

土木研究所資料

土木構造物のためのモニタリング システム活用ガイドライン（案）

令和 2 年 12 月

国立研究開発法人土木研究所
モニタリングシステム技術研究組合

Copyright © (2020) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）

国立研究開発法人土木研究所
モニタリングシステム技術研究組合

要 旨

近年、インフラ構造物の維持管理業務の重要性が高まる一方で、ICT 技術の発達に伴って、モニタリング技術の活用が注目されている。本ガイドライン（案）は、平成 26 年 10 月に道路・高速道路の管理者、ゼネコン、建設コンサルタント、電気・通信メーカー、センサ・設備メーカーと各分野の専門家を結集し、最先端のモニタリングシステムの早期実用化を目的として設立したモニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）の研究において、構造物の維持管理業務における点検、診断、さらには補修・補強などの様々な場面で有効と思われるモニタリング技術を、構造物とその変状に応じて活用方法をまとめたものである。

なお、本ガイドライン（案）は、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業研究の成果を含むものである。

キーワード：道路構造物、モニタリング

関係者名簿

(理事長)

早稲田大学		
名誉教授	依田 照彦	2014.10～現在

(理事)

東京大学大学院		
特任教授	石川 雄章	2014.10～現在

(組合員)

国立研究開発法人 土木研究所		
理事長	魚本 健人	2014.10～2017.3
〃	西川 和廣	2017.4～現在
企画部長	大塚 俊介	2014.10～2015.7
橋梁構造研究グループ長	松浦 弘	2014.10～2015.6
〃	中谷 昌一	2015.7～2016.3
〃	金澤 文彦	2016.4～現在
上席研究員	石田 雅博	2014.10～現在
〃	上仙 靖	2018.7～2019.3
主任研究員	宇佐美 惣	2014.10～2016.7
〃	大島 義信	2015.4～2020.3
〃	山本 将	2018.8～現在
〃	藤木 裕二	2020.4～現在
研究員	吉田 英二	2016.7～2017.3
〃	山口 岳思	2016.8～2018.7
〃	廣江 亜紀子	2017.4～2020.3
交流研究員	松林 卓	2014.10～2016.6
〃	大山 容一	2016.4～2017.3
〃	松尾 健二	2016.7～2018.6

沖電気工業株式会社		
理事 技術責任者	横田 潔	2015.5～2016.7
取締役専務執行役員	坪井 正志	2016.7～2019.5
上席執行役員	片桐 勇一郎	2019.5～現在
ネットワークシステム事業部 事業部長	井上 肇	2015.6～2019.9
ネットワークシステム事業部 事業部長	大塚 竜治	2019.10～現在
社会インフラソリューション事業部 部長	筒井 英夫	2019.10～現在
社会インフラソリューション事業部 チームマネージャ	山本 剛司	2019.10～現在
社会インフラソリューション事業部 スペシャリスト	山道 昇	2019.10～現在
社会インフラソリューション事業部	菊池 励	2019.10～現在
〃	寺山 知幸	2015.4～現在
イノベーション推進センター 部長	野崎 正典	2014.10～現在
イノベーション推進センター チームマネージャ	福井 潔	2014.10～現在
イノベーション推進センター	柳原 健太郎	2014.10～現在
IoTプラットフォーム事業部 スペシャリスト	山口 徳郎	2018.4～現在
IoTプラットフォーム事業部	橋爪 洋	2014.10～現在
〃	原田 崇	2014.10～現在
法務・知的財産部 スペシャリスト	村谷 正之	2016.4～現在
沖コンサルティングソリューションズ シニアマネージングコンサルタント	川西 素春	2014.10～現在

オムロンソーシアルソリューションズ株式会社 (2019.4～現在)		
モニタリング事業統括部長	佐野 司	2019.4～現在
モニタリング事業統括部 公共グループ リーダー	内田 薫	2020.4～現在
モニタリング事業統括部 公共グループ	黒田 卓也	2019.4～現在

鹿島建設株式会社		
専務執行役員	高田 悦久	2014.10～現在
技術管理部長	大野 俊夫	2014.10～2016.6
技師長	古市 耕輔	2014.10～現在
リニューアルグループ長	新井 崇裕	2014.10～現在
担当部長	岩井 稔	2014.10～現在
上席研究員	今井 道男	2014.10～現在
次長	池田 真理子	2014.10～現在

株式会社共和電業		
エンジニアリング本部 部長	竹内 秀也	2018.4～現在
エンジニアリング本部 主査	蓮池 康志	2016.10～現在
エンジニアリング本部 副主査	竹内 勝美	2016.10～2019.3
エンジニアリング本部	津田 仁	2016.10～2019.3
〃	立野 恵一	2014.10～現在

株式会社高速道路総合技術研究所（2019.4～現在）		
研究企画部長	八木 恵治	2019.4～2020.6
〃	京極 靖司	2020.6～現在
基盤整備推進担当部長	源谷 秋義	2016.8～2018.6
〃	中野 季哉	2018.7～現在
施設研究担当部長	東 晋一郎	2016.8～2019.6
橋梁研究担当部長	緒方 辰男	2016.8～2019.6
〃	岩立 次郎	2019.7～現在
斜面防災研究担当部長	横田 聖哉	2017.12～2019.6
〃	竹本 将	2018.7～現在
橋梁研究室長	広瀬 剛	2016.8～2018.6
〃	長谷 俊彦	2018.7～現在
土工研究室長	藤岡 一頼	2017.12～2018.6
管理基盤推進室 主任研究員	宮嶋 英次	2016.8～2018.3
〃	長濱 清孝	2018.4～2018.7
〃	鈴木 慎一	2018.8～現在

橋梁研究室 主任研究員	萩原 直樹	2016.8～2017.6
〃	原田 拓也	2017.7～2017.10
〃	村西 信哉	2017.11～2019.6
土工研究室 主任研究員	藤原 優	2018.7～2019.6
橋梁研究室 研究員	豊田 雄介	2016.8～2019.2
〃	長尾 千瑛	2016.8～2018.4
土工研究室 研究員	和地 敬	2017.12～2018.6
〃	中澤 正典	2018.7～現在
経営企画課長代理	小野 太士	2019.4～現在

長野計器株式会社 (2019.4～現在)		
開発センター 次長	土屋 宗典	2019.4～現在
開発センター FBG 開発課 係長	生井 貴宏	2019.4～現在
エンジニアリング本部 副主査	名取 努	2019.4～現在

日本工営株式会社		
相談役	山川 朝生	2014.10～2020.3
営業本部副本部長 執行役員	田村 秀夫	2020.4～現在
交通インフラマネジメント部 副技師長	松山 公年	2014.10～現在
中央研究所事業創生センター 専門部長	中津井 邦喜	2014.10～2015.3 2017.4～現在
鉄道事業部事業 部長代理	藤原 鉄朗	2014.10～現在
中央研究所先端研究センター センター長	中野 雅章	2014.10～現在
中央研究所技術開発センター 技師	高地 透	2014.10～現在
知財マネジメント室 課長	今野 正雄	2014.10～現在
大阪支店交通都市部 課長	下薊 晋一郎	2014.10～2017.3
福岡支店交通都市部 技師	末崎 将司	2014.10～2017.3
地質部 専門部長	小原 大輔	2014.10～2017.3
札幌支店 副支店長	西原 史和	2014.10～2020.3
札幌支店技術第一部 参事	近藤 悦郎	2016.4～2020.3
交通インフラマネジメント部 技師	園田 崇博	2016.4～現在
仙台支店流域水管理部 技師	佐々木 優輔	2017.4～2020.3

交通インフラマネジメント部 技師	新聞 友祐	2019.4～現在
中央研究所技術開発センター 技師	岡本 萌	2019.4～現在
中央研究所先端研究センター 技師	辻井 純平	2020.4～現在

日本電気株式会社		
第二都市インフラソリューション事業部長	児島 真吾	2020.4～現在
第二都市インフラソリューション事業部 部長	菊池 智郎	2014.10～現在
〃	植田 竜介	2014.10～現在
知的財産本部 エキスパート	吉田 英広	2015.3～現在
第二都市インフラソリューション事業部 エキスパート	村田 一仁	2015.1～現在
〃	葛西 茂	2015.1～現在
〃	三上 伸弘	2020.4～現在
〃	眞杉 隆宏	2018.5～現在
第二都市インフラソリューション事業部 主任	太田 雅彦	2018.4～現在
〃	木下 翔平	2015.6～現在
官公営業本部 マネージャー	伊藤 哲平	2020.4～現在

能美防災株式会社		
代表取締役会長	橋爪 毅	2014.10～現在
第1技術部 部長	志野 敏彦	2014.10～2018.3
エンジニアリング本部エンジニアリング部 部長	中元 政人	2018.4～2020.3
研究開発センター先進技術研究室 室長	山岸 貴俊	2014.10～現在
研究開発センター先進技術研究室	中野 主久	2014.10～現在
〃	遠藤 義英	2014.10～現在
〃	井関 晃広	2019.4～現在
〃	皆川 翔輝	2015.4～2018.3
第1技術部第1応用技術課	長澤 正浩	2014.10～現在
〃	中山 学	2018.4～現在

エンジニアリング本部品質安全管理部	山本 康弘	2014.10～現在
-------------------	-------	------------

株式会社日立製作所		
主任技師	古山 昇児	2014.10～現在
〃	田中 俊和	2017.4～現在
〃	上松 正史	2014.10～現在
技師	宮崎 剛	2014.10～現在

株式会社福山コンサルタント (2019.4～現在)		
上席理事	中野 聡	2019.4～現在
インフラマネジメント事業部 次長	宮村 正樹	2019.4～現在
インフラマネジメント事業部 課長補佐	徳永 皓平	2019.4～現在
インフラマネジメント事業部 係長	土田 智	2019.4～現在

富士通株式会社		
プリンシパルエキスパート	佐藤 均	2014.10～現在
シニアエキスパート	菊地 英幸	2014.10～現在
エキスパート	金児 純司	2015.6～2020.3
シニアマネージャー	松井 悦子	2014.10～現在
〃	深澤 健二郎	2014.10～2016.3
〃	春山 浩	2015.9～現在
マネージャー	田嶋 聡司	2015.4～現在
〃	中西 祐輔	2017.4～2019.3
	根岸 仁	2018.4～2019.3
	早川 誠	2020.4～現在
	山上 博	2015.6～2017.5

前田建設工業株式会社		
ICI 総合センター執行役員総合センター長	三島 徹也	2014.10～現在
ICI 総合センターイノベーションセンター長	小原 孝之	2014.10～現在
ICI 総合センター 社会インフラ研究センター長	中島 良光	2014.10～現在 (途中中断期間有り)

ICI 総合センター	石黒 健	2014.10～現在
経営改革本部 DX 推進室グループ長	松林 卓	2016.7～現在
経営改革本部 DX 推進室グループ	松尾 健二	2014.10～2016.6 2018.7～現在
土木事業本部インフラ再生推進部 グループ長	福井 康仁	2020.4～現在

三井住友建設株式会社 (2019.4～現在)		
主席研究員	玉置一清	2019.4～現在
主任研究員	湯浅香織	2019.4～現在

国際航業株式会社 (2014.10～2019.3)		
上級顧問	吉川 正嗣	2014.10～2019.3
顧問	池 盛孝	2014.10～2017.3
技術顧問	加藤 哲	2014.10～2017.3
東日本支社担当部長	田中 康裕	2014.10～2019.3
調査研究開発部長	赤松 幸生	2016.04～2018.3
センシング事業開発部長代行	中村 和弘	2014.10～2019.3
地理空間基盤技術部副部長	小田 三千夫	2014.10～2019.3
橋梁マネジメントグループチーム長	倉田 直樹	2014.10～2019.3
橋梁マネジメントグループ	伊礼 貴幸	2014.10～2019.3

中日本高速道路株式会社 (2014.10～2019.3)		
環境・技術企画部長	日比野 進弘	2014.10～2015.2
〃	八木 恵治	2015.3～2018.6
〃	吉村 義朗	2018.7～2019.3
技術開発チームリーダー	東 晋一郎	2014.10～2016.4
構造技術チームリーダー	長田 光司	2016.4～2018.3
技術企画・開発課長	松本 豊和	2018.4～2019.3
技術開発チームサブリーダー	大橋 岳	2014.10～2016.6
構造技術チームサブリーダー	若林 大	2016.4～2017.3
技術企画・開発課長代理	藤野 友裕	2016.7～2019.3

技術企画・開発課	北川 寛和	2016. 8～2019. 3
八王子支社 保全・サービス事業部 構造技術チームリーダー	長谷 俊彦	2015. 4～2018. 6

西日本高速道路株式会社 (2014. 10～2019. 3)		
技術環境部長	竹國 一也	2014. 10～2017. 6
〃	福永 靖雄	2018. 7～2019. 3
技術環境部次長		2014. 10～2015. 6
技術環境部 技術開発担当部長	兼澤 秀和	2014. 10～2019. 3
構造技術課長	緒方 辰男	2014. 10～2016. 6
〃	芦塚 憲一郎	2016. 7～2018. 8
〃	横山 和昭	2018. 11～2019. 3
構造技術課 課長代理	大城 壮司	2014. 10～2016. 6
〃	安里 俊則	2016. 7～2019. 3
構造技術課	松井 隆行	2014. 10～2015. 6
〃	宮田 弘和	2014. 10～2016. 7
〃	栢木 正喜	2014. 10～2017. 10
〃	福田 雅人	2015. 7～2019. 3
〃	藤井 雄介	2017. 11～2019. 3

東日本高速道路株式会社 (2014. 10～2019. 3)		
技術・環境部長	中西 勉	2014. 10～2015. 10
〃	水口 和之	2015. 10～2019. 3
構造物専門役	本間 淳史	2014. 10～現在
構造技術課長	安川 義行	2018. 07～2019. 3
技術企画課長代理	広瀬 剛	2014. 10～2015. 6
構造技術課長代理	藤野 和雄	2014. 10～2018. 7
〃	塩畑 英俊	2018. 7～2019. 3
構造技術課 係長	高久 英彰	2014. 10～2016. 10
〃	平野 勝彦	2016. 11～2019. 3
SMH 推進チームサブリーダー	板倉 義尚	2017. 4～2019. 3
福島管理事務所 改良担当課長	上平 研司	2015. 4～2018. 3

(モニタリングシステム技術研究組合 事務局)

事務局長	越川 博通	2014.11～2017.9
〃	丸山 公彦	2017.10～現在
研究コーディネータ	寺田 晃	2015.4～2017.3
〃	中津井 邦喜	2015.4～2017.3
〃	廣江 亜紀子	2015.4～2017.3
〃	吉川 賢史	2017.5～2018.4
〃	眞杉 隆宏	2017.5～2018.4
〃	佐藤 一郎	2018.4～2019.4
〃	山本 成美	2018.4～2019.5
〃	和田 龍児	2019.4～2020.4

目 次

第1部 モニタリングシステム技術研究組合 (RAIMS)

第2部 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン (案)

参考 問い合わせ一覧

第1部

モニタリングシステム技術研究組合
(RAIMS)

目次

1章	RAIMS の設立目的	1
2章	技術研究組合とは	1
3章	組織概要	1
4章	RAIMS の設立の流れ	2
5章	RAIMS の主な活動内容	3
5.1	土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）の作成	3
5.2	国土交通省道路局 公表資料への掲載	6
5.3	第三者機関としての技術評価業務の受託	7
5.4	富山市のモニタリングシステム導入に関する研究業務の受託	8
5.5	高速道路会社との共同研究	9
5.6	土木学会によるガイドラインのレビュー	9
6章	モニタリング技術普及のための広報活動	10
6.1	RAIMS 活動報告会の開催	10
6.2	モニタリング技術普及のためのパンフレットの作成	19
7章	おわりに	29

1章 RAIMSの設立目的

高度成長期以降に整備されたわが国の社会インフラは、今後10年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速的に高くなる見込みであり、適切な維持管理手法の導入により長寿命化、維持管理・更新のトータルコストの縮減・平準化を図ることが喫緊の課題である。例えば、道路分野においては、今後10年間で全国の道路橋約70万橋の50%以上が建設後50年を超えると見込まれ、統一的な基準による確実な点検の実施やメンテナンスサイクルの確立を進める必要がある。

一方で、構造物の損傷・劣化の状態監視を維持管理業務に活用するため、モニタリングシステムを構成するセンサによる計測技術や、計測データを収集・伝送する通信技術、データを分析評価する技術等には多種多様なものが存在する。しかし、これらを現場に活用するための指針となる具体的な方法や考え方などは示されていなかった。そのため災害などの異常時における損傷状況の把握、落橋などの重大事故に至る現象の早期発見、構造物の劣化進行を予測するための情報取得などのニーズに対して、適切なモニタリング機器の設置方法や項目、管理レベルなどをインフラ管理者が判断できない状況であった。

このような状況を鑑み、損傷・劣化の状態監視を社会インフラの維持管理業務へ活用するため、センサや通信・データ解析技術等を活用したモニタリングシステムの社会インフラ分野への実用化導入を図ることを目的として、モニタリングシステム技術研究組合を設立した¹⁾。

2章 技術研究組合とは

技術研究組合とは、産業活動において利用される技術に関して、組合員が自らのために共同研究を行う相互扶助組織（非営利公益法人）であり、「技術研究組合法」に基づいて設立される。各組合員は、研究者、研究費、設備等を出しあって共同研究を行い、その成果を共同で管理し、組合員相互で活用するものである²⁾。

3章 組織概要

モニタリングシステム技術研究組合（略称 RAIMS（ライムス）：Research Association for Infrastructure Monitoring System）は、2014年10月22日に依田照彦早稲田大学教授（当時）を理事長として設立し、以下の14者の組合員で2014年度～2018年度まで活動を行った。

沖電気工業株式会社、鹿島建設株式会社、株式会社共和電業、国際航業株式会社、独立行政法人土木研究所（当時）、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社、日本工営株式会社、日本電気株式会社、能美防災株式会社、東日本高速道路株式会社、株式会社日立製作所、富士通株式会社、前田建設工業株式会社（50音順）（2014年度～2018年度）

また、2019年度からの2年間は組合員の構成が一部変更となり、以下の15者が組合員として、これまでの成果のレベルアップ（モニタリングシステムの実装）のための更なる研究と導入促進を中心とする活動を行った。

沖電気工業株式会社，オムロンソーシアルソリューションズ株式会社，鹿島建設株式会社，株式会社共和電業，株式会社高速道路総合技術研究所，国立研究開発法人土木研究所，長野計器株式会社，日本工営株式会社，日本電気株式会社，能美防災株式会社，株式会社日立製作所，株式会社福山コンサルタント，富士通株式会社，前田建設工業株式会社，三井住友建設株式会社（50音順）（2019年度～2020年度）

4章 RAIMS の設立の流れ

RAIMS を設立する前に，モニタリングシステムを本格的に現場導入するにあたり，インフラを管理している側の立場で要求性能を整理し、標準化を目指す必要があることから，インフラの老朽化に知見のある独立行政法人土木研究所（当時）とインフラ管理者としての立場から東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社が参画し，共同で発起人会を設立した。

発起人会により，RAIMS の目的，活動内容，参加条件などに賛同する者を公募した上で，公平な審査を経て選ばれた前述の組合員でRAIMS を2014年10月に設立した。（図4.1.1）



図4.1.1 RAIMS 設立総会（2014年12月2日）

5章 RAIMS の主な活動内容

2014年度から2020年度の約7年間のRAIMSの主な活動内容を以下の通りである。

5.1 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）の作成

センサ、IT等を活用した社会インフラの状態の効率的な把握を可能とする新技術の開発・導入を進めることを目的として、モニタリング技術に関し、産学官が連携しながら、現場実証を通じてその有用性を評価・分析すること等により技術開発等を推進するにあたって、学識経験者等のご意見を頂くために、2013年に国土交通省が設置した「社会インフラのモニタリング技術活動推進検討委員会（庶務：大臣官房技術調査課，公共事業調査室及び総合政策局技術政策課）」において、社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発が公募された³⁾。

RAIMSは、公募テーマの1つである「モニタリング技術を社会インフラの維持管理業務へ適用するための技術的検証」に応募し、RAIMSが提案した「モニタリング技術の活用による維持管理業務の高度化・効率化」という研究開発課題が採択された。

そして、内閣府のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（図5.1.1）を活用して、国土交通省所管の検討委員会の評価（図5.1.2）を受けながら、2014年度～2018年度までの間、モニタリング技術の活用に関する技術研究開発に取り組んだ。

その技術研究開発の成果をもとに、「土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）」を作成した。まず、2019年4月に「総則」、「RC床版のモニタリング」、「モニタリングデータの転送」、「データの保存・活用」で構成された「土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）【床版モニタリング編】」をRAIMSホームページで公表した。

その後、2019年12月には、RC床版以外の部材を対象にしたモニタリング技術に関する内容について大幅に追加した形で「土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）β版」をRAIMSホームページで公表した（図5.1.3）。このβ版には、RAIMSとは別にSIPで技術研究開発に取り組んでいた企業の成果が含まれている。特に、橋脚・基礎の洗堀に関するモニタリング技術や、のり面・斜面の安定性評価に関するモニタリング技術はRAIMSとしては取り組んでいなかったこともあり、RAIMS以外の企業がガイドラインに参加してもらうことで、ガイドラインの内容を一層充実させたものとなっている。なお、RAIMS以外の参加企業の選定に際しては、各企業への事前説明会及び面接を実施した上で、参加に同意する企業に参加して頂いた。

本ガイドラインは、2019年12月公表のβ版に2019年から2020年の2年間の研究成果を反映して、更なる内容の充実を図ったものとなっている。

【参考】SIP 戦略的イノベーション創造プログラム

5

インフラ維持管理・更新マネジメント技術

(2014年5月現在)

目的 インフラ高齢化による重大事故リスクの顕在化・維持費用の不足が懸念される中、予防保全による維持管理水準の向上を低コストで実現。併せて、継続的な維持管理市場を創造するとともに、海外展開を推進。
対象機関 大学・企業・公的研究機関等 管理法人：JST・NEDO
実施期間 5年間(予定)。
予算規模 初年度は34.5億円。
 (総合科学技術・イノベーション会議が研究開発の進捗や有効性等について毎年度評価を行い、配分額を決定する。)

目標
 2020年度を目処に、国内において重要インフラ・老朽化インフラの20%をモデルケースとして、ICRT技術(ICT+Robot)をベースとしたインフラマネジメントによる予防保全を実現。

- 主な研究内容**
- ①点検・モニタリング・診断技術
 - ②構造材料・劣化機構・補修・補強技術
 - ③情報・通信技術
 - ④ロボット技術(点検と災害対応用の双方を扱う)
 - ⑤アセットマネジメント技術

出口戦略
 国が新技術を積極的に活用・評価し、その成果をインフラ事業主体に広く周知することで全国的に新技術を展開し、インフラ維持管理に関わる新規ビジネス市場を創出。有用な新技術を海外展開していくため、国内での活用と評価から国際標準化までを一貫して行う体制を整備。

仕組み改革・意識改革への寄与
 関係省庁、公的機関の予算・制度と連携し、革新的基礎研究から応用研究、基準作成・標準化、実導入までを迅速に実現。

プログラムディレクター
 藤野陽三 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 特任教授

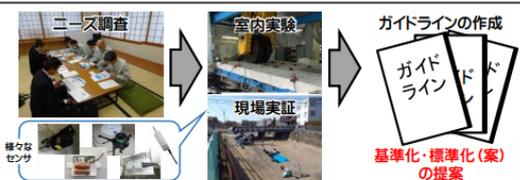


図 5.1.1 内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」

橋梁WG

実施期間：H26～30

モニタリング技術の活用による維持管理業務の高度化・効率化
 モニタリングシステム技術研究組合



・管理者ニーズ、現場実証を踏まえ、モニタリングシステムの現場導入ガイドラインを作成し、基準化・標準化(案)を示すものである。
 ・RC床版やPC桁における、たわみ・振動・ひび割れ・塩害等を計測するセンサを実証中。

国交省における実装の見込み

・モニタリング技術の導入により点検等の信頼性向上及び負担・コスト軽減を図れることが、ガイドライン(案)や基準化・標準化(案)で示されれば、今後現場への導入の可能性ある。

WG委員による主な意見

- ・機器の検証だけでなく、構造物の劣化など現象自体もあわせて明らかにした方が良い。
- ・設置位置や耐久性など、運用面での留意点も、整理するようにしてほしい。
- ・技術開発ではなく、既存機器の活用方法に重点を置いて整理すべきだが、単なるカタログ集になってはいけない。
- ・センサの技術開発は日進月歩なので、更新可能で継続的に使用できるものとすべき。
- ・ニーズを反映させる道筋を明確化すべき。

審査結果

＜ 継続 ＞

・ニーズ調査を十分に実施した上でガイドラインの整理を進めているが、引き続き、ユーザー目線の内容となるよう整理してほしい。

図 5.1.2 モニタリングシステム技術研究組合の取組に関する評価

(出典：国土交通省 HP 第6回社会インフラのモニタリング技術活動推進検討委員会)

理事長ご挨拶

RAIMS概要・組織

事業概要

リリース

リンク集



NEWS お知らせ

- NEW** 2019.12.27 [土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（全編版）を公開しました。](#)
- 2019.11.22 [北陸地方の地方自治体に向けた技術展示会（令和元年11月25日～26日）に出展します。](#)
- 2019.11.22 [社会インフラテック2019（令和元年12月4日～6日）に出展します。](#)
- 2019.09.09 [「道路橋の振害モニタリング技術」の技術選定結果について](#)

RAIMS活動報告会資料の閲覧はこちら

ガイドラインのダウンロードはこちら

インフラ管理者の方へ本組合への期待やニーズなどご意見をお寄せください

ここからダウンロード

図 5. 1. 3 RAIMS ホームページ

5.2 国土交通省道路局 公表資料への掲載

国土交通省道路局が、2020年6月に公表した定期点検の参考資料である「モニタリング技術も含めた定期点検の支援技術の使用について」の中で、本ガイドラインがモニタリング技術に関する参考図書の一つとして例示されることで、本ガイドラインの今後の更なる普及が期待されている。

また、「点検支援技術 性能カタログ（案）」には、図5.2.1に示す通りRAIMS関係の技術が掲載された。このことにより、モニタリング技術を今後の更なる普及が期待されている。

「点検支援技術性能カタログ（案）」掲載技術一覧					
2020年6月時点					
分類	検出項目		技術名	開発者	技術番号
計測・モニタリング技術	変位	支承部の機能障害	サンプリングモアレカメラ	(株) 共和電業	BR030002-V0020
		活荷重たわみ	光学振動解析技術【動画像による橋梁の活荷重たわみ・横揺れ・ひびわれ閉閉量の計測技術】	日本電気(株)	BR030009-V0020
		遊間の異常	桁端部異常検知モニタリングシステム	日本工営(株)	BR030010-V0020
	張力	PCケーブル・吊材	FBG 光ファイバひずみセンサを用いた橋梁モニタリングシステム(プレストレス喪失の可能性検知)	三井住友建設(株)	BR030011-V0020
	振動特性	洗堀	下部工基礎の洗堀モニタリングシステム	(株) 福山コンサルタント	BR030016-V0020
			加速度センサを用いた洗堀量および傾斜角のモニタリング	長野計器(株)	BR030017-V0020
		剛性評価	低周波3軸加速度センサによる主構造物の振動解析技術	能美防災(株)	BR030019-V0020
			橋梁の性能モニタリング技術(省電力無線センサによる遠隔モニタリングシステム)	オムロンソーシアルソリューションズ(株)	BR030021-V0020
	電位	鉄筋腐食	塩害補修効果モニタリングシステム	日本工営(株)	BR030022-V0020

図 5.2.1 「点検支援技術性能カタログ（案）」掲載技術一覧

5.3 第三者機関としての技術評価業務の受託

2019年2月から2021年3月の約2年間で東北地方整備局東北技術事務所よりNETISテーマ設定型の業務を受託した。

NETISとは、新技術の活用のため、新技術に関わる情報の共有及び提供を目的として、国土交通省が整備した新技術情報提供システム（NETIS: New Technology Information System）のことである⁴⁾。本業務は、ある技術テーマについて、技術の評価指標、要求水準、試験方法等を検討の上、民間企業等で開発されている技術を公募し、性能確認結果をとりまとめるものである（図5.3.1）。

RAIMSは本業務の中で、「塩害モニタリング技術」を公募し、応募企業のセンサ及びモニタリングシステムを供試体に設置し、結果を比較表にとりまとめた。

東北地方整備局の新技術活用評価会議を支援する第三者機関として選定され、技術評価を支援する実績を得た。

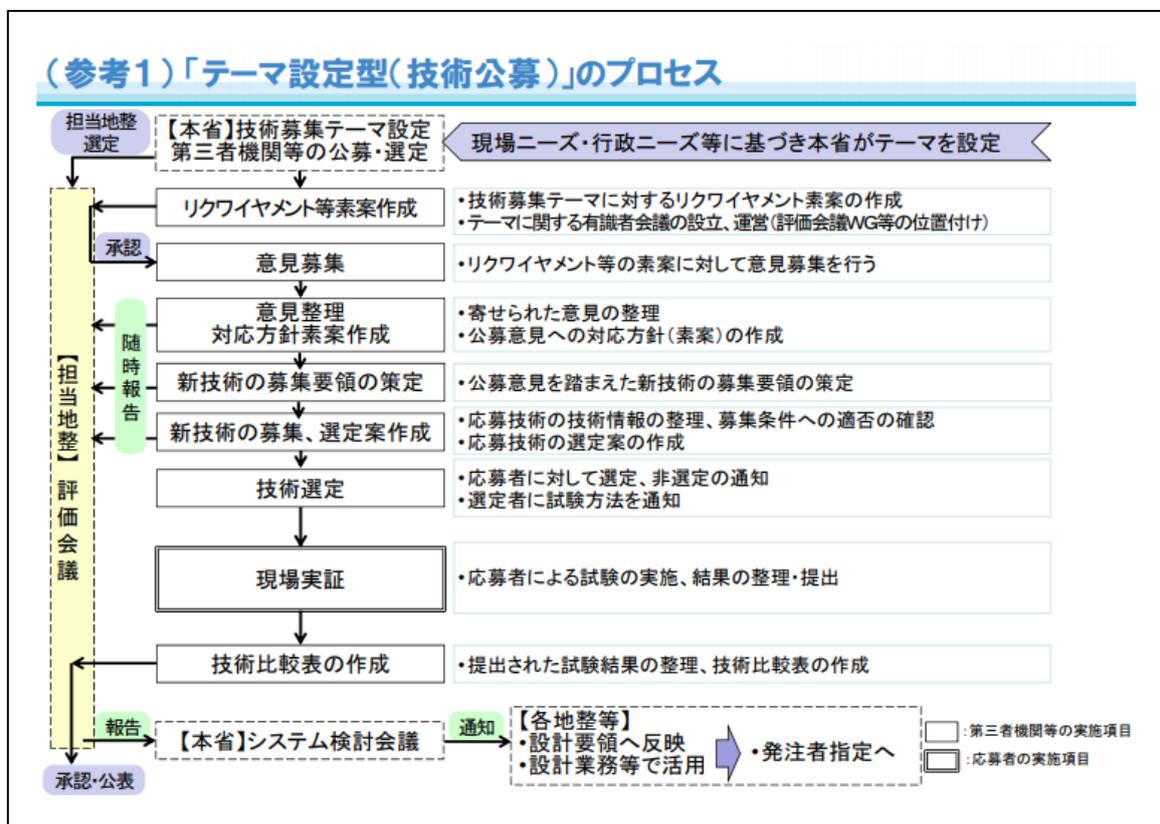


図 5.3.1 NETIS テーマ設定型の業務（出典：国土交通省 HP）

5.4 富山市のモニタリングシステム導入に関する研究業務の受託

2019年度から2020年度の2年間で、富山市へのモニタリングシステムの導入計画策定を目的として、地方公共団体における橋梁の維持管理の課題を整理し、地方公共団体におけるモニタリングシステムのニーズを把握した上で、ニーズに合致したモニタリングシステムを選定し導入に向けたロードマップを策定するなど、モニタリングシステムの導入方針を検討した(図5.4.1)。

容易に遠方の現場へ行くことができない橋梁に対して車両の通行安全性などを監視するため、桁端部異常検知モニタリングを設置した。道路管理者へのモニタリング技術の実装に関する知見を得ることができた。

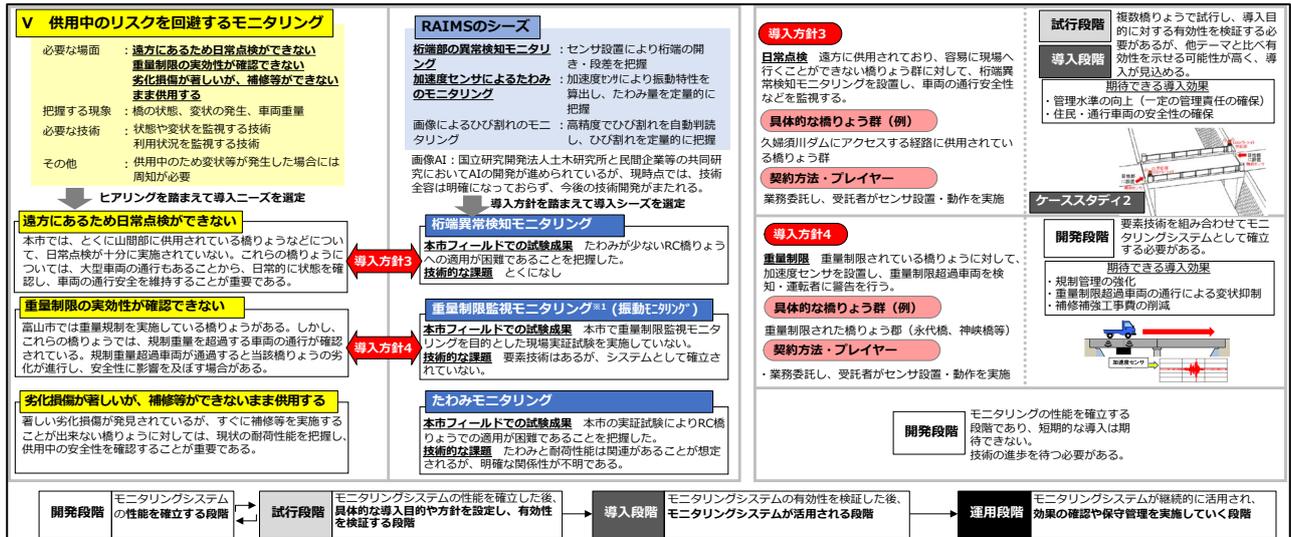


図 5.4.1 富山市へのモニタリングシステム導入計画策定

5.5 高速道路会社との共同研究

2019年度から2020年度の2年間で、NEXCO 東日本、NEXCO 中日本、NEXCO 西日本の3社とRAIMSの9社で共同研究を実施した。表 5.5.1 に示す研究テーマについて、8グループを構成し研究を進めた。

本ガイドラインには、2019年12月に公表したβ版に、この共同研究での成果の一部も反映している。

表 5.5.1 NEXCO 東日本、中日本、西日本との共同研究一覧

研究テーマ	参加組合員
<ul style="list-style-type: none">・塩害補修を行った橋梁の塩害モニタリング・鋼橋 RC 床版の疲労等の劣化に対するモニタリング・鋼橋 PC 床版の健全性モニタリング・鋼製フィンガージョイントの健全性モニタリング・PC 箱桁橋の健全性確認のモニタリング・斜張橋の斜材の張力確認モニタリング・複数の連続する構造物のモニタリング手法の計画	沖電気工業株式会社，オムロンソーシアルソリューションズ株式会社，鹿島建設株式会社，株式会社共和電業，日本工営株式会社，日本電気株式会社，能美防災株式会社，富士通株式会社，三井住友建設株式会社

5.6 土木学会によるガイドラインのレビュー

モニタリング技術の社会実装を促進するため、ガイドラインを土木学会の専門家による精査を受けた資料として公表することを目的に、土木学会にガイドラインのレビューを委託した。①理解しやすさ、②実用性、③公平性・公正性の3つのレビューの視点から、国のインフラメンテナンスに関する施策の推進、モニタリングの現場での適用にあたって、受発注者が抱える課題の解決・支援する資料として、本ガイドラインを編集し直す作業を実施する。具体的な作業は、土木学会の「インフラマネジメント新技術適用推進委員会」の下部組織として設立した「モニタリング技術活用のためのガイドライン策定小委員会」にて行っている。2021年3月の完成に向けて作業中である。

6章 モニタリング技術普及のための広報活動

6.1 RAIMS 活動報告会の開催

各種検討や室内実験を通して得られた知見や現場での実証試験の概要を公表することにより、道路管理者に橋梁のモニタリングに対する理解を深めていただき、将来の維持管理の現場で活用できるモニタリング技術を採用するための助けとなること目的に 2016 年度から年 1 回 RAIMS 活動報告会を開催した（図 6.1.1）。

RAIMS が主催するイベントだけではなく、ハイウェイテクノフェア、SIP インフラ維持管理及び SIP レジリエントな防災に関する国際セミナー、社会インフラテック、各地方の建設技術展示会などに参加することで、RAIMS の活動成果を広く周知、モニタリング技術の普及に努めた（表 6.1.1）。

他にも、土木学会への論文の投稿や各種専門誌への RAIMS の活動成果に関する投稿など積極的にモニタリング技術の普及に努めた（表 6.1.2, 表 6.1.3, 表 6.1.4）。

モニタリングシステム技術研究組合

Research Association for Infrastructure Monitoring System <http://www.raims.or.jp> RAIMS 検索

2019年度RAIMS活動報告会

-土木構造物のためのモニタリングシステム活用に向けたガイドラインの提案-

日時 2019年5月22日(水)

13:00~17:00(開場12:30)

場所 東京証券会館 8階ホール

東京都中央区日本橋茅場町1-5-8

★参加費：無料

※事前申込みが必要です

CPD認定プログラム
(認定団体は裏面掲載)

主催：モニタリングシステム技術研究組合
 後援：インフラメンテナンス国民会議
 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社



時間	題目	講演者
13:00	開演 (12:30開場)	
13:05~13:15	開会挨拶	モニタリングシステム技術研究組合 理事長 依田 照彦 (早稲田大学 名誉教授)
13:15~14:00	基調講演 インフラマネジメントにおける データ活用 (仮)	モニタリングシステム技術研究組合 理事 石川 雄章 (東京大学 大学院 情報学環 特任教授)
14:00~14:45	特別講演 新しい技術や取組みの実装を促す工夫 —SIP地域実装活動より— (仮)	岐阜大学 名誉教授 六郷 恵哲
14:45~15:00	RAIMSの活動報告	国立研究開発法人土木研究所 石田 雅博
15:00~15:15	(休 憩)	
15:15~15:35	定期点検要領の改定について	国土交通省 道路局 国道・技術課 道路技術分析官 牧野 浩志
15:35~16:35	「土木構造物のためのモニタリングシステム 活用ガイドライン」の要点解説	東日本高速道路株式会社 本間 淳史
16:35~16:55	今後の研究計画—直轄・自治体モニタリング 実装WGについて—	日本工営株式会社 中津井 邦喜
16:55~17:00	閉会挨拶	株式会社高速道路総合技術研究所 八木 恵治

※プログラムの内容は変更になる場合があります。

図 6.1.1 RAIMS 活動報告会

表 6.1.1 参加イベント一覧

No.	名称	主催	開催日
1	令和3年 RAIMS 活動報告会	モニタリングシステム 技術研究組合	2021年4月20日
2	北陸地方の地方自治体に向けた技術展示 会	北陸 SIP	2020年10月中旬～11 月末日（オンライン開 催）
3	社会インフラテック 2019	インフラメンテナンス 国民会議，日本経済新 聞社	2019年12月4日～6 日
4	北陸地方の地方自治体に向けた技術展示 会	北陸 SIP	2019年11月25日（富 山会場） 2019年11月26日（金 沢会場） 2019年11月26日（福 井会場）
5	2019年度 RAIMS 活動報告会 ー土木構造物のためのモニタリングシス テム活用に向けたガイドラインの提案ー	モニタリングシステム 技術研究組合	2019年5月22日
6	「SIP インフラ維持管理及び SIP レジリ エントな防災」に関する国際セミナー	SIP インフラ維持管 理・更新・マネジメン ト技術 / SIP レジリエ ントな防災・減災機能 の強化	2018年12月6日
7	社会インフラテック 2018	インフラメンテナンス 国民会議，日本経済新 聞社	2018年12月6日～8 日
8	ハイウェイテクノフェア 2018	公益財団法人高速道路 調査会	2018年11月28日～29 日
9	建設技術展 2018 近畿	日刊建設工業新聞社， 一般財団法人近畿建設 協会	2018年10月24日～25 日
10	SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメ ント技術」技術交流会	SIP インフラ維持管 理・更新・マネジメン ト技術 / 土木学会 SIP インフラ連携委員 会	2018年7月19日

11	平成 30 年度 RAIMS 活動報告会 ーモニタリングシステムの活用に向けた ガイドラインの提案ー	モニタリングシステム 技術研究組合	2018 年 7 月 20 日
12	建設技術展 2017 近畿	日刊建設工業新聞社, 一般財団法人近畿建設 協会	2017 年 10 月 25 日～26 日
13	SIP 北陸が主催する北陸地方の市町村に 向けた技術展示会	金沢大学 SIP 北陸	2017 年 11 月 6 日
14	国土技術研究会 (ポスターセッション)	国土交通省	2017 年 11 月 13 日～14 日
15	ハイウェイテクノフェア 2017	公益財団法人高速道路 調査会	2017 年 11 月 21 日～22 日
16	平成 29 年度 RAIMS 活動報告会 モニタリング技術の活用による維持管理 業務の高度化・効率化	モニタリングシステム 技術研究組合	2017 年 7 月 28 日
17	ハイウェイテクノフェア 2016	公益財団法人 高速道 路調査会	2016 年 11 月 1 日～2 日
18	平成 28 年度 RAIMS 活動報告会 インフラ維持管理へのモニタリングシス テム導入に向けた取り組み	モニタリングシステム 技術研究組合	2016 年 8 月 31 日

表 6.1.2 発表論文等一覧

No.	題名	著者	掲載
1	自治体へのモニタリングシステム導入に 関する検討	新聞 友祐, 中津井 邦 喜, 松山 公年, 植野 芳彦, 杉谷 真司, 宇津 徳浩	土木学会第 75 回年次学 術講演会 CS9-46, 2020 年 9 月, (公社) 土木学 会
2	自治体橋梁における桁端部異常検知モニ タリングシステムの実装	中津井 邦喜, 園田 崇 博, 松山 公年, 植野 芳彦, 杉谷 真司, 宇津 徳浩	土木学会第 75 回年次学 術講演会 CS9-47, 2020 年 9 月, (公社) 土木学 会
3	自治体橋梁における桁端部異常検知モニ タリングシステムの伝送に関する検討	園田 崇博, 松山 公 年, 中津井 邦喜, 植野 芳彦, 杉谷 真司, 宇津 徳浩	土木学会第 75 回年次学 術講演会 CS9-48, 2020 年 9 月, (公社) 土木学 会
4	塩害補修効果確認モニタリングの現場実 証	松山 公年, 園田 崇 博, 高地 透, 中津井 邦喜, 木村 紗他佳, 梶 山 俊一郎	土木学会第 74 回年次学 術講演会 CS9-01, 2019 年 9 月, (公社) 土木学 会

5	自治体橋梁における塩害モニタリングの現場実証	園田 崇博, 松山 公年, 高地 透, 中津井 邦喜, 北 篤志	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-02, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
6	RC 橋桁端部の塩害複合劣化モニタリング技術の検討	小原 孝之, 米田 大樹, 土屋 智史, 古市 耕輔	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-03, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
7	断面修復部に生じるマクロセル腐食に対するモニタリング手法の提案	高地 透, 中野 雅章, 松山 公年, 花岡 大伸	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-04, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
8	低周波加速度センサを用いた多点同期モニタリングによる橋梁の変位解析	遠藤 義英, 井関 晃広, 皆川 翔輝, 山岸 貴俊, 松尾 健二	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-44, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
9	低周波加速度センサを用いた 6 つの実橋梁における活荷重変位と振動の長期モニタリング	井関 晃広, 遠藤 義英, 皆川 翔輝, 山岸 貴俊	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-46, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
10	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その 7) AE センサデータを用いた加速度センサデータ分析結果の検証	金児 純司, 梅田 裕平, 菊地 英幸, 梅宮 茂良, 新井 崇裕, 古市 耕輔, 石田 雅博	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-47, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
11	動画像を用いた RC 桁橋の変位とひび割れ開閉挙動のモニタリング	太田 雅彦, 村田 一仁, 高田 巡	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-48, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
12	橋梁モニタリングのための低周波加速度センサを用いた試験車両走行時の変位解析	皆川 翔輝, 井関 晃広, 遠藤 義英, 山岸 貴俊, 松尾 健二	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-49, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会
13	周囲環境の影響を考慮した後施工型腐食環境検知センサの応答に関する検討	岡本 萌, 中野 雅章, 高地 透, 松山 公年, 米田 大樹, 土屋 智史	土木学会第 74 回年次学術講演会 CS9-50, 2019 年 9 月, (公社) 土木学会

14	トポロジカルデータ解析を用いた橋梁モニタリングデータの分析	金児 純司, 梅宮 茂良, 梅田 裕平, 菊地 英幸, 石黒 健, 松林 卓, 石田 雅博, 新井 崇裕, 古市 耕輔	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-011, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
15	地震で被災した橋梁に対する補修効果の確認へのモニタリングの活用	石田 雅博, 山口 岳思, 近藤 悦郎, 山岸 貴俊, 遠藤 義英, 皆川 翔輝	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-019, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
16	センサ設置方法の違いによる加速度センサ取得値の検証	廣江 亜紀子, 山口 岳思, 松尾 健二, 橋爪 洋, 立野 恵一, 山岸 貴俊	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-041, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
17	塩害補修における犠牲陽極材の防食効果に関するモニタリング技術検証	中野 雅章, 高地 透, 松山 公年	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-023, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
18	撤去桁の疲労載荷試験におけるモニタリング技術検証 (その 1) ～疲労載荷試験概要と試験結果～	山口 岳思, 松尾 健二, 廣江 亜紀子, 小原 孝之, 杉谷 真司	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-008, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
19	撤去桁の疲労載荷試験におけるモニタリング技術検証 (その 2) ～実験モード解析による疲労損傷評価～	木下 翔平, 葛西 茂, 清川 裕, 小原 孝之, 山口 岳思, 松尾 健二	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-009, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
20	撤去桁の疲労載荷試験におけるモニタリング技術検証 (その 3) ～低周波 3 軸加速度の多点同期計測による疲労損傷解析～	皆川 翔輝, 遠藤 義英, 山岸 貴俊, 小原 孝之, 廣江 亜紀子, 松尾 健二, 山口 岳思	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-010, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
21	実橋梁における高速光ファイバーセンサーを用いたモニタリング技術活用の検討	岩村 英志, 山口 徳郎, 浅林 一成, 村井 仁, 今井 道男	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-012, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
22	実橋の床版モニタリングにおける振動モードと損傷との対応解析	葛西 茂, 木下 翔平, 清川 裕, 本間 淳史, 藤野 和雄	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-026, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会

23	塩害橋梁における簡易モニタリングの適用性に関する研究	西原 史和, 松山 公年, 近藤 悦郎, 吉良 美咲, 石田 雅博, 山口 岳思	土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-020, 2018 年 8 月, (公社) 土木学会
24	振動可視化分析を用いた実橋梁床版のモード形状推定	木下翔平, 葛西茂、清川裕, 藤野和雄、本間淳史、寺田晃	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-017, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
25	実橋梁 RC 床版における光ファイバーセンサによるひび割れモニタリング技術の検討	古市 耕輔, 今井 道男、岩井 稔, 新井 崇裕、寺田 晃	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-018, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
26	実橋梁 RC 床版におけるアコースティックエミッション法による疲労損傷の評価	新井 崇裕, 岩井 稔, 古市 耕輔, 湯山 茂徳, 李 正旺, 寺田 晃	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-019, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
27	コンクリート桁橋におけるモニタリング技術活用の検討 (その 1) 技術活用の概要と現場実証実験の概要	中津井 邦喜, 小原 孝之, 石田 雅博, 杉谷 真司	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-020, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
28	コンクリート桁橋におけるモニタリング技術活用の検討 (その 2) 低周波加速度解析による力学的挙動の評価	皆川 翔輝, 遠藤 義英, 中野 主久, 長澤 正浩, 山岸 貴俊, 中津井 邦喜, 杉谷 真司	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-021, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
29	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その 6) 各種分析方法とモニタリングデータによる疲労劣化の評価	金児 純司, 梅宮 茂良, 梅田 裕平, 北島 弘伸, 菊地 英幸, 新井 崇裕, 古市 耕輔, 廣江 亜紀子	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-022, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
30	塩害モニタリングにおける対象位置決定方法に関する研究	松山 公年, 園田 崇博, 中野 雅章, 高地 透, 中津井 邦喜	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-031, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会
31	塩害モニタリングにおける実橋センサ設置方法に関する研究	松山 公年, 園田 崇博, 中野 雅章, 高地 透, 中津井 邦喜	土木学会第 72 回年次学術講演会 CS14-032, 2017 年 9 月, (公社) 土木学会

32	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その1) 試験の概要とリファレンス計測による損傷程度の評価	古市 耕輔, 新井 崇裕, 岩井 稔, 小原 孝之	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-036, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
33	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その2) 低周波 3 軸加速度センサによる RC 床版の疲労損傷解析	遠藤 義英, 皆川 翔輝, 山本 康弘, 山岸 貴俊	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-037, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
34	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その3) 実験モード解析法による疲労損傷評価	葛西 茂, 木下 翔平, 小原 孝之, 新井 崇裕	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-038, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
35	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その4) 光ファイバセンサによるひび割れ検知	今井 道男, 新井 崇裕, 岩井 稔, 古市 耕輔	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-039, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
36	輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術の検討 (その5) アコースティックエミッション法による疲労損傷の評価	新井 崇裕, 岩井 稔, 古市 耕輔, 湯山 茂徳, 李 正旺	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-040, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
37	コンクリートの塩害モニタリングに資する鉄筋腐食促進試験	高地 透, 中野 雅章, 米田 大樹, 小原 孝之	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-001, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
38	RC 梁供試体の鉄筋腐食促進試験における塩分浸透モニタリング	末崎 将司, 松山 公年, 米田 大樹, 小原 孝之	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-002, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会
39	RC 梁の耐荷力と振動特性との相関検証	葛西 茂, 木下 翔平, 中野 雅章	土木学会第 71 回年次学術講演会概要集 CS7-003, 2016 年 9 月, (公社) 土木学会

表 6.1.3 掲載雑誌一覧

No.	題名	著者	掲載
1	SIP の正念場 監視技術丸分かりの「標準」登場	—	日経コンストラクション, 2020 年 8 月 24 日号, (株) 日経 BP
2	モニタリング技術の活用による橋梁維持管理の高度化・効率化 — モニタリングシステム技術研究組合 (RAIMS) の取組み—	本間 淳史, 石田 雅博	橋梁と基礎, 2017 年 8 月, (株) 建設図書
3	センサ等を活用した橋梁のモニタリングの取組 モニタリングシステム技術研究組合 (RAIMS) における研究の紹介	廣江 亜紀子	道路, 2017 年 9 月, (公社) 日本道路協会
4	富山市五福 4 号橋におけるモニタリング技術の現場実証	杉谷 真司, 中津井 邦喜	土木技術資料, 2017 年 9 月, (一財) 土木研究センター
5	東北自動車道大森川橋におけるモニタリング技術の現場実証	藤野 和雄, 倉田 直樹, 葛西 茂, 廣江 亜紀子	土木技術資料, 2017 年 9 月, (一財) 土木研究センター
6	橋梁維持管理へのモニタリング技術適用に向けた取組み	廣江 亜紀子, 石田 雅博, 本間 淳史	プレストレストコンクリート, 2017 年 9 月, (公社) プレストレストコンクリート工学会
7	社会基盤施設のメンテナンスの現状と展望	依田 照彦	鉄道総研レビュー (RRR), 2017 年 11 月, (公財) 鉄道総合技術研究所
8	モニタリング技術の活用による橋梁維持管理の高度化・効率化	石田 雅博, 山口 岳思, 松尾 健二, 廣江 亜紀子	土木技術資料, 2017 年 1 月, (一財) 土木研究センター
9	橋梁の維持管理のための調査・監視技術の開発	中谷 昌一, 石田 雅博, 宇佐美 惣, 大島 義信	土木技術資料, 2016 年 1 月, (一財) 土木研究センター
10	インフラモニタリングシステムの早期実現に向けて ～「モニタリングシステム技術研究組合【RAIMS】」の始動～	石田 雅博, 宇佐美 惣, 武澤 永純	土木技術資料, 2015 年 3 月, (一財) 土木研究センター

11	社会インフラのモニタリングシステムに期待すること	依田 照彦	高速道路と自動車， 2017年1月，(公財) 高速道路調査会
12	モニタリングシステム実用化へ技術研究組合設立 インフラの維持管理にセンサ・通信技術等を活用	廣江 亜紀子	道路，2015年6月， (公社)日本道路協会
13	モニタリング技術による道路維持管理の効率化	本間 淳史	基礎工，2015年10月， (株)総合土木研究所
14	橋梁の維持管理のための調査・監視技術の開発	中谷 昌一、石田 雅博、宇佐美 惣、大島 義信	土木技術資料，2016年1月， (一財)土木研究センター
15	インフラ管理におけるイノベーションとモバイル機器の可能性	石川 雄章	JACIC 情報，2015年1月， (一財)日本建設情報総合センター
16	モニタリングシステム技術研究組合 RAIMS 設立	石田 雅博，宇佐美 惣	建設マネジメント技術，2015年2月， (一財)経済調査会

※RAIMS に関する記述を一部含むものについても一覧に掲載

表 6.1.4 報道一覧

No.	題名	放送日	放送局	内容
1	センサーで橋を管理 実証実験	平成 28 年 9 月 27 日	NHK 富山放送局	RAIMS による現場実証実験に関するニュース報道
2	富山市で実証実験 センサーで橋の老朽化を監視		チューリップテレビ (富山県)	
3	橋の維持管理をデータで把握，実証実験		北日本放送 (富山県)	

6.2 モニタリング技術普及のためのパンフレットの作成

RAIMS の活動内容，モニタリング技術の普及のために各種パンフレットを作成し，広報活動に取り組んだ。図 6.2.1，図 6.2.2 は RAIMS に関するパンフレットであり，図 6.2.2～図 6.2.9 はモニタリング技術を実際に導入してもらうことを目的とした地方公共団体向けのパンフレットである。

インフラモニタリングシステムの実

■ 01 ごあいさつ

RAIMS(ライムス)では、道路・高速道路の管理者、ゼネコン、建設コンサルタント、電気・通信メーカー、センサ・設備メーカーの各分野の専門家の総力を結集して、インフラモニタリングシステム活用のためのガイドラインを作成しました。

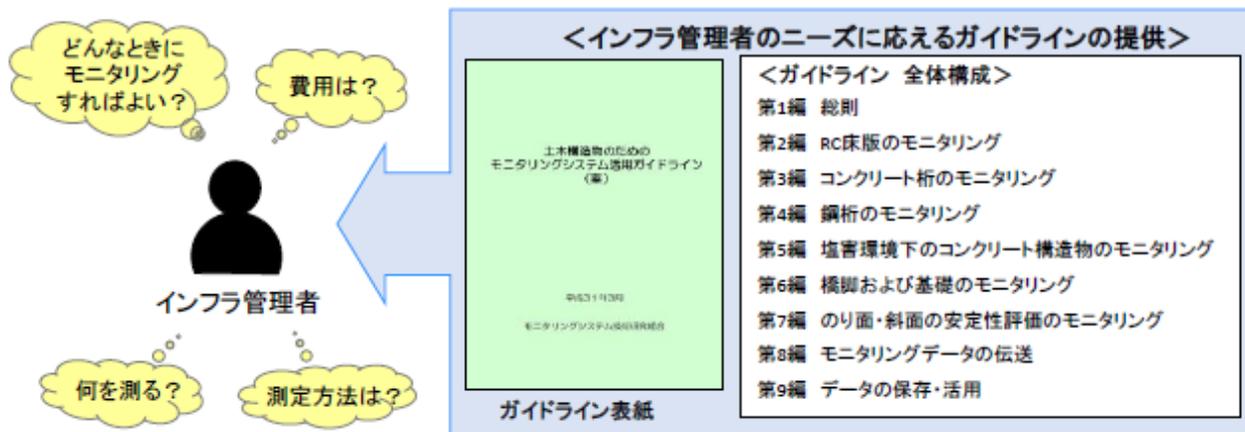
このガイドラインでは、点検・診断・措置・記録で代表される維持管理サイクルにおいて維持管理の効率化・最適化とライフサイクルコストの縮減を可能にする方法を提示するとともに、持続可能なインフラ管理の指針を提供しています。



理事長 依田 照彦
早稲田大学 名誉教授

■ 02 活動目的

RAIMSでは、老朽化の進む社会資本の効率的な維持管理の実現を目的に、インフラ管理者のためのモニタリングシステムガイドラインのさらなる充実と、社会実装を促進するための活動を行います。



■ 03 活動内容

①直轄・自治体モニタリング実装WG

- 直轄・自治体の維持管理業務にモニタリングを円滑に導入するための支援を実施します。
- イベントやフォーラムを活用したニーズの把握とモニタリング優良事例の普及・展開を実施します。

②共同研究WG

- 道路管理者等との共同研究を実施します。

③ガイドラインWG

- 上記①②WGや学識経験者との検討を通じ、ガイドラインの更なるブラッシュアップと充実化を実施します。

■ 04 活動実績

■ 成果発表

- 研究成果発表会の開催、各種展示会への参加、土木学会等で研究論文の発表(2016-2019)
- 「土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン」の発表(2019)

■ 受託研究・受託業務

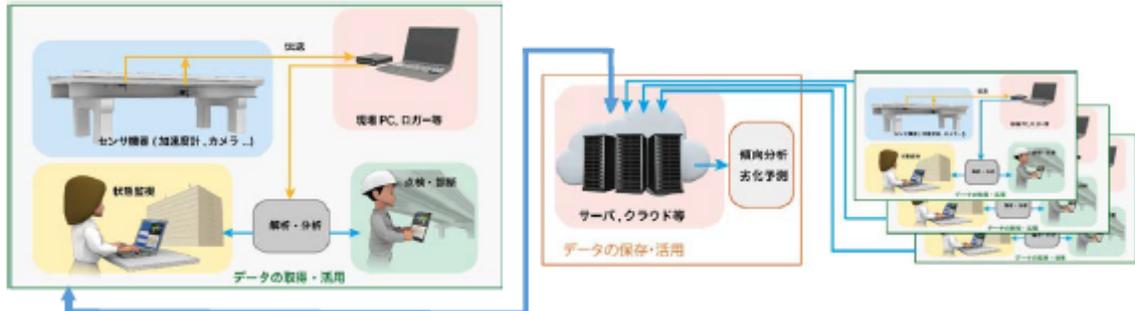
- 国土交通省: モニタリング技術の活用による維持管理業務の高度化・効率化(2014-2018)
(「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環)
- 富山市: 富山市の橋梁マネジメントにおけるモニタリングシステム導入に関する研究業務(2018-2019)
- 国土交通省東北地方整備局: 道路橋の塩害モニタリング技術の公募に係る検討業務(2018-2019)

図 6.2.1 RAIMS パンフレット①

用化に向けたガイドラインの提案

モニタリングシステムのイメージ

モニタリングシステムは、構造物のモニタリングデータの取得・活用と保存・活用に大別されます。



モニタリングの活用シーン

緊急時対応を補助するモニタリング

<橋梁桁端部の異常検知の例>

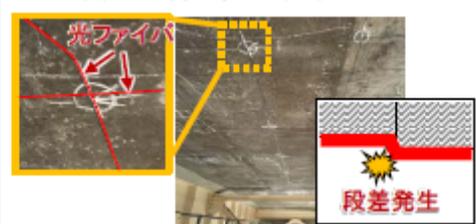


- ✓ 桁端部に簡易センサを設置
- ✓ 閾値に達したら自動的に警告灯が作動

※利用頻度が低く、う回路のある橋梁の場合

点検を補助するモニタリング

<RC床版の疲労進展計測の例>



- ✓ 光ファイバで床版下面損傷部を常時計測
- ✓ ひび割れ面の段差から抜落ちを検知

点検

記録

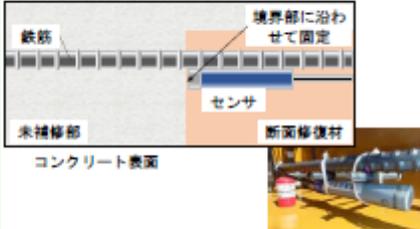
維持管理
サイクル

診断

措置
(補修・補強)

補修効果のモニタリング

<塩害補修箇所の例>



- ✓ 断面修復の境界部に照合電極を埋設
- ✓ マクロセル腐食による再劣化を検知

診断を補助するモニタリング

<橋の剛性を確認する詳細調査の例>



- ✓ 動画を解析し桁のたわみを計測
- ✓ 撮影位置の制約を受けず計測が可能

【各モニタリング活用シーンは一事例です。】

図 6.2.2 RAIMS パンフレット②

橋梁の維持管理をモニタリング技術でお手伝い



RAIMS(ライムス)では、道路・高速道路の管理者、ゼネコン、建設コンサルタント、電気・通信メーカー、センサ・設備メーカーの各分野の専門家の総力を結集して、インフラモニタリングシステム活用のためのガイドラインを作成しました。このガイドラインでは、橋梁等の社会インフラにおける維持管理サイクル(点検・診断・措置・記録)を効率化・最適化するための具体的な方法を示しています。

このガイドラインの中から地方自治体向けに社会インフラの維持管理の効率化・高度化に役立つモニタリングシステムをご紹介します。



1. はじめに
2. 維持管理の重要性
3. 維持管理の課題と解決策
4. モニタリングシステムとは？
5. モニタリングシステムを導入する目的は？メリットは？
6. 維持管理の流れとモニタリングシステムの関係は？
7. モニタリングシステムの種類は？
8. モニタリングシステムの選び方は？

RAIMS Research Association for Infrastructure Monitoring System

モニタリングシステム技術研究組合

図 6. 2. 3 地方公共団体向けパンフレット①

はじめに

本資料は、地方自治体の社会インフラ維持管理の効率化、高度化に役に立つための方法として、モニタリングシステムの導入を紹介するものです。

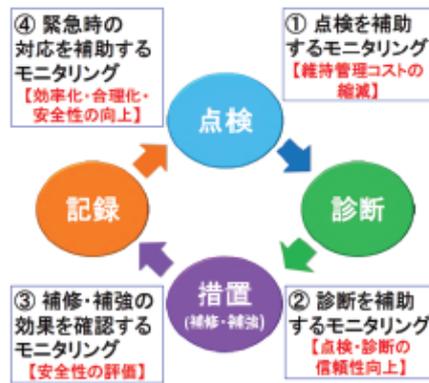
とくに地方自治体が管理する、橋梁などの社会インフラの維持管理への適用方法について、分かりやすく解説したものです。

なお、モニタリングシステムの適用方法については、ガイドラインに詳しく解説しているので、詳しくはガイドラインを見てください。

維持管理の重要性

橋梁をはじめとする社会インフラは、国民の安心、安全を守り、社会の経済活動を支える重要な社会資本です。これらの社会インフラを適切に維持管理し、持続的に社会経済活動を行うためには不可欠なものです。

とくに社会インフラの状態を把握する「点検」、措置の要否を判断する「診断」、補修・補強などの「措置」を行うことが基本的かつ重要です。



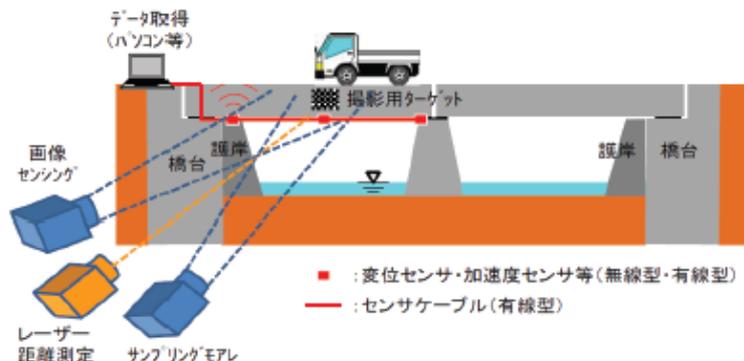
維持管理の課題と解決策

自治体の社会インフラに対して維持管理を行うためには、3つの事項が必要となります。それは、「ヒト」、「カネ」、「技術」です。これがないと、社会インフラを適切に維持管理することが難しくなります。社会インフラの維持管理を効率的に行うための1つの解決策が「モニタリング」です。モニタリングの導入で維持管理が効率化します。



モニタリングシステムとは？

モニタリングシステムとは、橋梁などの構造物にセンサを設置して、様々な測定を行うことで、構造物の状態を定量的かつ継続的に把握するものです。



RAIMS Research Association for Infrastructure Monitoring System

モニタリングシステム技術研究組合

図 6.2.4 地方公共団体向けパンフレット②

■ ■ モニタリングを導入する目的は？メリットは？

モニタリングシステムを導入することで以下のメリットが得られます。

(1)点検作業を効率化するためのモニタリング

- ・点検対象を絞り込む、または抽出する。
- ・点検対象の順位を決定する。
- ・点検作業を軽減する。(近接が困難な箇所を見る)

(2)措置要否を判断するためのモニタリング

- ・措置の必要性を判断するために、詳しく調べる。
- ・措置の必要の有無を判断するための判断材料を得る。

(3)措置順位を決定するためのモニタリング

- ・措置が必要な否か判断する。
- ・措置が必要な構造物群の優先順位をつける。

(4)状態を監視するためのモニタリング

- ・措置するまでに構造物の状況を監視する。

■ ■ 維持管理の流れとモニタリングシステムの関係は？

社会インフラの維持管理の流れを示します。

この流れの中で、モニタリングシステムの位置づけを示します。

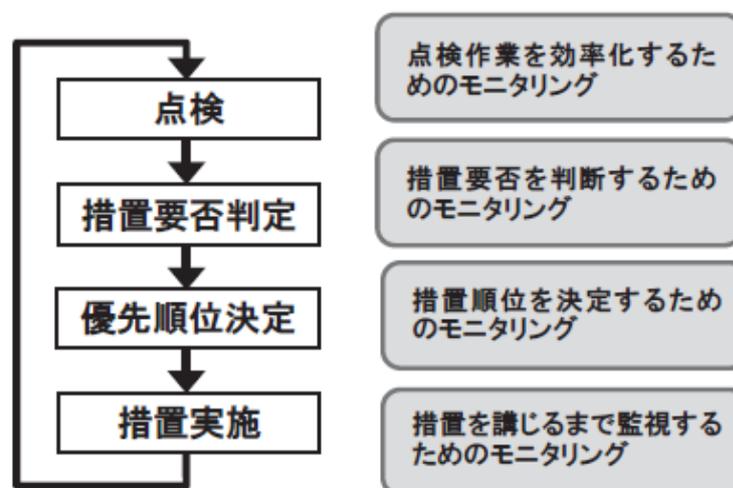


図 6.2.5 地方公共団体向けパンフレット③

■ ■ モニタリングシステムの種類は？

目的ごとに、適用可能なモニタリングシステムについて以下の表に示します。

	モニタリングの種類		
	【画像】 デジタル画像 赤外線	【振動】 加速度センサ 振動センサ	【たわみ・変位】 変位計 光ファイバ
(1)点検作業を効率化するためのモニタリング	○	○	△
(2)措置要否を判断するためのモニタリング	○	○	○
(3)措置順位を決定するためのモニタリング	○	○	○
(4)状態を監視するためのモニタリング	○	○	○

■ ■ モニタリングシステムの選び方は？

モニタリングシステムの選び方の例をフローで示します。

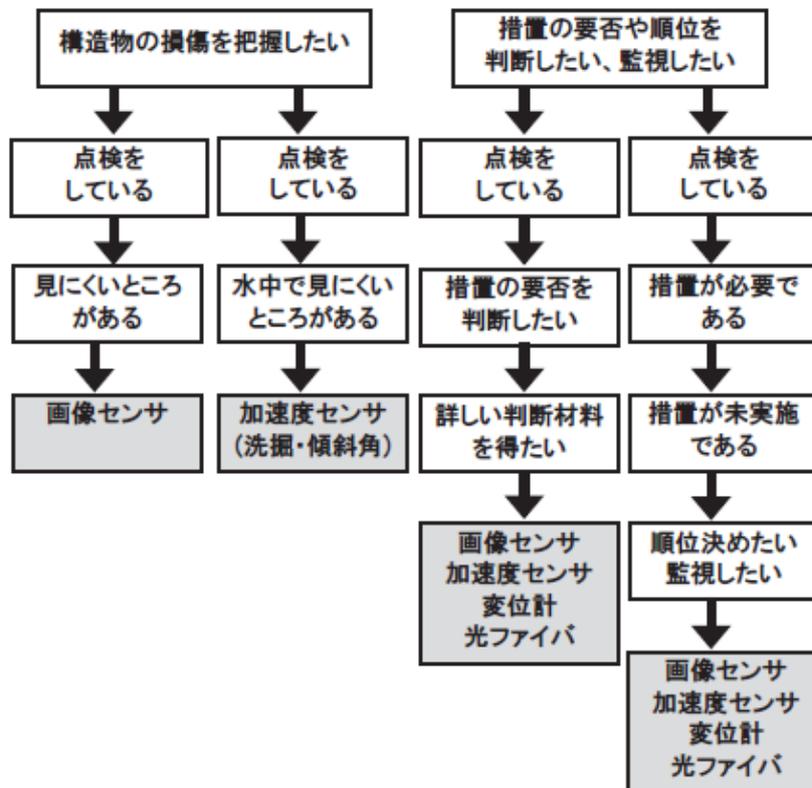


図 6.2.6 地方公共団体向けパンフレット④

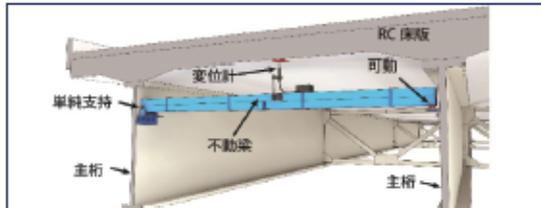
不動梁方式によるRC床版抜け落ち監視

不動杭不要 簡易不動梁でRC床版の変位計測！

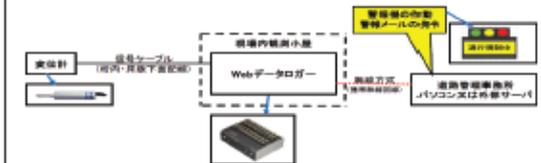
概要

RC床版の変位を常時計測・監視します。設定された閾値を超えると警報器が作動し、管理者に警報メールを発信します。

導入イメージ



【静的計測システム】



特徴

■ 簡易不動梁で変位計の設置が可能。

RC床版損傷箇所の直下付近に両側の鋼主桁側面を利用し磁石で簡易不動梁(アルミ角材等)を設置・固定し、その不動梁に変位計を取付け、床版の変位量を計測します。

■ 対傾構の利用も可能。

計測箇所が対傾構の近くであれば、対傾構を不動梁として変位計を取付け計測可能です。

効果

警報器を作動させることで、利用者に異常を知らせるとともに、管理者に警報メールで同時に通知することが出来ます。

概算費用

(変位計1点30万円+測定装置220万円)/橋
(測定装置は変位計10点まで接続可能です。測定装置はレンタルも可能です。)

サンプリングモアレカメラによる桁たわみ計測

桁下作業不要 格子シートとモアレカメラでたわみ計測！

概要

主桁側面または高欄に格子シートを設置(貼り付けまたはシート板を固定)するだけで、河川が急流であっても橋が高くても、モアレカメラで撮影出来れば、たわみ計測が可能です。

導入イメージ



特徴

■ 16点の変位(鉛直・水平)計測が可能。

1台のカメラで最大16点の変位(鉛直・水平)を同時に計測することが出来、その場でリアルタイムモニタリングが出来ます。また高速度撮影(500Hz)で瞬間変位の計測が可能です。

■ キャリブレーションが不要。

間隔が既知の格子シートを使用するので、現場でキャリブレーションが不要で、モアレカメラを設置したら直ちに計測出来ます。

効果

格子シートを設置するだけで、何時でもモアレカメラでたわみ計測が出来、その場で橋梁のたわみ量が確認出来ます。

概算費用(測定・解析費用)

初回:変位(格子シート)5点以内:60万円/橋
2回目以降:変位5点以内:30~40万円/橋

桁端異常検知モニタリング

ローテク&ローコストで日常管理を支援！

概要

橋梁の桁端部の異常を検出します。異常時には警告灯が点灯し、利用者に異常をお知らせします。管理者に異常を通知する機能もあります。

導入イメージ



特徴

■ アクセスが容易な位置にセンサ設置

橋梁点検車や高所作業者が不要な位置に設置し、安価な費用を実現する。



■ 20mmの開口幅を検出

実証実験で検出可能な開口幅を確認中です。

■ 5年程度の耐久性を確保

プラスチックボックスに電源を格納し防水・破損対策を検討中です。



効果

警告灯で利用者に異常を知らせることで事故の防止や日常管理の向上等の効果をもたらします。

概算費用

10～30万円/橋（設置のみ）

低周波加速度センサによるモニタリング

目視ではわからない損傷をキャッチ！

概要

橋梁において、主構造物(主桁や橋脚など)に設置した加速度センサを用い、損傷や劣化による構造内部の変状を可視化する技術です。橋梁の維持管理を補助するツールとして活用できます。

導入イメージと概算費用

低周波加速度センサ

高精度、高信頼性、高寿命
分解能: 1μg
測定帯域: 0~25Hz
平均出力電圧: 20V以上

データ収集装置

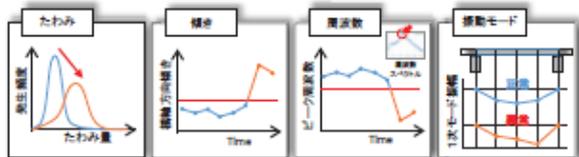
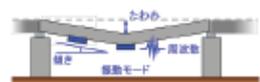
計測方式	対象橋梁	システムイメージ	概算費用
定期計測 (点検時)	・健全性が高い ・小～中規模		150万円～※1
常時計測	・健全性が低い ・大規模		400万円～※1

※1: 検修費用のみ、対象橋梁によって変動

特徴

■ 主構造物の剛性変状を非破壊で把握

振動特性を解析し可視化することで、構造内部に潜む、ひび割れ、破断等を捉えます。



■ 複雑な機材、特殊技能が不要なシステム

所定の位置に加速度センサを設置し、データ収集装置と接続することでデータが収集できます。

効果

維持管理の効率化、費用低減を期待できます。

- ・詳細点検のスクリーニング、補修計画策定の判断材料
- ・健全性の低い橋梁における、異常発生 of 早期検知、及び供用可否の監視による利用者の安全確保
- ・補強対策の効果確認

図 6.2.8 地方公共団体向けパンフレット⑥

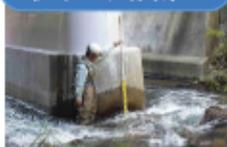
橋脚・基礎の洗堀モニタリング

洪水時の洗堀状況を遠隔地から計測可能！

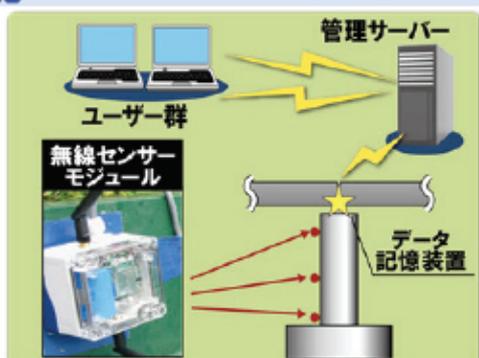
概要

水面下で確認できない橋脚の洗堀状況を加速度計センサと携帯通信回線により、現地に行かずに異常を確認することができます。

従来の洗堀調査



導入イメージ



特徴

- 遠隔地から計測可能
インターネット接続を用いることで、現地に行かずに計測が可能です。
- 近接目視困難な水面下での洗堀量を把握
洪水時における基礎の安全性を定量的に評価することが可能です。



データ記録装置



橋脚の無線センサ設置

効果

橋脚の安全上限界となる洗堀量に達した場合、管理者に異常を通知し、現地に行かずに交通可否の判断を行うことが可能となります。

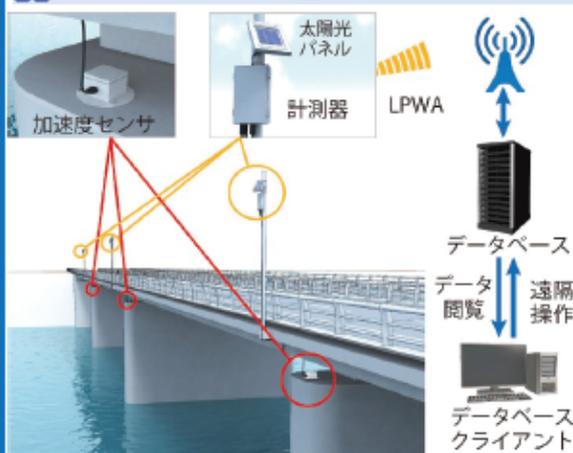
加速度センサを用いた洗堀量および傾斜角のモニタリング

水中にある橋脚基礎の洗堀の状況を簡単に把握！

概要

橋脚基礎の洗堀と橋脚の傾斜角を監視します。異常発生時には、クライアントの画面への異常表示と管理者へのメール通知を行います。

導入イメージ



特徴

- 洗堀の進行を検出
橋脚の固有振動数と傾斜角から洗堀の進行状況を把握できます。
- 現地に行かずに遠隔でモニタリング
監視ソフトで、遠隔でモニタリングできるので、災害時、現場に行く前に、即座に全体の洗堀の状況が把握できます。
- 電源工事が不要
小型の太陽光パネルの発電で駆動します。

効果

- 洗堀が発生しやすい橋脚の、洗堀の早期発見に活用できます。
- 洪水後・地震後の橋脚の損傷状況の確認に活用できます。

概算費用

40～80万円/橋脚（設置費と1年間の運用費）

RAIMS Research Association for Infrastructure Monitoring System

モニタリングシステム技術研究組合

図 6.2.9 地方公共団体向けパンフレット⑦

7章 おわりに

モニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）としての活動は、2020年度で終了予定である。今後は、モニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）に参加した各社がここでの活動を通して得た知見をもとに、それぞれモニタリング技術の研究開発、普及に努めていくことになる。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員 石田 雅博，主任研究員 宇佐美 惣：モニタリングシステム技術研究組合 RAIMS 設立，建設マネジメント，2015年2月号，pp. 90-92，2015年2月.
- 2) 経済産業省：CIP（技術研究組合）とは。
https://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/001.html
- 3) 国土交通省：社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会
<https://www.mlit.go.jp/tec/monitoring.html>
- 4) 国土交通省道路局国道・技術課：モニタリング技術も含めた定期点検の支援技術の使用について（参考資料），2020年6月.
- 5) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ（案），2020年6月.
- 6) 国土交通省：新技術情報提供システム
<https://www.netis.mlit.go.jp/>

第2部
土木構造物のための
モニタリングシステム活用ガイドライン
(案)

土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン（案）

総目次

第1編		総則
1章	目的	1-1
2章	適用範囲	1-2
3章	モニタリングの意義	1-3
4章	モニタリングシステムの概要	1-11
第2編		RC床版のモニタリング
1章	RC床版のモニタリングの位置づけと種類	2-1
2章	画像によるひび割れのモニタリング	2-5
3章	光ファイバによるひび割れのモニタリング	2-27
4章	変位計によるモニタリング	2-43
5章	光ファイバによるプレキャスト床版の接合部のモニタリング	2-64
6章	振動モードによるモニタリング	2-81
7章	適用事例	2-104
添付資料1	用語集	2-126
第3編		コンクリート桁のモニタリング
1章	コンクリート桁のモニタリングの位置づけと種類	3-1
2章	赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング	3-6
3章	動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング	3-21
4章	加速度センサによる健全性の診断	3-30
5章	桁端部の異常検知モニタリング	3-46
6章	適用事例	3-54
添付資料1	用語集	3-98
第4編		鋼桁のモニタリング
1章	鋼桁のモニタリングの位置づけと種類	4-1
2章	サンプリングモアレ法による変位のモニタリング	4-7
3章	動画像処理によるたわみのモニタリング	4-19
4章	加速度センサによるたわみのモニタリング	4-29
5章	光ファイバによるたわみのモニタリング	4-39
6章	動ひずみによる剛性変化のモニタリング	4-57
7章	画像処理による塗装のモニタリング	4-78
8章	変位計による遊間のモニタリング	4-101
9章	適用事例	4-114
添付資料1	用語集	4-147

第5編		斜張橋の斜材システムのモニタリング
1章	斜張橋のモニタリングの位置づけと種類	5-1
2章	高次振動法による張力変化のモニタリング	5-16
添付資料1	用語集	5-33
第6編		塩害環境下のコンクリート構造物のモニタリング
1章	塩害環境下のモニタリングの位置づけと種類	6-1
2章	塩分検知器による付着塩分のモニタリング	6-5
3章	模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング	6-14
4章	照合電極による進展期のモニタリング	6-26
5章	照合電極による補修効果のモニタリング	6-38
6章	適用事例	6-47
添付資料1	用語集	6-60
第7編		橋脚および基礎のモニタリング
1章	橋脚および基礎のモニタリングの位置づけと種類	7-1
2章	航空レーザ測深による洗掘状況の把握	7-10
3章	加速度センサを用いた洗掘量および傾斜角のモニタリング	7-27
4章	無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価（洗掘）	7-41
5章	無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価（地震）	7-64
6章	適用事例	7-76
添付資料1	用語集	7-87
第8編		のり面・斜面の安定性評価のモニタリング
1章	のり面・斜面の安定性評価モニタリングの位置づけと種類	8-1
2章	傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリングシステム	8-14
3章	多点傾斜変位と土壌水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング	8-27
4章	次世代衛星測位システムによるのり面・斜面の安定性評価モニタリング	8-35
5章	マルチGNSSによるのり面・斜面の安定性評価モニタリング	8-46
6章	落石危険度振動調査法による岩塊の常時モニタリング	8-59
7章	のり面・斜面の安定性評価モニタリング実施事例	8-67
添付資料1	用語集	8-86
添付資料2	斜面土砂災害分類と発生メカニズム	8-91
第9編		モニタリングデータの伝送
1章	インフラモニタリングにおける伝送の概要	9-1
2章	ケーススタディ	9-9
3章	目的別伝送シナリオ	9-13
4章	ネットワーク技術の選択	9-26
参考	モニタリングシステムにおけるセキュリティの考慮について	9-29
5章	適用事例	9-30

添付資料 1	用語集	9-39
第 10 編	データの保存・活用	
1 章	概要	10-1
2 章	保存活用プラットフォームに保存されるデータの選定及びデータ形式, 属性情報の与え方	10-7
3 章	保存活用システム事例	10-11
4 章	システム	10-22
5 章	データ保存	10-24
6 章	分析事例の紹介	10-43
添付資料 1	既存報告のまとめ	10-69
添付資料 2	データ形式 まとめ	10-70
添付資料 3	用語集	10-72

第1編 総則

1章	目的	1-1
2章	適用範囲	1-2
2.1	ガイドラインの位置づけ.....	1-2
2.2	対象とする構造物.....	1-2
3章	モニタリングの意義	1-3
3.1	モニタリングの定義.....	1-3
3.2	モニタリングの位置づけ.....	1-3
3.3	維持管理におけるモニタリングの活用.....	1-6
3.4	モニタリングの活用イメージ.....	1-8
3.4.1	変状を確認したら行うモニタリング.....	1-8
3.4.2	変状の早期発見のために行うモニタリング.....	1-8
3.4.3	補修・補強の効果を確認するために行うモニタリング.....	1-9
3.5	モニタリングの実施.....	1-9
3.6	モニタリングデータの評価・判定の考え方.....	1-10
4章	モニタリングシステムの概要	1-11
4.1	モニタリングシステムのイメージ.....	1-11
4.2	対象構造物の考え方.....	1-12
4.3	対象変状によるセンサ選定の目安.....	1-13

1章 目的

インフラ構造物の維持管理では、定期的な点検とそれによる状態の把握が基本であり、適切な判断・措置をするためには重要な行為である。これにより変状や損傷が確認された場合には、的確な診断のもと、適切な措置を講じることで、構造物を健全に保つとともに、維持管理に係る費用も最小化される。これは人間で例えれば、定期的に健康診断を受ける行為によく似ている。

一方、モニタリングとは、定期的（あるいは継続的）にデータを取得して、それを比較することにより、時間経過に伴う変状の発生や進行を把握する行為である（図 1.1.1）。したがって、モニタリングは、点検や診断に必要な情報を得るための有効な手段であり、点検や調査業務を補完する方法として、維持管理業務の合理化が期待されるものである。

近年、インフラ構造物の維持管理業務の重要性が高まる一方で、ICT 技術の発達に伴って、モニタリング技術の活用が注目されている。このガイドラインは、構造物の維持管理業務における点検、診断、さらには補修・補強などの様々な場面で有効と思われるモニタリング技術を、構造物とその変状に応じて活用方法をまとめたものである。なお、取りまとめにあたっては、地方公共団体の中堅技術者が業務に速やかに取り込めるように、分かりやすく編集するよう配慮している。

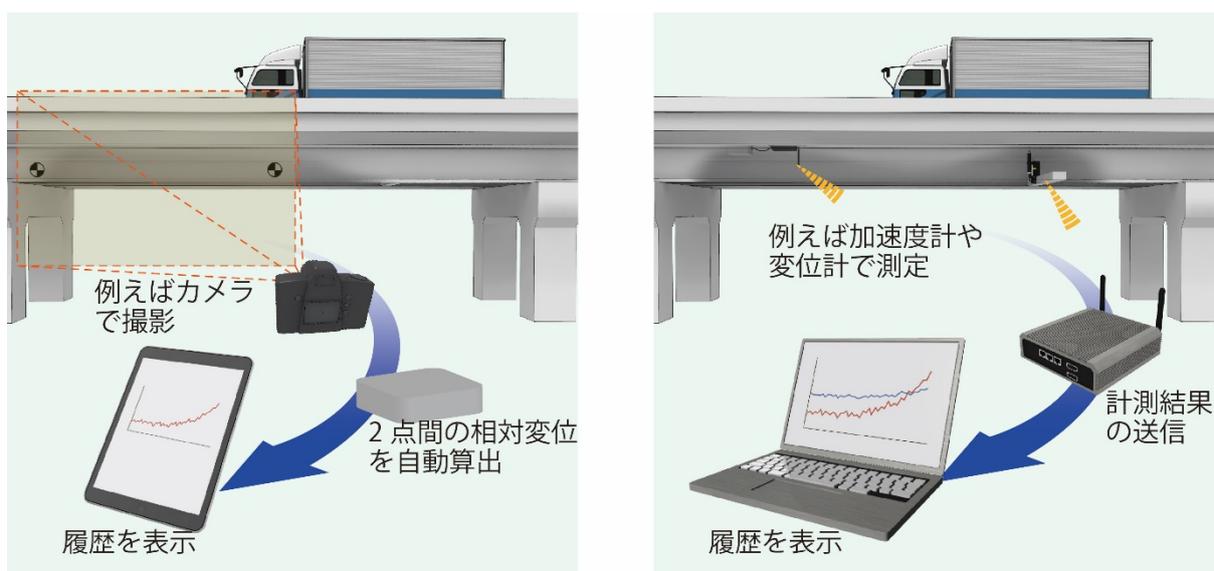


図 1.1.1 モニタリングのイメージ

2章 適用範囲

2.1 ガイドラインの位置づけ

このガイドラインは、モニタリング技術をインフラ構造物の維持管理業務に適用する場合の指針であり、現時点で実用的なモニタリング技術の種類とその適用性を構造物ごとにまとめている。

ガイドラインでは、標準的な適用方法を記載しているので、管理者それぞれの目的に応じて機器や頻度等を選択して活用されたい。

さらに、ここで示されるモニタリング技術は、今後、通常の維持管理業務の一環として、管理者それぞれの点検要領等に組み入れられて標準的に実施されることが望ましい。

2.2 対象とする構造物

このガイドラインは、道路構造物のうち橋梁およびのり面・斜面の維持管理を対象としてまとめたものである。このうち橋梁については、RC床版、コンクリート桁、鋼桁、並びに橋脚及び基礎について、それぞれの部材ごとに編を分けて編集している。さらに、コンクリート構造物における塩害に関するモニタリングについては、各部材ごとのモニタリングとは編を独立してまとめた。

これらはモニタリングシステム技術研究組合（Research Association for Infrastructure Monitoring System, 略称 RAIMS）が道路構造物を対象とした研究より得られた知見や成果を反映している。しかしながら、コンクリート構造物などの劣化要因や変状は、橋梁に限らず他の構造物においても共通する部分が多いことから、モニタリング技術の基本的な部分はその他の構造物にも採用が可能であると考えられるので、ガイドラインの趣旨や留意点をよく理解して活用するとよい。

3章 モニタリングの意義

3.1 モニタリング技術の定義

本ガイドラインにおけるモニタリング技術の定義は、国土交通省の社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会における考え方を踏襲することとし、「構造物等の状況を常時もしくは複数回（常時/定期/不定期，最低2時点）で計測し，状態変化を客観的に把握する技術」とする（図3.1.1）。

また，この計測する技術に加えて，データを収集または伝送する技術，ならびにそのデータを保存・蓄積するとともに必要に応じて活用する技術を含めて，その総称を「モニタリングシステム」と呼ぶことにする。

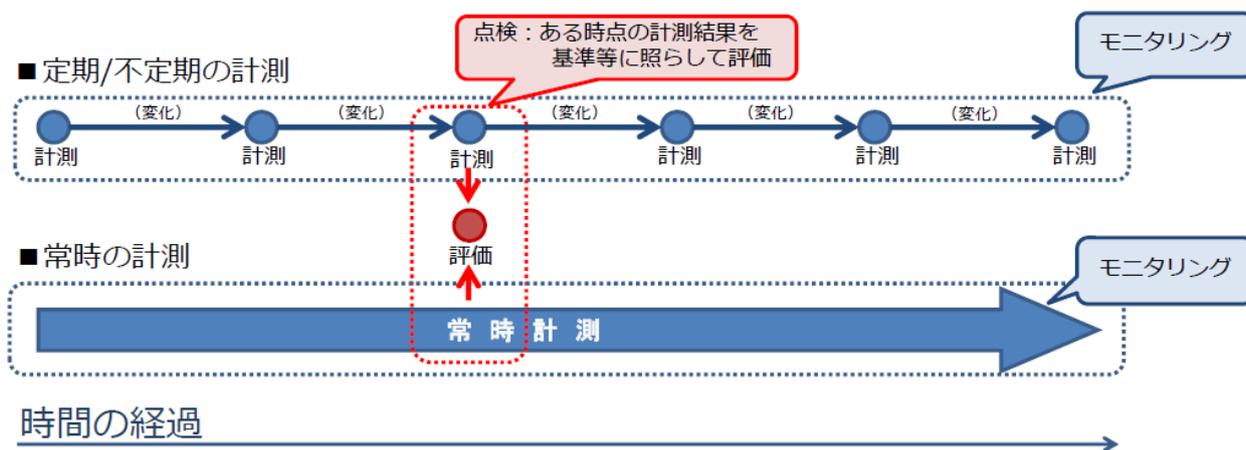


図3.1.1 モニタリング技術の定義

(出典：国土交通省 HP 第一回社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料)

3.2 モニタリングの位置づけ

構造物の維持管理は，基本的に【点検⇒診断⇒措置（補修・補強）⇒記録】のサイクルで定期的実施されている。ここで，維持管理業務を高度化・効率化するために有効と考えられるモニタリング技術は様々開発されており，これらの目的や役割を整理すると以下の4つに大別される（図3.2.1参照）。

(1) 点検を補助するモニタリング

構造物にセンサ等を設置して，構造物の振動，変位・ひずみ，内部応力の変化等を定期的（継続的）に計測することにより，異常箇所を抽出するモニタリングである。通常の点検を合理化することにより維持管理コストの縮減効果が期待される。

(2) 診断を補助するモニタリング

構造物の健全性を評価するために，構造物の振動，変位・ひずみ，内部応力等を計測することにより診断に必要な情報を取得するモニタリングである。目視等による点検結果に合わせて，これらのモニタリングデータを活用することで点検や診断業務の信頼性向上に寄与する。

(3) 補修・補強の効果を確認するモニタリング

構造物が劣化や被災により損傷した場合に補修や補強を行うが，それらの工法が適切であるか，あるいは期待された効果が発揮されているかを確認することは，維持管理業務を確実にを行うために重要である。すなわち，補修・補強を行なった構造物の再劣化の有無を把握し，補修・補強後の性能を評価するのに必要な情報を取得するためのモニタリングであり，このほかに予防保全の効果を検証するために行うモニタリング等もこれに含まれる。

(4) 緊急時の対応を補助するモニタリング

通常の点検とは別に、地震等の災害が発生した場合には、速やかに構造物の被災状況を把握する必要がある。あらかじめ構造物に設置したセンサ等によって、変状の発生の有無、損傷の程度などを迅速に把握するために採用するモニタリングであり、緊急時の点検の効率化、合理化および安全性の向上に寄与する。

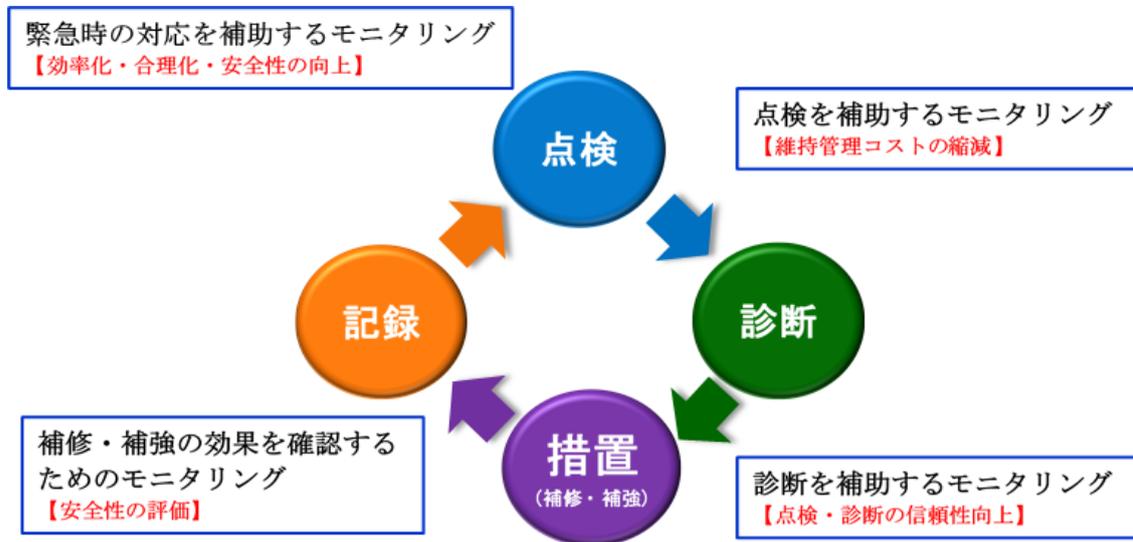


図 3.2.1 維持管理サイクルにおけるモニタリングの位置づけ

このように区分したモニタリングの役割について、代表的な管理者ニーズとその場合のモニタリングの目的を具体的に整理して表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 管理者ニーズとモニタリングの目的 (例示)

モニタリングの役割	管理者ニーズ	モニタリングの目的	タイプ
(1) 点検の補助	日常点検時の変状の見逃しを低減する。	何らかの異常があった箇所を把握する。	A
	定期点検の範囲を絞り込み、点検時間・費用を削減する。	健全性な範囲を把握する。	B
(2) 診断の補助	予防保全の実施により劣化損傷の進行を防ぐ。	予防保全の実施を判断するのに必要な情報を取得する。	C
	措置の優先順位づけを行う。	定量的データを取得し、比較する。	D
	健全度評価の精度を向上する。	健全度評価のための定性的、定量的データを取得する。	E
	供用状態を維持する。	通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達していないことを確認する。	F
補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認する。		G	
(3) 補修・補強の効果の確認	対策の妥当性を確認する。	対策の効果, 持続性を確認する。	H
(4) 緊急時の対応を補助	交通開放するまでの時間を短縮する (高速道路)。	落橋等の危険が予測される箇所を把握する。	I
	通行危険箇所を早期に把握する (一般道)。		

3.3 維持管理におけるモニタリングの活用

社会インフラは一般的に図 3.3.1 に示す維持管理フローに沿って維持管理がされている。この維持管理フローにおいて、平常時における①点検，②診断，③措置，④記録，に加えて⑤緊急時のそれぞれの場面でモニタリングの活用が期待できる。そのうち、特に期待ができる表 3.2.1 における A～I の活用場面を図 3.3.1 中に示す。

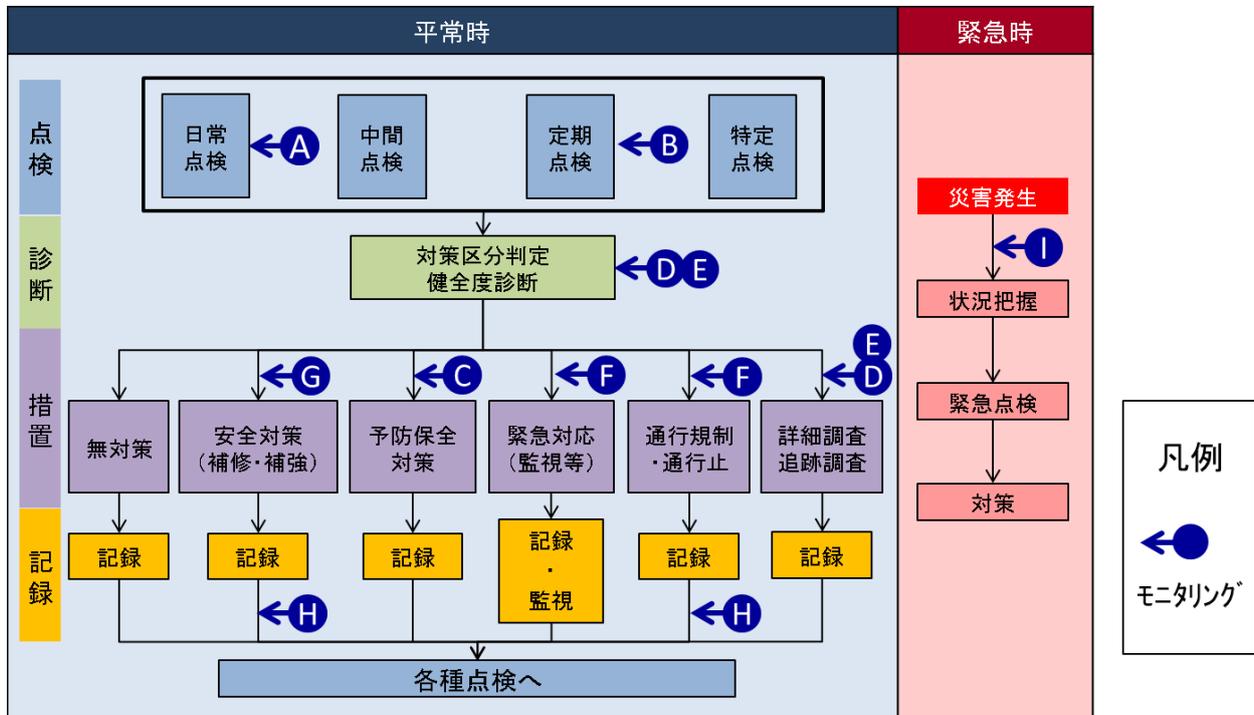
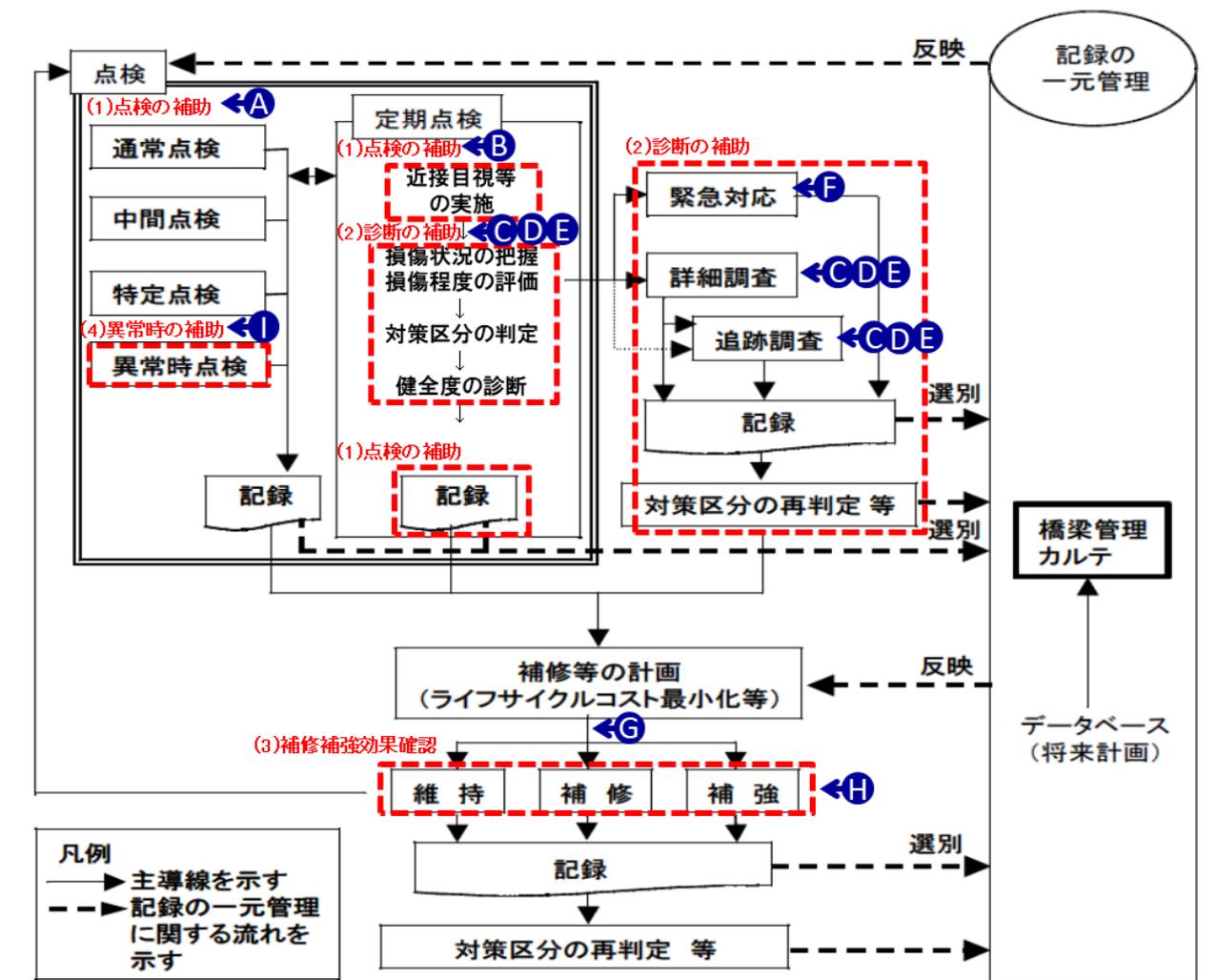


図 3.3.1 維持管理フローとモニタリングの活用場面

また、直轄国道では、橋梁定期点検要領に基づく図 3.3.2 に示す維持管理フローで維持管理が行われおり、この場合においても①点検、②診断、③措置、④記録、⑤異常時点検の各場面でモニタリングの活用が期待できることから、図 3.3.1 と同様にそのポイントを A~I で図中に示す。



3.4 モニタリングの活用イメージ

3.2 で述べたように、維持管理サイクルの各段階においてモニタリング技術を活用することで、維持管理業務の高度化や効率化が期待される。ただし、モニタリング技術を活用する場面は、多種多様であり、各管理者の維持管理方針に合わせて、インフラ構造物の種類、健全度、環境条件等に応じて、適切に採用していくことが重要である。

ここでは、維持管理業務におけるモニタリング技術の活用をイメージしやすいように、維持管理の場面に応じたモニタリングの導入ケースを以下に整理して示す。

3.4.1 変状が確認されたら行うモニタリング

通常の点検において、構造物の変状が確認された場合、診断に必要な情報の取得や変状の進行を監視するためにモニタリングを行うことが有効である。

(1) 変状の進行監視

代表的な事例は、RC 床版の塩害や疲労損傷が進行して、交通荷重によるたわみや振動が大きい場合に、継続的に変位を計測するモニタリングである。交通荷重によるたわみ量を測定して劣化の進行度を把握したり、たわみの増加が著しくなったら通行規制の措置判断をするための情報としても有効なモニタリングである。

また、コンクリートのひび割れが確認されたら、定期的に撮影した画像からその進行を確認したり、ゲージによりひび割れ幅を継続的に計測するモニタリング事例もある。

(2) 健全度を評価するための情報収集

コンクリートのひび割れやうき剥離が顕著であり、構造物の剛性の低下が懸念される場合に、加速度センサにより固有振動数や振動モードをモニタリングすることが有効である。また、塩害によるコンクリート内部の腐食環境を鋼材の電位により計測するモニタリングもこのケースに含まれる。

さらに SIP の研究成果として、河川内の橋脚が洗掘された場合に、基礎の健全度を評価するモニタリング技術も開発されている。

3.4.2 変状の早期発見のために行うモニタリング

通常の点検では、近接できる範囲が限られたり、点検周期のタイミングにより変状の発見が遅れる場合がある。モニタリングの活用により、これを補足することで維持管理の高度化や効率化が図られる。

(3) データの継続確認による異常検知

健全な状態から、定期的にデータを取得して、データに変化が現れた時に、詳細な調査を実施して変状を早期に発見するモニタリングである。人間が体温や血圧を平常時から測定して、健康状態を確認する方法と同じである。モニタリングデータとしては、変位、固有振動数、自然電位、および画像比較等がある。また SIP の研究成果としては、のり面や斜面崩壊の前兆を確認するモニタリング技術も開発されている。

(4) 近接目視困難箇所の確認

点検は近接目視により行うことが原則であるが、実際の現場では高所や狭隘部のように近接が困難と判断される箇所が存在する。このような箇所の点検は、センサなどによりモニタリングで補うことが有効である。望遠カメラやドローンなどにより撮影された画像の比較、応力集中箇所のひずみ計測などがこれにあたる。また、コンクリート中の塩分浸透量の計測なども、代表的なモニタリ

ング事例である。

(5) 災害時の変状箇所の早期把握

地震や台風などにより、構造物に被害が生じた可能性のある場合には緊急点検が必要となるが、膨大な構造物の点検を効率よく実施するためには、センサなどの情報により、被災した構造物が早期に仕分けできれば、点検の優先順位を判断する上で極めて有効である。

ただし、常時から数多くのセンサを設置しておく必要があることから、対象構造物の選定方法、モニタリングする変状とその技術について、費用や機器の保守の観点も含めた十分な検討が必要である。

3.4.3 補修・補強の効果を確認するために行うモニタリング

(6) 補修・補強前後の効果確認

構造物の維持管理においては、予防保全のためにコンクリートを被覆したり、損傷箇所の補修や補強を行うことが少なくない。その場合に、構造物の状態や挙動をモニタリングして、設計で想定された効果が発揮されているかを確認しておくことは有効である。それにより、劣化予測の見直しに反映したり、補修・補強工法の改善に役立てることができる。

3.5 モニタリングの実施

3.4で示した(1)～(6)のモニタリングによるセンサデータの取得は、以下 a)～d) に分類され、定期点検の間に災害や補修などが発生する中で図 3.5.1 に示すように実施される。

- a) 短期的：任意のタイミングで短期的にセンサデータの取得を行う。
- b) 断続的：一定期間センサデータの取得を行う。
- c) 日常的：日常的にセンサデータの取得を行う。
- d) 事後的：災害発生などを受けて事後的にセンサデータの取得を行う。

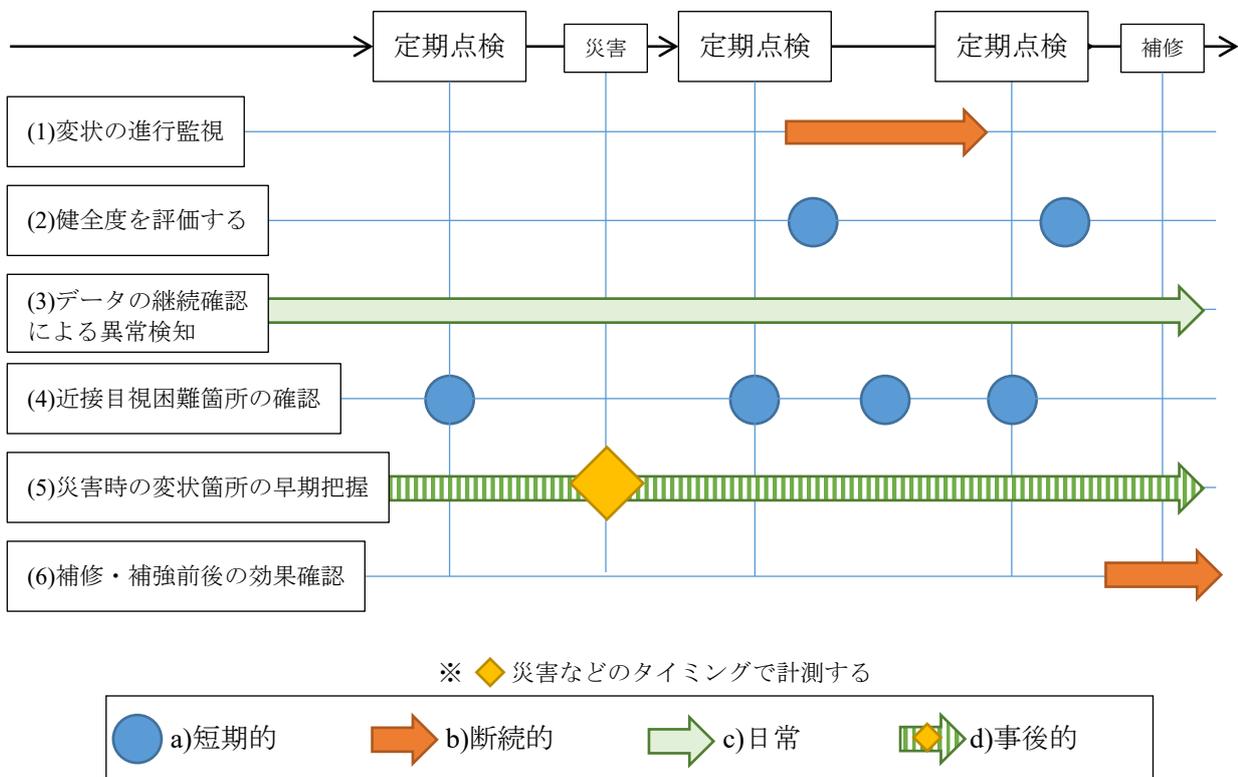


図 3.5.1 モニタリングの実施に関する概要図

3.6 モニタリングデータの評価・判定の考え方

モニタリングデータの評価・判定の方法としては2つに大別される。

一つは、構造物の耐荷性能や使用性能の限界値に対して、ある程度の安全率（余裕）を見込んで管理のための閾値が設定できる場合であり、その場合にはその閾値を管理基準として、供用制限などの措置判断を行う（図 3.6.1, ケース A）。閾値の設定のためには、継続的なデータ蓄積や解析等により、モニタリングにより得られる物理量と損傷程度の相関関係の把握が重要である。

もう一つは、通常の供用状態において必要な物理量を継続的に監視しておくことで、異常値や急激な増減が確認された場合に、詳細調査の実施や供用制限などの必要な措置を行う方法である（図 3.6.1, ケース B）。この場合には、前記のような管理基準値（閾値）を設定しなくてもモニタリングデータの評価が可能である。

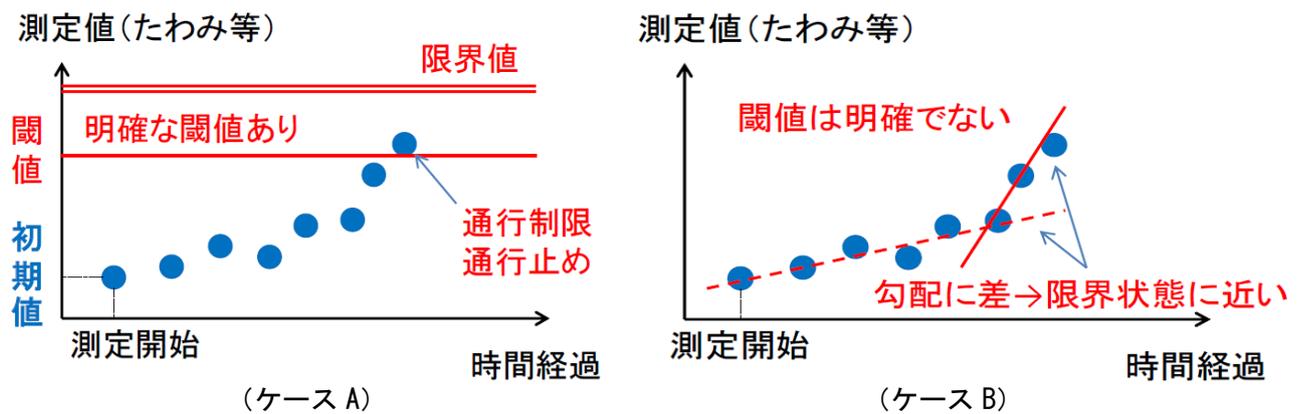


図 3.6.1 モニタリングデータの評価・判定の種別のイメージ

4章 モニタリングシステムの概要

4.1 モニタリングシステム

図 4.1.1 にモニタリングシステムのイメージを示す。モニタリングシステムは、構造物のモニタリングデータの取得・活用と保存・活用と大別される。基本的なモニタリングとしては、現地でセンサによる単体の構造物の計測から解析・分析を経てユーザに結果をアウトプットするデータの取得・活用で完結する。管理者の目的に応じて、複数構造物や複数地域のデータを対象としたデータの保存・活用までをシステムとすることも可能であり、データベースを構築し、比較可能なデータ量を増やすことで将来的に劣化予測や傾向分析等への活用が期待できる。

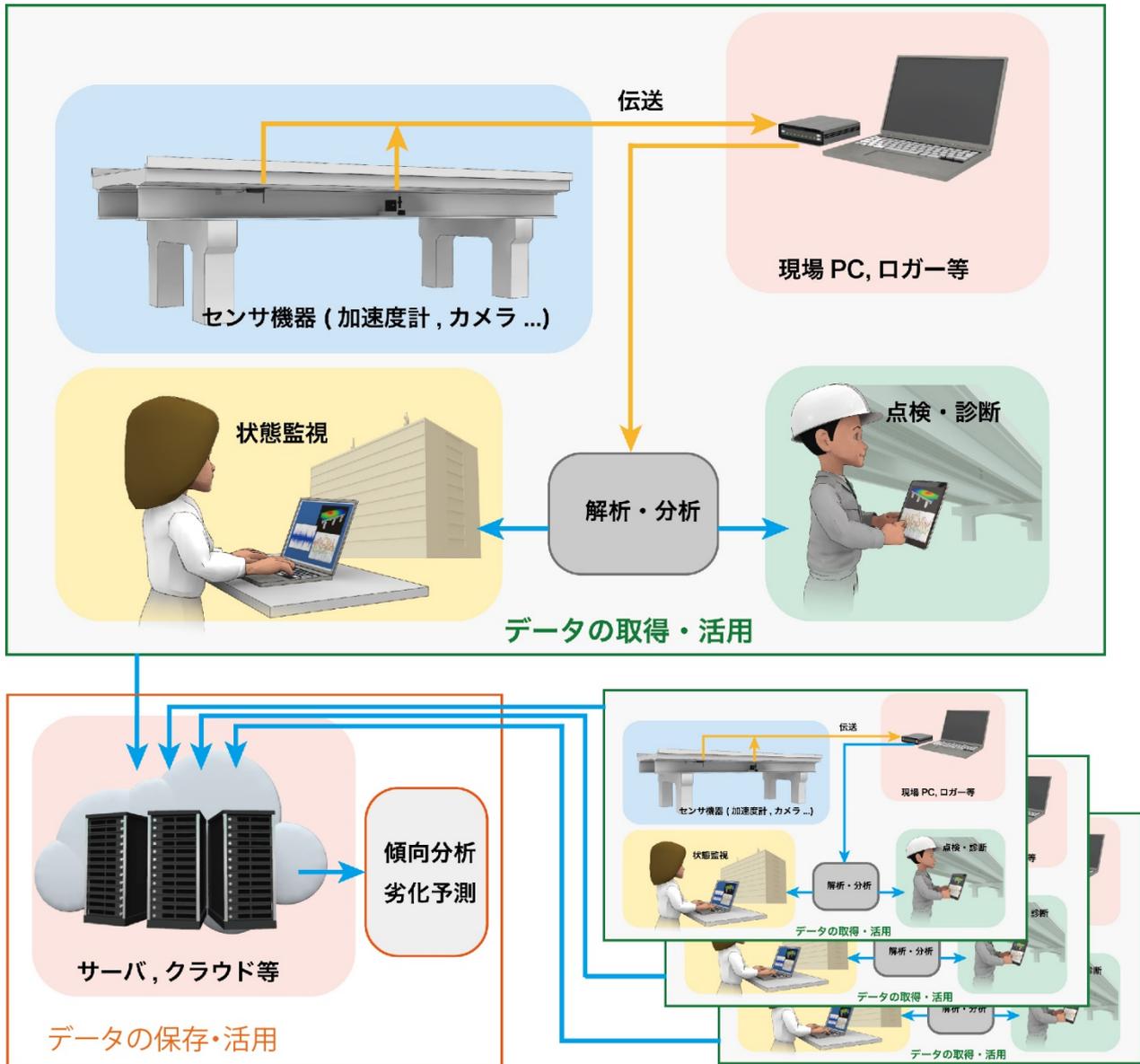


図 4.1.1 モニタリングシステムのイメージ

4.2 対象構造物の考え方

モニタリングシステムの導入に当たっては対象構造物の考え方として、以下の2点に留意し計画、導入する。

(1) 単体で代表する場合

特殊な構造，交通上重要である構造物を重点的に管理する。また，複数の対象構造物に関して，構造物の諸元が大差がない場合などに，複数の対象構造物の代表値として傾向監視を行う。

(2) 複数の比較する場合

複数の対象構造物のデータを取得することで，複数の中で優劣を判断する。また，環境条件，構造形式，建設年などの項目と合わせて分析することで劣化の地域性の分析を行う。

4.3 対象変状によるセンサ選定の目安

本ガイドラインにおいて、モニタリングで対象とする変状とセンサの例、及び掲載されている編・章番号を表4.3.1に示す。構造単位や構成材料に応じて、変状の中から目的にあったモニタリング対象を選定する。

表 4.3.1 橋梁におけるモニタリング対象とセンサの一覧表

構造単位		モニタリング対象・変状	センサ・方式	編	章	
上部構造	床版	ひび割れ	画像	2編	2章	
		抜け落ち	光ファイバ	2編	3章	
		たわみ	変位計	2編	4章	
		P C床版継ぎ目	光ファイバ	2編	5章	
		振動モード	加速度センサ	2編	6章	
	コンクリート桁	塩害による変状	浮き剥離（温度差）	赤外線画像	3編	2章
			ひび割れ開口変位	動画像	3編	3章
			固有振動数	加速度センサ	3編	4章
			減衰振動	加速度センサ	3編	4章
			たわみ角	加速度センサ	3編	4章
			振動モード	加速度センサ	3編	4章
			桁端部の変位	マグネット式センサ	3編	5章
			付着塩分	薄板モルタル	6編	2章
				ワッペン	6編	2章
			塩分浸透（潜伏期）	模擬鉄筋	6編	3章
			鋼材腐食（進展期）	照合電極（鉛式）	6編	4章
		小型照合電極（小型）		6編	4章	
		補修効果（マクロセル腐食）	照合電極（鉛式）	6編	6章	
	小型照合電極（小型）		6編	6章		
	鋼桁	活荷重たわみ分布	画像（サブリンク*モレ法）	4編	2章	
活荷重たわみ		動画像	4編	3章		
		加速度センサ	4編	4章		
たわみ分布		光ファイバ	4編	5章		
応力		ひずみゲージ	4編	6章		
塗装（濃淡変化）		画像	4編	7章		
支承部		変位計	4編	8章		
斜材ケーブル	ケーブル張力	加速度センサ	5編	2章		
下部構造	基礎	洗堀深さ	航空レーザ測量（ALB）	7編	2章	
		洗堀量，傾斜角	加速度センサ	7編	3章	
		洗堀量	無線加速度センサ	7編	4章	
	橋脚	地震による損傷	無線加速度センサ	7編	5章	
		コンクリート桁，塩害による変状を参照		6編		
のり面・斜面	切土斜面，盛土斜面，自然斜面	斜面表層の傾斜角	MEMS傾斜センサ	8編	2章	
				8編	3章	
		土中水分量	土壌水分計	8編	3章	
		地表面変位	GNSS（RTK測位）	8編	4章	
	GNSS（Static測位）		8編	5章		
	不安定岩塊（転石，浮石）	RMS減衰比	振動計（速度計タイプ）	8編	6章	
卓越周波数		8編		6章		
減衰定数		8編		6章		

第2編 RC床版のモニタリング

1 章	RC床版のモニタリングの位置づけと種類	2-1
1.1	モニタリングの位置づけ	2-1
1.2	モニタリングの種類と役割	2-2
1.2.1	各モニタリングの概要	2-2
1.2.2	モニタリングの種類と目的	2-3
2 章	画像によるひび割れのモニタリング	2-5
2.1	技術の概要	2-5
2.1.1	目的	2-5
2.1.2	画像によるモニタリング手法	2-5
2.1.3	正規化処理の原理	2-7
2.2	モニタリングの方法	2-11
2.2.1	モニタリングの手順	2-11
2.2.2	計画	2-12
2.2.3	機器の選定	2-13
2.2.4	撮影	2-15
2.2.5	正規化処理	2-15
2.2.6	ひび割れの判読	2-16
2.2.7	分布図の作成	2-17
2.2.8	データの保管	2-17
2.2.9	費用の目安	2-19
2.3	結果の評価	2-20
2.4	保守	2-23
3 章	光ファイバによるひび割れのモニタリング	2-27
3.1	技術の概要	2-27
3.1.1	目的	2-27
3.1.2	OTDRによるモニタリングの概要	2-27
3.1.3	計測期間	2-32
3.2	モニタリングの方法	2-33
3.2.1	モニタリングの手順	2-33
3.2.2	計画	2-33
3.2.3	光ファイバ設置	2-35
3.2.4	機器箱設置	2-37
3.2.5	導通確認	2-37
3.2.6	機器設置・調整	2-37
3.2.7	計測および監視	2-38

3.2.8	費用の目安	2-38
3.3	結果の評価	2-39
3.4	保守	2-39
4 章	変位計によるモニタリング	2-43
4.1	技術の概要	2-43
4.1.1	目的	2-43
4.1.2	システムの概要	2-43
4.1.3	計測の期間	2-48
4.2	モニタリングの方法	2-49
4.2.1	モニタリングの手順	2-49
4.2.2	計画	2-50
4.2.3	機器の選定	2-51
4.2.4	変位計の設置	2-55
4.2.5	現場と管理事務所との回線	2-59
4.2.6	データの蓄積	2-59
4.2.7	費用の目安	2-61
4.3	結果の評価	2-62
4.4	保守	2-63
5 章	光ファイバによるプレキャスト床版の接合部のモニタリング	2-64
5.1	技術の概要	2-64
5.1.1	目的	2-64
5.1.2	光ファイバによるモニタリングシステムの概要	2-64
5.1.3	計測期間	2-67
5.2	モニタリングの方法	2-68
5.2.1	モニタリングの手順	2-68
5.2.2	計画	2-68
5.2.3	光ファイバ設置	2-70
5.2.4	端子箱設置	2-72
5.2.5	導通確認	2-72
5.2.6	機器設置・調整	2-72
5.2.7	計測・評価	2-73
5.2.8	費用の目安	2-74
5.3	結果の評価	2-75
5.4	保守	2-75

6 章	振動モードによるモニタリング	2-81
6.1	技術の概要	2-81
6.1.1	目的	2-81
6.1.2	システムの概要	2-81
6.1.3	計測期間	2-85
6.2	モニタリングの方法	2-87
6.2.1	モニタリングの手順	2-87
6.2.2	計画	2-88
6.2.3	機器の選定	2-88
6.2.4	加速度センサおよび機器の設置	2-90
6.2.5	計測	2-93
6.2.6	データの伝送	2-93
6.2.7	データの蓄積	2-95
6.2.8	データの分析	2-96
6.2.9	費用の目安	2-99
6.3	結果の評価	2-101
6.4	保守	2-102
7 章	適用事例	2-104
7.1	光ファイバによるひび割れのモニタリング【2編3章の事例】	2-104
7.2	変位計によるモニタリング【2編4章の事例】	2-108
7.3	光ファイバによるプレキャスト床版の接合部のモニタリング【2編5章の事例】	2-111
7.4	振動モードによるモニタリング【2編6章の事例】	2-116
7.5	FBG 光ファイバによるプレキャスト PC 床版接合部動的ひずみのモニタリング	2-120
添付資料 1：用語集		2-126

1章 RC 床版のモニタリングの位置づけと種類

1.1 モニタリングの位置づけ

RC 床版（図 1.1.1）は、活荷重が直接作用する部材であり、損傷が進行しやすい部材である。また、RC 床版は他の部材と比較して部材厚が薄く鉄筋のかぶりが相対的に小さいことや表面積が大きいことから劣化因子の影響を受けやすい部材である。このように表面積が大きく損傷や劣化が進行しやすい RC 床版の点検・診断には多大な労力を有する。

現状では、点検・診断は、基本的には 5 年に一度の近接目視による定期点検により行われているが、点検者が都度変わる、点検者の判断が入る、近接目視に多大な費用がかかる、明らかに健全な箇所にも同じような点検を行っている等、普遍性、診断の適切性、費用、効率性等に課題も多い。これらに対して現状の定期点検に加えてモニタリング技術を活用することにより、定期点検の課題の一部を解決することができる。例えば、普遍性についてはデジタルカメラによる画像撮影により点検者が変わることによる影響を極力排除することが出来る、あるいは、診断の適切性については加速度センサにより RC 床版の損傷程度をよりの確に評価することが出来るなどである。また、供用に対する安全性が問題になるような損傷状態においては常時監視が必要になるが、このような場合にもモニタリング技術が有効である。このように、定期点検に加えてモニタリング技術を活用することや常時監視にモニタリング技術を用いることにより、合理的な RC 床版の維持管理が可能となる。本編は、RC 床版の維持管理に適した 5 つのモニタリング技術を示すものである。

なお、本編では、RC 床版のモニタリングに対して、モニタリング技術の選定から活用方法（結果の評価）まで一連の内容について示すが、より詳細な情報（例えば、データの蓄積等）については、別途設けた編を参照するようにした。

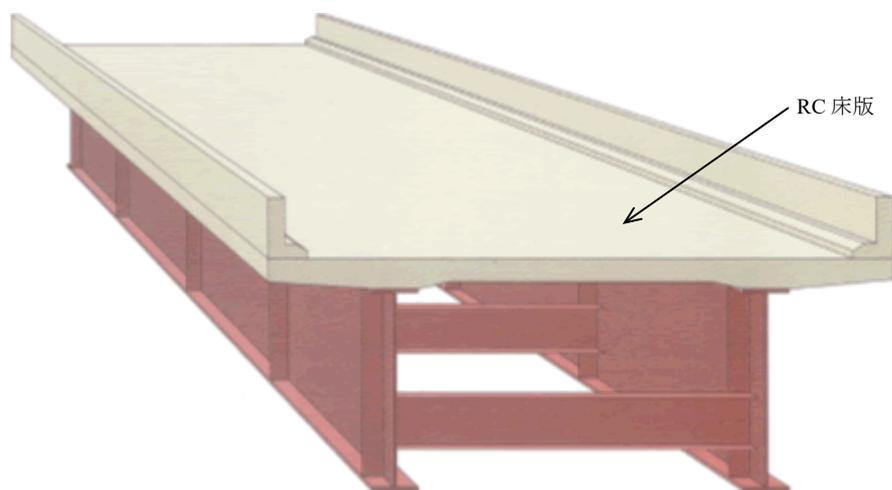


図 1.1.1 RC 床版

1.2 モニタリングの種類と役割

1.2.1 各モニタリングの概要

(1) 画像によるひび割れのモニタリング

画像によるひび割れのモニタリングは、ひび割れの現状把握、その劣化の進行度などに関するモニタリングを行うことにより損傷状況を評価するものである。画像によるモニタリング手法では、画像の正規化処理を行うことにより、計測者の技量に左右されない客観的なデータが取得できるため、モニタリング結果の正確性や品質向上を図ることができる。また、現場の作業環境を改善し、室内作業のウェイトを高めることで作業の効率化とコストダウンが可能になる。

(2) 光ファイバによる抜け落ちのモニタリング

光ファイバによる抜け落ちのモニタリングは、床版下面に網羅的に光ファイバを敷設して抜け落ち挙動の初期の兆候であるひび割れの目違いを常時監視するものである。ひび割れに目違いが生じるとそれに追従して光ファイバが屈曲し光ファイバの“光の透過量（単位 [dB]）”が変化する。この光の透過量をリアルタイムに計測することで抜け落ち挙動の発生やその位置を迅速に管理者へ通知して交通規制などの適切な措置へフィードバックすることにより、通行の安全性を確保するものである。

(3) 変位計によるたわみのモニタリング

変位計によるたわみのモニタリングは、抜け落ちが心配される床版の下面に変位計を設置し、たわみの挙動を常時監視するものである。床版のたわみは、左右の主桁に載っている床版単体の変位のことであり、床版変位と左右主桁変位との相対差である。そこで左右の主桁間に不動梁を敷設し、その梁に変位計を設置し床版のたわみを検出する。このたわみの傾向変化を確認することや閾値を設定することで抜け落ち挙動の発生を迅速に管理者へ通知して交通規制などの適切な措置へフィードバックすることにより、通行の安全性を確保するものである。

ここで、安全性の確保については、二つの技術があるが、「光ファイバによる抜け落ちのモニタリング」は危険な箇所が特定しにくい場合において面的に定性的な検知に、一方、「変位計によるたわみのモニタリング」は危険な箇所が特定できている場合において点的に定量的な検知にそれぞれ適しているという特徴を有する。従って、モニタリングの目的に応じて使い分け、もしくは併用を検討して使用することになる。

(4) 光ファイバによるプレキャスト床版接合部のモニタリング

光ファイバによるプレキャスト床版接合部のモニタリングは、床版の下面に光ファイバを敷設して橋軸方向全長に渡る床版のひずみの変化を定期的に測定することにより、初期の変状の発生位置を把握するものである。プレキャスト床版では特に、現場打ちとなる接合部に変状が出る可能性が高く、また、接合部は橋軸方向に連続して複数存在することから、接合部での変状の発生やその位置を効率的にモニタリングすることは、維持管理において有用である。

(5) 振動モードによるモニタリング

振動モードによるモニタリングは、複数の加速度センサを RC 床版の底面に設置し、車両が走行した際の振動応答から橋梁固有の振動モードを推定するものである。振動モードを推定することにより、剥離や抜け落ちなど変状に伴う構造性能の変化を非破壊で評価でき、管理者の診断の補助として活用するものである。

1.2.2 モニタリングの種類と目的

表 1.2.1 は、「第 1 編 3 章モニタリングの意義」において示されているモニタリングの目的と本編で示す各モニタリングとの対応をまとめたものである。モニタリングの位置づけである「点検の補助」「診断の補助」「補修補強の効果の確認」「緊急時の対応の補助」のそれぞれに対して適切なモニタリングを示している。管理者は、維持管理におけるモニタリングの役割に基づいてモニタリングを選定する。

表 1.2.1 モニタリングの種類と目的

対象となる損傷	モニタリングの種類	モニタリングの目的※								
		点検の補助		診断の補助					補修補強の効果の確認	緊急時の対応の補助
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
ひび割れ	画像によるひび割れのモニタリング (定期計測)		○	○						
抜け落ち	光ファイバによる抜け落ちのモニタリング (常時計測)						○			
たわみ	変位計によるたわみのモニタリング (常時計測)						○			
目開き	光ファイバによるプレキャスト床版 接合部のモニタリング (定期計測)	○		○						
構造性能の低下	振動モードによるモニタリング (定期計測)				○	○				

※モニタリングの目的の凡例説明

- A : 何らかの異常があった箇所を把握する（事象は特定できなくてよい）。
- B : 健全性を確認している範囲を把握する。
- C : 予防保全対策をとるべき状態に達したことを把握する。
- D : 定量的データを取得し、比較する。
- E : 健全度評価のための定性的、定量的データを取得する。
- F : 通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達したことを確認する。
- G : 補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認する。
- H : 対策の効果、持続性を確認する。
- I : 落橋の危険が予測される箇所を把握する。

図 1.2.1 は、RC 床版の維持管理におけるモニタリングの役割と種類について体系的に示したものである。現状では維持管理のそれぞれのフェイズ（健全度の状態）や目的に適した 5 つの技術がある。ここで示す 5 つの技術は、現段階で社会実装可能なものであり、第 1 編で示したモニタリングシステムの活用に期待する効果が見込める技術を選定している。技術の詳細は 2 章以降に記載するが、本節では 5 つの技術が何を目的に開発されたものかについて以下に簡単に触れることとする。健全度Ⅰ～Ⅲの期間における現状の点検を補助できるモニタリング技術として記録保存の合理化を目的とした「画像によるひび割れのモニタリング（第 2 章）」、健全度Ⅱ（後期）～Ⅲの期間における安全性確保（床版抜け落ちの常時監視）を目的とした「光ファイバによる抜け落ちのモニタリング（第 3 章）」および「変位計によるたわみのモニタリング（第 4 章）」、健全度Ⅰ～Ⅱの期間におけるプレキャスト床版の接合部の予防保全を目的とした「光ファイバによるプレキャスト床版の接合部のモニタリング（第 5 章）」、そして、健全度Ⅱ～Ⅲ（初期）の期間における高度な診断による評価を目的とした「振動モードによるモニタリング（第 6 章）」の 5 つの技術である。ここで、安全性の確保については、二つの技術があるが、光ファイバは危険な箇所が特定しにくい場合において面的に定性的な検知に、一方変位計は危険な箇所が特定できている場合において点的に定量的な検知にそれぞれ適しているという特徴を有する。従って、モニタリングの目的に応じて使い分け、もしくは併用を検討して使用することになる。

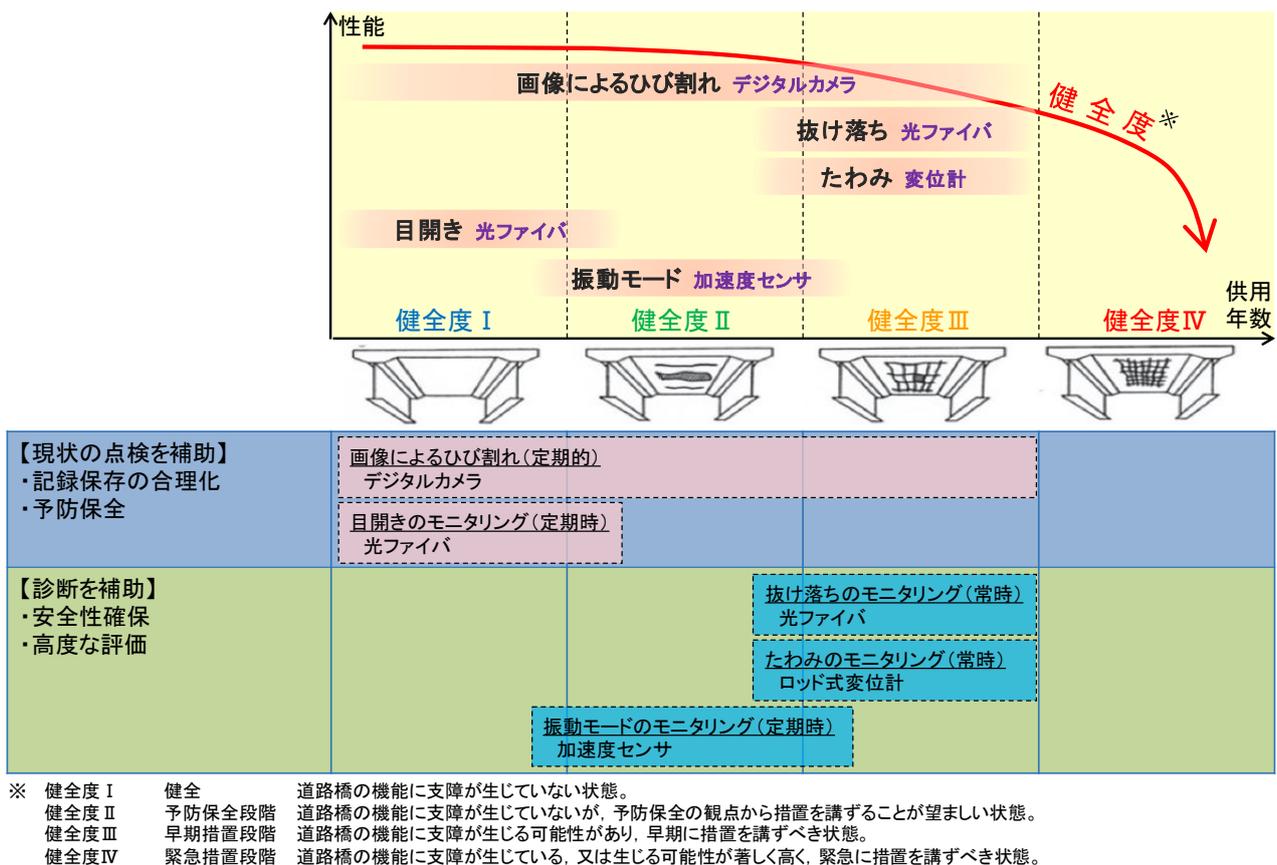


図 1.2.1 RC 床版の維持管理におけるモニタリングの種類と役割

2章 画像によるひび割れのモニタリング

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

画像による RC 床版のひび割れのモニタリングは、維持管理サイクルにおける管理者のニーズに応じて、ひび割れの現状把握、その劣化の進行度などに関するモニタリングを行うことにより損傷状況を評価するものである。

画像によるモニタリング手法（以下「本手法」）では、画像の正規化処理を行うことにより、計測者の技量に左右されない客観的なデータが取得できるため、モニタリング結果の正確性や品質向上を図ることができる。また、現場の作業環境を改善し、室内作業のウェイトを高めることで作業の効率化とコストダウンが可能になる。

2.1.2 画像によるモニタリング手法

(1) 本手法の特徴

現行手法と本手法との違いを図 2.2.1 のフローチャートで示す。現行手法と比較して足場や点検車の使用を抑制できるだけでなく、現地での点検作業の効率化と安全性の向上、位置精度を保持したひび割れ分布図等の作成、過去のデータとの比較による客観的なモニタリングが可能になることが主な特徴である。

(2) 本手法で考慮した技術的な仕様

「管理者のニーズ」および「橋梁定期点検要領（平成 31 年 3 月）」^りで定める事項をふまえ、画像によるモニタリングに求められる技術的な仕様は以下のとおりである。

1) データの客観性の確保

- ・誰が撮影し計測しても見落としや判読結果にバラツキ等が無く、データの客観性が確保されていること
- ・撮影手法や計測技術が簡便で分かりやすいこと
- ・地元関連企業が導入可能で使いやすいこと

2) 精密なモニタリングにも耐えうる精度の確保

- ・画像は位置座標を持ち、異なる 2 時期のひび割れの変化を正確に把握できること
- ・閾値設定などの数値解析に適用できるデータであること

3) 点検補助としての機能装備

- ・上向き姿勢によるチョーキング等の苛酷な作業環境を改善すること
- ・高所作業等の安全性を向上すること
- ・橋梁定期点検要領^りで定めている近接目視の現地作業を室内作業で代替することで点検費用を縮減すること

4) 計測した画像や解析したデータがシステムで容易に運用

- ・大容量の画像データであっても、容易に検索や閲覧等が行えること
- ・画像の格納方式や取り出し方などをシステム上で工夫できること

前述した技術仕様をふまえ、図 2.1.1 に現行手法と画像によるモニタリング手法の作業内容を示す。

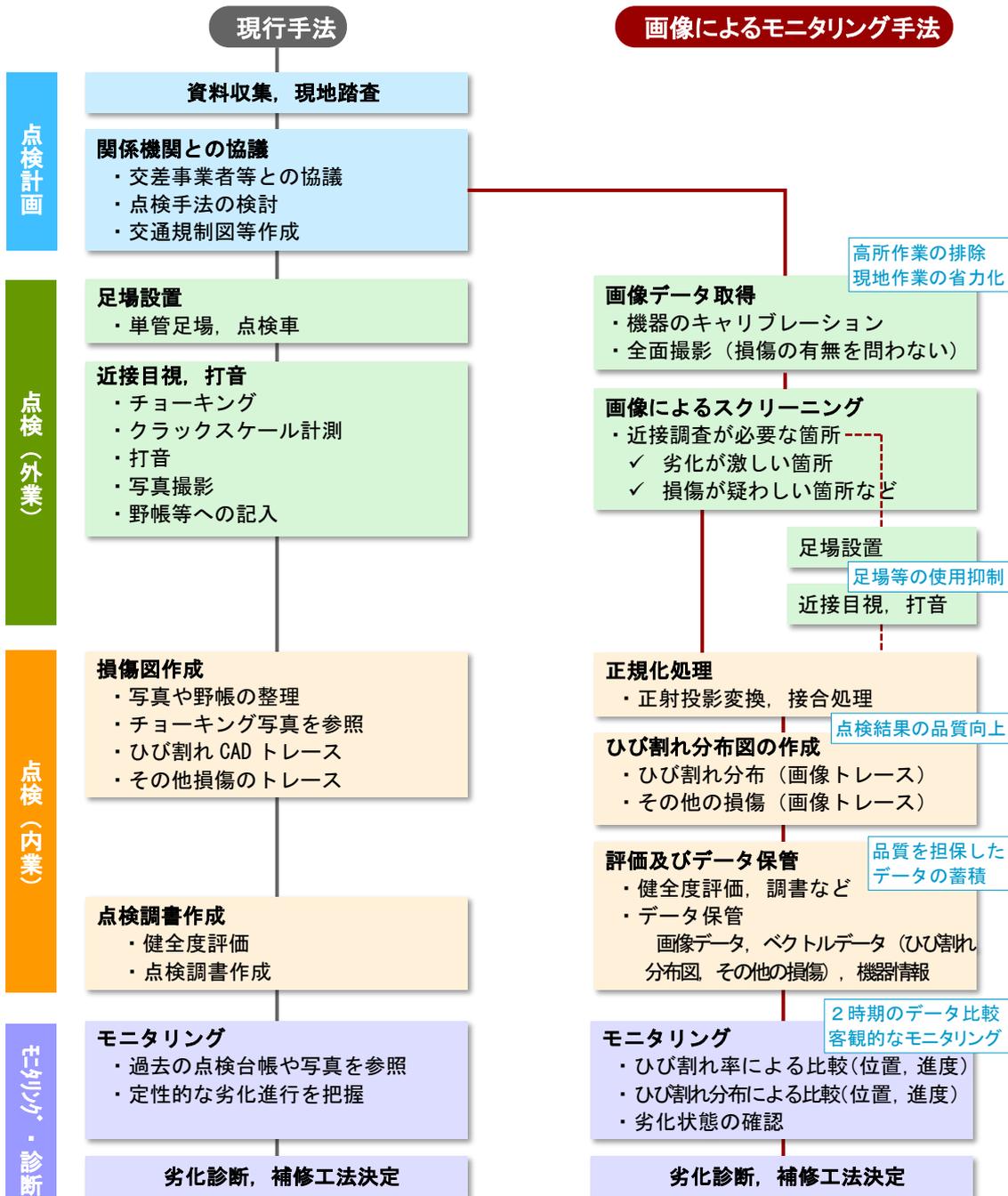


図 2.1.1 現行手法と画像によるモニタリング手法の作業内容の比較

2.1.3 正規化処理の原理

本手法の中で特に重要な技術は、画像を正規化する処理（中心投影画像から正射投影画像に変換する処理）である。主観的あるいは感覚的なモニタリングは、歪を含んだ無処理の画像や簡易的に処理した画像でも可能である。しかし、数値化する等の客観性のあるモニタリングに供するためには、撮影した画像を正規化し、座標原点を明確にした平面上に画像を展開できる必要がある。以下に、正規化処理について解説する。

(1) 手法の概要

1) カメラの画像は中心投影画像であり正確な計測が不可能

中心投影画像は画角の端部に向かって歪が大きくなる。また「カメラの傾き」「被写体（床版）の傾き」が加わり、さらに歪が拡大する。よって、撮影したままの画像には歪があり、画像の接合ができず計測もできない（図 2.1.2）。

2) 被写体を一定方向（一般的に鉛直方向）に正射した画像に変換

画像に写る標定点（写真上の位置と床版上の位置を関係付けるための基準となる点）をもとに、中心投影画像を正射投影画像に変換（正規化）する。この画像を接合し、ひび割れを判読するための計測用画像とする（図 2.1.3）。

本手法については、理論やプログラムが公開されているので参照されたい。

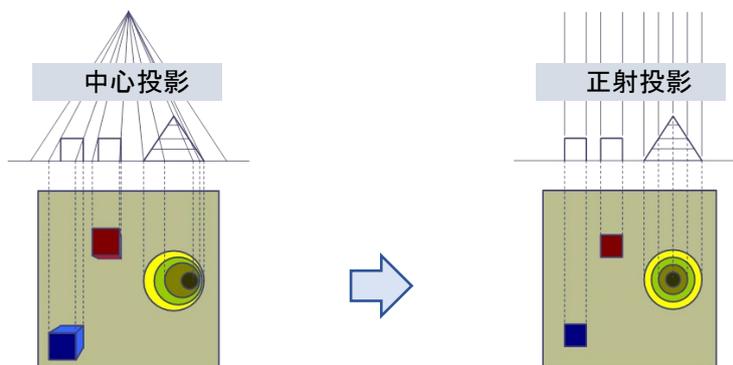


図 2.1.2 正規化処理の概念図

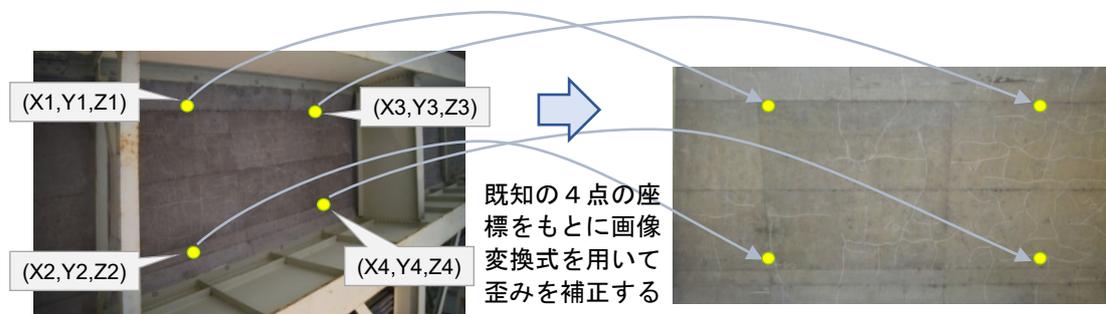


図 2.1.3 標定点を用いた正規化処理

(2) 標定点

正規化処理を行うためには、写真上に既知の3次元座標を持つ4つ以上の標定点（写真上の位置と床版上の位置を関係付けるための基準となる点）が必要である。標定点は、できる限り写真の四隅に配置することが望ましいが、横構や対傾構等がある場合は、これらの障害物を避けて配置する。

床版に標定点を与える方法として、以下に代表的な4つの例を示す。これ以外にも測量的な手法や画像照射などの手法も考えられるが、どのような方法にするかは計測を行う専門業者と事前に協議する。

〔方法1〕 床版にマーカを設置し、TS（トータルステーション）測量などでマーカの3次元座標を取得する



図 2.1.4 マーカの設置例

〔方法2〕 レーザスキャナによる3次元測量成果と写真を重ね合わせ、床版上の特徴的な点（コンクリート打設時の型枠の跡、ハンチの隅等）の3次元座標を取得する

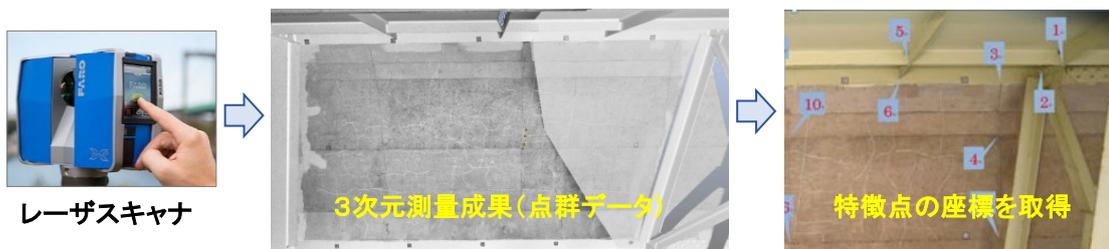


図 2.1.5 特徴的な点の座標取得例

〔方法3〕 床版のひび割れ撮影用の特殊な標定点照射装置（カメラと連動し、標定点の照射と標定点の三次元座標を取得する装置）を使う



図 2.1.6 標定点照射装置の例

〔方法4〕 カメラとレーザが一体となった標定図形照射装置（レーザ光で作成した正三角形を床版に平行投影し、床版と三角形を一枚の画像に撮像する装置）を用いる。標定図形の三次元座標を取得する方法は付録Iに示す



図 2.1.7 標定図形照射装置の例

(3) 正規化と簡易補正の違い

画像補正を施したと紹介されるスマートフォン等の画像変換は、簡易的に画像を補正する方法（画像の縦横の比率のみを調整する方法）が用いられることが多い（図 2.1.8）。この方法でもひび割れ分布を把握したり、2時期の画像を感覚的に比較したりすることは可能である。しかし、以下のような問題点があることを認識しておく必要がある。

- ・ひび割れが判読できる画像を取得するには、床版1パネルでも複数に分割して撮影する必要があるが、簡易補正の画像では接合が困難である
- ・同一のひび割れ幅であっても、画像上の位置によって判読結果が異なる可能性がある
- ・画像上の位置精度が低いため、ひび割れ形状の変化やひび割れ率などを正確に捉えることができない



(画像上でピクセル数等から各辺の長さを推定, $a=c$, $b=d$ になるように縦横比を調整する)

図 2.1.8 簡易的な画像補正の手法

2.2 モニタリングの方法

ここでは、床版下の地上にカメラ等を設置し、画像により床版下面のひび割れ等の損傷や経年変化を把握するモニタリング手法について説明する。

2.2.1 モニタリングの手順

画像によるモニタリングの基本的な手順は、図 2.2.1 のとおりである。



図 2.2.1 画像による床版のモニタリングの手順

2.2.2 計画

(1) カメラ・レンズの選択と撮影範囲

橋梁定期点検要領では、ひび割れ分布図には 0.2mm 以上を表示することが求められている。幅 0.2mm 以上のひび割れを判読するためには、実証から得た知見では 0.1mm 程度のひび割れを識別できる画質を確保する必要がある。

床版下面までの距離が異なるいくつかの橋梁でレンズを変えて実証した知見から、0.1mm のひび割れを識別し、0.2mm 以上のひび割れを判読するには、0.4mm/ピクセルより高い解像度で撮影することを推奨する。

※ひび割れの「識別」とはひび割れの形状が認識できること、ひび割れの「判読」とはひび割れの形状と幅を認識できることを言う。

表 2.2.1 は、レンズから床版までの距離による「焦点距離別の解像度」と「撮影できる床版下面の範囲」を示したものである。参考にしたカメラは、市販カメラの最上位機種に相当する機種（画素サイズ $\mu=4.14 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ）である。

使用するカメラとレンズは、このように撮影条件を整理した上で選定する。

表 2.2.1 床版までの距離による焦点距離別解像度と撮影可能範囲（例）

床版までの距離(m)	解像度(mm/ピクセル)				撮影可能範囲[幅(m) * 高さ(m)]							
	f = 35mm	f = 50mm	f = 85mm	f = 300mm	f = 35mm		f = 50mm		f = 85mm		f = 300mm	
					幅	高さ	幅	高さ	幅	高さ	幅	高さ
0.5	0.06	0.04	0.02	0.01	0.5	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0
1.0	0.12	0.08	0.05	0.01	1.0	0.6	0.7	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1
1.5	0.18	0.12	0.07	0.02	1.5	0.9	1.1	0.6	0.6	0.4	0.2	0.1
2.0	0.24	0.17	0.10	0.03	2.1	1.2	1.4	0.8	0.8	0.5	0.2	0.1
2.5	0.30	0.21	0.12	0.03	2.6	1.5	1.8	1.0	1.1	0.6	0.3	0.2
3.0	0.36	0.25	0.15	0.04	3.1	1.7	2.2	1.2	1.3	0.7	0.4	0.2
3.5	0.41	0.29	0.17	0.05	3.6	2.0	2.5	1.4	1.5	0.8	0.4	0.2
4.0	0.47	0.33	0.19	0.06	4.1	2.3	2.9	1.6	1.7	1.0	0.5	0.3
4.5	0.53	0.37	0.22	0.06	4.6	2.6	3.2	1.8	1.9	1.1	0.5	0.3
5.0	0.59	0.41	0.24	0.07	5.1	2.9	3.6	2.0	2.1	1.2	0.6	0.3
5.5	0.65	0.46	0.27	0.08	5.7	3.2	4.0	2.2	2.3	1.3	0.7	0.4
6.0	0.71	0.50	0.29	0.08	6.2	3.5	4.3	2.4	2.5	1.4	0.7	0.4
6.5	0.77	0.54	0.32	0.09	6.7	3.8	4.7	2.6	2.8	1.6	0.8	0.4
7.0	0.83	0.58	0.34	0.10	7.2	4.1	5.0	2.8	3.0	1.7	0.8	0.5
10.0	1.18	0.83	0.49	0.14	10.3	5.8	7.2	4.1	4.2	2.4	1.2	0.7
15.0	1.78	1.24	0.73	0.21	15.4	8.7	10.8	6.1	6.4	3.6	1.8	1.0
20.0	2.37	1.66	0.97	0.28	20.6	11.6	14.4	8.1	8.5	4.8	2.4	1.4
25.0	2.96	2.07	1.22	0.35	25.7	14.5	18.0	10.2	10.6	6.0	3.0	1.7
30.0	3.55	2.49	1.46	0.41	30.9	17.4	21.6	12.2	12.7	7.2	3.6	2.0
35.0	4.14	2.90	1.71	0.48	36.0	20.3	25.2	14.2	14.8	8.4	4.2	2.4
40.0	4.74	3.31	1.95	0.55	41.1	23.2	28.8	16.3	16.9	9.6	4.8	2.7

 0.1 mmのひび割れ幅を識別し、0.2mm のひび割れ幅と形状を判読できる範囲

- 使用カメラ仕様 : 画素サイズ $\mu=4.14 \mu\text{m}/\text{pixel}$
- 撮像素子サイズ : 約 36.0mm×24.0mm
- 焦点距離 (f) : 35, 50, 85, 300mm の4種類のレンズ

(2) 撮影角度

なるべく床版の直下で撮影角度が小さくなるように計画する。撮影角度が大きくなると、床版下面の解像度が低くなり、撮影範囲全体のピントも合わせづらくなる。実証による知見では、撮影角度が30度以上になると所定の解像度が得にくいので注意する。

(3) 撮影の障害物

対傾構、横構、添架物、検査路の有無や設置状況をふまえ、なるべくこれらの部材を避けて撮影できるように撮影位置、撮影角度、分割撮影等を計画する。検査路がある場合は検査路上から撮影し、それ以外は地上から撮影する。この場合、両者はカメラから床版までの距離が異なるため、適切な焦点距離のレンズを使用する。

また、横構や添加物は鉛直方向だけで撮影すると、その投影部分の画像は得られない。その部分に重大な劣化損傷箇所等がある場合は、斜めからの撮影を加えるなど欠損部分を少なくする工夫が必要である。

(4) 照度

照度が不足する場合は照明装置を使う。地面から床版までの距離、撮影対象の周辺環境、撮影時間等を顧慮して、照明装置の要否、照明装置の種類、台数等を計画する。

2.2.3 機器の選定

(1) 撮影カメラの仕様

1) カメラ

カメラの価格や操作性を考慮すると、工業用等の特殊なカメラではなく一眼レフカメラを選定する。

2) 撮像素子のサイズ

撮像素子は、レンズから入ってきた光を電気信号に変換する部品である。撮像素子のサイズが大きいほど一度に取り入れられる光量が多く、色の再現性、感度、ダイナミックレンジ（明暗差の対応範囲）などの面で有利となり、より高質な画像を得ることができる。

撮像素子の種類とサイズの関係を図2.2.2に示す。床版の撮影では、撮影位置により光量が不足したり、光の当たり方に差が出たりすることが想定される。よって、ダイナミックレンジの大きい35mmフルサイズの撮像素子のカメラを使用する。

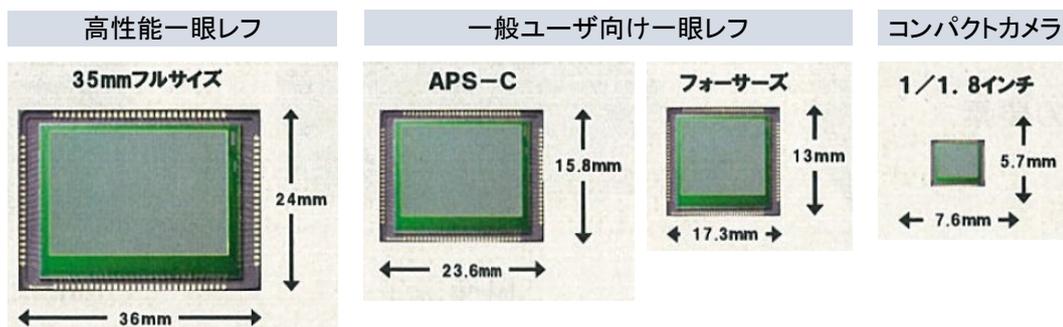


図 2.2.2 撮像素子の種類と搭載しているカメラの例³⁾

3) 画素数

実証に使用したカメラ（A社製）と同等のスペックを持つ主なカメラは、表 2.2.2 のとおりである。解像度が最も高い A 社製（5,060 万画素）を使用しても、床版 1 パネル（大きさ 5m×3m 程度）を 1 枚で撮影すると解像度が不足し、どのカメラでも分割撮影が必要となる。この場合、解像度が高いカメラほど撮影する枚数は少なくなるため、表 2.2.1 のような諸元を整理してカメラとレンズを選定する。

表 2.2.2 高解像度カメラの種類と画素数の例

カメラ種別	撮像素子サイズ, 画素数
A 社製	• 撮像素子 35mm フルサイズ • 有効画素数 5,060 万画素 • 記録画素数 8,688×5,792
B 社製	• 撮像素子 35mm フルサイズ • 有効画素数 3,635 万画素 • 記録画素数 7,360×4,912
C 社製	• 撮像素子 35mm フルサイズ • 有効画素数 3,640 万画素 • 記録画素数 7,360×4,912
D 社製	• 撮像素子 35mm フルサイズ • 有効画素数 4,240 万画素 • 記録画素数 7,952×5,304

4) レンズ

レンズは、単焦点レンズを使用する。ズームレンズは、撮影時の正確な焦点距離が記録されないため使用しない。

(2) 標定点の設置

標定点は、中心投影画像を正射投影画像に変換するために、写真上の位置と床版上の位置を関係付けるための基準にする点である。標定点は、橋梁の種類や撮影条件等を考慮して適切な設置方法を選定する。(詳細については 2.1.3 (2)を参照)

(3) 照明

照明の台数は、撮影範囲を均等に照らすために2台以上が適切である。照明の電源は、検査路上での可搬性を考慮し、コンパクトで軽量のものを選定する。照明の種類は、バッテリーで長時間使用でき消費電力の少ないLEDライトが望ましい。

(4) レンズのキャリブレーションパラメータ取得

通常、レンズには歪みが含まれており、その歪みはレンズの個体ごとに異なる。撮影した画像からレンズの歪みを除去するためには、レンズの歪みを補正するための係数(キャリブレーションパラメータ)を事前に求めておく必要がある。

キャリブレーションパラメータは、寸法が明確になっている対象物を撮影(キャリブレーション撮影)し、真値との差異を解析することで求められる。キャリブレーションパラメータは、レンズごとに1度取得すればよい。

2.2.4 撮影

高解像度のカメラであっても床版1パネルを1枚で撮影すると解像度が不足するため、撮影は分割して行う。この場合、後続する正規化処理の画像接合の精度を高めるため、隣り合う撮影範囲が重複するように撮影し、撮影範囲の幅と長さの重複率はそれぞれ30%以上とする。

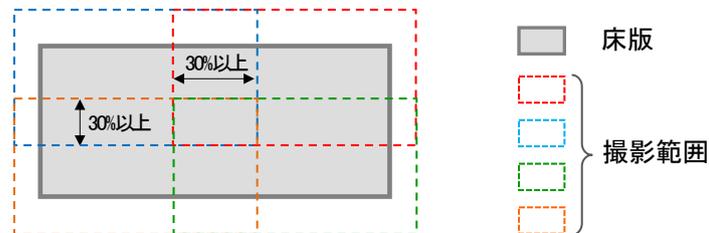


図 2.2.3 重複率を確保した分割撮影の例

2.2.5 正規化処理

(1) レンズ歪の除去

2.2.3(4)で求めたキャリブレーションパラメータを使って、使用したレンズによる画像の歪みを除去する。

(2) 正射投影画像への変換

標定点の3次元座標を用い、撮影後の中心投影画像を正射投影画像に変換する。(詳細については、2.1.3(1)を参照)

(3) 接合

2.2.5 (2)で正射投影画像に変換した画像を接合して床版1パネル単位にする。

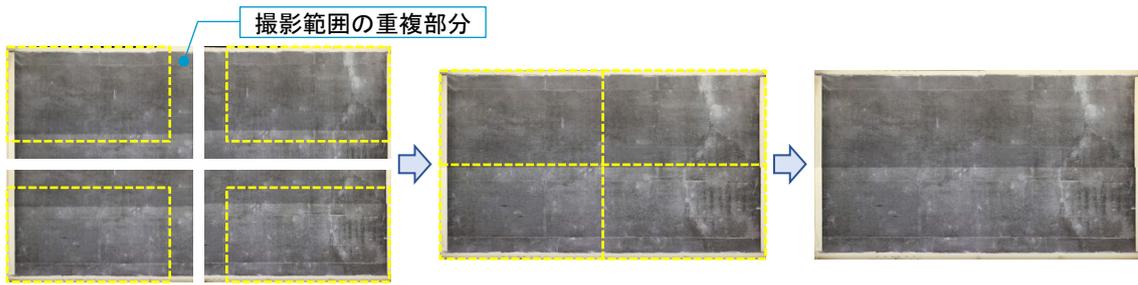


図 2.2.4 分割撮影した画像の接合

2.2.6 ひび割れの判読

ひび割れの判読は、2.2.5(3)で接合した画像データをもとにひび割れの幅と形状を判読する作業である。本作業は、CADソフト等を使用するのが効率的である。例えば、画像データ上に仮想的なクラックスケールを重畳表示し、ひび割れ幅を判読する。幅が0.2mm以上のひび割れについて形状をトレースしてひび割れ判読データ（ベクトルデータ）を作成する。必要に応じて、ひび割れ判読データに幅の情報を付与する。



図 2.2.5 CADを用いたひび割れ判読の例

現在、ひび割れの判読の自動化については、多くの企業や研究所で研究・開発が行われている。ひび割れの判読性能が高いソフトウェアが使用できれば、トレース作業の軽減がはかれる。ひび割れの自動判読手法の例を付録Ⅱに示す。

2.2.7 分布図の作成

2.2.5, 2.2.6 の作業で 1 パネル毎の床版の画像データとひび割れ判読データが得られた。この画像は図 2.2.6 に示すように画像だけでも 0.2mm 以上のひび割れが十分に認識でき、モニタリングデータとしても、そのまま使用できる。

ひび割れ分布図は、上記のデータをより分かり易く加工するものである。2.2.6 の作業結果から得られたひび割れ判読データ（ベクトルデータ）を、床版の写真（画像データ）と重ね合わせて平面的に表示できるようにし、床版 1 パネル単位で作成する（図 2.2.6）。なお、張り出し部等は、床版 1 パネルと同等のサイズに分割して作成する。

ひび割れ分布図は、どのパネルの分布図か識別できるように、パネルに番号を付与したインデックスマップを介して管理する。

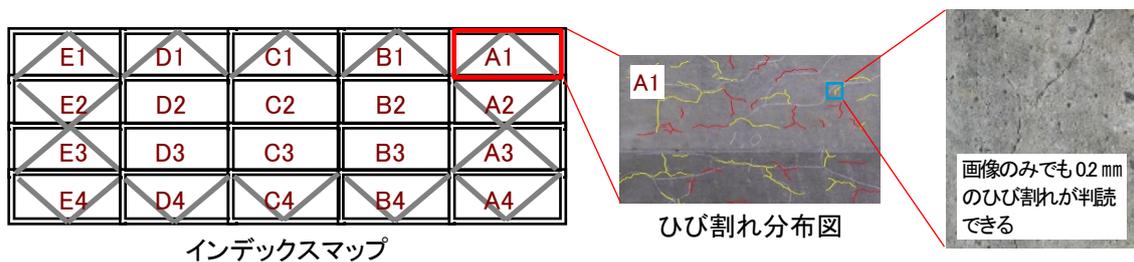


図 2.2.6 ひび割れ分布図の例

2.2.8 データの保管

(1) 保管するデータ

現状のひび割れ状況を確認し、将来のひび割れの変化をモニタリングするために以下のデータを保管する。

- ① 撮影データ
- ② 正射投影データ
- ③ 正射投影データの四隅の座標値
- ④ ひび割れ判読データ
- ⑤ その他損傷データ
- ⑥ 標定点データ（3次元座標データ）
- ⑦ レンズキャリブレーションパラメータ

(2) データの保管単位

2.2.8(1)で示した各データは、ひび割れ分布図と同様にデータの位置が特定できるように、インデックスマップと関連付けて管理する。張り出し部等は、床版1パネル程度のサイズに分割して保管する。

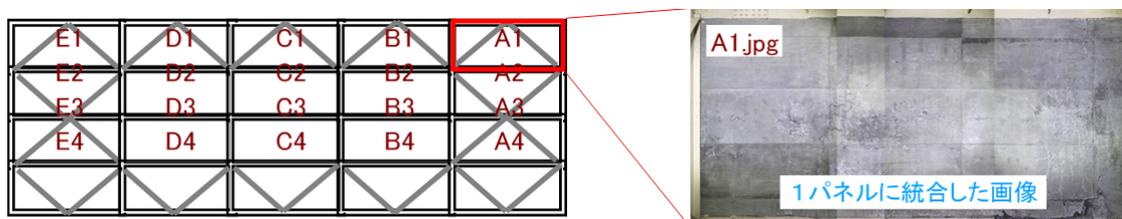


図 2.2.7 インデックスマップによる画像データの保管

(3) データのフォーマットと容量

画像データのフォーマットは、ファイルサイズを小さくするため JPEG 形式とし、圧縮率は標準圧縮または低圧縮とする。ベクトルデータのフォーマットは、DXF 形式または SFX 形式とする。その他の標定点データやレンズキャリブレーションパラメータ等のフォーマットは、テキスト形式とする。

表 2.2.3 データのフォーマットと容量

名称	種類	フォーマット	容量(参考)
① 撮影データ	画像データ	JPEG	60MB
② 正射投影データ	画像データ	JPEG	40MB
③ 正射投影データの四隅の座標値	テキストデータ	TXT	1KB
④ ひび割れ判読データ	ベクトルデータ	DXF(DWG), SFX	20KB
⑤ その他損傷データ	ベクトルデータ	DXF(DWG), SFX	1KB
⑥ 標定点データ(3次元座標データ)	テキストデータ	TXT	1KB
⑦ レンズキャリブレーションパラメータ	テキストデータ	TXT	1KB

*データ容量は床版1パネル当たりの参考値であり、橋梁の種類や規模等によって異なる。

2.2.9 費用の目安

(1) 試算のモデル橋梁

概算経費は、図 2.2.8 に示す橋梁の 1 支間分で試算した。

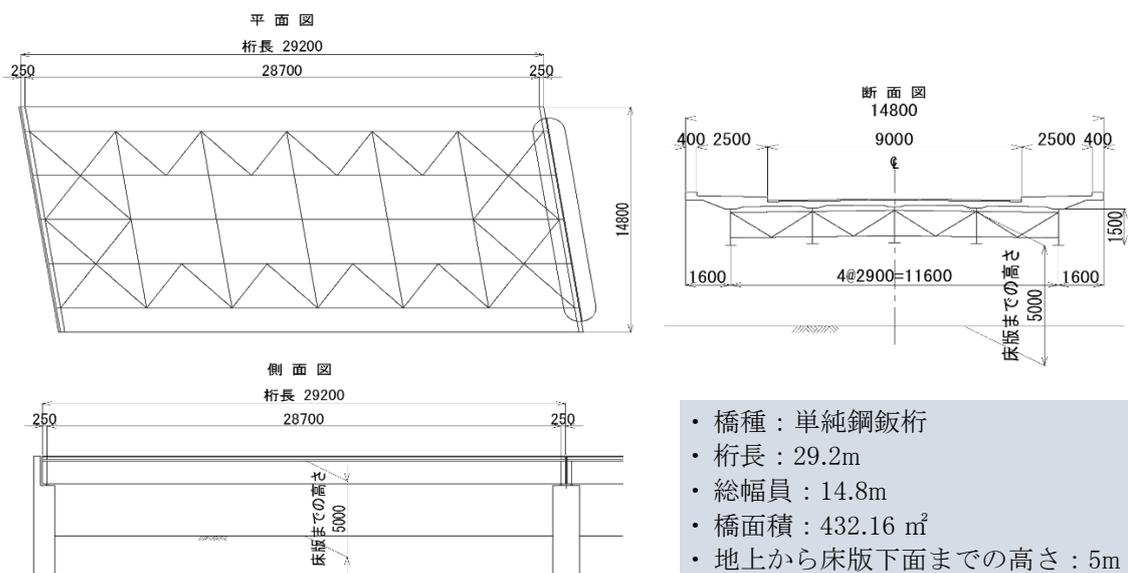


図 2.2.8 概算経費の試算のためのモデル（1 支間）

(2) 概算費用

本手法を用いた点検費用について、図 2.2.8 のモデルをもとに表 2.2.4 に示す概算費用(直接費)を試算した。本手法による橋面積 1 m²当たりの点検費用は、約 250 円となった。一方、同じモデルで足場設置を行う現行手法による試算では、橋面積 1 m²当たりの点検費用は約 460 円となった。したがって、本手法では 4 割程度のコスト縮減が期待できると思われる。

表 2.2.4 本手法による概算費用（直接原価）

経費区分	費用	備考
直接原価	107,000 円	
直接人件費（現地作業）	45,000 円	撮影
直接人件費（屋内作業）	45,000 円	正規化処理, ひび割れ判読, 分布図の作成
直接経費（機械経費）	17,000 円	
橋面積 m ² 当たりの費用	約 250 円	

2.3 結果の評価

本手法で取得した画像データやひび割れ分布図データは正規化され、同一座標上で管理されている。したがって、2時期のデータを同じ座標軸上で比較検証することができる。これが本手法の最大の特徴であり、モニタリング評価については以下の手法が考えられる。

- 〔手法1〕 2時期の画像の比較で変状を把握する
- 〔手法2〕 2時期のひび割れ分布図の比較により変状や進行を把握する
- 〔手法3〕 所定のメッシュ分割を行い、その中のひび割れ密度から健全度を評価する

(1) 2時期の画像による比較〔手法1〕

2時期の画像を比較検証することで、ひび割れ、漏水、錆汁、遊離石灰などの劣化変状をモニタリングする。大きな変化があった場合は、この画像をもとに詳細調査を実施する。



図 2.3.1 2時期の画像による比較例

(2) 2時期のひび割れ分布図による比較〔手法2〕

1) 定性的評価

2時期のひび割れ分布図（画像データ、ひび割れ判読データ）を重ねてその変化を計測し、計測した変化量から劣化の度合いを把握する。



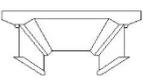
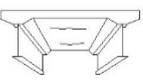
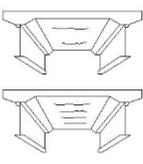
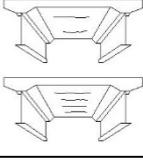
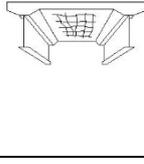
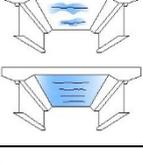
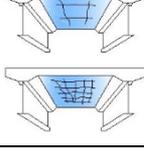
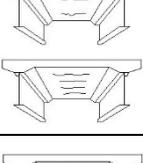
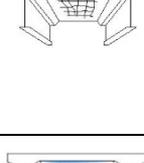
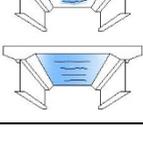
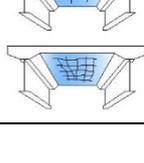
図 2.3.2 2時期のひび割れ分布図による比較例

2) ひび割れ形状から健全度を評価

橋梁定期点検要領¹⁾では、ひび割れ分布の形状特性から損傷程度の評価区分を提示している（表 2.3.1）。この表では「ひび割れが一方方向か二方向か」「漏水・遊離石灰の有無」をベースにして損傷状態を a～e に区分している。

健全性の診断は、上記の評価などを参考にして行うことも可能である。管理者によっては健全度の目安を定めている場合もあるため、管理者とそれらの活用を協議し評価することが望ましい。

表 2.3.1 ひび割れ分布の形状特性と損傷程度の評価¹⁾

状態	1 方向ひび割れ		2 方向ひび割れ			
	性状	ひび割れ	漏水・遊離石灰	性状	ひび割れ	漏水・遊離石灰
a		損傷なし	なし	—		
b		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは主として1方向のみ 最小ひび割れ間隔は概ね1m以上 最大ひび割れ幅は0.05mm以下（ヘアークラック程度） 	なし	—		
c		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは主として1方向のみ ひび割れ間隔は問わない ひび割れ幅は0.1mm以下が主（一部には0.1mm以上も存在） 	なし		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは格子状 格子の大きさは0.5m程度以上 ひび割れ幅は0.1mm以下が主（一部には0.1mm以上も存在） 	なし
d		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは主として1方向のみ ひび割れ間隔は問わない 最大ひび割れ幅は0.2mm以下が主（一部には0.2mm以上も存在） 	なし		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは格子状 格子の大きさは0.5m～0.2m ひび割れ幅は0.2mm以下が主（一部には0.2mm以上も存在） 	なし
		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは主として1方向のみ ひび割れ間隔は問わない 最大ひび割れ幅は0.2mm以下が主（一部には0.2mm以上も存在） 	あり		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは格子状 格子の大きさは問わない ひび割れ幅は0.2mm以下が主（一部には0.2mm以上も存在） 	あり
e		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは主として1方向のみ ひび割れ間隔は問わない ひび割れ幅は0.2mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる 	なし		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは格子状 格子の大きさは0.2m以下 ひび割れ幅は0.2mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる 	なし
		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは主として1方向のみ ひび割れ間隔は問わない ひび割れ幅は0.2mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる 	あり		<ul style="list-style-type: none"> ひび割れは格子状 格子の大きさは問わない ひび割れ幅は0.2mm以上が目立ち、部分的な角落ちも見られる 	あり

(3) ひび割れ密度による評価〔手法3〕

床版1パネルのひび割れ分布データを所定の大きさのメッシュに分割し、各メッシュ内に存在するひび割れの長さや交点の数などを解析し評価する方法が考えられる。今後、このような指標と劣化との関連性に対する研究が進めば、閾値による健全度評価も可能になる。

2.4 保守

画像による RC 床版のひび割れのモニタリングは、画像データの画質と標定点の位置精度を確保することが重要である。画像データの画質はひび割れ等の判読性能に影響し、標定点の位置精度は正規化処理の品質（正射投影変換の精度）に影響を及ぼす。

したがって、モニタリングで使用するカメラ、レンズ、照明装置、測量機器等については、適切な保守を行い、各機器の当初性能を維持する必要がある。

(1) カメラ・レンズ

- ・撮影前にバッテリーを充電し、カメラが正常に動作するかを確認する。レンズについては、傷やカビがないかを確認する。
- ・撮影後はカメラとレンズの清掃を行い、所定の保管ケースに収納する。
- ・カメラ性能を維持するには、カメラ特有の点検（ピント、AE 露出精度、AF 作動精度、シャッター、液晶パネル、消費電流、端子部など）が必要であり、定期的にメーカーのメンテナンスを受けることが望ましい。

(2) 標定点の座標取得に用いる測量機器

- ・使用前にバッテリーを充電し、機器が正常に動作するかを確認する。
- ・レンズがある場合は、傷やカビがないかを確認する。
- ・使用後は機器の清掃を行い、所定の保管ケースに収納する。
- ・トータルステーションやレーザスキャナ等の測量機器は「日本測量機器工業会（JSIMA）」の規格で校正方法が決まっている。校正頻度は、JSIMA によって 1 年以内での校正が推奨されている。よって、JSIMA にもとづくメーカーの校正を毎年受けるとともに、校正証明書を保管する。

(3) 照明装置

- ・使用前に、各部品が正常に動作するかを確認する。
- ・発光部に汚れや傷がないかを確認する。
- ・使用後は機器の清掃を行い、所定の保管ケースに収納する。
- ・定期的に、照度計等により照明装置の照度を確認する。

参考文献

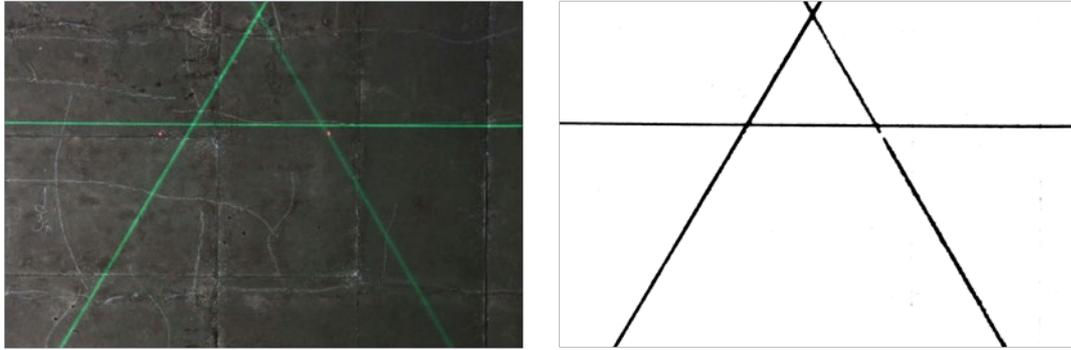
- 1) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領,2019.3.
- 2) 日本写真測量学会，解析写真測量委員会：解析写真測量改訂版，1989.
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：高解像度カメラ使用マニュアル（案），2017.

付録

1. 標定図形の三次元座標の算出

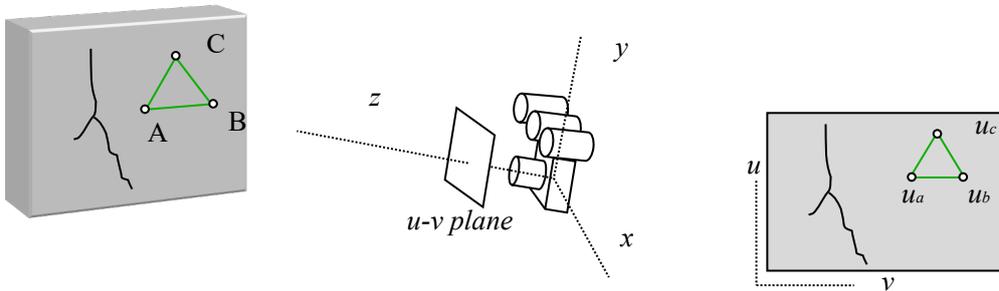
標定図形の三次元座標を導出するために、まず、照射された三角形の抽出を行う。

床版と標定図形を撮影した画像の例を(付録)図 2.1.1 に示す。画像中のレーザ光は緑色であるため、RGB カラー画像上で G チャンネルの 2 値処理を行うと、(付録)図 2.1.2 に示すように、容易にレーザ光の直線を検出できる。検出された直線の交点を算出し、三角形の頂点を求める。



(付録)図 2.1.1 標定図形を撮影した画像の例 (付録)図 2.1.2 レーザ光線の抽出

求められた頂点座標から、幾何変換処理を行う。具体的には、(付録)図 2.1.3 に示すように、カメラ座標系 x - y - z と画像座標系 u - v を考える。



(付録)図 2.1.3 カメラ座標系と画像座標系

カメラ座標系の z 方向と平行にレーザ光線は出力されているため、三角形の各頂点 A, B, C の x 成分 A_x, B_x, C_x と y 成分 A_y, B_y, C_y は既知の値である。未知のパラメータ A_z, B_z, C_z を画像上での各 A, B, C の座標値 u_a, u_b, u_c を用いて算出する。

$$A_z = \frac{f \cdot A_x}{u_a}, B_z = \frac{f \cdot B_x}{u_b}, C_z = \frac{f \cdot C_x}{u_c}$$

ここで、 f は焦点距離である。上式より、標定図形の三角形の頂点座標の三次元座標を取得できる。

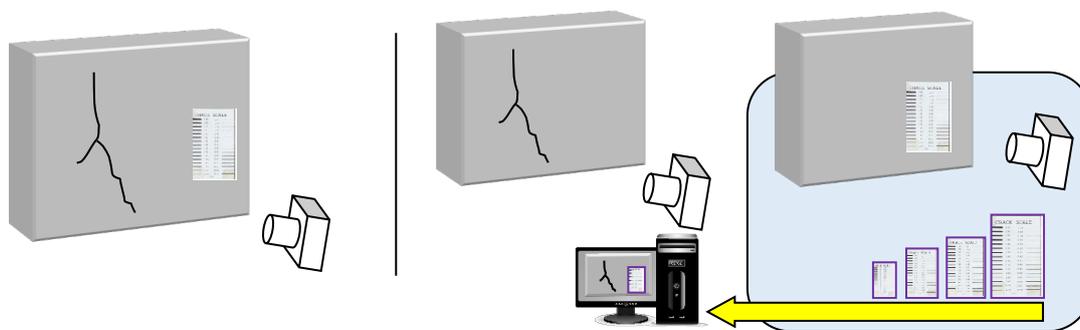
次に、三角形の頂点の三次元座標を用いて、壁の平面方程式を導出する。点 A を通る平面式は、法線ベクトルを $\mathbf{n}(l,m,n)$ とすると以下ようになる。

$$l(x - A_x) + m(y - A_y) + n(z - A_z) = 0$$

平面の方程式が導けたので、画像座標系 $u-v$ の各点と上式の交点を算出することで、画像上の各画素の三次元座標を算出する。

II. ひび割れの自動判読手法の例

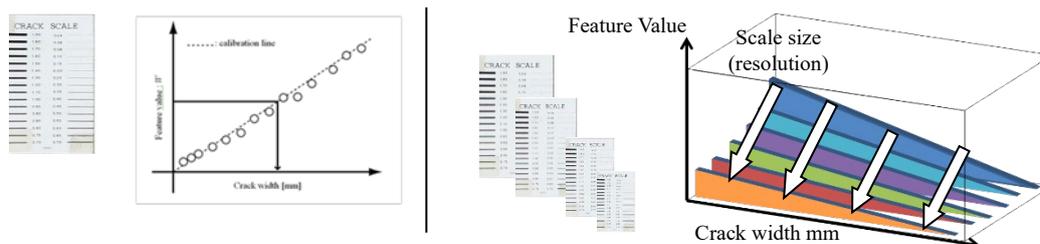
自動的にひび割れ幅を計測するために、獲得した濃淡画像の中からひび割れ画素のみを画像処理技術を用いて検出する。ひび割れ検出の画像処理法には、液体の浸透現象をモデル化したパーコレーションモデルに基づくひび割れ検出手法が有効である¹⁾。次に、ひび割れ幅の計測を抽出したひび割れ画素に適用する。近接撮影可能な場合は、クラックスケールをコンクリート壁面に貼り付け、画像内にクラックスケールが含まれるように撮像する((付録)図 2. II. 1 (1))。スケール幅とスケールの輝度特徴量からなる2次元キャリブレーション直線を生成し、抽出したひび割れ画素の輝度特徴と直線式を参照することで、ひび割れ幅をサブピクセル精度で計測する²⁾((付録)図 2. II. 2(1))。近接撮影が困難な場合は、(付録)図 2. II. 1 (2) に示すように、事前に、異なる解像度でクラックスケールを撮影し、解像度軸を追加した3次元キャリブレーション直線((付録)図 2. II. 2(2))を生成することで、画像解像度とひび割れ画素の輝度特徴を入力とすることで、自動的にひび割れ幅を計測する³⁾。



(1) スケールの添付手法²⁾

(2) 事前にクラックスケールの情報を取得³⁾

(付録)図 2. II. 1 クラックスケールの撮影



(1) 2次元特徴空間²⁾

(2) 解像度を含めた3次元特徴空間³⁾

(付録)図 2. II. 2 クラックスケールを基準としたひび割れ幅計測

参考文献

- 1) T. Yamaguchi, S. Hashimoto, “Fast Crack Detection Method for Large-size Concrete Surface Images using Percolation-based Image Processing,” Machine Vision and Applications, vol.21, no.5, pp.797-809, Aug. 2010.
- 2) 竹田宣典, 石関嘉一, 山田守, “画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ計測”, 大林組技術研究所報 No.79, 2015.
- 3) 石関嘉一, 山口友之, “レーザ光照射システムによる遠方からのひび割れモニタリング”, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1713-1718, 2018.

3章 光ファイバによるひび割れのモニタリング

3.1 技術の概要

3.1.1 目的

道路橋においては、劣化が進んでひび割れが生じた RC 床版上へ車輛を走行させる必要がある場合がある。劣化の初期にはひび割れが橋軸直角方向に発生し、その後格子状の二方向に伸展し、ひび割れの貫通、ひび割れのすり磨きを経て床版のせん断抵抗力が低下し、最終的に押し抜きせん断破壊を生じて抜け落ちる。本モニタリングは、劣化がある程度の広範囲にわたって進行した状態（図 1.2.1 内の健全度Ⅱ～Ⅲに相当）において、床版の抜け落ちを光ファイバセンサにより網羅的な範囲で監視するために適用するものである。

本モニタリングでは、抜け落ちをモニタリングするために、ひび割れ面の段差を監視する。床版下面に網羅的に光ファイバを固定して、“光の透過量（単位[dB]）”を常時計測する（図 3.1.1）。床版に生じた段差を、光ファイバを介してリアルタイムに光の透過量の変化（つまり、光の損失発生の有無）として検知することによって、変状の発生やその位置を迅速に管理者へ通知、交通規制などの適切な措置へフィードバックする。

抜け落ちモニタリングは、見過ごしが許されないため、網羅的な特長をもつ本モニタリングとともに、局所的ではあるが定量的なデータを得られる変位計を併用することが望ましい。



図 3.1.1 床版下面へ光ファイバの設置例

3.1.2 OTDR によるモニタリングの概要

(1) 光ファイバセンサ

光ファイバセンサには様々な計測方式にもとづく多くの種類がある（表 3.1.1）。光ファイバセンサのいくつかの計測方式を、計測可能箇所を区分したものを図 3.1.2 に示す。

縦軸は計測可能箇所を示し、光ファイバ上であらかじめ決められた任意の箇所のみを計測可能な「ポイント型」と、光ファイバ全長にわたってすべての箇所を計測可能な「分布型」に分けられる¹⁾²⁾。

横軸は空間分解能を示し、光ファイバ上でどのくらいの範囲におよぶ物理量を計測するかをあらわす。ひずみゲージのゲージ長に相当するもので、空間分解能が低いものは広範囲にわたる物理量を、空間分解能が高いものは狭い範囲内の物理量を、それぞれ計測する。前者は変化を大まかにとらえることに適し、後者は変化を細かくとらえることに適している。

本モニタリングでは、網羅的に監視する必要があることから分布型とし、抜け落ち検知にあたって十分な空間分解能を有する計測方式（OTDR）を用いる。

表 3.1.1 光ファイバセンサの計測方式

計測方式	計測量	光ファイバ	計測器コスト	備考
OTDR	透過量	汎用	◎	透過量の変化をもとに曲げや切断の発生や位置を特定可能。通信用光ファイバ敷設状況の確認用途として広く用いられている。
(ROTDR)	温度のみ	汎用	○	その強度が温度に依存するラマン散乱を利用。エネルギー分野などにおける温度分布計測技術として実績多数。
BOTDR	ひずみ (温度)	汎用	△	その周波数がひずみと温度に依存するブリルアン散乱を利用。光ファイバ片端のみの接続で、典型的な空間分解能は 1m。
BOCDA	ひずみ (温度)	汎用	△	その周波数がひずみと温度に依存するブリルアン散乱を利用。光ファイバ両端の接続で、数 cm レベルの空間分解能を実現。
強度検知	変形など	特殊加工	◎	変形が光ファイバの透過量に影響する機構を利用。単純な機構で変形などを計測できるが、一本の光ファイバへの多重化は不可。
FBG	ひずみ (温度)	特殊加工	○	光ファイバに特殊加工を施すことで、その箇所のひずみや温度を高精度に計測可能。一本の光ファイバへの多重化も可能。

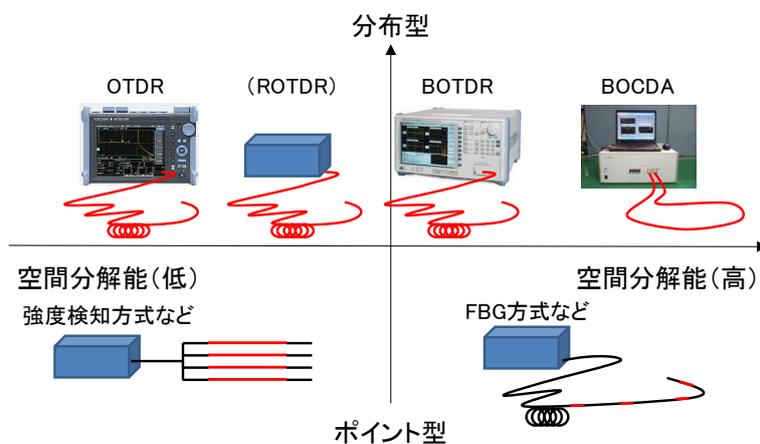


図 3.1.2 光ファイバセンサの計測方式マップ

(2) モニタリング原理

光ファイバそのものがセンサとして機能し、光ファイバ全長にわたって変状をとらえることができるものを、分布型光ファイバセンサと呼ぶ。本システムでは、モニタリング対象の床版下面に光ファイバを直接固定し、床版に生じた変状を、分布型の計測方式によりモニタリングするものである。光ファイバ全長で変状をとらえることができるため、広い範囲を網羅的に、また比較的低コストで、モニタリングできる。

分布型光ファイバセンサのうち、レイリー散乱を用いた計測方式に OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) がある。レイリー散乱光は、入射光と同じ波長の散乱光で、その光強度は光ファイバの各位置の損失に依存することが知られている (図 3.1.3)。OTDR によれば、パルス光を光ファイバに入射することで、散乱光の帰還時間からその発生位置を、散乱光の強度から光の透過量を計測することができる³⁾。通信用途の光ファイバを検査する技術として広く使われている汎用技術である。OTDR による計測結果のイメージを図 3.1.4 に示す。抜け落ちの予兆や発生を、それに伴って光ファイバに生じる曲げや破断による光の透過量変化として検知する。

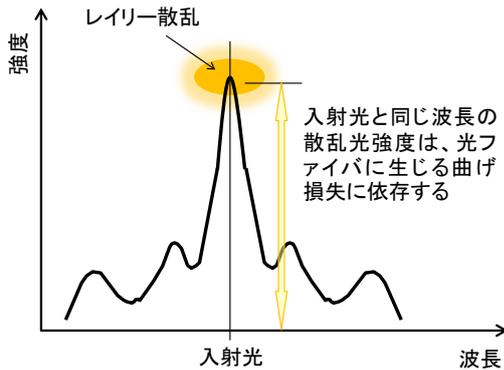


図 3.1.3 散乱光スペクトル

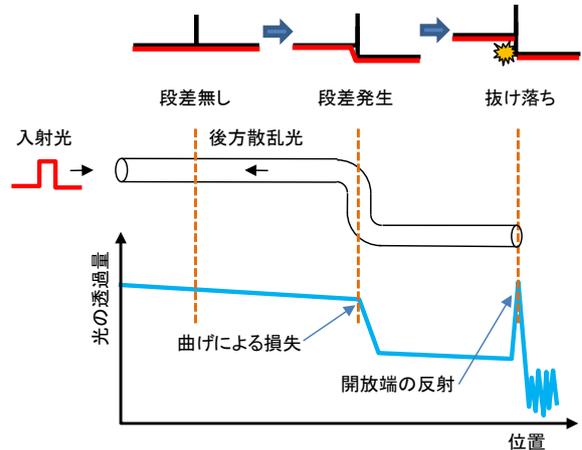


図 3.1.4 OTDR による計測結果のイメージ

(3) システム構成

本方式によるシステム構成を図 3.1.5 に示す。床版下面に固定した光ファイバを計測器 (OTDR) に接続する。計測器と接続したノートパソコンによって、計測結果 (光の透過量) をリアルタイムに監視し、万が一の場合 (曲げや破断により透過量に変化が発生した場合) に関係先に警報メールを送る。



図 3.1.5 システム構成

1) 光ファイバ

光ファイバには図 3.1.6 に示すいくつかの種類があるが、本モニタリングには通信用途の汎用シングルモードファイバ (SMF) を用いる。例えばマルチモードファイバでも適用可能であるが、SMF に比べて屈曲による損失低下が生じにくい点、その他の分布型計測器と併用できない点などから、本モニタリングには不適である。

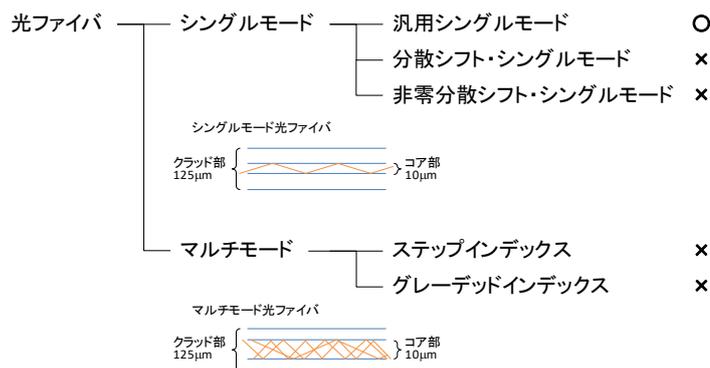


図 3.1.6 光ファイバの種類と本モニタリングへの適否

光ファイバの被覆についても考慮する必要がある (表 3.1.2)。光ファイバの被覆厚が薄い (外径が細い) ほど、変状に対する検知感度が高く、望ましい。一方で、外径が細いほど、断線しやすく施工性が低下するので、留意する必要がある。外径 2~3mm などのケーブル加工されたものは、内部にテンションメンバや保護層などが内包されており、本モニタリングには不適である。必ず、被覆と内部光ファイバが一体化されているタイトバッファとする。本モニタリングで使用する外径 0.25mm 素線の外観を図 3.1.7 に示す。



図 3.1.7 光ファイバの例 (0.25mm 素線)

表 3.1.2 光ファイバの被覆と本モニタリングへの適否

種類	断面・外観など	特徴	用途
0.25mm 素線		感度が最も高い	光ファイバの最小単位
0.9mm 心線		感度が低い	複数で多芯ケーブルを構成
テープファイバ		感度が低い	通信用途での宅内配線など
ケーブル被覆		感度が低い	計測用途での配線など

段差を模擬した室内実験時の計測結果を図 3.1.8 に示す。外径 0.25mm 素線の光の透過量を、段差の発生前 (青線) と 1mm の段差の発生後 (赤線) で計測した結果である。モニタリング範囲における透過光量を比較した場合、段差の発生前後で大きく低下したことがわかる。段差の発生前

は光の透過量がほぼ一定であったが、発生後は4.5m付近の位置で大きく低減（損失が増加）していることがわかる。その結果、同位置で段差が発生したことがわかる。

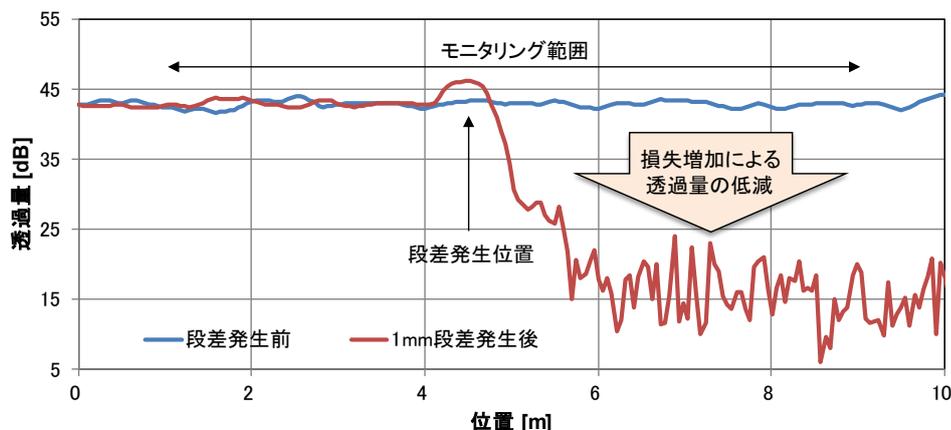


図 3.1.8 1mm 段差発生時の計測結果の例

2) OTDR 計測器

光の透過量を測る計測器には OTDR を用いる。これは必要な光の量が光ファイバ内を十分に透過しているかどうかを調べるための計測器で、曲げや破断による損失の発生を光ファイバ全長にわたって測ることができる。通信分野において汎用の計測器である。

計測器を選定するうえで最も重要なパラメータは、パルス幅とダイナミックレンジである。表 3.1.3 に示す様にパルス幅が短いほど、空間分解能が向上するうえデッドゾーン（接続反射部近傍で計測できない領域）が小さくなるが、ダイナミックレンジ（計測できる信号レベルの最大と最小の差（比）、計測可能距離に影響）も小さくなる。一般的な橋梁の場合は、出来る限りパルス幅は小さくすることが望ましい。また、使用波長を変更可能な場合、出来る限り長波長（1.65 μ m など）を用いた方が、曲げ損失が大きくなるために良い。

また、計測時間（平均化時間）が本モニタリングのサンプリング時間に相当するため、必要に応じた計測時間を満足する機種を選択する必要がある。さらに、計測結果をもとにした警報の判断や、警報メールの送信などを実現するうえでは、LAN ケーブルなどパソコンとのインターフェースを具備する機種が必要である。

計測器のコネクタ部は反射の少ない斜め研磨（Angled-PC）を用いることが望ましい。

計測器の使用環境は、0～+40 $^{\circ}$ C範囲内で、結露のないことが望ましい。

表 3.1.3 OTDR 計測器の仕様

項目	要求仕様	備考
パルス幅	10ns 以下	段差発生位置の特定性能に影響 (短いほど空間分解能が向上)
ダイナミックレンジ	36dB 程度 (1310nm 時) 34dB 程度 (1550nm 時)	計測可能距離などに影響

3) パソコン

計測器からのモニタリングデータをもとに、警報メールを発する機能があればよく、特殊な機器である必要はない。計測器ならびにその監視ソフトに応じた仕様を確認すること。

4) その他のシステム機器

パソコンによる監視結果をメール送信するために、携帯端末を用意する。特殊な機器である必要はない。

5) 電源など

常時監視において電源は、機器の消費電力を確認したうえで、商用電源を使用することを基本とする。また、安定した電源を使用する為には、停電時の予備電源として無停電電源装置（瞬間停電時のシステム保全を目的）、電源ノイズ対策用に絶縁トランスなどの使用も検討する。

また耐雷対策は、電源部で対策を行う。誘導雷による計測器ならびにパソコンの損傷を防ぐことを検討する。

3.1.3 計測期間

本モニタリングの計測期間は、抜け落ちが懸念される対象床版に光ファイバと計測器を設置し、計測開始になってから、補修・補強などの維持管理工事が完了すれば終了となる。そのあいだ、変状が管理値を超えた場合には、車両通行を規制するまでが計測期間である。床版の抜け落ち監視が目的であり、事前現象を捉え交通障害や車両事故を未然に防ぐ必要がある。

一般的に、機能劣化期前後から床版下面コンクリートが剥離及び抜け落ちなどに至るまでの期間は、交通量や大型車混入率にもよるが短期間が想定される。本モニタリングの期間は具体的な対策を实践できる期間が半年から数年程度と想定されることから、その間連続で安定した計測ができる仕様のモニタリングシステムを選定するものとする。

3.2 モニタリングの方法

3.2.1 モニタリングの手順

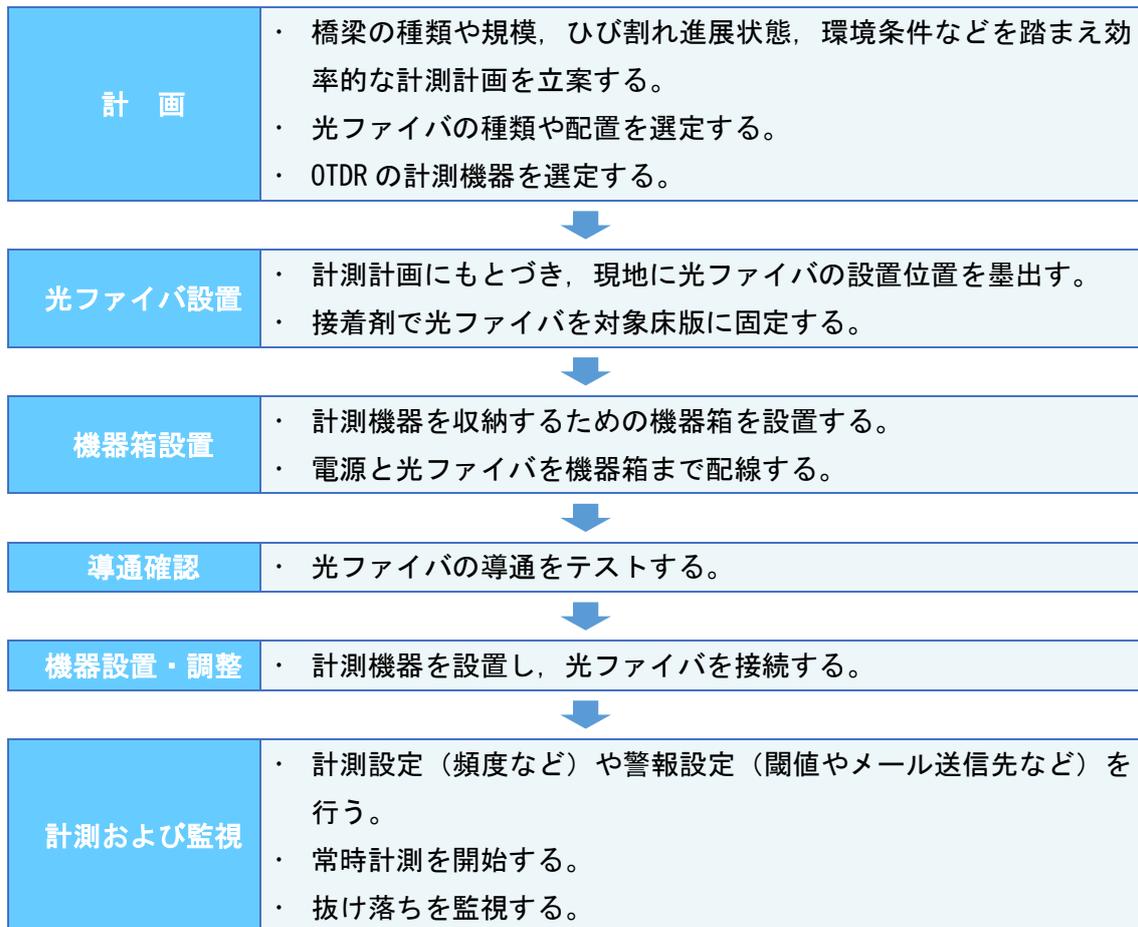


図 3.2.1 RC 床版ひび割れ光ファイバモニタリング手順

3.2.2 計画

RC 床版の抜け落ち監視を行う橋梁の種類や規模（橋長，幅員など），床版下部の構造（地盤状態又は河川の有無など）や床版までの高さ，周囲の地形条件などの環境条件，さらにひび割れ進展状況を調査して光ファイバの設置・配線方法・機器箱の位置などを十分検討し，目的に則した効率的な計測計画を立案する。

(1) 橋梁の種類や規模

長大橋梁と中小橋梁では，RC 床版の損傷度合によるが，通常その規模により光ファイバの設置範囲が設定される。重要路線では通行量も多いことが予想され且つ大型車混入率が高いことが想定されるので，損傷の発生は多い。

道路幅員や車線数にもより，光ファイバの設置範囲は変化する。ただし，RC 床版の損傷度合は，比較的集中して発生することが多く，同じ車線に偏り発生する可能性がある。

RC 床版の劣化現象にはコンクリート材料に伴う劣化現象（アルカリシリカ反応・中性化など）や環境条件に伴う劣化現象（塩害，凍害など），そして通行車両に伴う構造劣化があり，それらの原

因を良く理解し計測を行うことが重要である。

(2) 環境条件

光ファイバを設置するために必要な足場の確保が重要である。大型橋梁には点検用通路があるが、片側の主桁に近接して設けられていることが多く、必要に応じて別途足場が必要となる。また、河川上にある場合や谷合にある場合には、計測機器設置・配線などの作業において、必ず足場が必要となるので、状況に合わせて足場仮設、または高所作業車での作業を計画する。

資機材や足場などの運搬方法、電源設備の設置方法、無線通信状態などを調査・検討する。山間部にある橋梁などでは機材の運搬ルートを事前調査する。車輻で近づけない場合には、台車などを用いた運搬方法を検討する。本モニタリングは常時監視のため、商用電源を使用することを基本とする。また、計測データの伝送に携帯端末を使用するため、事前に現地で無線通信状態を確認してから使用する。

落雷によって、光ファイバが損傷を受けることはないが、計測機材や電源設備の耐雷対策も検討する。

(3) 光ファイバ配置の選定

上記項目(1)橋梁の種類や規模、(2)環境条件などを考慮して光ファイバの種類や配置を選定する。床版表面の劣化が激しく固定が困難な場合には、その場所を迂回する。標準的な光ファイバの配置を図3.2.2に示す。

グリッド型は、特にひび割れ進展が顕著な箇所に格子状に光ファイバを配置したものである(主に2方向ひび割れを想定)。格子の間隔は鉄筋間隔を考慮して決定する。通常、30cm程度の間隔とする。

ストレート型は、主桁のあいだのうち、走行車線など特にひび割れ進展が顕著な箇所を通る様に橋軸方向に直線状に配置したものである(主に1方向ひび割れを想定)。

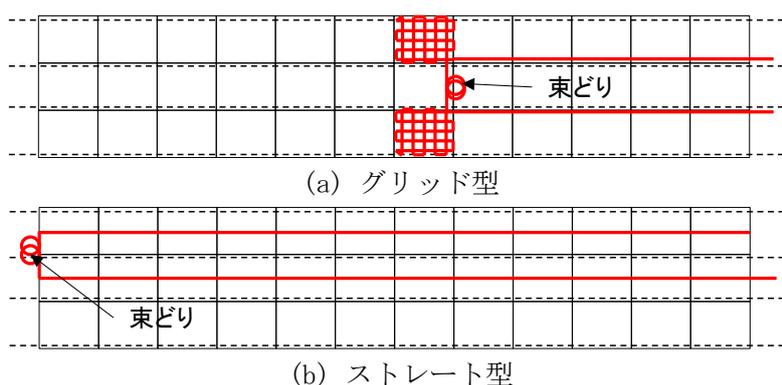


図3.2.2 標準的な光ファイバの配置 (平面図)

どちらの場合も、一筆書きの光ファイバで計測器まで繋げること(ループさせておく)。主桁をまたいだ範囲での計測を行う場合には、別途主桁を迂回するための光ファイバの配線を検討する。

設置時含む断線の場合の対策として、一定間隔で光ファイバの余長を1m程度確保して東どりしておくと、融着接続することが可能となり復旧が容易となる。

光ファイバの配線においては、電力線などと平行配線をして構わない。現場状況に応じて、既設の電力線や配水管などに併設することで光ファイバの損傷リスクを低減したり、構造物へのビス止めなどの手間を低減したりすることができる。また、都市部においても小動物の被害が想定されるので、必要に応じてケーブルを防護管にて配管・配線を行う。コネクタ接続や融着接続部に関しては、接続部の劣化や防水低下の発生が考えられるので、十分養生を行い使用する。

(4) 機器の選定

計測機器を準備する際は、計測期間や設置方法を考慮し機材の準備を行う。機器の仕様を良く検討し、計測期間に合った機材の調達に努める。特に、機材の組合せは、計測目的の仕様に合致していることを必ず確認する。例えば、光ファイバ接続コネクタ部の形状や光ファイバのモードフィールド径などの僅かな仕様の違いが、損失ならびに計測結果に大きな影響を与えかねないため、確認が必要である。

計測機器は、必要に応じて事前に組み合わせて、現場搬入前に調整・確認を行う。

(5) 計測方法

本モニタリングでは、計測データを予め設定した閾値と比較し、オーバーすることがあれば警報メールを送信する。

3.2.3 光ファイバ設置

(1) 事前準備

計測計画にもとづき、現地に光ファイバの設置位置の墨出しを行う。設置表面に光ファイバの設置に支障がある場合（大きい段差や漏水などで光ファイバを全長接着できない場合）、設置位置を変更する（迂回するなど）ことを検討する。また、設置位置には、粉じんや油分を取り除くためにウエスなどを用いて清掃する。

(2) 光ファイバ固定

設置位置に光ファイバを固定する。はじめに、光ファイバを設置位置に合わせて配置したうえで、養生テープなど粘着力の低いテープで仮固定する。このときに、直線部分の光ファイバは軽くテンションをかけながら仮固定すると、接着時の作業性の観点（光ファイバと床版表面とのあいだに隙間が生じにくい）から都合が良い。次に、仮固定したあいだの光ファイバを、接着剤を用いて床版表面に全長固定する。固定する際には、光ファイバと床版のあいだに接着剤が入る様に努める。接着剤には、二液性のエポキシ樹脂を、また作業性の点から、二液の混合がノズルで自動的に行われるガンタイプの工具を用いると良い。

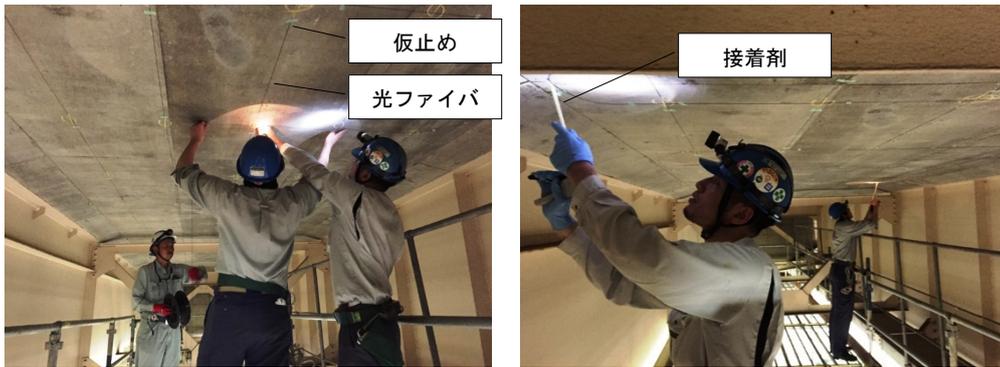


図 3.2.3 光ファイバの固定状況（左：仮固定作業，右：接着作業）

再度融着接続を可能にするための束どり部については、風雨などで解けたりすることがないように留意すること。

設置終了後、初期値を計測する前にひと晩程度、接着剤が硬化するための養生期間を置くこと。このときに、特に雨や水の養生は不要である。

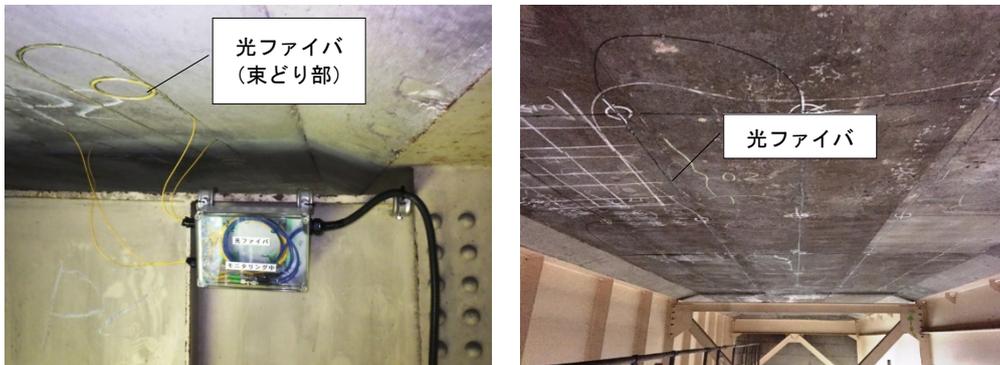


図 3.2.4 固定完了後の様子（左：束どり部，右：グリッド型）

(3) 配線

設置した光ファイバを機器箱まで配線する。配線部は、光ファイバが損傷しないように、ジャケット被覆付きの光ファイバを用いる、あるいは保護管で光ファイバを保護するなどの措置を施す。これらは、現地環境や予定されている計測期間などをもとに具体的な措置方法を検討する。

また、光ファイバ端部には、計測器に接続するためのコネクタを融着接続などで取り付ける。



図 3.2.5 光ファイバの橋脚部の配線状況（左：中継箱，右：保護管での配線）

3.2.4 機器箱設置

計測機器などを収納するための機器箱を設置する。転倒や浸水などがないように適切な風雨対策を施すとともに、設置場所や適用時期に応じて温度対策を講じる（冷却ファン、ヒーターなど）。

電源と光ファイバを機器箱まで配線する。このとき、機器箱のケーブル引き込み孔から雨水などが浸入しないようにする。



図 3.2.6 機器箱の設置状況例

3.2.5 導通確認

機器箱まで配線した光ファイバのコネクタ片端に可視光を入射し、もう片端まで導通があるかどうかを目視で確認する。導通が確認できない場合、OTDR 計測器を用いて断線や局所的な曲げが生じている位置を確認し、新たな光ファイバを設置のうえ、束どり部を利用して融着接続するなどの必要な対策を施す。

3.2.6 機器設置・調整

計測機器の設置は、機器に過大な負荷（振動や衝撃含む）が掛からないように丁寧に扱う。計測機器の運搬には専用のケースを用いて、重量のある計測機器は二人で運搬するなど充分気をつける。また、計測機器設置時に、環境温度と計測器の温度が異なる場合（特に冷え切った計測器を、急に高温多湿下に設置するなど）については、結露による回路ショートが生じないように、計測機器の電源投入前に計測機器そのものの温度を環境温度になじませる必要がある。

計測機器を機器箱内に設置し、配線した光ファイバを繋ぐ。このとき、必ず光ファイバ端面を専用工具で清掃する。さらに、端面スコープで清掃状況を確認することが望ましい。



図 3.2.7 機器の設置状況例

3.2.7 計測および監視

計測設定（頻度など）や警報設定（閾値やメール送信先など）を行う。

OTDR 計測器を用いて常時モニタリング（光の透過量計測）を開始する。

OTDR による損失発生位置とその変化量をもとに、変状発生箇所と変状程度をリアルタイムで把握する。仮に、OTDR による損失が大きく破断が生じている場合には、抜け落ちが生じていると考えられる。

RC 床版抜け落ちのモニタリングは、点検・調査などで過度の劣化が発見され、抜け落ちが想定される箇所の異常検知であり、抜け落ちの初期状況を把握し道路管理者へ通報し、道路交通の安全を確保することが最大の使命である。しかし、万が一剥離・抜け落ちが発生しても、直ちに道路管理者へ警報（メール送信）を発し、道路交通の安全が確保できるシステムであることが重要である。

3.2.8 費用の目安

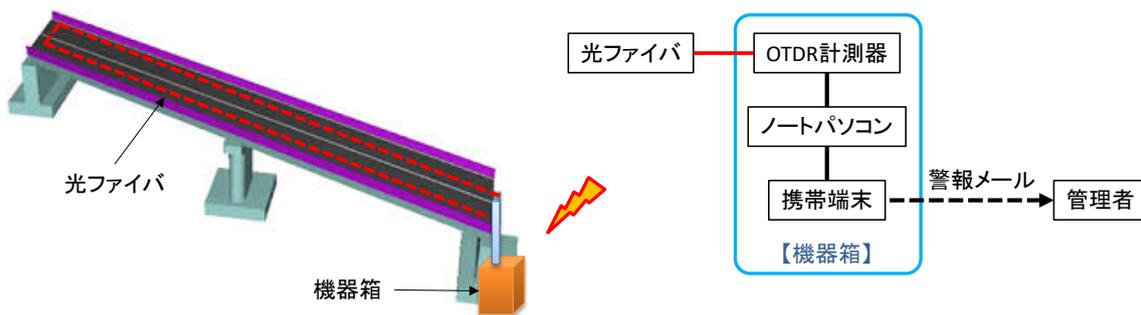
モニタリング範囲を 100m 長とした設置時費用について試算する。同長さに対して、往復路の光ファイバ 2 条での抜け落ちをモニタリングするとすれば、合計で 200m 長の光ファイバを設置することとなる。これまでの実績によれば、足場のある状態での光ファイバの設置は、作業員 1+2 人で 50m/日程度の歩掛である（外径 250 μm の場合）。合せて、計測器設置や機器箱までの配線で 1 日をみれば、合計で 15 人日（3 人×5 日）の作業となる。

計測時については、常設した計測機器による自動でのモニタリングとなるため、メンテナンスなどを除いて、基本的には機器のリース費、通信費、および電気代等が発生する。

表 3.2.1 概算費用の内訳

設置時	材料費	光ファイバ	200m	5,000 円
		接着剤	一式	50,000 円
		機器箱など	一式	50,000 円
	人件費		15 人日	700,000 円
計測時	リース費	OTDR ならびに監視ソフトウェア	一式	250,000 円/月

全体構成イメージ



3.3 結果の評価

管理値の区分については、光の透過量の変化量で閾値を定めて計測管理を行うのが一般的である。表 3.3.1 に管理値となる変化量設定例を示す。ここでは一例として、室内実験結果 (図 3.1.8) などをもとに、段差が生じて光の透過量が半分以下に大きく減じる値として閾値-5dB とする。変化量が閾値を超えたかどうかを確認するのは、床版設置の開始位置と終了位置である。その間での光の透過量の変化をもって確認する。万が一、管理値を超えた場合には、関係者にその旨自動的に警報メールが送信される。管理者は警報が発生した位置を目視で確認し、必要な措置をとる。その後、引き続きモニタリングする場合には、管理値等の再設定を行う。また、光ファイバが破断していた場合にはその箇所を交換するために、新たな光ファイバを設置し、束どり部分を利用して融着接続する。

表 3.3.1 管理値の設定例

	変化量	備考
管理値	-5dB	現地の状況をもて適宜調整する (透過量が半分で-3dB)

3.4 保守

光ファイバによる RC 床版の抜け落ちモニタリングでは、その計測期間を満足する計測機器の耐久性と、光ファイバを含めた計測機器の設置環境の安定性の確認も重要である。計測機器は必要に応じて定期的な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。それと共に電源やケーブル配線を含めた計測環境の保守が常に安定した計測データの収集には不可欠である。

(1) 光ファイバ

- ・光ファイバ設置前には、メーカーの検査成績書などで損失が所定の値以下であることを確認する。また、光ファイバ設置後の損失と比べ、その値が大きく変動していないことを確認する。
- ・RC 床版と光ファイバが接着剤によって固定されていることを目視で確認する。紫外線や漏水などによって接着剤の色味に局所的な変化がある箇所については特に注意して確認する。もし、異常が見られた場合には、接着剤で再固定する。

(2) 計測機器

- ・計測機器の外観に損傷などが無いことを確認する。

(3) 機器箱

- ・機器箱への配線接続部や、機器箱自体の固定にがたつきなどが無いことを確認する。また、雨水や虫などが機器箱内部に侵入していないことを確認する。

(4) 配線関係 (電源含む)

- ・光ファイバ配線や電源線などに異常がみられないか目視で確認する。

システムの使い分け

設置した同じ光ファイバ (SMF) を用いて、計測器を繋ぎかえることで、システムを変更することができる。(付録)表 1 にシステムの使い分けを示す。

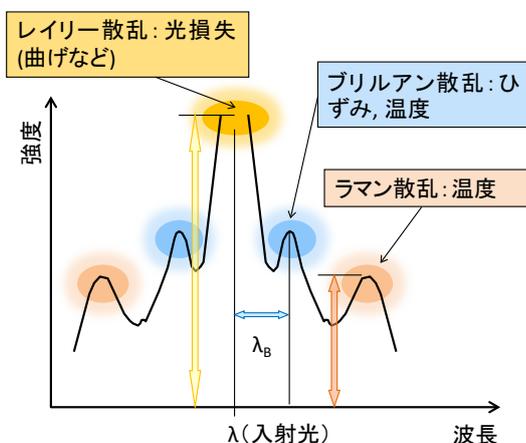
標準システムでは、レイリー散乱を利用する OTDR 計測器によって光ファイバの屈曲や破断を計測するものであるが、ブリルアン散乱を利用した計測器によれば光ファイバのひずみを計測することができる⁴⁾。例えば、BOTDR あるいは BOCDA によれば、光ファイバに沿ったひずみ分布を得ることができる。破断までは至らずとも、劣化が進行していることを光ファイバに生じたひずみから確認できる。あるいは、常時モニタリングを標準的システムで行い、定期的に光ファイバに接続する計測器を繋ぎかえてひずみ分布を計測する、という方法もあり得る。

(付録)表 1 計測方式の使い分け

計測方式	位置付け	モニタリング項目	散乱光	備考
OTDR	標準システム	屈曲, 破断	レイリー	リアルタイム異常検知
BOTDR	ひずみ計測システム	ひずみ	ブリルアン	劣化の伸展の把握
SDH-BOTDR	ひずみ計測システム (高速)	ひずみ	ブリルアン	劣化の伸展の把握 (計測時間短い)
BOCDA	ひずみ計測システム (高空間分解能)	ひずみ	ブリルアン	劣化の伸展の把握 (高空間分解能)

(1) ブリルアン散乱によるモニタリング原理

分布型光ファイバセンサのうち、ブリルアン散乱を用いた計測技術に BOCDA, BOTDR などがある。ブリルアン散乱光の光周波数は光ファイバの各部分のひずみに依存するため、光ファイバのひずみ分布を計測することができる ((付録)図 1)。



(付録)図 1 波長スペクトル

(2) BOTDR⁵⁾

光ファイバのひずみ分布を計測する計測器として BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) を用いる。計測するうえで最も重要なパラメータは、主にパルス幅、掃引周波数、加算回数である。パルス幅が短いほど空間分解能が向上するが、信号強度が低下してしまう分、加算回数を増やすことが良い。掃引周波数は、ひずみの大きさに応じて変更すべきであり、掃引周波数の範囲内にブリルアン周波数が含まれるようにやや広めに設定する。



(付録)図 2 BOTDR 計測器の例

(3) SDH-BOTDR⁶⁾

光ファイバのひずみ分布を計測する計測器として SDH-BOTDR (Self-delayed Heterodyne BOTDR) を用いる。得られる情報や考慮すべきパラメータは、前項の BOTDR とほぼ同様である。BOTDR よりも計測時間が非常に短い点が有利である。



(付録)図 3 SDH-BOTDR 計測器の例

(4) BOCDA⁷⁾

光ファイバのひずみ分布を計測する計測器として BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) を用いる。計測するうえで最も重要なパラメータは、主に変調周波数、掃引周波数である。変調周波数が高いほど空間分解能が向上するが、ひずみ計測可能な範囲が狭くなってしまふ (空間分解能と計測可能範囲がトレードオフの関係)。掃引周波数は、ひずみの大きさに応じて変更すべきであり、掃引周波数の範囲内にブリルアン周波数が含まれるようにやや広めに設定する。



(付録)図 4 BOCDA 計測器の例

参考文献

- 1) 保立和夫, 村山英晶: 光ファイバセンサ入門, 光防災センシング振興協会, 2012.
- 2) 光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する共同研究報告書: 光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル(案), 土木研究所共同研究報告書, 第292号, 2003.
- 3) 日本工業標準調査会: 光ファイバ損失試験方法, JIS C 6823, 2010.
- 4) 土木学会コンクリート委員会コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会報告: コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術, コンクリート技術シリーズ, 76号, 2007.
- 5) Kurashima, T., Horiguchi, T., Izumita, H., Furukawa, S., and Koyamada, Y.: Brillouin optical-fiber time domain reflectometry, IEICE transactions on communications, E76-B(4), 382-390, 1993.
- 6) Koizumi, K., Kanda, Y., Fujii, A., and Murai, H.: High-speed distributed strain measurement using Brillouin optical time-domain reflectometry based-on self-delayed heterodyne detection, European Conference on Optical Communication (ECOC), IEEE, 2015.
- 7) Hotate, K.: Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques. Optical Fiber Technology, 19(6), 700-719, 2013.

4章 変位計によるモニタリング

4.1 技術の概要

4.1.1 目的

地方の生産活動に必要な道路，住民の日常活動に不可欠な道路などが，定期点検等によって RC 床版に過度の損傷（例えば，健全度Ⅲ後期に相当する損傷）が発見されても，即時に工事費用を確保できないことや交通阻害の影響等からすぐに補修・補強・更新等の維持補修工事に取り掛かれない場合がある。代替路がなく供用を継続せざるを得ない場合に，RC 床版の損傷状態を監視し，事故発生を未然に防ぐことに RC 床版の変位常時計測（動的計測）が活用できる。また，主要路線においては，万が一 RC 床版の損傷が生じた場合の社会的影響が大きいことから健全度Ⅱの後期くらいから RC 床版の変位常時計測（静的計測）を行うことも想定される（動的計測と静的計測の具体的な使い分けは 4.1.2 で後述する）。

RC 床版の変位計測は，図 4.1.1 に示す不動梁を用いて変位計を設置し計測をするのが一般的である。使用する変位計は，ロッド式変位計が実績もあり用いられることが多い。通常床版下面は河川又は高所の場合が多く，河床には変位計を設置することは難しく，また変位計測間距離が長いと計測精度が落ちる。計測間距離を短くすることが計測精度を上げることになる。床版変位とは，左右の主桁に載っている床版単体の変位のことであり，床版変位と左右主桁変位との相対差である。そこで左右の主桁間に不動梁を渡し，その梁に変位計を設置し床版との距離変化を計測する手法が効率的である。

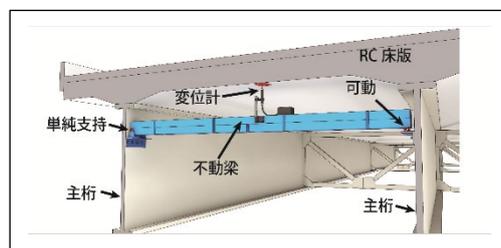


図 4.1.1 RC 床版の変位計測イメージ図

4.1.2 システムの概要

車両通行状態で RC 床版変位を計測する場合，大別して静的計測法と動的計測法の 2 種類の計測方法があり，その計測機器も一般的に異なる場合が多い。

【静的計測法と動的計測法】

*静的計測法：時間的に緩やかな変化をする現象を計測。

例：車両重量計測，距離計測，温度計測

*動的計測法：時間と共に急激に変化する現象を計測。

例：振動加速度計測，衝撃実験計測

床版変位計測にもその変化のスピードに合わせた計測方法の選定が必要である。健全度Ⅲの初期段階に於いては，床版変位量も少なく緩やかな変動なので静的計測法が良いが，後期段階では急激な変動が発生するので動的計測法が良い。計測機器は，静的計測から動的計測まで連続して計測できる機器もあるが，一般的には図 4.1.2 と図 4.1.3 に示す様な静的計測機器と動的計測機器に分かれている。実際に発生すると考えられる変位速度を考慮して，計測機器の選定を行う必要がある。



図 4.1.2 静的計測機器の例



図 4.1.3 動的計測機器の例

(1) 標準的システム

RC 床版の変位モニタリングシステムは、健全度Ⅲの後期状態で急激に床版変位が進行する（抜け落ち・剥離）状態に適用することを想定し動的計測法の以下のシステム構成（変位計・信号ケーブル・変位計用アンプ・データ収録器・パソコン・通信機）を標準とする。RC 床版の変位計測箇所には不動梁を用いて変位計を設置し、その信号ケーブルを現場内（計測橋梁下面や橋台近傍）に設置する観測小屋まで配線し、小屋内に変位計用アンプ・データ収録器・パソコン・通信機を設置する。パソコンにて変位計データと予め設定した閾値と比較し、それを超えれば警報機を作動させ警報メールを発令するシステムとする。

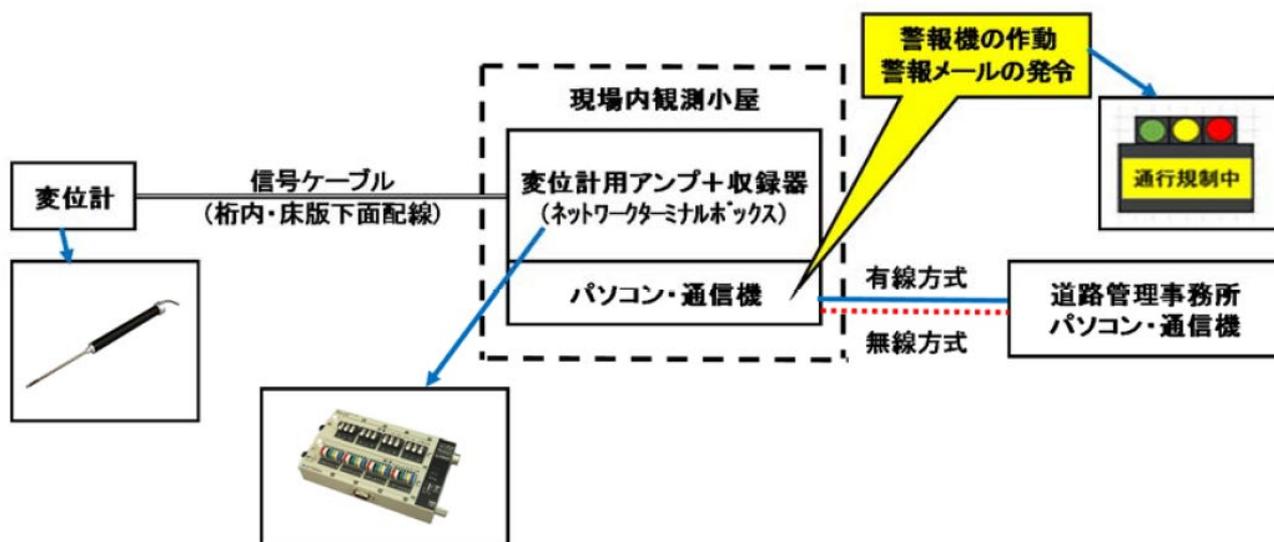


図 4.1.4 RC 床版の変位モニタリングシステムのイメージ図（動的計測）

1) 変位計と変位計用アンプ

変位計は、ロッド式変位計が実績も多く使用されている。ロッド式変位計も床版の変動に追従できる応答性の高い物を計測の仕様に合わせて選定する。変位計の電気的出力を増幅する変位計用アンプと変位計は、基本的にメーカー毎で対になっているのが一般的であるが、計測目的の仕様を満足すれば異なるメーカーの組合せも可能である。ただし、変位出力の感度方向が逆のケース等もあるので、事前に組合せて出力感度を確認することが必要である。

変位計と変位計用アンプを繋ぐ信号ケーブルは、なるべく接続の無い1本物を使用する。どうしてもケーブル同士を接続する場合は、コネクタ接続又は芯線同士の半田接続となるが、接続部の防水処理は入念に行い絶縁低下に注意する。メーカーの異なる変位計・変位計用アンプを使う時は、

信号ケーブル両端のコネクタ部の形状と接続を確認する。また、小動物が生息する場所では、電線管による防護配線も検討する。

2) データ収録器

変位計用アンプで増幅された電気信号（変位計計測データ）を連続的に記録する装置であるデータ収録器は、変位計と同一メーカーでなくても接続可能な収録器が多い。一般的に収録器の入力側が電圧又は電流仕様となっているものが多く、計測仕様を確認し選定する。更に接続部（コネクタ部）の仕様が異なることが多いので、事前の組合せ確認が必要である。

RC床版の固有振動数は数Hz～数10Hzであり、変位データを計測・収録する為には、通常2～5倍以上のサンプリング周波数でデータを収録する必要がある、変位計測のサンプリング周波数は100Hzを基本とする(健全度Ⅲの後期段階で変化が急激と想定)。

3) パソコン

データ収録器と接続して、計測の制御・データの収録・閾値との比較・警報の発令等を行うパソコンは、予め収録器側の制御ソフトとデータ処理ソフトをインストールして組合せ調整を行う。集録するデータ容量を事前に確認し、余裕のある記憶媒体を用意する。

4) その他のシステム機器

短期間の計測では、アンプ・収録器・データ処理機能が一体となったデータ収録処理器や中速サンプリング動的計測器（ネットワークターミナルボックス）が便利である。ただし、計測目的に仕様が合致していることを確認する必要がある。

5) 耐久性

モニタリングシステムは、目的の計測期間において十分に耐久性のあるものを選定する。計測期間中に変位計を含むシステム全体に不具合（測定不能、ドリフト、データ欠落等）が発生することが無い耐久性を備えたシステムを採用する。また、計測機器に関しては定期的な点検整備（機器メーカーによる定期的な再校正等）を行っていることを事前に確認する。

6) 管理方法

変位計測は、供用している橋梁の車両運行の安全確認を第一の目的としているので、常に床版変位の閾値を設定し、常時監視を行い、閾値を超えることで警報機が作動し車両運行の安全を確保すると同時に、関係者（道路管理者等）に警報メール等を発令する安全管理を行うものとする。閾値の設定は、閾値を予め設定し常に安全側での監視を行う。

7) 電源等

常時監視において電源は、商用電源を使用することを基本とする。ソーラー発電機器・蓄電池・充電器等を使用する場合には、使用システム機材に対して十分余裕のある電気量を確保する。また、安定した電源を使用する為には、停電時の予備電源として無停電電源装置（基本的に瞬間停電時のシステム保全を目的とする）、電源ノイズ対策用に絶縁トランス等の使用も検討する。

また耐雷対策は、変位計部・システム部・電源部でそれぞれ対策を行う。基本的に誘導雷による損傷を防ぐことを検討する。

8) 静的計測システム

変位が非常に緩やかな場合（健全度Ⅲの初期段階と想定）には静的計測器でインターバル計測も可能である。この時の計測インターバルは日常の温度変化も捉えることが可能な最低1時間ピッチ以内とする。静的計測の場合、変位計・信号ケーブル・データロガー・パソコン・通信機の組合せが一般的であるが、図4.1.5に示す様なデータロガーとパソコン・通信機が一体となった装置（Webデータロガー）が取り扱い易く効率的である。

変位計は、緩やかな変位変動が計測できれば良く応答周波数は低くても良い。データロガーは、1測点毎に切り替えて計測する装置で一般的に内部に物理量換算機能を持っており、変位データに換算してパソコンへデータ転送する装置である。また、計測インターバル機能を持ったロガーもある。

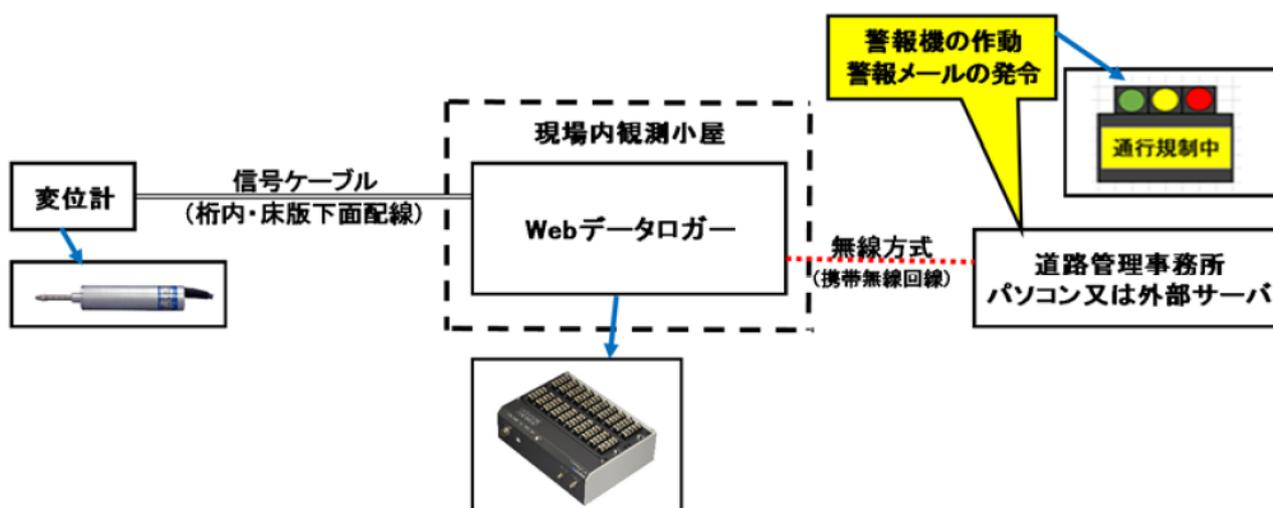


図4.1.5 RC床版の変位モニタリングシステムのイメージ図（静的計測）

(2) システムの使い分け

計測システム機器によっては、静的計測から動的計測まで同一の機器で計測可能な機種もあるので、そのような場合には機材の交換が有利か事前に検討が必要である。表4.1.1は静的計測・動的計測とその対応計測システムを表す。

表4.1.1 計測期間別計測システムの種類（静的計測と動的計測）

計測区分	静的計測期間 (健全度Ⅲ初期)	動的計測期間 (健全度Ⅲ後期)	備考
交換型	静的計測システム (静的計測)	動的計測システム (動的計測)	計測機器交換が必要である
同一型	動的計測システム (静的計測)	動的計測システム (動的計測)	基本的に計測間隔のみ変更で連続計測できる

システム構成の使い分け

表 4.1.2 に、動的計測法と静的計測法に分けてシステムの構成例を示す。

表 4.1.2 システム構成の使い分け例

タイプ	場所	計測条件	計測システム
動的計測法	現場	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測+データ収録+転送 閾値判定 警報メール発令, 警報機作動 サンプリング周波数: 100Hz 以上 	変位計 (高応答型)・信号ケーブル・変位用アンプ・データ収録器・パソコン・送信機・警報機
	管理事務所	<ul style="list-style-type: none"> データ受信+収録 閾値判定 警報メール発令, 警報機作動 	送受信機・パソコン・警報機
	現場	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測 閾値判定 警報機作動 サンプリング周波数: 100Hz 以上 	変位計 (高応答型)・信号ケーブル・計装用コンディショナ (警報接点付き)・警報機
静的計測法	現場	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測+データ収録+Web 転送 計測間隔: 1 時間に 1 回以上のインターバル計測 	変位計 (低応答型)・信号ケーブル・Web データロガー (送受信機付)
	管理事務所	<ul style="list-style-type: none"> データ受信+収録 閾値判定 警報メール発令, 警報機作動 	送受信機・パソコン・警報機
	現場	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測+データ収録+転送 閾値判定 警報機作動 計測間隔: 1 時間に 1 回以上のインターバル計測 	変位計 (低応答型)・信号ケーブル・データロガー・パソコン・送信機・警報機
	管理事務所	<ul style="list-style-type: none"> データ受信+収録 閾値判定 	送受信機・パソコン・警報機
	現場	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測+データ収録 計測間隔: 1 時間に 1 回以上のインターバル計測 	変位計 (低応答型)・信号ケーブル・メモリ式データロガー
	管理事務所	<ul style="list-style-type: none"> データ回収+収録 	パソコン・USB メモリ

4.1.3 計測の期間

RC 床版変位の計測期間は、損傷が発見され計測器を設置し計測開始になってから床版変位が閾値を超え、車両通行を規制するまでの期間であり、補修・補強等の維持管理工事が完了すれば終了となる。RC 床版の抜け落ち・剥離監視が目的であり、事前現象を捉え交通障害や車両事故を未然に防ぐことが出来れば最善である。

一般的に定期点検等により RC 床版が機能劣化期前後であることが判明し、床版下面コンクリートが剥離及び抜け落ち等に至るまでの期間は、交通量や大型車混入率にもよるが短期間が想定される。RC 床版変位のモニタリングの期間は具体的な対策を実践できる期間が半年から1年程度と想定されることから、その間連続で安定した測定ができる仕様のモニタリングシステムを選定するものとする。

4.2 モニタリングの方法

4.2.1 モニタリングの手順

変位計によるモニタリングの基本的な手順は、図 4.2.1 のとおりである。

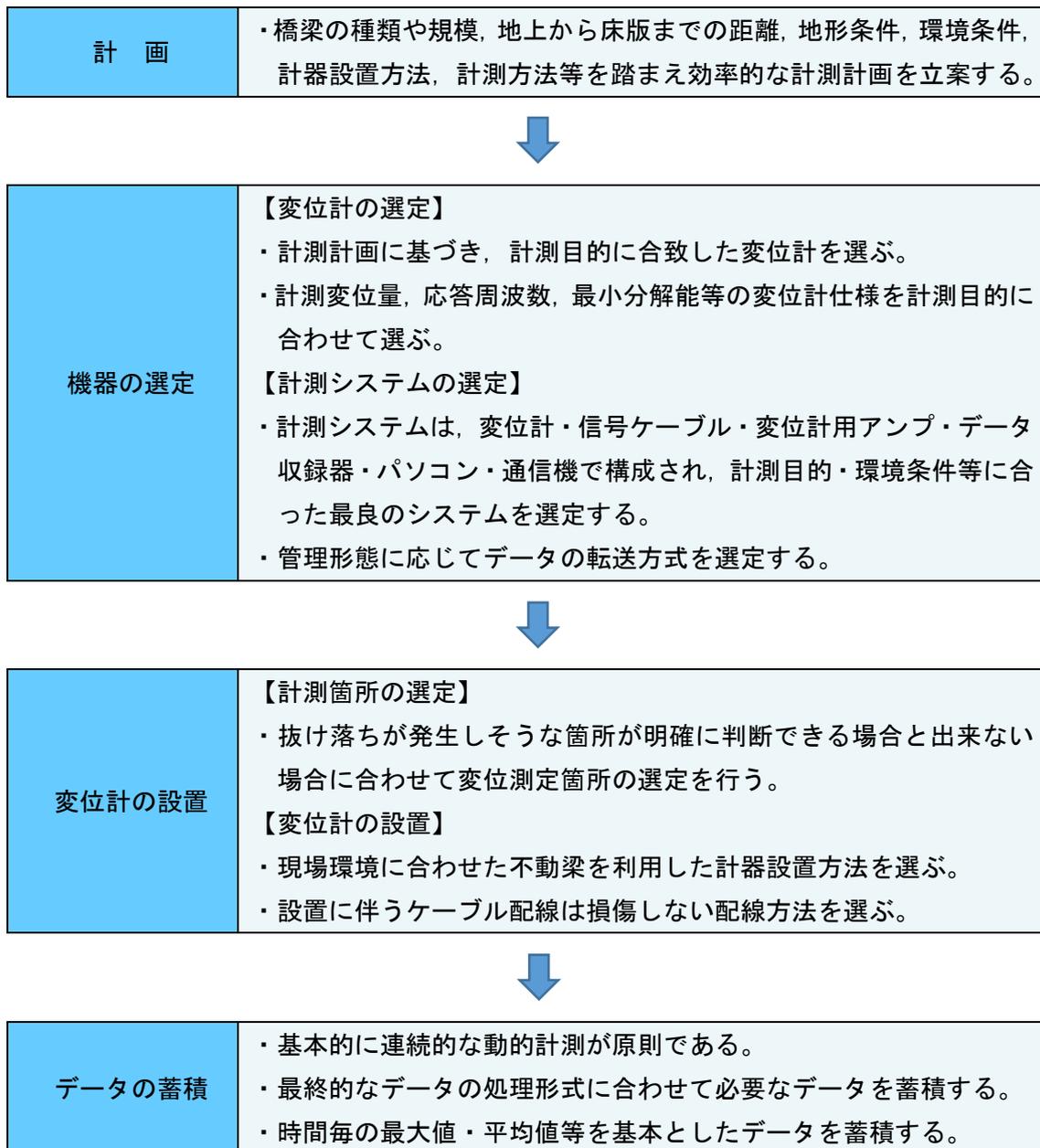


図 4.2.1 RC 床版変位計モニタリング手順

4.2.2 計画

RC床版の変位計測を行う橋梁の種類や規模(橋長,幅員等),床版下部の構造(地盤状態又は河川等)や床版までの高さ,周囲の地形条件や環境条件を調査して計測機器の設置・配線方法,計測方法を十分検討し,目的に則した効率的な計測計画を立案する。

(1) 橋梁の種類や規模

長大橋梁と中小橋梁では,RC床版の損傷割合によるが,通常その規模により測点数が設定される。重要路線では通行量も多いことが予想され且つ大型車混入率が高いことが想定されるので,損傷の発生は多い。

道路幅員や車線数にもより,計測数は変化する。ただし,RC床版の損傷割合は,比較的集中して発生することが多く,同じ車線に偏り発生する可能性がある。

RC床版の劣化現象にはコンクリート材料に伴う劣化現象(アルカリシリカ反応・中性化等)や環境条件に伴う劣化現象(塩害,凍害等),そして通行車両に伴う構造劣化があり,それらの原因を良く理解し計測を行うことが重要である。

(2) 床版下部の構造や床版までの高さ

基本的に,主桁に挟まれた床版の変位計測なので,主桁側面に設置する不動梁に変位計を設置することになる。そのため不動梁を設置するために必要な足場を確保する。大型橋梁には点検用通路があるが,片側の主桁に近接して設けられていることが多く,他方は足場が必要となる。

床版下面が河川や高さがある場合には,橋梁点検専用車等の利用を検討する。対傾構を不動梁として利用可能か検討する。必ず対傾構が有るとは限らないが,不動梁の代替えとして使用可能か調査する。

(3) 周囲の地形条件や環境条件

計測機器や足場等の運搬方法,電源設備の設置方法,無線通信状態等を調査・検討する。山間部にある橋梁等では機材の運搬ルートを事前調査する。また,計測に必要な電源の確保は計測方法(頻度,データ回収,警報発令等)を左右することもあるので十分に事前調査を行う。測定データの伝送に無線を使用する場合には,事前に現地で無線通信状態を確認してから使用する。(トラック無線等で計測機器が影響を受ける場合もある。)

河川上にある場合や谷谷にある場合には,計測機器設置・配線等の作業に於いて,必ず足場が必要となるので,状況に合わせて足場を仮設する。

海岸に近い橋梁の場合には塩害を,寒冷地の場合には凍害の影響を考慮して,計測機器の設置・配線を考慮する。また,降雪の多い地区では凍結防止剤による塩害も考慮する。

直射日光が当たる場所に変位計を設置する場合は,保護ケースを設置し直射日光を遮る。

落雷により計測機材が損傷を受けることを考慮し,センサ内部や近傍に耐雷装置を設けたり,測定機材や電源設備の耐雷対策も検討する。

(4) 機器の選定

計測機器を準備する際は、計測期間や設置方法を考慮し機材の準備を行う。この際、機器の仕様を良く検討し、計測期間に合った機材の調達に努める。特に、機材の組合せは、計測目的の仕様に合致していることを必ず確認する。

同じメーカーの機材であっても、型式の違いで性能が異なるので注意が必要である。

変位計は、メーカーにより入出力方式が異なり感度方向が逆の場合があるので、配線を確認すると同時に感度方向を確認する。

計測機器は、事前に組み合わせて現場搬入前に調整・確認を行う。

(5) 計測機器の設置・配線方法

計測機器の設置は、機器に過大な負荷が掛からないように丁寧に扱う。機器の仕様以上の負荷は掛けない。基本的に計測範囲ギリギリの仕様で製造されている変位計は少ないが、計測範囲にも余裕を持った変位計を選定する。変位計は比較的軽量であるが、ケーブルのみを持った運搬をせず、変位計の本体（ロッド部は持たない）とケーブルを持って運搬する。また設置に於いては、変位計専用の治具を使用する。

信号ケーブルの配線においては、高圧電力線とは平行配線（高圧ケーブルとは1m以上の離れ）を避け、近接配線をしない。また、都市部においても小動物の被害が想定されるので、長期間に亘る計測の場合にはケーブルを防護管にて配管・配線を行う。ケーブルの接続は、専用キットで接続することを推奨する。コネクタ接続に関しては、接続部の劣化や防水低下の発生が考えられるので、十分養生を行い使用する。

(6) 計測方法

計測方法は、目的の仕様に合った方式を選び、最終的なデータの利用方法を考慮したものとする。

RC床版の変位変動は健全度Ⅲの初期状態では、比較的緩やかな変化であるので静的計測法が良いが、後期状態では車両走行に追従した急激な変化が想定されるので動的計測法が良い。実際の変位計測は、後期状態での計測が多い。

連続計測の場合、常時安定した電源が確保できることが重要である。商用電源以外の太陽パネルや風力発電を利用する場合には、十分に余裕を見込んだ設備を検討する。

RC床版の変位計測に於いては、基本的に計測値に対して予め閾値を設定し、計測データを常時閾値と比較し、オーバーすることがあれば警報機を作動、警報メールを発令するシステムとする。

4.2.3 機器の選定

(1) 変位計の選定

このRC床版変位計測に使用する変位計は、図4.2.2に示す様なロッド式変位計を想定している。床版下面が河川である場合には河床に変位計を設置できない。床版から地盤までが高い場合には距離の長い変位を計測することになり変位計測精度が下がり、安定した長期計測は困難である。床版変位とは、主桁に載った床版単体の変位を計測することで、左右の主桁側面を利用して不動梁を設け、その不



図 4.2.2 ロッド式変位計

動梁と床版との間に変位計を設置し、変位量を計測することである。変位計の種類にはレーザや CCD カメラ等の画像を利用した変位計測法があるが、長期間の安定した計測には不向きである。ロッド式変位計の選定には、以下の検討が必要である。

1) 計測範囲と分解能

ロッド式変位計の計測範囲と分解能は、計測する RC 床版の変形量に対して十分な余裕をもつ仕様とする。

*計測範囲：予想される RC 床版たわみ量の 1.5 倍以上が望ましい。

*分解能は計測範囲の 1/100 以上が望ましい。

【例】

- ・計測範囲：RC 床版が抜け落ちる時の変位量は、一般的に変形角で 1/200～1/100 程度と言われている。床版の支間が 3m であれば、変位量は 7.5～15mm となる。「計測範囲：22.5mm 以上」が望ましい。
- ・分解能：最小計測範囲の 1/100 を満足するものとする。「分解能：0.075mm 以下」が望ましい。

注意：①分解能

計測器において、出力に識別可能な変化を生じさせることのできる入力の最小値。指示計器においては、識別可能な指示間の最小の差異。

注意：②不確かさ

計測の結果に付随した、合理的に計測量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ。

2) 応答周波数

ロッド式変位計は、RC 床版の振動変位に応答できる応答周波数を有するものとする。また、変位計のロッド先端部は床版が高応答の場合には、床版に接着剤等で固定する方が床版振動に追随するので良い。

*応答周波数：通常 RC 床版の固有振動数は数 Hz～10Hz 前後であり、その 2.5 倍以上の応答周波数範囲を持った変位計とする。「応答周波数：床版の固有振動数の 2.5 倍以上」

3) 耐久性

ロッド式変位計は、目的の計測期間（計器設置～計測終了・計器撤去）において十分な耐久性を有するものを用いるものとする。中古品であれば、必ず事前検査し、安定性、出力感度、絶縁抵抗値等を確認する。また、定期的なメンテナンス（メーカーに再校正）を推奨する。

ロッド式変位計が計測期間中に故障又は外的損傷を受けた場合には、同じ性能を有する変位計と交換することを基本とする。そして変位計交換前後の計測データの連続性に注意を要する。

4) 変位計の選定

ロッド式変位計は、想定している変位量、屋外環境での計測における耐久性、性能、取扱い易さ、安定性、設置・計測費用等を総合的に判断したものを選ぶ。表 4.2.1 に、動的計測・静的計測用ロ

ッド式変位計の仕様を示す。

表 4.2.1 ロッド式変位計の仕様

項目	動的計測用ロッド式変位計		静的計測用ロッド式変位計	
	仕様	備考	仕様	備考
計測容量 (計測範囲)	床版たわみ量の 1.5倍以上	例： たわみ量 10mm 容量：15mm 以上	床版たわみ量の 1.5倍以上	例： たわみ量 10mm 容量：15mm 以上
分解能 (最小読取值)	計測範囲の 1/100 以内	例： 計測範囲 10mm 分解能：0.1mm 以内	計測範囲の 1/100 以内	例： 計測範囲 10mm 分解能：0.1mm 以内
非直線性	±0.5%R0 以下	ヒステリシスも同 程度とする	±0.5%R0 以下	ヒステリシスも同 程度とする
繰り返し性	±0.5%R0 以下		±0.5%R0 以下	
応答周波数範囲	床版の固有振動数 の 2.5 倍以上	5 倍以上を推奨	1Hz 以上	
許容温度範囲	-10~70℃ 結露しないこと		-10~70℃ 結露しないこと	
出力の温度影響	±0.05%/℃以内		±0.05%/℃以内	

(2) 計測システムの選定

1) 静的計測システム

計測方法には大別して静的計測と動的計測がある。変化が緩やかな現象を計測するのが静的計測で、変化が急激な現象を計測するのが動的計測である。床版の変位計測においても、健全度Ⅲの初期状態では、変位の進行は緩やかなため静的計測でも良い。

静的計測システムには、以下の2方式があり計測目的に合わせて事前検討が必要である。

① 内部メモリ回収方式 (図 4.2.3 参照)

内部メモリ方式は、計測データをそのままロガー内部のメモリに一定のインターバルで書き込み、USBメモリ等の記憶媒体で計測データを回収するもので、計測データの収録のみに特化したものであり、閾値と比較して警報機の作動や警報メールを発令する機能は無い。

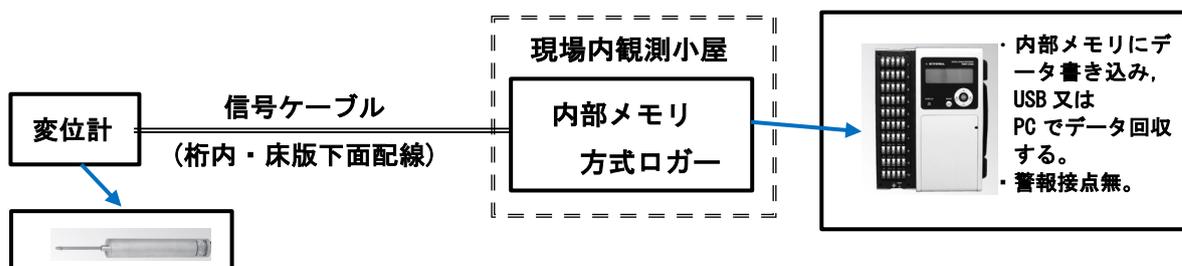


図 4.2.3 静的計測システム機器例 (内部メモリ回収方式)

② 外部処理方式（図 4.2.4 参照）

外部処理方式は、パソコンを利用して計測データを閾値と比較し、外部警報機の作動や警報メールを発令する計測管理に利用される一般的な静的計測方式である。計測データを現場のパソコンで処理する場合と外部サーバを利用して処理する場合がある。

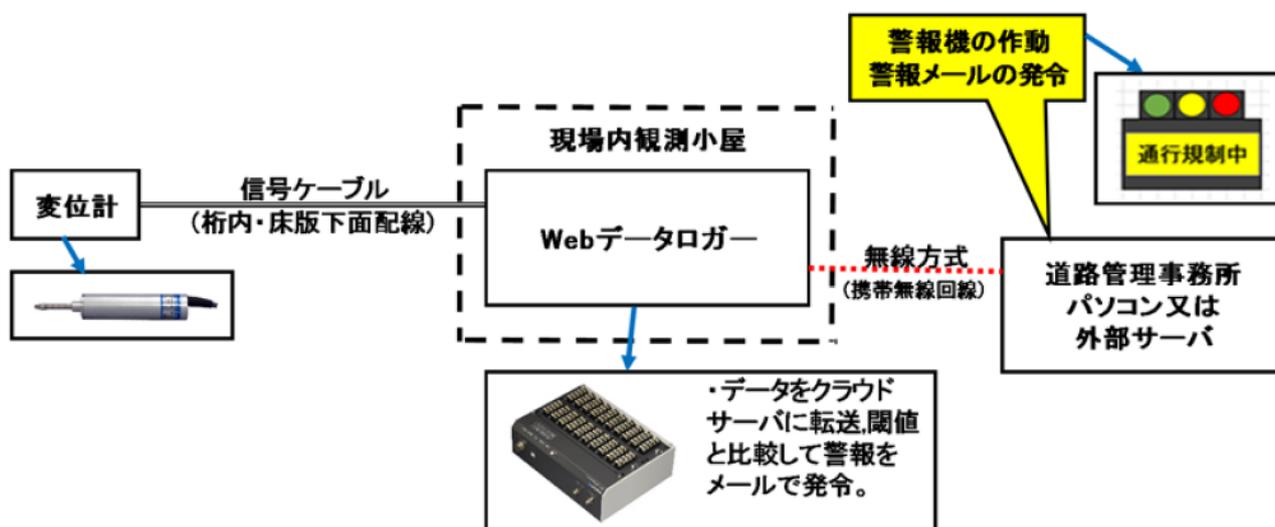


図 4.2.4 静的計測システム機器の例（外部処理方式）

2) 動的計測システム

RC 床版が健全度Ⅲの後期状態では、急激な抜け落ち・剥離が発生する可能性が高く、車両の通行に伴い変位量が急変する状態では動的計測が必要となる。

動的計測システムには、以下の2方式があり計測目的に合わせて事前検討が必要である。

① 閾値判定・データ未収録方式（図 4.2.5 参照）

計測データを収録せず、閾値との比較を行い、閾値をオーバーした時には警報機を作動させる方式で、計測データは残らない。比較的安価であるが、計測データが記録として残らない。

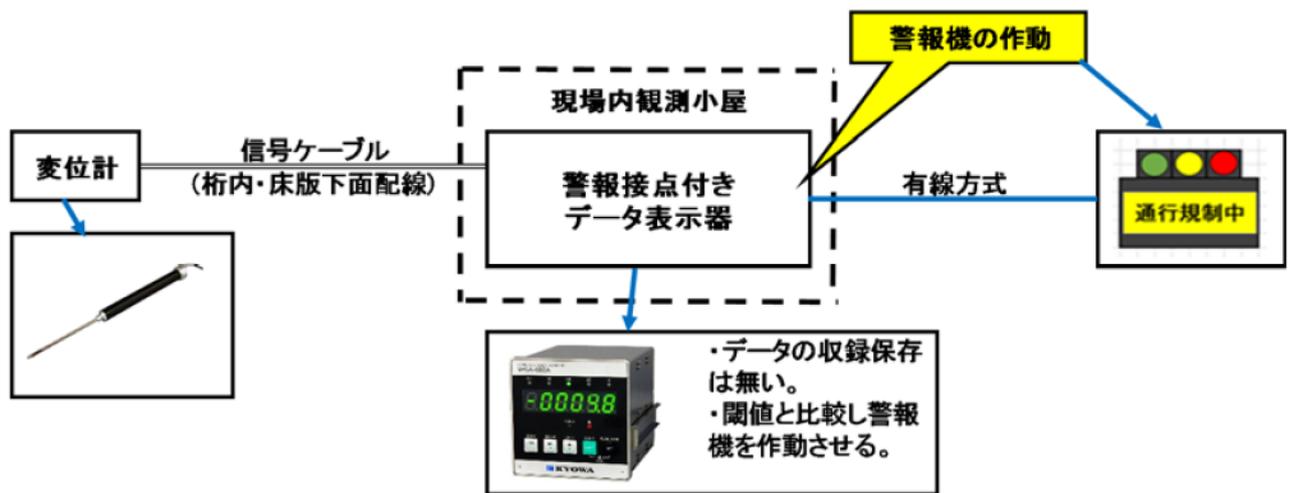


図 4.2.5 動的計測システム機器の例（閾値判定・データ未収録方式）

② 閾値判定・データ収録方式（図 4.2.6 参照）

計測データを収録し、閾値との比較を行い、閾値をオーバーした時には警報機を動作させると同時に警報をメールにて発令する方式である。比較的高価であるが、計測データが記録として残るので、変形発生状況を後で分析可能である。変位計アンプが内蔵された収録器には、パソコン制御で中速度（数 100Hz サンプルング）の計測が可能な装置もある。

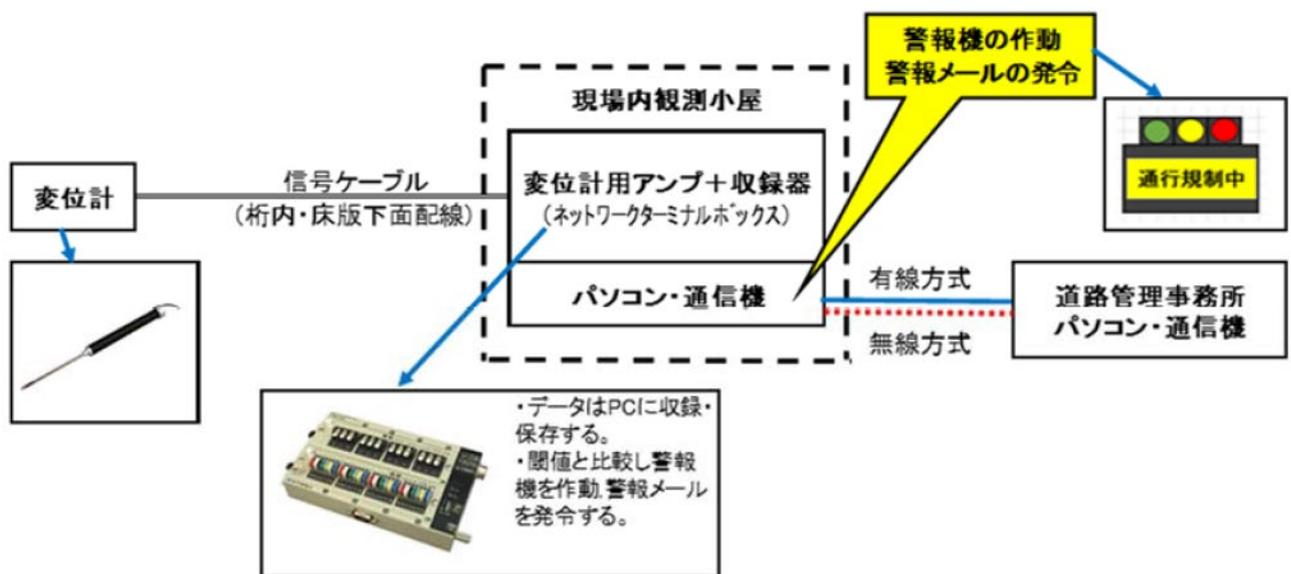


図 4.2.6 動的計測システム機器の例（閾値判定・データ収録方式）

4.2.4 変位計の設置

(1) 設置箇所

RC 床版変位の中でも特に測定対象とするのは、床版コンクリートの剥離や抜け落ちである。床版のたわみは、通常床版の中央付近が最大となるが、剥離や抜け落ち箇所と床版たわみの最大値発生箇所とはかならずしも一致せず、床版の損傷度合（特にクラック発生状況等）により決まるので、

変位計の設置箇所を決める際には、床版の点検結果や事前調査結果等を考慮して決定する。変位計設置箇所に関しては、以下の検討が必要である。

1) 設置箇所が明確な場合

RC 床版下面にクラックが多数発生している箇所や、床版に膨らみが見られるような明らかに抜け落ちが発生しそうな箇所が明確に判断できる場合は、その箇所に変位計を設置し常時計測するものとする。ただし、変位計をクラック線上に設置すると、クラック左右で異なる変位を生じることがあるので、クラック線上は避けて片側に寄せて設置・計測する。

RC 床版が膨らんで抜け落ちそうな場所では、膨らみの中央部に床版に垂直に設置する。変位計を設置する床版コンクリート表面部分が剥離することもあるので、変位計を設置する前に床版表面に浮き・空隙がないかハンマー等で打撃して確認を行う。

2) 設置箇所が明確でない場合

RC 床版の剥離・抜け落ちが発生しそうな箇所が限定出来ない場合は、事前に橋軸方向のたわみ分布等を測定し、抜け落ちが発生しそうな箇所を特定するものとする。特定した後にその箇所に変位計を設置し常時計測するものとする。たわみ分布測定法としては、光ファイバを線上又は面上に貼り付け、計測したひずみ量から分布図を作成し、変位計測箇所を特定する方法として変位計測補助作業がある。

(2) 変位計の設置

変位計の設置は、図 4.2.7 に示すように不動梁を主桁間に設け、その不動梁の治具を利用してロッド式変位計を設置する。図 4.2.8 に RAIMS の実験として高速道路橋に於いて実施した不動梁を用いた変位計の設置状況写真を示す。

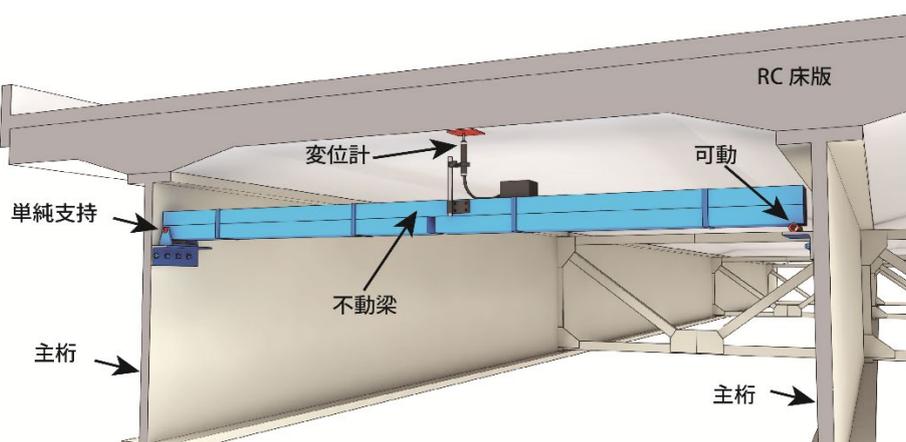


図 4.2.7 床版たわみ計測イメージ図

【現場写真例：ロッド式変位計設置写真例】



図 4.2.8 RC 床版の変位設置の概要

1) 不動梁の設置

変位計の設置箇所にはまず不動梁を設置する。不動梁は、RC 床版の損傷箇所（剥離又は抜け落ち等）の直下又は近傍に、両側の主桁（鋼桁）フランジ面に支持点を設けた不動梁を上方（床版下面近傍）に取り付ける。不動梁は、軽量で剛性の高い材料（例：アルミ製角パイプ□100×50×3）が取り扱い易く、作業性も良い。

不動梁設置位置は、変位計設置位置の直下とするが、現場の環境条件（構造上）によってはその位置を変更することもあるので、事前の現場確認が重要である。

不動梁は RC 床版に接近して設置すれば、主桁の変形（車両走行に伴う変形）を受けないので、両端固定支承が良いが、現場状況で不動梁設置位置が下方（主桁全高の 1/3 より下方）になり、主桁変形の影響が不動梁にもあると想定される場合には、不動梁の固定を片端は点支承、片端はローラー支承とすることが良い。

変位計設置近傍に対傾構が在る橋梁では、対傾構を不動梁として利用することも可能である。対傾構の上部にマグネットスタンド又は治具を取り付け、変位計を設置することが可能であればこれを利用しても良い。

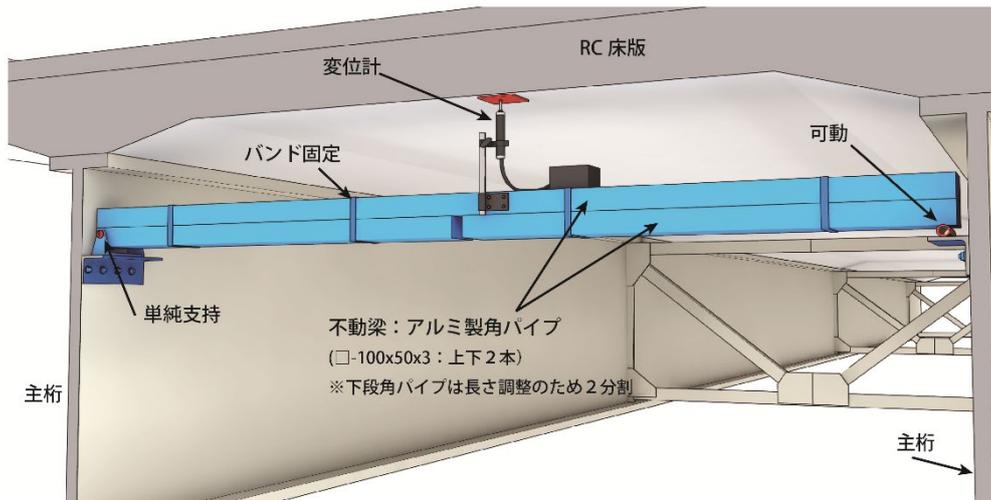


図 4.2.9 不動梁設置イメージ図

2) 変位計の設置 (図 4.2.10 参照)

変位計は短期間であればマグネットスタンドを用いて設置しても良いが、計測期間が長期間に及ぶ場合、専用の治具を用いて設置する(永久磁石も利用可能)。変位計は、RC床版に対して垂直となるように設置する。傾きが大きいと変位計のロッドがスムーズに可動しない場合があるので設置時に注意する。

RC床版に接するロッド先端は、RC床版に専用治具を用い接着剤等で固定する。ロッド先端部が滑ることによって変位計が傾斜する可能性がある。また反力の弱い変位計では車両通行時の床版変位を忠実にとらえることができない可能性がある。

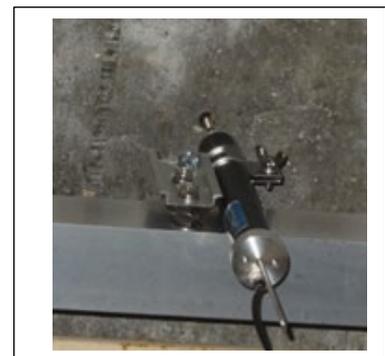


図 4.2.10 変位計設置状況

変位計の計測範囲の調整は、計測容量の50%程度で調整する。

目標の計測範囲を考慮することが第一であるが、変位計ロッドの中央付近が最も調整し易い。変位計を設置後必ず、ロッド伸縮の動きがスムーズであることを確認する。RC床版の変位は、基本的にRC床版が膨らむ方向の変位しか計測されないはずであるが、治具等の不具合で引き込まれる現象もあり得るので、両方向(伸縮)が計測できる状態に調整することが望ましい。

RC床版の劣化が進むと床版内部の水分が床版下面表面に浸み出してくることがあるので、変位計は防滴処理又は防護カバーを設置する。出来れば変位計自体が防水性であることが望ましい。

変位計から出ている信号ケーブルは、近傍の治具等に余裕をもって固定し変位計に無理な負荷がかからないように注意する。ただし、変位計ロッドの動きを拘束してはならない。変位計設置に際しても、ケーブルのみを持ったり、ロッドのみを持ったりせず、必ず変位計の本体を持って作業する。

変位計ロッドの伸縮の方向と電気的出力の方向性はメーカーにより異なるので、信号ケーブルを接続後、ロッドを伸縮させて感度方向を確認する。なお使用する全ての変位計の感度方向は必ず統一しておくことで、計測データの判断で問題を起こすことが無い。

3) 配線

変位計から計測器までのセンサ信号の伝送は、信号ケーブルを用いるのが望ましい（短期間の測定で電池・充電器等の電源が確保出来るのであれば、無線通信も考慮する）。信号ケーブルは、1 測点毎に独立したシールド付ケーブルを標準とする。多芯ケーブルを使用する場合、1 測点毎にシールドされた多芯ケーブルを使用することが望ましい。

信号ケーブルは、小動物による損傷を避けるために保護管で防護するのが望ましい。火災が問題となる場合には、難燃性の保護管を用いることを推奨する。

付近に高圧の電線が配置されている場合は、電磁ノイズの影響を受ける恐れがあるため、その影響がない箇所に配線するものとする。基本的に高圧電線との平行配線はしない。止むを得ない場合でも離して配線する。

信号ケーブルは、絶縁低下の原因となる接続箇所の無いものを理想とするが、止むを得ず接続する場合には、十分防水性を考慮した接続方式を採用する。

誘導雷による被災は、基本的に配線されている信号ケーブルから被雷する可能性が高いので、そのような地域では、信号ケーブルを電線管に配線したり、センサ及び計測装置に耐雷部品を装着したりして誘導雷から防護する。電源部分にも被雷することがあるので電源側にも耐雷装置を設置する。

4.2.5 現場と管理事務所との回線

現場と管理事務所間のデータ通信回線には、光ファイバ回線、電話回線、携帯電話回線、無線通信等がある。データの最終処理方法を考慮して、データ伝送量、伝送距離、IT 基盤の整備状況、特に現状の通信環境を調査し、信頼性等を考慮して適切なものを選定するのが望ましい。データ処理方法によっては相互通信が必要な場合もあるので、計測データの最終的な利用方法をよく検討して判断する。

変位計測方法のなかで静的計測方法は、基本的に計測スピードが遅く、データの変動も少ない為に記録器や PC 内のメモリ部にデータを記録し、必要に応じてデータを回収することが多い。これら常時のデータ監視ではなく、定期的なデータ回収管理の場合には、現場に於いて測定データのメモリ回収（半手で USB メモリ等の記憶媒体にデータ回収）や路車間通信による無線データ回収を行なう。無線通信によるデータ回収管理の場合には、事前に現場の無線通信環境の調査を行う（例：路車間通信で回収できる通信範囲（位置・距離）・回収データ量等）。これらの通信設備の電源も商用電源を基本とする。ただし、短期間の計測や計測データ量が少ない場合には、電池や太陽電池＋蓄電池等を利用するケースが多い。ただし、電池残量の余裕や、太陽電池の場合には日射の角度・日照時間・地域性等を考慮した余裕を持った電源設備とする。

4.2.6 データの蓄積

変位計測は動的計測の場合、常時連続監視計測を基本とし、100Hz 以上のサンプリング速度で計測を行い必要に応じて計測データの蓄積をする。閾値の比較のみで、計測データは蓄積しない場合もあるので、事前にデータの最終処理方式を決めておく。

静的計測の場合でも、毎計測時の閾値比較のみのケースもあるので、事前にデータの最終処理方式を決めておく。静的計測と動的計測では、データ量に大きな差があるので、蓄積する PC 又は記録装置の容量に注意する。静的計測から動的計測に移行することが想定される場合には、動的計測を基本とした

記録容量を準備する。

現場で計測データに対して予め設定した管理値との比較のみを行う場合でも、将来のデータ変動の傾向を検討する目的でデータを蓄積することを推奨する。

床版の変位が自然環境や交通環境の影響を受けることから、他の計測機器や環境計測機器の計測データが近傍に存在する場合には同時に収録することを推奨する。同時収録が不可能な場合でも、それらのデータを解析等の処理に利用することを推奨する。

表 4.2.2 に動的計測，静的計測に於ける概略データ量を示す。

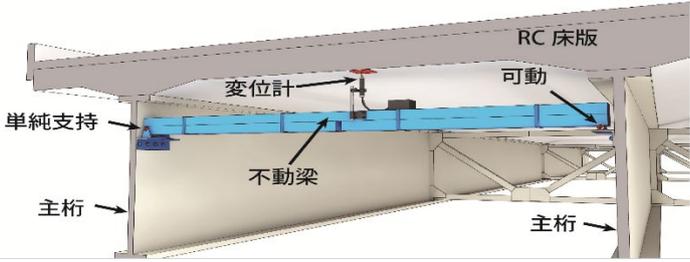
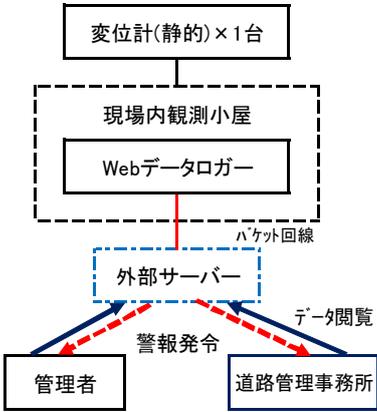
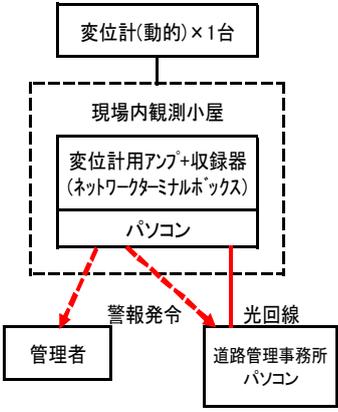
表 4.2.2 データ蓄積に必要な記憶容量

計測方式	計測条件	ファイル形式	記憶容量
動的計測	計測点数：変位計×1点 サンプリング周波数：100Hz 計測期間：1年間	CSV形式	100GB
静的計測	計測点数：変位計×1点 計測周期：1回/1時間 計測期間：1年間	CSV形式	2MB

4.2.7 費用の目安

モニタリングシステムの概算費用を示す（変位計1箇所当りの費用）。

表 4.2.3 概算費用（変位計1箇所当り）

項目	摘要	
	静的計測	動的計測
モニタリングシステムの例		
		
計測器	ロッド式変位計：静的計測	ロッド式変位計：動的計測
計測箇所数	1点+ケーブル30m	1点+ケーブル30m
測定期間	1年間	1年間
測定頻度	1回/10分間隔	100Hz サンプリング
データ回収方法	携帯電話回線	光回線
管理方式	現場管理方式	道路管理事務所管理方式
センサ材料費	20万円	20万円
計測システム費	機材：150万円(全損) 【10測点まで計測可能/台】 サーバ利用代：30万円/年	機材：300万円(全損) 【4測点まで計測可能/台 +増設可能(64ch)】
機材設置費	20万円	50万円
総計	220万円 (計測機材はレンタル可能)	370万円 (計測機材はレンタル可能)

※足場の設置費用・撤去費は含まず。

電源・電話回線・光回線は支給とする。

警報表示板は含まず。

4.3 結果の評価

RC 床版変位のモニタリングは、点検・調査等で過度の劣化が発見され、抜け落ちが想定される箇所の変位計測であり、抜け落ちの初期状況を把握し道路管理者へ通報し、道路交通安全を確保することが最大の使命である。しかし、万が一剥離・抜け落ちが発生しても、直ちに道路利用者へ警報を発し、道路交通安全が確保できるシステムであることが重要である。

管理値（閾値）の区分については、RC 床版の変位に対して警戒値、通行規制値、限界値の3段階の管理値を定めて計測管理を行うのが一般的である。ただし、変位が極めて小さい場合には、警戒値と限界値の2段階で管理を行う。

管理値のうち、通行規制値、限界値に達した場合は、影響がこれ以上拡大しないように、通行規制（通行止めを含む）することが基本であるが、現場状況を勘案して判断する。

4.4 保守

変位計による RC 床版の変位モニタリングでは、その計測期間を満足する計測機器の耐久性と変位計を含めた計測機器の設置環境の安定性も重要である。計測機器は定期的な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。それと共に電源やケーブル配線を含めた計測環境の保守が常に安定した計測データの収集には不可欠である。

(1) 変位計（不動梁含む）

- ・変位計設置前には、変位計の絶縁抵抗値・線間抵抗値をチェックし、更に計測器に接続して指示値が安定していることと変位計の感度方向を確認する。中古又はレンタル品の変位計を使用する場合には、さらに事前に再校正試験を行った日時と検査成績表の内容を確認する。
- ・計測期間中は定期的な点検を行う。計測器側の変位計ケーブル端末で絶縁抵抗値・線間抵抗値をチェックし、更に計測値に安定性があることを確認する。また変位計の外観に損傷が無いのか、変位計設置治具やマグネットスタンドに損傷が無いのか、変位計のロッドが床版に垂直にセットされているか、ロッド固定位置がズレていないか等を目視点検する。
- ・不動梁は外観に損傷がないか、設置位置のズレが無いかを目視点検する。
- ・変位計点検チェックの前後で必ず計測データに連続性があることを確認する。

(2) 計測機器（変位計を除く）

- ・変位計設置前には、変位計と組合せて感度方向や結線方式を確認し、データにフラツキが無く安定して計測できることの確認を行う。
- ・計測期間中は定期的な点検を行う。計測器が自己診断機能を持った計器は自己診断機能で計測動作が正常であることを確認する。その機能が無い計測器は、簡易な基準電圧等の校正データを入力し、出力電圧等が正常であり安定していることを確認する。また、パソコンや通信機器を通してデータの転送を行っている場合は、転送されたデータが一致していることを確認する。
- ・閾値等の設定を行っている場合には、その機能が正常か確認を行う。
- ・全ての計測機器の点検チェックの前後で必ず計測データに連続性があることを確認する。

(3) 配線関係（電源含む）

- ・変位計設置前には、使用する信号ケーブルに外的損傷が無いことを確認し、コネクタ部の形状や絶縁抵抗値のチェックを行う。中古品の場合には、絶縁抵抗値のチェックと合わせて線間抵抗値を確認するかセンサを接続して測定器側の出力を確認する。外観には表れないケーブル内部のキンク等もあるので念入りにチェックを行う。
- ・計測期間中は定期的な点検を行う。変位計から計測器までの信号ケーブルに損傷（外観損傷等）が無いことと絶縁抵抗値の低下が無いことを確認する。

5章 光ファイバによるプレキャスト床版の接合部のモニタリング

5.1 技術の概要

5.1.1 目的

プレキャスト PC 床版への床版取替えが順次進められている。取替え後の床版の耐久性を考えた場合、プレキャスト部ではなく、現場打ちとなる接合部に変状が出る可能性が高い。そのため、接合部さえみしておけば、その変状をいち早く察知することができる。本モニタリングは、橋軸方向に連続して複数存在する接合部を、光ファイバセンサにより効率的に監視するために適用するものである。

本モニタリングでは、接合部をまたぐ様に床版下面に光ファイバを固定して、光ファイバに沿った“ひずみの分布（単位[$\mu\epsilon$]または[10^{-6}]）”を定期モニタリングする。接合部の変状の発生やその位置を、光ファイバに沿ったひずみ分布計測結果をもとに把握することによって、重点的に近接目視をすべき箇所や、早期に措置すべき箇所などをスクリーニングすることで、点検の効率化に資する。



床版下面の様子

図 5.1.1 床版架け替え事例（左）と光ファイバ設置の様子（右）

5.1.2 光ファイバによるモニタリングシステムの概要

(1) 光ファイバセンサ

光ファイバセンサには様々な原理にもとづく多くの種類がある（2編3章図 3.1.2 参照）。

本モニタリングでは、橋軸方向に網羅的に監視する必要があることから分布型で、微細な変状をとらえる必要があることから、BOCDA と BOTDR を用いることとした。

(2) モニタリング原理

光ファイバそのものがセンサとして機能し、光ファイバ全長にわたって変状をとらえることができる計測技術を、分布型光ファイバセンサと呼ぶ¹⁾²⁾。本システムでは、モニタリング対象の床版下面に光ファイバを橋軸方向に直接固定し、床版接合部に生じた変状を、分布型光ファイバセンサ技術によりモニタリングするものである。光ファイバの全長にわたってひずみの分布状態を詳細にとらえることができるため、僅かな変状をモニタリングできる。

分布型光ファイバセンサのうち、ブリルアン散乱を用いた計測技術に BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)³⁾ と BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) がある。BOCDA が光ファイバの両端からポンプ光とプローブ光を入射して対向伝搬、位置選択的に誘導散乱を起こすことによって、任意の点のひずみ計測を行うのに対し、BOTDR は光ファイバの片端か

らパルス光を入射して、光ファイバの片端から順次ひずみ計測を行う。空間分解能は BOCDA が数十 mm 程度であり、BOTDR は 1m 程度である。ブリルアン散乱光は、入射光に対する周波数差が光ファイバの各部分のひずみに依存することが知られている（図 5.1.2）。BOCDA と BOTDR の両方式によれば、入射光の変調周波数からその発生位置を、散乱光の周波数変化から、光ファイバに沿ったひずみ分布を計測することができる。ひずみ分布計測結果のイメージを図 5.1.3 に示す。接合部の開口変位の発生を、それに伴って光ファイバに生じるひずみの局所変化として検知する。

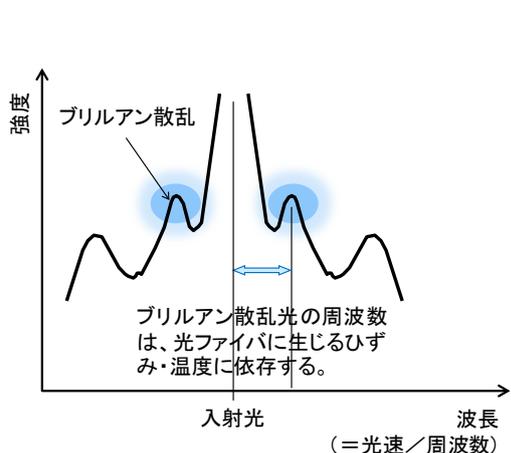


図 5.1.2 散乱光スペクトル

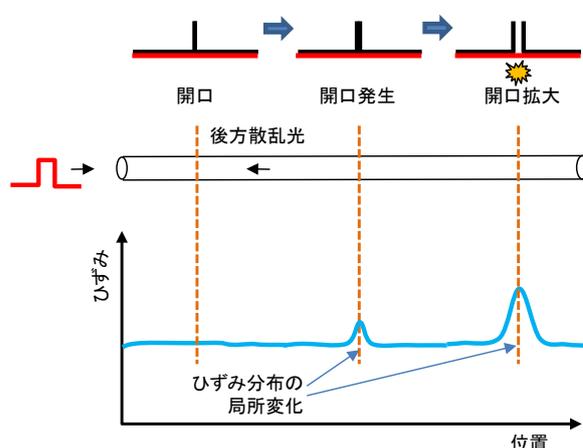


図 5.1.3 ひずみ分布のイメージ

(3) システム構成

本方式によるシステム構成を図 5.1.4 に示す。床版下面に固定した光ファイバを光ファイバ計測器に接続する。計測結果（ブリルアン散乱光周波数）を初期の計測結果などと比較して、発生したひずみ分布を算出し、接合部の変状の発生やその位置を把握する。

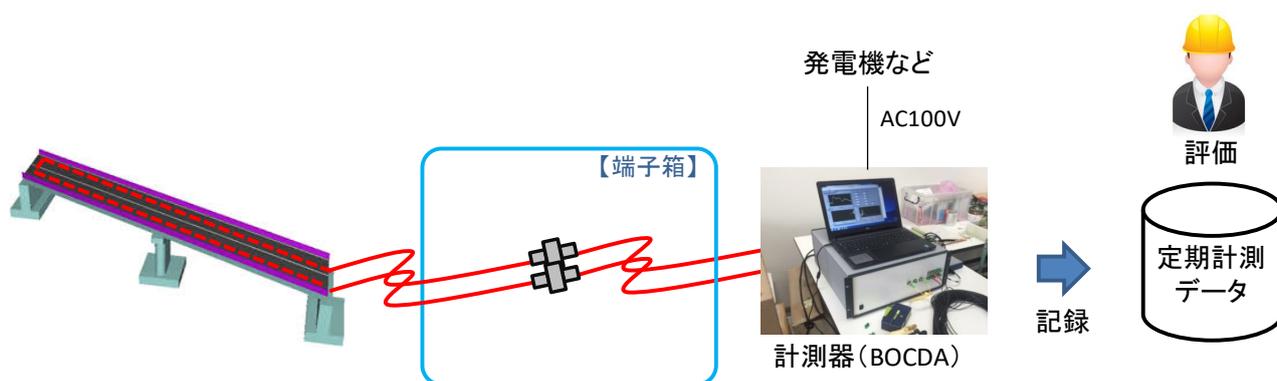


図 5.1.4 システム構成

1) 光ファイバ

光ファイバは、使用する計測器に応じたものとするが、通信用途の汎用シングルモードファイバ (SMF) が一般的であり、BOCDA も BOTDR も同じものを使用することができる。本モニタリングに利用するブリルアン散乱は、偏波の影響を受けるため、計測器によっては偏波保持ファイバ (PMF) を使用することによって散乱光の信号強度の向上などが期待できる。しかし、殆どの計測器は偏波無依存となるような機構を有するため、SMF で問題ない場合が多い。

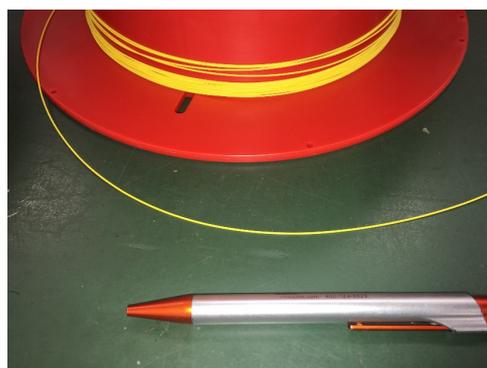


図 5.1.5 光ファイバの例 (0.9mm 心線)

光ファイバの被覆厚については、外径 0.9mm で、被覆と内部光ファイバが一体化されているタイトバッファとする (図 5.1.5)。外径がこれより細かい場合には施工性が悪くなること (断線しやすいこと)、これより太い場合には変状の検知感度が悪くなること、について留意する必要がある。

床版取換え後の橋梁におけるひずみ分布計測結果の例を図 5.1.6 に示す。光ファイバの設置後から 1, 2, 3, 6, 9, 12 か月後におけるひずみ分布の変化を示している。接合部に開口変位が生じた場合、局所的な引張ひずみがみられるが、そうした挙動はみられず、変状は生じていないと言える。

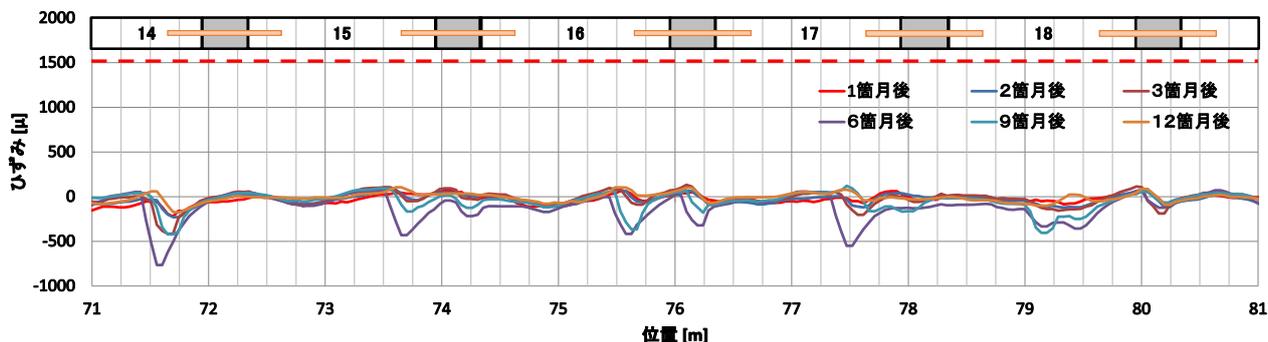


図 5.1.6 床版取替え後のひずみ分布計測結果の例

2) BOCDA 計測器 (パソコン含む)

ひずみ分布を計測する計測器に BOCDA を用いた場合、計測器を選定するうえで最も重要なパラメータは空間分解能である。空間分解能は、ひずみゲージのゲージ長に相当するもので、これが狭いほど狭い範囲のひずみ量を計測することとなる。接合部以外に変状が生じていないと仮定すれば、接合部のひずみ (ε) は、空間分解能 (L) と接合部の開口変位量 (dL) を用いて以下の関係式であらわされる。

$$\varepsilon = dL/L$$

そのため、空間分解能が小さいほど、微小な開口変位量を局所的なひずみ分布変化としてとらえることができる⁴⁾。例えば、空間分解能 (L) を 10cm, 計測器のひずみ計測精度 (ϵ) を 100×10^{-6} とすると、0.01mm の開口変位量 (dL) を検知することができる。

表 5.1.1 空間分解能と検知可能な開口変位量の関係

空間分解能 [m]	1.00	...	0.10	...	0.05
検知可能な開口変位 [mm]	0.100	...	0.010	...	0.005

計測器の制御ならびに計測データの記録用としてパソコンを用いる。初期データが格納されており、計測器用のプログラムまたは汎用計算プログラムなどを用いて、計測後速やかに初期データとの比較ができることが望ましい。

計測器のコネクタ部は反射の少ない斜め研磨 (Angled-PC) を用いることが望ましい。

計測器の使用環境は、0~+40°C範囲内で、結露のないことが望ましい。

3) BOTDR 計測器

ひずみ分布を計測する計測器に BOTDR を用いた場合、計測するうえで重要なパラメータは計測時間である。パルス幅が短いほど空間分解能が向上するが、信号強度が低下してしまう分、加算回数を増やす必要がある。すなわち計測時間がかかってしまい、実際の現場で作業時間が増大してしまうことが想定される。短い計測時間でひずみ分布を計測できることが望ましい。

また、BOTDA 計測器を用いた場合と同様に、計測データの記録用としてパソコンを用いる。

計測器のコネクタ部は反射の少ない斜め研磨 (Angled-PC) を用いることが望ましい。

計測器の使用環境は、0~+40°C範囲内で、結露のないことが望ましい。



図 5.1.7 BOTDR 計測器

4) 電源など

定期的な計測において電源は、必ずしも商用電源である必要はない。商用電源が確保できない場合には、発電機で代替可能である。また、安定した電源を使用する為には、停電時の予備電源として無停電電源装置 (瞬間停電時のシステム保全を目的)、電源ノイズ対策用に絶縁トランスなどの使用も検討する。

5.1.3 計測期間

本モニタリングは、床版更新後の適用を想定している。更新後の対象床版に光ファイバと計測器を設

置し、計測開始になってから変状が閾値を超え、注入工法などによる開口部の補修をした場合でも、その後も継続できることが望ましい。接合部の変状をモニタリングする目的であること、定期点検時における近接目視を補助する目的であること、などから 10 年を超えるような長期間における定期的な計測が想定される。その間連続で安定した計測ができる仕様のモニタリングシステムを選定するものとする。

5.2 モニタリングの方法

5.2.1 モニタリングの手順

<準備>

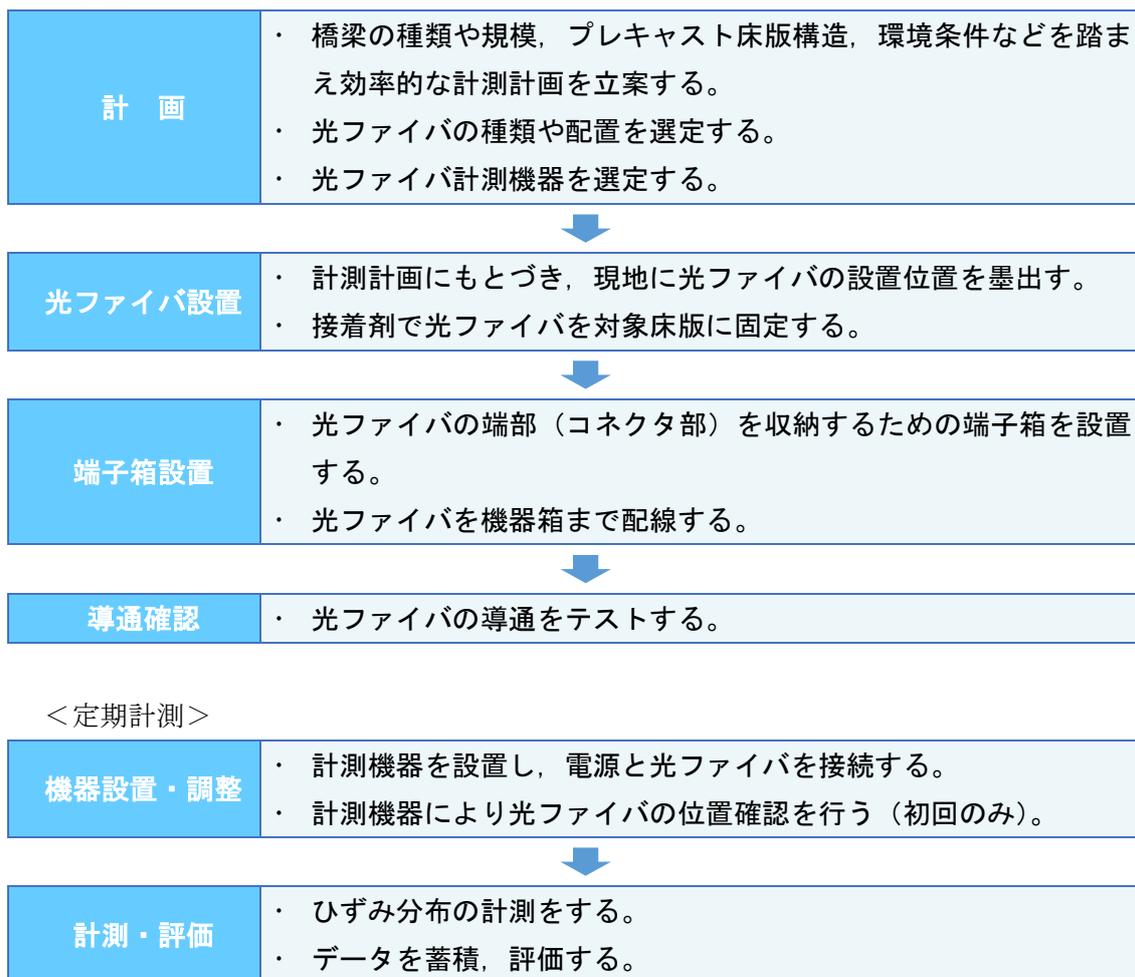


図 5.2.1 プレキャスト床版接合部光ファイバモニタリング手順

5.2.2 計画

プレキャスト床版接合部の監視を行う橋梁の種類や規模（橋長、幅員など）、床版下部の構造（地盤状態又は河川の有無など）や床版までの高さ、周囲の地形条件や環境条件を調査して光ファイバの設置・配線方法・端子箱の位置などを十分検討し、目的に則した効率的な計測計画を立案する。

(1) 橋梁の種類や規模

床版構造によって、プレキャスト床版接合部の大きさや間隔などに違いはみられるものの、基本

的には橋軸方向に沿って光ファイバを設置することとなる。その結果、接合部に沿って橋軸直角方向に異常が生じた場合に、橋軸方向に設置した光ファイバが異常を検知できる。橋軸方向における光ファイバの設置範囲は、橋梁の種類や規模その他条件を鑑み決定する。

(2) 環境条件

光ファイバを設置するために必要な足場の確保が重要である。大型橋梁には点検用通路があるが、片側の主桁に近接して設けられていることが多く、必要に応じて別途足場が必要となる。また、河川上にある場合や谷合にある場合には、計測機器設置・配線などの作業において、必ず足場が必要となるので、状況に合わせて足場仮設、または高所作業車での作業を計画する。

資機材や足場などの運搬方法、電源設備の設置方法などを調査・検討する。山間部にある橋梁などでは機材の運搬ルートを事前調査する。車輛で近づけない場合には、台車などを用いた運搬方法を検討する。本モニタリングは定期計測のため、必ずしも商用電源である必要はない。商用電源が確保できない場合には、発電機で代替可能である。

落雷によって、光ファイバが損傷を受けることはないが、計測機材や電源設備の耐雷対策も検討する。

(3) 光ファイバ配置の選定

ファイバは2条（計測器から橋軸方向に設置、Uターンして往復路を構成）の設置を標準とし、必要に応じて4条、6条、8条と偶数で設置する。断面方向の位置は、走行車線のタイヤ直下の位置が望ましい。橋軸方向に厳密な直線を確認する必要はなく、型枠目地を目印などに大よそ橋軸方向と平行であれば、モニタリング上は差し支えない。

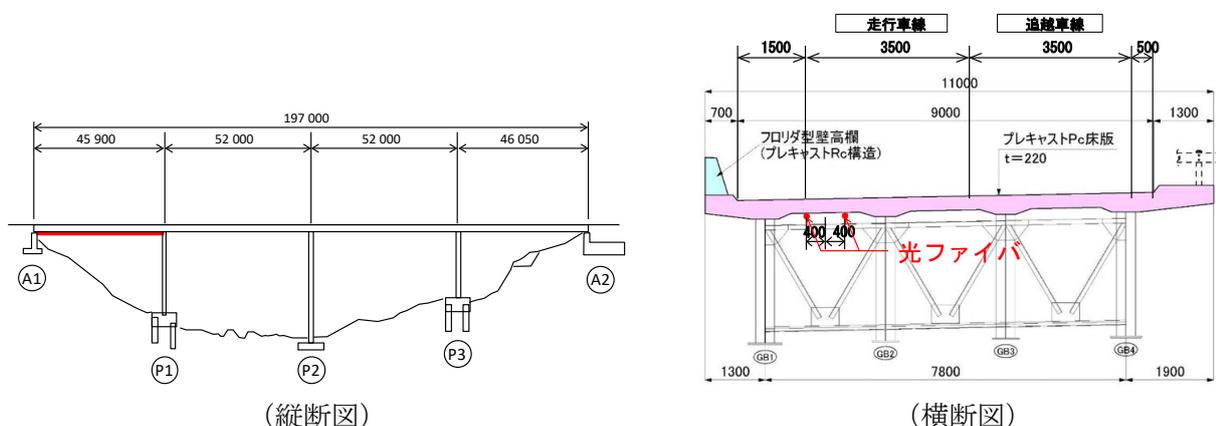


図 5.2.2 標準的な光ファイバの配置

光ファイバの配線においては、電力線などと平行配線をして構わない。現場状況に応じて、既設の電力線や配水管などに併設することで光ファイバの損傷リスクを低減したり、構造物へのビス止めなどの手間を低減したりすることができる。また、都市部においても小動物の被害が想定されるので、必要に応じてケーブルを防護管にて配管・配線を行う。コネクタ接続や融着接続部に関しては、接続部の劣化や防水低下の発生が考えられるので、十分養生を行い使用する。

(4) 機器の選定

計測機器を準備する際は、計測期間や設置方法を考慮し機材の準備を行う。この際、機器の仕様を良く検討し、計測期間に合った機材の調達に努める。特に、機材の組合せは、計測目的の仕様に合致していることを必ず確認する。例えば、光ファイバ接続コネクタ部の形状や光ファイバのモードフィールド径などの僅かな仕様の違いが、損失ならびに計測結果に大きな影響を与えかねないため、確認が必要である。

計測機器は、必要に応じて事前に組み合わせて、現場搬入前に調整・確認を行う。

(5) 計測方法

プレキャスト床版接合部計測においては、基本的に静的計測で行い、計測データの時系列変化をもって変状発生箇所の検知を行う。

5.2.3 光ファイバ設置

(1) 事前準備

計測計画にもとづき、現地に光ファイバの設置位置の墨出しを行う。設置表面に光ファイバの設置に支障がある場合（大きい段差がある場合や漏水が生じている場合など）、設置位置を変更する（迂回するなど）ことを検討する。また、設置位置は、粉じんや油分を取り除くためにウエスなどを用いて清掃する。

(2) 光ファイバ固定

設置位置に光ファイバを固定する。はじめに、光ファイバを設置位置に合わせて配置したうえで、養生テープなど粘着力の低いテープで仮固定する。このときに、直線部分の光ファイバは軽くテンションをかけながら仮固定すると、接着時の作業性の観点（光ファイバと床版表面とのあいだに隙間が生じにくい）や計測結果をもとにした現地位置との整合性を確認の観点（ブリルアン散乱を用いた計測技術によってテンションをかけた場所が確認できる）から都合が良い。次に、仮固定したあいだの光ファイバを、接着剤を用いて床版表面に全長固定する。固定する際には、光ファイバと床版のあいだに接着剤が入る様に努める。接着剤には、二液性のエポキシ樹脂を、また作業性の点から、二液の混合がノズルで自動的に行われるガンタイプの工具を用いると良い。



図 5.2.3 光ファイバの固定状況

設置終了後，初期値を計測する前にひと晩程度，接着剤が硬化するための養生期間を置くこと。このときに，特に雨や水の養生は不要である。



図 5.2.4 固定完了後の様子

(3) 配線

設置した光ファイバを端子箱まで配線する。配線部は，光ファイバが損傷しないように，ジャケット被覆付きの光ファイバを用いる，あるいは保護管で光ファイバを保護するなどの措置を施す。これらは，現地環境や予定されている計測期間などをもとに具体的な措置方法を検討する。

また，光ファイバ端部には，計測器に接続するためのコネクタを融着接続などで取り付ける。



図 5.2.5 光ファイバの橋台部の配線状況

5.2.4 端子箱設置

光ファイバ端部（コネクタ部）を収納するための端子箱を設置する。落下や浸水などが無いよう適切な風雨対策を施す。

光ファイバを機器箱まで配線する。このとき、端子箱のケーブル引き込み孔から雨水などが浸入しないようにする。



図 5.2.6 端子箱の設置状況

5.2.5 導通確認

機器箱まで配線した光ファイバのコネクタ片端に可視光を入射し、もう片端まで導通があるかどうかを目視で確認する。導通が確認できない場合、OTDR 計測器を用いて断線や局所的な曲げが生じている位置を確認し、新たな光ファイバを設置のうえ、融着接続するなどの必要な対策を施す。

5.2.6 機器設置・調整

計測機器の設置は、機器に過大な負荷（振動や衝撃含む）が掛からないように丁寧に扱う。計測機器の運搬には専用のケースを用いて、重量のある計測機器は二人で運搬するなど充分気をつける。また、計測機器設置時に、環境温度と計測器の温度が異なる場合（特に冷え切った計測器を、急に高温多湿下に設置するなど）については、結露による回路ショートが生じないように、計測機器の電源投入前に計測機器そのものの温度を環境温度になじませる必要がある。

計測機器を端子箱付近に設置し、配線した光ファイバを繋ぐ。このとき、必ず光ファイバ端面を専用工具で清掃する。さらに、端面スコープで清掃状況を確認することが望ましい。また、突然の天候の変化に備えて、計測機器類の雨養生について検討、必要に応じて準備する。



図 5.2.7 機器の設置状況

計測機器により光ファイバの位置確認を行う（初回のみ）。具体的には、設置した光ファイバの任意位置に冷却スプレーなどを用いて温度変化を与え、ブリルアン散乱を用いたひずみ計測機器でひずみ分布を計測する。このときに空間分解能以上で温度変化が与えられれば、ひずみ分布計測結果から冷却した位置を確認することができる（10°Cの変化で 200×10^{-6} ひずみ相当）。本結果をもとに、光ファイバ計測結果と現地との位置関係を把握する。

5.2.7 計測・評価

(1) BOCDA

BOCDA 計測器を用いて定期モニタリングを開始する。

定期的実施するひずみ分布計測結果をもとに、局所的なひずみ変化の有無、発生位置とその変化量の経時変化を把握する。仮に、ある特定の位置でのひずみが上昇しつづけている場合には、その箇所での接合部が開いていると考えられる。

定期的実施するひずみ分布計測においては、計測データはテキストデータ（CSV、一回あたりのモニタリングにつきファイルサイズは 100k バイト程度（50m×2 条の場合）である）としてすべて蓄積しておくとともに、定期的にグラフ描画を行い、閾値を超えていないか経過を観察すること。ブリルアン散乱のスペクトルデータまで含めた場合のファイルサイズは 40~50M バイトであるが、不具合が出た場合の原因究明に役立つ場合があるため、初回のスペクトルデータは保存しておくこと。

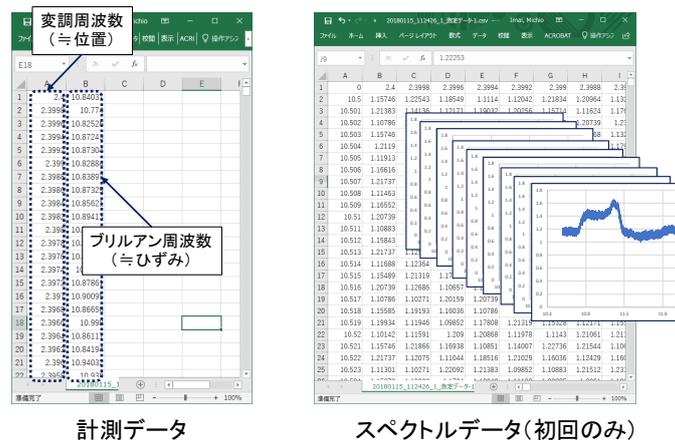


図 5.2.8 計測データの概要

(2) BOTDR

BOTDR 計測器を用いて定期モニタリングを開始する。BOTDA 方式と同様に、ひずみ分布計測結果をもとに、局所的なひずみ変化の有無、その発生位置と変化量の経時変化を把握する。定期的実施する場合の計測データはテキストデータ（CSV、一回あたりのファイルサイズは BOTDA 方式とそれほど相違ない）として、定期的に保存しておくことが望ましい。BOTDA 計測器によってより高分解能で計測したデータを初期データとして、おおまかな変化量を BOTDR 計測器で観測することなども想定できる。

5.2.8 費用の目安

モニタリング範囲を 100m 長とした設置時費用について試算する。同長さに対して、往復路の光ファイバ 2 条で接合部をモニタリングするとすれば、合計で 200m 長の光ファイバを設置することとなる。これまでの実績によれば、足場のある状態での光ファイバの設置は、作業員 1 + 2 人で 100m/日程度の歩掛である（外径 900 ミクロンの場合）。合せて、計測器設置や端子箱までの配線で 1 日をみれば、合計で 9 人日（3 人×3 日）の作業となる。

計測時については、作業員が計測機器を持参しての定期的なモニタリングとなるため、そのための人件費とリース費または機器費が発生する。概算費用の内訳を BOCDA と BOTDR についてそれぞれ表 5.2.1 と表 5.2.2 に示す。

表 5.2.1 概算費用の内訳（BOCDA）

設置時	材料費	光ファイバ	200m	20,000 円
		接着剤	一式	50,000 円
		端子箱など	一式	20,000 円
	人件費		9 人日	420,000 円
計測時	人件費		2 人日	90,000 円/回
	リース費	BOCDA 計測器など	一式	100,000 円/回

全体構成イメージ

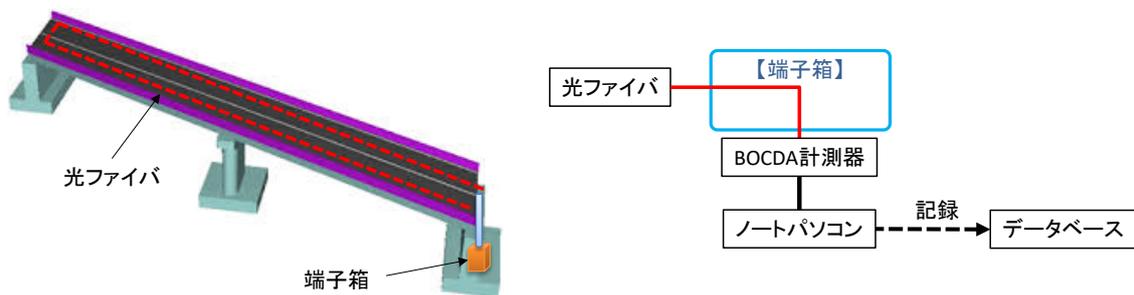
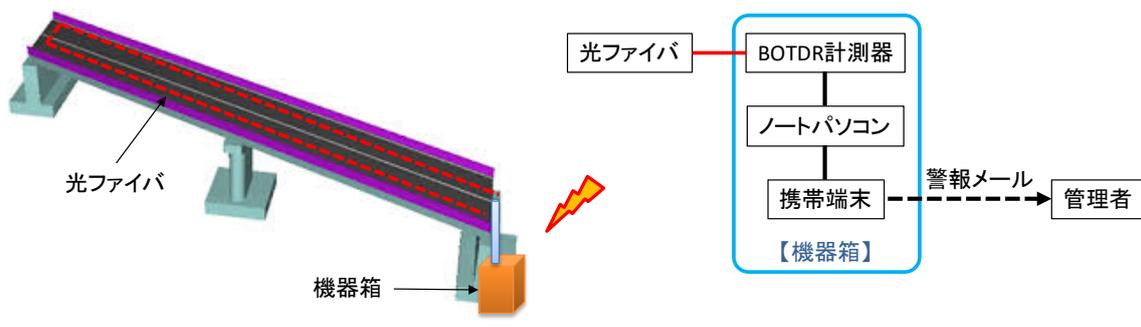


表 5.2.2 概算費用の内訳(BOTDR)

設置時	材料費	光ファイバ	200m	20,000 円
		接着剤	一式	50,000 円
		端子箱など	一式	20,000 円
	人件費		9 人日	420,000 円
	機器費	BOTDR 計測器	一式	9,900,000 円
計測時	人件費		2 人日	90,000 円/回

全体構成イメージ



5.3 結果の評価

プレキャスト PC 床版の接合部のモニタリングは、接合部の変状の発生やその位置を検知し、道路管理者が重点的に確認・措置すべき箇所を明確にして（スクリーニング）、その維持管理を効率化することが最大の使命である。

(1) BOCDA

管理値（閾値）の区分については、床版接合部のひずみ値に対して表 5.3.1 に示すような管理値を決める。これは、開口変位 0.1 mm 幅相当のひずみで、本閾値を超えた場合には道路管理者がその接合部を近接目視で確認することとし、超えない場合にはその接合部は特に目視不要とすることで点検の効率化を図る。

表 5.3.1 管理値の目安

	管理値	備考
異常あり	$1,500 \times 10^{-6}$	開口 0.1mm 幅相当（空間分解能 7cm 程度）

(2) BOTDR

空間分解能 1m のひずみ分布測定でも、コンクリート接合部全体のひずみ変化を計測することが可能である。コンクリート接合部周辺での変化が局所的に生じた場合、そのひずみ分布の特異的な変化から検知しようと推測される。

5.4 保守

光ファイバによるプレキャスト床版の接合部モニタリングでは、その計測期間を満足する計測機器の連続性と、光ファイバの設置環境の安定性の確認も重要である。定期的なモニタリングを行うための計

測機器には適切な保守が行われ、その性能を維持する必要がある。それと共にケーブル配線を含めた計測環境の保守が常に安定した計測データの収集には不可欠である。

(1) 光ファイバ

- ・光ファイバ設置前には、メーカーの検査成績書などで損失が所定の値以下であることを確認する。また、光ファイバ設置後の損失を確認しておき、その値が大きく変動していないことを確認する。
- ・PC床版と光ファイバが接着剤によって固定されていることを目視で確認する。紫外線や漏水などによって接着剤の色味に局所的な変化がある箇所については特に注意して確認する。もし、異常が見られた場合には、接着剤で再固定する。

(2) 計測機器

- ・計測機器の外観に損傷などが無いことを確認する。
- ・定期的モニタリングに用いられる計測機器には、基本的に同一機種を同じ計測設定で使用する事が望ましい。

(3) 端子箱

- ・端子箱への配線接続部や、端子箱自体の固定にがたつきなどが無いことを確認する。また、雨水や虫などが端子箱内部に侵入していないことを確認する。

(4) 配線関係（電源含む）

- ・光ファイバ配線などに異常がみられないか目視で確認する。

システムの使い分け

設置した同じ光ファイバを用いて、計測器を繋ぎかえることで、システムを変更することができる。(付録)表 1 にシステムの使い分けを示す。

標準システムでは、ブリルアン散乱を利用する BOCDA 計測器によって比較的高空間分解能で光ファイバに沿ったひずみ分布を計測する。例えば、BOTDR でも同様に光ファイバに沿ったひずみ分布を得ることができる。両者の違いは、空間分解能と光ファイバの構成である。空間分解能は、検知可能な開口変位量に関する(表 5.1.1)。具体的な目的に応じて、適した計測器を選択することができる。

(付録)表 1 システムの使い分け

計測方式	位置付け	モニタリング項目	備考
BOCDA	標準システム	ひずみ	空間分解能 cm オーダー, 両端接続
BOTDA	標準システム (BOCDA と代替可)	ひずみ	空間分解能 cm オーダー, 両端接続
BOTDR	汎用システム (低空間分解能)	ひずみ	空間分解能 m オーダー, 片端接続
FBG	ポイント計測システム	ひずみ	空間分解能 mm オーダー, 高精度

(1) BOTDA

光ファイバのひずみ分布を計測する計測器として BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) を用いる。BOTDR 同様、計測するうえで最も重要なパラメータは、主にパルス幅、掃引周波数、加算回数である。パルス幅が短いほど空間分解能が向上するが、信号強度が低下してしまう分、加算回数を増やすことが良い。掃引周波数は、ひずみの大きさに応じて変更すべきであり、掃引周波数の範囲内にブリルアン周波数が含まれるようにやや広めに設定する。BOTDR と異なり、光ファイバの両端を計測器に接続する必要があるが、高い空間分解能を得ることができる。



(付録)図 1 BOTDA 計測器

(2) BOTDR⁵⁾

光ファイバのひずみ分布を計測する計測器として BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) を用いる。計測するうえで最も重要なパラメータは、主にパルス幅、掃引周波数、加算回数である。パルス幅が短いほど空間分解能が向上するが、信号強度が低下してしまう分、加算回数を増やすことが良い。掃引周波数は、ひずみの大きさに応じて変更すべきであり、掃引周波数の範囲内にブリルアン周波数が含まれるようにやや広めに設定する。



(付録)図2 BOTDR 計測器

(3) SDH-BOTDR

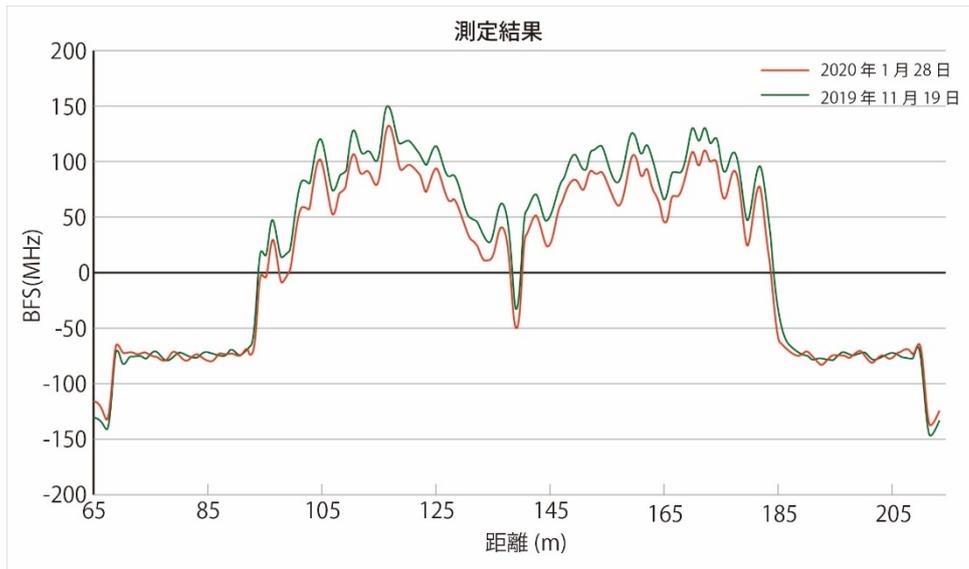
光ファイバのひずみ分布を計測する計測器として SDH-BOTDR (Self-Delayed Heterodyne Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) を用いる。得られる情報や考慮すべきパラメータは、前項の BOTDR とほぼ同様である。BOTDR よりも計測時間が非常に短い点が有利である。



(付録)図3 SDH-BOTDR 計測器

SDH-BOTDR を用いて、光ファイバに沿ったひずみ分布を取得した例を紹介する。橋梁の床版下面に、5.2.3 で記載した敷設方法で敷設した光ファイバを接続し、2 回計測した結果を(付録)図4 に示す。モニタリング領域(約 90m~185m の区間)のひずみ分布は、2 回目(2020/01/28)のひずみ分布のほうが、1 回目(2020/11/19)のひずみ分布に対して一様に大きくなっていることが分かる。

このような計測を定期的 to 実施し、ひずみ分布の変化をモニタリングすることにより、ひずみ量の特徴的な変化を検知することができる。前述の BOTDA の常時測定の結果を組み合わせることで、ひずみ量の特徴的な変化を生み出す要因となる事象を推定することもできる。



(付録)図4 SDH-BOTDRによるひずみ分布の測定結果例

(4) FBG

ファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating : FBG) は、光ファイバのコア部に周期的な屈折率変化が形成されたポイント型のセンサである。屈折率の変化はグレーティング (回折格子) として働き、グレーティングの周期が作るブラッグ反射条件を満たす波長の光のみを反射させることができる。広帯域なスペクトルを持った光を FBG に入射すると、屈折率が周期的に変化しているグレーティング部分の反射は、ブラッグ波長と呼ばれる特定の波長に対してのみ、互いに強めあう方向に干渉する。これによって FBG は、ブラッグ波長の光成分のみを反射し、それ以外の光成分をすべて透過させる。このブラッグ波長を観測することにより、FBG に加えられたひずみを観測することができる。高精度で動的な計測ができる特長がある。また、一本の光ファイバに複数の FBG を繋げることができるが、その個数には上限があること、またその個数ごとにセンサ加工費用がかかることなどから、接合部 10 箇所を超えるような場合には向いていないと言えない。



(付録)図5 FBG 計測器

参考文献

- 1) 保立和夫, 村山英晶 : 光ファイバセンサ入門, 光防災センシング振興協会, 2012.
- 2) 光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する共同研究報告書 : 光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル(案), 土木研究所共同研究報告書, 第 292 号, 2003.
- 3) Hotate, K.: Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques. *Optical Fiber Technology*, 19(6), 700-719, 2013.
- 4) Imai, M., Nakano, R., Kono, T., Ichinomiya, T., Miura, S., Mure, M.: Crack detection application for fiber reinforced concrete using BOCDA-based optical fiber strain sensor, *Journal of structural engineering*, 136(8), 1001-1008, 2010.
- 5) Kurashima, T., Horiguchi, T., Izumita, H., Furukawa, S., and Koyamada, Y.: Brillouin optical-fiber time domain reflectometry, *IEICE transactions on communications*, E76-B(4), 382-390, 1993.

6章 振動モードによるモニタリング

6.1 技術の概要

6.1.1 目的

本モニタリングの目的は、診断を補助するモニタリングとして、剥離や抜け落ちなど変状に伴う構造性能の変化を非破壊で評価することにある。

本モニタリングの特長は、橋梁固有の振動モードに着眼した分析である。具体的に、複数の加速度センサをRC床版の底面に設置し、車両が走行した際の振動応答から橋梁固有の振動モードを推定させる。それら複数の振動モードの時系列変化から、構造性能の変化を評価する。本ガイドラインでは、道路管理事業者が振動モードを用いたモニタリングを円滑に活用できるよう、システムの概要やモニタリングの方法、評価の活用を説明する。

6.1.2 システムの概要

(1) 手動計測型

モニタリングシステムは、加速度センサ機器、データロガー、アプリケーションで構成されている。その構成例を図6.1.1に示す。本システムは、現地で収集したデータを、事務所などへ持ち帰り評価するシステムとなっている。

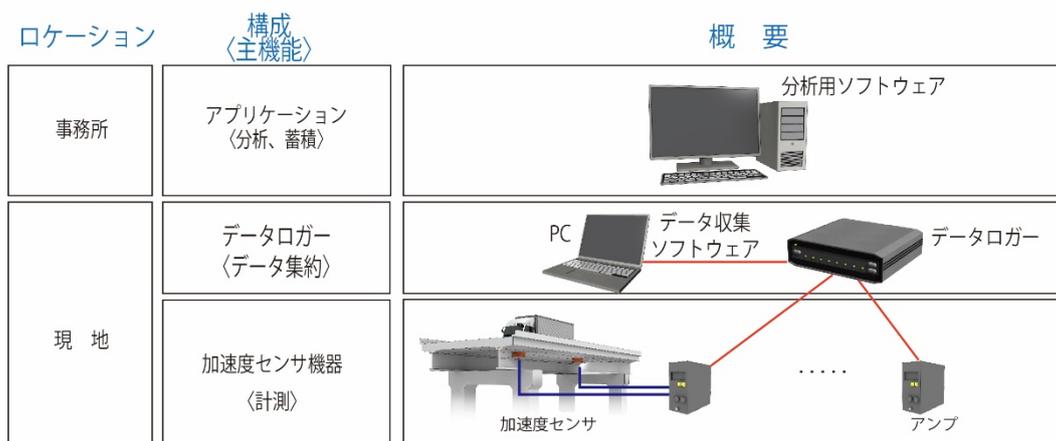


図 6.1.1 手動計測型モニタリングシステムの構成例

1) 加速度センサ機器

加速度センサ機器の主機能は、橋梁に生ずる加速度の計測である。加速度センサ機器はセンサデバイスとアンプによって構成されている。図 6.1.2(a)と図 6.1.2(b)にセンサデバイスとアンプの例を示す。アンプはセンサ信号の増幅やフィルタリングなど不要信号の除去機能を有していることが望ましい。



図 6.1.2(a) センサデバイス



図 6.1.2(b) アンプ

2) データロガー

データロガーの主機能は、データ集約である。具体的にデータの収集、データの保存、計測制御である。図 6.1.3 にデータロガー本体の例を示す。データロガーは、ロガー本体、データ収集ソフトウェア、パーソナルコンピュータで構成されている。



図 6.1.3 データロガー本体

3) アプリケーション

アプリケーションの主機能は、回収したデータの分析と蓄積である。また、結果の表示やファイルの閲覧機能を有している。データの分析では、加速度の時刻歴波形データから橋梁固有の振動モードを抽出し可視化させる。図 6.1.4 にアプリケーション例を示す。

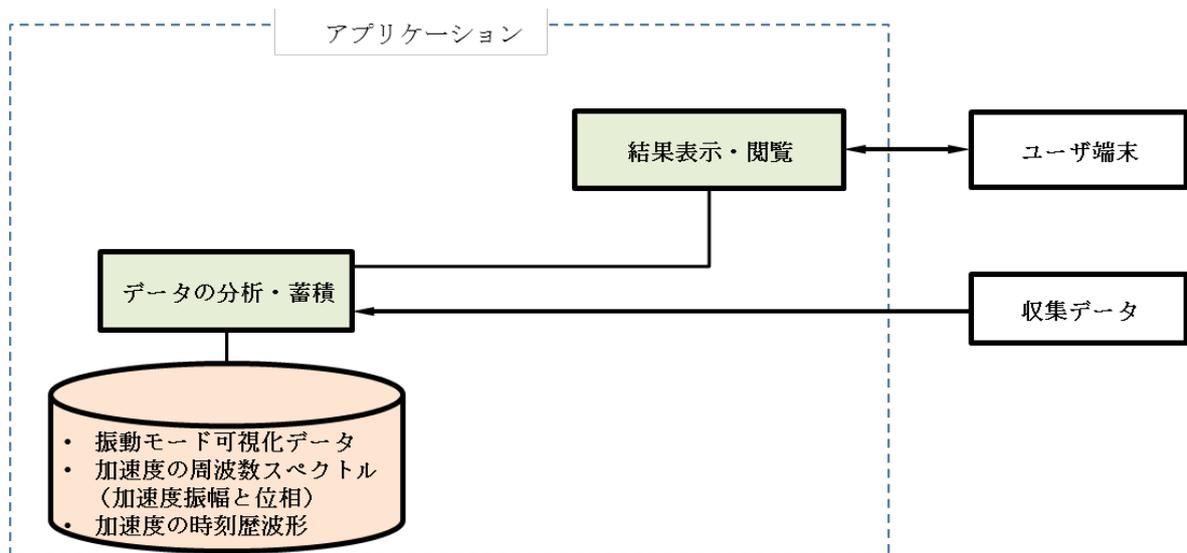


図 6.1.4 アプリケーション例（手動計測型）

(2) 遠隔計測型

モニタリングシステムは、子機（センサユニット）、親機（ゲートウェイ）、ローカルネットワーク、広域ネットワーク、アプリケーションで構成されている。その構成例を図 6.1.5 に示す。本システムは、事務所に居ながらデータ収集と分析が可能なシステムとなっている。

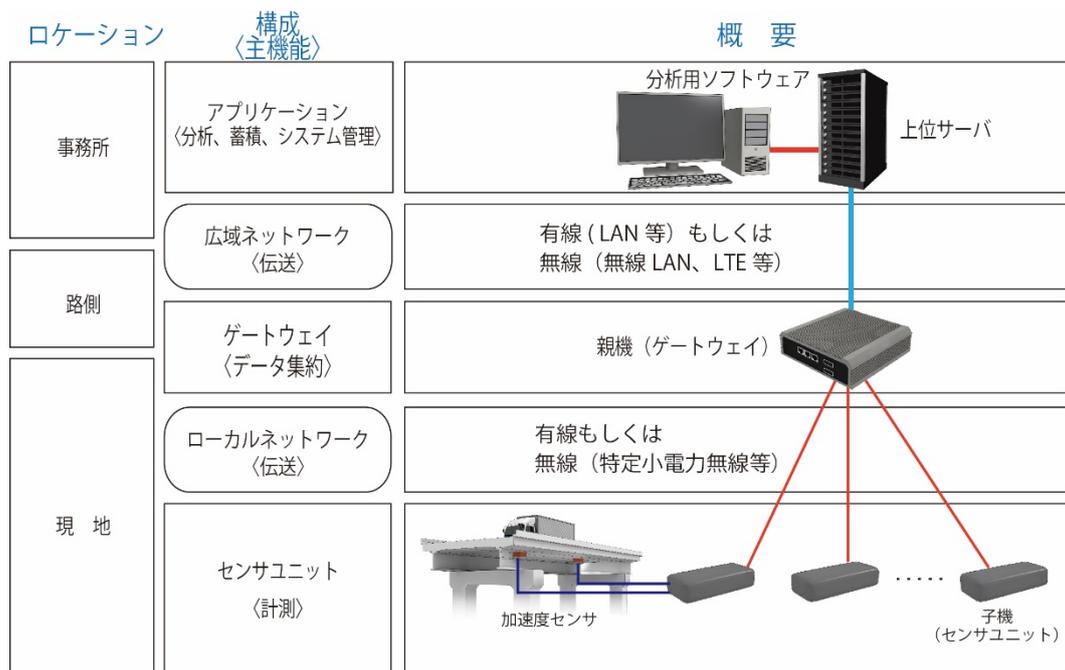


図 6.1.5 遠隔計測型モニタリングシステムの構成例

1) 子機（センサユニット）

子機の主機能は、橋梁に生ずる加速度の計測である。また、データの一次保存や親機へのデータ送信機能も有している。子機は取り付けが容易となるよう、給電不要のバッテリー駆動であることが望ましい。しかしながら、給電が容易に確保できる場合は、必ずしもバッテリー駆動である必要はな

い。一例として、**図 6.1.6** に子機を示す。本例は、加速度センサと筐体本体とが分離されたセンサ分離型構造である。この構造は加速度センサを所望の箇所へ容易に設置できる、筐体本体は環境的に厳しい箇所を避けて設置できる、加速度センサが故障した際容易に交換できるなどの利点を有している。



図 6.1.6 子機（センサ分離型）

本ガイドラインではセンサ分離型構造を例に記述したが、後述の諸仕様を満足できるならば、筐体本体に加速度センサが内蔵されたセンサ内蔵型構造でもよい。

2) 親機（ゲートウェイ）

親機の主機能は、子機データの集約である。またデータの保存、各子機の状態監視および動作制御、アプリケーション側へのデータ送信機能も有している。親機は取り付けが容易となるよう、給電不要のバッテリー駆動であることが望ましい。しかしながら、給電が容易に確保できる場合は、必ずしもバッテリー駆動である必要はない。一例として、**図 6.1.7** に親機を示す。



図 6.1.7 親機（ゲートウェイ）

3) ローカルネットワーク

ローカルネットワークは、複数の子機と親機との通信手段である。これにより、子機で計測したデータを親機に集約できる。また、親機は子機の状態監視や動作を制御できる。通信は有線方式、無線方式のどちらでもよい。無線方式の場合は、免許や届出が不要かつ利便性がよいことから特定小電力無線の利用を推奨する。

4) 広域ネットワーク

広域ネットワークは、親機とアプリケーションとの通信手段である。これにより、アプリケーションへ親機の計測データを伝送できる。また、アプリケーション側から親機の動作を指示できる。広域ネットワークは、橋梁構造や周囲の通信環境を加味して、無線方式か有線方式のどちらかを選択する。無線方式は、通信範囲や回線容量を考慮して、3G または LTE 回線の利用を推奨する。有線方式の場合、通信仕様を踏まえて、最適な通信インターフェースを選定する。

5) アプリケーション

アプリケーションの主機能は、子機や親機の状態管理・動作制御、データの分析・蓄積である。また評価の表示や閲覧機能も有している。その概要を図 6.1.8 に示す。

アプリケーションは、広域ネットワークを介して親機を直接的に、子機は親機を介して間接的にその状態や動作を管理・制御できる。これにより計測条件の変更などを遠隔で操作できるため現地に出向く回数を低減できる。加速度の時刻歴波形などの取得データや分析データは、アプリケーションが実装されたまたはアプリケーションがアクセス可能なサーバへ蓄積する。アプリケーションはそれらデータ群を管理する機能を保有している。データの分析では、加速度の時刻歴波形から橋梁固有の振動モードを可視化させる機能を有している。

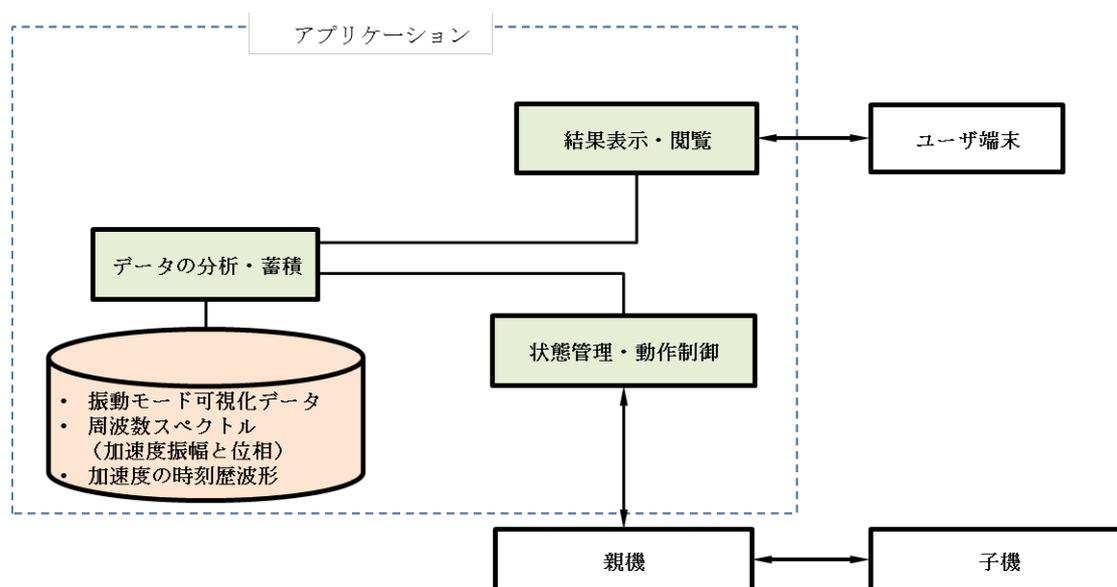


図 6.1.8 アプリケーションの概要（遠隔計測型）

6.1.3 計測期間

モニタリングの期間や間隔は、対象床版の劣化状況やモニタリングシステムの性能を加味して、道路管理事業者が適切に決定することを推奨する。図 6.1.9 のように、1 回のモニタリングは、計測ばらつきなどを考慮して 10 回以上繰り返し計測する。また、1 回の計測時間は 120 秒以上とする。なお、1 回のモニタリングは、環境変化の影響を受けぬよう 1 日程度で計測することが望ましい。

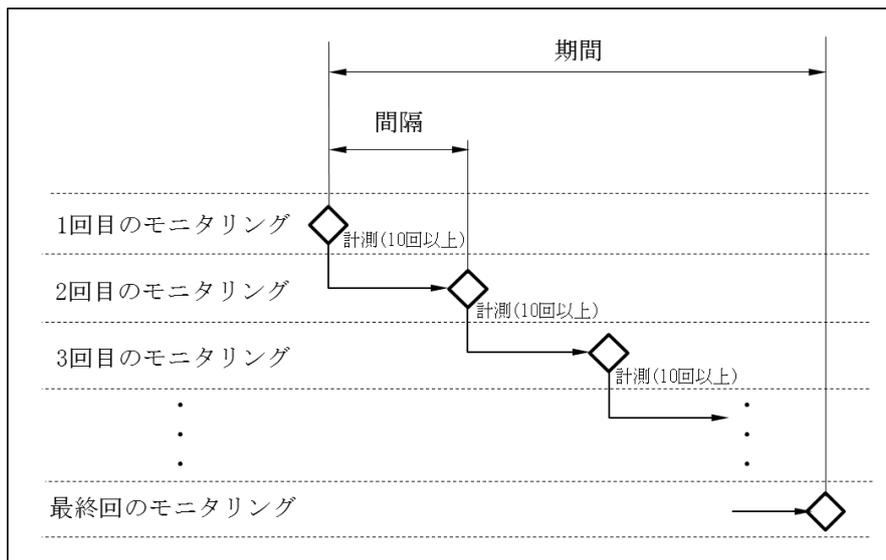


図 6.1.9 モニタリングの期間および間隔の概要

6.2 モニタリングの方法

6.2.1 モニタリングの手順

モニタリングシステムの導入から、結果の評価およびデータ蓄積までの作業フローを図6.2.1に示す。

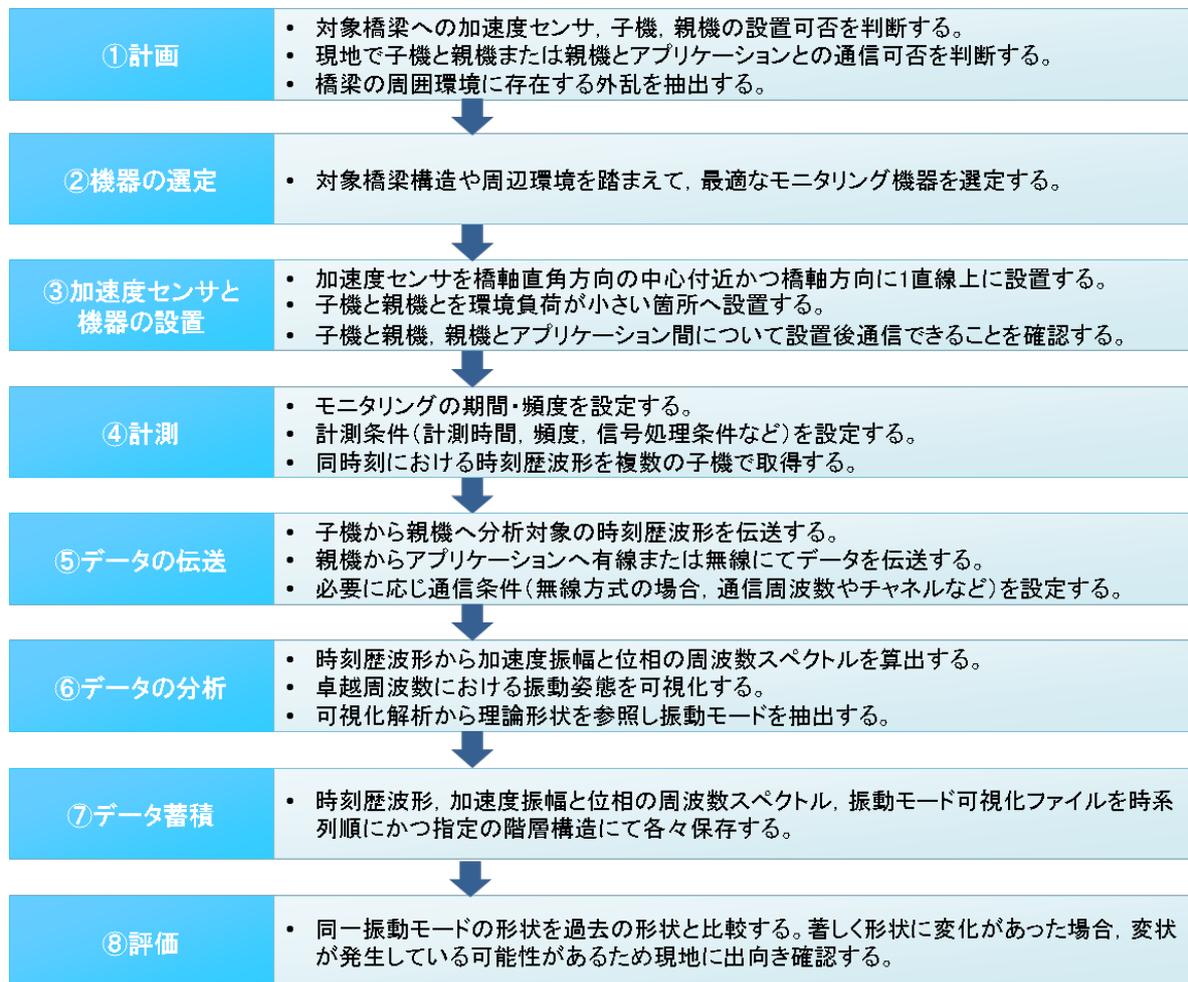


図 6.2.1 作業フロー

6.2.2 計画

モニタリングシステムを導入する前に、適用橋梁およびその周辺の環境を調査する。調査項目を表 6.2.1 に示す。主に、子機や親機が橋梁へ取り付け可能か、子機と親機または親機とアプリケーションとが通信可能かを調査する。また、工事用機器などの外乱が橋梁周囲に存在するか調査する。抽出した外乱が振動計測に影響を与えてしまう場合、計測のタイミングなどを調整する必要がある。

表 6.2.1 調査項目

加速度センサの設置可否
子機の設置可否
親機の設置可否
親機用の給電確保
ローカルネットワークの通信可否
広域ネットワークの通信可否
外乱の抽出

6.2.3 機器の選定

機器の主要特性は、鋼単純合成鉄桁橋（径間長 35m 程度）の RC 床版を対象とした RAIMS の一分析事例をもとに導出している。上記分析事例の対象橋梁と、診断対象の構造や設置環境が著しく異なる場合、求められる機器の主要特性は異なる恐れがある。そのため適用時は橋梁に生じている加速度を計測かつ分析できるよう、使用者が機器メーカーや分析メーカーと調整の上、最適な機器を選定する必要がある。

(1) 手動計測型

加速度センサ機器とデータロガーは、表 6.2.2 の主要特性を満足していることが望ましい。

表 6.2.2 加速度センサ機器とデータロガーに関する主要特性

項目		仕様
計測	最大検知加速度	$\pm 1.2G(\pm 11m/s^2)$ 以上
	最小検知周波数	1Hz 以下
	最大検知周波数	150Hz 以上
	加速度分解能	$4.0 \times 10^{-4}m/s^2$ 以下
	サンプリング周波数	600Hz 以上
データ記憶	保存容量	サンプリング周波数 600Hz 以上で 120s 計測したデータを、10 回分以上記憶できること。
全加速度センサ間の同期精度 (計測時)		$\pm 500 \mu s$ 以内

最大検知加速度は、伸縮装置を通行した際の加速度を計測できるよう $\pm 1.2G$ 以上とする。最小検知周波数は、橋軸方向たわみ 1 次の共振特性を計測できるよう 1Hz 以下とする。最大検知周波数は、主桁を節とするたわみ形状のモードを捉えられるよう 150Hz 以上とする。加速度分解能は、上記最大検知加速度において、たわみの 5 次モードを計測できるよう $4.0 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$ 以下とする。サンプリング周波数は、ナイキストの定理および機器の計測性能を加味して最大検知周波数の 4 倍以上とする。保存容量は、サンプリング周波数 600Hz 以上で 120 秒以上計測したデータを、10 回分以上記憶可能な容量とする。各加速度センサの振幅と位相情報をもとに振動モードを分析するため、計測時における各加速度センサの同期精度が重要となる。本ガイドラインは最大 150Hz までに発生する振動モードを対象としていることから、全加速度センサ間の同期精度は $\pm 500 \mu\text{s}$ 以内とする。

(2) 遠隔計測型

1) 子機

子機は、表 6.2.3 の主要特性を満足していることが望ましい。

表 6.2.3 子機の主要特性

項目		仕様
計測	最大検知加速度	$\pm 1.2G(\pm 11\text{m/s}^2)$ 以上
	最小検知周波数	1Hz 以下
	最大検知周波数	150Hz 以上
	加速度分解能	$4.0 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$ 以下
	サンプリング周波数	600Hz 以上
通信	方式	有線または特定小電力無線 (920MHz 帯)
データ記憶	保存容量	サンプリング周波数 600Hz 以上で 120s 計測したデータを記憶できること。
全子機間の同期精度 (計測時)		$\pm 500 \mu\text{s}$ 以内

親機との通信は、有線方式または通信距離性能や利便性を考慮して特定小電力無線 (920MHz 帯) とする。保存容量は、サンプリング周波数 600Hz 以上で 120 秒間計測したデータを記憶可能な容量とする。また、計測時における全子機の同期精度は、最大 150Hz までに発生する振動モードを捉えられるよう $\pm 500 \mu\text{s}$ 以内とする。最大検知加速度、最小検知周波数、最大検知周波数、加速度分解能、サンプリング周波数については、前述の表 6.2.2 と同様である。

2) 親機

親機は、表 6.2.4 の主要特性を満足していることが望ましい。

表 6.2.4 親機の主要特性

項目		仕様
通信	子機との通信	有線方式または特定小電力無線方式（920MHz 帯）
	アプリケーション側との通信	有線 LAN, 3G または LTE
記憶容量		サンプリング周波数 600Hz 以上で 120 秒間計測したデータを、10 回分以上記憶できること。

子機との通信は、有線方式または通信距離性能や利便性を考慮して特定小電力無線方式（920MHz 帯）とする。アプリケーション側との通信は、通信範囲や回線容量を考慮して、3G や LTE 回線などの無線通信または有線通信の利用を推奨する。親機の記憶容量は、サンプリング周波数 600Hz 以上で 120 秒間計測したデータを、10 回分以上記憶可能な容量とする。

6.2.4 加速度センサおよび機器の設置

(1) 加速度センサの設置数、設置位置および固定法

センサ分離型の子機を例に、加速度センサの設置数、設置位置およびその固定法を説明する。表 6.2.5 に加速度センサの設置数、設置位置および固定法の推奨一覧を示す。また、図 6.2.2 に加速度センサの設置位置の例を示す。加速度センサは、橋軸方向に発生する鉛直たわみの 5 次モードを観測できるよう、11 個以上設置させることが望ましい。橋軸直角方向は中央付近に設置する。橋軸方向は 1 直線上にかつ中央に対して対称となるよう設置する。具体的に、中央と両端および両端部と中央間に等間隔で設置させる。加速度センサの固定は、アンカを推奨する。図 6.2.3 に固定例を示す。落下に伴う第 3 者被害を生じさせぬよう、しっかりと RC 床版に加速度センサを固定する必要がある。

表 6.2.5 加速度センサの設置数、設置位置および固定法

項目	仕様	参照
センサ設置数	橋軸方向は、11 個以上を 1 直線上に配置する。 橋軸直角方向は、5 個以上を 1 直線上に配置する。	図 6.2.2
設置位置	橋軸方向および橋軸直角方向ともに、中央に対して対称に配置する。また、中央と両端には必ず設置する。	図 6.2.2
固定法	アンカ固定を推奨する。	図 6.2.3

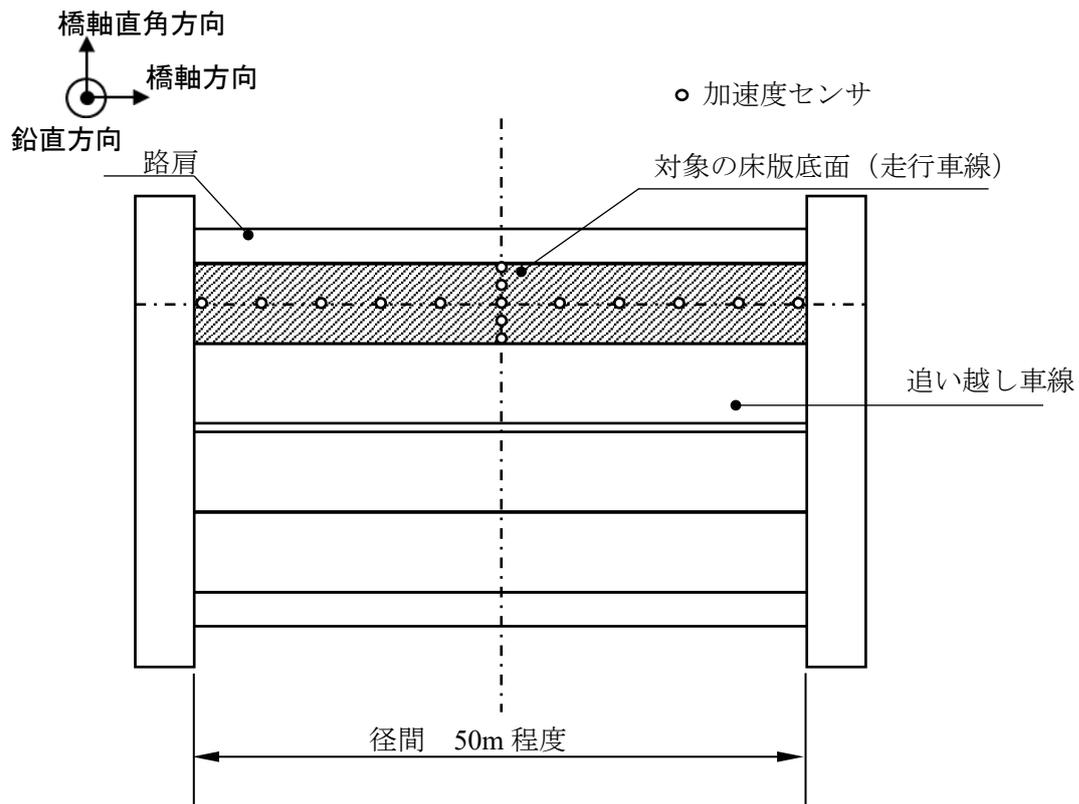


図 6.2.2 加速度センサの設置位置例



図 6.2.3 アンカによるセンサの固定例

(2) 子機と親機の設置位置および固定法

センサ分離型を例に、子機と親機の設置位置および固定法を説明する。表 6.2.6 に子機と親機の設置位置および固定法の推奨一覧を示す。また、図 6.2.4(a) と (b) に挟み込みによる子機の固定例を示す。子機と親機は風雨などによる環境負荷が極力小さい箇所へ設置する。親機はアプリケーションとの通信を容易に確保できる位置に設置する。具体的に子機は主桁や検査路に、親機は主桁や検査路または橋台へ、それぞれ挟み込みやアンカにより固定する。落下に伴う第三者被害を生じさせぬよう、しっかりと子機や親機を固定する。子機と親機のデータのやりとりに無線方式を適用する場合、各子機と親機は見通しが確保できる位置に設置させる。また、子機と親機の無線用アンテナは、互いに平行となるように設置する。

表 6.2.6 子機・親機の設置位置および固定法

項目	推奨条件	参照
設置位置	(1) 子機は、主桁または検査路	
	(2) 親機は、主桁、検査路または橋台	
固定法	挟み込みまたはアンカによる固定	図 6.2.4



(a) 正面



(b) 裏面

図 6.2.4 子機の固定例<挟み込みによる固定>

6.2.5 計測

6.2.4 に記載したセンサ配置のもと橋梁上の加速度を計測する。本モニタリングでは、1 台の車両が対象橋梁へ接近、通過した後の加速度を計測することが望ましい。ここで、車両は法定速度程度で走行しており、かつその重量が重ければ重いほどよい。なお、渋滞や外乱となりうる工事機器が周囲で動作している状態での計測は避ける。

6.2.6 データの伝送

(1) 手動計測型

手動計測型は、現地での計測後、作業員がデータを持ち帰ることになる。この時、記憶媒体に過度な衝撃や振動を与えぬよう慎重に扱わなければならない。

(2) 遠隔計測型

1) 子機と親機とのローカルネットワーク

各子機によるデータ計測が完了すると、親機へ有線方式または無線方式でデータを伝送する。有線方式の場合、使用する子機と親機の仕様に基づいて適切に伝送条件を設定する。無線方式の場合、通信速度や送信電力などを加味した上で伝送条件を適切に設定する。

特定小電力無線通信の場合の仕様例を表 6.2.7 に示す。また、表 6.2.8 に通信の推奨チャンネルを示す。通信のチャンネルは、伝送の安定性や他チャンネルの利用状況を考慮して、帯域幅 400kHz の 33~60ch の中から選定する。また、キャリア・センス、つまり他の無線局に対する混信を回避する機能が実装されていなければならない。

表 6.2.7 子機と親機との無線通信仕様

項目	仕様	
送信方式	GFSK 方式	
無線通信速度	9.6kbps/100kbps/500kbps	
送信出力	最大 1mW	最大 20mW
通信周波数	920.6MHz~923.4MHz (全 15 チャンネル)	920.7MHz~923.3MHz (全 14 チャンネル)
通信距離	見通し 250m 以上	見通し 400m 以上
通信データ	加速度の時刻歴波形とデータ取得時の時刻情報	

表 6.2.8 特定小電力無線における推奨チャンネル

中心周波数 [MHz]	チャンネル 帯域幅 200KHz	キャリア・センス時間	チャンネル 帯域幅 400KHz		備 考		
920.6	24	5ms 以上	24	24	RFID との 共用チャンネル		
920.8	25						
921.0	26						
・	・		128 μ s 以上	31		32	
・	・						
922.0	31						
922.2	32						
922.4	33						
922.6	34						
922.8	35						
923.0	36						
923.2	37						
923.4	38						
923.6	39	39			40		使用推奨 チャンネル
923.8	40						
・	・						
・	・						
927.6	59						
927.8	60						
928.0	61		60	60			

■ : 使用推奨チャンネル

2) 親機とアプリケーションとの広域ネットワーク通信

広域ネットワークでは、TCP/IP（通信プロトコルの1種）に対応したネットワーク環境を選定する。接続形態は橋梁周辺のネットワーク通信環境を考慮して有線方式か無線方式のどちらか一方を選定する。通信の信頼性確保の観点から、基本的には有線方式による通信とする。しかしながら、有線ネットワークが存在しない場合またはその敷設が困難な場合、3G または LTE 回線などの無線方式を採用してもよい。3G または LTE 回線を使用する場合、親機にデータ通信専用の SIM カード（携帯電話等で使用されている IC カード）を実装する必要がある。SIM カードは、モニタリングのデータ量を加味して、1 ヶ月 1GB 以上、通信速度は 1Mbps 以上の仕様を満足していることが望ましい。また、親機の仕様に応じて、標準 SIM、micro SIM、nano SIM などの中から最適なタイプを選定する。

有線方式・無線方式のどちらの場合においても、アプリケーションと親機とが広域ネットワークを介して通信できるよう、事前に設定作業が必要となる。具体的にアプリケーションには親機を識別するための情報などを、親機にはアプリケーションのアドレス情報などを登録する。これによりアプリケーションと親機との通信が可能となる。

6.2.7 データの蓄積

本モニタリングのデータ蓄積を説明する。表 6.2.9 に計測データとともに分析の過程で生成されるデータの種類とファイル形式を示す。加速度の時刻歴波形および、加速度振幅と位相の周波数スペクトルは csv ファイルとする。振動モードの可視化データファイルは wmv ファイルとする。

表 6.2.9 データの種類とファイル形式

データ	ファイル形式
加速度の時刻歴波形	csv
加速度振幅の周波数スペクトル	csv
振動モードの可視化データ	wmv

続いて、1回のモニタリングのデータを格納するために必要な記憶容量を表 6.2.10 に示す。ここで、1回のモニタリングは繰り返し 10 回計測することを前提にしている。

表 6.2.10 1回のモニタリングに必要な記憶容量 (例 10 回計測分)

データの種類	1回のモニタリング
加速度の時刻歴波形	約 500 MB
加速度の周波数スペクトル	約 20 MB
振動モードの可視化データ	約 100-200MB

次に、加速度の時刻歴波形、および加速度振幅と位相の周波数スペクトルデータのフォーマット例を表 6.2.11 および表 6.2.12 に示す。

表 6.2.11 加速度の時刻歴波形のフォーマット例

Sensor Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Time	acceleration										
s	m/s ²										
0	-3.64E-02	-3.51E-02	-2.75E-02	-4.42E-02	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	-3.46E-03
0.001667	-3.64E-02	-3.51E-02	-2.75E-02	-4.42E-02	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	-3.46E-03
0.003334	-3.64E-02	-3.51E-02	-2.75E-02	-4.42E-02	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	-3.46E-03
0.005001	-3.64E-02	-3.51E-02	-2.75E-02	-4.42E-02	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	-3.46E-03
0.006668	-3.64E-02	-3.51E-02	-2.75E-02	-4.42E-02	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	4.15E-03	-1.12E-02	-3.46E-03	-3.46E-03
.
.
.
.
.

表 6.2.12 加速度の周波数スペクトルのフォーマット例

Sensor Node	1		2		3		.		11	
Frequency	Magnitude	Phase	Magnitude	Phase	Magnitude	.	.	.	Magnitude	Phase
Hz	m/s ²	degree	m/s ²	degree	m/s ²	.	.	.	m/s ²	degree
0.00E+00	2.90E-02	180	2.90E-02	180	2.90E-02	.	.	.	2.90E-02	180
6.25E-01	2.93E-02	-2.145623	2.93E-02	-2.145623	2.93E-02	.	.	.	2.93E-02	-2.145623
1.25E+00	9.42E-04	111.7644	9.42E-04	111.7644	9.42E-04	.	.	.	9.42E-04	111.7644
1.88E+00	1.06E-03	101.065	1.06E-03	101.065	1.06E-03	101.065	1.06E-03	101.065	1.06E-03	101.065
2.50E+00	1.03E-03	-58.95871	1.03E-03	-58.95871	1.03E-03	-58.95871	1.03E-03	-58.95871	1.03E-03	-58.95871
3.13E+00	1.40E-03	-159.4647	1.40E-03	-159.4647	1.40E-03	-159.4647	1.40E-03	-159.4647	1.40E-03	-159.4647
.
.
.
.
.

6.2.8 データの分析

図 6.2.5 に加速度の時刻歴波形から橋梁固有の振動モードを導出するための手順を示す。最初に、分析対象データを選定するため、取得した加速度の時刻歴波形から減衰自由振動区間を選定する（手順①）。減衰自由振動区間の例を図 6.2.6 に示す。区間長は数秒程度を推奨する。次に、各子機の減衰自由振動区間をフーリエ変換処理し加速度振幅と位相について周波数スペクトルを算出する（手順②）。なお、周波数スペクトルの取得方法は、フーリエ変換処理に限定するものではない。その後、各子機の加速度と位相の周波数スペクトルからスペクトルピークを抽出する（手順③）。続いて、スペクトルピークにおける各子機の加速度振幅の変化を、位相データをもとに 1 周期分描画させる（手順④）。最後に、導出したモードと公知の理論解析によるモードとを定性比較する（手順⑤）。

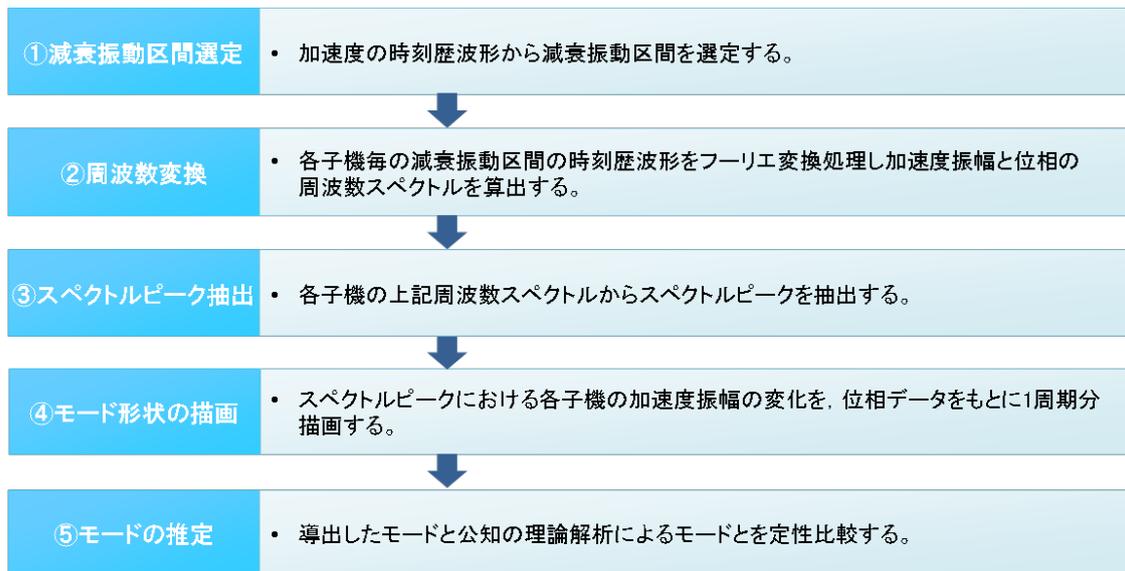


図 6.2.5 振動モードの導出手順

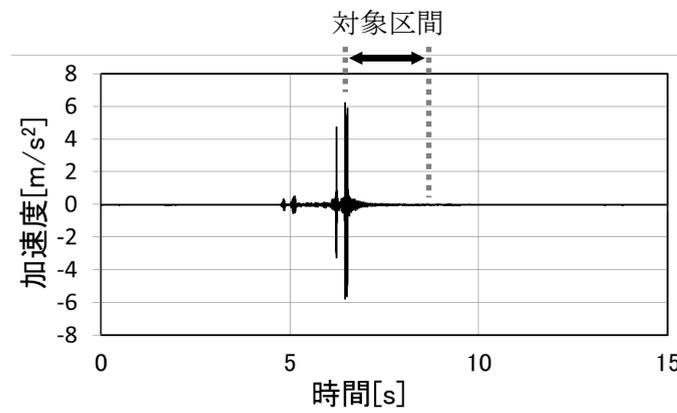


図 6.2.6 減衰自由振動区間

振動モードを推定するため、理論解析による振動モードの形状を説明する²⁾。

表 6.2.13 に道路橋床版の振動モードの理論解析結果を示す。X 軸，Y 軸，Z 軸は，それぞれ橋軸方向，橋軸直角方向，鉛直方向である。車両走行方向は X 軸の正方向である。表中の数値は，各位置における相対的な振幅の比を表し正の符号が鉛直方向上向きを示す。

床版は板構造であり，橋軸方向と橋軸直角方向のそれぞれの方向に振動モードが存在する。図 6.2.2 に示すセンサ設置の場合，橋軸方向には表 6.2.13 右欄に記載した振動モードが発生する。表中(a)，(b)は，それぞれたわみ 1 次，たわみ 2 次のモードである。表中(c)は，理論解析では示されていないものの，実証実験で発生を確認したたわみ 3 次のモードである²⁾。橋軸方向のそれぞれの振動モードに対する橋軸直角方向の振動モードは，主桁を節とするたわみ 1 次のモードや剛体モードなどである。また，橋軸方向の振動モードによっては観測されない場合もある。

表 6.2.13 参照用の振動モード例

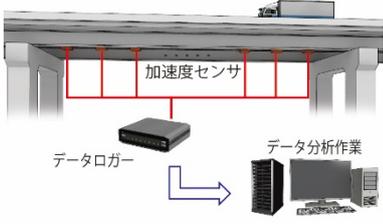
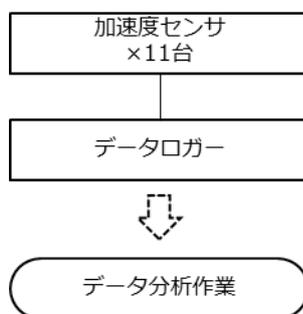
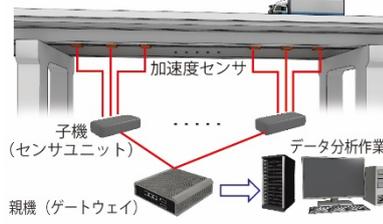
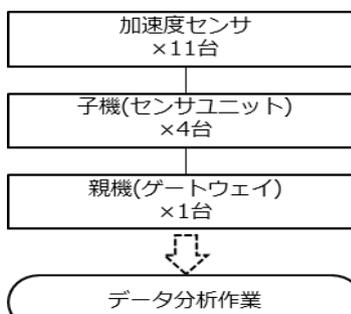
振動形状の理論解析結果 ²⁾	橋軸方向の理論形状 (断面 A-A の形状)

x:橋軸方向, y:橋軸直角方向, z:鉛直方向

6.2.9 費用の目安

本モニタリングシステムにおける費用の目安を表 6.2.14 に示す。

表 6.2.14 費用の目安

項目	適用	
	手動計測型	遠隔計測型
システム構成(例)	 	 
センサ	加速度センサ	加速度センサ
計測箇所点数	11 点	11 点
測定方式	手動測定	定期測定
測定期間	1 回	(例)1 年間
測定頻度	1 回	(例)月 1 回
データ回収方式	手動	ネットワーク経由
管理方式	現場管理	管理事務所管理
計測 ^(※1)	作業費：100 万円程度 (機器はリース想定)	機器費：800 万円程度
分析 ^(※2)	作業費：300 万円程度～	作業費：数百万円～
機材設置/撤去費 ^(※3)	別途	別途

(※1) 計測に関して、

- ・手動計測型の場合は計測のみの作業費。機材設置/撤去費用，足場費用，諸経費含まず。機器はリース想定（リース費用別途。購入する場合は一式 700 万程度～）。
- ・遠隔計測型の場合は，機器購入する場合の機器費。概算。標準価格ベース。機器単体費用のみ。オプション類含まず。電源・ネットワーク回線支給とする。

(※2) 分析に関して、

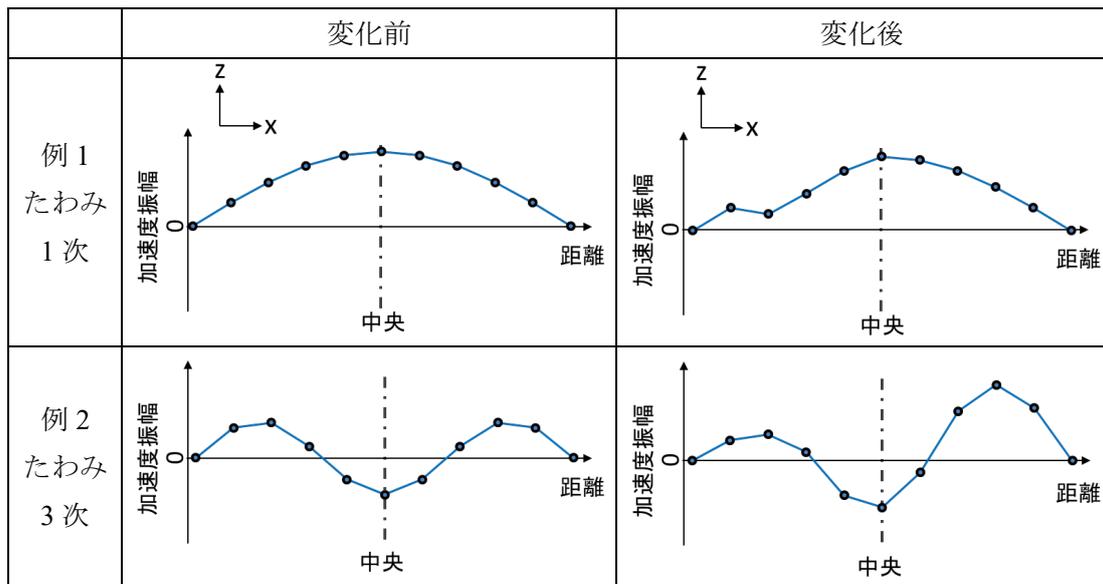
- ・ 6.2.8 に示す分析を行う場合のデータ分析作業費のみを想定。分析内容の詳細度によって費用は変わるため参考費用。
- ・ 遠隔計測型の場合は分析頻度・対象箇所数、分析内容の詳細度等による。

(※3) 機材設置/撤去費用は現場ごとに個別対応となるため別途。

6.3 結果の評価

結果は、振動モードの形状変化に着目して評価する。表 6.3.1 に代表的な振動モードの変化例を示す。例 1 のように当初の形状（変化前）と比較して特異形状が発生する，例 2 のように当初中央に対して対称であった形状が非対称になるなど，振動モードの形状に変化が生じた場合，損傷に起因している可能性があるため，現地に出向き確認する。なお，本評価は，鋼単純合成鈹桁橋（径間長 35m 程度）の RC 床版を対象とした RAIMS の一分析事例をもとに記述しており，橋梁構造や設置環境，損傷要因および損傷程度によっては振動モードの変化が本記述とは異なる場合もある。振動モードについて視覚的に明らかな変化が生じた場合，速やかに分析メーカーへ相談することを推奨する。

表 6.3.1 振動モードの変化例



x:橋軸方向, z:鉛直方向

6.4 保守

モニタリングシステムに起因した変化を排除しデータの正確性を担保するため、利用者はシステム導入元の会社と連携して、適切にシステムを保守する必要がある。ここで、システムの保守対象は手動計測型モニタリングと遠隔計測型モニタリングのハードウェアならびにソフトウェアである。基本的に、利用者はシステム導入元が推奨する保守事項を遵守する必要がある。以下に保守事項の例を記述する。

(1) 手動計測型モニタリング

利用者は、導入前と撤去後について、モニタリングシステムの計測特性に関わる検査結果をシステム導入元から取得することが望ましい。この検査結果にしたがって、モニタリングにおける計測に問題がないことを確認する。なお、検査すべき計測特性は事前にシステム導入元へ確認する。

(2) 遠隔計測型モニタリング

基本的に長期計測が前提であることから、バッテリーなどの消耗品の交換を除きモニタリング期間中はメンテナンスフリーとなるシステムを選定する。また、そのシステムは、システムの状態管理機能を有していることが望ましい。ただし、利用者は保守事項の一環として次のケースについて対応する必要がある。

- ・システムの状態管理機能により、加速度センサの応答が無いなどの障害が発生した場合、速やかに現地へ出向き加速度センサ、ケーブル、子機、親機の設置状況を確認する。具体的には加速度センサが RC 床版へしっかりと固定されているか、子機や親機が固定設置されているか、ケーブルに損傷が無いかなどを目視確認する。それら結果に基づいてシステム導入元と対応を協議する。
- ・モニタリングシステムに実装したソフトウェアに対して、セキュリティパッチつまり、ソフトウェアで発見された問題点や脆弱性に対しそれら不具合を解決するためのプログラムが公開された場合、システム導入元に確認の上、順次適用を検討する。
- ・子機がバッテリー駆動タイプの場合、必要に応じてバッテリーの交換が必要である。利用者はモニタリング期間などをシステム導入元へ事前に連絡し交換時期を把握することが重要である。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 28 年度 社会インフラのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発 成果報告書（提案名称:モニタリング技術の活用による維持管理業務の高度化・効率化），2017.
- 2) 足立義雄，岡村宏一，島田 功：道路橋床版の低周波域における振動性状について，土木学会論文報告集，第 330 号，pp.37-48,1983.
- 3) 日本機械学会：機械実用便覧，改訂第 7 版，2011.
- 4) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，構造工学シリーズ 10，2000.
- 5) 日本機械学会：振動学，JSME テキストシリーズ，2005.
- 6) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，1993.

7章 適用事例

7.1 光ファイバによるひび割れのモニタリング【2編3章の事例】

(1) モニタリングの位置づけと目的

重交通路線の劣化が著しい鋼橋 RC 床版については、大規模更新工事によりプレキャスト PC 床版への取替えが計画されている。しかしながら、床版取替え工事は大規模な交通規制を伴うため、本来であれば取替えの優先度が高い橋梁であっても、迂回路確保などの課題がありすぐに施工できない橋梁もある。これらの橋梁については床版取替えまでの間にモニタリング計測を実施し、抜け落ち等の異常が検知された場合には、部分打替え等の応急対策や交通規制等の緊急対策の要否を判断する必要がある。

このため、劣化が進行して抜け落ちが懸念される RC 床版を対象に、抜け落ちの兆候を検知するモニタリング技術の適用性の検討を行った。



図 7.1.1 RC 床版の劣化状況 (床版下面)

(2) モニタリング計画

1) モニタリングの概要

劣化した RC 床版の抜け落ち兆候の評価指標として下面ひび割れの段差発生を設定し、ひび割れ部における段差発生を検出するためのモニタリングを実施した。適用したモニタリング技術を表 7.1.1 に示す。

表 7.1.1 適用するモニタリング技術

モニタリング技術		計測項目	備考
分布型光ファイバ	OTDR [*] 方式	曲げ変形による光の損失量	

^{*}OTDR : Optical Time Domain Reflectometer (光パルス試験器)

光ファイバの伝送損失や距離測定, 断線箇所の検出, 融着接続・メカニカルスプライス・コネクタ接続などの接続損失や反射量 (反射減衰量, リターンロス) を評価する測定器。外力による光ファイバの曲げ変形などを検出することができる。

2) モニタリングの範囲

分布型光ファイバは、大型車の走行台数が多いと推定される走行車線側（G2～G3 桁間）の床版下面に設置した。分布型光ファイバの配置イメージを図 7.1.2 に、パネル 1 箇所あたりの配置寸法を図 7.1.3 に示す。

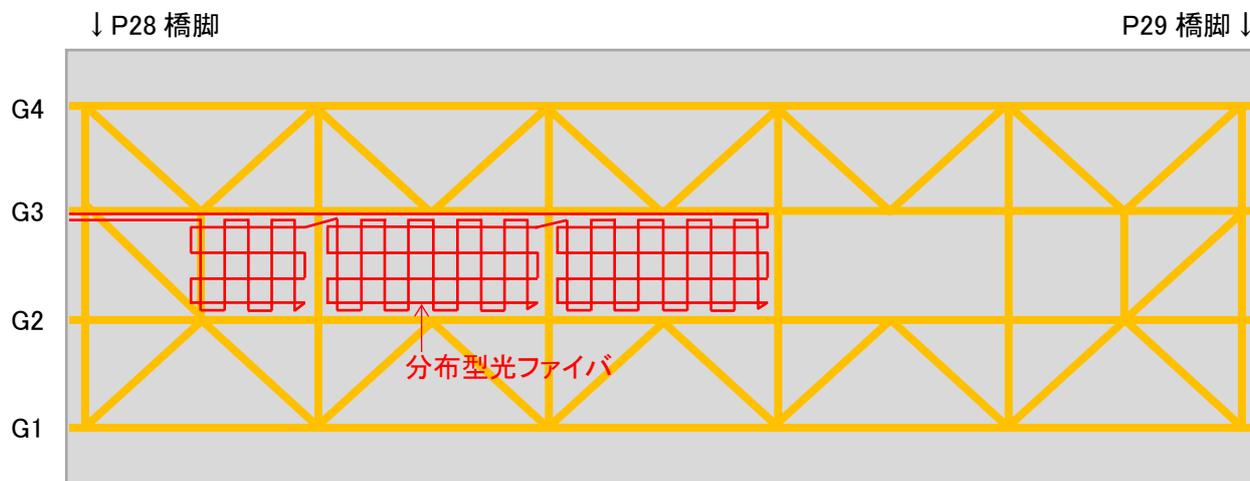


図 7.1.2 床版下面への光ファイバの設置イメージ

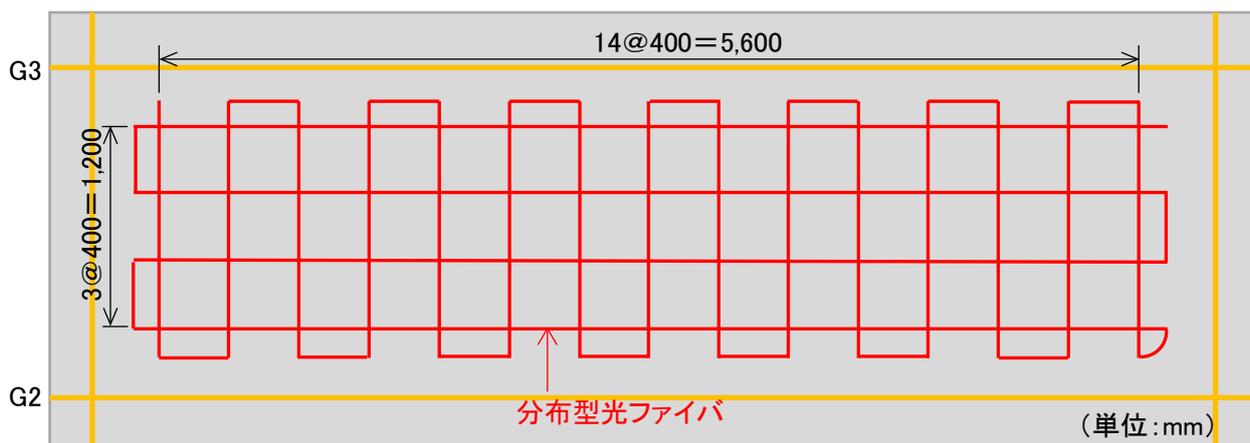


図 7.1.3 パネル 1 箇所あたりの光ファイバの設置寸法

(3) 光ファイバ設置・計測

分布型光ファイバの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を使用し、接着作業は床版直下に配置した高所作業車（幅広デッキ、ブーム長 15m）を用いて実施した。接着作業の状況を図 7.1.4 に示す。分布型光ファイバの設置に係る作業歩掛は以下のとおりであった。

光ファイバ仮固定 : $155\text{m} \div 2 \text{人} \div 12\text{hr} = 6.5\text{m/人 hr}$

光ファイバ接着 : $155\text{m} \div 3 \text{人} \div 24\text{hr} = 2.2\text{m/人 hr}$



図 7.1.4 高所作業車による作業状況

計測作業は、図 7.1.5 に示すように計測機器収納ボックス内に計測装置一式を設置し、常時モニタリングを実施した。常時モニタリングを行うために、近隣の電力会社架空線より商用電源の引込み工事を行った。

床版抜け落ちはひび割れ段差発生後に急激に進行する可能性が考えられる。このため、常時モニタリングの結果は遠隔で確認できるようにするとともに、設定した閾値を超過した場合に異常を知らせる警報メールを発するようにした。



図 7.1.5 計測状況

(4) モニタリング結果

OTDR による波形データの一部を図 7.1.6 に示す。グラフの横軸は計測装置からの距離を表しており、グラフ左側の緑色縦線 (S) が計測始点を、グラフ中央の緑色縦線 (E) が計測終点を示す。また、縦軸が後方散乱光の損失量を表している。灰色線は計測初期値を、黒色線は現在の計測値を、青色線は計測初期値からの差分を示している。床版ひび割れに段差が生じると段差位置で黒色線に損失量が現われ、初期値との差分である青色線が下側に下がることになる。

なお、グラフの緑色縦線 (E) より右側は光ファイバがない計測対象外の領域であるため、波形が乱れて現れている。

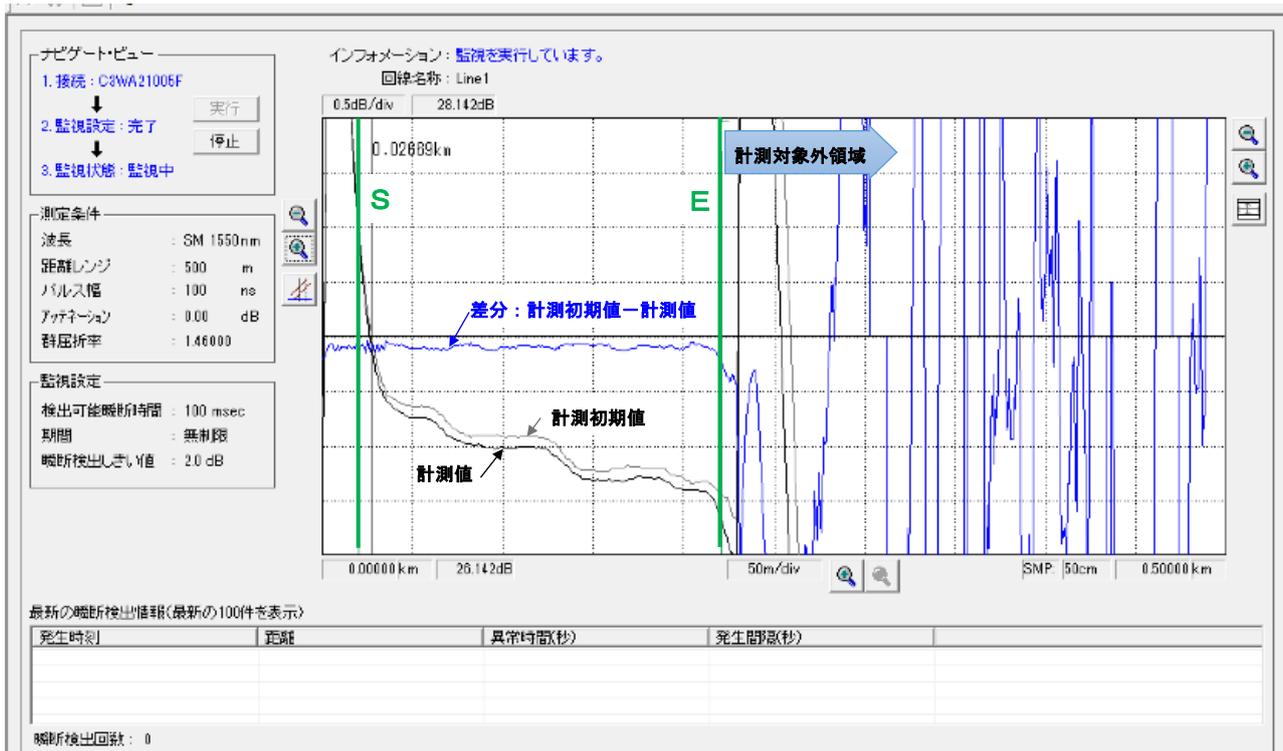


図 7.1.6 計測結果の一例

(5) まとめ

劣化した RC 床版の抜け落ち兆候の評価指標として下面ひび割れの段差発生を設定し、ひび割れ部における段差発生を検出するために分布型光ファイバ (OTDR) の適用性の評価を開始した。今後はモニタリングを継続することにより、段差が生じた場合に応急対策や緊急対策の可否を判断するための閾値の設定を行うためのデータを収集する予定である。

7.2 変位計によるモニタリング【2編4章の事例】

(1) モニタリングの位置づけと目的

地方の生産活動に必要な道路などが、定期点検等によってRC床版に過度の損傷（例えば、健全度Ⅲ後期に相当する損傷）が発見されても、即時に工事費用を確保できないことや交通阻害の影響等からすぐに補修・補強・更新等の維持補修工事に取り掛かれない場合がある。代替路がなく供用を継続せざるを得ない場合に、RC床版の損傷状態を監視し、事故発生を未然に防ぐことにRC床版の変位常時計測（動的計測）が活用できる。

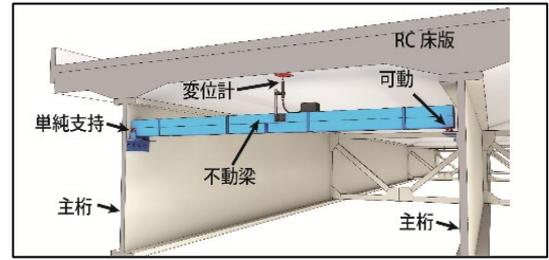


図 7.2.1 RC床版の変位計測イメージ

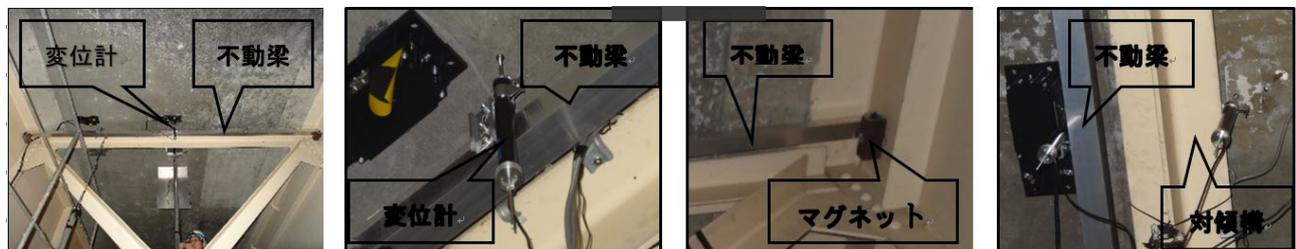
RC床版の変位計測は、図7.2.1に示す不動梁を用いて変位計を設置し計測する方法が効率的である。しかし、従来の計測方法は、床版下面の地盤上や河川の中に設けた不動の構造物にロード式変位計を単管パイプの足場や大型治具を用い垂直に固定し、床版と主桁両方の変位を同時に計測し、その差分を床版単体の変位量としている。しかし、橋が高所にあり計測器が設置出来ない場合や設置できたとしても風等の影響が大きく安定したデータの取得が難しい場合には、この不動梁を用いた床版変位の計測方法は有用である。

不動梁を用いた変位計測の施工性と実用性を確認する目的で、東北地方の高速道路橋にて実証試験を行った。

(2) モニタリング計画

1) 計測機器の設置

RC床版の損傷箇所（剥離又は抜け落ちの可能性が高い箇所）に変位計を設置するために、その直下に不動梁を設置する。不動梁は、軽量で剛性の高い材料（アルミ製角パイプ 100×50×3）を用意し、両側の鋼主桁側面にマグネットを設置しその上に固定した。不動梁をなるべく上方に設置すると車両通行に伴う鋼主桁の横変形にも影響は少なくできる。RC床版の損傷箇所が、対傾構に近い場所であれば、対傾構を不動梁として使用しても構わない。実証試験では、橋の橋軸方向中央、かつRC床版の中央に測点を設けたため、近傍の対傾構にも変位計を設置し、不動梁との比較を行った。不動梁および変位計の設置状況を図7.2.2に示す。



(a) 不動梁と変位計

(b) 変位計設置図

(c) 不動梁固定部

(d) 対傾構変位計

図 7.2.2 計測結果の一例

【不動梁及び変位計設置時の注意点】

・ 不動梁の材質は、不動梁にロード式変位計を取付けることでたわみが生じない剛性があり、かつ軽

量の鋼材が良い。現場は高所作業となるため、軽量で運搬し易く加工し易い材料が便利である。

- ・ 不動梁は床版に平行に設置する。斜めに設置すると計測誤差の原因となる。
- ・ 不動梁はなるべく主桁側面の上方（側面の 1/3 より上方）に設置する。車両走行に伴う主桁の水平方向（車両走行位置により主桁が橋軸直角方向にも変位）への変位の影響を受けにくく、更に風の影響も受けにくくなる。
- ・ 変位計は、機種により応答性に違いがあるため、計測しようとする床版変位の応答性を事前に確認し、変位計を選定する。高応答の変位計測の場合は、変位計ロッド先端を RC 床版に固定する。
- ・ 対傾構を利用して変位計を設置する場合には、対傾構の近傍とする。但し対傾構から距離のある箇所を設置する際は、片持ち梁方式になるため治具の固定状況を確認する。

(3) モニタリング結果

実験は、地盤を基準とした変位計測、不動梁を用いた変位計測、対傾構を不動梁とした変位計測の 3 種類を同時に行った (図 7.2.3 参照)。データの収録は、対象とする下り線の走行車線に大型車が通過する際に 3 種類同時に行い合計 25 回行った。各計測回の最大値を図 7.2.4 に示す。図 7.2.4 には 3 種類の変位計最大値と従来の床版だけの変位計測方法による換算値（地盤から床版下面までの変位と地盤から主桁下面までの変位の差分）を示す。図 7.2.5 には地盤を基準とした従来の変位データを除き、求める床版変位の最大値のみを示す。走行車両による変位（たわみ）量は絶対値で約 1mm～5mm を示した。たわみ量 2mm で約 20ton に相当する。

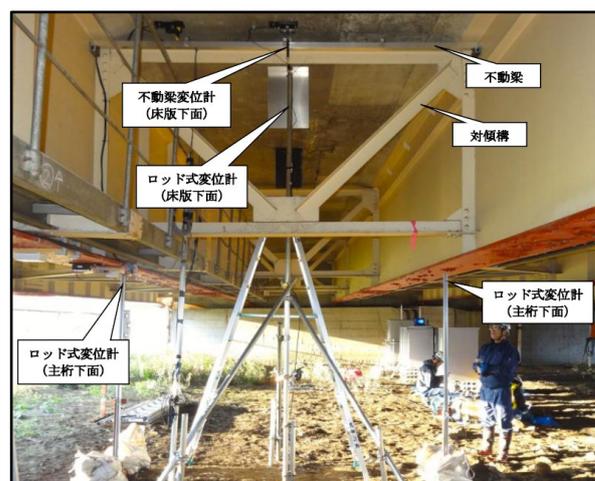


図 7.2.3 RC 床版の変位計測状況

走行車両による平均たわみ量は約 2.2mm であり、20ton 強平均の車両通過に相当する。地盤基準杭変位と左右主桁下面の平均変位を差し引いた従来計測法による床版の平均たわみ量は、0.15mm と非常に少ない値であった。絶対たわみ量（地盤から床版）の 7% であり、RC 床版の耐力は十分あると思われる。従来計測法による RC 床版の平均変位量 0.15mm と比較して、不動梁を用いた RC 床版の平均変位量は 0.18mm、対傾構を用いた RC 床版の平均変位量は 0.16mm であった。微小な差異はあるが、変位計設置位置に離れがあり、必ずしも同一地点でないことを考慮すれば概ね一致していると判断できる。

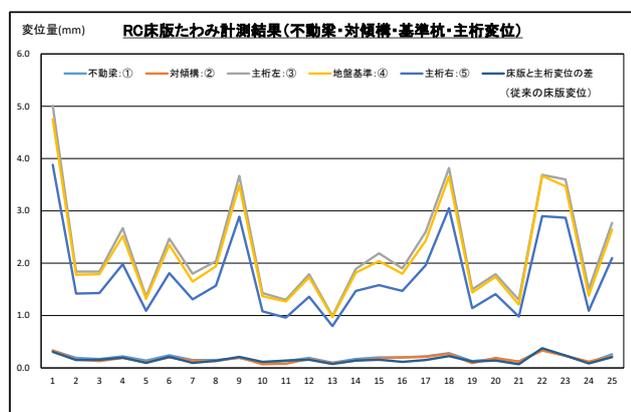


図 7.2.4 RC 床版変位計測結果-1

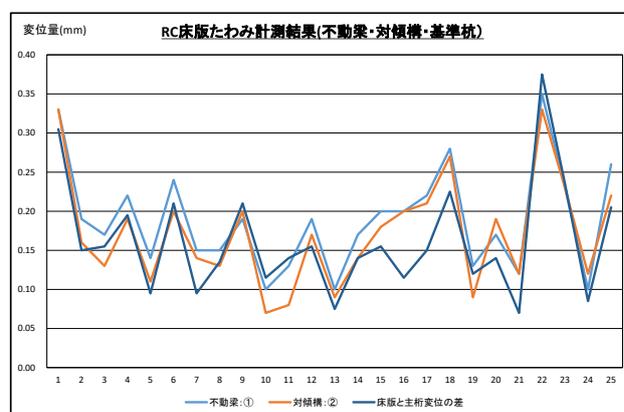


図 7.2.5 RC 床版変位計測結果-2

(4) 概算費用

約 220 万円（変位計×1台，測定器×1台，計測計器設置費用：足場仮設費は含まず）

(5) まとめ

不動梁を用いた方法及び対傾構を不動梁と見なした方法で RC 床版の変位計測の実用性が確認できた。また，不動梁を用いた方法に於いて，不動梁を RC 床版に近く設置出来れば，支点は固定端でも計測可能であること，RC 床版の損傷箇所が対傾構の近傍であれば，マグネットスタンドと変位計で計測可能であることがそれぞれ分かった。

7.3 光ファイバによるプレキャスト床版の接合部のモニタリング【2編5章の事例】

(1) モニタリングの位置づけと目的

プレキャスト PC 床版（以下、PCa 床版）は、品質管理体制の整った工場で作成されるとともに、橋軸直角方向にプレストレスが導入されていることなどから、床版疲労に対して高い耐久性を有している。これに対して PCa 床版の接合部は、床版架設後に場所打ちコンクリートによって施工されること、橋軸直角方向にプレストレスが導入されていないことなど PCa 床版との品質に差があり、長期的には橋梁を走行する大型車の荷重等の影響によりひび割れ等の変状が顕在化する可能性が考えられる。

このため、プレキャスト PC 床版への取替えが完了した鋼鈹桁橋を対象に、場所打ち接合部における変状を早期に把握して、重点点検箇所のスクリーニングなど維持管理の効率化を目的としたモニタリングを行った。



図 7.3.1 プレキャスト PC 床版の場所打ち接合部（床版下面）

(2) モニタリング計画

1) モニタリングの概要

PCa 床版接合部の健全性を評価する指標としてひずみ変化量を設定し、接合部のひずみ変化量を評価するモニタリングを実施した。適用したモニタリング技術を表 7.3.1 に示す。

接合部の健全性評価は、接合部ごとの相対的なひずみ変化量から評価する方法、PCa 床版と接合部のひずみ変化量の対比から評価する方法などを試みた。

表 7.3.1 適用するモニタリング技術

モニタリング技術		計測項目
分布型光ファイバ	BOCDA※方式	光ファイバ全長のひずみ分布

※BOCDA : Brillouin Optical Correlation Domain Analysis (ブリルアン光相関領域解析法)

周波数変化がひずみと温度に依存するブリルアン散乱を利用する計測方法。光ファイバの両端からポンプ光とプローブ光を入射して対向伝搬、位置選択的に誘導散乱を起こすことによって、任意の点のひずみ計測を行う技術。空間分解能：数十 mm 程度。

2) モニタリングの範囲

分布型光ファイバは、大型車の走行台数が多いと推定される走行車線側（G1～G2 桁間）の床版下面に設置した。分布型光ファイバの配置イメージを図 7.3.2 および図 7.3.3 に示す。

BOCDA 方式は光ファイバの両端を計測器に接続する必要があることから、光ファイバは A1 橋台～P1 橋脚間の場所打ち接合部 22 箇所を往復で縦断するように設置した。

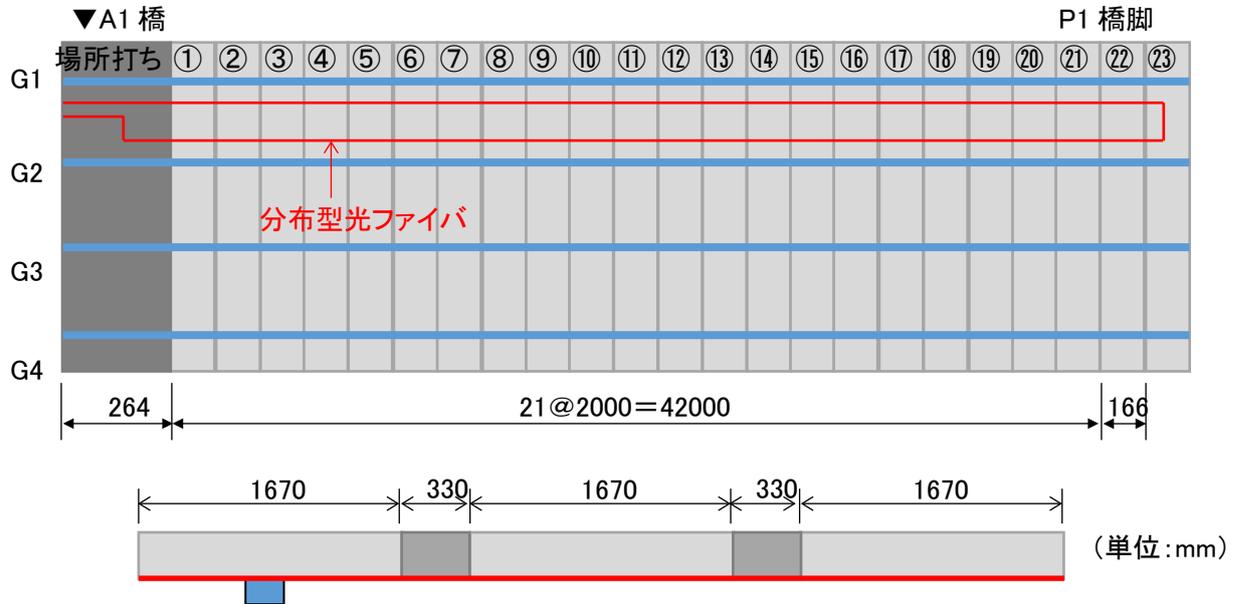


図 7.3.2 光ファイバの設置イメージ

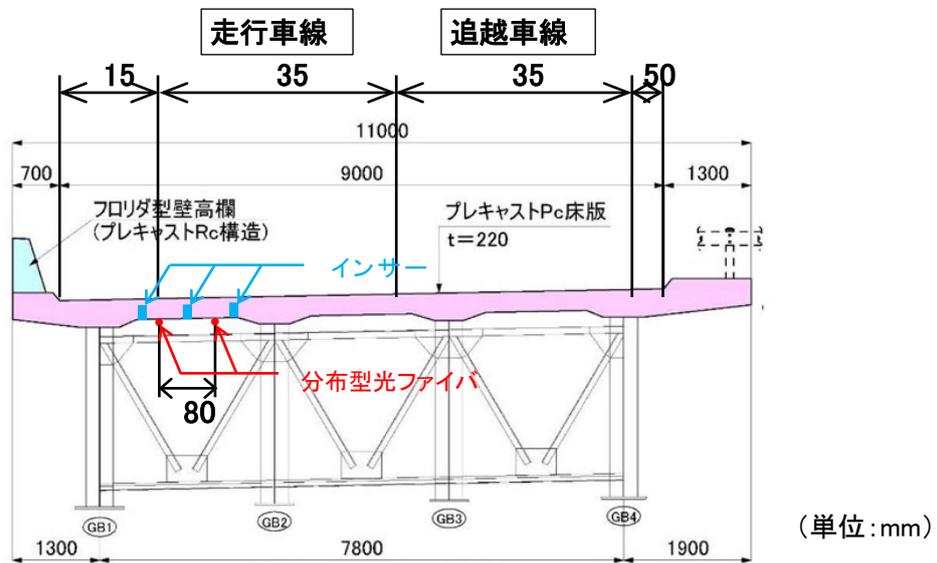


図 7.3.3 分布型光ファイバの設置位置

(3) 光ファイバ設置・計測

分布型光ファイバの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を使用し、接着作業は橋梁検査路上から実施した。接着作業の状況を図 7.3.4 に示す。分布型光ファイバの設置に係る作業歩掛は以下のとおりであった。

光ファイバ仮固定 : 90m ÷ 2 人 ÷ 1hr = 45m/人 hr
光ファイバ接着 : 90m ÷ 3 人 ÷ 7hr = 4.3m/人 hr

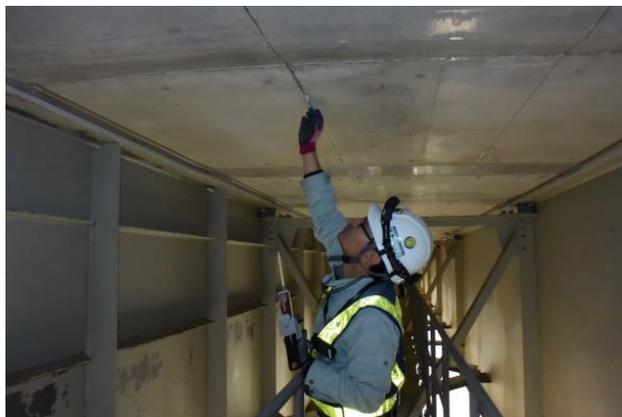


図 7.3.4 分布型光ファイバの接着作業の状況

計測作業は、計測回ごとに計測器を現地に搬入して実施した。1 回の計測に要した現地作業時間は、準備作業 90 分、計測作業 30 分×2 回、片付け 60 分の約 3.5 時間であった。計測状況を図 7.3.5 に示す。



図 7.3.5 計測状況

(4) モニタリング結果

空間分解能を 50mm，サンプリング距離間隔を 25mm に設定してひずみ分布の計測を行った。50mm の間隔に 0.1mm の長さ変化が生じた場合のひずみ量は以下のとおり。

$$0.1\text{mm} / 50\text{mm} = 0.002 = 2000 \times 10^{-6}$$

ひずみ分布の計測結果の一例を図 7.3.6 に示す。横軸は計測器からの距離を表しており、約 96m が A1 橋台（始点）、約 141m が P1 橋脚（折返し点）、約 185m が A1 橋台（終点）であり、この範囲をモニ

タリング領域とした。

ひずみ分布の計測は秋季から冬季にかけて3回実施したが、いずれの計測回においても経常的に引張ひずみ(+)と圧縮ひずみ(-)が現われており、引張ひずみは最大 700×10^{-6} 程度となっていた。この引張ひずみに対応する長さ変化は $(700 \times 10^{-6} \times 50\text{mm} = 0.035\text{mm})$ 程度と微小であった。

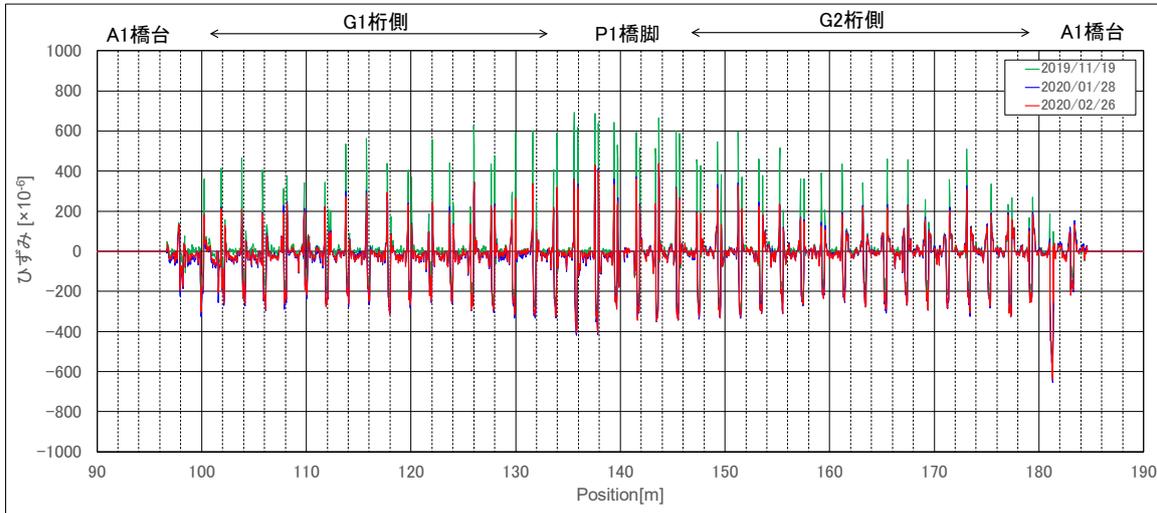


図 7.3.6 BOCDA 方式によるひずみ分布の計測結果

図 7.3.6 の横軸のうち、引張ひずみが比較的大きい 130m-140m 付近を拡大し、床版と接合部の境界を表示させたグラフを図 7.3.7 に示す。この範囲は G1 桁側の床版 No.18~No.23 である。

図 7.3.7 より、PCa 床版中央部にはひずみがほとんど生じていないのに対して、PCa 床版と接合部の境界付近で引張ひずみが生じていること、接合部中央では圧縮ひずみが生じていることが認められる。

PCa 床版と接合部の境界付近に引張ひずみが、接合部中央部で圧縮ひずみが生じている現象は、場所打ち施工された接合部コンクリートの収縮の影響などが考えられる。今後、外気温が異なる条件でデータを取得することにより、接合部付近に生じるひずみ挙動に関する考察を行う予定である。

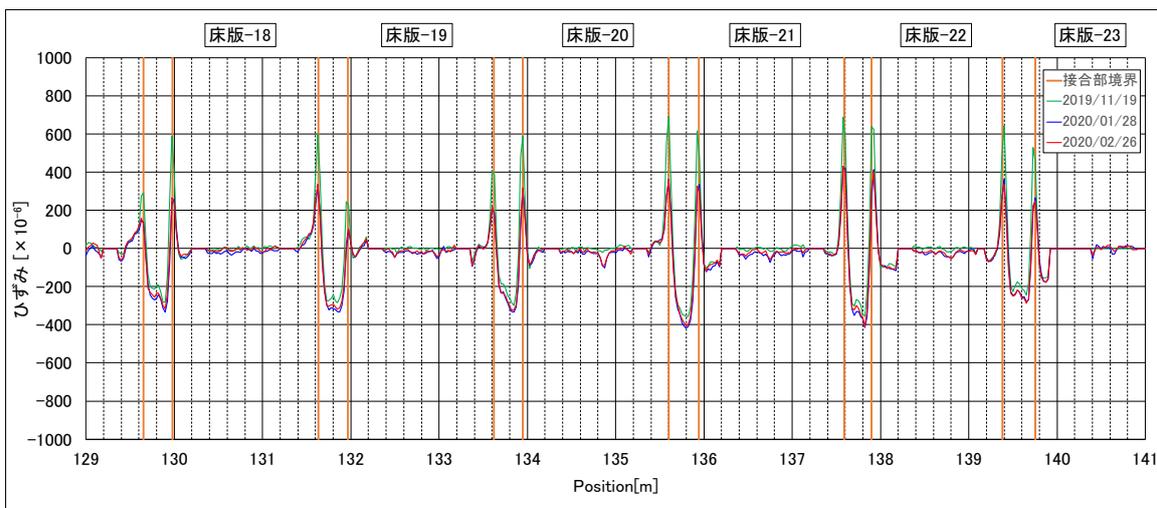


図 7.3.7 BOCDA 方式によるひずみ分布の計測結果 (拡大)

(5) まとめ

本モニタリングシステムを用いることによって、プレキャスト PC 床版の場所打ち接合部における変状を早期に把握できる可能性を示した。今後は、重点点検箇所をスクリーニングするための閾値設定など、評価を行うための情報収集を継続する予定である。

7.4 振動モードによるモニタリング【2編6章の事例】

(1) モニタリングの位置づけと目的

本モニタリングの目的は、診断を補助するモニタリングとして、剥離や抜け落ちなど変状に伴う構造性能の変化を非破壊で評価することにある。

本モニタリングの特長は、橋梁固有の振動モードに着眼した分析である。具体的に、複数の加速度センサをRC床版の底面に設置し、車両が走行した際の振動応答から橋梁固有の振動モードを推定させる。それら複数の振動モードの時系列変化から、構造性能の変化を評価する。

(2) モニタリング計画

1) 対象橋梁

東北地方の高速道路橋の外観を図7.4.1に示す。構造形式は鋼合成単純鈹桁橋で、橋長は36.3m、床版形式はRC床版である。構造形式と施工時期は上下線でほぼ同一であるが、RC床版の健全度は上下線で異なっている。具体的に健全度は上り線がⅢ、下り線がⅣで下り線の方が損傷している。



図7.4.1 対象橋の外観

表7.4.1 対象橋の概要

項目	仕様
供用開始時期	1975年
構造形式	鋼合成単純鈹桁橋
橋長	36.3 m
幅員	10.75 m
床版形式	RC床版
健全度 (5段階評価)	上り線 健全度Ⅲ 下り線 健全度Ⅳ

(3) 計測条件と解析方法

1) 計測条件

床版の振動は、多点同時計測が可能な有線型解析システムで計測した。有線型解析システムの概要を図7.4.2に示す。解析システムは、加速度を計測するための振動センサ、FFTアナライザ、制御用PCで構成した。振動センサは橋軸方向に1列となるよう、走行車線下の床版に等間隔で9個設置した。道路上の車両走行状態を目視しながら、大型車1台が走行車線を通じた際に、床版の鉛直方向に生じる振動応答を計測した。

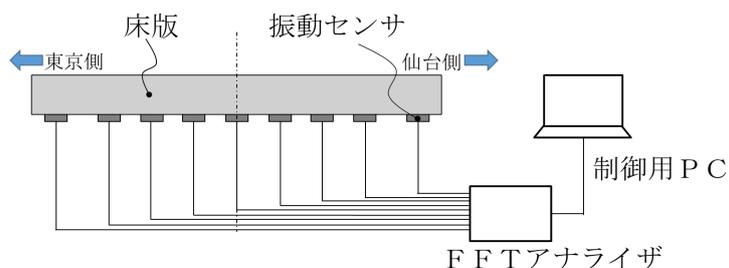


図7.4.2 有線型解析システムの概要

2) 解析方法

取得した加速度の時刻歴波形から減衰自由振動区間を選定し、周波数変換処理後に各卓越周波数における加速度振幅と位相情報から振動姿態を描画させて、振動モードを推定した。

(4) モニタリングおよび解析結果

1) 加速度の周波数スペクトル

図 7.4.3 に上下線の計測における代表的な加速度振幅の周波数スペクトルを示す。センサ位置は橋軸方向の中央である。4.4Hz など複数の周波数で卓越が観測されている。この中でも 19Hz と 93Hz の加速度振幅が特に上下線で異なっていた。

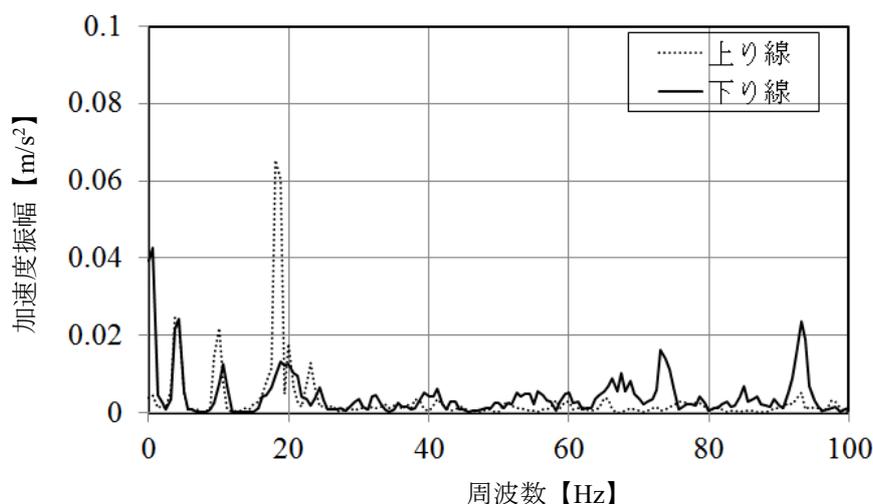


図 7.4.3 上下線の加速度振幅の周波数スペクトル

次に、19Hz と 93Hz における振動モードを分析し、損傷との関係を調査した。

(5) 振動モード形状の特異領域と損傷との対応

1) 19Hz における振動モード

19Hz における上り線の振動形状を図 7.4.4 に、同様に下り線の振動形状を図 7.4.5 に示す。図 7.4.4 と図 7.4.5 から 19Hz における振動形状は、鉛直たわみの 3 次モードであると解釈できる¹⁾。ところが、その形状は上下線で異なる。具体的に、上り線の鉛直たわみ 3 次モードは、橋軸方向の中心に対して概ね対称である。一方、下り線の鉛直たわみ 3 次モードは、橋軸方向中心に対して非対称であり、特に、センサ No.⑧付近が特異的であった。次に、その特異的な領域と点検記録における損傷との比較を試みた。上り線の点検記録図を図 7.4.6 に、下り線の点検記録図を図 7.4.7 に示す。点検記録図のハッチング箇所はポップアップやスケーリングなどの損傷を示している。モード形状において特異的であった、下り線のセンサ No.⑧付近には、剥離を含む損傷が生じていた。したがって、下り線の鉛直たわみの 3 次モード形状が特異的である理由の一つとして、RC 床版の損傷に起因している可能性がある²⁾。

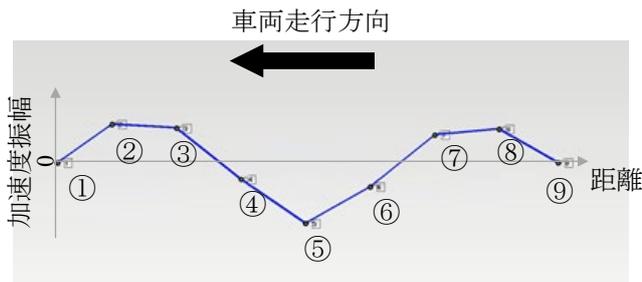


図 7.4.4 上り線の振動形状(19Hz)

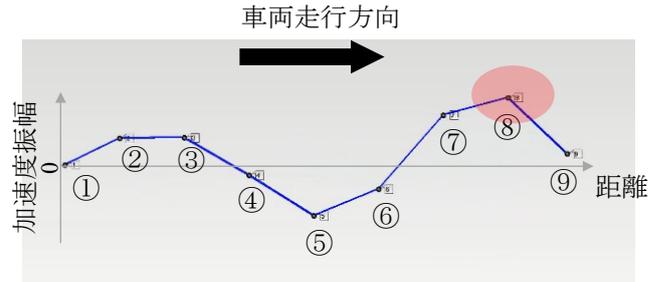


図 7.4.5 下り線の振動形状(19Hz)

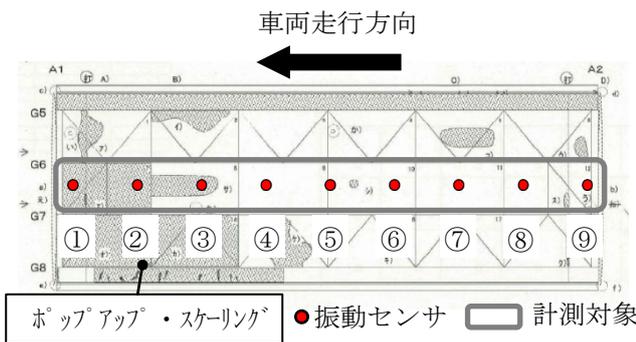


図 7.4.6 上り線の点検記録図

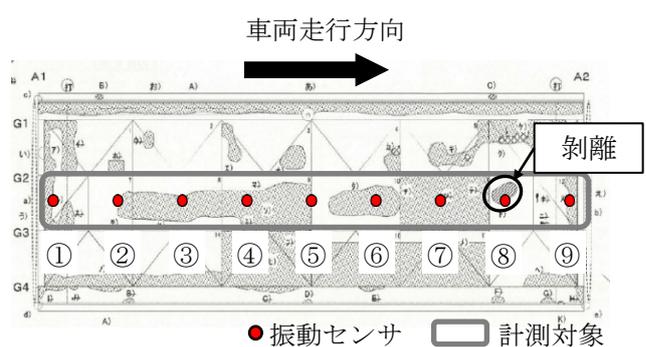


図 7.4.7 下り線の点検記録図

2) 93Hz における振動モード

93Hz における上り線の振動形状を図 7.4.8 に、同様に下り線の振動形状を図 7.4.9 に示す。上り線の形状は、車両の退出側付近つまりセンサ No.①付近の加速度振幅が他の計測点よりも大きくなっていた。一方、下り線の形状は、ほぼ全計測点について加速度振幅が観測されており、かつ各計測点間の位相がばらついていた。次に、この 93Hz における振動モードの理想形状を数値解析により導出した³⁾。図 7.4.10 と図 7.4.11 に結果を示す。数値解析で導出した振動モード形状に対して実証結果による振動モード形状を比較すると、上り線はセンサ No.①付近が特異的であった。また、下り線はほぼ全計測点について特異的であった。さらに、特異的な領域を前述の点検記録図と比較したところ、振動モードの特異領域が点検記録図における損傷領域と概ね一致していた(図 7.4.12, 7.4.13)。したがって、93Hz の振動モードにおいても、特異的な領域が、RC 床版の損傷に起因している可能性がある。



図 7.4.8 上り線の振動形状(93Hz)

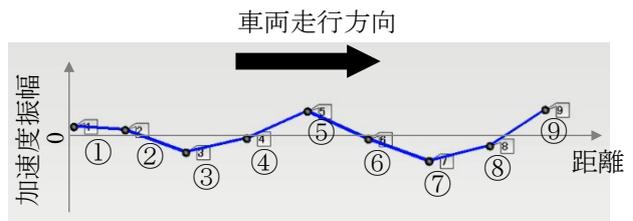


図 7.4.9 下り線の振動形状(93Hz)

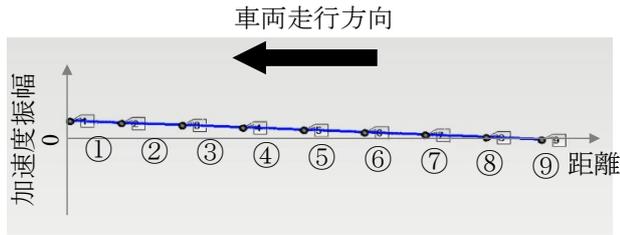


図 7.4.10 上り線の振動の理想形状(93Hz)



図 7.4.11 下り線の振動の理想形状(93Hz)

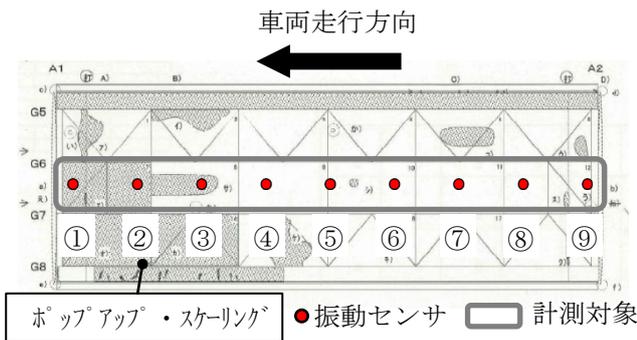


図 7.4.12 上り線の点検記録図

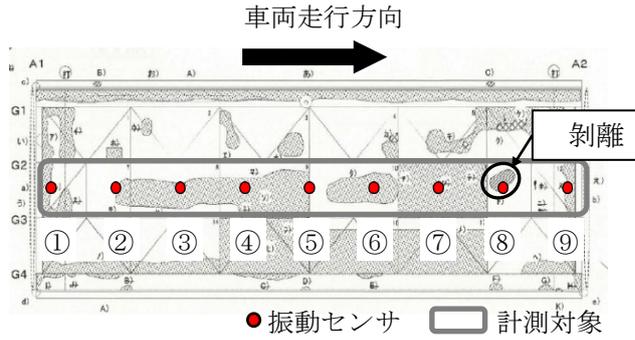


図 7.4.13 下り線の点検記録図

(6) まとめ

鋼合成単純鉄桁橋の RC 床版を対象とした適用事例を示した。振動モードに着目することで、剥離などの損傷状況の差異を可視化できた。本事例では、建設機械が橋梁周辺で動作していると、橋梁振動を取得しづらい場合があった。したがって、計測の際には暗振動を確認して外乱が重畳していないか調査する、または建設機械を停止させた状態で計測するなど配慮が必要であることも確認できた。

参考文献

- 1) 木下, 葛西, 清川, 藤野, 本間, 寺田: 振動可視化分析を用いた実橋梁床版のモード形状推定, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, CS14-017, pp.33-34, 2017.
- 2) 藤野, 倉田, 葛西, 廣江: 東北自動車道大森川橋におけるモニタリング技術の現場実証, 土木技術資料, Vol.59, No.9, pp.46-49, 2017.
- 3) 葛西, 木下, 清川, 藤野, 本間: 実橋の床版モニタリングにおける振動モードと損傷との対応解析, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集, CS9-026, pp.51-52, 2018.

7.5 FBG 光ファイバによるプレキャスト PC 床版接合部動的ひずみのモニタリング

(1) モニタリングの位置づけと目的

プレキャスト PC 床版（以下、PCa 床版）の接合部は、RC 部材として設計されているため、ひび割れが生じた場合も、構造上は安全性が損なわれるものではないが、長期的には、腐食因子の侵入や、ひび割れが生じた継目部に輪荷重による疲労の影響が局所的に集中するなどして、変状が徐々に進行していく懸念がある。

そこで、接合部に生じたひび割れ（＝コンクリートひずみ×センサ長）が、輪荷重走行に対して、RC 計算による応答値以内であるか、また、長期的に応答値が増加していないかをモニタリングする。

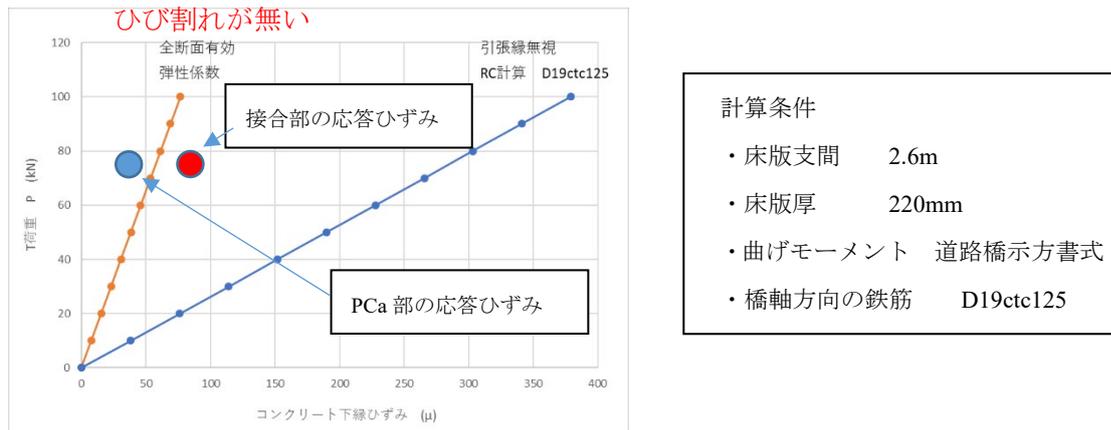


図 7.5.1 輪荷重走行時における接合部下縁の計算値例

輪荷重の推定には、以下の 2 つの方法がある、

方法 1 軸重計により輪荷重を計測した試験車両を走行させる。

方法 2 24 時間程度の連続測定を行い、ひずみの大きい上位 10% の車両の平均値を代表値とし、この代表値の経年的な変化を比較する。

(2) モニタリング計画

1) モニタリングの概要

プレキャスト PC 床版接合部の動的ひずみのモニタリングに適用した技術を表 7.5.1 に示す。

表 7.5.1 適用するモニタリング技術

モニタリング技術		計測項目
ポイント型光ファイバ	FBG 方式	センサ設置箇所の動ひずみ

FBG : Fiber Bragg Grating

光ファイバの局所に紫外線レーザを照射することで、光ファイバ内部に一定間隔の回折格子を形成し、この格子から反射する光の波長によって、格子部の間隔変化（＝ひずみ）や温度変化を検出する方法。

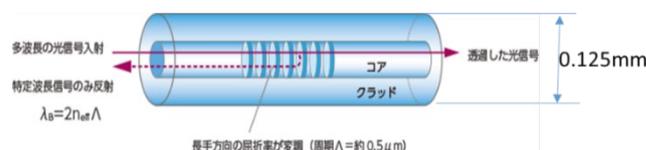


図 7.5.2 FBG 光ファイバの概要

FBG方式（ポイント型）の光ファイバひずみセンサとは，FBGを形成した光ファイバの両外側に，長期安定性の高いガラス融着等の技術によりステンレス製のプレート（以下，SUS固定版）を固定し，このSUS固定版を接着剤またはステンレス製アンカでコンクリートに固定したものである。

SUS固定版の間隔は自由に設定することができ，この2点間の平均ひずみ（＝伸縮量/センサ長）を測定する。

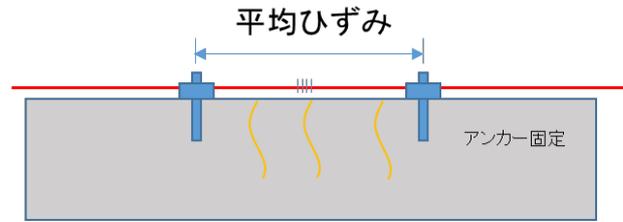


図 7.5.3 FBG 光ファイバひずみセンサの概要

2) モニタリングの範囲

図 7.5.4，図 7.5.5 に PCa 床版接合部のモニタリングセンサ配置状況を示す。接合部を跨ぐセンサ長のひずみセンサを，ひび割れが発生している接合部橋軸方向に設置する。あわせて，参考値として，PCa 床版中央部の橋軸方向にも同じセンサを設置し，この両者を比較した。

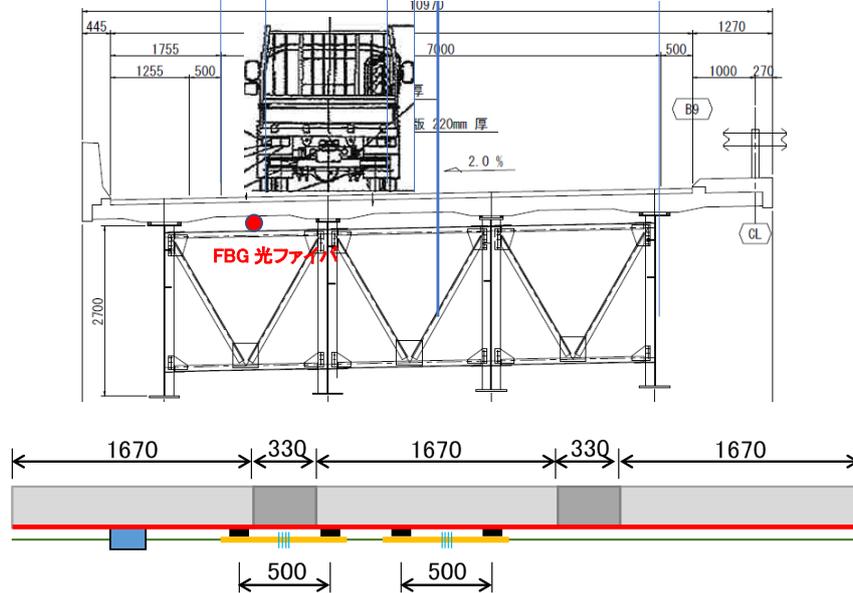


図 7.5.4 プレキャスト床版接合部のモニタリングセンサ配置

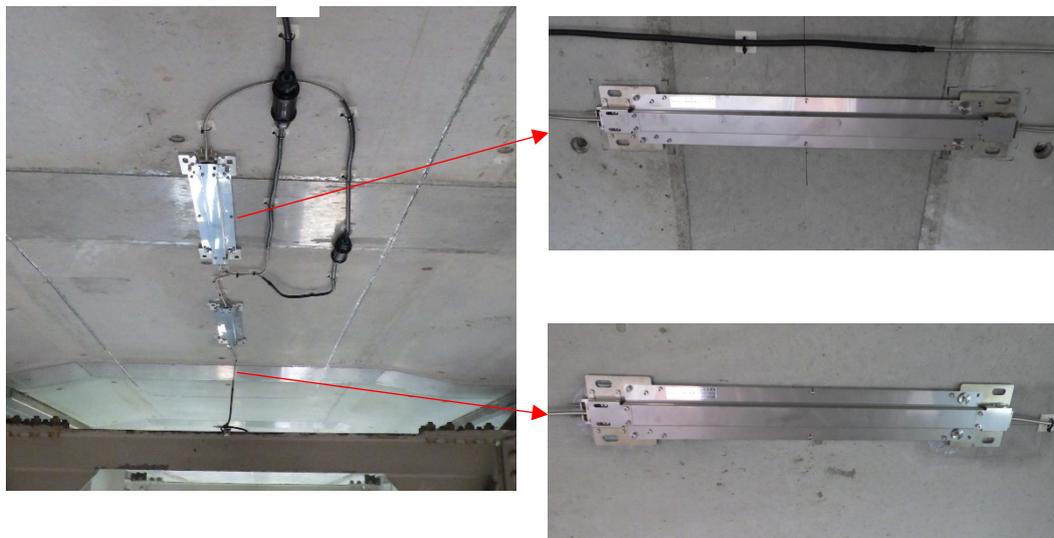


図 7.5.5 プレキャスト床版接合部のセンサ設置事例

(3) FBG 光ファイバひずみセンサの設置および測定

1) 設置作業

- ①FBG 光センサの SUS 固定版を
所定の位置に接着



図 7.5.6 センサ設置状況の例

- ②光ケーブル端部に測定器を接続後、各センサ
に所定のプリテンション(3000 μ)を導入
- ③測定器設置箇所まで、光ケーブルを配線

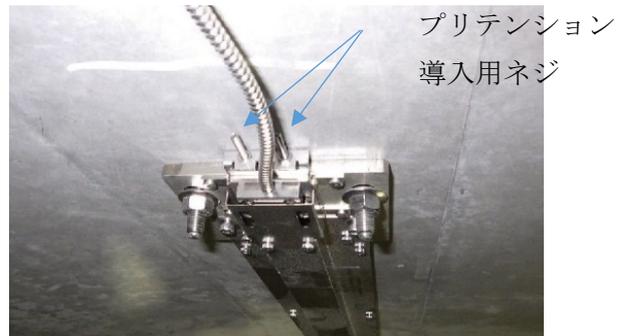


図 7.5.7 センサの端部構造

2) 計測

年 1 回程度の測定を計画した場合、測定器、データ保管装置(ノートパソコン)および電源(例えば、ポータブル電源やカーバッテリー等)を都度持参し、一時的に設置する。測定器への接続は光ファイバ 1 本のみであり、測定準備作業は 15 分程度で完了する。

測定は可能なかぎり、24 時間連続測定とし、交通量の多い時間帯のデータを採用する。測定サンプリングは、100Hz のサンプリングとする。

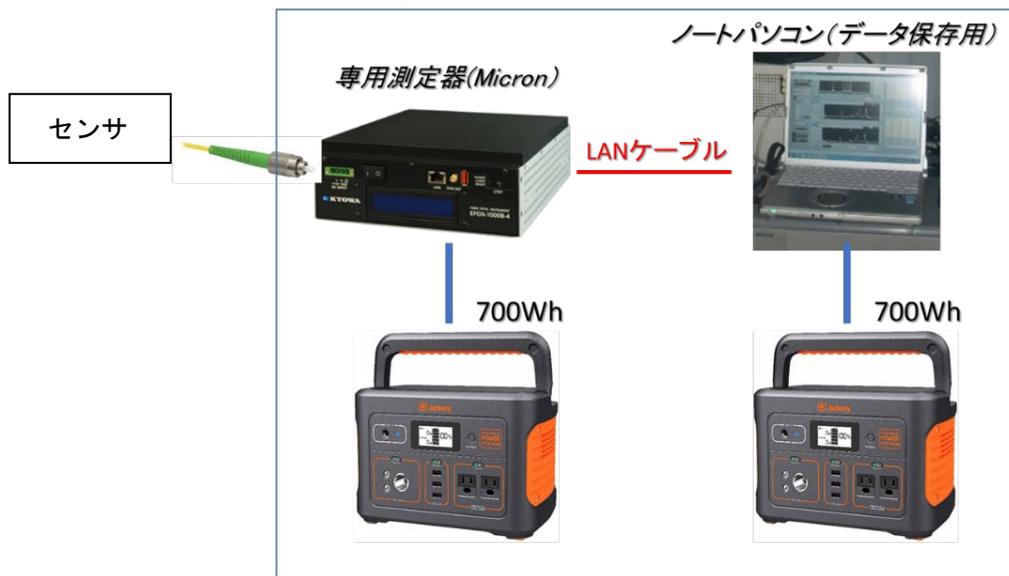


図 7.5.8 測定システムの構成例

(4) モニタリング結果

1) データ整理

図 7.5.9 に、目視点検において 0.1mm 未満の微細なひび割れが確認された接合部（中間支点近傍）と、それに隣接する PCa 部における 1 時間に通過した全車両の応答ひずみを示す。参考として、図 7.5.10 に、目視点検において、ひび割れが確認されなかった部位（径間中央部付近）の測定例も示す。

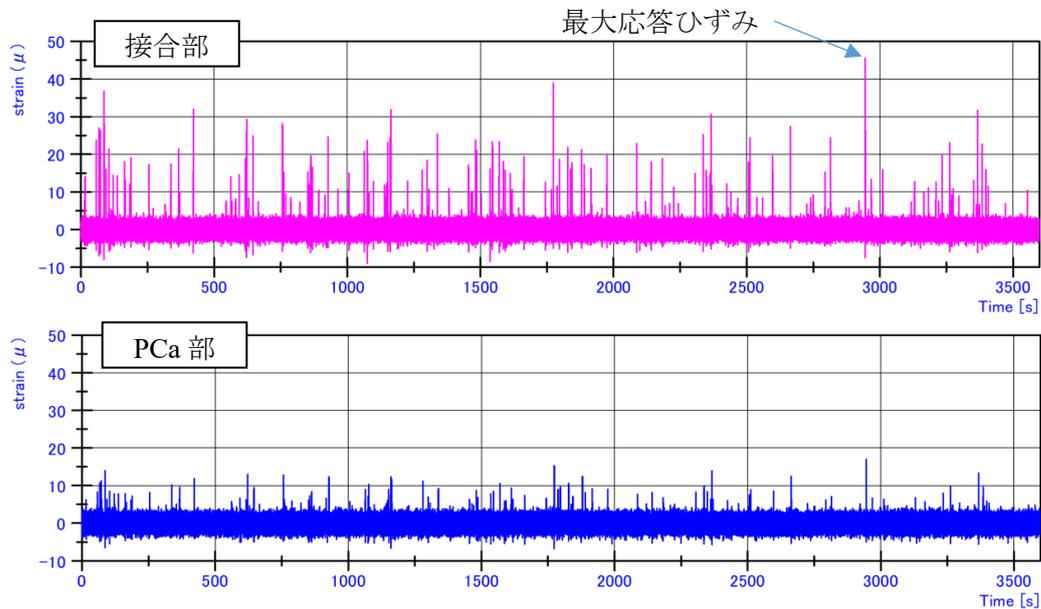


図 7.5.9 0.1mm 未満の微細ひび割れが確認された部位（中間支点部）の測定事例

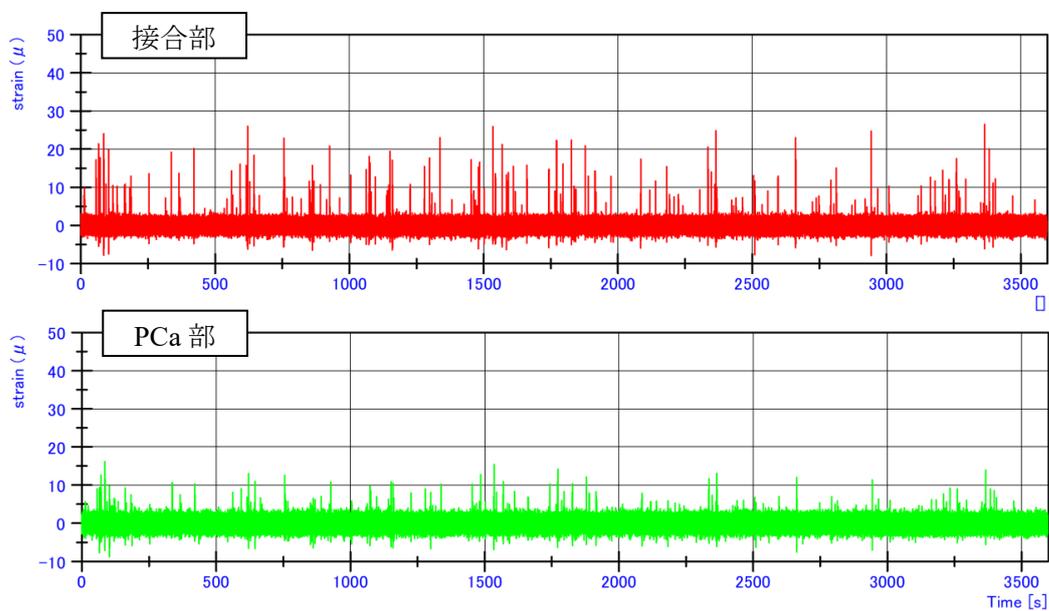


図 7.5.10 ひび割れが確認されなかった部位（径間部）の測定事例

図 7.5.11 に、最大応答ひずみが生じた車両走行時の拡大図を示す。

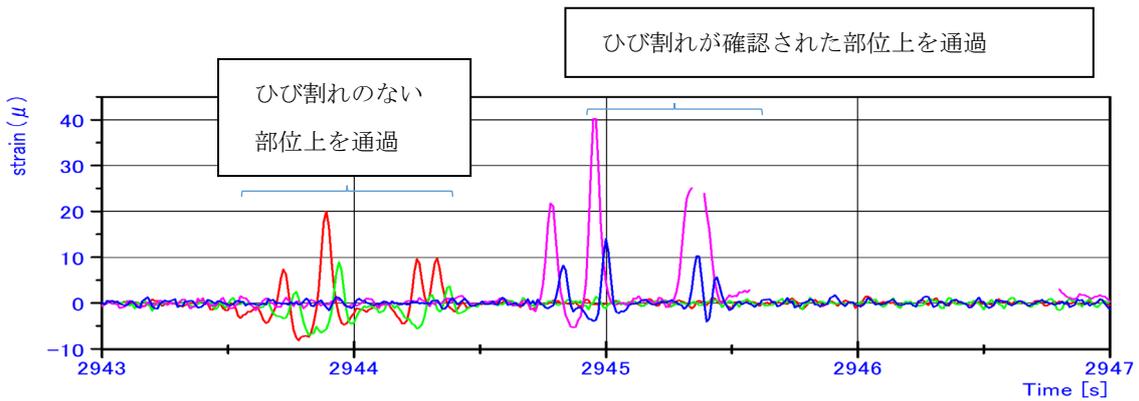


図 7.5.11 最大応答ひずみとなった車両の応答ひずみ拡大図

2) 結果の評価

図 7.5.12 に、データ整理により抽出した車両の応答ひずみを、計算値に重ねた実測事例を示す。縦軸の輪荷重は、推定可能な車両の応答ひずみから比例計算により求めたものである。

PCa 部のひずみは、おおむね計算値の半分程度であった。壁高欄、舗装等の橋面工による影響や、道示式の安全余裕度から鑑みると妥当な値と考えられる。目視点検において、0.1mm 未満の微細なひび割れが確認された接合部の応答ひずみは、PCa 部の 2 倍程度ではあるが、RC 計算値と比較すると、十分に小さい値である。また、最大で 50kN を超えると推定される輪荷重（車体総重量は 200kN 超と推定）の走行時の応答ひずみは 55μ であり、接合部の動的なひび割れの開口は、瞬間的に、 $55\mu \times$ センサ長 $500\text{mm} = 0.03\text{mm}$ である。これにより、構造安全上、耐久性上も問題ないと考えられる。また、先に示した図 7.5.11 から、車両通過後の残留ひずみはまったく認められない。3 か月後に 2 回目の測定を実施したが、その変化はほとんどなく、剛性低下の進行はないものと考えられる。

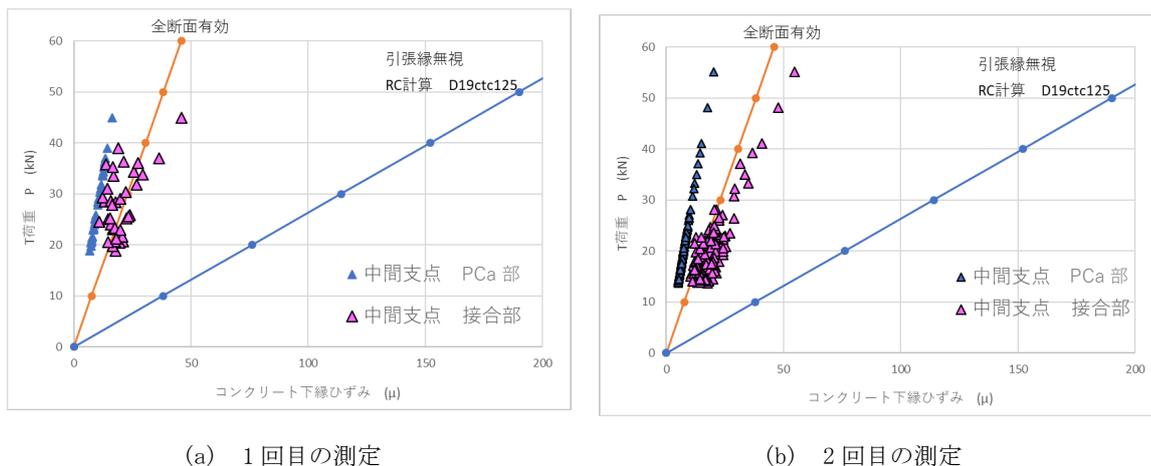
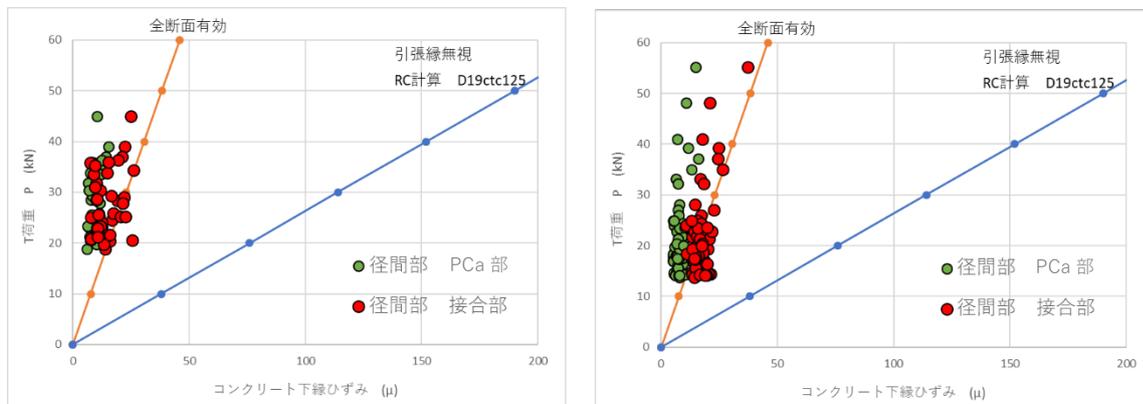


図 7.5.12 0.1mm 未満の微細ひび割れが確認された部位(中間支点部)の応答ひずみと計算値の比較

参考として、図 7.5.13 に、目視点検においてひび割れが確認されなかった接合部の応答ひずみと計算値の比較例を示す。外観上は、ひび割れがなく、一体性が確保されているように見えるが、接合部の応答ひずみは、若干大きく、潜在的に剛性の低下傾向があるものと思われる。



(a) 1回目の測定

(b) 2回目の測定

図 7.5.13 ひび割れが確認されなかった部位(中間支点部)の応答ひずみと計算値の比較

(5) まとめ

本モニタリングを用いることで、プレキャスト床版接合部における、輪荷重によるひび割れ開閉の有無および、ひび割れが生じた場合の構造性能の評価を行うことができる。

参考文献

- 1) 玉置, 杉谷, 土地, 森川: FBG 光ファイバを用いた橋梁モニタリング技術の実橋検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1303-1308, 2017.
- 2) 玉置, 湯浅, 森川, 殿井, 高橋: 重交通下における既設 PC 単純桁の動的挙動に関する一考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.18, pp.63-68, 2018.

添付資料 1：用語集

用語	意味	類義語・関連語
解像度	デジタル画像のきめ細かさや滑らかさを表す尺度のこと。単位は、通常 dpi（ドット・パー・インチ）で表す。この値が高いほど、より自然に近い画質が得られる。	dpi
画素	デジタル画像を構成する最小単位のことであり、ピクセルと同意語。この値が多いほど高精細な表現が可能になる。	ピクセル
キャリブレーション	真値（既知の値や標準器等が示す値）と当該機器で求めた値の関係を、特定の条件下で確認すること。	校正
共振	周期的な外力や周期的な変位が振動系に作用した際に、特定の振動数において振動振幅が急に増大する現象。	
共振特性	振動系において共振が生じる周波数、ならびに、その周波数での静的な応答に対する振幅の倍率。	
減衰自由振動	振動系に摩擦力、空気抵抗などが作用し、その系の自由振動が時間の経過とともに減少する振動。	
剛体モード	弾性変形を伴わない剛体運動の固有振動モード。	
サンプリング	連続した時間信号を一定の時間間隔で取り出して離散的な信号へ変える処理。	
サンプリング周波数	サンプリングを行う周波数。	
周波数スペクトル	波数ごとに振幅や位相を表すこと。それぞれ振幅スペクトル、位相スペクトルと呼ぶ。	
振動モード	共振における振動の形。	
時刻歴波形	時系列に振幅を描画した波形。	
スペクトルピーク	振幅スペクトルにおいて振幅値が最大となる点。	
正規化処理	正規形でないものをルールに従って正規形に変換し、比較や演算などのために利用しやすくすること。ここでは、中心投影画像の歪みをなくした正射投影画像に変換する処理をいう。	中心投影画像，正射投影画像
正射投影画像	被写体を真上から投影した画像のこと。中心投影画像の歪みを補正しているため、画像上で位置、面積、距離などを正確に計測することができる。	中心投影画像
静的計測器	物理量の大きさが時間的に緩慢な変化しかしない現象を計測するための計測器。	
中心投影画像	レンズを通して撮影した画像のこと。レンズの中心に光束が集まるため、画像の中心から端部に向かうほど歪みが大きくなる。	正射投影画像

用語	意味	類義語・関連語
動的計測器	振動や衝撃などのように時間と共に物理量が変化する現象を計測するための計測器。	
ナイキストの定理	サンプリング周波数と最大検知周波数との間に成立する定理。信号を標本化(離散化)すると、標本化間隔の間に埋もれる変動は収集されない。	
ひび割れ密度	単位面積当たりのひび割れの割合（延長，交点数など）のこと。	
標定点	画像上の点と被写体上の点の位置を関係付けるための基準となる点（3次元座標）のこと。ここでは，中心投影画像を正射投影画像に変換するために使用する。	
フィルタリング	信号に含まれる成分の中から，特定の周波数成分のみを抜き出す処理。	
フーリエ変換	ある関数を周期関数に分解する変換。	
理論形状	機械や構造物を力学モデルで表した場合に，力学モデルの運動方程式や有限要素解析で推定できる振動モード。	

第3編 コンクリート桁のモニタリング

1 章	コンクリート桁のモニタリングの位置づけと種類	3-1
1.1	モニタリングの位置づけ	3-1
1.2	モニタリングの種類と役割	3-2
1.2.1	各種モニタリングの概要	3-2
1.2.2	モニタリングの種類と目的.....	3-3
2 章	赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング	3-6
2.1	技術の概要.....	3-6
2.1.1	目的.....	3-6
2.1.2	システムの概要.....	3-6
2.1.3	計測の期間.....	3-9
2.2	モニタリングの方法	3-9
2.2.1	モニタリングの手順.....	3-9
2.2.2	点検計画及び現地踏査.....	3-10
2.2.3	機材の準備	3-11
2.2.4	画像の観察・撮影	3-13
2.2.5	点検結果の整理・保存.....	3-17
2.2.6	費用の目安	3-17
2.3	結果の評価.....	3-18
2.4	保守.....	3-20
3 章	動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング	3-21
3.1	技術の概要.....	3-21
3.1.1	目的.....	3-21
3.1.2	システムの概要.....	3-21
3.1.3	計測期間.....	3-22
3.2	モニタリングの方法	3-22
3.2.1	モニタリングの手順.....	3-23
3.2.2	計画.....	3-24
3.2.3	機材の準備	3-24
3.2.4	撮影.....	3-26
3.2.5	ひび割れ開閉量の算出.....	3-27
3.2.6	データ保存	3-27
3.2.7	費用の目安	3-28
3.3	結果の評価.....	3-28
3.4	保守.....	3-29

4 章	加速度センサによる健全性の診断	3-30
4.1	技術の概要.....	3-30
4.1.1	目的.....	3-30
4.1.2	システムの概要.....	3-30
4.1.3	計測の期間.....	3-33
4.2	モニタリングの方法.....	3-33
4.2.1	モニタリングの手順.....	3-33
4.2.2	計画.....	3-34
4.2.3	機器の選定・設計.....	3-34
4.2.4	機器の設置.....	3-36
4.2.5	データの計測・蓄積.....	3-37
4.2.6	データ分析.....	3-37
4.2.7	費用の目安.....	3-42
4.3	結果の評価.....	3-42
4.3.1	固有振動の結果の評価.....	3-42
4.3.2	減衰振動の結果の評価.....	3-44
4.3.3	振動モードの結果の評価.....	3-44
4.3.4	たわみ角の結果の評価.....	3-44
4.4	保守.....	3-45
5 章	桁端部の異常検知モニタリング	3-46
5.1	技術の概要.....	3-46
5.1.1	目的.....	3-46
5.1.2	システムの概要.....	3-47
5.2	モニタリングの方法.....	3-49
5.2.1	モニタリングの手順.....	3-49
5.2.2	事前調査及び計画.....	3-49
5.2.3	機器の選定.....	3-50
5.2.4	機器の設置.....	3-50
5.2.5	モニタリングの実施.....	3-50
5.2.6	費用の目安.....	3-51
5.3	結果の評価.....	3-51
5.4	モニタリングの保守.....	3-52
6 章	適用事例	3-54
6.1	赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング【3編2章の事例】.....	3-54
6.2	動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング【3編3章の事例】.....	3-59

6.3	加速度センサによる健全性の診断【3編4章の事例①】	3-64
6.4	加速度センサによる健全性の診断【3編4章の事例②】	3-69
6.5	加速度センサによる健全性の診断【3編4章の事例③】	3-75
6.6	桁端部の異常検知モニタリングの実橋載荷試験への適用【3編5章の事例①】	3-79
6.7	桁端異常検知モニタリング【3編5章の事例②】	3-85
6.8	光ファイバひずみセンサによるプレストレス損失の可能性検知.....	3-90
添付資料1：用語集.....		3-98

1章 コンクリート桁のモニタリングの位置づけと種類

1.1 モニタリングの位置づけ

コンクリート桁橋は、橋軸方向に複数本掛けられた鉄筋コンクリートで構成される主桁により車両重量を支える形式の橋梁を言う。主桁は床版を介して車両重量を支え、車両重量によって発生する曲げモーメントとせん断力に抵抗する。

なお、コンクリート桁橋に関連するモニタリングのなかでも、コンクリート床版のひび割れや抜け落ちに関するモニタリングについては「第2編 RC床版のモニタリング」を参照されたい。また、コンクリートへの塩分浸透による補強鋼材の腐食に関するモニタリングについては「第6編 塩害環境下のコンクリート構造物のモニタリング」を参照されたい。

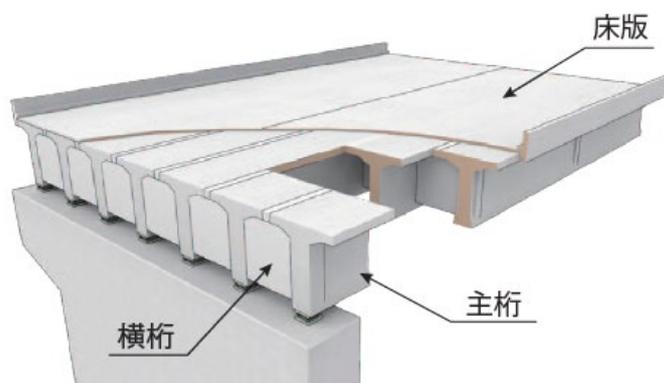


図 1.1.1 コンクリート桁橋の例

「橋梁定期点検要領」¹⁾に示されているコンクリート桁の損傷の種類として定義されているものうち、コンクリートの外観に現れる損傷としては、ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、補修・補強材の損傷、定着部の異常、変色・劣化、変形・欠損などがある。これら変状の有無を把握するためには、変状前後の差異を見極める必要があり、経時的な監視が必要となる。5年に一度の定期点検により外観変状の進行度合いを把握するが、詳細な変状の把握を行うためには、橋梁の全長、全面にわたって記録をする必要があるが、長大橋、検査路が整備されていない橋梁、箱桁外面は、検査路等が整備されていないなど近接目視が困難な橋梁が存在する。これらに対しては、定期的カメラを用いて画像を取得・評価を行うなどの方法を採用する場合がある。また、外観のみでは判断できないが、打音検査により損傷を把握するものとしてコンクリートの浮きや剥離がある。これに対しても同様に定期的カメラを用いて画像を取得し、前後の画像を比較、評価する手法が有効であり、「赤外線カメラによるコンクリートの浮き・剥離のモニタリング」を用いて、損傷の程度を評価する。

ひび割れの有害性の診断には、外観のみでは評価できない場合がある。そのような場合には、ひび割れの開口変位やその動的挙動を計測、監視して評価を行う。この場合は、クラックゲージによるひび割れ開口変位のモニタリングや「動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング」を導入することにより、特性をつかみ、損傷の程度を評価する。

コンクリート部材は剛性が高いため、疲労損傷等によって剛性が低下した場合でもたわみは小さく、目視では異常を把握できない場合が多い。この場合は、「加速度センサによる健全性の診断」により、振動特性とたわみ角のモニタリングを行って、これらの指標を総合的に診断することにより、損傷の程度を評価する。

なお、変位計による計測やカメラ画像を分析することにより得られるたわみは、主桁の構造劣化に伴

い増大するため、その絶対値や増分をモニタリングすることで、構造性能の変化を監視することが理論的には可能である。しかし、コンクリート主桁のたわみ値は非常に小さく、現在のセンシング技術では測定することが事実上、困難である。今後のセンサデバイスの技術向上により、モニタリング技術として機能する可能性もあるが、本ガイドラインでは、コンクリート主桁のたわみのモニタリングは取り上げないものとする。

自治体の保有する小規模な橋梁に対して、管理水準を下げて、供用制限を講じることが必要な場合がある。この様な橋梁に対して、「桁端部の異常検知モニタリング」を導入して、桁端の異常を検知する。

なお、モニタリング結果の評価のためには、初期状態からの変化の絶対量を把握して、検討することができるのが理想的である。初期状態を把握して、供用中のある時点の計測結果との差分を算出することを可能にするためにも、橋梁の開通に合わせ加速度計等による計測を実施して、初期値を取得しておくことが望ましい。

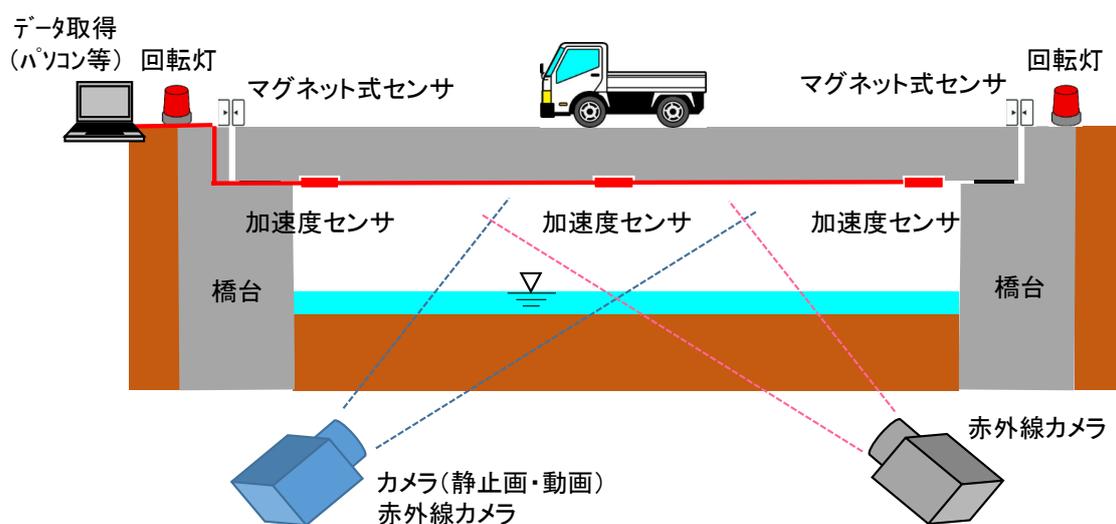


図 1.1.2 コンクリート桁のモニタリングの概念

1.2 モニタリングの種類と役割

1.2.1 各種モニタリングの概要

コンクリート桁のモニタリング技術として、現段階で実装可能なものであり、第1編で示したモニタリングシステムの活用期待する効果が見込める4つの技術について概説する。

(1) 赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング

赤外線法は、1日の気温の変化や日射の変化に伴い発生する温度差を赤外線カメラで撮影し、得られた温度分布画像から変状箇所を検出する手法である。本モニタリングを用いて、橋梁点検時において効率的に変状箇所をスクリーニングするとともに、点検によりたたき落としを行った箇所の再劣化やたたき落としを行えなかった変状箇所の位置や面積を定量的に把握し、劣化進行を把握する。

(2) 動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング

ひび割れの動画像を撮像して、車両走行の荷重に伴うひび割れ開口の動的特性を把握することにより、ひび割れの有害性を評価する。これまで、特定のひび割れの開口状況の監視にはひび割れの開口変位を測定するセンサであるクラックゲージが用いられてきたが、特にハイピア等の容易にアクセスできない橋梁に対しては、その設置にかかる手間やコストがネックとなり、維持管理サイク

ルを効率化，高度化する手段としては広く普及してこなかった。近年のカメラによる撮影，分析技術の進歩により，より簡便で低コストにモニタリングが可能となり，維持管理サイクルを効率化，高度化するモニタリング技術として活用できるようになった。動画像によるひび割れのモニタリングは，点検により有害なひび割れの可能性がある場合に，車両走行の荷重に伴うひび割れ開口を動画により撮影し，その開口変位の動的特性を把握することにより，そのひび割れが収縮ひび割れ等の構造的な影響の少ないひび割れか否かを評価する。

(3) 加速度センサによる健全性の診断

本手法により，目視では分からない構造性能の低下を監視する。加速度センサによるモニタリングにより，計測した加速度から算出できる橋梁の固有振動及び減衰，振動モード，たわみ角の分析が可能であり，これら複数の特徴量の時系列変化から，構造性能の変化を評価する。本モニタリングは，診断の補助及び緊急対応の補助するモニタリングとして，鉄筋損傷や PC 鋼材の破断などの変状に伴う構造性能の変化を評価する。

(4) 桁端部の異常検知モニタリング

自治体の橋梁のうち最も多いものが，支間長が 15 m 未満の規模の小さい RC 単純桁橋である。これらは数量が非常に多く，十分な費用を費やして維持管理を行うことが困難である場合が多い。このような橋梁に対しては，伸縮装置や目地の異常変位を桁端部に設置したマグネット式センサにより監視して異常を検知する，点検の補助に資する本モニタリングを適用する。

1.2.2 モニタリングの種類と目的

表 1.2.1 は「第 1 編 3 章モニタリングの意義」において示されているモニタリングの目的と各種モニタリングとの対応をまとめたものである。これによると，モニタリングの位置づけである，点検の補助，診断の補助，補修・補強の効果の確認，緊急時の対応の補助，のそれぞれに対応して，役割を発揮するモニタリングの種類が異なる。管理者は，維持管理におけるモニタリングの役割に基づいた種類のモニタリングを選定する。

表 1.2.1 モニタリングの種類と目的

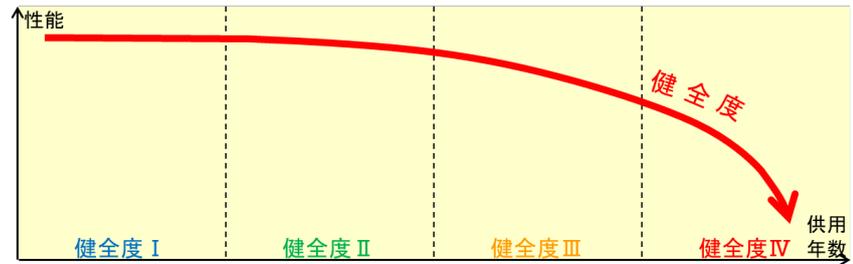
対象となる変状	モニタリングの種類	モニタリングの目的※								
		点検の補助		診断の補助					補修補強の効果の確認	緊急時の対応の補助
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
浮き剥離	赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング (定期計測)	○	○							
ひび割れ	動画画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング (定期計測)					○				
構造性能の低下	3軸加速度センサによる健全性の診断 (定期・常時計測)		○ 定期			○ 常時				
桁端部の変位	桁端部の異常検知モニタリング (常時計測)	○								

※モニタリングの目的の凡例説明

- A：何らかの異常があった箇所を把握する。
- B：健全な範囲もしくは要監視範囲を把握する。
- C：予防保全の実施を判断するのに必要な情報を取得する。
- D：定量的データを取得し、比較する。
- E：健全度評価のための定性的、定量的データを取得する。
- F：通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達していないことを確認する。
- G：補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認する。
- H：対策の効果，持続性を確認する。
- I：落橋等の危険が予測される箇所を把握する。

なお、表 1.2.1 には、各モニタリングが最も合致したニーズに対して○を付けているが、それ以外のニーズに対しての適用が可能なものもあり、詳しくは2章以降の各モニタリングの説明を参照されたい。

表 1.2.1 に示したモニタリングの種類と役割を対応させて、維持管理の経年劣化のグラフと対比させて示したのが図 1.2.1 である。



【現状の点検を補助】 ・記録保存の合理化 ・異常検知 ・予防保全	赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング(定期的) 赤外線カメラ			
			桁端部の異常検知モニタリング(常時計測) マグネット式センサ	
【診断を補助】 ・高度な評価	3軸加速度センサによる健全性の診断(定期的)	加速度センサ		
	3軸加速度センサによる健全性の診断(常時)	加速度センサ		動画処理によるひび割れ挙動のモニタリング(定期的) デジタルカメラ

図 1.2.1 コンクリート桁の維持管理におけるモニタリングの種類と役割

要約すると 4 つのモニタリングシステムにはそれぞれ役割があり，健全度 I ～ III の期間における点検の補助を目的とした「赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離のモニタリング」，定期計測による「3 軸加速度センサによる健全性の診断」，健全度 II ～ III の期間における診断の補助を目的とした「動画処理によるひび割れ挙動のモニタリング」，健全度 I ～ III の期間における診断の補助を目的とした常時計測による「3 軸加速度センサによる健全性の診断」，健全度 III における点検の補助を目的とした「桁端部の異常検知モニタリング」とそれぞれ整理できる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領, 2019. 3.

2章 赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

橋梁の桁や床版等のコンクリート構造物の浮き・剥離等の変状箇所を下面から点検及びモニタリングする場合、路下条件により構造物に接近することが困難な場合がある。たとえば、跨線橋・跨道橋の近接目視・打音点検を行う場合、跨線橋ではき電停止時間内に軌陸車を使用した夜間点検、跨道橋では大規模な規制を行いながら高所作業車を使用した点検を行う必要がある。とくに、跨線橋については軌陸車の作業範囲によって必ずしも全ての部材を近接目視できないことや、点検に至るまでに長期間の協議を要すること、一般の橋梁よりも費用が莫大となることが問題となる。また、跨線橋・跨道橋においてコンクリート片が落下した場合、鉄道や車両、通行者といった第三者に被害を与える可能性があることも問題である。

このため、コンクリート構造物の浮き・剥離等の変状箇所を確実にかつ効率的にスクリーニングできる点検技術や、点検によりたたき落としを行った箇所の再劣化やたたき落としを行えなかった変状箇所の位置や面積を定量的に把握し、定期的に点検を行うことで、変状箇所の新たな出現、変状範囲の拡大、前回と変化なし等といった劣化進行を評価できるモニタリング技術が求められている。これらのニーズに対する技術として赤外線サーモグラフィ法（以下、赤外線法という）による点検技術が有効である。赤外線法は、構造物から離れた場所から赤外線カメラを用いてコンクリート構造物の健全部と変状箇所に生じる温度差を観察することで、浮き・剥離等の変状箇所を確認することが可能となる点検技術である。図 2.1.1 に赤外線法による点検（以下、赤外線点検という）イメージを示す。

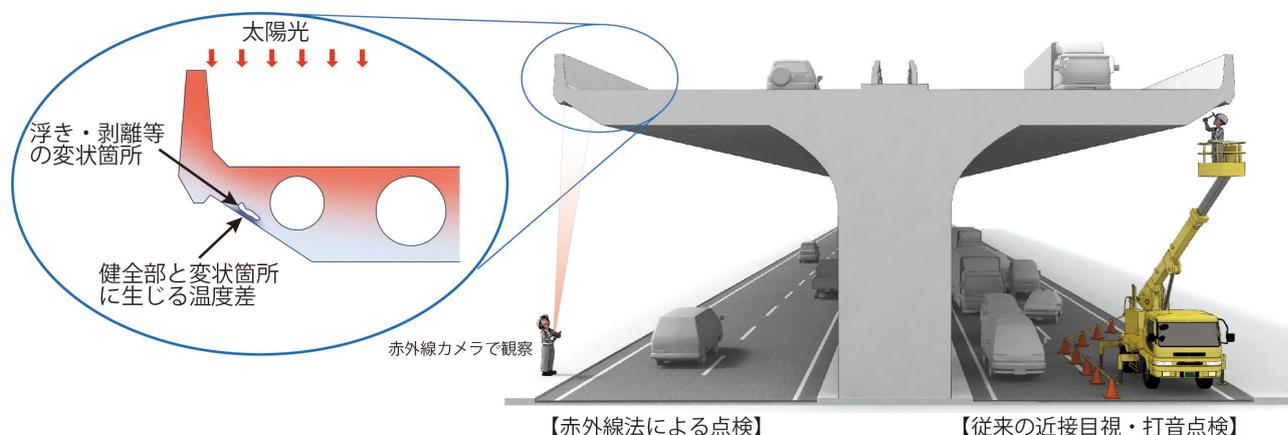


図 2.1.1 赤外線法による点検イメージ

2.1.2 システムの概要

(1) 赤外線点検の原理

コンクリート構造物の場合、コンクリート表面近くの浮き・剥離等は、鉄筋の腐食によるひび割れ等に存在する空気層が熱流の遮断層となり、気温等の温度変化に伴い健全部との表面温度差を生じる。本章でいう赤外線法は、日射や気温等の自然の温度変化を受け、図 2.1.2 に示すように、コンクリートの浮き・剥離等の変状箇所と健全部とで生じる温度分布の違いを、赤外線カメラで赤外線画像として観察（撮影）し、その赤外線画像を変状箇所が識別しやすいよう適切な温度範囲で表示し、温度変化部を変状箇所として検出する手法である。

一般的に、赤外線法による欠陥検出には、測定対象物の温度変化が不可欠となるが、測定対象物に温度変化を与える方法によって、能動型(active)と受動型(passive)とに分類される。本章でいう赤外線法による点検は受動型 (passive) に属するものである。

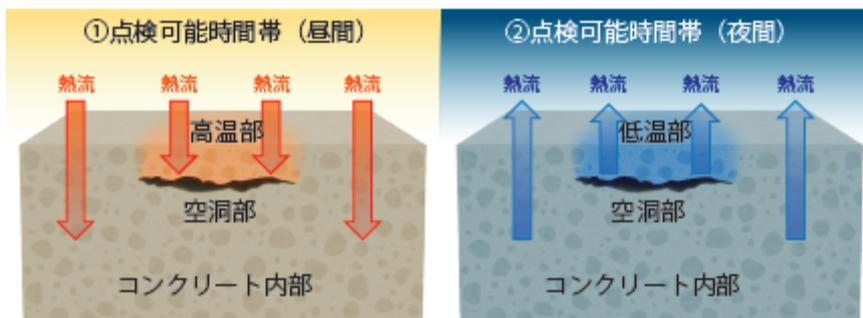
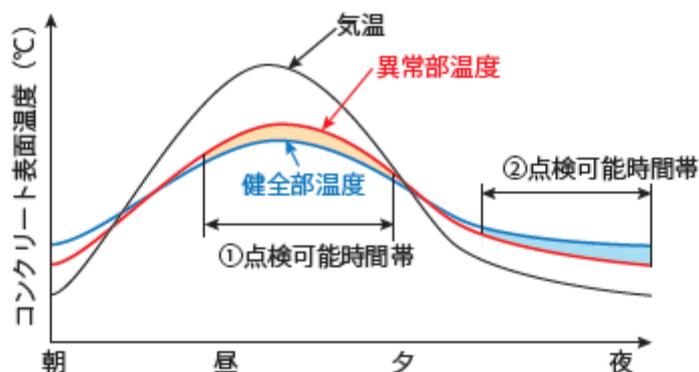


図 2.1.2 コンクリート表面温度分布と変状箇所の抽出例

(2) システムの構成

本モニタリングシステムは、赤外線カメラ、可視画像撮影機材 (デジタルカメラ等)、熱環境測定装置、ノート型パソコン (専用アプリケーションインストール済み) で構成される。熱環境測定装置とは、点検対象構造物の熱環境を把握し、適切な点検時間帯を判断するために設置する装置である。図 2.1.3 に本モニタリングシステムの構成例を示す。

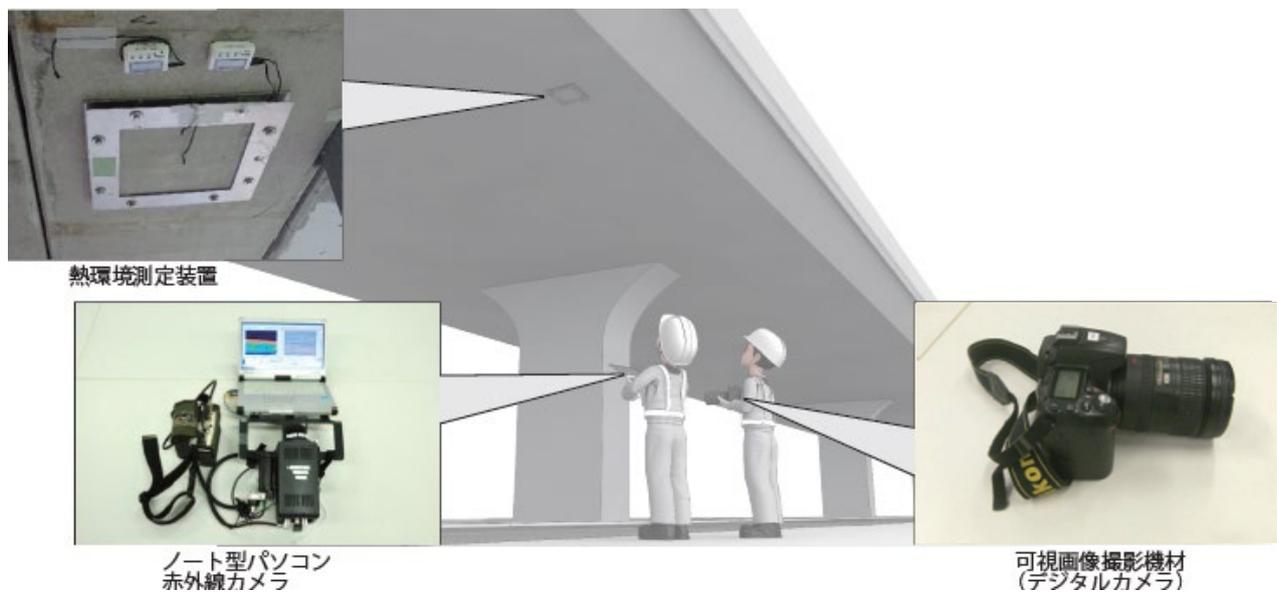


図 2.1.3 本モニタリングシステムの構成例

(3) 要求性能

赤外線法による点検技術に求められる要求性能は、国土交通省が取り組んでいる「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会橋梁維持管理部会」における「コンクリート構造物の浮き・剥離を検出可能な非破壊検査技術の評価」の中で、「利用場面及び適用条件において要求性能を満足すると認める」とされた技術であることとする。この利用場面及び適用条件における要求性能については、平成 27 年度に実施した実橋梁における検証結果をもとに、以下のとおり設定している事例がある。

1) 利用場面

「橋梁における第三者被害予防措置要領（案）」（平成 28 年 12 月）に基づき実施される措置において、落下する可能性のある損傷（コンクリートの浮き・剥離）のある箇所を推定し、打音検査が必要な箇所を事前にスクリーニング（抽出）する目的で使用される。

2) 適用条件

- ・天候が雨天でないこと
- ・調査対象部位が湿潤状態でないこと
- ・亜鉛を含む防錆スプレー等、金属系の塗料をコンクリート表面に塗布した部位でないこと
- ・熱環境測定装置に検出可能な温度差が発生すること
- ・調査対象に対する対象面角度の最小角度が 30°以上確保できること
- ・撮影箇所から調査対象部位の視通が確保できること
- ・調査時間帯は原則として夜間とする
- ・コンクリート表面から 4cm 奥までの浮き・剥離
- ・日較差（1 日の最高気温と最低気温の差）7℃以上が望ましい
- ・撮影距離約 50m 未満（ただし、レンズや、距離計の変更により 80m 程度まで対応可能）

3) 要求性能

- ・適用条件下において検出率が100%であること。

(参考) 変状箇所の検出率 = (従来方法による点検で把握された損傷のうち、当該技術で検出できた損傷数) / (従来方法による点検で把握された損傷数)

また、赤外線点検を定期的に行うモニタリングに求められる要求性能は、赤外線点検で検出された変状箇所の位置を特定し、過去の点検結果と比較、評価できることとする。とくに、第三者被害の可能性がある箇所において、今後剥落に発展する可能性のある変状は赤外線点検による変状箇所のモニタリングが重要である。

2.1.3 計測の期間

赤外線点検の実施間隔は、本ガイドラインでは定期点検時および定期点検の中間年（定期点検実施後2～3年）を推奨するが、対象となる桁の路下条件や劣化状況を考慮して、適切に定めることを原則とする。

なお、「橋梁における第三者被害予防措置要領（案）（平成28年12月 国土交通省道路局国道・防災課）」では、定期点検の中間年（定期点検実施後2～3年）ごとに行う措置として、赤外線サーモグラフィ装置を用いた非破壊検査を実施し、適用が不可能な箇所、または異常ありと判定された箇所に対象を絞って打音検査を実施することとされている。

2.2 モニタリングの方法

2.2.1 モニタリングの手順

赤外線法により橋梁下面から桁や床版等のコンクリート構造物の浮き・剥離等の変状や経年劣化を把握するモニタリングは次の手順で実施することを基本とする。図2.2.1にモニタリング手順のフローを例示する。

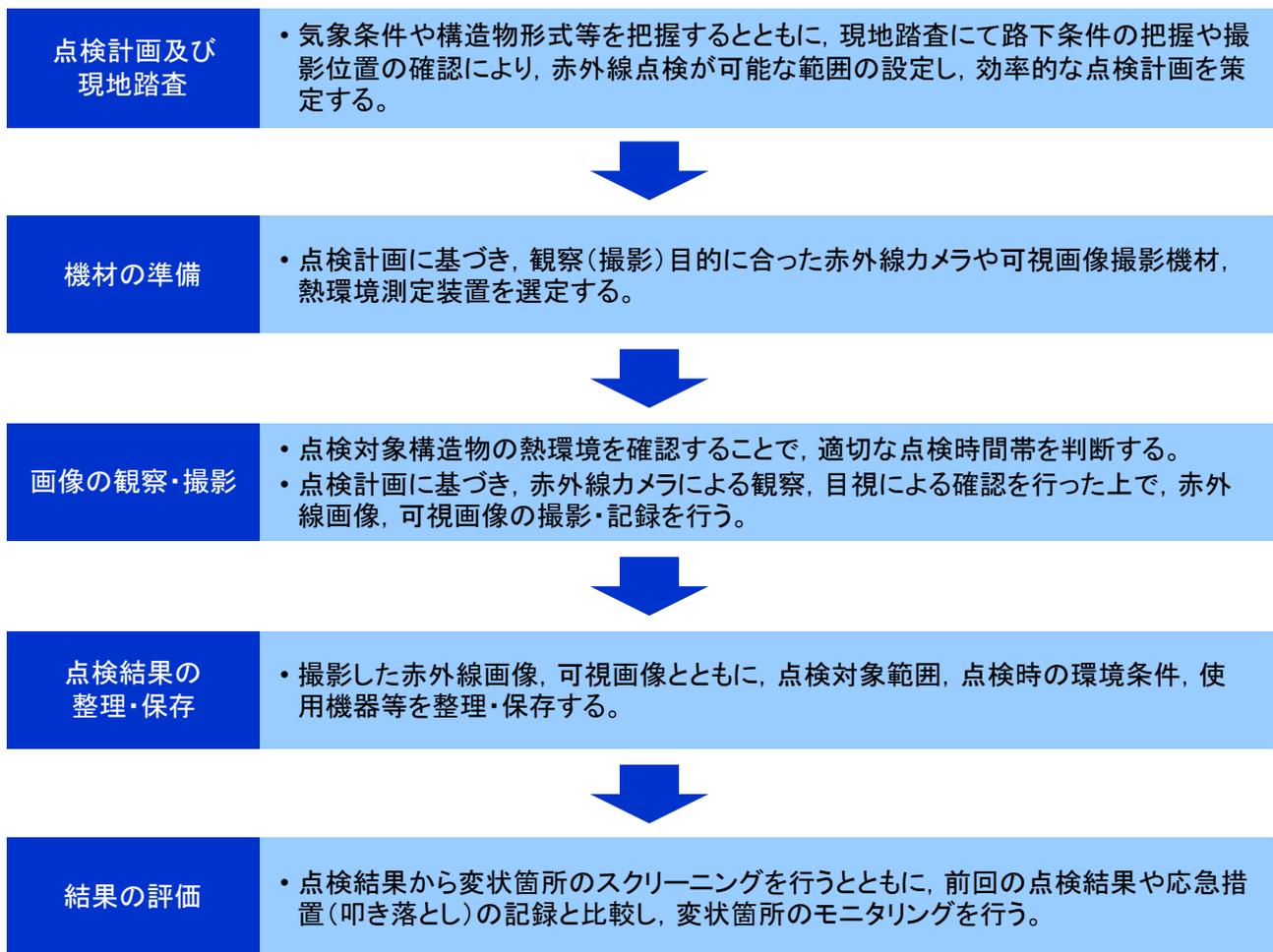


図 2.2.1 赤外線法によるモニタリング手順のフロー

2.2.2 点検計画及び現地踏査

点検計画及び現地踏査は、赤外線点検では路下条件や周辺状況によって点検が不可能となる場合や撮影位置が画質や撮影作業に大きく影響するため、事前に確認することで点検作業を円滑に行うことを目的としている。

点検計画の策定は、事前に点検対象地域の気温の日較差や温度変化の傾向といった気象条件や構造物の形式等条件を把握した上で、橋梁一般図や航空写真等を用いて、鋼構造形式の部材や検査路等による物理的な死角となる範囲、点検対象となる構造物の日照条件、周辺環境の確認を行うことを原則とする。また、現地踏査では点検計画で知り得た情報から、撮影位置の適否や対象物の死角の範囲等の確認、熱環境測定装置設置箇所を選定を行うことを原則とする。

2.2.3 機材の準備

(1) 赤外線カメラ

赤外線カメラの性能は、冷却型撮像素子タイプを基本とし、最小温度分解能が 0.02°C 程度を目安とする。現在実用化されている赤外線カメラの種類で最小温度分解能を大別すると以下のとおりとなる。

- 1) 冷却型（高感度タイプ）・・・最小温度分解能が 0.02°C 程度の冷却型撮像素子
- 2) 非冷却型（汎用タイプ）・・・最小温度分解能が 0.1°C 程度の非冷却型撮像素子
- 3) 上記以外のタイプ・・・最小温度分解能に精度を求めない監視カメラタイプ

赤外線法は、赤外線画像から判断し変状箇所を特定するモニタリング手法である。図 2.2.2 に冷却型（高感度タイプ）と非冷却型（汎用タイプ）の赤外線画像の例を示す。冷却型（高感度タイプ）のほうが変状箇所の検出が容易となることが解る。また、冷却型（高感度タイプ）は点検可能な撮影時間帯の拡大や、より深い変状の検出が可能となり、点検の効率化・高度化が図られる利点を持つ。

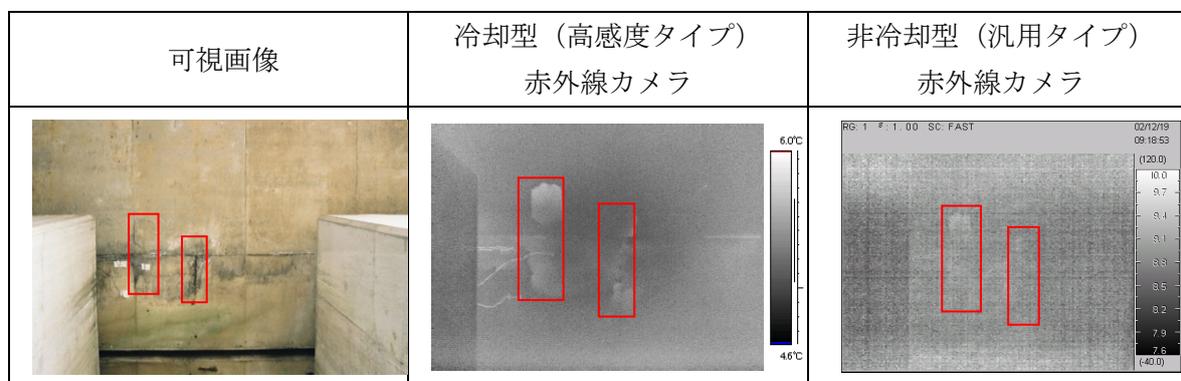


図 2.2.2 赤外線画像例（曇天，9:00）

(2) 可視画像撮影機材

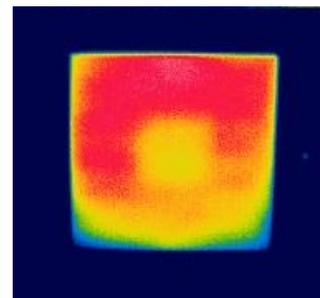
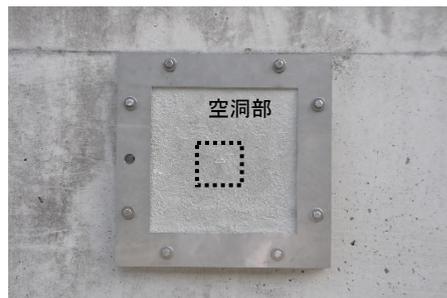
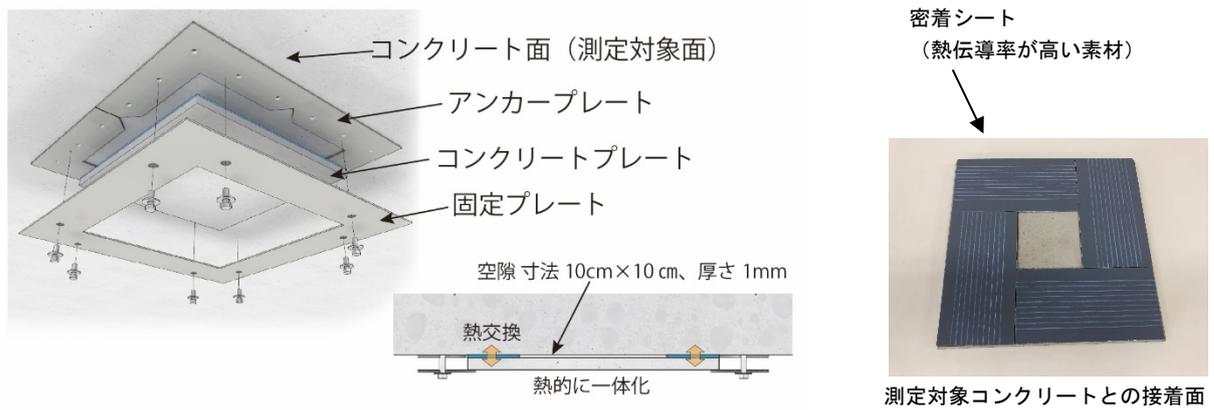
可視画像撮影機材の性能は、コンクリートの表面状態や形状を把握できる程度の解像度とし、デジタル一眼レフカメラで 1,000 万画素以上の機能を目安とする。

(3) 熱環境測定装置

熱環境測定装置は、対象構造物の熱環境を把握できる構造とする。また、熱環境測定装置の設置箇所の選定にあたっては、点検対象構造物と同じ条件（例えば、床版下面を対象とする場合、日射の影響を受けない場所）に該当する適切な場所であることを確認する。なお、熱環境測定装置は、周辺の熱環境になじませるために点検を行う 1 日前に設置しておくことが望ましい。以下に、2 タイプの熱環境測定装置を例示する。

1) 貼付型熱環境測定装置

気温の変化や部材の厚さ、構造形式等多種多様な温度変化を伴う橋梁本体に対し直接貼り付けることで、変状箇所に見立てた人為的な空洞部を再現する装置である。この装置を用いることで、複雑な熱環境の影響を受ける橋梁本体の温度変化を直接把握でき、現地で赤外線点検の適切な点検時間帯を確認することが可能となる。本装置の構造例を図 2.2.3 に示す。



可視画像 (設置状況)

熱画像

図 2.2.3 貼付型熱環境測定装置の構造

2) 据置型熱環境測定装置

気温の変化のみを受ける場合の熱環境を測定する装置である。本装置は、変状箇所に見立てた人為的に空洞部を備えたコンクリート試験体で、橋梁周辺の日陰に据置くことで、現地で点検対象物に接近することなく赤外線点検の適切な調査時間帯を確認することが可能となる。本装置の構造例を図 2.2.4 に示す。

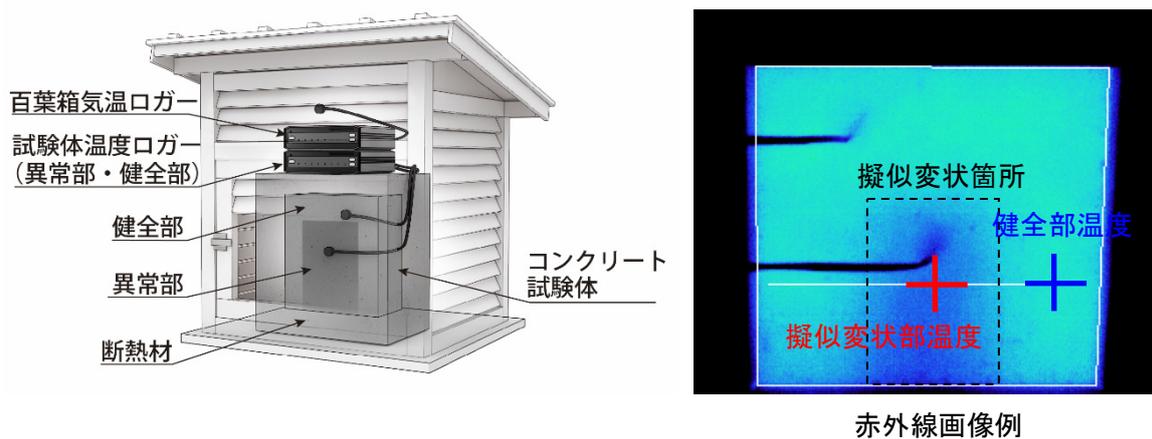


図 2.2.4 据置型熱環境測定装置の構造

2.2.4 画像の観察・撮影

(1) 点検時間帯の判断

点検開始前及び点検終了時の他、気象急変時等には、点検対象構造物の熱環境を確認することにより、適切な点検時間帯を判断することを原則とする。

これは、赤外線点検において、点検対象構造物の変状箇所温度差が発生している熱環境かどうかを把握することが重要なためである。これを怠る、もしくは判断を誤ると、変状箇所を見逃す結果となり、点検結果の信頼性が著しく損なわれることにつながるため注意が必要である。なお、構造物の熱環境を測定したデータは、参考値として記録、保存、報告することが望ましい。

熱環境の記録としては、赤外線点検を適した時間に行ったかどうかを確認するために、赤外線点検直前及び終了直後の熱環境測定装置の赤外線画像を記録することが望ましい。また、熱環境測定装置の健全部ならびに変状箇所及び気温の温度履歴も接触型の温度ロガー等により測定し、報告書に記載することが望ましい。

なお、コンクリート構造物は、構造物の位置する方角や部材、橋梁形式の違いにより、非常に複雑な日射の影響を受けることを理解した上で、点検時間帯を適切に計画、判断することが重要である。

(2) 赤外線画像の観察

赤外線カメラによる観察は、点検計画と現地踏査の結果を踏まえて定めた範囲に対して行うものとする。また、観察（撮影）時の撮影条件については、以下に示す範囲を原則とする。参考に観察時の状況を図 2.2.5 に示す。



図 2.2.5 赤外線画像の観察状況

1) 撮影距離

使用する赤外線カメラの性能及び使用するレンズの仕様を考慮した上で、対象となる変状箇所を検出できる距離を上限とすることを原則とする。

赤外線法による点検で検出できる変状箇所の面積の大きさは、主に赤外線カメラと使用するレンズの仕様である空間分解能と撮影距離から求まる最小検知寸法の大きさによって決定される。最小検知寸法は、撮影距離が長くなるほど大きくなるため、撮影距離が長くなるに従って、赤外線画像上の変状箇所は、大きなモザイク状の画像となり、温度変化部の境界が曖昧になることで最終的に

は検出不可能な状態になる。よって、点検に際して、対象となる変状箇所の大きさと最小検知寸法
 の関係を事前に整理し、使用する赤外線カメラのレンズごとに撮影距離の上限を決めておくことが
 重要である。

使用するレンズの仕様と撮影距離については、検出する変状寸法を 10cm×10cm とした場合、表
 のように設定している事例がある。

表 2.2.1 使用するレンズの仕様と撮影距離

使用レンズ		撮影距離 (m)
広角レンズ	13mm	$0 < L \leq 10$
標準レンズ	25mm	$10 < L \leq 20$
2倍望遠レンズ	50mm	$20 < L \leq 45$
4倍望遠レンズ	100mm	$45 < L \leq 95$

2) 撮影角度

点検対象に対する対象面角度の最小角度が 30°以上であることを原則とする。

図 2.2.6 のように、撮影対象物に対して 0°すなわち正面から撮影した状態から、角度をつけると、
 60°を超えるあたりから急激に放射率が低下するのが分かる。図 2.2.7 は、狭角での赤外線画像であ
 るが、これを裏付けるように、撮影角度が小さくなる上側の温度が、実際の温度より低く測定され
 ている。このことから、測定面に対する最小角度は、図 2.2.8 に示すように、30°以上を確保するこ
 とが重要である。

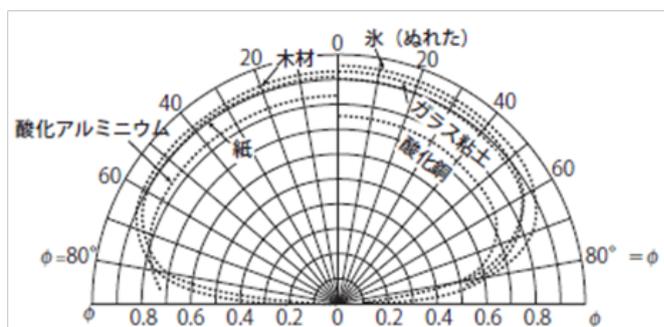


図 2.2.6 一般的材料の放射率の指向性¹⁾

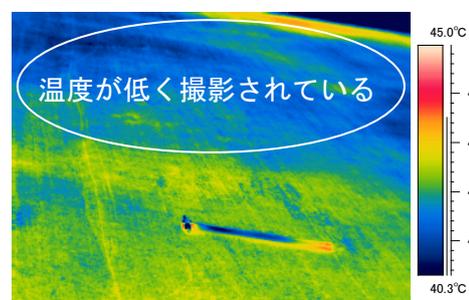


図 2.2.7 狭角の赤外線画像

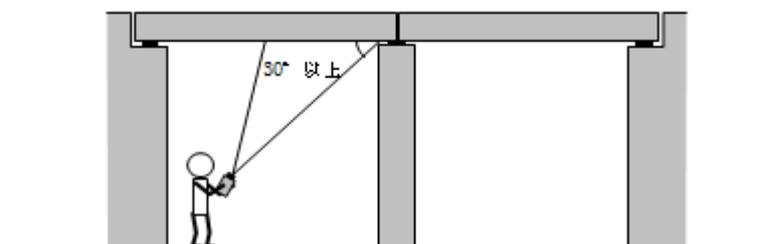


図 2.2.8 床版下面の撮影角度例

3) 温度スパン

観察時の温度スパンは、構造物表面に発生する変状箇所の温度差を確実に検出することができる温度スパンを設定することを原則とする。

赤外線点検は、変状箇所の絞込みを目的としているが、構造物表面に発生する変状箇所の温度差は非常に小さい。温度スパンを広くすると、赤外線カメラ画像のノイズが目立たなくなるため、一見、検出しやすい印象を受けるが、**図 2.2.9**のように、同じ赤外線画像であっても、温度スパンが大きくなると、微細な温度変化の箇所の差が見えづらくなる。よって、赤外線点検における観察時は、適切な温度スパンを設定することが重要である。

温度スパンの設定としては、2℃を標準としている事例がある。ただし、直射日光の影響により温度分布の幅が大きく、スパン 2℃では観察しづらい場合等は、必要最小限の範囲で、スパンを広げて観察しても良い。

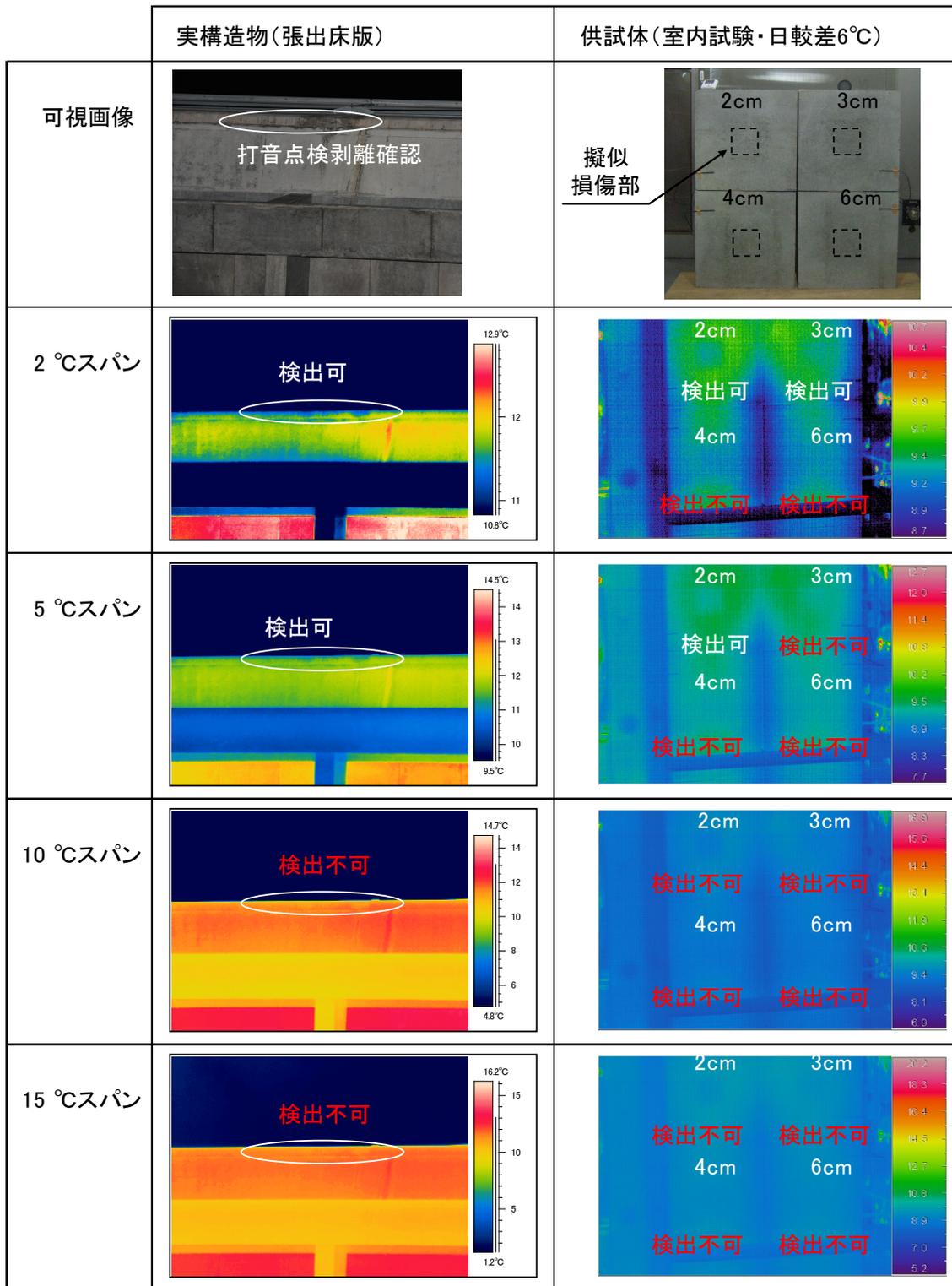


図 2.2.9 温度スパンごとの変状箇所の見え方

(3) 目視による確認

赤外線カメラによる点検では、点検対象箇所の熱反射の影響等、様々な影響を受けるため、赤外線画像には変状箇所に起因しない温度変化も検出される。これらの温度変化を点検終了後に、変状箇所による温度変化か、その他の影響によるのかを判断することは困難である。よって、赤外線画像撮影時には、点検対象周辺の環境や目視による表面状態の確認を行い、温度変化の発生原因を総合的に判断するとともに、変状箇所以外の影響ができるだけ小さくなるよう留意することを原則とす

る。なお、目視による確認はデジタルカメラや双眼鏡を利用すると良い。

(4) 赤外線画像，可視画像の撮影・記録

赤外線画像，可視画像は，将来劣化進行の評価に活用することも可能であることから，健全な箇所も含めた赤外線点検が可能な範囲全体について撮影・記録を行うことを原則とする。

変状箇所の検出は，赤外線画像を観察しながら温度変化部を検出し，その箇所の目視結果等を加味して，総合的に判断することを原則とする。また，温度変化部の検出箇所は目視により変状が確認できない場合でも，点検展開図にその位置・範囲等を記録すると良い。

2.2.5 点検結果の整理・保存

点検結果は，点検対象位置や温度変化部の発生している箇所及びその範囲，点検時の環境温度条件，使用機器等が明確となるように取りまとめることとし，点検展開図，点検結果報告書に以下の事項を記録することを原則とする。

(1) 点検箇所に関する事項

道路名，点検対象橋梁名，路下条件等

(2) 赤外線装置に関する事項

赤外線装置名称及び取扱いメーカー名

(3) 点検内容に関する事項

点検実施日時，天候（点検日及び前日），外気温の経時変化，点検時の撮影距離及び撮影角度（対象面角度）

(4) 点検結果に関する事項

変状箇所の検出位置，外観状況，その他特記事項

また，撮影した赤外線画像及び可視画像は橋梁名や支間ごとに画像ファイルとして整理した上で，後に近接目視及び打音点検を実施する際や過去の点検記録と比較する際に位置の特定が可能となるよう，変状箇所の可視画像と赤外線画像を整理・保存するとともに，各々のファイル番号と変状位置，範囲等を点検展開図に記入すると良い。

2.2.6 費用の目安

(1) 試算のモデル橋梁

概算経費は，図 2.2.10 に示す橋梁 1 径間分で試算した。

[橋種] R C連続T桁橋	[径間長] 26.8m	[幅員] 8.3m
[点検対象面積] 502.5 m ²	[路下への進入] 可能	

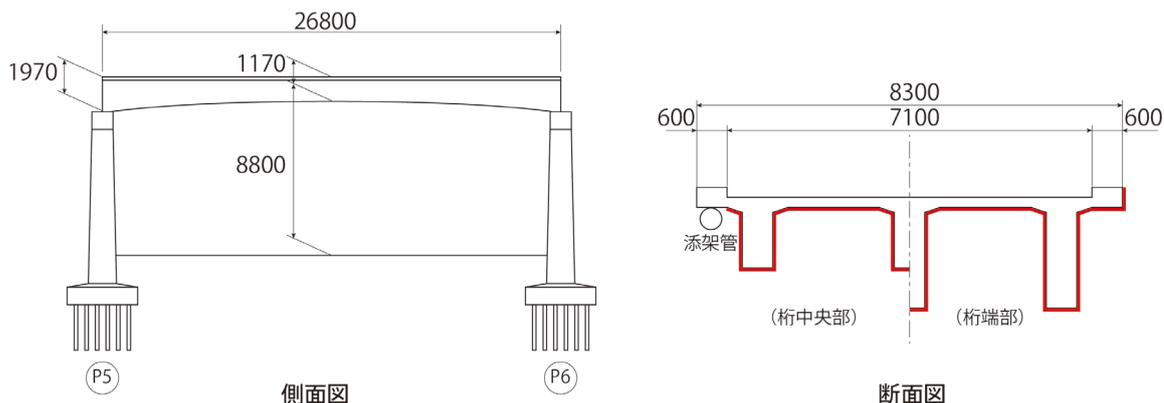


図 2.2.10 概算経費の試算のためのモデル

(2) 概算費用

本手法を用いた点検費用について、図 2.2.10 のモデルをもとに表 2.2.2 に示す概算費用（直接費）を試算した。

表 2.2.2 本手法による概算費用（直接費）

作業項目	作業内容	金額	備考
計測費用(直接人件費)	試験体設置・撤去, 可視画像撮影	27,700 円	
	赤外線調査 [夜間]	26,200 円	技師 C : 0.3 人・日 技術員 : 0.3 人・日
計測費用(直接経費)	機械器具費(赤外線カメラ)	8,100 円	機械損料
解析費用(直接人件費)	赤外線画像解析	38,500 円	
	展開図・調書作成	36,300 円	
合計		136,800 円	

2.3 結果の評価

赤外線点検結果は、主に打音点検が必要な変状箇所の推定（スクリーニング）に活用されているが、過去の点検結果と比較すること（モニタリング）で、変状箇所における劣化進行の推定や今後剥離に進展するような変状箇所の抽出、現時点での点検結果のより正確な評価が可能となる。事業者は赤外線点検の目的に応じて、点検内容（画像の撮影・記録や結果の整理・保存方法等）を検討することが重要である。

(1) 変状箇所のスクリーニング

コンクリート片の剥落による第三者被害の可能性がある箇所において、赤外線点検によって浮き・剥離等の変状箇所が検出された場合は、近接目視および打音点検を行い、異常が確認された場合は応急措置（たたき落とし）を行う必要がある。

たとえば、赤外線画像に対し、画像解析技術を用いて特異な温度差を強調させて画像処理を行い、深さ 1 cm 程度の変状を赤色、2 cm 程度の変状を黄色、3 cm 程度の変状を青色で表示し、各々の変状箇所を a.要注意箇所, b.注意箇所, c.経過観察箇所, それ以外は健全部として評価する事例がある。

この事例では、コンクリート表面から深さ約 1,2,3cm に変状を模擬した供試体を用いて、深さが既知である変状箇所の温度差を基準とし、閾値を設けることで、変状を3段階表示させる技術を用いている。また、この技術を用いた赤外線点検結果と、既設構造物の打音点検結果を比較することで、赤外線画像の評価方法を設定している。

(2) 変状箇所のモニタリング

赤外線点検結果は、前回の点検結果や応急措置（たたき落とし）の記録と比較し、変状箇所の新たな出現、変状範囲の拡大、もしくは前回点検との変化がないことについて確認することが可能である。このためには、過去の点検展開図から変状箇所を想定し、可視画像と赤外線画像を比較しながら、今回の赤外線画像の温度変化部を確認することが重要である。また、赤外線カメラの最小温度分解能や撮像素子、可視画像撮影機材（デジタルカメラ）の画素数が、過去の点検時に使用した機材と同等の性能であることも重要である。

たとえば、上記赤外線点検で評価を受けた箇所が前回の点検結果と比べて、①新たに出現した、②範囲が広がった等で損傷ランクが上がった、③前回と変わらない、の比較や、健全部と想定される箇所と異常部ピーク値との温度差、同一温度差範囲の面積の比較により評価している事例がある。図 2.3.1 に赤外線画像を比較した事例を示す。

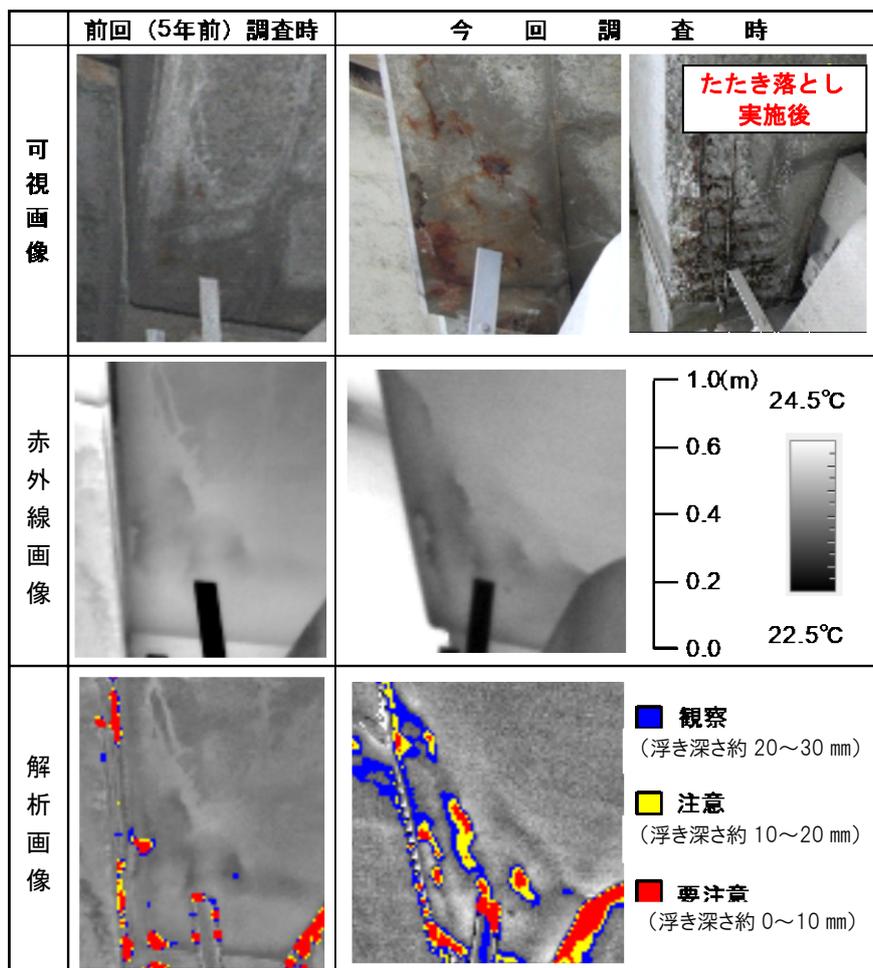


図 2.3.1 赤外線画像の比較例

2.4 保守

赤外線画像によるコンクリートの浮き・剥離モニタリングでは、新たな変状箇所の出現有無と前回変状箇所の劣化進行を評価することになる。したがって、前回の点検結果や応急措置の記録と今回の調査結果を比較するためには、以下の点に注意しなければならない。

(1) 点検時の適用条件

赤外線調査では、浮き・剥離等の異常部が検出可能な条件下で調査を行っていないければ前回結果と比較しても変状箇所の変化を議論できない。まず、「2.1.2 システムの概要 (3)要求性能 2)適用条件」に記す適用条件を満足する時間帯に調査を実施する必要がある。

(2) 撮影位置・機材等

前回の点検結果と比較するためには、赤外線画像や可視画像の撮影画角や解像度が同程度でなければならない。そこで、モニタリングする場合は、前回の点検結果や応急措置の記録から撮影位置や画角、撮影機材の性能、使用レンズ等を確認し、前回と同一条件で撮影するように心がけることが重要である。また、赤外線カメラのキャリブレーションとして、点検開始前やレンズ交換時には黒体（表面に入射するあらゆる波長を吸収し、反射も透過もしない物体）を撮影し、異常な写り込みがないか確認することも重要である。

参考文献

- 1) 甲藤好郎：伝熱概論 第19刷，養賢堂，pp. 351，1964

3章 動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング

3.1 技術の概要

3.1.1 目的

橋梁の桁や床版などのコンクリート構造物に生じたひび割れを定期点検などで発見した場合に、そのひび割れの進展の可能性の有無を確認する。車両走行時の挙動を確認したい場合などに、本モニタリングシステムを適用することでひび割れの挙動を数値化することができる。

本モニタリングシステムは、ひび割れ箇所を動画撮影し、撮影した動画像を解析してひび割れ開閉量を算出するもので、クラックゲージや ϵ ゲージを設置するのが大変で近接困難な場所に対して、マーカー等を設置しなくても遠隔・非接触でひび割れ挙動が計測できるものである。本モニタリングシステムを用いることで、計測対象とするひび割れが乾燥収縮によるものか、それとも構造上危険なひび割れかを判断する根拠となるデータを取得することができる。

3.1.2 システムの概要

(1) 原理

動画像処理によるひび割れ開閉量計測の原理について図 3.1.1 を用いて説明する。図 3.1.1 に示すように車両通過に伴うひび割れ開閉量は以下の手順で算出する。初めに、①撮影した動画像からコンクリート桁表面の自然模様の動きを追跡することで撮影面の全画素に対して画素ごとに面内方向変位を時系列データとして算出する。しかしながら、①で求めた面内方向変位には桁のたわみにより発生する変位成分（＝撮影面全体の動きに起因する変位成分）も含んでいる。そこで、②撮影面全体の 3 次元方向変位を時系列データとして算出し、③①で求めた面内方向変位から②で求めた変位成分を除去してひび割れ開閉量（＝面内歪み）の時系列データを算出する。

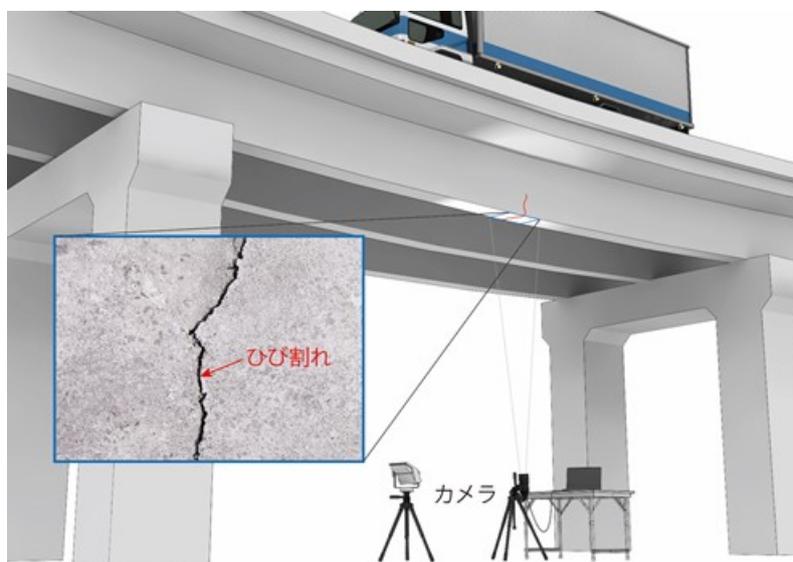


図 3.1.1 計測原理概要

(2) システム構成

本モニタリングシステムは、図 3.1.2 に示すように、カメラ、レンズ、三脚（カメラ固定用）、制御用 PC（専用アプリケーションインストール済み）、照明で構成される。

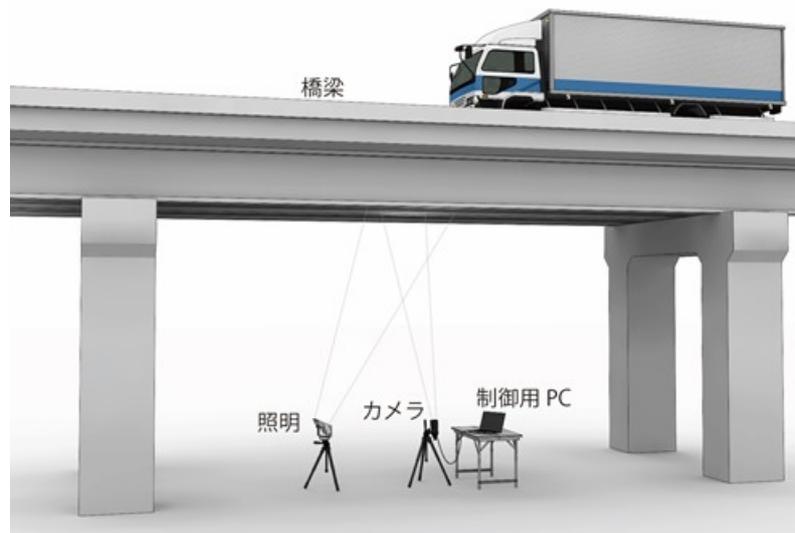


図 3.1.2 本モニタリングシステム

3.1.3 計測期間

モニタリングの期間や計測間隔は対象となる桁の劣化状況を考慮して、道路管理事業者が適切に決定するものとする。1回の撮影時間は、解析に必要な時間として、対象箇所上を車両が通過する前後 5 秒以上とする。また、ひび割れ挙動が顕在化しやすい大型車両通行時に撮影することを推奨する。

3.2 モニタリングの方法

ここでは、桁下の地上に本モニタリングシステムを設置し、動画像によりひび割れ開閉量を計測するモニタリング手法について説明する。

3.2.1 モニタリングの手順

動画像によるモニタリングの基本的な手順は、図 3.2.1 の通りである。また、撮影した動画像データから算出したひび割れ開閉量の時系列データ例を図 3.2.2 に示す。

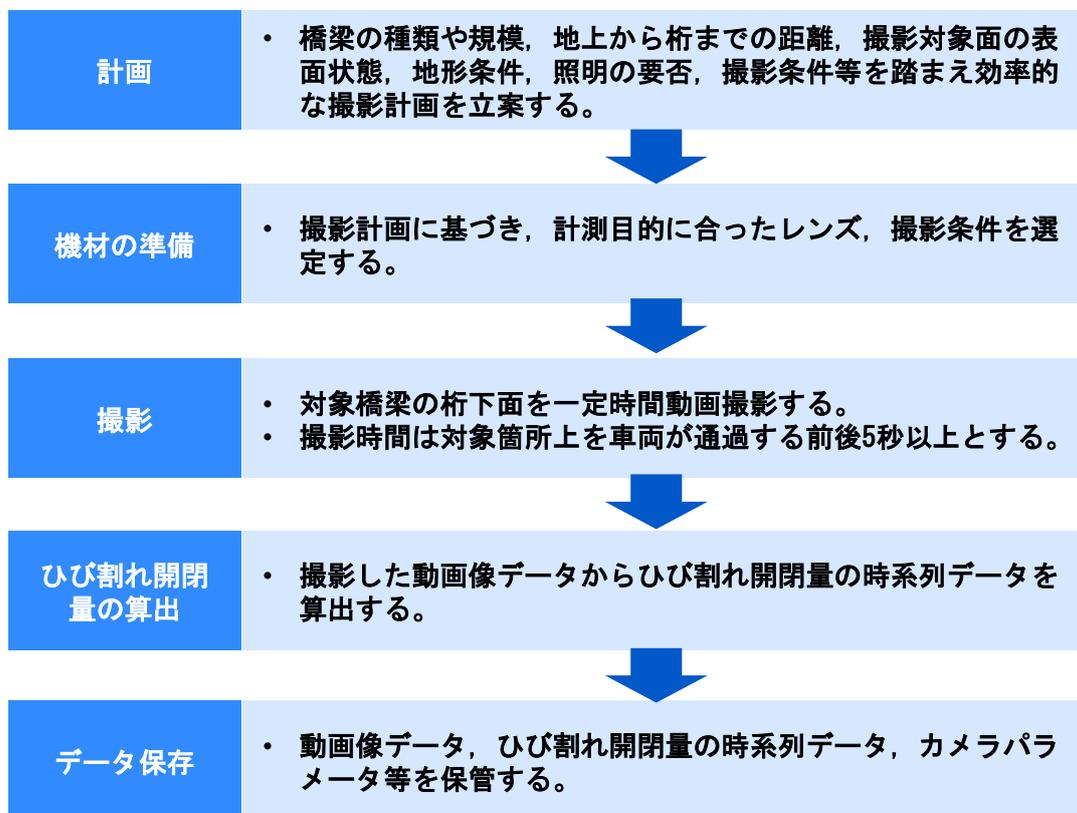


図 3.2.1 動画像によるひび割れ開閉量のモニタリングの手順



図 3.2.2 ひび割れ開閉量の時系列データ例

3.2.2 計画

(1) 撮影距離

計測対象となる桁からカメラ・レンズまでの距離を撮影距離という。本モニタリングシステムは、撮影距離 10m 程度で、面内方向 $10\mu\text{m}$ の変位が計測可能となるように想定して設計している。撮影距離は、撮影前にレーザ距離計などで予め計測する。

(2) 照度

照度が不足する場合は照明装置を使う。地面から桁までの距離、撮影対象の周辺環境（日照の影響の有無など）、撮影時間等を考慮して、撮影範囲内で照度ムラが発生しないように、照明装置の要否、照明装置の種類、台数等を計画する。

(3) 撮影条件

コンクリート桁表面の微小な動きを計測するため、設置場所、天候等に留意する必要がある。設置場所については、計測対象となる桁下面に対して正対方向となる位置で、かつ計測時にカメラが揺れないような強固な箇所を選定する。また、雨、風、陽炎、短時間での日照変動の影響を極力受けない条件で撮影を行うよう計画する。

3.2.3 機材の準備

(1) カメラ

本モニタリングシステムは、対象物表面の微小な動きを計測するものであるため、グローバルシャッター型のカメラを使用する。また、ピクセル情報を最大限活用するため、モノクロカメラを使用する。解像度、フレームレートを考慮し、面内方向 $10\mu\text{m}$ の変位（撮影距離 10m）を計測するためには、フル HD・200 万画素以上のものを推奨する。参考までに現場実証で使用したカメラのスペックを表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 使用カメラのスペック

項目	仕様	
	カメラ A	カメラ B
インターフェース	USB3.0	USB3.1
グローバルシャッター	CMOS	CMOS
ピクセルサイズ	$5.5 \times 5.5 \mu\text{m}$	$3.45 \times 3.45 \mu\text{m}$
解像度	2048×2048	4112×3008
フレームレート	90fps（最大）	31fps（最大）

一方、計測用途ではない民生用のカラーカメラは、色変換、ガンマ変換、ベイヤー配列デモザイキング（+物によっては絵作り処理）等が入るため画像解析の精度を追求するには不向きであり、利用にあたっては個別に検証が必要である。

(2) レンズ

レンズは基本的には単焦点レンズを推奨する。撮影時の焦点距離がわかればズームレンズを使用しても構わないが、正確な焦点距離が記録できない場合は使用を推奨しない。焦点距離に関しては、既知の撮影距離にある既知の大きさ・長さの物体を撮影することで、撮影画像から算出してもよい。

使用するカメラの解像度/ピクセルサイズおよびレンズ焦点距離と撮影距離（厳密にはレンズ主点から桁までの距離）に応じて、カメラ・レンズを選定する。例えば、カメラ B を用いて以下の

条件で撮影した場合、撮影範囲は約 788×576mm、撮像分解能は約 191 μm 、カメラ A を用いた場合、撮影範囲は約 626×626mm、撮像分解能は約 305 μm となる。

- ・ レンズ焦点距離 : 180mm
- ・ 撮影距離 : 10m

尚、撮像分解能は、計測対象上における 1 ピクセルのサイズである。この程度の撮像分解能があれば撮影距離 10m 程度で面内方向 10 μm の変位が計測可能となる。また、撮影距離が 50m 程度と長くなる場合は、上で示したレンズより焦点距離の長いレンズを選定することで面内方向 50 μm の変位計測が可能となる。ただし、撮影距離が長くなることで空気の揺らぎなどの影響が大きくなるため、精度が低下する可能性がある。

また、現場実証では表 3.2.1 のカメラに加えて、以下のレンズおよびレンズアダプタを使用した。

- ・ レンズ : 焦点距離(180mm)、最大口径比(1:2.8)、レンズ構成(6群8枚)、絞り方式(自動絞り)、最大絞り(f/2.8)、最小絞り(f/22)
- ・ レンズアダプタ : C マウントアダプター

(3) 制御用 PC

専用のアプリケーション (※) によるひび割れ開閉量算出にあたって、基準画像に対して各フレームごとに対象面の全画素の動き (面内変位) を計測する必要があり、処理負荷が非常に大きい。そのため解析時間は PC の性能に大きく依存するため、高性能 GPU を搭載する機種を推奨する。

※専用のアプリケーションとは、撮影した動画像を処理してひび割れ挙動を解析するソフトウェアです。本章での紹介例の製品に関しまして、現時点で提供可能な試用版については巻末の問い合わせ一覧にある問い合わせ先までご連絡ください。

3.2.4 撮影

計測対象箇所（橋梁の桁下面）を車両通過に合わせて一定時間動画撮影する。撮影時間は対象箇所上を車両が通過する前後5秒以上とする。撮影に必要な人数は橋梁下で制御用PCの操作を行う人と橋梁上を通過する車両が見渡せる場所で撮影開始の合図をかける人の計2名は最低限必要である。ただし、図3.2.3に示すように、車両検知用のセンサ（例：超小型レーザ距離センサ）を対象箇所の手前の道路脇等に設置して車両通過によるトリガ計測も可能である。これにより撮影・計測に必要な人数を削減できる。ただし、機器の設置・撤去作業も含め安全面を考慮すると2名での撮影・計測作業を推奨する。

また、撮影にあたって計測対象箇所の照度に注意する必要がある。レンズの絞りを調節しても画像が暗い場合は、照明装置を使用する。照明装置は、撮影範囲を照度ムラがなく均等に照らせる機器を選定するのが望ましい。また、照明装置の種類は、バッテリーで長時間使用でき、消費電力の少ないLED照明が望ましい。さらに、必要に応じて複数台使用することで撮影範囲の照度ムラが無くなるよう調整しても良い。また、計測対象箇所が日照変動の影響を受けやすい場合も照明装置を使用することで、ノイズの少ない安定した動画像を撮影することができる。さらに、照明装置のフリッカーもノイズの原因となる場合があるため、照明装置の使用にあたっては留意する。

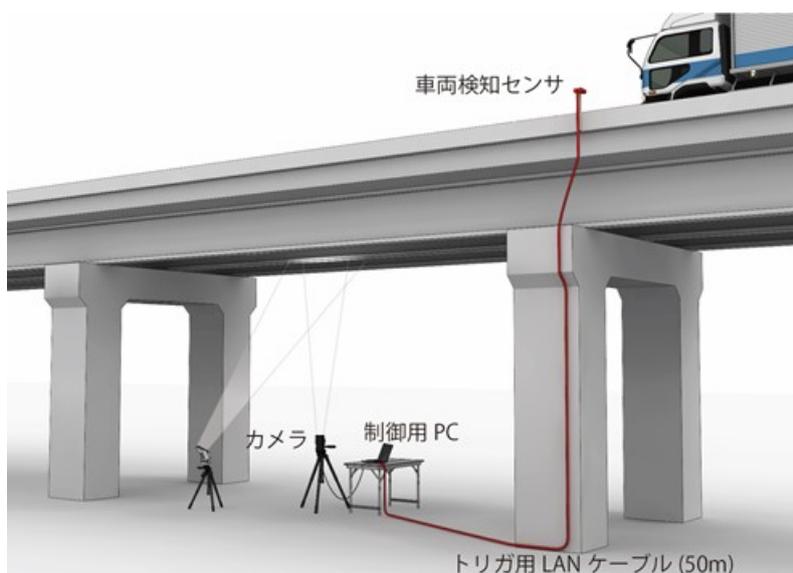


図 3.2.3 車両検知センサを利用した撮影方法

3.2.5 ひび割れ開閉量の算出

撮影した動画像を使用して、以下の手順で車両通過に伴うひび割れ開閉量を算出する。図 3.2.4 に算出手順を示す。

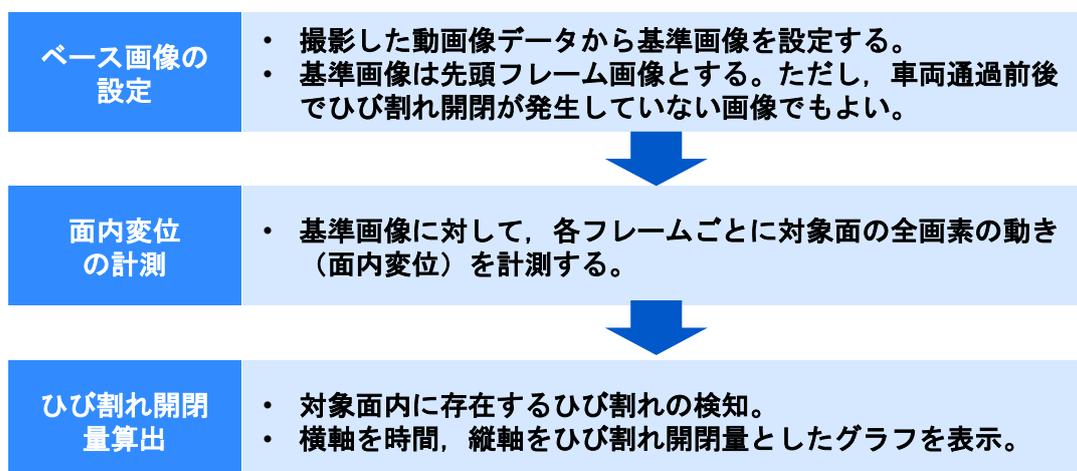


図 3.2.4 ひび割れ開閉量算出手順

3.2.6 データ保存

(1) 保管するデータ

保管するデータは以下の通り。

- 1) 動画像データ
 - ・ (フレームレート×撮影時間) 枚数分の画像
- 2) 撮影パラメータ
 - ・ 撮影距離
 - ・ フレームレート, 露光時間, F 値, レンズ焦点距離
- 3) ひび割れ開閉量算出結果

(2) データの保管単位

1 回の計測ごとに PC 内の指定のフォルダ内に自動でフォルダが作成され、作成されたフォルダ内に動画像データが (フレームレート×撮影時間) 枚数分格納される。

- ・ フォルダ名：西暦年月日時分秒 (時刻は撮影開始時刻)
- ・ ファイル名：西暦年月日時分秒_フレーム番号

(3) データのフォーマットと容量

データのフォーマットと容量を表 3.2.2 に示す。画像データは容量が大きいので、道路管理事業者の判断で、ひび割れ開閉量算出後は基準画像だけ残して、それ以外は消去しても良い。

表 3.2.2 データのフォーマットと容量

名称	種類	フォーマット	容量 (参考)
①動画データ	画像データ	BMP	3.6GB (注1)
②撮影パラメータ	テキストデータ	TXT	1KB
③ひび割れ開閉量算出結果	テキストデータ	TXT (注2)	640KB

(注1) フレームレートを 30fps, 撮影時間を 10 秒とした場合の 1 回の計測データ容量

(注2) ファイルフォーマットはテキストタブ区切り形式

3.2.7 費用の目安

本モニタリングシステムにおける費用の目安を表 3.2.3 に示す。費用の試算にあたって、これまで現場実証を行った橋梁をモデルケースとし、1 橋あたり、計測作業は 1 日として概算費用を算出した。算出条件は、径間長約 40m の橋梁で計測箇所は 5 箇所、動画データ (=解析データ) 数 25 とし、橋梁下にカメラが設置可能であるとした。また、費用は橋梁の規模、計測環境 (機器の設置容易性など)、計測箇所数および解析するデータ数により変動する。

表 3.2.3 費用の目安

作業内容	数量	費用	備考
①計測作業	1 式	450,000 円	機器レンタル費は含まず
②解析作業	1 式	500,000 円	
合計		950,000 円	

注) ただし、表中の費用には経費は含まれていない。

3.3 結果の評価

ひび割れ挙動を数値化した結果に基づいて、道路管理事業者は適切な措置を取る。

例えば、道路管理事業者が定期点検で近接目視により詳細調査が必要と判断したひび割れや橋梁の構造上重大な影響を及ぼす可能性があるとして判断したひび割れについて、重量既知の車両が走行した時のひび割れ開閉量を計測し、補修が必要かどうかの診断の補助とする。また、即補修と診断されなかったひび割れについては、定期的にひび割れ開閉量を計測し、ひび割れ開閉量の推移をモニタリングする。予め道路管理事業者が設定した閾値がある場合は、計測値が閾値を超えたときに通行制限や通行止めの措置を取る。一方、閾値が明確でない場合は、施工時または補修・補強後などの健全時に初期値として計測しておき、計測値の近似勾配が明らかに変化したときに詳細点検や通行止め等の措置を取る。

3.4 保守

動画像によるコンクリート桁のひび割れのモニタリングでは、微小な動きを計測するため、動画像データの画質が重要となる。動画像データの画質はひび割れ開閉量の計測性能に影響を及ぼす。したがって、モニタリングで使用する制御用PC、カメラ、レンズ、等については適切な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。

(1) 制御用PC

- ・撮影・計測前にバッテリーを充電し、機器が正常に動作するかを確認する。
- ・専用アプリケーションを立ち上げ、正常に動作するかを確認する。

(2) カメラ・レンズ

- ・撮影・計測前にカメラが正常に動作するか確認する。
- ・PC画面上に画像が映っていて専用アプリケーションでカメラ制御できることを確認する。
- ・レンズについては、傷や汚れ・カビがないかを確認する。
- ・撮影・計測後はカメラとレンズの清掃を行い、傷・汚れが付かないように収納する。

尚、モニタリング期間中にカメラが更新され、後継機種のスペックが変更された場合は、表 3.2.1 のスペックと同等かそれ以上の機種を用いることで継続してデータ比較が可能となる。

4章 加速度センサによる健全性の診断

4.1 技術の概要

4.1.1 目的

加速度センサを用いて振動をモニタリングした場合、計測されたデータの演算処理により複数の物理量を観測する事ができる。

少なくとも1つの軸、即ち単軸の加速度を計測する加速度センサを用いれば、計測データの直交変換処理により固有振動が得られ、剛性の低下を間接的に知ることができる。また振動が減衰する時間に着目すれば、剛性低下に起因する振動減衰時間の長期化を定量的に知ることができる。これら固有振動と振動の減衰のうち、固有振動は構造劣化の比較的少ない段階、振動減衰時間は構造劣化の進行した段階での、日常点検では観測できない橋梁の剛性低下を知ることができ、目視では観測できない内部の健全性の把握手段として有効である。

2軸以上を計測できる加速度センサを用いれば、傾きの計測も可能となる。加速度センサを主桁の両端部に設置すれば、主桁のたわみ角（残留たわみ角）を観測できる。たわみ角は主桁の疲労による剛性低下を知ることができるため、定性的、定量的データに基づき健全度の低い橋梁の供用状態を把握する常時モニタリングとして活用できる。

更には、複数の3軸の加速度センサを用いる事により、振動モードも加えて観測が可能となる。振動モードは、主桁の卓越した振動状態を可視化するもので、視覚的な損傷状態・箇所の確認が可能となる。

上記の通り、加速度センサの測定軸数や個数を増やせば、観測できる物理量が増加し、様々な観点から健全性評価を行う事ができる。加速度センサは、比較的健全な橋梁については、目視では観測できない内部の健全性の把握や健全度評価のための定性的、定量的データの取得、健全度の低い橋梁については供用状態を把握する常時モニタリング手段として、更には橋梁の補強対策後の、定量的な補強効果確認の目的でも用いる事ができ、幅広い活用が可能である。

近年のMEMS技術の発展により加速度センサは著しい進歩を遂げ、高性能・高安定・長寿命な加速度センサを採用する事で、長期にわたる常時計測が可能となった。加速度センサを都度設置しながらの定期計測から、長期の常時モニタリングまで、用途に応じた活用ができる。

なお、4編4章に示す通り、加速度から主桁のたわみを導出することも可能であり、加速度センサのみを用いるだけでも様々な物理量を算出して多面的な分析を実施できる。

4.1.2 システムの概要

(1) システム構成

1) オフライン型システム

オフライン型システムは、加速度センサ、データ収集装置、アプリケーションで構成されている。その構成例を図4.1.1に示す。本システムは、現地で収集した加速度データを記録メディアに記憶、事務所などへ持ち帰り分析を行い評価するシステムである。計測に必要な現地機器は計測時のみ設置し、複数の現場で同一機器を使い回せるので経済的である。本システムは常時計測を行わないため、即時性を必要としない比較的健全性の高い小規模な橋梁に対するモニタリングとして有効であり、特に日常点検の見逃しを低減するスクリーニング用途での活用に適している。

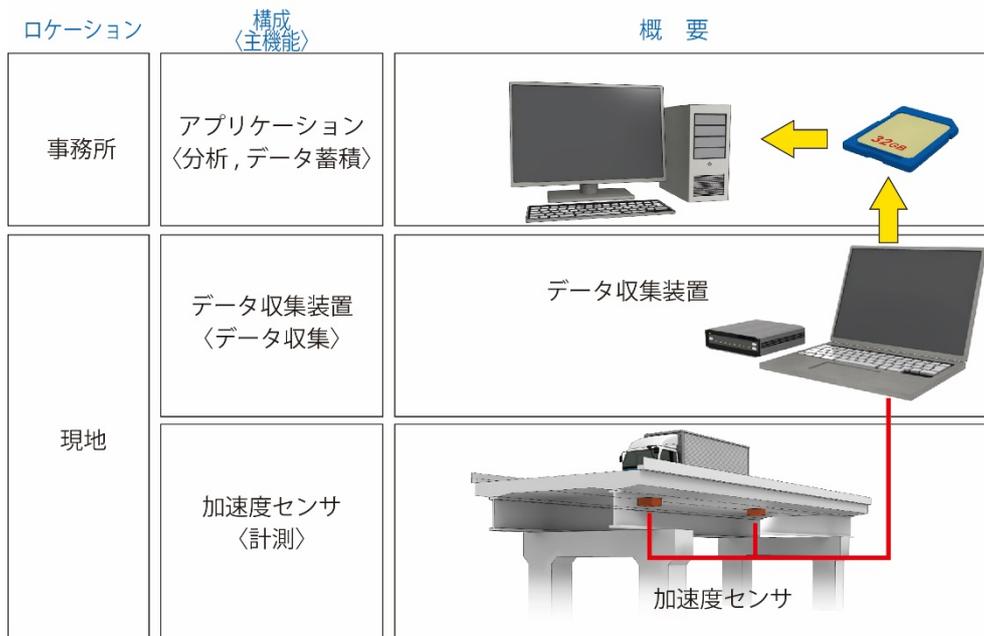


図 4.1.1 オフライン型システム

2) 遠隔計測型システム

遠隔計測型システムは、加速度センサ、データ収集装置、広域ネットワーク、アプリケーションで構成されている。その構成例を図 4.1.2 に示す。本システムは、事務所にいながらデータ収集と分析・評価が可能なシステムとなっている。遠隔計測型システムは、常時計測・監視が原則であり、現場の状況を即座に診断し、判断を下さなければならない状況に適している。本システムは、劣化・損傷が進んだ健全性の低い橋梁や、損傷が発見されても即座に通行止めなどの処置ができない重交通路線の橋梁のモニタリングに有効である。

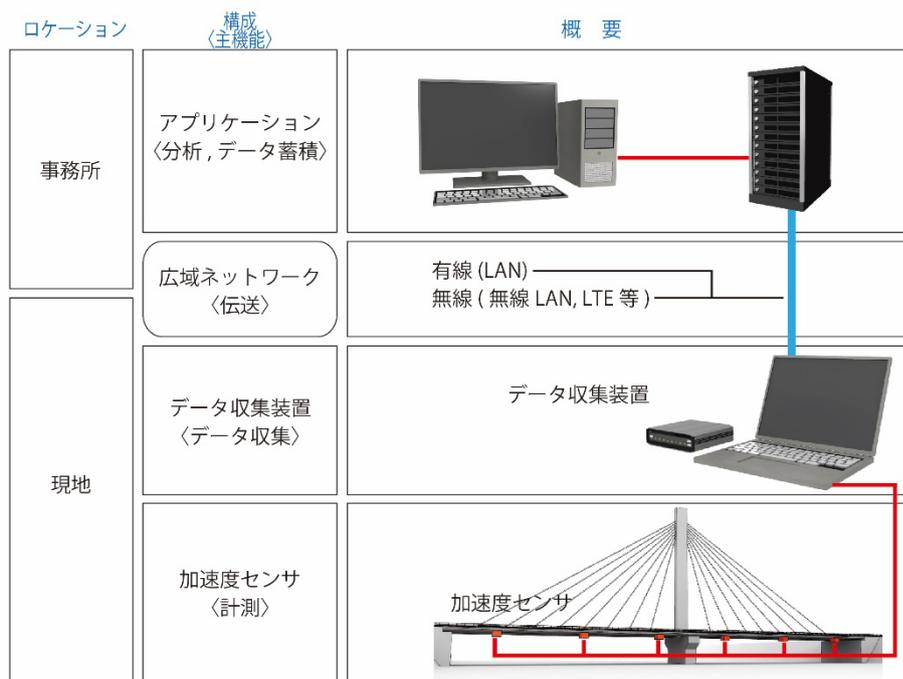


図 4.1.2 遠隔計測型システム

(2) 構成機器

1) 加速度センサ

加速度センサは、橋梁に印加される加速度を計測する。図 4.1.3 に加速度センサの例を示す。加速度センサは長期の測定および高精度な測定を行うために、外部給電および有線伝送路を確保することが望ましい。また、たわみ角を計測するためには、直流加速度を測定可能な 3 軸加速度センサを用意する必要がある。表 4.1.1 に、3 軸加速度センサの代表特性例、および性能項目のポイントを示す。

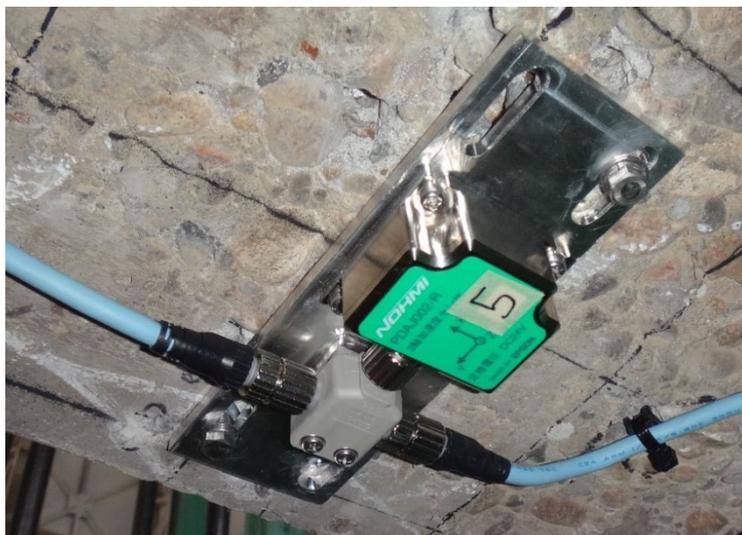


図 4.1.3 3 軸加速度センサ

表 4.1.1 3 軸加速度センサの代表特性例

性能項目	仕様	性能項目のポイント
測定軸数	3 軸	軸数により、測定できる物理量が変化
軸アライメント誤差	-55 [dB]	傾きの計測精度に影響（小さい程精度が高い）
加速度測定範囲	-5 ~ 5 [G]	橋梁の振動の大きさに応じて選択
加速度分解能	62.5×10^{-9} [G]	高剛性の橋梁の測定には高分解能品を選択
直線性誤差	0.03 [%FS]	全計測値の測定精度に影響。1%FS 以下を推奨
測定周波数範囲	DC ~ 20 [Hz] (-10dB)	橋梁の固有振動数に合わせて選択 たわみ角測定時は DC（重力加速度）を高精度測定可能なものを選択
サンプリング周波数	100 Hz	橋梁の固有振動数に合わせて選択、測定周波数の 2 ~ 4 倍以上が目安
保護等級	IP67	風雨に曝される場合、防水、防塵構造が必要

2) データ収集装置

データ収集装置の主機能は、データの収集、データの保存、加速度センサの状態監視及び動作制御である。また遠隔計測型システムの場合、広域ネットワークを介したアプリケーション側へのデータ送信機能も有している。図 4.1.4 にデータ収集装置の例を示す。



図 4.1.4 データ収集装置

3) 広域ネットワーク

広域ネットワークは、データ収集装置とアプリケーションとの通信手段である。広域ネットワークは、橋梁の構造や周囲の通信環境を鑑みて、無線方式か有線方式のどちらかを選択する。無線方式は、通信範囲や回線容量を考慮して、現状では 3G または LTE 回線の利用を推奨する。有線方式では、通信仕様を踏まえ最適な通信インターフェースを選定する。

4) アプリケーション

アプリケーションの主機能は、データの蓄積や分析、評価の表示や閲覧である。また遠隔計測型システムの場合、加速度センサやデータ収集装置の状態監視や動作制御の機能も有している。計測した加速度データや分析データは、アプリケーションが実装される PC またはアプリケーションがアクセス可能なサーバへ蓄積する。アプリケーションは計測した加速度データや分析データなどのデータ群を管理する機能を有している。またアプリケーションは、加速度データから橋梁の固有振動及びその減衰、振動モード、たわみ角を算出して可視化させるデータ分析機能を有している。

4.1.3 計測の期間

日常点検時のスクリーニング用途として使用するならば、緊急対応の必要はなく、オフライン型システムを用いた定期計測を日常点検の工程に合わせて行うのが費用面で効果的である。1 回の計測時間は、十分な交通振動を得るため半日～1 日程度の計測をする、或いは、できるだけ重い車両を意図的に数回～10 回程度走行させて測定するのが望ましい。

また、健全度の低い橋梁に対して供用状態を維持するためのモニタリング用途には、遠隔計測型システムを用いた常時計測を行う。常時計測では、計測機器の設置以後、連続して計測を行うのが望ましいが、データ容量に制約がある場合は、例えば 1 時間毎に 15 分間の計測を行うなど、定期間隔で所定時間のデータを蓄積してもよい。

4.2 モニタリングの方法

4.2.1 モニタリングの手順

加速度センサを用いた振動のモニタリングの基本的な手順は、図 4.2.1 のとおりである。

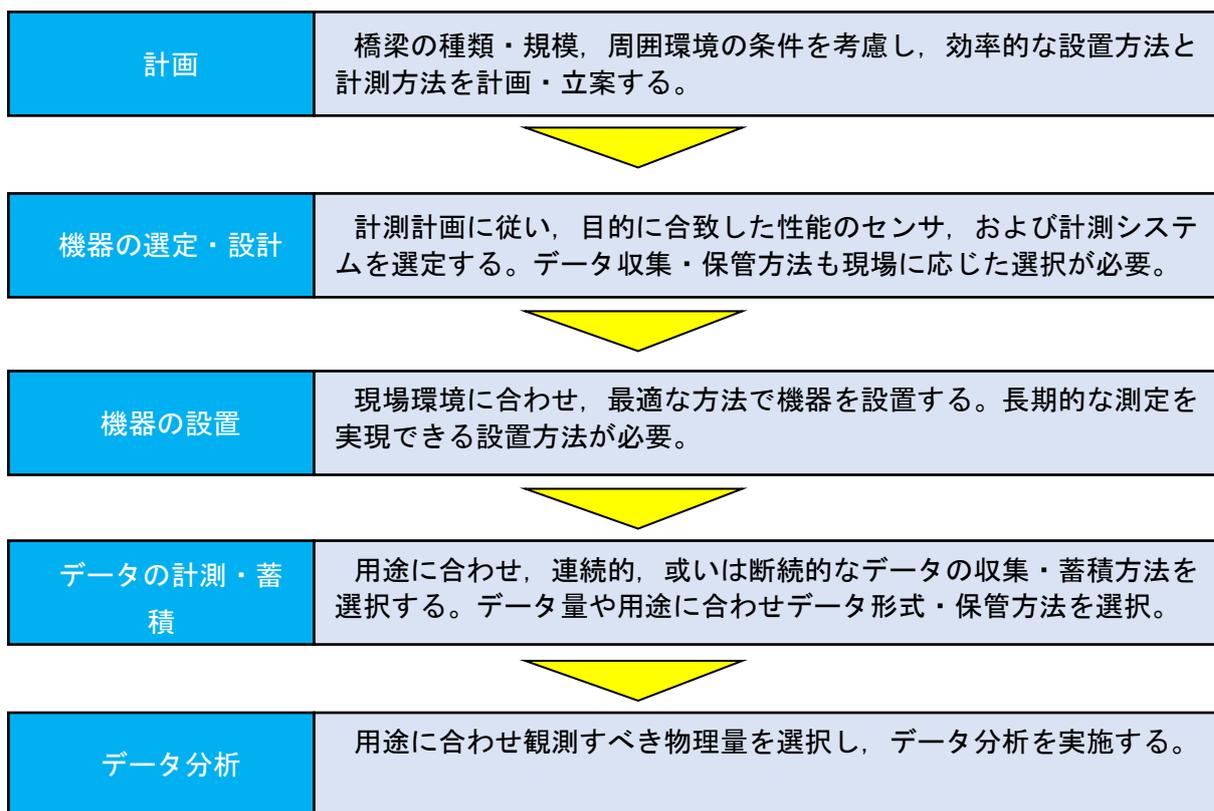


図 4.2.1 加速度センサを用いた振動のモニタリング手順

4.2.2 計画

モニタリングシステムを導入する前に、対象橋梁の種類や規模および構造，周辺の地形条件や環境条件を調査し，目的に則した効率的な計画を立案する。調査項目表のイメージを表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 調査項目表のイメージ

調査項目	結果
加速度センサの設置可否	
データ収集装置の設置可否	
広域ネットワークの確認	
周囲環境の外乱要因の調査	

4.2.3 機器の選定・設計

(1) 加速度センサの選定

加速度センサによる振動モニタリングでは，計測した加速度を各種演算することにより複数の物理量を算出できる。このため，算出対象となる物理量により加速度センサの要求性能が異なる。以下に固有振動，振動の減衰，振動モード，およびたわみ角の計測時に必要な性能を示す。

1) 固有振動，振動の減衰および振動モード計測時の加速度センサ選定

橋梁の固有振動数は支間長に概ね依存するため，加速度センサの周波数特性およびサンプリング

周波数は、対象の橋梁に合わせて選択する必要がある¹⁾。表 4.2.2 に、橋梁の支間長に対する 1 次の固有振動数の目安、および加速度センサの特性選択例を示す。表中、周波数特性例の括弧内の表記は、後述のたわみ角の測定に必要な条件を付加した場合である。

加速度センサの周波数特性は、1 次の固有振動数のみを計測する場合、表 4.2.2 の周波数範囲に感度を持つ加速度センサを選定する。2 次、3 次など、より高次の固有振動数も計測する場合、表 4.2.2 の周波数範囲の 5~10 倍以上の周波数に感度を有する加速度センサを選定する。サンプリング周波数は、測定する最大周波数の 2~4 倍以上とする。加速度の最小分解能は、測定対象の橋梁で測定すべき最小の振動加速度に対して 10 倍以上とする。

また振動モードも併せて計測する場合、全ての加速度センサが時刻同期してサンプリングできなければならない。

表 4.2.2 橋梁の支間長と固有振動数の目安

支間長 [m]	1 次固有振動数 [Hz]	加速度センサの周波数特性 およびサンプリング周波数の選択例 [Hz]
10	8~20	周波数特性:1 (DC) ~30Hz, サンプリング周波数:100Hz
20	2~15	周波数特性:0.2 (DC) ~20Hz, サンプリング周波数:100Hz
50	1~8	周波数特性:0.1 (DC) ~15Hz, サンプリング周波数:100Hz
100	0.5~5	周波数特性:0.05 (DC) ~10Hz, サンプリング周波数:50Hz
200	0.3~2	周波数特性:0.02 (DC) ~10Hz, サンプリング周波数:50Hz
500	0.2~1	周波数特性:0.02 (DC) ~10Hz, サンプリング周波数:20Hz

2) たわみ角計測時の加速度センサ選定

たわみ角の計測には、直交する 2 軸にかかる重力加速度を高精度に計測できる加速度センサを選定する必要がある。重力加速度は直流加速度であるため、加速度の直流 (DC) 成分を計測可能な 2 軸以上の加速度センサを選定する。表 4.2.2 の周波数特性例の括弧内表記の通り、最低測定周波数を DC まで計測可能とした機器選定が必要である。

たわみ角の最小分解能は、計測すべき傾斜量に対して誤差を考慮して決定する。計測誤差を 10% 以内とするならば、計測すべき傾斜量に対し 1/10 以上の分解能を必要とする。例えば、コンクリート桁橋のたわみ角の目安として径間の 1/100 を測りたい場合、たわみ角の最小分解能は 1/1000 以下となる。このたわみ角 1/1000 を計測するには、 $1/1000[G] = 1[mG]$ 以下の最小分解能を有する加速度センサを選定する。また加速度センサの温度特性や長期安定性も計測誤差に影響を与えるため、温度依存性が小さく、長期安定性の高いセンサを選択する。

(2) データ収集装置の選定

1) オフライン型システム

データ収集装置の記憶容量は、加速度センサのサンプリング周波数で計測期間内のデータを記録可能な容量を有する機器を選定する。

2) 遠隔計測型システム

データ収集装置の記憶容量は、広域ネットワークの遮断などを考慮して加速度センサのサンプリング周波数で少なくとも 7 日以上計測データを保持可能な容量を有する機器を選定する。アプリケーション側と通信するために、通信範囲や回線容量を考慮した無線通信または有線通信などの広

域ネットワークを利用可能な機器を選定する。

4.2.4 機器の設置

(1) 加速度センサの設置

加速度センサの設置は、コンクリート桁と加速度センサを長期にわたって強固に締結させるため、アンカーによる設置を推奨する。アンカーの敷設によりコンクリートの劣化の進行が懸念される場合、長寿命かつ高強度なエポキシ系接着剤を用いた数年程度の計測も可能である。

オフライン型システムによる定期計測の場合、計測時に同位置・同姿勢で加速度センサを設置する必要があるため、予め取付用ベースプレートをアクセスのしやすい位置に設置しておき、計測時に加速度センサをベースプレートに取り付けて計測を行う。

加速度センサに接続するケーブルは、ケーブルの振動が加速度センサへ伝達される影響を防止するため、加速度センサ近傍で固定する必要がある。また、長期にわたる計測を行う場合、ケーブルは保護管などを用いて配管・配線を行う。

また加速度センサの設置位置は、データ分析を行う対象の物理量によって異なる。以下に固有振動、減衰振動、振動モードおよびたわみ角の計測時の設置位置を示す。

1) 固有振動、および減衰振動計測時の加速度センサ設置位置

1 次の固有振動および減衰振動を計測する場合、強い振動を期待できない桁の両端付近以外ならば、どの位置に加速度センサを設置しても計測は可能であるが、最も振動振幅が大きくなる桁の径間中央、或いは中央付近に加速度センサを設置するのが好適である。より高次の固有振動も測定する場合、桁の径間中央付近の他に、桁の四分位点周辺など、高次の固有振動が計測できる位置に加速度センサを設置する。設置する加速度センサの向きは、計測する3軸方向を、橋軸方向、橋軸直交方向、鉛直方向に合わせるのが最適であるが、少なくとも1軸は鉛直方向に合わせた設置とする。

2) 振動モード計測時の加速度センサの設置位置

加速度センサは、橋軸方向に一直線上に桁の径間中央、桁端部および径間中央部一端部間に等間隔で設置する。設置する加速度センサの向きは、計測する3軸方向を、橋軸方向、橋軸直交方向、鉛直方向に合わせるのが最適であるが、少なくとも1軸は鉛直方向に合わせ、また全てのセンサの向きを合わせた設置とする。

3) たわみ角計測時の加速度センサの設置位置

桁のたわみ角を正確に計測するには、桁の両端付近に加速度センサを設置しなければならない。ただし橋台の直近に設置した場合、桁が橋台へ固着され、たわみ角が観測されない場合がある。このような場合を考慮し、橋台から若干離隔させて設置する必要がある。

設置する加速度センサの向きは、計測する3軸方向を、橋軸方向、橋軸直交方向、鉛直方向に合わせるのが最適である。

(2) データ収集装置の設置

データ収集装置の設置は、メンテナンスなどの作業性を考慮し、アクセスがしやすく、広域ネットワークを容易に確保できる、橋梁またはその周辺に設置する。

またデータ収集装置は、常時安定した電源を確保することが重要である。商用電源以外の太陽光パネルなどを利用する場合には、十分に余裕を見込んだ設備を検討する。また長期にわたる計測を行う場合、落雷などによる機器損傷の懸念を考慮して、機器や電源設備の耐雷対策を検討する。

4.2.5 データの計測・蓄積

加速度センサは、計測されたデータに各種のデータ分析を施す事で様々な物理量を算出できるが、これら物理量の特性によってデータ計測時の条件は異なる。以下に固有振動、減衰振動、振動モードおよびたわみ角の計測時の条件を示す。なお、以下の条件に共通する条件として、工作機械の振動などの過大な振動が周囲にある状態での計測は避けること。

(1) 固有振動測定時の計測条件

1 日以上の交通流による常時振動を連続的に計測することが望ましい。しかしながら、十分な交通流が見込めない橋梁では、意図的に車両を数回～10 回程度走行させ通過後の振動を計測する。ここで、走行させる車両は法定速度程度で走行し、重量が重いほうが望ましい。

(2) 減衰振動、および振動モード測定時の計測条件

意図的に車両を走行させ通過後の振動を計測する。ここで、走行させる車両は法定速度程度で走行し、重量が重いほうが望ましい。しかし、1 日以上の交通流による常時振動を連続的に計測し、データ分析に最適なデータを切り出してもよい。

(3) たわみ角測定時の計測条件

センサで測定される加速度の直流成分を用いてたわみ角を算出するため、車両の通行がない状態で1 分以上の計測を数回～10 回程度計測することが望ましい。

所定期間、計測されたデータは、データ収集装置内に記憶・蓄積される。蓄積された計測データは、オフライン型システムでは、持ち帰りデータ分析を行う。遠隔計測型システムでは、データ収集装置内の計測データを定期的に広域ネットワーク経由で遠隔地のサーバへ蓄積する。

データフォーマットは、オフライン型システムによる定期計測などの小規模なデータ計測の場合は CSV 形式など、可読性の高いデータフォーマットで処理可能である。しかし常時計測を行う場合の計測データは膨大であり、ネットワーク負荷、ストレージ容量、データ分析に要する計算コスト、の何れの面からも可読性の高いデータフォーマットは現実的ではない。遠隔計測型システムでは、バイナリ形式のデータフォーマットを採用し、かつ圧縮処理を施すのが効果的である。表 4.2.3 にデータフォーマットとデータサイズの目安を示す。

表 4.2.3 データフォーマットとデータサイズの目安

データフォーマット	時刻, 3 軸加速度, 温度情報をサンプリング周波数 100Hz で記憶した場合の 1 時間当たりのデータサイズ
CSV 形式	約 17 Mbyte (可逆圧縮時 約 8.5 Mbyte)
バイナリ形式	約 5 Mbyte (可逆圧縮時 約 2.5 Mbyte)

4.2.6 データ分析

加速度センサによる振動モニタリングでは、測定した加速度から各種演算によって複数の物理量を算出することができるため、対象とする物理量の特性によってデータの処理手法が異なる。以下に固有振動、振動モードおよびたわみ角の測定時のデータ分析手法を示す。

(1) 固有振動数および減衰振動のデータ分析

固有振動数の分析には、計測データに対し直交変換を行い、得られたスペクトルから著しいピーク周波数を求める。図 4.2.2 に計測された加速度から直交変換を用いて周波数スペクトルと減衰時間を導出するための手順を示す。

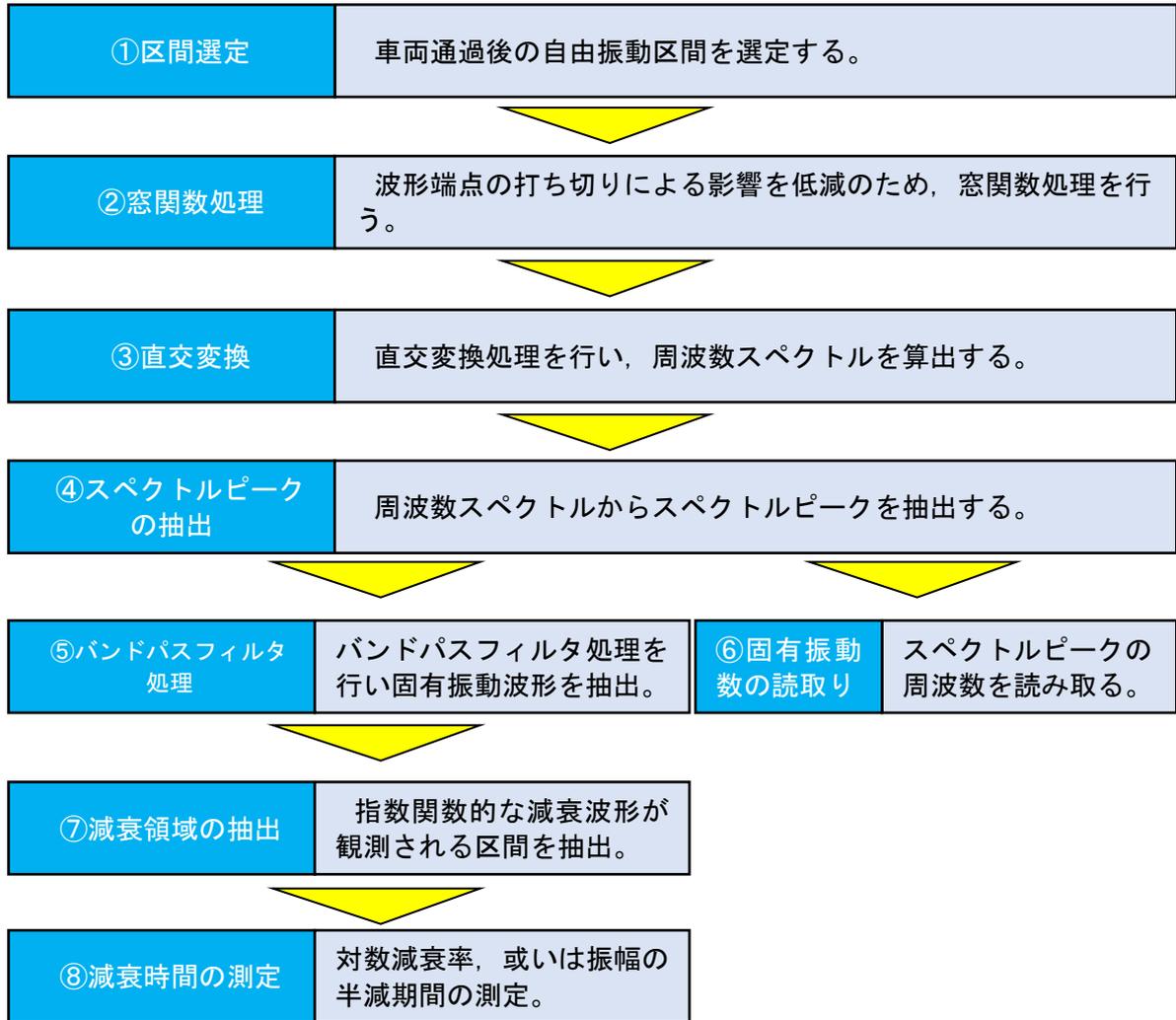


図 4.2.2 固有振動数および減衰時間の導出手順

- 手順① 先ず分析対象の計測データから、車両通過後の自由振動区間を選定する。
 常時計測を行った場合、計測したデータの全区間からデータ分析に適した区間を切り出して使用してもよい。これら計測データの切り出しを自動で行うシステムも存在する。
- 手順② 次に、データの計測期間の打ち切りによる周波数特性への影響を低減させるため、窓関数処理を行う。窓関数には様々なものがあるが、システムに適した窓関数を採用する。
- 手順③ 窓関数処理後、計測波形を直交変換し、周波数スペクトルを算出する。直交変換には様々な手法があるが、一般的には高速フーリエ変換（FFT）を用いる事が多い。
- 手順④⑥ 続いて、得られた周波数スペクトルからピークを抽出する。得られたスペクトルピークが橋梁の固有振動であり、低い周波数から順に1次、2次…の固有振動数となる。
- 手順⑤ 手順①で切り出した元のデータに対し、得られた固有振動数を包括し、かつエネルギーの大きな異なる振動が混入しない周波数範囲を設定したバンドパスフィルタ処理を行い、固有振動波形を抽出する。なお抽出する固有振動波形は、一般的には1次の固有振動波形である。
- 手順⑦ 手順⑤で抽出された波形の減衰時間を計測する。なお計測対象は指数関数的な減衰波形が観測される区間とする。

手順⑧ 自由振動時の減衰振動波形は、指数関数的な波形となる。手順⑦で抽出した減衰波形の中で、隣り合う波形の振幅の比を対数減衰率として測定する、或いは、ある時点から振幅が 1/2 まで減衰する経過時間を減衰時間として測定する。図 4.2.3 に減衰時間の導出イメージを示す。

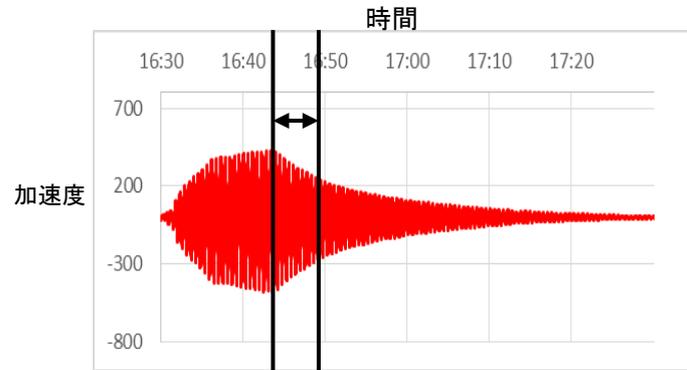


図 4.2.3 減衰時間の導出イメージ

(2) 振動モードのデータ分析

振動モードのデータ分析には、主桁の所定の位置へそれぞれ配置され、時刻同期して測定された複数の加速度センサの計測データを用意する。図 4.2.4 に振動モードのデータ分析の手順を示す。

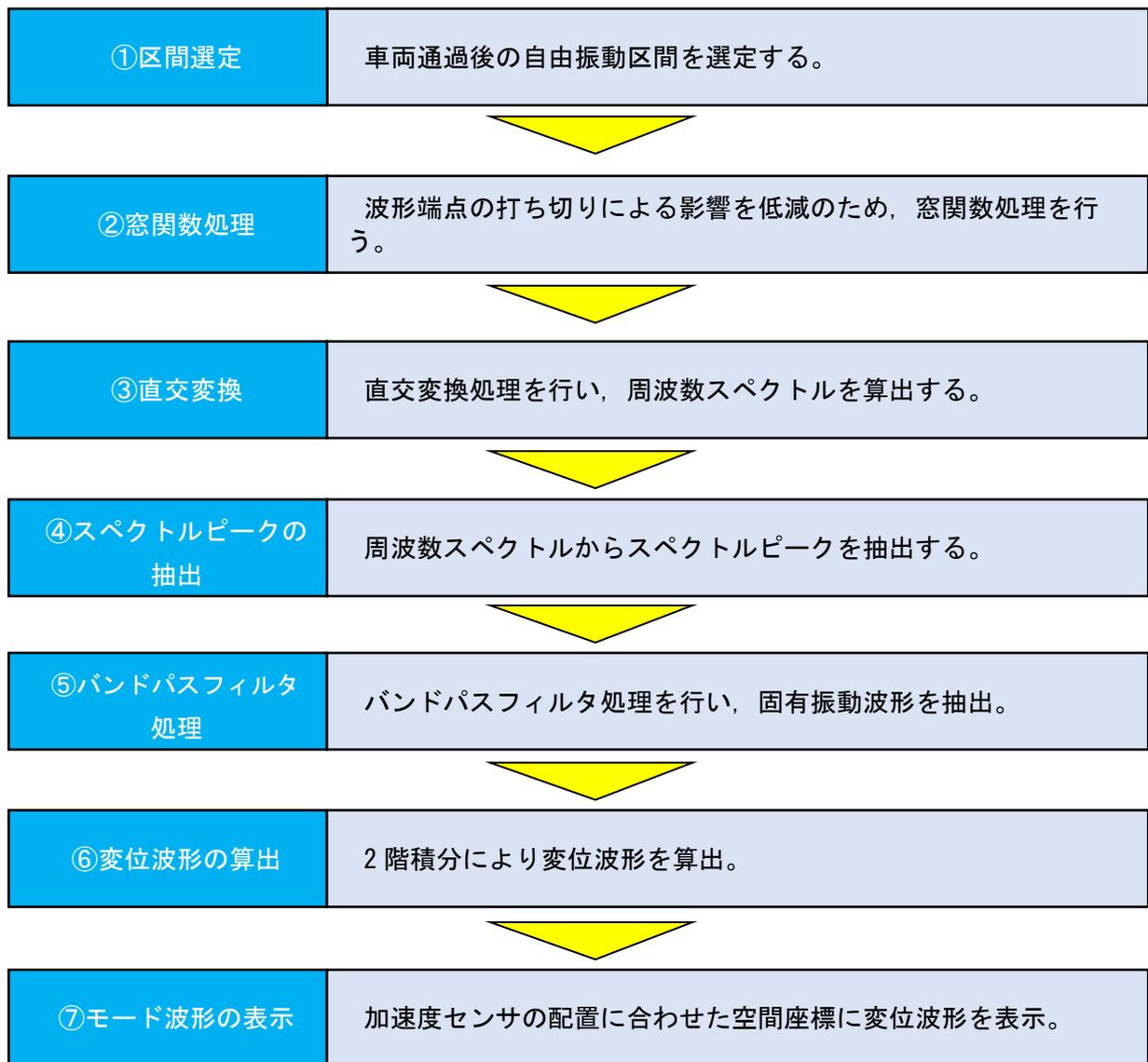


図 4.2.4 振動モードのデータ分析手順

- 手順① 分析対象の計測データについて、車両通過後の自由振動区間を選定する。なお、常時計測を実施した場合でも、計測した全区間の計測データから、データ分析に適した区間を切り出し、分析区間として選定する。これら計測データの切り出しを自動で行うシステムも存在する。
- 手順② データの計測期間の打ち切りによる周波数特性への影響を低減させるため、窓関数処理を行う。窓関数には様々なものがあるが、システムに適した窓関数を採用する。
- 手順③ 窓関数処理後、計測波形を直交変換し、周波数スペクトルを算出する。直交変換には様々な手法が存在するが、一般的には高速フーリエ変換（FFT）を用いる事が多い。
- 手順④ 得られた周波数スペクトルからピークを抽出する。得られたスペクトルピークは橋梁の固有振動であり、低い周波数から順に1次、2次…の固有振動数となる。
- 手順⑤ 手順①で切り出された元のデータに対し、得られた固有振動数を包括し、かつエネルギーの大きな異なる振動が混入しない周波数範囲を設定したバンドパスフィルタ処理を行い、固有振動波形を抽出する。
- 手順⑥ 手順⑤で抽出されたデータを2階積分し変位波形を算出する。なお、変位の振幅情報を

必要とせず、波形挙動のみを確認する目的の場合、手順⑤のバンドパスフィルタ処理の通過帯域を狭帯域化させ、バンドパスフィルタ処理後の波形の極性を反転させたものを変位波形の代用として処理負荷を低減させる事ができる。

手順⑦ 手順⑥で得られた波形の変位データを、主桁へ設置された加速度センサに相当する空間座標へ表示させ、全加速度センサの変位データを時刻同期して連続的に表示する。振動モードは、全ての軸方向、全ての次数の固有振動に対して適用するが、必要に応じて軸方向、次数の固有振動に対して個別にデータ分析を行ってもよい。

(3) たわみ角計測時のデータ分析

図 4.2.5 に加速度からたわみ角を導出する手順を示す。

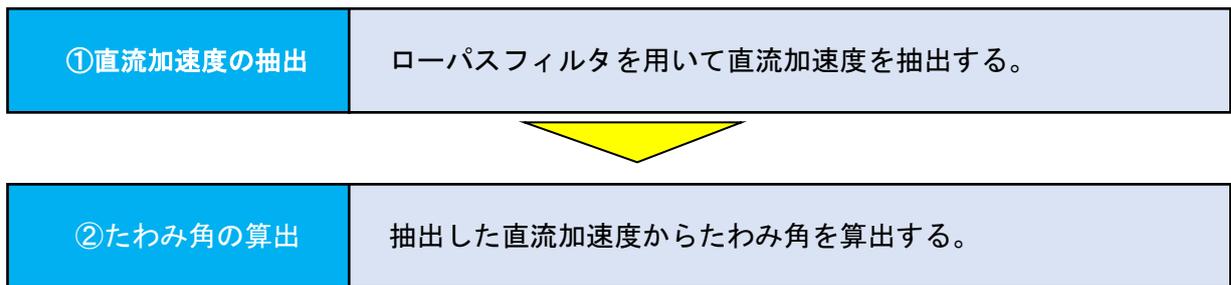


図 4.2.5 たわみ角の導出手順

手順① 計測された 2 軸、或いは 3 軸の加速度データに対し、ローパスフィルタ処理を施して直流成分を含む低周波の加速度を抽出する。ローパスフィルタのカットオフ周波数は、計測データのデータ長に応じて決定するが、少なくとも 0.1Hz 以下とすることが望ましく、より直流に近い周波数成分のみを抽出するのがよい。

手順② 手順①で抽出した低周波加速度の合成ベクトルが示す方向は重力加速度の発生方向であり、鉛直方向である。この重力方向と加速度センサの軸方向とが成す角がたわみ角である。図 4.2.6 にたわみ角の算出イメージを示す。

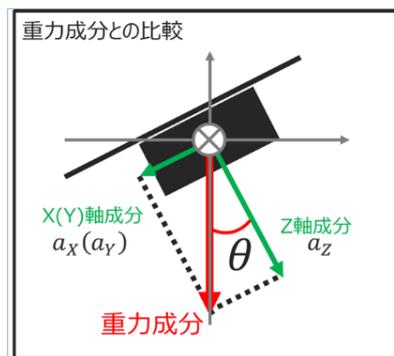
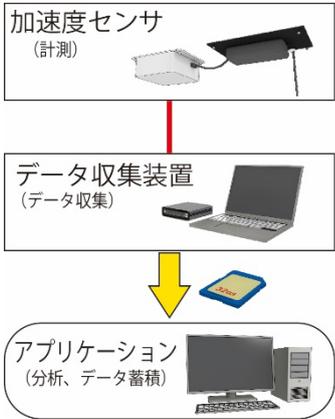
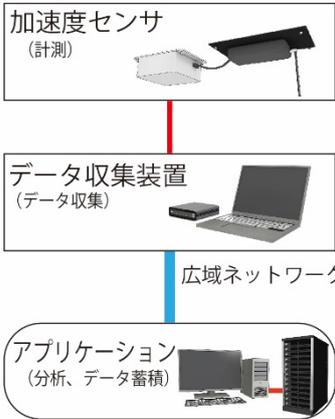


図 4.2.6 たわみ角の算出イメージ

4.2.7 費用の目安

定期計測に適した小規模システム、および多数の橋梁を常時計測する大規模システムの費用の目安を表 4.2.4 に示す。

表 4.2.4 費用の目安

項目	適用	
	オフライン型システム(小規模向)	遠隔計測型システム(大規模向)
システム例		
対応できる橋梁数	小規模	大規模
データ分析アプリケーション	管理者所有のPCを用いた分析アプリケーションソフトによる	データ分析サーバ装置を設置したアプリケーションサーバによる(※2)
計測点数	1点以上(固有振動, たわみ角) 3点以上(振動モード)	3点以上(通常5点以上)
測定方式	手動測定	常時計測
測定期間・間隔	1回/年	通年
データ回収	手動	広域ネットワークを經由
機器費	加速度センサ+データ収集装置: 150万円~ アプリケーションソフト: 100万円	加速度センサ+データ収集装置: 400万円~ アプリケーションサーバ: 数千万円~
設置工事費	別途	別途

※1 電源・広域ネットワーク回線は別途調達

※2 監視橋梁数が小規模の場合、安価なPCによるアプリケーションサーバを構築可能

※3 計測機材は、レンタル可能

※4 計測点数により変動

4.3 結果の評価

以下に固有振動、減衰振動、振動モードおよびたわみ角の結果の評価方法を示す。

4.3.1 固有振動の結果の評価

周波数スペクトルの評価方法は、1編3章に記す通り、通常の供用状態の時点から必要な物理量を定期的・継続的に監視し、異常値や急激な増減を観測するケースB(1編 図3.6.1)の評価・判定方法に適している。

結果の評価には、供用可能な状態の時点の計測データを初期値として用意する必要がある。初期値は、橋梁建設時に予め測定しておく事が理想的であるが、現実的には供用可能橋梁に対する現在の計測データで代用する。測定対象の橋梁の補強工事を行った場合、補強工事直後に計測データを取得し、これを新たな初期値とする事が望ましい。

周波数スペクトルは、構造物の疲労・損傷に伴う構造状態の変化や部材剛性の低下などに対し、ピー

ク周波数が図 4.3.1 のように変化する。或いは、図 4.3.2 のように構造物特有の振動モードが卓越しなくなり、有意なピークが現れずスペクトルが徐々に平坦化する。このようなピーク周波数の変化やスペクトルの平坦化の観測は、単純桁橋などの構造が単純な橋梁に対して有効である。

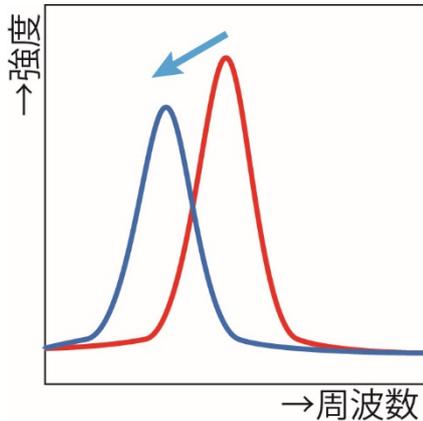


図 4.3.1 ピーク周波数の変化

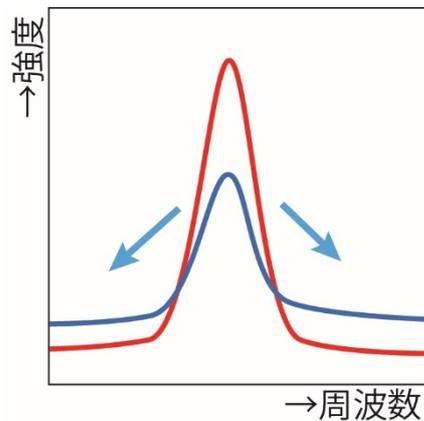


図 4.3.2 ピークスペクトルの平坦化

複雑な構造をもつ橋梁では、構造解析シミュレーションによる事前解析を行い、対象橋梁の固有振動を予め把握する。なお事前解析を行った場合、1 編 3 章で記した、解析結果を管理基準として供用制限などの措置判断を行うケース A (1 編 図 3.6.1) の評価・判定方法の適用も可能である。

周波数スペクトルを時系列に並べ可視化したスペクトログラムの例を図 4.3.3 に示す。

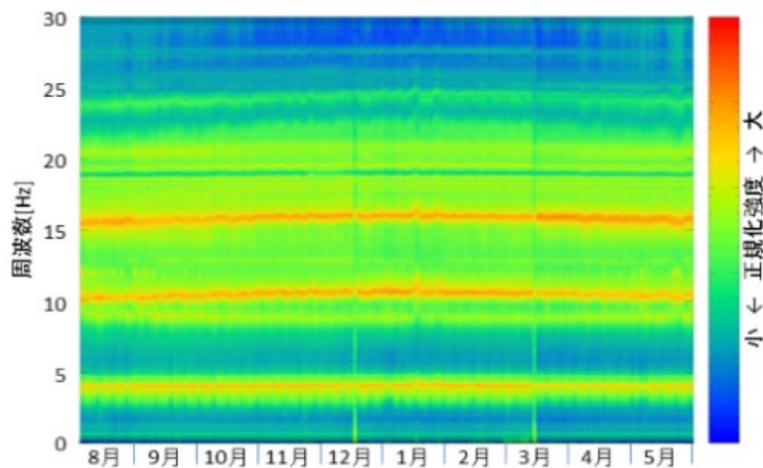


図 4.3.3 スペクトログラムの例

周波数スペクトルをスペクトログラム化すると、数秒～数十秒程度の短時間のスペクトログラムでは減衰振動時の周波数変化やスペクトルの乱れを、1 か月～数年単位の長期間のスペクトログラムでは固有振動の季節変動や構造的な損傷が発生した場合の周波数スペクトルの変化を、それぞれ視覚的に確認できる。

4.3.2 減衰振動の結果の評価

振動の減衰時間の評価は、1編3章で記す通り、通常の供用状態の時点から必要な物理量を定期的・継続的に監視し、異常値や急激な増減を観測するケースB(1編 図3.6.1)の評価・判定方法に適している。

結果の評価には、供用可能な状態の時点の計測データを初期値として用意する必要がある。初期値は、橋梁建設時に予め測定しておく事が理想的であるが、現実的には供用可能橋梁に対する現在の計測データで代用する。測定対象の橋梁の補強工事を行った場合、補強工事直後に計測データを取得し、これを新たな初期値とする事が望ましい。

振動の減衰時間は、主桁の構造状態や部材剛性などの劣化に伴い長くなり、対数減衰率は小さい値となる。これらの数値を健全時当初の数値と比較して結果を評価する。減衰時間が長く(対数減衰率が小さく)変化した場合、桁の劣化・損傷による剛性低下が生じている恐れがある。結果の評価で異常と判断された場合、該当橋梁の詳細点検を実施する。

4.3.3 振動モードの結果の評価

振動モードは、点検やモニタリングにより内部に損傷の疑いがある場合に、損傷状態や損傷箇所を視覚的に確認できる。主桁全体で見ると、構造物の疲労・損傷に伴って振動の形状が変化する。そこで、健全時当初の振動形状、または理論解析により導出した健全時の振動形状と、現在測定した振動形状とを比較することで結果を評価する。または振動モードに明らかな形状の不連続がみられるかを確認する。

振動モードの解析により桁の動きの不連続を可視化した例を図4.3.4に示す。なお図中、主桁は横軸方向が橋軸方向として配置されており、図中の各点は加速度センサの配置された位置を指す。縦軸は主桁の変位(mm)を示す。

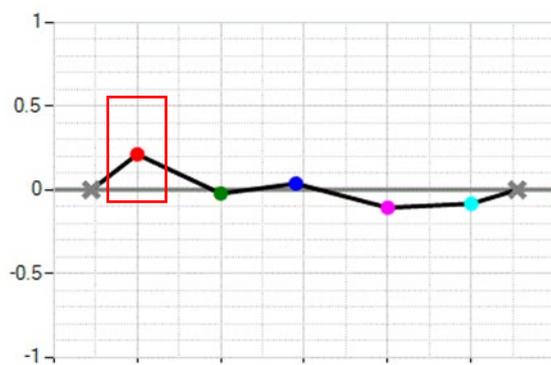


図 4.3.4 内部損傷のある主桁の振動モード例

上述の通り、振動モードの評価には、供用可能な状態の時点の計測データを初期値として用意すれば、過去の振動形状との比較を行う事ができ、微小な変化を観測できる。

初期値は、橋梁建設時に予め測定しておく事が理想的であるが、現実的には供用可能橋梁に対する現在の計測データで代用する。測定対象の橋梁の補強工事を行った場合、補強工事直後に計測データを取得し、これを新たな初期値とする事が望ましい。

4.3.4 たわみ角の結果の評価

たわみ角は、健全度の低い橋梁の供用状態維持のためのモニタリング用途に適しており、1編3章で記す通り、閾値を管理基準として供用制限などの措置判断を行うケースA(1編 図3.6.1)の評価・判

定方法に適している。

例えば、コンクリート桁橋のたわみ角の管理設定値を 1/100 として、測定結果のたわみ角が管理設定値を超えているかどうかを評価する。評価の結果、異常と判断された場合、該当橋梁の状態を詳細に検討の上、供用を停止するなどの必要な措置を行う。

4.4 保守

長期にわたってモニタリング性能を維持するには、センサを交換する際に新旧センサの計測データの継続性・互換性を維持しなければならない。即ち新旧センサの計測データ間の相関を取り、新旧互いのセンサ同士で比較可能な変換を行える様、キャリブレーションを行う。

なおセンサの交換の際には、新旧センサは同じ姿勢で設置するのが、キャリブレーションを実施する上でも望ましい。このため、直接センサを橋梁に設置せず取付ベースプレートを予め橋梁に設置して、ベースプレート上にセンサを設置することが望ましい。また、設置機器は定期的に点検整備（定期的な校正など）を行い、故障や測定精度の低下が無い事を確認する。

またデータの互換性を確保するために、計測データのデータフォーマットを同一にする、または旧センサのデータフォーマットに変換できる必要がある。

参考文献

- 1) 加藤，島田：橋梁実測振動特性の統計解析，土木学会論文報告集 No. 311, pp. 49～58, 1981. 7

5章 桁端部の異常検知モニタリング

5.1 技術の概要

5.1.1 目的

橋梁の維持管理において、点検→診断→措置→記録→計画のサイクルが一般的であるが、橋梁の全てにおいて、同じ管理レベルで維持管理を行うことは難しい場合がある。とくに、市町村の小規模自治体が管理する橋梁において、ヒト、モノ（技術）、カネが十分でなく、維持管理サイクルが効果的に回らない状況が少なくない。

図 5.1.1、図 5.1.2 に示すように、過去に老朽化した橋梁が落橋した事例もあり、管理レベルを向上させることが重要であるが、一方でメリハリをつけた維持管理を行う必要があり、橋梁の利用者が少ないもののうち、迂回路があり、社会的重要性が低いものは、管理水準を下げて、供用制限を講じることが必要な場合がある。このような状況においては、5年に1回実施している定期点検のみで状態を把握することが難しく、何らかの異常が生じた際には、その状況を直ちに把握し、対策を講じる必要がある。

このような橋梁に対して、桁端の異常を検知するモニタリング手法により、通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達したことを確認し、その状態を監視する方法について説明する。

一方、地震等により桁が大きく移動して供用制限を講じることもある。本モニタリング手法は、このような緊急時や災害時の対応にも適用可能であるため、参考にするるとよい。



図 5.1.1 老朽化・撤去した事例

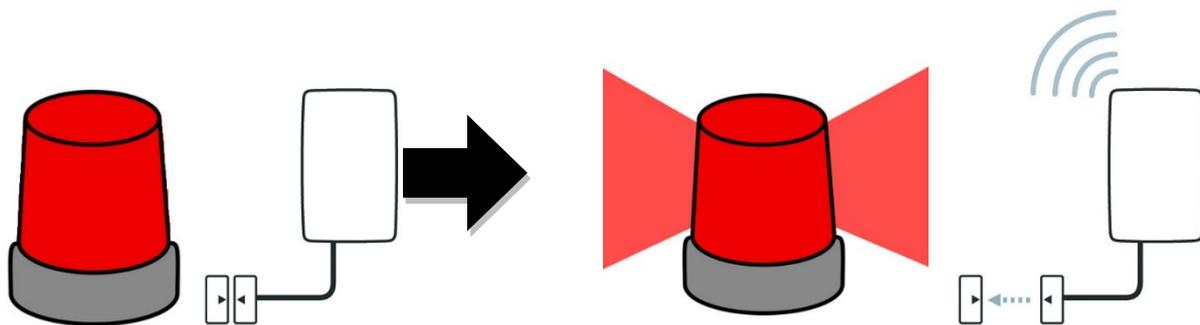


図 5.1.2 橋梁の通行止め・供用制限を行った事例

5.1.2 システムの概要

(1) 原理

本章で述べる「桁端部の異常検知モニタリング」は、防犯センサ（以下、マグネット式センサと呼ぶ）と受信機を組み合わせることで構成されるものである。一般に、マグネット式センサは、センサ間の距離が20～30mm程度開かないと感知しない仕組みになっている。マグネット式センサの仕組みは、通常センサ間に磁力が作用し、センサ同士が接触していると、磁力により通電しない状態になっているが、センサ同士が開くとセンサ間の磁力が弱まり、通電することでブザーが鳴り、または、LED表示灯が点滅するものである（図5.1.3）。マグネット式センサを用いたシステムの例を図5.1.4に示す。



(a) センサが開いていない状態

(b) センサが開いた状態

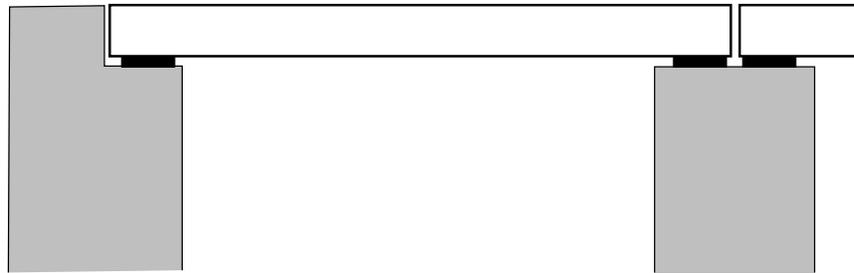
図 5.1.3 マグネット式センサを用いたシステム



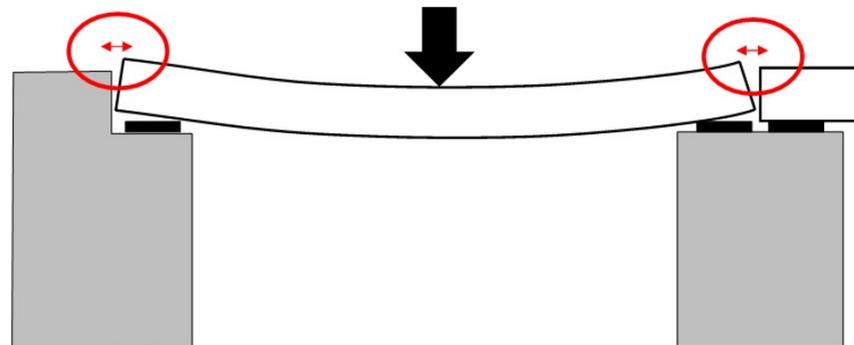
図 5.1.4 桁端部の異常検知モニタリングの例

(2) モニタリング対象

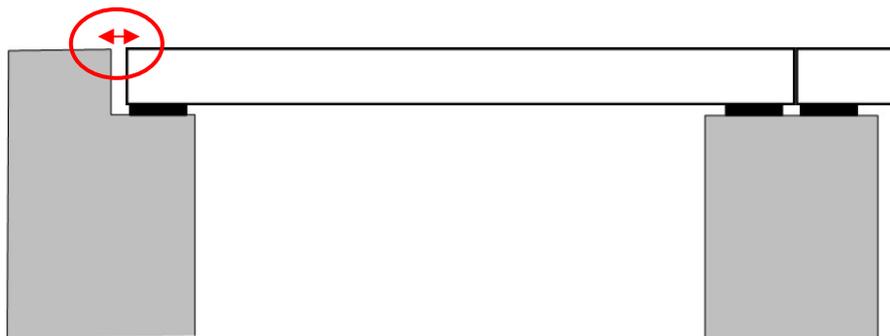
本モニタリングの対象は、桁が大きく変形や移動した際に生ずる桁端部の異常な変位である。橋梁の桁において、損傷が著しく、耐荷性が低下している状況下で生じる変状や地震等による桁の移動を想定としている。例えば、桁端部の伸縮装置や目地の開きや段差などである。したがって、桁端部の目地等にマグネット式センサを設置し、目地部の開きや段差をモニタリングする¹⁾。



(a) 通常の状態



(b) 桁が大きく変形した状態



(c) 桁が大きく移動した状態

図 5.1.5 桁端部の異常検知箇所为例

(3) モニタリング機器の要求性能

桁端部の異常検知システムの要求性能を表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 桁端部の異常検知システムの要求性能

項目		仕様
センサ	性能	・センサ間の距離（3方向）が 20～30mm 程度開くことを検知できること。
受信機	性能	・センサと検知機器間は無線または有線で数 10m 離すことができること。
警報機	性能	・センサが検知した際にアラームやライトで状況を周囲に知らせることができること。
共通	耐久性	・直射日光や水掛かりなどに対して耐久性を有していること。（野外，防水型を使用すること） ・電池を使用する場合，連続使用期間を最低 1 年程度稼動すること。

5.2 モニタリングの方法

5.2.1 モニタリングの手順

桁端部の異常検知モニタリングは，次の手順で実施することを基本とする。図 5.2.1 にモニタリング手順のフローを例示する。



図 5.2.1 桁端部の異常検知モニタリングの手順例

5.2.2 事前調査及び計画

モニタリングの実施に先立ち，対象橋梁の点検調書や維持管理履歴を確認する。点検調書の諸元欄で竣工年，適用示方書，構造形式，基本寸法などの一般的かつ基本的な事項を把握する。

また，現地踏査を行い，対象橋梁の現地状況を把握する。この際，桁端の状況や桁下中央付近の状況

を確認し、センサの設置方法を検討する。

上記、事前調査を行い、対象橋梁の基礎情報を把握したうえで、モニタリング計画を策定する。モニタリング計画の策定には、マグネット式センサを設置することで、落橋を検知する効果的な箇所(位置)を検討し、マグネット式センサの設置位置や数量を決定する。また、マグネット式センサが検知した際に動作するアラームやLED表示灯などの警報器を設置する位置についても検討、決定する。

5.2.3 機器の選定

対象橋梁の状況を把握したうえで、センサや受信機、警報機等の機器を選定する。マグネット式センサは受信機・警報機とセットになっているものが多いので、これらの組み合わせと現状状況を考慮して選定するとよい。

5.2.4 機器の設置

まず、センサを設置する前に、センサの感度を確認する。センサ間を開いて、どの程度センサ同士が開いた場合に感知するか事前に把握する。この際、センサの感度(何mm開いた場合に感知したか)やセンサの状況を把握する。

現地作業では、モニタリング計画で策定したセンサ設置箇所を確認し、安全にかつ確実にマグネット式センサを取り付ける。センサの設置には、2液混合のエポキシ樹脂型のコンクリート用接着剤を用いるとよい。また、桁端部など部材端部が欠けていたり、既に部材間に開きが生じている場合には、樹脂製(塩化ビニールやアクリル樹脂など)の板を設置して、その板にセンサを設置するとよい。

また、センサの感度を確認し、センサを確実に設置したうえで、モニタリング装置全体が稼動するか初期動作を確認して、モニタリングを開始する。



図 5.2.2 マグネット式センサの設置例

5.2.5 モニタリングの実施

本モニタリングシステムは、桁端部に変位や移動が生じ、これをセンサが検知すると、アラームが鳴り、または、LED表示灯が点滅するので、対象橋梁の周辺住民などに、モニタリング実施について事前説明を十分行い、アラームやLED表示灯が反応した場合、速やかに管理者に通報してもらう協力の依頼をしておくことよい。

センサが変位を検知した場合には、桁端部が大きく開いているか、大きく移動している状況であるので、このような場合には、速やかに現地状況を確認し、必要な対応(例えば、通行止めや対象橋梁近辺への立ち入り禁止等)を講じるとよい。さらに、対象橋梁の安全性を確認したうえで、橋梁全体や桁端部、支承の損傷状況、進展状況を確認し、適切に詳細調査や対策を講じる必要がある。

また、1年に1回は電池の寿命や作動確認を行い、適切に作動することを確認する必要がある。

5.2.6 費用の目安

桁端部の異常検知モニタリングは、市販の防犯センサ及び装置を活用したものであり、センサ及び機材費用及び設置費用を合わせて約 10 万円程度でモニタリングシステムを構築することが可能である。

表 5.2.1 桁端部の異常検知モニタリングの費用の例（1 橋あたり）

項目	数量及び費用
計測箇所数(例)	4 点
測定期間(例)	1 年間 ^{※1}
センサ・警報機等材料費	約 2 万円
機材設置費	約 10 万円
総計	約 12 万円

※1 電池稼動期間を 1 年間に設定した

5.3 結果の評価

一般に、上記の対応を行う際の桁端部の開きは 50mm を目安とする。参考に国土技術政策総合研究所（以下、国総研）が行った位置計測による構造物の監視・変状探知手法の検討結果を示す²⁾。

本検討は、位置計測による構造物の監視・変状探知手法の開発を目的として、常時監視の対象とすべき損傷箇所と変位量を把握した。具体には、東日本大震災後に、東北地方整備局が、震度 6 弱以上の 11 路線の橋梁を対象に行った緊急橋梁点検結果を用いて、橋梁の被災状況を調査した。また、被災実績のデータを補完するため、地震動により損傷した場合に一般的は道路橋で発生する段差量を試算した。

既往の主な地震による被災事例では、橋台背面における段差が最も多く、規制期間が長いところでは、段差量 50mm 以上が多い。また、一般的な道路橋の条件で用いられる支承部で、支承ストッパーの破断、支承モルタルの損傷、これらと関連した伸縮装置の損傷により、50mm～60mm の段差が発生する可能性が高いとしている。

このことから、支承部の破壊や橋台背面の段差発生により、供用性に懸念のある状況では 50mm 以上の段差が生じている場合が多いと考えられ、桁端部や掛け違い部における概ね 50mm 以上の段差を常時監視により検知することが、有効性・必要性の視点から監視の目標として妥当と考えられた。

位置計測による常時監視は、地震等の発生直後に道路管理者が被災状況の把握、応急復旧などの対応に利用することを想定し、その性能目標を以下のように設定した。

- ・橋梁の突発的、致命的変状を、迅速・簡潔に検知することができる
- ・常時監視の対象箇所は、桁端部や掛け違い部とし、検知する変位量は 50mm 以上とする。

このような状態を検知した場合には、直ちに対象橋梁の状態を現地で確認するとともに、必要に応じて、通行制限や通行止め、供用停止等の措置を講じたり、橋梁損傷の影響が及ぶ周辺住民への説明などを行うことが必要である。

表 5.3.1 監視箇所と損傷状況²⁾

監視箇所		損傷状況
桁端部	橋台背面	橋台背面盛土の傾斜, 沈下
	橋台部 (伸縮部)	桁の横ずれ, 段差, 開き
掛け違い部	掛け違い部 (伸縮部)	桁の横ずれ, 段差, 開き

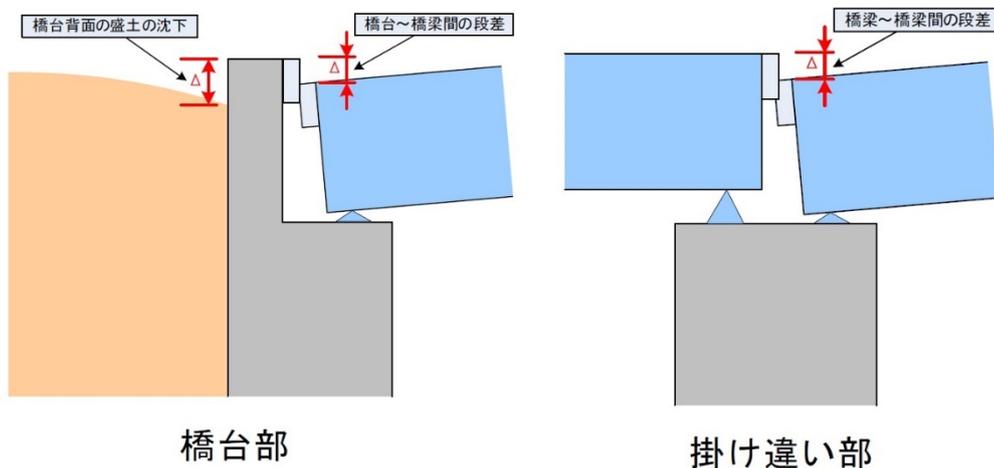


図 5.3.1 沈下や段差が発生する箇所の例²⁾

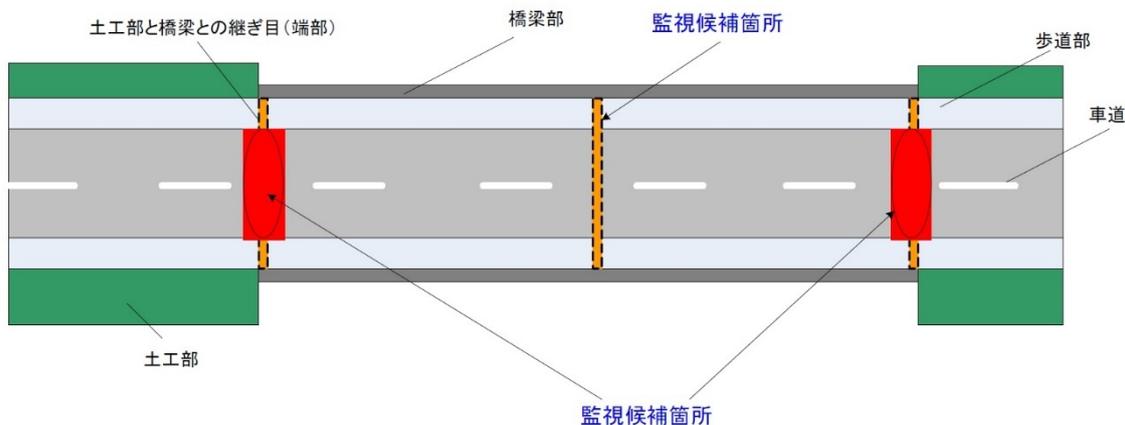


図 5.3.2 監視候補箇所の例²⁾

5.4 モニタリングの保守

桁端部の異常検知モニタリングを実施する場合の保守について以下に示す。

(1) バッテリーの状況把握と交換

電源は電池式であり、一般に1年以上は動作が確認されているが、1年に1度は動作確認を行い、電池の残存量を把握し、早めに電池交換を行う必要がある。

(2) いたづら防止

不用意にセンサに触れたり、壊したりすることが無い様に、必要に応じてセンサを保護、養生するか、近づいたり、触ることを禁止することを注意喚起することが必要である。

参考文献

- 1) 西原, 松山, 近藤, 吉良, 石田, 山口 : 塩害橋梁における簡易モニタリングの適用性に関する研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集 CS9-20, pp. 39-40, 2018. 8
- 2) 国土技術政策総合研究所 : 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 No. 50, 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発, pp. 7-1~7-12, 2015. 12

6章 適用事例

6.1 赤外線サーモグラフィ法を用いた浮き・剥離モニタリング【3編2章の事例】

－高速道路コンクリート橋への適用事例－

(1) 適用事例の概要

高速道路のコンクリート橋の点検において、コンクリートの浮き・剥離の疑いがある箇所を推定し、打音検査が必要な箇所を事前にスクリーニングする目的で、赤外線サーモグラフィ法（以下、赤外線法という）を適用した事例を示す。

(2) 対象橋梁

対象橋梁は、四国の高速道路のコンクリート橋であり、供用開始から概ね 20～30 年程度経過している。主な橋梁形式は RC 中空床版や PC 合成桁であり、平成 30 年度に調査した約 22 万㎡を対象とする。

(3) モニタリングの手順

赤外線法によるモニタリングは、橋梁下面から桁や床版等のコンクリート構造物の浮き・剥離等の変状や経年劣化を把握するため、次の手順で実施した。

1) 点検計画及び現地踏査

気象条件や構造物形式、撮影に必要な路下条件や撮影位置の確認、赤外線法の適用可能範囲を設定し、点検計画を策定するため、昼間および夜間に現地踏査を実施した。



図 6.1.1 昼間の現地踏査状況



図 6.1.2 夜間の現地踏査状況

2) 機材の準備

①赤外線カメラ

赤外線カメラは、最も検出精度の優れる冷却型（高感度タイプ）を使用した。冷却型撮像素子を有し最小温度分解能は 0.02℃である。

②可視画像撮影機材

可視画像撮影機材は、コンクリートの表面状態や形状を把握できる程度の解像度を目途に、1,280 万画素のデジタル一眼レフカメラを使用した。

③熱環境測定装置

赤外線法を適用する対象橋梁や構造形式が多種多様なため、熱環境測定装置は、簡易で汎用性に優れる貼付型を使用した。

図 6.1.3 に本モニタリングシステムの構成を示す。

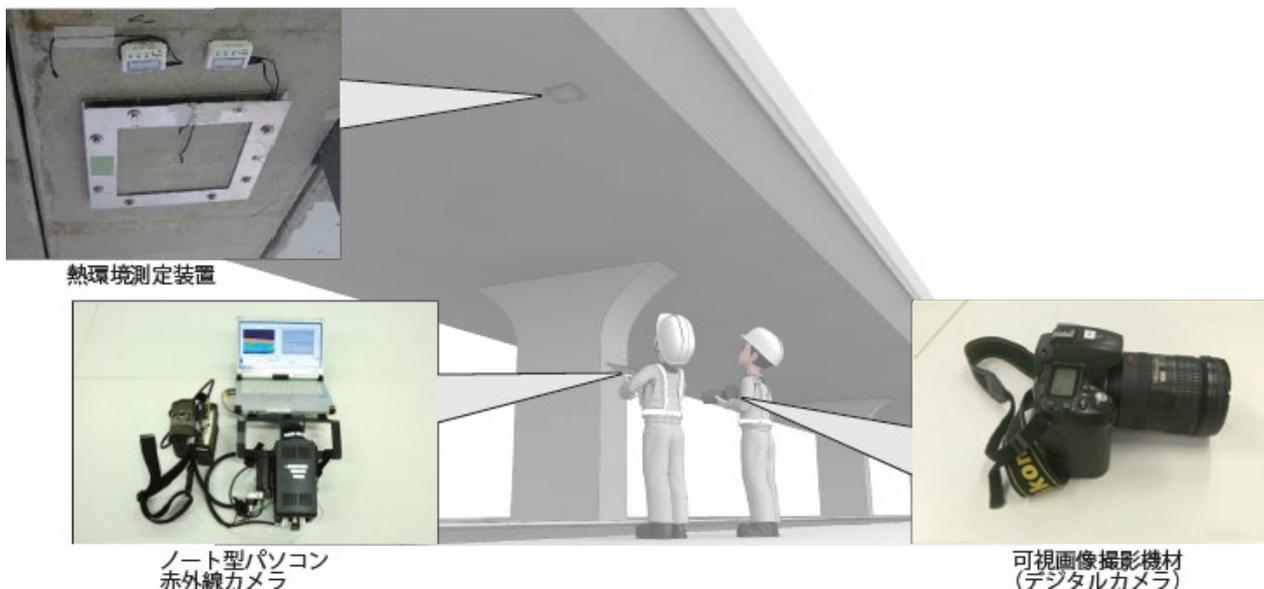


図 6.1.3 本モニタリングシステムの構成

3) 画像の観察・撮影

可視画像撮影は昼間に実施し、赤外線調査は、点検対象構造物の変状箇所にて温度差が発生している熱環境かどうかを確認した上で、夜間に実施した（図 6.1.4 参照）。



図 6.1.4 赤外線画像の観察状況（夜間）

4) 点検結果の整理・保存

撮影した可視画像及び赤外線画像を損傷部位ごとに取りまとめるとともに、損傷判定支援ソフトを用い、損傷程度を評価した。損傷判定支援ソフトは、「赤外線画像」を自動で解析し、「判定画像」として部位ごとに損傷レベルを3段階（青：観察，黄：注意，赤：要注意）で表示する機能を有する。図 6.1.5 に、熱環境測定装置により、あらかじめ損傷深さを検証した結果を示す。損傷程度は、これまでの現地調査および室内試験の検証結果¹⁾より、浮き深さ 30mm は「観察（青）」、浮き深さ 20mm は「注意（黄）」、浮き深さ 10mm は「要注意（赤）」と表示されるよう設定した。

なお、最終的には、「可視画像」、「赤外線画像」、「判定画像」や現地踏査結果、補修履歴など総合的に勘案し、知識と技能を有する者が判定した。

損傷グレード	可視画像	熱画像	判定画像
観察(浮き深さ30mm) 異常音のみ 			
注意(浮き深さ20mm) 打音すると落下の可能性有 			
要注意(浮き深さ10mm) 自然落下の可能性有 			

図 6.1.5 熱環境測定装置を用いた損傷判定支援ソフトの検証

(4) 結果の評価

表 6.1.1 に、調査面積 216 千 m^2 に対する判定区分の内訳割合 (箇所/千 m^2) を示す。「要注意 (赤)」、「注意 (黄)」、「観察 (青)」に区分されたものは 1 千 m^2 あたり計 1.2 箇所あり、赤外線調査後の近接目視点検において打音検査を実施した。

表 6.1.1 判定区分の内訳割合

要注意 (赤) 	注意 (黄) 	観察 (青) 
0.1 箇所/千 m^2	0.8 箇所/千 m^2	0.3 箇所/千 m^2

1) 要注意判定結果：さび汁 (桁端部)

図 6.1.6 に、桁端部におけるさび汁の要注意判定結果を示す。可視画像から、はく落跡及びさび汁が確認された。該当部位の赤外線画像から、はく落跡の境界部は温度低下が大きい濃青色で示され、その温度分布から浮きが疑われる。この濃青色の部位について、判定画像は「要注意 (赤)」と示された。

損傷検出状況		可視画像	近接可視画像	赤外線画像	支援システム画像
損傷部位	張出し(走行)				
損傷範囲 (m)	1.35 × 0.28				
外観所見	錆汁				
備考					
判定	要注意				

図 6.1.6 さび汁 (桁端部) の要注意判定結果

2) 要注意判定結果：ひび割れ（張出床版）

図 6.1.7 に、張出床版におけるひび割れの要注意判定結果を示す。可視画像から、張出床版下面の幅員方向にひび割れが確認された。該当部位の赤外線画像から、ひび割れに沿って濃青色で示された。この濃青色で示される部位について、判定画像は「要注意（赤）」と示された。

損傷検出状況		可視画像	近接可視画像	赤外線画像	支援システム画像
損傷部位	張出し(追越)				
損傷範囲 (m)	1.06 × 0.47				
外観所見	ひび割れ				
備考					
判定	要注意				

図 6.1.7 ひび割れ（張出床版）の要注意判定結果

3) 要注意判定結果：鉄筋露出（張出床版）

図 6.1.8 に、張出床版における鉄筋露出の要注意判定結果を示す。排水管周囲の水染みとともに、張出床版の付け根部に鉄筋露出が確認された。該当部位の赤外線画像から、鉄筋露出部の周囲が濃青色で示された。この濃青色で示される部位について、判定画像は「要注意（赤）」と示された。

損傷検出状況		可視画像	近接可視画像	赤外線画像	支援システム画像
損傷部位	張出し(走行)				
損傷範囲 (m)	1.00 × 0.31				
外観所見	鉄筋露出				
備考	H26 要注意 1				
判定	要注意				

図 6.1.8 鉄筋露出（張出床版）の要注意判定結果

4) 要注意判定結果：浮き（床版下面）

図 6.1.9 に、浮き（床版下面）の要注意判定結果を示す。可視画像から、該当部位は外観上変状がなく健全に見えるが、赤外線画像から円形に濃青色で示される部位が示された。この濃青色で示される部位について、判定画像は「要注意（赤）」と示された。

損傷検出状況		可視画像	近接可視画像	赤外線画像	支援システム画像
損傷部位	床版下面				
損傷範囲 (m)	0.97 × 1.07				
外観所見	健全				
備考					
判定	要注意				

図 6.1.9 浮き（床版下面）の要注意判定結果

なお、今回の調査に要した費用一式*は約 270 円/m²、赤外線調査に要した時間は約 1,500 m²/夜間 7 時間あたり、だった。

*計測費用（試験体設置撤去、可視画像撮影、赤外線調査[夜間]）、機械損料（赤外線カメラ）、解析費用（赤外線画像解析、展開図、調書作成）を含む

(5) まとめ

赤外線法において、可視画像、赤外線画像に加え、損傷判定支援ソフトによる判定画像を用いることで、膨大な量を効率的にスクリーニングすることが可能となり、実務に活用できる。

参考文献

- 1) 林, 橋本, 明石 : 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上, コンクリート工学年次論文集 Vol. 35, No. 1, pp. 1813-1818, 2013

6.2 動画像処理によるひび割れ挙動のモニタリング【3編3章の事例】

(1) 適用事例の概要

鉄筋コンクリート桁などに生じたひび割れを定期点検などで発見した場合に、対象とするひび割れが乾燥収縮によるものか、もしくは構造上危険なものかを判断する根拠となるデータを取得したい。そのために、本モニタリングシステムを自治体が管理する橋梁に適用し検証を行った事例を紹介する。

具体的には、重量が既知の車両を一定速度で橋梁上を走行させる（以下、車両走行載荷試験とする）ことで、橋梁に外力を加えその時のひび割れ開口変位を計測した。

(2) 対象橋梁

対象橋梁は地方自治体が管理する T 橋を対象とした。表 6.2.1 に対象橋梁の概要を、図 6.2.1 に T 橋の全景を示す。

表 6.2.1 対象橋梁の概要

橋梁形式	RC 桁橋
名称	T 橋
径間数	5
橋長	72.9m
最大支間長	14.2m
総幅員	6.3m
架設年次	昭和 33 年
適用示方書	昭和 31 年道示
設計活荷重	TL-21(S31)



図 6.2.1 T 橋全景

(3) 計測方法

車両走行載荷試験の際に、桁下面に発生しているひび割れ箇所を橋梁真下からカメラで動画撮影し、車両走行載荷に伴うひび割れ開口変位と桁たわみを計測した。計測箇所は図 6.2.2 に示した径間中央付近のひび割れ箇所③（本走行試験における計測対象のうちの 1 箇所）とし、カメラをひび割れ箇所③の真下に台座固定し、車両がひび割れ箇所の真上を通過する前後 20 秒間を動画撮影した。車両走行載荷試験に用いた車両は 8t 車と 20t 車の 2 種類で実施した。尚、実験に使用したカメラのスペック及び撮影条件を表 6.2.2 に示す。また、撮影には焦点距離が 75mm と 180mm の 2 種類のレンズを使用した。尚、今回、計測環境が暗かったため、図 6.2.3 で示したように LED 照明を用いた。上記の方法で撮影した動画像データから切り出した静止画像のサンプルを図 6.2.4 に示す。

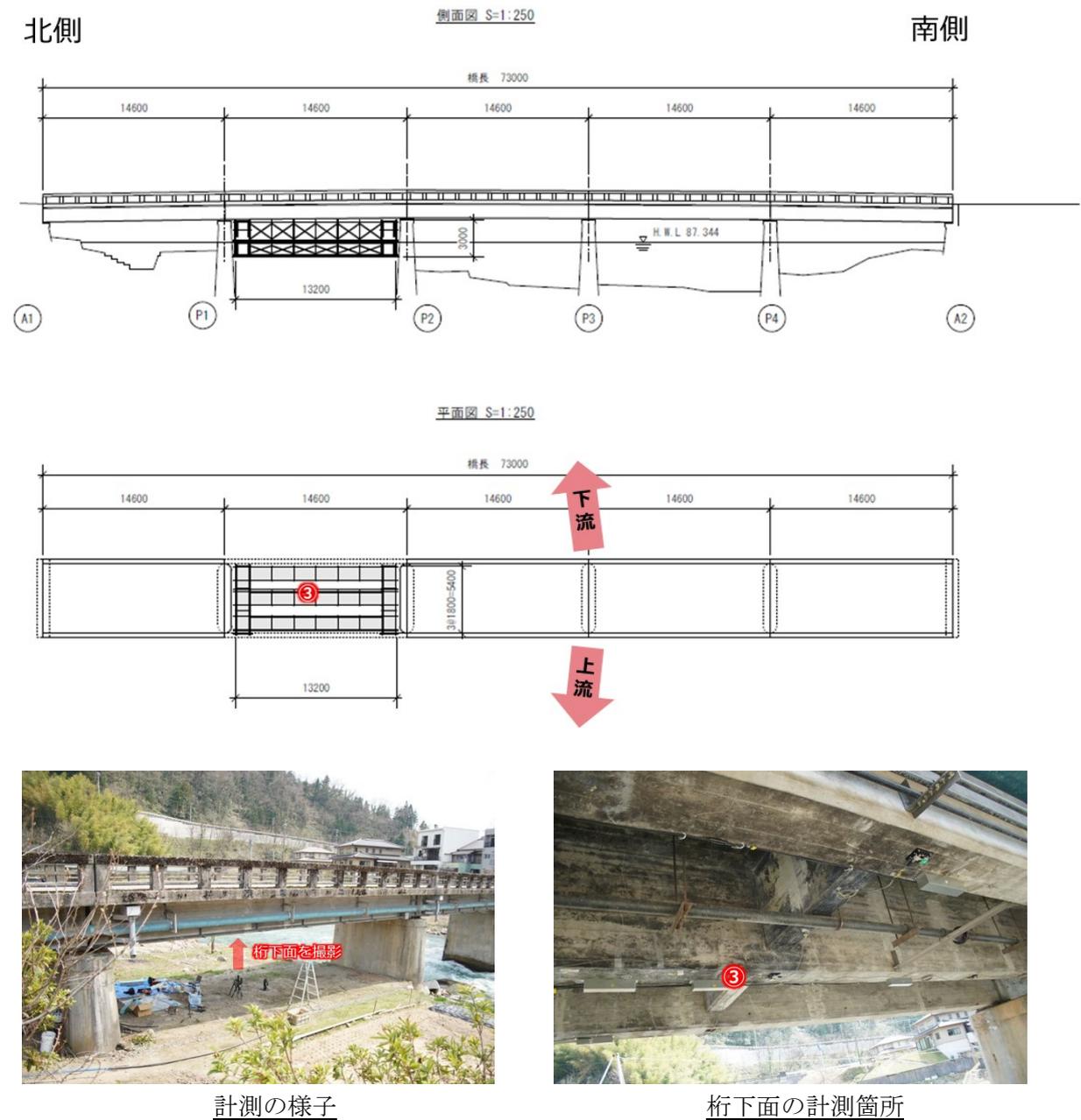


図 6.2.2 計測状況

車両走行載荷試験の様子



計測対象ひび割れ



計測機器



図 6.2.3 計測箇所および計測機器

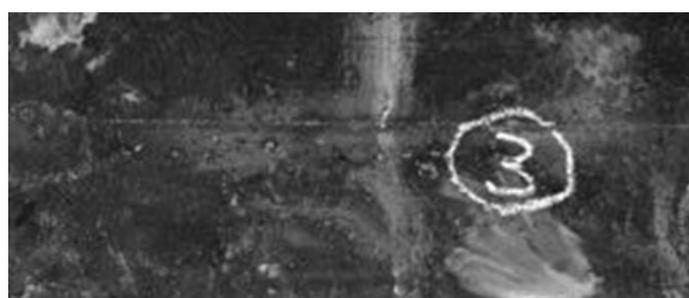


図 6.2.4 撮像画像サンプル

表 6.2.2 使用したカメラスペック及び撮影条件

画素数	4112×3008
画素ピッチ (μm)	3.45
秒間撮影枚数 (fps)	25
露光時間 (ms)	10
撮影距離 (mm)	2702

撮影した動画データ解析し、桁たわみ及びひび割れ開口変位を算出した結果の一例を図 6.2.5 と図 6.2.6 に示す。図 6.2.5 は 8t 車走行載荷時の桁たわみ及びひび割れ開口変位計測結果を、図 6.2.6 は 20t 車走行載荷時の桁たわみ及びひび割れ開口変位計測結果を示している。

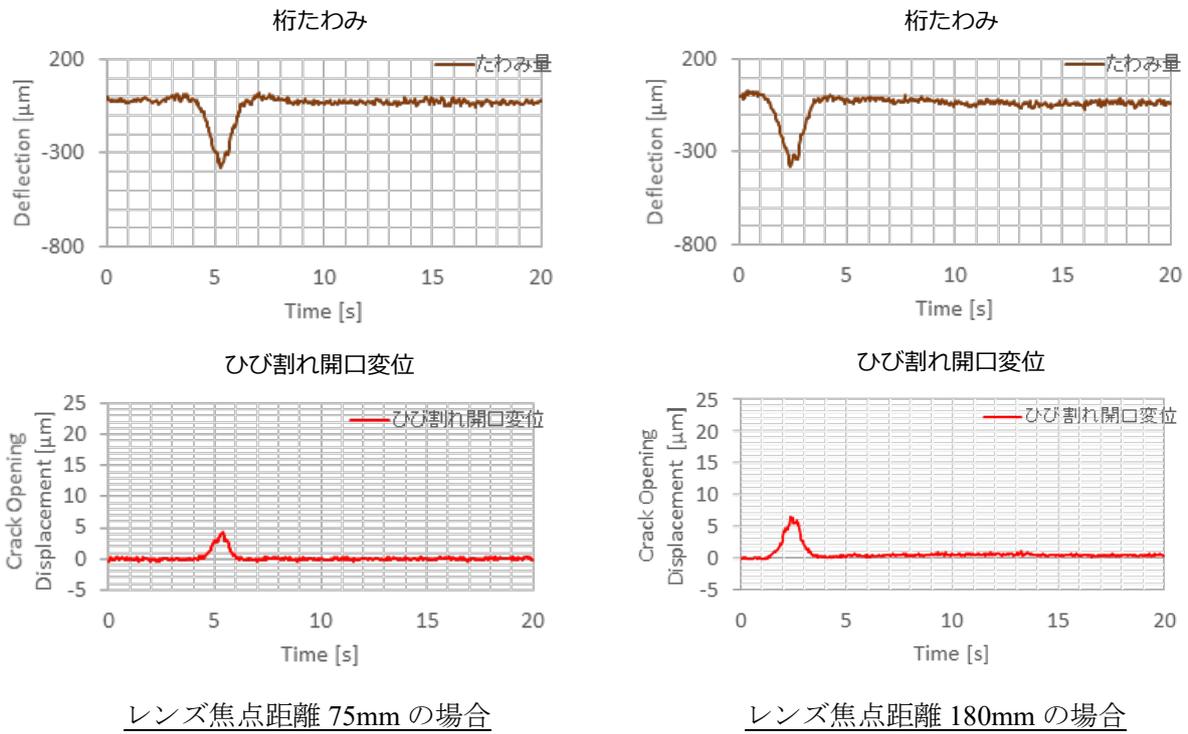


図 6.2.5 8t 車走行載荷試験結果

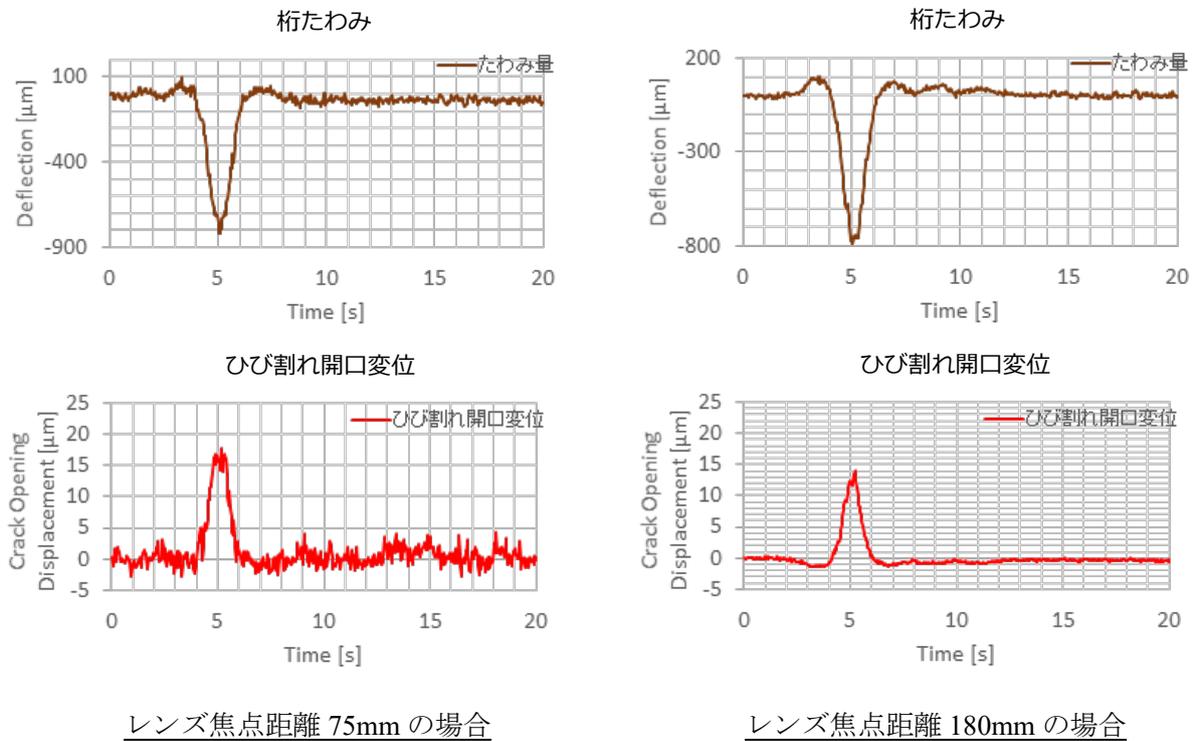


図 6.2.6 20t 車走行載荷試験結果

図 6.2.5 より、8t 車走行載荷において、レンズ焦点距離の違いによらず、計測箇所直上を車両が通過した際のひび割れ開口変位が約 $5\mu\text{m}$ であることが確認できた。また、ひび割れ開口変位が最大になると桁たわみが約 $350\mu\text{m}$ と最大になるのが同期していることも確認できた。同様に図 6.2.6 より、20t 車走行載荷においても、レンズ焦点距離の違いによらず、計測箇所直上を車両が通過した際のひび割れ開口変位が約 $14\mu\text{m}$ であることが確認できた。また、ひび割れ開口変位が最大になると桁たわみが約 $750\mu\text{m}$ と最大になるのが同期していることも確認できた。さらに、焦点距離の異なるレンズでも同等の結果が得られたことから、焦点距離の短いレンズを用いて広角撮影することで撮影範囲内にある複数のひび割れの開口変位を同時に捉えられる可能性があることも分かった。

(4) まとめ

本モニタリングを適用することで、車両走行に伴う桁たわみと同期したひび割れ開口変位を計測できることを確認した。すなわち、クラックゲージや π ゲージを設置しなくても遠隔・非接触で対象箇所を動画撮影し画像解析により、ひび割れ開口変位が計測できる。これにより、対象とするひび割れが構造上危険なものかどうかを判断するためのデータを取得できる。

6.3 加速度センサによる健全性の診断【3編4章の事例①】

(1) 適用事例の概要

1) コンクリート桁橋での加速度センサによる測定

コンクリート桁橋の主桁の部分的な損傷や強度低下を評価するため、主桁へ設置した複数の加速度センサを用いて振動を測定、主桁の剛性に密接なパラメータを各部の振動データを用いて比較・評価した適用事例を紹介する。

2) 橋梁の概要

対象橋梁は、地方自治体が管理する昭和33年に架設（設計基準は昭和31年道路橋示方書）された、コンクリート桁橋である。図6.3.1～図6.3.3に測定を実施した橋梁の外観を示す。



図 6.3.1 計測橋梁の外観（上面）



図 6.3.2 計測橋梁の外観（裏面）



図 6.3.3 計測橋梁の外観（側面）

本橋の橋梁緒元は、総幅員 6.3m、橋長 72.9m、最大支間長 14.2m の 5 径間 RC 桁橋である。

3) 計測概要

本事例では、橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向(X, Y, Z 軸)を計測可能な 3 軸加速度センサを複数設置し、それぞれの加速度センサのサンプリング時刻を同期させ計測を行った。

加速度センサの設置箇所は、図 6.3.4 に示す通り、1 径間内の 3 本の主桁に対し、縦方向および横方向の振動を測定できるように、橋軸方向に 5 か所、橋軸直角方向に 3 か所を十字状に配置、また参考として橋梁上部の欄干 1 か所を追加した計 8 箇所に設置した。同図 6.3.4 に加速度センサの番号を示す。

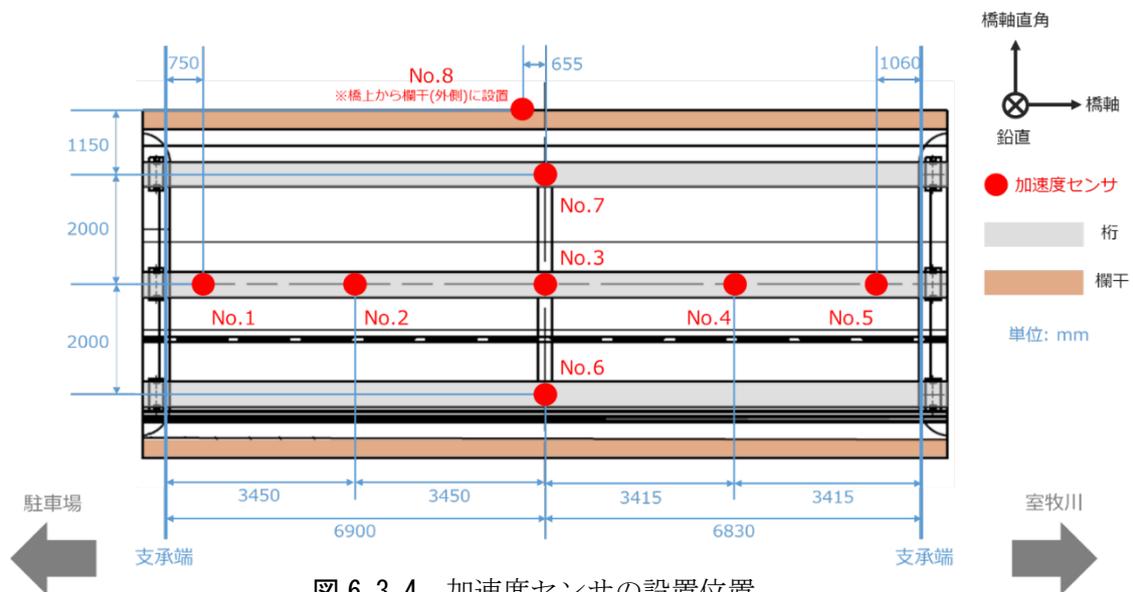


図 6.3.4 加速度センサの設置位置

3軸加速度センサは図 6.3.5, 図 6.3.6, および表 6.3.1 に示す通りの性能・外観を有する機器を使用した。



図 6.3.5 3軸加速度センサ

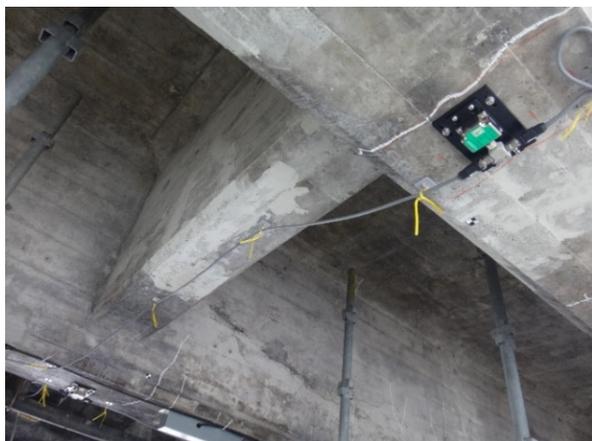


図 6.3.6 計測ユニット

表 6.3.1 3軸加速度センサの特性

項目	仕様
測定範囲	XYZ 各軸 $\pm 5G$ (精度保証範囲 $\pm 1G$)
測定分解能	各軸 $0.06 \mu G$
サンプリング周波数	100Hz (10ms)
周波数範囲	DC~20Hz (-10db : 20Hz)
電源電圧	DC24V +5% -20%
消費電流	最大 100mA (突入電流を除く)
物理インタフェース	CAN2.0A
最大配線長	100m
構造	アルミニウム合金
保護等級	防水, 防塵 (IP67 相当)
環境条件	$-20^{\circ}C \sim +50^{\circ}C$, 85%RH 以下
平均故障間隔	10 年以上 (温度: $+30^{\circ}C$ 下)

3軸加速度センサは、後施工アンカーでベースプレートを固定し、センサをベースプレートにねじで固定した。機械式アンカーの敷設が困難な場合は、高耐久性エポキシ系接着剤を用いて固定する事もできる。3軸加速度センサは、計測ユニットにカスケードに接続され、計測データは計測ユニット内の不揮発メモリに保管される。計測データの収集は、ネットワーク経由で計測ユニットから取得しても良いし、現地の不揮発メモリを回収する事もできる。なお加速度センサに接続されるケーブル類は、ケーブルの揺れが加速度センサに伝達されるのを防止するため、加速度センサ周辺で適宜固定している。実際に加速度センサ、および計測ユニットを設置した状況を図 6.3.7、図 6.3.8 に示す。



(a) 主桁へ設置した様子



(b) 欄干へ設置した様子

図 6.3.7 センサ設置の様子



図 6.3.8 計測ユニットを設置した様子

4) 費用の目安

本測定に用いた加速度センサシステムは、中継処理装置（定価：87万円）1台、加速度センサ（定価：33万円）8台であり、システム価格は定価ベースで351万円である。加速度センサについては、測定内容に応じて削減することができる。また本システムは10年の長期測定が可能であり、長期にわたる測定の場合は機器の購入が必要だが、一時的な測定に関してはレンタルや業者への委託測定も可能である。

(2) 試験結果

1) スペクトル解析による振動特性評価

車両通行時の振動波形に対し、専用の解析ソフトウェアを用いてフーリエ変換を行うことで、スペ

クトル解析を行った。図 6.3.9, 図 6.3.10 に, 測定した振動データから算出されたパワースペクトルを示す。

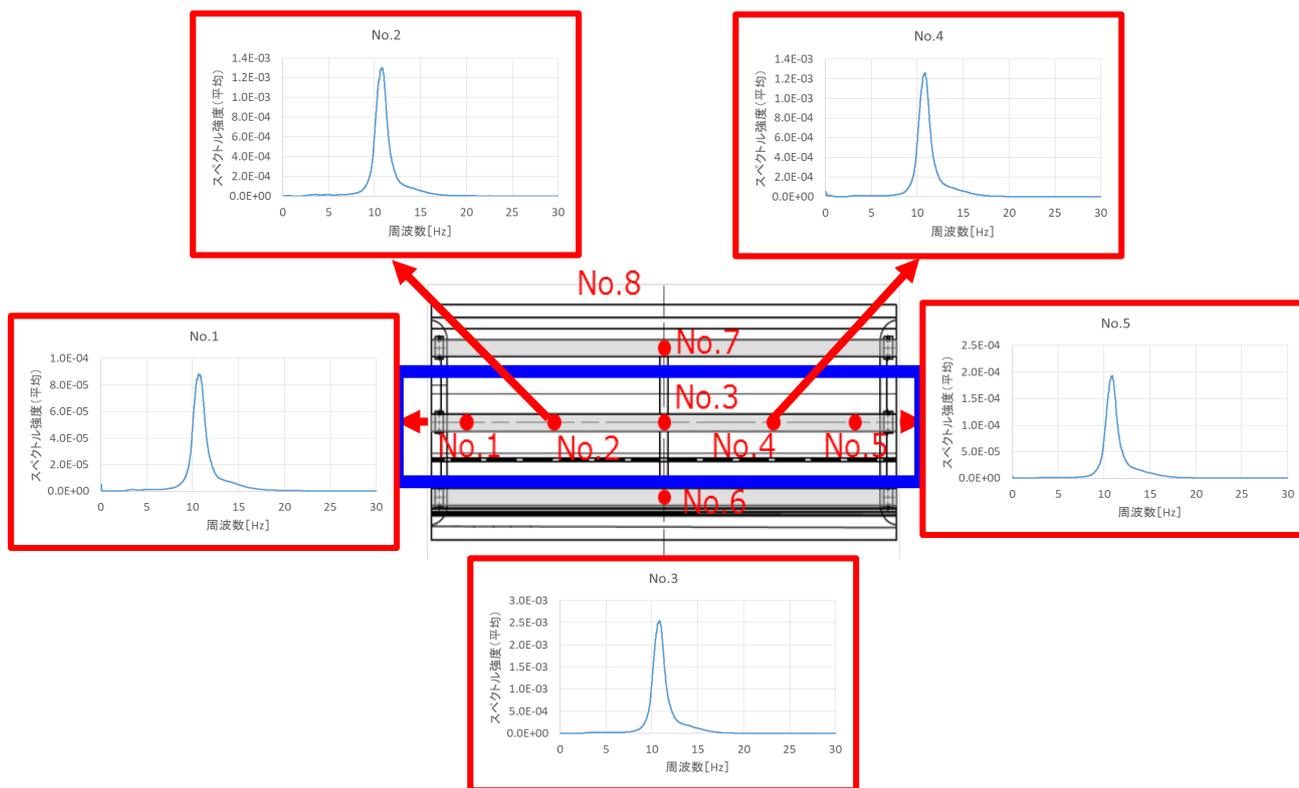


図 6.3.9 橋軸方向のパワースペクトル

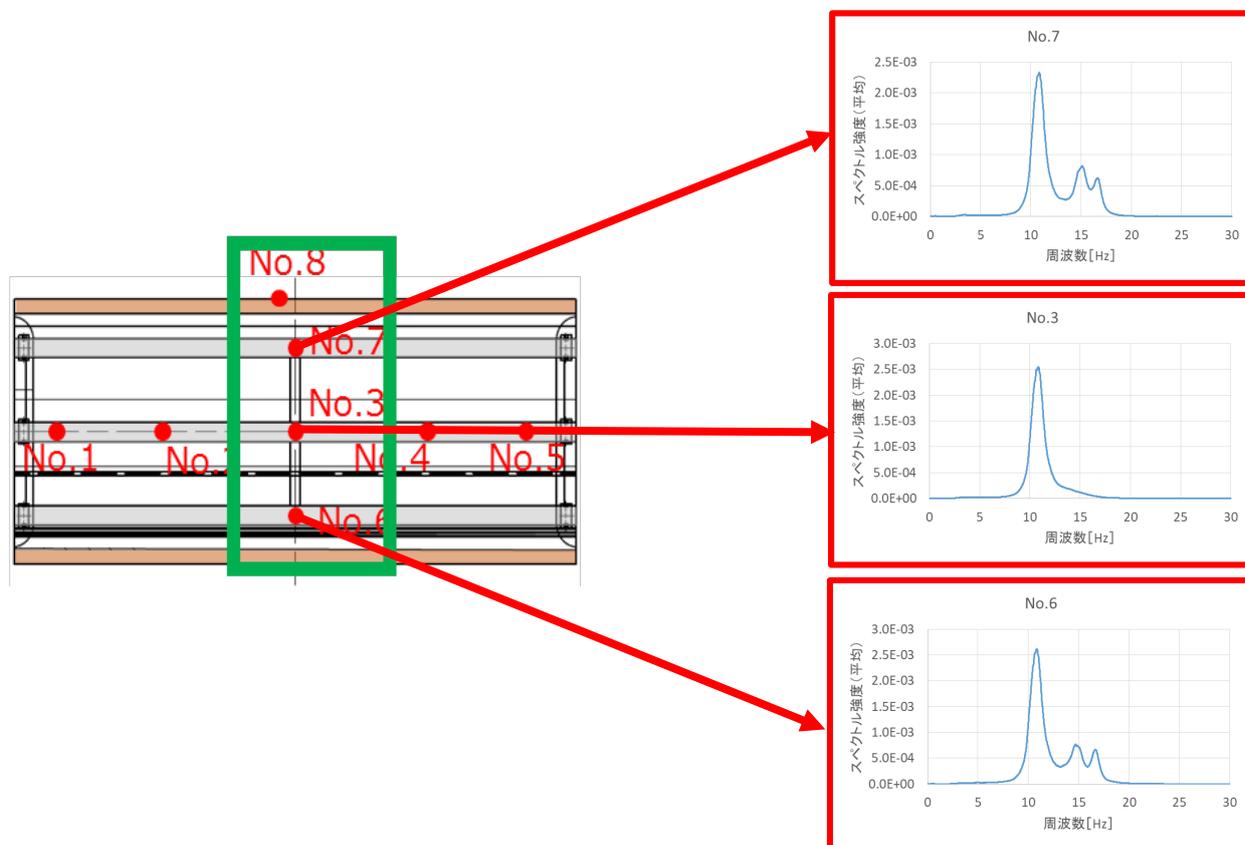


図 6.3.10 橋軸直角方向のパワースペクトル

図 6.3.9 の橋軸方向に設置した 5 つの加速度センサでは、全て同一形状のスペクトルが観測され、また No.3 のセンサのパワーが最も大きい事から、11Hz 付近に 1 次の固有振動が発生していると確認できる。また図 6.3.10 の橋軸直角方向に設置した 3 つの加速度センサでは、中心の No.3 を除き両側のセンサに 15Hz, 17Hz 付近のスペクトルピークが確認されており、橋軸に対し回転方向への揺れと考えられる。

2) スペクトログラムによる振動特性の経時安定性の評価

図 6.3.9, 図 6.3.10 のパワースペクトルのうち、No.3, No.6 についての周波数分布の時間変化を観測するため、専用の解析ソフトウェアを用いて約 9 カ月間の振動データを用いてスペクトログラムを算出・可視化した結果を図 6.3.11, 図 6.3.12 に示す。

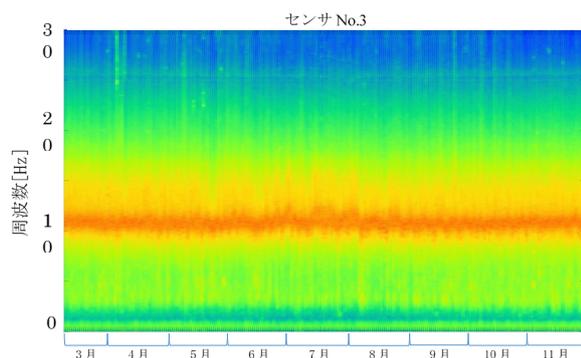


図 6.3.11 No. 3 のスペクトログラム

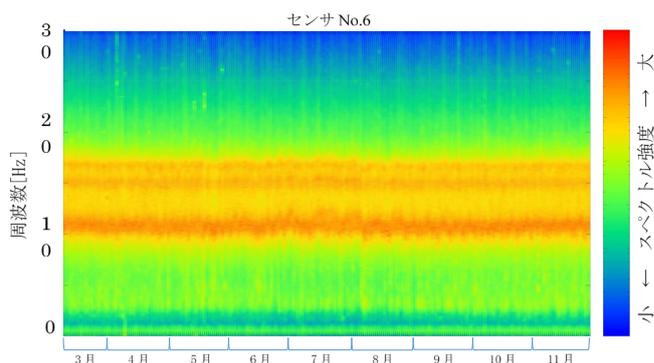


図 6.3.12 No. 6 のスペクトログラム

図中、横軸が時間の進行を示し、赤色がパワーの強い振動数である事を示している。本結果では、観測期間中の固有振動が水平に並んでおり、時間の経過と共に振動特性が変動していない事が確認された。即ち、現状、橋梁の振動特性は安定している事が確認できた。

(3) まとめ

加速度センサを用いてコンクリート橋の主桁の交通振動を計測し、各種の演算処理を行うことで橋梁の振動特性を知ることができる。振動特性は、主桁の剛性変化や部分的な強度低下に密接に関係するパラメータであり、目視では確認できない剛性変化を評価できる。本事例では、固有振動に着目した観測を行ったが、より詳細な観測として、傾きを測定したたわみ角の評価や、振動モードの分析、減衰時間の測定、更には活荷重変位の測定も併せて分析する事も可能である。

参考文献

- 1) モニタリングシステム技術研究組合：社会インフラのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発成果報告書, pp.4-93-4-140, 2019.3

6.4 加速度センサによる健全性の診断【3編4章の事例②】

「固有振動数の計測値を用いたベイズ推定による構造物の損傷推定方法」

(1) 適用事例の概要

「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関連した、国土交通省の現場実証において、2014年～2018年の間に、実橋梁でモニタリングを適用した事例を紹介する。

1) 対象橋梁

2007年3月に供用を開始した、橋長232m、支間長71.3m+88.0m+71.3mの鉄筋コンクリート床版を有する3径間連続鋼箱桁橋である。

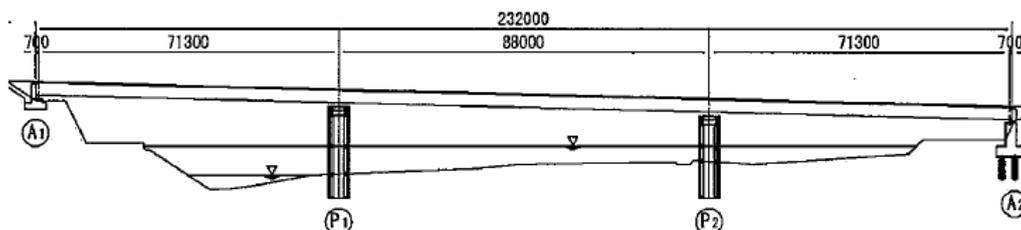


図 6.4.1 対象橋梁側面図

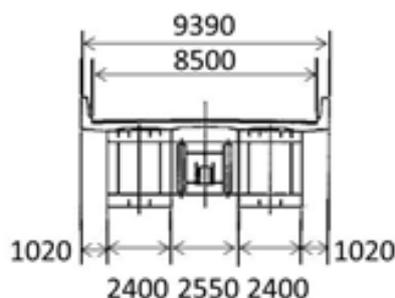


図 6.4.2 対象橋梁断面図

2) 目的

対象橋梁の事前調査を実施した結果、中央径間のコンクリート床版には橋軸直角方向に約1m間隔でひび割れが生じており、鋼部材の表面には部分的に腐食の進行が確認された。そこで、腐食や活荷重などの使用環境の把握、および剛性低下が懸念されるため、その剛性を確認することを目的として、基本特性、構造特性を把握した上で、剛性低下の要因を評価するモニタリングを計画、実施した。

表 6.4.1、表 6.4.2 に現場調査結果とモニタリング目的の一覧を示す。現場状況写真については、参考文献 6) の Figure. 1 を参照。

表 6.4.1 現場状況とモニタリング目的①

現場状況 (劣化損傷項目)	モニタリング目的
腐食	腐食環境の把握による原因究明と経過監視
	板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握

表 6.4.2 現場状況とモニタリング目的②

現場状況（劣化損傷項目）	モニタリング目的
コンクリート床版ひび割れ	コンクリート剛性低下把握

3) モニタリング項目

剛性低下をモニタリングするための計測項目，評価方法の一覧を表 6.4.3 に示す。また，計測する物理量と演算で求める特性値および性能（剛性）評価の関連性を図 6.4.3 に示す。ここでは，使用環境の把握としては，温湿度を，基本特性としては固有振動数，構造特性として，温度特性について評価した。

表 6.4.3 モニタリング目的と計測項目および評価方法

現場状況（劣化損傷項目）	モニタリング目的	計測項目	剛性評価方法
腐食	板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握	温度，湿度 加速度	コンクリートヤング率の推定
コンクリート床版ひび割れ	コンクリート剛性低下把握	活荷重 桁ひずみ	

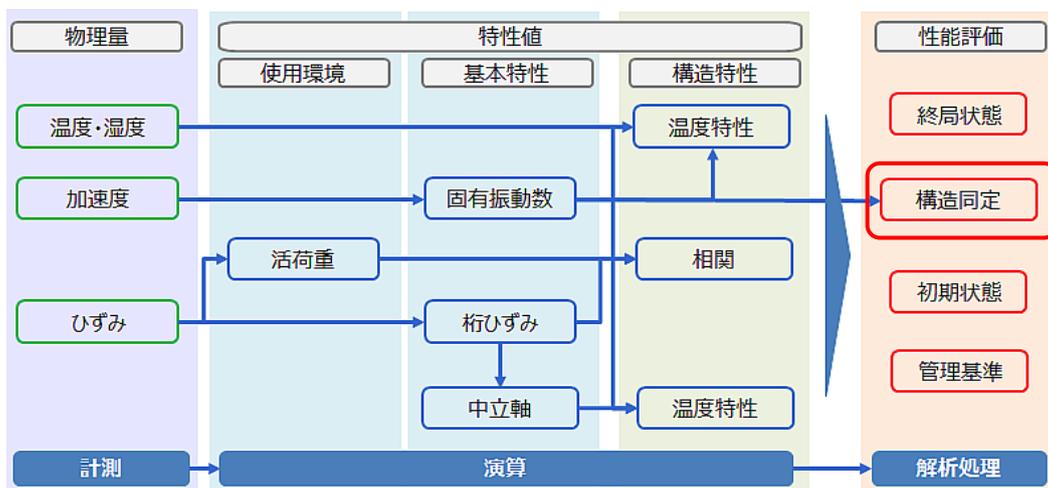


図 6.4.3 計測値と特性値の関連性

(2) 計測機器の設置

1) システム構成

図 6.4.4 にシステム構成図を示す。現場に計測器を設置し、公衆回線を通して社内サーバにデータを転送し、その結果を関係者で共有し解析を実施した。

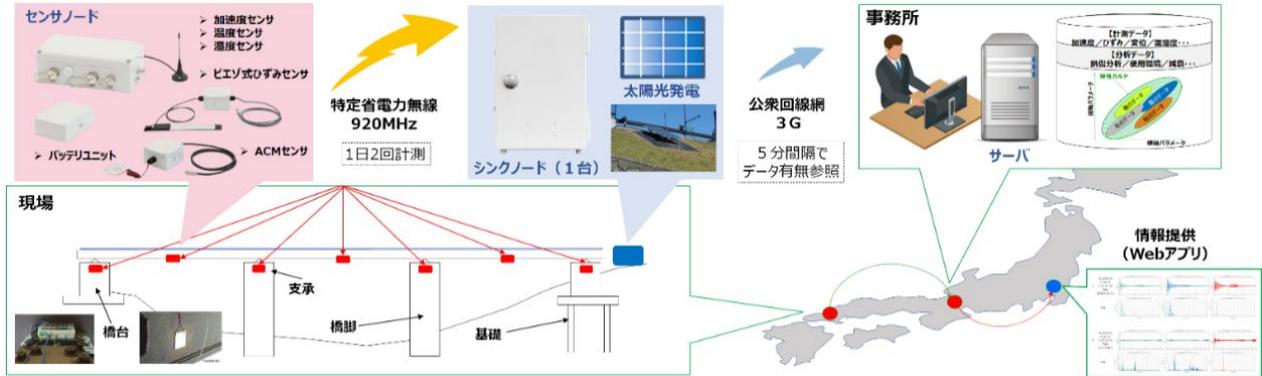


図 6.4.4 システム構成図

2) 使用機器

表 6.4.4 に使用した機器の一覧を示す。

表 6.4.4 計測機器一覧表

項目	備考
センサーノード	温湿度センサ, 加速度センサ (3 軸), 無線通信 (920MHz)
バッテリーユニット	リチウムイオン電池
920MHz アンテナ	
シンクノード	通信周波数 (920MHz), 最大接続台数 (40 台)
GPS ボックス	
遠隔通信アンテナ	

3) 設置場所

固有振動数を計測する加速度センサは、基本特性を把握するうえで必要な 1~5 次程度の低次の振動を計測する必要があるため、支間 L の 1/2L で奇数次モード, 1/4L で偶数次モードを計測できる位置を選定し、設置した。

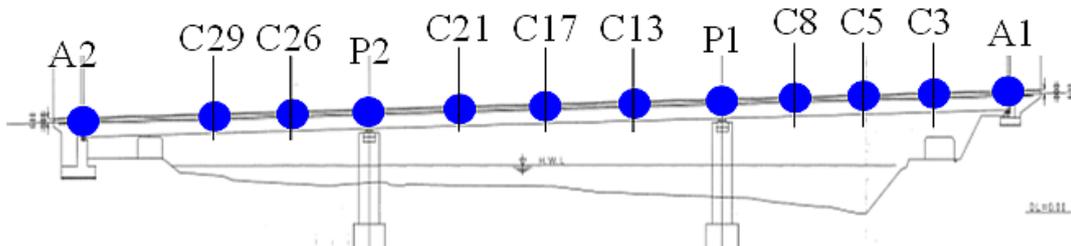


図 6.4.5 センサ設置場所

4) 設置状況

図 6.4.6 に計測機器の設置状況を示す。



図 6.4.6 センサ設置状況

(3) 加速度計測および固有振動数算出結果

固有振動数とは、構造物が自由振動した際に現れる構造物が持つ固有の振動数のことである。損傷などにより構造が変化した場合にはこの特性も変化することになる。よって、固有振動数を把握しておくことは橋梁の特性を把握する意味で非常に重要である。図 6.4.7 (上) に横軸を温度とし、縦軸を卓越周波数とした図を示す。年間の温度変化による変動は、高次になるほど若干低下すること、各次数において計測値には $\pm 0.3\text{Hz}$ 程度のばらつきを確認した。卓越周波数はピーク値を自動的に検出するソフトウェアで抽出しており、また一般車両の通行がある中で抽出しているため、図 6.4.7 (下) のように、ばらつきをもった分布となっている。このばらつきから最頻値を固有振動数として特定することが可能となる。

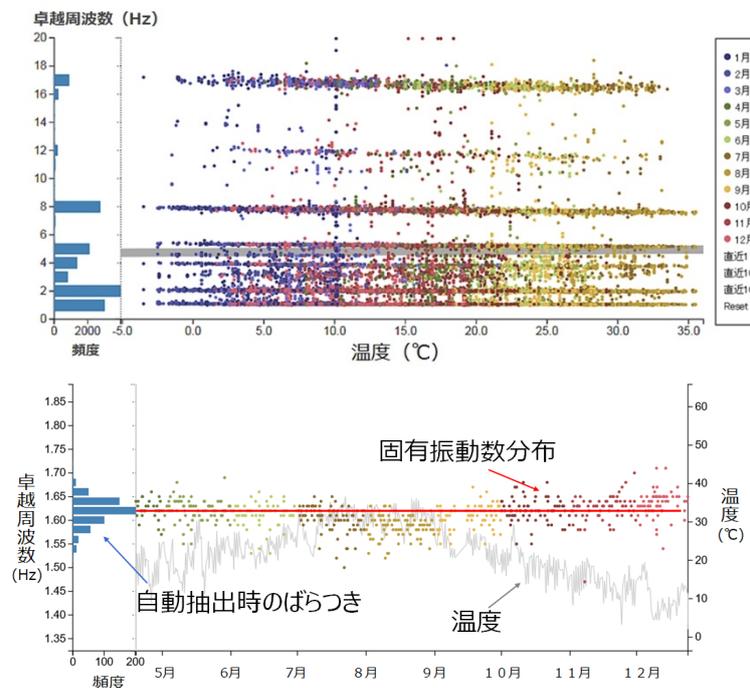


図 6.4.7 卓越周波数の温度変化 (上) および時系列分布 (下)

(4) ベイズ推定による構造物の損傷推定方法について

1) FEM モデルの構築

構造特性に変化があった場合に、どのような条件で変化が起きたのかを知る必要がある。対象橋梁ではコンクリート床版のひび割れや、鋼部材の腐食により剛性低下が懸念される。そこで、まず橋梁全体（グローバル）の基本特性を示す固有振動数に注目し、固有振動数の変化について検討を行った。これには、FEM モデルを用いた各パラメータの影響度分析、および変動分布を求めることが有効であるため、FEM モデルを構築し、固有振動数を評価対象とした劣化損傷の現状（コンクリート床版のひび割れ、鋼材の腐食）に影響するパラメータの推定を実施した³⁾。設計図面に基づき、主桁、横桁、RC 床版、ゴム支承を数値モデル化した FEM モデルと構造パラメータについては参考文献 5)の図 17 および表 4 を参照。

2) 構造同定

計測した加速度データから、固有振動数による構造同定解析を行った。同定解析には、システム同定手法の一つである NExT-ERA⁴⁾ と呼ばれる手法を用いて行った。これは、車両通行による強制振動の加速度波形から自由減衰応答波形のみを抽出し、固有振動数を求める手法である。1~3 次の同定結果と上記 FEM モデルによる構造解析で求めた固有振動数については参考文献 5)の図 16 および図 18 を参照。両者に 5~10%の差があることが分かる。これは初期（設計値による解析）から現状（計測データ）への変化であり、この変化に影響する構造パラメータを求めることが、構造物の損傷を同定することとなる。

3) ベイズ推定による構造パラメータ推定

パラメータの推定にはベイズ推定を用いた。ベイズ推定は、FEM 解析結果が計測値に近い数値を検出できるように、条件式（ベイズ式）を導入して、より計測値に近いパラメータ値を導いていく数学的手法である。構造の状態を把握するためのパラメータ（例えば、コンクリートのヤング係数、コンクリートの密度、鋼材のヤング係数、支点条件など）を設定し、事前の情報に設計値、新たに得られた情報に構造同定結果を利用することで現状の構造パラメータを推定することができる。このパラメータの修正を繰り返し、より計測値に近い構造同定結果に近づけていき、それぞれ設定したパラメータの発生確率を示すものである。

推定結果については参考文献 5)の図 19 を参照。固有振動数の差には中央径間のコンクリートヤング率 ($E_{c,center}$) が最も影響し、その値は 28GPa から 9.85GPa に低下しているという結果が得られた。これは中央径間にコンクリート床版のひび割れが生じている状況と一致している。また、橋梁全体（グローバル）の固有振動数から、中央径間のコンクリートヤング率（ローカル）へ、損傷に関する特徴量の推定ができたことと事例と言える。

(5) まとめ

本適用事例では、社会インフラの維持管理へ適用が可能な常設型モニタリングシステムにおいて、橋梁全体（グローバル）の固有振動数から、中央径間のコンクリートヤング率（ローカル）の損傷状態を推定する技術を示した。本事例における技術は、特別な新規性を持ったものではなく、電気、通信技術の中で、既に数年前から技術的に確立しているものである。その技術を土木現場に適用できるように、工夫を加え、省電力化や無線化を実現し、その中で耐久性や信頼性の確保を図った。さらに、加速度センサを用いて、固有振動数を計測することで、グローバルの情報からローカルの状態を推定するモニタ

リング技術の有効性を示すことができた事例である。

参考文献

- 1) 黒田, 西田, 高瀬, 佐々木: 省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 2 (特性カルテ), 土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-017, 2018.8
- 2) 佐々木, Sinsamutpadung, Tuttipongsawat, 黒田, 西田, 高瀬: 省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 3 (特性分析), 土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-018, 2018.8
- 3) Juang, J.-N., Pappa, R.S. : An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985
- 4) Farrar, C.R., James, G.H. : System Identification from ambient vibration measurements on a bridge, Journal of Sound and Vibration Vol.205, pp.1-18, 1997.
- 5) 西田, 高瀬, 幡山, 佐々木: 社会インフラへのモニタリング技術の活用(2), OMRON TECHNICS
- 6) Eiichi Sasaki, Porjan Tuttipongsawat, Natdanai Sinsamutpadung, : Condition evaluation of a highway bridge with RC deck using monitoring data obtained by wireless sensors, CASTED2018, 2018.5

6.5 加速度センサによる健全性の診断【3編4章の事例③】

「低周波3軸加速度センサによるPC箱桁橋の振動特性診断」

(1) 適用事例の概要

PC箱桁橋の箱桁内部に加速度センサシステムを設置し、振動特性（スペクトル解析、たわみ）について測定・分析を行った適用事例を紹介する。

実施対象としたPC箱桁橋においては、変状の発生が確認されており、本実施事例では、変状の存在による橋梁構造体の剛性への影響について、振動特性を用いて診断することを目的とした計測・評価について記す。

1) 橋梁の概要

対象橋梁は、平成2年に高速道路に架設されていた橋長281m、幅員9mのPC3径間連続ラーメン箱桁橋である。図6.5.1に測定を実施した橋梁の概要図を示す。

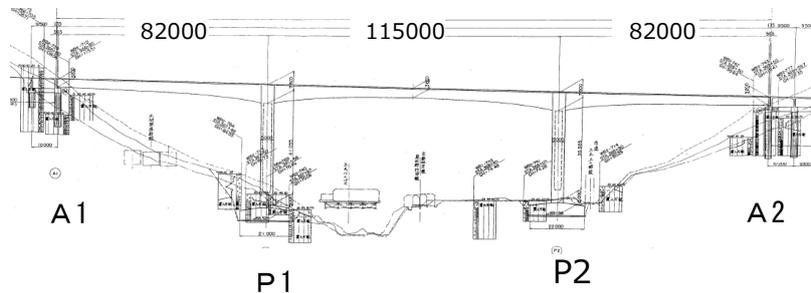


図 6.5.1 計測対象橋梁の概要図

2) 計測概要

本事例では、橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向（X、Y、Z軸）を計測可能な3軸加速度センサを、A1-P1径間（変状なし）とA2-P2径間（変状あり）の2つの側径間の箱桁内部に複数設置し、各径間毎の加速度センサ群を同期させ計測を実施した。

加速度センサは、図6.5.2に示す通り、径間毎に径間中央と2つの径間四分位点の下フランジ上面に6箇所、径間中央の上フランジ下面に2箇所の計8箇所、橋梁全体で計16箇所に設置した。

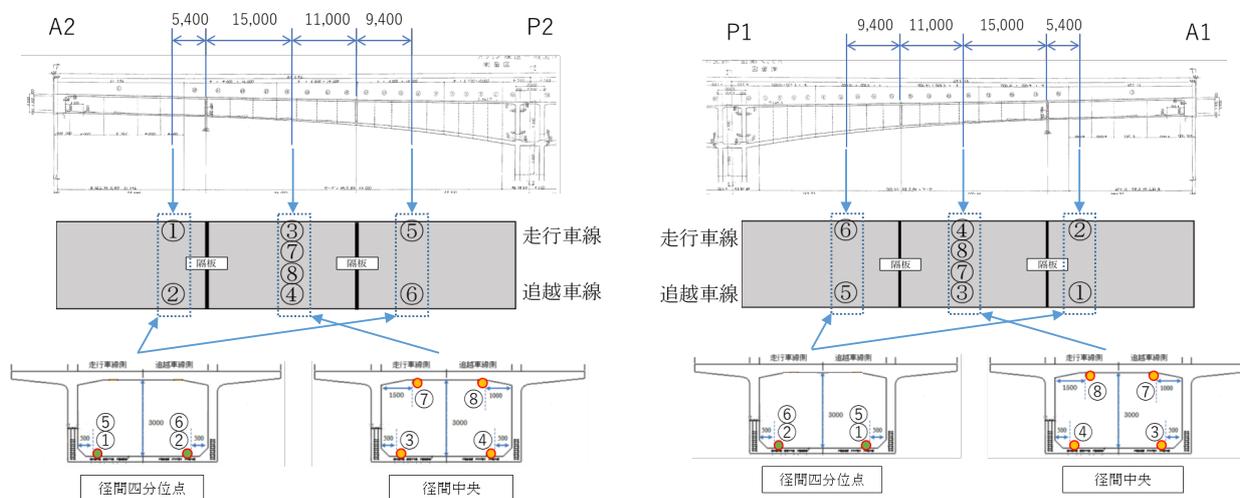


図 6.5.2 2つの径間における加速度センサの設置位置とセンサ番号

計測システム（1システム分）の構成概要を、図 6.5.3 に示す。

なお、本実施例においては、計測システム2つ分として、計測ユニット2台、加速度センサ16台を使用しており、定価ベースの機器費で702万円である。

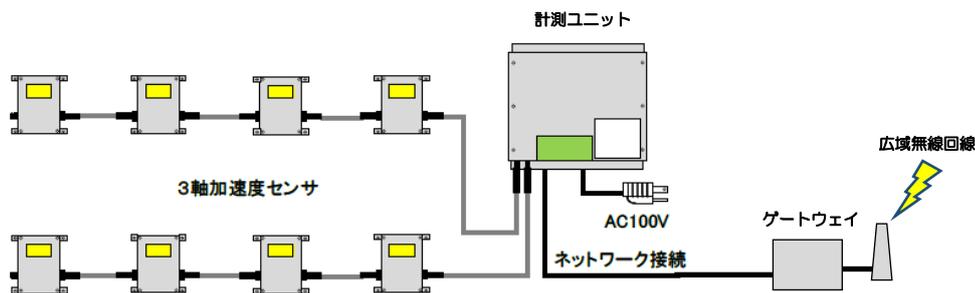


図 6.5.3 計測システム概要図

加速度センサは、予め高耐久性エポキシ系接着剤にて計測点へ接着したベースプレートに組付けた。加速度センサに接続されるケーブル類は、ケーブルの揺れが加速度センサに伝達されるのを防止するため、加速度センサ周辺で適宜固定している。

加速度センサは計測ユニットにカスケードに接続され、計測データは計測ユニット内の記憶媒体へ保存される。計測ユニットへは無線ネットワーク経由でアクセス可能であり、保存された計測データを遠隔地から定期的に取り得ることが可能である。

加速度センサ、及び計測ユニットの設置状況を図 6.5.4～図 6.5.7 に示す。



図 6.5.4 径間中点の加速度センサ設置状況
(赤矢印の先がセンサ設置位置)

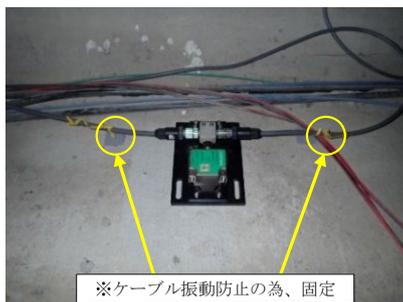


図 6.5.5 下フランジ面の加速度センサ設置状況



図 6.5.6 下フランジ面のセンサ設置状況

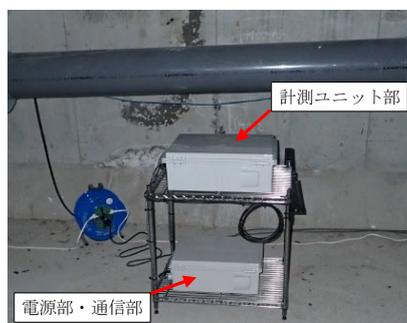


図 6.5.7 計測ユニット部の様子

(2) 試験結果

1) スペクトル解析による振動特性評価

約5か月半の間、常時計測した振動データに対し、フーリエ変換によるスペクトル解析を実施した。

解析結果の例として、A2-P2 径間の走行車線側に設置したセンサの振動データから算出した、計測期間における平均パワースペクトルを図 6.5.8 に示す。また、2つの径間の径間中点の走行車線側に設置した加速度センサにおけるパワースペクトルを比較した図を図 6.5.9 に示す。

更に、パワースペクトルの経時変化を確認するために作成したスペクトログラムの例として、各径間におけるセンサ No.3 のスペクトログラムを、図 6.5.10、図 6.5.11 に示す。

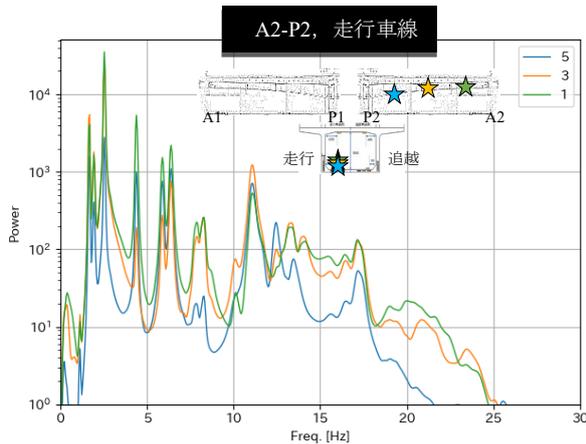


図 6.5.8 A2-P2 径間のパワースペクトル

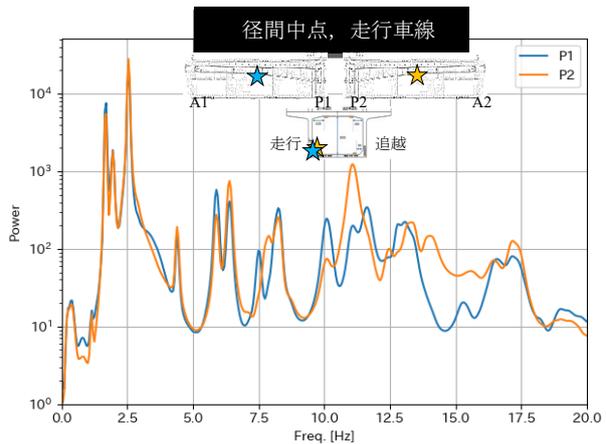


図 6.5.9 2つの径間のパワースペクトル比較

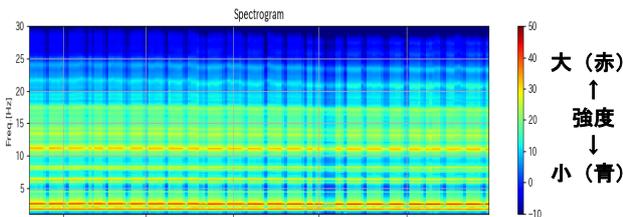


図 6.5.10 A1-P1 径間のスペクトログラム

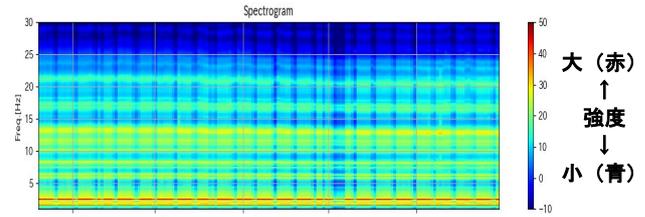


図 6.5.11 A2-P2 径間のスペクトログラム

図 6.5.8 から、本橋梁のパワースペクトルには、複数のスペクトルピークが存在しており、高周波側(7Hz~)では計測位置によって異なるスペクトル分布を示していることが判る。また図 6.5.9 から、損傷状況が異なる2つの径間においても、高周波側のスペクトル分布の差異が見られる。

変状発生前のデータが無いことから、高周波側のスペクトル分布の差異の要因として、変状の存在による影響と各径間にある構造の違いによる影響とを今回の計測結果のみでは判別できない。

しかしながら、図 6.5.10、図 6.5.11 のスペクトログラムにおいて、パワースペクトルの分布形状(色の分布)が水平方向に並んでいることから、計測期間において、時間経過による振動特性の変化はなく、本橋梁の剛性が安定していることを確認できる。

2) たわみ(活荷重変位)による振動特性評価

本ガイドラインの4編4章に加速度センサによるモニタリングの技術として記載されている、「たわみ(活荷重変位)」について、本橋梁においても解析を適用した。

約5か月半の間、常時計測して得られた加速度データに対し、2階積分によるたわみ(活荷重変位)の算出を実施した。計測期間中に発生したたわみについて、たわみ量毎の発生頻度を集計した、たわみ発生頻度ヒストグラムを図 6.5.12、図 6.5.13 に示す。

また、ヒストグラムの経時変化を確認するために、1日毎のたわみ発生頻度ヒストグラムの経時変化を表すカラーマップ作成した。例としてA2-P2径間のセンサNo.3におけるたわみ発生頻度のカラーマップを図6.5.14に示す。

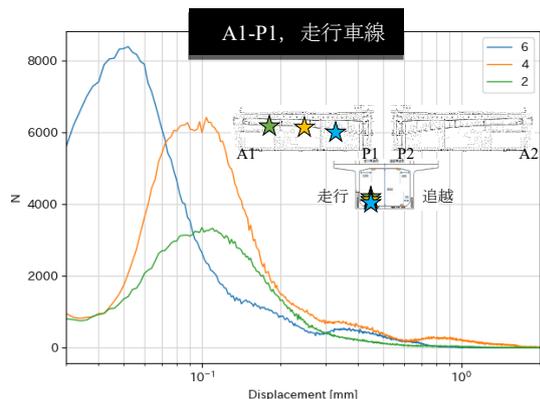


図 6.5.12 A1-P1 径間走行車線のたわみ発生頻度ヒストグラム

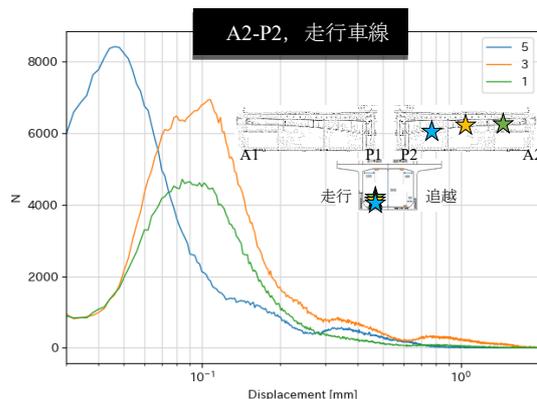


図 6.5.13 A2-P2 径間走行車線のたわみ発生頻度ヒストグラム

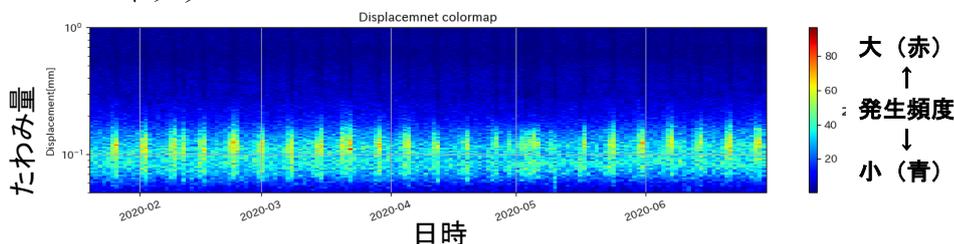


図 6.5.14 A2-P2 径間 No.3 におけるたわみ発生頻度カラーマップ

図 6.5.12, 図 6.5.13 から、損傷状況の異なる2つの径間のヒストグラム分布について、ほとんど差異が無いことが判る。たわみによるモニタリングでは、計測対象の剛性変化をたわみ量の変化として捉える為、本橋梁で発生している変状の程度では剛性変化がほとんど発生しておらず、たわみ量の変化として捉えることが出来ないと考えられる。

一方、図 6.5.14 のカラーマップから、交通量の違い(平日, 休日)による発生頻度の変化(カラー分布の差異)があるものの、たわみ発生頻度ヒストグラムの分布形状は水平方向に並んでいることが判る。

このことから、たわみの解析の結果においても、スペクトル解析の解析結果と同様に、計測期間中において、本橋梁における振動特性が変化しておらず、剛性が安定していることを確認できる。

(3) まとめ

本適用事例では、加速度センサを用い、損傷状況の異なる2径間において振動データを計測し、橋梁の振動特性(スペクトル解析, たわみ)を解析することで、橋梁の剛性を評価した事例について示した。

解析した2つの振動特性における今回の解析結果だけでは、本橋梁における変状の影響による剛性変化を判別できなかった。しかし、計測期間中における本橋梁の剛性の安定性を確認することができた為、今後、確認されている変状の進行、或いは他の要因による橋梁の剛性変化が発生した場合には、今回の解析結果を活用し、加速度センサを用いた振動特性による健全性の診断が可能である。

加速度センサにより得られる振動特性は、構造体全体の剛性の状況を反映するため、剛性に影響を及ぼさない様な局所的な変状の発生に対する感度は高くないが、広域的に構造体全体の状態変化を診断する手段として優れている。継続的なモニタリングにより、劣化進行度の診断、目視では確認できない重大変状発生を検知等、維持管理手段の高度化に活用できると考える。

6.6 桁端部の異常検知モニタリングの実橋載荷試験への適用【3編5章の事例①】

(1) 適用事例の概要

老朽化した橋梁の載荷試験において、桁端異常検知モニタリングを適用した事例について紹介する。桁端異常検知モニタリングは、主に自治体が管理する橋梁で、措置の一つである監視をする場合に本技術を活用して、橋梁の維持管理を効率化することを想定している。

具体的には、橋梁の桁端部における遊間の開きや段差等の異常を検知することによって、近接目視を行わずに桁端部の状態を把握し、橋梁桁端部の異常を現地で知らせるモニタリング技術である。

本モニタリング技術の実橋での適用性を確認するため、土木研究所により耐荷力試験が実施された実橋に本モニタリング技術を適用し、載荷試験に伴う桁の変形によって生じる桁端部の異常検知の可否を確認した。

なお、耐荷力試験は既設橋梁の耐荷力を評価する技術の確立に向けて実施され、実橋の主桁の破壊まで想定した耐荷力試験は国内初の試みである¹⁾。この試験で桁が大きく変形し桁端に異常が生じる状況を想定して、本モニタリング技術の適用を行った²⁾。

(2) 実況載荷試験の概要

1) 橋梁の概要

本試験の対象とした橋梁は、北海道において塩害による損傷のため架替となった橋梁である。図 6.6.1 に全景、表 6.6.1 に橋梁諸元を示す。本橋は塩害による劣化損傷が著しく、耐震性能も現在の基準を満足していないことから、新橋が本橋に隣接して建設され、撤去される予定であった。



表 6.6.1 対象橋の緒元

項目	内容
架 設 年	1960年(昭和35年)
橋 梁 規 格	TL-20(1等橋)
橋 長	l=180.3 5径間 (载荷径間支間長 35.2m)
幅 員	W=6.0m(0.25+5.50+0.25)
上部工形式	単純PCポステンT桁5連 4主桁
下部工形式	半重力式橋台 N=2基 壁式橋脚 N=4基(RC構造)
基礎工形式	オープンケーソン基礎 N=6基

図 6.6.1 対象橋の外景

2) 損傷概要

本橋は竣工後 57 年が経過しており、日本海沿岸からの距離が約 170m と飛来塩分の影響を多く受ける環境に位置している。そのため、塩害損傷が著しく、载荷径間においても、内部鋼材の腐食に起因する主桁のひび割れやコンクリートの剥離が生じている (図 6.6.2)。



図 6.6.2 損傷状況 (剥離, 内部鋼材腐食)

3) 載荷試験概要

載荷径間は、河川敷のある第1径間とした。載荷位置および方法はG1桁支間中央への1点集中載荷とした。載荷及び計測には、グラウンドアンカーによる載荷装置、および計測機器を設置した(図6.6.3, 図6.6.4)。載荷は、各段階において変形状況や損傷状況を把握するため、大きく3段階に分けて載荷した。載荷ステップを図6.6.5に示す。



図 6.6.3 載荷試験全景

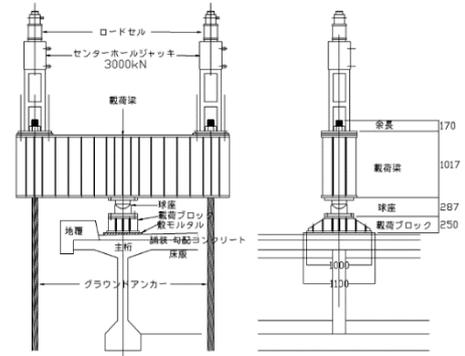


図 6.6.4 載荷装置

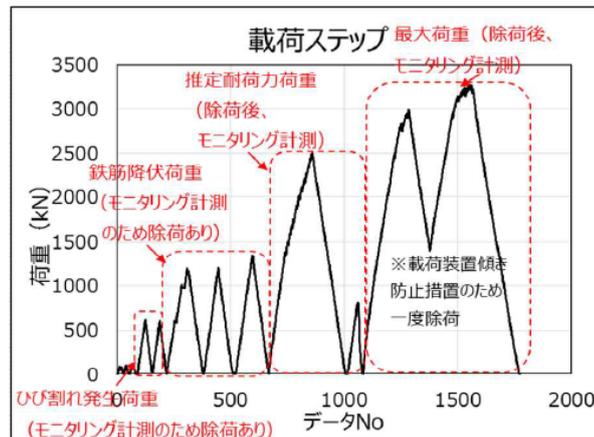


図 6.6.5 載荷ステップ

(3) 適用したモニタリングの概要

1) センサの設置

市販の防犯センサ(マグネット式センサ)に改良を加えて、センサが3~5mm開くと感知するように調整した。センサを桁端及び支間中央部のひび割れ部に設置した(図6.6.6, 図6.6.7)。

センサは桁側面に固定したプラスチック板の上に設置した。橋梁表面とプラスチック板、プラスチック板とセンサの設置には接着剤を使用した(図6.6.8)。

センサが変位を感知すれば、無線によりセンサから検知器に信号が飛ばされ、検知器が反応する仕組みになっている。なお、センサによるモニタリングと同時に、コンクリートマイクを対象桁に設置し、載荷時の破壊音をモニタリングした(図6.6.6)。

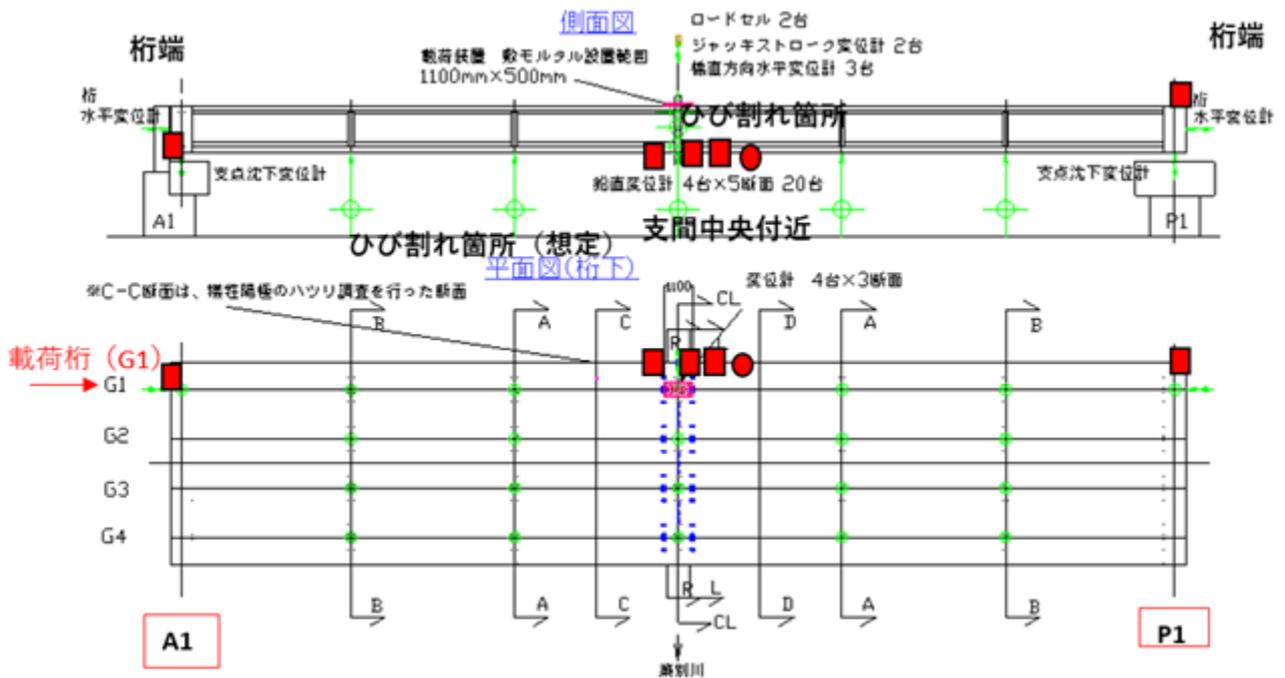


図 6.6.6 センサ設置箇所 (■ : センサ, ● : コンクリートマイク)



図 6.6.7 センサ設置状況 (桁端部)



図 6.6.8 センサ設置作業状況

2) モニタリング計測

モニタリング中にセンサ等の機材の操作は不要であり、センサが異常な変位を感知すれば、無線によりセンサから検知器に信号が飛ばされ、検知器が反応する仕組みになっている。中継器を用いれば、センサと検知器は、約 100m 以上離して設置することが可能である。図 6.6.9 にセンサの検知器と記録状況を示す。なお、載荷時には、センサによるモニタリングと同時に、コンクリートマイクを対象桁に設置 (図 6.6.10) してコンクリート内部の破壊音をモニタリングしながら、センサの検知状況を記録した。



図 6.6.9 検知器および記録状況

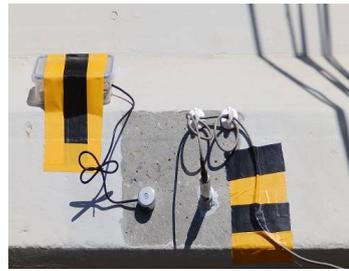


図 6.6.10 コンクリートマイク設置状況

(4) 試験結果

1) 橋梁の破壊状況

G1 桁支間中央では、推定耐荷力である 2500kN 載荷時に約 150mm の鉛直変位が生じ、終局荷重である 3300kN 載荷時に約 400mm の鉛直変位が生じた。図 6.6.11 に桁中央部の変形状況を示す。



図 6.6.11 桁中央部の変形状況

2) モニタリング結果

載荷試験時において、センサが反応した結果を表 6.6.2 に示す。初日の鉄筋降伏荷重までの載荷では、P1 地覆部が感知した。また、2 日目の推定耐荷重までの載荷では、まず A1 桁端部が感知し、次いで P1 地覆部、最後に桁下中央のひび割れ部が感知した。3 日目の最大荷重までの載荷では、A1 桁端部と P1 地覆部が感知した (図 6.6.12)。

このように、実橋の載荷試験において、桁端部及び桁中央部にセンサを設置し、桁の変形に伴う目地やひび割れ部の開きをモニタリングすることの有効性を明らかにした。

表 6.6.2 センサ感知結果

鉄筋降伏荷重まで(2017/7/26)

時間	感知した位置、荷重(kN)、支間中央のたわみ(mm)
11:38	P1地覆部、1000kN、22mm

推定耐荷重まで(2017/7/27)

時間	感知した位置、荷重(kN)、支間中央のたわみ(mm)
10:32	A1桁端部、1000kN、27mm
12:08	P1地覆部、2200kN、103mm
12:23	ひび割れ部、2480kN、138mm

最大荷重まで(2017/7/28)

時間	感知した位置、荷重(kN)、支間中央のたわみ(mm)
9:25	A1桁端部、1200kN、62mm
9:33	P1地覆部、1720kN、97mm

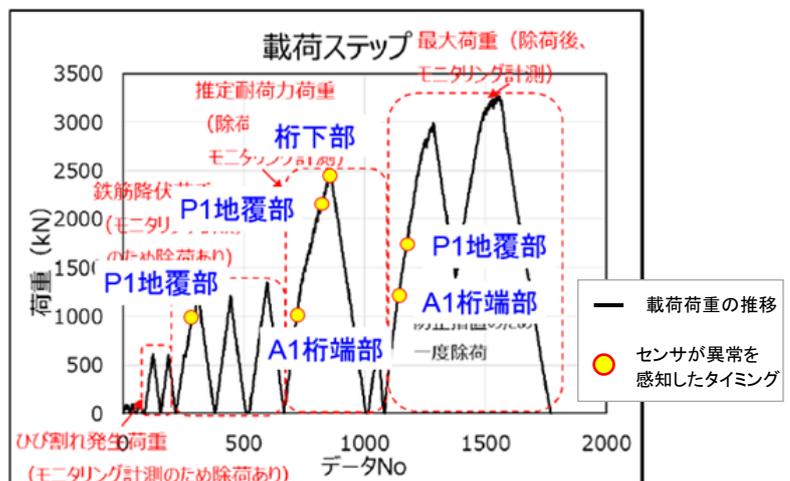


図 6.6.12 載荷ステップにおけるセンサ感知状況

(5) まとめ

実橋の载荷実験で、桁端部及び中央部の目地やひび割れの開きを検知し、モニタリングすることができた。とくに桁端部に設置したセンサが良く反応した。最大荷重付近では、ひび割れを跨いで設置したセンサも反応した。桁端部のセンサが反応した理由としては、桁がたわむと端部が反り上がり、端部同士のずれが生じることなどが原因であると考えられた (図 6.6.13)。

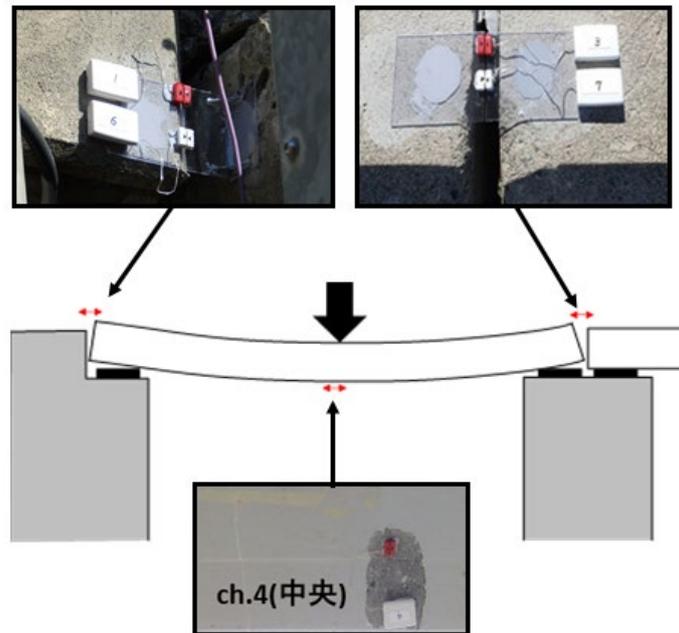


図 6.6.13 桁たわみと桁端部挙動・センサ位置の関係

センサの橋梁への適用例を図 6.6.14 に示す。センサを目地部及び支間中央部等の構造的な (外力による) ひび割れに設置する。供用環境下で目地部またはひび割れ部の開口が生じた場合、受信部が反応し、親柱等に設置した LED 式ライトが点滅するシステムが自治体橋梁に設置されている。このようなシステムであれば、乾電池等バッテリーで稼動可能であり、10~30 万円程度で設置、運用が可能である。また、異常検知時に管理者にメール等で異常を知らせるシステムも付加することが可能である。

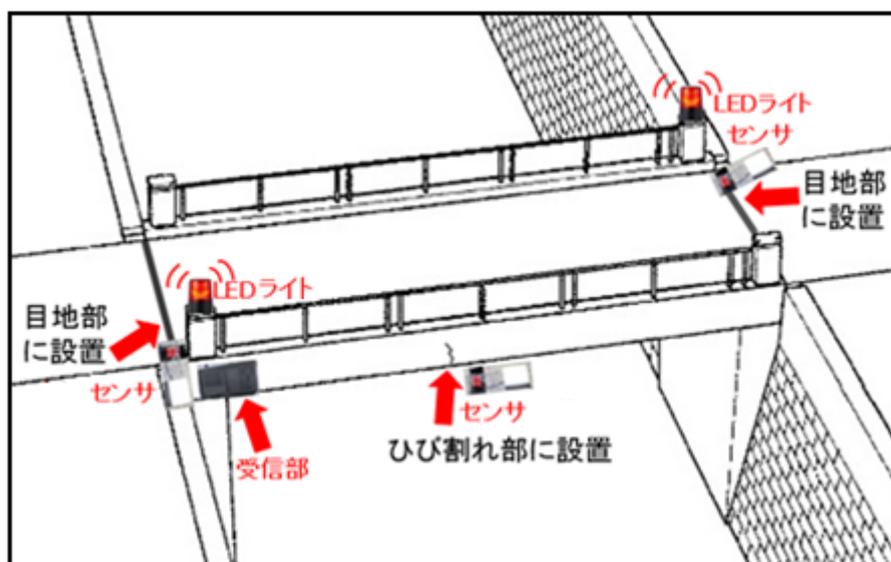


図 6.6.14 桁端異常検知モニタリングシステムの例

参考文献

- 1) 平田, 藤野戸, 石田 : 国道 232 号旧築別橋における実橋耐荷力試験, 第 61 回北海道開発技術研究発表会資料, 推進 1, pp.1-5, 2018
- 2) 西原, 松山, 近藤, 吉良美咲, 石田, 山口 : 塩害橋梁における簡易モニタリングの適用性に関する研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集 CS9-20, pp.39-40, 2018

6.7 桁端異常検知モニタリング【3編5章の事例②】

「自治体橋梁における桁端部異常検知および通信のモニタリング」

(1) 適用事例の概要

1) 自治体橋梁へのモニタリングシステムの適用

地方自治体が管理する小規模橋梁において、異常な変位の有無を検知するセンサを用いて、橋梁の桁端部の異常を検知し、利用者および管理者に警告・通知するシステムを適用した事例を紹介する。

橋梁の維持管理において、とくに地方自治体では、限られた人員や予算の中で、自らが管理する橋梁を巡回し、監視することは困難である。「桁端部異常検知モニタリングシステム」によって、自治体の橋梁維持管理を補助することを目的として実橋梁への適用を行った。

2) 橋梁の概要

対象橋梁は、市街地から20km以上離れた山間部の橋梁であり、アクセスには車で1時間程度を要するため、日常的に状況を監視することが困難である。現時点では耐荷性に影響を及ぼす著しい変状は見られないが、今後、伸縮装置からの漏水の影響により主桁（耐候性鋼材）や支承の腐食が懸念される。



図 6.7.1 対象橋梁

(2) モニタリング概要

1) モニタリングの対象とする現象

モニタリングの対象は、桁端部の遊間の開きや段差である。主桁に生じた変状の進展に伴う耐荷性の低下や地震等によって異常が発生することを想定している。

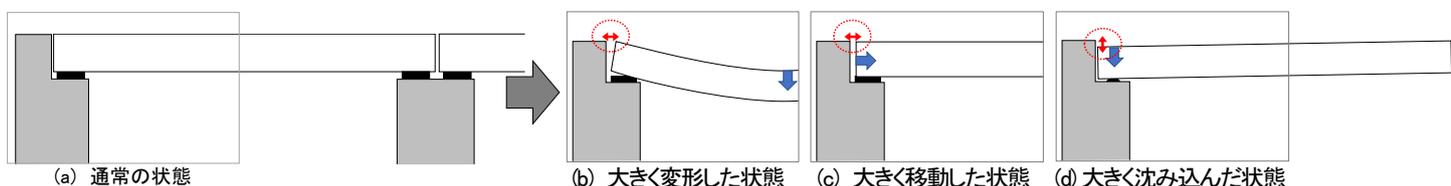


図 6.7.2 桁端部の異常

2) 利用者への警告機能

本モニタリングシステムでは、上述の現象が懸念される橋梁の桁端部にセンサを設置し、センサが異常な変位を検知すると、親柱等に設置した LED 表示灯が点灯して橋梁の利用者や周辺住民に警告するシステムを適用した。



図 6.7.3 利用者への警告機能のイメージ

3) 管理者への通知機能

異常発生を現地で警告する従来の機能に加え、ネットワークを介して管理者に伝送する機能を付加した。異常が発生したことを伝送して通知することにより、管理者がリアルタイムで把握することができる。また、利用者や周辺住民が管理者へ通報する手間を省き、さらに迅速な対応を行うことが可能となる。



図 6.7.4 管理者への通知機能のイメージ

4) 異常検知の原理

異常を検知するセンサとして、マグネット式センサを使用した。マグネット式センサは、通常時にセンサ同士が近接していると、磁力により通電しない状態になっているが、センサ同士がある一定の間隔以上開くと通電する。

このセンサを橋梁の遊間を挟んだ桁端部の地覆等に設置することにより、桁端部の開きや段差による異常な変位の有無を検知することができる。

なお、本橋では桁端部の遊間が 20mm 以上開いた際に検知する設定とした。

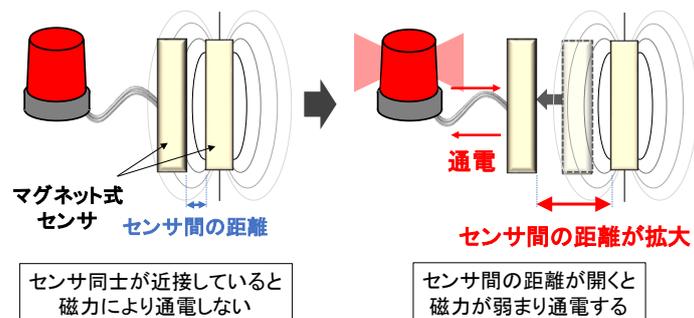


図 6.7.5 異常検知の原理



図 6.7.6 センサの設置位置

5) モニタリングシステムの構成

センサが異常を検知した後、LED 表示灯が点灯するとともに、携帯回線に伝送するまでの通信経路を図に示す。異常検知した際、センサが通電し、センサに接続した送信機から受信機に信号を送る。信号を受信した受信機には LED 表示灯および超小型コンピュータが接続されており、それぞれ、現地での警告（LED 表示灯の点灯）および異常検知データの伝送（携帯回線経由）を行う。

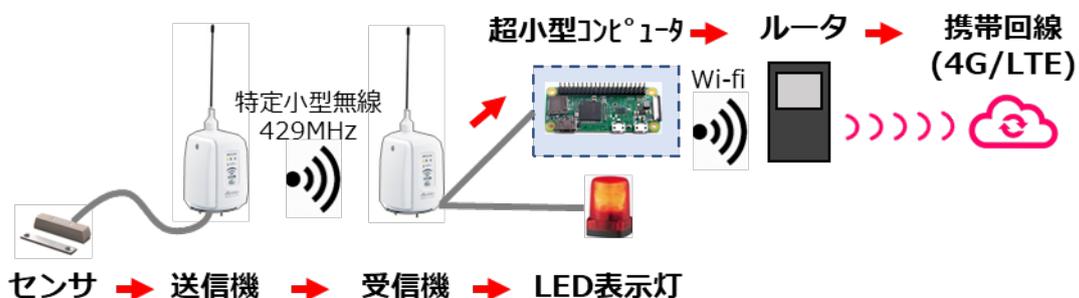


図 6.7.7 モニタリングシステムの構成

(3) モニタリングシステムの適用結果

1) モニタリングシステムの設置

センサは桁端部の両側の地覆部に1箇所ずつ、計4箇所に設置した。また送信機・受信機・LED表示灯は親柱上に設置した。センサの設置時は不陸及び高さ調整用プラスチック板を使用し、両面テープで固定した。

通信機器は受信機と接続し、バッテリーと共にプラスチックボックスの中に格納した状態で、現地に設置した。なお、通信機器の消費電力は1~8W程度と小さいが、長期間のモニタリングを行うためには大容量バッテリーやソーラーパネルによる給電、商用電源等、状況に応じて電源供給方法を検討する必要がある。

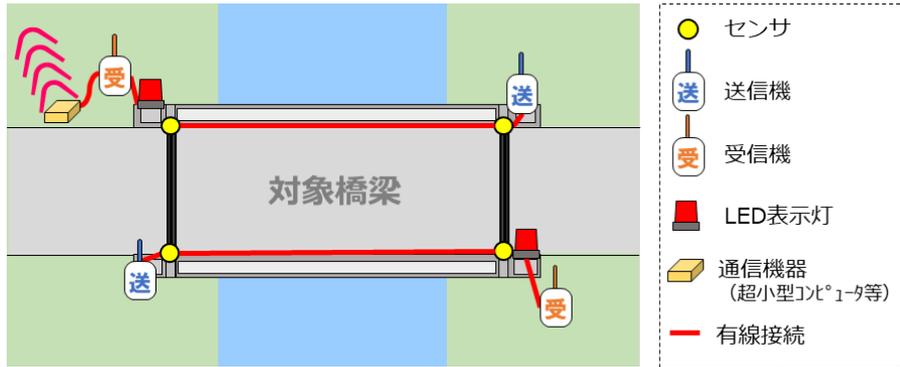


図 6.7.8 モニタリングシステムの設置箇所



図 6.7.9 モニタリングシステムの設置状況

2) 動作確認

センサの設置時は不陸及び高さ調整用プラスチック板を使用し、両面テープで固定した。また、設置後には動作確認を行い、モニタリングシステムが適切に動作することを確認した。

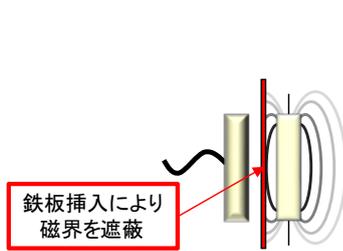


図 6.7.10 動作確認の原理



図 6.7.11 動作確認状況



図 6.7.12 動作確認時の点灯状況

3) 伝送により付加した機能

伝送により，以下の機能を付加した。

①警告メールの送信機能

異常検知時に，登録したメールアドレス宛に警告メールを送信する機能である。管理者は橋梁の異常発生をリアルタイムで把握することが可能となる。



図 6.7.13 警告メール送信機能のイメージ

②Web での状態確認機能

橋梁の異常の有無を Web ブラウザで確認できる機能である。この機能により管理者は橋梁の状態（桁端部の異常の有無）を常時確認することが可能となる。また，本機能では異常発生履歴を確認することができる。

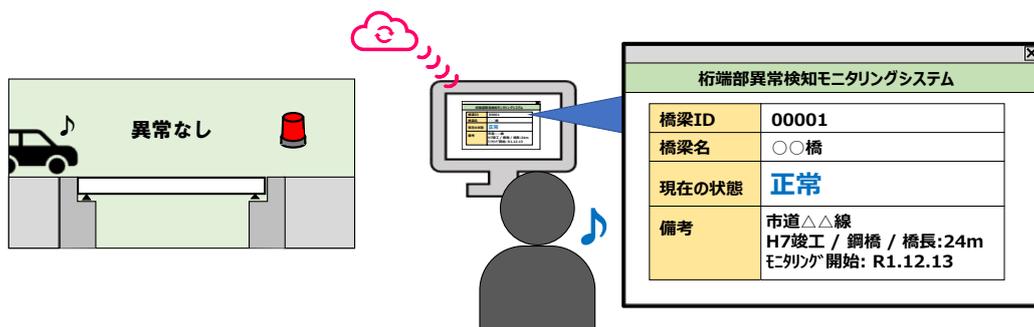


図 6.7.14 Web での状態確認機能のイメージ

(3) まとめ

本事例では，地方自治体が管理する橋梁に「桁端部異常検知モニタリングシステム」を適用し，橋梁の桁端部に開きや段差等の異常が発生した際に，LED 表示灯による現地での警告および管理者にメールで通知するしくみを構築した。また，Web での状態確認機能により，常時橋梁の状態（桁端部の異常の有無）を確認可能なシステムとした。

地方自治体によっては，独自のネットワークを構築している場合など，状況は様々に異なると思われるため，本モニタリングシステムをカスタマイズすることで，橋梁の状態や人員体制，予算に応じたシステムの導入が可能である。

6.8 光ファイバひずみセンサによるプレストレス損失の可能性検知

(1) 適用事例の概要

1) 技術の概要

プレストレストコンクリート橋は、建設時において、コンクリート内部に配置した PC 鋼材を緊張することで、主桁コンクリートに大きな圧縮応力（圧縮ひずみ）が導入されている。PC 鋼材はシースと呼ばれるコンクリート内部のダクト内に配置され、緊張作業後、このシース内の空隙にグラウトと呼ばれるセメントペーストを注入し防錆をしているが、このグラウト注入が不十分であった場合、塩化物イオンがシース内に侵入し、PC 鋼材に腐食が発生する可能性がある。これを長年放置し、さらに腐食が進行すると、PC 鋼材が破断するなどして、主桁コンクリートに導入されていた圧縮ひずみ（プレストレス）が減少し、橋梁の安全性が低下することになる。

一般的に、プレストレストコンクリート橋は、設計活荷重作用時に引張応力が発生しないように圧縮ひずみの導入量が設計され、約 300~600 μ 程度と非常に大きな圧縮ひずみが導入されている。このため、多少の PC 鋼材の腐食、プレストレスの損失では、ひび割れが発生することはない、目視点検では、初期段階のプレストレス損失を検知することは困難と考えられている。PC 鋼材の腐食破断が、およそ全体の 40~50% まで進行すると、死荷重状態でも、ひび割れが発生するが、その時点では、橋梁の安全性が大きく損なわれ、危険な状態となっている。

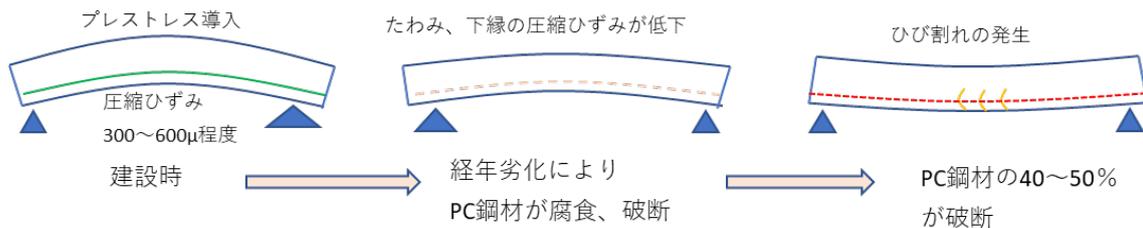


図 6.8.1 プレストレス損失による橋梁の変化

そこで、ひずみセンサにより、プレストレス導入方向の死荷重ひずみ（静ひずみ）の変化を測定することで、初期段階のプレストレス損失の可能性を検知する。

PC 鋼材の腐食は、比較的、緩やかに進行することが多いため、計測期間は長期間に及ぶものと考えられる。そこで、経年劣化の懸念が少ない材料のみで構成する FBG 光ファイバひずみセンサを用いることで、数十年に及ぶ長期信頼性を有するモニタリングシステムを構築する。

2) システムの概要

① FBG 光ファイバひずみセンサ

FBG (Fiber Bragg Grating) とは、光ファイバの局所に紫外線レーザを照射することで、光ファイバ内部に一定間隔の回折格子を形成し、この格子から反射する光の波長によって、格子部の間隔変化 (=ひずみ) や温度変化を検出する技術である。

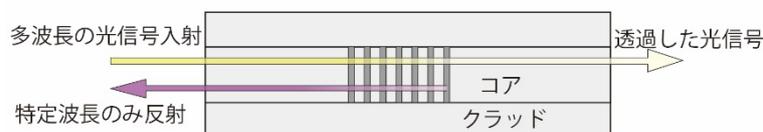


図 6.8.2 FBG の概要

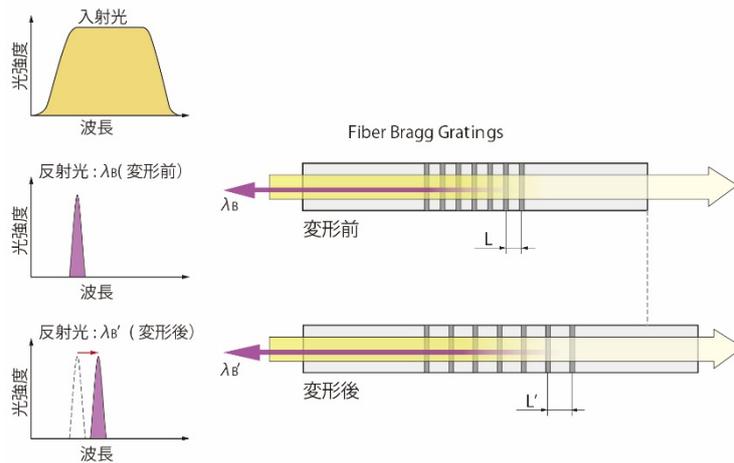


図 6.8.3 FBG 光ファイバセンシングの原理

FBG 光ファイバひずみセンサとは、FBG を形成した光ファイバの両外側に、長期安定性の高いガラス融着等の技術によりステンレス製のプレート（以下、SUS 固定版）を固定し、この SUS 固定版をステンレス製アンカーでコンクリートに固定したものである。SUS 固定版間の光ファイバにはテンションを導入する必要があるが、あらかじめテンションが導入された製品と、現場で SUS 固定版をコンクリートに固定した後に導入する製品の 2 種類がある。

SUS 固定版の間隔は自由に設定することができ、この 2 点間の平均ひずみ（＝伸縮量/センサ長）を測定する。ひび割れが多い構造物では、センサ長を 1m 以上のロングゲージとすることで、局所的な影響を受けないひずみ測定が可能である。

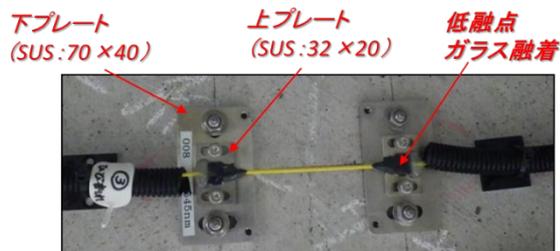


図 6.8.4 FBG 光ファイバひずみセンサの例

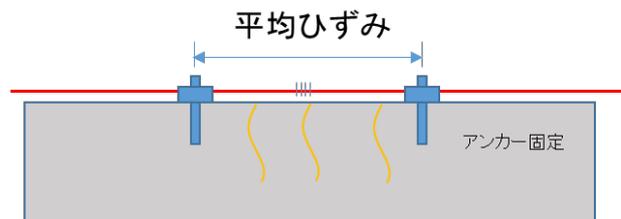


図 6.8.5 FBG 光ファイバひずみセンサの概要

FBG 光ファイバの測定波長は、回折格子の間隔変化と屈折率変化によって変化するが、ひずみ成分は主に回折格子の間隔変化に依存し、温度成分は主に屈折率の変化に依存する。このため、構造物に固定せずに、ひずみが生じない無拘束センサを別途配置し、これとの差分をとることによって、温度補正したひずみを算定することができる。

温度補正後のひずみ＝(FBG 光ファイバひずみセンサの波長－無拘束センサの波長) × 校正係数

ここで、校正係数：各センサの試験成績書による（およそ $800 \mu / \text{nm}$ 程度）

② FBG 光ファイバひずみセンサの特徴

- FBG 光ファイバひずみセンサの精度は、電気型ひずみゲージと同等の精度・分解能 (1μ) を有し、1000Hz の高速計測が可能である。
- 配線が直列配置であり、センサ設置作業および測定作業が容易である。

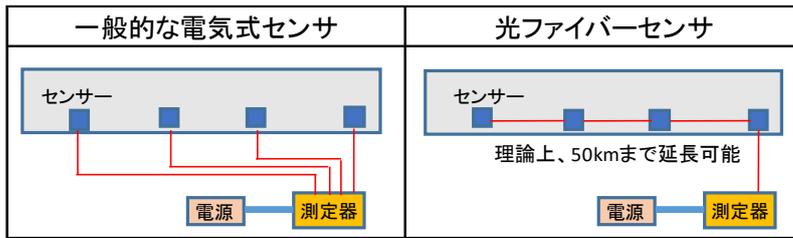


図 6.8.6 センサの配置比較

FBG 光ファイバは、製作時の回折格子の間隔により、センサごとに固有の基本波長が割り当てられているため、1本の線で繋げても、個別のセンサが識別できる。図 6.8.7 に、6 個のセンサを直列接続した場合の測定器表示を示す。現場設置作業においては、配線識別の必要がなく、また基本波長が重複しないセンサであれば任意の位置に追加することが可能である。

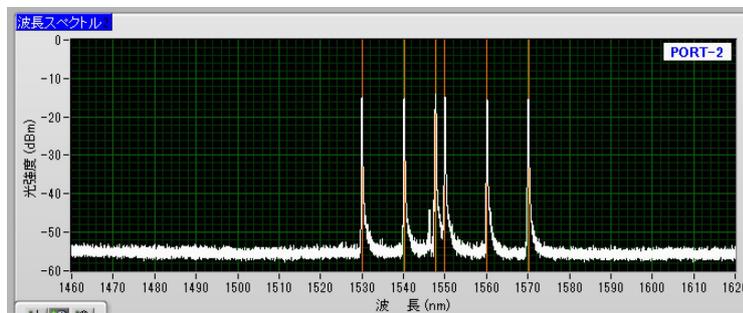


図 6.8.7 FBG 光ファイバの波長表示

- ・光ファイバの距離減衰は極めて小さく、理論上は約 50km まで可能で、接続具等による損失を考慮しても数 km 程度は可能である。測定器の設置場所を遠方に設定することや、数 km 程度離れた橋梁を一つのシステムで測定することが可能となる。
- ・電磁の影響を受けないため、現場フィールドにおいてもノイズが極めて小さい。
- ・光ファイバは、紫外線、湿気等の劣化要因があるものの、被覆材により抑制することができ、極めて耐久性が高い材料である。劣化が生じた場合も、光の強度が減衰するだけで、反射波長への影響は小さく、センサとしての機能は長期に保たれる。

③ モニタリングシステム

主桁コンクリートは、気温変化による熱ひずみが常に変化しており、プレストレス損失の静ひずみを検出するためには、この気温変化による熱ひずみを補正する必要がある。

そこで、プレストレスが導入されている方向と、プレストレスが導入されていない方向の 2 箇所に、FBG 光ファイバひずみセンサを設置し、そのひずみの値の差を取ることで熱ひずみの影響をキャンセルすることができる。プレストレスの導入方向については、図面等により確認するものとする。一般に、支間中央の下フランジの橋軸方向がプレストレス導入方向であり、プレストレスが導入されていないウェブ鉛直方向のひずみ値に比べ、プレストレス導入方向のひずみ変化が、引張側に進行した場合、プレストレスが損失している可能性があるものとする。

図 6.8.8 に、PC 単純 T 桁(支間 26m)の静ひずみの測定事例を示す。現場には、測定器を常設せず、都度、測定器およびバッテリーを持参し、断続的に測定を実施した事例である。橋軸方向ひずみと鉛

直方向ひずみは、ほぼ一致した挙動を示しており、プレストレスの損失は生じていないものとみなされた。図には、参考として、気象庁発表の現地の日平均気温に、コンクリート線膨張係数を乗じた熱ひずみの推定値を青点線で示している。

変状の進行が緩やかであると判断された場合は、測定頻度を年1回程度とし、ほぼ同じ季節に実施することで、温度補正分が小さくなり、評価精度は高まるものと考えられる。

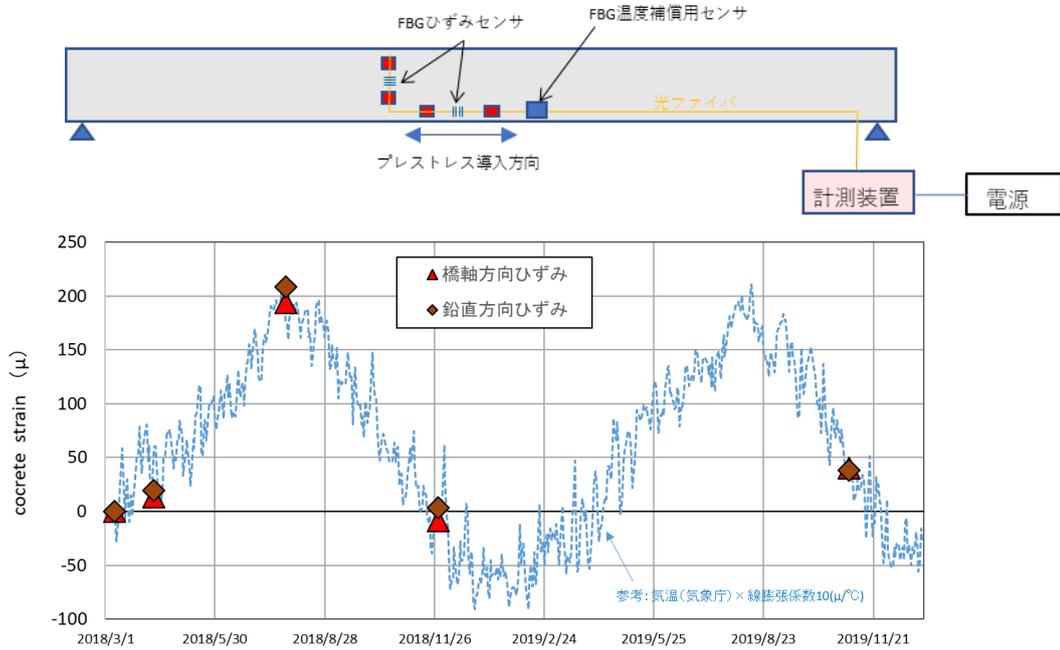


図 6.8.8 PC 単純桁のモニタリング事例

3) 計測の期間

PC 鋼材の腐食の進行は比較的緩やかであり、一般的に常時計測を行う必要はなく、定期的な測定によるものとする。

(2) モニタリングの方法

1) 計画・事前準備

本システムを採用するにあたっては、一般的に次のような検討が必要である。

- ・ センサ設置のためには、必要に応じて高所作業車や足場等を構築し、計測部位に近接する必要がある。ただし、光ファイバ配線ケーブル（以下、光ケーブル）をアクセスが容易な箇所まで配線することで、測定時には、足場等を不要にできる。
- ・ センサは、SUS 固定版によりコンクリート構造物に固定するため、事前に管理者と協議が必要である。
- ・ センサには給電の必要はないが、測定器及びデータ保管装置には 100V の電源が必要となる。現場に電源が確保できない場合、次のいずれかにより、24 時間程度の連続稼働が可能である。
 - a) リチウムイオン電池ポータブル電源 700Wh ×2 台
 - b) カーバッテリー 120Ah ×2 台

センサ設置計画にあたっては、次のような検討が必要である。

- ・ 調査対象橋梁の図面、可能なかぎり計算書を手し、その構造特性から、プレストレス損失によ

る影響が最も大きくなる部位(例えば、単純桁であれば支間中央)の推定を行う。

- ・ 現地踏査により、センサ設置位置の状況確認及び測定器設置場所を選定する。
- ・ センサの設置箇所の形状、状況によって、所要のセンサ長を計画する。
- ・ 配線用の光ケーブルは湿気によって膨張し、光透過量が低減するため、雨水がかかる箇所では、防水保護が必要である。

2) 機材の準備

センサ設置作業及び測定作業時の、一般的な必要機器を表 6.8.1 に示す。また、現場状況に応じて、足場、高所作業車、橋梁点検車等の計画が必要になる。

表 6.8.1 調査に必要な機器, 工具

	項目	機器名等
設置作業時	1. センサ	
	FBG 光ファイバひずみセンサ	
	温度補正用ダミーセンサ	
	2. 配線材	
	配線用光ケーブル	FC/APC コネクタ
	FC/APC アダプタ, 防護材	
	SUS 固定版	
	3. 使用工具, 資材等	
	充電式ハンマードリル	
工具箱	六角レンチ, ドライバー等	
測定作業時	4. 測定機材 (都度持ち込み : 現場には常置しない)	
	FBG 光ファイバ測定器	
	ノートパソコン	データ収録ソフト
	ポータブル電源	24 時間測定の場合, 700Wh×2 台



図 6.8.9 FC/APC コネクタ



図 6.8.10 FC/APC アダプタ



図 6.8.11 FBG 光ファイバ測定器の例



図 6.8.12 ポータブルバッテリーの例

3) センサ設置手順

一般的なセンサの設置手順を以下に示す。

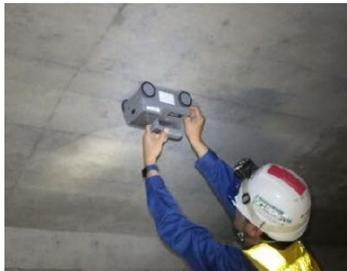
①センサ検品

全てのひずみセンサに光を通し，通光および波長を確認



②ひずみセンサ

設置位置の決定→設置位置の配筋調査（鉄筋探査レーダ）→設置（アンカーボルト固定）



③プレテンション導入

各ひずみセンサにプレテンションを導入

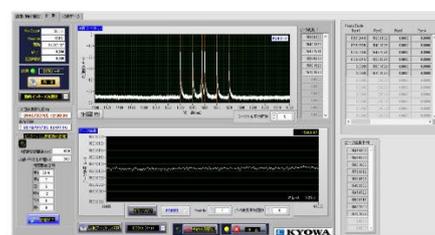
④配線

各センサを繋ぐ光ファイバを配線（橋梁両端まで）



⑤通光確認

橋梁各端部の光ファイバを計測器に接続して光を通し，パソコンソフト上にて，全センサの波長が見られること，波長や光の強度から正常に動作していることを確認



パソコンソフト画面の例

4) 測定

- ・ 年1回程度の測定を計画した場合、測定器、データ保管装置(ノートパソコン)および電源(例えば、ポータブル電源やカーバッテリー等)を都度持参し、一時的に設置する。
- ・ 測定器への接続は光ファイバ1~2本のみであり、測定準備作業は15分程度で完了する。
- ・ 可能なかぎり、24時間程度の測定を実施し、気温変化により測定値が正常に変化していることを確認する。



図 6.8.13 測定システムの構成例

5) 費用の目安

- 【計画】 図面調査、現地踏査等 橋梁ケースにより異なる
- 【設置】 約 180 万円 ※センサ 2 箇所設置の場合 (足場・高所作業車は別途)
- 材料費 センサ購入 60 万円+配線材等 40 万円
- 労務費 80 万円 (2 人×2 日)
- 【計測】 約 50 万円/回
- 測定労務費 40 万円 (測定器損料含む)
- 解析作業 10 万円 ※変状がない場合
- 変状が確認された場合の対応は別業務

(3) 結果の評価

- ・ 本手法は、基本的にクリープ乾燥収縮が終了したと考えられる建設後3年以上のPC橋に適用する。クリープや乾燥収縮が収束していないと考えられる建設後2~3年のPC橋に適用する場合は、設計計算上想定されるクリープ・乾燥収縮のひずみ変化と比較するなど、別途検討を行う必要がある。
- ・ プレストレス導入方向と、プレストレスを導入していない方向のひずみが一致している場合は、プレストレス損失の可能性は低いと判断できる(図6.8.8参照)。
- ・ プレストレスを導入していない鉛直方向のひずみに比べ、プレストレスを導入している方向のひずみが、引張側に大きくなる場合は、プレストレス損失が進行している可能性があるかと判断し、

測定頻度を上げるとともに、グラウト未充填位置調査やPC鋼材破断調査等の詳細な調査に移行する。

- ・ 詳細な調査により、グラウト未充填箇所またはPC鋼材の破断が確認された場合、必要に応じて、グラウト再注入工事や、外ケーブル補強工事を計画する。
- ・ 補修工事後もモニタリングを継続することで、補修工事の効果を確認することができる。

(4) 保守

- ・ 現場には、センサおよび配線端末のみとするので、特に保守の必要はない。
- ・ 配線用光ケーブルの長さを計測途中で変更すと波長がシフトするため、変更する場合はその前後で測定し、シフト量を補正する必要がある。

(5) まとめ

本事例では、FBG光ファイバひずみセンサを用いて、プレストレス導入方向の死荷重ひずみの変化を測定し、初期段階のプレストレス損失の可能性を検知する事例について示した。

PC鋼材の腐食は、比較的、緩やかに進行することが多いため、計測期間は長期間に及ぶものと考えられる。本モニタリング技術では、経年劣化の懸念が少ない材料のみで構成するFBG光ファイバひずみセンサを用いることで、数十年に及ぶ長期信頼性を有するモニタリングシステムを構築できる。

参考文献

- 1) 玉置, 杉谷, 土地, 森川 : FBG光ファイバを用いた橋梁モニタリング技術の実橋検証, コンクリート工学年次論文集 Vol. 39, No. 2, pp1303-1308, 2017
- 2) 玉置, 杉谷, 菅沼, 森川 : ICTを活用した新しい橋梁維持管理手法の提案, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 26th, pp651-656, 2017
- 3) 玉置, 湯浅, 森川, 殿井, 高橋 : 重交通下における既設PC単純桁の動的挙動に関する一考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Vol118, pp63-68, 2018
- 4) Tamaki.K, Yuasa.K, Morikawa.H, Takemoto.O : Verification of Bridge Monitoring System using FBG Optical Fiber Sensors on Existing Prestressed Concrete Bridge, Proceeding of the fib Symposium 2019, pp1098-1105, 2019
- 5) 長野計器 FBG光ファイバセンサ技術 : 2016年

添付資料 1：用語集

用語	意味	類義語・関連語
色変換	様々存在する色情報の表現形式（三原色，輝度＋色差など）を所望の表現形式へと変換すること。人間にとっての見栄えを優先して変換を行った場合，物理的な計測情報が失われる。	
浮き・剥離	かぶり厚さが比較的少ない場合に鉄筋腐食によってコンクリート片が押し出された状態をいう。	
温度依存性	環境温度に依存して，計測値や性能変動する特性のこと。程度差はあるが，万物に温度依存性は存在する。	温度特性
温度スパン	赤外線カメラで撮影・表示した赤外線画像の温度分布を，色若しくは白黒の濃淡で表示する場合の表示温度範囲の最大値と最小値の幅。	
温度変化部	赤外線画像から変状箇所と判断される，健全部と表面温度が異なる範囲をいう。	
温度ロガー	放射温度を測定する非接触型，若しくは温度変化に対して電気抵抗の変化の大きい抵抗体を用いる接触型の温度計により，一定時間ごとの温度変化を記録できる装置を言う。	
回線容量	単位時間あたりに，通信回線が伝達できる情報量のこと。	
外乱	測定対象の状態を乱す原因となる外的作用。	
可視画像	写真等によって撮影した外観の画像をいう。	
加速度センサ	加速度を計測するセンサ・計測器のこと。	加速度センサデバイス 加速度計
加速度分解能	加速度センサが計測できる最小の単位を指す。	
カットオフ周波数	周波数フィルタにおいて，通過帯域と阻止帯域の境界となる周波数を示す。	遮断周波数
ガンマ変換	画像階調の特性曲線（コントラストなど）を補正すること。人間にとっての見栄えを優先して変換を行った場合，物理的な計測情報が失われる。明るさの調整は，各画素ごとの輝度値を指数関数で変換することによって行う。CCDカメラ等のイメージセンサにおいて，入力光量Eと出力値Dは $D = E^\gamma$ （ γ 特性）と呼ばれる指数関数の関係を持っている。この γ 値によって画素値の変換を行うこと。	ガンマ補正
基準画像	ひび割れ，たわみを算出する際の基準となる画像。通常は，ひび割れの開口や桁のたわみが発生していない時の画像を基準画像に設定する。例えば，撮影時の先頭フレーム画像。	

用語	意味	類義語・関連語
キャリブレーション	計測機器が所定の計測値が得られる様，調整すること。 或いは，機器を交換する際に古い機器と，新しい機器との計測値の間の関係性・相関性を調査し，調整すること。	校正
空間分解能	位置的に隣接した2つの物体を見分ける能力の総称。本篇では，二次元センサを使用した赤外線カメラにおいて映像化できる最小視野角であり，1画素の映し出す画角をmrad（ミリラジアン）で示した値。	
グローバルシャッター	撮影時にイメージセンサの受光素子データを一括で読み出すもの。	
健全部	コンクリート建造物の浮き・剥離及び内部に生じたジャンカや空洞がない状態，或いは，変状箇所の周辺の健全な状態のコンクリートをいう。	
高速フーリエ変換	離散フーリエ変換を計算機上で高速に演算する手法のこと。計測信号を周波数成分に分解・表現するための演算手法の一つ。	FFT
黒体	入射したエネルギーをすべて吸収し，すべての波長と温度で放射強度が最大となる架空の物体をいい，放射率＝1となる。	
固有振動数	ある構造を持つ対象物が自由振動を行う時，その対象物が持つ固有の共振周波数のこと。構造・形状・材料，および密度等により決定される。	卓越振動数
最小温度分解能	ノイズの影響を排除して検知できうる最小温度差を意味する。この値が小さいほど高感度な赤外線カメラとなる。	
最小検知寸法	点検対象面の温度変化を測定可能な，最も小さな点検対象面上の寸法または長さ。	
撮影角度	カメラの光軸と計測対象面の法線ベクトルとの角度。	
撮影距離	対象面と撮影位置との斜距離をいう。	
サンプリング周波数	アナログ信号をデジタル化する際の標本化処理を行う頻度。通常，1秒間に行う標本化処理の回数として表す。	標本化周波数
軸アライメント誤差	複数の計測軸が存在する計測機器，センサが持つ，本来あるべき測定軸の配置と，現実の測定軸の配置の調整誤差のこと。	
自由振動	建造物に外力が作用しない，復元力のみによる振動のこと。振動系に抵抗が存在する場合，減衰振動となる。	

用語	意味	類義語・関連語
周波数スペクトル	信号波形は多数の正弦波の合成波形として表現され、この合成波形の関数として、各正弦波の周波数成分の振幅、或いは振幅と位相を複素数として表現されたものを指す。	
受動型	赤外線法の分類の一つで、測定対象物を強制的に加熱することなく、気温の変化等により自然に発生する温度変化を捉えることにより、変状部を検出する方法	
周波数特性	物理量と周波数の関係性を示したもの。モニタリング分野では特に、計測機器やセンサの持つ周波数に対する計測性能の特性を表したもの。	
照度	撮影する構造物の表面を照らす光の明るさを表す物理量。	
振動減衰時間	構造物に外力が作用しない復元力による振動では、時間と共に振幅が減衰する振動となる。このとき振動の減衰は指数関数的となり、一定比率の減衰が発生に係る時間は一定となり、例えば振幅が1/2となる時間などを指す。	
振動モード	特定の周波数で単振動する構造物の、各点における振動振幅の固有な空間分布を示す振動様式のこと。計算機上で振動モードを解析処理する場合は、振動の様子を確認し易くするために実際の振動より大きく変動した図で表現する。	
スペクトルピーク	パワースペクトルの様な周波数分布のうち卓越した周波数を指す。	ピークスペクトル
スペクトログラム	周波数・振幅分布・時間の三次元で表現されるグラフ。一般的には、横軸が時間を表し、縦軸が周波数を表す。そして、各点の明るさや色である時点のある周波数での強さ（振幅）を表す。	
赤外線画像	コンクリート表面の温度分布を赤外線法による画像で示したものをいう。	
赤外線法	物体から放出される赤外線の波長領域での放射の強さが、物体温度の関数となっていることを利用するもので、健全部と変状箇所との熱伝導の違いによる表面温度の差異を、赤外線カメラによって検出する手法をいう。	
測定軸数	計測機器が一度に測定できる物理量の数。加速度や回転角など一般には直交する同じ物理量の計測数を意味するが、必ずしも同じ物理量が測定できるものを示さない。	

用語	意味	類義語・関連語
対象面角度	赤外線カメラの視準線と対象面との角度をいい、水平を 0° 、鉛直を 90° とする。	
対数減衰率	構造物に外力が作用しない復元力による振動では、時間と共に振幅が減衰する振動となる。このとき振動の減衰は指数関数的となり、隣り合う振幅の比の自然対数をとったものを指す。	
たわみ角	構造部材に、たわみが発生する際に生じる角度。一般には、活荷重により生じた一時的なたわみを除く、非載荷時に残留したたわみにより生じた角度を指す。	残留たわみ角
直線性誤差	計測機器やセンサへ実際に入力される信号レベルに比例せず、理想的な比例直線からの誤差を表す。計測機器やセンサが測定できるフルスケールに対しての比率%で表され、[%FS]と表す。	
直交変換	信号成分を周波数成分に変換する処理の総称。フーリエ変換やコサイン変換などが代表的な直交変換である。	
直接効果	日射が赤外線点検測定面に、直接照射されることにより、点検対象面の温度変化が発生する効果。	
直流加速度	加速度の直流成分、重力加速度	
取付用ベースプレート	センサや計測機器を設置するための台座。設置対象の形状に合わせて作成される。定期的に同じ場所に設置する場合や、機器の交換が計画される場合は特に多用される。	
内部欠陥	コンクリート構造物内部に生じたジャンカや空洞のことをいう。	
日較差	1日の気温の変化量を指し、1日の最高気温と最低気温の差をいう。	
熱環境	ある対象物周辺における日射や気温変化等、外部の熱の状態。	
熱環境測定装置	実際の橋梁で出現する変状箇所を真似て作成したコンクリート供試体等であり、この装置で適切な点検時間帯を把握するもの。	
熱伝達率	異なる物質間の熱の伝わりやすさを表わす係数。接する固体・流体の性質や、流速、個体表面の状態等で異なる。	
熱伝導率	均一な物質内における熱の伝わりやすさを表わす係数。	
熱反射	点検対象周辺の熱源から放射される赤外線が、点検対象物表面に反射して赤外線画像に写りこむ現象。	

用語	意味	類義語・関連語
能動型	赤外線法の分類の一つで、測定対象物を人工的に加熱・冷却することで、測定対象物表面に強制的に温度変化を引き起こし、その温度変化から変状部を検出する方法。	
バイナリ形式	文字以外を含んだデータの形式。 バイナリは2進数の事をいうが、文字（テキスト）も各種文字コード（シフトJIS, Unicodeなど）に従って2進数で表される。一般的には文字だけで構成されるデータ形式をテキスト形式と呼び、それ以外をバイナリ形式と呼ぶ。	
半減期間	振動減衰波形における、振幅が1/2となる期間のこと。	
バンドパスフィルタ	必要な範囲の周波数のみを通させ、不要な範囲の周波数を減衰させるフィルタを表す。光学的、数学的（ソフトウェア的）、電気回路的、力学的など様々な構成があるが、モニタリング分野においては、電気回路的、或いはソフトウェア的な構成を指す事が多い。	
ピクセルサイズ	画像を記録するイメージセンサの画素1つ1つの大きさ。	
ひび割れ開閉量	コンクリート構造物に発生したひび割れが車両走行などの活荷重により開口した時の最大変位量。	
フリッカー	照明器具やディスプレイのような発光装置で発生する細かいちらつき現象。	
フレームレート	動画処理で用いられる1秒間に何枚のフレーム（コマ数）を保存するかの単位。	
ベイヤー配列デモザイキング	三原色フィルタを市松模様状に配したセンサで受光し、補間演算によって全画素の三原色情報を復元する手法。人間にとっての見栄えとセンサコストから発想された方式であり、物理的な真値が復元される保証はない。	
変状箇所	コンクリート構造物の浮き・剥離及び内部に生じたジャンカや空洞がある箇所をいう。	
放射率	物体の赤外線放射エネルギーと、その物体と同一温度である黒体の放射エネルギーとの比である。 ϵ で表され透過しない物体では1=放射率+反射率となる。物体の材質や表面状態、検出波長域により異なる。	
保護等級	国際電気基準会議(IEC)で定められた防水、防塵に対する保護性能に関する等級のこと。規定された保護等級に合致する性能を「IP66」等のIPコードで表す。	

用語	意味	類義語・関連語
窓関数処理	測定データに対し、窓関数（ある有限の区間以外では値が0となる関数）を掛け合わせる処理を示す。周波数変換などの計算処理時に、現実的な計算処理の制約内で周波数分解能とダイナミックレンジのバランスを調節する手法。	
ローパスフィルタ	特定の周波数以外の信号を遮断するフィルタのうち、低周波成分のみを通過させ、高周波成分を遮断するフィルタのこと。	
CSV 形式	Comma Separated Valuesの略で、テキストデータの形式の一つ。項目の区切り文字にカンマ「,」が用いられる。可読性が高いが、データ量や処理速度では不利となる。	
MEMS	Micro Electro Mechanical System の略で、微細加工技術により集積した、機械構造を有する電子デバイスを指す。温度、磁気、赤外線、加速度などのセンサへ応用される。	

第4編 鋼桁のモニタリング

1 章	鋼桁のモニタリングの位置づけと種類	4-1
1.1	モニタリングの位置づけ	4-1
1.2	モニタリングと役割	4-2
1.2.1	各種モニタリングの概要	4-2
1.2.2	モニタリングの種類と目的	4-4
2 章	サンプリングモアレ法による変位のモニタリング	4-7
2.1	技術の概要	4-7
2.1.1	目的	4-7
2.1.2	システムの概要	4-8
2.2	モニタリングの方法	4-10
2.2.1	モニタリングの手順	4-10
2.2.2	計画	4-11
2.2.3	機器の選定	4-12
2.2.4	格子シートとサンプリングモアレカメラの設置	4-13
2.2.5	計測	4-16
2.2.6	データの蓄積	4-16
2.2.7	費用の目安	4-17
2.3	結果の評価	4-18
2.4	保守	4-18
3 章	動画像処理によるたわみのモニタリング	4-19
3.1	技術の概要	4-19
3.1.1	目的	4-19
3.1.2	システムの概要	4-19
3.1.3	計測期間	4-21
3.2	モニタリングの方法	4-21
3.2.1	モニタリングの手順	4-21
3.2.2	計画	4-23
3.2.3	機材の準備	4-24
3.2.4	撮影	4-25
3.2.5	たわみ算出	4-25
3.2.6	データ保存	4-26
3.2.7	費用の目安	4-27
3.3	結果の評価	4-27
3.4	保守	4-28

4 章	加速度センサによるたわみのモニタリング	4-29
4.1	技術の概要	4-29
4.1.1	目的	4-29
4.1.2	システムの概要	4-29
4.1.3	計測の期間	4-32
4.2	モニタリングの方法	4-32
4.2.1	モニタリングの手順	4-32
4.2.2	計画	4-33
4.2.3	機器の選定・設計	4-33
4.2.4	機器の設置	4-34
4.2.5	データの計測・蓄積	4-35
4.2.6	データ分析	4-36
4.2.7	費用の目安	4-37
4.3	結果の評価	4-38
4.4	保守	4-38
5 章	光ファイバによるたわみのモニタリング	4-39
5.1	技術の概要	4-39
5.1.1	目的	4-39
5.1.2	システムの概要	4-40
5.2	モニタリングの方法	4-44
5.2.1	モニタリングの手順	4-44
5.2.2	事前解析	4-45
5.2.3	機器選定	4-47
5.2.4	センサ設置・システム構築	4-47
5.2.5	初期計測	4-51
5.2.6	管理基準値の設定	4-51
5.2.7	システム運用	4-51
5.2.8	費用の目安	4-52
5.3	結果の評価	4-52
5.4	画面・計測データ事例	4-53
5.5	保守	4-55
6 章	動ひずみによる剛性変化のモニタリング	4-57
6.1	技術の概要	4-57
6.1.1	目的	4-57
6.1.2	システムの概要	4-60
6.1.3	計測期間	4-64

6.2	モニタリングの方法	4-65
6.2.1	モニタリングの手順.....	4-65
6.2.2	モニタリングの計画.....	4-66
6.2.3	機器の選定・設計	4-66
6.2.4	機器の設置	4-70
6.2.5	データの計測・蓄積.....	4-71
6.2.6	費用の目安	4-71
6.3	結果の評価.....	4-72
6.3.1	特性カルテとは.....	4-72
6.3.2	評価事例（特性カルテ）	4-73
6.3.3	評価結果からの診断方法	4-76
6.4	保守.....	4-77
7章	画像処理による塗装のモニタリング.....	4-78
7.1	技術の概要.....	4-78
7.1.1	目的.....	4-78
7.1.2	システムの概要.....	4-78
7.1.3	計測の頻度	4-81
7.1.4	データの蓄積	4-82
7.2	モニタリングの方法	4-83
7.2.1	モニタリングの手順.....	4-83
7.2.2	点検計画.....	4-83
7.2.3	実橋データベース登録.....	4-83
7.2.4	現場撮影.....	4-84
7.2.5	塗装モニタリングシステムを利用した画像入力と劣化度診断・評価.....	4-94
7.2.6	目視確認.....	4-94
7.2.7	現地状況を踏まえた総合判定	4-94
7.2.8	点検結果の記録.....	4-95
7.2.9	費用の目安	4-95
7.3	結果の評価.....	4-96
7.3.1	塗膜劣化度評価判定の流れ.....	4-96
7.3.2	塗装モニタリングシステムによる劣化度評価	4-96
7.4	保守.....	4-100
8章	変位計による遊間のモニタリング	4-101
8.1	技術の概要.....	4-101
8.1.1	目的.....	4-101
8.1.2	システムの概要.....	4-102
8.1.3	計測の期間	4-104

8.2	モニタリングの方法	4-105
8.2.1	モニタリングの手順.....	4-105
8.2.2	計画.....	4-106
8.2.3	機器の選定	4-106
8.2.4	変位計の設置	4-109
8.2.5	計測.....	4-111
8.2.6	データの蓄積	4-111
8.2.7	費用の目安	4-112
8.3	結果の評価.....	4-112
8.4	保守.....	4-113
9 章	適用事例	4-114
9.1	サンプリングモアレ法による変位のモニタリング【4編2章の事例】	4-114
9.2	動画像処理によるたわみのモニタリング【4編3章の事例】	4-116
9.3	加速度センサによるたわみの測定【4編4章の事例】	4-122
9.4	動ひずみによる剛性変化のモニタリング【4編6章の事例①】	4-127
9.5	動ひずみによる剛性変化のモニタリング【4編6章の事例②】	4-134
9.6	動ひずみによる剛性変化のモニタリング【4編6章の事例③】	4-140
9.7	変位計による遊間のモニタリング【4編8章の事例】	4-145
添付資料1	用語集.....	4-147

1章 鋼桁のモニタリングの位置づけと種類

1.1 モニタリングの位置づけ

鋼桁橋は、橋軸方向に複数本掛けられた鋼製の主桁が橋面を支持し、車両重量には主として主桁が抵抗し、発生する曲げモーメントとせん断力に抵抗する。床版にはRC床版、PC床版、鋼床版、合成床版が用いられる。

なお、鋼桁橋に関連するモニタリングのなかでも、コンクリート床版に関わるモニタリングについては第2編を参照されたい。

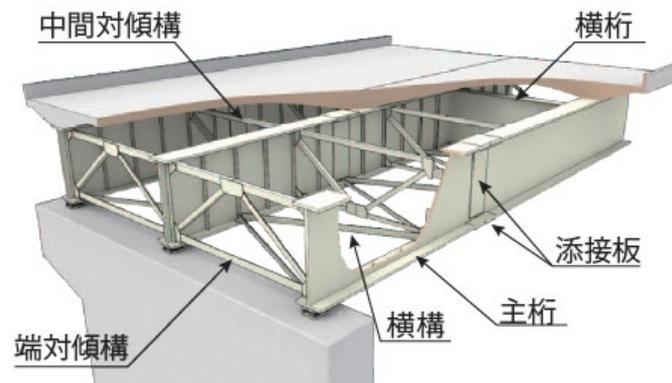


図 1.1.1 鋼桁橋

「橋梁定期点検要領」¹⁾に示されている鋼部材の損傷の種類として定義されているもののうち、外観に現れる損傷として防食機能である塗装の劣化に対しては、定期的にカメラを用いて画像を取得して画像処理を行うことにより塗膜の劣化部を自動抽出し、定量的数値により劣化の程度を評価する「画像処理による塗装のモニタリング」により、前後の結果を比較することによって塗装の劣化程度の変状を経時的にとらえる。遊間の異常に対しては、変位計により主桁端部と支承の間の相対変位を計測する「変位計による遊間のモニタリング」により遊間変位の異常を評価し、伸縮装置や支承の機能を評価する。

外観に現れない変状として剛性の低下があるが、たわみを計測する手法と動ひずみを計測する手法によりモニタリングすることにより、劣化を評価、診断することができる。たわみに対しては、4つの異なるモニタリング手法がある。一つは、遠望から格子模様のターゲットを画像撮影し解析することによる「サンプリングモアレ法による変位のモニタリング」である。二つ目は、遠望から支間中央点の動画を撮影し、画像解析することにより3次元変位を得る「動画画像処理によるたわみのモニタリング」である。三つ目は、加速度センサを設置することにより主桁の加速度を計測し、時刻歴に積分することによりたわみ値を算出する「加速度センサによるたわみのモニタリング」である。最後に、光ファイバを橋軸方向に敷設することにより、橋軸方向の桁のひずみを分布的に計測し、値を橋軸方向に値を積分することにより各所におけるたわみ値を得る「光ファイバによるたわみのモニタリング」がある。これら4つのたわみのモニタリングのそれぞれの特長については後述する。たわみを計測する手法においては、定期計測する方法と常時計測する方法があるが、定期計測する場合には、測定時期の異なる測定値を比較、検討する必要があるため、車両重量が既知である車両を走行させた場合のたわみ値を計測する必要がある。一方で、常時計測の場合には、車両重量の異なるたわみ量を統計的に取り扱って評価することが可能であるので、車両重量が既知であることは必須ではない。また、動ひずみを計測する手法としては、鋼桁に生じる動ひずみを計測して、発生する応力を動的に把握することによる「動ひずみによる剛

性変化のモニタリング」により、鋼桁部材の剛性変化を評価する。

なお、モニタリング結果の評価のためには、初期状態からの変化の絶対量を把握して、検討することができるのが理想的である。初期状態を把握して、供用中のある時点の計測結果との差分を算出することを可能にするためにも、橋梁の竣工直後に計測を実施して、初期値を取得しておくことが望ましい。

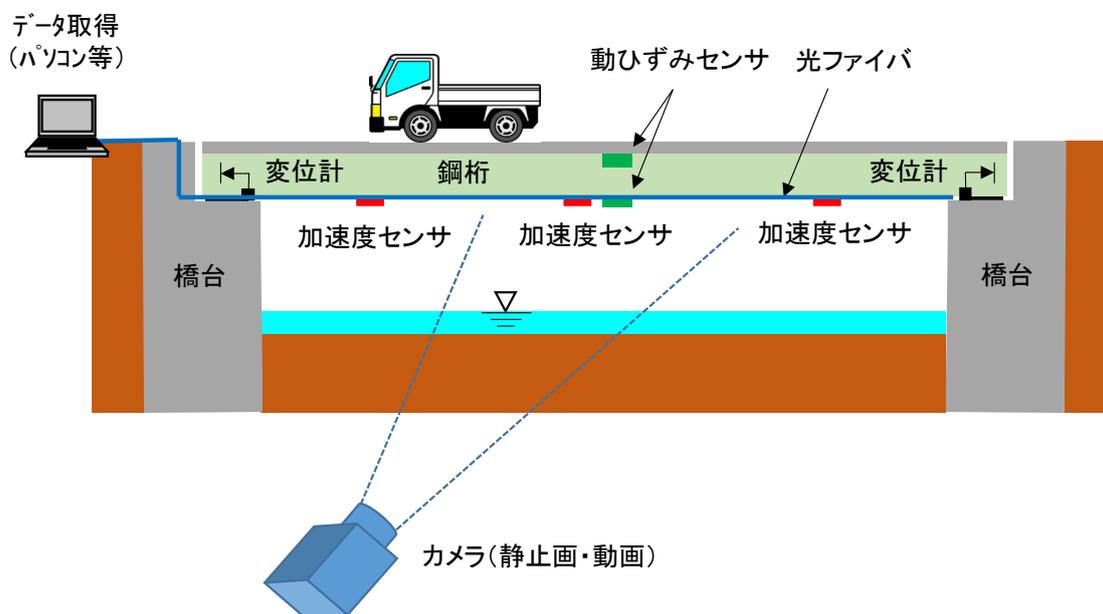


図 1.1.2 鋼桁のモニタリングの概念

1.2 モニタリングと役割

1.2.1 各種モニタリングの概要

鋼桁のモニタリング技術として、現段階で社会実装可能なものであり、第1編で示したモニタリングシステムの活用を期待する効果が見込める7つの技術について、何を目的に開発されたものかについて、以下に簡単に触れる。

(1) サンプリングモアレ法による変位のモニタリング

鋼主桁のたわみは、主桁の構造劣化に伴い増大するため、その絶対値や増分をモニタリングすることで、構造性能の変化を監視、診断できる。本手法は、カメラにより測定ターゲットとなる格子シートを遠望から撮影し、解析することにより多点のたわみ値を同時に得る非接触型のモニタリングである。遠望からの測定が可能であり、橋梁へのアクセス条件等の制約を受けないため、条件面や費用面において有利であるので、定期計測によるモニタリングに用いる。しかし、計測期間が開くことやデータ量が少ないことから、計測結果から連続的な変状の増減を求めることができないため、何らかの閾値を設けてそれと比較することによる評価を行う。そのため、たわみ測定時の入力荷重が既知である必要があり、重量既知の車両を走行させてたわみを測定し、過去の測定結果と現在の測定結果とを比較することにより、その変化を見る事で目視点検では判断し難い構造劣化を検出する。さらに本手法によれば、橋長の全長にわたって撮影をすることができれば、たわみのモードを解析することも可能である。非接触型のモニタリングは、接触型に比べて比較的精度が劣ることや、降雨や大気の揺らぎ等の環境条件の影響を受ける場合があるため、モニタリングの役割としては変状の有無を早期に発見するためのスクリーニングに用いる。

(2) 動画処理によるたわみのモニタリング

本手法は、(1) サンプルングモアレ法によるたわみのモニタリングと同様に、カメラにより遠望から撮影、解析することによりたわみ値を得る非接触型のモニタリングである。本手法においても、たわみ測定時の入力荷重が既知である必要があり、重量既知の車両を走行させてたわみを測定し、過去の測定結果と現在の測定結果とを比較することにより、その変化を見る事で目視点検では判断し難い構造劣化を検出する。本モニタリングの役割としても(1)と同様に、変状の有無を早期に発見するためのスクリーニングに用いるが、本手法は画像解析の特長により、主桁全長が見通せない環境においても、主桁の真下からの撮影によってもたわみ値を得ることが可能である。すなわち、本手法は、アクセスが困難であり、環境的な制約により橋梁下方からの撮影しか行えない場合に有効である。

(3) 加速度センサによるたわみのモニタリング

本手法では、加速度センサを主桁に常時設置して常時計測を行い、長期的・継続的な監視をすることで、年間を通じた大量の車両通行時のたわみ量を得る。これら長期のたわみ量は、日ごと、週ごと、連休時などに通行量や車種のバラつきはあるが、長期のたわみ量に注目すると統計的には安定しており、過去の統計データと現在の統計データを比較する事で、重量既知の車両を走行させる事無く構造劣化の傾向判断ができる。常時計測には、主に、機器を設置する接触型のモニタリングが用いられるが、支間の桁下にアクセスすることが困難な橋梁も多く、設置のための手間や費用がかかるが、その一方で、たわみを精度よく計測することが可能である。そのため、何らかの異常や変状の恐れがある場合に、その進行状況の監視や劣化のレベルの診断に用いる。さらに、補強を行う前後に本モニタリングを行うことにより、補強の効果を確認することができる。

(4) 光ファイバによるたわみのモニタリング

本手法も、光ファイバを主桁の延長方向に常時設置して、(3)と同様に常時計測を行い、長期的・継続的な監視をするものである。分布的にたわみ値が得られるため、たわみのモードを解析することが可能であり、変状箇所の同定が行える。何らかの異常や変状の恐れがある場合に、その進行状況の監視や劣化のレベルの診断に用いる。耐荷力の低い橋梁（平成5年改訂以前の示方書適用の橋梁など）や、緊急輸送道路等で健全度がⅢの鋼橋において、橋梁が通行制限あるいは通行止めすべき状況にあるかの診断を行う。さらに、災害発生時の前後のデータを比較することにより、主桁の過大な変位の有無が評価できるため、災害による損傷の有無の判断材料になる。

(5) 動ひずみによる剛性変化のモニタリング

たわみのモニタリングにより変状が認められた場合で、さらに局所的な変状の詳細やその監視を行いたい場合には、主桁へ動ひずみゲージを設置し、動ひずみを測定して、車両重量を同定するとともに、曲げ変形における中立軸位置を算出して、剛性の変化を評価し、構造性能を診断する。

(6) 画像処理による塗装のモニタリング

本手法は、塗装の塗替え時期の判定に用いる。これまでは、塗膜面に近接して目視点検を行う場合には、検査路や足場が必要となることから、調査に多大な労力、時間、費用を要していた。本手法によれば、遠方から塗膜画像を撮影するのみで良いため、塗膜の劣化度判定の簡素化が可能となる。また、客観的で的確な劣化度判定が可能となるため、塗替え時期と塗替え単位を適切に設定することが可能となり、結果として維持管理費用の削減につながる。

(7) 変位計による遊間のモニタリング

伸縮装置の遊間が極端に狭い、或いは広い、遊間異常の状況を、接触型の変位計あるいは非接触型のカメラによりモニタリングすることで、支承部が有効に機能しているか否かを監視し、主桁端部への損傷を未然に防ぐ。さらに、地震等により被災した場合には、支承部の損傷度合いや段差の有無などがわかるため、供用可能か否かの判断材料になる。

1.2.2 モニタリングの種類と目的

表 1.2.1 は「第 1 編 3 章モニタリングの意義」において示されているモニタリングの目的と各種モニタリングとの対応をまとめたものである。これによると、モニタリングの位置づけである、点検の補助、診断の補助、補修・補強の効果の確認、緊急時の対応の補助、のそれぞれに対応して、役割を発揮するモニタリングの種類が異なる。管理者は、維持管理におけるモニタリングの役割に基づいた種類のモニタリングを選定する。

表 1.2.1 モニタリングの種類と目的

対象となる変状	モニタリングの種類	モニタリングの目的*									
		点検の補助		診断の補助					補修補強の効果の確認	緊急時の対応の補助	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	
構造性能の低下 異常なたわみ	サンプリングモアレ法による変位のモニタリング (定期計測)					○				○	
	動画像処理によるたわみのモニタリング (定期計測)					○				○	
	加速度センサによるたわみのモニタリング (常時・定期計測)					○ 常定期				○ 定期	
	光ファイバによるたわみのモニタリング (常時計測)							○			○
	動ひずみによる剛性変化のモニタリング (常時計測)					○					
塗装の劣化	画像処理による塗装のモニタリング (定期計測)				○						
支承の可動状態	変位計による遊間のモニタリング (常時計測)		○								

※モニタリングの目的の凡例説明

- A : 何らかの異常があった箇所を把握する。
- B : 健全な範囲もしくは要監視範囲を把握する。
- C : 予防保全の実施を判断するのに必要な情報を取得する。
- D : 定量的データを取得し、比較する。
- E : 健全度評価のための定性的、定量的データを取得する。
- F : 通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達していないことを確認する。
- G : 補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認する。
- H : 対策の効果、持続性を確認する。
- I : 落橋等の危険が予測される箇所を把握する。

なお、表 1.2.1 には、各モニタリングが最も合致したニーズに対して○を付けているが、それ以外のニーズに対しての適用が可能なものもあり、詳しくは 2 章以降の各モニタリングの説明を参照されたい。

表 1.2.1 に示したモニタリングの種類と役割を対応させて、維持管理の経年劣化のグラフと対比させて示したのが図 1.2.1 である。

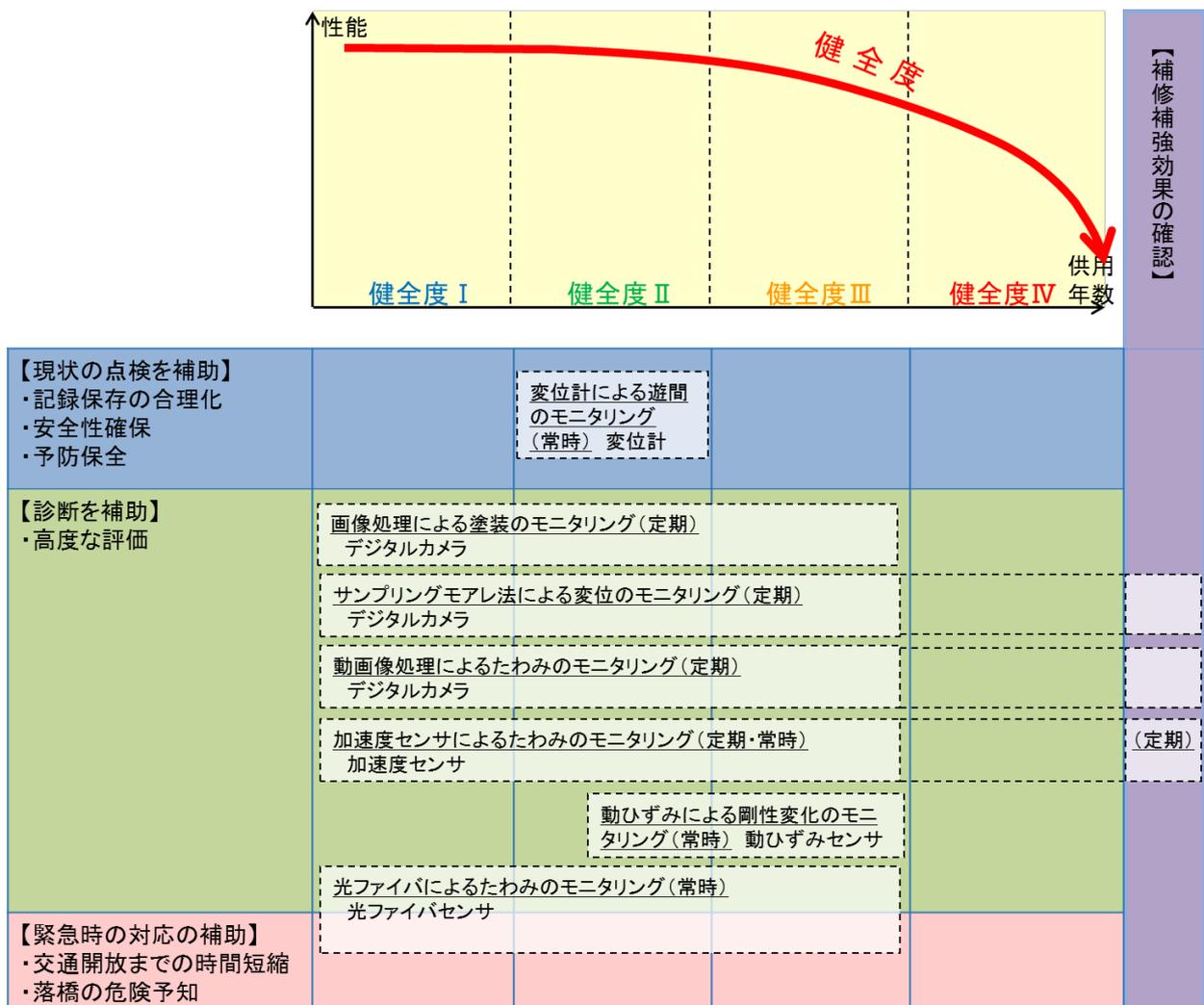


図 1.2.1 鋼桁の維持管理におけるモニタリングの種類と役割

要約すると7つのモニタリングシステムにはそれぞれ役割があり、健全度Ⅰ～Ⅲの期間における点検の補助・診断の補助を目的とした「画像処理による塗装のモニタリング」、健全度Ⅰ～Ⅲの期間における診断の補助と補修・補強効果の確認を目的とした「サンプリングモアレ法によるたわみのモニタリング」、
「動画画像処理によるたわみのモニタリング」および「加速度センサによるたわみのモニタリング」、健全度Ⅰ～Ⅲの期間における診断の補助と緊急時の対応の補助を目的とした「光ファイバによる変位のモニタリング」、健全度Ⅱ～Ⅲの期間における診断の補助を目的とした「動ひずみセンサによる剛性変化のモニタリング」、健全度Ⅱの期間における診断の補助を目的とした「変位計による遊間のモニタリング」とそれぞれ整理できる。

2章 サンプリグモアレ法による変位のモニタリング

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

近年開発が進んでいる画像処理技術のひとつであるサンプリグモアレ法は、デジタルカメラ画像内で同時に多点の変位計測ができ、静的計測（静的载荷試験等）にも動的計測（車両走行試験等）にも対応できる計測技術である。センサを使用する計測方法と異なり、センサの設置作業や信号ケーブルの配線作業が無いので、少人数で比較的簡易作業のみで、その費用も安価な計測方法である。

サンプリグモアレ法による主桁のたわみ計測は、図 2.1.1 に示すように主桁側面に格子シートを貼り付け、格子シート全てを撮影可能な場所にサンプリグモアレカメラを設置し、格子シートの撮影と同時に2次元（水平と垂直）の変位を計測するのが一般的である。主桁には格子シートを貼り付け又は接着剤等で固定するだけで良く、信号ケーブルの配線作業が無く計測器の設置が簡易である。

また、サンプリグモアレ法は同時に多点で広範囲の変位計測が可能なので橋梁全体のたわみ分布を1度の撮影で捉えることが可能である。通常変位計を使った計測では、各点毎に変位計を設置し同時に多点計測し、後処理で計測データを合成してたわみ分布を作成するのが一般的であるが、サンプリグモアレ法は、この従来計測手法と比較しても短時間で簡易な方法でたわみ分布を得られる利点がある。

さらに、主桁側面に直角（橋梁を真横から）に向いてサンプリグモアレカメラを設置するのが一般的であるが、現場の環境条件によっては、斜めの角度のみしか撮影ができない状況であっても、格子シート上の計測点が重ならなければ計測は可能である。

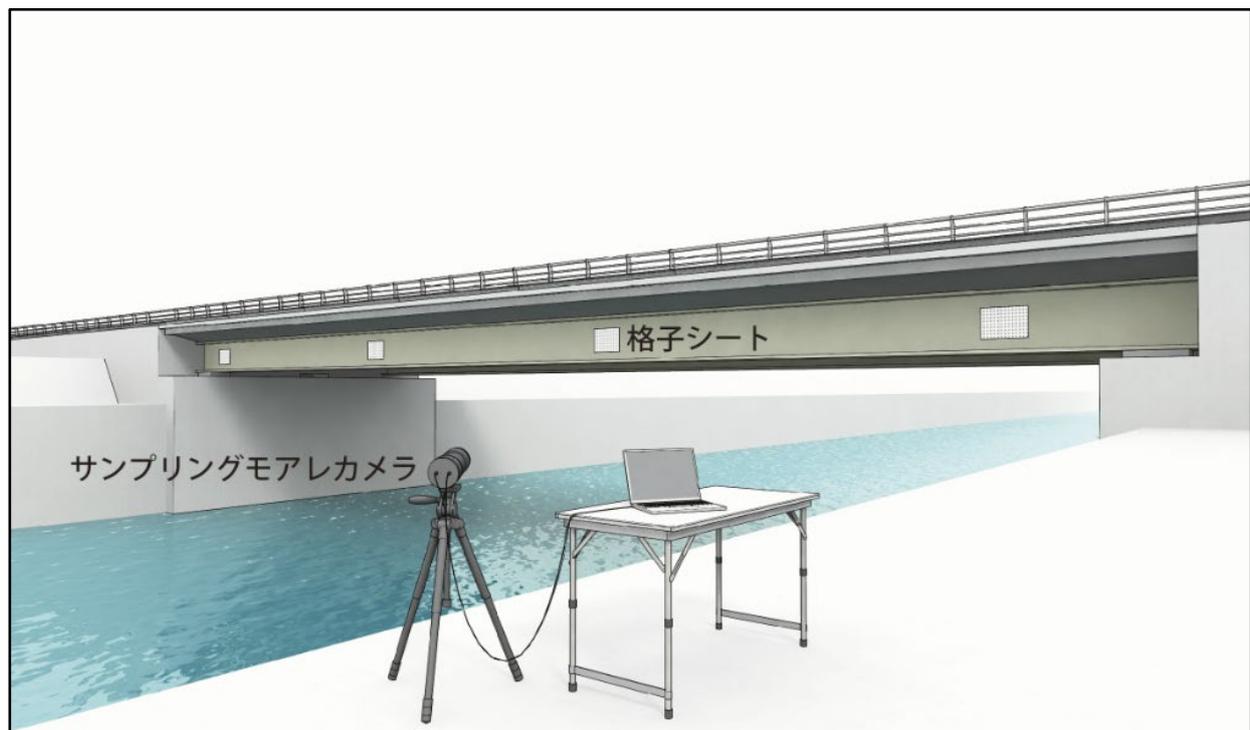


図 2.1.1 サンプリグモアレ法を用いた変位モニタリングイメージ図

2.1.2 システムの概要

(1) サンプリングモアレ法の原理

サンプリングモアレ法とは、2次元の格子画像に対する位相解析手法のひとつである。ワンショットの画像から2成分の位相を得ることが出来る。周囲の画素を平均化する処理技術があるため、ノイズに強く、格子ピッチの1/100~1/1000の計測精度が得られる。

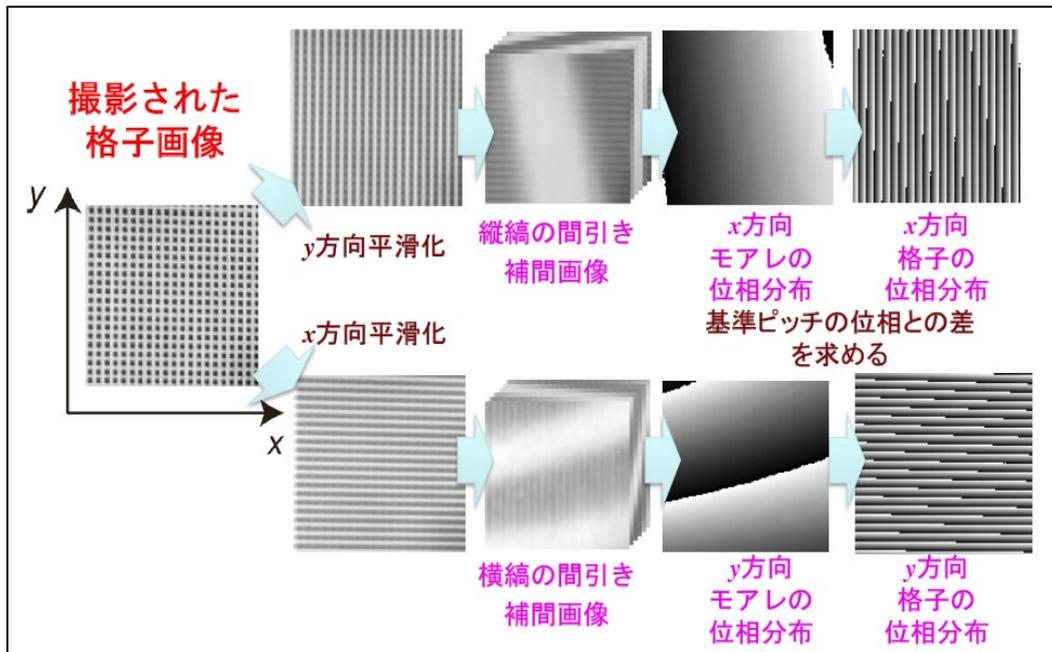


図 2.1.2 サンプリングモアレ法による位相解析の流れ

図 2.1.2 に撮影された 2 次元格子画像に対するサンプリングモアレ法による位相解析の流れを示す。2 次元格子画像を y 方向に平滑化することで、x 成分の格子が得られる。これに対して、格子の画素数に近い整数の画素数 N で間引き処理を行う。このとき、間引く位置を 1 画素ずつ変えることによって、位相シフトされた N 枚のモアレ画像が得られる。これらの画像に位相シフト法を適用することで、x 方向のモアレの位相分布が得られる。さらに N 画素で 2π にラッピング処理をすることで、x 方向の格子の位相分布が得られる。y 方向についても同様の処理で y 方向の格子のモアレと位相分布と y 方向の格子の位相分布がそれぞれ得られる。

変位については変形前後の格子の位相の変化から求めることができる。変位は位相差に定数を掛けたものとなっており、カメラの位置や撮影画像内での格子のピッチとは無関係に値が得られることになる。そのため、本手法はカメラのキャリブレーションが不要で、計測対象に取り付けられた格子シート（パターン）の正面にカメラを配置する必要もなく、レンズの歪曲収差に影響されずに変位分布を得ることができる。

計測対象物に貼り付けられた 2 次元格子パターンを斜め方向から撮影すると、撮影された画像においては、格子の向きもピッチも場所によって異なるように撮影される。それでも格子ピッチが既知であるために、得られる位相差からの変位への換算式は変わらない。

サンプリングモアレ法の特徴としては、

- 1) ワンショットで撮影した画像から x 方向と y 方向の 2 次元の変位が同時に計測できる。
- 2) 変位計測分解能は、格子ピッチの 1/100 から 1/1000 程度が得られる。

- 3) 計測対象側は、格子パターンを固定するだけでよい。
- 4) 格子ピッチが既知の格子を用いるため、キャリブレーションが不要である。が挙げられる。さらに専用のサンプリングモアレカメラの特徴としては、
- 5) 高速撮影により瞬間変位を計測できる（事例では最大 500Hz）。
- 6) 1 台のカメラで多点の同時計測が可能である（事例では 1 画面内 16 測点）。
- 7) リアルタイムのモニタリングが可能である。
- 8) 複数台のカメラの同期計測が可能である（事例では 3 台-最大 48 測点同時計測）。等が挙げられる。

また、格子画像は位相を用いるため正確に格子に焦点を合わせる必要がなく、例えば測定する格子パターン毎にカメラ方向に対して距離が異なっても計測を行うことができる。カメラの画角範囲内に格子パターンの測定点があれば、多点での同時測定が可能である。

(2) システム構成

サンプリングモアレ法による変位計測の標準的なシステムは、サンプリングモアレカメラと格子シート、そしてサンプリングモアレカメラの計測（撮影・内部で位相解析）データを収録するパソコンの組合せである。また、市販デジタルカメラ等のデジタル画像を後処理で位相解析ソフトを用いて変位を算出する方法がある。

1) サンプリングモアレカメラを用いたシステム

専用のサンプリングモアレカメラを用いたシステムは、**図 2.1.3** に示すように格子シート（パターン）とそれを撮影するサンプリングモアレカメラ、そしてサンプリングモアレカメラ内部でデジタルカメラ画像の位相解析を行い、変位データに換算したデジタルデータをパソコンに収録しパソコン画面に出力するシステムであり、更なる場で変位データを直接確認することができる。

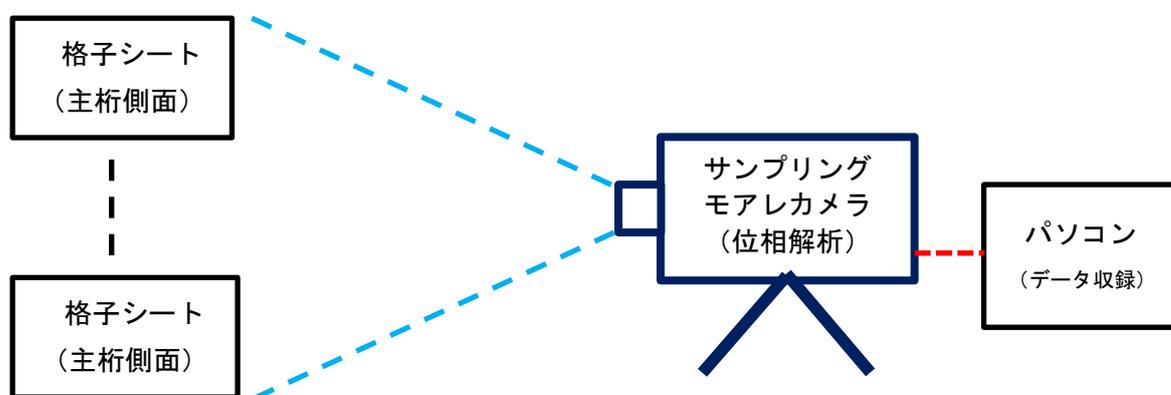


図 2.1.3 サンプリングモアレカメラを用いたシステムのイメージ図

2) 市販デジタルカメラを用いたシステム

市販デジタルカメラを用いたシステムは、基本的に撮影までの段階はほぼ専用のサンプリングモアレカメラを用いた場合と同じである。撮影後に収録したデジタル画像を専用の位相解析ソフトで処理し変位を算出するものである。市販デジタルカメラはサンプリングモアレカメラと比べ安価であるが、その場で変位データを確認することはできない。

2.2 モニタリングの方法

2.2.1 モニタリングの手順

サンプリングモアレ法を用いた変位のモニタリングの基本的な手順は、図 2.2.1 のとおりである。

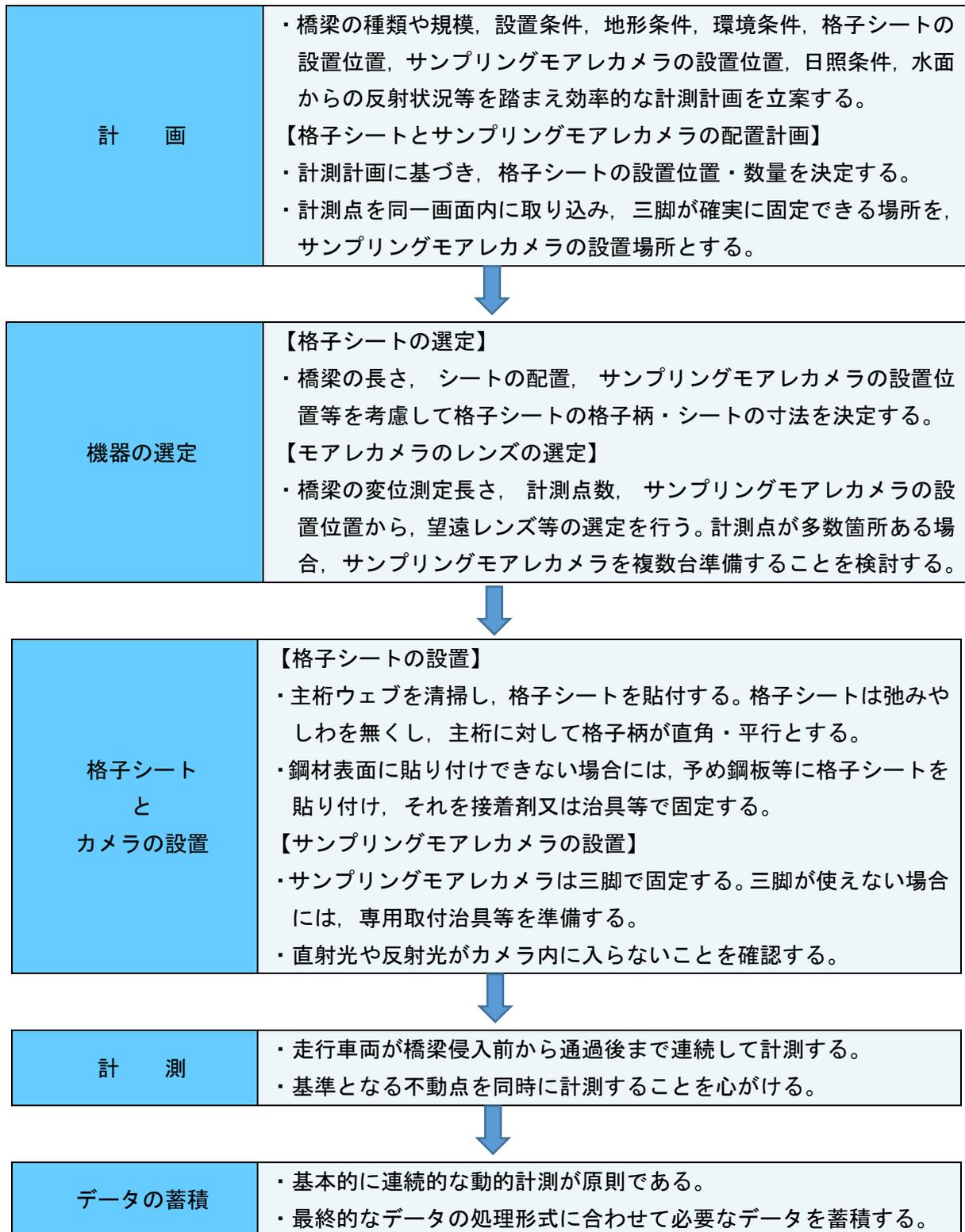


図 2.2.1 サンプリングモアレ法による変位のモニタリング手順

2.2.2 計画

サンプリングモアレ法を用いて主桁の変位（たわみ）計測を行う橋梁の種類や規模（橋長、幅員等）、桁下部の構造（地盤状態又は河川等）や鋼桁までの高さ、周囲の地形条件や環境条件を調査して格子シートの設置位置・設置方法、撮影に使うモアレカメラの設置位置・設置方法、計測方法等を十分検討し、目的に則した効率的な計測計画を立案する。

(1) 格子シートの配置計画

主桁のたわみ計測を考えると鋼桁の長さ（橋軸方向）により計測点（格子シート）が異なる。鋼桁のたわみ分布を計測するとすれば最低3点（両端部と中央）が必要であり、桁長が長くなればそれに合わせて増加する。最大変位が想定される箇所と将来の分析方法に合わせた配置を計画する。

道路橋の場合、複数車線がある橋梁では走行路線の偏りがあるので、事前に調査しておく。また試験的に車両を走行させる場合には、事前に走行車線を決めておく。

主桁の劣化現象には、腐食や塩害そして通行車両に伴う構造劣化（疲労劣化）があるので、それらの原因を良く理解し計測を行うことが重要である。

(2) 格子シートの設置計画

基本的に変位（たわみ）の計測点は格子シートであり、格子シート裏面の粘着シートを主桁側面（ウェブ）に貼り付けることが多いので主桁側面で貼付作業が可能か、足場が必要かを事前に確認する。また主桁側面にシートが貼付出来ない場合には、主桁下フランジ部に格子シートを貼り付けたパネル版を固定することも考え、下フランジの状態を事前調査する。

夜間や橋の下からの計測（撮影）時には、必要に応じて格子シートに照明を当て、シート表面を明るくするように照明器具を準備する。

桁下が河川や道路等で人が入ることができない場合には、サンプリングモアレカメラの設置位置が鋼桁に対して斜め方向からとなるので、サンプリングモアレカメラと格子シートの設置位置の間に障害物が無いか事前調査する。

(3) サンプリングモアレカメラの設置場所

サンプリングモアレカメラの設置場所は、硬質地盤で三脚またはサンプリングモアレカメラ専用取付治具がしっかり固定できる場所であり、振動やほこりが無い場所が理想である。三脚は大型で重量がある方が設置時の安定性がある。軽量三脚では、カメラ操作時や風・微振動でも動揺する恐れがあるので注意が必要である。三脚固定部はぬかるみがなく、三脚が沈み込んだり傾いたりすることがないことを確認する。三脚が設置出来ない場所では、必要に応じてサンプリングモアレカメラ専用取付治具を準備する。風の影響がある場合には、サンプリングモアレカメラの周囲を囲うことも検討する。また降雨の対策についても事前に準備する。

サンプリングモアレカメラのレンズに直射日光や河川水面の反射光が入らない場所を選定する。計測時間が長時間となる場合には、日照の変化を考え設置場所を移動する。但し、基準となる格子シートを変位が発生しない場所に一カ所設置し、常にその位置を計測画面に入れることで同一基準からの計測となり、計測精度を保つことができる。

2.2.3 機器の選定

(1) 格子シート（パターン）の選定

主桁の変位を計測したい箇所に設置する格子シートは、基本的に縦・横同寸の正方形格子シートを使用するのが一般的である。ただし格子柄の形状が長方形であっても同一のパターンであれば、計測には問題が無い。計測方向（水平又は鉛直）がどちらか一方に決まっていれば、格子形状ではなく、等間隔の平行線模様でも計測可能である。

格子シートは、設置する鋼桁の状況に応じて貼り付け（裏面粘着シート又は接着剤）型か設置（予め格子シートを接着した鋼板）型を選ぶ。また撮影距離に応じて格子シートの格子の寸法とシート全体の寸法を選ぶ。

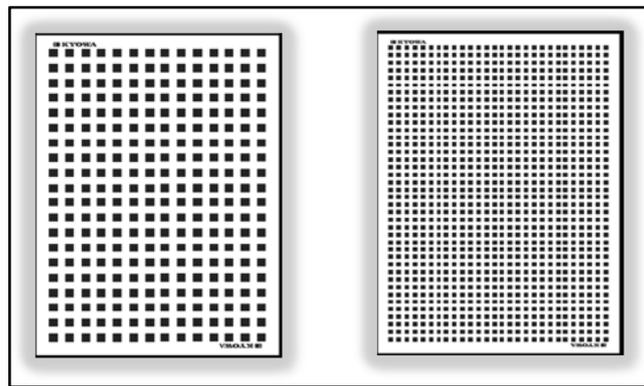


図 2.2.2 格子シートイメージ図

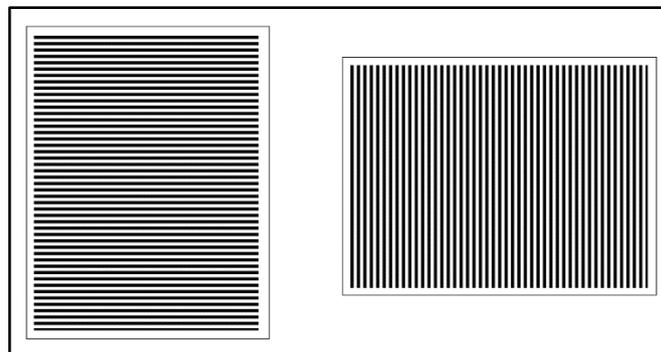


図 2.2.3 横縞・縦縞シートイメージ図

一般的に使用されている格子柄は、2mm～40mm であり、格子シートの寸法は A4～A2 サイズが一般的である。特殊なケースとして格子柄 0.05mm で A8 シートの実績もある。また格子シートの全国規模の規格化に関しても近年検討されている。

格子柄の寸法及びシートの寸法は、計測する橋梁の長さ、計測点数（格子シートの配置数）、サンプリングモアレカメラの設置位置及び計測する変位の最小分解能等を検討して選定する。

例：標準偏差 XY変位：0.05mm 5mmピッチ格子シートを使用で距離 20m

（注：気象条件、計測距離等の計測環境により変化）

(2) サンプリングモアレカメラの選定

カメラは専用のサンプリングモアレカメラを使用し、カメラ制御と計測データ収録用のパソコン、電源を用意する。このサンプリングモアレカメラ本体には画像処理が出来る機能が組み込まれているので、サンプリングモアレカメラからの出力は各計測点の2次元座標である。パソコンには、専用の制御用ソフトを組み込み事前に動作を確認する。電源は商用電源でも良いが、バッテリーであれば機動性があるので現場条件で検討する。

サンプリングモアレカメラの外観図例を図 2.2.4 に、仕様例を表 2.2.1 に示す。



図 2.2.4 サンプリングモアレカメラ外観図例

表 2.2.1 サンプリングモアレカメラの仕様例

項目	仕様
測定周期 (計測フレームレート)	1fps~500fps (処理領域数と領域サイズ, 露光時間による)
測定精度	分解能 格子ピッチの 1/100 から 1/1000 (格子の撮影画素数による) 【計測例】 標準偏差 XY 変位 : 0.05mm θ 変位 : 0.021° (静止対象物 5mm ピッチ 2次元格子使用 距離 20m) 注 : 気象条件, 計測距離等の計測環境により変化
ピクセル数	2048×2048pixel (ピクセルサイズ 5.5 μ m×5.5 μ m)
コントロール ソフトウェア動作環境	OS : Windows10 64bit 対応 メモリ : 16GB 以上 SSD : 240GB 以上

2.2.4 格子シートとサンプリングモアレカメラの設置

格子シートは、一般的にビニール製で裏面の粘着シートで主桁の側面に貼り付けることが多い。主桁の側面を清掃して格子シートの格子柄をフランジ面に平行又は垂直となるように貼り付ける。また、主桁表面にクラック等がある場合には、クラックが観察できるように主桁表面に直接格子柄を転写す

るので、事前確認をする。主桁側面に格子シートが貼れない場合には、予め格子シートを鋼板等に貼り付けたパネルを準備し、主桁の側面に接着剤で貼り付けるか磁石等で取り付ける。さらにフランジ部分を利用して固定することも事前に検討しておく。

表 2.2.2 格子シートの設置方法

設置種類	設置方法と注意点
<p>①ビニール製格子シートの貼り付け方法</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁側面を清掃する。ゴミや凹凸が無いか確認する。 ・裏面の粘着シートを剥がし、主桁側面に貼り付ける。裏面に皺や空気だまりが入らないように注意する。 ・格子柄が水平・垂直になるように貼り付ける。 <div data-bbox="536 633 1222 1196" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">格子シートを橋梁点検車両にて主桁ウェブに貼り付けている作業状況</p>
<p>②パネル式格子シートの設置方法</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁側面に接着剤で貼り付けるのであれば、側面を清掃し、ゴミや凹凸が無いか確認し、接着剤の取扱説明書に則て貼り付ける。 ・マグネットや治具で固定する場合には、パネルが落下しても第三者に被害が及ぶことの無いように落下防止策を講じる。 <div data-bbox="539 1462 1264 1957" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">格子シートを鋼板に貼り付け主桁下フランジにシャコ万力で固定した状況</p>

サンプリングモアレカメラの設置は、基本的に大型の三脚を使用するか専用の取付治具を使用する。計測中に風雨にさらされることも考慮し、事前に対策を準備しておく。また、直射日光や河川水面からの反射光が入らないように設置位置・撮影方向に注意する。電源は、基本バッテリーを使用することで機動性を持たせる。

表 2.2.3 サンプリングモアレカメラの設置方法

設置種類	設置方法と注意点
①三脚による設置	<ul style="list-style-type: none"> ・大型の三脚(自重 5kg 以上)を使用し、比較的硬質な地盤に固定する。ぬかるみは出来るだけ避け、ぬかるみの場合には土砂等を三脚の足回りに入れ三脚が沈み込まないことを確認する。 ・周囲の振動で三脚が揺れることが無いことを確認する。 ・風雨対策は事前に準備する。 ・直射光・反射光がサンプリングモアレカメラに入らないように設置する。 <div data-bbox="517 757 1254 1261" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="459 1272 1249 1305">三脚にサンプリングモアレカメラを固定した計測（撮影）状況</p>
②専用取付治具による設置	<ul style="list-style-type: none"> ・取付治具を水平な場所に固定する。 ・固定部が振動で揺れることがないことを確認する。 <div data-bbox="517 1417 1233 1910" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="459 1921 1305 1955">取付治具にサンプリングモアレカメラを固定した計測（撮影）状況</p>

2.2.5 計測

計測方法は、目的の仕様に合った方式を選び、最終的なデータの利用方法を考慮したものとする。

主桁のたわみ計測であれば、定期的と同じ計測方法で行うことで主桁の構造性能の変化を把握できるので、毎回同じ計測位置（格子シートの貼り付け位置）で計測を行う。損傷が発見され劣化が予想される場合には、従来位置に追加し損傷周辺に格子シートを貼り付ける。また、主桁のたわみは主桁中央付近が最大たわみとなるが、構造形式によっては必ずしも中央と限らない場合もあるので事前に検討しておく。更に、主桁端部に変状が発生することもあるので必ず端部の変位も計測する。橋脚や橋台部も変状の可能性が考えられるのであれば計測点として確認計測を行う。

通常、車両走行時のたわみ計測では車両が橋梁に侵入する前から通過後までの計測を行う。出来れば、橋梁の前後 5～10m の範囲まで走行車両が接近・通過したら計測する。事前計測で影響範囲を確認することを勧める。橋台の裏込め部分に車両が載ることで、主桁が振動又は変形を起こすこともあるので、事前確認を行う。

計測と同時に各計測点（格子シート上の計測点）の波形データを確認する。事前計測にて、計測点の順番位置と波形順番位置の確認を行う。但し、車両の走行位置によっては順番が異なることもあるので注意が必要である。

2.2.6 データの蓄積

サンプリングモアレカメラによる主桁変位（たわみ）の計測は、一定期間毎のインターバル計測が主体と考え、毎回の計測データを蓄積する。各回の計測も基本的に試験車両（荷重が既知の車両）が橋梁を通過又は中央に停車した時点のたわみを計測するものとし、約1分間のデータとする。但し、車両走行に伴う主桁変位（たわみ）を連続的に長時間計測する場合には、それに対応した記録装置を準備する。

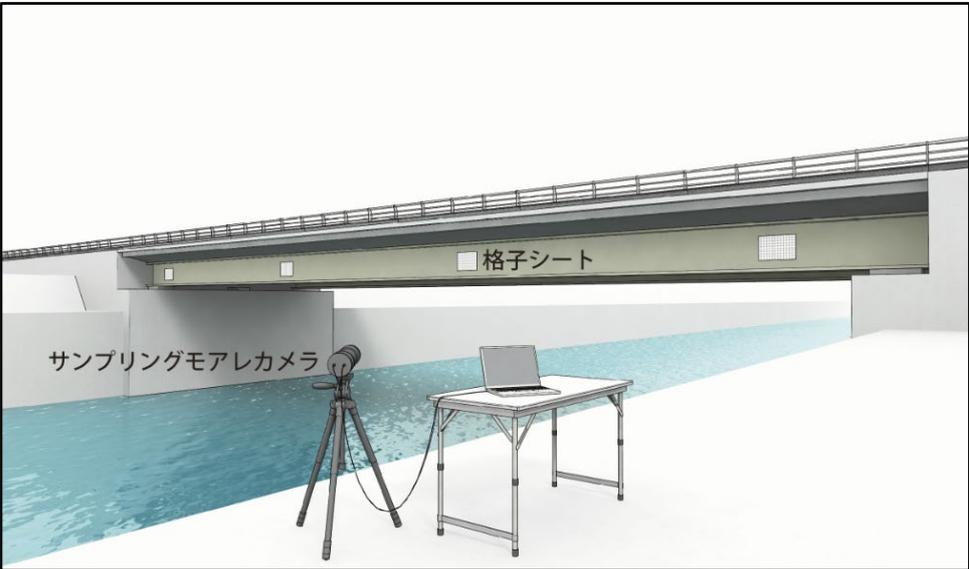
表 2.2.4 データ蓄積に必要な記憶容量

計測方式	計測条件	ファイル形式	記憶容量
動的計測 (静止・試験車 両走行)	計測点数：1点～16点 サンプリング周波数：50Hz 計測期間：1分間連続	C S V形式	約2MB
動的計測 (試験車両・高 速走行)	計測点数：1点～16点 サンプリング周波数：200Hz 計測期間：10分間連続	C S V形式	約100MB

2.2.7 費用の目安

モニタリングシステムの概算費用を示す（変位（たわみ）計測 1 回の費用）。

表 2.2.5 モニタリングシステムの概算費用

項目	摘要
モニタリングシステムの例	
計測器	サンプリングモアレカメラ, パソコン, バッテリー, 三脚
計測箇所数	格子シート (20mm 格子×A3) × 3 枚
測定期間	1 回 (1 日で 4 橋梁計測可能として: 移動も含め)
測定頻度	1 回/1 分間隔, 50Hz サンプルング
データ回収	現場でパソコンに収録
管理方式	現場管理方式
シート設置費	5 万円 (1~4 橋梁再利用)
機材損料費	機材損料: 20 万円 (短期間損料) 【16 測点まで計測可能/台】
測定・報告費	35 万円 (1~4 箇所/日)
総計	60 万円 (1 日で 4 橋梁連続計測可能として, 4 橋梁合計) (計測機材はレンタル可能, 走行車両・足場仮設は含まず)

※1. 足場の設置費用・撤去費, 交通誘導, 交通規制, 試験車両は含まず。

2. 1 日で 4 橋梁の計測が可能とした見積である。(移動含む)

2.3 結果の評価

主桁変位（たわみ）のモニタリングは、定期的なインターバル計測として行うことが理想である。また可能な限り、供用開始時や補修・補強完了時に初期値計測としてたわみ計測を行うべきである。一般的に橋梁の構造的強度を計測する方法として、たわみ計測と同時に主桁の表面ひずみ計測を行い断面係数を算出し、設計時の断面係数と比較し損傷度を判定することがある。しかし、橋梁完成時に初期値計測として主桁のたわみ量とひずみ量を計測しておけば、正確な断面係数の比較ができるのであるが、実際にはこの初期値計測が行われることは少なく、設計で用いた物理量を利用しているのが実情である。

目視点検等で主桁に損傷が発見され構造強度に懸念がある場合には、主桁のたわみ量とひずみ量を計測して断面係数の変化を設計時と比較し、損傷度合を判定する。また、設計上のたわみ限界値に対して管理値を設け管理指標とすることもある。

管理値（閾値）の区分については、主桁たわみに対して警戒値、通行規制値、限界値の3段階の管理値を定めて計測管理を行うのが一般的である。

管理値のうち、通行規制値、限界値に達した場合は、影響がこれ以上拡大しないように、通行規制（通行止めを含む）することが基本であるが、現場状況を勘案して判断する。なお、具体的な管理値の設定には、道路橋示方書などを参考として設定する。

2.4 保守

サンプリングモアレ法による鋼桁の変位モニタリングでは、その計測期間中に定期的又は不定期にモアレ計測を行う際、モアレ計測に使用する計測機器の計測精度が常に一定であることが重要である。

(1) 格子シート

- ・格子シートは主桁側面に設置したままで、計測時に清掃を行えば良い。計測毎に格子シートを主桁側面に貼り付ける場合には同じシートを使い、更に主桁側面に印を付けておく。
- ・格子シートは常温保存で良いが、シートに部分的な温度変化による歪みや、上載荷重をかけ格子柄を変形させない。

(2) サンプリングモアレカメラ（パソコン含む）

- ・サンプリングモアレカメラは定期的な点検を行い性能を維持する。また、使用前には制御・データ収録用パソコンと接続し、操作性・データの収録状況等の点検を必ず行う。
- ・サンプリングモアレカメラは専用容器（防塵・防水・防湿）に入れ暗所で保存する。温度変化による機械部品の狂いを嫌うので、温度変化の少ない場所に安置する。
- ・レンズはカビが発生しやすいので、毎回使用後は清掃し暗所にて保管する。

参考文献

- 1) 藤垣，原，生駒，村田：列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用，実験力学 Vol.12, No.3, pp.179-184, 2012

3章 動画像処理によるたわみのモニタリング

3.1 技術の概要

3.1.1 目的

動画像処理による鋼桁のたわみモニタリングは、橋梁の健全度診断に必要な定量的データを得るための診断の補助として、目視点検では確認できない鋼桁の損傷などの変状に伴う構造性能の低下を評価するものであり、鋼桁全体、ひいては橋梁全体の健全性を客観的に数値として把握する。また、本モニタリングは橋梁の補修・補強工事の際、その効果を定量的に評価・確認する目的でも用いることができる。

本モニタリングの特長は、マーカー等を設置しなくても遠隔・非接触で対象箇所のたわみを計測できることと、障害物等により横方向から計測できない場合でも橋梁の真下から計測できることである。さらに、対象箇所に対して正対方向からだけでなく、斜め方向からでも計測できるため撮影位置の制約を受けないことである。また、本モニタリングは対象箇所を定期的に計測する場合に適した手法であり、診断の補助として活用できる定量的データを低コストに取得できる。

3.1.2 システムの概要

(1) 原理

動画像処理によるたわみ計測の原理について、図 3.1.1 を用いて説明する。カメラは、計測対象面に対して正対方向から撮影するものとする。図 3.1.1 に示すように車両通過に伴い計測対象面が dz だけ鉛直下方向（カメラの光軸方向）に変位した場合、カメラから計測対象面までの距離 L が短くなるため、動画像内で対象物が微かに拡大する。この時の拡大率を画像処理により算出し、拡大率と撮影距離から変位量（たわみ量）を算出する。逆に、計測対象面が鉛直上方向に変位した場合は、カメラから計測対象面までの距離 L が長くなるため、動画像内で対象物が微かに縮小する。この時の縮小率を画像処理により算出し、縮小率と撮影距離から変位量を算出する。これによりカメラの光軸方向の変位量を動画像処理により算出することができる。

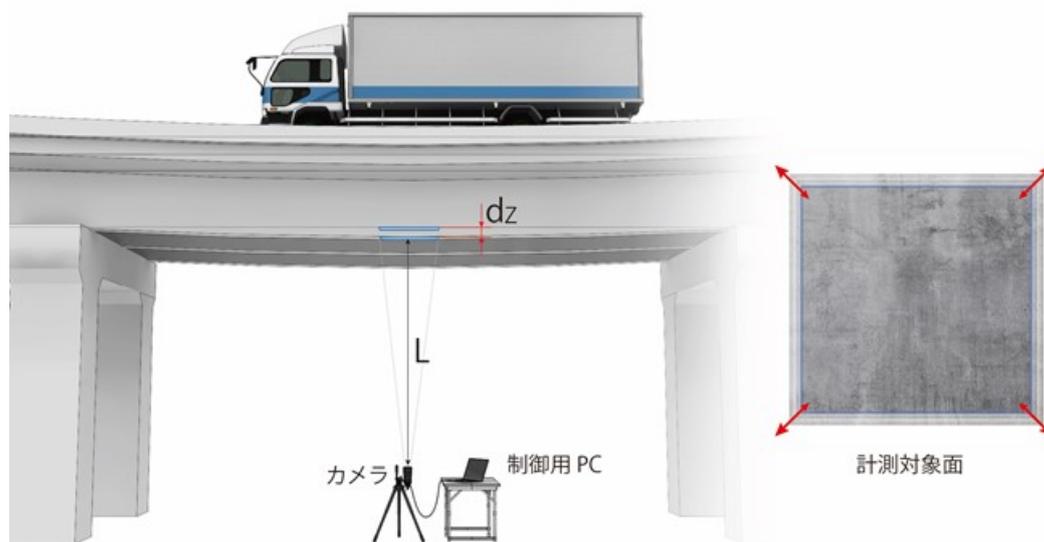


図 3.1.1 計測原理概要

次に、計測対象面に対して斜め方向から撮影する場合の原理について、図 3.1.2 を用いて説明する。図 3.1.2 に示すようにカメラは計測対象面に対して角度 θ 傾いているとし、角度 θ は別手段での計測により既知とする。斜め方向から撮影する場合は、①撮影角 θ を用いて撮影した動画像を透視投影変換し、正面化画像を生成する。正面化画像から前述の方法により正面化画像間のたわみ量 dz' を算出する。②正面化画像間のたわみ量 dz' の値を撮影角 θ を用いて補正し、たわみ量 dz を算出する。

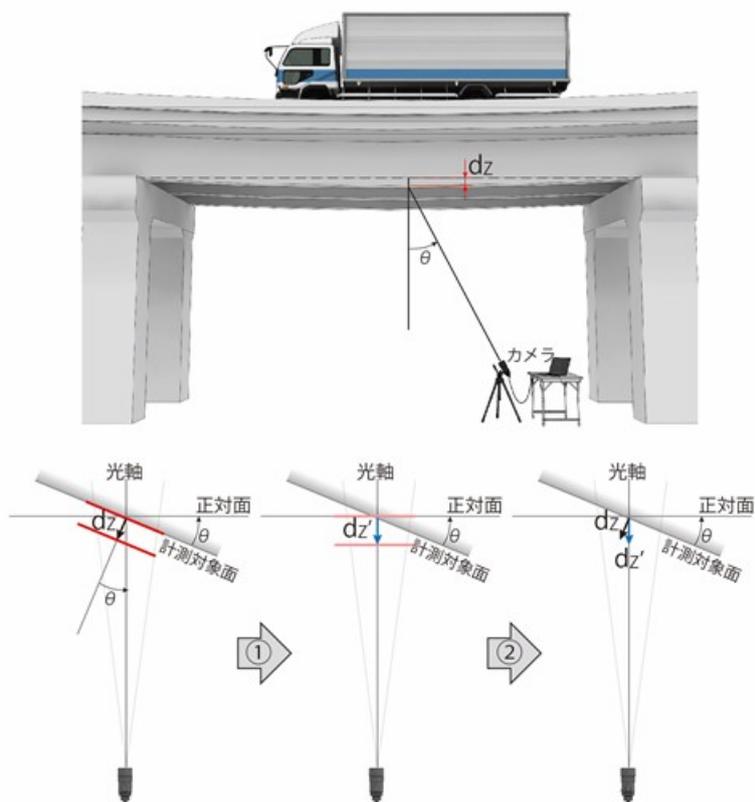


図 3.1.2 計測原理概要（斜め方向撮影）

(2) システム構成

本モニタリングシステムは、図 3.1.3 に示すように、カメラ、レンズ、三脚（カメラ固定用）、制御用 PC（専用アプリケーションインストール済み）、照明で構成される。

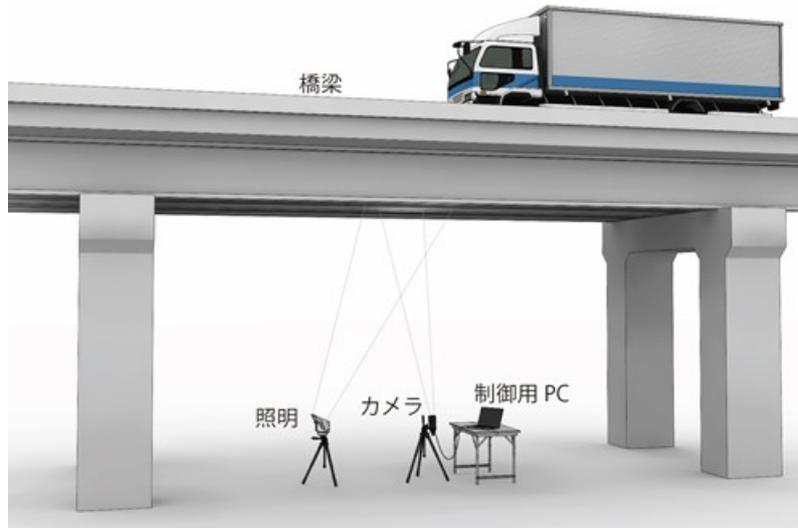


図 3.1.3 本モニタリングシステム

3.1.3 計測期間

モニタリングの期間や計測間隔は対象となる桁の劣化状況を考慮して、道路管理事業者が適切に決定するものとする。1回の撮影時間は、解析に必要な時間として、対象箇所上を車両が通過する前後5秒以上とする。

3.2 モニタリングの方法

ここでは、桁下の地上に本モニタリングシステムを設置し、動画像によりたわみを計測するモニタリング手法について説明する。

3.2.1 モニタリングの手順

動画像によるモニタリングの基本的な手順は、図 3.2.1 の通りである。また、撮影した動画像データから算出したたわみの時系列データ例を図 3.2.2 に示す。

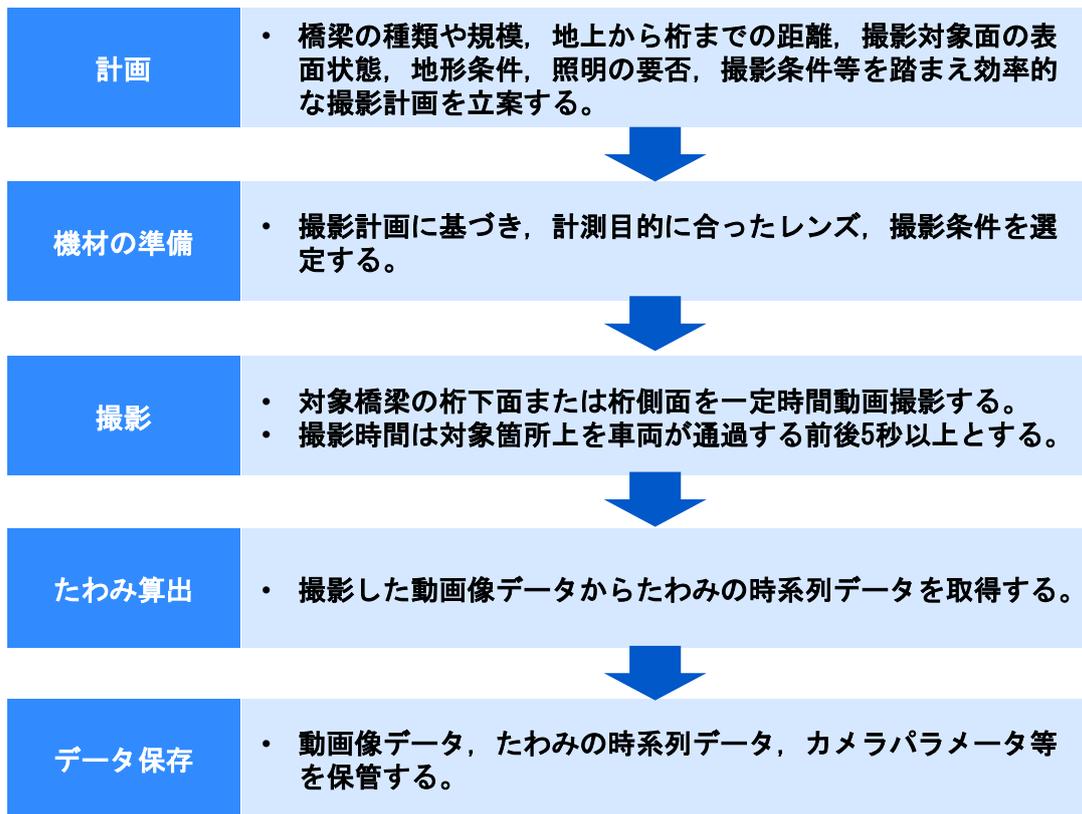


図 3.2.1 動画像によるたわみのモニタリングの手順



図 3.2.2 たわみの時系列データ例

3.2.2 計画

(1) 撮影距離

計測対象となる桁からカメラ・レンズまでの距離を撮影距離という。本モニタリングシステムは、撮影距離 10m 程度で、0.1mm 精度のたわみが計測可能となるように想定して設計している。撮影距離は、撮影前にレーザ距離計などで予め計測する。

(2) 撮影角度

なるべく桁の直下で撮影角度が小さくなるように計画する。橋梁の規模や種類、地形条件などにより計測対象部分直下にカメラを設置することが難しい場合は図 3.2.3 のように斜め方向から撮影することを検討する。また、焦点距離の大きい望遠レンズを使用する場合は、撮影角度が大きくなると撮影範囲全体のピントが合わせづらくなり、計測精度に影響する可能性がある。ただし、現場実証による知見では、カメラを直上から 40 度傾けて撮影しても真下から撮影した場合と同等の精度で計測できることは確認している。

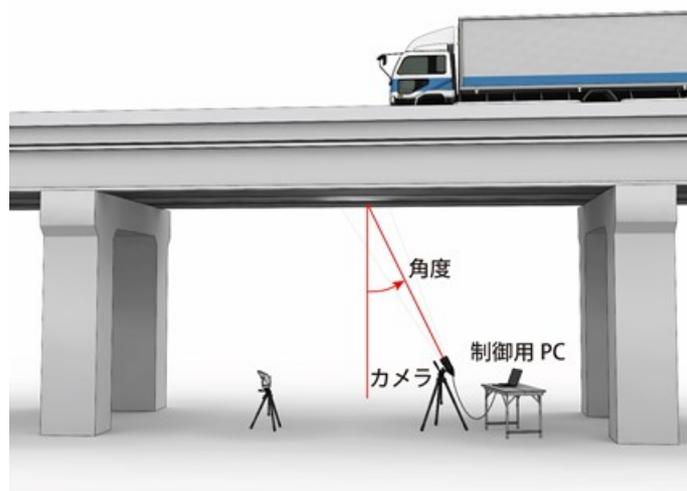


図 3.2.3 撮影角度

(3) 照度

照度が不足する場合は照明装置を使う。地面から桁までの距離、撮影対象の周辺環境（日照の影響の有無など）、撮影時間等を考慮して、撮影範囲内で照度ムラが発生しないように照明装置の要否、照明装置の種類、台数等を計画する。

(4) 計測箇所

計測箇所は桁下面または桁側面で日照変動等の影響が少ない箇所を選定する。天候条件（雨、風、陽炎、短時間での日照変動など）により計測精度に影響を及ぼす場合があるため、事前に確認する。特に計測箇所が桁側面で雨天の場合、雨粒が画像内に写りこむと精度が低下するので注意する。

3.2.3 機材の準備

(1) カメラ

本モニタリングシステムは、対象物表面の微小な動きを計測するものであるため、グローバルシャッター型のカメラを使用する。また、ピクセル情報を最大限活用するため、モノクロカメラを使用する。解像度、フレームレートを考慮し、0.1mm 精度（撮影距離 10m）でたわみを計測するためには、フル HD・200 万画素以上のものを推奨する。参考までに現場実証で使用したカメラのスペックを表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 使用カメラのスペック

項目	仕様
インターフェース	USB3.0
グローバルシャッター	CMOS
ピクセルサイズ	5.5×5.5 μm
解像度	2048×2048
フレームレート	90fps（最大）

一方、計測用途ではない民生用のカラーカメラは、色変換、ガンマ変換、ベイヤー配列デモザイキング（+物によっては絵作り処理）等が入るため画像解析の精度を追求するには不向きであり、利用にあたっては個別に検証が必要である。

(2) レンズ

レンズは基本的には単焦点レンズを推奨する。撮影時の焦点距離がわかればズームレンズを使用しても構わないが、正確な焦点距離が記録できない場合は使用を推奨しない。焦点距離に関しては、既知の撮影距離にある既知の大きさ・長さの物体を撮影することで、撮影画像から算出してもよい。

使用するカメラの解像度/ピクセルサイズおよびレンズ焦点距離と撮影距離（厳密にはレンズ主点から桁までの距離）に応じて、カメラおよびレンズを選定する。例えば、表 3.2.1 のカメラを用いて、以下の条件で撮影した場合、撮影範囲は約 626×626mm、撮像分解能は約 305 μm となる。

- ・レンズ焦点距離：180mm
- ・撮影距離：10m

尚、撮像分解能は、計測対象上における 1 ピクセルのサイズである。この程度の撮像分解能があれば撮影距離 10m 程度で 0.1mm 精度のたわみ計測が可能となる。

また、現場実証では表 3.2.1 のカメラに加えて、以下の仕様のレンズおよびレンズアダプタを使用した。

- ・レンズ：焦点距離(180mm)，最大口径比(1:2.8)，レンズ構成(6群8枚)，
絞り方式(自動絞り)，最大絞り(f/2.8)，最小絞り(f/22)
- ・レンズアダプタ：Cマウントアダプター

(3) 制御用 PC

専用のアプリケーション（※）では、対象物を動画撮影しながらたわみの算出結果をリアルタイムに表示可能な機能を備えており、本機能を利用するためには、高性能 GPU を搭載するか、或いは 6 スレッド以上のマルチスレッド CPU 搭載の機種を選定する。

※専用のアプリケーションとは、撮影した動画像を処理してたわみ量を解析するソフトウェアです。本章での紹介例の製品に関しまして、現時点で提供可能な試用版については巻末の問い合わせ一覧にある問い合わせ先までご連絡ください。

(4) レーザ距離計

撮影距離、撮影角度を測定するためにハンディタイプのレーザ距離計を使用する。

3.2.4 撮影

計測対象箇所（橋梁の桁下面）を重量既知の車両通過に合わせて一定時間動画撮影する。撮影時間は対象箇所上を車両が通過する前後5秒以上とする。撮影に必要な人数は橋梁下で制御用PCの操作を行う人と橋梁上を通過する車両が見渡せる場所で撮影開始の合図をかける人の計2名は最低限必要である。ただし、図3.2.4に示すように、車両検知用のセンサ（超小型レーザ距離センサ）を対象箇所の手前の道路脇等に設置して車両通過によるトリガ計測も可能である。これにより撮影・計測に必要な人数を削減できる。ただし、機器の設置・撤去作業も含め安全面を考慮すると2名での作業を推奨する。

また、撮影にあたって計測対象箇所の照度に注意する必要がある。レンズの絞りを調節しても画像が暗い場合は、照明装置を使用する。照明装置は、撮影範囲を照度ムラがなく均等に照らせる機器を選定するのが望ましい。また、照明装置の種類は、バッテリーで長時間使用でき、消費電力の少ないLED照明が望ましい。さらに、必要に応じて複数台使用することで撮影範囲の照度ムラが無くなるよう調整しても良い。また、計測対象箇所が日照変動の影響を受けやすい場合も照明装置を使用することで、ノイズの少ない安定した動画像を撮影することができる。さらに、照明装置のフリッカーもノイズの原因となる場合があるため、照明装置の使用にあたっては留意する。

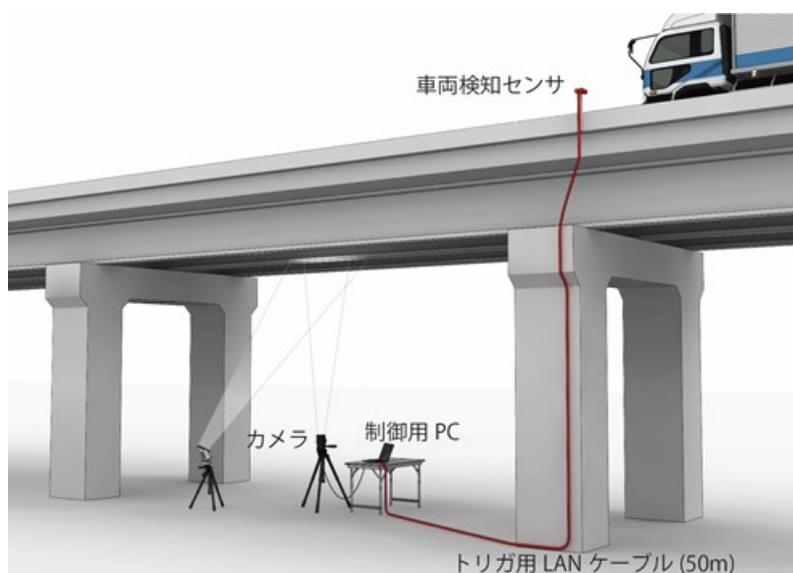


図 3.2.4 車両検知センサを利用した撮影方法

3.2.5 たわみ算出

専用アプリケーションにより車両通過に伴うたわみの算出手順を図3.2.5に示す。

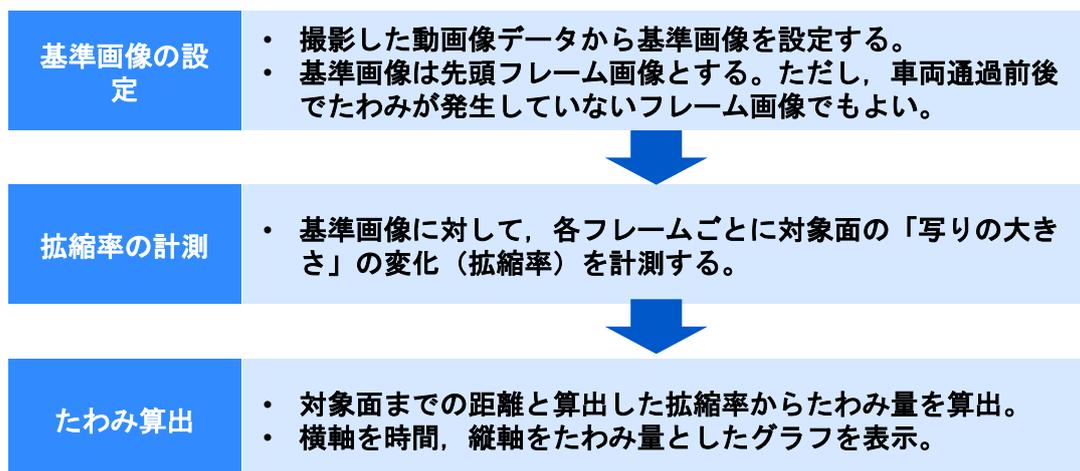


図 3.2.5 たわみ算出手順

3.2.6 データ保存

(1) 保管するデータ

保管するデータは以下の通り。

1) 動画データ

- ・ (フレームレート×撮影時間) 枚数分の画像

2) 撮影パラメータ

- ・ 撮影距離
- ・ 撮影角度
- ・ フレームレート, 露光時間, F 値, レンズ焦点距離

3) たわみ算出結果

(2) データの保管単位

1 回の計測ごとに PC 内の指定のフォルダ内に自動でフォルダが作成され、作成されたフォルダ内に動画データが (フレームレート×撮影時間) 枚数分格納される。

- ・ フォルダ名：西暦年月日時分秒 (時刻は撮影開始時刻)
- ・ ファイル名：西暦年月日時分秒_フレーム番号

(3) データのフォーマットと容量

データのフォーマットと容量を表 3.2.2 に示す。画像データは容量が大きいので、道路管理事業者の判断で、たわみ算出後は基準画像だけ残して、それ以外は消去しても良い。

表 3.2.2 データのフォーマットと容量

名称	種類	フォーマット	容量 (参考)
①動画データ	画像データ	BMP	1.6GB (注 1)
②撮影パラメータ	テキストデータ	TXT	1KB
③たわみ算出結果	テキストデータ	TXT (注 2)	850KB

(注 1) フレームレートを 80fps, 撮影時間を 5 秒とした場合の 1 回の計測データ容量

(注 2) ファイルフォーマットはテキストタブ区切り形式

3.2.7 費用の目安

本モニタリングシステムにおける費用の目安を表 3.2.3 に示す。費用の試算にあたって、これまで現場実証を行った橋梁をモデルケースとし、1 橋あたり、計測作業は1 日として概算費用を算出した。算出条件は、径間長約 40m の橋梁で計測箇所は 5 箇所、動画像データ（＝解析データ）数 25 とし、橋梁下にカメラが設置可能であるとした。ただし、費用は橋梁の規模、計測環境（機器の設置容易性など）、計測箇所数および解析するデータ数により変動する。

表 3.2.3 費用の目安

作業内容	数量	費用	備考
①計測作業	1 式	450,000 円	機器レンタル費は含まず
②解析作業	1 式	500,000 円	
合計		950,000 円	

注) ただし、表中の費用には経費は含まれていない。

3.3 結果の評価

道路管理事業者が、診断の補助として定期的に橋梁の対象箇所のたわみ量を計測する場合、モニタリング結果は以下のように評価する。

対象橋梁の設計資料や事前解析の程度により、1 編 3 章で記した閾値を管理基準として措置判断を行うケース A（1 編 図 3.6.1）、通常の供用状態において必要な物理量を定期的・継続的に監視し、異常値や急激な増減を観測するケース B（1 編 図 3.6.1）のいずれの評価も適用可能である。対象橋梁の設計資料の整備状況、解析コストなどを総合的に検討して、何れの方法を採用するかを選択する。

橋梁のたわみは、構造物の疲労・損傷に伴い増加する。定期的な計測データの解析には、たわみ測定時の入力荷重が既知である必要があるため、任意の重量既知の車両を走行させてたわみ量を測定する。施工時または補修補強後などの健全時に初期値としてたわみ量を測定しておき、得られた現在のたわみ量と当初（健全時）のたわみ量とを比較し、たわみ量の著しい変化の有無を観測することで結果を評価する。また、対象橋梁のたわみ量が管理値として設定されている場合は、測定したたわみ量が管理設定値を超えているかを評価する。

結果の評価で異常と判断された場合、該当橋梁の詳細点検を実施する。

また、補強工事の前後で上記と同様に重量既知の車両を走行させた時のたわみ量を測定し比較することで、補強効果を定量的に評価・確認することができる。

3.4 保守

動画像による鋼桁のたわみのモニタリングでは、微小な動きを計測するため、動画像データの画質が重要となる。動画像データの画質はたわみの計測性能に影響を及ぼす。したがって、モニタリングで使用する制御用PC、カメラ、レンズ、等については適切な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。

(1) 制御用PC

- ・撮影・計測前にバッテリーを充電し、機器が正常に動作するかを確認する。
- ・専用アプリケーションを立ち上げ、正常に動作するかを確認する。

(2) カメラ・レンズ

- ・撮影・計測前にカメラが正常に動作するか確認する。
- ・PC画面上に画像が映っていて専用アプリケーションでカメラ制御できることを確認する。
- ・レンズについては、傷や汚れ・カビがないかを確認する。
- ・撮影・計測後はカメラとレンズの清掃を行い、傷・汚れが付かないように収納する。

尚、モニタリング期間中にカメラが更新され、後継機種のスぺックが変更された場合は、従来カメラのスぺックと同等かそれ以上の機種を用いることで継続してデータ比較が可能となる。

4章 加速度センサによるたわみのモニタリング

4.1 技術の概要

4.1.1 目的

加速度センサを用いると、主桁に印加される加速度を演算処理することで、たわみ（活荷重変位）を観測することができる。

近年の MEMS 技術の発展により加速度センサは著しい進歩を遂げ、高性能・高安定・長寿命な加速度センサを採用する事で、長いものでは 10 年間に及ぶ長期の常時計測が可能となった。また長期の常時計測可能なモニタリング手段としては、設置工事が比較的容易である事も加速度センサの利点である。

加速度センサを用いるたわみのモニタリングは、長期常時計測の特徴を活かし、健全度の低い橋梁の供用状態を維持するための常時モニタリング手段として採用するのが最も効果的である。しかしながら、複数の橋梁に対して少数のセンサを定期的に流用・設置し、低コストな計測システムとして活用することも可能である。

たわみによる健全性評価は、鋼桁の構造劣化を評価するものであり、鋼桁の健全性を数値として定量的に把握することができる。また本手法では、供用中断後の橋梁の補強工事の効果を定量的に評価・確認する事ができ、供用状態の維持から補強効果の確認まで一貫して用いることができる。

加速度から主桁のたわみ（活荷重変位）をモニタリングするには、一つ、或いは複数の加速度センサを鋼桁に設置し、車両が走行した時の加速度応答から、たわみを算出する。主桁の構造劣化が進行すれば、たわみ量の経時的な変化から、構造性能の低下を評価できる。

なお、3 編 4 章に示すように、加速度から主桁の固有振動および振動の減衰、振動モード、たわみ角を導出することも可能であり、加速度センサを用いるだけでも様々な物理量を算出して多面的な分析が可能である。

4.1.2 システムの概要

(1) システム構成

1) 遠隔計測型システム

遠隔計測型システムは、加速度センサ、データ収集装置、広域ネットワーク、アプリケーションで構成されている。その構成例を図 4.1.1 に示す。本システムは、事務所にいながらデータ収集と分析・評価が可能なシステムとなっている。

遠隔計測型システムは、現地へ行く事なく常時計測・監視が可能であり、遠隔地から現場の状況を即座に診断し、判断を下さなければならない状況に好適である。

本システムは、損傷が発見されても即座に通行止めなどの処置ができない重交通路線の橋梁などのモニタリングに有効である。

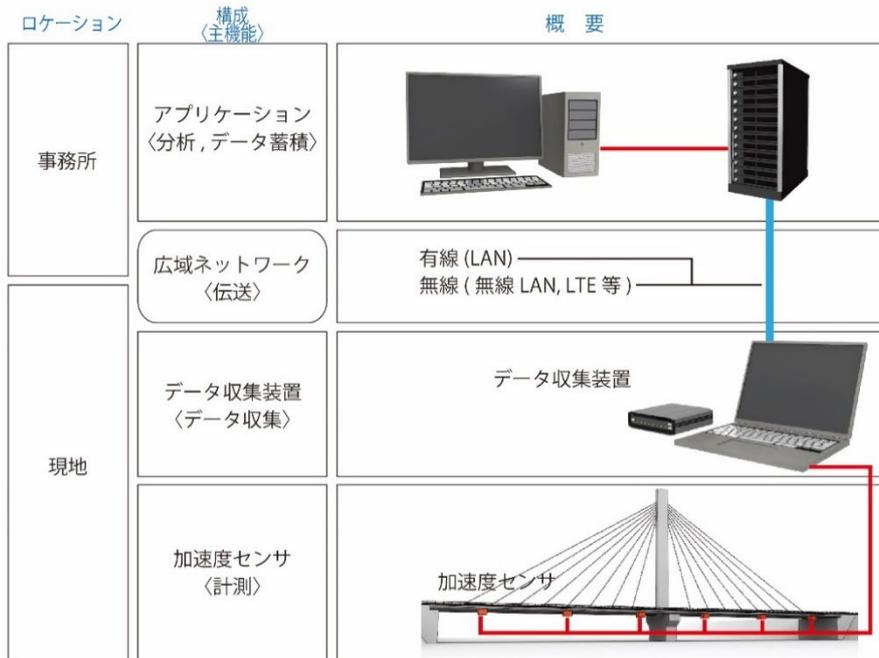


図 4.1.1 遠隔計測型システム

2) オフライン型システム

オフライン型システムは、加速度センサ、データ収集装置、アプリケーションで構成されている。その構成例を図 4.1.2 に示す。本システムは、現地で収集した加速度データを記録メディアに記憶、事務所などへ持ち帰り分析を行い評価するシステムである。計測に必要な現地機器は計測時のみ設置し、複数の現場で同一機器を使い回せるので経済的である。

本システムは、他のたわみのモニタリング手法と同様、即時性が求められない、比較的健全性の高い橋梁に対し健全度診断のための定量的データを得るといふ、診断の補助としての活用に適している。

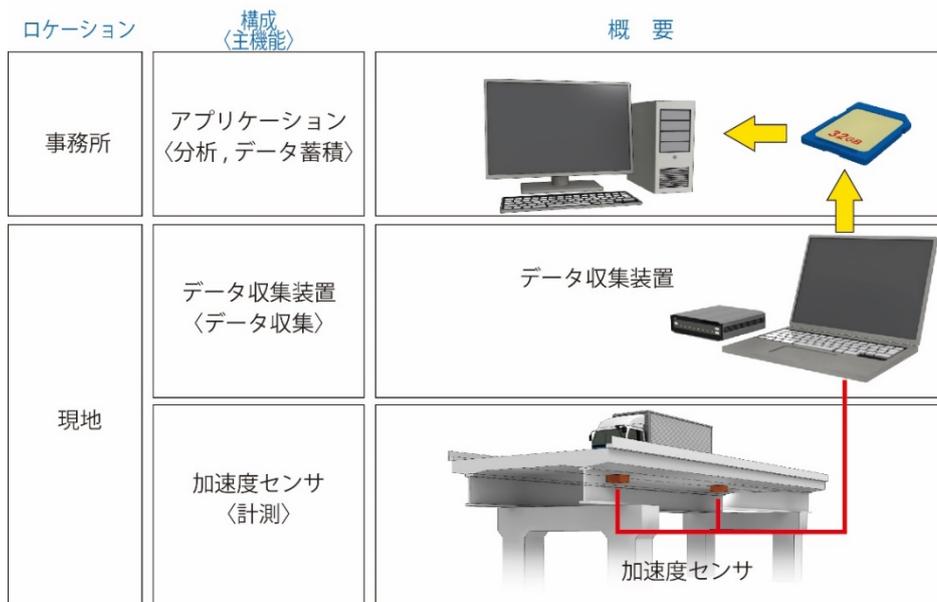


図 4.1.2 オフライン型システム

(2) 構成機器

1) 加速度センサ

加速度センサは、橋梁に印加される加速度を計測する。図 4.1.3 に加速度センサの例を示す。加速度センサは長期安定と高精度測定を行うために、外部給電および有線伝送路を確保することが望ましい。表 4.1.1 に、加速度センサの代表特性例、および性能項目のポイントを示す。

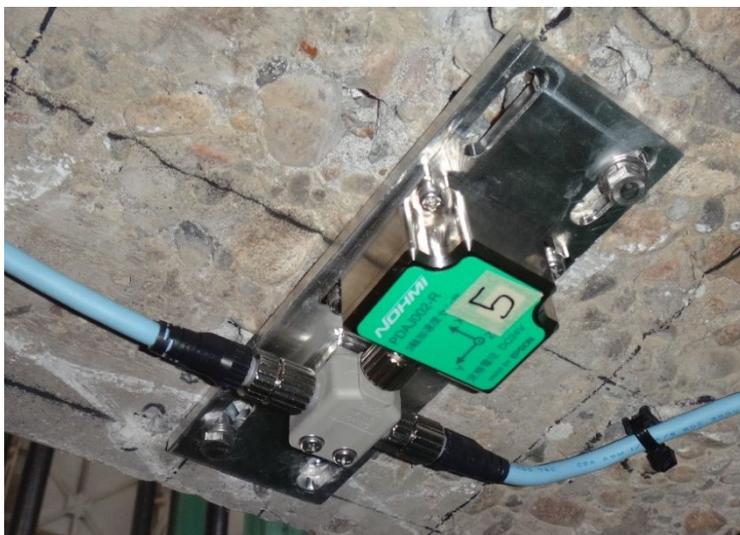


図 4.1.3 加速度センサ

表 4.1.1 加速度センサの代表特性例

性能項目	仕様	性能項目のポイント
測定軸数	3 軸	単軸でも測定可能だが、3 軸あるとセンサ設置姿勢の自由度が増す
軸アライメント誤差	-55 [dB]	たわみの計測精度に影響（小さい程精度が高い）
加速度測定範囲	-5 ~ 5 [G]	橋梁の振動の大きさに応じて選択
加速度分解能	62.5×10^{-9} [G]	高剛性の橋梁の測定には高分解能品を選択
直線性誤差	0.03[%FS]	全計測値の測定精度に影響。1%FS 以下を推奨
測定周波数範囲	DC ~ 20 [Hz] (-10dB)	橋梁の規模、交通流の車速に合わせて選択
サンプリング周波数	100 Hz	橋梁の規模、交通流の車速に合わせて選択
保護等級	IP67	風雨に曝される場合、防水、防塵構造が必要

2) データ収集装置

データ収集装置の主機能は、データの収集、データの保存、加速度センサの状態監視及び動作制御、広域ネットワークを介したアプリケーション側へのデータ送信である。オフライン型システムの場合、データ送信機能は必要としない。図 4.1.4 にデータ収集装置の例を示す。



図 4.1.4 データ収集装置

3) 広域ネットワーク

広域ネットワークは、データ収集装置とアプリケーションとの通信手段である。広域ネットワークは、橋梁の構造や周囲の通信環境を鑑みて、無線方式か有線方式のどちらかを選択する。無線方式は、通信範囲や回線容量を考慮して、現状では 3G または LTE 回線の利用を推奨する。有線方式では、通信仕様を踏まえ最適な通信インターフェースを選定する。

4) アプリケーション

アプリケーションの主機能は、データの蓄積や分析、評価の表示や閲覧である。また遠隔計測型システムの場合、加速度センサやデータ収集装置の状態監視や動作制御の機能も有している。計測した加速度データや分析データは、アプリケーションが実装される PC またはアプリケーションがアクセス可能なサーバへ蓄積する。アプリケーションは計測した加速度データや分析データなどのデータ群を管理する機能を有している。またアプリケーションは、加速度データから橋梁のたわみを算出して可視化させるデータ分析機能を有している。

4.1.3 計測の期間

常時計測では、計測機器の設置以後、連続して計測を行うのがよい。特に劣化・損傷が進み健全性が低く、即座に通行止めなどの処置ができない重交通路線の橋梁などは、計測機器を設置してから、モニタリングシステムが変状を検出して車両の通行を規制、または補修・補強等の維持管理工事が完了するまでの期間を常時計測するのが望ましい。

オフライン型システムを用いた定期計測では、日常点検に合わせて定期計測を行うのが費用面で効果的である。定期計測時の 1 回の計測時間は、重量既知の車両を意図的に数回～10 回程度走行させて測定するのが望ましい。

4.2 モニタリングの方法

4.2.1 モニタリングの手順

加速度センサを用いたたわみのモニタリングの基本的な手順は、図 4.2.1 のとおりである。

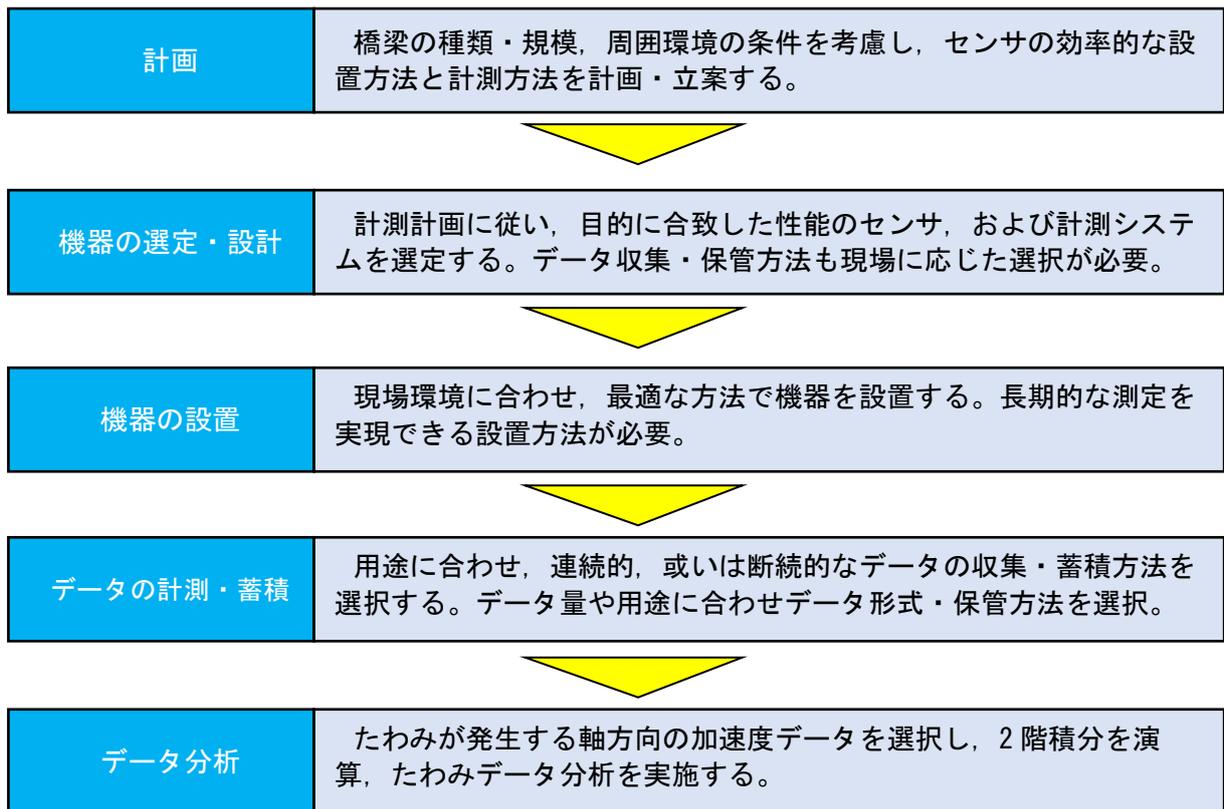


図 4.2.1 加速度センサを用いたたわみのモニタリング手順

4.2.2 計画

モニタリングシステムを導入する前に，対象橋梁の種類や規模および構造，周辺の地形条件や環境条件を調査し，目的に則した効率的な計画を立案する。調査項目表のイメージを表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 調査項目表のイメージ

調査項目	結果
加速度センサの設置可否	
データ収集装置の設置可否	
広域ネットワークの確認	
周囲環境の外乱要因の調査	

4.2.3 機器の選定・設計

(1) 加速度センサの選定

加速度センサを用いてたわみを測定する場合，性能項目のうち，周波数特性，サンプリング周波数，加速度の最小分解能を，測定対象に合わせて慎重に選択しなければならない。

たわみの周波数特性は，対象橋梁の径間長および走行車両の速度に依存する。表 4.2.2 に橋梁の径間長と走行車両の速度に対するたわみの周波数特性の目安を示す。加速度センサの周波数特性は，

表 4.2.2 の周波数に感度を持つものを選定する。サンプリング周波数は、測定周波数の 20 倍程度を満たせるのが望ましい。

最小分解能は、測定する主桁の最小たわみ量、および対象橋梁の径間長、走行車両の速度に応じて変化する。選択の目安として、表 4.2.3 に測定する最小たわみ量を 1[mm]としたときの要求性能を示す。

表 4.2.2 たわみ測定に必要な加速度周波数特性の目安

径間長	車両走行速度		
	30 [km/h]	60 [km/h]	100 [km/h]
10 [m]	0.41 [Hz]	0.83 [Hz]	1.38 [Hz]
20 [m]	0.20 [Hz]	0.41 [Hz]	0.69 [Hz]
50 [m]	0.08 [Hz]	0.16 [Hz]	0.27 [Hz]
100 [m]	0.04 [Hz]	0.08 [Hz]	0.13 [Hz]

表 4.2.3 測定する最小たわみ量を 1[mm]とした時の最小分解能

径間長	車両走行速度		
	30 [km/h]	60 [km/h]	100 [km/h]
10 [m]	33 [μG]	138 [μG]	383 [μG]
20 [m]	8 [μG]	33 [μG]	95 [μG]
50 [m]	1.2 [μG]	5 [μG]	14 [μG]
100 [m]	0.3 [μG]	1.2 [μG]	3 [μG]

(2) データ収集装置の選定

1) 遠隔計測型システム

データ収集装置の記憶容量は、広域ネットワークの遮断などを考慮して加速度センサのサンプリング周波数で、少なくとも 7 日以上計測データを保持可能な容量を有する機器を選定する。アプリケーション側と通信するために、通信範囲や回線容量を考慮した無線通信または有線通信などの広域ネットワークを利用可能な機器を選定する。

2) オフライン型システム

データ収集装置の記憶容量は、加速度センサのサンプリング周波数で計測期間内のデータを記録可能な容量を有する機器を選定する。

4.2.4 機器の設置

(1) 加速度センサの設置

加速度センサの設置は、鋼桁と加速度センサを強固に締結させるため鋼材に穿孔、或いはナットを溶接してのネジ固定が最も確実であるが、鋼材への穿孔や溶接は許容され難い場合、強力な永久磁石による固定が現実的である。永久磁石により固定する場合、センサの横ずれ防止、および永久磁石の腐食防止のため、塗膜を傷めないシリコン系コーキング剤などを用いて周囲をコーキングすること。

加速度センサに接続するケーブルは、ケーブルの振動が加速度センサに伝達される影響を防止す

るため、加速度センサ近傍で固定する必要がある。また、長期にわたる計測を行う場合、ケーブルは保護管などを用いて配管・配線を行う。

加速度センサの設置位置は、桁の径間中央付近に加速度センサを設置することが望ましいが、桁の径間中央付近への設置が困難な場合には、できるだけ中央に近い位置へ設置し、設置位置を数値で把握・記録する。また主桁全体の沈み込みが懸念される場合は、桁の両端にも加速度センサを設置するのが望ましい。設置する加速度センサの向きは、計測する3軸方向を、橋軸方向、橋軸直交方向、鉛直方向に合わせるのが最適であるが、少なくとも1軸は鉛直方向に合わせた設置とする。

なお、オフライン型システムによる定期計測の場合、計測時に同位置・同姿勢で加速度センサを設置する必要があるため、予め取付用ベースプレートをアクセスのしやすい位置に設置しておき、計測時に加速度センサをベースプレートに取り付けて計測を行う。

(2) データ収集装置の設置

データ収集装置の設置は、メンテナンスなどの作業性を考慮し、アクセスがしやすく、広域ネットワークへの接続を容易に確保できる橋梁またはその周辺に設置する。

またデータ収集装置は、常時安定した電源を確保することが重要である。商用電源以外の太陽光パネルなどを利用する場合には、十分に余裕を見込んだ設備を検討する。また長期にわたる計測を行う場合、落雷などによる機器損傷の懸念を考慮して、機器や電源設備の耐雷対策を検討する。

4.2.5 データの計測・蓄積

健全度の低い橋梁の、供用状態を維持するためのモニタリング手段として用いる場合、常時計測が原則である。年単位での常時計測による大量のたわみデータを統計解析し、統計的な異常検出を実現できる。

データ収集装置内の計測データは、定期的に広域ネットワークを経由して遠隔地のサーバへ蓄積する。常時計測による計測データの記憶容量は膨大であり、ネットワーク負荷、ストレージ容量、データ分析に要する計算コスト、の何れの面でも、バイナリ形式によるデータフォーマットの採用が効果的である。

橋梁の健全度診断に必要な、定量的データを得る診断の補助として使用する場合、7日間を超える期間を連続的に計測することが望ましい。これは連休などを除く道路の交通量は1週間周期で変動するためである。しかしながら、十分な交通流を見込めない橋梁では、意図的に車両を数回～10回程度走行させ、たわみを計測する。ここで毎回の計測に走行させる車両の重量を重量計などで計測して把握・記録する。毎回の計測で同一重量の車両を用いることが望ましく、車両重量は重いほうが望ましい。また走行車両は法定速度程度で走行する。

定期計測時のデータフォーマットは、CSV形式など、可読性の高いデータフォーマットで処理可能である。蓄積された計測データは、持ち帰りデータ分析を行う。

表 4.2.4 にデータフォーマットとデータサイズの目安を示す。

表 4.2.4 データフォーマットとデータサイズの目安

データフォーマット	時刻, 3 軸加速度, 温度情報をサンプリング周波数 100Hz で記憶した場合の 1 時間当たりのデータサイズ
CSV 形式	約 17 Mbyte
CSV 形式の可逆圧縮	約 8.5 Mbyte
バイナリ形式	約 5 Mbyte
バイナリ形式の可逆圧縮	約 2.5 Mbyte

なお, 計測データをそのまま送信・蓄積する事なく, データ収集装置内でたわみ量のデータ分析を行い, 結果を送信・蓄積する事で, ネットワーク負荷, データの記憶容量を 1/1000 以下に抑圧する事も可能である。

4.2.6 データ分析

図 4.2.2 に加速度から, たわみを導出する手順を示す。

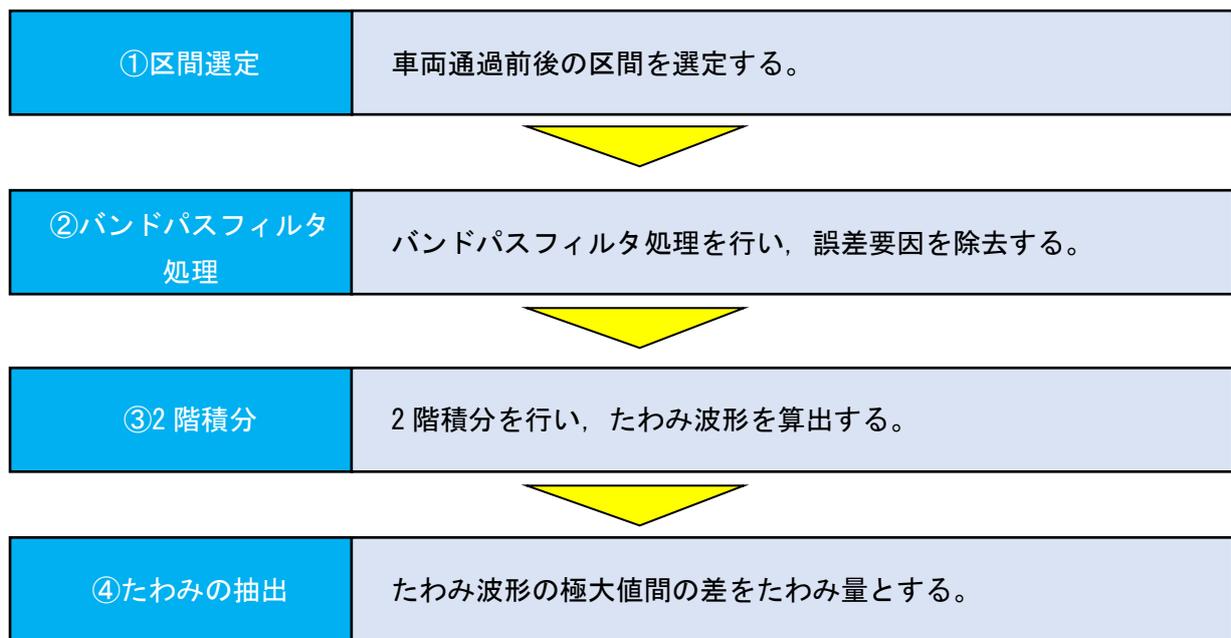


図 4.2.2 たわみの導出手順

- 手順① 先ず分析対象データを選定するため, 車両通過時の区間を選定する。
- 手順② たわみ算出時の演算誤差は, 周波数の 2 乗に反比例して増大する。
この誤差要因を除去するためバンドパスフィルタ処理を行い, 不要な周波数成分を除去する。
- 手順③ 手順②で得られたデータに対して 2 階積分を行い, たわみ波形を算出する。
- 手順④ 手順③で得られた, たわみ波形の極大値間の差を抽出し, たわみ量を得る。
主桁両端の沈み込みを補正する場合, 両端の沈み込み量を引き去り, たわみ量を得る。

図 4.2.3 に, 加速度波形からのたわみ量計測イメージを示す。

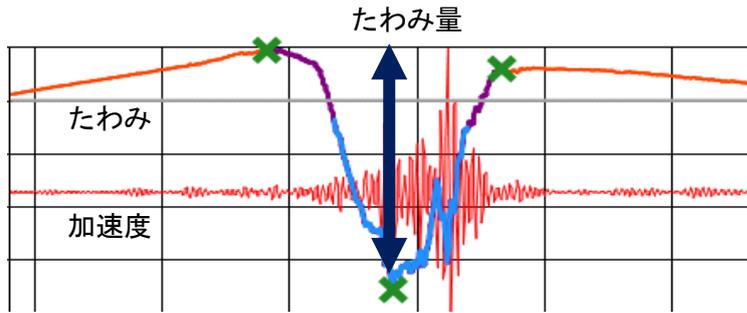


図 4.2.3 加速度波形からのたわみ量計測イメージ

4.2.7 費用の目安

多数の橋梁を常時計測する大規模システム、および定期計測に適した小規模システムの費用の目安を表 4.2.5 に、それぞれ示す。

表 4.2.5 費用の目安

項目	適用	
	遠隔計測型システム（常時計測）	オフライン型システム（定期計測）
システム例		
対応橋梁数	大規模	小規模
データ分析アプリケーション	データ分析用のサーバ装置を設置したアプリケーションサーバによる(※2)	管理者所有のPCを用いた分析アプリケーションソフトによる
計測点数	支間1点以上	支間1点以上
測定方式	常時測定	手動測定
測定期間・間隔	通年	1回/年
データ回収	広域ネットワークを經由	手動
機器費	加速度センサ+データ収集装置：400万円～ アプリケーションサーバ：数千万円～	加速度センサ+データ収集装置：150万円～ アプリケーションソフト：100万円
設置工事費	別途	別途

※1 電源・広域ネットワーク回線は別途調達

※2 監視橋梁数が小規模の場合、安価なPCによるアプリケーションサーバを構築可能

※3 計測機材は、レンタル可能

※4 費用は、計測点数により変動

4.3 結果の評価

対象橋梁の設計資料や事前解析の程度により、第1編3章で記す通り、閾値を管理基準として措置判断を行うケースA(1編 図3.6.1)としての評価、通常の供用状態の時点で必要な物理量を定期的・継続的に監視し、異常値や急激な増減を観測するケースB(1編 図3.6.1)としての評価、何れも適用可能である。対象橋梁の設計資料の整備状況、解析コストなどを総合的に検討して、どちらの方法を採用するかを選択する。なおケースBとしての評価を行う場合は、供用可能な状態の時点の計測データを初期値として用意する必要がある。初期値は、橋梁建設時に予め測定しておく事が理想的ではあるが、現実的には供用可能橋梁に対する現在の計測データで代用する。測定対象の橋梁の補強工事を行った場合、補強工事直後に計測データを取得し、これを新たな初期値とする事が望ましい。

(1) 供用状態維持のための常時計測の場合

橋梁のたわみは、構造物の疲労・損傷に伴い増加する。常時測定時の長期データを用いる解析では、年間を通じた大量の車両走行時のたわみ量を観測できる。これらの長期のたわみデータは、土日祝日や連休時など交通事情の異なる時期には統計的な傾向が異なるが、長期データとして統計的に扱うと安定したデータと見なす事ができる。そこで一定期間毎に車両通過時のたわみ量を統計データへ変換し、現在のたわみ量の統計データと健全時当初のたわみ量の統計データとを比較し、有意差を検出することで結果を評価できる。また事前解析により対象橋梁のたわみ量が管理設定値として設定されている場合、測定したたわみ量が管理設定値を超えているかを評価する事もできる。

結果の評価で異常と判断された場合、対象橋梁の詳細点検の実施や、供用停止など、橋梁の状況を詳細に確認の上、必要な措置を行う。

(2) 診断の補助のための定期測定の場合

橋梁のたわみは、構造物の疲労・損傷に伴い増加する。定期計測時のデータ解析には、たわみ測定時の入力荷重が既知の必要があるため、重量既知の任意の車両を走行させ、たわみ量を計測する。

得られた現在のたわみ量と、健全時当初のたわみ量とを比較し、たわみ量の著しい変化の有無を観測することで結果を評価する。対象橋梁のたわみ量が管理値として設定されている場合は、測定したたわみ量が管理設定値を超えているかを評価する事もできる。

結果の評価で異常と判断された場合、該当橋梁の詳細点検を実施し、橋梁の状況を把握する。

4.4 保守

長期にわたってモニタリング性能を維持するために、センサを交換する際に新旧センサの計測データの継続性・互換性を維持しなければならない。即ち新旧センサの計測データ間の相関を取り、新旧互いのセンサ同士で比較可能な変換を行える様、キャリブレーションを行う。

なおセンサの交換の際には、新旧センサは同じ姿勢で設置するのが、キャリブレーションを実施する上でも望ましい。このため、直接センサを橋梁に設置せず、取付ベースプレートを予め橋梁に設置して、ベースプレート上にセンサを設置することが望ましい。また、設置機器は定期的に点検整備(定期的な校正など)を行い、故障や測定精度の低下が無い事を確認する。

またデータの互換性を確保するために、計測データのデータフォーマットを同一にする、または旧センサのデータフォーマットに変換できる必要がある。

5章 光ファイバによるたわみのモニタリング

5.1 技術の概要

5.1.1 目的

光ファイバによるたわみのモニタリングは、耐荷力の低い橋梁（平成5年改訂以前の示方書適用の橋梁など）や、緊急輸送道路等で健全度がⅢ以下の鋼橋において、橋梁が通行制限あるいは通行止めにするべき状況にあるかの診断を補助する技術である。また、災害等の緊急時に橋梁が通行制限あるいは通行止めにするべき状況にあるかの診断の補助にも活用できる。本モニタリングの対象橋梁イメージを図5.1.1に示す。

	健全度Ⅰ	健全度Ⅱ	健全度Ⅲ	健全度Ⅳ
緊急輸送道路	平成5年改訂以前の 道路橋示方書により 設計された橋梁		全ての橋梁	
その他道路	平成5年改訂以前の 道路橋示方書で設計 かつ 大型車両の通行が多い橋梁		大型車両の通行が多い橋梁	

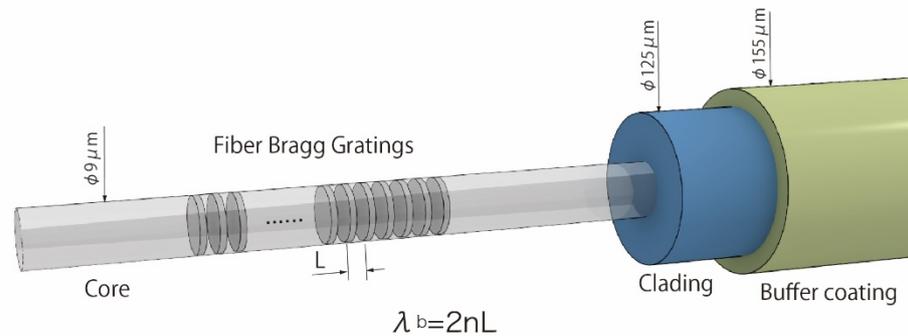
図 5.1.1 モニタリング検討対象橋梁

5.1.2 システムの概要

(1) 概要紹介

光ファイバによるたわみのモニタリングではFBG(Fiber Bragg Gratings)と呼ばれる方式の光ファイバセンシング技術を活用する。

FBG とは、**図 5.1.2** のように光ファイバのコアの屈折率に周期的な屈折率変化を形成したファイバ型デバイスのことで、この部分がセンサとして機能する。



λ_b : ブラッグ波長
 n : 光ファイバのコアにおける有効屈折率
 L : グレーティング周期と呼ばれるグレーティング (回折格子) の間隔

図 5.1.2 FBG の構造

帯域を持った入射光が FBG を通過する際、ブラッグ波長と呼ばれる特定の波長成分 (λ_b) が FBG より反射し、他の波長成分は透過する。この FBG 部に外力が加わると光ファイバが伸縮し、それに伴い FBG の回折格子間隔が変化し、**図 5.1.3** のように反射するブラッグ波長も変化する。

この特性を利用し、入射光と反射光の波長変化から FBG の伸縮を求め、ひずみを求める事が出来る。

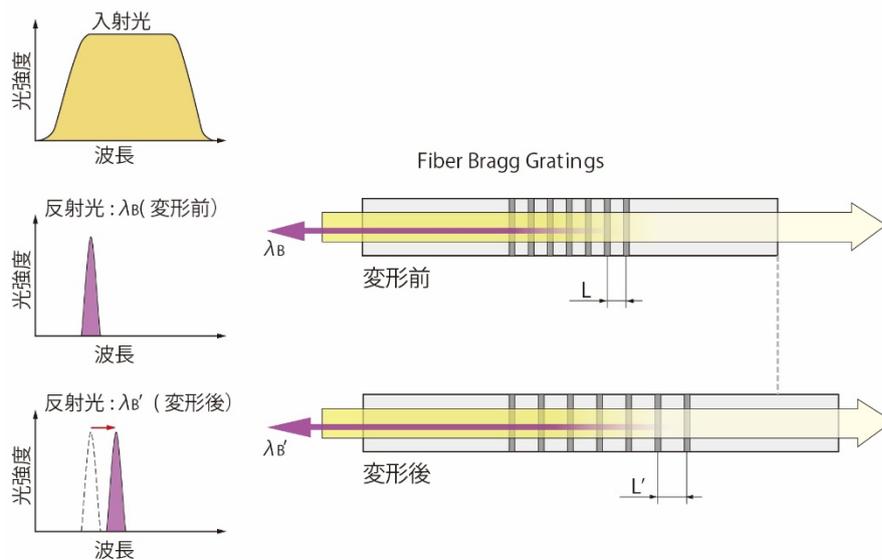


図 5.1.3 FBG センシングの原理

光ファイバセンサ（FBG）の特徴を以下に示す。

■特長

- ・精度が高く，リアルタイム計測が可能
- ・1本の光ファイバで多点計測が可能
- ・センサ自身に給電が不要
- ・落雷等の影響を受けない
- ・電気ノイズの影響を受けない
- ・耐食性に優れ，長期信頼性が高い

光ファイバセンサでの計測を行う場合，光ファイバセンサと光ファイバセンサ用の測定器，計測データのモニター・データ圧縮等の操作を行う PC で構成される。鋼橋計測の場合に使用する光ファイバセンサ（FBG）の例を図 5.1.4 に，光ファイバセンサによる計測システムの構成を図 5.1.5 に，また光ファイバセンサによるたわみモニタリングに必要なセンサ及び測定器の要求スペックを表 5.1.1 に示す。

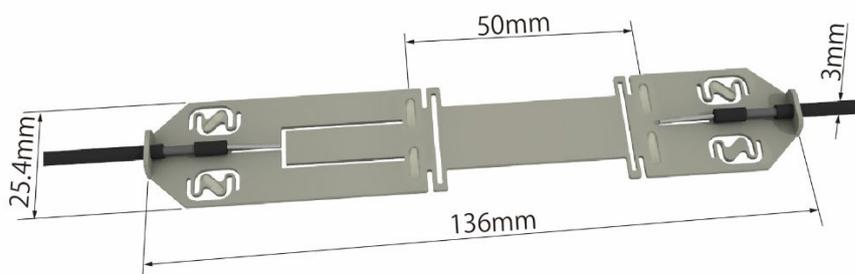


図 5.1.4 鋼橋計測用光ファイバセンサ（FBG）例



図 5.1.5 FBG センサ（金属計測用）例

表 5.1.1 要求スペック

センサ	ひずみ計測精度	$1\mu\varepsilon \sim 2\mu\varepsilon$ 以下
測定器	サンプリング周波数	100Hz 以上で計測可能
	センサ接続数	5 点以上

(2) システム概要

光ファイバによるたわみのモニタリングは、センサによるひずみの計測、モニタリング用カメラによる橋梁映像の撮影、及びデータ送信を行う「現地側システム部」、現地で送信されたデータをサーバへ送る「ネットワーク部」、送信された計測データを基に解析を行い、たわみ、支承異常の検知及びその状況・映像を管理者が確認できる機能を提供する「データセンター部」、の3つに分別される。モニタリングシステムの全体構成を図 5.1.6 に示す。

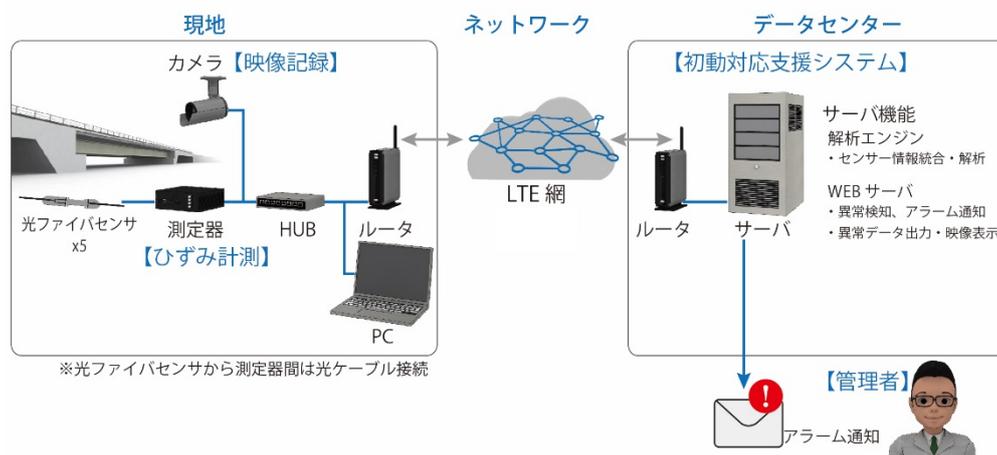


図 5.1.6 システム構成図

1) 現地側システム

現地側システムは光ファイバセンサ及び測定器、現地状況を撮影するカメラ、計測データの収集・送信を行う PC 及びルータで構成される。

光ファイバセンサで計測されたひずみデータ、及びカメラ映像をルータよりネットワークを通じてデータセンター側へ送信する。ひずみデータは LTE 網でも伝送できるよう、2 分毎にファイル作成し、PC でデータ圧縮して送信する。

2) ネットワーク

現地からデータセンターへのデータ送信は、商用の光ファイバ回線等を準備して行うのが一般的ではあるが、橋梁の場所によっては引き込みが困難である場合を考慮し、LTE 網を用いて伝送する。ただし、第三者によるデータ傍受やハッキング等を考慮し、第三者が接続できないネットワーク環境を推奨する。

3) データセンター側システム

データセンター側システムにはルータ、サーバが設置され、現地から送信されたひずみ、異常時の映像データの蓄積を行うストレージ、データ解析を行う解析エンジンと解析結果から異常検知、アラーム通知・異常箇所の表示、異常時の映像を表示する Web サーバで構成される。

解析フローを図 5.1.7 に示す。

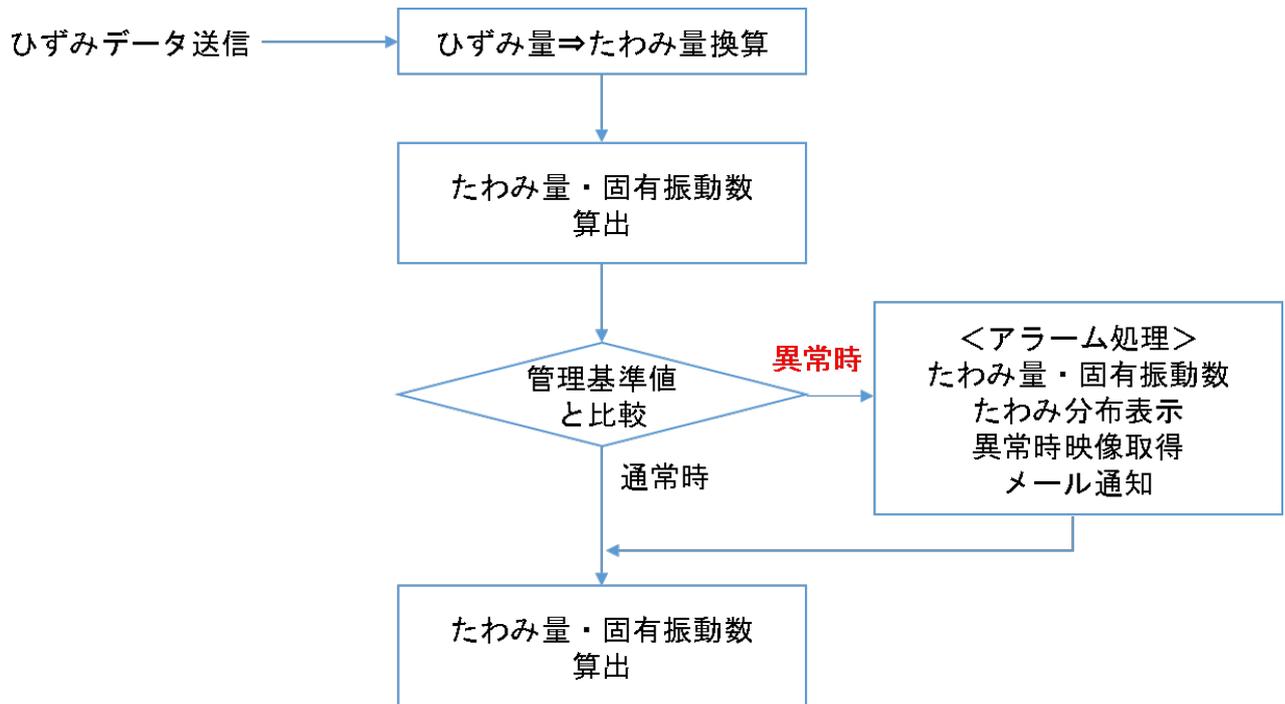


図 5.1.7 解析フロー

解析エンジンではひずみデータよりたわみ量を算出し管理基準値と比較する。 Web サーバでは、ひずみデータより算出されたたわみ量の管理基準値超過を検知した際、登録した管理者へメールによるアラーム通知を行う。

5.2 モニタリングの方法

5.2.1 モニタリングの手順

図 5.2.1 に光ファイバセンサによるたわみモニタリングのフロー図を示す。

事前解析からシステム運用までの緑の部分にはモニタリング導入までの流れを示し、アラーム発生以降の赤の部分は、システム運用開始後に管理基準値超過をシステムが検知し、管理者に通知された後、管理者がシステムから橋梁の状態を確認・判断し実施するものを示している。

なお管理基準値の設定に当たっては、設計データによる事前解析及びシステム構築後の初期計測結果を基に設定するため、橋梁供用開始時の初期値の計測は必要としない。

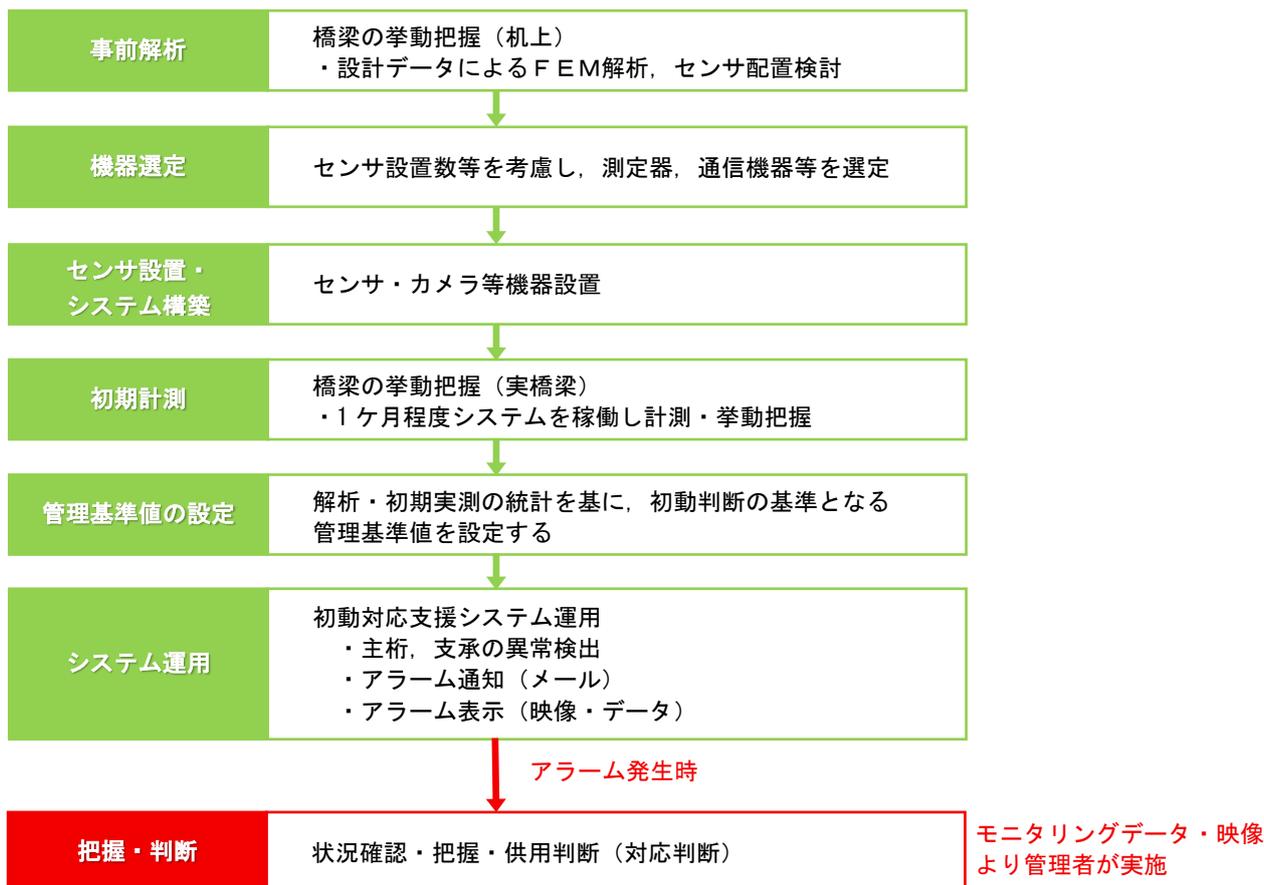


図 5.2.1 モニタリングフロー図

5.2.2 事前解析

計測を実施する前に対象橋梁の構造計算を行い、構造物の挙動把握するための各センサの最適配置を決定すると共に、発生するひずみの最大値を求め対応するセンサを選定する。

解析は、単純桁橋など構造が単純な場合には梁理論による手計算やフレームモデルによる構造計算、連続桁橋や構造が複雑な場合には有限要素法による構造解析など、解析手法を選定し実施する。

選定した解析手法により固有振動数とその振動モード解析を行い、3次モード程度までの挙動が計測できるように、各モードのたわみが最大となる位置を求め、センサ設置位置とする。

事例として、国土交通省平成26年「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発に係る公募（橋梁分野の維持管理の高度化・効率化に係るモニタリングシステムの現場実証）」（以下、国交省モニタリング実証）での事前解析事例を示す。

国交省モニタリング実証では径間長30m、上下1車線の単純桁橋の図面を基に、FEM（Finite Element Method、有限要素法）により仮想交通荷重に対して橋梁桁に発生する引張ひずみ分布の解析を行った。

国交省モニタリング実証にて作成した解析モデル（FEM）を図5.2.2に、ひずみ解析結果及びセンサ設置位置を図5.2.3に示す。

解析の結果、径間中央（ $L/2$ ）に $246.9\mu\epsilon$ 最大の引張ひずみが発生し、この径間中央を軸にほぼ対称にひずみ分布が発生している事が分かる。この解析結果を元に、径間中央にセンサ配置を決定した。また、径間中央を軸に対称性があることから、片側 $L/2$ の範囲には $L/4$ 位置に、残り $L/2$ の範囲には $L/6$ 毎にセンサを設置し、3次モードまでの挙動を捕らえられるセンサ配置とした。

センサを設置する桁は、4本の桁それぞれ同じ傾向でひずみが発生することから、全体の傾向を捉えやすい中央側の桁の1本に設置した。

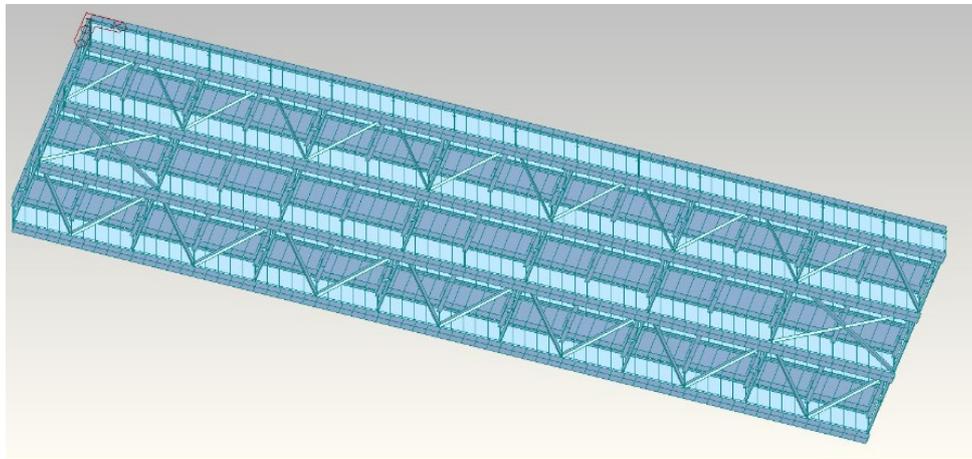


図 5.2.2 解析モデル（FEM）

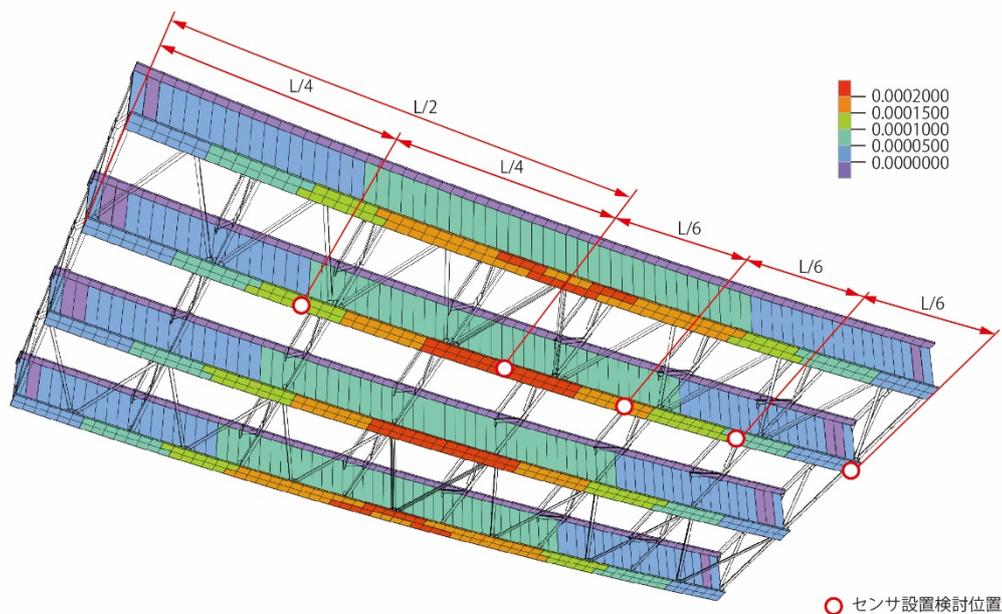


図 5.2.3 FEM の引張ひずみの分布及びセンサ設置位置

この事前解析の結果より，実際のセンサ設置は図 5.2.4 のように行った。

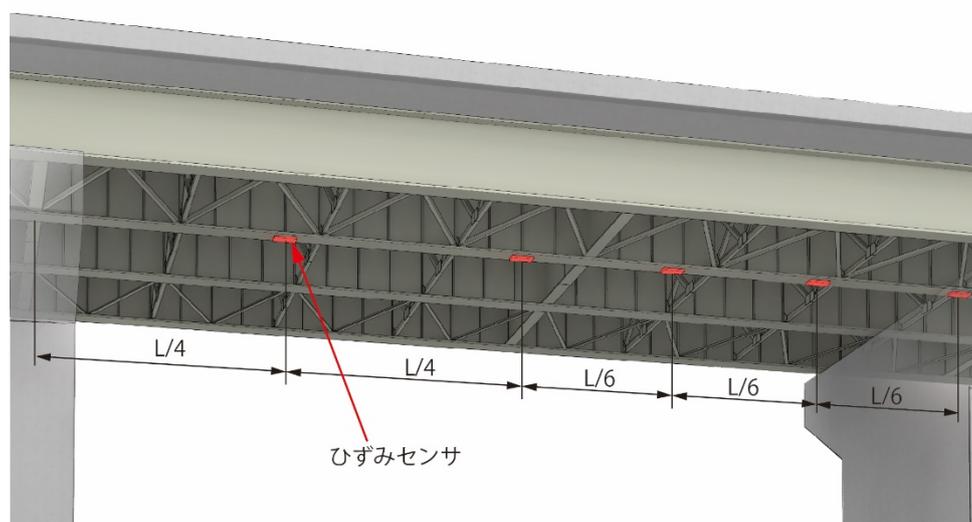


図 5.2.4 実証橋梁でのセンサ設置位置

国交省モニタリング実証では，分布センシングの計測データを解析するために開発された分布センシングデータ処理ツールを用いて解析を実施した。

このツールを用いて計測された分布形ひずみ (Strain) の時系列的な情報から構造物のたわみ分布 (Displacements)，構造物の振動特性 (Dynamic behavior)，構造物を通る荷重の量と分布 (Load)，構造物の損傷検知 (Damage) を算出する。

あわせて，橋梁のひずみ分布形，たわみ分布形，最大たわみや最大荷重を算出して管理基準値設定を行う。この管理基準値の超過を検知するとアラームが発信される。同時に，橋梁の桁の固有振動数をひ

ずみセンサの計測結果より算出し、橋梁の支承が正常に機能しているかの評価も行っている。

また、解析により橋梁の振動特性、荷重状況、損傷状況を把握でき、各状態量の経年変化（同等荷重による絶対量の増加、大荷重通過後の残留発生の有無、橋梁全体ねじれ変形発生の有無、損傷の発生と進展など）により総合的に橋梁の健全度を評価、荷重同定結果より交通量を統計することで、過積載車両の監視ができ、交通荷重のパターンを分析して疲労を算定すれば寿命評価も可能である。

これにより、支承の機能低下を遠隔より把握でき、機能低下の進んでいる箇所から点検・補修を実施するなど維持管理の効率化を図れるとともに、震災時などに、支承に異常が発生したかどうかをリアルタイムに把握でき、橋梁に設置したモニタリング用カメラの映像と合わせて確認することで、管理者の初動対応や評価の省力化と効率化を可能とする。

5.2.3 機器選定

(1) センサ選定

事前解析で得られた最大ひずみ値を基に、最大ひずみを計測可能な光ファイバセンサを選定する。国交省モニタリング実証の例では、最大 $246.9 \mu \varepsilon$ のひずみが発生することより、センサの計測レンジがこの最大ひずみ値以上のものを選定した。

また、センサ設置方法としては接着方式とスポット溶接方式があるが、接着方式は気温が低くなると接着剤の硬化にかかる時間が長くなることから、スポット溶接可能なセンサ選定を推奨する。

(2) 現地側機器選定

光ファイバセンサ用測定器は、橋梁の大きさや、構造によっては設置するセンサ数が多くなる為、センサ設置数に応じて機器を選定する。

径間数の多い橋梁の場合、測定器の1チャンネルあたりのセンサ接続最大数が大きい測定器を選定することで、必要な測定器の台数を最小とする事が出来る。

また、現地側に設置する機器は、現地の温度、湿度等の環境条件を考慮し選定を行うとともに、状況に応じて熱対策のある機器収容箱を選定し、安定して機器が稼働できるようにする。

5.2.4 センサ設置・システム構築

光ファイバセンサの設置は、通常スポット溶接又は接着剤装着で実施する。図 5.2.5～図 5.2.6 にスポット溶接、接着剤装着イメージを示す。

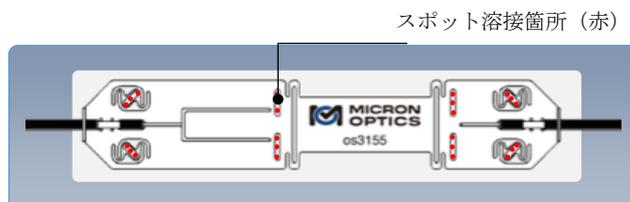


図 5.2.5 スポット溶接イメージ図

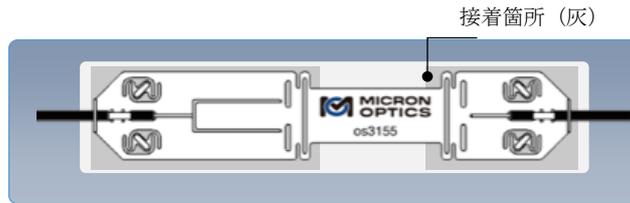


図 5.2.6 接着剤着装イメージ図

鋼橋の場合、接着方式と比べ長期の安定性があり、硬化時間（24 時間程度）が不要で設置が容易なことからスポット溶接での設置を推奨する。スポット溶接でのセンサ設置手順を図 5.2.7 に示す。

【設置手順】

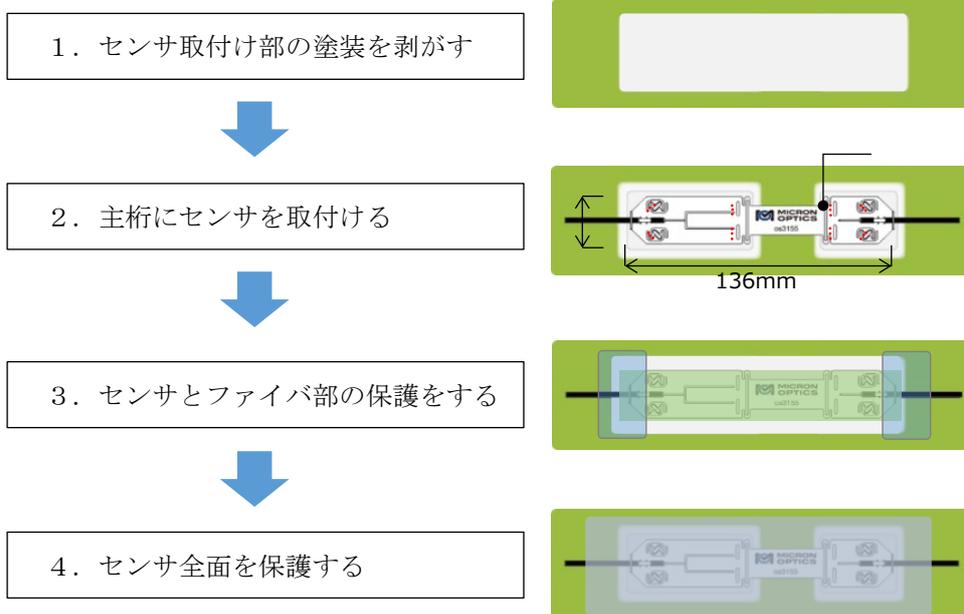


図 5.2.7 スポット溶接設置手順

センサ実装例として、国交省モニタリング実証でのセンサ設置状況及び現地側機器設置状況を図 5.2.8～図 5.2.9 に示す。



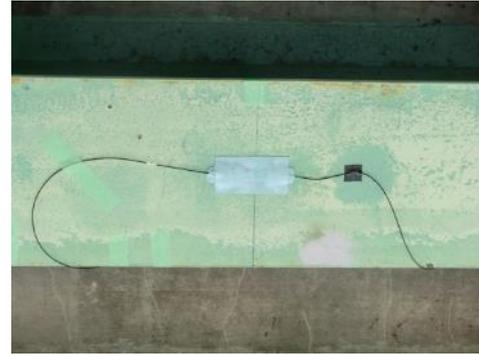
【高所作業車による作業状況】



【サンダーによる研磨状況】



【スポット溶接作業状況】



【光ファイバセンサ設置完了】

図 5.2.8 センサの設置状況例



【計測 BOX 組立て作業状況】



【通信機器・測定器他設置作業状況】



【センサ配線引き込み作業状況】



【機器通電試験作業状況】



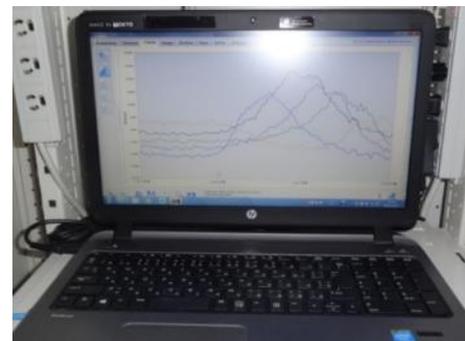
【機器試験（測定器）作業状況】



【機器試験（通信機器）作業状況】



【機器試験（電源切替器）作業状況】



【ひずみ量計測・伝送試験状況】

図 5. 2. 9 機器の設置状況例

5.2.5 初期計測

モニタリングシステム構築後、橋梁の通常の挙動を把握する為に、1ヶ月程度の初期計測を実施する。また、交通規制が可能な場合は、より詳細な挙動を把握する為に载荷試験を実施する。

5.2.6 管理基準値の設定

初動判断を行う為の基準となる管理基準値の設定は、ひずみより算出したたわみ量の事前解析結果、及び初期計測の結果を基に検討・設定する。

■解析による検討

- ① 道路橋示方書により算定した鋼橋の設計たわみ許容値
- ② 事前解析で作成した FEM 解析モデルを用いて、道路橋示方書による設計(活荷重)荷重を負荷し FEM 解析を行い算定されたたわみ。更にその橋梁における制限重量上限車混入として各種パターンの荷重組み合わせによる FEM 解析を実施し、算定された各種荷重時のたわみ

■初期計測結果による検討

- ③ システム構築後、一定期間(1~3ヶ月程度)実測結果の統計分析

①は橋梁の許容値を超える値であることより、橋梁の破損等を含む異常が発生した可能性が非常に高く、②、③は通行可能重量を超える車両の通行、もしくは何らかの異常が発生した可能性がある状況である。これら①~③の結果及び橋梁の健全度、耐荷力等を考慮し、注意レベル、警戒レベルなど、複数の管理基準値と超過した際の対応を設定する。

5.2.7 システム運用

管理者はメールに記載されたアドレスより Web サーバにアクセスし、アラーム発生時のたわみ推移及び現地の映像(2分間)を確認する。通常時、アラーム発生時の対応フローを図 5.2.10 に示す。

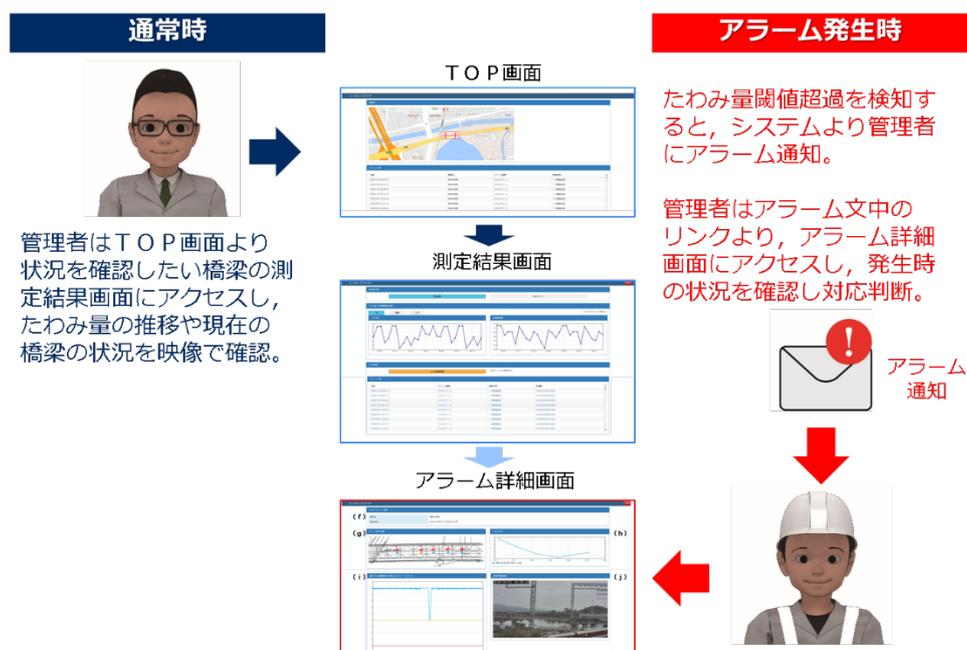


図 5.2.10 アラーム対応フロー

5.2.8 費用の目安

モニタリングシステムの概算費用を以下に示す。測定器などの機器に関しては、購入のほかにレンタルによる提供形態もあるので、モニタリングの期間、規模、予算状況等を検討の上、導入しやすい形態を活用する。

表 5.2.1 モニタリングシステム導入概算費用

項目	金額 (万円)		備考
	購入	レンタル (1年)	
事前解析	320 ※レンタル不可		FEM 解析費用
センサ等	60 ※レンタル不可		センサ, 接続コネクタ, 光ファイバケーブル
測定器	260	120	FBG 用測定器
通信機器等	120	50	PC, ルータ, HUB, モニタリング用カメラ
サーバ機器	200	50	サーバ機器
合計	960	580	

- ・モニタリング対象 : 径間長 30m程度の鋼桁橋 1 径間
- ・センサ設置数 : 10 個
- ・必要データ : 橋梁の図面データ, 構造計算書等
- ・別途必要経費等 : 機器収容箱及び現地へのセンサ, 機器設置工事費, 通信費, 電力費, 解析ソフト等

5.3 結果の評価

モニタリングシステム運用中に管理基準値超過を検知した場合の確認項目を以下に示す。システムによる状況確認後の対応は、管理基準策定時に設定した対応内容に従うものとする。

■たわみの状況

- ・管理基準値を超過したたわみの大きさ, 発生場所
- ・管理基準値超過発生後, 発生前と比較して超過発生が増加傾向にあるか

■基準値超過発生時の橋梁状況 (カメラ映像)

- ・過積載車両と思われる車両の走行有無, 大型車両の連続通過有無
- ・橋梁での事故発生の有無
- ・地震, 台風, 大雨等の災害による橋梁の状態変化の有無

5.4 画面・計測データ事例

国土交通省モニタリング実証の計測事例を以下に示す。図 5.4.1 は 2015 年 12 月から 2016 年 12 月までの 1 年間モニタリング実施した橋梁の 2 分毎のたわみ最大値と周辺の気温を示している。

夏と冬で 20℃以上の平均気温差があるが、最大たわみ値との相関はほとんど見られなかったため、1 年を通じて同じ管理基準値でモニタリングを実施した。

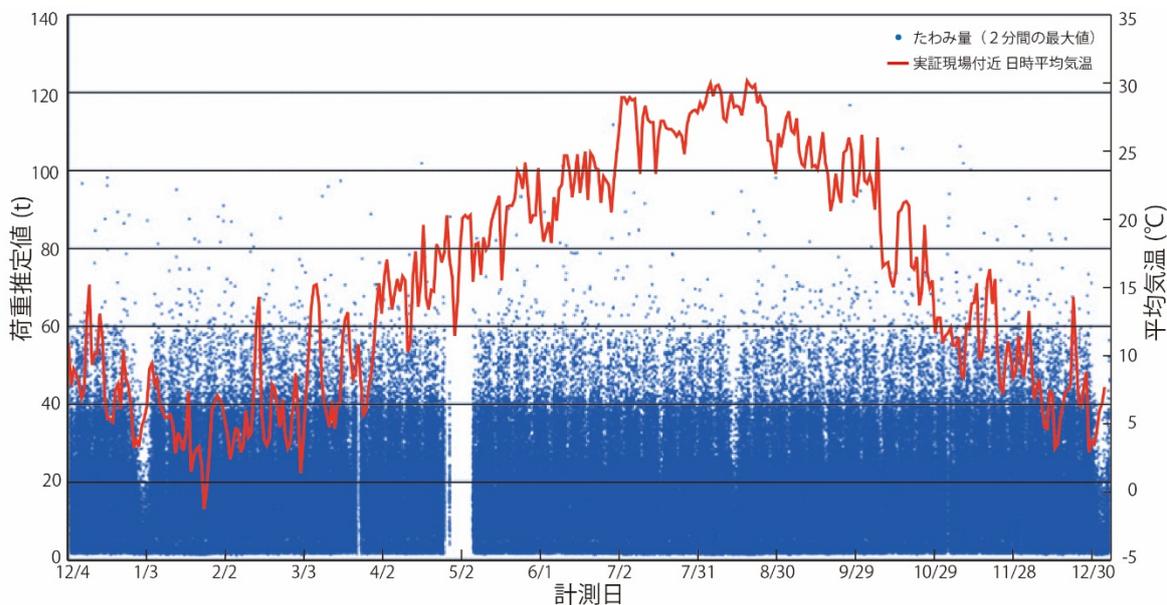


図 5.4.1 算出された 2 分毎のたわみ最大値

管理基準値は、事前解析結果及び初期計測結果の分析より、過積載車両の通行が疑われるフェーズ 1 (14mm) と 40t 以上の車両が通過したと思われるフェーズ 2 (19mm) の 2 段階を設定した。図 5.4.2 に 1 年間のモニタリング結果を示す。

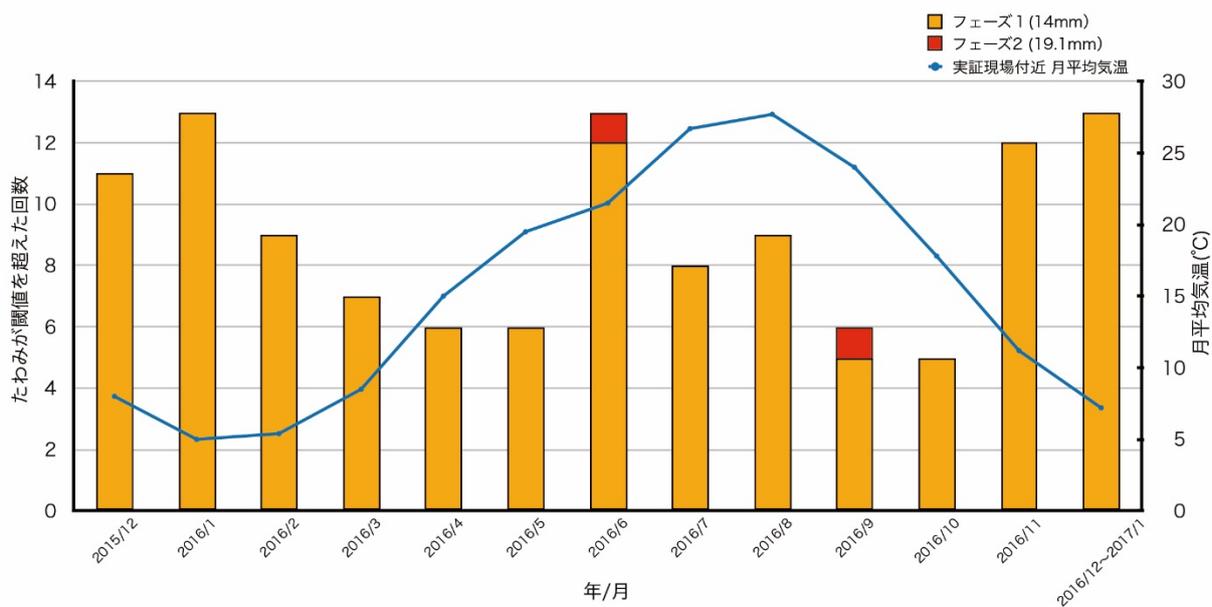


図 5.4.2 モニタリング結果

モニタリング期間中、6月と9月に1回ずつフェーズ2の管理基準値超過が確認された。超過時の通行車両を発生時のカメラ映像より確認したところ、過積載車両と思われる大型車両の通過が確認されたが、その他の異常は認められず、発生以降の管理基準値超過の増加等も認められなかったため、橋梁への異常発生は無いと判断した。

また、管理基準値を超過した際の状況を管理者が容易に確認し対応判断を支援できるよう、**図 5.4.3**の管理画面を開発しモニタリング期間中運用した。管理画面では（f）たわみアラーム詳細、（g）アラーム発生位置、（h）たわみ分布、（i）最大たわみ量推移、（j）現地映像（録画）より構成され、橋梁のどの部分に異常なたわみが発生したか、また発生時橋梁通過車両や、その時の状況が確認できる。



図 5.4.3 管理画面（たわみアラーム詳細表示）

- （f）アラーム詳細 : アラーム発生日時，検知内容を表示
- （g）アラーム発生位置 : 分布設置センサーの“どの位置”で管理基準値超過を検出したか表示
- （h）たわみ分布 : センサー毎のたわみ量をグラフ表示
- （i）最大たわみ量推移 : たわみアラーム発生時を含む2分間のたわみ量推移グラフ表示
- （j）現地映像（録画） : たわみアラーム発生時を含む2分間の現地映像（録画）を表示

また、管理基準値によるモニタリングとあわせて、実証開始時に 20t と 15t の車両を通行させる実測実験を行い、ひずみと荷重推定値の同定を行い、計測結果を基に交通荷重（車両合計重量）の推定も実施した。**図 5.4.4** 及び**図 5.4.5** に交通荷重推定結果を示す。

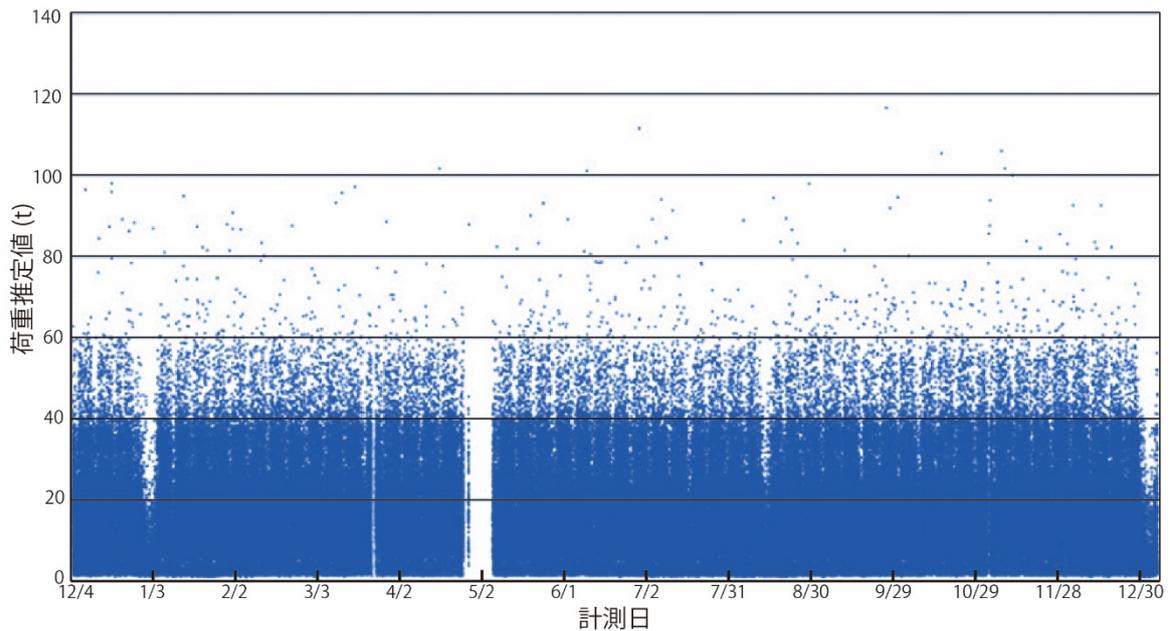


図 5.4.4 交通荷重推定値プロット

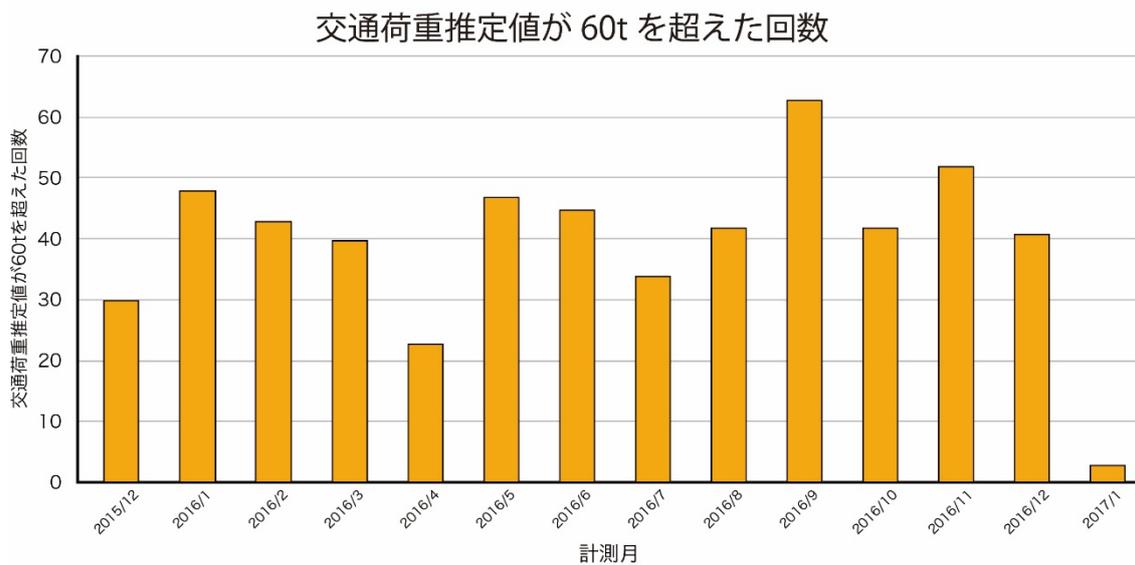


図 5.4.5 交通荷重（全幅の車両合計重量）が 60t を超えた回数の月別値

本モニタリングシステムにより計測したひずみから活荷重（交通荷重：車両合計重量）の時刻歴も得られ、この荷重モニタリングデータを活用して疲労評価等に役立てることが可能となる。

5.5 保守

本モニタリングで使用する光ファイバセンサは長期間劣化が少なく、センサ設置方式のスポット溶接方式は長期にわたり安定的に設置できるものであるが、長期間にわたりモニタリングを行う場合には、年1回程度センサ設置状況を確認し、センサ設置に問題ないかや、ケーブルにたわみがないかなど確認することを推奨する。

また、使用する測定器や通信機器は遠隔で状態監視を行い、常時安定的にモニタリングできる状態に

あることを確認できるようにする。

■センサの設置状況確認

- ・センサ保護材のはがれ，欠落等
- ・光ファイバ配線の状況（ケーブルの垂れ下がり，断線等発生していないか）

■現地側機器の状況確認（遠隔）

- ・エラー，アラーム等の発生有無
- ・データ欠損の有無

参考文献

- 1) 楊，荒木，矢部，呉，李：光ファイバ分布センシングによるRC曲げ構造物の荷重同定手法の研究，コンクリート技術シリーズ 76 コンクリート構造物ヘルスマニタリング技術（土木学会）第Ⅱ編 シンポジウム講演概要集，pp.Ⅱ-1～6，2007.4
- 2) Kejian YANG, Akito YABE, Kazumi YAMAMOTO, Hideaki ARAKI, and Zhishen WU：The Evaluation of KAWANE Bridge by distributed FBG sensors and by FEM analysis, The Proceeding of 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4) July, pp.22-24, 2009, Zurich, Switzerland.
- 3) 楊，鈴木，山本，村山，呉：鉄道高架橋のモニタリング手法の開発における解析的検討，土木学会第68回年次学術講演会 CS6-005, pp9-10, 2013.9
- 4) 楊：光ファイバセンシングデータを活用した構造物の健康診断，OPTRONICS Vol. 33, No. 7, pp. 90-93, 2014.7
- 5) 楊：センシングデータ分析技術の紹介——光ファイバセンシングデータによる構造物の健全度評価，建設機械 Vol. 51, No. 3, pp. 44-48, 2015.3

6章 動ひずみによる剛性変化のモニタリング

6.1 技術の概要

6.1.1 目的

鋼構造物の設計においては、荷重ケースに沿って各部材の「応力」を設定し、許容される「応力」と比較して断面の大きさや拘束条件などを決定している。そのため、その鋼材の「応力」を計測、評価することで、設計状態からの変状を判断することができる。例えば、疲労、腐食などにより、鋼材が損傷を受けることで、鋼材断面の減少や力の流れが変わることにより、「応力」の過負荷や局部的な「応力」集中となる。さらにその状態が継続することで損傷が進行することがある。このように、鋼材の「応力」を評価することは、桁の健全度状態を知るために非常に有効な手段と言える。

鋼材に加わる「応力」を直接計測することはできないが、応力に関連して発生する単位長さあたりの変化量である「ひずみ」を計測することは可能であり、「ひずみ」を計測することで、鋼材に作用する「応力」を知ることができ、その結果、剛性の評価が可能となる。

ひずみセンサによって得られる情報は局所的なものであることから、点検等により損傷が見つかった橋梁に対して、その損傷箇所の影響を定量的に評価するために活用することが有効であり、健全度判定のばらつきがなくなり、措置の時期、優先順位を的確に決定することが可能となる。

(1) 構造物の応力状態の計測方法

構造物の応力状態を把握するために「ひずみ」を計測する方法は、大きく分類して、「静ひずみ」、「動ひずみ」の2種類が存在する。「静ひずみ」は構造物に時間的な応力変化がない場合、または変化が散漫で、データロガーなどの計測器の性能に依存しない、ある所定時における応力状態を計測するものである。それに対して「動ひずみ」は、車両通行や地震、台風（強風）などの影響による構造物における応力状態の時刻的变化を計測するものである。表 6.1.1 にそれぞれの特徴と計測事例を示す。維持管理における「ひずみ」計測では、「静ひずみ」および「動ひずみ」を計測するそれぞれのケースがある。

表 6.1.1 静ひずみと動ひずみ

	特徴	計測事例
静ひずみ	時間的な変化が遅く、ほとんど変化しない 例：鋼材の温度変化や経時変化（クリープ）で伸縮して発生するひずみ	①静的載荷試験などにより、構造物の応力状態を把握し、設計時の応力度との変化を確認するための計測。 ②死荷重の変化を評価するための計測
動ひずみ	時間的な変化が速い 例：車両通行、災害（地震、台風）時の鋼材の挙動により発生するひずみ	活荷重や地震時の構造物の応力状態、疲労試験時の局部応力状態などの計測。

(2) 動ひずみセンサの利点

構造物の死荷重の変化などを評価する場合は、支点沈下など、その構造物の状態変化が生じた時の応力度の変化を、ひずみゲージを使用して「静ひずみ」として長期間計測する方法が一般的である。しかし、ひずみゲージを張り付けた状態での連続した計測では、電力を常時供給する必要がある。また、ひずみゲージの耐久性から長期的には2年程度の計測が限度であると考えられている。

そのため、1週間程度のひずみゲージによる計測を定期的 to 実施し、応力の変化を計測する場合があるが、ひずみゲージの設置毎に変化する計測誤差に注意が必要である。

一般に維持管理を行う場合は、「静ひずみ」の変化を観察するより、構造物に働くインプット（作

用外力) に対する構造物のアウトプット (応答値) の変化を観察することの方が、応力変化の要因が明確であり、評価し易く、「動ひずみ」を計測することが有効である。しかし、ひずみゲージを使用する場合は、センサへの電力供給や耐久性の課題が大きい。

橋梁のモニタリングを目的とした場合、現場における電源の確保は容易ではない。そのため、電池駆動のように、商用電源工事を必要としない低消費電力の計測装置のニーズが高い。ひずみ計測において、電気抵抗の変化を計測するひずみゲージが代表的であるが、電気抵抗を計測するために電源供給が必要であり、消費電力が大きい。動ひずみ計測専用である「 piezoelectric ひずみセンサ」は、「ひずみ」に比例して電荷を出力する圧電素子 (PVDF) から構成されており、電力供給なしで、ひずみの計測が可能である。長期計測可能なモニタリングシステムには、消費電力、耐久性の面から piezoelectric ひずみセンサが有効である。

表 6.1.2 動ひずみ計測方法の比較

	ひずみゲージ	piezoelectric ひずみセンサ
消費電力	10W (センサ+アンプ)	1.2mW (センサ+アンプ)
耐久性	2年 (保護要)	10年 (保護要)
計測範囲	~30000 μst	~200 μst
ノイズ特性	メーカー規定なし	$\pm 2.3 \mu st$

(3) 動ひずみの活用事例

橋梁の挙動 (特性) を分かり易く、定量的に示すには、ひずみ値そのままではなく、橋梁の挙動を示す指標に変換することで、数値の意味が分かり易くなり、橋梁のモニタリングへの活用の幅が広がる。以下に「動ひずみ」の活用事例を示す。

1) 活荷重計測

図 6.1.1 に示すように、床版裏側 (橋軸直角方向) に動ひずみセンサを設置し、車両通行時のひずみを計測することで、車両重量に比例した床版のひずみが計測できる。車両重量は橋梁への入力情報として有効な情報であり、過積載など床版の損傷の原因となる要因についての状況把握にも活用できる指標である。

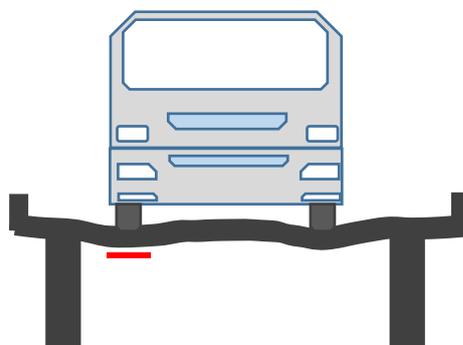


図 6.1.1 活荷重計測イメージ

【活荷重の計算方法】

既知の荷重の走行試験により本ひずみ値のキャリブレーションを行う。走行試験の計測データから影響線（単位荷重1トンで生じるひずみ）を求め、車軸毎に影響線をフィッティングし、軸重を算出。軸重の合計が車両総重量となる。図 6.1.2 に計測事例を示す。

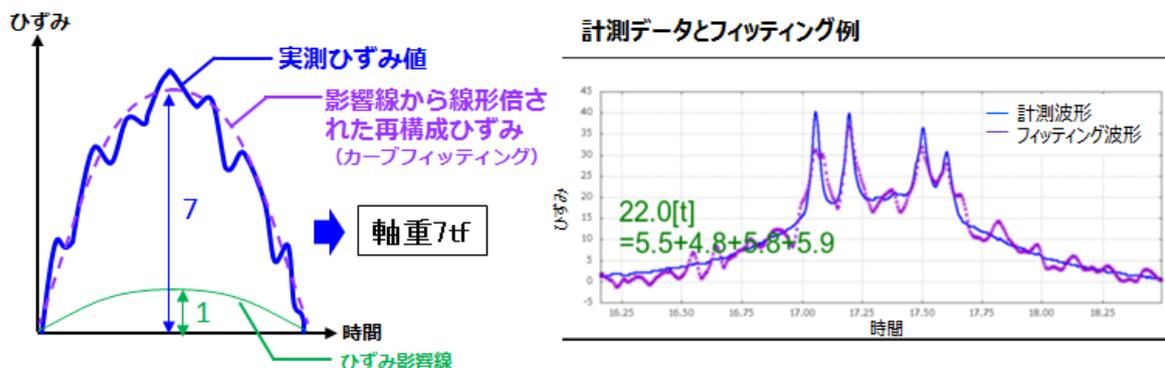


図 6.1.2 活荷重算出方法と算出事例

2) 桁ひずみ計測

桁（上フランジまたは下フランジ）にひずみセンサを橋軸方向に設置し、車両通行時のひずみを計測する。桁のひずみは桁の損傷などの変状に伴う剛性の変化を示すものであり、活荷重などの入力情報に対する桁の出力情報として有効であり、活荷重情報と併用して剛性評価に活用できる指標である。図 6.1.3 に計測事例を示す。

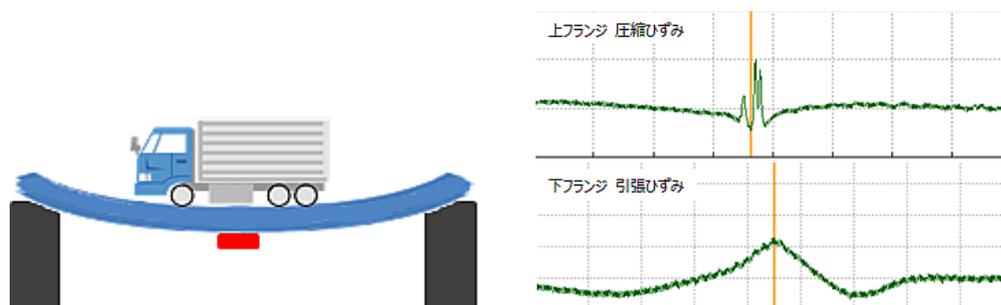


図 6.1.3 桁ひずみ計測イメージ

3) 中立軸計測

図 6.1.4 に示すように、桁の上フランジ（上面）および下フランジ（下面）にひずみセンサを橋軸方向に設置し、車両通行時のひずみを計測する。上面と下面のそれぞれの引張、圧縮ひずみから中立軸を算出できる。中立軸は活荷重などの入力に関係なく算出できるものであり、橋軸方向での断面応力の位置は剛性評価に活用できる指標である。

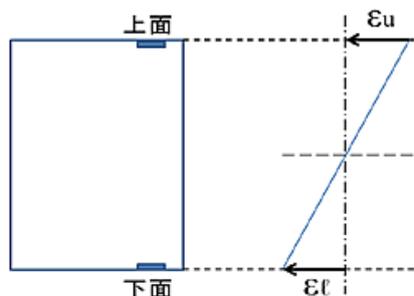


図 6.1.4 中立軸算出イメージ

6.1.2 システムの概要

ひずみを計測するためには、センサ、アンプ、データ収集装置が必要となる。「静ひずみ」を計測するシステムについては、ひずみゲージを取扱うメーカーのホームページを参照することとし、本項では、「動ひずみ」を計測するためのシステムについて説明する。

(1) ピエゾ式ひずみセンサの動作原理

ピエゾ式ひずみセンサは、圧力を電荷に変換する圧電素子を使用して、センサに加えられた力（ひずみ）に比例した電気信号を出力するセンサである。圧電素子としては、電気特性、耐候性、機械特性の優れた PVDF（ポリフッ化ビニリデン）を使用したものが、橋梁モニタリングには適している。センサから得られる信号は電荷であるため、通常「チャージアンプ」を使用して、電荷を電圧信号に変換する。図 6.1.5 に標準的な回路構成を示す。センサおよびアンプのセットでピエゾ式ひずみセンサとして利用可能となる。圧電素子は加えられた力に比例して電荷を出力するため、電源の供給が不要である。アンプで得られる電荷を電圧信号に変換するための電力は微々たるものであり、非常に省電力のセンサを構成できるのが大きな特徴となる。

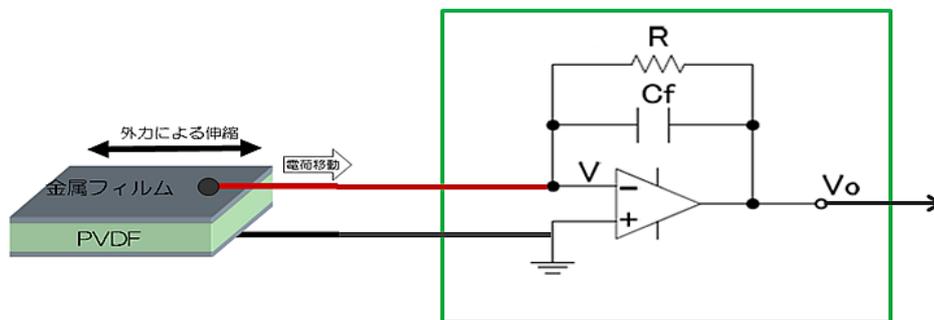


図 6.1.5 ピエゾ式ひずみセンサ原理図

(2) ピエゾ式ひずみセンサの留意すべき特性

1) 入力と出力の関係

ピエゾ式ひずみセンサの特徴である「圧電効果」による入力（力）と出力（電圧）の関係について説明する。図 6.1.6 に示すように、センサに力を加えた時（例：圧縮時）は、力に比例した電圧が出力される。一定の力を加えた場合には新たな電荷は発生せず、アンプ回路内で放電されるため、電圧が減少する。さらにセンサに逆方向の力を加えた時（例：引張時）も、力に比例した電圧が出力される。このように、力の変化に対しては比例した電圧が得られるが、静止状態では、電圧の低下または増加が発生することになる。静止状態が長時間継続しないような動的な力の変化に対して

は、入力と出力の関係が一致するが、静止状態が継続するような場合には入力と出力の関係は一致しない。計測対象の挙動には十分な注意が必要である。

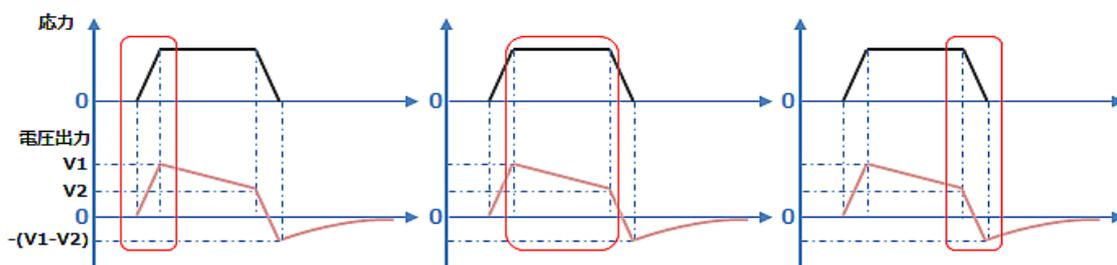


図 6.1.6 力と出力電圧の関係

2) 周波数特性

ピエゾ式ひずみセンサ（チャージアンプ含む）を活荷重計測や桁ひずみ計測などのアプリケーションに適用する場合、周波数特性に留意する必要がある。橋梁での計測において、桁ひずみは、車両通過による半波長の強制振動となるため、センサの出力電圧として現れる信号の周波数は、支間長と車両の走行速度で決定され、支間長を 50m とした場合、表 6.1.3 のようになる。

表 6.1.3 走行速度と周波数の関係事例（支間長=50m の場合）

走行速度 (km/h)	1	5	10	20	30	40	50	60
通過時間 (s)	180	36	18	9	6	4.5	3.6	3
周波数 (Hz)	0.003	0.014	0.028	0.056	0.083	0.111	0.139	0.167

一方、ピエゾ式ひずみセンサの周波数特性は、図 6.1.7 に示すように低い周波数で減衰する特性を示す。表 6.1.3 から 40(km/h)で走行する車両による周波数は 0.111(Hz)となり、図 6.1.7 から電圧比は 0.997 となり、計測精度に影響はない。5(km/h)では周波数が 0.014(Hz)、電圧比は 0.86 で、約 14%の電圧低下となり、計測精度に影響が現れる。渋滞の発生などにより低速走行が生じる場合には、本特性を留意する必要がある。

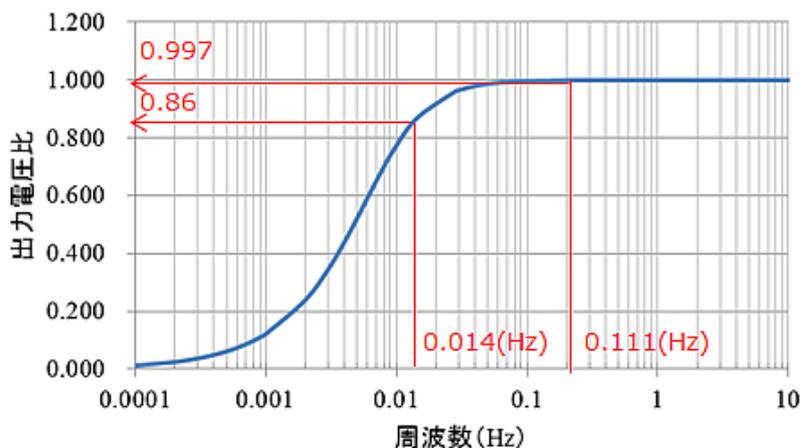


図 6.1.7 ピエゾ式ひずみセンサの周波数特性（例）

(3) ピエゾ式ひずみセンサ計測システム構成

計測システムは、ピエゾ式ひずみセンサ、データ収集装置、評価アプリケーションで構成される。ひずみセンサは常時設置が前提であるが、データ収集装置については、計測目的により、オフラインシステム、オンラインシステムのいずれかを選択することとなる。

1) オフラインシステム

オフライン計測システムの構成例を図 6.1.8 に示す。本システムにおいては、計測は必要時（定期計測、走行試験など）に実施し、計測データは事務所に持ち帰り事後評価を行うことを前提としている。頻繁に計測データを確認する必要がなく、計測し易い場所での経過観察などで利用するシステムである。データ収集装置としては、電圧計測のできるデータロガーを使用する。電源は電池または直流バッテリーで駆動可能であり、バッテリー搭載のロガーを使用することで、商用電源のない場所でも計測が可能である。データロガー選定時には必要な計測精度を満足することを十分に検討することが必要である（6.2.3 項参照）。

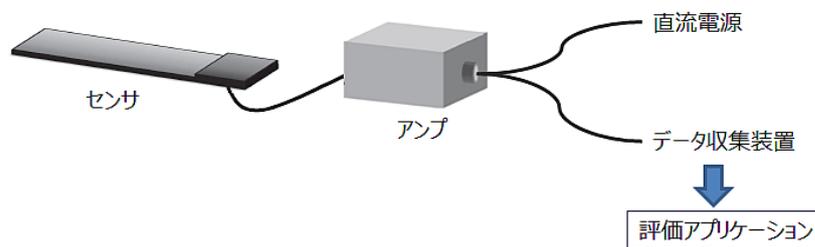


図 6.1.8 オフラインシステムイメージ

2) オンライン（遠隔監視）システム

オンライン計測システムイメージを図 6.1.9 に、システム構成例を図 6.1.10 に示す。ひずみ計測値を中継装置に集約し、中継装置から公衆回線を通じて遠隔地でデータを閲覧、収集するためのシステムである。長期間モニタリングを実施するために有効なシステムである。データ収集装置と中継機は有線または無線で接続される。無線通信機能付きのデータ収集装置を活用することで、センサケーブルが不要となり設置コストを削減することができる。

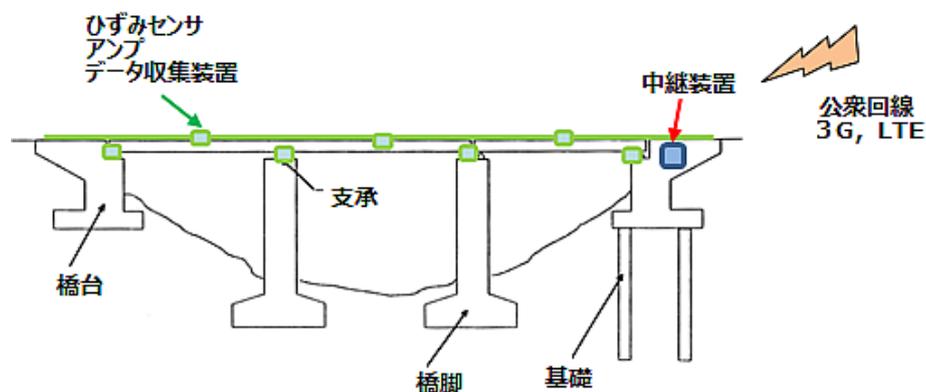


図 6.1.9 オンラインシステムイメージ

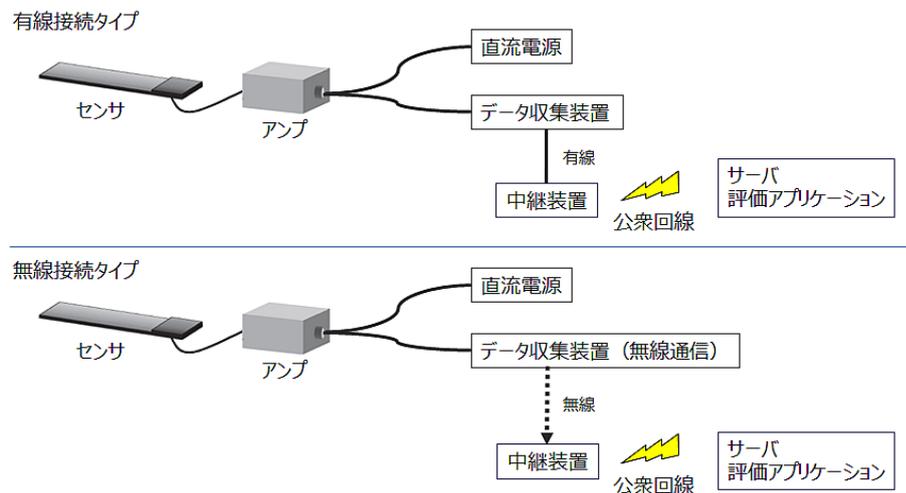


図 6.1.10 オンラインシステム構成例

(4) 構成機器

1) ひずみセンサ

ひずみセンサは、センサとアンプから構成される。低消費電力の利点を活かし、省電力機器で計測できること、また接続機器の汎用性を考慮して、アナログ出力機能を有するものである。

2) 直流電源

センサおよびアンプに供給する電源である。商用電源を使用できる場合は、AC-DC コンバータなどの電源パックを、商用電源を使用できない場合は、電池、バッテリーなどを使用する。

3) データ収集装置

ひずみセンサのデータをデジタル値に変換し、アプリケーションで評価できる状態とすること、また遠隔監視システムにおいては、ネットワーク網を通じて、計測データを中継装置に無線で送信する機能を有するものである。無線通信については、橋梁など複雑な構造内で長距離の通信を行う場合、920MHz 帯の通信が有効である。また、計測データに関しては、センサ間の時刻同期が重要であり、高精度な時刻同期機能を有するものが望ましい。

4) 中継装置

現地に設置される複数のセンサデータを集約し、一時保管および、遠隔地に広域ネットワークを通じてデータを送信する機能を有するものである。

5) サーバ

遠隔地に設置されるデータを保管するサーバである。クラウドサーバを活用するもの、独自システム内で構築するオンプレミスのサーバがあり、計測目的に応じて選択可能である。サーバのハードウェア保守を考慮すると、機器の動作保証、セキュリティなどが充実しているクラウドサービスを活用することが、長期間のメンテナンス費用の削減に有効である。

6.1.3 計測期間

(1) 計測期間の目安

センサによる計測値は、外部要因の特性（温度、交通量）、構造物の特性（鋼構造物の伸縮特性など）、センサの特性（温度特性）の影響により対象構造物が健全な状態でも変動する。計測値は季節、また朝夕でも変動するものであり、これら変動すべてを含めて、計測データの特性と言える。この構造物の特性を正しく把握するためには、継続的に計測を行い、計測データの分布から特性を評価することが必要である。季節変動を把握するため、最低1年程度の計測を推奨する。表 6.1.4 に計測期間の目安を、図 6.1.11 に計測データ分布のイメージを示す。

表 6.1.4 計測期間の目安

目的	計測目的	計測期間
点検の補助	補修までの経過観察	補修工事実施まで
	点検困難箇所のモニタリング	常設
診断の補助	橋梁の健全度を定量的に示すため、構造解析と組合せ、設計値と比較する。	1年程度
補修・補強の効果確認	対策の効果、持続性を定量評価。	1年程度
緊急時の対応補助	地震などの突発的な事象を計測する（トリガ計測）。	常設

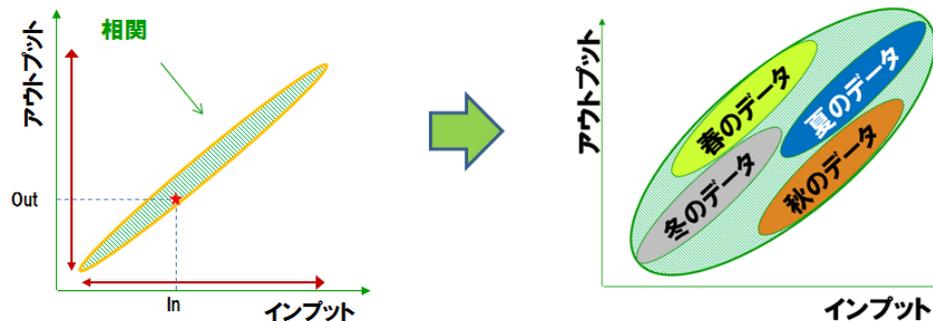


図 6.1.11 計測データ分布イメージ

(2) 計測頻度の目安

橋梁の劣化速度は、非常に緩やかなものである。したがって、橋梁の状態変化を評価するためには、高頻度で計測する必要はなく、日々の変化（温度、交通量、橋梁の伸縮特性など）を把握することを目的として、1日2回（朝、夕）計測を行うものとする。また、地震など突発的な事象の場合、地震時の状態をすべて計測しておくことが重要であり、地震の継続時間を考慮して5分程度の計測時間を標準とする。

6.2 モニタリングの方法

6.2.1 モニタリングの手順

ひずみセンサを使用した剛性のモニタリングを実施する場合の標準的な手順について説明する。図

6.2.1 に実施手順の概要を示す。

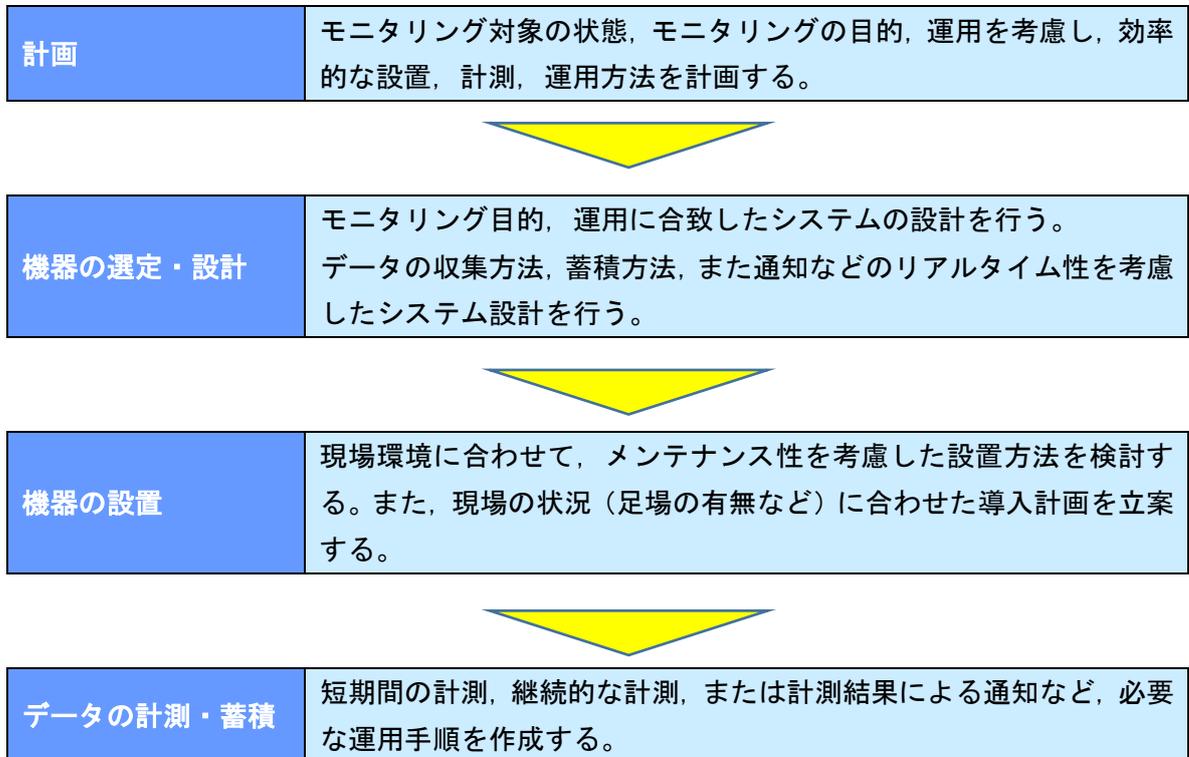


図 6.2.1 モニタリング実施手順

6.2.2 モニタリングの計画

モニタリングは「点検の補助」、「診断の補助」、「補修・補強の効果確認」、「緊急時の対応補助」などの用途に活用できるものである。それぞれの目的により、計測システム、計測期間、運用方法が異なる。モニタリングを効率良く実施するためには、以下の点を事前に検討し、システム、運用体制を構築することが重要である。

表 6.2.1 モニタリング計画の検討内容

検討内容	説明
計測方法	<p>【計測場所】 計測場所は、損傷の発生状況などにより決まるものであるが、場所によっては設置方法が複雑になり設置できない可能性もある。</p> <p>【計測内容】 計測する対象で、どのようなひずみを計測するのかを明確にする。構造解析などによりある程度のひずみレベルを想定しておくこと、センサ選定を効率よく行うことができる。</p> <p>【センサ数】 システム設計に重要な要素である。計測データの活用方法に依存することであるが、システム設計前に決定しておく必要がある。</p> <p>【計測タイミング】 計測タイミングにより、必要な機能が異なる。常時計測、定期計測やトリガ計測の機能を活用して、効率的、経済的なモニタリングシステムの設計が可能である。</p>
導入方法	<p>導入には足場の設置や、現場への立ち入り等、現場担当者との調整が必須である。作業内容を整理し、必要な手続きを事前に確認の上、導入計画の作成が必要である。</p>
運用方法	<p>モニタリングにおいては、誰が、どこで、何をモニタリングするのか、またモニタリングの結果によって、どのようなアクションを実施するのかにより、システムの設計を行うため、これらの運用方法を決定しておく。</p>

6.2.3 機器の選定・設計

(1) 計測精度について

計測精度はひずみセンサの電圧値をデジタル変換して保存するロガーの性能に依存する。ここでは、ひずみを計測する上での、計測精度を最適化するために、認識しておく必要な事項について説明する。

1) 分解能

アナログ信号はコンピュータなどのデジタル機器で使用するため、デジタル値に変換する必要がある。アナログ値は、コンピュータが読み取れる 1bit 単位のデジタル値（電圧値）に変換され、このデジタル値の最少電圧の大きさを分解能と定義する。1bit あたりの分解能が細かいほうがよりアナログ信号を忠実に再現することができる。図 6.2.2 に概念図を示す。例えば、測定レンジ（3V）を 12ビットでデジタル変換した場合は、 $3V/4096 (=2^{12}) = 0.7mV/bit$ となる。

分解能を最大限に上げるためには、計測するひずみのレンジ（上下幅）を最適に設定する必要がある。例えば、出力範囲が0V～5Vのセンサであっても、実際に計測される範囲が1V～2Vの場合、計測レンジを1V～2Vとすることで、分解能を最大とすることができる。

ただし、測定レンジは使用する計測器で設定範囲が決まっているため、より最適に近い設定が可能な計測器を選定する必要がある。

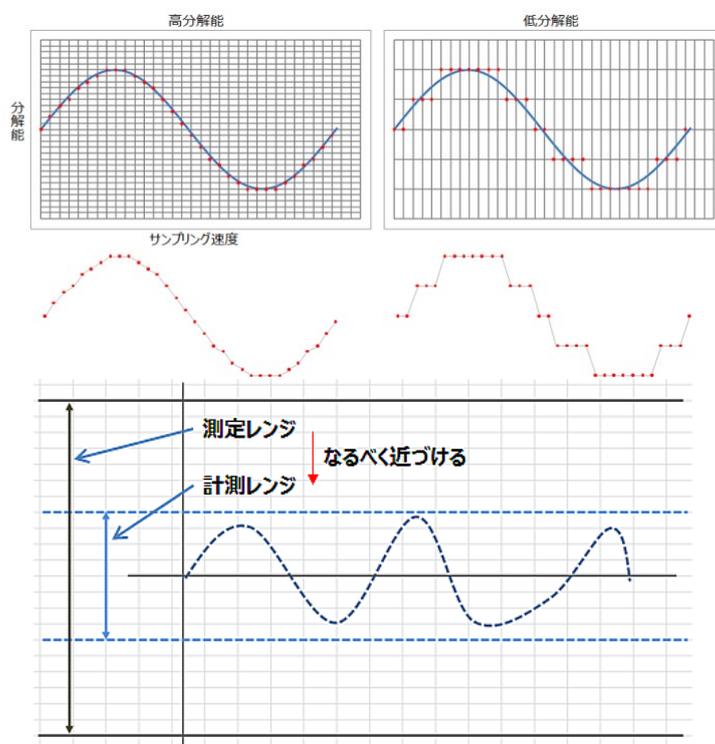


図 6.2.2 分解能と計測レンジ

2) サンプリング周期

計測する信号の周波数に合わせ、サンプリング周期を適切に設定する必要がある。高速にサンプリングすることで必要なデータの計測は可能であるが、データ容量が膨大となり、システム規模が大きくなる。またサンプリング周期が遅すぎると、図 6.2.3 に示すように、信号を正しく表現できなくなる。必要とする信号の周波数帯域を把握し、適切なサンプリング周期の設定および、不要な高周波成分をカットするフィルタの適用が必要である。

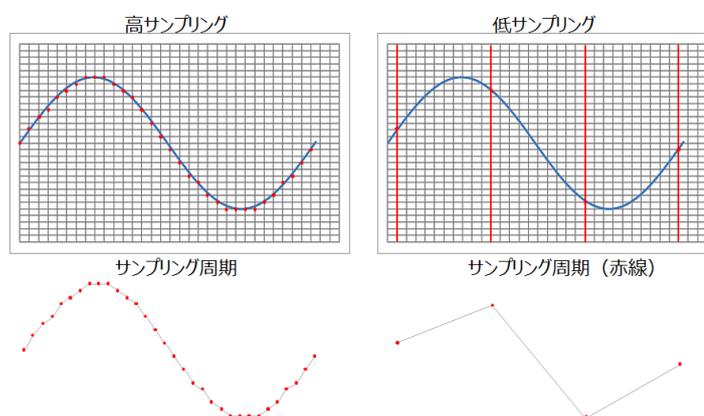


図 6.2.3 サンプリング周期の違い

(2) 使用事例

国土交通省平成 26 年「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発に係る公募（橋梁分野の維持管理の高度化・効率化に係るモニタリングシステムの現場実証）」において、実橋での実証実験で使用されたシステム事例を紹介する。

1) ピエゾ式ひずみセンサ

ピエゾ式ひずみセンサは、音響、振動など様々な用途で使用されているものであり、ひずみ計測用途で製品化されているものは少なく、橋梁のモニタリングで活用する場合に必要な仕様についても、不明確なものが多い。橋梁など構造物のひずみを屋外で計測することを目的としたセンサについて、表 6.2.2 に主な仕様を示す。センサ外観図については参考文献 1) の図 7 を参照。

表 6.2.2 ピエゾ式ひずみセンサの主な仕様

仕様項目	仕様
入力電源電圧, 電流	DC3.0V±0.15V, 400±20μA (計測時)
消費電力	1.2mW
使用温湿度範囲	-20~60°C, 25~95%Rh
防塵・防水性	IP65 相当
計測可能範囲	±208.33μst ※ひずみと出力電圧の線形性が担保される範囲
周波数特性	0.01~50Hz (-3dB)
出力感度	1.8±0.3mV/μst センサ個別に感度特性を規定
出力感度温度特性	0.47%/°C
センササイズ	270(W)×38(D)×10(H) mm (ロングゲージ)
アンプサイズ	100(W)×100(D)×60(H) mm

2) データ収集装置

データ収集装置は、ひずみセンサに直流電源(3V)を供給するバッテリーユニットと、ピエゾ式ひずみセンサの信号をデジタル化し、特定小電力無線で送信する無線端末(センサノード)で構成される。センサノードは中継装置から配信される時刻に同期し、時刻誤差 5msec 以内の高精度時刻同期機能を搭載している。センサノードには加速度センサも搭載されており、地震発生を自動で検知し、計測を開始できる。表 6.2.3 にデータ収集装置の主な仕様を示す。外観図については参考文献 1) の図 4 を参照。

表 6.2.3 モニタリングシステムの主な仕様

センサノード	仕様
入力電源電圧	DC2.5V~3.0V
消費電力	待機時：90 μ W, 計測時：21mW, 通信時：126mW
使用温湿度範囲	-20~60 $^{\circ}$ C, 25~95%Rh
防塵・防水性	IP65 相当
搭載センサ	温湿度センサ, 加速度センサ (トリガ用, 計測用)
サンプリング	200Hz
分解能	12bit
外形寸法	160(W) \times 80(D) \times 56(H) mm
バッテリーユニット	仕様
出力電圧	DC3.0V~3.3V (新品時)
出力電流	最大：2000 mA, 連続：5 mA
容量	48,000 mAh ※2 回/日 5 分間計測で 5 年間使用可
防塵・防水性	IP65 相当
外形寸法	175(W) \times 125(D) \times 60(H) mm

3) 中継装置

中継装置は常時動作し、センサノードからの計測データを受信し、データベースに蓄積、および上位サーバへデータを転送する機能を有する。筐体内部に特定省電力無線装置, 3G 回線ルータ, 制御 PC を搭載しており、センサノードとの通信, 上位サーバとの通信, また GPS 装置も搭載可能であり、センサノードに定期的に時刻情報を提供し、システム時刻の同期を制御する。現場設置の機器を統括する装置であり、常時給電が必要な装置である。表 6.2.4 に中継装置の主な仕様を示す。中継装置を含めたシステム構成については、参考文献 3) を参照。

表 6.2.4 中継装置の主な仕様

項目	仕様
入力電源	AC100V \pm 10V, DC24V ※電源必要
使用温湿度範囲	-20~60 $^{\circ}$ C, 30~80%Rh
防塵・防水性	IPx3 相当
搭載機器	FAPC, ルータ, GPS
最大接続センサノード	40 台
データ保存期間	1 週間 (センサノード 40 台接続時 1 日 2 回 5 分/回計測時)
外形寸法	300(W) \times 220(D) \times 450(H) mm

4) サーバ

運用に合わせてサーバ形態 (クラウド型, オンプレミス型) を決定する。サーバ機を資産として保持しない, またはサーバメンテナンス費用を削減したい場合で、計測データの社内蓄積が不要な場合は、クラウド型を活用することが有効である。ただし、基幹システムとの連携や、データ管理

に特別なルールが必要な場合には、オンプレミス型で、データ蓄積、接続インターフェースのカスタマイズを行い、システムの最適化が有効である。

6.2.4 機器の設置

(1) ピエゾ式ひずみセンサの設置方法

ピエゾ式ひずみセンサは接着剤で対象物に固定し設置する。また計測対象の伸縮に正しく追従するためには、鋼材のように塗装されている部材については、塗装を剥ぎ、鋼材に直接接着することが必要である。また、接着剤の硬化には、温度環境が重要であり、図 6.2.4 に示すように、周囲温度が低い程、硬化時間が長くなる。長時間の固定が必要となるため、マグネット式の固定治具などを使用して固定する。

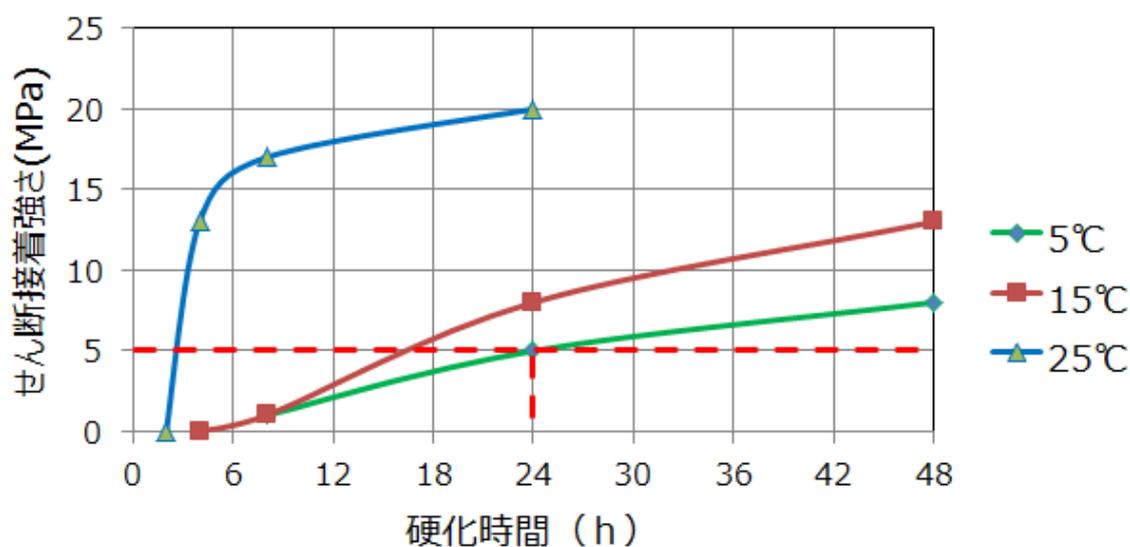


図 6.2.4 周囲温度と接着剤硬化時間の関係

(2) ピエゾ式ひずみセンサの保護事例

ピエゾ式ひずみセンサの素材 (PVDF) は強誘電体であり、圧電効果に加え、代表的な特性として「焦電効果」がある。「焦電効果」とは温度変化によって誘電体の分極が発生し、電荷が発生する現象である。この効果を利用して、人検知や接触センサのように活用されているが、橋梁の挙動をセンシングする場合には、温度変化による出力と橋梁の挙動による出力変化との区別ができなくなるため、悪影響となる。

この悪影響を排除するため、温度変化がセンサに伝わらないように保護することが必要である。保護した状態の例を図 6.2.5 に示す。

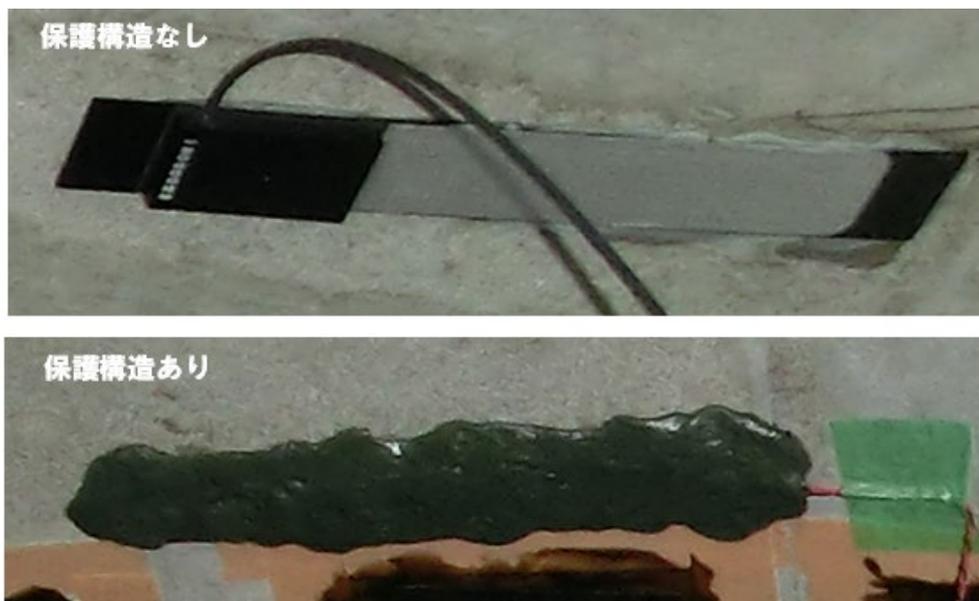


図 6.2.5 ピエゾ式ひずみセンサ保護事例

6.2.5 データの計測・蓄積

モニタリングの1回の計測時間については、地震時発生時の状態を計測することも考慮して5分間を標準として考える。表 6.2.5 にデータ量試算の例を示す。データ量は分解能、サンプリング周波数に依存する。これら設定は必要な計測精度で決定されることになる。計測データの活用用途に従い、必要な容量を確保することが必要となる。

表 6.2.5 データ量試算例

計測条件	データ量		
	1 回分	1 日 2 回	1 年分
保存データサイズ：16bit サンプリング周波数：200Hz 計測時間：5 分間	960,000bit	234Byte	83.5MByte

6.2.6 費用の目安

以下に機器費および、設置、調整に必要な費用の目安を示す。図 6.2.6 に示すように、オンラインシステムについては、橋長 200m 程度の橋梁において、側径間で活荷重計測（2カ所、2車線の床版）を、中央径間で桁ひずみ計測を（1箇所、上下フランジ）実施することを想定している。

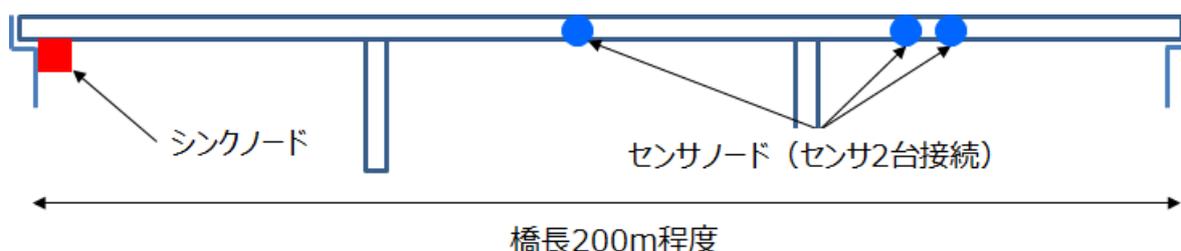


図 6.2.6 費用算出モデル

(1) 現場設置機器費

表 6.2.6 機器費目安 (例)

項目	価格	備考
ピエゾ式ひずみセンサ (アンプ含む)	15 万円程度	1 セット単体
オフラインシステム データ収集装置 ・データロガー	数万～数十万円 程度	センサ台数, 計測精度によ り異なる。
オンラインシステム センサ+データ収集装置 +中継装置	300 万円 ～500 万円程度	システム構成例 ・センサ 6 台 ・センサノード 3 台 ・シンクノード 1 台
サーバ・アプリ	個別	運用に合わせて機器選定お よびアプリケーション作成

※センサ, 各装置の費用は台数, システム規模により個別見積りとなる。

(2) その他費用

表 6.2.7 その他費用

項目	費用	備考
事前調査 センサ設置場所, 通信状態, 配線 方法などの現場調査および設置 治具, システム設計	100 万程度	システム構成例 ・センサ 6 台 ・センサノード 3 台 ・シンクノード 1 台 工費費は橋梁の場所, 種類 および計測箇所により大き く変動する。
設置工事 設置治具作成, 機器設置	250 万程度	
システム調整 運用に合わせたシステム設定, 検証	50 万程度	

6.3 結果の評価

6.3.1 特性カルテとは

構造物に外部から作用する活荷重, 地震, 強風, 飛来塩分, 温度変化などの外部要因をインプットとし, それに伴う構造物の応答である振動, ひずみ, 変位などの応答値をアウトプットとして, インプット, アウトプットそれぞれの対応関係を明確にし, 健全度を示す評価指標とする。これを「特性カルテ」と呼ぶ。「特性カルテ」はその劣化損傷の対象により, 表 6.3.1 に示すように横軸はインプット情報, 例えば温度, 湿度, 活荷重などとし, 縦軸はアウトプット情報, 例えば振動やひずみ計測などから得られる固有周波数, 桁ひずみ, 中立軸位置などである。特性カルテを使用して剛性の変化のモニタリングができる。ただし, 剛性を評価するためには, 構造解析が必要である。

表6.3.1 特性カルテ

センサ	特性カルテ		活用方法
	横軸	縦軸	
加速度	温度	固有周波数	振動変化
	活荷重	桁たわみ	通行車両重量と桁たわみの相関
ひずみ	時間	中立軸	中立軸の位置変化
	活荷重	桁ひずみ	通行車両重量と桁ひずみの相関

図6.3.1に示すように、構造物が健全である場合も、センサによる計測値は外部要因および使用するセンサ、計測方法によりばらつく。センサ（加速度センサ、ひずみセンサなど）は温度特性を持ち、構造物（特に鋼構造物）も温度により伸縮特性があることから、センサの計測値は季節、また朝夕でも変動することになる。これら変動が構造物の挙動を解析する上で、非常に重要な意味をもち、計測システムを含めて、計測対象となる構造物の「特性」である。つまり、このばらつきを明確に把握することが健全性を評価するために重要であり、構造物の劣化損傷においては、ばらつきを持った計測値全体がゆっくり変化する（スローダメージ）となる。このゆっくりした変化量を適切に把握することが、構造物の損傷評価では重要である。

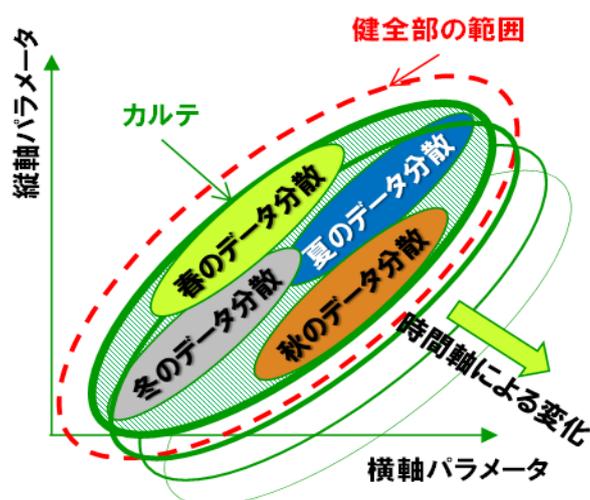


図6.3.1 特性カルテの概念図

6.3.2 評価事例（特性カルテ）

実橋梁での計測事例を以下に示す。図6.3.2に示すように、中央径間および側径間にセンサを設置し、毎日5分間の定期計測を3時と15時の2回実施し、平常時の橋梁の挙動を示すデータとして、加速度センサ、ひずみセンサのデータを蓄積している。つまり、計測しているデータは、加速度、ひずみのみであるが、それぞれの計測データを活荷重、固有周波数、中立軸など、構造物の特性を表す指標に加工し、多方面から剛性低下の評価手法を検討している。本成果は、国土交通省平成26年「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発に係る公募（橋梁分野の維持管理の高度化・効率化に係るモニタリングシステムの現場実証）」の成果の一部である。

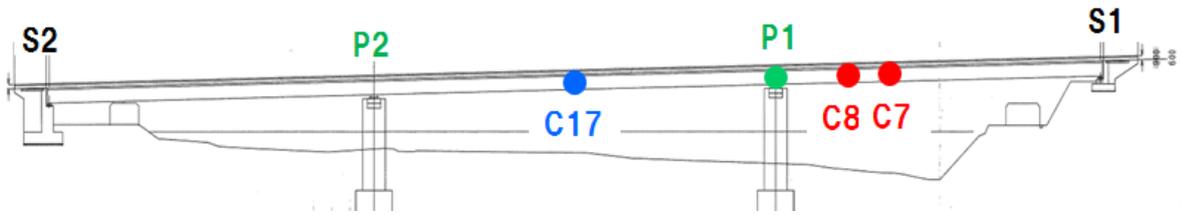


図6.3.2 計測事例

1) ひずみセンサの計測データによる評価事例

① 中立軸

剛性低下の診断において、橋軸方向での断面応力の把握は有効である。桁上下フランジにひずみセンサを設置し、それぞれの引張、圧縮ひずみから中立軸を算出した。図 6.3.3 に横軸を時間軸、縦軸を中立軸として、2016/9～2018/7 まで計測した中立軸の分布を示す、対象橋梁では、ねじれの影響により 2 つの中立軸が存在することが分かった。この中立軸の位置変化も対象橋梁の剛性特性を示す指標である。

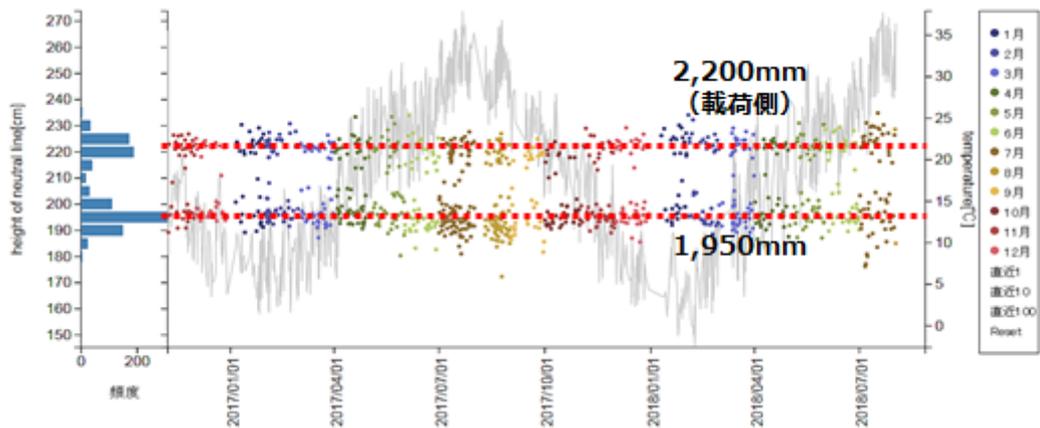


図 6.3.3 中立軸算出例

② 活荷重一桁ひずみ

平常時の入力情報としての活荷重のモニタリングは有効であり、入力に対する橋梁の応答（アウトプット）として桁のひずみを計測することで、剛性低下の可能性を評価できる。図 6.3.4 に計測データおよび、図 6.3.5 に横軸を活荷重、縦軸を桁ひずみとした相関図を示す。図 6.3.5 の傾きは桁の曲げ剛性により関係付けられる。この傾きも橋梁の剛性特性を示すものであり、剛性変化のモニタリングに活用できる指標である。

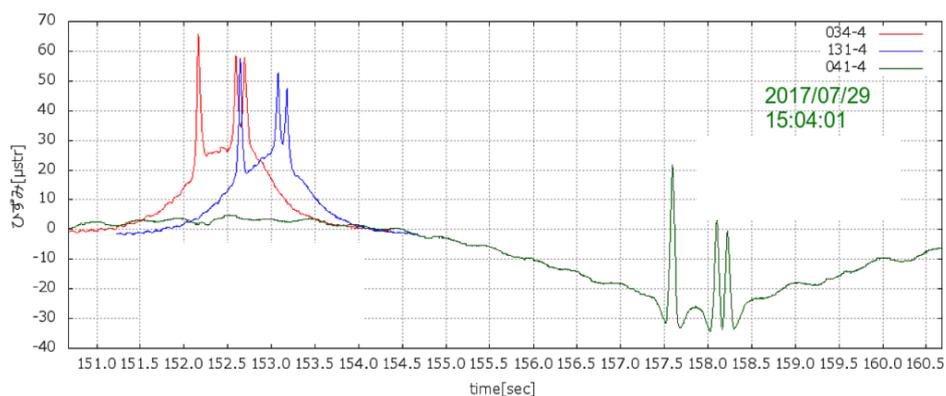


図 6.3.4 計測データ

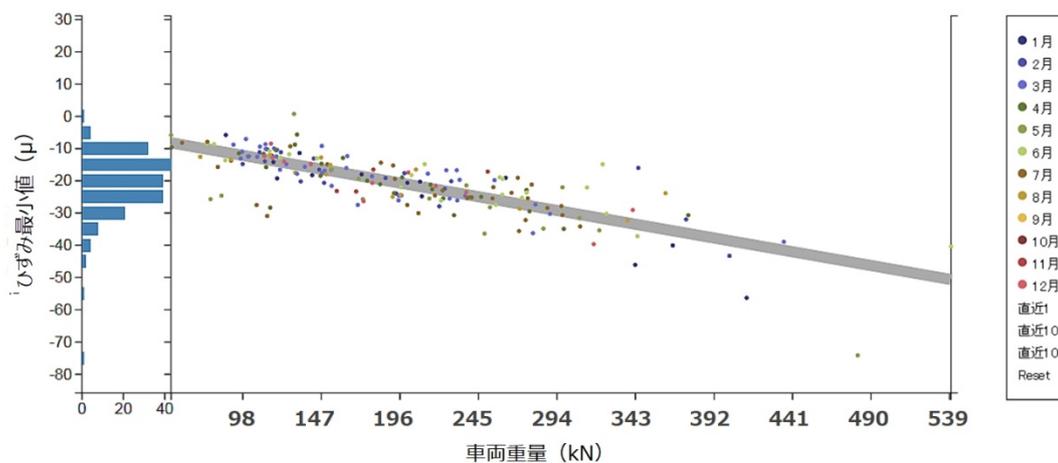


図 6.3.5 活荷重一桁ひずみ相関

2) 加速度センサの計測データによる評価事例

① 固有周波数

損傷による剛性低下により、構造物の固有周波数が変化し、振動特性が変化することに着目し、特性を調べた。図 6.3.6 に横軸を温度とし、縦軸に鉛直 5 次までの固有周波数の値を示す。年間の温度変化による変動は、高次になるほど若干の変化を示すことがわかり、また、各次数において計測値には±0.3Hz 程度のばらつきを確認した、これら温度特性、ばらつきを含めて、対象橋梁の平常時の剛性特性を表しており、剛性変化のモニタリングに活用できる指標である。

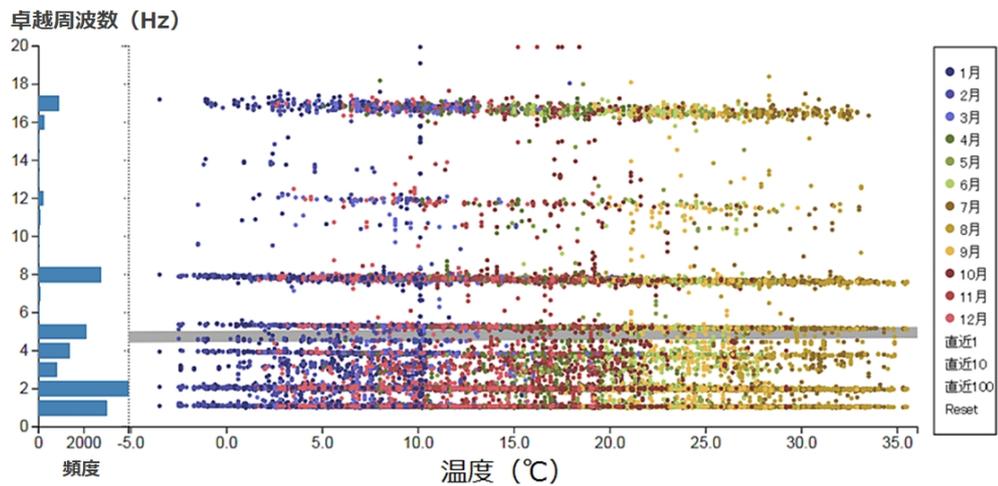


図 6.3.6 固有周波数の温度特性

6.3.3 評価結果からの診断方法

6.3.2 に剛性変化のモニタリングに活用できる特性カルテの事例を紹介した。これら特性カルテは、剛性そのものを示すものではないため、実際の剛性を評価するためには、構造解析を用いて剛性の同定を行う必要がある。さらに、解析により終局状態での剛性を推定することで、維持管理における管理基準を設定し、管理基準により、補修・補強・通行止めなどの対応を定義することが可能となる。

また、初期値は設計値と等しくなることもあり、計測した現状がどのように進行してきたものかを把握するためには、初期値を計測しておくことが重要となる。

6.4 保守

長期モニタリングを実施する場合、システムを構成する機器の定期交換、故障時の修理・交換などの対応が必要となる。表 6.4.1 に各機器の定期交換の目安を示す。本定期交換年数を越えて使用する場合は、モニタリング期間と合わせ定期交換を計画し、予算を確保することが必要となる。

また、各機器の故障対応として、保守部材をストックしておくことも検討が必要である。

表 6.4.1 定期交換の目安 (例)

	機器	定期交換年数	備考
センサ	ピエゾ式ひずみセンサ	10 年	故障時は交換
	ひずみセンサ用アンプ	10 年	故障時は交換
データ収集装置	センサノード	10 年	故障時は交換
	バッテリーユニット	5 年	計測頻度に依存 運用に合わせ定期交換周期を 決定する。
中継装置	シンクノード	5 年	故障時は修理対応

※偶発的な故障に対しては、予防保全として予備機の確保を推奨する。

参考文献

- 1) 黒田, 西田, 尾崎, 樋上, 赤井: 社会インフラへのモニタリング技術の活用(1), OMRON TECHNICS
- 2) 西田, 高瀬, 幡山, 佐々木: 社会インフラへのモニタリング技術の活用(2), OMRON TECHNICS
- 3) 国土交通省道路局, 点検支援技術性能カタログ (案) BR030021-V0020, 令和 2 年 6 月

7章 画像処理による塗装のモニタリング

7.1 技術の概要

7.1.1 目的

鋼橋塗装の塗替え時期は、主に目視観察で行う塗膜の劣化程度（以下、「塗膜劣化度」と呼ぶ。）の評価により判断してきた。しかし、目視観察による評価は、調査担当者の経験の差や主観による個人的誤差が発生する恐れがあるとともに、効率性に劣る面があり、より効率的な調査と客観的な評価が求められている。

画像処理による塗装のモニタリングは、デジタルカメラで撮影した鋼橋塗膜の画像に対して画像処理を行って劣化部を自動抽出し、その結果を数値化することにより、塗膜の現状を客観的かつ定量的に評価するものである（図 7.1.1）。

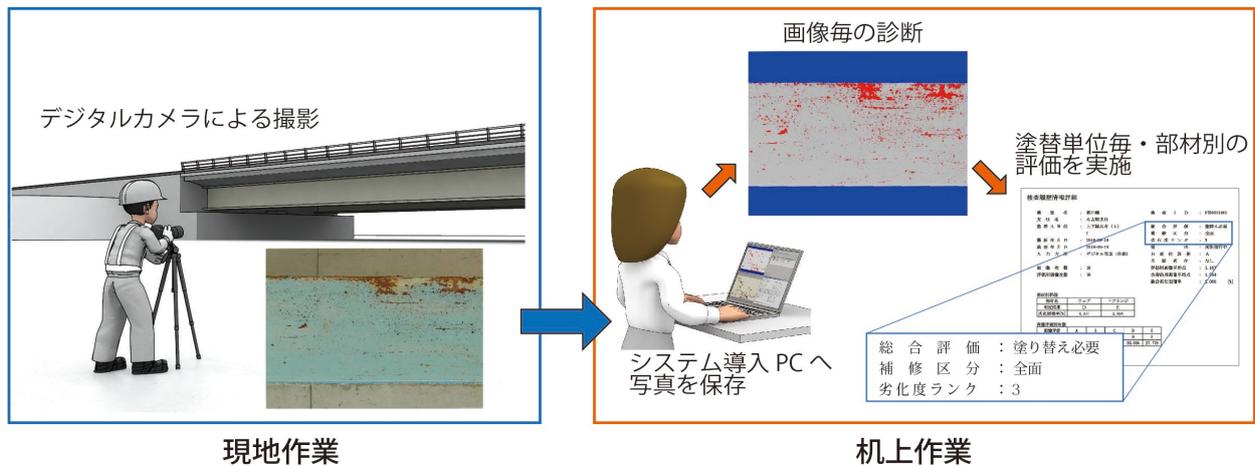


図 7.1.1 画像処理による塗装のモニタリングのイメージ

従来は、鋼橋の塗膜劣化度を詳細に調査するためには、塗膜面に近接する必要があることから検査路や足場が必要となり、調査に多大な労力、時間、費用を要していたが、画像処理による塗装のモニタリングでは、遠方から塗膜の画像を撮影するのみでよいため、塗膜劣化度の評価が簡素化できる。

また、定量的に塗膜劣化度を判定できることから、評価の個人的誤差による塗替え時期のばらつきがなくなり、計画的な塗替計画を策定できるため、的確なコスト配分での塗替え実施が可能である。

7.1.2 システムの概要

画像による塗装のモニタリングシステムは、コンピュータによる画像処理技術を応用して塗膜劣化度を客観的かつ定量的に評価するものであり、デジタルカメラで撮影した鋼橋の塗膜画像に対して画像処理を行って劣化部を自動抽出し、その結果を数値化することにより、塗膜の現状を定量的に評価するものである（図 7.1.2）。以下、高速道路会社で実用化されている塗装のモニタリングシステム¹⁾（以下、「塗装モニタリングシステム」と呼ぶ。）について紹介する。

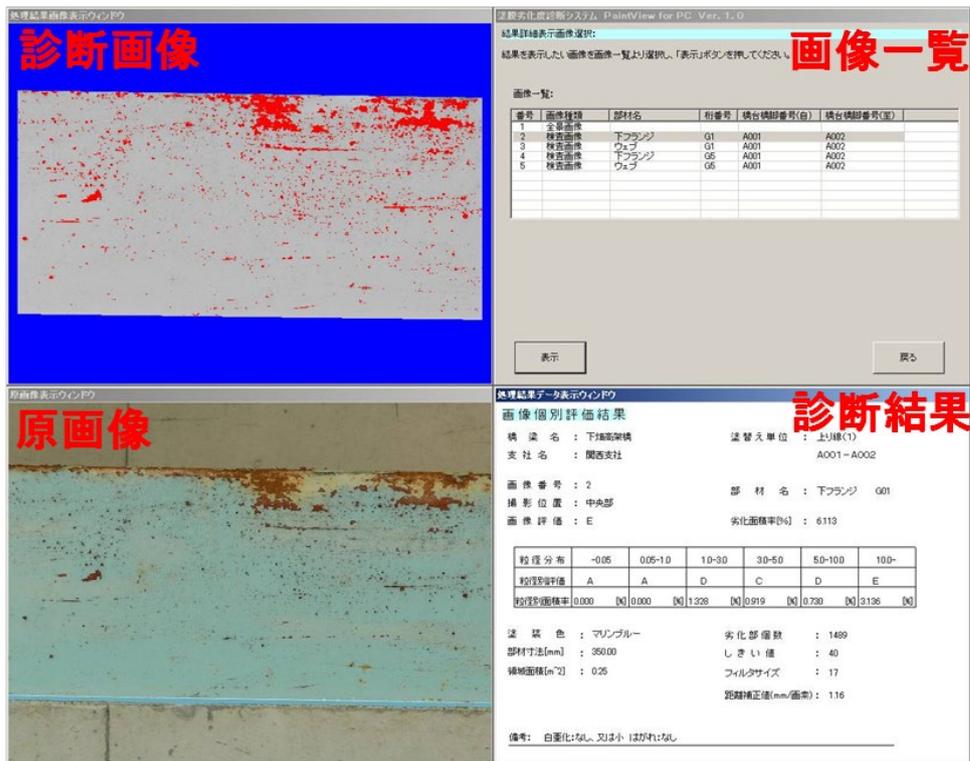


図 7.1.2 塗装モニタリングシステムでの画像処理イメージ

(1) 画像処理の原理

デジタルカメラで撮影された画像に対して、塗装モニタリングシステムで「濃淡モフォロジ処理」と呼ばれる画像処理を自動的に行う。

「濃淡モフォロジ処理²⁾」とは、濃淡画像情報より濃淡値の偏りがある範囲内の広さに亘って存在しているとき、その部分を優位の濃淡変化部として検出するものである。

通常、錆や塗膜割れなどの塗膜劣化部（変状部）は、周囲の正常な塗膜面と比較して相対的に暗くなっており、従来の画像処理技術では撮影時の明るさの影響を受け、ハレーションや陰影のある画像となり、塗膜劣化部を精度良く抽出することは困難であった。

当該「濃淡モフォロジ処理」は、画像の相対的な明るさに基づいて判断するのではなく、周囲と比較して相対的に暗い部分を抽出する。具体的には、ストロボが当たって、手前の明るい中で相対的に暗い部分や遠方の全体的に暗い中でも特に暗い部分を劣化部として適確に抽出している。このため、撮影時の天候や写真の明るさに左右されず、的確に劣化部のみを抽出する事が可能となっている。

図 7.1.3 に濃淡モフォロジで処理した結果を示す。

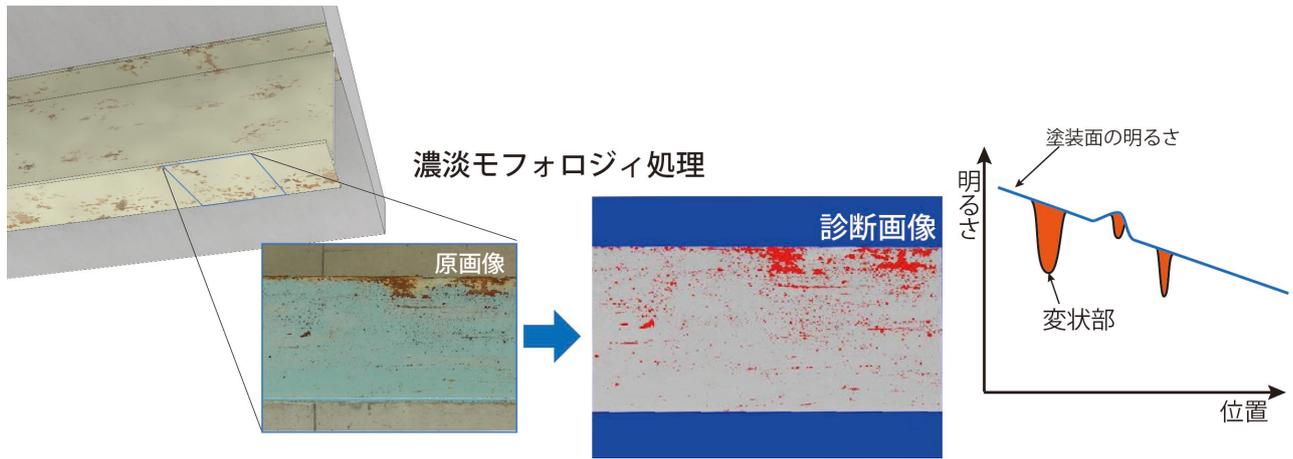


図 7.1.3 濃淡モフォロジ処理による劣化部の抽出状況

(2) システム構成

塗装モニタリングシステムは、図 7.1.4 に示すとおり、3つのアプリケーション（PC版鋼橋塗膜劣化診断システム、実橋データベース管理システム、WWW型検索システム）から構成されている。

1) PC版鋼橋塗膜劣化診断システム

PC版鋼橋塗膜劣化診断システム（以下、「メインシステム」と呼ぶ。）は、鋼橋塗膜の劣化度を診断する機能に加え、データベース機能を有している。

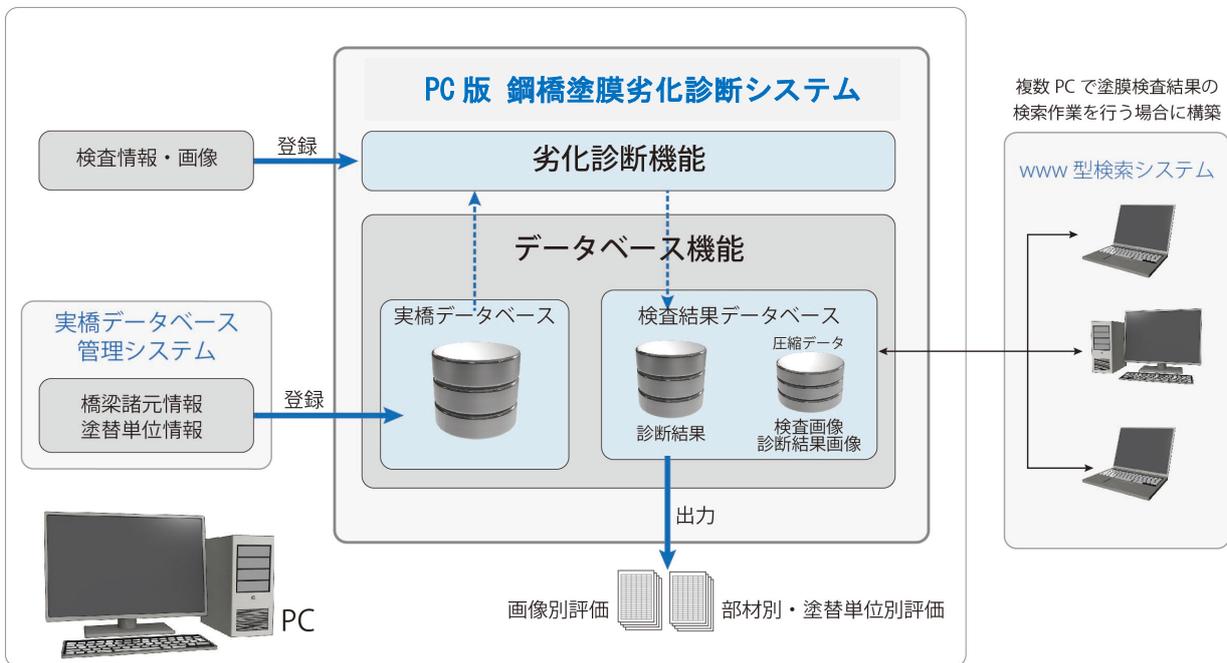


図 7.1.4 塗装モニタリングシステムの構成図

① 劣化度診断機能

劣化度診断機能は、鋼橋の塗膜劣化度を自動的に診断するものであり、以下の機能を有している。

- ・デジタルカメラを用いて撮影した鋼橋塗装面の画像に対して、画像処理を行うことによって、さび、われ、はがれなどの目に見える劣化部を抽出する。
- ・劣化部の面積、粒径等の幾何学的特徴量を基に、評価基準に照らし合わせて、塗膜の劣化度を判定する。
- ・検査結果をデータベースに格納し、橋梁名、塗装系、劣化度評価値等の項目をキーとして検索を行うことできる。

② データベース機能

データベース機能では、2つのデータベースと圧縮データを扱う。

a) 実橋データベース

実橋データベースは、メインシステムにおいて、診断対象となる橋梁および塗替え単位に関する諸情報（以下、「実橋データ」と呼ぶ。）を格納したデータベースである。診断のための画像の入力から診断、さらには評価結果の扱いに至るまで、メインシステムでの処理の過程は、すべてこの実橋データベース内の情報と関連づけられて取り扱われる。なお、塗替え単位情報以外の橋梁基本データは、橋梁名や塗装に関する情報などがある。

b) 検査結果データベース

検査結果データベースは、塗膜劣化度の評価結果・診断対象画像情報等を蓄積するデータベースである。また、検査画像及び診断結果画像は、圧縮して蓄積している。

2) 実橋データベース管理システム

実橋データベース管理システムは、メインシステムに有する実橋データベースに蓄積している実橋データの新規登録、参照、編集、更新、削除を行うためのシステムである。

3) WWW型検索システム

WWW型検索システムは、ネットワークに接続した検索端末とそれにインストールされた Web ブラウザを使用して、メインシステム内の実橋データ、および塗膜検査結果を検索し、結果データを参照できるシステムである。なお、検索端末に Web ブラウザを使用することにより、専用のアプリケーションをインストールすることなく使用できる。

7.1.3 計測の頻度

過去の塗装モニタリングシステムによる劣化度評価結果をもとに、表 7.1.1 に示す時期を目安として点検を実施することが望ましい。なお、新設橋梁又は塗替え実施後の橋梁の点検頻度は、10年程度を目安とする。

表 7.1.1 点検頻度の設定例

塗装モニタリングシステムによる劣化度評価 ※1		総合評価	点検時期
劣化度ランク	総合劣化面積率		
①～⑤		塗替え必要	－（速やかに塗替え計画を策定）
⑥・⑦		塗替え時期の検討必要	必要に応じて3年以内に点検
⑧		要注意観察	3年程度後に点検を実施
⑨	0.5%以上	経過観察	5年程度後に点検を実施
⑨	0.5%未満	経過観察	10年程度後に点検を実施

※1：塗装モニタリングシステムによる劣化度評価については、「7.3.2 塗装モニタリングシステムによる劣化度評価」を参照。

7.1.4 データの蓄積

表 7.1.2 に示すデータは、メインシステムの検査結果データベース内に自動的に蓄積される。これらのデータは、経年劣化の状況や塗替えサイクルが把握できるため、蓄積していくことを推奨する。なお、記憶媒体の容量に制約がある場合でも、最低限、次回塗替え後初回点検実施までは蓄積しておくことが望ましい。

表 7.1.2 1塗替単位あたりの蓄積されるデータ量

データベースに蓄積されるデータ	容量	備考
検査画像データ	15 MB	
診断結果データ	5 MB	圧縮データ
診断結果画像データ		

7.2 モニタリングの方法

7.2.1 モニタリングの手順

塗装モニタリングシステムによる塗装のモニタリングの流れを図 7.2.1 に示す。

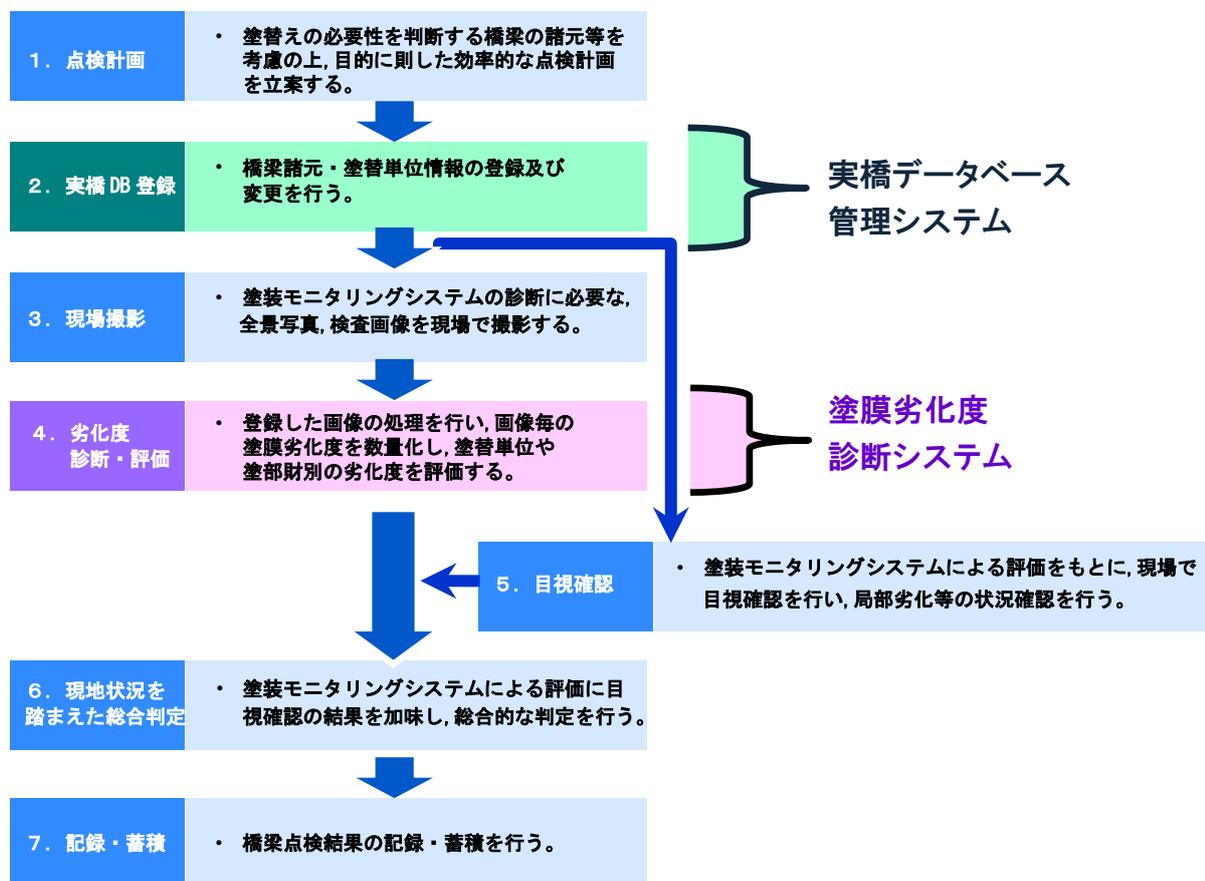


図 7.2.1 塗装モニタリングシステムによる塗装のモニタリングの流れ

7.2.2 点検計画

塗替えの必要性を判断する橋梁の塗装系、構造、環境条件、使用条件などを考慮の上、塗膜劣化の進行速度を勘案して、目的に則した効率的な点検計画を立案する。

7.2.3 実橋データベース登録

塗装モニタリングシステムを運用し、鋼橋塗装のモニタリングを開始する前には、塗膜点検を行う対象橋梁の諸元情報（橋梁名・所在地といった基本情報）や塗替え単位情報など塗装に関するデータ（以下、「実橋データ」と呼ぶ。）を実橋データベース管理システムに登録する。

塗装モニタリングシステムでは、実橋データ、並びに塗膜の点検・診断は、橋梁の塗替え単位（※2）で登録・管理されており、上り線、下り線、上下線共有3つの分別毎に20までの塗替え単位を登録することができる。また、検査履歴は、塗替え単位毎に蓄積していくので、実橋データベースへの初期登録時に、橋梁毎に塗替え単位を決定する必要がある。

なお、※2 塗替え単位とは、基本的に橋台および橋脚によって区切られた複数径間で、桁毎の区別はない。塗装モニタリングシステムにおける塗替え単位とは、塗装の状況や経時変化を点検・管理していく単位である。

7.2.4 現場撮影

(1) 撮影機材

写真撮影に使用する機材は、以下のとおりである。

1) デジタルカメラ本体

使用するデジタルカメラは、画像解像度が 640×480 画素以上、画像データ形式が TIFF 形式、または JPEG 形式にそれぞれ対応していることとする。また、デジタルカメラ本体は、基本的にバッテリー駆動であるため、撮影が長時間にわたる場合には、予備のバッテリーを十分用意する。

2) 画像記憶媒体(メモリカード)

記憶媒体は、塗替え単位で撮影する画像枚数分(15～20 枚程度)が 1 つの記憶媒体に収まるように使用するため、記憶容量は、十分余裕のあるサイズを準備する。

3) 三脚

安定して画像を撮影できるように三脚を設置する。撮影する箇所によって、三脚の設置が困難な場合には、三脚を使用しないで撮影してもよい。ただし、撮影距離が長い(約 20m 以上)場合には、望遠倍率が大きくなり、ブレのない撮影が困難となるため、必ず三脚を使用する。

4) ストロボ

ストロボを使用する場合には、光量を十分に確保するため、可能な限り外付けのストロボを使用する。

5) 交換用レンズ(レンズ交換可能な機種の場合)

使用するデジタルカメラはレンズ交換ができるものが望ましい。交換レンズは従来の 35mm 一眼レフカメラで撮影する場合と同様、焦点距離が 35mm フィルム換算で 28mm～70mm、または 70mm～300mm 程度のズームレンズとする。レンズ交換ができない機種を使用する場合には、焦点距離が 35mm フィルム換算で 28mm～300mm 程度の約 10 倍ズームレンズが付いているものを使用する。

(2) 撮影する画像

撮影は塗装モニタリングシステムの診断・管理単位である塗替え単位毎に行うものとし、撮影する画像は、以下のとおりである。

1) 全景画像

全景画像は、データ整理およびデータシートを作成する際に参照するものであるため、特に撮影条件はないが、調査橋梁の全景および架設環境が把握できるように 1～2 カット撮影し、必要に応じて撮影位置を変えて撮影することが必要となる。なお、劣化度評価の対象とはならないが、部材毎の塗膜劣化を把握するために部材毎に撮影することも考える。上記で述べたように、塗り替え単位毎に診断を行うので、一橋梁が複数の塗り替え単位として扱われている場合は、全景写真も塗り替え単位が異なる毎に撮影する。

2) 検査画像

検査画像は、塗装モニタリングシステムに入力し、劣化度評価を行うための画像であり、塗替え単位あたり 10～20 カット程度撮影する。

画像のコントラストが大きくなるように、撮影にあつては注意を要する。よって、撮影は快晴時よりも曇天時の方が望ましいが、快晴時となる場合には、光の強いもの(太陽、空等)を極力入れないように撮影する等の工夫を行い、適宜、画像のコントラストを調整することが望ましい。なお、画像のコントラスト調整は、各機材の取扱説明書に従うこと。

(3) 撮影範囲

撮影範囲は、以下のとおりとする。

1) 対象径間

1 塗替え単位あたり、塗膜劣化状態を代表している 2 径間程度を選択する。ただし、同一塗替え単位で劣化状態に著しい偏りがある場合には、その旨をデータシートに明記し、偏りの状況が説明できるように撮影する。

また、塗替え単位が 500m 以上の場合では、対象径間数および塗膜劣化診断用画像の枚数を適宜増やして撮影する。

2) 対象部材

撮影対象とする部材は表 7.2.1 に示した部材とし、劣化状態が著しい下フランジ下面を主体として撮影するが、ウェブおよびその他の部材についても劣化が見られる場合には、下フランジと同様に撮影する。

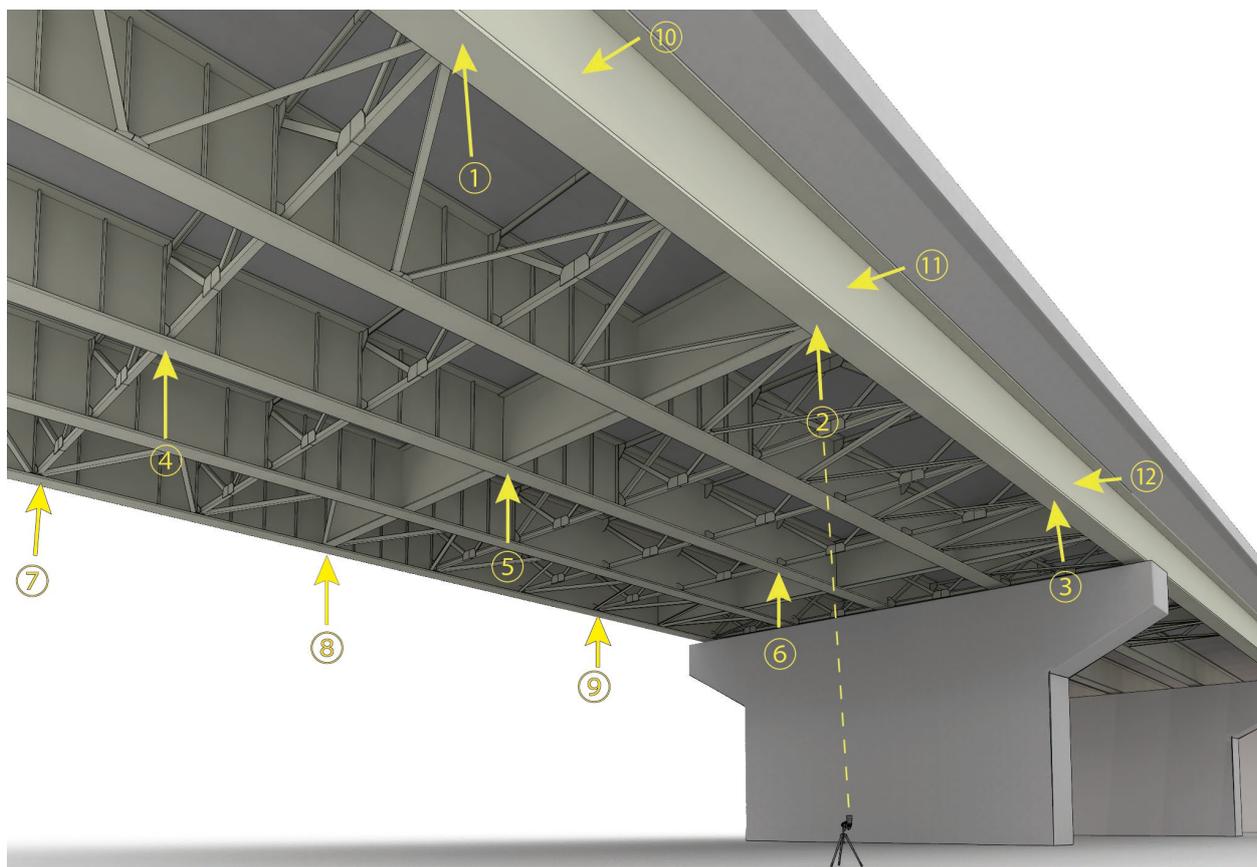
表 7.2.1 橋梁形式別撮影箇所

橋梁形式	部材名	点検箇所（撮影箇所）
鈹桁	下フランジ下面	外桁および中央部付近の内桁を選択し、1 径間中の両端部および中央部から各 1 点(計 3 点)を撮影する。
	ウェブ外面	外桁の両端部および中央部を各 1 点(計 3 点)撮影する。
箱桁	下フランジ下面	両端部および中央部を各 1 点(計 3 点)撮影する。
	ウェブ外面	外桁の両端部および中央部を各 1 点(計 3 点)撮影する。
トラス橋, アーチ橋, 等		鈹桁端の下フランジ下面に準じる。

- ・ 端部とは支間端部, 中央部とは支間中央部付近をいう。
- ・ ウェブの撮影において, 内桁(内側)のウェブ面は撮影角度および明るさにおいて, 画像処理に適した画像を撮影することは困難であるため, 基本的には外桁(外面)のウェブ面を対象とする。
- ・ ボルト締付け部(添接部, ガセットプレート等)は診断対象外とするために, その部分を含めて撮影を行った場合には, 塗装モニタリングシステムによる画像検査の補正処理でその領域を削除する必要がある。
- ・ 橋梁形式毎の撮影箇所および撮影枚数の算出例を表 7.2.2 に示すとともに, 鈹桁橋の例を図 7.2.2 に示す。

表 7.2.2 橋梁形式毎の撮影箇所および撮影枚数

橋梁形式	部材名	撮影枚数	撮影箇所
鈹桁橋 (1 径間)	下フランジ 下面	9 枚	両外桁および中央部付近の内桁 1 桁(計 3 桁)を選択し、両端部および中央部の 3 点を撮影する。
	ウェブ外面	3 枚	外桁の両端部および中央部の 3 点を撮影する。
		計 12 枚	
鈹桁橋 (2 径間)	下フランジ 下面	12 枚	2 径間各々の、外桁および中央部付近の内桁 1 桁(計 2 桁)を選択し、両端部および中央部の 3 点を撮影する。
	ウェブ外面	6 枚	2 径間各々の、外桁の両端部および中央部の 3 点を撮影する。
		計 18 枚	
鈹桁橋 (3 径間 以上)	下フランジ 下面	12 枚	全径間のうち代表的な 2 径間を選定し、各々の外桁および中央部付近の内桁 1 桁(計 2 桁)を選択し、両端部および中央部の 3 点を撮影する。
	ウェブ外面	6 枚	全径間のうち代表的な 2 径間を選定し、各々の外桁の両端部および中央部の 3 点を撮影する。
		計 18 枚	
箱桁橋 (片側 2Box の 場合)	下フランジ 下面	6~12 枚	外桁、内桁の両端部および中央部付近 1~2 径間で 6~12 点撮影する。
	ウェブ外面	3~6 枚	同一径間で外桁の両端部および中央部から 1~2 径間では 3~6 点を撮影する。
		計 9~18 枚	
箱桁橋 (片側 単 Box の場合)	下フランジ 下面	6~12 枚	両端部および中央部付近 1~2 径間で 6~12 点撮影する。ただし、撮影部位の重複は避ける
	ウェブ外面	3~6 枚	同一径間で外桁の両端部および中央部から 1~2 径間では 3~6 点を撮影する。
		計 9~18 枚	



部材名	撮影箇所および撮影枚数
下フランジ下面	①～⑨(撮影枚数は9枚)
ウェブ外面	⑩～⑫(撮影枚数は3枚)
合計撮影枚数	9枚+3枚=12枚

図 7.2.2 プレートガーダー橋の例

(4) 撮影方法

撮影はデジタルカメラにて、以下に示す方法で実施する。

1) 撮影準備

デジタルカメラで撮影する際には、撮影を開始する前に画像データ形式を以下のとおり設定する。

- ・画像データ形式を JPEG 形式に設定する場合には、ロスレス圧縮が望ましいが、データサイズが大きくなり、データベース容量圧迫する可能性があるため、低圧縮率モードを利用すると良い。

2) 撮影方法について

撮影準備作業を実施した後、実際の塗膜診断に使用する画像を撮影する。

下フランジ下面の撮影状況を図 7.2.3、ウェブ外面を図 7.2.4 に示す。



図 7.2.3 下フランジ下面の撮影状況



図 7.2.4 ウェブ外面の撮影状況

- ・安定して画像を撮影できるように三脚を設置する。撮影する箇所によって、三脚の設置が困難な場合には、三脚を使用しないで撮影してもよい。ただし、撮影距離が長い(約 20m 以上)場合には、望遠倍率が大きくなり、ブレのない撮影が困難となるため、必ず三脚を使用する。
- ・デジタルカメラを撮影箇所（被写体）に正対して設置する。
- ・被写体の撮影範囲を設定する。被写体までの距離が遠い場合には、望遠レンズ、またはズーム機能を使用して、ファインダーへの写り込み範囲を十分に確保する。
- ・撮影箇所を撮影する。撮影後、撮影した画像を付属の液晶モニタ等でプレビューできる場合には、撮影した画像にブレが無い、明るさは十分か等、撮影画像の状態を確認する。
- ・全ての撮影対象部位において、上記を繰り返し行う。

3) その他

撮影作業を効率的に実施するために、可能な場合には以下の方法を適用する。

- ・カメラ本体接眼部にアングルファインダーを取付け可能な場合には、アングルファインダーを使用して、楽な姿勢で撮影できるようにする。
- ・カメラ本体に取り外し可能、または方向変更可能な液晶モニタが付属している場合には、楽な姿勢で撮影できるように液晶モニタの向きを調整する。

(5) 被写体の取込み方法

塗膜劣化度評価用画像を撮影する場合は、撮影対象部材の上下端が映る範囲でできるだけ大きくなるように倍率を選択する。

- 1) カメラのファインダーは、撮影対象部材に対して横一定にし、カメラを寝かせて撮影してはならない (図 7.2.5)。

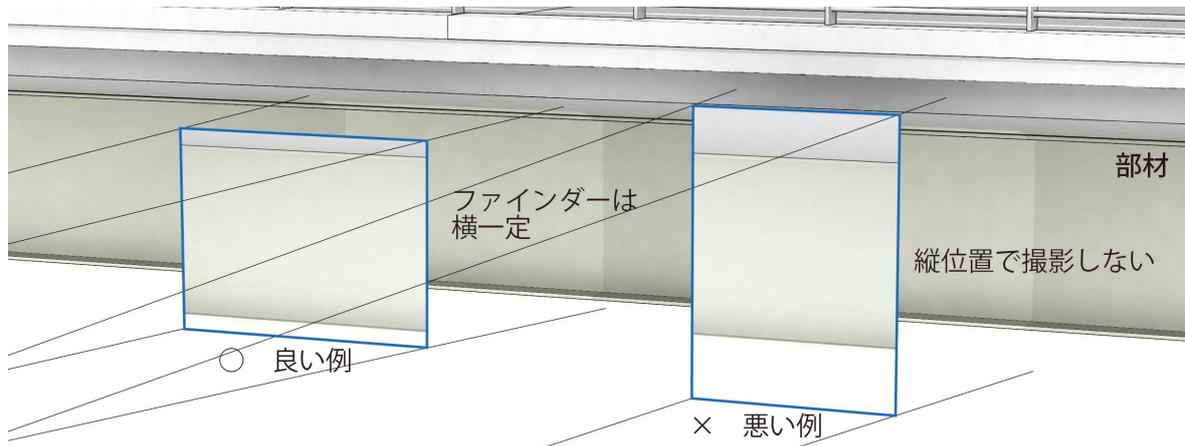


図 7.2.5 ファインダーの位置

2) ファインダー内への被写体の取込み範囲は、モニタ画面で見た場合に、被写体の写る範囲が一定になるように撮影する。例えば、図 7.2.6 に示すように下フランジ下面を撮影する場合には、被写体はファインダー内で一定の範囲が得られるような構図で取込まなければならない。被写体からの距離や撮影位置が違って、望遠レンズを使用するなどして、ファインダー内への被写体への取込みを一定にする。

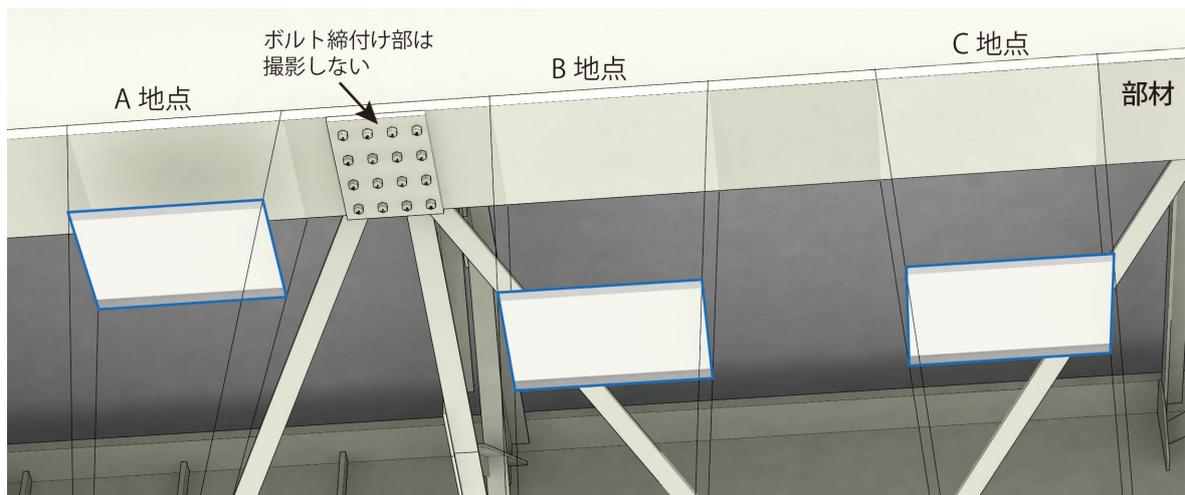


図 7.2.6 ファインダー内における被写体の取込み方 (例)

- 3) ファインダー内の被写体は、図 7.2.7 に示すように若干の余白を取らなければならない。また、ボルトの締付け部（添接部、ガセットプレート部）は避けて撮影する。

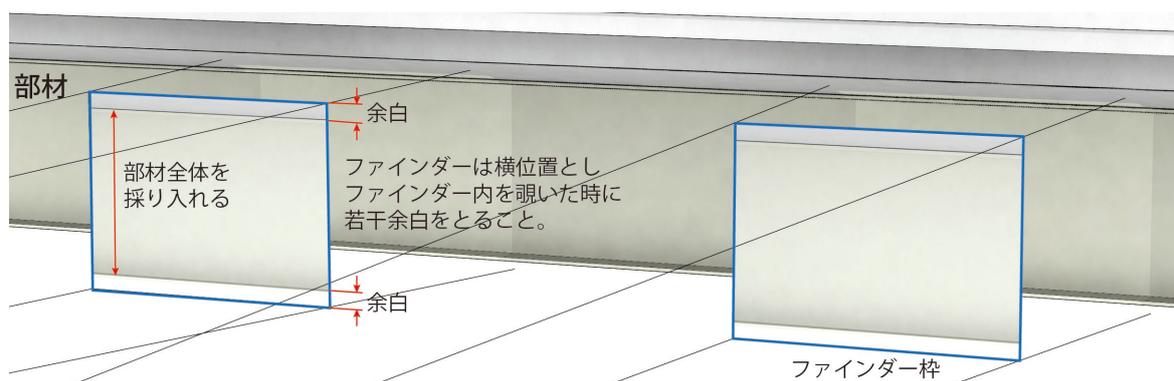


図 7.2.7 ファインダー内における被写体と余裕幅

- 4) 撮影者は、ファインダー内に写る被写体の大きさを十分に把握しておくことが必要である。
- 5) 塗装モニタリングシステムでは、撮影された部材の寸法が判らないと劣化面積を算出することができないため、橋梁諸元の把握状況、現地の撮影条件に応じて以下の対応が必要である。
- ① 被写体である対象橋梁の下フランジ幅やウェブ幅を、図面または実測等により確認しデータシートに記入する。
 - ② 下フランジの段落とし部などで図面がなく実測も困難であるといった場合には、既知の下フランジ幅の部分から推測して、データシートに記入しても良い。
 - ③ 検査路や足場上から近接して部材を撮影する場合等で、一画面に部材幅全体が取込めない場合には、撮影枠内にスケールを取付けるなどして、劣化部分の寸法が分かるようにする必要がある。撮影に必要なスケールの要件を以下に記載する。
 - a) スケールの種類
スケールは、画面（写真）上で目盛りを読み取らなければならない。目盛りは一般に使用される 1mm 単位のものでなくても、5cm あるいは 10cm 単位のものでも良い。
 - b) スケールの材質
スケールは、裏面がマグネットになっているシート状のものが良い。マグネットシートは、文具店等で市販されており、100×300mm に c) に示す事項を記入して使用する。
 - c) スケールの記入事項
スケールには、橋梁名、部材名、部材位置等を記入する。なお、記入には、水性フェルトペン（ホワイトボード用マーカペン）を用いると、使用後に簡単に拭き取れるので便利である。
 - d) スケールの取付け位置
スケールの取付け位置は撮影画像に向かって右側とし、中央部分には取付けてはならない。スケールの取付け位置の例を図 7.2.8 に示す。
 - ④ 桁高が高い場合や検査路などが無い箇所ではスケールの取付けができない場合には、その撮影画面（視野）の概ねの寸法を求め、データシートに記入する。なお、概ねの寸法の取り方は図 7.2.9 に示すとおりである。

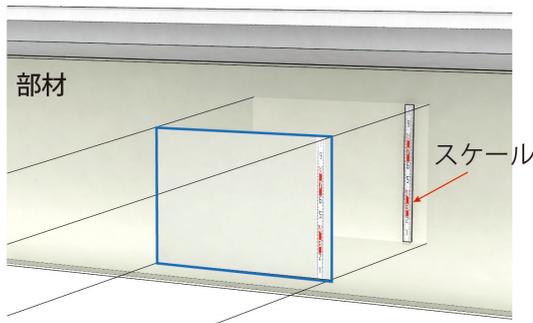


図 7.2.8 スケール設置 (例)

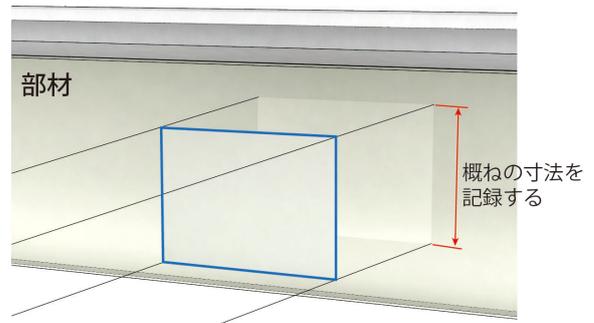


図 7.2.9 寸法の取り方(例)

(6) 撮影位置の設定

撮影位置は以下のとおりとする。

1) 下フランジ下面

下フランジ下面を撮影する場合は、必ず被写体に正対する位置で撮影しなければならない。また、望遠レンズで撮影する場合は、手ぶれ防止のために、必ず三脚を使用しなければならない。下フランジ下面の撮影位置の例を図 7.2.10 に示す。また、撮影イメージは、図 7.2.3 に示す。

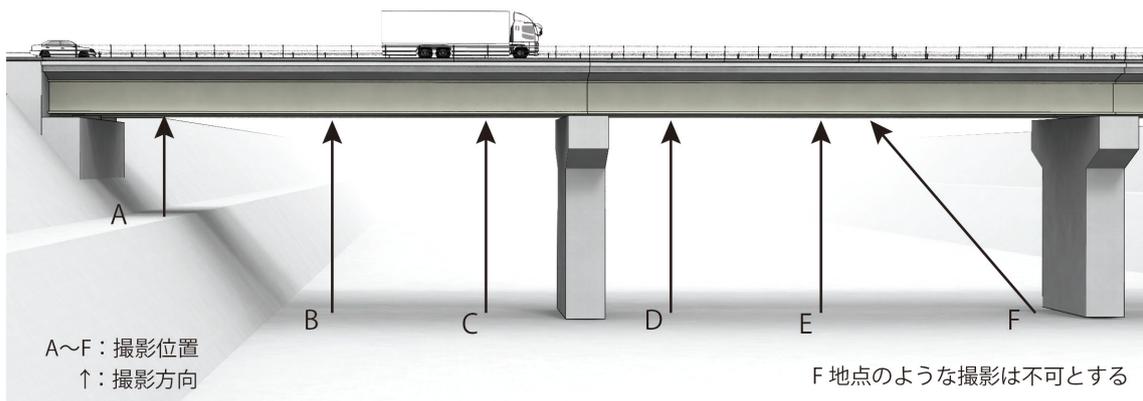
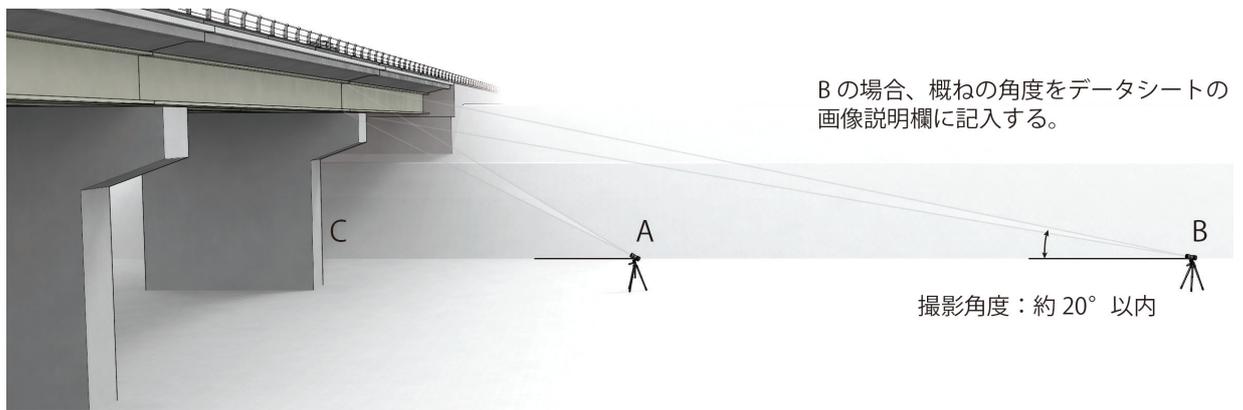


図 7.2.10 下フランジ下面を撮影する場合の撮影位置 (例)

2) ウェブ面

鈑桁橋や箱桁橋のウェブ面を撮影する場合には、下フランジ下面のように正対して撮影することは困難なため斜め位置から撮影する。ただし、足場工や検査車などを使用することによって正対して撮影できる場合はこの限りではない。斜め位置から撮影した場合は、おおよその撮影角度をデータシートに記入する (図 7.2.11 の場合は、仰角約 20 度とする)。

ウェブ面の撮影位置の例を図 7.2.11 に、撮影イメージを図 7.2.4 に、連続している変状箇所を撮影する場合の例を図 7.2.12 の A~C に示す。なお、図 7.2.11 において、A 地点で撮影したウェブ面の画像 (写真) は、被写体に対してひずみが生じやすいので、なるべく B 地点で撮影するようにする。



「7.2.4(5)被写体の取込み方法」を満足する B 地点の求め方

- ひずみを最小限に抑えるため、カメラに高倍率ズームレンズを取り付けて、倍率を最高倍率にセットする。
- C 地点から遠ざかり、ファインダー内に写る被写体が一定サイズになるように設定した位置が B 地点である。

図 7.2.11 ウェブ面の撮影位置 (例)

3) 被写体に正対して撮影できない場合の留意点

図 7.2.12 の D に示す例のように、どのようにしても被写体に正対して撮影できない場合は、撮影位置 D' からのズレ角度を、スケッチとともにデータシートの「画像説明欄」に記入する。

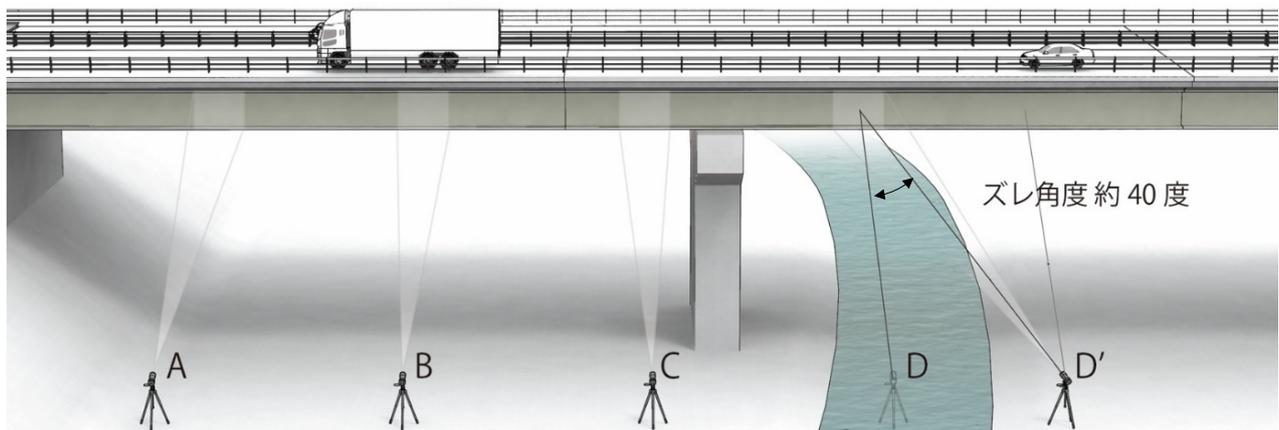


図 7.2.12 ウェブ面を撮影する場合の橋軸方向の撮影位置 (例)

4) 撮影角度のとり方

撮影時における、撮影角度のとり方の目安を以下に示す (図 7.2.13 参照)。

- 撮影者は、被写体に正対して立つ。
- そのまま両足を 90 度に広げて立つ。
- 被写体方向に対して、つま先方向との角度が 45 度となるが、撮影は 1/2 (20 度) 以内で撮影する。

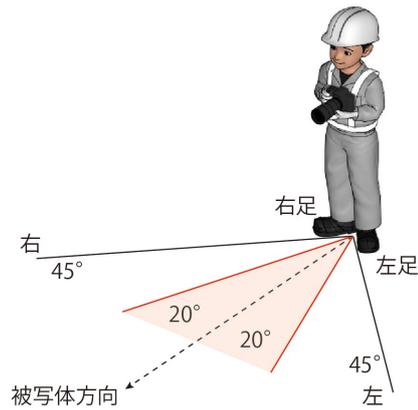


図 7.2.13 撮影角度のとり方

なお、上記の基本撮影角度での撮影が困難な場合には、画像撮影後、市販の画像補正処理ソフト等によるひずみ補正を行えるか検討し、基本撮影角度外での撮影を決定する事も可能である。

(7) 特殊な撮影

山間部に架設された橋梁のように、撮影位置からの桁の高さが段階的に変化する橋梁の場合の撮影方法を以下に示す。

1) 撮影位置

図 7.2.14 に示す橋梁のように、撮影位置からの桁の高さが段階的に変化する場合には、図中に示した A1～P1 間の A、B、C 地点および P2～A2 間の D、E、F 地点のそれぞれの撮影位置から、下フランジ下面を 2～3 枚撮影することを基本とする。

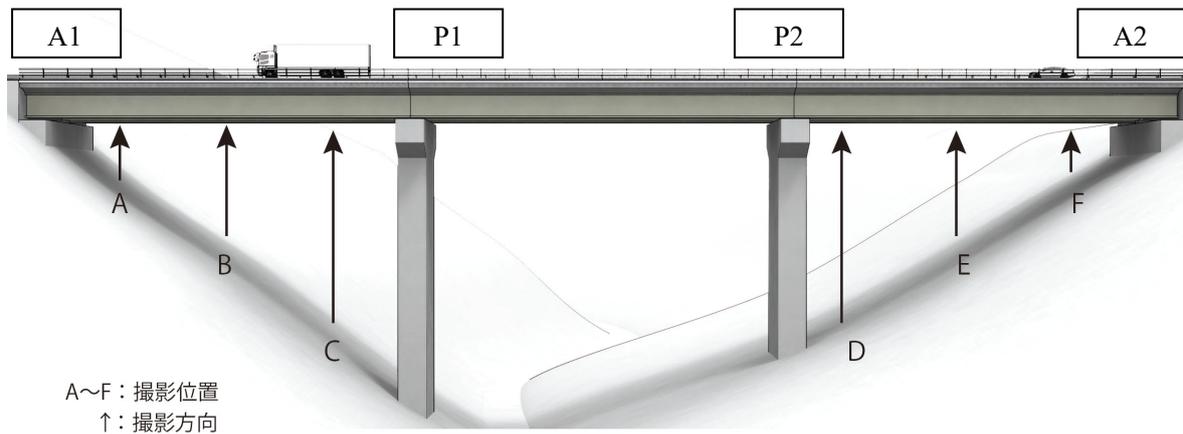


図 7.2.14 山間に架設された橋梁の撮影位置 (例)

2) 撮影要領

撮影は本項の規定により行うものとするが、図 7.2.14 に示した C および D 地点のように、撮影地点から桁下までの距離が高い場合には、被写体がファインダー内に写る一定レベルに達しない場合（ファインダー内いっぱいにならずに、他の部材も写し込んでしまうような場合）がある。このような場合については、以下のように撮影を行う。

- ・使用望遠レンズの焦点距離を最高倍率にして、ファインダー内の被写体が一定レベル(ファインダー内一杯)になる地点を C 地点、または D 地点として選ぶ。
- ・橋台側の A 地点および F 地点と、焦点距離を最高倍率にして得られた C 地点および D 地点との中間地点をそれぞれ B 地点、E 地点とする(図 7.2.15)。
- ・撮影位置は簡単な側面図(スケッチ)を描いて、それぞれの撮影地点を記入し、データシートに添付する(側面図の様式は自由)。



図 7.2.15 ファインダー内に写る被写体の一定レベルをとらえた撮影位置 (例)

7.2.5 塗装モニタリングシステムを利用した画像入力と劣化度診断・評価

現場撮影した画像を塗装モニタリングシステムに取り込み、劣化診断・評価を実施する。取り込まれた画像は自動的に、画像毎に塗膜劣化度の診断を行ったのち、数値化したものをもとに塗替単位・部材別評価を算定する。詳細については、7.3 で後述する。

7.2.6 目視確認

塗装モニタリングシステムによる評価をもとに、現場で目視確認を行い、局部劣化などの状況確認を行う。

なお、塗装モニタリングシステムによる点検は、全体の劣化状態を代表する場所の撮影画像から、その塗替え単位全体としての劣化度を評価するものである。しかし、現地状況によっては、特殊部、ジョイント等からの漏水部、沓座近傍などにおいて局部的な劣化が進行することがある。目視確認にあつては、これら局部的な劣化の状況を確認する。

7.2.7 現地状況を踏まえた総合判定

目視確認の結果を踏まえ、現地状況を勘案して、表 7.2.3 に示す判定区分により、全面塗替えと部分塗替えの区分あるいは部分塗替えを行う範囲を判定する。

表 7.2.3 判定区分

総合判定		部分塗替えの範囲
全面塗替え	—	—
部分塗替え	部材を限定した塗替え	下フランジまたはウェブ
	場所を限定した塗替え	端部または中央部
	部材と場所を限定した塗替え	下フランジまたはウェブ かつ 端部または中央部

7.2.8 点検結果の記録

点検結果は各道路管理者の所定様式に記録するとともに、適切な方法で保管し、必要な時に随時利用できるようにするものとする。

7.2.9 費用の目安

塗装モニタリングシステムを利用した塗装のモニタリングの費用の目安を表 7.2.4 に示す。試算には、3径間鈹桁橋（橋長 90m, 幅員 15m）を用い、1塗替単位（今回は1橋全て）あたりの概算費用を算出した。なお算定結果は、直接人件費のみで、解析ソフト利用料・経費等は含まない。

表 7.2.4 費用の目安

作業項目	作業内容	該当作業番号 ^{注1}	金額	備考
机上作業 (直接人件費)	・事前作業 (調査計画策定, 調査資料整備)	1, 2	約 5 万円	
	・事後作業 (メインシステムでの診断, 調書整備)	4, 6, 7		
現場作業 (直接人件費)	・現地踏査 ・現場点検 (撮影) ・診断後目視確認	3, 5	約 10 万円	
合計			約 15 万円	

注 1) 該当作業番号：図 7.2.1 の作業番号 (1~7)

7.3 結果の評価

7.3.1 塗膜劣化度評価判定の流れ

点検結果の判定にあたっては、塗装モニタリングシステムにより自動算出される劣化度評価を基本として、目視確認の結果を踏まえ、現地状況を勘案して総合的に塗替えの必要性等を判定するものとする。図 7.3.1 に塗膜劣化度評価判定の流れを示す。

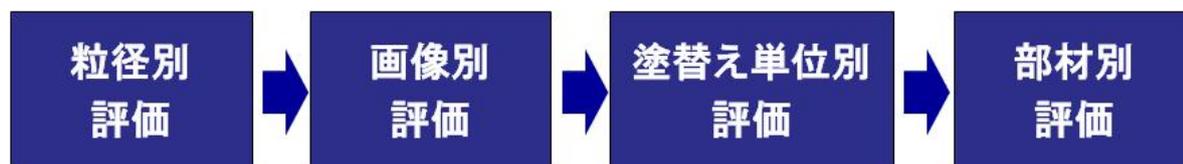


図 7.3.1 塗装モニタリングシステムにて劣化度評価を自動判定する過程

7.3.2 塗装モニタリングシステムによる劣化度評価

塗装モニタリングシステムでは、以下の手順で点検対象となる塗替え単位ごとの塗膜劣化度を評価する。

- 1) 画像ごとに粒径別評価を行う。
- 2) 粒径別評価から画像別評価を行う。
- 3) 全ての点検画像の評価から総合評価を行う。
- 4) 部材別の劣化度評価を行う。

従来の塗膜劣化度判定は、塗膜劣化としてさび、はがれ、ひびわれ、白亜化、変色、光沢減少、ふくれについて評価し、それらに環境条件を加えた総合的な評価を行うことになっていた。しかし、近年の研究により塗膜表面のさびの粒径と鋼材腐食（腐食深さ）との関係が明らかにされたため、塗装モニタリングシステムでは、塗膜の総合的な劣化ではなく、直接鋼材の腐食状態により塗替えを判断することとする。

また、塗膜表面に見られるさび粒径が大きいほど、素材の腐食度（腐食深さと大きさ）が大きくなることから、顕在化したさびを粒径別に分類し、その粒径別の占有面積率に重み付けをして塗膜劣化度の評価を行う。なお、ここでの粒径とは、さびの面積と同一の面積を持つ円の直径を指す。

つまり、同じ面積率であれば鋼材腐食は同じという考えではなく、粒径が大きいものが含まれていると鋼材腐食は大きくなっているという評価を行う。

以下に塗装モニタリングシステムにて、劣化度評価を自動算出する過程を解説する。各評価基準例（表 7.3.1～表 7.3.6）は、高速道路 3 会社での事例である。

(1) 粒径別評価

粒径別評価は、以下の手順で行う。

- 1) 各画像から、画像処理により劣化部を抽出する。
- 2) 抽出された個々の劣化部面積から粒径を計算する（図 7.3.2）。



図 7.3.2 個々の劣化部面積から粒径を計算するイメージ

- 3) 粒径により、6つのクラスに分類し、次式によりクラスごとに劣化部の占有面積（粒径別劣化面積率）を算出する。

$$\text{粒径別劣化面積率} = \text{粒径クラスごとの劣化部面積の総和} / \text{処理領域の面積}$$

- 4) 表 7.3.1 のような評価基準を定め、粒径別評価を行う。なお、評価は A, B, C, D, E の 5 段階で行う。

表 7.3.1 粒径別評価基準例

劣化部の粒径 [mm]	粒径別劣化面積率 [%]					
	0.05 未満	0.05 以上 1.0 未満	1.0 以上 3.0 未満	3.0 以上 5.0 未満	5.0 以上 10.0 未満	10.0 以上
0.1 未満	A	B	B	B	C	C
0.1 以上 0.3 未満	B	B	C	C	C	D
0.3 以上 0.5 未満	C	C	C	C	C	D
0.5 以上 1.0 未満	C	C	C	C	D	D
1.0 以上 1.5 未満	C	C	D	D	D	D
1.5 以上 2.0 未満	D	D	D	D	D	E
2.0 以上 5.0 未満	D	D	D	D	E	E
5.0 以上	E	E	E	E	E	E

表 7.3.1 は、「アメリカ鋼構造物協会（S.S.P.C.）塗装仕様書（1964）塗装した鋼表面の錆発生程度の評価方法」に示されるさび発錆度標準図を基本に作成し、実橋の塗膜状況の撮影により得られた約 200 枚の画像により、画像処理結果と S.S.P.C. のさび発生度標準図による目視結果との整合がとれるように修正した。

なお、表中の評価グレードは、以下のとおりである。

- A：良好な塗膜
- B：やや良好な塗膜
- C：要観察
- D：塗替えを前提とした観察を続ける
- E：塗替えを必要とする

この結果、画像処理結果と目視結果との間に不一致のものがあつたが、その主な原因は塗装面のよごれによるものであつた。したがつて、汚れの著しい画像については、劣化度を過大評価する可能性があり、画像処理の段階で、よごれを省くなどの補正処理をする必要がある。

(2) 画像別評価

各粒径クラスごとに得られた6つの粒径別評価の中から、もっとも劣化の激しいものを、その画像全体の評価（画像別評価）とする。たとえば、6つの粒径別評価が表7.3.2の場合は、画像別評価はDとなる。

表 7.3.2 画像別評価例

劣化部の粒径 [mm]	0.05 未満	0.05 以上 1.0 未満	1.0 以上 3.0 未満	3.0 以上 5.0 未満	5.0 以上 10.0 未満	10.0 以上
粒径別評価	B	C	D	D	A	D

(3) 塗替え単位別総合評価

塗替え単位別総合評価は、以下の手順で行う。

- 1) 全検査画像の画像別評価を表7.3.3に従い点数化する。

表 7.3.3 画像別評価点数表例

粒径別評価	A	B	C	D	E
点数	0	0	0.5	1	2

- 2) 点数化した画像別評価の平均値と検査画像の中で評価がEの画像の占める割合とから、表7.3.4の評価基準を用いて総合評価を行う。

表 7.3.4 塗替え単位別総合評価基準例

画像評価E の画像 が占める割合	画像評価値 の平均点	評 価	補修区別	劣化度 ランク	備 考
40%以上	1点以上	塗替え必要	全面的	①	劣化進行中
	1点未満	塗替え必要	部分的	④	劣化進行中
30%以上 40%未満	1点以上	塗替え必要	全面的	②	劣化進行中
	1点未満	塗替え必要	部分的	⑤	部分的に劣化進行中
20%以上 30%未満	1点以上	塗替え必要	全面的	③	劣化進行中
	0.5点以上 1点未満	塗替え時期の 検討必要	部分的	⑦	部分的に劣化進行中
	0.5点未満	要注意観察	部分的	⑧	部分的に劣化進行中
20%未満	1点以上	塗替え時期の 検討必要	全面的	⑥	劣化進行中
	1点未満	観察継続	部分的	⑨	軽度の劣化

塗替え単位別総合評価は、評価する塗替え単位が塗替え時期に達しているかを判断するのが主目的であるため、A～Cグレードの軽度な劣化よりもD・Eグレードの重度の劣化に注目して評価する。基本的にはEグレード（画像別評価で塗替え必要）の画像の占める割合により塗替え必要、塗替え時期の検討必要に区分する。

さらにC・Dグレードの割合により局部的に劣化しているか全体的に劣化しているかを判断することとしている。そのために、表7.3.4に示すグレードに重み付けを行った画像別評価値の平均点を求め、その大小によりEグレードの割合により決定した判定を調整し、あるいは、劣化が部分的または全体的なものかを判断する。

画像評価Eの画像の占める割合と画像評価値の平均点より、総合評価を行う(表7.3.4)。

また、同じ評価の中での優先順位をつける場合には、表7.3.4に示す劣化度ランク①から⑨を優先し、その中での順位付けとして画像評価値の平均点を用いるのが望ましい。

(4) 部材別評価

部材別評価は、主部材である下フランジとウェブに対して、それぞれの塗膜劣化度を、部材別評価で評価する。これまでに塗装モニタリングシステムで評価・蓄積したデータを分析したところ、図7.3.3に示すとおり、部材により劣化進行速度に著しい違いがあることが明らかになってきた²⁾。そこで、総合評価の他に部材別評価を示すことにより、部材を限定した部分塗替えの判断指標にすることとした。

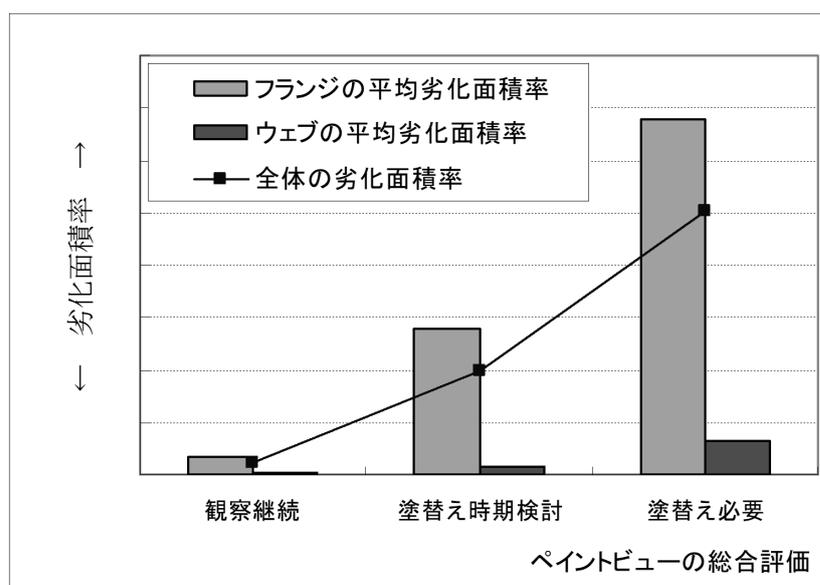


図 7.3.3 部材別（下フランジとウェブ）に見た劣化状況の違い^{※3}

※3 塗装モニタリングシステムによる診断結果を総合評価別・部材別(下フランジとウェブ)に区分し、それぞれの平均劣化面積率を算出したもの。

部材別評価は、以下の手順で行う。

- 1) 点検画像を部材別（下フランジ，ウェブ）に分ける。
- 2) 各グループの画像に対する評価を表7.3.5に従い点数化する。

- 3) 点数化した画像別評価の平均点と点検画像の中で評価Eの画像の占める割合とから、表 7.3.6 の④評価基準を用いて部材別評価を算出する。

表 7.3.5 画像別評価点数表例

粒径別評価	A	B	C	D	E
点数	0	0	0.5	1	2

表 7.3.6 部材別評価基準例

画像別評価の平均点 画像評価がEの 画像の占める割合	0.5 未満	0.5 以上 1.0 未満	1.0 以上
0.2 未満	B	C	D
0.2 以上 0.3 未満	C	D	E
0.3 以上 0.4 未満	D	D	E
0.4 以上	E	E	E

7.4 保守

データの保管について、以下のとおり留意する。

検査結果データ、検査画像並びに診断結果画像は、メインシステムのデータベース機能に蓄積されるが、PC端末の故障や更新時に、データの破損や紛失が発生する可能性があるため、定期的にバックアップを行う必要がある。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：鋼橋の塗膜点検（Paint View®），保全点検要領 構造物編 補足資料（案）【技術資料】附属資料1，2017.4
- 2) 藤原，三宅，赤井，河野，出川：画像処理による鋼橋塗膜の劣化度判定法に関する研究，土木学会論文集 No. 598, I-44, pp. 85-96, 1998.7

8章 変位計による遊間のモニタリング

8.1 技術の概要

8.1.1 目的

主桁端部の支承部において、主桁は主に外気温の変動により水平方向に緩やかに伸縮し、通行車両の輪荷重の衝撃により水平方向又は鉛直方向に動的に変動する。桁端部に損傷が発生していなければ、支承部における主桁の伸縮はスムーズに行われる。伸縮がスムーズに出来なければ、支承部の摩擦力の増大、錆、腐食、損傷、橋台コンクリート部の破損等や伸縮装置の損傷が懸念される。遊間の異常とは、可動支承部で移動制限装置の隙間が設計上設定された値を確保されていない状態である。供用後の下部工の移動や支承部建設時の設置誤差が原因と考えられることが多いが、遊間に異常が発生しても初期変位であれば、車両走行の安全性や橋体の耐荷性に対する緊急性は少ないと考えられる。しかし、遊間の異常が大きくなると、橋体の伸縮によって発生する拘束水平力が桁や橋座などへ損傷を与える可能性がある。遊間部は目視点検時には狭く・暗い部位の為に正確な判断がし難い箇所であり、変位計によるモニタリングを行うことで健全性を確認することができる。モニタリングデータに異常があれば、主桁端部の損傷を早期発見・補修することが出来、機能を回復することができる。また、地震時に於いては支承部の損傷度合や橋梁供用可能の判断データとなる。

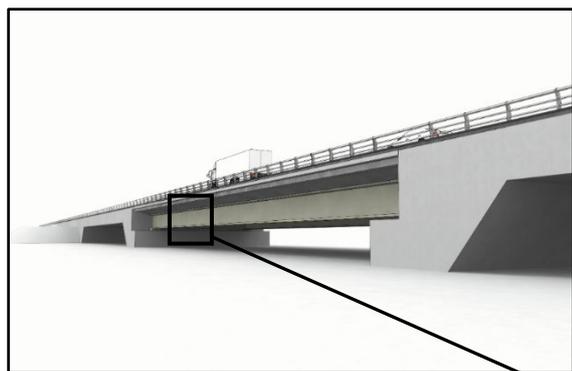


図 8.1.1 橋梁全景図

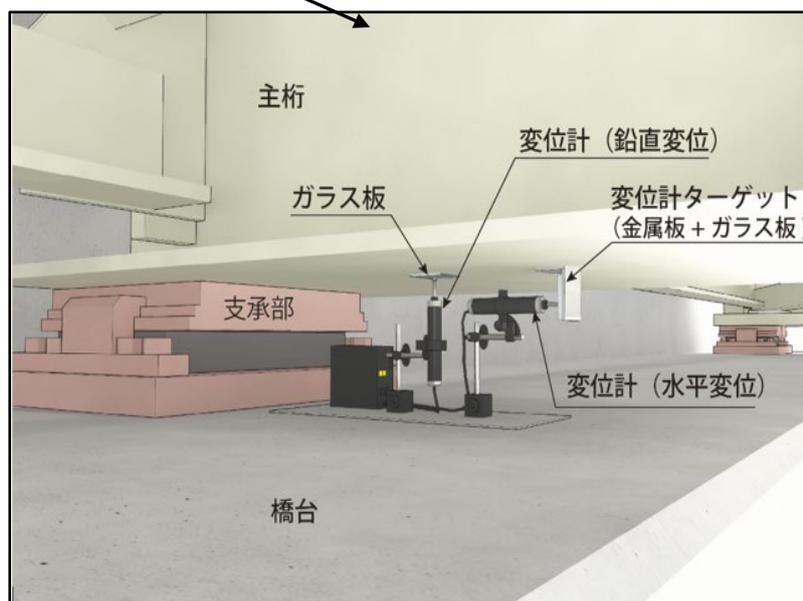


図 8.1.2 遊間変位モニタリングイメージ図

8.1.2 システムの概要

主桁端部における遊間の変位とは、主に外気温の変動により水平方向（橋軸方向）に伸縮する主桁と基準となる橋台または橋脚との相対変位である。車両走行に伴う輪荷重による主桁の衝撃的な変動もあるが、通常は温度変化に伴う主桁の伸縮量の方がはるかに大きく非常に緩やかな動きであり、この遊間変位を計測する方法としては静的計測法が適している。また大型地震に伴う変動や車両衝突事故等による変動は衝撃的な動きでありこれを計測する方法としては動的計測法が適している。しかし、大型地震や車両衝突事故等が発生した際には、それぞれの事象が起きた後に、対象橋梁が供用可能か否かの判断をするために遊間変位の計測データが利用されることになり、それは静的計測データが良い。

基本的に主桁端部における遊間の変位計測は温度変化に伴う主桁の水平方向の伸縮を主として計測することとし、静的計測（緩やかな変化現象）法で行うものとする。

(1) 変位計（温度計含む）を用いた遊間の変位モニタリングシステム

主桁端部の遊間変位モニタリングシステムは、急激な変化は無いものとし長期間連続した計測を行うことを原則とした静的計測システムを標準とする。鋼桁端部の橋台または橋脚の天端を基準点とし、そこに変位計（主に水平方向、必要に応じて鉛直方向を追加）を設置し、鋼桁端部との相対変位をメモリ内蔵のデータロガーで計測し、定期的にデータロガー内部の計測データを回収するシステムとする。温度影響が遊間変位の主要因なので同時に温度計を設置し、外気温の計測を必ず行う。温度計の計測が出来ない場合には、周辺の気象データを参考値として利用する。

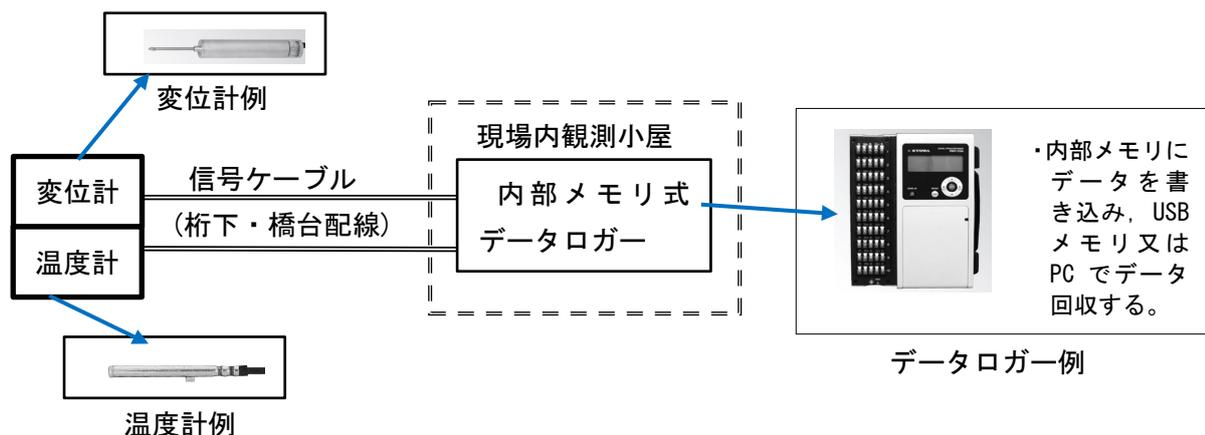


図 8.1.3 主桁端部変位計による遊間変位モニタリングイメージ図（静的計測）

1) 変位計（含む温度計）

変位計は、ロッド式変位計が実績も多く使用されている。高応答性変位計は必要無く、一般的に使用されている変位計が良いが、測定範囲を十分に満足する容量の変位計を使用する。また、変位計は直接雨水等にさらされることの無い場所に設置する。どうしても雨水等にさらされる可能性のある場合には、事前にその対応を考慮した設置方法を検討する。更に変位計は防水機能が無くても良いが、長期間の計測を考慮して防滴構造以上の性能が必要である。

変位計の信号ケーブルは、なるべく接続の無い1本物を使用する。どうしてもケーブルを接続する場合は、コネクタ接続又は芯線部分の半田付け接続となるが、接続部の防水処理は入念に行い絶縁低下に注意する。また、小動物が生息する場所では、電線管による防護配線も検討する。

2) 内部メモリ式データロガー

計測機能と同時に内部に計測データをメモリする機能を併せ持ったデータロガーが近年多く使用されている。一般的に電源も電池駆動するものが多く、年単位の計測を無人で行うことができる。計測データも USB メモリで回収できるタイプや無線通信機能で回収できるタイプがある。

遊間の変位モニタリングは長期間静的計測が基本で、1時間に1回又は1日数回の計測となる。変位計測と同時に温度計測を同時に必ず行う。

(2) 市販デジタルカメラを用いた遊間の伸縮変位モニタリングシステム

構造物の変位を変位計では無く画像技術を利用して計測する方法が近年多く開発されてきた。今回紹介する技術は、市販デジタルカメラで撮影した画像データからサンプリングモアレ法の解析技術を利用して変位を算出するものである。橋梁のたわみ計測では、サンプリングモアレカメラを用いて撮影・計測し、同時処理でたわみ計測値を表示するのが基本であるが長期間連続計測には向かない。そこで桁端部の変位計測には、自動シャッター機能を有する市販のデジタルカメラ（または CCD カメラ）を準備し、基準の格子シートを不動点である橋台または橋脚上に設置、移動変位する主桁には変位用の格子シートを設置、同一画面内で基準シートと移動シートを一定間隔のインターバル撮影・収録し、その後解析処理して変位を算出する。変位量が大きい時や2方向の変位があった時には特に有効である。また、画像データが残るので、伸縮装置の劣化等で支承部や橋台または橋脚天端に雨水の浸透・滞水、土砂の堆積等の確認が画像データとして確認が出来る。

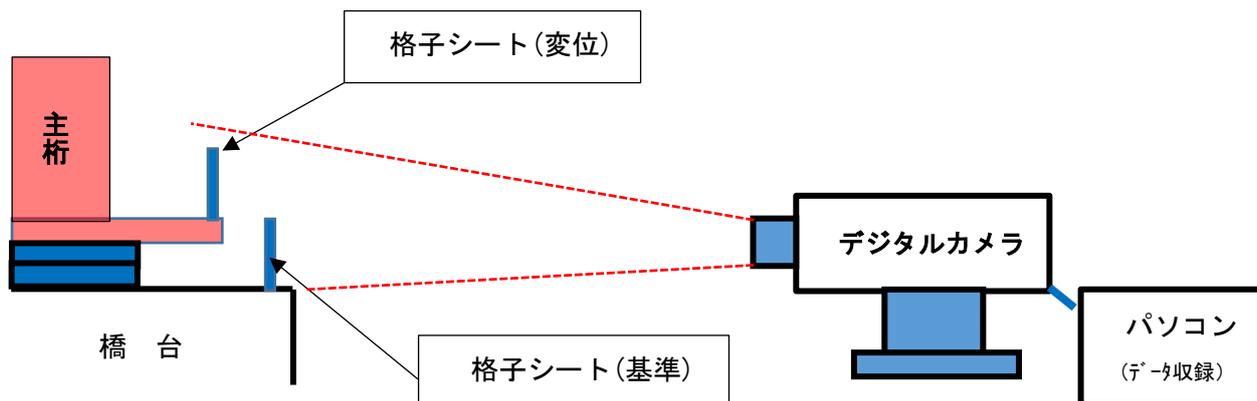


図 8.1.4 市販デジタルカメラによる遊間変位モニタリングイメージ(1)

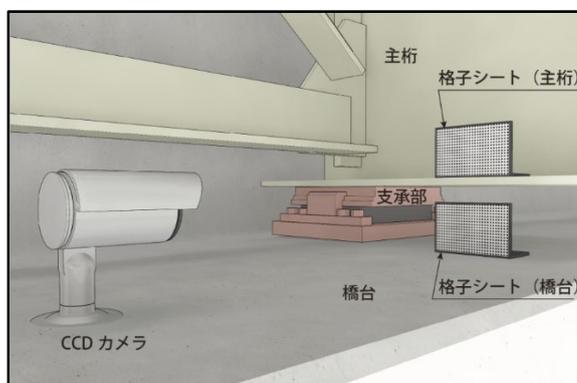


図 8.1.5 市販デジタルカメラによる遊間変位モニタリングイメージ(2)

8.1.3 計測の期間

主桁端部が温度変化によりスムーズに移動することを確認するには、最低でも1年以上の連続した計測が必要であり、最初の1年間のデータから温度と桁伸縮の相関関係を把握し、2年目以降に於いてその相関関係に変化が生じれば、主桁端部に何等かの変状が発生したことが推定でき、詳細点検を行う判断資料となる。外気温と主桁伸縮の相関関係は年間を通して均一ではなく、季節又は期間により相関関係が異なることが考えられるので、最低1年以上の基準データが必要となり、季節又は期間毎の相関を比較することが重要となる。

8.2 モニタリングの方法

8.2.1 モニタリングの手順

変位計を用いた伸縮による遊間のモニタリングの基本的な手順は、図 8.2.1 のとおりである。

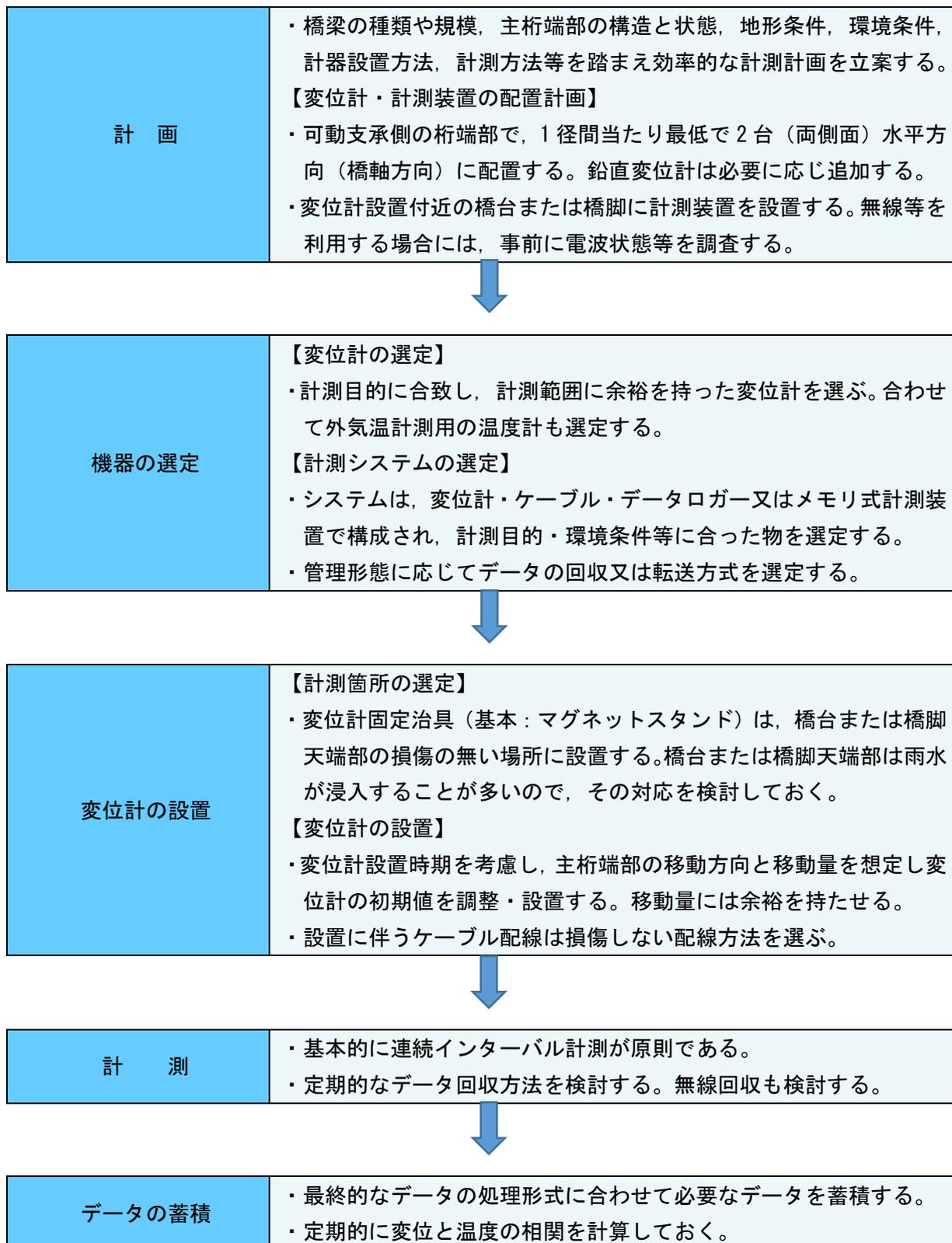


図 8.2.1 変位計による遊間のモニタリング手順

8.2.2 計画

変位計を用いた主桁伸縮による遊間モニタリングを行う橋梁の種類や規模（橋長、幅員等）、桁下部の構造（地盤状況又は河川等）や鋼桁までの高さ、桁端部（主桁、支承、伸縮装置、落橋防止装置等）の状態、周囲の地形条件や環境条件を調査して変位計の設置位置・設置方法、計測装置の設置位置・設置方法、計測方法を十分検討し、目的に則した効率的な計測計画を立案する。

(1) 変位計の配置計画

主桁端部における遊間の変位は、可動支承部がある側の主桁端部と固定点となる橋台または橋脚天端部との相対変位であり、この可動支承部側に変位計を設置する。主桁端部は基本的に狭い空間となっているため、変位計を設置する場所や設置方法の事前検討が必要である。

主桁端部は最も損傷の発生し易い部位であり、この部位の損傷度合によっては桁の伸縮変位にも影響が表れる。本来それら部位の損傷を遊間変位モニタリングで探し出すことが計測目的である。特に伸縮装置の劣化・損傷により支承部への土砂堆積や雨水が浸入することが多く支承部や橋台が損傷を受け、桁の伸縮がスムーズに行かなくなることが多いので主桁端部周辺の事前調査を行う。

主桁端部の伸縮計測の配置位置は基本的に橋梁1径間当たり、可動支承がある橋台または橋脚の左右端2箇所に設置する。主桁が多数ある幅員の広い多主桁橋梁では、可動支承側の全主桁端部に設置するのが理想である。また、主桁長さが異なる橋梁においても全主桁を計測するのが理想である。

変位計の計測方向は基本的には、主桁伸縮と平行な水平変位（橋軸方向）である。しかし、大地震等の災害時には、道路供用判断資料として床版表面の鉛直段差が重要となるので、水平方向と同時に鉛直方向変位が必要となる。

(2) 計測装置の配置・配線計画

計測装置（データロガー等）の設置は、橋台または橋脚天端の平坦な場所を基本とする。計測装置は、防滴・防塵構造の収納箱に入れ、雨水の浸入や土砂が堆積することの無い場所に設置する。また、橋台または橋脚天端から計測装置等が落下し第三者に損傷を与える事のないよう事前に検討する。データ通信方法として無線を利用する場合には、事前に通信状態を調査する。

変位計の信号ケーブルの配線においては、高圧電力線とは平行配線（高圧ケーブルとは1m以上の離れ）を避け、近接配線をしない。また、小動物の被害が想定される場所では、長期間に亘る計測の場合にはケーブルを防護管にて配管・配線を行う。ケーブルの接続は、専用キットで接続することを推奨する。コネクタ接続に関しては、接続部の劣化や防水低下の発生が考えられるので、十分養生を行い使用する。

8.2.3 機器の選定

(1) 変位計の選定

主桁端部の遊間変位計測に使用する変位計は、**図 8.2.2** に示す様なロッド式変位計を想定している。主桁端部の橋台または橋脚天端に変位計固定治具（基本：マグネットスタンド）を設置し、そこに変位計を固定しロッド先端部を主桁に固定した変位計ターゲットに当て、橋台または橋脚天端と主桁との相対変位を計測する。

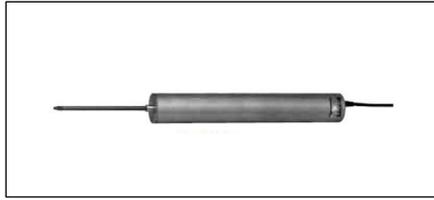


図 8.2.2 ロッド式変位計例

ロッド式変位計の選定には、以下の検討が必要である。

1) 計測範囲と分解能

ロッド式変位計の計測範囲と分解能は、計測する主桁端部の遊間の変位量に対して十分な余裕を持った仕様とする。

* 計測範囲：予想される主桁端部の伸縮量の 1.5 倍以上が望ましい。更に、地震時に想定している変位量よりも大きいこと。

* 分解能は計測範囲の 1/100 以上が望ましい。

【例】

- ・ 計測範囲：スパン 30m の単純梁の鋼主桁橋梁：L=30,000mm
年間温度変化：-10℃～40℃：温度差 50℃
片端固定端，片端自由端：変位は自由端に集中
主桁最大伸縮量=30,000mm×50℃×11×10⁻⁶ mm/℃=16.5mm
最大伸縮量×1.5 倍=24.75 (25mm)
地震時想定最大変位量：30mm **【50mmを選定】**
- ・ 分解能：最小計測範囲の 1/100 を満足するものとする。
「分解能：0.5mm以下」が望ましい。

注意：①分解能

計測器において、出力に識別可能な変化を生じさせることのできる入力値の最小値。
指示計器においては、識別可能な指示間の最小の差異。

注意：②不確かさ

計測の結果に付随した、合理的に計測量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ。

2) 耐久性

ロッド式変位計は、目的の計測期間（計器設置～計測終了・計器撤去）において十分な耐久性を有するものを用いるものとする。中古品であれば、必ず事前検査し、安定性、出力感度、絶縁抵抗値等を確認する。また、定期的なメンテ（メーカーによる再校正）を推奨する。

ロッド式変位計が計測期間中に故障又は外的損傷を受けた場合には、同じ性能を有する変位計と交換することを基本とする。そして変位計交換前後の計測データの連続性に注意を要する。

ロッド式変位計は、想定している変位量、屋外環境での計測における耐久性、性能、取扱い易さ、安定性、設置・計測費用等を総合的に判断したものを選ぶ。

(2) 計測システムの選定

1) 静的計測システム

計測方法には大別して静的計測と動的計測がある。変化が緩やかな現象を計測するのが静的計測で、変化が急激な現象を計測するのが動的計測である。温度変化に伴う主桁の伸縮変位の計測は、基本的に緩やかな変動であり、静的計測で良い。

静的計測システムには、以下の2方式があり計測目的に合わせて事前検討が必要である。

① 内部メモリ回収方式 (図 8.2.3 参照)

内部メモリ方式は、計測データをそのままロガー内部のメモリに一定のインターバルで書き込み、USBメモリ等の記憶媒体で計測データを回収するもので、計測データの収録のみに特化したものであり、閾値と比較して警報機の作動や警報メールを発令する機能は無い。

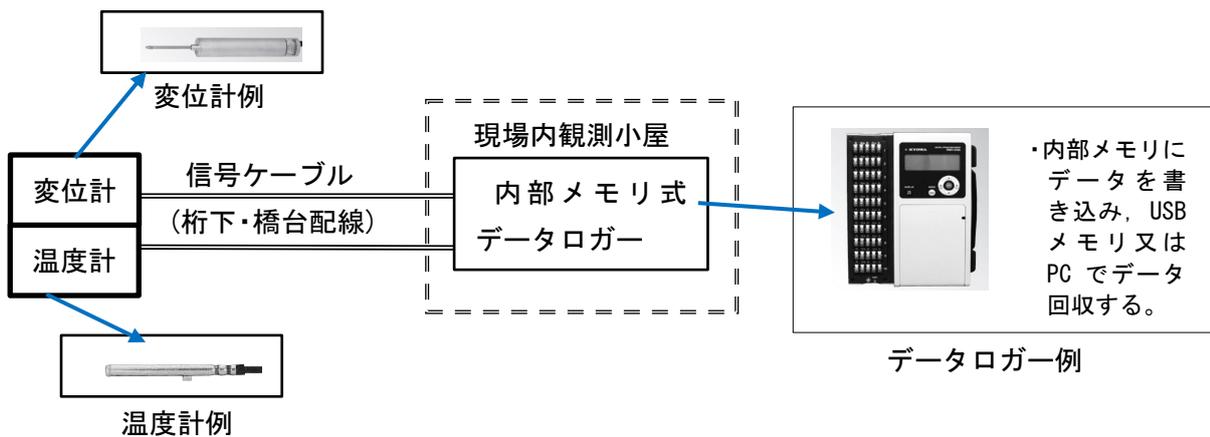


図 8.2.3 静的計測システム機器例 (内部メモリ回収方式)

② 外部処理方式 (図 8.2.4 参照)

外部処理方式は、パソコンを利用して計測データを閾値と比較し、外部警報機の作動や警報メールを発令する計測管理に利用される一般的な静的計測方式である。計測データを事務所のパソコンで処理する場合と外部サーバを利用して処理する場合がある。

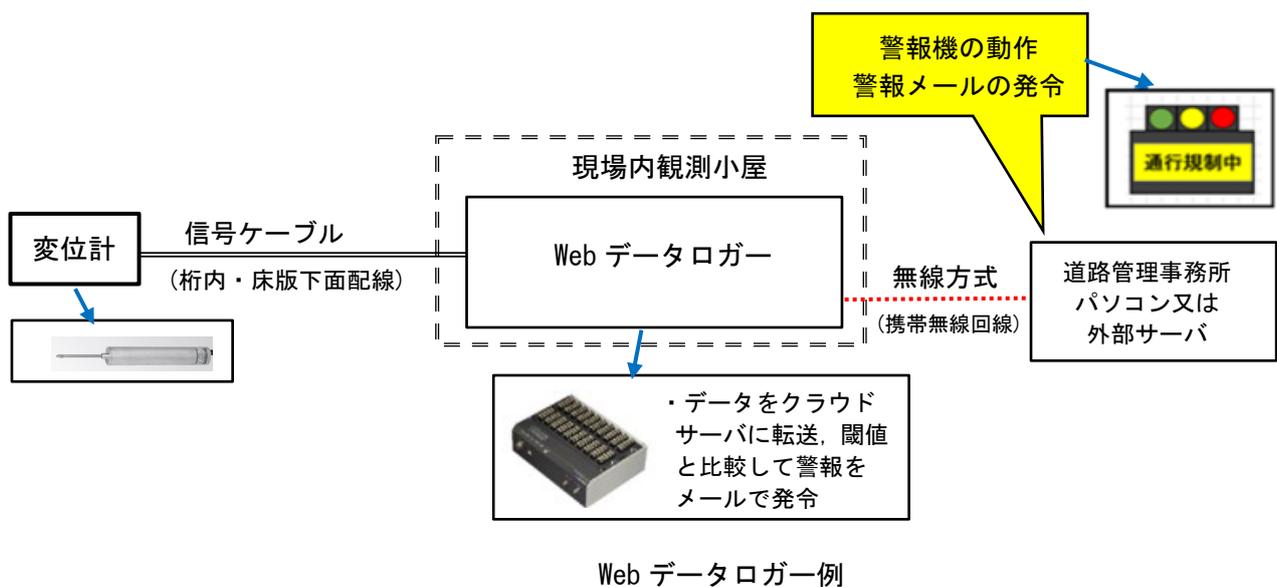


図 8.2.4 静的計測システム機器の例 (外部処理方式)

8.2.4 変位計の設置

(1) 設置箇所

主桁端部の伸縮変位を計測する箇所は、可動支承のある主桁自由端側である。主桁端部の橋台または橋脚の平らな天端表面に変位計固定治具（基本：マグネットスタンド）を設置し、その治具に変位計を取り付け、変位計のロッド先端を主桁に固定した変位計ターゲットに当て主桁端部と橋台または橋脚天端との相対変位を計測する。

主桁端部は、主桁・支承・伸縮装置・落橋防止装置等があり比較的狭く暗い空間である。

伸縮装置が劣化・損傷していると橋台または橋脚天端部は雨水の滞水や土砂の堆積があるので、事前に天端部からそれらを除去すると同時に変位計設置後の雨水滞水や土砂堆積の対策が必要となる。また、橋台・橋脚天端部のコンクリート表面に浮き・剥離が無いことをハンマー等で打撃して確認する。

支承部に関しても事前に劣化・損傷を確認しておく。特に支承部には、主桁が伸縮変位を起こした形跡が残っているので、それによって過去の主桁移動量を確認する。

橋台または橋脚天端部の損傷が著しく変位計の設置が困難であれば、設置治具等を工夫し設置可能な位置を探す。

(2) 変位計の設置

変位計の設置は、に示すように橋台または橋脚天端のコンクリート面に固定治具を設置（マグネットスタンドの下に鉄板を敷き、鉄板を天端コンクリート表面に接着剤で固定）し、固定治具に変位計を取り付け、主桁側にロッド式変位計の先端部を固定する治具（変位計ターゲット）を取り付け相対変位が計測できるようにセットする。（写真は橋梁の桁端部変位の計測用に変位計を設置した状況写真である。）ロッド式変位計は、基本的に主桁に対して平行（橋軸方向）となるように設置する。（鉛直方向変位に関しては必要に応じて設置する。）変位計の傾きが大きいと変位計ロッドがスムーズに稼働しない場合があるので設置時に注意する。また、長期計測に於いてはロッド先端を接着剤等で固定する。

変位計をセットする際は、測定範囲（桁の伸縮量）に対して余裕を持って初期値を調整する。

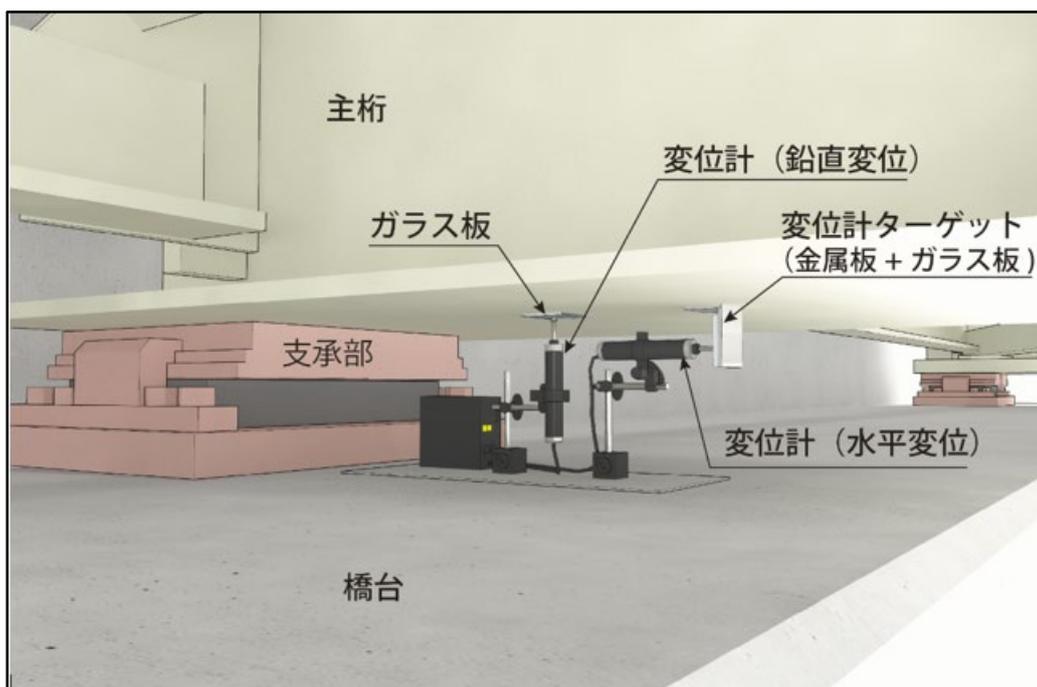


図 8.2.5 主桁端部変位計設置イメージ図

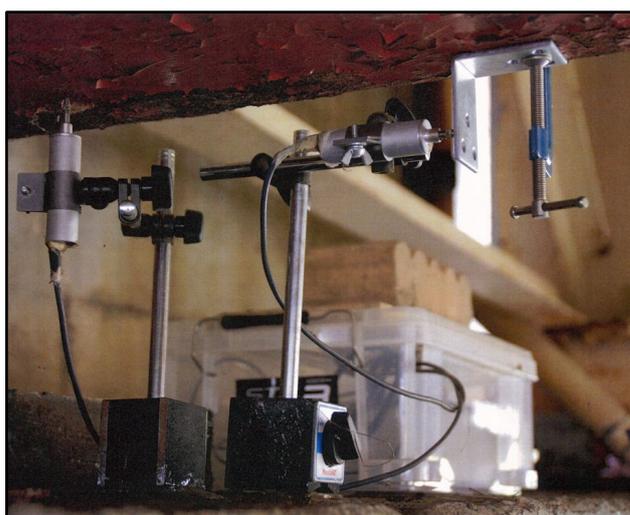


図 8.2.6 変位計設置写真例

変位計の信号ケーブルは、近傍の変位計固定治具等に余裕を持って固定し変位計に無理な負荷がかからないように注意する。ただし、変位計ロッドの動きを拘束してはならない。変位計設置に際しても、ケーブルのみを持ったり、ロッドのみを持ったりせず、必ず変位計の本体を持って作業する。

変位計ロッドの伸縮の方向と電気的出力の方向性はメーカーにより異なるので、信号ケーブルを接続後、ロッドを伸縮させて感度方向を確認する。なお使用する全ての変位計の感度方向は必ず統一しておくことで、計測データの判断で問題を起こすことが無い。

(3) 配線

変位計から計測器までのセンサ信号の伝送は、信号ケーブルを用いるのが望ましい。信号ケーブルは、1 測点毎に独立したシールド付ケーブルを標準とする。

信号ケーブルは、小動物による損傷を避けるために保護管で防護するのが望ましい。火災が問題

となる場合には、難燃性の保護管を用いることを推奨する。

高圧電線が配置されている場合では、電磁ノイズの影響を受ける恐れがあるため、その影響が無い箇所に配線する。基本的に高圧電線との平行配線はしない。止むを得ない場合でも離して配線する。

信号ケーブルは、絶縁低下の原因となる接続箇所の無いものを理想とするが、止むを得ず接続する場合には、十分防水性を考慮した接続方式を採用する。

誘導雷による被災は、基本的に配線されている信号ケーブルから被雷する可能性が高いので、そのような地域では、信号ケーブルを電線管に配線したり、センサ及び計測装置に耐雷部品を装着したりして誘導雷から防護する。電源部分にも被雷することがあるので電源側にも耐雷装置を設置する。

8.2.5 計測

計測方法は、目的の仕様に合った方式を選び、最終的なデータの利用方法を考慮したものとする。

主桁端部の遊間変位は、温度変化に伴う変動が主体であり非常に緩やかな変化であるので静的計測法が良い。車両走行に伴い桁端部に発生する衝撃振動変位や大地震に於ける大変位にも破損することが無く、その後通常の温度変化に伴う変位が計測でき、更に大地震後にその変位状況が安定して計測できることが理想である。

長期間の連続計測の場合、常時安定した電源が確保できることが重要である。商用電源以外の太陽パネルや風力発電を利用する場合には、十分に余裕を見込んだ設備を検討する。短期間の連続計測の場合、バッテリー駆動の計測装置を使用することも可能である。

データの回収は、短期間計測であればUSBメモリやパソコンによる回収、長期間計測であれば無線通信回収や電話回線による回収を準備する。現場の状況を判断して決定する。

8.2.6 データの蓄積

主桁の伸縮変位計測は、温度変化に伴う主桁の伸縮量の変化計測であり、最初の1年間の計測データから温度と主桁伸縮の相関関係を把握しておき、定期的に回収したデータを季節毎又は年間変動毎と比較する。データ回収は定期的な回収となるが最低でも半年ごとの回収を推奨する。

変位計測と同時に温度計測も必ず行う。下表に変位計測に於ける概略データ量を示す。

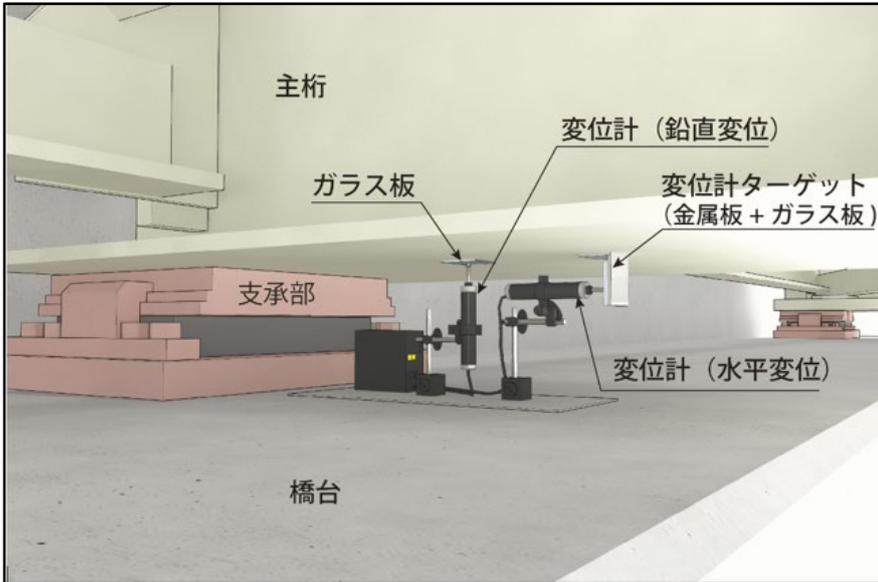
表 8.2.1 データ蓄積に必要な記憶容量

計測方式	計測条件	ファイル形式	記憶容量
静的計測	計測点数：変位計×5点 インターバル：1回/1時間 計測期間：1年間	CSV形式	2MB

8.2.7 費用の目安

モニタリングシステムの概算費用を示す（桁端部変位 1 箇所当りの費用）。

表 8.2.2 概算費用（桁端部変位 1 箇所当りの費用）

項目	摘要
モニタリングシステムの例	
計測器	ロッド式変位計：静的計測
計測箇所数	ロッド式変位計×4点＋（温度計×1点）＋ケーブル30m×5本 変位計：2点（水平・鉛直）×2箇所（桁端部上り線・下り線）
測定期間	2年間以上
測定頻度	1回/1時間のインターバル計測
データ回収	USBメモリで回収（手動回収）
管理方式	現場管理方式
変位計設置費	60万円（変位計×4点＋温度計×1点/橋梁）
機材設置費	メモリ式データロガー：70万円 【10測点まで計測可能/台】
総計	130万円（足場仮設費・撤去費・データ回収費は含まず）

- ※1. 足場の仮設費・撤去費・データ回収費・整理費・電池交換費は含まず。
- 2. 計器設置に伴う宿泊費用は含まず。

8.3 結果の評価

主桁端部の遊間変位のモニタリングは、主に外気温変化に伴う主桁の伸縮がスムーズに出来ているか否かにより、桁端部に変状が生じているかを判断する資料となる。一カ年の変位計測データから、桁端部の変位と外気温との相関関係を把握し、その後の計測データで相関関係に変化が見られたら桁端部の詳細点検を行う指標とする。目視点検では、狭く・暗い為に明確に判断し難い遊間の変動を、モニタリングすることで健全性を確認することができる。外気温の変動と桁端部変位の相関は年間を通して一定の相関ではない場合もあるので、季節毎や期間毎の相関関係も調べる。

8.4 保守

主桁端部の遊間変位のモニタリングでは、その計測期間を満足する計測機器の耐久性と変位計を含めた計測機器の設置環境の安定性も重要である。計測機器は定期的な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。それと共に電源やケーブル配線を含めた計測環境の保守が常に安定した計測データの収集には不可欠である。

(1) 変位計

- ・変位計設置前には、変位計の絶縁抵抗値・線間抵抗値をチェックし、更に計測器に接続して指示値が安定していることと変位計の感度方向を確認する。中古又はレンタル品の変位計を使用する場合には、事前に再校正試験を行った日時と検査成績表の内容、変位計の絶縁抵抗値・線間抵抗値をチェックし、更に計測器に接続して指示値が安定していることと変位計の感度方向を確認する。
- ・計測期間中は定期的な点検を行う。計測器側の変位計ケーブル端末で絶縁抵抗値・線間抵抗値をチェックし、更に計測値に安定性があることを確認する。また変位計の外観に損傷が無いか、変位計設置治具やマグネットスタンドに損傷が無いか、変位計のロッドが主桁に平行（基本計測方向）に又は鉛直（上下方向）にセットされているか、ロッド固定位置がズレていないか等を目視点検する。
- ・変位計を設置する橋台または橋脚天端のコンクリート表面の浮き・剥離が無いか事前に確認し、計測期間中も定期的に設置位置のズレが無いかを目視点検する。
- ・変位計点検チェックの前後で必ず計測データに連続性があることを確認する。

(2) 計測装置（変位計を除く）

- ・変位計設置前には、変位計と組合せて感度方向や結線方式を確認し、データにフラツキが無く、安定して計測できることの確認を行う。
- ・計測期間中は定期的な点検を行う。計測装置が自己診断機能を持った計器は自己診断機能で計測動作が正常であることを確認する。その機能が無い計測装置は、簡易な基準電圧等の校正データを入力し、出力電圧等が正常であり安定していることを確認する。また、パソコンや通信機器を通してデータの転送を行っている場合は、転送されたデータが一致していることを確認する。
- ・閾値等の設定を行っている場合には、その機能が正常か確認を行う。
- ・全ての計測機器の点検チェックの前後で必ず計測データに連続性があることを確認する。
- ・変位計設置前には、使用する信号ケーブルに外的損傷が無いかを確認し、コネクタ部の形状や絶縁抵抗値のチェックを行う。中古品の場合には、絶縁抵抗値のチェックと合わせて線間抵抗値を確認するかセンサを接続して測定器側の出力を確認する。外観には表れないケーブル内部のキンク等もあるので念入りにチェックを行う。

9章 適用事例

9.1 サンプルングモアレ法による変位のモニタリング【4編2章の事例】

(1) 適用事例の概要

鋼主桁のたわみ計測は、従来ロッド式変位計等の接触式計測器を用いた計測法が用いられている。しかし、桁下に河川等の障害物があり計測器が直接設置出来ない場合、ビデオカメラ等で撮影を行い、画像解析技術を用いてたわみ量を算出する計測法が用いられている。そこで画像解析技術のひとつであるサンプルングモアレ技術を内蔵したサンプルングモアレカメラ（以降：モアレカメラ）を使い、格子シートを遠望から撮影し、多点の変位をその場で表示できる計測技術を確認するため、東北地方の高速道路橋で試験車両（散水車）を走行させ主桁のたわみ計測を行った。

対象橋は鋼合成単純鉄桁橋で、橋長 36.3m、床版は I 型鋼桁に挟まれた形で鋼桁上に設置された RC 床版形式である。



図 9.1.1 対象橋の外観

(2) 計測器の設置

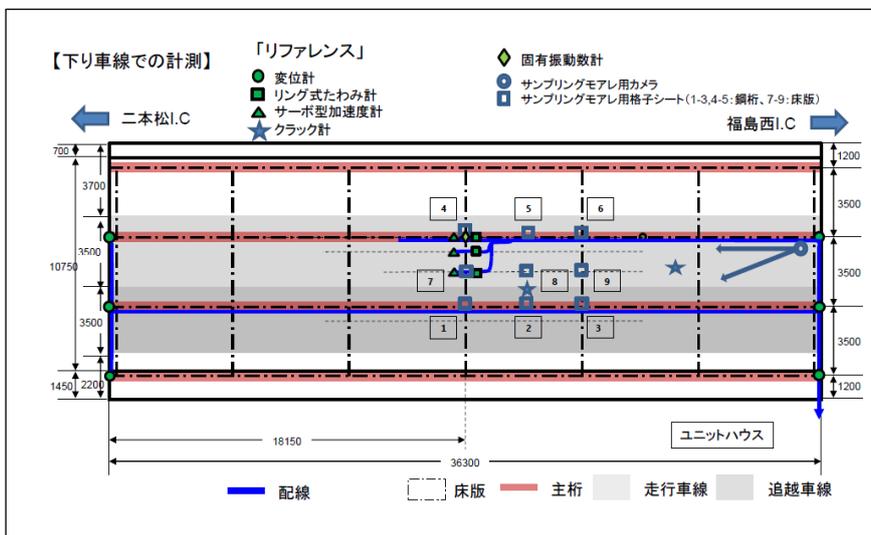


図 9.1.2 計器配置図



図 9.1.3 格子シート設置状況
(鋼主桁下面)



図 9.1.4 格子シート設置状況
(RC 床版下面)

鋼主桁及び RC 床版中央のたわみ計測と同時に多点計測が可能であることを確認する為、図 9.1.2 に示すように RC 床版を挟んだ主桁 2 列と RC 床版中央に各 3 箇所、合計 9 箇所に格子シートを設置した。全ての格子シートがモアレカメラの画面内に入る位置として福島方の橋台付近を選定し、モアレカメラを固定した。格子シートを貼付したアルミ板を主桁下面にはシャコ万で固定し、RC 床版下面にはアンカーで固定した。

全 9 枚のシートがカメラ画面内で重ならないように配置し、床版下面の暗所シートには照明を用意した。

【格子シート及びモアレカメラ設置時の注意点】

1) 格子シート設置時の注意点

- ・格子サイズは、格子シートの設置位置とモアレカメラの設置距離から選定する。
- ・格子シートはモアレカメラと正対して設置することが基本である。但し計測期間中に格子シートの



図 9.1.5 カメラ設置状況

角度がズレなければ傾斜状態でも計測は可能である。

- ・複数の格子シートがモアレカメラ内の画像として重ならないことを原則とする。

2) サンプルングモアレカメラ（パソコンを含む）設置時の注意点

- ・撮影時、風や振動でモアレカメラがぶれないよう注意する。（囲等の準備をする。）
- ・モアレカメラ画面内に直射日光や反射光が入らないようにカメラの位置を工夫する。
- ・モアレカメラ画面内に不動点（不動な場所に格子シートを設置し、計測点を設ける）を設けることが出来れば、計測精度を上げることが出来る。

(3) 実験結果

図 9.1.6 に示す試験車両（散水車）走行時の橋梁のたわみを計測した結果、図 9.1.7 に示すように走行車線を試験車両が走行した時には、走行側の鋼製主桁の変位が最大となり、追越し側の主桁変位は少なく（約 30%減）、その間にある RC 床版は両主桁変位の平均値に近い変位量を示した。また、同時に計測していた近傍（約 0.5m 離れ）の接触式のリング式変位計とほぼ同程度の変位量であった。更にサンプルングモアレ法では上下方向だけではなく左右方向も同時に計測することが出来ることが確認できた。



図 9.1.6 試験車両走行状況

図 9.1.8 は、従来の鉛直方向の変位データを左側に、同時に計測した水平方向の変位データを右側に示す。この水平方向の変位データから、車両が走行車線を走行している時には追越し車線側の主桁が外側（上り線側）に変位し、追い越し車線側を走行している時には、走行車線側の主桁が路肩側に変位していることが判る。

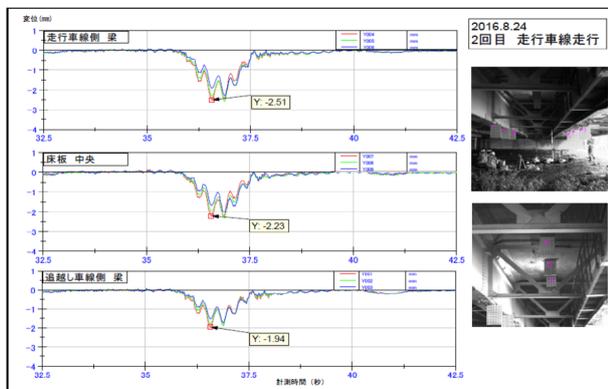


図 9.1.7 たわみ計測結果

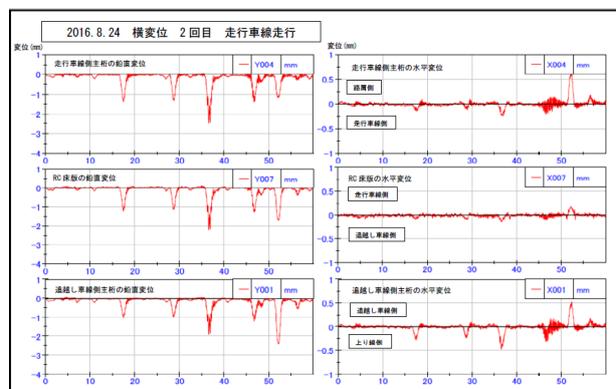


図 9.1.8 たわみ量と横変位計測結果

(4) まとめ

- ・モアレカメラ 1 台で、2 方向 (X, Y) の変位を、多点（最大 16 測点の同時計測）で高速撮影（200Hz）の計測が可能であり、その場で結果を確認できる。
- ・望遠レンズで遠距離からの計測も可能である。但し、日照の影響を受けるので注意する。
- ・格子シートがあれば、モアレカメラと制御 PC だけで何時でも変位計測が可能である。

(5) 概算費用

約 60 万円（1 日で 4 橋梁連続計測可能として、4 橋梁合計：計測機器は損料、足場仮設費含まず。）

9.2 動画像処理によるたわみのモニタリング【4編3章の事例】

(1) 適用事例の概要

橋梁の健全度診断に必要な定量的データを得るため、すなわち診断の補助を目的として、目視点検では確認できない鋼桁の損傷等の変状に伴う構造性能の低下を定量的に評価確認したい。そのために、本モニタリングシステムを自治体が管理する橋梁へ適用し検証を行ったので紹介する。

具体的には、重量が既知の車両を一定速度で橋梁上を走行させる（以下、車両走行載荷試験とする）ことで、橋梁に外力を加えその時のたわみ量を計測した。

(2) 対象橋梁

対象橋梁は自治体が管理する Y 橋を対象とした。表 9.2.1 に対象橋梁の概要を、図 9.2.1 に Y 橋の全景を示す。

表 9.2.1 対象橋梁の概要

橋梁形式	鋼鈹桁橋
名称	Y 橋
径間数	3
橋長	88.0m
最大支間長	28.7m
総幅員	14.8m
架設年次	昭和 47 年
適用示方書	昭和 39 年道示
設計活荷重	TL-20(S31)



図 9.2.1 Y 橋全景

(3) 計測方法

車両走行載荷試験の際に、鋼桁下面を橋梁真下からカメラで動画撮影し、走行載荷に伴う桁たわみを計測した。計測箇所は図 9.2.2 に示した中央の 3 本の主桁の支間中央付近 3 箇所とした。メインカメラを台座固定、サブカメラ 2 台を三脚固定し、上記の 3 箇所を同期撮影した。ただし、1 台のサブカメラについては機材の都合により手動での同時計測とした。撮影時間は、計測箇所の直上を車両が通過する前後 20 秒とした。車両走行載荷試験に用いた車両は 8t 車と 20t 車の 2 種類で、車両は左車線を走行した。尚、実験に使用したカメラのスペック及び撮影条件を表 9.2.2 に示す。また、撮影には焦点距離が 180mm のレンズを使用した。尚、今回、計測環境が暗かったため、図 9.2.3 で示したように LED 照明を用いた。車両載荷試験の様子を図 9.2.4 に示す。

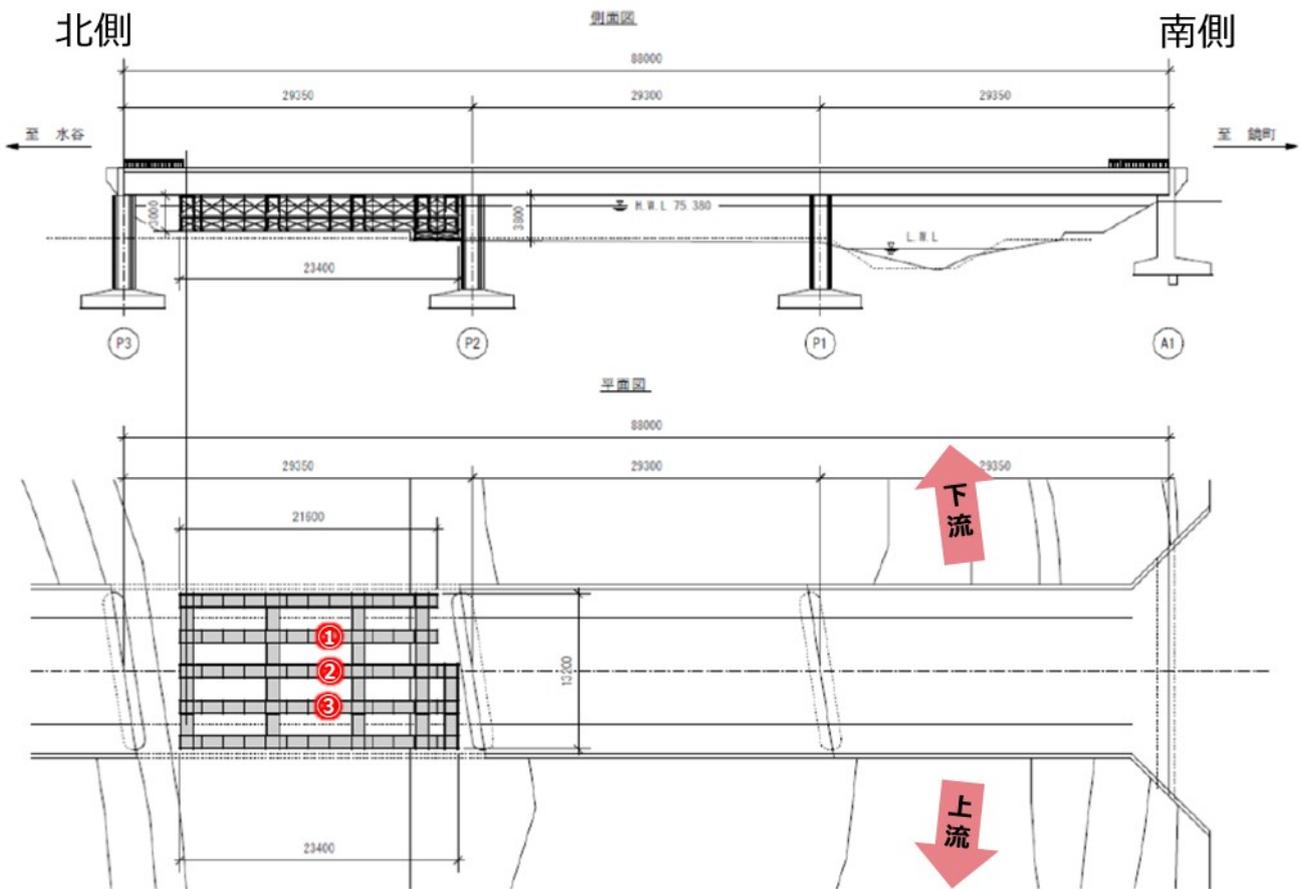


図 9.2.2 橋梁一般図

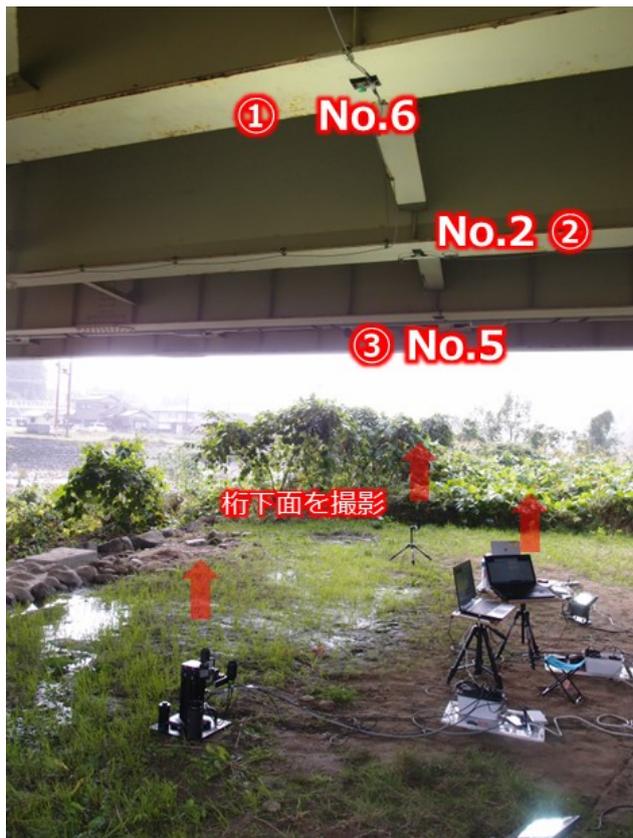


図 9.2.3 計測箇所および計測機器



図 9.2.4 車両走行載荷試験の様子

表 9.2.2 使用したカメラのスペック及び撮影条件

	メインカメラ	サブカメラ	サブカメラ 2
画素数	4112×3008	2048×2048	2048×2048
画素ピッチ(μm)	3.45	5.5	5.5
秒間撮影枚数(fps)	25	75	75
露光時間(msec)	10	10	10
撮影距離(mm)	3026	2534	2800
計測箇所	①	②	③

撮影した動画像データを解析した結果の一例を図 9.2.5 と図 9.2.6 に示す。図 9.2.5 は 8t 車走行載荷時の桁たわみ計測結果を、図 9.2.6 は 20t 車走行載荷時の桁たわみ計測結果を示している。また、メインカメラ及びサブカメラ 2 台の撮影画像（動画像データ内の 1 フレームを切り出した静止画像）も併せて示している。

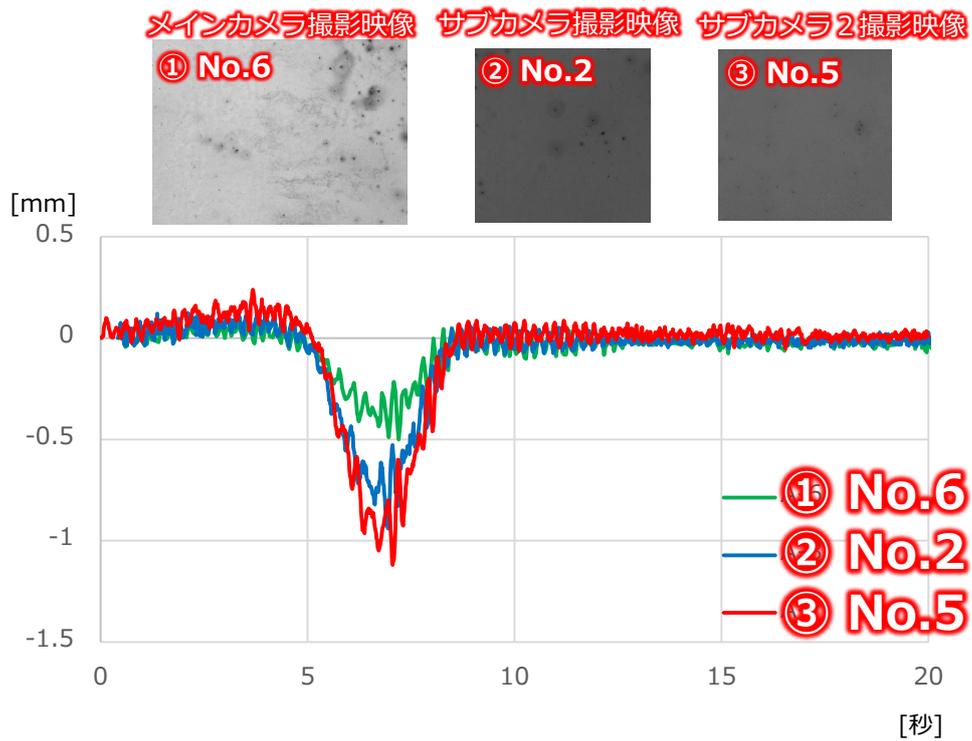


図 9.2.5 8t 車走行載荷試験結果 (南→北走行時)

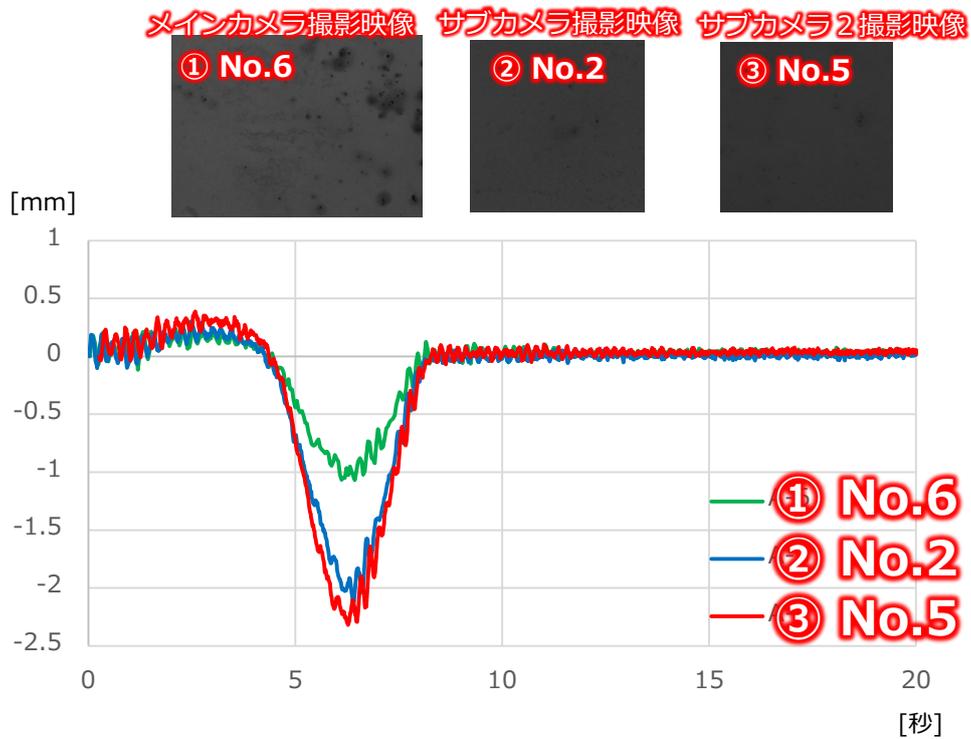


図 9.2.6 20t 車走行載荷試験結果 (南→北走行時)

図 9.2.5 より、8t 車走行載荷試験において、計測箇所直上を車両が通過した際の桁たわみが走行車線側で約 1.1mm、対向車線側で約 0.4mm であることが確認できた。同様に、図 9.2.6 より、20t 車走行載荷試験においても、計測箇所直上を車両が通過した際の桁たわみが走行車線側で約 2.3mm、対向車線側で約 1.0mm であることが確認できた。上記の結果より、載荷重量の増加に伴い桁たわみが増大していることと車両の走行位置によって桁たわみが増大することが確認できた。

また、8t 車走行載荷時と 20t 車走行載荷時の各カメラの撮影映像を比較するとわかるように、撮影映像の明るさに差があるにもかかわらず桁たわみが計測できていることから、計測環境の照度にばらつきがあっても十分計測できることが実証できた。さらに、コンクリート桁に比べてテクスチャが少ない鋼桁が計測対象でも計測できることが実証できた。

(4) まとめ

本モニタリングを適用することで、車両走行に伴う鋼桁のたわみが計測できることを確認した。すなわち、マーカー等を設置することなく、遠隔・非接触で対象箇所のたわみを計測できるため、重量既知の車両を走行させることで、鋼桁の構造性能の変化を低コストに観測できる。

9.3 加速度センサによるたわみの測定【4編4章の事例】

(1) 適用事例の概要

1) 鋼桁橋での加速度センサによる測定

鋼桁橋の主桁の主桁の部分的な損傷や強度低下を評価するため、主桁へ設置した加速度センサを用いて振動を測定、振動データを演算処理し、たわみ（活荷重変位）を算出、各部の主桁の剛性について比較・評価した適用事例を紹介する。

2) 橋梁の概要

対象橋梁は、自治体が管理する昭和47年に架設（設計基準は昭和39年道路橋示方書）された、鋼桁橋である。図9.3.1～図9.3.3に測定を実施した橋梁の外観を示す。



図 9.3.1 計測橋梁の外観（上面）



図 9.3.2 計測橋梁の外観（裏面）



図 9.3.3 計測橋梁の外観（側面）

本橋の橋梁緒元は、総幅員 14.8m、橋長 88.0m、最大支間長 28.7m の 3 径間 鋼桁橋である。

3) 計測概要

本事例では、橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向(X, Y, Z 軸)を計測可能な 3 軸加速度センサを複数設置し、それぞれの加速度センサのサンプリング時刻を同期させ計測を行った。

加速度センサの設置箇所は、図 9.3.4 に示す通り、1 径間内の 5 本の主桁に対し、縦方向および横方向の振動を測定できるように、橋軸方向に 3 か所、橋軸直角方向に 5 か所を十字状に配置、また参考として橋梁上部の欄干 1 か所を追加した計 8 箇所に設置した。同図 9.3.4 に加速度センサの番号を示す。

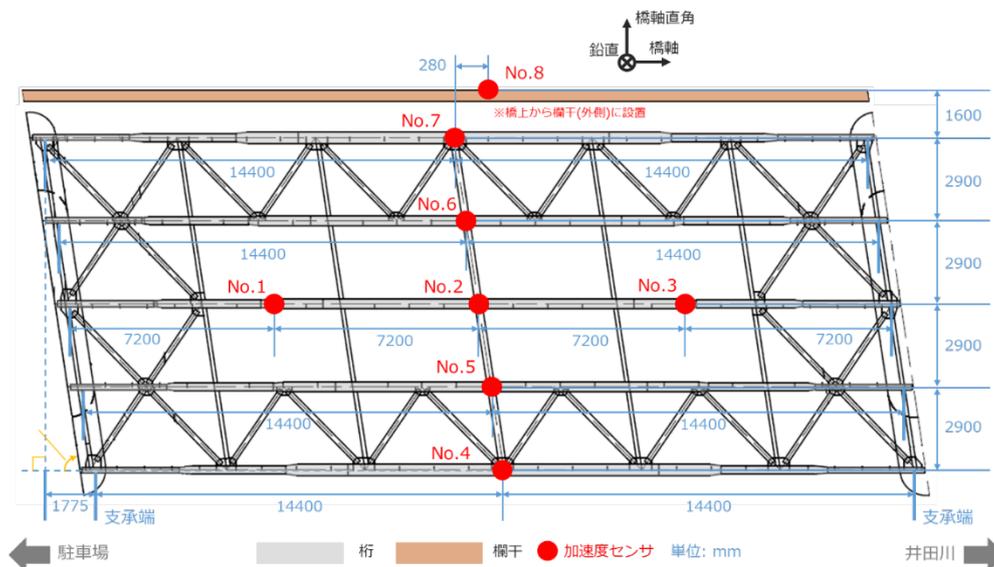


図 9.3.4 加速度センサの設置位置

3 軸加速度センサは図 9.3.5, 図 9.3.6, および表 9.3.1 に示す通りの性能・外観を有する機器を使用した。



図 9.3.5 3 軸加速度センサ



図 9.3.6 計測ユニット

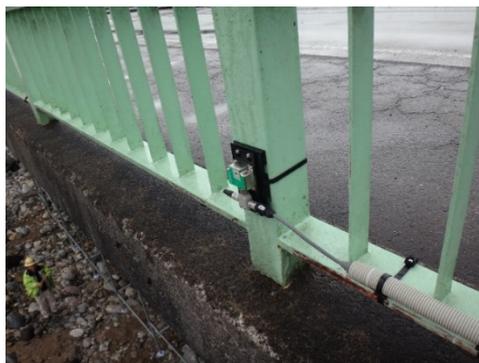
表 9.3.1 3 軸加速度センサの特性

項目	仕様
測定範囲	XYZ 各軸 ±5G (精度保証範囲 ±1G)
測定分解能	各軸 0.06 μG
サンプリング周波数	100Hz (10ms)
周波数範囲	DC~20Hz (-10db : 20Hz)
電源電圧	DC24V +5% -20%
消費電流	最大 100mA (突入電流を除く)
物理インタフェース	CAN2.0A
最大配線長	100m
構造	アルミニウム合金
保護等級	防水, 防塵 (IP67 相当)
環境条件	-20°C~+50°C, 85%RH 以下
平均故障間隔	10 年以上 (温度 : +30°C 下)

3 軸加速度センサは、裏面に強力な磁石を設置した取り付けベースにより固定し、横ずれ防止措置として後に剥がす事ができるシリコン系の弾性コーキング材の部分塗布、或いはメタルバンドによる補強を行った。3 軸加速度センサは、計測ユニットにカスケードに接続され、計測データは計測ユニット内の不揮発メモリに保管される。計測データの収集は、ネットワーク経由で計測ユニットから取得しても良いし、現地の不揮発メモリを回収する事もできる。なお加速度センサに接続されるケーブル類は、ケーブルの揺れが加速度センサに伝達されるのを防止するため、加速度センサ周辺で適宜固定している。実際に加速度センサ、および計測ユニットを設置した状況を図 9.3.7、図 9.3.8 に示す。



(a) 主桁へ設置した様子



(b) 欄干へ設置した様子

図 9.3.7 センサ設置の様子



図 9.3.8 計測ユニットを設置した様子

また、たわみ測定のキャリブレーション測定として、重量が既知の車両(4t 車)を通行させ、たわみ量を測定した。車両通行時の様子を図 9.3.9 に示す。



図 9.3.9 車両通行時の様子

なお、本測定に用いた加速度センサシステムは、中継処理装置（定価：87万円）1台、加速度センサ（定価：33万円）8台であり、システム価格は定価ベースで351万円である。加速度センサについては、測定内容に応じて削減することができる。また本システムは10年の長期測定が可能であり、長期にわたる測定の場合は機器の購入が必要だが、一時的な測定に関しては機器のレンタルや業者への委託測定も可能である。

(2) 試験結果

1) たわみ量と荷重の関係性の評価

車両走行試験では、往路、復路それぞれ5回ずつ車両を走行させ、加速度情報を取得、各センサの加速度情報からたわみ（活荷重変位）を算出した。図9.3.10、図9.3.11に、それぞれ往路、復路走行時のたわみ（活荷重変位）について、専用の解析ソフトウェアを用いて振動データから活荷重変位を算出、車両走行時の活荷重変位の分布についてグラフ化を行った結果を示す。図中、円の大きさはたわみの大きさを表し、「工」のシンボルの長さは5回分の測定結果のばらつきを示す。このばらつきは、実験毎の車両の走行する位置の違いによる橋軸回転方向の揺れによる影響が大きい。

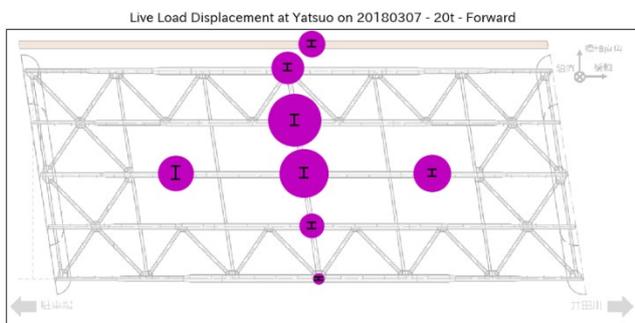


図 9.3.10 往路走行時の活荷重変位分布

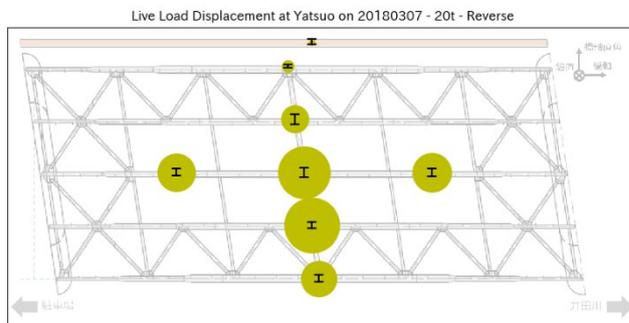


図 9.3.11 復路走行時の活荷重変位分布

図9.3.10、図9.3.11より、それぞれ橋梁中心部かつ車両走行車線直上の結果を最大たわみとして分布していることを確認し、本測定が妥当との判断結果を得た。

2) たわみヒストグラムによる主桁の経時安定性の評価

専用の解析ソフトウェアを用いて、橋梁中心に配置した加速度センサの長期間の振動データから、たわみ（活荷重変位）の発生頻度ヒストグラムを作成、得られた結果を、走行車両の車重と、活荷重変位との関係性をプロットした結果を図9.3.12に示す。また同様に専用の解析ソフトウェアを用いて、測定期間中全期間のたわみ（活荷重変位）の発生頻度分布を日ごとに算出、プロットした結果を図9.3.13に示す。

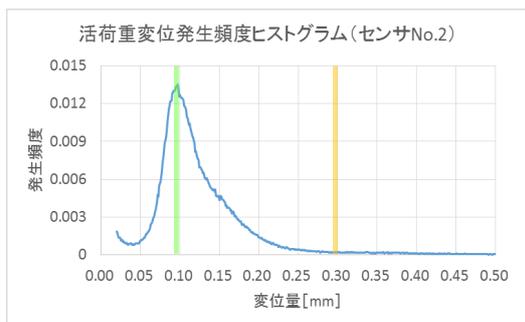


図 9.3.12 所定期間の交通流のたわみ分布

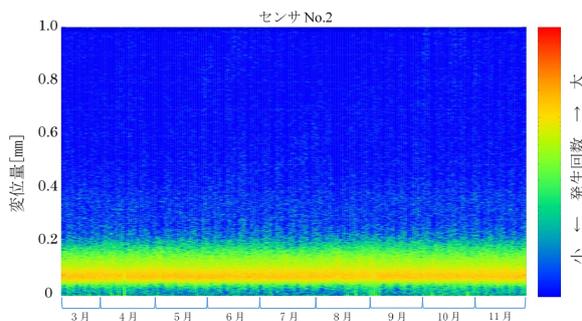


図 9.3.13 長期のたわみ分布の経時評価

図 9.3.12 中、黄色のラインが車両走行試験時(4t 車)のたわみであり、緑色のラインは通常交通流での最頻値で、1 t 車に相当する。図 9.3.13 から、全期間を通じ、普通車の走行が主要な交通であることが確認できる。また期間中、たわみの最頻値の変化はなく、対象橋梁の剛性に著しい変化が発生していない事が確認できた。

(3) まとめ

加速度センサを用いて鋼橋の主桁の交通振動を計測し、演算処理を行うことで橋梁の活荷重変位を算出することができる。主桁のたわみ特性は、主桁の剛性変化や部分的な強度低下に密接に関係するパラメータであり、目視では確認できない剛性変化を評価できる。本事例では、たわみに着目した観測を行ったが、より詳細な観測として、固有振動・振動モード解析や傾きを測定したたわみ角の評価等も併せて分析する事も可能である。

参考文献

- 1) モニタリングシステム技術研究組合：社会インフラのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発成果報告書，pp. 4-201-4-240，2019.3

9.4 動ひずみによる剛性変化のモニタリング【4編6章の事例①】

「活荷重と桁ひずみの相関による剛性モニタリング」

(1) 適用事例の概要

「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関連した、国土交通省の現場実証において、2014年～2018年の間に、実橋梁でモニタリングを適用した事例を紹介する。

1) 対象橋梁

2007年3月に供用を開始した、橋長232m、支間長71.3m+88.0m+71.3mの鉄筋コンクリート床版を有する3径間連続鋼箱桁橋である。図9.4.1に側面図と断面図を示す。

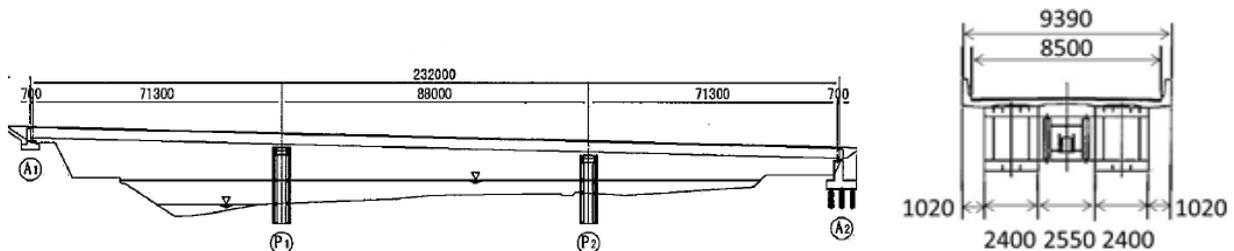


図 9.4.1 対象橋梁概要図（左：側面図，右：断面図）

2) 目的

対象橋梁の事前調査を実施した結果、中央径間のコンクリート床版には橋軸直角方向に約1m間隔でひび割れが生じており、鋼部材の表面には部分的に腐食の進行が確認された。そこで、腐食や活荷重などの使用環境の把握、および剛性低下が懸念されるため、その剛性を確認することを目的として、基本特性、構造特性を把握した上で、剛性低下の要因を評価するモニタリングを計画、実施した。

表9.4.1に現場調査結果とモニタリング目的の一覧を示す。現場状況の写真については、参考文献3)のFigure.1を参照。

表 9.4.1 現場状況とモニタリング目的

現場状況（劣化損傷項目）	モニタリング目的
腐食	腐食環境の把握による原因究明と経過監視
	板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握
コンクリート床版ひび割れ	コンクリート剛性低下把握

3) モニタリング項目

剛性低下をモニタリングするための計測項目、評価方法の一覧を表 9.4.2 に示す。また、計測する物理量と演算で求める特性値および性能（剛性）評価の関連性を図 9.4.2 に示す。ここでは、使用環境の把握としては、活荷重を、基本特性としては、桁ひずみ、構造特性として、活荷重と桁ひずみの相関性について評価した。

表 9.4.2 モニタリング目的と計測項目および評価方法

現場状況（劣化損傷項目）	モニタリング目的	計測項目	剛性評価方法
腐食	板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握	温度、湿度 加速度	①橋軸方向の断面応力（中立軸）
コンクリート床版ひび割れ	コンクリート剛性低下把握	活荷重 桁ひずみ	②活荷重と桁ひずみの相関

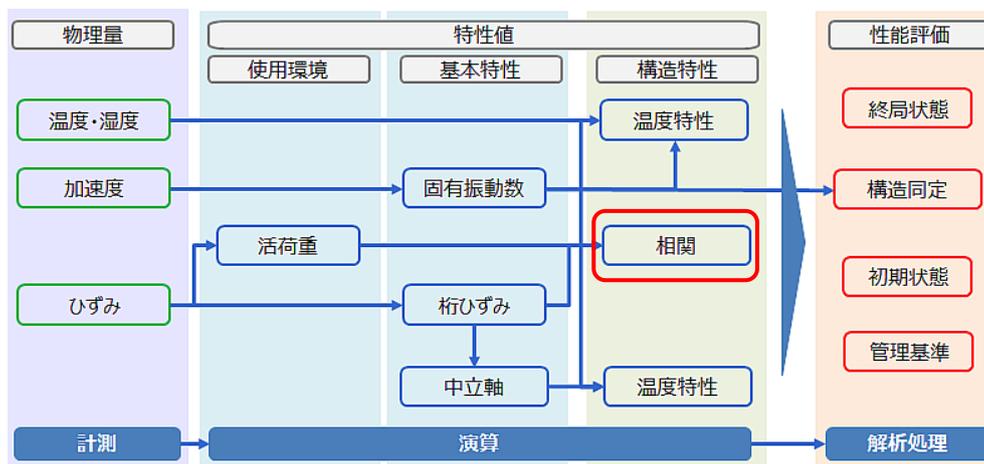


図 9.4.2 計測値と特性値の関連性

(2) 計測機器の設置

1) システム構成

図 9.4.3 にシステム構成図を示す。現場に計測器を設置し、公衆回線を通して社内サーバにデータを転送し、その結果を関係者で共有し解析を実施した。

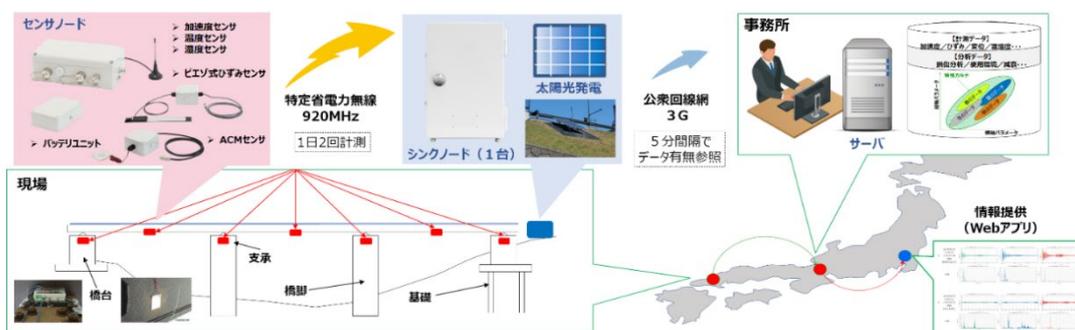


図 9.4.3 システム構成図

2) 使用機器

表 9.4.3 に使用した機器の一覧を示す。

表 9.4.3 計測機器一覧表

項目	備考
センサーノード	温湿度センサ, 加速度センサ (3 軸), 無線通信 (920MHz)
バッテリーユニット	リチウムイオン電池
ピエゾ式ひずみセンサ	計測可能範囲($\pm 208.33 \mu\text{st}$), 周波数特性 0.01~50Hz, 出力感度($1.8 \pm 0.3 \text{mV}/\mu\text{st}$)
ピエゾ式ひずみセンサアンプ	
920MHz アンテナ	
シンクノード	通信周波数 (920MHz), 最大接続台数 (40 台)
GPS ボックス	
遠隔通信アンテナ	

3) 設置場所

活荷重および桁ひずみを計測するひずみセンサは、活荷重計測用として、床版の損傷のない側径間 (C7, C8), 桁ひずみ計測用として、床版にひび割れのある中央径間のスパン中央 C17 でひずみを計測した。図 9.4.4 に対象橋梁における計測位置を示す。

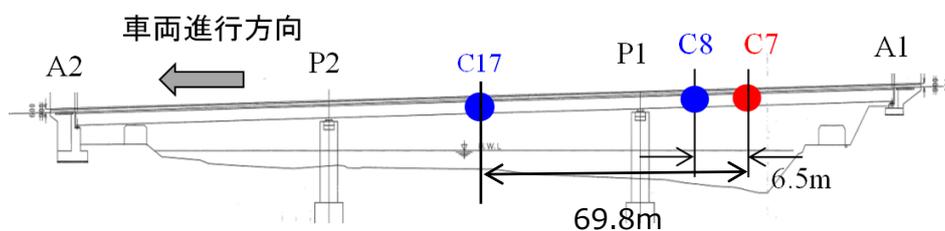


図 9.4.4 センサ設置場所

4) 設置状況

図 9.4.5 に C7, C8 における動ひずみセンサの設置方法, 図 9.4.6 に C17 における設置方法を示す。C7, C8 ではひずみセンサの長手方向が橋軸直角方向に, C17 では橋軸方向になるように設置している。

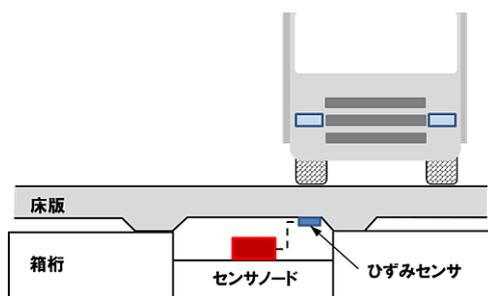


図 9.4.5 センサ設置状況 (C7, C8)

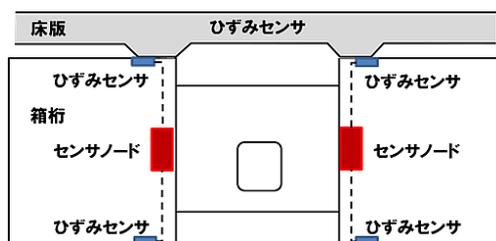


図 9.4.6 センサ設置状況 (C17)

(3) 計測結果（物理量，特性値）

1) 動ひずみ計測結果

図 9.4.7 に動ひずみの計測波形を示す。C7, C8 は約 6.5m 間隔であり，計測した波形の時間差からこの間の走行速度を計算できる。C7 から C17 は約 69.8m 距離があるため，この走行速度から，桁ひずみの発生する時刻を算出し，活荷重と桁ひずみの対応付けを自動的に行う。

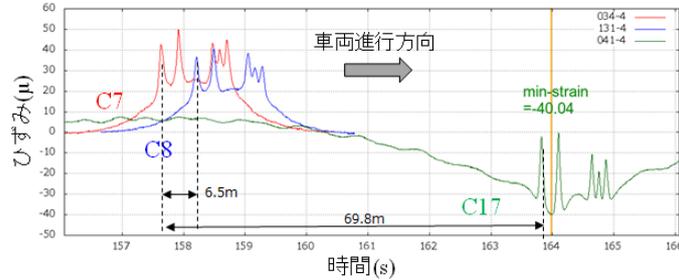


図 9.4.7 動ひずみ計測結果例

2) 活荷重評価結果

図 9.4.8 に 2017 年 1 月から 2018 年 11 月の間に計測した活荷重の分布を示す。計測タイミングは 3 時と 15 時の 1 日 2 回で，1 回につき 5 分間の計測とし，活荷重は 49kN (5tf) 以上の車両のみ集計した。

統計的な傾向を把握するには十分と考える。結果から，道路法の規定を超過する車両の通行実態が把握できた。港湾や空港に近いことが要因としていると想定される。ただし，すべての通行車両を計測しているわけではないため，あくまで傾向把握のためのデータとして活用できるものである。

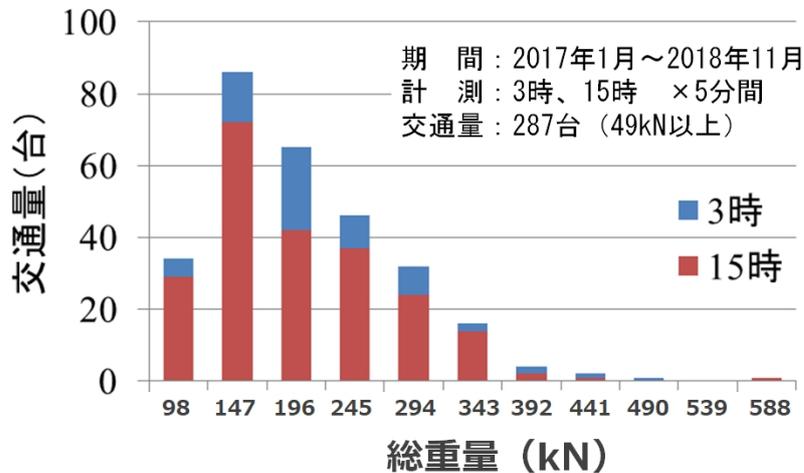


図 9.4.8 車両の重量による橋梁の疲労に及ぼす影響

3) 活荷重と桁ひずみの相関評価

梁に力が加わると，梁の上側は圧縮され，下側は引張られ，部材の断面には圧縮応力と引張応力が分布する。この応力の分布は曲げ応力度 σ と呼び，中立軸から梁の上端（あるいは下端）までの距離 y と断面二次モーメント I ，曲げモーメント M との間に以下の関係がある。

$$\sigma = My / I \quad \text{式 1}$$

ここで，図 9.4.9 に示すような梁を走行する活荷重 P と，梁の中央に生じるひずみ ε との関係を考

える。まず、 ϵ と σ の関係は材料のヤング率を E とすると以下の関係がある。

$$\epsilon = \sigma / E = My / EI \quad \text{式 2}$$

また、荷重位置での曲げモーメント MP は以下で表される。

$$MP = Px (l-x) / l \quad \text{式 3}$$

中央の曲げモーメントを Mc とすると以下が成り立つ。

$$Mc = MP l / 2(l-x) = Px / 2 \quad \text{式 4}$$

したがって、荷重 P による中央のひずみ ϵ は式 2, 3 から以下となる。

$$\epsilon = Pxy / 2EI \quad \text{式 5}$$

式 5 から、活荷重 P とひずみ ϵ の関係は EI を表すことが分かる。 E は材料の剛性、 I は断面形状の剛性を示すことから、活荷重と桁ひずみの相関は、桁の剛性を評価するために有効な手法である。

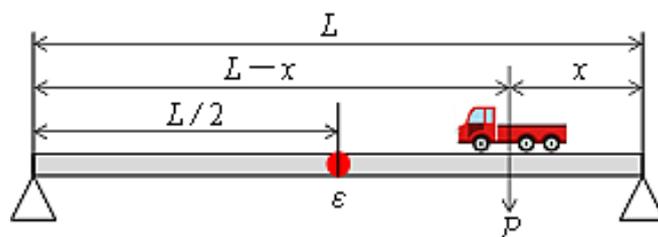


図 9.4.9 活荷重と桁ひずみの関係

図 9.4.10 に横軸に活荷重、縦軸に C17 の桁ひずみとし、2016 年 10 月から 2018 年 11 月まで年ごとに示した。図中左下の数値はデータの近似直線の傾きを表し、この値が EI である。

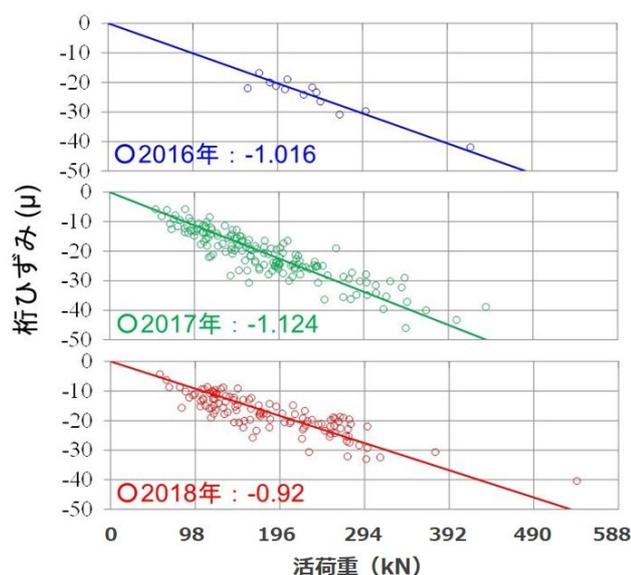


図 9.4.10 桁ひずみと活荷重の相関

(4) 剛性評価結果

本特性値は式 5 で示されるように、材料の剛性 E だけでなく、断面形状の剛性 I も示している。本原理に基づき、 E をひび割れが生じていない側径間の値とし（設計値）、 I を考慮するため、ひび割れを模擬した FEM モデルにより評価した。さらに図 9.4.11 に示すように、コンクリートのひび割れによる劣化の進展に合わせ、初期状態としてひび割れが無い状態を a、現場と同様に中央径間のみ 1m 間隔で橋軸直角方向にひび割れがある状態を b、終局状態として鉄筋の配筋間隔である 0.25m 間隔で橋軸、橋軸直

角に格子状にひび割れがある状態を c として評価を行った。

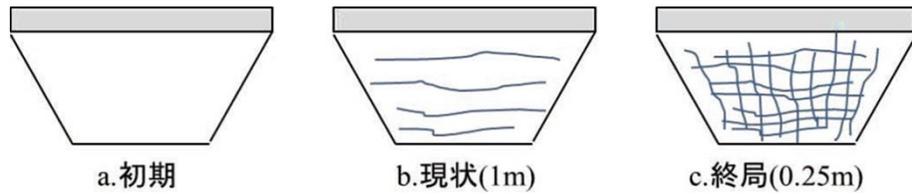


図 9.4.11 ひび割れの進展モデル

評価結果を図 9.4.12 に示す。FEM モデルで解析した「②設計計算値による完成後の桁剛性（初期状態 a）」を青色で、「③道路管理者が設定する桁剛性の限界値（終局状態 c）」を緑色で示し、「①計測値」を赤色で示している。ひび割れの無い初期状態 a との比較では、剛性の低下が確認され、終局状態 c ではさらに剛性が低下することが明確となった。これにより、初期と現状、終局状態がモニタリングにより定量的に示され、構造物の健全度を把握するための参考値となることを示している。ただし、限界値の設定については、本事例ではひび割れの進行を模擬したものであり、あらゆる損傷を示した確定値ではない。解析を活用して限界値を設定する場合は、あくまでも想定した値として活用することを前提として考慮する必要がある。

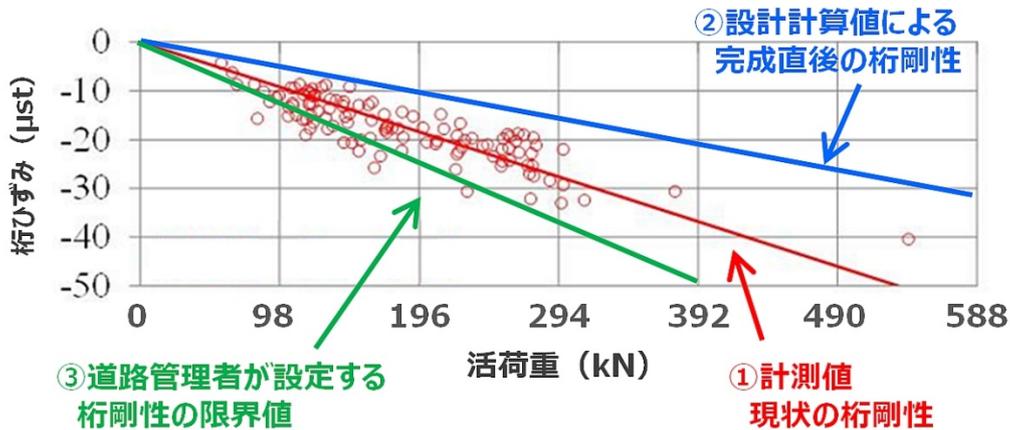


図 9.4.12 剛性評価事例

(5) まとめ

本適用事例では、社会インフラの維持管理へ適用が可能な常設型モニタリングシステムにおいて、活荷重と桁ひずみの相関を活用したモニタリング事例を示した。本システムにおける技術は、特別な新規性を持ったものではなく、電気、通信技術の中で、既に数年前から技術的に確立しているものである。その技術を土木現場に適用できるように、工夫を加え、省電力化や無線化を実現し、耐久性や信頼性の確保を図った。さらに、予防保全による維持管理の実現を目的に、客観的なデータによる健全度の把握や、使用限界を評価する手法について示している。対象橋梁は、建設後 10 年程度の比較的健全な状況であったが、提案するモニタリング手法の有効性を示すことができたと考える。

参考文献

- 1) 黒田, 西田, 高瀬, 佐々木: 省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 2 (特性カルテ), 土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-017, 2018.8
- 2) 佐々木, Sinsamutpadung, Tuttipongsawat, 黒田, 西田, 高瀬: 省電力ワイアレスセンサによる橋梁

モニタリングシステムの開発 3 (特性分析), 土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-018, 2018.8

- 3) Eiichi Sasaki, Porjan Tuttipongsawat, Natdanai Sinsamutpadung : Condition evaluation of a highway bridge with RC deck using monitoring data obtained by wireless sensors, CASTED2018, 2018.5

9.5 動ひずみによる剛性変化のモニタリング【4編6章の事例②】 「中立軸の位置による剛性モニタリング」

(1) 適用事例の概要

「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関連した、国土交通省の現場実証において、2014年～2018年の間に、実橋梁でモニタリングを適用した事例を紹介する。

1) 対象橋梁

2007年3月に供用を開始した、橋長232m、支間長71.3m+88.0m+71.3mの鉄筋コンクリート床版を有する3径間連続鋼箱桁橋である。

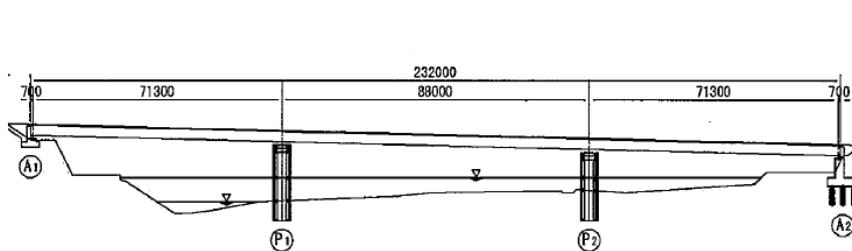


図 9.5.1 対象橋梁側面図

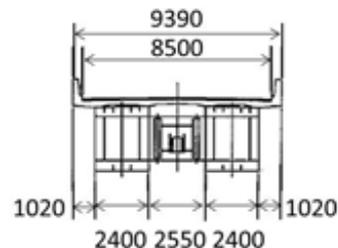


図 9.5.2 対象橋梁断面図

2) 目的

対象橋梁の事前調査を実施した結果、中央径間のコンクリート床版には橋軸直角方向に約1m間隔でひび割れが生じており、鋼部材の表面には部分的に腐食の進行が確認された。そこで、腐食や活荷重などの使用環境の把握、および剛性低下が懸念されるため、その剛性を確認することを目的として、基本特性、構造特性を把握した上で、剛性低下の要因を評価するモニタリングを計画、実施した。

表 9.5.1 に現場調査結果とモニタリング目的の一覧を示す。現場状況写真については参考文献 3)の Figure.1 を参照。

表 9.5.1 現場状況とモニタリング目的

現場状況（劣化損傷項目）	モニタリング目的
腐食	腐食環境の把握による原因究明と経過監視
	板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握
コンクリート床版ひび割れ	コンクリート剛性低下把握

3) モニタリング項目

剛性低下をモニタリングするための計測項目、評価方法の一覧を表 9.5.2 に示す。また、計測する物理量と演算で求める特性値および性能（剛性）評価の関連性を図 9.5.3 に示す。ここでは、使用環境の把握としては、温湿度を、基本特性としては、桁ひずみ、中立軸、構造特性として、温度特性を評価した。

表 9.5.2 モニタリング目的と計測項目および評価方法

現場状況（劣化損傷項目）	モニタリング目的	計測項目	剛性評価方法
腐食	板厚の減少による鋼箱桁の剛性低下把握	温度、湿度 加速度	①橋軸方向の断面応力（中立軸）
コンクリート床版ひび割れ	コンクリート剛性低下把握	活荷重 桁ひずみ	②活荷重と桁ひずみの相関

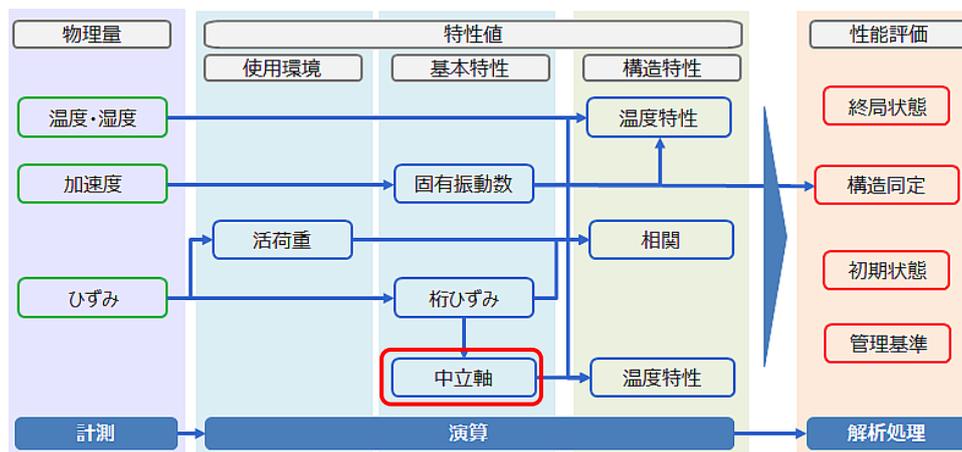


図 9.5.3 計測値と特性値の関連性

(2) 計測機器の設置

1) システム構成

図 9.5.4 にシステム構成図を示す。現場に計測器を設置し、公衆回線を通して社内サーバにデータを転送し、その結果を関係者で共有し解析を実施した。

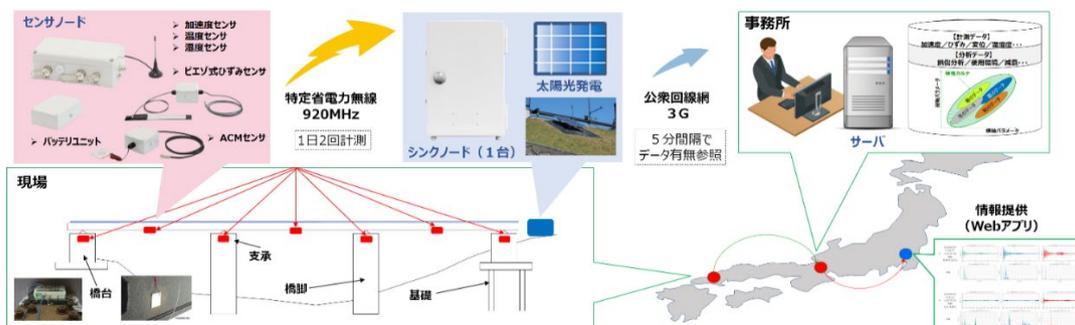


図 9.5.4 システム構成図

2) 使用機器

表 9.5.3 に使用した機器の一覧を示す。

表 9.5.3 計測機器一覧表

項目	備考
センサノード	温湿度センサ, 加速度センサ (3 軸), 無線通信 (920MHz)
バッテリーユニット	リチウムイオン電池
ピエゾ式ひずみセンサ	計測可能範囲($\pm 208.33 \mu\text{st}$), 周波数特性 0.01~50Hz, 出力感度($1.8 \pm 0.3 \text{mV}/\mu\text{st}$)
ピエゾ式ひずみセンサアンプ	
920MHz アンテナ	
シンクノード	通信周波数 (920MHz), 最大接続台数 (40 台)
GPS ボックス	
遠隔通信アンテナ	

3) 設置場所

桁ひずみを計測するひずみセンサは, 床版にひび割れのある中央径間のスパン中央 C17 でひずみを計測した。図 9.5.5 に対象橋梁における計測位置を示す。

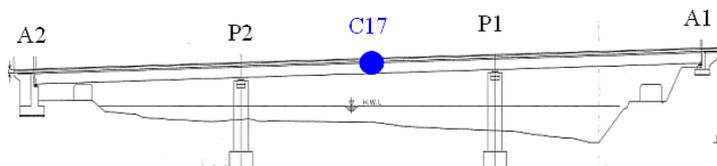


図 9.5.5 センサ設置場所

4) 動ひずみセンサ設置方法

図 9.5.6 に動ひずみセンサおよびセンサノードの設置位置を示す。箱桁の上下フランジに, センサの長手方向が橋軸方向となるように設置している。



図 9.5.6 センサ設置状況 (C17)

(3) 計測結果 (物理量, 特性値)

1) 動ひずみ計測結果

図 9.5.7 に C17 における動ひずみの計測波形を示す。青色が下フランジ, オレンジ色が上フランジの計測データである。

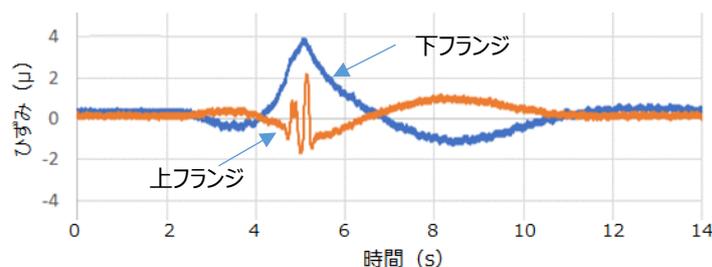


図 9.5.7 動ひずみ計測結果例 (C17)

2) 中立軸の計測結果

中央径間のコンクリート床版のひび割れは橋軸直角方向（車線幅方向）に発生している。したがって、橋軸方向（車両進行方向）への力の分担が不連続となり、箱桁上面でのひずみの増加の可能性が考えられる。ここで、**図 9.5.8** に示すような単純支持梁の曲げを考える。梁に力が加わると、梁の上側は圧縮され、下側は引張られ、中央は圧縮も引張もない中立軸となる。そこで、**図 9.5.9** に示すように、箱桁の上下フランジのひずみデータ（ ε_u 、 ε_l ）から中立軸を算出し、中立軸の位置（高さ）を指標とするモニタリングを実施した。箱桁の高さを H とすると中立軸高さ H_n は以下の式で表される。

$$H_n = H \varepsilon_l / (\varepsilon_u + \varepsilon_l) \quad \text{式 1}$$

中立軸は橋梁の断面（ローカル）における特性を表すものであり、今回のように損傷が発生していることが明確な場合には、その損傷の進行を観察するために有効な手法と言える。

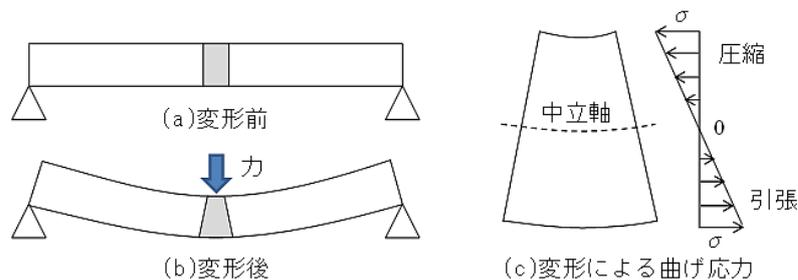


図 9.5.8 曲げを受ける梁の変形

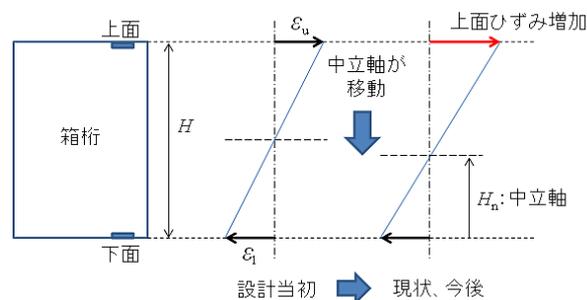


図 9.5.9 中立軸による断面応力の把握

図 9.5.10 に 2017 年 10 月から 2018 年 11 月までの 1 年間の計測データを示す。ばらつきは多く発生しているが、統計的に中立軸の位置を特性できることが分かる。データの分布が上下に二つあるが、これは車両走行により桁がねじれ、載荷側と非載荷側で異なる値を示すためである。以降では載荷側となる上側の分布に着目して評価を実施した。

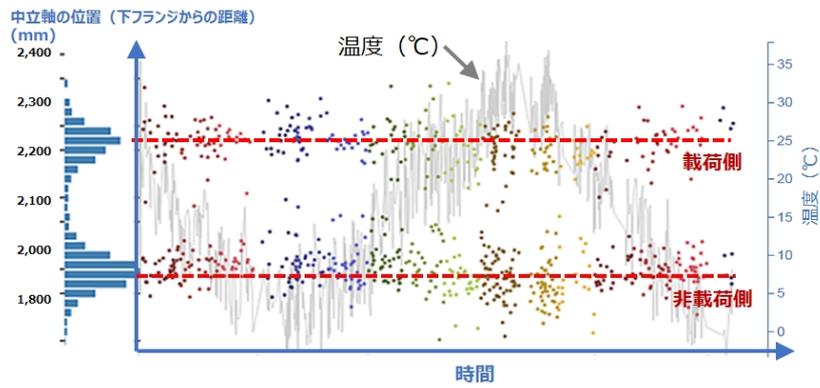


図 9.5.10 中立軸の位置の時系列データ

(4) 剛性評価結果

図 9.5.11 に示す FEM モデルを作成し、単位荷重を載荷した場合の構造解析を実施し、中立軸を求めた。床版のコンクリートのヤング率は、別途求めた特性値を使用した。設計値は設計計算書に記載されている値 28.0GPa、現状値はひび割れの影響により低下し、9.85GPa と推定されている。

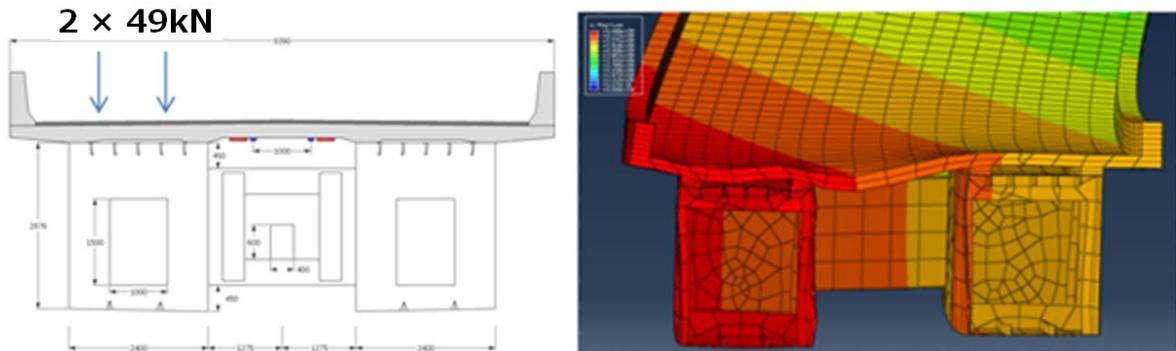


図 9.5.11 FEM モデル

現状値 (9.85GPa) を使用した時の中立軸は 2,244mm となり、実測値 (2230mm) とほぼ一致する結果となった。また、設計値 (28GPa) を使用して、初期の中立軸を同じく構造解析により求めた。その結果、中立軸は 2,592mm となり、現状の中立軸高さは初期から低下していることが把握できた。

本結果を図 9.5.12 にまとめる。現状としては、床版のひび割れの影響により、設計時 (完了直後) よりも中立軸が低下していることが想定される。また、実測値は解析値とも一致し、中立軸高さにより橋梁の剛性をモニタリングすることが可能であることが示され、中立軸高さを継続モニタリングすることで、床版の損傷の進行を把握することができる。

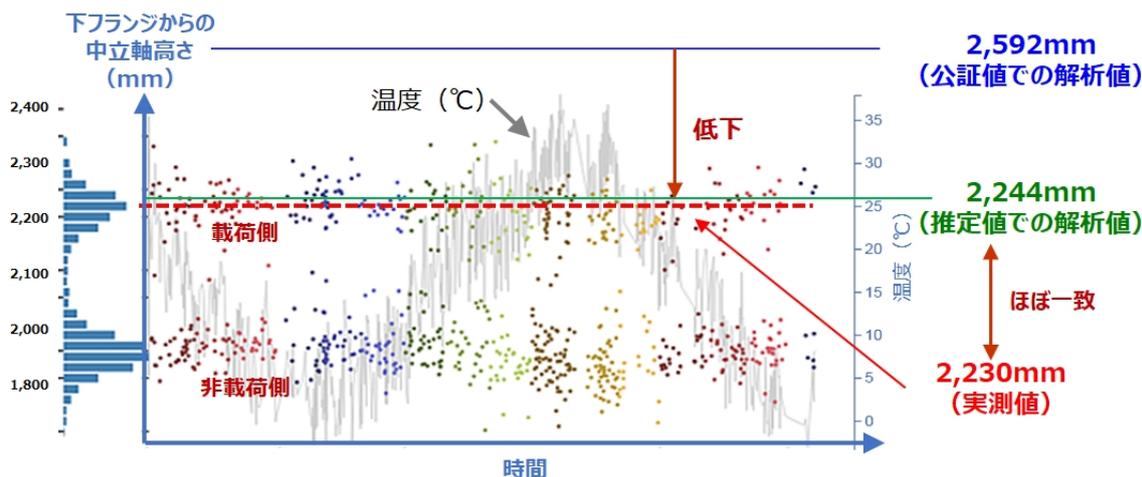


図 9.5.12 剛性評価事例

(5) まとめ

本適用事例では、社会インフラの維持管理へ適用が可能な常設型モニタリングシステムにおいて、中立軸高さを使用した事例を示した。本事例で使用している計測システムは、特別な新規性を持ったものではなく、電気、通信技術の中で、既に数年前から技術的に確立しているものである。その技術を土木現場に適用できるように工夫を加え、省電力化や無線化を実現し、耐久性や信頼性の確保を図ったものである。対象橋梁は、建設後 10 年程度の比較的健全な状況であったが、提案するモニタリング手法の有効性を示すことができたと考える。

参考文献

- 1) 黒田, 西田, 高瀬, 佐々木: 省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 2 (特性カルテ), 土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-017, 2018.8
- 2) 佐々木, Sinsamutpadung, Tuttipongsawat, 黒田, 西田, 高瀬: 省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 3 (特性分析), 土木学会第 73 回年次学術講演会 CS9-018, 2018.8
- 3) Eiichi Sasaki, Porjan Tuttipongsawat, Natdanai Sinsamutpadung : Condition evaluation of a highway bridge with RC deck using monitoring data obtained by wireless sensors, CASTED2018, 2018.5

9.6 動ひずみによる剛性変化のモニタリング【4編6章の事例③】

「PC 橋における活荷重—桁ひずみの相関による剛性評価」

(1) 適用事例の概要

1) 活荷重—桁ひずみの相関による剛性評価技術の PC 橋への適用

PC 鋼材の腐食に伴う劣化の進行に関しては、死荷重による桁の変形を確認することが適していると言われるが、PC 鋼材破断箇所が不明な場合や、グラウトの未充填が部分的である場合に、その変化を検知するための計測場所の特定が困難、あるいは、計測装置が大規模（測定箇所の増大）となってしまう。また、計測箇所の判断を間違えると、PC 鋼材腐食に伴う破断や劣化の進行を見逃してしまう可能性がある。ここでは、PC 鋼材腐食が特定できないケースを想定し、構造物全体あるいは局部的な剛性を評価し、少なくとも耐荷力について異常がないことを確認するための手法として、第4編6章に記載の技術を PC 橋に適用し、活用可能性を検討することを目的とする。

2) 対象橋梁の概要

対象橋梁は、高速道路で供用中の PC 箱桁橋で、橋長 281m、幅員 9m の PC3 径間連続ラーメン橋である。図 9.6.1 に側面図と断面図を示す。

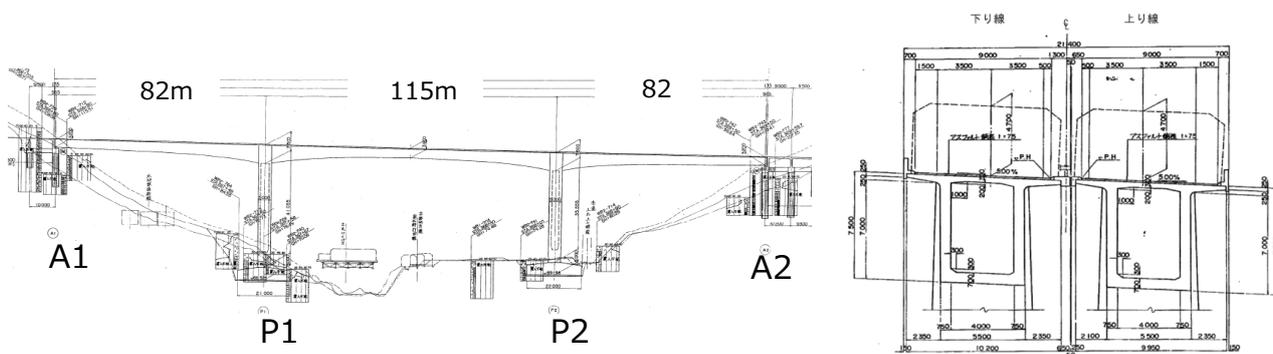


図 9.6.1 対象橋梁概要図（左：側面図，右：断面図）

(2) 計測概要

1) 使用機器

表 9.6.1 に使用した機器の一覧を示す。

表 9.6.1 計測機器一覧表

項目	備考
センサノード	温湿度センサ，加速度センサ（3 軸），無線通信（920MHz）
バッテリーユニット	リチウムイオン電池
ピエゾ式ひずみセンサ	計測可能範囲(±208.33μst)，周波数特性 0.01～50Hz，出力感度(1.8±0.3mV/μst)
ピエゾ式ひずみセンサアンプ	
920MHz アンテナ	
シンクノード	通信周波数（920MHz），最大接続台数（40 台）
GPS ボックス	
遠隔通信アンテナ	

2) 計測箇所

中央径間 (②)，側径間 (①，③) のウェブ上下で橋軸方向にセンサを設置し，桁ひずみを計測する。

また、A2 付近の損傷のない床版に橋軸直角方向にセンサを設置し、ひずみを計測し活荷重を算出する。図 9.6.2 に対象橋梁における計測位置を、図 9.6.3 に活荷重計測位置の詳細を示す。

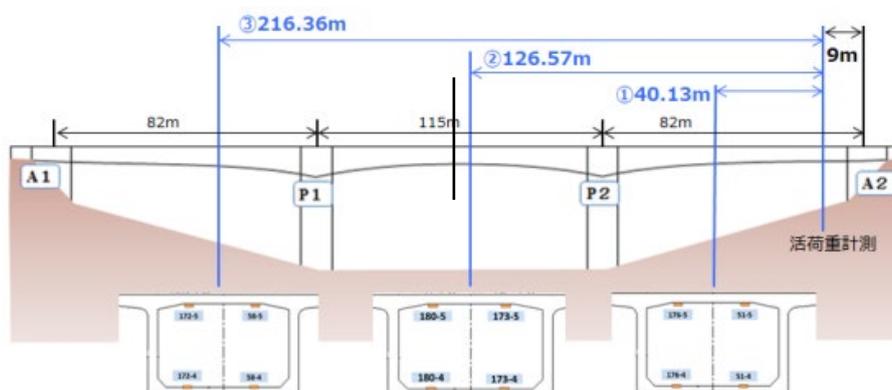


図 9.6.2 センサ設置場所

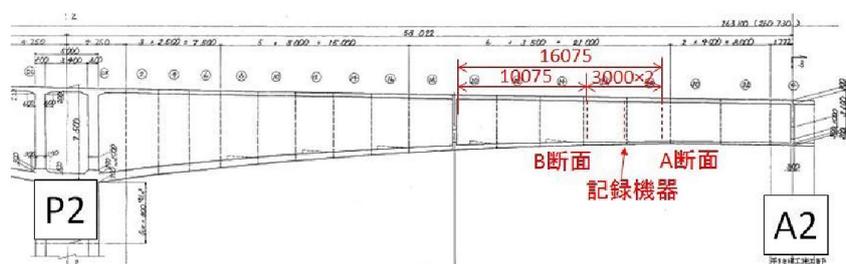


図 9.6.3 活荷重計測センサ設置場所

3) システム構成

計測データは A1, A2 桁端部に設置するシンクノードに集約し、シンクノードから公衆回線を通して、サーバへ転送する。計測は 30 分間隔 (5 分/回) とし、各計測データ単位で活荷重、桁たわみ、桁ひずみおよび各相関を自動で抽出する。図 9.6.4 にシステム構成図¹⁾を示す。

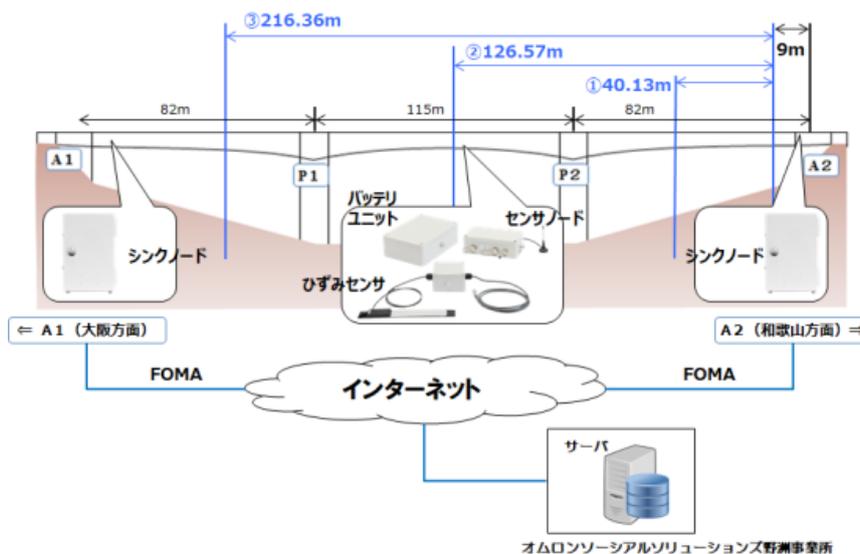


図 9.6.4 システム構成図

4) 設置状況

図 9.6.5 に A, B 両断面における動ひずみセンサの設置状況, 図 9.6.6 に桁ひずみ計測位置における設置状況を示す。A 断面, B 断面ではひずみセンサの長手方向が橋軸直角方向に, 桁ひずみ計測位置では橋軸方向になるように, 上下フランジに設置している。

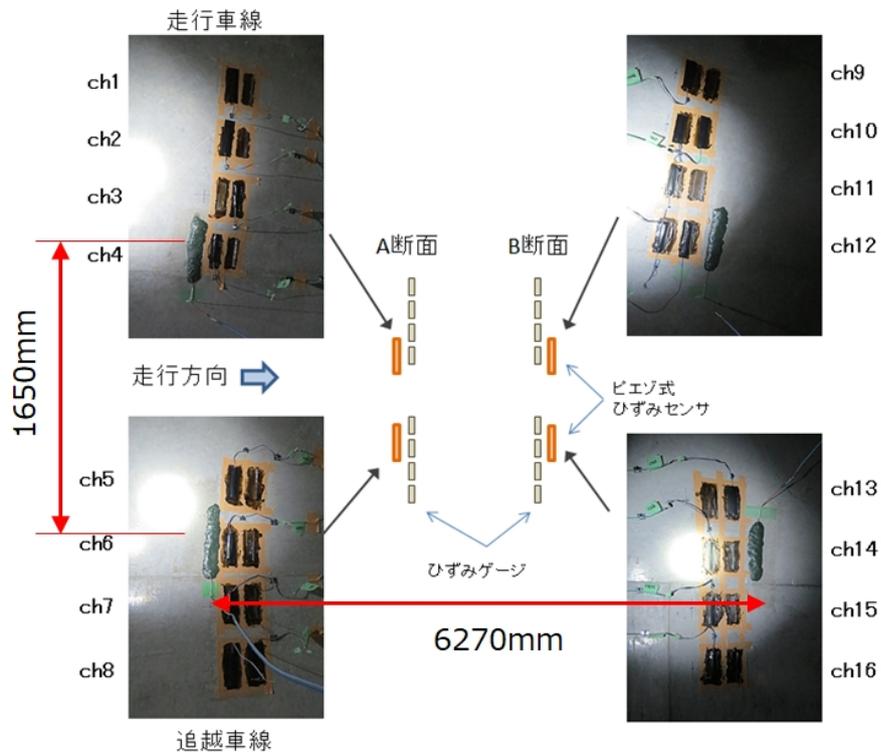


図 9.6.5 活荷重計測センサ設置状況

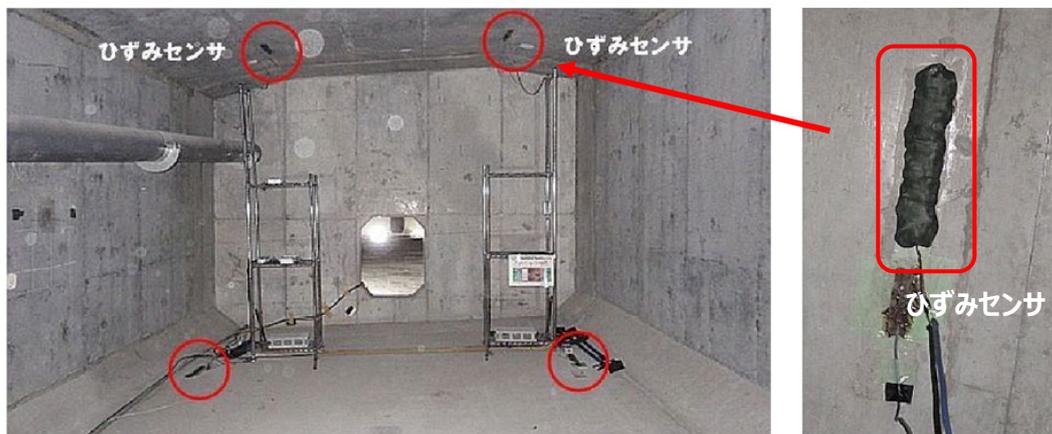


図 9.6.6 桁ひずみ計測センサ設置状況

(3) 計測結果 (物理量, 特性値)

1) 動ひずみ計測結果

図 9.6.7 に動ひずみの計測波形を示す。A 断面, B 断面は約 6m 間隔であり, 計測した波形の時間差からこの間の走行速度を計算できる。A 断面から桁ひずみ計測位置までは図 9.6.3 に示すような距離関係があり, 計測データから算出した走行速度から, 桁ひずみの発生する時刻を算出し, 活荷重と桁ひずみの対応付けを自動的に行う。

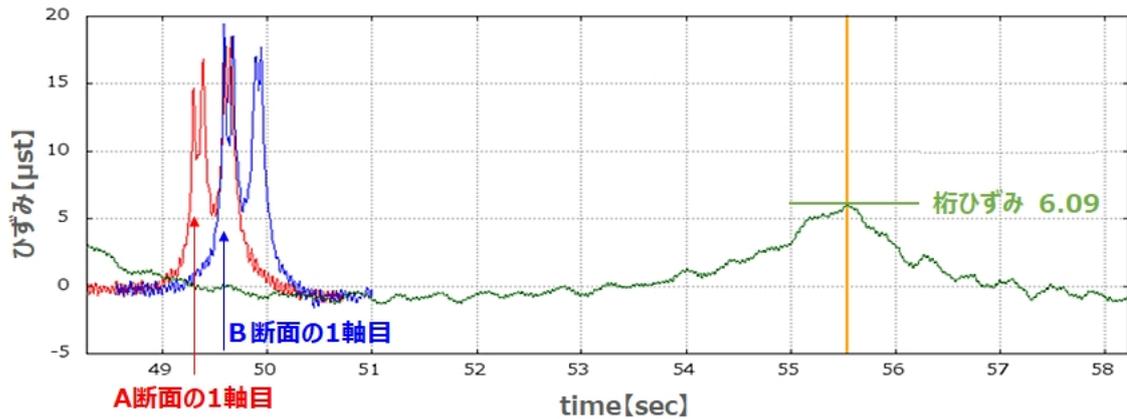


図 9.6.7 動ひずみ計測結果例（上フランジ）

2) 活荷重と桁ひずみの相関

図 9.6.8 に横軸に活荷重，縦軸に桁ひずみとし，2016 年 10 月から 2019 年 3 月まで計測した全データに対して，横軸を車両重量，縦軸を桁ひずみとした特性カルテ²⁾の分布を示す。図中上部に示すように，相関係数 0.81 と相関性の高い結果が得られている。この近似直線の傾きが剛性 EI を示すこととなるが，図を見て分かるように計測データは計測時の誤差を含んでおり，ある程度のばらつきを持っている。継続的に計測を行い，統計的に評価することで信頼性の高い剛性数値を得ることができる。

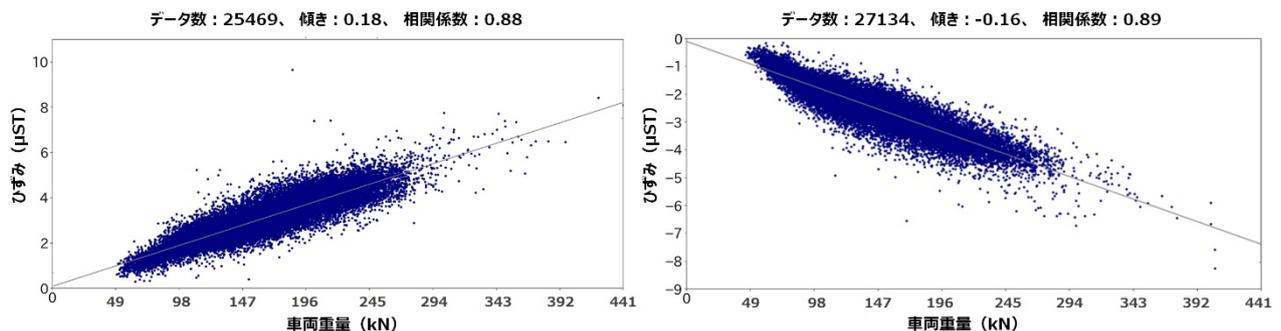


図 9.6.8 桁ひずみと活荷重の相関（左：下フランジ，右：上フランジ）

(4) 剛性評価結果

図 9.6.8 に示すように，活荷重および桁ひずみの計測値はある程度のばらつきはあるものの，一定の相関があることが分かる。図 9.6.9 に 3 か月毎にこの相関を計測し，時系列にプロットした図を示す。図を見て分かるように，相関特性を長期監視することによって，ばらつきのあるひずみ値の時系列データに対し，よりばらつきが小さく，信頼性の高い健全度把握が可能となる。

さらには，初期と終局状態に関して解析によりこの相関特性を算出することで，構造物の剛性がどのように推移し，現状どのような位置にあるのかを把握するための参考値とすることができる。ただし，限界値の設定については，対象とする橋梁の状態を把握し，将来を予測して具体的に発生し得る損傷を想定した解析を行い，しきい値を設定する必要がある。計測値のばらつきが想定した損傷時の特性に比べ小さい場合には，本モニタリング手法による監視が適用可能となる。



図 9.6.9 桁ひずみと活荷重の相関

(5) まとめ

本適用事例では、社会インフラの維持管理へ適用が可能な常設型モニタリングシステムにおいて、活荷重と桁ひずみの相関を活用したモニタリング手法を、PC箱桁橋に適用した事例を示した。今回構築した手法では、橋梁上を通過する車両重量とそれに伴い発生するひずみ応答を評価することから、その相関を示す特性係数は桁剛性を評価することになり、直接的な健全性評価が可能となる。本手法は、鋼桁橋における桁腐食や亀裂などの変状に対する耐荷力監視、また床版などの部材レベルの損傷進行監視などの活用が考えられる。異常部位の経過観察や監視には多大な労力と費用が必要なことから、本手法を用いることにより、維持管理の高度化・効率化に貢献できると考える。

参考文献

- 1) 西田, 黒田, 高瀬, 佐々木:省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発1(センサ概要), 土木学会第73回年次学術講演会 CS9-016, 2018.8
- 2) 黒田, 西田, 高瀬, 佐々木:省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発2(特性カルテ), 土木学会第73回年次学術講演会 CS9-017, 2018.8

9.7 変位計による遊間のモニタリング【4編8章の事例】

(1) 適用事例の概要

橋梁支承部において、桁端部に損傷がなければ、主桁の伸縮はスムーズに行われる。遊間に異常が発生すると、橋体の伸縮によって発生する拘束水平力が桁や橋座等へ損傷を与える可能性がある。遊間変位計測は目視点検に於いても、狭く・暗い部位の為に正確な判断が難しい箇所である。この遊間の変位計測を、従来のロッド式変位計を使った接触式計測器による計測法とサンプリングモアレ法を用いた画像解析技術による計測法についての確認計測を行った。場所は東北地方の高速道路橋で約半年間の自動計測を行い確認した。対象橋は鋼合成単純鉸桁橋で、橋長 36.3mの RC 床版形式である。



図 9.7.1 対象橋の外観



図 9.7.2 橋下・橋台部



図 9.7.3 橋台・支承部

(2) 計測器の設置（可動支承側橋台）

1) ロッド式変位計を用いた遊間変位の計測

橋台に変位計固定治具を設置し、変位計のロッド部を主桁下面に固定し、主桁の伸縮量を静的に計測する。変位計は水平方向のみで良いが、桁端部の詳細な変動を計測する場合には垂直方向も同時に計測する。主桁は主に外気温の影響で伸縮変化しているので、その外気温の計測も同時に行うと良い。但し温度計測が出来ない時は、付近の気象データを利用する。

変位計をメモリ式データロガーに接続し計測するのが一般的な計測システムである。計測頻度は1回/時間を基本とする。

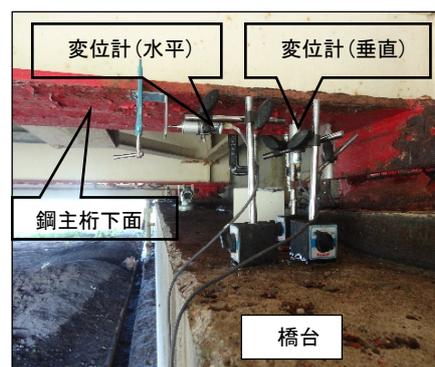


図 9.7.4 ロッド式変位計設置図

2) サンプリングモアレ法を用いた遊間変位の計測

CCDカメラを橋台に、カメラ前面の橋台と主桁側面に格子シートを設置し、2枚のシートをカメラの同一画面内の静止画としてインターバル撮影をする。撮影画像からサンプリングモアレ法の画像解析技術を用いて遊間変位量を算出する。温度データは、カメラ画面内にデジタル温度計を置くか、気象データを利用する。



図 9.7.5
CCDカメラ(橋台)

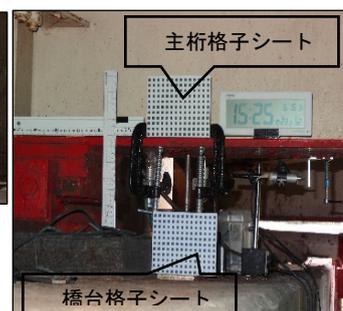


図 9.7.6 シート設置図

【計器設置時の注意点】

① ロッド式変位計設置時の注意点

- ・変位計の容量は、主桁の伸縮量以上(1.5倍程度)とし、RC床版や継目からの雨水に配慮する。
- ・変位計は主桁と平行に設置する。変位計のロッド先端は、主桁側に固定することを基本とする。

② CCDカメラと格子シート設置時の注意点

- ・必ず基準側(橋台)にも格子シートを設置し、主桁側シートとの相対変位を計測する。
- ・格子シートと CCDカメラは正対設置を基本とする。正対できない時はその姿勢を保つこと。

(3) 実験結果

1) 水平変位計測結果

ロッド式変位計と CCD カメラによる遊間変位の測定結果は、図 9.7.7 に示すよう概ね一致した結果となった。主桁が夏期から冬期まで緩やかに収縮し遊間変位が広がり、この現象により支承部に問題となるような損傷が無いことが判る。

(注意：変位計データは 2017 年 10 月中旬から約 1 ヶ月間欠測，11 月中旬再開。)

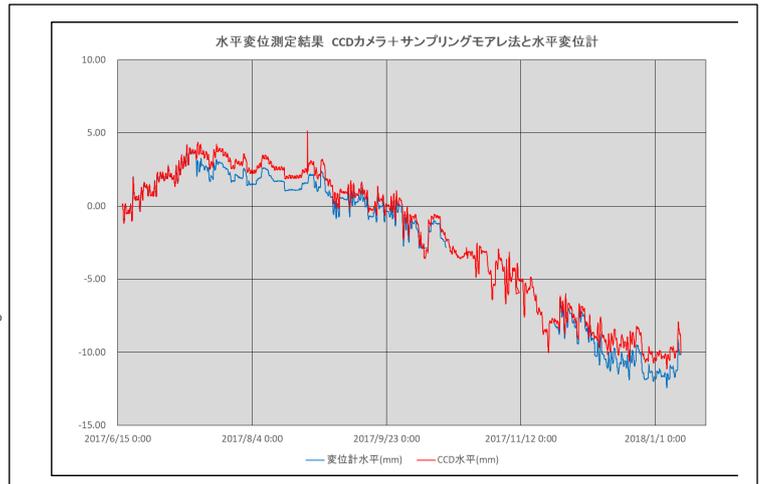


図 9.7.7 ロッド式変位計と CCD カメラ+モアレ法変位

2) CCD カメラ画像による橋台支承部の雨水浸透状況確認



図 9.7.8 2017/06/21 18:58 の状況



図 9.7.9 2017/06/21 23:58 の状況

CCD カメラ画像は、遊間変位計測以外に以下の利点がある。

- ・カメラ画像を記録することにより、橋台及び支承部への雨水浸透状況の確認が可能となり、支承部の腐食や橋台部の損傷発生に対する対応を早くできる。上図（図 9.7.8-9）写真下部の黒い染みの広がりが雨水の浸透状況である。
 - ・カメラ画像を記録することにより監視部分の変化が目視に近い状態で確認することができる。
- ※破損，侵入・盗難，動物の侵入，植物の繁茂等の経過が記録でき管理情報の補助となる。

(4) まとめ

- ・ロッド式変位計と CCD カメラ画像をサンプリングモアレ技術で画像処理した変位データは概ね一致した結果となり、両計測手法とも実用上問題なく使える。
- ・遊間変位を計測することで、橋梁支承部に損傷が発生したことを把握できる。
- ・CCD カメラの画像は、支承部の雨水浸透状況や部材の損傷状況を確実に捉えることが出来る。

(5) 概算費用

約 130 万円（変位計×4 台，温度計×1 台，測定器×1 台，計器設置費用：足場仮設費は含まず）

添付資料 1：用語集

用語	意味	類義語・関連語
位相	周期的な運動をするものが、その周期中にどの位置にいるかを示すこと。	
位相解析	特定の性質を持つ関数全体(関数空間)を位相的・解析的に研究する学問。関数解析。位相数学的方法を用いて様々な関数空間の性質を統一的に研究し、関数方程式の研究などに役立つ近代の解析学。	
位相シフト法	格子の位相を1周期の範囲でシフトさせながら、複数枚の格子画像を撮影し、得られた複数枚の画像から位相分布を求める方法である。	
色変換	様々な存在する色情報の表現形式（三原色、輝度＋色差など）を所望の表現形式へと変換すること。人間にとっての見栄えを優先して変換を行った場合、物理的な計測情報が失われる。	
塩害	鉄筋コンクリートあるいはプレストレスコンクリートにおいて、塩化物が鋼材を腐食させ、コンクリート構造物に損害を与えること。	
回線容量	単位時間あたりに、通信回線が伝達できる情報量のこと。	
外乱	測定対象の状態を乱す原因となる外的作用。	
画角	カメラで撮影した際、実際に写る範囲を角度で表したもの。焦点距離が長くなると画角は狭くなるため、広角レンズが広く、望遠レンズほど画角が狭くなる。	
画素	デジタル画像を構成する、色情報を持つ最小単位の点。	
加速度センサ	加速度を計測するセンサ・計測器のこと。	加速度センサデバイス 加速度計
加速度分解能	加速度センサが計測できる最小の単位を指す。	
ガンマ変換	画像階調の特性曲線（コントラストなど）を補正すること。人間にとっての見栄えを優先して変換を行った場合、物理的な計測情報が失われる。明るさの調整は、各画素ごとの輝度値を指数関数で変換することによって行う。CCDカメラ等のイメージセンサにおいて、入力光量Eと出力値Dは $D = E^\gamma$ （ γ 特性）と呼ばれる指数関数の関係を持っている。この γ 値によって画素値の変換を行うこと。	ガンマ補正
基準画像	ひび割れ、たわみを算出する際の基準となる画像。通常は、ひび割れの開口や桁のたわみが発生していない時の画像を基準画像に設定する。例えば、撮影時の先頭フレーム画像。	

用語	意味	類義語・関連語
キャリブレーション	計測機器が所定の計測値が得られる様、メモリや内部状態を調整すること。或いは、機器を交換する際に古い機器と、新しい機器との計測値の関係性・相関性を調査し、測定機器固有の誤差を求めること。	校正
グローバルシャッター	撮影時にイメージセンサの受光素子データを一括で読み出すもの。	
計測範囲	測定範囲。指定された限度内に計器の誤差が収まるべき測定量の範囲。	
構造劣化	繰り返し荷重によって亀裂が発生・進展する現象，継手部等の応力集中部に生じやすい。	
固有振動数	ある構造を持つ対象物が自由振動を行う時，その対象物が持つ固有の共振周波数のこと。構造・形状・材料，および密度等により決定される。	卓越振動数
撮影角度	カメラの光軸と計測対象面の法線ベクトルとの角度。	
サンプリング周波数	アナログ信号をデジタル化する際の標本化処理を行う頻度。通常，1秒間に行う標本化処理の回数として表す。	標本化周波数
サンプリングモアレ法	格子画像のサンプリングにより発生するモアレ縞の位相を解析して変位を求める方法。	
軸アライメント誤差	複数の計測軸が存在する計測機器，センサが持つ，本来あるべき測定軸の配置と，現実の測定軸の配置の調整誤差のこと。	
支承部	上部構造(主桁・主構)と下部構造(橋台や橋脚)の間に設置する部材のこと。沓。	
実橋データ	橋梁の諸元情報（橋梁名や所在地といった基本情報）や塗替え単位情報など塗装に関する情報の総称。	
周波数特性	物理量と周波数の関係性を示したもの。モニタリング分野では特に，計測機器やセンサの持つ周波数に対する計測性能の特性を表したもの。	
照度	撮影する構造物の表面を照らす光の明るさを表す物理量。	
シンクノード	センサネットワークの中で，センサノードからの情報を集約するための中心となる装置のこと。無線機能とデータを集約するためのデータベース機能を持つ。	
伸縮装置	橋梁の路面端部に設置されるもので，気温の変化による橋梁の伸縮，地震時および車両の通行にともなう橋梁の変形を吸収し，自動車や人が支障なく通行できるようにするもの。	
芯線	電線や通信線のうち，中にある導体部分。	

用語	意味	類義語・関連語
浸透	物体の隙間をすり抜けて液体が通過したり、内側に入り込むこと。	
静的計測	時間的に緩慢な変化をする現象を計測。	
絶縁低下	電気的な絶縁抵抗値が、何らかの原因により低下し、電気が流れやすくなること。	
センサノード	センサ機能付き、無線端末。1個以上のセンサ、無線チップ、マイクロプロセッサ、電源（電池など）により構成され、センサネットワークを構成する機器のこと。	
測定軸数	計測機器が一度に測定できる物理量の数。加速度や回転角など一般には直交する同じ物理量の計測数を意味するが、必ずしも同じ物理量が測定できるものを示さない。	
滞水	よどんで流れない水。	
たわみ	車の通行などの一時的にかかる荷重で発生する構造物の変位を表す。恒常的に荷重が印加される場合や、荷重が印加されていないがたわみや変位が発生しているものは該当しない。	活荷重変位
断面係数	構造材に生じる曲げ応力の大きさを計算する基準として、断面の形状から算出する係数。	
チャージアンプ	入力した電荷の総量（電流の積分値）に比例した信号を出力する増幅器のこと。	
直線性誤差	計測機器やセンサへ実際に入力される信号レベルに比例せず、理想的な比例直線からの誤差を表す。計測機器やセンサが測定できるフルスケールに対しての比率%で表され、[%FS]と表す。	
データロガー	センサにより計測・収集した各種データ（電流値、電圧値など）をデジタル値に変換して保存する装置のこと。	
透視投影変換	3次元空間上の点をセンサ面へと投影する手法。指定された視点・視線方向での被写体の見え方を生成するために用いられる。	
動的計測	時間と共に急激に変化する現象を計測。	
特性カルテ	橋梁への入力情報と入力に対する応答である出力情報を計測し、それぞれの相関を継続的なデータとして表したものの。	
取付用ベースプレート	センサや計測機器を設置するための台座。設置対象の形状に合わせて作成される。定期的に同じ場所に設置する場合や、機器の交換が計画される場合は特に多用される。	
内部メモリ	プログラマブルターミナル本体内部で自由に読み書きできるメモリ。	

用語	意味	類義語・関連語
塗替え単位	塗装の状況や経時変化を点検・管理していく単位で、基本的に、橋台及び橋脚によって区切られた複数径間をひとつの塗替え単位とする。現地状況に応じて、橋梁全体、上下線を分割、橋梁内で分割といった様々な単位が考えられる。	
濃淡モフォロジイ処理	画像処理技術のひとつで、濃淡画像情報より濃淡値の偏りが、ある範囲の広さに亘って存在しているとき、その部分を優位の濃淡変化部として検出する技術。	
バイナリ形式	文字以外を含んだデータの形式。 バイナリは2進数の事をいうが、文字(テキスト)も各種文字コード(シフトJIS, Unicodeなど)に従って2進数で表される。一般的には文字だけで構成されるデータ形式をテキスト形式と呼び、それ以外をバイナリ形式と呼ぶ。	
半田付け	熱で溶かしたはんだによって金属を接合する作業のこと。	
バンドパスフィルタ	必要な範囲の周波数のみを通過させ、不要な範囲の周波数を減衰させるフィルタを表す。光学的、数学的(ソフトウェア的)、電気回路的、力学的など様々な構成があるが、モニタリング分野においては、電気回路的、或いはソフトウェア的な構成を指す事が多い。	
ピエゾ式	圧電効果 (piezoelectric effect) を活用したもの。圧電効果とは、物質に圧力(力)を加えると、圧力に比例した分極(表面電荷)が現れる現象のこと。	
ピクセルサイズ	画像を記録するイメージセンサの画素1つ1つの大きさ。	
ピクセル数	コンピュータのディスプレイなどの画面を構成する最小単位の点数。単位面積当たりのピクセル数が多いほど精密な表示ができる。	
ひび割れ開閉量	コンクリート構造物に発生したひび割れが車両走行などの活荷重により開口した時の最大変位量。	
腐食	金属がそれを取りかこむ環境物質との化学反応もしくは電気化学反応によって損耗すること。	
フリッカー	照明器具やディスプレイのような発光装置で発生する細かいちらつき現象。	
フレームモデル	3次元CADなどで表現された形状モデルの一つ。各種の解析に用いられる。	
フレームレート	動画処理で用いられる1秒間に何枚のフレーム(コマ数)を保存するかの単位。	
閉域網	外部(インターネット等)から直接接続されない、特定の利用者や局のみを利用する閉じたネットワークのこと。	

用語	意味	類義語・関連語
平滑化	データにおける重要パターンを、ノイズなど、重要性の低いものを除去しながら見つけ出す方法。	
ベイヤー配列デモザイキング	三原色フィルタを市松模様状に配したセンサで受光し、補間演算によって全画素の三原色情報を復元する手法。人間にとっての見栄えとセンサコストから発想された方式であり、物理的な真値が復元される保証はない。	
保護等級	国際電気基準会議(IEC)で定められた防水、防塵に対する保護性能に関する等級のこと。規定された保護等級に合致する性能を「IP66」等のIPコードで表す。	
モアレ	干渉縞、規則正しい繰り返し模様を複数重ね合わせた時に、それらの周期のずれにより視覚的に発生する縞模様のこと。	
遊間	橋の上部工は、温度変化や乾燥収縮又は地震時による橋脚の変形により動く。この動きに対応した、桁と橋台の胸壁や桁同士が損傷を起こさないような適切な間隔を設けること。	
ラッピング処理	プログラミングの分野で、あるクラスや関数、データ型などが提供する機能やデータを含み、別の形で提供すること。	
歪曲収差	レンズなどの光学系で、画像が被写体と相似にならず、歪んでしまう収差。	
ワンショット	動画の様に連続的に撮像したものではなく、1枚のみ撮像すること。	
CSV形式	Comma Separated Valuesの略で、テキストデータの形式の一つ。項目の区切り文字にカンマ「,」が用いられる。可読性が高いが、データ量や処理速度では不利となる。	
FEM	Finite Element Methodの略で、有限要素法のこと。解析対象を微小な解析要素で分割・モデル化し、解析的に解くことが困難な微分方程式の近似解を得る方法。	有限要素法
MEMS	Micro Electro Mechanical System の略で、微細加工技術により集積した、機械構造を有する電子デバイスを指す。温度、磁気、赤外線、加速度などのセンサへ応用される。	
PVDF	ポリフッ化ビニリデン (PolyVinylidene DiFluoride) 高耐性、高純度な熱可塑性フッ素重合体のひとつであり、機械的強度が強いフッ素系樹脂のこと。	

第5編 斜張橋の斜材システムのモニタリング

1 章	斜張橋のモニタリングの位置づけと種類	5-1
1.1	モニタリングの位置づけ	5-1
1.1.1	斜張橋の構造	5-1
1.1.2	斜材システム特有の変状と着眼点.....	5-2
1.1.3	斜材システムの点検および調査の方法.....	5-4
1.1.4	斜材ケーブルの張力モニタリングによる健全性の評価	5-7
1.1.5	モニタリングの位置づけ	5-11
1.2	モニタリングの種類と役割	5-14
1.2.1	モニタリングの概要.....	5-14
1.2.2	モニタリングの種類と目的.....	5-14
2 章	高次振動法による張力変化のモニタリング	5-16
2.1	技術の概要.....	5-16
2.1.1	目的.....	5-16
2.1.2	システムの概要.....	5-16
2.1.3	計測の期間	5-18
2.2	モニタリングの方法	5-19
2.2.1	モニタリングの手順.....	5-19
2.2.2	モニタリングの計画.....	5-20
2.2.3	管理基準値の設定	5-20
2.2.4	機器の選定・設計	5-20
2.2.5	機器の設置	5-23
2.2.6	初期計測.....	5-24
2.2.7	システムの運用.....	5-24
2.2.8	費用の目安	5-26
2.3	結果の評価.....	5-26
2.4	モニタリングの事例	5-28
2.4.1	概要.....	5-28
2.4.2	対象範囲.....	5-28
2.4.3	計測結果.....	5-30
2.5	保守.....	5-32
	添付資料 1：用語集	5-33

1章 斜張橋のモニタリングの位置づけと種類

1.1 モニタリングの位置づけ

1.1.1 斜張橋の構造

斜張橋は塔から吊った斜材により主桁を補剛した構造の橋梁である。塔を介して配置される主桁を支持または補剛するための部材を斜材といい、ケーブル（PC 鋼線、PC 鋼より線）、保護管、充填材等で構成される。また、斜材、斜材定着部、制振装置の総称を斜材システムと呼ぶ。なお、エクストラード橋も構造的には斜張橋と同じ部類に属するため、本編では同一のものとして取扱い、斜張橋と呼ぶ。斜張橋の構成部材を図 1.1.1 に、構成要素を表 1.1.1 に示す。

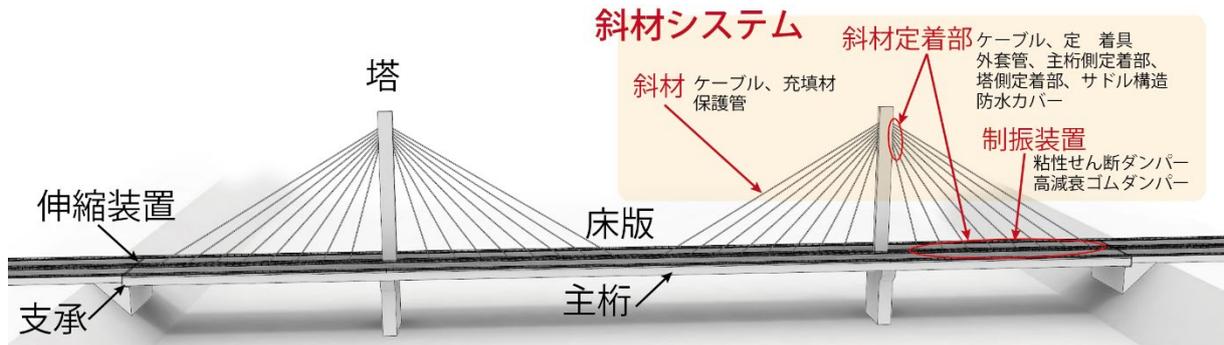


図 1.1.1 斜張橋の構成部材と斜材システム

表 1.1.1 斜材システム及び塔の構成要素

部材	構成部材	構成要素
斜材システム	斜材	ケーブル (PC 鋼線, PC 鋼より線)
		充填材
		保護管
	斜材定着部	ケーブル (PC 鋼線, PC 鋼より線)
		定着具
		外套管
		主桁側定着部
		塔側定着部
		サドル構造
	制振装置	粘性せん断ダンパー
高減衰ゴムダンパー		
塔	塔	塔

斜張橋に固有かつ重要な構造部材として斜材システム及び塔がある。このうち、塔に発生が想定される変状は、主にひび割れや浮き等（コンクリートの場合）、あるいは腐食等（鋼の場合）である。これらの多くは近接目視により点検・診断が可能である。本編での記述は斜張橋において特徴的な斜材システムを対象とするものに限定することとした。なお、本章の記述は文献（斜張橋・エクストラードロード橋維持管理指針（共通編）〔中日本高速道路株式会社〕）から引用している。塔を含めた点検・診断については、当文献を参考にすると良い。

1.1.2 斜材システム特有の変状と着眼点

斜材システムの部材に想定される変状を表 1.1.2 に示す。

表 1.1.2 斜材システムに想定される変状

部 材		想定される変状
斜材システム	斜材	ケーブルの破断，腐食，疲労き裂，保護管の腐食・き裂，振動
	斜材定着部（コンクリート）	定着体の腐食，定着部近傍のひび割れ，はく離・鉄筋露出，漏水・エフロレッセンス，浮き
	斜材定着部（鋼）	定着体の腐食，定着部近傍の変形・座屈，塗膜劣化・腐食，漏水・滞水，疲労き裂
	その他	制振装置の変状，充填材の漏出

斜材システムの点検及び調査の着眼点の例を図 1.1.2 に示す。

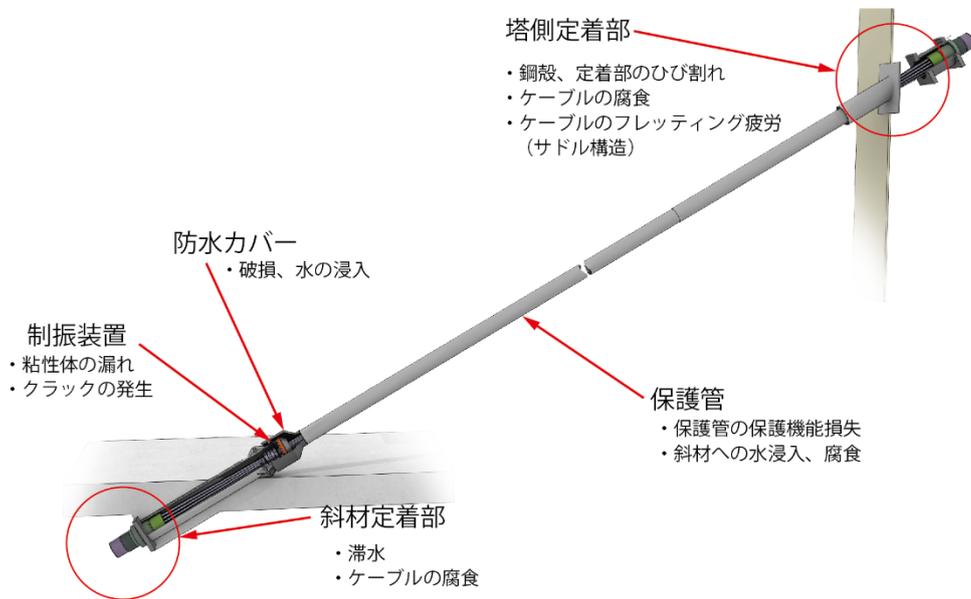


図 1.1.2 斜材システムの点検及び調査の着眼点の例

斜張橋においては、海外を含めて斜材ケーブルの破断を原因とした安全性に関わる重大事象が発生している事例があるため、斜材システムに着目して点検・調査を実施する必要がある。しかし、ケーブル自体は保護管の中にあり、近接目視による点検ではケーブルの腐食等の変状を確認することは困難なため、定期的あるいは継続的にケーブルの性状を監視すること（モニタリング）によりケーブルの健全性を確認することが重要となる。

斜材システムの変状を進行させるきっかけとなるのは「水の浸入」である。例えば腐食は、斜材保護管内部への水の浸入により生じる可能性があり、まず保護管のき裂等の表面状態、充填材の漏れや劣化を点検で確認し、内部に水が浸入できる状態になっていたら、ケーブルの腐食に進行している可能性がある。その場合には、斜材、斜材定着部付近のケーブルや定着具の点検、ケーブルの断面欠損や張力測定等の詳細調査を行う。また、速やかな「水の浸入」を防止する対策を施す。

1.1.3 斜材システムの点検および調査の方法

(1) 点検の種類と頻度

斜張橋に特有な部材のうち斜材システムの点検および調査の頻度の例を表 1.1.3 に示す。この事例では、斜材システムにおいて、定期点検（詳細点検）は概ね近接目視により実施することとしている。定期点検で、変状の可能性が疑われた場合は、高次振動法や渦流探傷法による詳細調査やモニタリングを実施し、保護管内部のケーブルの健全性の確認を行う。このうち、渦流探傷法による斜材ケーブル調査には特殊な点検ロボットを用いる必要があるため、比較的簡易に測定が可能な高次振動法による調査を先行して実施し、渦流探傷法での調査の必要性をスクリーニングすることが有効である。

表 1.1.3 斜材システムの点検及び調査の頻度の例

構成部材	構成要素	確認項目	方法	位置付け	頻度	モニタリング		
斜材システム	斜材	張力	高次振動法	初期点検 詳細調査	点検でC判定がある場合 ^{※3}	○		
		ケーブル	ケーブルの断面欠損	渦流探傷法	詳細調査	点検でC判定がある場合 ^{※3}		
				微破壊検査 解体調査	詳細調査	渦流探傷に応じて		
	保護管	損傷・変形・変色	近接目視 (自走式点検装置)	初期点検 詳細点検	1回以上/5年			
	斜材定着部	ケーブル	ケーブルの変状	近接目視 (工業用内視鏡等)	初期点検 詳細点検	1回以上/5年		
		斜材定着部	主桁側：保全点検要領による 塔側：以下による					
		定着具	ゆるみ、腐食	近接目視 ^{※1}	初期点検 詳細点検	1回以上/5年		
		外套管	損傷・変形・腐食	近接目視 (工業用内視鏡等)	初期点検 詳細点検	1回以上/5年		
		防水カバー (ブーツ)	損傷・変形・変色	近接目視	初期点検 詳細点検	1回以上/5年		
		制振装置	粘性せん断ダンパー	粘性体の漏れ・劣化	近接目視 ^{※2}	初期点検 詳細点検	1回以上/5年	
			高減衰ゴムダンパー	高減衰ゴムの劣化・破損	近接目視	初期点検 詳細点検	1回以上/5年	
	斜材振動の異常			近接目視	初期点検 日常点検	2回以上/1年 (降車点検)		
	全体	形状	測量	緊急点検	緊急時			

※1 定着カバーを解体し、内部腐食の有無の確認をするのがよい。

※2 外観観察による漏れの有無の確認をするのがよい。

※3 C判定とは、「変状に対する判定を行うために、調査を実施する必要がある場合」をいう。

(2) 点検の方法

斜張橋の定期点検においては、近接目視が基本である。橋面からの近接目視が困難な箇所は、高所作業車等により近接する。高所作業車等によっても近接が困難な箇所は、ロープアクセスによる近接目視や自走式点検装置等の利用を検討する。点検困難箇所は、工業用内視鏡等を用いた方法等による点検を検討する。

斜張橋の斜材システムに関する近接可能、近接困難および点検困難箇所とそれらに対応した点検の方法の例を表 1.1.4 および図 1.1.3 に示す。斜材の近接目視および自走式点検装置、斜材定着部の工業用内視鏡等の近接目視等では、交通規制を小規模にできる方法を橋梁ごとに検討する。

表 1.1.4 斜材システムに関する点検箇所と点検方法の例

分類	構成部材	構成要素 (変状)	点検調査の方法
近接可能	斜材	保護管 (損傷・変形・変色)	近接目視
近接困難			高所作業車, ロープアクセス, 自走式点検装置 による近接目視
点検困難 箇所	斜材定着部	鋼材 (破断・腐食)	工業用内視鏡等

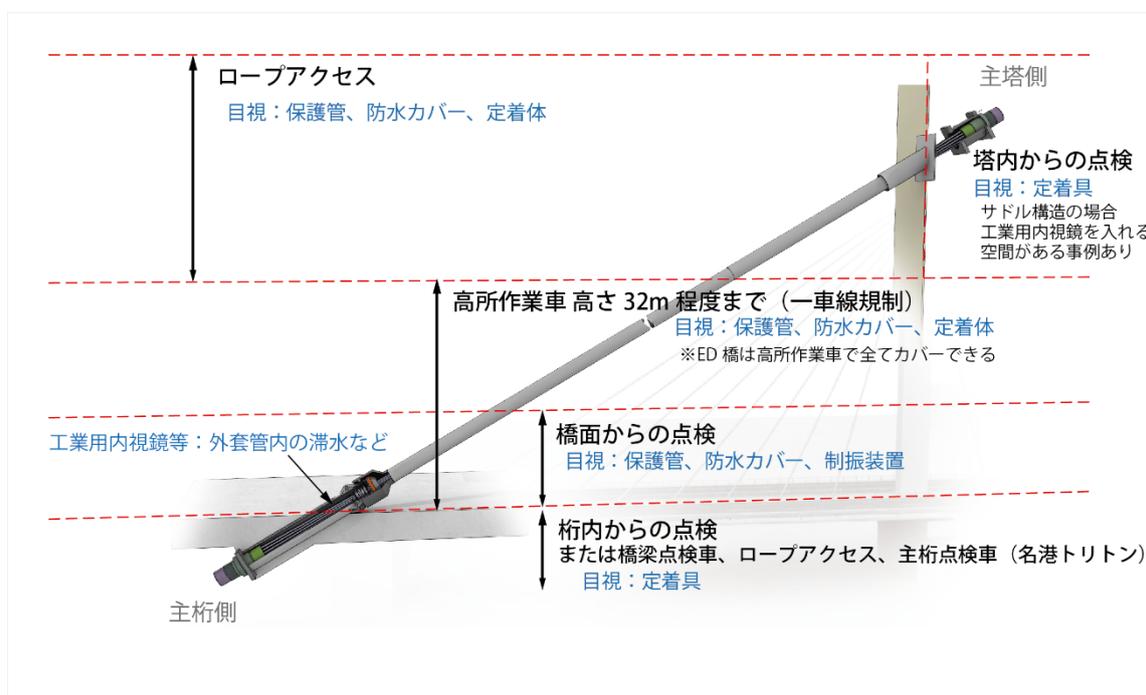


図 1.1.3 斜材システムに関する点検箇所と点検の方法の例の概要図

(3) 詳細調査の方法

点検で得られない情報を得るためには、必要に応じて適切な方法で詳細調査を行う。斜張橋において用いられる斜材システムの調査方法の例を図 1.1.4 に示す。



図 1.1.4 斜材システムに関する詳細調査の方法の例

1) 高次振動法

斜材保護管内部のケーブルは保護管により近接目視することが困難であるが、ケーブルが断面欠損した場合には張力が変化する(後述の 1.1.4 参照)。そこで、ケーブルの断面欠損の可能性を把握することを目的とする場合には、斜材の固有振動数を測定し、その固有振動数からケーブルの張力を推定する高次振動法が有効となる。

従来は強制振動法により張力を測定していたが、曲げ剛性が既知であることが前提であること、ポリエチレンなどで被覆されているケーブルでは曲げ剛性の測定が困難であること、途中区間で偏向部を有している場合、支点条件等の設定が明確では無いことなどの問題点があった。

高次振動法は、ケーブルの曲げ振動方程式からケーブルの張力を算出する方法である。複数の高次の固有振動数とモード次数の関係式から直接、張力と曲げ剛性を同時に求める方法であり、吊橋や斜張橋などで十分な精度を有していることが確認されている。ただし、斜材の固有振動数の計測値は気候条件、交通条件に左右されやすいため、この方法を用いる場合は、固有振動数測定時の気候条件、交通条件を同一とするか、同一とみなせるように換算した値を求める必要がある。

グラウトタイプの斜材に対する高次振動法によるケーブルの断面欠損の把握については、グラウトとケーブルの付着により腐食による素線の破断率と張力の低下率が必ずしも一致しないため、渦流探傷法などによるケーブルの断面欠損の調査を併用する必要がある。

2) 渦流探傷法

高次振動法によって張力に異常が検出され、ケーブルの断面欠損調査を目的とする場合には、渦流探傷法による破断調査が有効である。

渦流探傷法は、コイルに交流電流を流して磁界を発生させ、そのコイルを試験対象である導電性物質に近づけて移動させ、腐食による断面欠損に応じた信号の変化を検知することにより腐食の発生位置や断面欠損量を評価する方法である。渦流探傷法は、斜材の自走式点検装置に搭載されている例もある。

渦流探傷法によるケーブルの調査では、内部きずが検出できないこと、正確な寸法測定ができないこと、検査精度が探傷技術者の経験や能力に左右されるという留意点がある。

3) 超音波探傷法

ボタンヘッドの定着システムに対して、斜材定着部近傍のケーブルの破断を調査することを目的とする場合には、超音波探傷法が有効である。

超音波探傷法は、斜材定着部近傍のケーブルに対して、定着体端のワイヤー端部が露出した部分から超音波を入力して、その反射波を検知することにより、ケーブルの破断の有無を推定することができる技術である。ただし、この方法はボタンヘッド加工が施された平行線定着工法である海外の2～3橋でのみ採用事例があるため、定着体の種類によって適用の可否が分かれることに注意が必要である。

4) 解体調査

渦流探傷法による破断調査の結果に基づき、ケーブルの破断状況や腐食状況などより具体的な情報を得ること、あるいは調査結果の裏付けを確認することを目的として、保護管や外套管を開封して解体調査を行う。解体調査の採用にあたっては、構造物や健全な部位に影響が生じないよう十分な配慮とともに、開封後の対策の立案が必要である。

1.1.4 斜材ケーブルの張力モニタリングによる健全性の評価

主桁を斜材システムで吊り上げている斜張橋では、斜材ケーブルの変状が全体系の健全性に与える影響が大きいと想定される。斜材ケーブルの張力を計測することで、斜材ケーブルの変状と全体系の健全性を評価できるかを確認するため、斜材ケーブルの張力、変状、全体系の健全性の関係性を解析により検証した。解析には全体系のモデルを用い、斜材ケーブルを逐次破断させ、その張力の変化や主桁の応力変化を確認している。

解析は、建設時の詳細設計結果をもとに、節点座標、部材剛性、全死荷重時斜材張力を条件として与え、ケーブルは棒要素（軸力のみ）、その他部材は梁要素としている。

(1) PC・鋼複合エクストラドーズド橋の全体挙動の解析例

側径間最外縁のケーブル（以下 S1 という）の断面を減少させていった場合のケーブルの張力・応力変化と、主桁上下縁の応力変化を以下に示す。

1) S1 の断面を減少させていった場合のケーブルの張力・応力変化

S1 の断面を減少させていった場合の S1 及び隣接のケーブル（以下 S2 という）のケーブルの張力・応力変化を図 1.1.5 に示す。部分破断が進行してもいずれのケーブルにも急激な応力増加は発生しない結果となった。

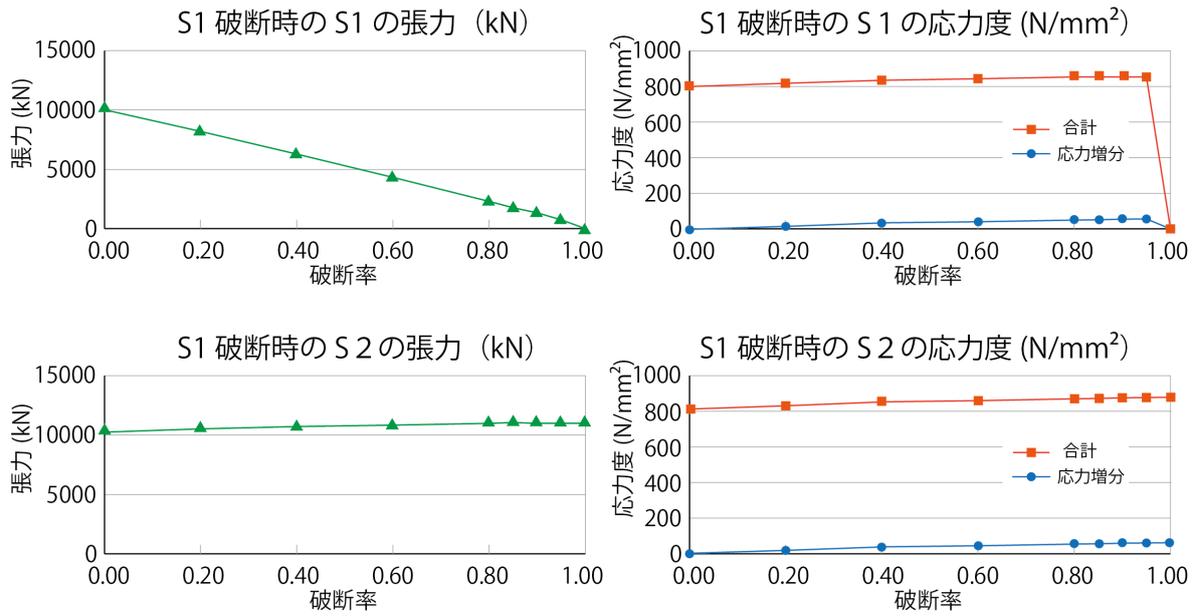


図 1.1.5 ケーブルの張力・応力変化

2) S1 の断面を減少させていった場合の主桁上下縁の応力変化

S1 の断面を減少させていった場合の主桁上下縁の応力変化を図 1.1.6 に示す。部分破断の進行に伴い、下縁応力度が許容値を上回り、S1 破断時の変動応力は設計活荷重の 37% 程度であるため、設計活荷重の 63% 以内に抑える交通規制が必要となる。

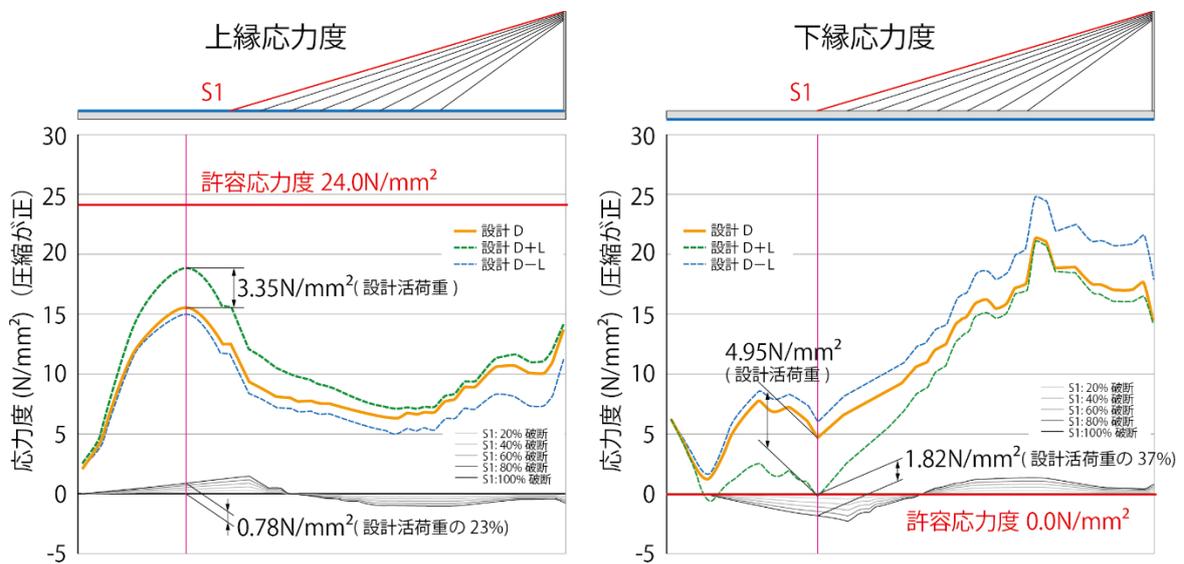


図 1.1.6 主桁上下縁の応力変化

(2) 鋼斜張橋の全体挙動の解析例

主径間最外縁のケーブル（以下 S34 という）の断面を減少させていった場合のケーブルの張力・応力変化と、側径間最外縁のケーブル（以下 S1 という）の断面を減少させていった場合の主桁上下縁の応力変化を以下に示す。

1) S34 の断面を減少させていった場合のケーブルの張力・応力変化

S34 の断面を減少させていった場合の S34, 隣接のケーブル (以下 S33 という) 及び 2 面吊りのもう一方の最外縁のケーブル (以下反対側 S34 という) のケーブルの張力・応力変化を 図 1.1.7 に示す。本ケースにおいても、部分破断が進行しても各ケーブルには急激な応力増加は発生しない結果となった。

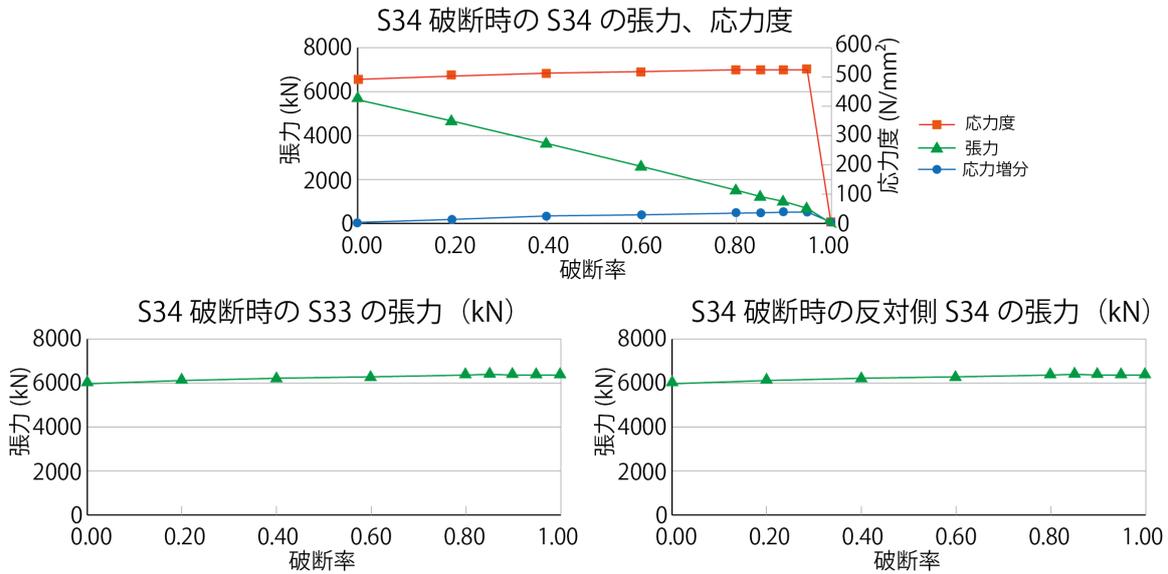


図 1.1.7 ケーブルの張力・応力変化

2) S1 の断面を減少させていった場合の主桁上下縁の応力変化

S1 の断面を減少させていった場合の主桁上下縁の応力変化を 図 1.1.8 に示す。部分破断の進行に伴い、下縁応力度が許容値を上回り、S1 破断時の変動応力は設計活荷重の 21% 程度であるため、設計活荷重の 79% 以内に抑える交通規制が必要となる。許容値の超過はわずかであり、交通規制を行わない場合でも、降伏点 (許容値の 1.7 倍) を超えることはなく、弾性範囲内におさまっている。

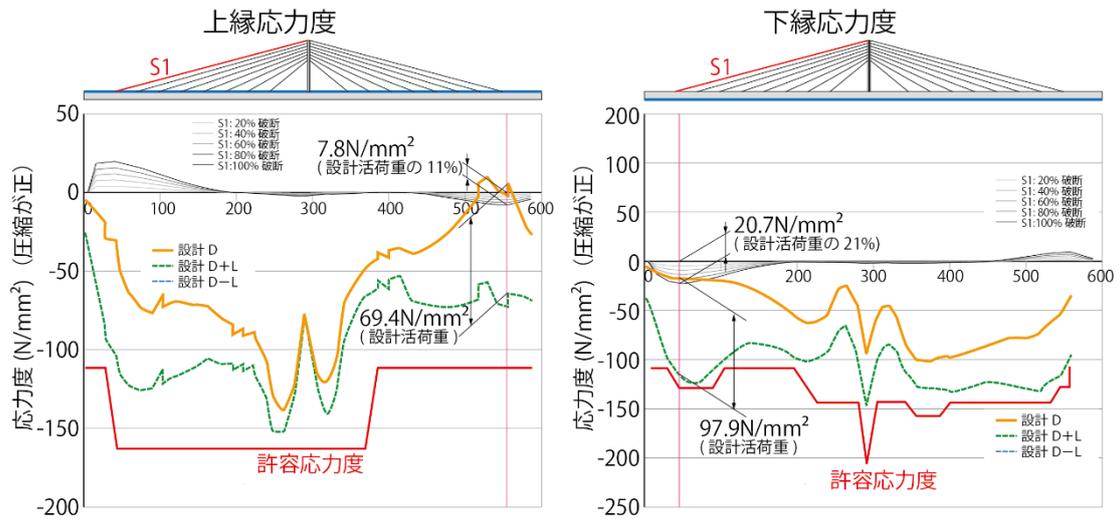


図 1.1.8 主桁上下縁の応力変化

以上の検討結果を踏まえると、ケーブルの張力変動を把握することで、ケーブル腐食の可能性を把握できるため、高次振動法によるケーブル張力のモニタリングは斜張橋の健全性評価に有効である。また、破断時には主桁の曲げ応力度は許容値をオーバーする可能性があるものの、部分的な交通規制を行えば許容値以内に抑えることが可能である。このため、モニタリングの活用シナリオとして、適切な閾値を設定した上で、高次振動法による常時モニタリングと無線伝送を組合せたモニタリングを実施し、斜材交換までの期間、供用することも考えられる。

1.1.5 モニタリングの位置づけ

現状では、点検・診断は、基本的には5年に一度の近接目視による定期点検により行われているが目視点検は点検者によって点検結果にばらつきがあるという問題がある。また、斜張橋の場合、高所作業車やロープアクセス等の方法で近接目視をする必要があり、常に危険が伴う上に多大な費用がかかる。

それに対して、1.1.4に示した解析例のように、ケーブルの残存断面積にほぼ比例して張力が減少することから、ケーブルの張力変動を把握することで、ケーブル等の鋼材腐食の可能性を把握できる。ケーブルの張力変動は、加速度センサを用いた高次振動法により推定することができ、モニタリングシステムとして構築することで、斜材ケーブルの変状をより迅速に評価することが出来る。また、供用に対する安全性が問題になるような状況においては常時監視が必要になるが、このような場合にもモニタリング技術を活用すれば、安全な調査が低コストで可能となり、長期間の経時変化を連続的に測定することも可能となる。

このように、定期点検に加えてモニタリング技術を活用することや、常時監視にモニタリング技術を用いることにより、合理的な斜材の維持管理が可能となる。この時、橋梁全体挙動の変化について事前に解析しモニタリングで得られるケーブル張力の管理限界の閾値を設定し、迅速に健全性の評価及び交通規制の判定を行えるようにしておくことは道路交通の安全を担う上で有用である。本項では、斜張橋の斜材システムの維持管理に適した高次振動法を用いたモニタリングシステムの運用について以下に示す。

図1.1.9に斜材ケーブルの点検・調査の中で、モニタリングを活用した例を示す。

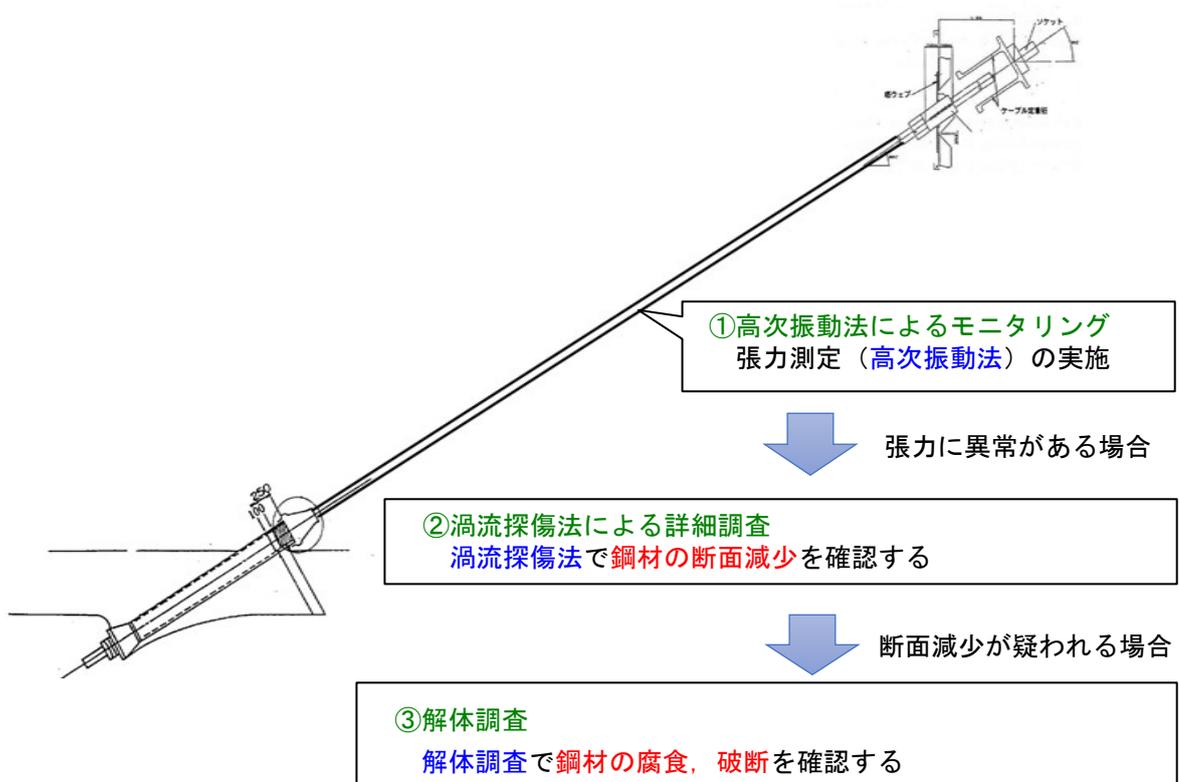


図 1.1.9 斜材ケーブルの点検・調査の中でモニタリングを活用した例

図 1.1.9 に示す通り、鋼材の腐食状況の確認を目的とした斜材ケーブルのモニタリング・調査方法は①高次振動法によるモニタリング（張力測定）、②渦流探傷法による詳細調査（腐食による断面減少の検出）、③解体調査による目視による腐食状況の確認に大別することができる。

以下に、実際の維持管理に高次振動法による斜材ケーブルのモニタリングを活用した例を示す。

① 高次振動法によるモニタリング

この維持管理事例ではまず、斜材の張力異常の個別判定として、判定区分を表 1.1.5 のように設定し判断することとしている。なお、この表で判定区分を A1～A2 としているのは、異常値として検出した場合は②、③の順で詳細調査を実施することを意味している。

表 1.1.5 斜材に対する判定区分の例

変状の種類	変状パターン	変状の概要	要求性能	判定区分		
				AA	A1～A2	B
全体変状	張力異常	全体形状や荷重分担の変化、クリープや乾燥収縮による経時的な変化などにより異常な張力となった状態。	安全性	—	高次振動法による計測の結果、張力が初期値に比べて±5%以上変化している。	高次振動法による計測の結果、張力が初期値に比べて変化しているが、±5%未満である。

ここで、張力異常の閾値を5%とした理由は、高次振動法の測定誤差が3%程度であるため、それ以上であれば張力の異常があるといえるためである（図 1.1.10、図 1.1.11）。張力の初期値は建設時の設計値ではなく、供用後に最初に計測した張力を初期値として、初期値との比率で判定するため、健全な状態での張力を把握しておくことが重要である。

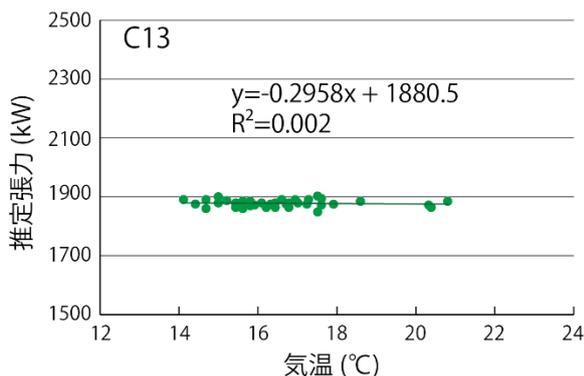


図 1.1.10 気温と推定張力の関係

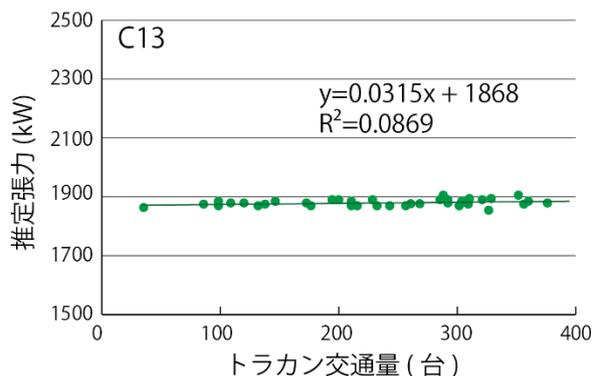


図 1.1.11 交通量と推定張力の関係

② 渦流探傷法による詳細調査

この維持管理事例では、高次振動法による計測の結果、張力が初期値に比べて±5%以上変化している場合、渦流探傷法により鋼材の断面減少を調査する。

③ 解体調査

この維持管理事例では、渦流探傷法による調査の結果、鋼材の断面減少が疑われる場合、斜材ケーブルの破断状況や腐食状況を確認するため、保護管や外套管を開封して解体調査を実施する。これらの調査結果を基に対策を選定する。

以上の例のように、高次振動法による斜材ケーブルのモニタリングを行うにあたっては、健全な状態での張力を初期値として把握しておくことが重要であり、モニタリングにより異常を検知した後の詳細調査から対策までの流れを整理し、迅速な対応が可能なように整備しておくことが望ましい。

1.2 モニタリングの種類と役割

1.2.1 モニタリングの概要

高次振動法によるモニタリングは、複数の加速度センサを斜材ケーブルに設置し、車両が走行した際の振動応答から橋梁固有の振動数と実際の振動波形から斜材ケーブルの張力を計測しその変化から変状を推定するものである。

1.2.2 モニタリングの種類と目的

表 1.2.1 は、「第 1 編 3 章モニタリングの意義」において示されているモニタリングの目的と本編で示す加速度センサによる斜材ケーブルの張力変状との対応をまとめたものである。モニタリングの位置づけである「点検の補助」「診断の補助」「補修補強の効果の確認」「緊急時の対応の補助」のそれぞれに対して適切なモニタリングを示している。また、計測器を常時設置することにより、「補修補強の効果の確認」や「緊急時の対応の補助」にも適している。管理者は、これら維持管理におけるモニタリングの役割に基づいてモニタリングを選定する。

表 1.2.1 モニタリングの種類と目的

対象となる損傷	モニタリングの種類	モニタリングの目的※								
		点検の補助		診断の補助					補修補強の効果の確認	緊急時の対応の補助
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
斜材ケーブルの変状	加速度センサによる斜材ケーブルの張力変状 (定期計測)	○	○							
斜材ケーブルの変状	加速度センサによる斜材ケーブルの張力変状 (常時計測)			○	○	○	○	○	○	○

※モニタリングの目的の凡例説明

- A : 何らかの異常があった箇所を把握する（事象は特定できなくてよい）。
- B : 健全性を確認している範囲を把握する。
- C : 予防保全対策をとるべき状態に達したことを把握する。
- D : 定量的データを取得し、比較する。
- E : 健全度評価のための定性的、定量的データを取得する。
- F : 通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達したことを確認する。
- G : 補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認する。
- H : 対策の効果、持続性を確認する。
- I : 落橋の危険が予測される箇所を把握する。

図 1.2.1 は、斜張橋の斜材ケーブル維持管理におけるモニタリングの役割と種類について体系的に示したものである。高次振動法によるモニタリングは現段階で実装可能なものであり、第 1 編で示したモニタリングシステムの活用を期待する効果が見込める技術である。健全度Ⅰ～Ⅱの期間においては、斜材ケーブルの現状の点検の補助ができ、異常箇所の把握や健全性の把握を目的とすることができる。健全度Ⅱ～Ⅳの期間においては、斜材ケーブルの張力異常を常時監視することにより、予防保全や車両の通行による張力異常の定量的データ取得と健全度の評価を目的とすることができる。

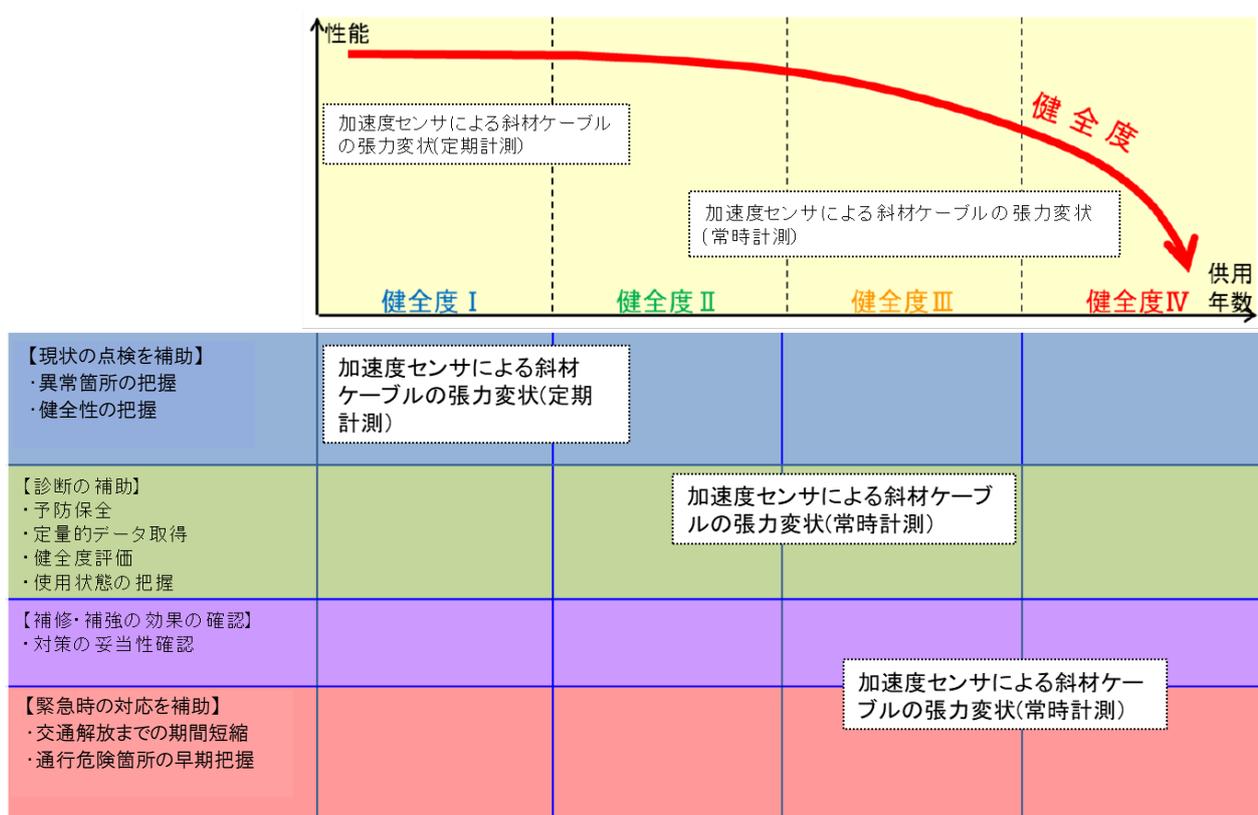


図 1.2.1 斜材ケーブルの維持管理におけるモニタリングの種類と役割

2章 高次振動法による張力変化のモニタリング

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

斜張橋において斜材ケーブルは重要な構造部材であり、確実に健全性の評価を行う必要があるが、点検・診断が容易ではない部材であり、合理的な手法が望まれている。高次振動法は、ケーブルの曲げ振動方程式からケーブルの張力を算出する方法であり、複数の高次の固有振動数とモード次数の関係式から直接、張力と曲げ剛性を同時に求める方法で、吊橋や斜張橋などで十分な精度を有していることが確認されている。ケーブルの張力と断面欠損の関係は解析的に確認されており、高次振動法による張力変化のモニタリングによりケーブルの変状を把握することができる。なお異常が検出された場合、渦流探傷法や解体検査による詳細調査をおこなう。

高次振動法による張力計測を可能とする加速度センサを斜材ケーブルに設置し、遠隔にてモニタリングを行うことにより、斜材ケーブルの変状を迅速に評価すること出来る。また、供用に対する安全性が問題になるような状況においては常時監視が必要になるが、このような場合にも、安全な調査が低コストで可能となり、長期間の経年変化を連続的に測定することも可能となる。このように、定期点検に加えて高次振動法による張力変化のモニタリングを活用することにより、合理的な斜材の維持管理が可能となる。

2.1.2 システムの概要

(1)システム構成

システムの形態として、現地で計測員が手動で定期的にデータを収集するオフライン型と、ネットワークを通して遠隔から常時、データを収集するオンライン型がある。設置する環境（場所）、計測点数、計測期間、ネットワーク環境、工事費、保守費用等を考慮しシステムを選定する事が望ましい。各形態のシステム構成と特徴を以下に示す。

1) オフライン型システム

オフライン型システムは、現地に設置する加速度センサ、及び、データロガー、アプリケーションで構成される。その構成例を図 2.1.1 に示す。本システムは、現地で収集した加速度データまたは固有振動数データを記録メディアに保存し、測定員が手動で計測データを回収し、事務所などへ持ち帰り分析を行い評価するシステムである。

オフライン型は、オンライン型に比べて通信費が削減されるが、計測員が現地に赴いて計測作業をする回数が多い場合にはランニングコストが高くなるため、変状の兆候を把握するための定期的な監視には有効な手段となる。

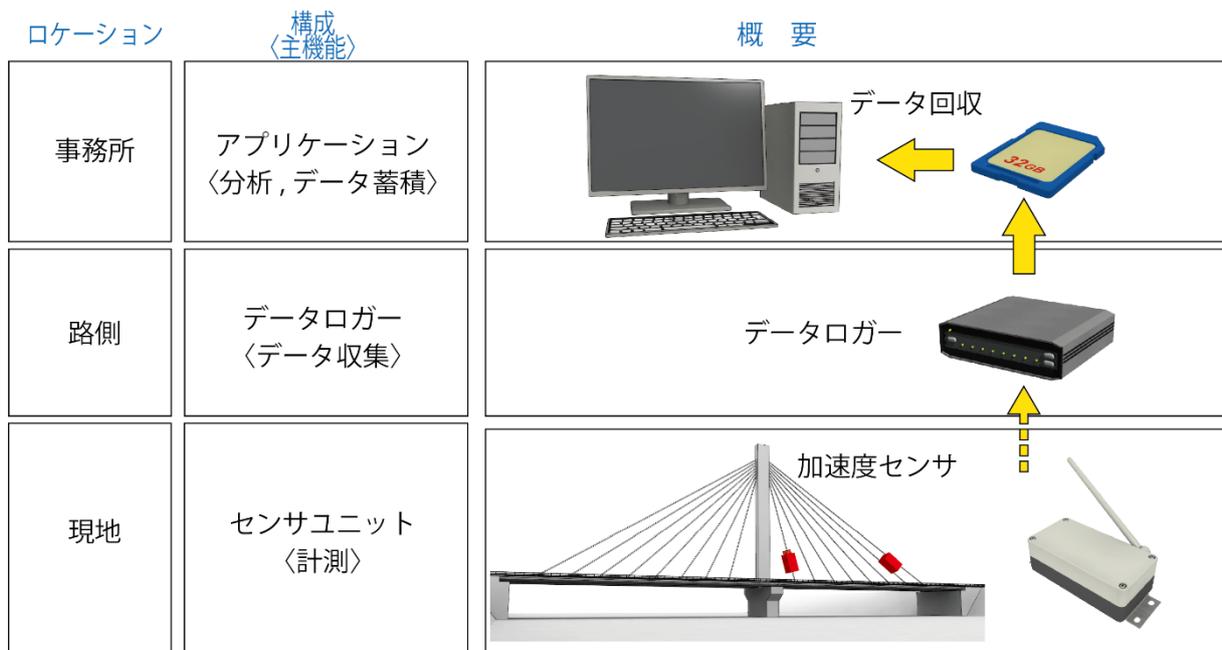


図 2.1.1 オフライン型システム構成

2) オンライン型システム

オンライン型システムは、加速度センサ、ローカルネットワーク（無線通信）、ゲートウェイ、広域ネットワーク、アプリケーションで構成されている。その構成例を図 2.1.2 に示す。本システムは、計測員が現地に赴き手動でデータを収集することなく、遠隔からセンサデータを自動的に収集・蓄積し、グラフで張力の推移や固有振動数等を可視化することができる。また、計測結果が管理基準値を超えた場合にメール等で管理者へ通知することが可能となる。本システムの加速度センサは、省電力マルチホップネットワークに対応した無線モジュールを搭載することにより、長期間の電池駆動を可能とし、配線レスを実現することができる。通信装置の故障等により、広域ネットワークの通信断が発生することに備え、現地設置の機器に計測データを一時的に保存できる機能が備えてあることが望ましい。

オンライン型は、計測員が現地に赴く必要がないため、データ収集の回数が多い場合にはオフライン型と比べて運用コストが安くなる。また、遠隔で加速度センサの正常性確認等の保守が可能であるため、現地での保守作業のコストも削減できる。

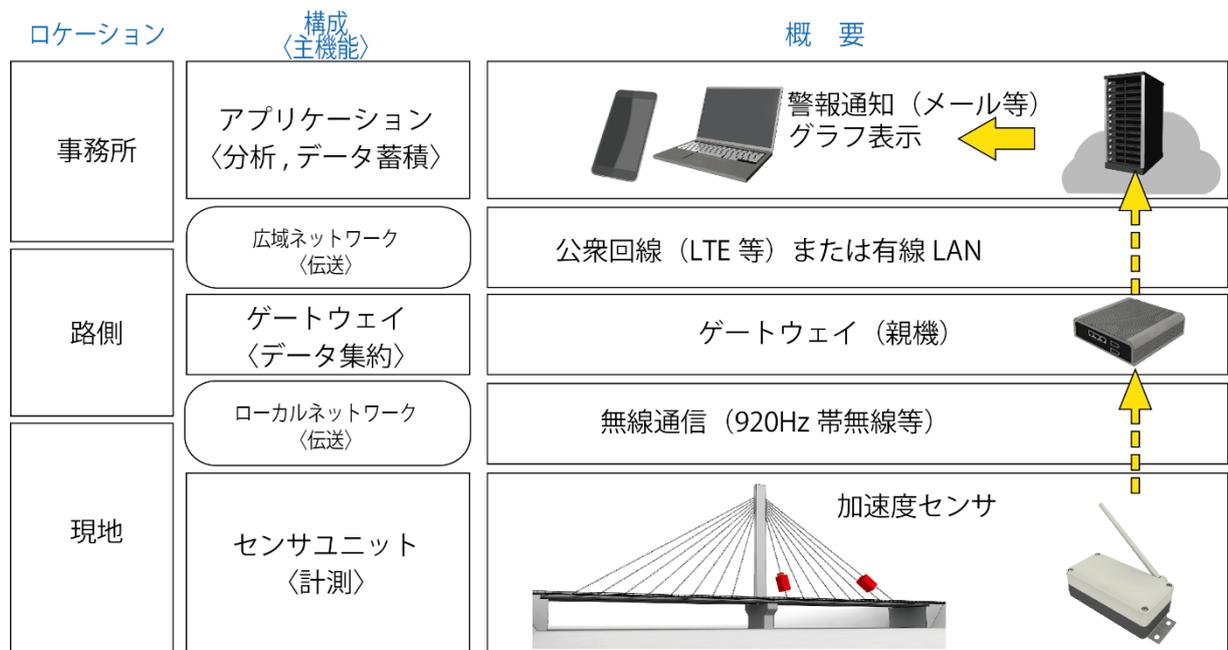


図 2.1.2 オンライン型システム構成例

2.1.3 計測の期間

斜材ケーブルの腐食や破断等の可能性を把握する目的で、供用初期の段階でモニタリングを開始し、長期間にわたり状態を監視することが最も有効である。また、点検や詳細調査により健全性を確認した後や、腐食や破断等の兆候が見られた後に、モニタリングを開始し、オンラインで斜材交換までの期間の状態の監視に使用することも有効である。

2.2 モニタリングの方法

2.2.1 モニタリングの手順

加速度センサを用いた高次振動法によるモニタリングの基本的な手順は、図 2.2.1 のとおりである。

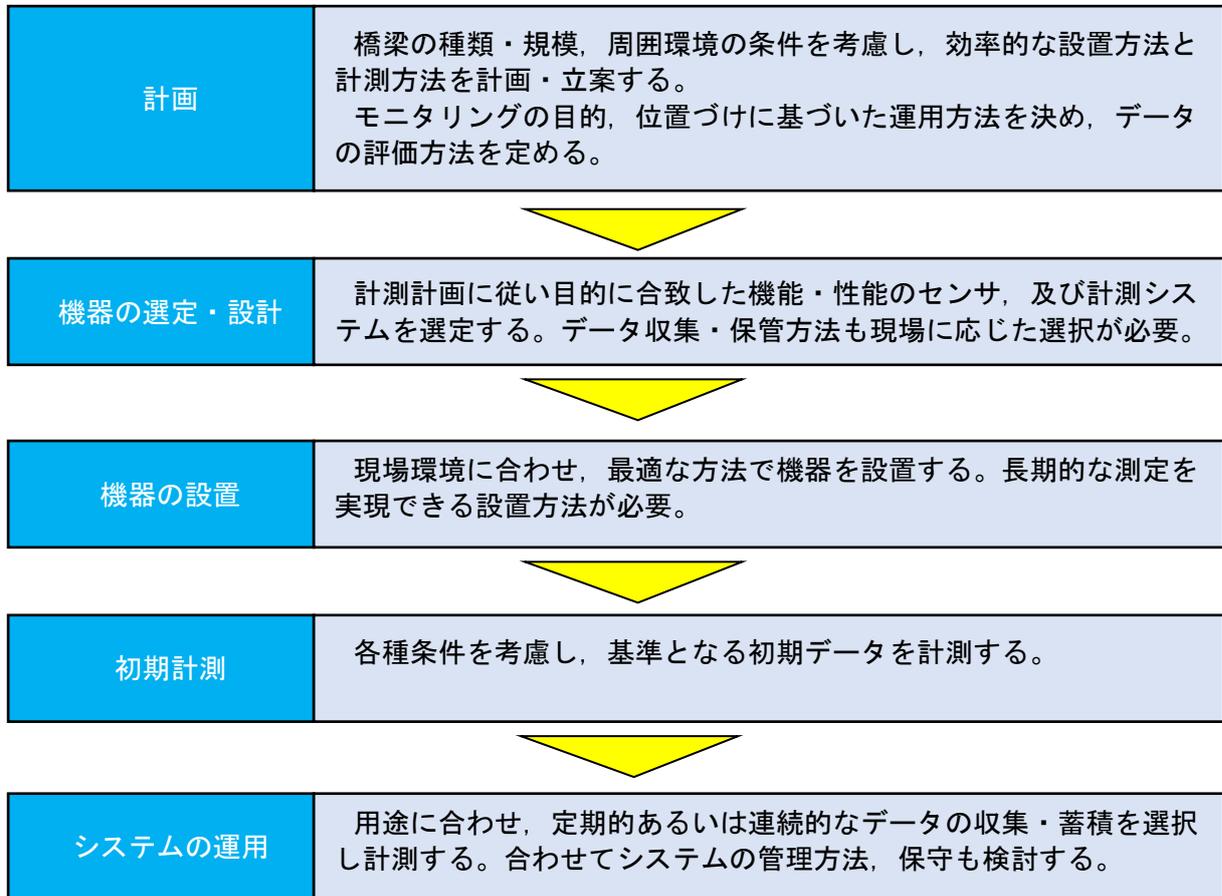


図 2.2.1 加速度センサを用いた高次振動法のモニタリング手順

2.2.2 モニタリングの計画

モニタリングシステムを導入する前に、対象の橋梁の規模および構造，周辺の地形条件や環境条件を調査し，目的に則した効率的な計画を立案する。調査項目のイメージを表 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 調査項目のイメージ

調査項目
橋梁調査/加速度センサの設置可否
加速度センサの設置場所検討
オンライン/オフラインシステムの選択
広域ネットワークの接続性確認
周囲環境の外乱要因の調査

モニタリングの計画にあたっては，その目的や位置づけに基づき，計測したデータの運用方法，管理基準値や評価・判定方法を決めた上で，モニタリングシステムの設計を行う。

2.2.3 管理基準値の設定

斜材ケーブルの張力の異常とは，ケーブルの断面欠損による張力変化の他，全体形状や荷重分担の変化，クリープや乾燥収縮による経時的な変化などにより異常な張力となった状態を指す。この張力の異常を判定する基準値としては，高次振動法による計測の結果，張力が初期値に比べて±5%以上変化している状態とし，これを管理基準値とする。ここで，張力異常の閾値を 5%とした理由は，高次振動法の測定誤差が 3%程度であるため，余裕を持たせた閾値として 5%とし，それ以上であれば張力の異常があるといえるためである。5%以上変化している場合は，変状があり早期に措置が必要な状態，または適切な時期に措置を行うことが望ましい状態と判定する。なお，3%以上 5%未満の変化がある場合は，変状はあるが少ないため，変状の進行状態を継続的に監視する必要がある状態と判定する。

今後，計測データによる分析結果の蓄積や解析的な検討などにより，変状の進行が張力に与える影響を把握することにより，モニタリングの目的に応じて管理基準値のバリエーションを増やすことも可能となり，本モニタリングシステムの適用範囲はさらに広がることが期待できる。

2.2.4 機器の選定・設計

加速度センサは，斜材ケーブルの低次から高次までの固有振動数を検出できるサンプリング周波数に対応する必要がある。また，計測する時刻や計測する間隔を運用時に設定できる必要がある。設置現場における通信線の工事，電源工事の可否やコストの観点から必要に応じて，無線通信や電池駆動に対応したタイプの機器を選定する。

表 2.2.2 に加速度センサ，表 2.2.3 にゲートウェイに求められる仕様を示す。



図 2.2.2 加速度センサ（無線通信，電池駆動タイプ）

表 2.2.2 加速度センサ仕様

項目		仕様
計測	加速度	測定軸：xyz（3 軸） サンプリング周波数：100Hz 以上，測定レンジ：±2G 計測時間：定時刻計測，周期計測
	温度・湿度	装置内温度・湿度の計測 温度計測範囲：-20～60℃，湿度：25%～85%RH
無線通信 *	無線規格	920MHz 通信 IEEE 802.15.4g 準拠，ARIB STD-T108 準拠
	周波数	920MHz 帯（922.3MHz～928.1MHz）
	送信出力	20mW
	プロトコル	無線マルチホップネットワーク
	アンテナ	防水アンテナ対応
電源		電池駆動
使用環境条件		温湿度条件：-20～60℃，25～85%RH 防水防塵対応 IP65 以上
環境対応		RoHS 対応
認定取得		技術基準適合証明（電波法）

*無線通信の仕様は，オンライン型システムの場合の例

表 2.2.3 ゲートウェイ仕様

項目		仕様
広域ネットワーク	サービス	LTE または, 3G 回線を利用
ローカルネットワーク	無線規格	920MHz 通信 IEEE 802.15.4g 準拠, ARIB STD-T108 準拠
	周波数	920MHz 帯 (922.3MHz~928.1MHz)
	送信出力	20mW
電源		AC100V, または, 太陽光発電駆動
環境対応		RoHS 対応
認定取得		技術基準適合証明 (電波法)

2.2.5 機器の設置

図 2.2.3 に加速度センサの設置例、図 2.2.4 にゲートウェイの設置例を示す。

加速度センサは、斜材ケーブルへ結束バンドまたはU字金具で固定する。この際、斜材が傷付くことを防止するためにゴムシートで覆った上に、装置をバンド止めする。また、落下防止のため、本体と斜材ケーブルをワイヤーで接続する。取付ける位置はケーブルの真上とし、図 2.2.3 に示すように加速度センサの計測軸（図の例ではZ軸）がケーブルに対して垂直となるようにする。

ゲートウェイは張り出し部等の手すりにバンドで固定する。張り出し部が無い場合は、交通に支障がなく、計測員が行ける場所かを考慮して設置する。ゲートウェイ用の電源は橋脚内から張り出し部へ引き回して接続する。電源引き回しが困難な場合は、太陽光発電に対応したゲートウェイを選択し設置する。

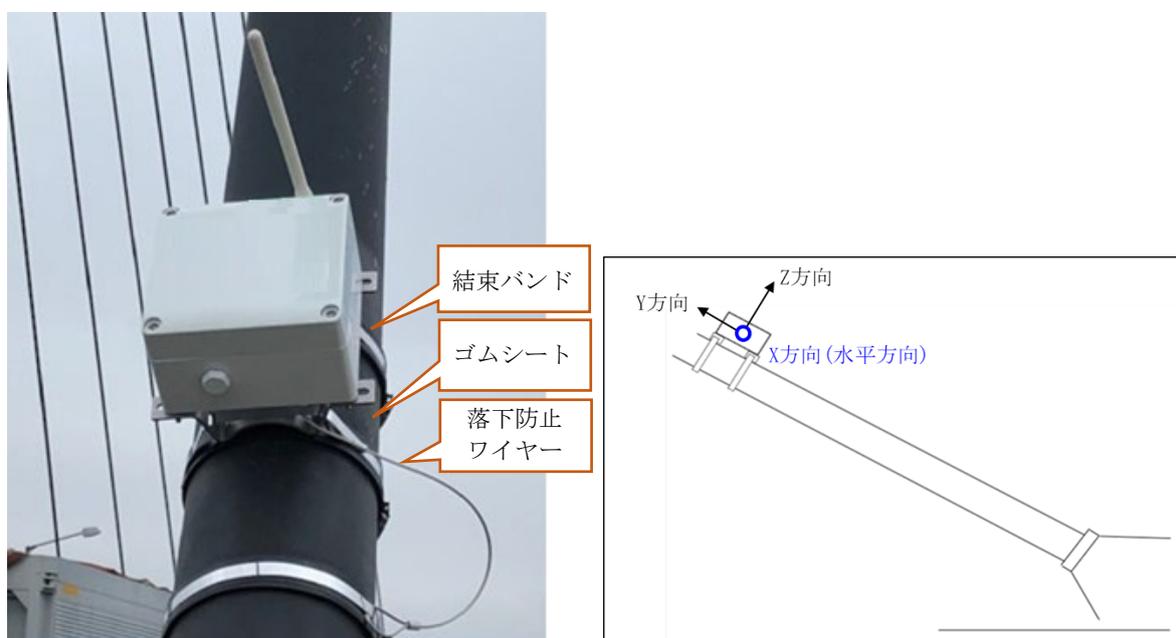


図 2.2.3 加速度センサ設置例



図 2.2.4 ゲートウェイの設置例

2.2.6 初期計測

高次振動法による張力変化のモニタリングでは、健全な状態の斜材ケーブルに加速度センサを設置し、初期値を把握しておくことが望ましい。建設時の設計値ではなく、供用後に最初に計測したときの結果を初期値とし、この初期値との比率を適切な閾値でモニタリングする。腐食や破断等が見られた後にモニタリングする場合には、加速度センサを設置したときの計測結果を初期値とし、その時点からの初期値との比率をモニタリングする。また、初期計測では、昼夜や交通量の違いによる張力の変動を把握するために1週間以上のデータ収集を行った上で初期値を定める。

2.2.7 システムの運用

オフライン型システムは、計測員が現場に行ってデータロガーから計測データを収集し、事務所等に持ち帰り、サーバに格納して解析をするという運用になる。平常時の計測においては、オンライン型と得られる結果に差異はないが、異常の発生をリアルタイムに検知することはできない。

オンライン型システムは、現地の斜材ケーブルに設置した加速度センサからネットワークを経由してクラウド等のサーバ上の管理ソフトウェアにデータが蓄積され、管理者はリモートで計測データのグラフをいつでも確認することができる。また、システムが計測データから異常を検知した場合は、リアルタイムに管理事務所内の監視画面への表示やメールで管理者に警報を通知することができる。図 2.2.5 に、オンライン型システムの運用イメージを示す。

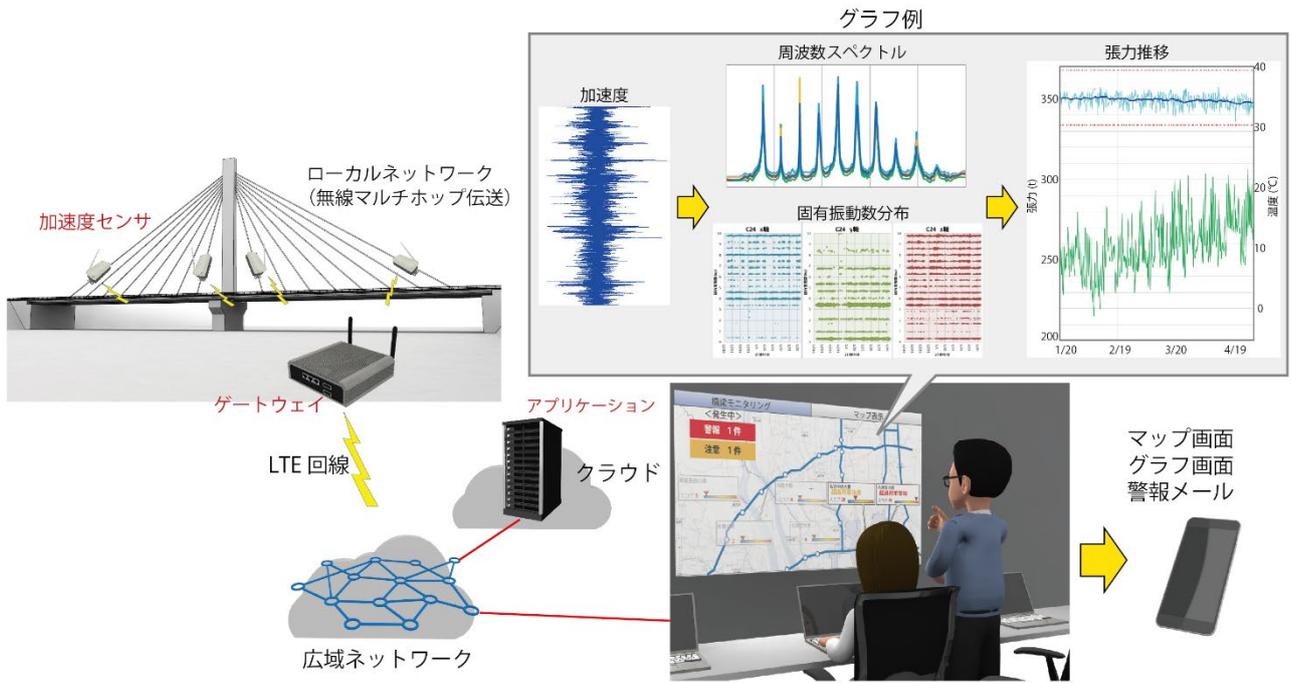


図 2.2.5 システム運用イメージ図

2.2.8 費用の目安

表 2.2.4 に、オフライン、オンラインそれぞれのシステムの導入や運用に必要な費用の目安を示す。

表 2.2.4 費用の目安

項目	内容	
システム構成	オフライン型システム ・ 加速度センサ ・ データロガー ・ アプリケーション	オンライン型システム ・ 加速度センサ ・ ゲートウェイ ・ アプリケーション
データ回収方式	手動	自動（ネットワーク経由）
計測箇所点数	最小 1 点	最小 1 点
測定頻度	4 回／年 回収・分析	4 回／1 日
管理方式	現場管理	リモート
機器費用	100 万円	100 万円
計測・分析費用	100 万円／年	100 万円／年
小計	200 万円～	200 万円～

*オフライン型の計測・分析費用は、現地計測と分析の作業費の概算。分析内容の詳細度によって費用は変わる。機材設置/撤去費用，足場費用，諸経費含まない。

*オンライン型の計測・分析費用は、クラウド等のサーバ費用と通信回線費用の概算。

*工事・保守費用は 現場ごとに個別対応となるため，ここでは含まない。

2.3 結果の評価

本システムでは、現場に設置した加速度センサの計測データから斜材ケーブルの張力を推定する。

張力を推定する方法として、加速度センサの計測データを高速フーリエ変換し、これによって得られる周波数スペクトルのデータから、低次から高次までの固有振動数を抽出する。図 2.3.1 に固有振動数の推移を表したグラフの例を示す。

次に、固有振動数から張力を推定する。以下の式は、斜張橋の斜材ケーブルの低次から高次までの固有振動数 f_i と次数 i の関係式であり、計測データから得られた固有振動数を用いて、最小二乗法によって 2 つの係数 (A, B) を同定できる。係数 B に含まれるケーブル長 L 、及び、単位長さあたりの質量 ρ A は設計値があるため、係数 B から張力 T を算出できる。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2$$

係数A $\frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4}$ 係数B $\frac{T}{4\rho AL^2}$
 f_i : 固有振動数 (Hz) i : 次数
 T : 張力 (N) EI : 曲げ剛性 (N・m²)
 L : ケーブル長 (m) ρA : 単位長さあたり質量 (kg/m)

オフライン型システムでは、加速度データまたは固有振動数データを現場で回収し、管理事務所のサーバ上のアプリケーションによって張力推定をおこない、初期値との比較を行う。

オンライン型システムでは、システムが自動で毎日定刻（例えば、0:00、6:00、12:00、18:00の1日4回）に斜材にかかる加速度を計測し、計測のたびに低次から高次までの固有振動数を算出し、張力の推定を行う。最小二乗法では、1次から最大10次以上の固有振動数の内、計測毎に抽出が可能であった次数を用いる。車両通行量等の外部条件の変化により、計測毎に張力の推定結果は変動が生じる。このため、張力推定結果の移動平均をとることにより、誤差を抑える。また、現在の張力と初期計測時の張力の比率が基準値を超えた場合には、自動的に警報を発出することができる。

図 2.3.1 に固有振動数の推移を表したグラフの例を、図 2.3.2 に張力の推移を表したグラフの例を示す。図 2.3.2 で水色のグラフは、移動平均をとる前の張力のグラフで、青色のグラフは移動平均（28回）をとったグラフである。赤一点鎖線は、管理基準値として、計測初期の張力の±5%の範囲を示している。

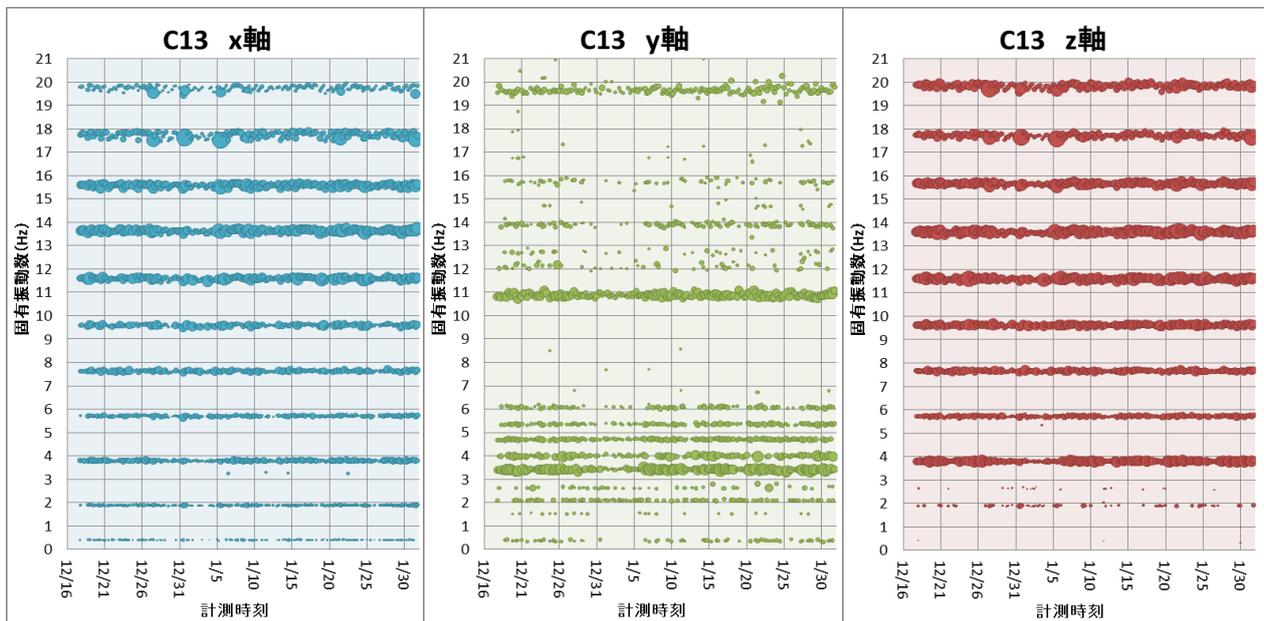


図 2.3.1 固有振動数のグラフ例

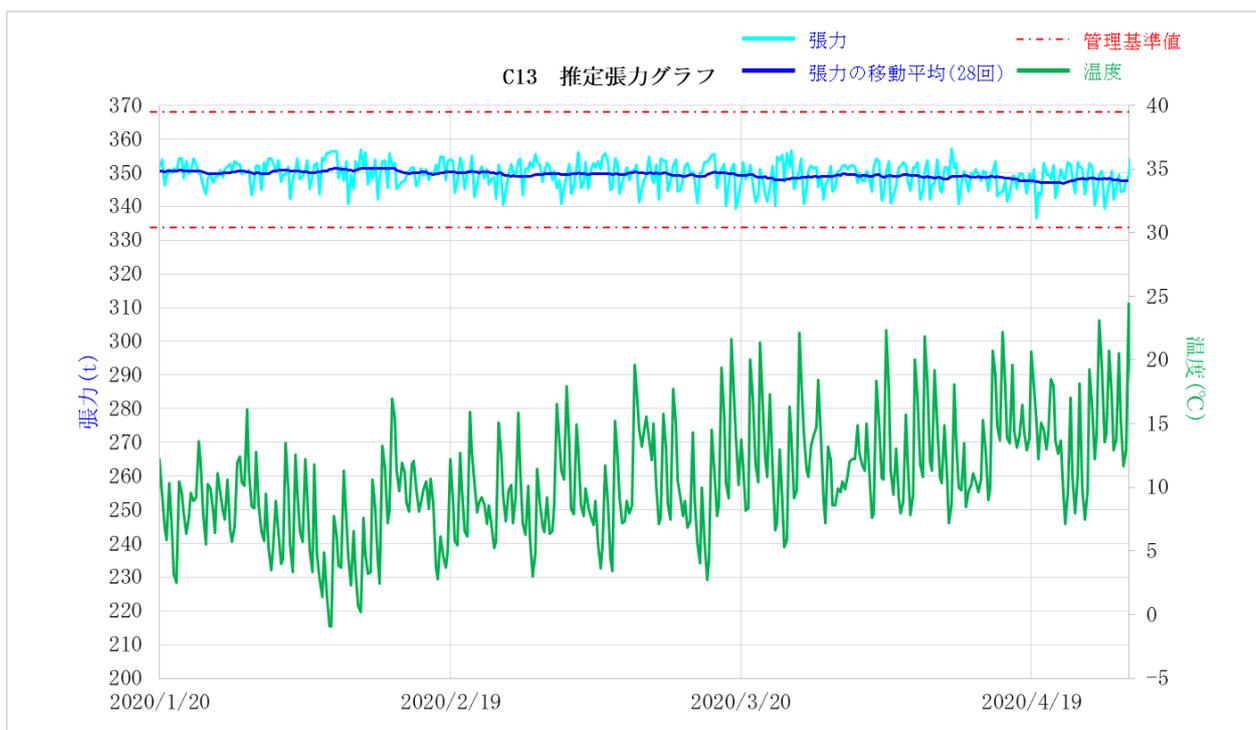


図 2.3.2 張力のグラフ例

2.4 モニタリングの事例

2.4.1 概要

高次振動法による張力モニタリングを中日本高速道路株式会社が供用している名港東大橋で実施した事例について紹介する。本事例では、斜張橋の健全性評価のため、斜材ケーブルにかかる加速度を計測し、固有振動数から推定される張力をモニタリングした。また、日変動や年変動、その他の変動要因等の傾向を把握し、管理基準値を用いたモニタリングの実用性を検証した。

2.4.2 対象範囲

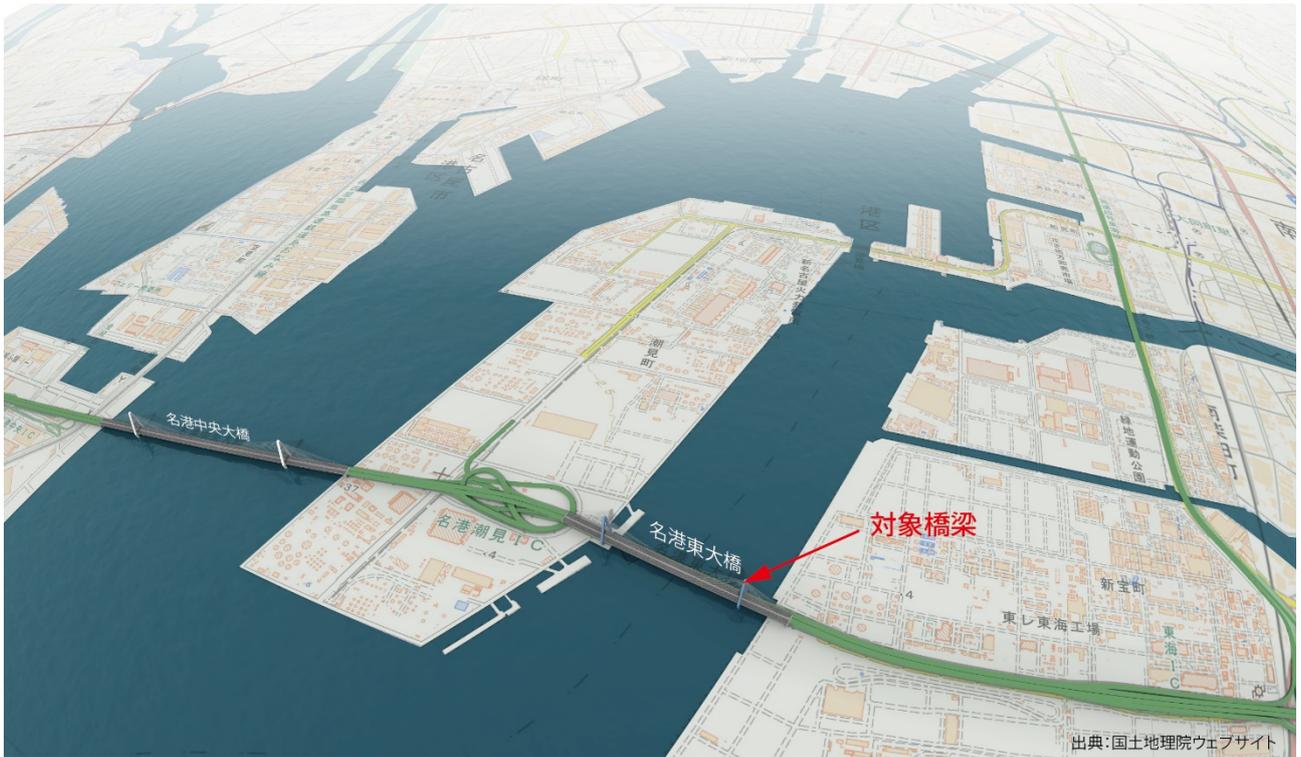
(1) 対象橋梁

橋梁名： 名港東大橋（名港潮見 IC～東海 IC 間）

位置： 愛知県東海市新宝町

型式： 3 径間連続鋼斜張橋

橋長： 700m



(地理院地図)

図 2.4.1 対象橋梁 位置図

(2) 対象径間

本事例でモニタリングの対象とした径間を図 2.4.2 に示す。中央径間の最内縁 (C13) 及び最外縁 (C24) の斜材ケーブルに加速度センサを設置した。

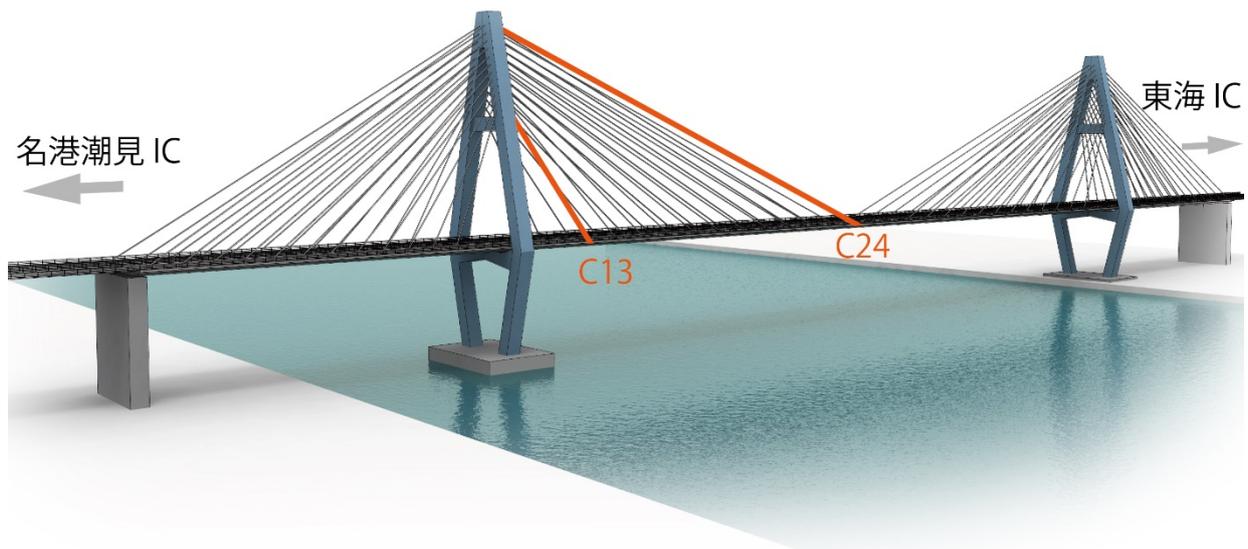


図 2.4.2 モニタリングの対象径間

(3) 計測条件

表 2.4.1 に示す条件で計測した加速度データから固有振動数を算出し、張力の推定をおこなった。

表 2.4.1 データ収集条件

項目	内容
データ種別	加速度データ
計測回数	1日4回
計測時間	1回5分
計測軸	x,y,z 軸
サンプリング周波数	125Hz
実施時期	2019年12月16日から 2020年8月現在継続中

2.4.3 計測結果

本計測では、斜材に強制振動を与えることなく、通常の車両通行等により斜材にかかる加速度を計測している。計測した加速度データを高速フーリエ変換して得られる周波数スペクトルのデータから、低次から高次までの固有振動数を抽出する。最内縁(C13)の固有振動数のグラフを図.2.4.3、最外縁(C24)の固有振動数のグラフを図.2.4.4に示す。x軸、z軸では、低次から高次までの固有振動数が毎回、その値がほとんど変化することなく、安定して検出できていることがわかる。y軸は、固有振動数が明瞭に検出できていない次数があり、これは斜材の引張方向は振動が発生しにくいいためと考えられる。

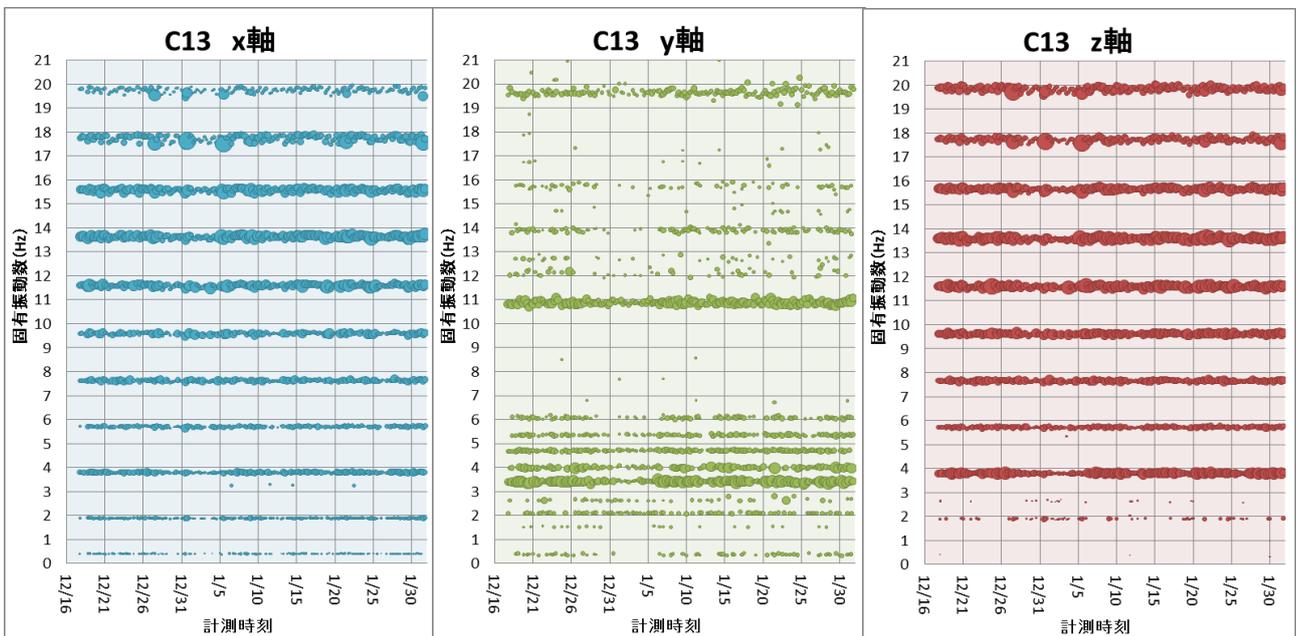


図 2.4.3 C13 の固有振動数のグラフ

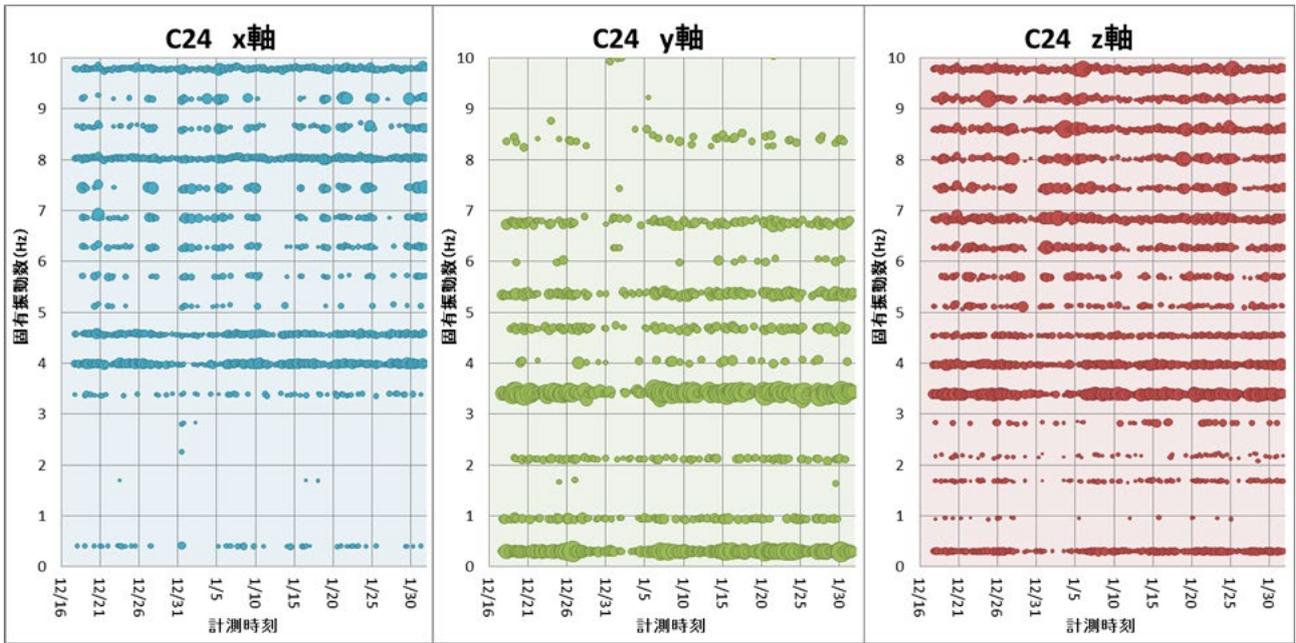


図 2.4.4 C24 の固有振動数のグラフ

最内縁 (C13) の推定張力のグラフを図 2.4.5, 最外縁 (C24) の推定張力のグラフを図 2.4.6 に示す。本グラフには加速度センサ内で計測している温度グラフも重ねて示す。

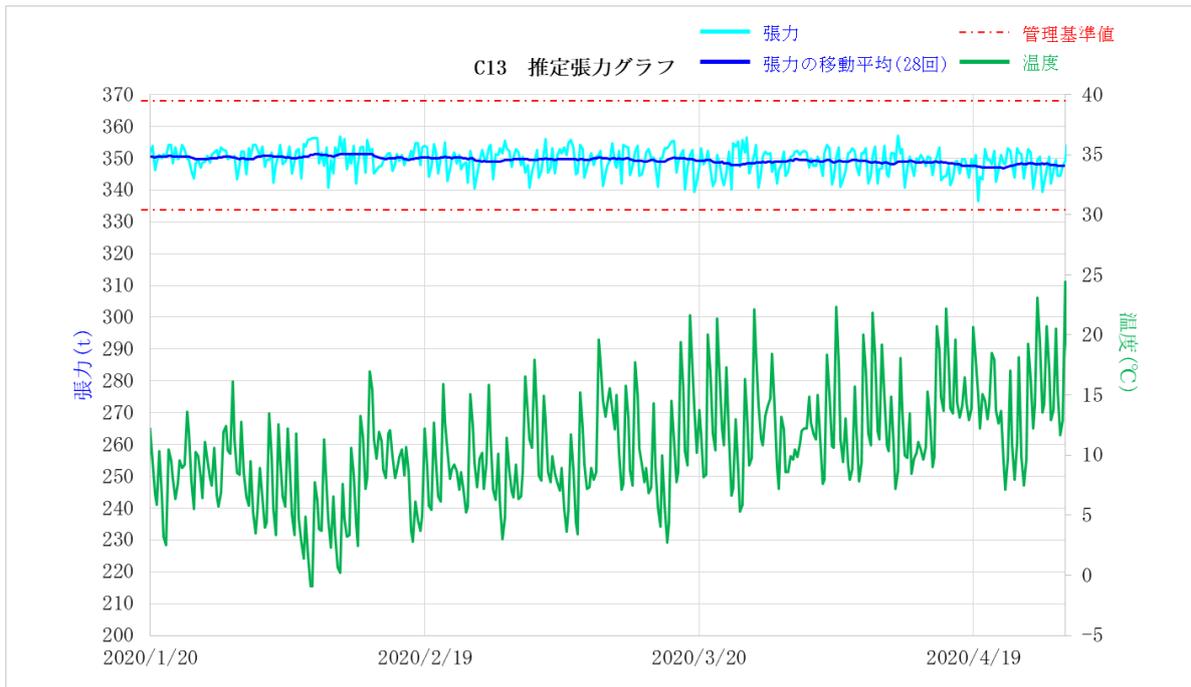


図 2.4.5 C13 の推定張力のグラフ

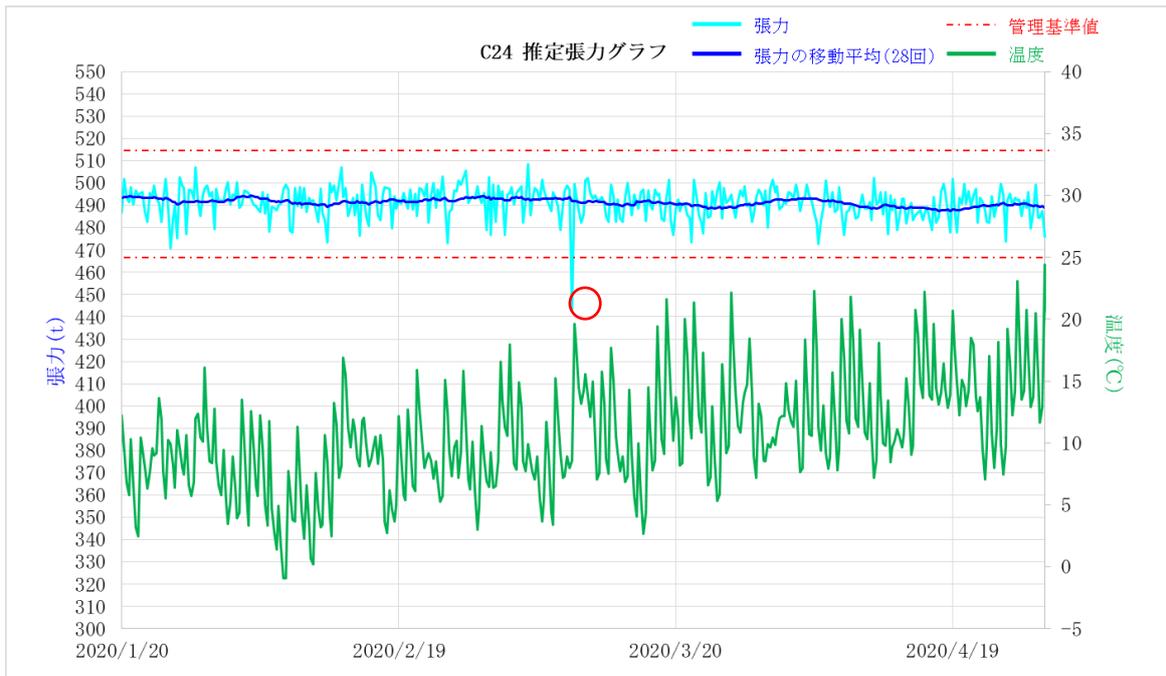


図 2.4.6 C24 の推定張力のグラフ

3 か月間以上の張力推移では、数%程度の変動があり、また、図 2.4.6 内の赤丸で示すような異常値を検出することがあった。車両通行等の外部条件が変化しているため、ときには揺れが小さいために固有振動数を検出できた次数が少ない場合などで最小二乗法の結果に影響する。これらの変動は、1 週間分（1 日 4 回×7 日=28 回）の移動平均をとってグラフ化することにより、±3%未満に低減することができた。温度の最小と最大の差が約 25°Cであったが、張力推定結果が大幅に変動することはなかったため、温度変化によって張力変化のモニタリングに与える影響は少ないと想定される。

2.5 保守

継続的にモニタリングを実施する場合、システムを構成する機器の定期交換、故障時の修理・交換などの保守が必要となる。表 2.5.1 に各機器の定期交換の目安を示す。本定期交換年数を越えて使用する場合は、モニタリング期間と合わせ定期交換を計画することが必要となる。電池交換時期は運用条件によって変動する可能性があるため、オンライン型システムでは加速度センサの電池電圧を遠隔で監視し、電池交換時期の目安とする。

表 2.5.1 定期保守の目安（例）

機器	定期交換年数	備考
加速度センサ	10 年	故障時は交換
加速度センサ用電池	5 年	
ゲートウェイ	5 年	故障時は修理または交換
サーバ	5 年	故障時は交換

添付資料 1：用語集

用語	意味	類義語・関連語
温度依存性	環境温度に依存して、計測値や性能が変動する特性のこと。程度差はあるが、万物に温度依存性は存在する。	温度特性
加速度センサ	加速度を計測するセンサ・計測器のこと。	
加速度分解能	加速度センサが計測できる最小の単位を指す。	
固有振動数	ある構造を持つ対象物が自由振動を行う時、その対象物が持つ固有の共振周波数のこと。構造・形状・材料、および密度等により決定される。	卓越振動数
サンプリング周波数	アナログ信号をデジタル化する際の標本化処理を行う頻度。通常、1秒間に行う標本化処理の回数として表す。	標本化周波数
データロガー	センサにより計測・収集した各種データ（電流値、電圧値など）をデジタル値に変換して保存する装置のこと。	
自由振動	構造物に外力が作用しない、復元力のみによる振動のこと。振動系に抵抗が存在する場合、減衰振動となる。	

第6編 塩害環境下のコンクリート構造物のモニタリング

1 章	塩害環境下のモニタリングの位置づけと種類	6-1
1.1	塩害を受けるコンクリート構造物におけるモニタリングの位置づけ	6-1
1.2	塩害モニタリングの種類と役割	6-4
2 章	塩分検知器による付着塩分のモニタリング	6-5
2.1	技術の概要	6-5
2.1.1	目的	6-5
2.1.2	モニタリングの概要	6-6
2.1.3	計測期間	6-7
2.2	モニタリングの方法	6-8
2.2.1	モニタリングの手順	6-8
2.2.2	計画	6-8
2.2.3	検知器の設置	6-9
2.2.4	測定	6-9
2.2.5	データの蓄積	6-9
2.2.6	費用の目安	6-10
2.3	結果の評価	6-10
2.4	保守	6-10
2.5	その他の塩分調査方法	6-10
3 章	模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング	6-14
3.1	技術の概要	6-14
3.1.1	目的	6-14
3.1.2	モニタリングの概要	6-14
3.1.3	計測期間	6-16
3.2	モニタリングの方法	6-16
3.2.1	モニタリングの手順	6-16
3.2.2	計画	6-16
3.2.3	機器の選定	6-17
3.2.4	機器の設置	6-18
3.2.5	計測	6-23
3.2.6	データの蓄積	6-23
3.2.7	費用の目安	6-24
3.3	結果の評価	6-25
3.4	保守	6-25
4 章	照合電極による進展期のモニタリング	6-26
4.1	技術の概要	6-26
4.1.1	目的	6-26
4.1.2	モニタリングの概要	6-26
4.2	モニタリングの方法	6-28

4.2.1	モニタリングの手順.....	6-28
4.2.2	計画.....	6-28
4.2.3	機器の選定.....	6-29
4.2.4	機器の設置.....	6-30
4.2.5	計測.....	6-35
4.2.6	データの蓄積.....	6-35
4.2.7	費用の目安.....	6-36
4.3	結果の評価.....	6-37
4.4	保守.....	6-37
5章	照合電極による補修効果のモニタリング.....	6-38
5.1	技術の概要.....	6-38
5.1.1	目的.....	6-38
5.1.2	モニタリングの概要.....	6-40
5.2	モニタリングの方法.....	6-42
5.2.1	モニタリングの手順.....	6-42
5.2.2	計画.....	6-42
5.2.3	機器の選定.....	6-43
5.2.4	機器の設置.....	6-43
5.2.5	データの蓄積.....	6-45
5.2.6	費用の目安.....	6-45
5.3	結果の評価.....	6-46
5.3.1	鋼材の電位の評価（マクロセル腐食）.....	6-46
5.4	保守.....	6-46
6章	適用事例.....	6-47
6.1	潜伏期・進展期における塩害モニタリング【6編3章・4章の事例】.....	6-47
	「沿岸部高架橋における付着塩分、塩分浸透及び鋼材腐食モニタリング」 ²⁾³⁾	6-47
6.2	塩害補修効果のモニタリング【6編5章の事例①】.....	6-52
	「塩害劣化桁の断面修復等の対策効果モニタリング」 ⁴⁾	6-52
6.3	塩害補修効果のモニタリング【6編5章の事例②】.....	6-55
	「小規模橋梁の塩害補修効果モニタリング」 ⁵⁾	6-55
	添付資料：用語集.....	6-60

1章 塩害環境下のモニタリングの位置づけと種類

1.1 塩害を受けるコンクリート構造物におけるモニタリングの位置づけ

コンクリート構造物の塩害は、塩分がコンクリート中に浸透したり施工時に内在塩分として存在することで、コンクリート中の鋼材の腐食が塩分の存在により発生・促進され、腐食生成物の体積膨張でコンクリートにひび割れや剥離が生じたり、鋼材の断面減少などを伴うことにより、構造物の性能が低下し、構造物が所定の機能を果たすことができなくなる現象である¹⁾。塩害の劣化過程と構造物の状態を表 1.1.1 に示す。

表 1.1.1 塩害の劣化過程と構造物の状態

劣化過程	説明	構造物の状態	事例
潜伏期	コンクリート中の鋼材の腐食が開始するまでの期間	・外観上の変状は見られない	
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間		
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	・腐食ひび割れや浮きが発生する ・錆汁が見られる	
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	・大規模な剥離・剥落が見られる ・鋼材の著しい断面減少が見られる ・変位、たわみが大きい	

劣化過程が加速期、劣化期に達した場合、対策が大掛かりとなるとともに再劣化が生じる可能性が高くなるため、塩害環境にあるコンクリート構造物の維持管理では、構造物が置かれている環境条件を把握し、潜伏期、進展期の段階で早期かつ効果的な予防保全対策を講じることが、ライフサイクルコスト低減の観点から重要である。一方、既に加速期、劣化期の段階にあり、補修・補強を行い供用する必要があるコンクリート構造物も多数存在する。このような構造物では、補修・補強の効果および持続性を確認しながら適切なタイミングで措置を行う必要がある。

我が国における土木構造物の維持管理は、まず、近接目視点検により外観変状を把握するのが一般的であり、塩害の影響を受けるコンクリート構造物も例外ではない。潜伏期、進展期の段階、あるいは補修・補強を終えて再劣化が生じるまでの段階では、構造物の表面に変状が現れないため、管理者は構造物の状態を詳細に把握することが困難である。すなわち、管理者は最も効果的な対策である予防保全を行うべき段階において、判断材料が不足することになる。そこで、管理者が適切な判断を行うための情報を得るために、調査やモニタリングが必要となる。塩害対策の検討における管理者の目的と調査・モニタリングの位置づけを表 1.1.2 及び表 1.1.3 に示す。なお、本編では塩害の代表的な要因とされる海岸の飛来塩分または凍結防止剤による劣化を想定している。表 1.1.2 は供用開始後に塩害劣化したコンクリート構造物の劣化過程における調査・モニタリングの位置づけを整理した。また、表 1.1.3 は塩害対策の実施後における調査・モニタリングの位置づけを整理した。なお、本編では再劣化の事例が多い断面修復工法に対して、現場実証を行った内容を記載している。

加速期、劣化期に達したコンクリート構造物においては、変状が目視で確認できる、あるいは各部材の挙動として現れるため、これらの状況を把握するモニタリングについては、「第3編 コンクリート桁のモニタリング」を参照されたい。

表 1.1.2 塩害対策の検討における調査・モニタリングの位置づけ（塩害劣化したコンクリート構造物）

劣化過程	調査・モニタリングの目的	調査・モニタリングの課題	調査の必然性	モニタリングの必然性	調査・モニタリングの方法	
					調査 (1回で完結)	モニタリング (経時変化を把握)
潜伏期 進展期	多くの構造物の中から塩害対策の詳細調査(浸透塩分あるいは鋼材腐食の把握)を行うべき構造物を選定する。	塩害環境の程度を、立地条件や外観目視で得られる情報だけでは適切に把握できない場合がある。	構造物が置かれた塩害環境の程度を定量的なデータで把握し、評価する必要がある。	構造物が置かれた塩害環境の経年的変化を定量的に把握し、評価する必要がある。	飛来塩分調査 (飛来塩分捕集器, ガーゼ法)	—
	構造物の中で、詳細調査またはモニタリングを行う位置・範囲を絞り込む。	詳細調査を行うべき位置・範囲を、外観目視で得られる情報だけでは適切に絞り込めない場合がある。	定量的なデータで構造物表面の塩分分布を把握した上で詳細調査位置や範囲を絞り込む必要がある。	年間の季節変動に応じた付着塩分を定量的に把握し、塩害を受ける位置や範囲を把握する必要がある。	付着塩分調査 表面塩分調査	塩分検知器 (薄板モルタル, ワッペン)
	構造物の診断・劣化進行予測精度を高める。	コンクリート内部の塩分浸透状況を外観目視で把握できないため、劣化予測や診断の精度が低くなる。	塩分浸透量測定によりコンクリート内部への塩分浸透状況を把握する必要がある。	表面からの塩分浸透状況を経時的に把握し、対策時期を決定する必要がある。	浸透塩分調査 (コア採取, 塩分分析, EPMA 面分析等)	模擬鉄筋による電圧、抵抗測定
		内部鋼材の腐食発生の時期や状況を外観目視で把握できないため、診断精度が低くなる。	内部鋼材の腐食状況や腐食に関するデータにより、内部鋼材の腐食発生や腐食状況を把握する必要がある。	内部鋼材の腐食に関するデータを経時的に把握し、腐食の発生時期を把握する必要がある。	電気化学的調査 (自然電位法) 鋼材腐食調査 (はつり, 腐食状況調査)	照合電極による電位測定 (鉛式, 小型)
		内部鋼材の腐食速度を外観目視で把握できないため、劣化予測や診断精度が低くなる。	定量的なデータにより内部鋼材の腐食速度を把握する必要がある。	内部鋼材の腐食進行性を経時的に把握する必要がある。	電気化学的調査 (分極抵抗法)	—
加速期 劣化期	「第3編 コンクリート桁のモニタリング」を参照					

表 1.1.3 塩害対策の検討における調査・モニタリングの位置づけ（塩害対策後のコンクリート構造物）

補修工法	得られる効果	調査・モニタリングの目的	調査・モニタリングの課題	調査のニーズ（必要性）	モニタリングのニーズ（必要性）	調査・モニタリングの方法	
						調査（1回で完結）	モニタリング（経時変化把握）
表面被覆工法	外部からの塩分侵入の低減または遮断による、鋼材腐食の抑制	表面被覆の局所的な損傷箇所を早期に検知する。	目視で把握が困難な微小な損傷箇所を広範囲から検知するのは困難である。	広範囲から表面被覆の劣化、損傷箇所を効率的に探知する必要がある。	—	赤外線法 表面被覆の浮き剥離の調査	—
			表面保護機能の低下が顕在化している箇所を検知する。				
表面含浸工法			表面保護効果が目視で確認できないため、塩分浸透を見過す場合がある。			コア採取分析	模擬鉄筋
断面修復工法	塩分が浸透したコンクリートの除去による、鋼材腐食の防止	再劣化（マクロセル腐食）が顕在化する時期と箇所を検知する。	塩分浸透コンクリートを十分除去できず、未補修部コンクリートに塩分が残ると、補修境界部にマクロセル腐食が発生する場合がある。	未補修部の塩分浸透状況を把握する必要がある。	未補修部の塩分浸透状況を経時的に把握する必要がある。	コア採取分析 蛍光 X 線	—
				マクロセル腐食の発生を把握する必要がある。	マクロセル腐食の発生の時期を把握する必要がある。	—	鉛式照合電極 小型照合電極
脱塩工法	浸透した塩分の除去による鋼材腐食の抑制	脱塩後、コンクリート中に残った塩分の再拡散状況を把握する。	十分に脱塩できない場合があり、塩化物イオンが再拡散する場合がある。	塩分の再拡散状況を把握する必要がある。	塩分の再拡散した状況を経時的に把握する必要がある。	コア採取分析	模擬鉄筋
				内部鋼材の腐食状況を把握する必要がある。	内部鋼材の腐食状況を経時的に把握する必要がある。	—	鉛式照合電極 小型照合電極
電気防食工法	防食電流の供給による鋼材腐食の停止	電気防食効果を確認する。 防食効果が失われた状況を把握する。	陽極材消耗やシステムトラブル等により、防食電流が供給されず、鋼材腐食が再び生じる可能性がある。	電気防食効果を把握する必要がある。	電気防食効果を経時的に把握する必要がある。	—	復極量測定
				内部鋼材腐食を定量的に検知する必要がある。	内部鋼材腐食を経時的に把握する必要がある。	—	鉛式照合電極 小型照合電極

※赤枠は本編で記載する内容を示す。

1.2 塩害モニタリングの種類と役割

塩害劣化過程におけるモニタリングの種類と役割を図 1.2.1 に示す。前述したとおり、塩害を受ける構造物の維持管理において、潜伏期及び進展期の劣化状況を把握し、適切な予防対策を行うことが効果的な維持管理となることを踏まえて、ここでは潜伏期と進展期に対するモニタリングを示している。付着塩分の把握は、対象構造物において、塩害を受けている代表的な箇所を把握・抽出することが重要である。また、断面修復等の塩害補修効果を把握するためのモニタリングも重要である。各手法の概要を表 1.2.1 に示す。

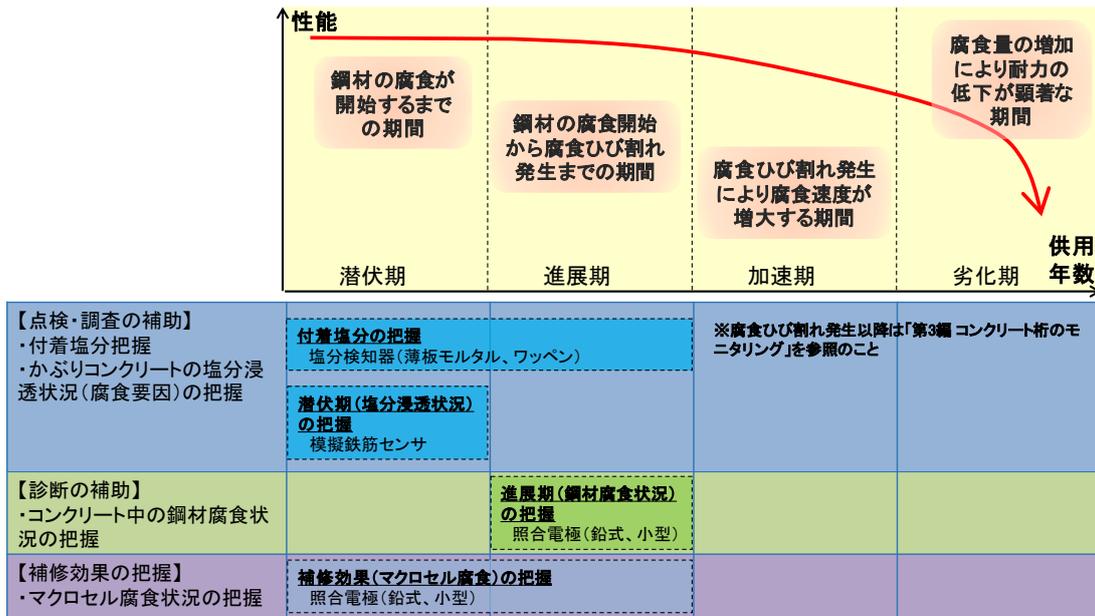
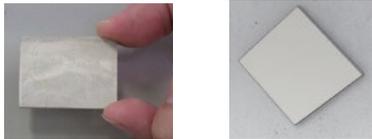
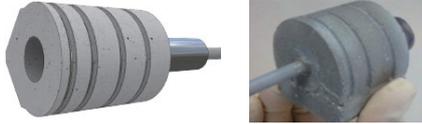
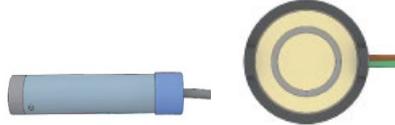
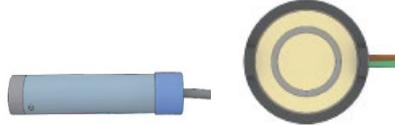


図 1.2.1 塩害を受けるコンクリート構造物の劣化過程とモニタリングの種類と役割

表 1.2.1 塩害モニタリング手法の概要

目的(対象)	概要	センサの例
付着塩分の把握	塩分検知器(薄板モルタルやワッペン)を表面に設置して、付着塩分を把握する。	
潜伏期(塩分浸透状況)の把握	模擬鉄筋をかぶりコンクリートに設置し、塩分浸透や腐食要因の浸透状況を把握する。	
進展期(鋼材腐食状況)の把握	照合電極(鉛式、小型)を鋼材近傍に設置して、腐食状況を把握する。	
補修効果(マクロセル腐食)の把握	照合電極(鉛式、小型)を断面修復境界部に設置して、鋼材のマクロセル腐食状況を把握する。	

2章 塩分検知器による付着塩分のモニタリング

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

コンクリート構造物の塩害は、構造物の表面から塩分等の劣化因子が侵入することにより発生する。劣化因子の一つである塩分が構造物に付着、浸透することが塩害劣化を引き起こす原因である。そのため、塩害環境下の構造物の維持管理では、まず構造物が置かれている塩害環境を把握することが重要である。対象となる構造物において塩分がどの程度供給され（飛来、散布、付着、洗い流しなど）、内部に浸透するかを把握することは、劣化予測を行うためにも重要である。

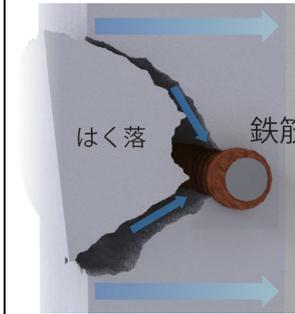
潜伏期	進展期	加速期	劣化期
 <p>塩分の浸透</p> <p>鉄筋</p>	 <p>塩分の浸透</p> <p>鉄筋</p>	 <p>鉄筋</p> <p>ひび割れから塩分、水、酸素が直接侵入</p>	 <p>鉄筋</p> <p>はく落</p>
<p>鉄筋：腐食なし</p> <p>外観：ひび割れなし</p>	<p>鉄筋：部分的腐食</p> <p>外観：ひび割れなし</p>	<p>鉄筋：全体的な腐食</p> <p>外観：ひび割れあり</p>	<p>鉄筋：断面減少</p> <p>外観：はく落</p>

図 2.1.1 本章のモニタリング技術の適用範囲（赤枠）

RC 及び PC 構造物の塩害は、前述したように塩分がコンクリート表面に付着し、コンクリート内部に浸透することにより、通常高アルカリ性のコンクリートで保護されている鋼材が腐食する現象である。

鋼材腐食は、基本的には水と酸素の存在により起こるものであり、その腐食を促進する因子として、気温、湿度、降雨量、日照時間、風向、風速などの気象条件と、海からの飛来塩分や路面に散布される凍結防止剤の塩分などがあり、これらは腐食の発生・進行に強く影響する。

これらの塩害環境の評価は、対象とする橋梁において、年間を通して風向きや風速、橋梁周辺の地形、構造形式等を考慮したうえで、塩分が橋梁に付着する傾向を把握することが重要である。橋梁において、付着する量は様でなく、風の吹き溜まりや水掛かりなどによってもその分布が異なるため、これらに配慮した橋梁の塩害環境を評価しなければならない。

本章で述べる塩分検知器は橋梁へ付着する塩分量を測定することを目的として、対象橋梁の塩害環境の推定や部材ごとの塩分の付着分布を把握しモニタリングすることが可能になる。

図 2.1.2 は塩分の輸送過程を示したものである。海からの飛来塩分を想定しており，道路で散布される凍結防止剤の塩分については，排水経路や通行車両の路面水の跳ね上げによる供給が想定される。

図 2.1.2 のうち，塩害環境把握には，対象構造物周辺で塩分がどの程度飛んでくるのか（飛来塩分量がどれくらいか），塩分がどの程度付着するか（表面の付着塩分量がどれくらいか）を把握することが重要である。

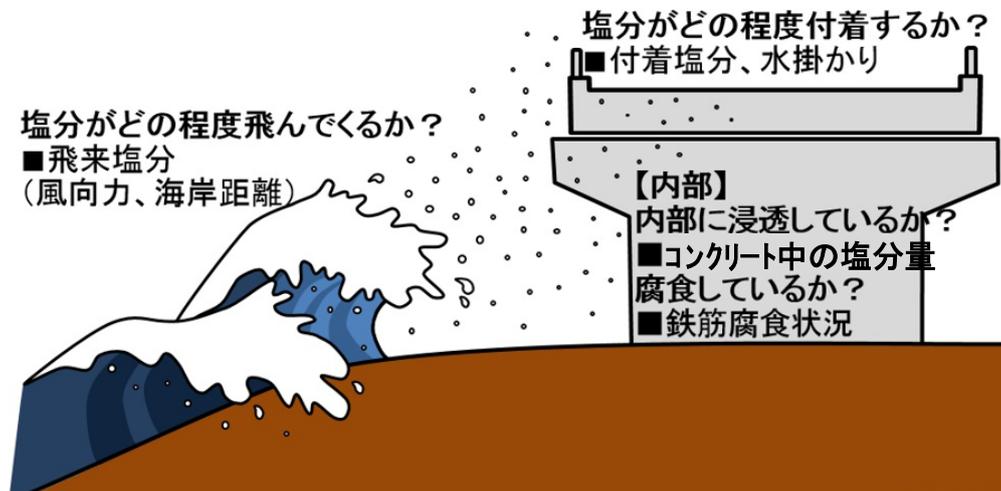


図 2.1.2 塩分の輸送過程のイメージ図

2.1.2 モニタリングの概要

(1) 薄板モルタルによる付着塩分の測定

薄板モルタルを対象橋梁に設置し，一定暴露期間後に回収，粉碎，分析することにより，薄板モルタルに付着・浸透した塩分量を把握するものである。薄板モルタルは，普通ポルトランドセメントと標準砂等を用いて作製したものである。設置条件や用途により，形状や寸法が異なるが，過去の測定事例では小型の板状（30mm×40mm×5mm）のものが多い。また，モルタル製であることから，コンクリート構造物と同様に洗い流しの影響も考慮することができる。

なお，薄板モルタルは構造物の表面コンクリートがむき出しの場合に用いる。樹脂等で表面が被覆されている場合は，(2) のワッペンによる手法を用いる。

測定の際は，対象橋梁の代表的な位置を選定して設置する。また，塩分供給量の季節変動等の影響を考慮して測定期間を定める。



図 2.1.3 薄板モルタルの例

(2) ワッペンによる付着塩分の測定

耐候性鋼材の小型試験片（ワッペン試験片）を表面に貼り付け、一定期間暴露後の付着塩分量や腐食減耗量から、塩害環境を把握する方法である。この手法は、耐候性鋼材に付着した塩分を測定する方法であり、コンクリートの表面を樹脂系等の材料で表面被覆を施してある場合や含浸材や被覆材などで表面保護を施してある場合の付着塩分を把握するために本手法を用いることができる。

測定の際は、薄板モルタルの場合と同様に、対象橋梁の代表的な位置を選定して設置する。また、塩分供給量の季節変動等の影響を考慮して測定期間を定める。

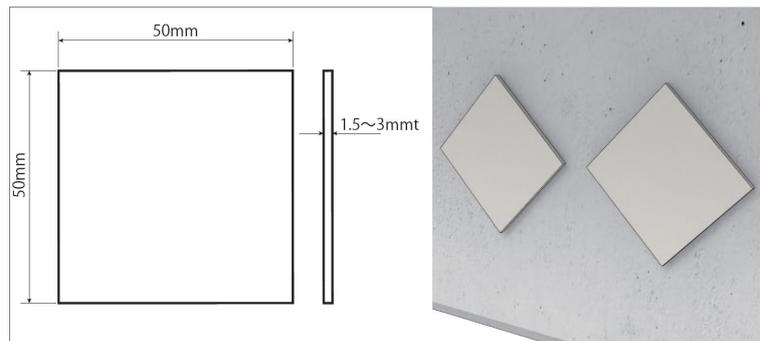


図 2.1.4 ワッペンの例

2.1.3 計測期間

本手法を用いる場合は、塩分供給量の季節変動を考慮して、1年を通じた計測を行う。各季節での計測は3ヶ月を目安として実施することが望ましい。年間の計測は、計測箇所ごとに5枚の使用を基本として、3ヶ月間の計測を4回、通年の計測を1回実施する。

一度回収した検知器は再利用ができないため、計測回数や放置期間に応じて数量を決める。基本的な1年間の実施工程の例を図2.1.5に示す。

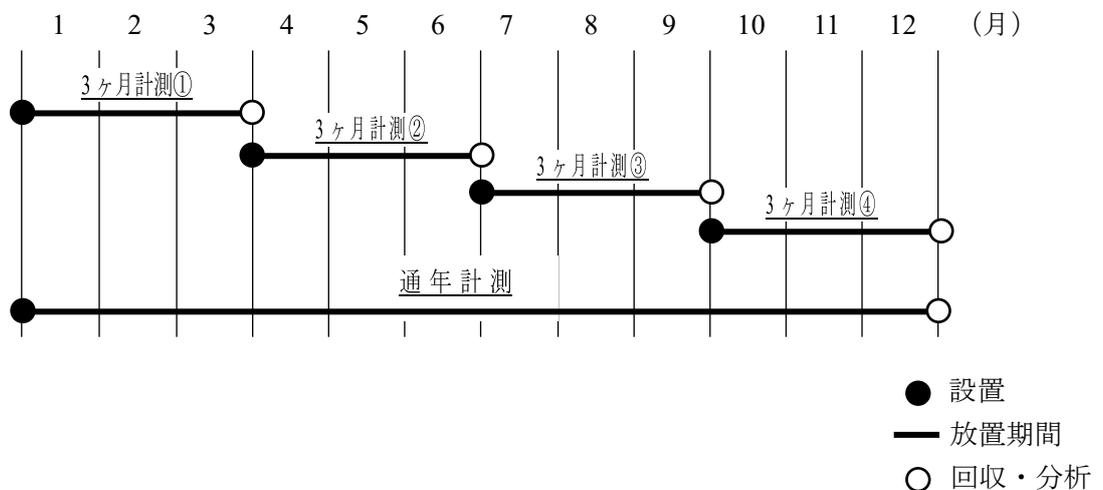


図 2.1.5 実施工程の例

2.2 モニタリングの方法

2.2.1 モニタリングの手順

付着塩分のモニタリングの基本的な手順を図 2.2.1 に示す。

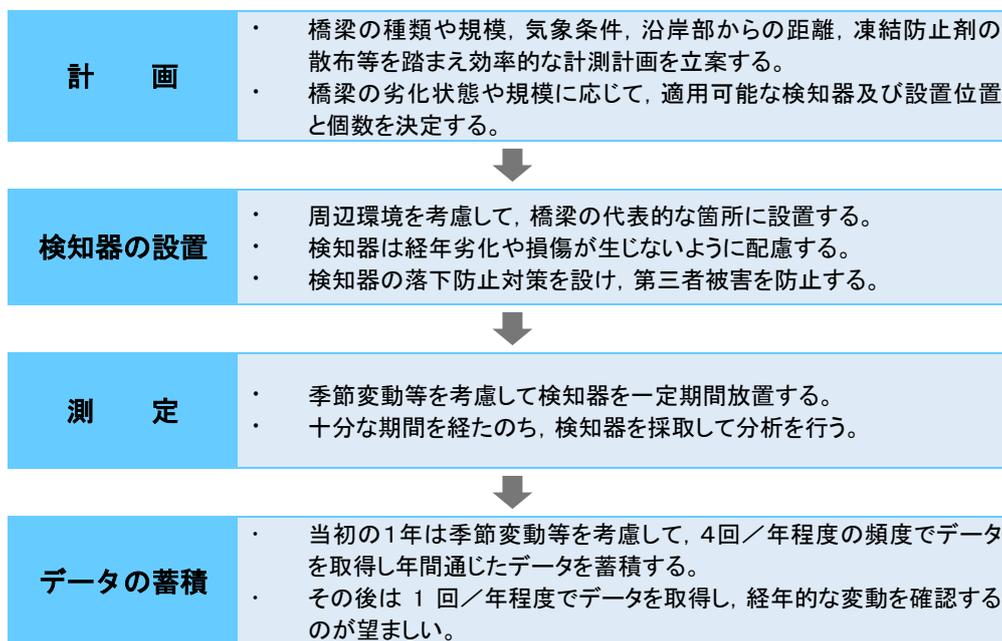


図 2.2.1 付着塩分のモニタリング手順

2.2.2 計画

モニタリングを導入する前に, 必要なセンサの数量や設置の手順を立案するために, 対象橋梁の構造形式や規模を調査する。その他に, 構造物の劣化状態や, 雨がかり状況や路面の状態なども外観目視により把握しておく。また, 機器の設置に際して, 安全に設置や測定が実施できるかを確認する。

塩害環境を把握する場合, 対象構造物の海岸線からの距離や凍結防止剤の散布状況等を事前に調査する。また, 設置後に風雨等で不具合が起きないように設置環境を確認する。

検知器の選定は, 対象橋梁の表面状態によって判断する。表面がコンクリートの場合は薄板モルタルを用い, コンクリートの表面に被覆が施されている場合はワッペンを用いる。なお, その他の手法を用いる場合は, 表 2.2.1 の要求性能を満足する機器を選定する必要がある。

検知器の設置位置は, 海からの距離, 方向, 構造物の形状, 雨掛かりなどによって, 構造物の中で塩害を受けやすい箇所, 受けにくい箇所があるため, これを事前に把握し選定するのがよい。対象橋梁のうち最も厳しい塩害環境をモニタリングする場合は, 塩分供給量が多く雨掛かりによる洗い流しが起きにくい場所など, 塩分が最も付着しやすい位置に設置する。対象橋梁の中で付着塩分の分布を把握する場合には, 塩分の付着しやすさや雨掛かりの影響の大小を考慮して複数箇所に設置する必要がある。

表 2.2.1 塩害環境を把握するモニタリングシステムの要求性能

測定対象	項目	性能
付着塩分	測定	表面に付着した塩分を確実に回収し、測定ができること。 表面に付着した塩分または表層に浸透した塩分を測定できること。
	耐久性	雨風等により欠損・脱落がないこと。

2.2.3 検知器の設置

検知器の設置手順について、手順の概要を図 2.2.2 に示す。

計画で決定した設置位置や設置面の方向を現地で確認するとともに、設置のための事前準備（足場の確保など）を行う。設置の際には、表面を清掃し、薄板モルタルやワッペン^①の付着を確保し、必要に応じて落下防止対策を講じる。設置後に設置位置の状況を記録する。

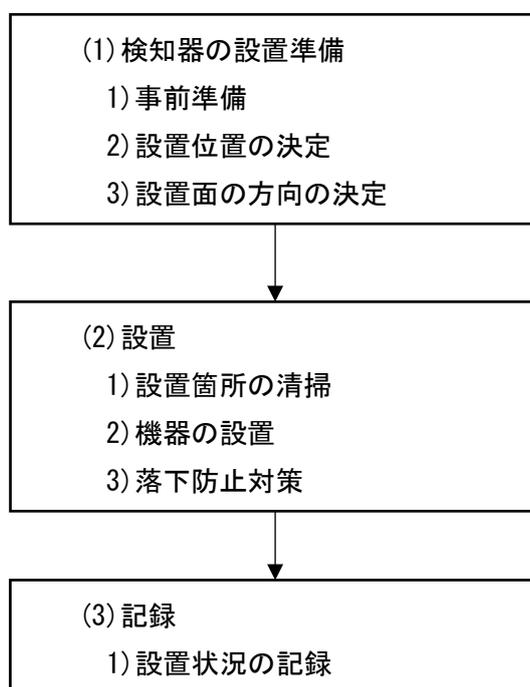


図 2.2.2 検知器設置手順の概要

2.2.4 測定

設置した検知器を一定期間放置したのち、検知器を回収して分析・測定を行う。薄板モルタルの場合は、検知器を回収後に破碎・調製し、モルタルに含有している塩分量を計測する。ワッペン^①の場合は、検知器を回収し表面に付着している塩分を水に溶解させ、塩分濃度計を用いて塩分量を計測する。なお、薄板モルタルは kg/m^3 、ワッペン^①は mg/m^2 でのデータを得ることができる。

2.2.5 データの蓄積

塩害環境は、季節変化による影響が大きいため、年間を通じてデータを把握するとよい。機器を設置した後、1年間は4回/年程度の頻度でデータを取得し、1年の間での変化を把握することを基本とする。また、1年間の変化の再現性、つまり年毎に変化を把握したうえで、年次変化を把握する場合には、塩害環境が最も厳しい時期に経年的にデータを取得することが望ましい。

2.2.6 費用の目安

付着塩分のモニタリングにおける費用の目安を表 2.2.2 に示す。

表 2.2.2 付着塩分モニタリングの費用の目安

項目	摘要
計測箇所数	1 箇所 (5 枚)
測定期間	1 年間
測定頻度	4 回/年
作業環境	特殊な足場が不要な橋
データ回収方法	手動
材料費	10 万円
設置費	10 万円
データ分析費	40 万円
総計	60 万円

※検知器の種類や現場の条件により費用が異なる。

※複数橋梁を同時期に行う場合は 1 橋当たりの費用は上記より減額となる。

2.3 結果の評価

蓄積されたデータを基に、対象橋梁の代表的な位置に付着している塩分量を把握することができる。さらに、複数箇所でのデータを取得することで、橋梁全体の付着塩分の分布を把握でき、塩害環境の厳しい箇所を特定することができる。

各手法の評価については、薄板モルタルでは「道路橋示方書 III コンクリート橋・コンクリート部材編」に記載の塩害の影響度合い及び「コンクリート標準示方書 設計編」の表面塩化物イオン濃度の基準値を参考とした場合、計測値が 1.5 kg/m^3 以上の場合で塩害の影響を受けると判断できる。一方で、ワッペンでは「鋼道路橋防食便覧」での塗装に関する管理基準を準用すると、 50 mg/m^2 以上の場合に塩害の影響が懸念される。

また、薄板モルタルでは今後の劣化予測解析の際に用いるコンクリート表面における塩化物イオン濃度を得ることも可能である。なお、劣化の予測方法はコンクリート標準示方書 設計編を参照されたい。

2.4 保守

塩害環境を把握する検知器は、厳しい塩害環境に設置することが多いため、耐久性を考慮した各手法の取り扱い注意事項に従って保守を行う。

2.5 その他の塩分調査方法

前述では付着塩分を把握する手法として薄板モルタル及びワッペンを紹介したが、表 2.5.1～表 2.5.3 にこれら以外の塩分調査方法を紹介する。表 2.5.1～表 2.5.3 には飛来塩分、付着塩分、表面塩分を把握する手法を示したが、目的や測定条件に応じてこれらの手法を参考にされたい。

表 2.5.1 塩分調査方法一覧 (1 / 3)

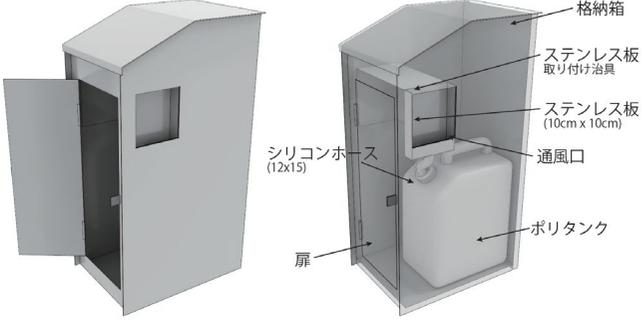
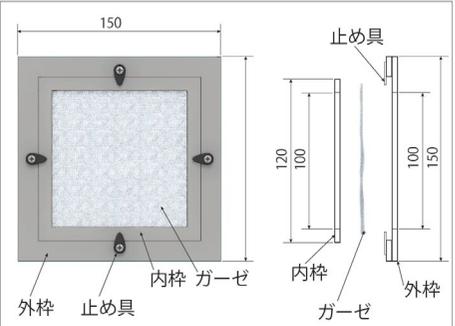
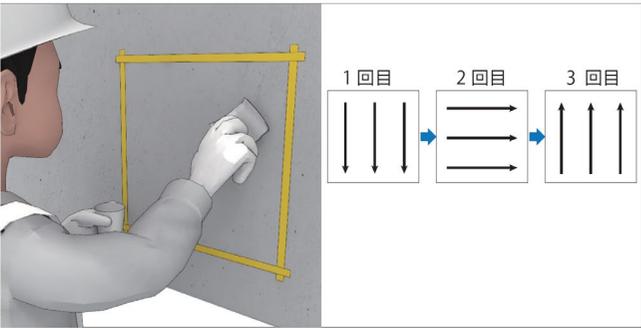
測定対象	手法	機器または測定の例	概要
飛来塩分	飛来塩分捕集器		<p>100mm×100mmのステンレス板に付着した塩分を雨水とともに、ポリタンク内に回収し、その塩分濃度から飛来塩分を算出する方法である。</p>
	ガーゼ法		<p>ガーゼ法は JIS Z 2382 に基づく方法であり、外寸法 150×150mm、内寸法 100×100mmの外枠に、外寸法 120×120mm、内寸法 100×100mmの内枠をはめ込み式にしてガーゼを挟み、雨水が直接かからないようにして飛来塩分を捕集するものである。</p>
付着塩分	ガーゼ拭き取り法		<p>測定物表面に付着している塩分をガーゼで拭き取り、脱イオン水に溶解させて塩素イオン検知管（以下検知管という）を用いて付着塩分量を測定する方法である。</p>

表 2.5.2 塩分調査方法一覧 (2 / 3)

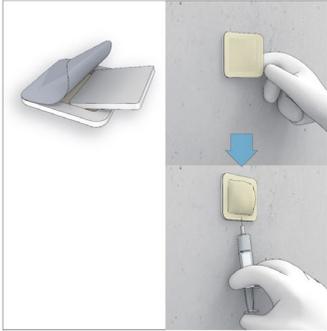
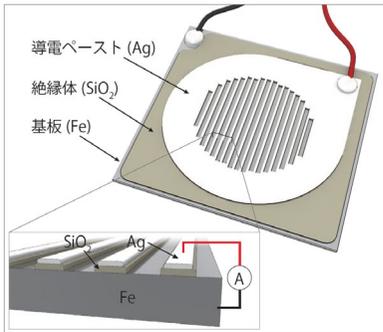
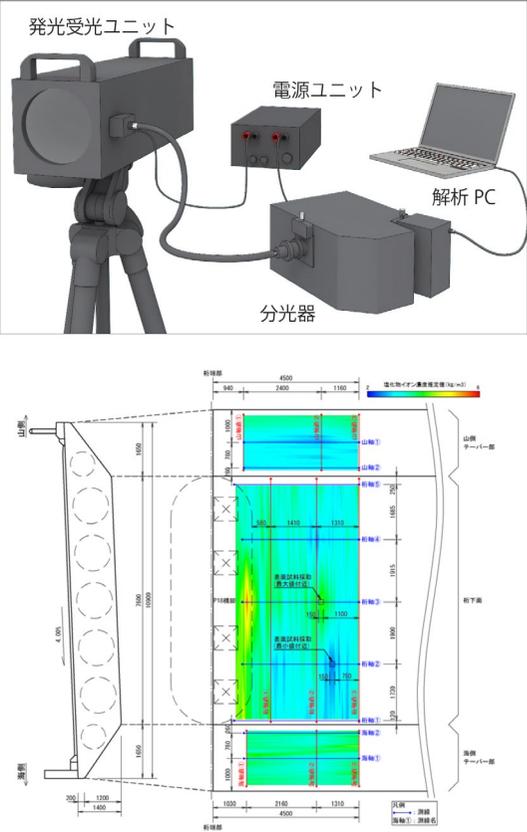
測定対象	手法	適用例	概要
付着塩分	ブレッセル法		<p>測定物表面に測定セルを貼り付け、脱イオン水を注射器により注入し塩分を溶出させる。注射器で抜き取った試料液は塩素イオン検知管により濃度を読み取り 1m² 当りの付着量に換算する方法である。</p>
	電導度法		<p>測定物表面に付着している塩分を脱イオン水に溶出させ、この塩分溶出液の電導度を測定し、塩分濃度に換算して塩分量を求める方法である。</p>
	ACM センサ		<p>ACM(Atmospheric Corrosion Monitor)型腐食センサによる方法は、環境因子により電気化学的に発生する金属の腐食電流を計測する手法であり、その計測結果を用いて大気環境の腐食性を定量的に評価する。</p>

表 2.5.3 塩分調査方法一覧 (3 / 3)

<p>表面塩分</p>	<p>近赤外線分光法</p>		<p>果実の糖度を分類するための分光分析を応用したもので、機器内部に内蔵したハロゲンライトから、近赤外光線をコンクリート表面に照射し、はね返った光を同じ機器に内蔵している光ファイバーで集光して、光の波形を解析することにより、コンクリート表面の塩化物イオン濃度を測定する方法である。</p>
-------------	----------------	---	--

3章 模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング

3.1 技術の概要

3.1.1 目的

コンクリート構造物の塩害は、構造物の表面から塩分等の劣化因子が侵入することにより発生する。劣化因子が鉄筋位置まで達すると、鉄筋腐食が発生し腐食ひび割れやかぶりコンクリートの浮きが生じる。このような状態は加速期、劣化期の段階であり、外観上の変化が表れた状態では対策が大掛かりになるとともに再劣化の可能性が高まる。そのため、塩害環境下の構造物の維持管理では、外観上の変状が見られない潜伏期、進展期の段階で、劣化因子の侵入を捉えることが必要とされる。本章では、潜伏期の段階における、かぶりコンクリートの劣化因子の侵入状況をモニタリングする技術を示す。

潜伏期	進展期	加速期	劣化期
鉄筋：腐食なし 外観：ひび割れなし	鉄筋：部分的腐食 外観：ひび割れなし	鉄筋：全体的な腐食 外観：ひび割れあり	鉄筋：断面減少 外観：はく落

図 3.1.1 本章のモニタリング技術の適用範囲（赤枠）

3.1.2 モニタリングの概要

(1) モニタリングの原理

潜伏期の段階での塩害の劣化因子の侵入を捉える手法として、模擬鉄筋をセンサとしたモニタリングがある。ここでの模擬鉄筋とは、構造物内部の鉄筋と同様に塩害が及ぶことで錆を生じる鉄線や鉄板などを指している。模擬鉄筋をコンクリート中に埋設し、劣化因子が模擬鉄筋まで到達して模擬鉄筋が腐食や破断することによって生じる電圧や抵抗の変化により、劣化因子の侵入の有無を検知する（図 3.1.2 参照）。また、模擬鉄筋を任意の深さに複数個配置することによって、構造物表面からの劣化因子の侵入状況を段階的に把握することが可能となる。

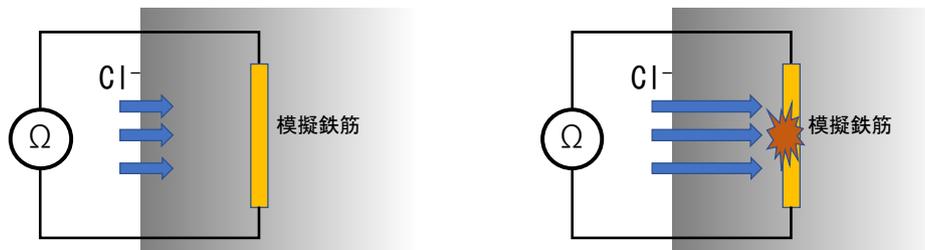


図 3.1.2 模擬鉄筋センサによる塩害環境の検知イメージ（抵抗値測定の場合）

(2) 標準的なシステム

模擬鉄筋センサによる標準的なシステムを図 3.1.3 に示す。コンクリート中に埋設した模擬鉄筋をリード線で導通して、コンクリート外部まで配線する。外部に配線したケーブルとデジタルマルチメータを接続し、電圧や抵抗等の電気的特性を計測する。初期の計測値に対して、電気特性に変化がある場合は、劣化因子が侵入し模擬鉄筋が腐食している可能性が高いことが把握できる。模擬鉄筋センサの例を図 3.1.4 に示す。

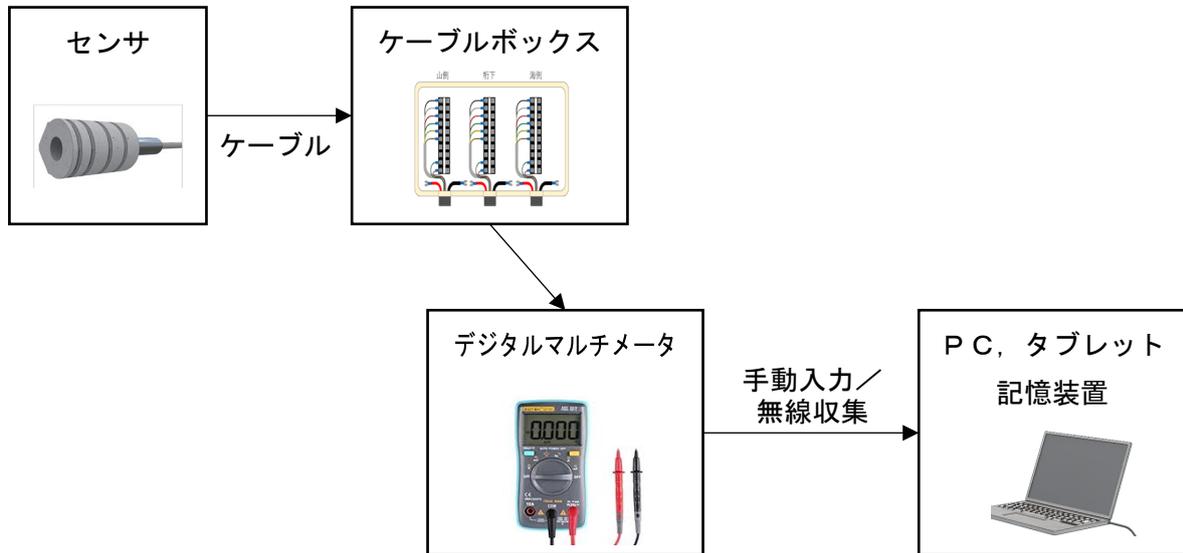


図 3.1.3 模擬鉄筋センサによるモニタリングシステムの構成例

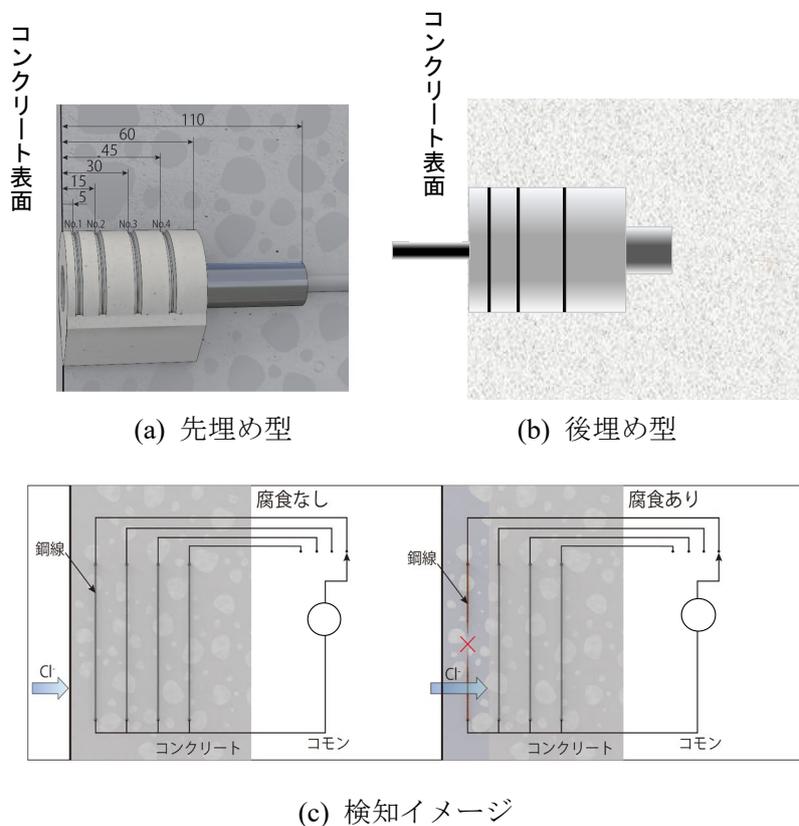


図 3.1.4 模擬鉄筋センサの例

3.1.3 計測期間

本手法は設置後から模擬鉄筋の電気的特性が変化するまで継続した計測を行う。設置当初は1回/月程度の計測頻度で実施し、その後は計測値の状況に応じて計測頻度を決定する。いずれかの模擬鉄筋で電気的特性の変化が見られた場合は、計測頻度を見直すことが望ましい。

3.2 モニタリングの方法

3.2.1 モニタリングの手順

モニタリングの基本的な手順を図3.2.1に示す。

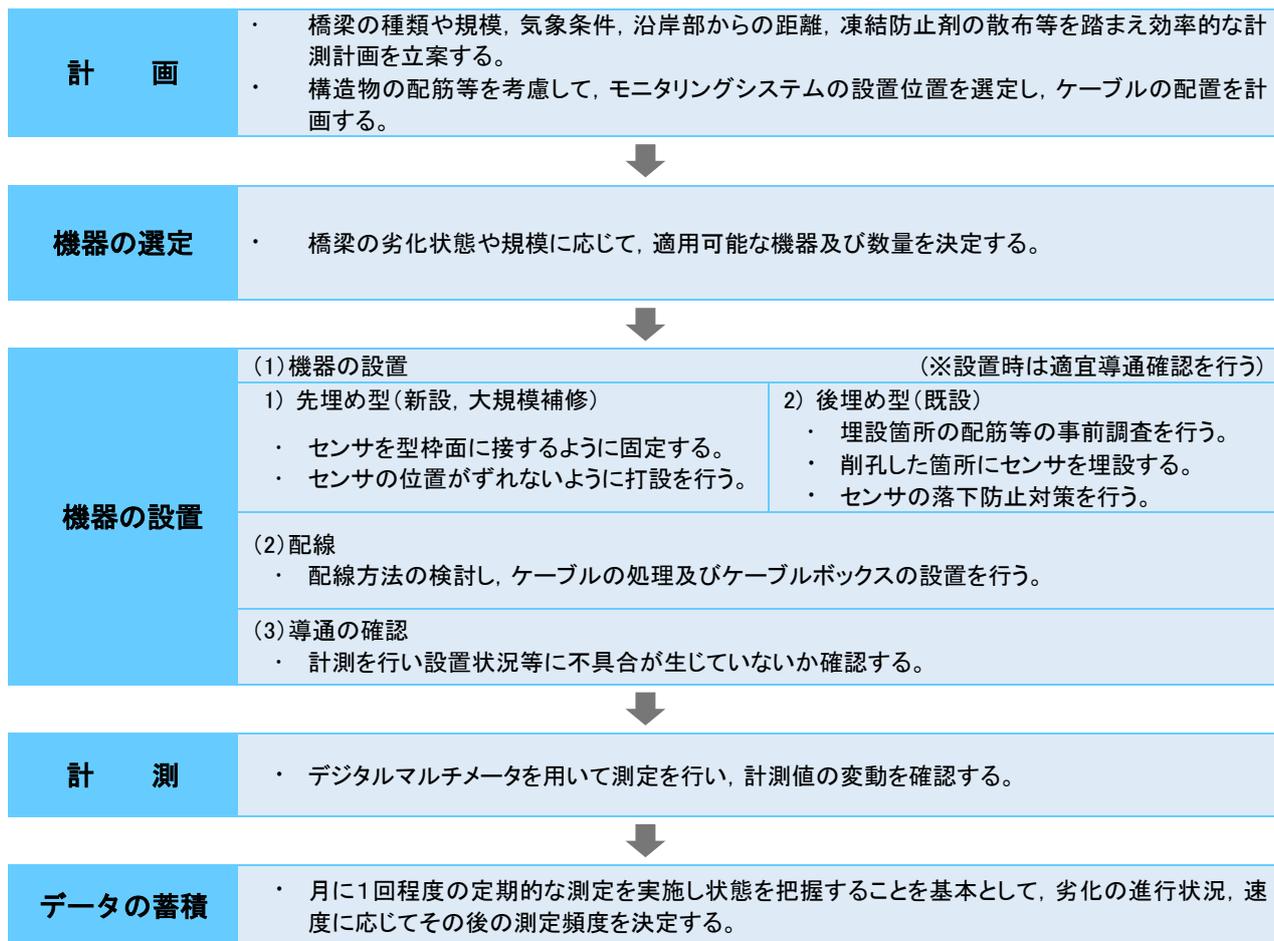


図 3.2.1 模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング手順

3.2.2 計画

(1) 橋梁の種類や規模

モニタリングシステムを導入する前に、必要なセンサの数量や設置の手順を立案するために、対象橋梁の構造形式や規模を調査する。その他に、構造物の劣化状態や、雨がかり状況や路面の状態なども外観目視により把握しておく。

また、配線や計測ボックスの設置に際して、安全に施工や計測が実施できるか確認する。

(2) 周囲の環境条件

塩害を対象とする場合、沿岸部からの距離等の飛来塩分の供給に係わる情報や凍結防止剤の散布状況等を調査する。塩分環境が明確でない場合や複数のセンサ設置が困難である場合は、第2章の塩分検知器による付着塩分のモニタリングを実施したうえで、計画を立案することが望ましい。

また、導入後の保守に関して風雨等でモニタリングシステムに不具合が起きないように、設置環境を確認する。

3.2.3 機器の選定

構造物の劣化状況や周辺環境に応じて、状態を把握するうえで必要な機器、数量を決定する。劣化過程が潜伏期にある場合は、外観目視で劣化状況の判断が困難であるため、いくつかのモニタリングシステムを併用して設置することも有効である。

本モニタリングシステムの要求仕様を表3.2.1に示す。

表 3.2.1 模擬鉄筋センサによるモニタリングの要求性能

	項目	仕様
センサ	検知性能	塩害環境を受けることで鉄筋と同程度に腐食し、短期間で切断する細い材料を模擬鉄筋として使用していること。例えば $\phi 0.1\text{mm}$ 程度の鉄線とする。
	寸法	かぶりコンクリート内に設置できる寸法であること。埋設時の削孔等で内部の鉄筋に干渉しないこと。
ケーブル	耐久性	設置対象環境の気温・湿度・紫外線等に対し、被覆等が耐候性を有していること。
	寸法	施工時や屋外環境において断線等を引き起こさない径とすること。例えば $\phi 7.5\text{mm}$ 程度とすること。
ケーブルボックス	耐久性	設置対象環境の気温・湿度・紫外線等に対し、耐候性を有していること。想定される外力に対して強度を有していること。
デジタルマルチメータ	分解能	抵抗値 0.1Ω または電圧値 0.1mV が計測可能であること。
	入力抵抗	$100\text{M}\Omega$ 以上であること。

3.2.4 機器の設置

機器の設置手順について、概要を図 3.2.2 に示す。なお、本手順は後埋め型のセンサの手順である。

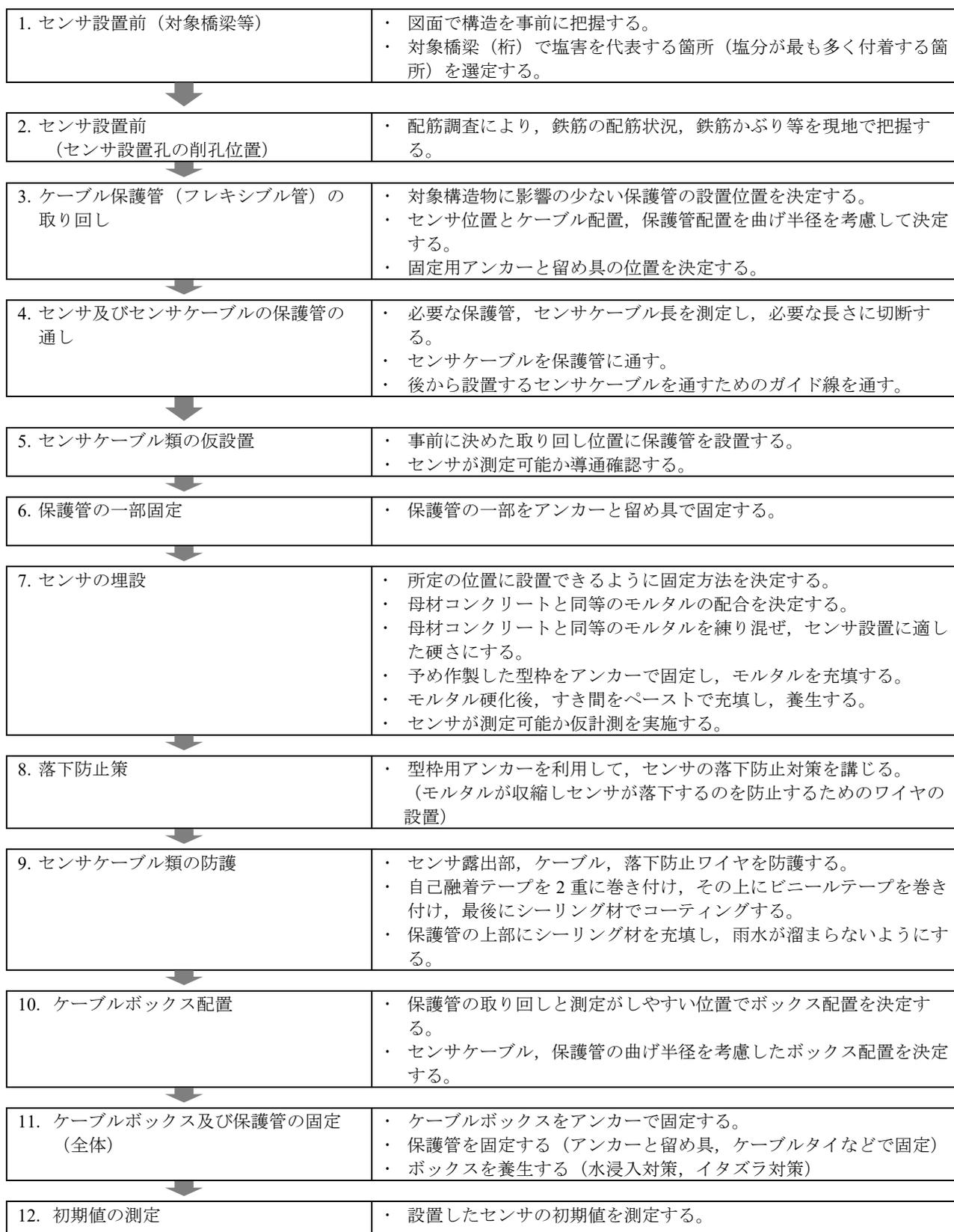


図 3.2.2 機器設置手順の概要

(1) 計測機器の設置

1) 事前準備

モニタリングシステム導入の事前準備として、センサを埋設するための削孔を行う。削孔範囲は、躯体の損傷を極力少なくすること及び埋設に用いる充填材がセンサの検知精度に及ぼす影響を考慮し、センサ本体の寸法に応じてセンサが設置可能な範囲の最小規模に留める。削孔位置については、構造物中の鉄筋を切断しないように施工図面等の資料調査や電磁波レーダ法等の非破壊調査機器で配筋状態を把握しておく必要がある。また、必要に応じて、削孔の際に採取した試料を基に塩分分析を行なうことで、モニタリングシステム導入時点の塩分浸透状況なども確認する。



写真 3.2.1 鉄筋探査と削孔状況の例

2) センサの埋設

① センサの固定

センサが所定の位置に設置できるように、養生板やワイヤ等を用いて固定する。模擬鉄筋センサはコンクリート表面からの塩分等の劣化因子の侵入を捉えることが目的であるため、コンクリート表面にセンサを合わせて固定する（図 3.2.3 参照）。桁下部等の上方向に向かって設置する際は、養生中にセンサが落下する危険があるため、養生板はアンカーで固定しておく。

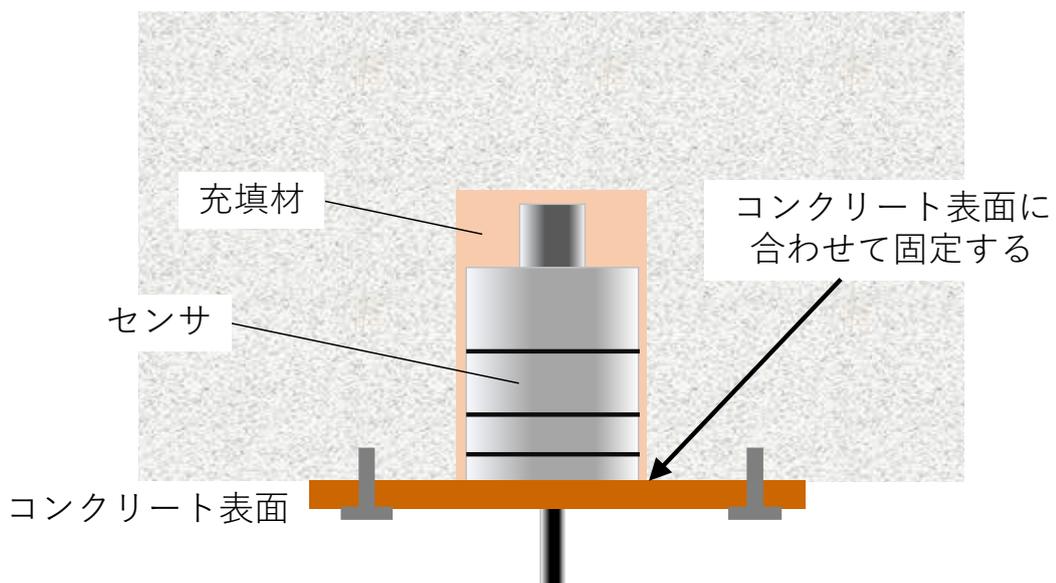


図 3.2.3 模擬鉄筋センサの固定位置（断面図）

② モルタルの充填

センサを埋設する際は、モルタルを用いて削孔範囲の埋め戻しを行う。なお、ここで使用するモルタルは、埋設する周辺のコングリートと同等の配合を基本とする。一般的な補修材料であるポリマーセメントモルタルや対象橋梁のコングリートよりも高強度のモルタルを用いると、周囲のコングリートに比べて塩分の拡散係数が低いため正確な測定ができない。また、センサと既設構造物の隙間が小さいため、充填性を考慮して配合から粗骨材を除いたモルタルを用いる。対象橋梁の配合が不明な場合は、同様の構造形式の一般的な配合を参考にすると良い。

モルタルの配合により、練り上がり直後ではスランプが大きく、施工時に垂れ落ちる可能性がある。その場合は、練り置きをして粘性がある程度高くなった時点で施工を行う。また、充填不足により隙間が生じないように十分に配慮する。



写真 3.2.2 モルタル充填後の養生板設置状況

③ 養生

モルタルの配合に応じて硬化時間を適切に判断し脱型を行う。脱型後に急激な乾燥による収縮をしないように適切な養生を行う。

3) 落下防止対策

脱型後のセンサの固定及び落下防止策として、ワイヤ、アンカー等を使用した固定具で確実に固定する（図 3.2.4 参照）。また、これらに対して、腐食防止策としてシリコンによる保護を行う。

(2) 配線

1) 配線方法

ケーブルは構造物の点検作業等に支障が出ないように配置する。また、腐食を防止するため、可能な限り雨や日光が直接当たらない桁下等に配置する。

2) ケーブルの処理

外部に露出するケーブルは、保護管の中に格納し腐食を防止する。ケーブルが露出している付近まで保護管を配置し、保護管の一部に切り込みを入れて管内にケーブルを引き込む。引き込み口までに露出しているケーブルは自己融着テープ、ビニールテープ等を巻き付けたのち、シリコンで最終的な保護を施す。なお、ここで使用するテープは、ケーブルが確実に保護されているかを確認できるように、交互に色の異なるテープを使用する。保護管は、対象橋梁への影響が少ない箇所を選定のうえ、計測ボックスまで伸ばし、一定間隔で支持金具を用いて固定する（図 3.2.5 参照）。その後、保護管と構造物との隙間やケーブルの引き込み口等の雨水浸入の可能性がある箇所をシリコンで保護し、止水及び腐食防止対策を講じる（写真 3.2.3 参照）。

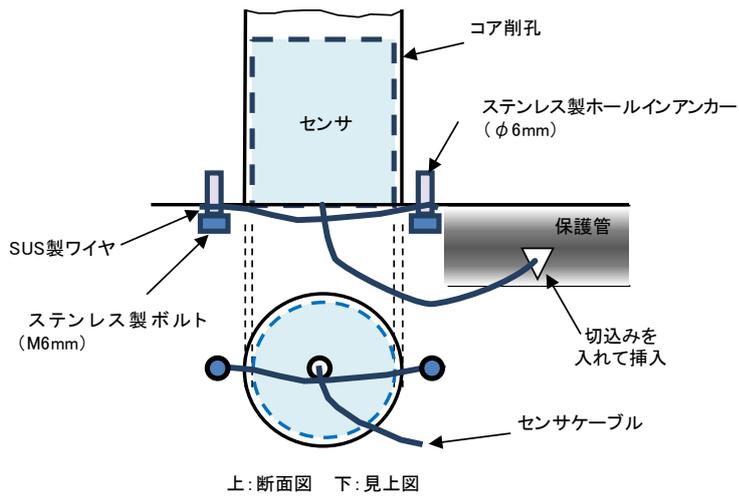


図 3.2.4 模擬鉄筋センサの落下防止策施工方法

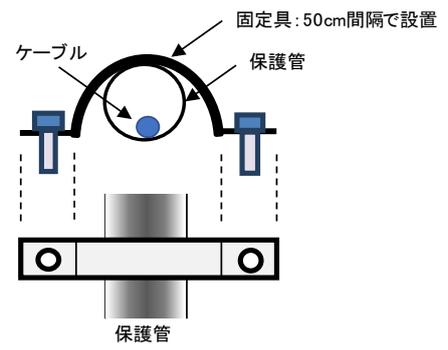


図 3.2.5 保護管の固定方法



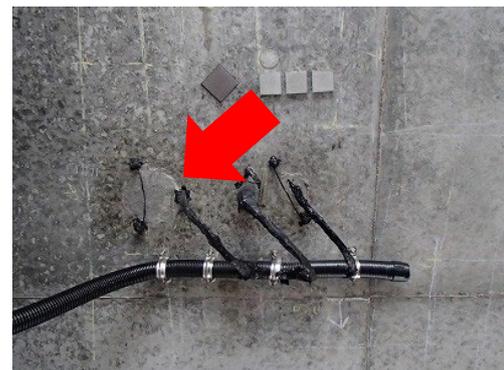
(a) 自己融着テープの巻付け



(b) 色の異なるビニールテープの巻付け



(c) シリコン材による保護



(d) ケーブル処理後の状況

写真 3.2.3 ケーブル処理状況の例

3) ケーブルボックスの設置

定期計測の際にデータ収集の効率化を図るために、地上から接近が可能な位置に、複数のケーブルを1箇所に集約するためのボックスを設置する。ケーブルボックスは、アンカーで固定し落下対策を施すと共に、浸入水の対策や第三者が不用意に触れることが無いように注意書きをする等の対策を施す。特に、配線の取り込み口は下方向を原則とし、降雨による浸入水を防ぐ。また、ケーブルボックス内には複数の配線が集約されるため、計測時に取り違いが無いように必要に応じて配線盤を設ける（図 3.2.6 参照）。

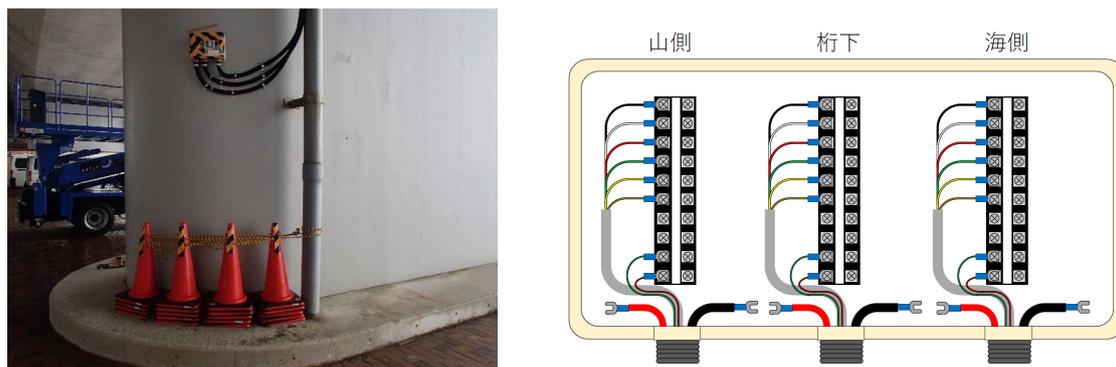


図 3.2.6 ケーブルボックスの設置と内部配線盤の例

(3) 導通の確認

導通の確認は作業段階において適宜実施し、全ての設置工程が終了した段階で、最終的なセンサ及びケーブル等の導通を確認する（写真 3.2.4 参照）。

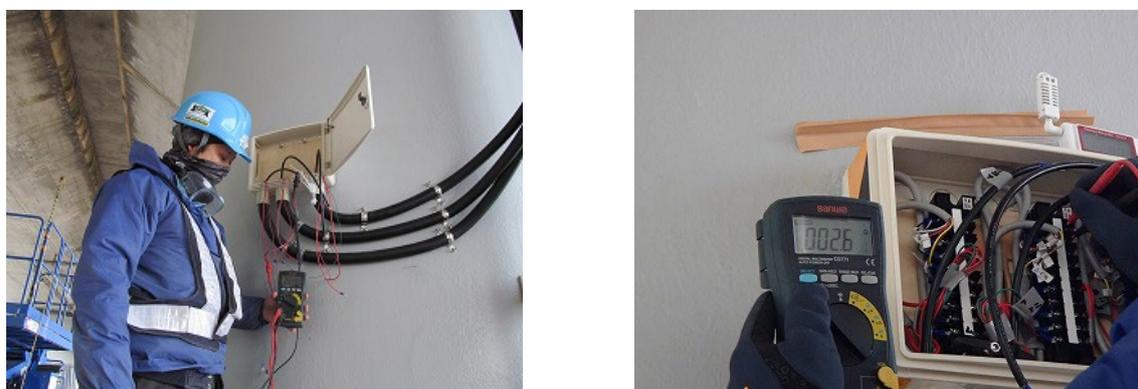


写真 3.2.4 導通の確認状況

3.2.5 計測

ケーブルボックスに格納されたケーブルを取り出し、デジタルマルチメータで抵抗値を 0.1Ω 単位で計測する。

3.2.6 データの蓄積

計測頻度は、計測開始から1年程度は月に1回程度の定期的な測定を実施し状態を把握することを基本として、計測値の変化の状況、速度に応じて測定頻度を変更する。また、計測に併せて温湿度を測定し記録しておく。

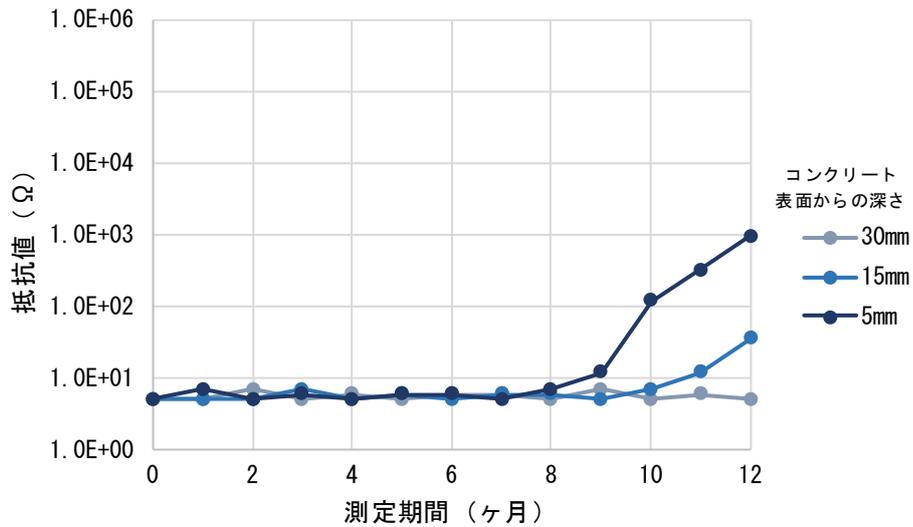


図 3.2.7 計測データの取得イメージ

3.2.7 費用の目安

本モニタリングシステムにおける費用の目安を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.2 費用の目安

項目	概要
モニタリングシステム の例	模擬鉄筋センサによるモニタリング
	計測箇所数 (例) 3 点 測定期間 (例) 1 年間 測定頻度 (例) 1 回/月 データ回収方法 手動 センサ材料費 40 万円 (センサ本体 10 万円×3 個+ケーブル等附属物 10 万円) センサ設置費 40 万円 データ分析費 30 万円 総計 110 万円

※鉄筋探査を行う場合は別途調査費用が加わる。(機器レンタル費用：約 25 万円)

※現場条件 (高所作業車使用等) によって設置費用や安全対策費用が変わる。

※複数橋梁を同時期に行う場合は 1 橋当たりの費用は上記より減額となる。

3.3 結果の評価

健全な場合の模擬鉄筋は、抵抗値が極めて低い。一方で、模擬鉄筋位置に塩分等の劣化因子が侵入し、腐食が生じている場合は、抵抗値が急激に上昇する。このような抵抗値の変化によって、塩害環境劣化因子の侵入の有無を判定する。

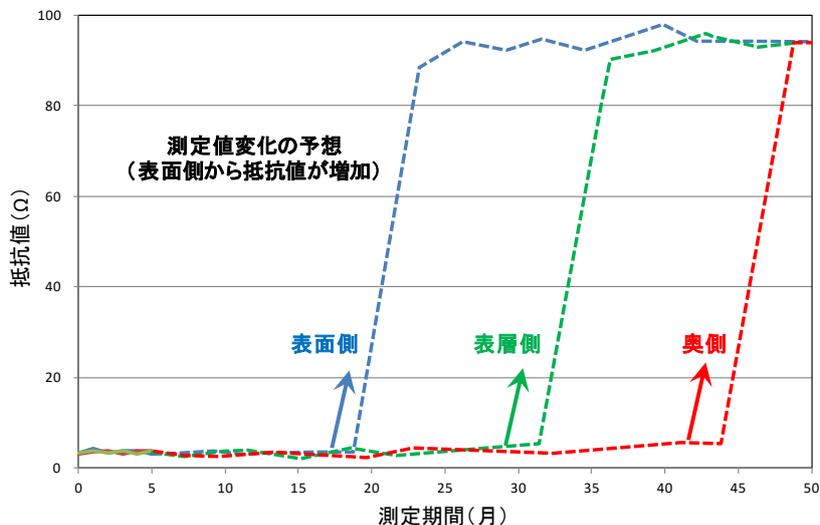


図 3.3.1 模擬鉄筋の抵抗値が増加した場合の計測イメージ

3.4 保守

模擬鉄筋によるかぶりコンクリートの劣化因子の侵入状況のモニタリングでは、センサ及び配線の劣化を防ぐために、それらに対する保護管の設置等を行う。また、計測時にセンサ及びケーブルの設置状況に不具合がないか、遠方目視で確認を行う。固定具等に腐食が見られる場合は、状況に応じて固定具を交換する等の対策を講じる。

計測に際しては、事前に計器の較正を行う。計測値が安定しない場合はある程度安定するまで時間を置く必要がある。計測値に異常がある場合は、センサの取り付け状況や周囲の構造物の劣化状況等を確認し、センサ自体に不具合がある場合は、交換等の対応を行う。

4章 照合電極による進展期のモニタリング

4.1 技術の概要

4.1.1 目的

コンクリート構造物の塩害は、構造物の表面から塩分等の劣化因子が侵入することにより発生する。劣化因子が鉄筋位置まで達すると、鉄筋腐食が発生し腐食ひび割れやかぶりコンクリートの浮きが生じる。大規模な劣化を抑制するうえでは、鉄筋腐食の発生を早期に検知することが重要である。本技術では、鉄筋近傍にセンサを配置して、鉄筋腐食の有無を捉えることを目的にしている。

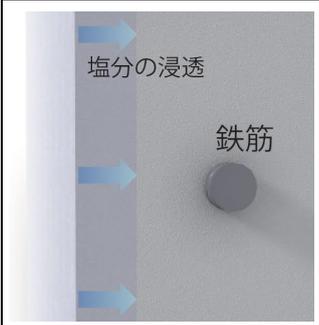
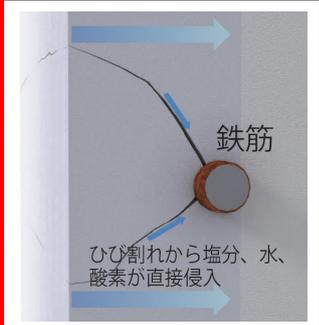
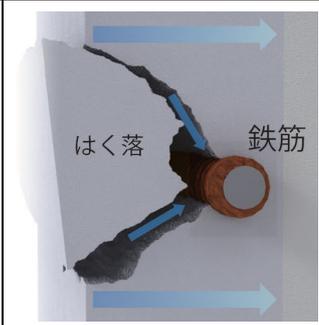
潜伏期	進展期	加速期	劣化期
 <p>塩分の浸透</p> <p>鉄筋</p>	 <p>塩分の浸透</p> <p>鉄筋</p>	 <p>鉄筋</p> <p>ひび割れから塩分、水、酸素が直接侵入</p>	 <p>鉄筋</p> <p>はく落</p>
<p>鉄筋：腐食なし</p> <p>外観：ひび割れなし</p>	<p>鉄筋：部分的腐食</p> <p>外観：ひび割れなし</p>	<p>鉄筋：全体的な腐食</p> <p>外観：ひび割れあり</p>	<p>鉄筋：断面減少</p> <p>外観：はく落</p>

図 4.1.1 本章のモニタリング技術の適用範囲（赤枠）

4.1.2 モニタリングの概要

(1) モニタリングの原理

鉄筋腐食の有無を把握する手法として、電気化学的手法によるモニタリングを用いる。鉄筋が腐食する際の腐食電流によって生じる電位勾配や電気抵抗の変化を捉えることで、腐食の有無を把握することが可能となる。鋼材腐食による電位（電圧）低下の発生メカニズムと腐食検知のイメージを図 4.1.2 に示す。鉄筋の付近に照合電極を配置すると、照合電極に対する鉄筋の電位を計測することができる。鉄筋の腐食が進行することで腐食電流が発生し、照合電極に対する電位が低下する。その低下した電位レベルに応じて、腐食の可能性を判断する。

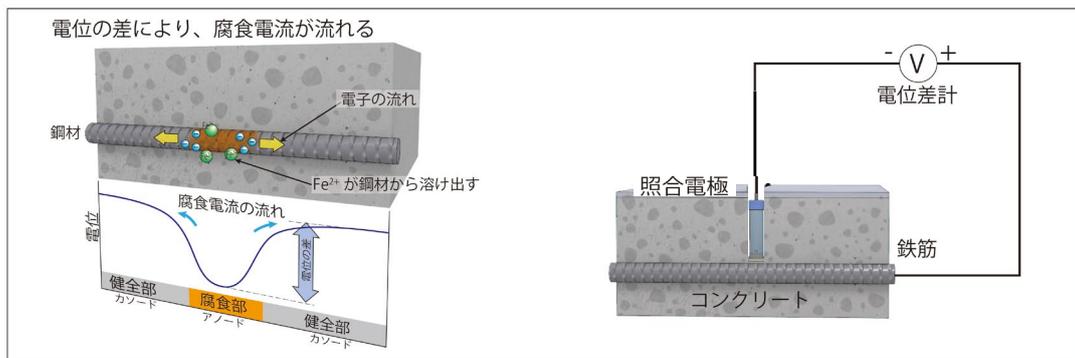


図 4.1.2 鋼材腐食による電位低下の発生メカニズムと腐食検知のイメージ

(2) 標準的なシステム

照合電極による標準的なシステムを図 4.1.3 に示す。コンクリート中に埋設した照合電極をリード線で導通して、コンクリート外部まで配線する。外部に配線したケーブルとデジタルマルチメータを接続し、電位を計測する。

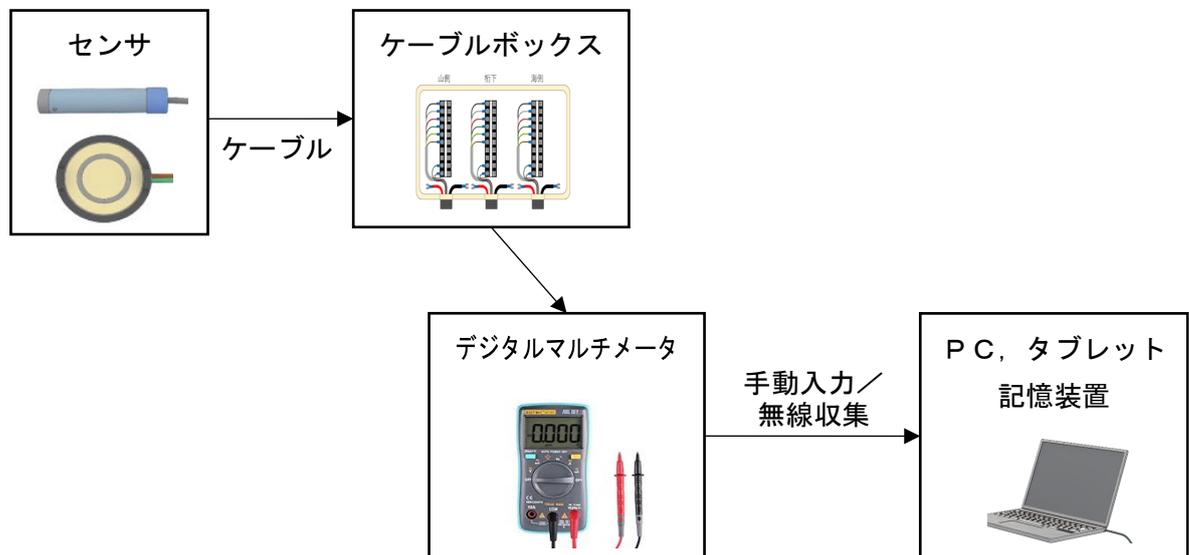
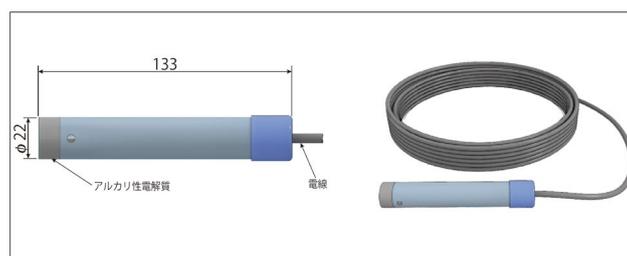
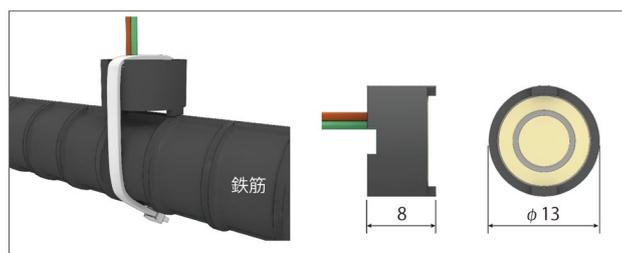


図 4.1.3 照合電極によるモニタリングシステムの構成例

照合電極によるモニタリング技術の例を図 4.1.4 に示す。本章では鉛を電極とする一般的な照合電極と円形の電極を搭載した小型の照合電極を紹介する。また、図 4.1.4 に示した技術の他に、飽和硫酸銅、二酸化マンガン、飽和甘こう（カロメル）、飽和銀・塩化銀などを電極として使用する手法がある。使用する電極によって、計測値の飽和硫酸銅基準への変換方法が異なるため留意する必要がある。



(a) 照合電極（鉛式）



(b) 照合電極（小型）

図 4.1.4 照合電極の例

4.2 モニタリングの方法

4.2.1 モニタリングの手順

モニタリングの基本的な手順を図 4.2.1 に示す。

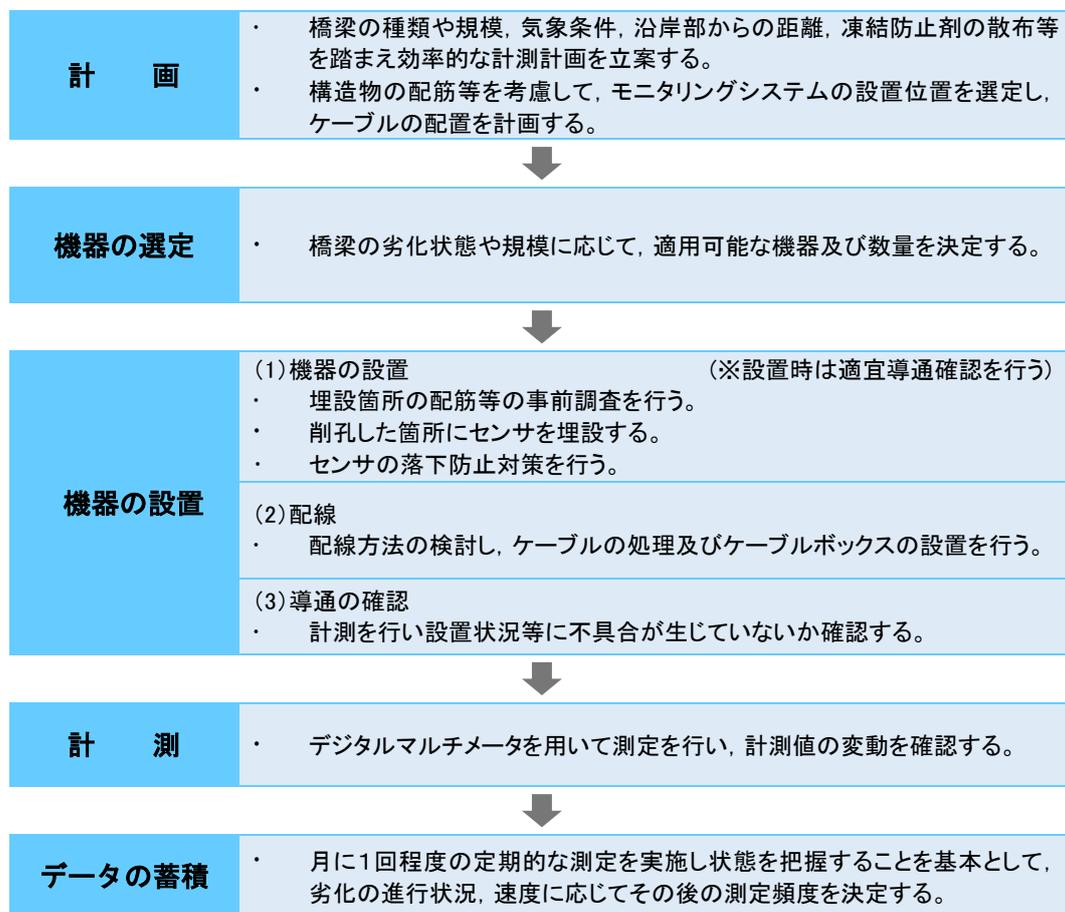


図 4.2.1 照合電極による進展期のモニタリング手順

4.2.2 計画

(1) 橋梁の種類や規模

モニタリングシステムを導入する前に、必要なセンサの数量や設置の手順を立案するために、対象橋梁の構造形式や規模を調査する。その他に、構造物の劣化状態や、雨がかり状況や路面の状態なども外観目視により把握しておき、鉄筋腐食が生じ易い箇所を抽出し、代表的な計測箇所を決定する。

また、配線や計測ボックスの設置に際して、安全に施工や計測が実施できるかを確認する。

(2) 周囲の環境条件

海岸部からの距離等の飛来塩分の供給に係わる情報や凍結防止剤の散布状況等を調査する。塩害環境が明確でない場合や複数のセンサ設置が困難である場合は、「第2章 塩分検知器による付着塩分のモニタリング」を実施したうえで、計画を立案することが望ましい。

また、導入後の保守に関して風雨等でモニタリングシステムに不具合が起きないように、設置環境を確認する。

4.2.3 機器の選定

構造物の劣化状況や周辺環境に応じて、状態を把握するうえで必要な機器、数量を決定する。外観目視で劣化状況の判断が困難な場合は、いくつかのモニタリングシステムを併用して設置することも有効である。

また、照合電極は鉄筋近傍に埋設する必要があるため、対象橋梁の鉄筋かぶりに応じて使用する機器を選定する。計測の安定性の観点から鉛式照合電極の使用を基本とするが、かぶりの小さい対象については小型照合電極を用いることがよい。

本モニタリングシステムの基本的な要求性能を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 要求性能の一例

	項目	仕様
センサ	検知性能	鉄筋腐食に伴う電位差を安定的に測定できる電極を用いること。
	寸法	かぶりコンクリート内に設置できる寸法であること。埋設時の削孔等で内部の鉄筋に干渉しないこと。
ケーブル	耐久性	設置対象環境の気温・湿度・紫外線等に対し、被覆等が耐候性を有していること。
	寸法	施工時や屋外環境において断線等を引き起こさない径とすること。例えばφ7.5mm程度とすること。
ケーブルボックス	耐久性	設置対象環境の気温・湿度・紫外線等に対し、耐候性を有していること。想定される外力に対して強度を有していること。
デジタルマルチメータ	分解能	電圧値 0.1mV が計測可能であること。
	入力抵抗	100MΩ以上であること。

4.2.4 機器の設置

機器の設置手順について、手順の概要を図4.2.2に示す。

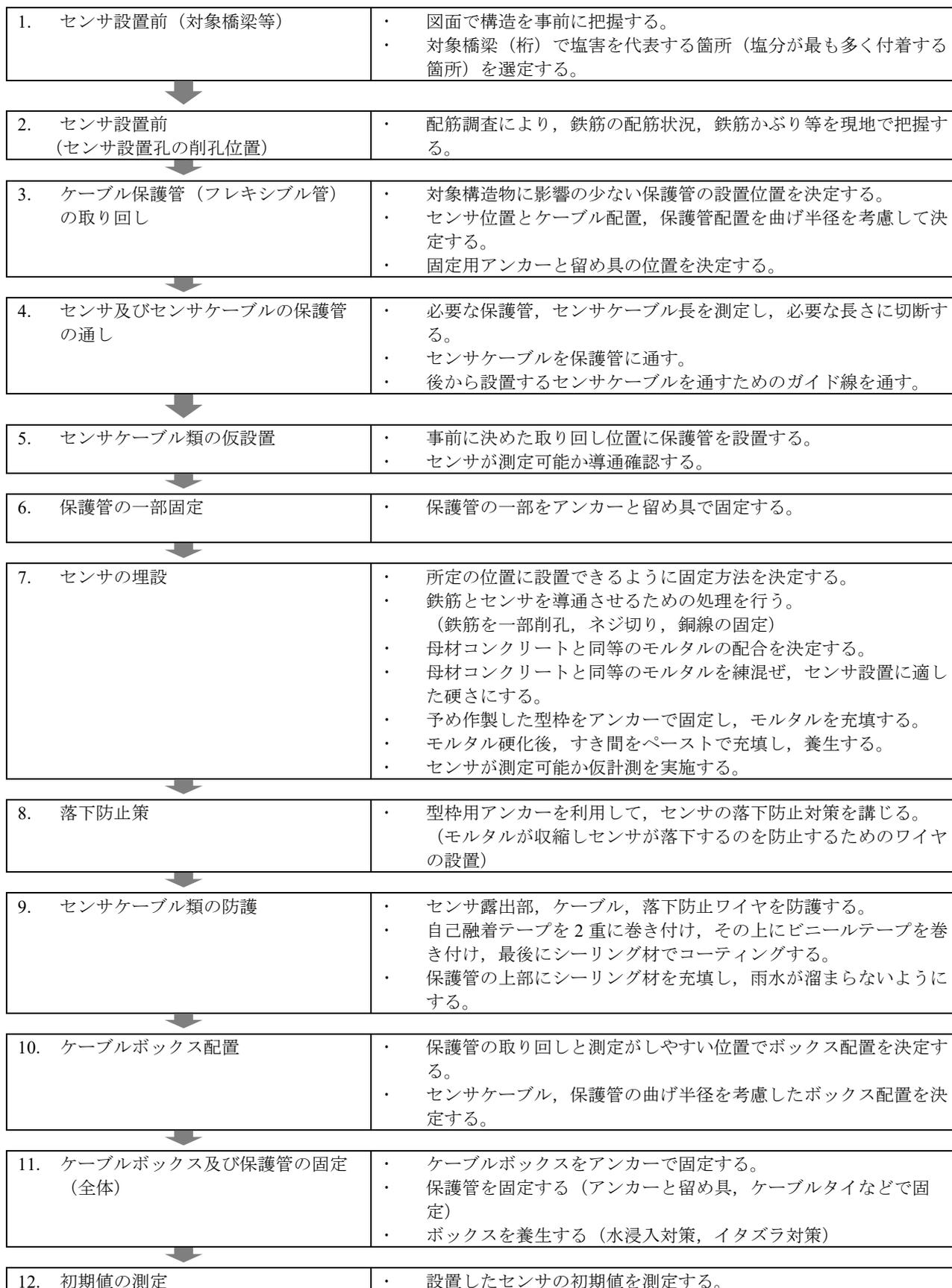


図4.2.2 機器設置手順の概要

(1) 計測機器の設置

1) 事前準備

モニタリングシステム導入の事前準備として、センサを埋設するための削孔を行う。削孔範囲は、躯体の損傷を極力少なくすること及び埋設時の充填材がセンサの検知精度に及ぼす影響を考慮し、センサ本体の寸法に応じてセンサが設置可能な範囲の最小規模に留める。削孔位置については、構造中の鉄筋を切断しないように施工図面等の資料調査や電磁波レーダ法等の非破壊調査機器で配筋状態を把握しておく必要がある。また、必要に応じて、削孔の際に採取した試料を基に塩分分析を行なうことで、モニタリングシステム導入時点の塩分浸透状況なども確認する。



写真 4.2.1 鉄筋探査と削孔状況の例

2) センサの埋設

① センサの固定

センサが所定の位置に設置できるように、あらかじめ露出させた鉄筋に対して仮止めし、その後モルタルで削孔箇所を埋め戻す方法がある。その際に、埋め戻したモルタルが垂れ落ちないように養生板やワイヤ等を用いて固定する。照合電極は鉄筋腐食の有無を検知する目的であるため、鉄筋にセンサを近づけて固定する（図 4.2.3 参照）。桁下部等の上方向に向かって設置する際は、養生中にセンサが落下する危険があるため、養生板はアンカーで固定しておく。

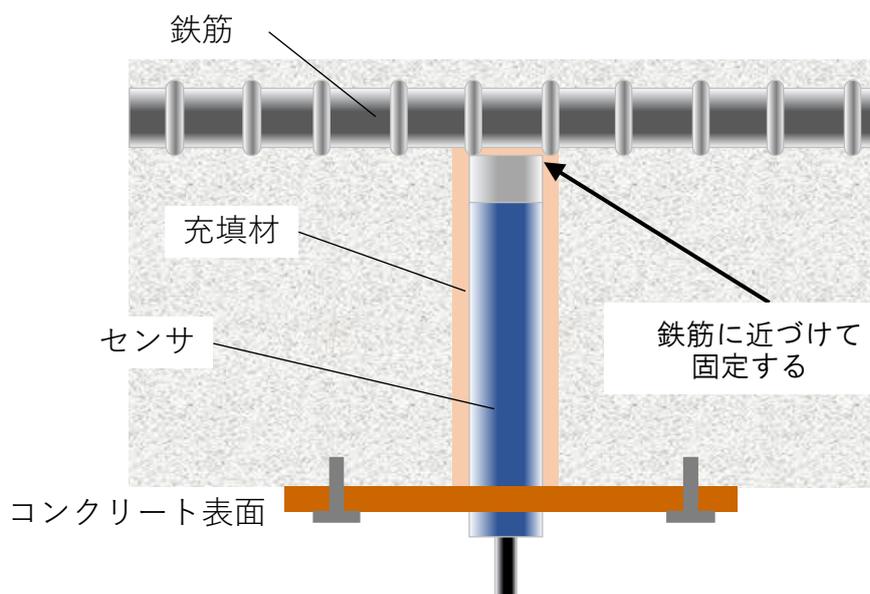


図 4.2.3 照合電極（鉛式）センサの固定位置

② モルタルの充填

センサを埋設する際は、モルタルを用いて削孔範囲の埋め戻しを行う。なお、ここで使用するモルタルは、埋設する周辺のコングリートと同等の配合を基本とする。ポリマーセメントモルタルや対象橋梁のコングリートよりも高強度のモルタルを用いると、鉄筋と照合電極の導電性が低くなり正確な測定ができない。また、センサと既設構造物の隙間が小さいため、充填性を考慮して配合から粗骨材を除いたモルタルを用いる。対象橋梁の配合が不明な場合は、同様の構造形式の一般的な配合を参考にするのも良い。

モルタルの配合により、練り上がり直後ではスランプが大きく、施工時に垂れ落ちる可能性がある。その場合は、練置きをして粘性がある程度高くなった時点で施工を行う。また、充填不足により隙間が生じないように十分に配慮する。



写真 4.2.2 モルタル充填後の養生板設置状況

③ 養生

モルタルの配合に応じて硬化時間を適切に判断し脱型を行う。脱型後に急激な乾燥による収縮をしないように適切な養生を行う。

3) 鉄筋とケーブルの接続

鉄筋とセンサを導通させる必要がある機器は、あらかじめはつり出した鉄筋にケーブルを接続する。接続の方法は鉄筋にリード線を複数回巻きつけるか鉄筋にねじ切りを施し、ねじで定着させるなど、切断防止を図り導通を確保する。

4) 落下防止対策

センサの寸法によっては本体の一部が外部へ露出する場合がある。その際は、脱型後のセンサの固定及び落下防止策として、ワイヤ、アンカー等を使用した固定具で固定することや腐食防止策としてシリコーンによる保護を行う（図 4.2.4 参照）。

(2) 配線

1) 配線方法

ケーブルは構造物の点検作業等に支障が出ないように配置する。また、腐食を防止するため、可能なかぎり雨や日光が直接当たらない桁下等に配置する。

2) ケーブルの処理

外部露出するケーブルは、保護管の中に格納し腐食を防止する。ケーブルが露出している付近まで保護管を配置し、保護管の一部に切り込みを入れて管内にケーブルを引き込む。引き込み口まで

に露出しているケーブルは自己融着テープ、ビニールテープ等を巻き付けたのち、シリコンで最終的な保護工を施すことが望ましい。なお、ここで使用するテープは、ケーブルが確実に保護されているかを確認できるように、交互に色の異なるテープを使用する。保護管は、対象橋梁への影響が少ない箇所を選定のうえ、計測ボックスまでの伸ばし、一定間隔で支持金具を用いて固定する（図 4.2.5 参照）。その後、保護管と構造物との隙間やケーブルの引き込み口等の雨水浸入の可能性がある箇所をシリコンで保護することで、止水及び腐食防止対策を講じる（写真 4.2.3 参照）。

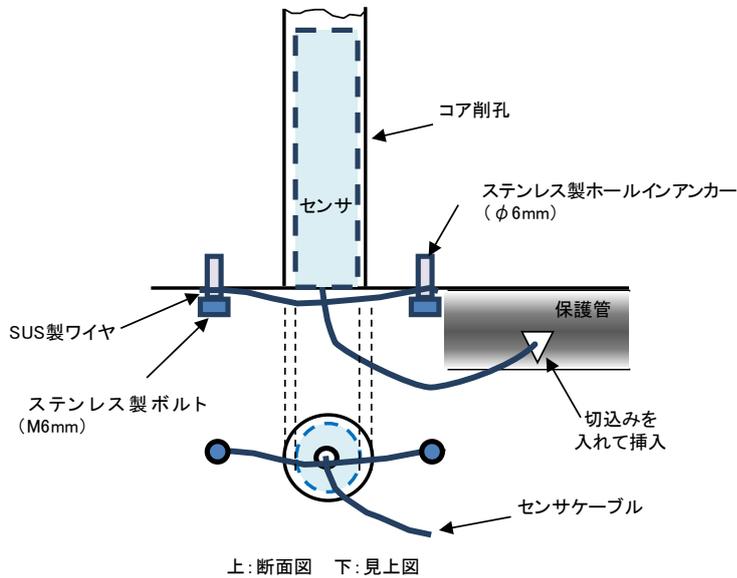


図 4.2.4 照合電極（鉛式）の落下防止策施工方法

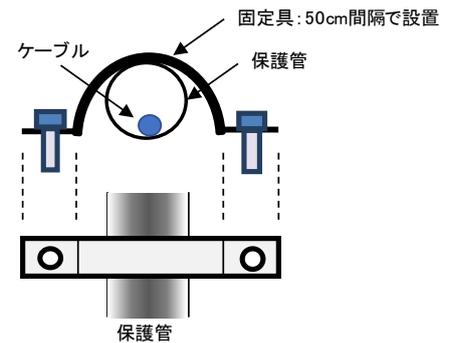


図 4.2.5 保護管の固定方法



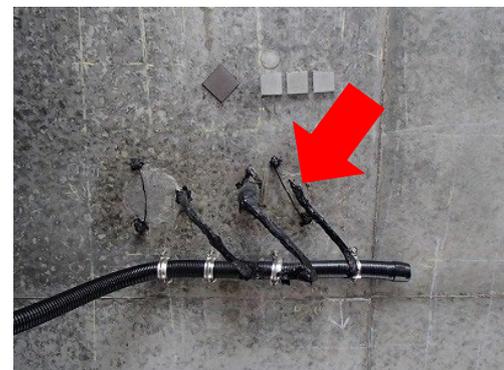
(a) 自己融着テープの巻付け



(b) 色の異なるビニールテープの巻付け



(c) シリコン材による保護



(d) ケーブル処理後の状況

写真 4.2.3 ケーブル処理状況の例

3) ケーブルボックスの設置

定期計測の際にデータ収集の効率化を図るために、地上から接近が可能な位置に、複数のケーブルを一箇所に集約するためのボックスを設置する。ケーブルボックスは、アンカーで固定し落下対策を施すと共に、浸入水の対策や第三者が不用意に触れることが無いように注意書きをする等の対策を施す。特に、配線の取り込み口は下方向を原則とし、降雨による浸入水を防ぐ。また、ケーブルボックス内には複数の配線が集約されるため、計測時に取り違いが無いように必要に応じて配線盤を設ける（図 4.2.6 参照）。

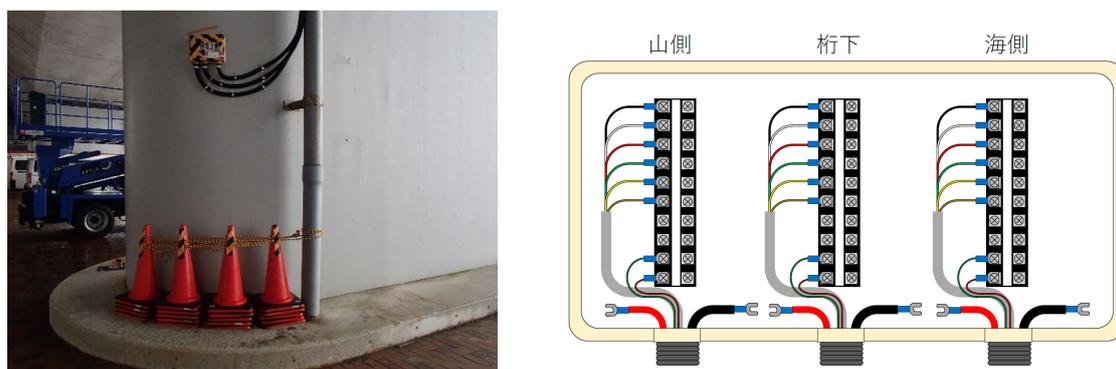


図 4.2.6 ケーブルボックスの設置と内部配線盤の例

(3) 導通の確認

導通の確認は作業段階において適宜実施し、全ての設置工程が終了した段階で、最終的なセンサ及びケーブル等の導通を確認する（写真 4.2.4 参照）。



写真 4.2.4 導通の確認状況

4.2.5 計測

ケーブルボックスに格納されたケーブルを取り出し、デジタルマルチメータで抵抗値を 0.1mV 単位で計測する。

4.2.6 データの蓄積

計測頻度は、計測開始から 1 年程度は月に 1 回程度の定期的な測定を実施し状態を把握することを基本として、劣化の進行状況，速度に応じて測定頻度を変更する。また，計測に合わせて温湿度を測定し記録しておく。

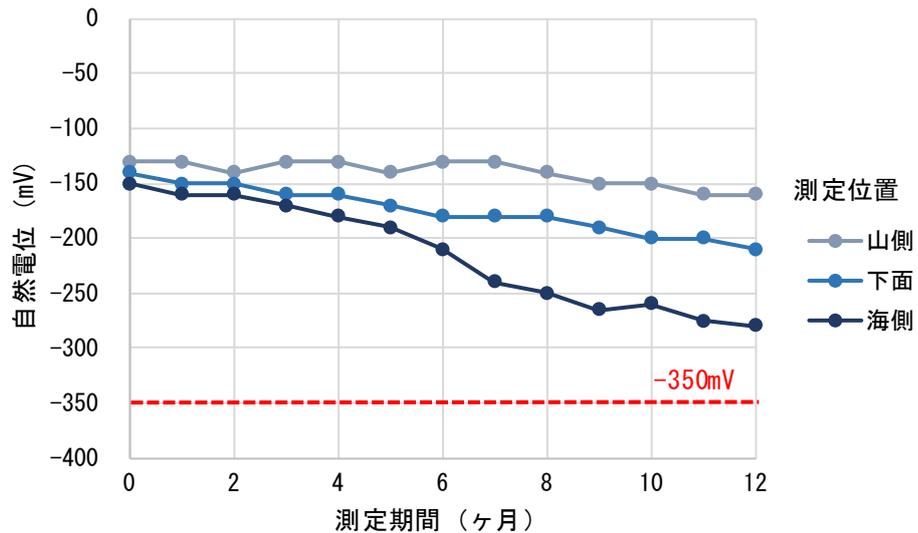
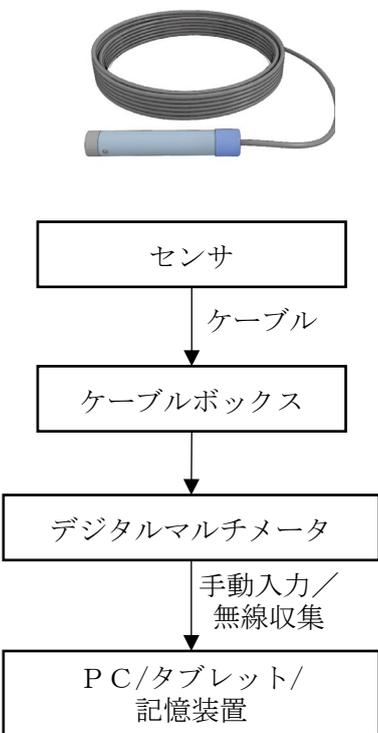
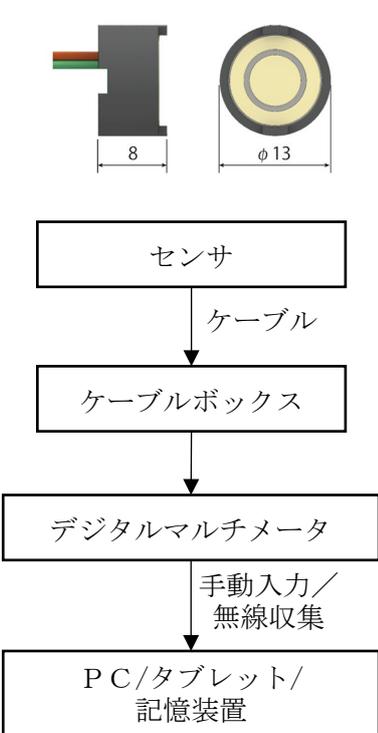


図 4.2.7 計測データの取得イメージ

4.2.7 費用の目安

本モニタリングシステムにおける費用の目安を表4.2.2に示す。

表 4.2.2 費用の目安

項目	摘要	
	照合電極（鉛式）	照合電極（小型）
モニタリングシステムの場合	 <p>照合電極（鉛式）の構成図。ケーブルボックス、デジタルマルチメータ、PC/タブレット/記憶装置が接続されている。</p>	 <p>照合電極（小型）の構成図。ケーブルボックス、デジタルマルチメータ、PC/タブレット/記憶装置が接続されている。電極の寸法は幅8mm、径φ13mmである。</p>
計測箇所数（例）	3点	3点
測定期間（例）	1年間	1年間
測定頻度（例）	1回/月	1回/月
作業環境	特殊な足場が不要	特殊な足場が不要
データ回収方法	手動	手動
センサ材料費	30万円	5万円
センサ設置費	40万円	40万円
データ分析費	30万円	30万円
総計	100万円	75万円

※鉄筋探査を行う場合は別途調査費用が加わる。（機器レンタル費用：約25万円）

※現場条件（高所作業車使用等）によって設置費用や安全対策費用が変わる。

※複数橋梁を同時期に行う場合は1橋当たりの費用は上記より減額となる。

4.3 結果の評価

電位の評価は、ASTM C 876 (Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete) で基準化されている。ここでは、計測した電位が飽和硫酸銅 (CSE) 基準で判断することとし、測定した自然電位が -350mV 以下となる場合は、鉄筋腐食が90%以上の確率で生じているとされている (表 4.3.1 参照)。このことから、自然電位を測定することで、鉄筋腐食の有無を判定する。

表 4.3.1 自然電位による鉄筋腐食の可能性判定

自然電位 E (mV : CSE)	腐食確率
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	不確定
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

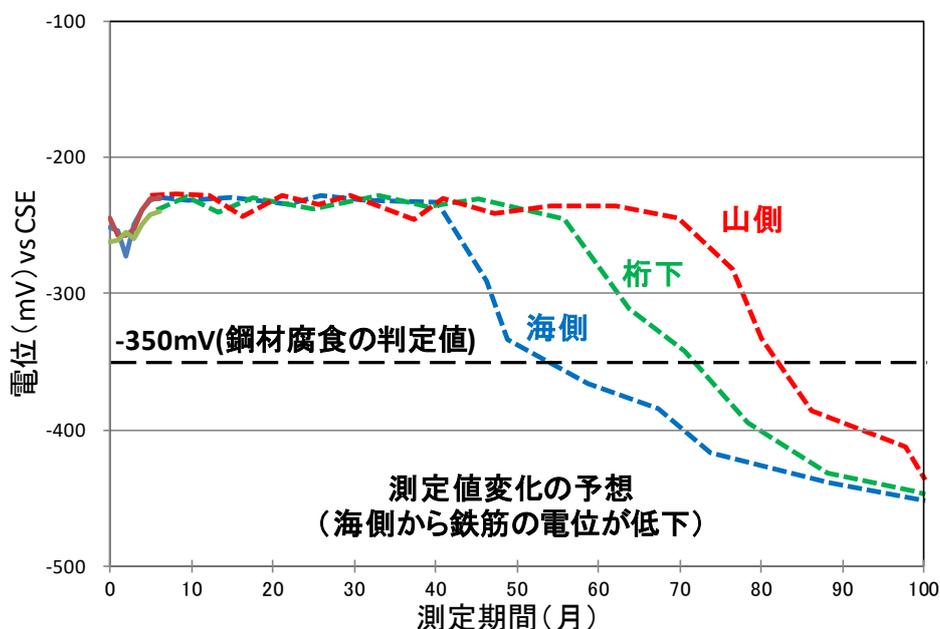


図 4.3.1 自然電位が低下した場合の計測イメージ

4.4 保守

電気化学的手法による鉄筋腐食のモニタリングでは、センサ及び配線の劣化を防ぐために、それらに対しての保護管の設置、埋設したセンサ周辺への浸入水防止処理等を行う。また、計測時にセンサ及びケーブルの設置状況の不具合がないか、遠方目視で確認を行う。固定具等に腐食が見られる場合は、状況に応じて固定具を交換する等の対策を講じる。

計測に際しては、事前に計器の較正を行う。計測値が安定しない場合はある程度安定するまで時間を置くこと。計測値に異常がある場合は、センサの取り付け状況や周囲の構造物の劣化状況等を確認し、センサ自体に不具合がある場合は、交換等の対応を行う。

5章 照合電極による補修効果のモニタリング

5.1 技術の概要

5.1.1 目的

塩害劣化を受けたコンクリート構造物の補修工法は、塩害による構造物の劣化程度や現地の環境状況、構造特性、経済性等を考慮して選定される。一般的には、コンクリート内部に浸透した塩分が相当に多い場合は、その後の腐食ひび割れや浮き等の発生を防ぐために、コンクリート内部に浸透した塩分を除去する断面修復工法あるいは脱塩工法、もしくは鋼材腐食の進行を防止する電気防食工法が適用される。また、外部からの腐食発生原因を取り除くことも重要であり、外部環境からコンクリート中に塩分が浸透するのを防ぐ表面被覆工法が合せて行われることが多い。

これらの補修工法を適用した場合でも未補修箇所のコンクリート中の残存塩分や脱塩工法等で補修を実施した箇所の残存塩分が再拡散することにより再劣化が懸念される。例えば、断面修復工法では、未補修箇所のコンクリート中に残存した塩分の影響によって、断面修復箇所と断面修復しない箇所の境界部付近において鋼材に電位差が生じ、局所的な腐食が激しく発生するマクロセル腐食が生じる可能性がある。その補修後の再劣化に対して、補修前から十分な調査と残存する塩分の再拡散予測やマクロセル腐食推定等を実施して、補修範囲の確定及び必要な対策を実施することを基本としている。

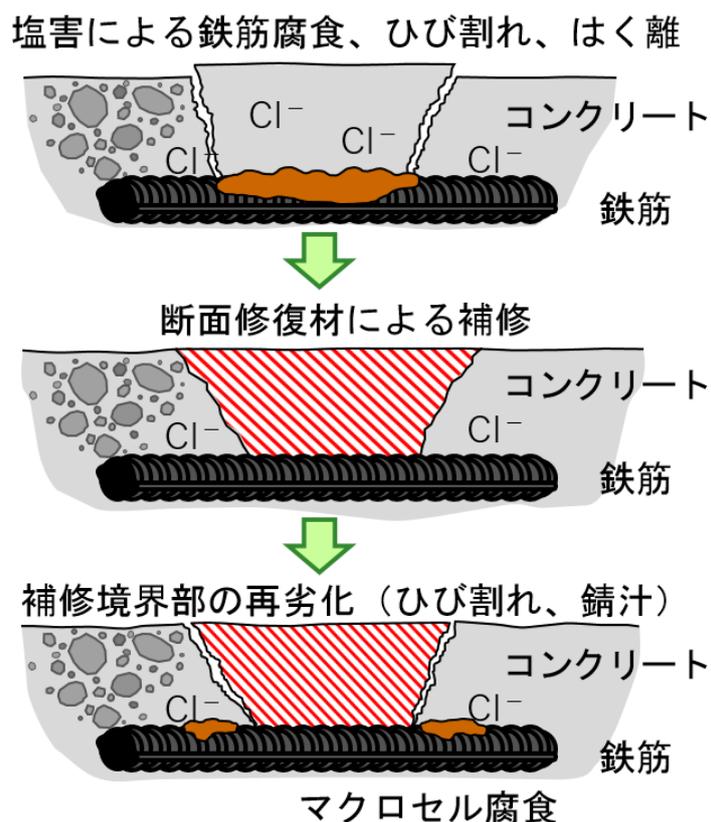


図 5.1.1 マクロセル腐食のイメージ

塩害劣化に対して事前の調査・検討を実施しても補修構造物の構造特性上（例えば PC 構造物等）で部分的にしか断面修復できない場合は、コンクリートに浸透した塩分濃度を十分除去できないなど、目標とした性能まで補修ができない場合もある。そのような場合は、モニタリングを併用することで、鉄筋腐食状況や塩化物イオンの浸透状況をいち早く確認し、早い段階から再劣化原因の推定及び対策を実施することが可能となる。これにより、モニタリングを実施しない場合は、再劣化箇所に対して補修を繰り返す必要があったものが、モニタリングを実施することで、再劣化を防止し、より効果的な補修を行うことができる。



写真 5. 1. 1 断面修復・表面被覆箇所の再劣化の例

5.1.2 モニタリングの概要

(1) 断面修復効果のモニタリング

断面修復後のモニタリングは、マクロセル腐食の発生が想定される箇所で実施するのが良い。マクロセル腐食は、断面修復した箇所と未修復コンクリートの境界付近で生じ、未修復コンクリートに含まれる塩分濃度が高いほどマクロセル腐食が生じやすいことが知られている。

室内実験におけるマクロセル腐食発生による断面修復箇所の境界部における電気的状況を図 5.1.2 に示す。マクロセル腐食箇所では、腐食反応により腐食電流密度が増加し、その結果、電位が小さく（負の値が大きく）なっている。

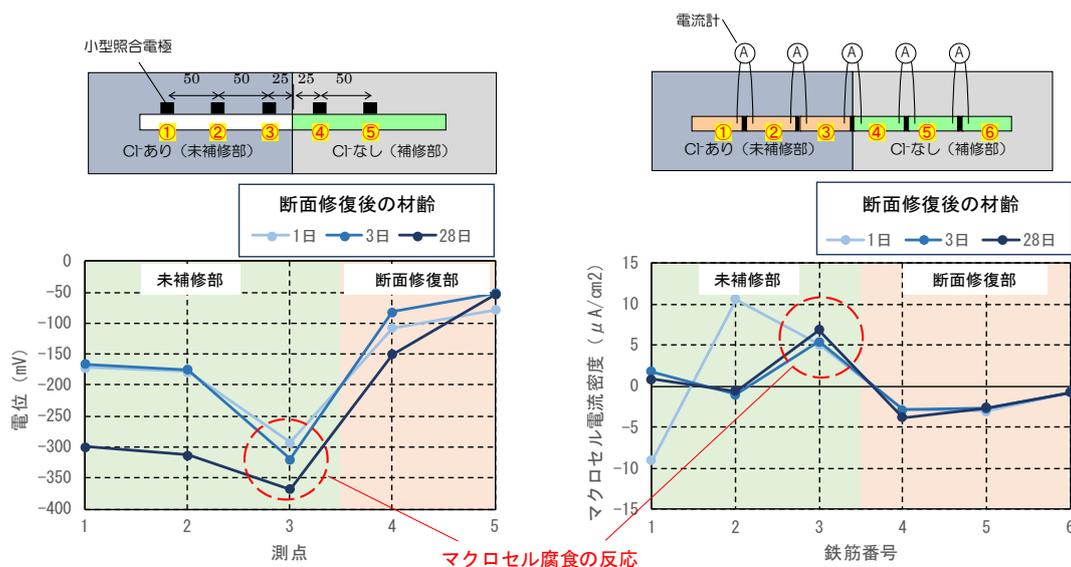


図 5.1.2 マクロセル腐食による電気的变化（左：電位，右：電流密度）

このため、モニタリングは、断面修復箇所の境界部付近で、照合電極（鉛式照合電極または小型照合電極）で、鋼材の腐食状況を把握する。センサの設置位置は、断面修復の施工時に行う場合と、既に施工が行われた後に設置する場合で、設置方法が異なる。各状況に応じて以下の方法を参考とする。

1) 断面修復施工時

断面修復施工時には、かぶりコンクリートがはつきり取られ、鉄筋が露出した状態であるため、図 5.1.3 のように境界部に鉛式照合電極を鉄筋に沿う形で設置することを基本とする。また、同時に露出した鉄筋にケーブル（銅線）を設置しておく。

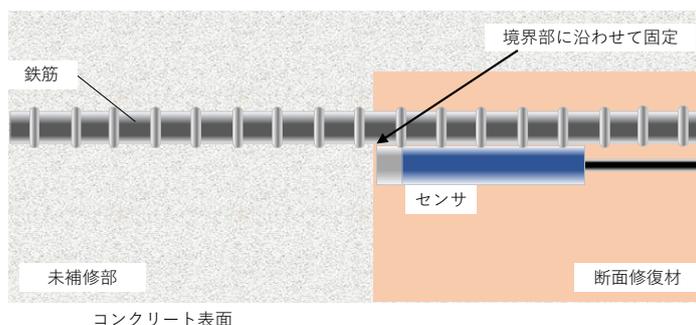


図 5.1.3 断面修復施工時におけるセンサ設置例

2) 断面修復後

断面修復後に、マクロセル腐食の発生の有無を把握したい場合、センサと銅線を後付けすることが必要となる。この場合、センサは断面修復境界部に近い位置にセンサを設置し、マクロセル腐食の範囲を外れた（約 20cm）箇所に同じセンサを設置し、比較する。この2つのセンサを比較することにより、境界部でマクロセル腐食が生じることにより、電位の低下（電位差）を把握する。また、補修部との比較を行う場合には、補修部にもセンサを設置するとよい。

図 5.1.4 に断面修復後のセンサ設置例を示す。照合電極は鉛式を用いることを基本とするが、かぶり小さい（5cm 程度）場合には、小型照合電極を設置してもよい。また、鉄筋にケーブル（銅線）を設置しておく。

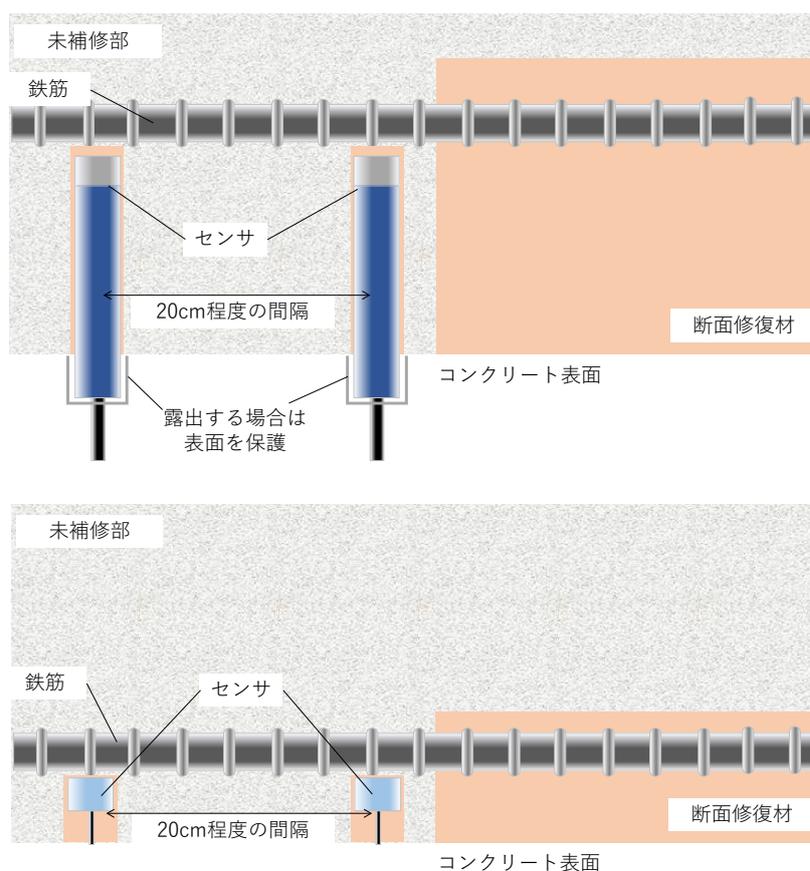


図 5.1.4 断面修復施工後におけるセンサ設置例（上：鉛式照合電極 下：小型照合電極）

測定期間は、センサ設置後 1 年間は毎月測定を行うこと基本とする。電位は、温度や湿度の影響を受け、季節変動を生じるため、1 年間の電位の変化を把握し、同時に温度や湿度を測定するとよい。これらの測定値の変化（傾向）が次の年も同じであることを確認したうえで、最も低い電位を示す時期に毎年測定を継続して行うことが望ましい。

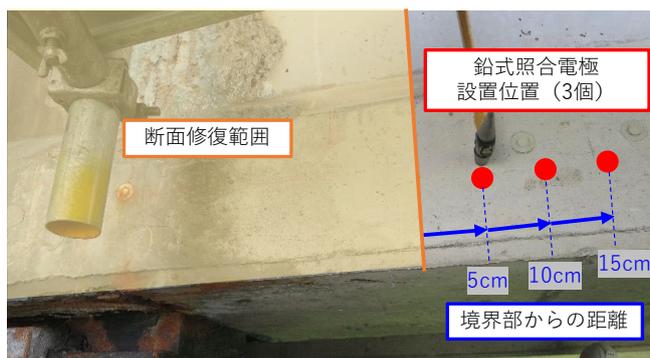


写真 5.1.2 断面修復モニタリング例
(鉛式照合電極)

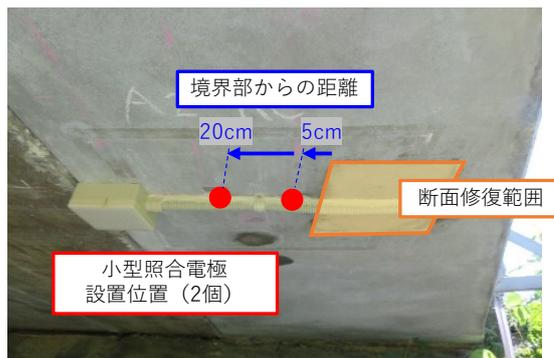


写真 5.1.3 断面修復後のモニタリング例
(小型照合電極)

5.2 モニタリングの方法

5.2.1 モニタリングの手順

モニタリングの基本的な手順を図 5.2.1 示す。

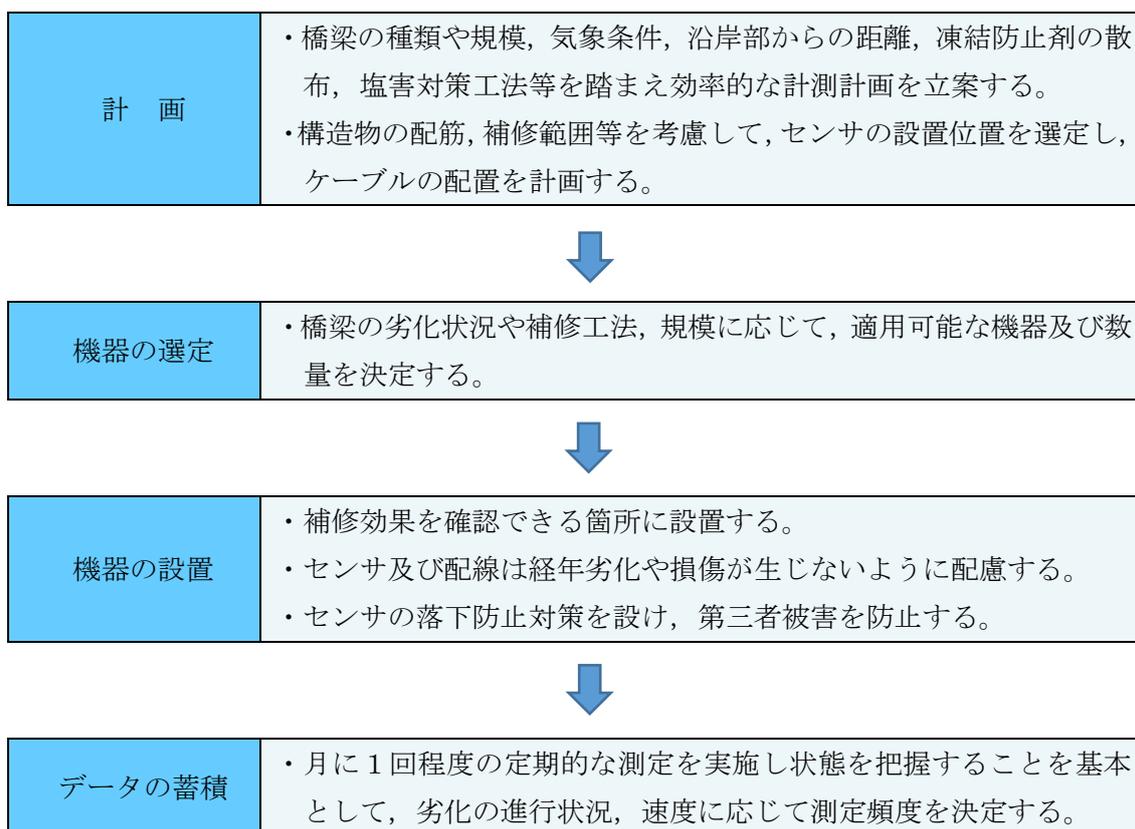


図 5.2.1 補修効果確認を目的としたモニタリング手順

5.2.2 計画

モニタリングシステムを導入する前に, 対象橋梁およびその周辺の環境, 実施された補修工法等を調査する。塩害補修効果を把握するためには, 補修工法の種類及び範囲等を踏まえて計画する。また, 構造物の補修前の劣化状態と補修工法に応じて効果を把握する手法が異なるため, 補修前に実施した詳細

調査結果や補修工事記録を把握しておく。

5.2.3 機器の選定

補修前の劣化状況や補修工法に応じて、補修効果を把握するうえで必要な機器、数量を決定する。かぶりコンクリートの塩分浸透状況や内部鋼材の腐食状況など複数の事項を把握する必要がある場合は、いくつかのモニタリングシステムを併用して設置することも有効である。

本モニタリングシステムの要求性能を表 5.2.1 に示す。

表 5.2.1 塩害補修効果モニタリングの要求性能

	項目	性能
センサ	検知性能	鉄筋腐食に伴う電位差を安定的に測定できる電極を用いること。
	寸法	補修箇所及びかぶりコンクリート内に設置できる寸法であること。埋設時の削孔等で内部の鉄筋に干渉しないこと。
ケーブル	耐久性	設置箇所の気温・湿度・紫外線等に対し、被覆等が耐候性を有していること。
	寸法	施工時や屋外環境において断線等を引き起こさない径とすること。
ケーブルボックス	耐久性	設置対象環境の気温・湿度・紫外線等に対し、耐候性を有していること。想定される外力に対して強度を有していること。
デジタルマルチメータ	分解能	電圧値 0.1mV が計測可能であること。
	入力抵抗	100MΩ 以上であること。

5.2.4 機器の設置

機器の設置について、設置手順の概要を図 5.2.2 に示す。

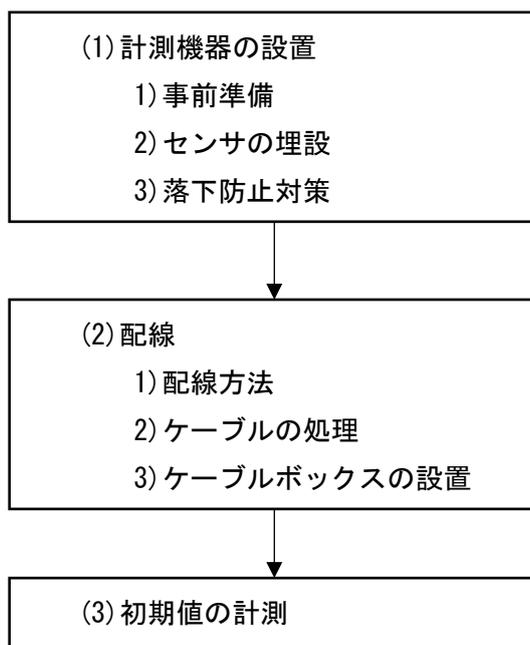


図 5.2.2 機器設置手順の概要

補修効果を把握するために適した位置を抽出し、センサ等の設置位置を決定する。センサの設置に際して、コア抜き等の微破壊が必要な場合は、構造的な影響に配慮した位置を選定する必要がある。センサ及び配線は、第三者被害を防止するため、落下防止の処置を行う。

センサ及び配線を水分による劣化から保護するため、浸入水の恐れがある部分については、自己融着テープやビニールテープで止水を行う。なお、ここで使用するテープは、ケーブルが確実に保護されているかを確認できるように、交互に色の異なるテープを使用する。また、保護管と構造物の隙間に滞水が生じないように、シーリング材を充填する。

定期的な計測を容易にするため、複数の配線をまとめてケーブルボックスに格納しておく。ケーブルボックスの設置に際しては、ボックスが脱落しないようにアンカー等で固定する。また、内部への浸入水防止処理や関係者以外の接触防止のための対策を行うこと。

設置後は、センサの導通を確認する目的で、設置したセンサの初期値を測定する。



写真 5.2.1 鉄筋探査と削孔状況の例



(a)自己融着テープの巻付け

(b)色の異なるビニールテープの巻付け

(c)シリコーン材による保護

(d)ケーブル処理後の状況

写真 5.2.2 ケーブル処理状況の例

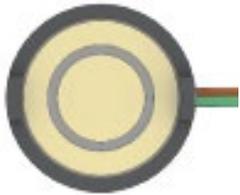
5.2.5 データの蓄積

データの蓄積については、「4章 照合電極による進展期のモニタリング」を参考にされたい。

5.2.6 費用の目安

本モニタリングシステムにおける費用の目安を表 5.2.2 に示す。

表 5.2.2 費用の目安（マクロセル腐食評価）

項目	摘要	
	鉛式照合電極	小型照合電極
モニタリングシステム の例		
計測箇所数（例）	1箇所（センサ2個）	1箇所（センサ2個）
測定期間（例）	1年間	1年間
測定頻度（例）	1回/月	1回/月
作業環境	特殊な足場が不要な橋	特殊な足場が不要な橋
データ回収方法	手動	手動
センサ材料費	20万円	5万円
機材設置費	20万円	20万円
データ収集費	30万円	30万円
総計	70万円	55万円

※鉛式照合電極の使用を基本とする。

※鉄筋探査を行う場合は別途調査費用が加わる。（機器レンタル費用：約25万円）

※複数箇所を同時期に行う場合は1箇所当たりの費用は上記より減額となる場合がある。

5.3 結果の評価

5.3.1 鋼材の電位の評価（マクロセル腐食）

断面修復の境界部にマクロセル腐食が生じると、センサが検知する電位が低下する。この電位の低下状況を把握することにより、マクロセル腐食発生の有無を判断し、断面修復の効果（再劣化の有無）を評価する。

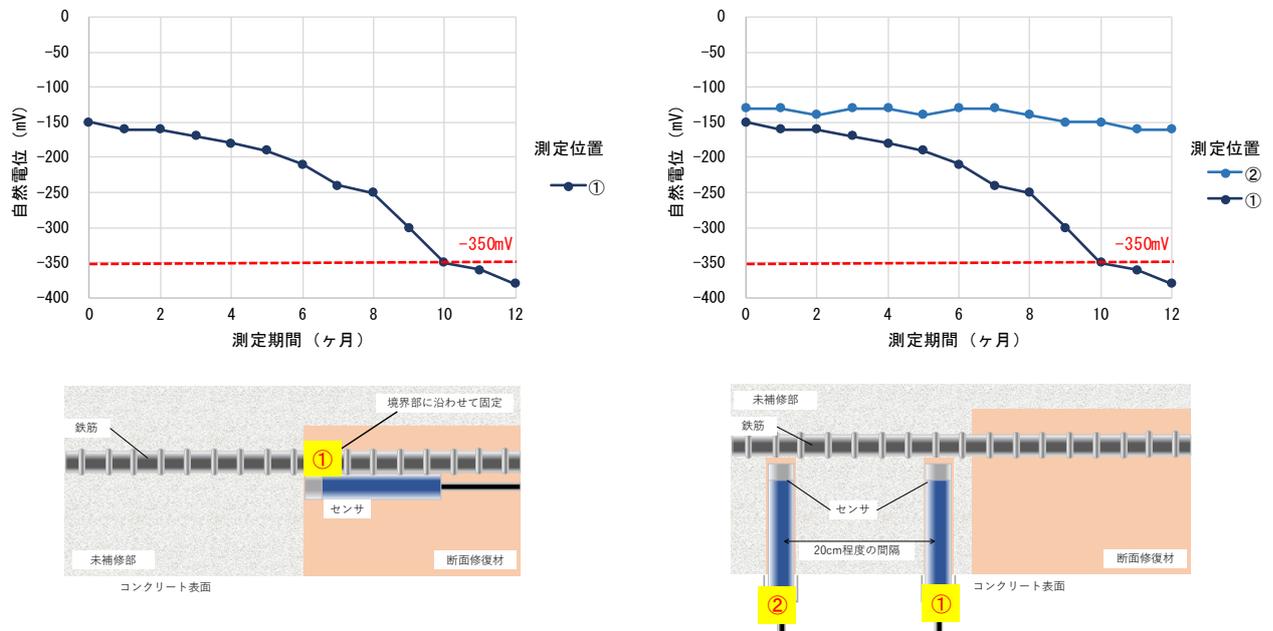


図 5.3.1 マクロセル腐食により電位が低下した場合の計測イメージ

5.4 保守

塩害補修効果を把握するモニタリングにおいては、センサやケーブル、計器などが塩分や凍結防止剤などが飛来し、付着する厳しい環境に置かれていることが多い。したがって、塩害補修効果のモニタリングにおいても、センサ設置状態やケーブルの固定状態、計器類の動作確認など、これらの保守について留意する必要がある。

これらの保守に関する詳細は、「4章 照合電極による進展期のモニタリング」を参考にされたい。

6章 適用事例

6.1 潜伏期・進展期における塩害モニタリング【6編3章・4章の事例】

「沿岸部高架橋における付着塩分、塩分浸透及び鋼材腐食モニタリング」²⁾³⁾

(1) 適用事例の概要

1) 塩害モニタリングの沿岸部高架橋への適用

本事例では、海からの飛来塩分が多量に供給される環境下である沿岸部高架橋に対して塩害モニタリングを適用した事例を紹介する。

対象とした沿岸部高架橋は、外観上でひび割れ等の変状が表れていない塩害の潜伏期から進展期の状態である。そのため、付着塩分のモニタリング、模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング、照合電極による進展期のモニタリングを適用した。

2) 橋梁の概要

対象橋梁は、1985年～1987年に建設され、日本海沿岸部に位置する中空床版PC桁である。本事例では、高架橋のP18付近の上部工及び橋脚で作業を実施した。

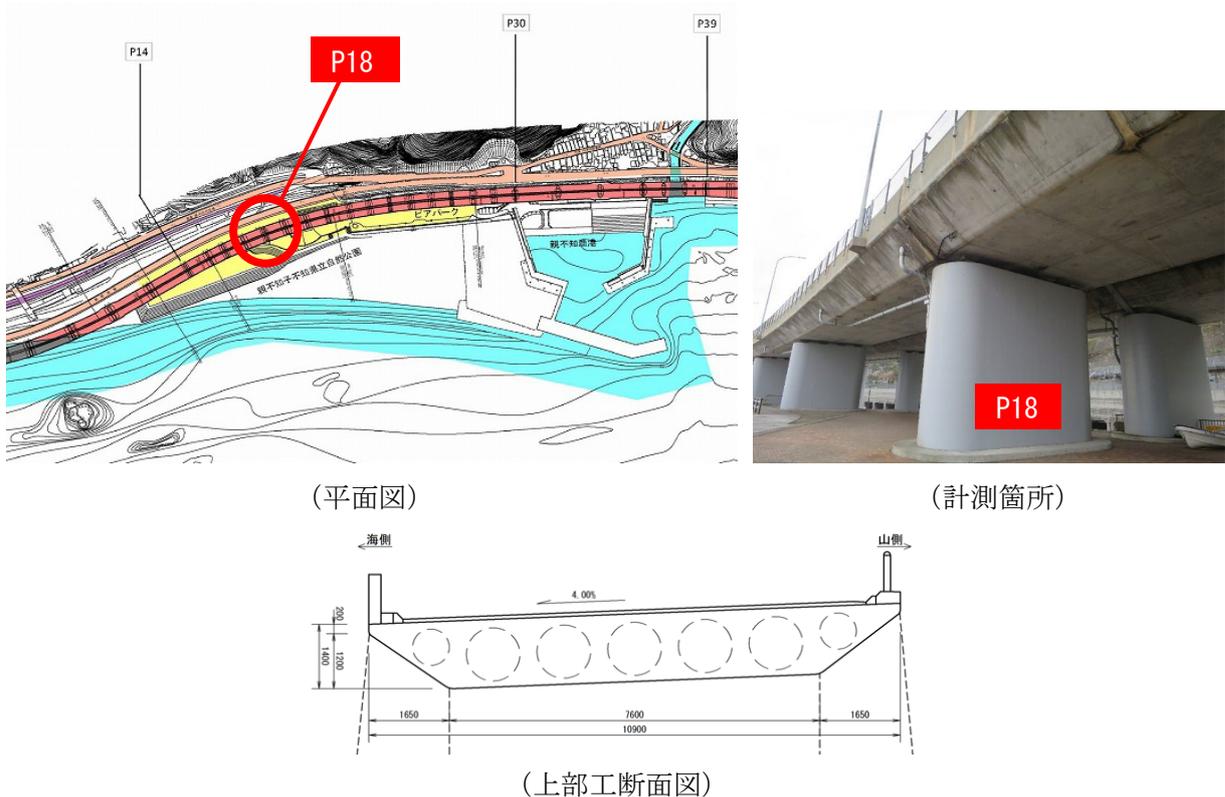


図 6.1.1 計測対象位置

(2) 計測概要

1) 使用機器

表 6.1.1 に本事例で使用した塩害モニタリングのセンサの一覧を示す。

表 6.1.1 塩害モニタリングセンサー一覧表

分類	センサ	使用方法
付着塩分のモニタリング	ワッペン (耐候性鋼材)	ワッペンを躯体表面に貼付け、一定期間暴露後に付着した塩分量を測定する。
	薄板モルタル	薄板モルタルを躯体表面に貼付け、一定期間暴露後に付着・浸透した塩分量を測定する。
潜伏期のモニタリング	腐食センサ CS5	かぶりコンクリート中に埋設し、躯体に浸透する塩分等の劣化因子を模擬鉄筋により検知する。
進展期のモニタリング	鉛照合電極 PbM-5 型	鉄筋付近に埋設し、鉄筋の自然電位を計測することにより腐食の可能性を判定する。
	GBRC 腐食試験法埋設型ミニセンサ	鉄筋付近に埋設し、鉄筋の自然電位を計測することにより腐食の可能性を判定する。

2) 計測箇所

各センサ他設置物の設置箇所と数量を表 6.1.2 に示す。センサは P18 の支承付近に、海側・桁下面・山側の 3 箇所に設置した。付着塩分のモニタリングは他のモニタリングと同様の支承付近と支承から 5m 支間中央寄りにそれぞれ設置した。

また、各センサからのケーブルはフレキシブルパイプに収容し、地上から脚立でアクセスできる位置に設置したケーブルボックスまで配線した。

表 6.1.2 計測機器一覧表

分類	センサ他設置物	設置箇所					
		海側		桁下面		山側	
		支承 付近	中央 寄り	支承 付近	中央 寄り	支承 付近	中央 寄り
付着塩分の モニタリング	ワッペン (耐候性鋼材)	1 個	1 個	1 個	1 個	1 個	1 個
	薄板モルタル	3 個	3 個	3 個	3 個	3 個	3 個
潜伏期の モニタリング	腐食センサ CS5	1 個	—	1 個	—	1 個	—
進展期の モニタリング	鉛照合電極 PbM-5 型	1 個	—	1 個	—	1 個	—
	GBRC 腐食試験法埋設型ミニセンサ	1 個	—	1 個	—	1 個	—
計測装置	ケーブルボックス	※橋脚部に 1 個設置					
	フレキシブルパイプ	※3 箇所 (海側・桁下面・山側) のセンサケーブルを収容しケーブルボックスへ接続					



図 6.1.2 センサ・計測機器の設置箇所

3) 設置状況

各センサの設置状況を図 6.1.3 に示す。埋設型のセンサは既設コンクリートを削孔したのちに、所定の位置にセンサを設置しモルタルを充填した。また、躯体外部に露出しているセンサケーブルは、降雨による腐食等でモニタリング中に不具合が生じないようにシリコーン等で保護した。



図 6.1.3 センサ・計測機器の設置状況

4) 計測状況

各センサの計測状況を図 6.1.4 に示す。付着塩分モニタリングのワッペン及び薄板モルタルは、所定の期間暴露後に躯体から剥がして回収し、塩分量を測定した。また、腐食センサ並びに鉛照合電極は、橋脚に設置したケーブルボックスまで伸ばしたセンサケーブルに対して、デジタルマルチメータを用いて電位や抵抗を定期的に計測した。ミニセンサに関しては、専用の計測機器によって電位等を定期的に計測した。



図 6.1.4 各センサの計測状況

(3) 試験結果

1) 付着塩分のモニタリング

付着塩分のモニタリングは設置から約1年後に回収し塩分量を測定した。測定結果を図6.1.5に示す。薄板モルタルによる塩分測定結果は、(大)海側>桁下面>山側(小)であったが、ワッペンは(大)海側>山側>桁下面(小)と両者の傾向に相違が見られた。これは、モルタルとワッペン(金属)の材質の違いが表面の塩分付着量に影響を与えたと考えられる。本対象はPC上部工であるため、モルタルの方がより構造物に近い表面塩分を示していると考えられる。

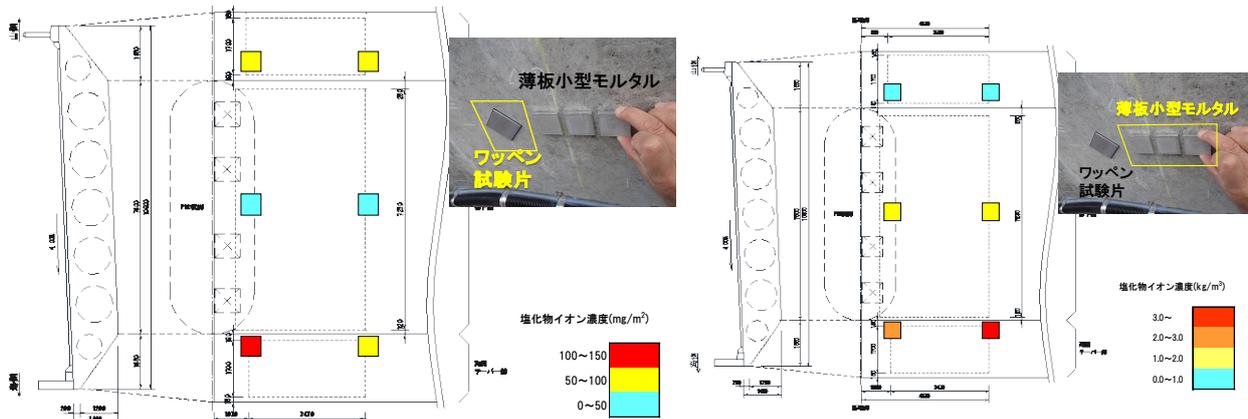


図 6.1.5 付着塩分のモニタリング結果

2) 模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング

設置から約2年間の模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング結果を図6.1.6に示す。海側、下面、山側ともにほぼ一定値を示しており。コンクリート中の塩分浸透は、鉄筋位置まで至っておらず、まだ潜伏期の段階であることがわかる。海側の腐食センサのうち、奥側(表面から30mmの位置)の抵抗値が増加している傾向がみられる。この傾向については、表面から抵抗値が増加している訳ではないので塩分浸透の影響ではなく、センサ、ケーブル、鉄筋間の接触による影響で、抵抗値が変化した可能性がある。

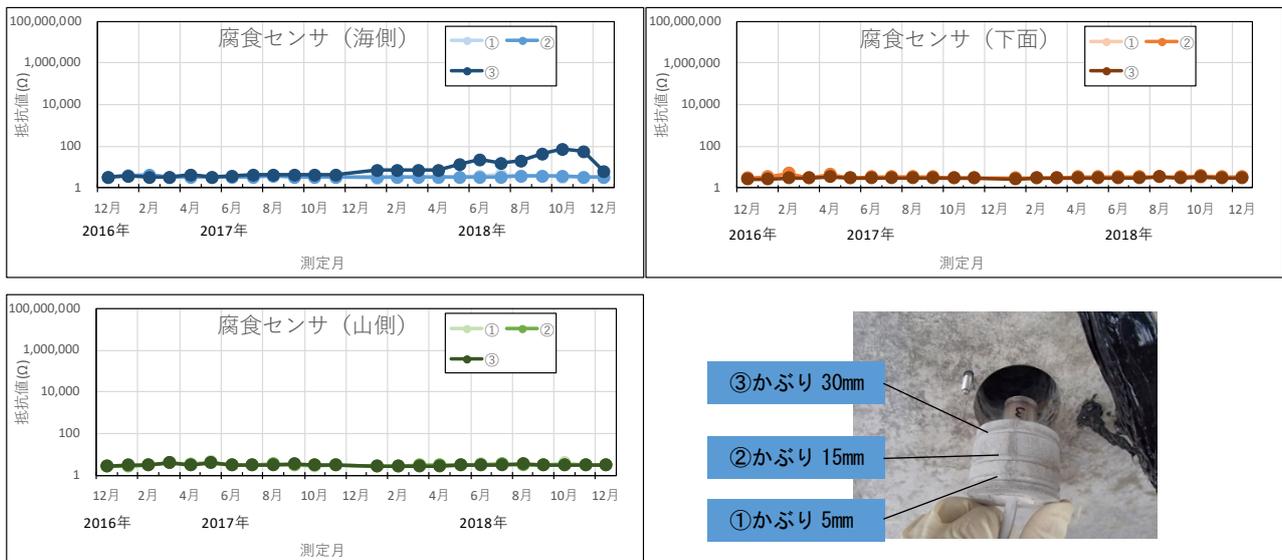


図 6.1.6 模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング結果

3) 照合電極による進展期のモニタリング

設置から約2年間の照合電極による進展期のモニタリング結果を図6.1.7に示す。

鉛照合電極によるモニタリング結果は、海側・桁下面・山側ともに同様な傾向を示しており、冬季に電位が低下する傾向が見られた。全体として電位は、 -350mV を下回っておらず、鉄筋が腐食状態に至っていないと考えられた。ミニセンサによるモニタリング結果は、海側及び山側の電位の変化は、鉛照合電極と同様に冬季に電位が低下する傾向を示している。一方、桁下面の電位は、大きく変動しており不安定な傾向を示している。一般的に、電位が大きく変動することは考えにくいいため、センサまたはケーブルの接触状況が影響していると考えられる。

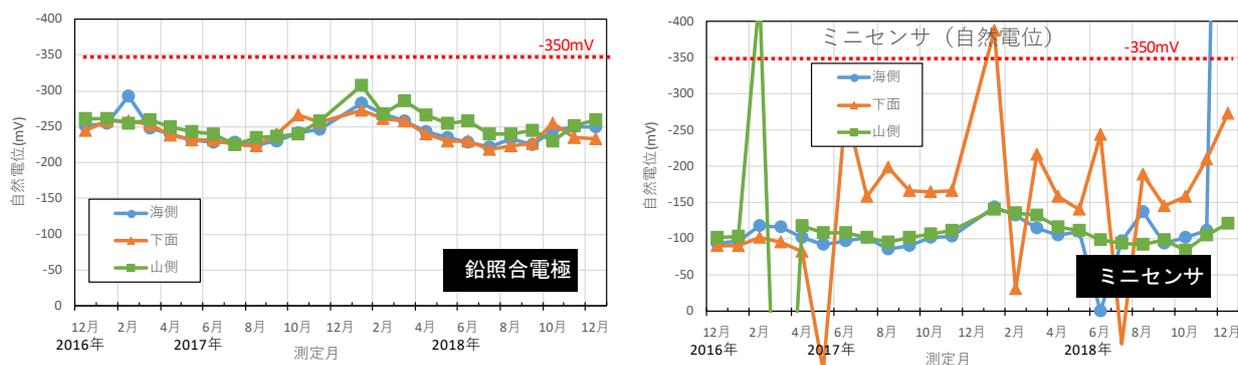


図 6.1.7 照合電極による進展期のモニタリング結果

(3) まとめ

本事例では、沿岸部の高架橋で付着塩分及び塩害の潜伏期・進展期に対するモニタリングシステムを適用し、供給される塩分量や橋梁の塩害劣化の進行状況（塩分等の劣化因子の浸透状況，鉄筋の腐食状況）を計測した。

付着塩分のモニタリング結果では、計測対象として上部工のうち海側で最も飛来塩分量が大きくなることが分かった。一方で、模擬鉄筋をセンサとした潜伏期のモニタリング結果並びに照合電極による進展期のモニタリング結果では、かぶりコンクリート中の塩分等の劣化因子の浸透や鉄筋の腐食が確認されなかった。したがって、本橋梁は現時点では塩害の潜伏期に相当すると評価できる。

本適用事例のように、事前に塩害が生じ易い箇所を付着塩分モニタリングで特定し、該当箇所に対して塩害初期の段階からセンサを埋設しておくことで、外観目視では確認できない塩害の潜伏期から進展期の劣化進行を時系列で確認することができ、予防保全的対策の判断として役立てることができると考えられる。

6.2 塩害補修効果のモニタリング【6編5章の事例①】

「塩害劣化桁の断面修復等の対策効果モニタリング」⁴⁾

(1) 適用事例の概要

1) 塩害補修効果へのモニタリングの適用

凍結防止剤による塩害劣化を受けた橋梁に対する補修効果を確認するためのモニタリングを行った。塩害劣化したコンクリート構造物では劣化箇所を除去し、断面修復材により補修を行うことが多い。図 6.2.1 のように断面修復範囲が十分でなく、母材コンクリートに塩分が残存している場合、断面修復箇所の境界部分でマクロセル腐食が生じる可能性があり、維持管理上の問題となる。また、脱塩工法を適用した場合には、脱塩により除去できなかった塩分の再拡散により、再劣化が生じる可能性がある。

そこで、上述の断面修復や脱塩工法による塩害補修に対して、補修効果を把握する目的でモニタリングを実施した。

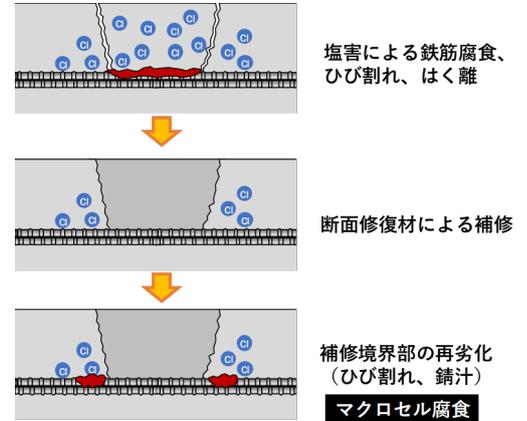


図 6.2.1 マクロセル腐食のイメージ

2) 橋梁の概要

対象橋梁は 1992 年竣工の PC 箱桁橋 (U 橋) と 1985 年竣工の PCI 桁橋 (M 橋) である (写真 6.2.1, 写真 6.2.2)。U 橋では、箱桁内部に配置された排水管から凍結防止剤を含んだ水が漏水し、箱桁下床版の上面に剥離・鉄筋露出が生じた。また、M 橋では、凍結防止剤を含んだ水が桁端部に掛り、剥離・鉄筋露出が生じていた。U 橋と M 橋の塩害劣化状況を写真 6.2.3 に示す。これらの塩害劣化に対して、表 6.2.1 に示す補修対策を実施した。



写真 6.2.1 U 橋全景 (PC 箱桁橋)



写真 6.2.2 M 橋全景 (PCI 桁橋)



(a)U 橋劣化状況(箱桁内部)



(b)M 橋劣化状況(桁端部)

写真 6.2.3 塩害劣化状況

表 6.2.1 調査対象橋梁の塩害対策

対象	形式	補修対策	実施年
U橋	PC箱桁	断面修復(上面)、脱塩工法(下面)	2017
M橋	PCT桁	断面修復	2017

U 橋 PC 箱桁下床版の上面に対しては、塩分が浸透したコンクリートを除去し、鉄筋に防錆処理をした後 PCM（ポリマーセメントモルタル）で断面修復した。下面に対しては、上面と合わせた断面修復では設計荷重時に下縁引張側で許容応力を超過するため、電気化学的脱塩工法を適用し、鉄筋位置の脱塩率 60%を目標に脱塩を実施した。図 6.2.2 に U 橋 PC 箱桁の塩害対策の概要を示す。M 橋の PCI 桁端部に対しては、U 橋箱桁の断面修復対策と同様、塩分浸透部分を除去し、PCM で断面修復を実施した。

(2) 計測概要

本検討において、モニタリングの目的は、脱塩後の塩分の再拡散によるコンクリート内部の鋼材腐食環境の変化を把握する目的で実施した。また、断面修復境界部におけるマクロセル腐食発生の有無を把握する目的で実施した。

1) 使用機器

表 6.2.2 に本事例で使用した塩害モニタリングのセンサの一覧を示す。

表 6.2.2 塩害モニタリングセンサー一覧表

分類	センサ	使用方法
U 橋のモニタリング (断面修復：マクロセル腐食) (脱塩工法：塩分再拡散)	鉛照合電極 PbM-5 型	鉄筋付近に埋設し、鉄筋の自然電位を計測することにより腐食の可能性を判定する。
	腐食センサ CS5	かぶりコンクリート中に埋設し、躯体に浸透する塩分等の劣化因子を模擬鉄筋により検知する。
M 橋のモニタリング (断面修復：マクロセル腐食)	腐食センサ CS5	鉄筋付近に埋設し、鉄筋の自然電位を計測することにより腐食の可能性を判定する。

2) 計測箇所及び状況

U 橋 PC 箱桁の脱塩工法に対して、2 種類のセンサを設置した。脱塩後の塩分の再拡散を把握する目的で模擬鉄筋センサを設置した。また、鋼材の腐食状況を把握する目的で鉛式照合電極を設置した。U 橋 PC 箱桁のセンサ設置概要を図 6.2.3 に示す。

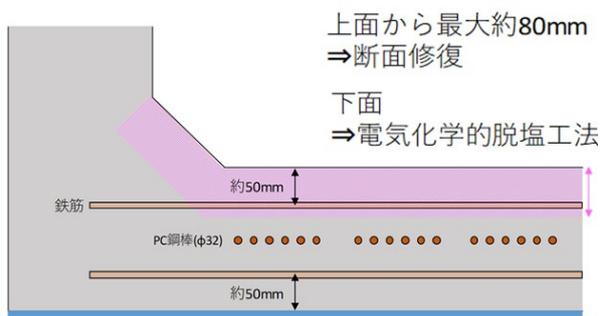


図 6.2.2 塩害対策の概要 (U 橋箱桁断面図)

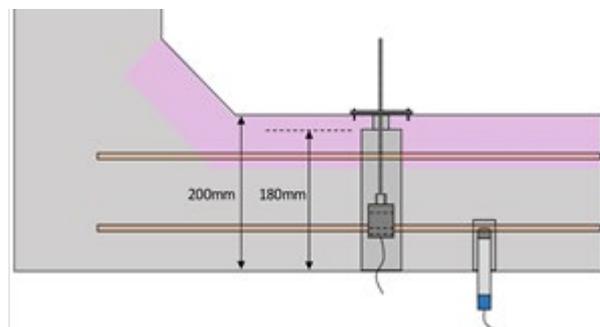


図 6.2.3 センサ設置概要 (U 橋箱桁断面図)

M 橋 PCI 桁端部の断面修復工法に対しては、断面修復境界部の母材コンクリート側に約 5cm 間隔で鉛式照合電極を鋼材位置に設置した。M 橋 PCI 桁端部の照合電極設置状況を写真 6.2.4 に示す。

なお、照合電極埋設モルタルは、母材コンクリート配合を参考に、モルタルを練混ぜて充填した。

照合電極及びケーブルは、自己融着テープ及びビニールテープ、シリコンシーリング材で養生した。また、雨水が直接掛からない箇所を考慮して計測ボックス等を設置し、ケーブル類を収納した。

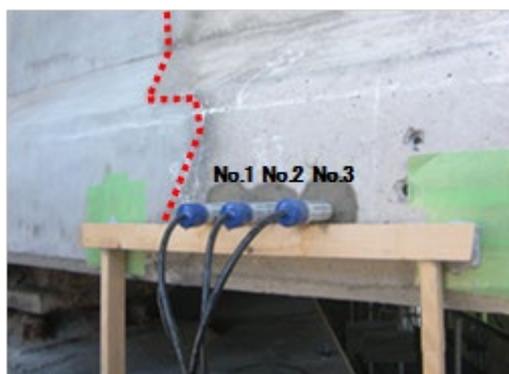


写真 6.2.4 M 橋 PCI 桁端部の照合電極の設置状況

(3) 試験結果

1) M 橋のモニタリング

M 橋 PCI 桁端断面修復部のモニタリング結果を図 6.2.4 に示す。3 本の照合電極で測定した電位に若干の差が見られるが、腐食可能性が高いとされる -350mV に至っていない状況を確認した。

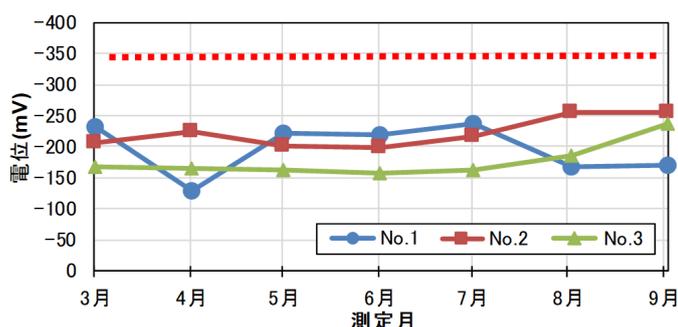


図 6.2.4 モニタリング結果 (M 橋 PCI 桁)

2) U 橋のモニタリング

U 橋の PC 箱桁脱塩部においても、M 橋と同様にモニタリング結果に大きな変化は見られなかった。これらの結果から、U 橋と M 橋において、現時点で塩害補修効果が発揮されている状態であると考えられた。

(3) まとめ

本事例では、凍結防止剤による塩害により劣化した塩害上部工の補修箇所に対するモニタリングシステムを適用し、塩害補修効果（塩分の再拡散状況、鉄筋の腐食状況）をモニタリングした。現時点では、モニタリング結果に大きな変化が見られず、塩害補修効果が発揮されていると考えられる。

本適用事例のように、塩害補修箇所にモニタリングを行うことにより、塩害補修工法やその範囲の妥当性を検証することが可能であり、再劣化が表面に現れる前にマクロセル腐食の状況を把握することができれば、事前に剥落対策など追加対策が可能となり、より確実な塩害対策実施が期待される。

6.3 塩害補修効果のモニタリング【6編5章の事例②】

「小規模橋梁の塩害補修効果モニタリング」⁵⁾

(1) 適用事例の概要

1) 塩害補修効果へのモニタリングの適用

凍結防止剤による塩害劣化を受けた橋梁に対する補修効果を確認するためのモニタリングを行った。塩害劣化したコンクリート構造物では劣化箇所を除去し、断面修復材により補修を行うことが多い。図 6.3.1 のように断面修復範囲が十分でなく、母材コンクリートに塩分が残存している場合、断面修復箇所の境界部分でマクロセル腐食が生じる可能性があり、維持管理上の問題となる。

そこで、自治体が管理する小規模橋梁において、断面修復工法による塩害補修を実施した橋梁に対して、補修効果を把握する目的でモニタリングを実施した。

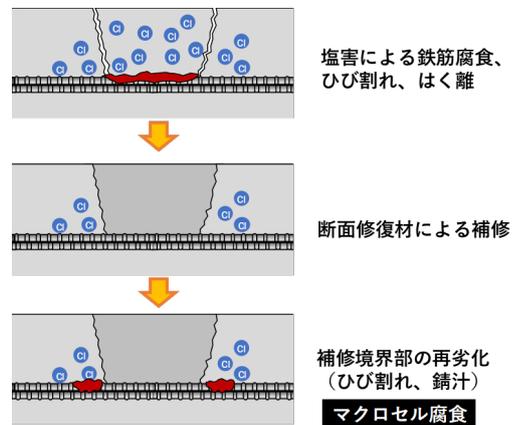


図 6.3.1 マクロセル腐食のイメージ

2) 橋梁の概要

北陸地方の沿岸部に位置し、地方自治体が管理する PC 単純プレテン中空床版橋（一部 RC 構造）を対象とした。本橋は図 6.3.2 のように、海からの風が川沿いに吹き抜け、多量の塩分が飛来する環境である。また、図 6.3.3 のように過年度補修工事において、PC 部ではひび割れ注入工および表面含浸工，RC 部では全面断面修復，高欄では部分断面修復が行われている。

事前調査の結果、PC 部に橋軸方向ひび割れが見られたが（図 6.3.4），錆汁の滲出は無かった。RC 部は断面修復済みであり，損傷は見られなかった。表面塩分を測定し海側に塩分が多い傾向であることを確認した。



図 6.3.2 対象橋梁の供用環境

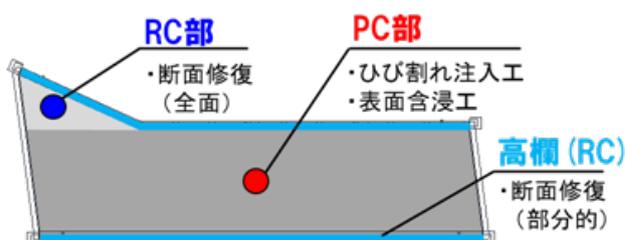


図 6.3.3 過年度補修箇所

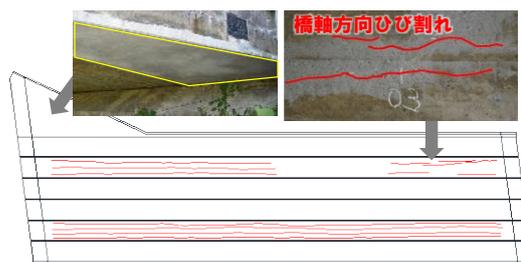


図 6.3.4 近接目視調査結果

(2) 計測概要

1) 事前調査

モニタリングの実施に先立ち本橋の劣化状況の把握、センサ設置位置の選定を目的として、事前調査を実施した。

調査項目及び結果を表 6.3.1 に示す。近接目視調査では図 6.3.4 のように PC 部に橋軸方向ひび割れが見られたが、錆汁の滲出は無く、塩害起因である可能性は低い。PC 部は断面修復済みであり、損傷は見られなかった。表面塩分は海側・A1 側に多い傾向があった。また、PC 部のひび割れ箇所は塩分が浸透しており、帯筋が腐食していた。RC 部、高欄では軽微な鋼材腐食が生じていた。このことから PC 橋軸方向に生じたひび割れからの塩分浸透により、鋼材腐食の進行が懸念される。また RC 部及び高欄では、鋼材腐食の進行性を把握する必要がある。これらの目的をもって塩害モニタリングを検討した。

表 6.3.1 事前調査の項目・内容・結果概要

調査項目	方法	目的(把握内容)	結果		
			PC部	RC部	高欄(RC)
① 近接目視調査	目視	・ひび割れ等の劣化損傷	橋軸方向ひび割れあり・錆汁なし	損傷なし	部分断面修復多数
② 表面塩分調査	ガーゼ拭き取り	・塩害環境の分布	海側・A1側の塩分量が多い	非常に少ない	—
③ 浸透塩分調査	試料採取(ドリル・コア)、電位差測定法	・塩害劣化状況	ひび割れ箇所は深くまで浸透(PC鋼材位置で1.2kg/m ³)	過年度補修箇所は少なく、母材コンクリートも少ない(境界付近で約0.9kg/m ³)	深くまで浸透(主筋位置で約1.1kg/m ³)、中性化深さも大きい
		・鉄筋腐食との関連 ・補修効果確認			
④ はつり調査	はつり、目視	・鉄筋腐食状態の確認	帯筋(20mm)に軽微な腐食 PC鋼材(約30mm)に腐食なし	配力筋(72mm)・主筋(90mm)に軽微な腐食	帯筋(7mm)に軽微な腐食 主筋(50mm)に腐食なし

※カッコ内はかぶり厚

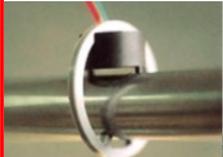
2) 使用機器

本検討において、モニタリングの目的は、断面修復後の再劣化に対して鋼材腐食有無を把握する目的で実施した。モニタリング位置は、PC 部(帯筋)、RC 部(配力筋)、高欄(主筋)のそれぞれ1箇所ずつとした。表 6.3.3 に本事例で使用した塩害モニタリングのセンサの一覧を示す。

表 6.3.2 塩害モニタリングセンサ一覧表

分類	センサ	使用方法
塩害補修効果モニタリング (断面修復：マクロセル腐食)	小型照合電極	鉄筋付近に埋設し、鉄筋の自然電位を計測することにより腐食の可能性を判定する。
	鉛式照合電極	鉄筋付近に埋設し、鉄筋の自然電位を計測することにより腐食の可能性を判定する。

表 6.3.3 使用したセンサ概要

センサ	小型照合電極	鉛式照合電極
写真		
センサ寸法	φ13×7mm	φ22×133mm
コア径	φ15~20mm程度	φ30~35mm程度
充填材	モルタル	モルタル

3) 計測箇所及び状況

PC部（帯筋）、RC部（配力筋）、高欄（主筋）に1箇所ずつセンサを設置した。はつり調査箇所を断面修復した後のマクロセル腐食を想定し、図6.3.5のように断面修復箇所から約5cm、約20cmに1個ずつ設置した。PC部では事前調査結果より、表面塩分量が多く、ひび割れが生じている箇所にセンサを設置した。また、計測作業の効率性及び安全性を考慮し、計測BOXはすべて上部工下面に設置した（図6.3.6）。

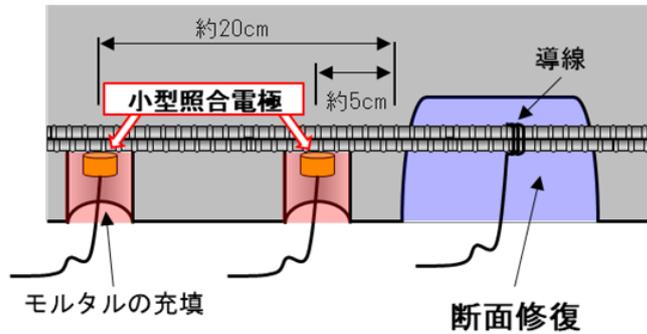


図 6.3.5 照合電極設置イメージ

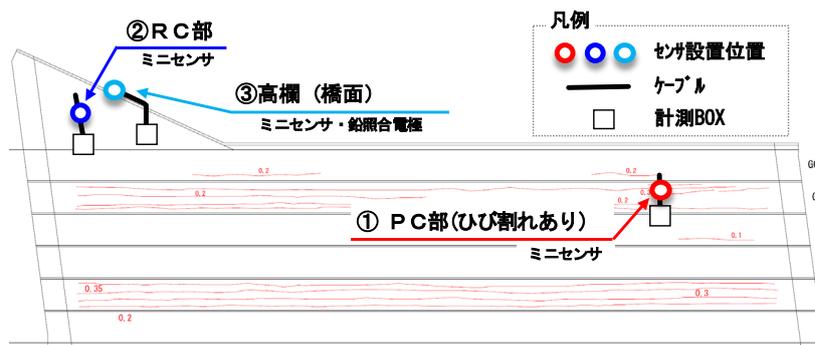


図 6.3.6 センサ設置位置

小型照合電極を鉄筋に対して確実に設置するため、照合電極の接触面にはあらかじめモルタルを充填して照合電極を設置し、設置後に充填したモルタルが硬化する際にはアクリル板とスポンジを用いた簡易な治具により上向きの圧力を与えることにより照合電極を確実に設置した（図6.3.7）。



図 6.3.7 小型照合電極の設置時の状況

本橋の供用環境では、水分や塩分の供給により照合電極の配線ケーブル及び計測 BOX が劣化することが懸念された。そのため、配線ケーブルは樹脂製のフレキシブルパイプ内に格納するとともに孔は照合電極位置に合わせて最小限とし、水分や塩分が溜まらないよう隙間をシリコン材でコーキングした。また、計測 BOX の内部には除湿剤を設置して乾燥状態を保つことにより、ケーブルや端子類の劣化を防止した。

また、簡易かつ安価な塩害モニタリングシステムにより、確実にデータを取得するため、表 6.3.4 に示す工夫を行った。

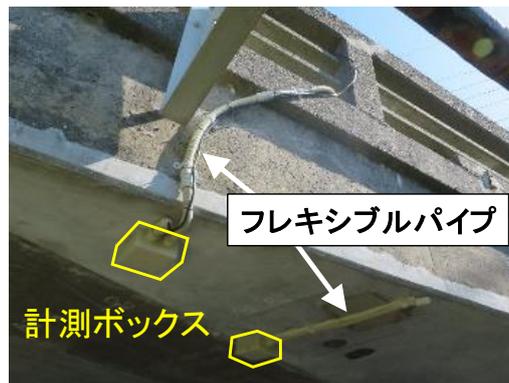


写真 6.3.1 ケーブルや端子の保護（フレキシブルパイプ，計測ボックス）

表 6.3.4 センサ設置時の工夫内容

目的	内容
センサの確実な設置	・ミニセンサ設置面のモルタル充填
	・充填モルタル硬化時の固定方法
ケーブル・計測BOX等の劣化防止	・フレキシブルパイプによるケーブル等の保護
	・シリコンコーキングによる充填保護
	・計測ボックス内の除湿
安価な機材の使用	・ホームセンター等で調達可能な汎用品を使用

（3）試験結果

照合電極設置以降、月一回程度のモニタリング計測を実施中である。計測結果を図 6.3.8 に示す。これまでの計測結果の概要を以下に示す。

- ・断面修復箇所から 5cm と 20cm に設置した小型照合電極の結果に大きな違いは見られない。
- ・小型照合電極結果は、0mV～300mV 程度を推移している。
- ・鉛式照合電極結果は-400mV～-500mV 程度を推移している。

小型照合電極と鉛式照合電極の自然電位の違いについては、今後も継続的にモニタリング結果を比較し、検討を行う予定である。

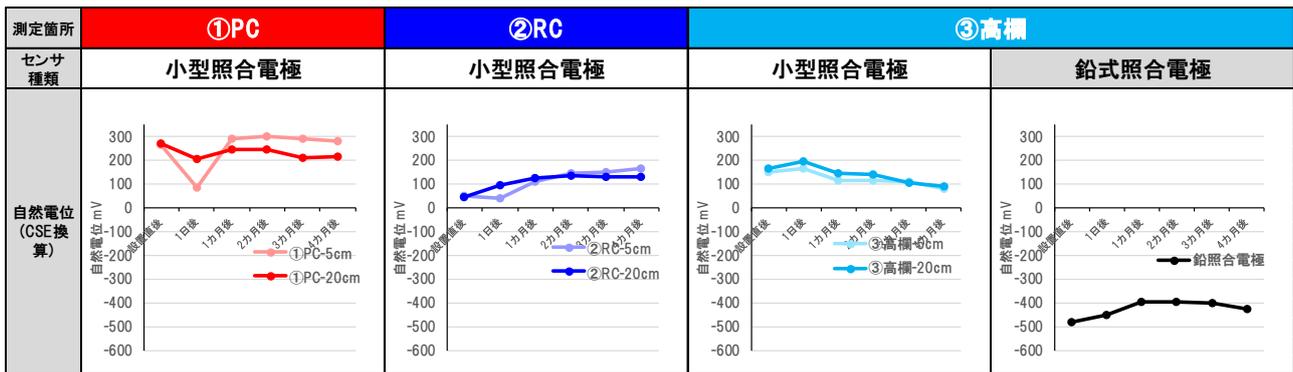


図 6.3.8 モニタリング計測結果グラフ

(4) まとめ

本事例では、海岸に近く飛来塩分により劣化した塩害上部工の補修箇所に対してモニタリングシステムを適用し、塩害補修効果（鉄筋の腐食状況）をモニタリングした。現時点では、モニタリング結果に大きな変化が見られず、塩害補修効果が発揮されていると考えられる。

本適用事例のように、自治体が管理する小規模橋梁の塩害補修箇所にモニタリングを行うことにより、塩害補修工法やその範囲の妥当性を検証することが可能であり、再劣化が表面に現れる前にマクロセル腐食の状況を把握することができれば、事前に有効な追加対策が可能となり、より確実な塩害対策実施が期待される。

【参考文献】

- 1) ASTM C 876-91(Reapproved 1999) : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999
- 2) 園田, 中津井他: 塩害モニタリングにおける対象位置決定方法に関する研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, 2017.9
- 3) 松山, 園田他: 塩害モニタリングにおける実橋センサ設置方法に関する研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, 2017.9
- 4) 松山, 園田他: 塩害補修効果確認モニタリングの現場実証, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, 2019.9
- 5) 園田, 高地他: 自治体橋梁における塩害モニタリングの現場実証, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, 2019.9

添付資料：用語集

用語	意味	類義語・関連語
塩害	コンクリート中の塩分の存在により、コンクリート中の鋼材の腐食が進行し、腐食生成物の体積膨張によりコンクリートのひび割れや剥離・剥落、あるいは鋼材の断面減少が生じ、ひいては構造物の性能低下につながる現象	
飛来塩分	海岸の波浪によって生ずる海水しぶき、自然由来の塩分	
凍結防止剤	冬季の路面凍結を防止するために散布される塩化ナトリウムや塩化カルシウムのこと、車の走行や路面排水により生じる塩水しぶき、人為的由来の塩分	
塩化物イオン	塩（塩化ナトリウム）が水溶液の状態となり、ナトリウムイオンと塩素イオンとなるが、このうち塩素イオンをさす（Cl ⁻ ）	
劣化過程	劣化が進行することにより変化する劣化状況の各期間	
潜伏期	鋼材の腐食が開始するまでの期間	
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	
電位	腐食することで鋼材がマイナス電気を帯びて、電圧が低下すること、自然電位ともいう	mV
電位差	腐食することで鋼材がマイナス電気を帯びて、電圧が低下し、健全部と比べて差が生じること	mV
照合電極	電位の測定時に電位の基準点となる電極のこと	基準電極 参照電極
断面修復工法	劣化したコンクリートと鋼材の錆を除去し、鋼材に防錆剤を塗布して、新しいコンクリートで除去部を埋め戻す補修工法	
再劣化	以前に補修した箇所が再度劣化すること	
マクロセル腐食	断面修復した箇所の境界部において、内部の鋼材が著しく腐食すること	

第7編 橋脚および基礎のモニタリング

1 章	橋脚および基礎のモニタリングの位置づけと種類	7-1
1.1	モニタリングの目的・位置づけ	7-1
1.1.1	変状の早期発見のために行うモニタリング（洗掘が発生しやすい橋脚・基礎）	7-2
1.1.2	変状を確認した場合に行うモニタリング（損傷を確認した橋脚・基礎）	7-4
1.1.3	災害時の変状箇所の早期把握を行うモニタリング(洪水・地震により被災した橋脚・基礎).....	7-5
1.1.4	初期値の取得	7-6
1.2	モニタリングの種類と役割	7-7
1.2.1	モニタリングの種類	7-7
1.2.2	モニタリングの役割	7-8
2 章	航空レーザ測深による洗掘状況の把握	7-10
2.1	技術の概要.....	7-10
2.1.1	目的.....	7-10
2.1.2	システムの概要.....	7-10
2.2	モニタリングの方法	7-13
2.2.1	モニタリングの手順	7-13
2.2.2	計画.....	7-14
2.2.3	計測環境の準備.....	7-18
2.2.4	計測.....	7-20
2.2.5	データ処理（1次処理）	7-22
2.2.6	データ処理（2次処理）	7-24
2.2.7	費用の目安.....	7-24
2.3	結果の評価.....	7-26
2.3.1	洗掘状況の把握.....	7-26
2.3.2	洗掘の進行予測.....	7-26
3 章	加速度センサを用いた洗掘量および傾斜角のモニタリング	7-27
3.1	技術の概要.....	7-27
3.1.1	目的.....	7-27
3.1.2	システムの概要.....	7-27
3.1.3	計測期間	7-29
3.2	モニタリングの方法	7-30
3.2.1	モニタリングの手順	7-30
3.2.2	計画.....	7-31
3.2.3	機器の選定	7-31
3.2.4	機器の設置.....	7-32
3.2.5	初期値の取得	7-33

3.2.6	計測.....	7-36
3.2.7	解析.....	7-37
3.2.8	データの蓄積.....	7-37
3.2.9	費用の目安.....	7-38
3.3	結果の評価.....	7-39
3.3.1	土被り量と傾斜角のモニタリング.....	7-39
3.3.2	初期値の再取得.....	7-40
3.4	保守.....	7-40
4 章	無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価（洗掘）.....	7-41
4.1	技術の概要.....	7-41
4.1.1	目的.....	7-41
4.1.2	システムの概要.....	7-42
4.1.3	計測期間.....	7-46
4.2	モニタリングの方法.....	7-47
4.2.1	モニタリングの手順.....	7-47
4.2.2	計画.....	7-48
4.2.3	機器の選定.....	7-49
4.2.4	無線加速度センサおよび機器の設置.....	7-50
4.2.5	初期値の計測.....	7-52
4.2.6	計測.....	7-53
4.2.7	データの伝送.....	7-53
4.2.8	データの蓄積.....	7-53
4.2.9	データの分析.....	7-54
4.2.10	費用の目安.....	7-56
4.3	結果の評価.....	7-57
4.4	保守.....	7-63
5 章	無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価（地震）.....	7-64
5.1	技術の概要.....	7-64
5.1.1	目的.....	7-64
5.1.2	システムの概要.....	7-65
5.1.3	計測期間.....	7-66
5.2	モニタリングの方法.....	7-67
5.2.1	モニタリングの手順.....	7-67
5.2.2	計画.....	7-68
5.2.3	機器の選定.....	7-69
5.2.4	無線加速度センサおよび機器の設置.....	7-69

5.2.5	初期値の設定	7-69
5.2.6	計測.....	7-70
5.2.7	データの伝送	7-70
5.2.8	データの蓄積	7-70
5.2.9	データの分析	7-70
5.2.10	費用の目安.....	7-70
5.3	結果の評価.....	7-71
5.4	保守.....	7-75
6 章	適用事例	7-76
6.1	無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価【7編4章の事例】	7-76
6.2	加速度センサによる地震により被災した橋梁の補修効果の確認【7編5章の事例】	7-81
添付資料1：用語集		7-87

1章 橋脚および基礎のモニタリングの位置づけと種類

1.1 モニタリングの目的・位置づけ

橋脚および基礎のモニタリングは、洗掘および地震による損傷の早期発見を対象としている。

洗掘は、増水した河川の流水により、河川・海中の橋脚周辺地盤で河床が低下することで、橋脚、基礎の安定性が低下し、これにより橋脚の沈下、傾斜などの甚大な被害を及ぼす変状が引き起こされる。現行の定期点検要領では、洗掘の発生の有無を5年に1回の近接目視調査により定性的な評価で行っているが、河川・海中の基礎の洗掘状態を近接目視で把握することは困難であった。

地震の発生時は、橋脚および基礎が被災すると重大な被害を受けるため、被災箇所の早期発見および被災状況を把握し、交通規制、供用可否判定などを早期に対応する必要がある。しかし、橋脚躯体や基礎は土中部に埋まっており、被災状況を目視で把握するには掘削する必要があるため、早急に被災状況を確認することができない。また補修・補強後の橋脚について補修・補強効果を定量的に評価することができず、地震後の橋梁の安全性を確認することができない。

以上より、橋脚および基礎に関しては、洗掘、地震に対するモニタリングを行い、橋脚・基礎の安全性を評価する必要がある。本編ではそのモニタリング手法を紹介する。本書第1編3.4のモニタリング活用イメージに照らし合わせると、(1)変状の早期発見のために行うモニタリングは、洗掘が発生しやすい橋脚・基礎に対し行うモニタリングであり、(2)変状を確認した場合に行うモニタリングは、橋梁定期点検結果によって損傷を確認した後に補修・更新までの期間に行うモニタリングを指し、(3)災害時の変状箇所の早期発見や補修・補強の効果を確認するためのモニタリングは、洪水や地震の被災を受けた橋脚・基礎に対するモニタリングである。これらのモニタリングの活用場面を表1.1.1、関連性を図1.1.1に示す。

表 1.1.1 モニタリングの活用イメージ・目的

モニタリングの活用イメージ		目的
活用場面	モニタリングの位置づけ	
洗掘が発生しやすい橋脚・基礎	変状の早期発見のために行うモニタリング	洗掘が発生しやすい橋梁に対して行うモニタリング
洗掘を確認した橋脚・基礎	変状を確認した場合に行うモニタリング	損傷が確認された橋梁に対して補修・更新までの期間に行うモニタリング
洪水・地震により被災した橋脚・基礎	災害時の変状箇所の早期把握	洪水・地震によって被害が生じた可能性がある橋梁に対して行うモニタリング

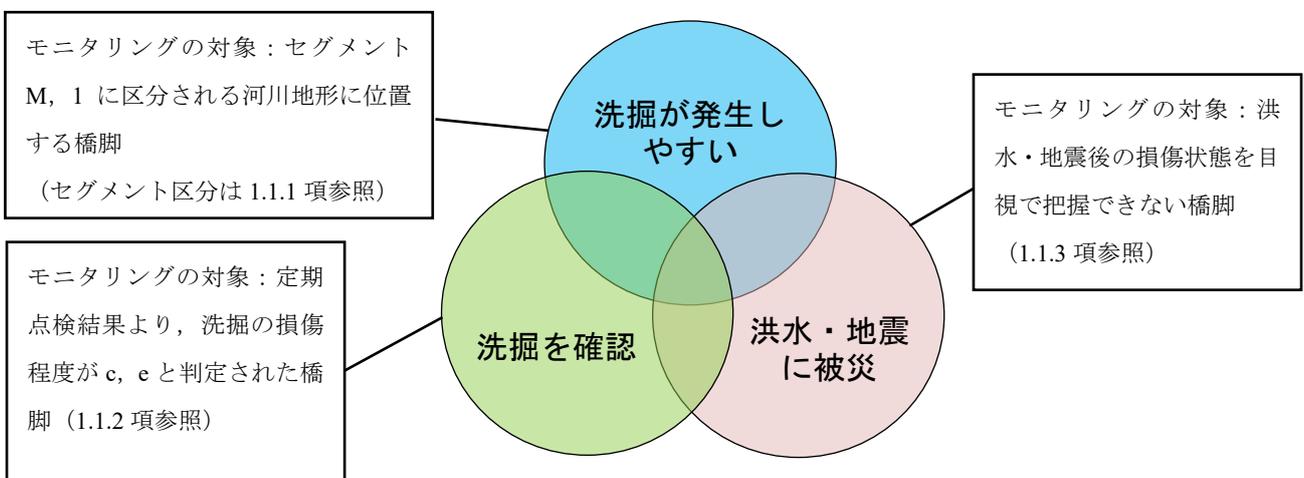


図 1.1.1 橋脚・基礎のモニタリングの位置づけの関連性

1.1.1 変状の早期発見のために行うモニタリング（洗掘が発生しやすい橋脚・基礎）

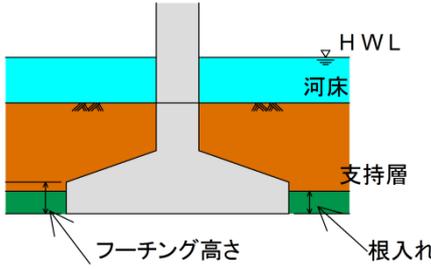
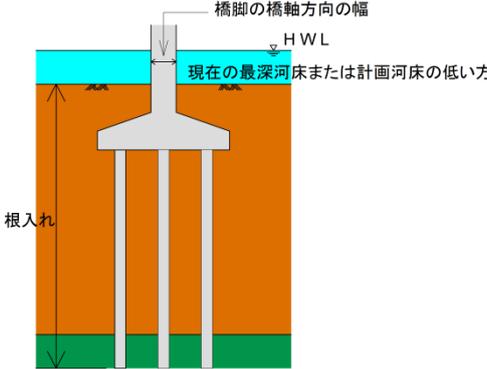
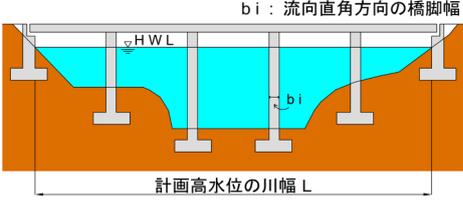
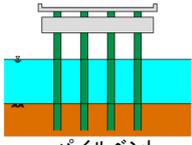
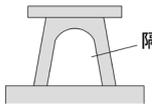
変状の早期発見のためのモニタリングでは、洗掘が発生しやすい河川地形、構造的な特徴を有する橋梁に対して、洗掘が発生する前の健全な状態から定期的にモニタリングを行い、洗掘が発生した際の異常値を検知し、洗掘による変状を早期に発見することを目的とする。

洗掘のモニタリングの対象箇所の特徴は、表 1.1.2 に示す河川地形による特徴と表 1.1.3 に示す構造的な特徴が挙げられる。河川地形の特徴としては、河川勾配を指標とした「河川砂防技術基準 調査編 国土交通省 水管理・国土保全局 平成 26 年 4 月」に示されている河川セグメント区分より、表の赤枠に示すセグメント M, 1 に該当する箇所において洗掘が発生しやすい。また構造的な特徴としては「河川管理施設等構造令」が制定される前の架設時期が古い橋梁や河川内に位置する橋脚の構造によって決まる河積阻害率などが挙げられる。

表 1.1.2 河川地形の主な特徴と洗掘の発生しやすさ

		洗掘の発生			
		多			少
河川地形	セグメント区分	セグメントM	セグメント1	セグメント2	セグメント3
	地形区分	山間地	扇状地	谷底平野 自然堤防帯	デルタ
	河床材料の 代表粒径 dR	さまざま	2cm以上	3cm~0.3mm	0.3mm以下
	河岸 構成物質	河床河岸に岩が出てい るところが多い	表層に砂, シルトが乗 ることがあるが薄く, 河 床材料と同一物質が占 める	下層は河床材料と同 一, 細砂, シルト, 粘土 の混合物	シルト, 粘土
	勾配の目安	1/60以上	1/60~1/400	1/400~1/5000	1/5000~水平
	蛇行程度	曲りが少ない		蛇行が激しいが, 川幅水深 比が大きいところでは8字蛇 行または島の発生	蛇行が大きいものもあるが 小さいものもある
	河岸 浸食程度	非常に激しい		中, 河床材料が大きい方が 水路は良く動く	弱, ほとんど水路の位置は 動かない
	低水路の 平均深さ	0.5~3m		2~8m	3~8m

表 1.1.3 洗掘が発生しやすい下部構造の主な特徴※

分類	パラメータ	特徴
構造的 特徴	架設年代	<p>「河川管理施設等構造令」が制定される昭和 51 年以前の橋梁は、橋梁構造自体が洗掘や洪水に対して安全性が低いと考えられる。</p>
	基礎の根入れ	<p>洗掘に対する安定性は、以下に示す基礎の根入れ状態が確保されていない場合、洗掘に対する影響が懸念される。</p> <p>①直接基礎</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フーチングの高さの半分以上の支持層（砂質土では N 値が概ね 30 以上、粘性土では N 値が概ね 20 以上の層）に根入れされている。 <p>②杭基礎，ケーソン基礎，鋼管矢板基礎</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現在の最深河床または計画河床の低い方から基礎先端までの根入れが 10m 以上、または橋脚の橋軸方向の幅の 5 倍以上である。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>①直接基礎</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>②杭・ケーソン・鋼管矢板基礎</p> </div> </div>
河積 障害率		<p>「河川管理施設等構造令」が制定される昭和 51 年以前の橋梁は、河積障害率が 5%以上となる橋梁が存在するため、洗掘に対する影響が懸念される。</p> <p style="text-align: center;">河積障害率 = $\sum b/L \times 100$</p> <div style="text-align: center;">  </div>
橋脚の 構造形式		<p>橋脚がパイルベントで作られている場合や隔壁の無いラーメン構造の場合など流水を障害する構造の場合、洗掘による影響が懸念される。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>パイルベント</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>隔壁なし</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">隔壁の無いラーメン構造</p>

※表中「道路防災総点検 点検要領 H18.9」より一部抜粋

1.1.2 変状を確認した場合に行うモニタリング（損傷を確認した橋脚・基礎）

変状を確認した場合に行うモニタリングでは、表 1.1.4 に示す定期点検により洗掘による損傷の発生が認められた橋梁を対象に行う。

表 1.1.4 変状を確認した場合に行うモニタリングの対象橋脚

目的	対象箇所	モニタリング開始時期
橋梁定期点検結果より実施	橋梁定期点検結果で洗掘損傷の発生が認められた橋梁（表 1.1.5）	洗掘損傷の発生が認められた時点

表 1.1.5 「橋梁定期点検要領 国土交通省 道路局 国道・防災課 H31.3」㊸洗掘

区分	一般的状況
a	損傷なし
b	—
c	基礎が流水のため洗掘されている。
d	—
e	基礎が流水のため著しく洗掘されている。

損傷程度の評価区分は、一般的状況を参考にして定性的に行うことを基本とする。

【所見を記載する上での参考】

損傷箇所	代表的な損傷原因の例	懸念される構造物への影響の例
基礎	<ul style="list-style-type: none"> ・ 流水の変化 ・ 全体的な河床の低下 	洗掘が進展すると、下部工に傾斜が生じる可能性がある。

【判定区分 E1；橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応が必要な損傷】

フーチング下面まで洗掘され、橋脚の沈下や傾斜が生じる危険性が高い状況などにおいては、緊急対応が妥当と判断できる場合がある。

【判定区分 S1, S2；詳細調査又は追跡調査が必要な損傷】

過去の点検結果で洗掘が確認されており、常に水位が高く、目視では確認できない状況などにおいては、詳細調査を実施することが妥当と判断できる場合がある。

1.1.3 災害時の変状箇所の早期把握を行うモニタリング（洪水・地震により被災した橋脚・基礎）

災害時の変状箇所の早期把握を行うモニタリングでは、表 1.1.6 に示す洪水、地震後の変状箇所を早期に把握することが困難な場合、モニタリングによる被災前と被災後の結果を比較することにより、変状箇所の早期把握を行う。

地震時のモニタリングの対象となる橋脚を表 1.1.7 に示す。なお、洗掘は 1.1.1 に示す洗掘が発生しやすい河川地形および構造的特徴を有する橋脚を対象とする。本モニタリングを行うにあたり、変状箇所の早期把握を行うためには、対象橋脚の被災前の初期値を把握しておく必要がある。

表 1.1.6 洪水・地震による変状箇所の近接困難箇所

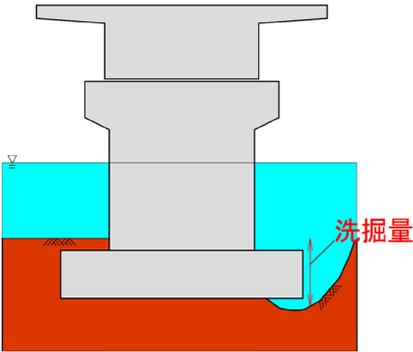
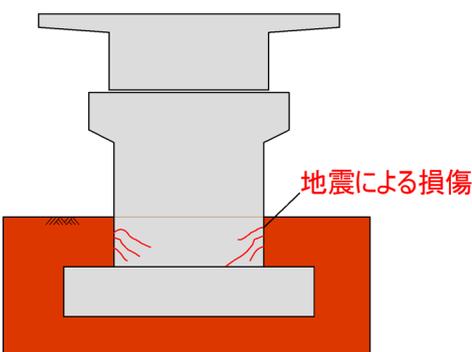
	洪水	地震
変状		
変状の種類	洗掘，沈下，傾斜	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートのひび割れ・圧壊 ・鋼材の座屈，鉄筋の降伏，破断 ・橋脚，基礎の傾斜
点検時の問題	・河川内の河床低下，洗掘状態を目視で把握することが困難	・土中部の橋脚躯体，基礎の損傷を掘削して確認する必要があり，早期に被災状況を目視で把握することが困難
維持管理の問題	・水面下での洗掘量の進行状況による橋脚の安全性評価が確認できない	・補修，補強効果の定量的な評価が困難

表 1.1.7 地震のモニタリングの対象となる箇所と位置づけ

対象箇所	モニタリングの位置づけ
新設橋梁	供用開始後の安全性の確認と被災前の初期値の把握
耐震補強を実施した橋梁	耐震補強後の安全性の確認と補強による構造的変化後の初期値の把握
現行の耐震基準を満たしていない橋梁	耐震補強，特に基礎の耐震補強を行っていない橋梁の安全性の確認と補強前の初期値の把握

1.1.4 初期値の取得

本章で紹介するモニタリングでは、変状を早期に発見するため、あらかじめ初期値を把握しておく必要がある。初期値のモニタリングの位置づけを表 1.1.8 に示す。

表 1.1.8 初期値のモニタリングの位置づけ

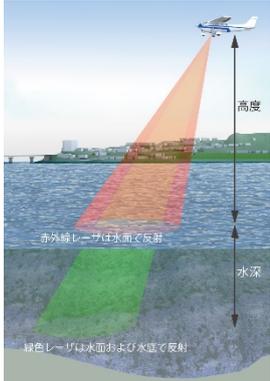
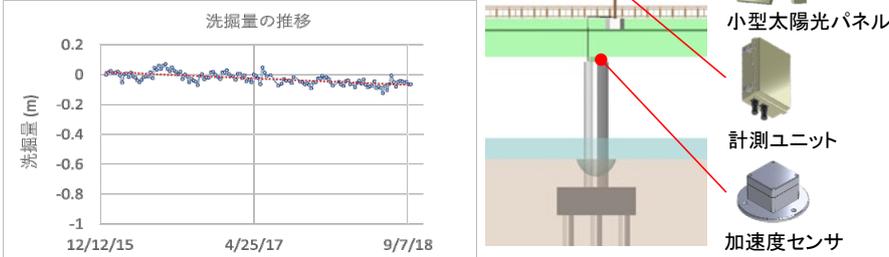
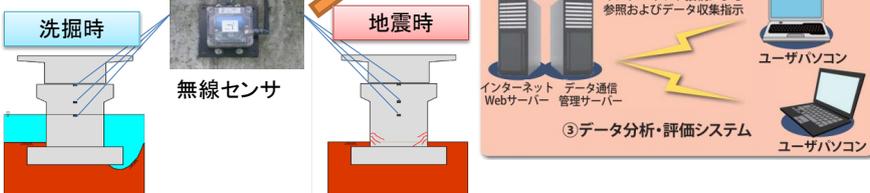
対象橋梁	初期値のモニタリングの位置づけ
新設橋梁の場合	・ 建設直後の状態 (建設直後の河床位置の確認を行うモニタリング)
既設橋梁の場合	・ 健全な状態 (洗掘、地震による損傷を受けていない状態) ・ 損傷が把握できた状態 ・ 耐震補強後等の構造的な変化が行われた状態
洪水・地震による被災を受けた橋梁の場合	・ 補修、補強前の状態 (補修、補強効果の確認を行うモニタリング)

1.2 モニタリングの種類と役割

1.2.1 モニタリングの種類

橋脚および基礎のモニタリング技術の概要を表 1.2.1 に示す。2 章では航空レーザ測深により、航空機からレーザ計測を行うことで、広範囲の水底地形や橋脚周辺の洗掘状況を概括的に把握する。3 章では加速度センサにより、橋梁下部工基礎の土被り厚（洗掘度）と橋脚の傾斜角度を健全度指標とし、定期巡回時や災害発生時における健全度を現地で把握する。4, 5 章では、無線タイプの加速度センサにより、固有振動数から洗掘時においては洗掘量および橋脚・基礎の安全性、地震時においては橋脚・基礎の損傷度および安全性を定量的に評価する。

表 1.2.1 橋脚および基礎のモニタリング技術の概要

技術名	技術の概要
航空レーザ測深による洗掘状況の把握 (2章)	<p>航空レーザ測深機(ALB)を用いて、航空機(上空)より直接レーザ計測を行うことで、水底地形や橋脚周辺の洗掘状況を広範囲に把握する。また複数の時期に計測することにより、橋梁上下流の河床変動(洗掘)の進行状況を捉えることも可能となる。</p> 
加速度センサを用いた洗掘量および傾斜角のモニタリング (3章)	<p>加速度センサを橋脚の天端に、小型太陽光パネルと計測ユニットを桁上の街路灯などに取り付け、洗掘量と橋脚の傾斜角の変動を常時監視する。</p> 
無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価(洗掘) (4章)	<p>橋脚に設置した無線加速度センサより、橋脚の常時微動から固有振動数を測定し、洪水による洗掘量と地震時の損傷を固有振動数から評価する。</p> 
無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価(地震) (5章)	<p>無線センサ</p> 

1.2.2 モニタリングの役割

図 1.2.1 は、橋脚および基礎のモニタリングの活用イメージ・目的について体系的に示したものである。また図 1.2.1 の各項目と交わる箇所については、表 1.2.2 に示す特徴を有する橋脚を主に対象としている。現状では、1.2.1 で紹介した維持管理のそれぞれのフェイズ（健全度の状態）や目的に適した 3 つの技術がある。ここで示す 3 つの技術は、現段階で社会実装可能なものであり、第 1 編で示したモニタリングシステムの活用期待する効果が見込める技術を選定している。技術の詳細は 2 章以降に記載する。

図 1.2.2, 図 1.2.3 は、「第 1 編 3 章モニタリングの定義」において示されているモニタリングの位置づけに対応して、洗掘および地震によるモニタリングを体系的に示したものである。

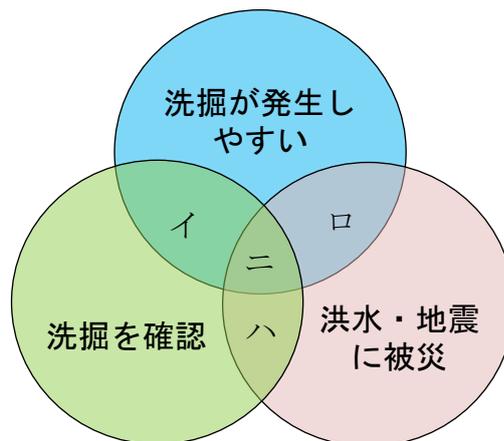


図 1.2.1 橋脚・基礎のモニタリングの位置づけの関連性

表 1.2.2 各項目と交わる箇所の橋脚の特徴

	特徴
イ	セグメント M, 1 に該当する河川地形に位置する橋脚であり、かつ橋梁の定期点検結果より損傷程度 c, e と判定された橋脚
ロ	セグメント M, 1 に該当する河川地形に位置する橋脚であり、かつ洪水後の洗掘状態を目視により確認することが困難である橋脚
ハ	橋梁の定期点検結果より損傷程度 c, e と判定された橋脚であり、かつ洪水後の洗掘状態を目視により確認することが困難である橋脚
ニ	セグメント M, 1 に該当する河川地形に位置する橋脚であり、橋梁の定期点検結果より損傷程度 c, e と判定され、洪水後の洗掘状態を目視により確認することが困難である橋脚

(1) 洗掘のモニタリングの種類と役割

洗掘を対象としたモニタリングシステムは、本編では3つの技術が対応している。河床全体の洗掘箇所を把握するため、航空レーザ測深により、河床全体の河床位置を確認し、洗掘箇所のスクリーニングを行う。スクリーニングにより、洗掘による影響が懸念される橋脚に対して、加速度センサを設置し、洪水前の橋脚の固有振動数や傾斜角などの初期値を計測し、洪水後は初期値と比較することで、洗掘量および橋脚・基礎の安全性を定量的に評価することができる。

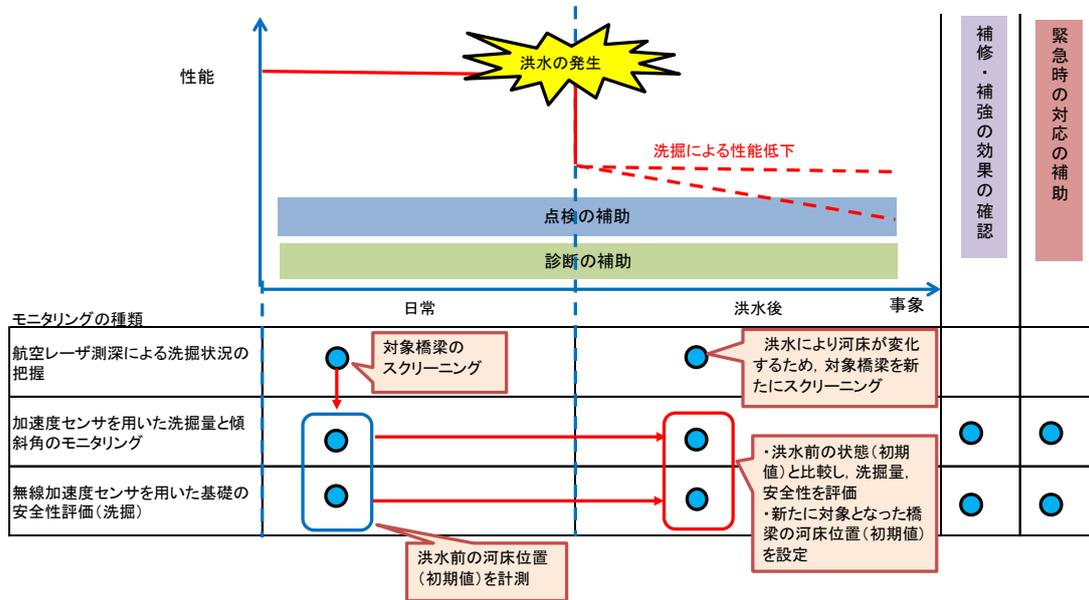


図 1.2.2 洗掘によるモニタリングの種類と役割

(2) 地震のモニタリングの種類と役割

地震を対象としたモニタリングシステムは、本章の3つのモニタリングシステムのうち、「加速度センサを用いた洗掘量と傾斜角のモニタリング」、「無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価(地震)」が対応しており、地震後の点検・診断の補助、補修・補強効果の確認、緊急時の対応の補助を目的とする。

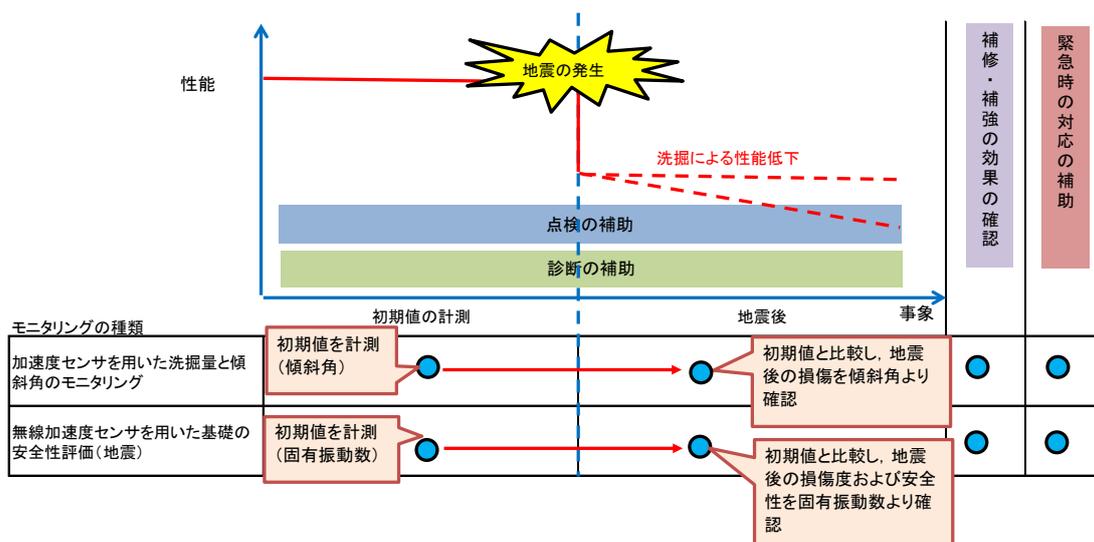


図 1.2.3 地震によるモニタリングの種類と役割

2章 航空レーザ測深による洗掘状況の把握

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

洗掘状況の健全度の評価では、橋脚周辺の水底地形を確認して洗掘の広がりや深さを把握することが重要である。さらに将来的な洗掘の進行性を予測するために、対象橋脚の上下流の水底地形を経時的に把握することも重要である。これを実現するためには、広い範囲の3次元河床データが必要となる。

これまで、橋脚周辺の水底地形を確認する方法には、標尺等を使って陸上から洗掘深を計測する陸上調査、潜水士が水中に潜って洗掘形状を調査する水中調査、測量船に音響測深機を搭載して洗掘形状を計測する音響測深の3種類が主流であった。一方、水底地形の経時変化の把握には、河川管理者が通常5年に1度実施する定期縦横断測量の成果を使う場合が多かった。しかし、従来の手法では、広範囲な3次元河床データを取得することは現実的に難しい。

航空レーザ測深（ALB：Airborne Laser Bathymetry）は、航空機からレーザ計測を行い水底の測量や調査を行う技術で、もともと浅海域に用いられていた。近年、航空レーザ測深を河川測量へ適用することで、作業の高度化・効率化を図る検討が始まっており、多くの試行検証が行われている。

本技術は、今後、河川測量への普及が見込まれるALBにより、橋脚周辺の洗掘状況や広範囲の水底地形を概括的に把握することが目的である。計測結果から、健全度の把握が必要と考えられる橋脚については、第3章、第4章で述べるモニタリングの実施を想定している。このため、ALBによる計測は、経時的な状態把握を目的とした定期点検や、水底地形が大きく変化する可能性のある出水後の点検としての活用が適している。

なお、航空レーザ測深（ALB）は、水底地形だけでなく陸上部の地形も計測することができるため、橋脚周辺の水の有無に関わらず、洗掘状況を把握することが可能である。

2.1.2 システムの概要

(1) 航空レーザ測深（ALB）の原理

レーザ（Laser）は、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字であり、レーザ光は人工的に生み出された電磁波の一種である。レーザを用いた技術は光通信、レーザ医療、CDやDVDへの書き込み・読み込み、バーコードの読み取り、車や工業製品の板金加工や布の裁断、レーザポインタ等、一般社会にも浸透している技術である。レーザの特性は、その波長帯によっても変わり、人間の目にも見える可視光線や、人間の目には見えない近赤外線～中赤外線、遠赤外線等、利用用途によっても選択するレーザは変わる。

航空レーザ測深では、航空機に搭載したレーザ測距装置から、緑色レーザと近赤外レーザを同時に照射する。レーザは、地上に向けて楕円状等に照射される方式があり、高度500mより計測した場合、1コースあたりの計測幅は約350m程度となる。緑色レーザは、水中を貫入した後、水底で反射されて受光部へと戻り、近赤外レーザは、水面で反射され受光部へと戻る。レーザが照射されてから戻るまでの時間を測定することにより、緑色レーザでは航空機から水底までの距離を、近赤外レーザでは航空機から水面までの距離を求めることができる。近赤外レーザにより測定された水面の位置情報は、緑色レーザが水中に貫入する際に生じる屈折の影響を補正するために用いる。

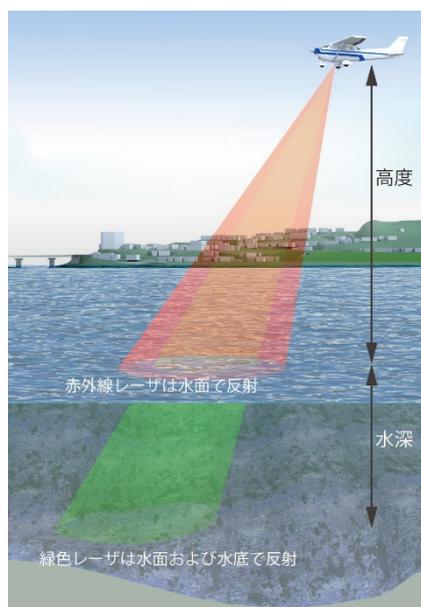


図 2.1.1 航空レーザー測深の計測

(2) システムの外観

システム全体の主な構成要素は、次の通りである。

- ① ALB を搭載するための航空機（固定翼または回転翼）
- ② ALB 機材一式（近赤外レーザー（陸部および水面計測用）、緑色レーザー（水部内計測用）、デジタルカメラ（可視画像による状況把握）、システムコントローラー、データ記録装置）
- ③ 飛行軌跡ならびにレーザー計測時の照射位置等を算出するための GNSS/IMU（*）装置
（*）Global Navigation Satellite System（全球測位衛星システム）/Inertial Measurement Unit（慣性計測装置）

図 2.1.2 に ALB によるデータ計測イメージの全体図（概念図）を示す。

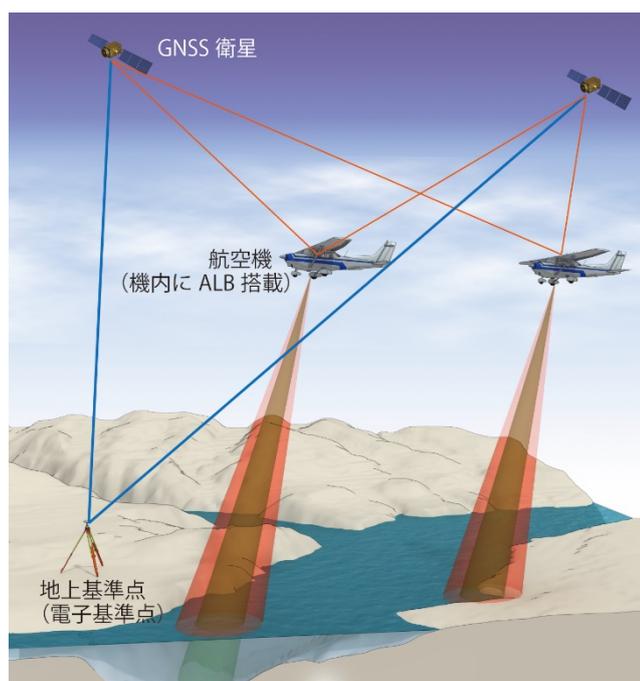


図 2.1.2 ALB 計測の概要図原理

(3) 航空レーザー測深（ALB）の特徴

これまで航空レーザー計測に使われてきたレーザー測距装置の多くは、近赤外波長帯のレーザー（近赤外レーザー）を用いて地表面形状を計測している。しかし、近赤外レーザーは水中を透過することができないため、水底地形を計測することは不可能であった。一方、航空レーザー測深で使用するレーザー測距装置は、水中を透過することができる緑色レーザーを使用しており、水底地形の計測が可能である。

(4) 航空レーザー測深（ALB）における留意点

航空レーザー測深の計測計画を立案する際は、次のような水部および周辺状況を確認しておくことが重要となる。

1) 測深能力に対する水質の影響

航空レーザー測深は、水質（濁度）の状況により欠測が生じる可能性がある。これは、水中での緑色レーザーの減衰が大きな要因である。緑色レーザーを大きく減衰させる要因は、水中の懸濁物質による散乱のほか、有色溶存有機物による緑色レーザー光の吸収、水面上で発生する白波による緑色レーザーの反射（水中部へ貫入量の減少）、水底部の低反射物質による緑色レーザーの反射量の減少などが挙げられる。

2) 航空計測の可否

航空レーザー測深は、航空機を使用して上空から橋脚部を計測する。航空機の運航は、航空法により「管制区域」が設定されており、この「管制区域」には、自衛隊・米軍の管轄空域も含まれており、航空局の管轄以外にも自衛隊・米軍のエリアとの調整が必要となる場合がある。

計測計画時には飛行可能区域であるかどうかを確認する必要がある。

(5) 計測点間隔について

航空レーザー測深により得られる計測点は、三次元のポイント座標（X, Y, Z）を保有した点群データとなる。この各計測点の点間隔の違いにより、地形表現や解析結果（シミュレーション等）に影響を与える可能性もあるので、必要な点間隔を事前に検討する必要がある。なお、1 計測コース内の点間隔は、同じ点間隔で計測するので、橋脚周辺の洗掘状況をより詳細に把握するためには、当該箇所周辺のみを複数回計測する等の対処が必要になる。

2.2 モニタリングの方法

2.2.1 モニタリングの手順

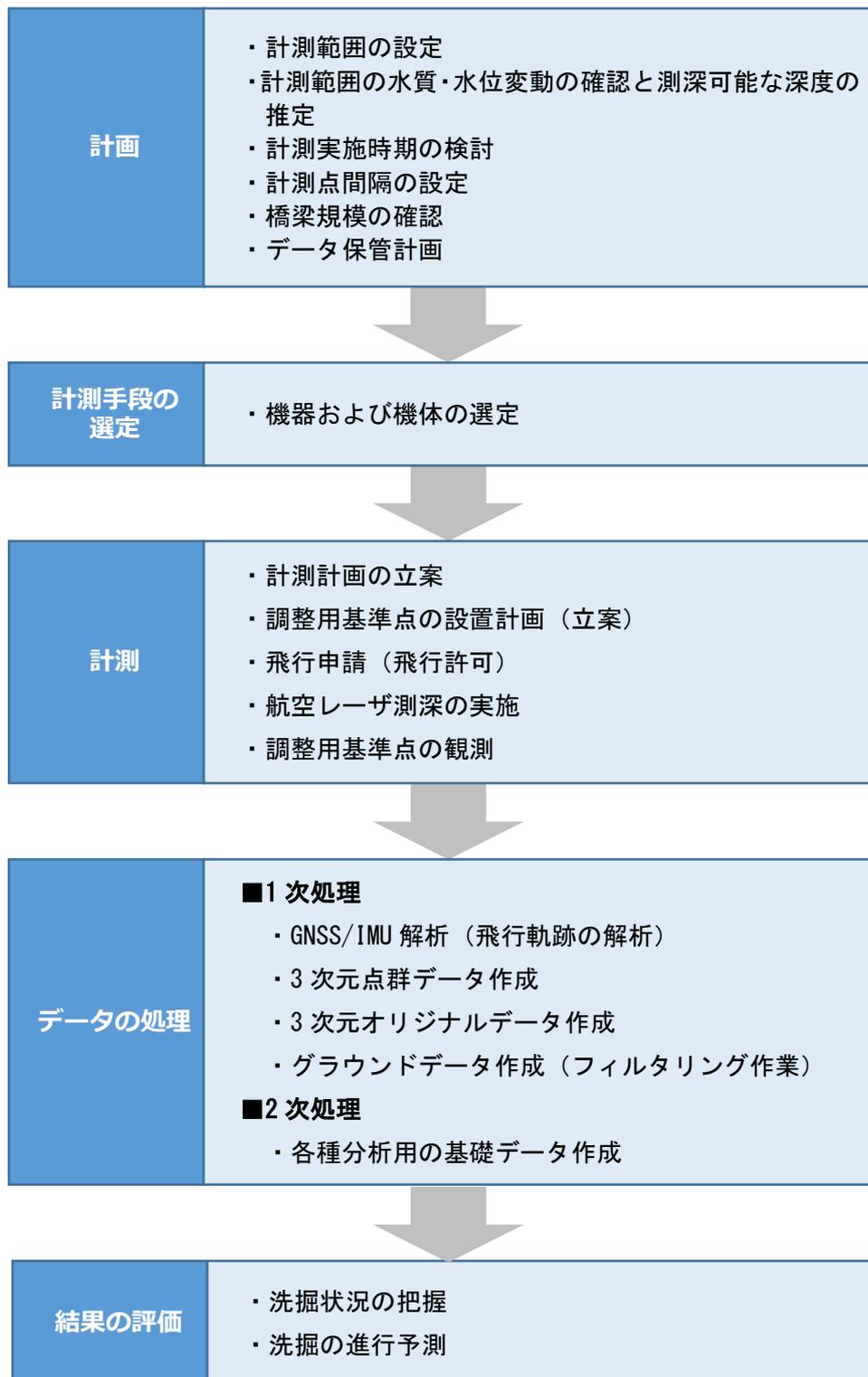


図 2.2.1 モニタリング手順

2.2.2 計画

(1) 計測範囲の設定

洗掘の状態把握においては、洗掘形状に加え、河川全体の河床変動や深掘れの状況等も確認して健全度を評価する必要がある。計測は橋梁（橋脚）周辺だけではなく、河川全体に対して実施することが必要である。このため、計測範囲は、計測対象とする橋梁の上下流それぞれ 500m（計 1,000m）を標準とする。また、航空レーザ測深では、水のない陸部の地形を計測することも可能であるため、陸上部に存在する橋脚もあわせて計測範囲を検討する。

(2) 計測範囲の水質・水位変動の確認と測深可能な深度の推定

航空レーザ測深では、測深可能な距離は水質（濁度）に影響される。このため、計測範囲の水質（濁度）や水位について、関連する月別、時期別のデータからその状況を確認するとともに、航空レーザ測深による測深可能な深度を推定し、河床データ取得の可否について検討を行う。

1) 水中の濁度を示す水質指標

水中の濁度を示す水質指標としては、透明度、拡散消散係数、透視度が挙げられる。なお、濁度自体の単位は、NTU、FTU、FNU、ppm など複数あり、測定方法も多数あるため、本文における水質指標は、透明度、拡散消散係数、透視度の記載とした。これらの指標の概要、測定方法を述べる。

表 2.2.1 水中の濁度を示す主な水質指標

水質指標	概要	測定方法
透明度 (単位m)	水の濁り具合を表す指標。透明度板を水中に沈め測定する。 河川では、通常 1～3m の値となる。	直径 30cm 程度の白色板に錘を付けて水中に徐々に沈め、白色板が目視で確認できなくなった深さを測定し、透明度とする。
拡散消散係数 (単位 m^{-1})	水中での光の減衰度合いを示した係数。光量子センサを使用して測定する。 河川では、通常 $0.3\sim 0.8m^{-1}$ の値となる。	光量子センサを使って、ある水深に対応した光の強度を測定する。両者の相関関係から拡散消散係数を計算する。
透視度 (単位cm)	水の濁り具合を表す指標。採取した水を透視度計で測定する。 河川では、通常 50～100cm の値となる。	透視度計（透明な筒の底に二重十字線を引いた器具）に、採取した水を入れる。筒の上部から底部の二重十字線を目視確認し、水を徐々に排水する。二重十字線が確認できた水深を測定し、透視度とする。

2) 水質指標を用いた測深深度の推定方法

レーザ測距装置のカタログ表では、透明度や拡散消散係数を用いて測深深度を示していることが多い。計画段階では、計測対象とする範囲の透明度や拡散消散係数の情報を事前に入手し、レーザ測距装置のカタログ表等を用いて測深深度を把握しておく必要がある。水質指標を事前に入手するには、国土交通省（水管理・国土保全局）が所管する観測所で観測されている水文水質データベース（以下、水水 DB）が参考になる。水水 DB では、全国の一級水系（109 水系）及び沖縄地方のダ

ム管理に関連する二級水系等において、雨量、水位、流量、水質（透明度）、底質等の観測が行なわれ、観測結果が公開されている。

なお、拡散消散係数は、水水 DB には含まれていないので、必要に応じて観測する必要がある。

表 2.2.2 カタログ表の測深深度記載例

記載例	意味
2 Secchi depth (単位m)	透明度 (Secchi depth) の 2 倍程度の水深まで測深可能。 透明度が 3m であれば、測深能力は約 6m。
2.5 / K (単位m)	2.5 を拡散消散係数 (K) で割った値まで測深可能。 拡散消散係数が 0.5 であれば、測深能力は約 5m。

(3) 計測実施時期の検討

航空レーザ測深は、洗掘の発生有無やその進行状況を確認するためのモニタリング方法であり、定期点検や出水後の事後的な点検としての活用が適している。また、河道全体の河床変動や深掘れの状況等の確認を行うことができる手法である。

定期点検においては、河川管理者が実施する定期縦横断測量の時期（通常 5 年に 1 回）に合わせて実施することで、広い範囲にわたり、同時期の河床データを取得することが可能となるが、航空レーザ測深は水の濁度に大きく依存する。以上を踏まえて、航空レーザ測深の計測実施時期の検討にあたり、考慮すべき条件を以下に示す。

- ・ 河川改修等で水が極端に濁っていないこと
- ・ 水の色が茶色でないこと（茶色い場合は、水中の物質が緑色光を吸収する可能性がある）
- ・ 白波が少ないこと
- ・ 透視度（年平均）が 20cm 以上あること
- ・ 前項 2) で推定した測深深度が、水深より大きいこと

(4) 計測点間隔の設定

橋脚周辺の河床位置を取得するため、計測点間隔は 1m×1m あたり 1 点以上とする。

(5) 橋梁規模の確認

一般に、レーザ測距装置からのレーザ光は、直下ではなく、角度をもって照射される。このため、一定の条件を満たせば、橋梁上部工で遮蔽されることなく、橋脚部の地形情報を取得することができる。計画段階においては、橋梁規模（上部構造の大きさや橋脚の高さ等）を確認し、橋梁の上部構造によるレーザの遮蔽割合を確認する必要がある。

■ 検討例

具体的な検討例として、レーザ測距装置からの照射角度が28度（前方14度，後方14度），計測対象とする橋梁の上部工から河床までの高さが25mである場合を考える。図2.2.2より，橋脚の中心から上部工の張出し幅が6.2m以内であれば，橋脚付近の水底地形を計測することが可能である。

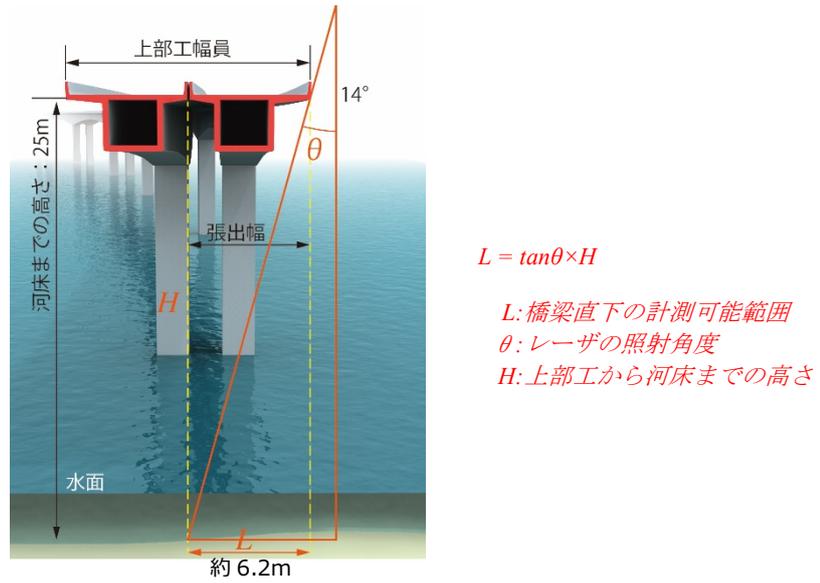


図 2. 2. 2 航空レーザ測深による橋脚周辺の計測可能範囲

(6) データ保管計画

成果データの保管方法については下表を標準とし、必要に応じて適宜変更する。また、記録媒体においては、データ量および保管期限を考慮して選定する。

表 2.2.3 データ保管

データ種別	データの主な内容	データ保管者	保管期限等	摘要欄
生データ	・計測 Raw データ (2.2.4 (2))	計測者	—	各計測機器が取得する生データ。データの内容を確認できるのは、メーカーのみ。
1次処理データ	・GNSS/IMU 解析データ (2.2.5 (1)) ・3次元点群データ (2.2.5 (2)) ・3次元オリジナルデータ (2.2.5 (3)) ・グラウンドデータ (2.2.5 (4))	計測者	直近2時期のデータ	生データに対して処理を行い、点群形式で出力されたデータ。点群表示ソフト等を使用することで、ユーザー側でデータ内容を確認することが可能。
2次処理データ	・面補間データ (2.2.6, 2.3.1 (2)) ・断面データ (2.3.1 (1)) ・傾斜データ (2.2.6) ・等深線データ (2.2.6) ・差分図データ(経時変化) (2.3.2)	管理者	全て蓄積	1次処理を行ったデータに対して、さらに処理を行い、管理者が洗掘の分析を行うために必要な情報を抽出したデータ。画像データや図面での提供も可能。

2.2.3 計測環境の準備

航空レーザ測深を行う場合、計測環境の準備として以下2つの選定が必要となる。

- ・航空レーザ測深機（ALB）（機器）の選定
- ・航空レーザ測深機（ALB）を搭載するための航空機（機体）の選定

(1) 機器の設定

現在（2018年8月）日本で運用されているALB機材の主な性能（仕様）は以下の内容（表2.2.4）の通りである。

表 2.2.4 ALB の主な機材仕様（スペック表）

	A社	B社
レーザの波長帯	近赤外線レーザおよび 緑レーザを保有	近赤外線レーザおよび 緑レーザを保有
パルスレート（kHz） （1秒間のレーザ照射数）	近赤外線レーザ 500（kHz） 緑レーザ 35（kHz）	近赤外線レーザ 550（kHz） 緑レーザ 550（kHz）
測深性能	1.5 Secchi depth	1.5 Secchi depth
拡散消散係数	2.2	—
レーザクラス	クラス4	クラス3B
重量（kg）、大きさ（センサのみ）縦×横×高さ（cm）	約80kg 約51×48×63 cm	約65kg 約52×52×70 cm
消費電力	18-32V DC, 約840W	18-32V DC, 約400W
最大視野角（Field Of View）	（進行方向）前後±14° （進行方向）左右±20°	±20°

両機材ともレーザ測距装置から緑色レーザ及び近赤外レーザを照射する基本的な性能を兼ね備えており、大きな問題はないが、今後も上記スペックレベルを満たすスペックを保持したALB機材で対応することが望ましい。

(2) 機体の設定

ALB を搭載するための航空機（機体）の種類は、固定翼と回転翼に分けられる。各機体を使用する際には、以下の環境が必要となる。

- ・ALB を搭載するためのカメラ穴があること、もしくは機材を格納するための専用ポッドが装備されていること。
- ・機体には GNSS アンテナを取り付けられること。
- ・ALB 動作を保証できる電源容量が確保されていること。

ALB を搭載している各機体の主な特性について、整理すると以下の通りとなる。

表 2.2.5 ALB 搭載機体の整理

主な特性（特徴）	航空機（固定翼）		航空機（回転翼）	
	記号	備考	記号	備考
飛行及び計測時間の長さ	○	一回あたりの飛行時間が長い	△	一回あたりの飛行時間が短い
対地高度 （地上からの高度）	○	ALB 運用時は、同じ高度	○	ALB 運用時は、同じ高度
（機体の）駐機および 離発着	△	飛行場（空港）のみ	○	飛行場（空港）以外に ヘリポートも可能
機動性	○	飛行速度が速いため、山間地 では回転翼よりも飛行制限を 受け易い。急峻な山間地形で の低高度飛行は困難	◎	計測地区に近いヘリポートを 確保した場合、計測機会が増 す
計測面積	○	延長距離の長い海岸や河川流 域全体を計測するような広域 計測に適している	△	延長距離の短い海岸や橋脚の 洗掘箇所のみ等、狭域な計測 に適している
洗掘状況の把握に対して 有益な運用方法	◎	流域全体（広域）に対する同 じ時点の橋脚および洗掘状況 の把握には、固定翼が有利	◎	狭域や一部区間の橋脚および 洗掘状況の把握には、回転翼 が有利

凡例：◎（優）、○（良）、△（可）

2.2.2 計画に記述した (1) 計測範囲の設定、(2) 計測範囲の水質・水位変動の確認と測深可能な深度の推定、(3) 計測実施時期の検討、(4) 計測点間隔の設定、(5) 橋梁規模の確認を行い、ALB のデータ利用目的に応じて、計測作業が短期間かつ精度良く実施できるように、ALB 機器と搭載用の機体（固定翼・回転翼）を選定する必要がある。

また、上空より計測する手段（機体）として、最近ではドローン（UAV）の技術開発が目覚ましい。これまで、ドローン（UAV）に搭載可能な ALB 機器は、面（連続）的な計測をできる機種は見当たらず、水部内も含めた面（連続）的な 3 次元の点群情報を収集することは困難であった。しかし、最近になり、面（連続）的な計測が可能なドローン搭載型 ALB が登場し、将来的には、ドローンによる ALB 機器を搭載した洗掘調査が進展していくと期待される。

2.2.4 計測

計測に関する内容は、測量法（昭和二十四年法律第百八十八号）第三十四条の規定に基づき制定されている公共測量作業規程の準則（国土交通省 国土地理院）を参考にして、以下に記載する。

(1) 計測計画の立案

計測計画では、計測時間帯、対地高度、計測コース、レーザ点群の間隔（計測点間隔）等について計画を行う。

- ・計測時間帯：点群データの精度は、GNSS 衛星数やその配置状態（PDOP）に左右される。一般的には、レーザ計測時の GNSS 衛星数は5個以上、衛星の配置状態が位置精度へ与える影響を示した PDOP (位置精度低下率)は3以下であることが必要である。これらの状況は時間とともに変化するため、適切な時間帯に計測を行う必要がある。GNSS の衛星数、PDOP の時間変化については、インターネット上で公開されているため、このような情報を利用して計測時間帯を決定する。
- ・対地高度：対地高度（地面からの高度）は400～500mを標準とする。高層ビル等の高い人工物がある場所では、航空法上、400～500mでの計測ができない場合もあるため、計測高度を上げる、計測コースを変更する等の検討を行う。
- ・計測コース：対象範囲周辺の地形状況や航空管制等、飛行が制限される要素について十分に注意を払い、計測コースを設定する。
- ・計測点間隔：計測点間隔は、航空機の対地速度、コース間重複率、レーザ計測機のスキャン回数、スキャン角度、パルスレートの関係によって決定されるため、対象範囲の状況等によって適切な値を設定する。

なお、航空局より飛行許可を取る必要があるため、立案した計測計画を航空局へ提出する。提出から許可が下りるまでに、数日～1週間程度の日数が必要となるため、この期間にも留意する必要がある。

(2) 航空レーザ測深の実施

(1)の計測計画に基づき、航空レーザ測深を実施する。

離陸前においては、当日の気象状況について確認を行う。離陸地点から計測地までの距離が離れている場合には、途中の経路の気象状況にも十分な注意を払う。また、機体のチェックや、搭載している機器の動作確認等も行い、異常が無いかを確認する。

計測中は、機体に搭乗しているオペレータが、各機器の動作状況や GNSS 衛星の捕捉状態等について確認を行う。

着陸後は、データが記録された HDD を取り外し、解析用 PC へのデータコピーを行う。

(3) 調整用基準点設置計画（立案）

点群データの位置精度の確認等に用いるため、陸部に基準箇所（調整用基準点）を設定する。計測コース設定後、調整用基準点の配置計画を立案する。調整用基準点は計測点間隔の2～3倍の辺長がある平坦な場所（グラウンド、空き地、公園等）に設定する。

また、設置箇所数は、以下の通りとする。

$$\text{設置箇所数} = (\text{対象範囲の面積(km}^2\text{)} \div 25) + 1$$

※ 小数部は切り上げ、最低 4 点以上

(4) 調整用基準点の観測

(3)の計画に基づき、調整用基準点の位置情報の観測を行う(図 2.2.3)。水平位置の観測は、公共測量作業規程の準則で規定する 4 級基準点測量により行うこととし、近傍に既知点が無い場合は、単点観測法に準じて実施する。標高の観測についても公共測量作業規程の準則で規定する 4 級基準点測量により行うこととし、近傍に既知点が無い場合は、観測する調整用基準点に最も近い 2 点以上の水準点を既知点として、公共測量作業規程の準則で規定する GNSS 観測のスタティック法に準じて実施する。



図 2.2.3 調整用基準点観測 (実測) とレーザ計測点群の比較イメージ

2.2.5 データ処理（1次処理）

データ処理は、測量法（昭和二十四年法律第百八十八号）第三十四条の規定に基づき制定されている公共測量作業規程の準則（国土交通省 国土地理院）を参考にして、以下に記載する。

(1) GNSS/IMU 解析（飛行軌跡の解析）

計測実施後、航空機上のGNSS観測データ・IMUデータ及び地上固定局のGNSS観測データ（電子基準点データ）の統合解析処理を行う。統合解析処理は、GNSS/IMUに付随するソフトウェアで実施する。

解析処理時の留意事項・精度基準を以下に示す。

- レーザ計測時のGNSS衛星数は、5個以上とする。
- GNSS観測に使用した衛星のPDOP(位置精度低下率)は、3以下を標準とする。

(2) 3次元点群データ作成

1) 点群データ生成処理

地上固定局のGNSS観測データ、航空機上のGNSS観測データ、IMUデータ及びレーザ測距装置で取得したデータを統合処理して3次元計測データを作成する。統合処理は、レーザ測距装置に付随する専用の解析ソフトウェアで実施する。

2) コース間標高値の点検

隣接コース間の重複部分において、お互いのコースデータにズレが発生していないかを検証をするために、コース間標高値の較差について確認を行う。

コース間検証箇所は、公共測量作業規程の準則に基づき、次式により求める。

- コース延長(km)/10+1（小数点以下切り上げ）

コース間検証箇所における高さ検証は、以下の方法で実施する。

- ① 点検箇所は、同時撮影している航空写真等から平坦で明瞭な地点を選定する。
- ② 点検箇所の標高値は、点検箇所から計測点間隔の2~3倍の辺長の正方形（もしくは直径が計測点間隔の2~3倍の円）内のレーザ計測データを平均したものとす。
- ③ 各コースについて該当する点検箇所の標高値を算出する。
- ④ ③で求めた標高値を使い、重複するコースの標高値の較差を算出する。
- ⑤ ④の算出結果を基に、重複コース間ごとに較差の平均値及び標準偏差を求める。
- ⑥ ④で求めた重複コース間ごとの標高値の較差が、公共測量作業規程の準則に定められた制限値±30cm以内であるかを目安として、精度確認を行う。
- ⑦ 重複コースごとの標高値の較差の平均値の絶対値が30cm以上の場合は、点検箇所の再選定、または、ボアサイトキャリブレーション値*の再調整と計測データの再補正を行う。以上の処置を行っても、較差が30cm以上となる場合は、再度、ALBを実施する。

※ボアサイトキャリブレーション値

GNSS/IMUの3軸（X方向、Y方向、Z方向）とレーザ計測装置の3軸のズレを補正する値。

(3) 3次元オリジナルデータ作成

調整用基準点観測結果との比較点検を行い、位置精度の確認を行う。比較点検は以下の方法で実施する。

- ① 調整用基準点箇所の標高値は、基準点から計測点間隔の2～3倍の辺長の正方形（もしくは直径が計測点間隔の2～3倍の円）内のレーザ計測データを平均したものとする。
- ② ①で算出したレーザ計測データ標高値と、調整用基準点の観測値から、較差と標準偏差を計算する。
- ③ ②で計算した各調整用基準点の較差の平均が、公共測量作業規程の準則に定められた制限値±25cm以内であるかを目安として、比較点検を行う。
- ④ すべての調整用基準点での点検の結果、較差の平均値の絶対値が25cm以上又は標準偏差が25cm以上の場合は、原因を調査の上、再計算処理、または、再度ALBを実施する。ただし、較差の傾向が計測範囲全体で同じ場合は、地域全体の三次元データの標高値を上下の一律シフトの平行移動により補正する。

(4) グラウンドデータ作成（フィルタリング作業）

前項で作成したオリジナルデータに対し、水底面、地表面以外の地物を除去するフィルタリング処理を行い、グラウンドデータを作成する。

2.2.6 データ処理（2次処理）

2.2.5(4)で作成したグラウンドデータを基に、データ分析の基礎資料となる TIN (Triangulated Irregular Network 形式：不整三角網)、グリッドデータ等の面補間を行い、微地形強調図、等深線図、傾斜図等の机上目視点検用図面、差分図等の経時変化データを作成する。これらの図面作成においては、CAD や GIS 関連のソフトウェアを使用する。

2.2.7 費用の目安

航空レーザ測深による費用は、平成 30 年度の「設計業務等標準積算基準書（国土交通省大臣官房技術調査課監修）」より、航空レーザ測量（地図情報レベル 1000）の積算基準を参考にして算出した。

なお、費用の算出にあたっては、以下の条件で行った。

表 2.2.6 費用算出の設定条件

設定項目	条件
対象とする橋梁・現場条件	幅約 500m の河川を横過する 4 橋
計測時間	約 2 時間（4 橋梁が概ね 10km 以内に存在することを想定）
使用機体	航空機（固定翼）
計測範囲	対象とする橋梁の上下流 500m ずつ、計 1,000m ✓ 4 橋合計：約 2k m ² →1,000m（延長）×500m（幅）×4（橋）
計測点間隔	1m に 1 点
その他	総運航費、計測の費目にレーザ測距装置機材経費を計上

また、航空レーザ測深における主な作業項目は、以下の通りである。

- 全体計画
- 航空レーザ計測
- 水質判定調査
- 調整用基準点の設置
- データ処理（1次処理）
- データ処理（2次処理）

以上の条件で、費用算出を行った結果（概算）を次頁に示す。

表 2.2.7 概算費用の例（4 橋あたり）

項目	費用（概算）	備考
全体計画・成果とりまとめ	20 万円	
航空レーザ計測	70 万円	計測時間・使用機体・計測範囲により変動
水質判定調査	15 万円	橋梁数により変動
調整用基準点の設置	15 万円	計測面積により変動
データ処理（1次処理）	40 万円	計測面積により変動
データ処理（2次処理）	20 万円	橋梁数により変動
合計	180 万円	

※本価格は概算であり，橋梁の形式，周辺の地形，河川状況により変動する。

2.3 結果の評価

航空レーザ測深によって得られた計測結果をもとに、洗掘形状の評価を行う。評価を行う際のポイントとして、航空レーザ測深を実施した時点での洗掘形状の評価と、現在の洗掘が今後どの程度進行するかを予見した評価の2点が挙げられる。

また、航空レーザ測深により得られた洗掘形状は、3次元データとして整備されている。この特徴を生かし、従来の最大洗掘深による評価だけでなく、様々な角度から評価を行うことが必要である。

2.3.1 洗掘状況の把握

(1) 2次元表示による洗掘状況の把握

航空レーザ測深で得られた点群データに対し、面補間を行い、断面図を作成したものである。このような断面図を作成すると、洗掘深の2次元形状を定量的に評価することが可能である。また、橋梁一般図を重ねることで、より詳細に洗掘の状況を確認することが可能である。

さらに、複数の時期で取得されたデータを重畳表示することで、経時変化を確認することもできる。(例えば、インフラ技術総覧¹⁾ P.75 「洗掘形状の3次元表示図面」参照)

(2) 3次元表示による洗掘状況の把握

前項(1)と同様に航空レーザ測深で得られた点群データに対して TIN による面補間を行ったデータを3次元表示し、さらに、橋梁一般図から、橋脚部分の3次元モデルを作成し、重畳表示したものである。3次元表示を行うことにより、洗掘深の形状をより現実に近い形で定量的に評価することが可能である。(例えば、インフラ技術総覧¹⁾ P.75 「洗掘形状の2次元表示図面(断面図)」参照)

2.3.2 洗掘の進行予測

洗掘の進行予測には、複数時期の洗掘形状および周辺地形の河床データを使い、各データの差分を計算することで、変化傾向を把握することが必要である。

2 時期の航空レーザ測深データの河床高の差分(河床変動)を求めた解析図である。図中、暖色系は河床が堆積傾向にある場所、寒色系は河床が洗掘傾向にある場所を示している。

この中で P4 は橋脚周辺部のみが寒色系でその周辺は暖色系となっている。橋脚の周辺は若干洗掘傾向であるが、河床全体としては堆積傾向にあることを示している。

一方、P7 は橋脚周辺部が濃い青となっており、初回計測時に比べ洗掘が進行していることがわかる。さらに、その周辺の河床全体寒色系で示されている。すなわち、P7 付近は、河床全体が低下傾向にあり、さらに、橋脚周辺も洗掘も進行している状態であることが確認できることから、今後、急速に洗掘が進行する危険性があることが推測できる。

このように、航空レーザ測深による洗掘状況の把握では、橋脚部の局所的な範囲だけではなく、河床全体の変動傾向が把握できるため、より確実なモニタリング(洗掘進行予測)を行うことができる。(例えば、インフラ技術総覧¹⁾ P.75 「二時期の標高差分図」参照)

1)SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術：インフラ技術総覧，2019

3章 加速度センサを用いた洗掘量および傾斜角のモニタリング

3.1 技術の概要

3.1.1 目的

本モニタリング技術は、河川橋梁の下部構造の洗掘と傾斜の状態、およびその進行を把握するものである。国土交通省による橋梁定期点検要領¹⁾には、下部構造の洗掘と傾斜を点検することが示されている。しかし、常に水位が高く目視点検は容易でない。さらに過去に洗掘が確認されたことがある場合は、詳細調査や追跡調査の実施を考慮することが示されている。また、国土交通省による道路橋定期点検要領²⁾では、近接目視による点検が困難な場合、近接目視によって行う評価と同等の評価が行える方法によって点検しなければならないことが示されている。定期点検は5年に1度が基本として定められているが、突然の水害や出水時に進行が速まる洗掘を把握するためには、センサを常設し常時モニタリングを行うことが重要である。以上のように、本モニタリング技術は、目視検査では困難な日常点検や定期点検、追跡調査、緊急時の点検を補助し、客観的な指標で管理することを目的とするものである。

表 3.1.1 利用目的

日常点検	水位が高く、目視点検が困難
定期点検	省力化が必要
追跡調査	定期点検の結果、追跡調査が必要と判断
緊急時の点検	出水による進行が懸念

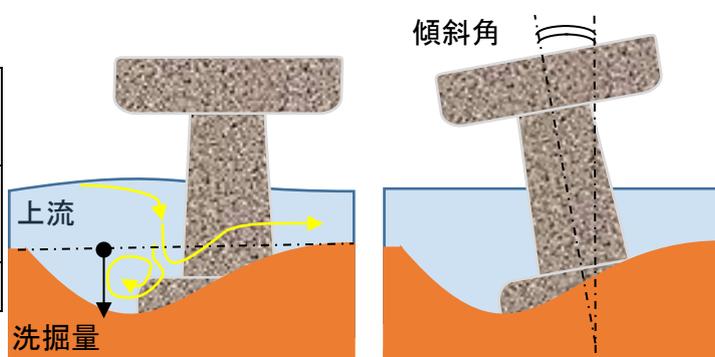


図 3.1.1 モニタリングの対象

3.1.2 システムの概要

(1) モニタリングの原理

洗掘などによって橋梁下部構造に対する地盤支持力が失われると、橋脚の固有振動数の低下となって現れることがわかっている（図 3.1.2）。また、地震動などの荷重が作用したときに、橋脚の基礎に有害な残留変位が生じると基礎の安定性が確保できなくなる。そのため、橋脚の基礎は、作用する荷重による基礎の変位を許容変位以下になるよう設計する。レベル2地震動の場合、その許容変位は、橋脚天端又はフーチング底面における傾斜角 0.02rad 程度を目安にするとよいとされている。従って、橋脚の固有振動数と傾斜角の変化を監視することは有意義なことである。従来、鉄道橋梁においては橋梁下部構造の健全度評価手法として、加速度センサを用いた衝撃振動試験³⁾が広く実施されており、多くの実績を有する信頼性の高い手法として維持管理の現場で活用されてきた（図 3.1.3）。衝撃振動試験は、技量を有する複数名の検査員を必要とすることから、常時モニタリングに適した方法とは言えない。本モニタリング技術は、風などの自然力に誘起される橋脚の微動（常時微動）から固有振動数に相当する卓越振動数を解析するので、検査員を要さず、橋梁下部構造の土被り量（洗掘量）を長期にわたり常時監視する技術である。なお、この技術の基本的な原理は、従来から行われている衝撃振動試験と共通である。

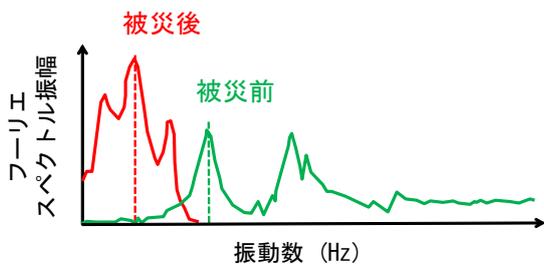


図 3.1.2 固有振動数の低下

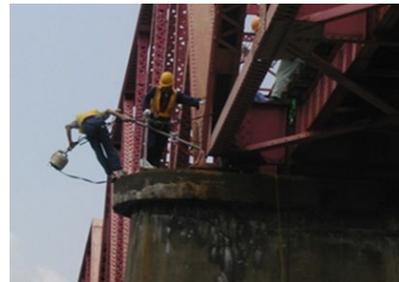


図 3.1.3 衝撃振動試験の実施例

(2) モニタリングシステムの構成

モニタリングシステムは、加速度センサ、計測ユニット、小型太陽光パネルによる電源から構成される（図 3.1.4）。

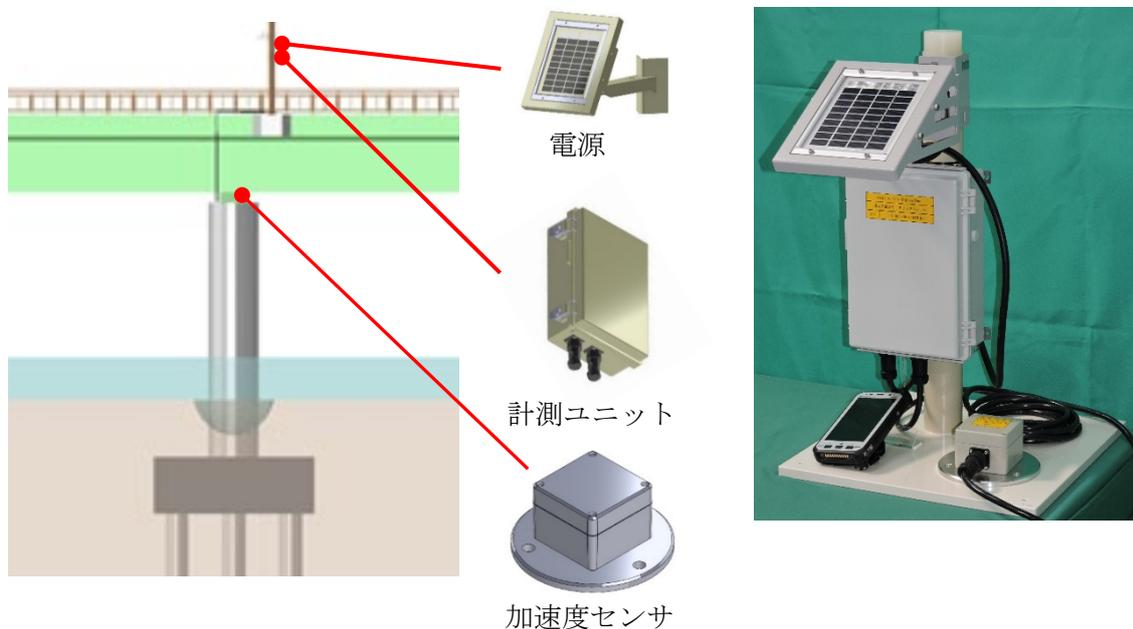


図 3.1.4 システムの概要

1) 加速度センサ

加速度センサ（図 3.1.5）による洗掘量を評価するために必要な計測軸は 1 軸であるが、加速度から 2 軸の傾斜角を計測する必要があるため、3 軸の加速度を計測する機能が必要である。長期にわたりモニタリングを行うために、また出水時における水没や流木に備えて、高い耐久性能、耐衝撃性、防水性能を有していなければならない。



図 3.1.5 加速度センサと信号ケーブル

2) 電源

小型太陽光パネルを用いた自立型電源を標準とする。

3) 計測ユニット

計測ユニットは、計測機能、解析機能、SDカード（データ記録媒体）、2次電池およびバックアップ用1次電池を内蔵する。点検時にSDカードによってデータの回収を行うことができるが、外部との通信手段として、Bluetoothなどの近距離無線通信手段や、LTE（携帯電話で使われる高速無線通信）、LPWA（広帯域小電力無線）などの通信手段を備えても良い。

① 計測機能

毎日定時刻に3軸の振動加速度の直流成分を計測し、洗掘量を解析するために、橋軸直角方向の振動加速度を定時間計測する。さらに橋軸方向と橋軸直角方向の橋脚の傾斜角を算出する。土被り量の解析と洗掘量の算出に必要な振動加速度の計測時間は、1日5回、1回200秒を標準とする。傾斜角の算出に必要な振動加速度の計測時間は、1日5回、1回30秒を標準とする。

② 解析機能

加速度センサによって計測した振動加速度データから土被り量を解析し、洗掘量を算出する。広域ネットワークを介した外部システム（クラウドサーバー等）を使用せず、システム単独で機能させるためにデータの解析機能を内蔵する。

③ データ記録媒体

モニタリングデータを記録し、点検者が現地でデータを回収するために、SDカードを用いる。また、実際の運用に応じたシステムの動作条件（1日の計測開始時刻、計測回数、1回の計測時間など）をSDカードに保存した設定情報から読み込む機能を備える。

④ 2次電池

太陽光パネルが日中発電した電力を蓄える。

⑤ バックアップ電池

バックアップ電池は、天候不良や太陽光パネルの汚損・故障などによりモニタリングシステムの運用に必要な電力を発電できない状況においてもモニタリングの機能が損なわれる事態を回避するためのもので、1次電池を用いる。

3.1.3 計測期間

3.1.1に示した利用目的に応じて計測期間を設定する。

表 3.1.2 利用目的と計測期間

利用目的	計測期間
日常点検、定期点検の補助	最低5年以上（常設が望ましい）
追跡調査の補助	調査が完了するまで（およそ5年が目安）
緊急時の点検の補助	最低5年以上（常設が望ましい） (日常点検、定期点検との併用が望ましい)

3.2 モニタリングの方法

3.2.1 モニタリングの手順

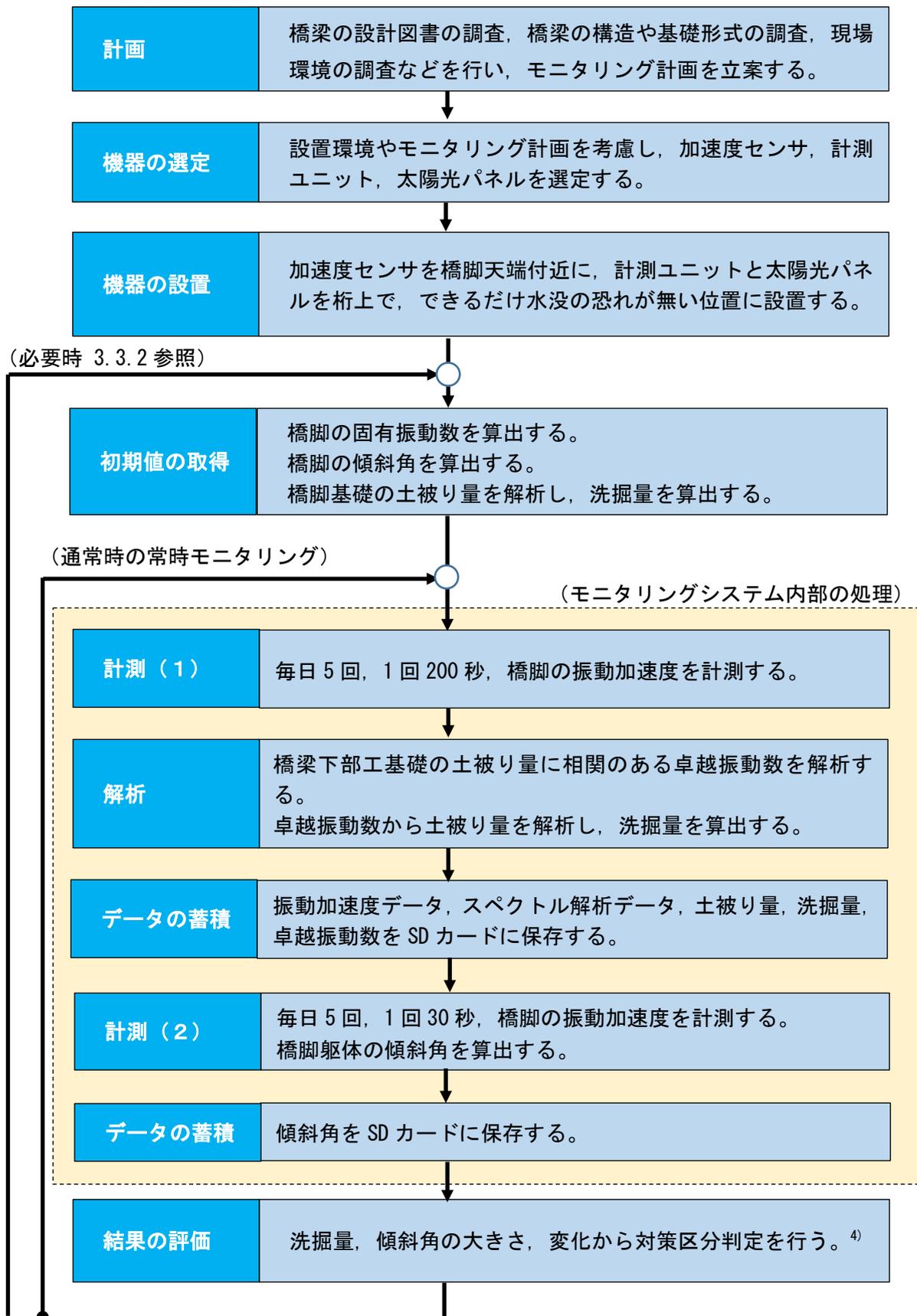


図 3.2.1 モニタリングの手順

3.2.2 計画

モニタリングの計画を立案する。計画は以下の項目を考慮して立案する。

(1) 対象橋梁と橋脚の選定

日常点検および定期点検の対象となる河川橋梁のうち、特に目視による点検が困難な橋梁、追跡調査が必要と判定された橋梁、出水時の洗掘の進行リスクが懸念される橋梁に対して、適用を検討する。

(2) システムの設置箇所

加速度センサをモニタリングする橋脚天端に1台設置する。計測ユニットを出水時にも浸水しない照明柱などの高所に設置する。太陽光パネルを計測ユニット近傍に設置する。以上の条件を踏まえ、設置箇所を決定する。出水時に流木などによる衝撃が加わる恐れがある場合、加速度センサと信号ケーブルに保護金具を取り付けることが望ましい。

(3) モニタリング結果の確認頻度

通常の点検では毎日モニタリング結果を確認する必要はないが、月に1回程度、ひと月分のモニタリング結果とトレンド（推移）を確認する。ただし、出水時や水害が発生した場合はその限りではない。

3.2.3 機器の選定

(1) 加速度センサの選定

加速度センサの要求仕様の一例を表3.2.1に示す。この仕様は、橋脚が揺れにくい大型の橋梁の場合を想定している。橋脚の振動特性は、橋梁や橋脚ごとに異なり、桁が比較的軽量であるなど揺れやすい橋脚の場合は、加速度分解能を落とし、コストを抑えることも可能となる。従って、事前に常時微動の加速度振幅の大きさを確認しておく。

表 3.2.1 要求仕様

項目	仕様
加速度レンジ	±0.1G 以上 ^{注1}
加速度分解能	0.06μG/LSB
周波数レンジ	DC ~50Hz 以上 ^{注2}
検出軸数	3 軸

注1) 実際に計測される最大加速度の2倍以上とするのがよい。

注2) 橋脚の固有振動数の2倍以上とするのがよい。

(2) 計測ユニットの選定

計測ユニットに必要な主な機能を以下に示す。なお、屋外に長期にわたり設置するため、高い防水性能と耐久性を備えていなければならない。

1) 基本機能

- 計測機能（設定した時刻になると、土被り量の解析と洗掘量の算出に必要な振動加速度の計測と、傾斜角の算出に必要な振動加速度の計測を行ったのち傾斜角を算出する。1日につき最低5回任

意の時刻に計測できること。)

- 解析機能（時系列振動加速度データから土被り量に相関する卓越振動数，卓越振動数から土被り量を解析し，洗掘量を算出する。）
- データ蓄積機能（時系列振動加速度データとモニタリング結果を SD カードに保存する。最低 5 年分のデータを保存できる SD カードが望ましい。）
- 電源機能（太陽光発電のエネルギーを蓄電する 2 次電池とバックアップ電池。2 次電池は，最低 2 日間システムを運用できる電力を蓄えられるキャパシタが望ましい。バックアップ電池は，最低 2 週間システムを運用できるだけの容量を備えた 1 次電池が望ましい。）

2) 拡張機能

以下の機能があれば，災害時などの緊急点検の際に利便性が高い。

- トリガー機能（大きな振動を検知した際に計測を開始する機能）
- 即時実施機能（定時刻を待たずに即座に計測，解析を実行する機能）
- 近距離無線通信機能（Bluetooth などによる携帯端末へのデータのダウンロード）

(3) 太陽光パネルの選定

加速度センサと計測ユニットが稼働するのに十分な電力が得られるよう，システムの設置箇所の日照時間を考慮して選定する。およそ 2 時間の日照でキャパシタを満充電できる発電能力を備えたものが望ましい。機器の設置例で実例として示したのは，1.9W で外形 182mm x 136mm の小型太陽光パネルである。

3.2.4 機器の設置

(1) 加速度センサの設置

加速度センサを橋脚天端に 1 台設置する。長期にわたってモニタリングするため，アンカーボルトによって固定する必要がある。加速度センサの加速度検出 3 軸のうち 2 軸は橋軸方向及び橋軸直角方向と一致するように向きを合わせて設置する。加速度センサは防水構造であるが，水害時に浸水の恐れがある場合は，流木などによる損傷を避けるために保護カバーを取り付けることが望ましい。



図 3.2.2 加速度センサの設置

(2) 計測ユニットと太陽光パネルの設置

図 3.2.3 は，太陽光パネルと計測ユニットを橋梁傍らに立つ照明柱にステンレス製の電柱取り付けベルトで固定した例である。この例では，1.9W の小型太陽光パネル（182mm x 136mm）によってシステムの全ての電力を賄うことができる。なお，太陽光パネルと計測ユニットは，できるだけ水

害時にも浸水しない高さに設置する。また、浸水しない範囲で加速度センサとできるだけ至近距離になるように設置する。



図 3.2.3 計測ユニットの設置

3.2.5 初期値の取得

モニタリングの開始前または開始時に、初期値を取得する。取得する初期値の項目は、固有振動数と土被り量（洗掘量）、そして橋脚躯体の傾斜角である。

(1) 固有振動数

固有振動数の初期値を、衝撃振動試験³⁾により取得する。

1) 衝撃振動試験の概要

衝撃振動試験は、橋脚天端に重錘を用いて衝撃を与え、その際に生じる橋脚の応答振動を速度計や加速度計等のセンサにより収録し、得られた振動波形をスペクトル解析することで、橋脚の一次の固有振動数・振動モードを把握し、健全度を調査する非破壊現地試験法である。固有振動数の大きさから橋脚の安定性に関する健全度を評価できる。

2) 試験の流れ

図 3.2.4 に衝撃振動試験の流れを示す。以下の手順により固有振動数を求める。

- センサと重錘を設置する。センサは、橋脚天端の 1 箇所に設置する。重錘は、橋脚天端に衝撃を与えることができるように、上部工の部材等から吊り下げて設置する。ただし、センサの設置位置と重錘の打撃位置が近すぎると、打撃時の表面波による影響を受けてしまうので、お互いの位置はある程度離す必要がある。
- 各橋脚にて、重錘打撃時の応答振動の収録を 10 回行う。
- 各振動センサにおける、収録した応答振動波形を重ね合わせる。この重ね合わせを行うことによって、収録した波形の S/N 比を向上させることができる。
- 得られた重ね合わせ波形について、スペクトル解析を行い、フーリエスペクトル振幅の分布と位相角の分布を算定し、グラフ化する。
- 橋脚の固有振動数を、橋脚天端・橋脚中間・橋脚下端のフーリエスペクトル振幅の図や、桁等の隣接部材の衝撃振動試験から得られるフーリエスペクトル振幅の図から総合的に判断し、決定する。なお、速度収録の場合、衝撃に起因する固有振動は、位相角が理論上 0° あるいは 180° となり、加速度収録の場合、位相角が理論上 $\pm 90^\circ$ となる。
- 橋脚天端・橋脚中間・橋脚下端それぞれのフーリエスペクトル振幅の図から、決定した固有振動数におけるフーリエスペクトル振幅および位相角を求め、振動モードを決定する。

3) センサの仕様

振動を計測する計測器は、橋脚の1次の固有振動数を含む周波数帯域で、感度が高く、かつ周波数特性が平坦な加速度センサ、ないし速度センサを用いる。

4) センサの設置

計測器は、橋脚の固有振動数を求める場合は、橋脚の天端に1台設置すればよい。ただし、振動モードを求める場合は、橋脚の天端、中間および下部に3台以上の計測器を設置する必要がある。

5) 重錘による打撃方法

打撃に使用する重錘は、一般的な鉄道橋梁では30 kg程度のものを使用している。ただし、比較的大規模な橋梁やノイズの大きな橋梁では、より大きな衝撃力を与えるために、より重量のある重錘を使用した方がよい場合もある。この重錘を用いて橋脚天端を橋軸直角方向に打撃する。打撃回数は10回を標準とし、衝撃力は均一にするのが望ましい。

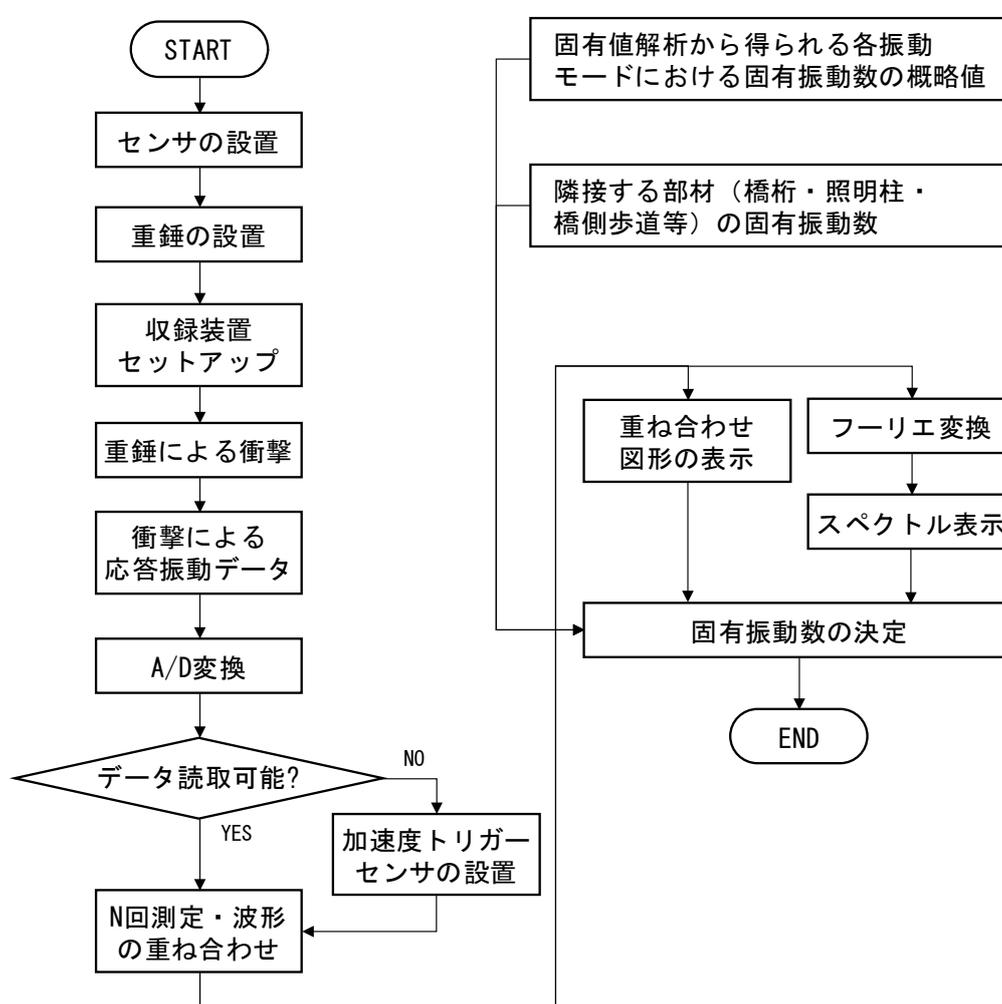


図 3.2.4 衝撃振動試験のフロー

(2) 土被り量 (洗掘量)

現況の河床位置を計測する。計測は、音響測深により橋脚の躯体から周囲およそ 1m の範囲を 50cm の間隔で行う (図 3.2.6) のが望ましいが、簡易的には不動点 (橋脚天端など) から錘付きのロープを垂らし、河床位置までの深さを測ることで換算しても良い。その後、土被り量または洗掘量を算出する。本章で用いる土被り量と洗掘量の定義を図 3.2.7 に示す。土被り量はフーチング上面から現況の河床位置までの高さ (上向きを+)、洗掘量は竣工時の河床位置から現況の河床位置までの深さ (下向きを+) としている。



図 3.2.5 音響測深の実施例

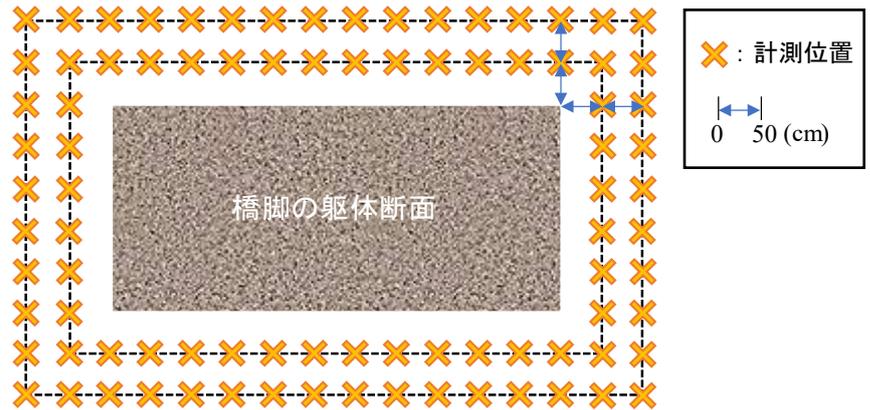


図 3.2.6 音響測深による計測位置

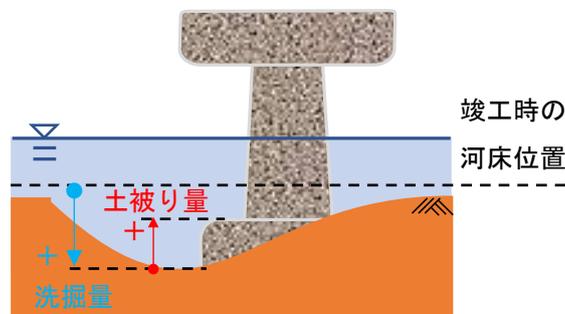


図 3.2.7 土被り量と洗掘量

(3) 橋脚躯体の傾斜角

橋脚天端に設置した加速度センサで取得した 3 軸の振動加速度データの直流成分から、橋軸方向と橋軸直角方向の傾斜角を算出する。

3.2.6 計測

(1) 計測準備

計測は、計測ユニットによって自動的に実行されるが、動作条件を予め設定しておく必要がある。動作条件の主なものは、以下のとおりである。

1) 計測時刻の設定

毎日の計測を開始する時刻を設定する。1日5回の計測を標準とし、なるべく通行量の少ない深夜～早朝の時刻を選ぶ。

2) 計測時間の設定

1回の計測で取得する時系列振動データの長さを設定する。8秒～200秒が目安として考えられるが、橋脚の振動レベルや振動のフーリエスペクトル振幅によって決定する。一般的に、揺れやすい橋脚ほど、橋脚の振動レベル、振動のフーリエスペクトル振幅が大きいため、計測時間を短くできる傾向にある。

3) サンプリング周波数の設定

時系列振動データを計測する際のサンプリング周波数を設定する。200Hz～500Hzを目安として考えられ、初期値として得られた橋脚の固有振動数の2倍以上に設定するのがよい。

(2) 計測

図3.2.8は、計測した時系列振動データの実例である。(サンプリング周波数 = 200Hz, 計測時間 = 200秒)

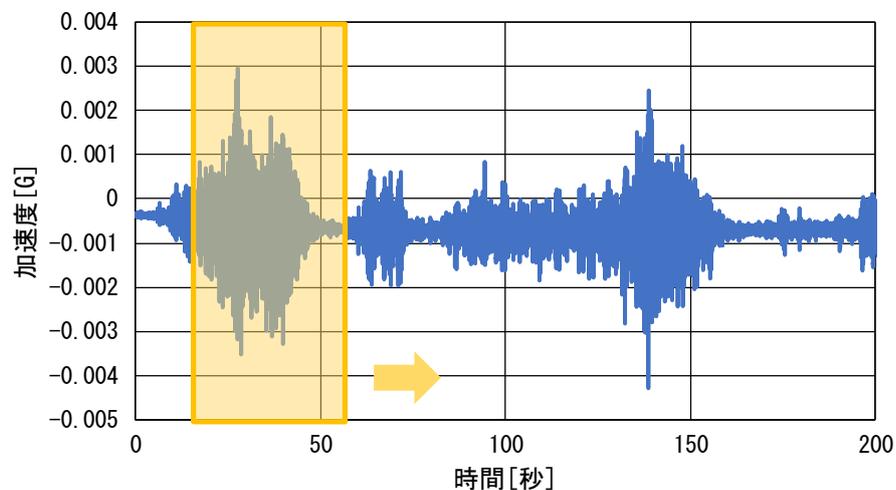


図 3.2.8 時系列加速度データの実例

3.2.7 解析

信号処理は、主に時系列の加速度データに対するフィルタリング処理、スペクトル解析などから成るが、処理の条件は橋脚の振動の大きさ、周波数特性、S/Nなどに依存するため、予め計測ユニットに処理条件を設定する必要がある。図3.2.9は、時系列振動データから8192ポイントを切り出し

(窓)、パワースペクトルに変換したものである。この窓を、時刻0から一定の時間を順次シフトさせていくことで、1回の時系列加速度データから複数のパワースペクトルのデータを得ている。例えば、上部構造が重い橋脚や、連続桁で拘束されている橋脚の場合は、橋脚の振動が極めて小さいことがある。このような橋脚では、1回の土被り量の算出を行う際に、1週間分の計測データを用いて信号処理する必要がある。1回の土被り量の算出を行う際に必要となる計測データの期間は、およそ数日～1週間が目安となり、橋脚の振動のフーリエスペクトル振幅に依存し、揺れやすいほど期間を短くできる。以上のように、土被り量は1回の加速度計測で直ちに答えが出るとは限らない。これに対して橋脚の傾斜角は、1回の計測で得られた時系列データを平均するので、1回の計測で直ちにそのときの状態を評価することができる。

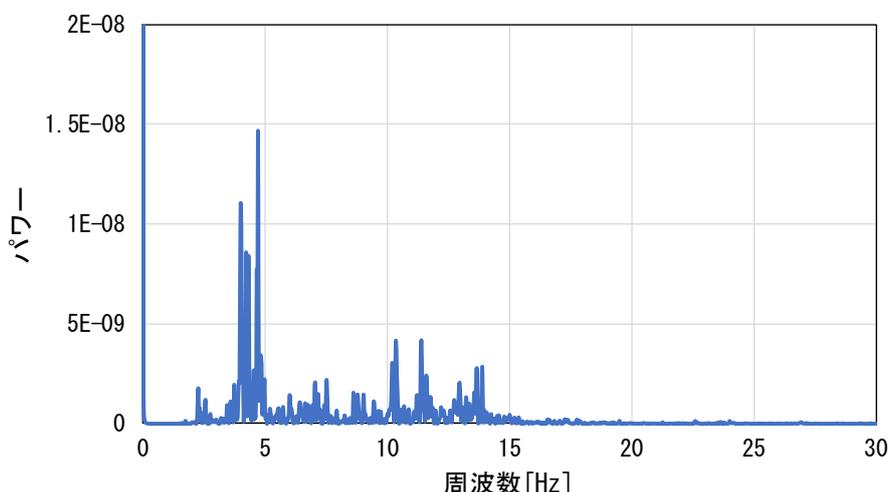


図 3.2.9 パワースペクトルの実例

3.2.8 データの蓄積

モニタリング期間、毎日得られる全てのデータを保存する。

- 3軸の時系列振動加速度の計測データ
- 加速度データをスペクトル解析して算出したデータ（フーリエスペクトル振幅またはパワースペクトル）
- 2軸の傾斜角の算出値
- 卓越振動数の解析結果
- 土被り量の解析結果と洗掘量の算出結果

それぞれのデータのファイル形式とデータ容量を表3.2.2に示す。

表 3.2.2 データの種類とファイル形式

名 称	種 類	フォーマット	容量(参考)
3 軸の時系列加速度データ	バイナリデータ	独自形式	17MB
スペクトル解析データ	バイナリデータ	独自形式	3.2MB
2 軸の傾斜角データ	テキストデータ	CSV	1KB
卓越振動数	テキストデータ	CSV	1KB
土被り量と洗掘量	テキストデータ	CSV	30Byte

*データ容量は、1 週間当たりの参考値である。

3.2.9 費用の目安

モニタリングの概算コストは、5 年間継続して実施することを基本とし、1 橋脚あたり概算で年間 80 万円程度である。表 3.2.3 に作業項目と費用を示す。

表 3.2.3 概算費用の例

項目	費用 (概算)	備考
現地調査	30 万円 (注1)	初年度に 1 回
装置の設置, 撤去	50 万円 (注2)	初年度と最終年度に 1 回
装置の保守とメンテナンス	10 万円	毎年発生
初期値の取得 (現状の評価)	30 万円 (注3)	初年度 1 回と 5 年間の間に 2~3 回
装置の損金	20 万円	毎年発生
合計 (5 年間)	400 万円	
年間	80 万円	

(注1) 現地までの旅費等の諸経費は含んでいません。

(注2) 現地の状況などにより、追加費用が発生することがあります。

(注3) 5 年間で 4 回実施を想定して算出しています。

3.3 結果の評価

3.3.1 土被り量と傾斜角のモニタリング

図 3.3.1 は、実際に得られた土被り量のモニタリング結果の実例である。実線は土被り量を、斜線は1次の近似式で土被り量のトレンド（推移）を示している。縦軸の基準（ゼロ）を、杭基礎のフーチング上面の位置とした。このモニタリング結果は、2018年の3月において、基礎の周囲の土被り量はフーチング上面より1m以上の位置にあり、2015年の12月から2018年の3月までの土被り量のトレンドがおよそ-25cmとゆっくりとではあるが減少傾向にあることを示唆している。

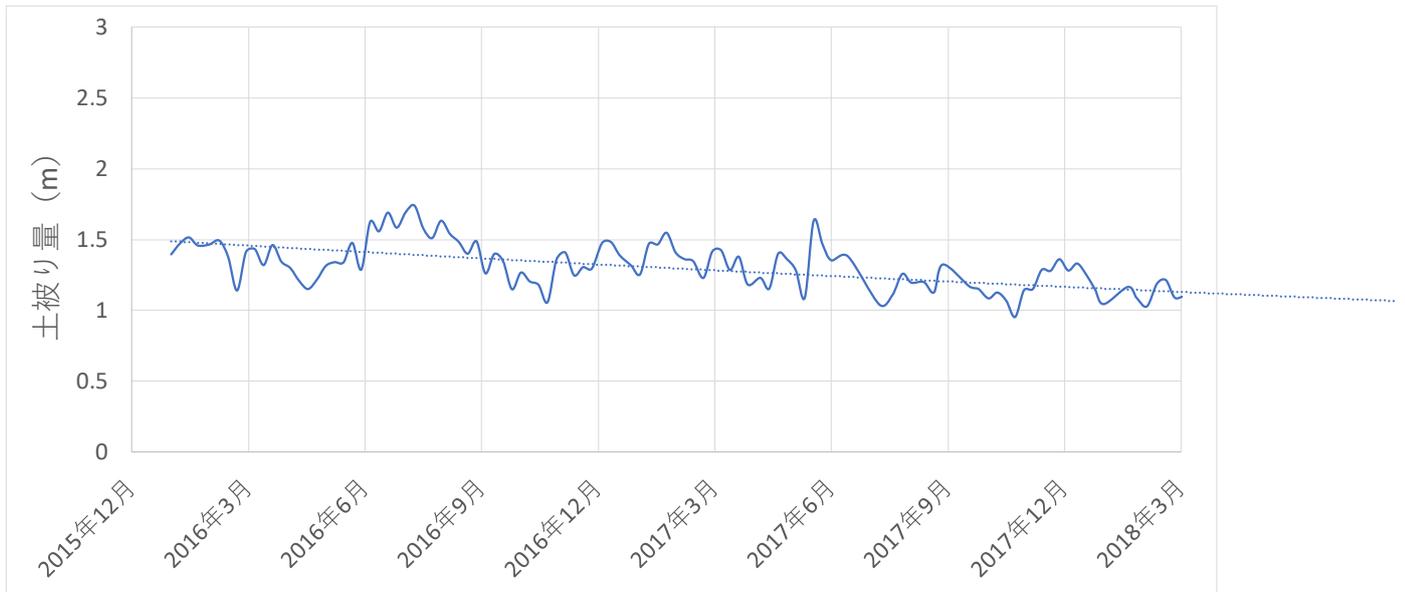


図 3.3.1 土被り量のモニタリング結果と評価例

図 3.3.2 は、傾斜角のモニタリング結果と評価の例である。



図 3.3.2 傾斜角のモニタリング結果のイメージ

3.3.2 初期値の再取得

モニタリングシステム設置後の最初の2年間は6ヶ月毎に、また、土被り量（洗掘量）のモニタリング結果が極端に変化したときは、初期値を再取得し、モニタリングシステムのキャリブレーションを行うことが望ましい。

3.4 保守

本モニタリングシステムに起因した変化を排除しデータの正確性を担保するため、利用者はシステム導入元の会社と連携して、適切にシステムを保守する必要がある。ここで、システムの保守対象は加速度センサ、計測ユニット、太陽光パネル及び、各ケーブルである。基本的に、利用者はシステム導入元が推奨する保守事項を遵守する必要がある。以下に保守事項の例を記述する。

(1) 加速度センサ

- 外観に損傷が無いことを確認する。
- 加速度センサの橋脚固定部に緩みやズレが発生していないことを確認する。
- 自己診断機能を有するセンサの場合は、その出力を確認する。

(2) 計測ユニット

- 外観に損傷が無いことを確認する。
- 設置箇所への固定状態が保持されていることを確認する。
- 雨水や虫などが内部に侵入していないか確認する。
- バックアップ電池を2年に1回程度で交換する。

(3) 太陽光パネル

- 外観に損傷や発電を阻害する汚れが無いことを確認する。
- 設置箇所への固定状態が保持されていることを確認する。

(4) 各ケーブル

- 外観に損傷が無いことを確認する。
- コネクタ部に緩み等の異常が無いか確認する。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領，平成31年3月。
- 2) 国土交通省 道路局：道路橋定期点検要領，平成31年2月。
- 3) 財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）基礎構造物・抗土圧構造物，平成19年1月。
- 4) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領 付録-1 対策区分判定要領，平成31年3月。

4章 無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価（洗掘）

4.1 技術の概要

本モニタリング技術は、無線通信タイプの加速度センサを用いたモニタリングと基礎の安全性を評価するものである。技術の特徴を図 4.1.1 に示す。



図 4.1.1 洗掘のモニタリングの特徴

4.1.1 目的

洗掘のモニタリングは、洪水等の異常時による被災状況や供用可否判定、経年的な河床低下による基礎の洗掘の進行状況、洗掘による橋脚と基礎の安全性について、橋脚の振動データから分析・評価するモニタリング方法である。計測は図 4.1.2、表 4.1.1 に示す(1)常時モニタリング、(2)スポット計測の2種類の計測方法に分けられる。

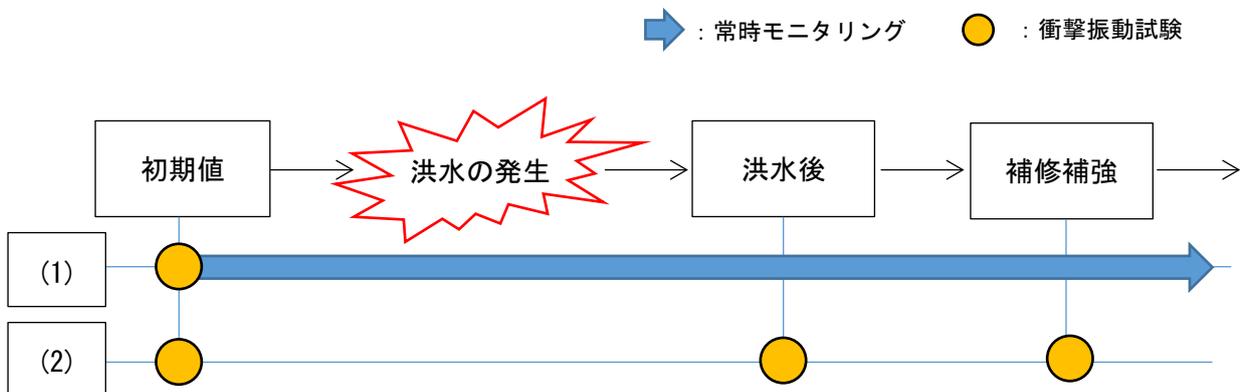


図 4.1.2 洗掘のモニタリングの時期

表 4.1.1 測定方法の概要

測定方法	概要
(1)常時モニタリング	無線センサを設置したままとし、定期的にデータを取得し、洗掘が発生した場合に詳細な調査を早期に実施して変状の確認を行う。
(2)スポット計測	4.2.5 に示す初期値の計測を衝撃振動試験により、計測する。

4.1.2 システムの概要

モニタリングシステムは、現地に行かずに橋脚の振動データ（常時微動等）を計測し、計測した振動データから橋脚の固有振動数と固有振動モードを分析し、分析結果から橋脚および基礎の安全性を評価するものであり、全体システムの構成要素は図 4.1.3 に示す 3 つのシステムで構成されている。

- ① 橋脚に取り付ける無線センサモジュール群
- ② 計測した振動データを収集・転送するデータ収集システム
- ③ 収集データから安全性を評価するデータ分析・評価システム

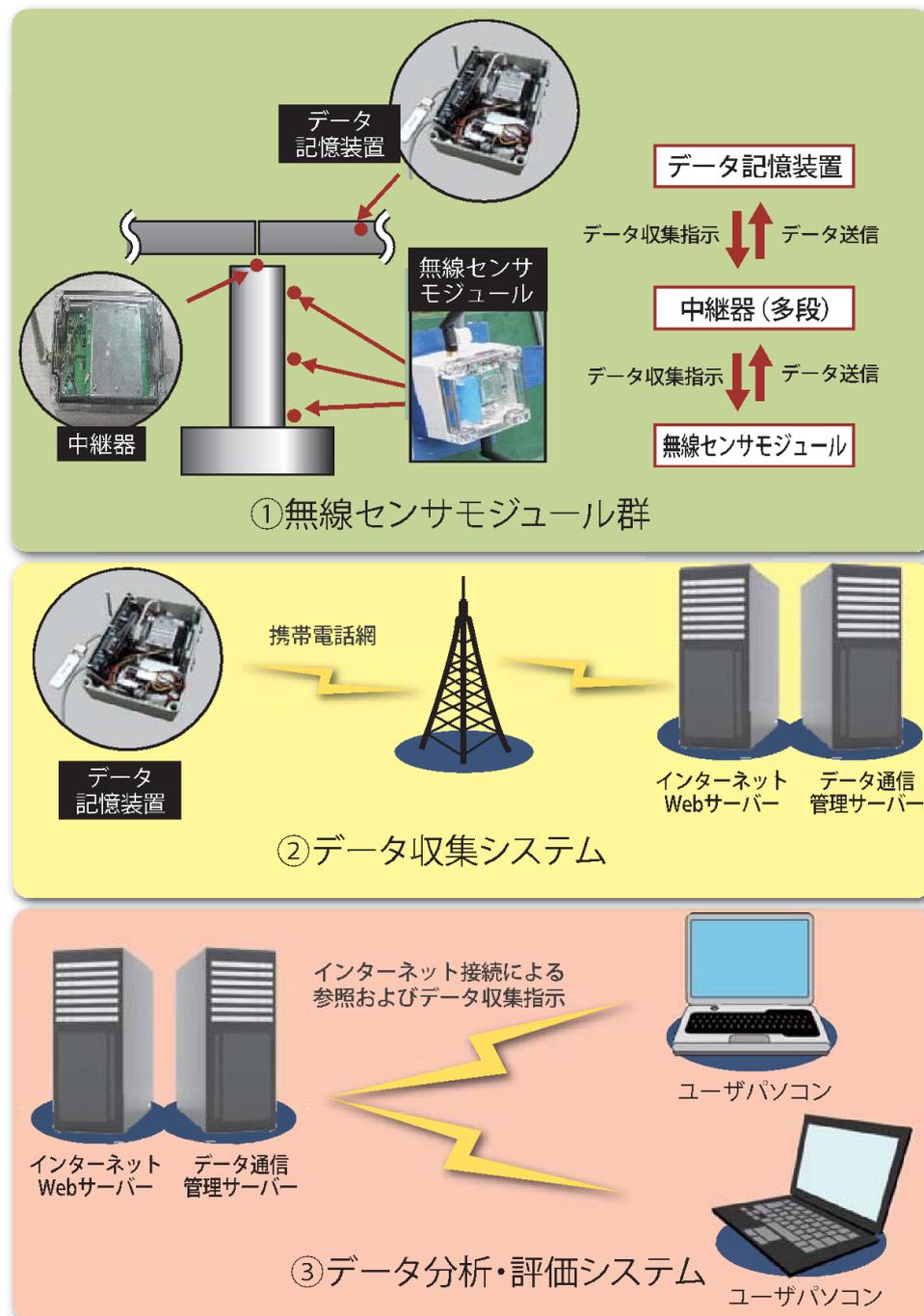


図 4.1.3 データ収集システムの概要

(1) 無線センサモジュール群

無線センサモジュールは、MEMS 加速度センサ、センサアンプ、無線器から構成され、橋脚の振動データを収集するもので、無線センサモジュール 1 個につき、加速度センサ 1 個と温度センサ 1 個、無線モジュール、長期対応バッテリー電源、長期使用のための防水ケースを有している。橋脚への取り付けは、図 4.1.4 に示すように、固有振動数と固有振動モードの分析を考慮して、標準的に 3 個 1 セットを標準とする。



図 4.1.4 無線センサモジュールの取付け状況

(2) データ収集システム

データ収集システムは、ネットワークモジュール（データ記憶装置）と公衆通信回線によるデータ収集システムから構成される。このうち、データ記憶装置は各無線センサモジュールが時間的に同期して要求されるデータを取得するよう同期信号を供給し、200ch を超える無線センサネットワークを形成することも可能である。さらに、データ記憶装置から公衆携帯回線（携帯電話網）を介して遠隔のデータ通信管理サーバーに測定データを転送し、インターネット Web サーバーを通じて、クラウドサーバーから計測データを引き出す。

(3) データ分析・評価システム

1) 計測データの収集・分析システム

モニタリングによる測定データの分析は、計測データ（振動データ）から橋脚の固有振動数と固有振動モードを分析（主として周波数分析）するシステム（図 4.1.5）を用いて行う。

■ データ収集システム

必要に応じて収集するデータを選択できます。

■ データ分析システム

収集したデータを分析します。

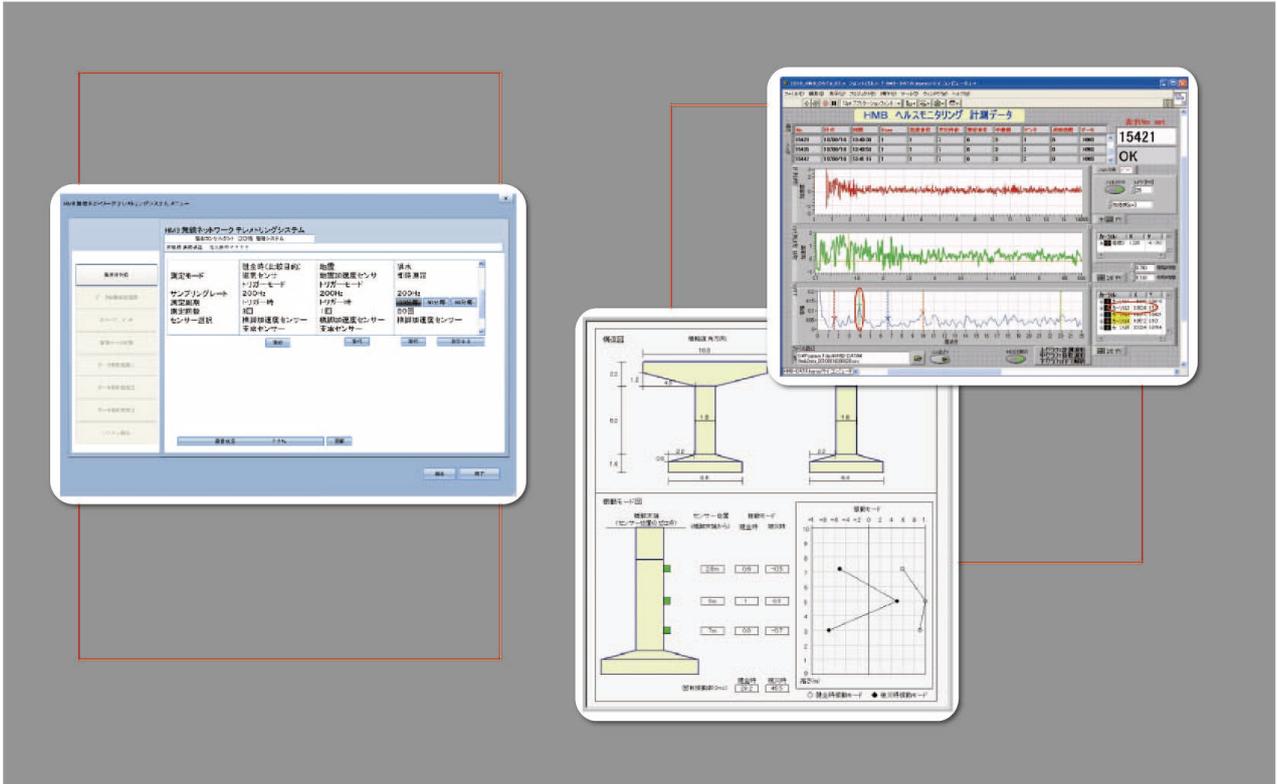


図 4.1.5 データ収集・分析システムのデータ分析画面の例

2) 洗掘時の安全性を評価するシステム

洗掘を評価するシステムは、橋脚の固有振動数から洗掘度合いを評価（固有値解析法を用いる）するシステムと、基礎の安定性を満足する固有振動数の閾値を算出（基礎の安定計算を用いる）する基礎の必要固有振動数算出システム（図 4.1.6）から構成される。

このデータ分析・評価システムから、次のアウトプットが得られる。データ分析システムからのアウトプットは、橋脚の固有振動数と固有振動モードである。データ評価システムでは、橋脚の構造諸元と土質諸元をインプットすることにより、固有値解析法を用いて基礎の洗掘度合いと固有振動数の関係を把握し、間接的に定量的な基礎の洗掘量をアウトプットする。さらに、基礎の洗掘度合いと基礎の安定の関係を実験計算から把握し、橋脚の固有振動数と安定の関係から基礎の安定性を満足する固有振動数の閾値をアウトプットする。

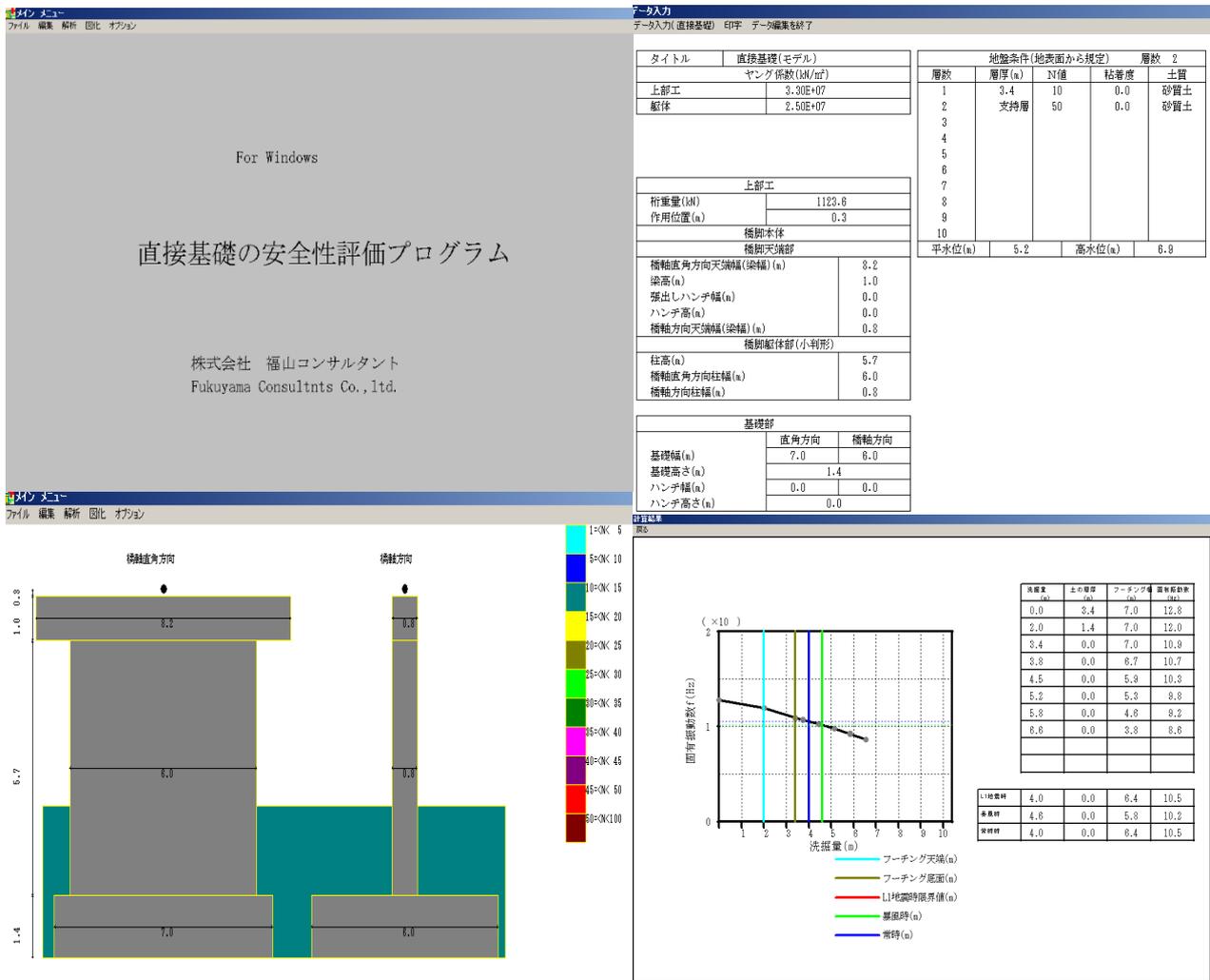


図 4.1.6 データ評価システムによる安全性照査画面の例

4.1.3 計測期間

モニタリングの期間や間隔は、表 4.1.2 に示すモニタリングの目的と計測方法の内容を考慮して設定することを推奨する。計測方法は、基本的には常時モニタリングにより行うが、補修・補強後のモニタリングについては、スポット計測にて行う。1セットのモニタリングは、計測ばらつきを考慮して20回行い、1回の計測時間はサーバー上のデータ容量を考慮し、15秒/回（データ数：3000、サンプリング周波数：200Hz）とする。

表 4.1.2 洗掘のモニタリングの計測目的・計測期間

モニタリングの対象	初期値の計測	モニタリング
(1)洗掘しやすい橋脚・基礎	<ul style="list-style-type: none"> 初期値を計測するため衝撃振動試験を1回実施する。 	<p>【常時モニタリング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 定期的にデータを取得し、洗掘が発生した際の変状を早期に発見するため、常時モニタリングを行う。 計測は1週間に1セット行う。
(2)損傷を確認した橋脚・基礎	<ul style="list-style-type: none"> 橋梁定期点検により損傷が確認された橋脚に対して、衝撃振動試験を1回実施し、初期値を測定する。 	<p>【常時モニタリング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 損傷後の経過確認および安全性を早期に確認するため、補修、補強を行うまで常時モニタリングを行う。 計測は1週間に1セット行う。
(3)洪水を受けた橋脚・基礎	<ul style="list-style-type: none"> 洪水後に衝撃振動試験を1回実施し、初期値を測定する。 補修、補強後に衝撃振動試験を1回行い、初期値を測定する。 	<p>【常時モニタリング】</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修、補強を行うまでの経過を確認するため、常時モニタリングを1日1セット行う。 補修、補強後の補強効果の確認を行う。 <p>【スポット計測】</p> <ul style="list-style-type: none"> 補修、補強後は、1年に1セット行う。

4.2 モニタリングの方法

4.2.1 モニタリングの手順

無線加速度センサを用いた洗掘のモニタリングの基本的な手順は、図 4.2.1 の通りである。

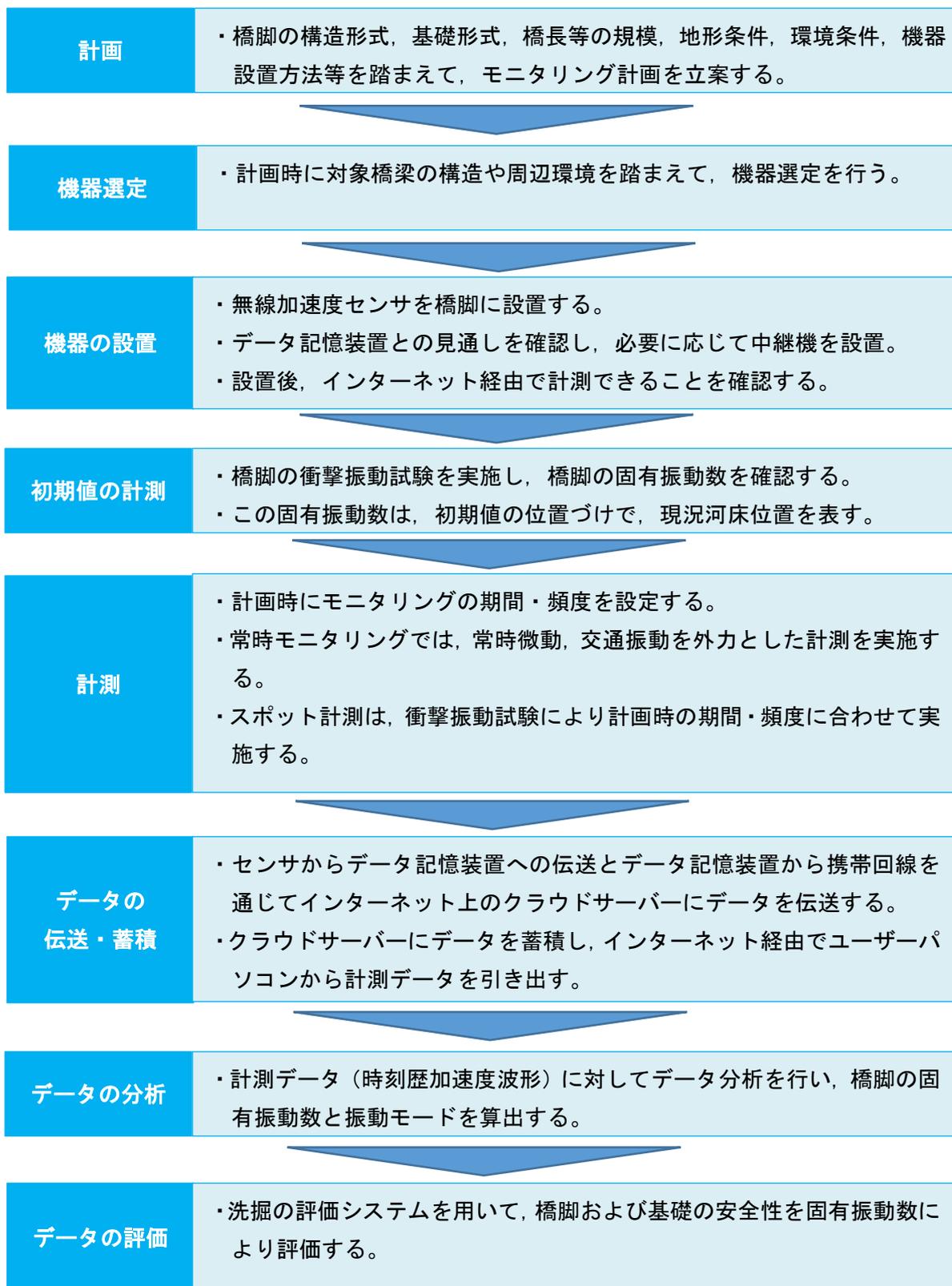


図 4.2.1 無線加速度センサを用いた洗掘のモニタリングの手順

4.2.2 計画

モニタリング計測を行う橋梁の種類や規模（橋長，幅員等），下部構造の構造（橋脚，基礎），周囲の地形条件や環境条件を調査して，計測機器の設置・配線方法，計測方法等を十分検討し，目的に則した効率的な計測計画を立案する。なお洗掘時の対象となる橋梁については，以下のように設定する。

(1) 橋梁の種類や規模

洗掘のモニタリングの対象とする橋脚および基礎の選定は，1.1.1～1.1.3より，定期点検より洗掘による損傷の発生が認められた橋梁や洗掘が発生しやすい河川地形，構造的特徴を有する橋梁に対して行うことを推奨する。

(2) センサの設置位置

センサの設置位置は，橋脚の振動モードを把握することを目的として，概ね橋脚の天端・中段・下段の3つを標準とする（図4.2.2）。なお中段・下段のセンサは，水位によって水没する恐れがあり，設置が困難である場合には，天端のみの設置でも運用可能である。

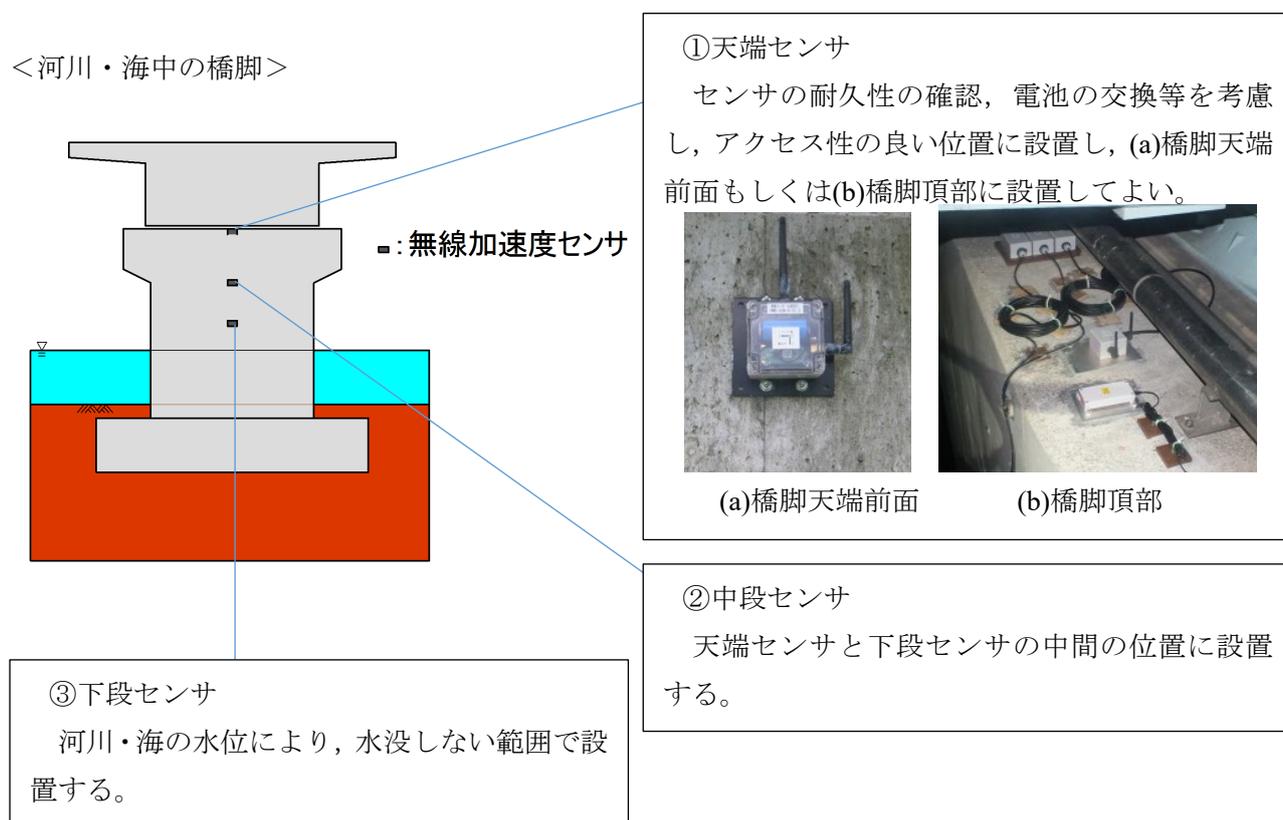


図4.2.2 河川・海中の橋脚のセンサの設置位置

(3) 周囲の地形条件や環境条件

計測機器の配置・設置方法、無線通信状態等を調査・検討する。対象橋梁に検査路等が無く、橋脚天端への移動が困難な場合は、橋梁点検車、高所作業車等を用いる場合もあるため事前調査を行う。また計測に必要な電源の確保は、計測方法・計測期間を左右することもあるので十分に事前調査を行う。測定データの伝送には無線を使用するため、事前に現地で無線通信状態を確認してから使用し、通信状態が不安定な場合は中継器を設置する。

(4) 計測期間・頻度

計測期間・頻度については、4.1.3より設定するが、洗掘の進行状況が著しい場合はモニタリングの計測頻度を上げるなど、状況に応じて設定する。

4.2.3 機器の選定

モニタリングの使用機器については、表 4.2.1 に示す要求性能を満足する加速度センサを使用する。例として、実証試験で使用した無線加速度センサの仕様を表 4.2.2 に示す。

表 4.2.1 加速度センサの要求性能

項目	仕様
応答周波数	DC～50Hz
サンプリング周波数	200Hz 以上
測定時間	15 秒/回

表 4.2.2 実証試験で使用した無線加速度センサの仕様

項目		仕様
計測	最大検知加速度	$\pm 1.25\text{m/s}^2$ ($\pm 125\text{Gal}$)
	応答周波数	DC～50Hz
	サンプリング周波数	200Hz
	測定時間	15 秒/回
	無線周波数	2.4GHz もしくは 920MHz
	送信出力	+5dBm
電源	アンテナ	外部アンテナ 2 系統
	電源	リチウムイオン電池

4.2.4 無線加速度センサおよび機器の設置

無線加速度センサの設置数、設置位置、固定方法の例を図 4.2.3、図 4.2.4 に示す。無線加速度センサは、振動モードの把握のため橋脚天端、中段、下段の 3 箇所を推奨する（対象橋梁の環境条件等により設置が困難な場合は、橋脚天端の 1 箇所でも運用は可能である）。無線加速度センサの設置方法は、橋脚の耐久性に影響しないよう表 4.2.3 に示すエポキシ系接着剤による設置も可能（3 年間の実証試験で確認済み）であるが、落下等の第 3 者被害の発生が予想される場所では、アンカーによる固定を推奨する。また、長期計測として使用する場合は、定期的にセンサの設置状況を確認し、第 3 者被害が発生しないよう防止に努めることとする。

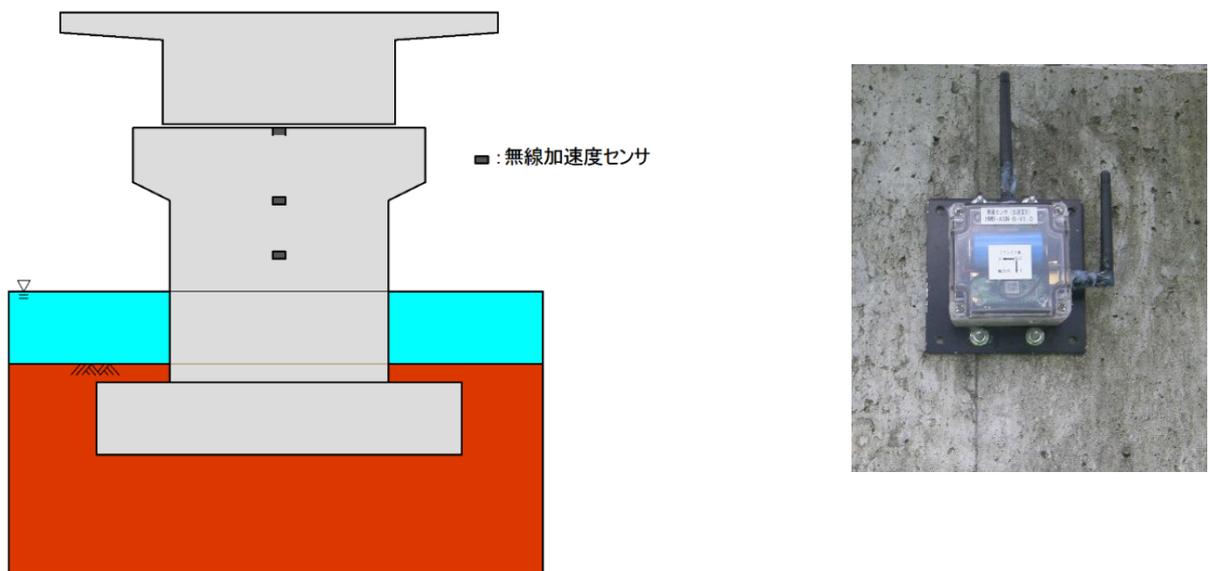


図 4.2.3 無線加速度センサの設置位置

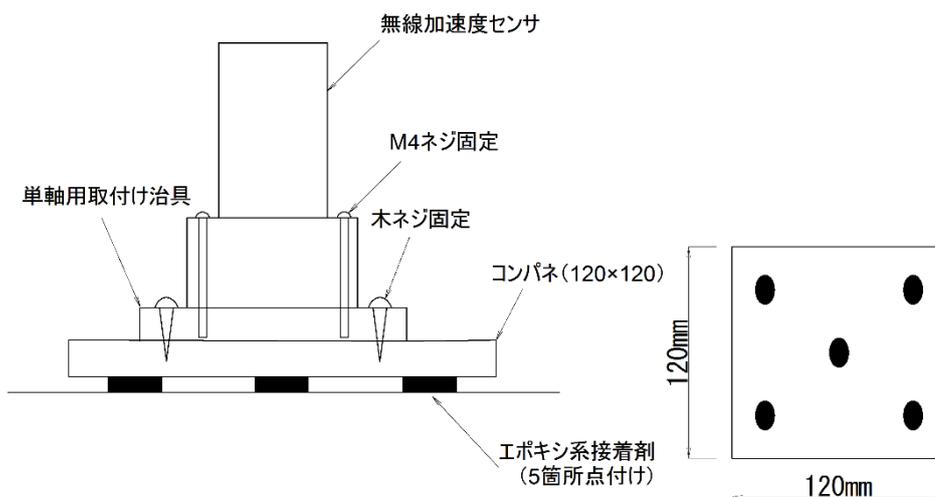


図 4.2.4 無線加速度センサの固定方法の例

表 4.2.3 エポキシ系接着剤の仕様の例

		A 剤 (主剤)	B 剤 (硬化剤)
主成分		変性エポキシ樹脂	チオール基末端液状ポリエーテルポリマ
外観		白色揺変性ペースト状	黒色揺変性ペースト状
混合比		主剤:硬化剤=1:1(質量比)	
混合粘度		約 200Pa・s(25℃)	
可使時間		約 4 分(20℃, 20g)	
固定時間	冬 (5℃)	60 分以上	
	春・秋 (20℃)	15 分以上	
	夏 (30℃)	10 分以上	

4.2.5 初期値の計測

モニタリングの測定結果を評価するにあたり、対象橋脚に対して衝撃振動試験を実施し、現況の固有振動数（初期値）を計測する。衝撃振動試験とは、30kg～50kg 程度の重錘を使用し、橋脚天端から 0.1m～0.5m の箇所にて衝撃力を与え、その応答から構造物の周波数応答関数を算出し、この関数の振幅の卓越から構造物の固有振動数を把握する試験である。

衝撃振動試験より測定した初期値を設定することにより、初期値とモニタリングの測定結果を比較することで、洗掘量の絶対評価および橋脚・基礎の安全性を評価することができる。なお、現況の河床位置は、「橋梁定期点検要領（国土交通省 道路局 国道・防災課 H31.3）」損傷番号②⑥洗掘より、対象構造物の定期点検結果から設定する。

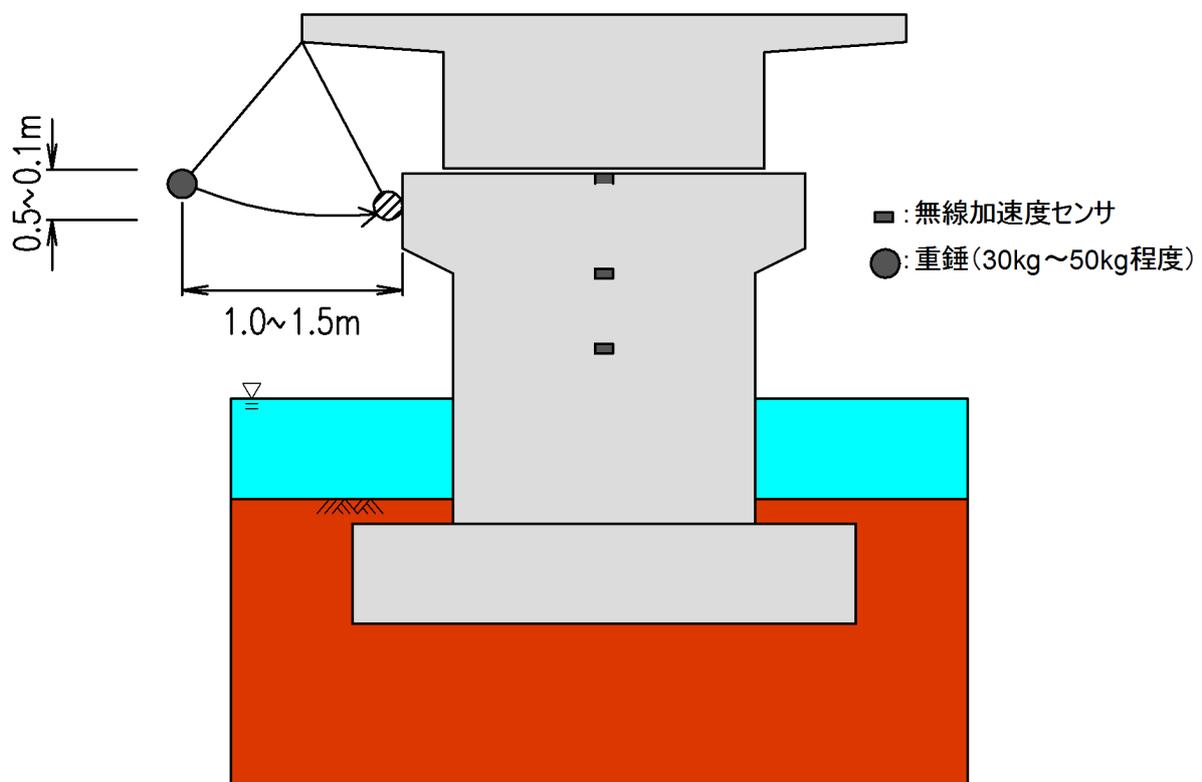


図 4.2.5 衝撃振動試験の概要

4.2.6 計測

4.2.4 より、設置した無線加速度センサより応答加速度を計測する。本モニタリングでは、対象橋脚上を通過する交通振動および常時微動より計測するため、計測時間帯は任意に行うことが可能である。

4.2.7 データの伝送

(1) 無線センサモジュール群からデータ記憶装置への伝送

無線センサモジュール群によるデータ計測が完了すると、データ記憶装置へ取得したデータを無線伝送する。その通信方式は、2.4GHz、920MHz 帯の周波数帯域の利用を推奨する。

(2) データ記憶装置からネットワークサーバーへの伝送

データ記憶装置に保存されたデータは、公衆携帯回線（携帯電話網）を介して遠隔のデータ通信管理サーバーに測定データを転送される。ユーザーは、インターネット Web サーバーを通じて、インターネットに接続したユーザーパソコンから計測データを引き出すことができる。

災害時においては、電力・通信等のライフラインに影響を与え、ネットワークサーバーへのデータの伝送、サーバーへの接続ができない可能性がある。その際は現地で無線通信を直接使用することにより、計測データを引き出すことが可能である。

4.2.8 データの蓄積

データのファイル形式を表 4.2.4 に示す。表は計測データとともに分析の過程で生成されるデータの種類とファイル形式を示している。加速度の時刻歴波形および周波数スペクトルは csv ファイルとすることを推奨する。

また1回のモニタリングのデータを格納するために必要な記憶容量は、測定時間が長いほど容量は大きくなる。本モニタリングでは、データの保存およびデータの伝送を考慮し、1回の測定を15秒としている。

表 4.2.4 データの種類とファイル形式の例

データ	ファイル形式	1回の計測	1セット (計20回)
加速度の時刻歴波形	csv	約300KB	約6MB
加速度の周波数スペクトル	csv	約300KB	約6MB

4.2.9 データの分析

計測データの分析方法として、モニタリングによる常時微動から分析する方法と衝撃振動試験による分析方法の流れを図 4.2.6、図 4.2.7 に示す。常時微動のランダムノイズから橋梁の自由振動を同定する手法として、一般的な FFT（高速フーリエ変換, Fast Fourier Transform）を用いて行い、橋脚の固有振動数を特定する。また周波数分析は $\Delta f=0.05\text{Hz}$ 以下、 $\Delta t=5\text{msec}$ (200Hz) の分解能を有し、ノイズ除去を目的として、表 4.2.5 に示す波形の重ね合わせを行い、必要に応じてウィンドウ処理および伝達関数処理を行う。周波数分析結果より、フーリエスペクトルが卓越する振動数を抽出し、現況の固有振動数を設定する。なお振動数の卓越は、衝撃振動試験による計測結果より、現況の固有振動数、振動モードを確認した後行うことを推奨する。

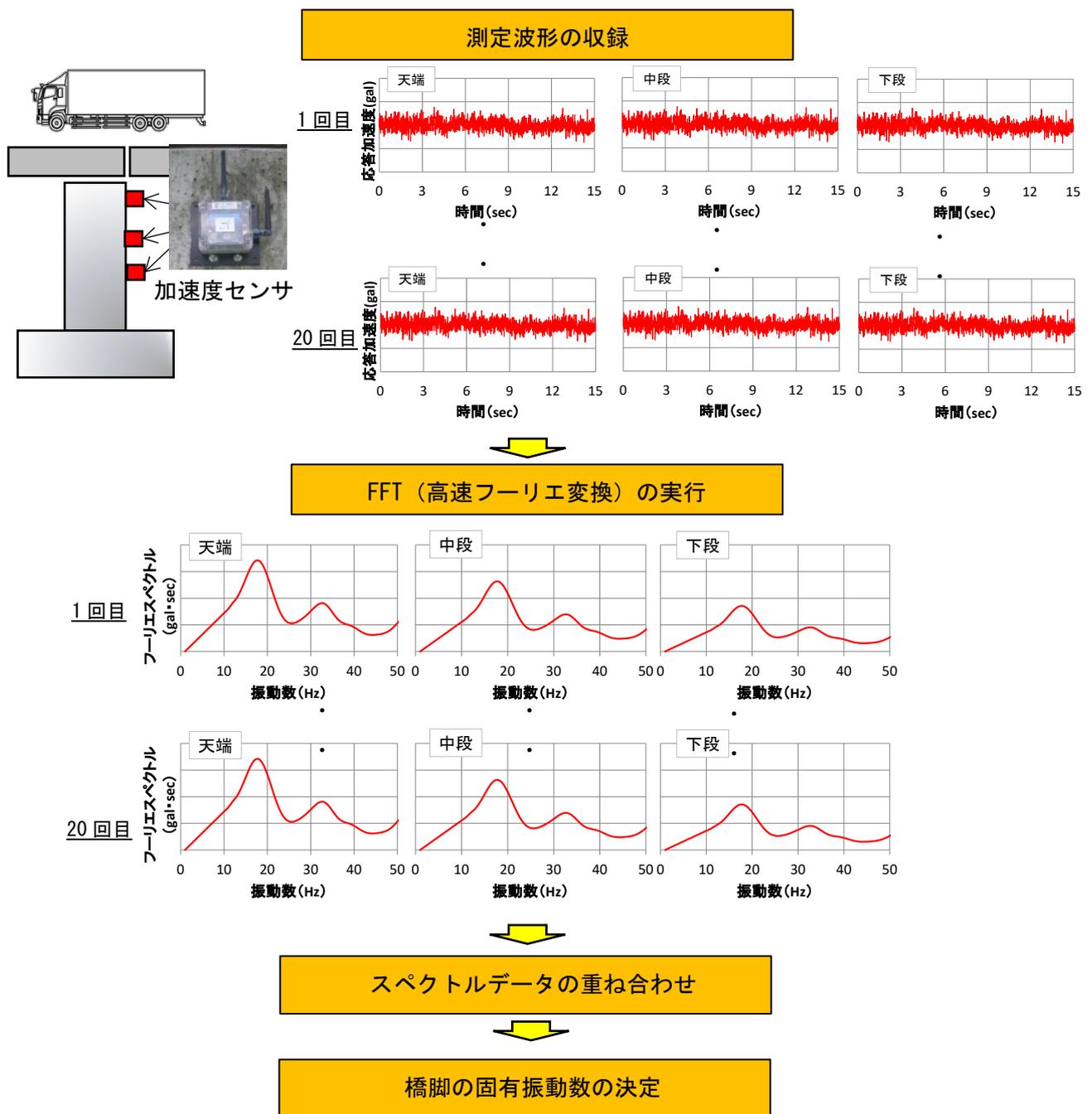


図 4.2.6 モニタリングによる測定データの分析の流れ

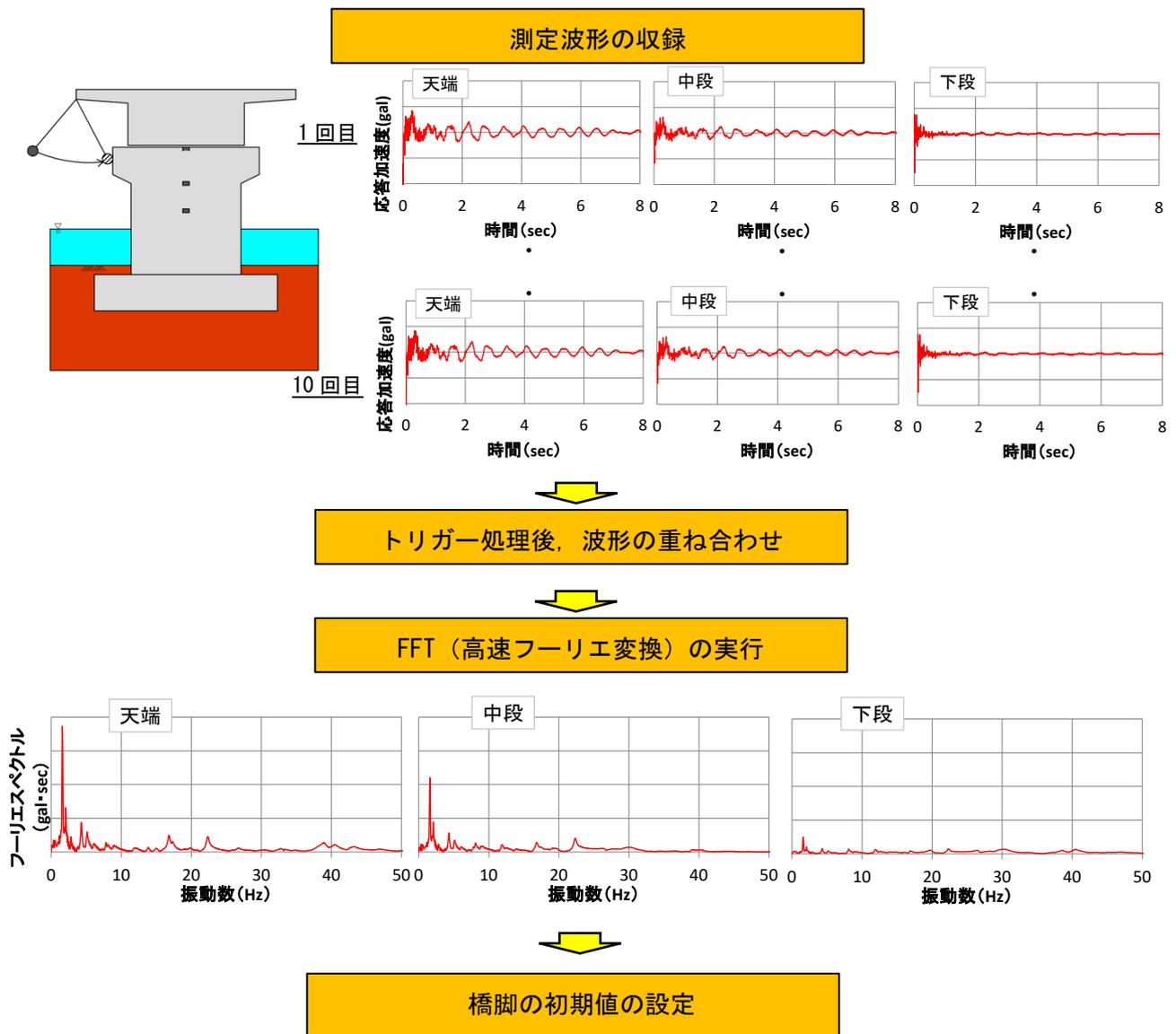


図 4.2.7 衝撃振動試験による測定データの分析の流れ

表 4.2.5 常時微動波形・衝撃振動試験のランダムノイズの除去方法

計測方法	データの重ね合わせ方法	重ね合わせデータ数
常時微動, 交通振動	FFT後のスペクトルデータの重ね合わせを行う	20 波形程度
衝撃振動試験	トリガー処理を行った波形データの重ね合わせを行った後, FFTを行う	10 波形程度

4.2.10 費用の目安

モニタリングの概算コストは、センサモジュール3台、中継器1台、その他1式を5年間継続して実施することを基本とする。橋脚1基あたり概算で約85万円程度であり、内訳は表4.2.6に示す。

表 4.2.6 概算費用の例 (1基あたり)

項目	費用(千円)	備考(内訳等)
計測に係る機器類一式	566千円	リース料金(5年間) 無線センサモジュール:118千円 中継器:106千円
データの収集・伝送に係る機器類一式	647千円	リース料金(5年間) データ記憶装置:647千円
分析に係る機器類一式	1000千円	サーバー使用料(5年間)
設置費(機材運搬費含む) ^{※1}	80千円	
伝送費	440千円	通信費(5年間)
分析費・計測費	1500千円	リース料金(5年間) ソフト使用料 ^{※2}
その他費用(計測用電源引込工事)	61千円	データ記憶装置の電源
合計(5年間) ^{※3※4}	4294千円	
費用(1年間)	約85万円	

1セット:85万円/年(センサーモジュール3台,中継器1台,その他1式を5年間継続使用時のコスト)

※1 センサの設置位置により,高所作業車等の費用が別途必要

※2 ソフトは直接基礎のみ対応しており,杭・ケーソン基礎は別途検討を必要とする。

※3 費用については諸経費(旅費,交通費等)を含んでいない。

※4 衝撃振動試験による初期値の計測分は含んでおらず,第5章5.2.10項を参照とする。

4.3 結果の評価

モニタリングによる計測結果の評価の流れを図4.3.1に示す。評価は4.2.9の分析より読み取った橋脚の固有振動数と次頁以降に示す評価システムより算出した閾値と比較することで現況の安全性の評価を行う。

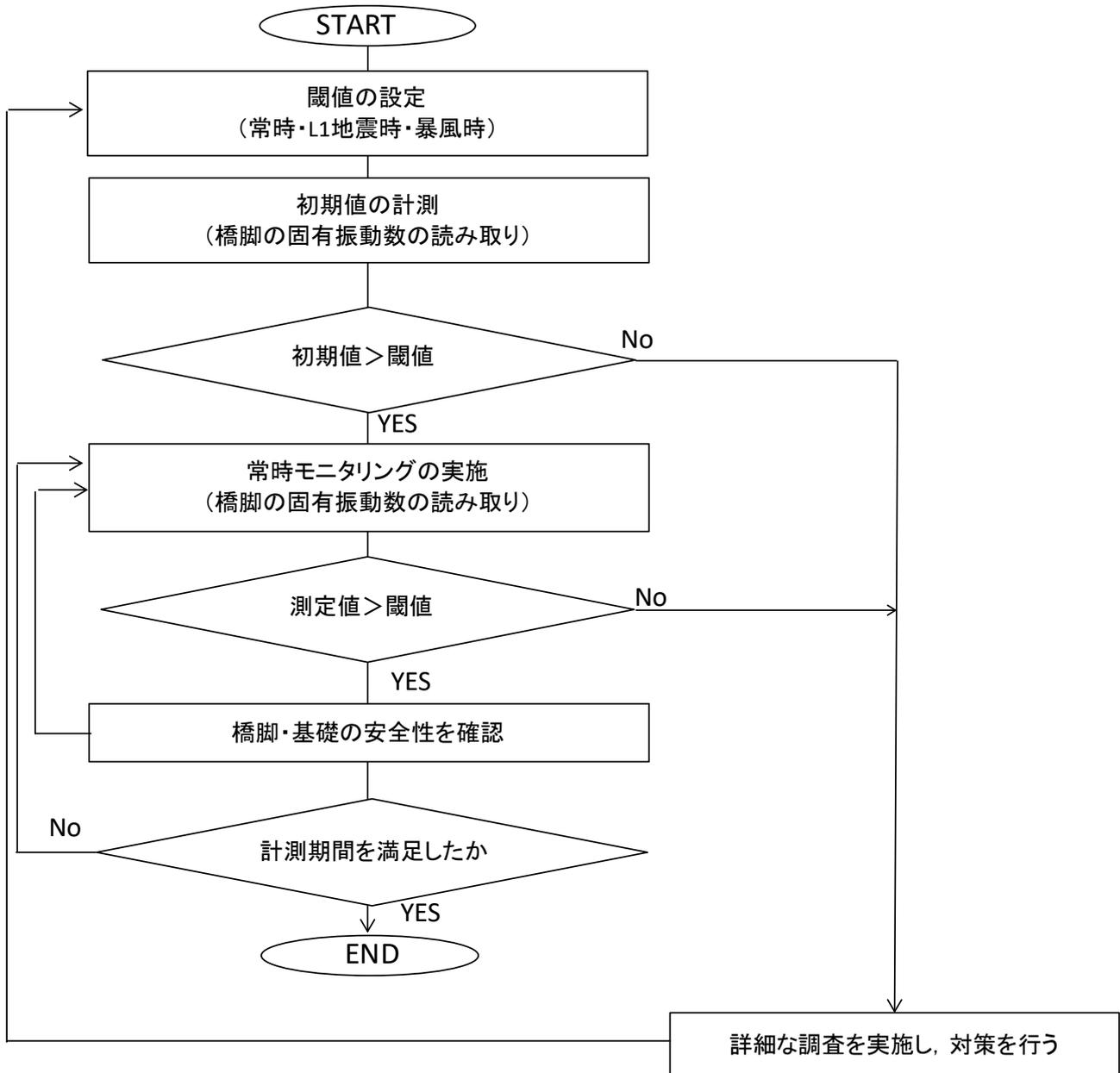


図 4.3.1 モニタリングの計測結果の評価の流れ

(1) 閾値の設定

洗掘のモニタリングによる計測結果の評価の流れを図 4.3.2 に示す。結果の評価については、橋脚の振動モデルによる固有値解析を行い、土被り量の変化と固有振動数の関係について把握する。また基礎の安定計算上限界となる土被り量を推定し、限界状態時の固有振動数を算出し、それらを閾値として設定し、モニタリングの測定結果を評価する。

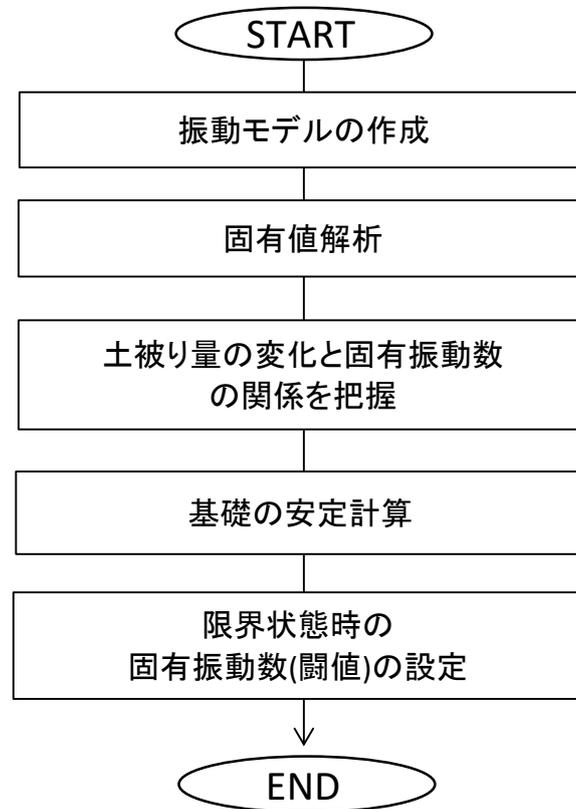


図 4.3.2 洗掘による閾値の算出の流れ

(2) 振動モデルの作成

モニタリングによる計測結果の評価は、橋脚の構造諸元と土質諸元を用いて、図 4.3.3 に示す橋脚の振動モデルを作成する。振動モデルは、耐震設計時の動的解析（公益社団法人 日本道路協会 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 平成 29 年 11 月）に用いる質点-ばね系を用いる。また地盤ばねのモデル化に用いる土質諸元に関しては、図 4.3.4 の基礎地盤のせん断ひずみとせん断剛性低下率の関係から、モニタリング計測時の常時微動の地盤せん断ひずみレベルが設計レベル（地震時の地盤のせん断ひずみレベル）ではなく、初期レベル（ 10^{-6} の地盤のせん断ひずみレベル）に近い微小レベルであることを考慮して、地盤のせん断剛性 G_0 を用いる。

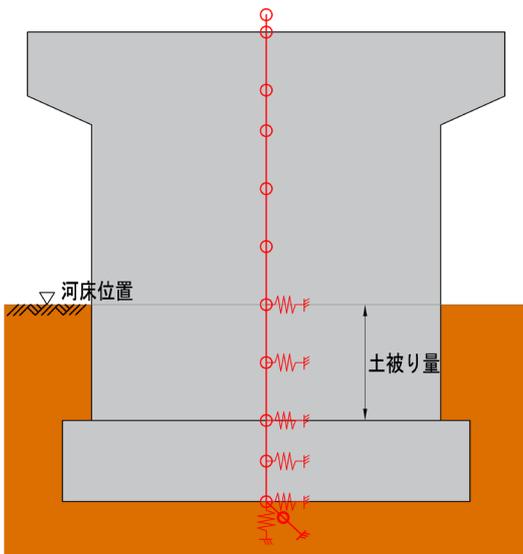


図 4.3.3 振動モデルの作成

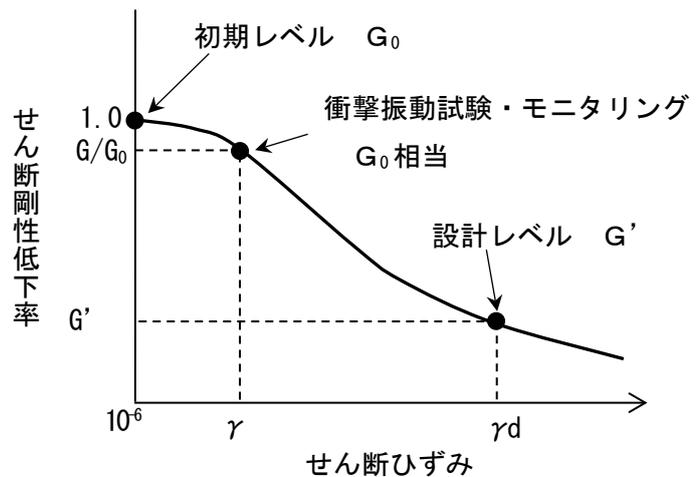


図 4.3.4 地盤のせん断ひずみと剛性の低下率の関係

(3) 固有値解析・土被り量の変化と固有振動数の関係

設定した振動モデルより、橋脚の固有値解析を実施し、土被り量の変化と固有振動数の関係を把握する。振動モデルに用いる土質定数の設定については、設計図書や土質調査報告書等より設定することが望ましいが、無い場合は近傍のボーリングデータ等を用いて設定する。

(4) 基礎の安定計算

(3)より設定した土質定数より、基礎の安定計算を実施する。安定計算は道路橋示方書より、対象橋脚の基礎形式に合わせて行い、安定計算上限界となる洗掘量を算出する。

例えば、直接基礎の場合では、安定計算は常時、暴風時、L1地震時において、図4.3.5に示す(a)支持力、(b)滑動、(c)転倒の3つの項目に対して照査を行う。表4.3.1の照査結果より、常時、暴風時、L1地震時の限界状態時の洗掘量を把握する。例えば、常時においては、洗掘量5.3m時において照査項目のうち転倒で制限値を超えたため、洗掘量5.3mを常時における限界状態時の洗掘量と設定する。なお、安定計算に用いる各限界値における荷重の組合せについては、道路管理者が独自の組合せを設定して行うことも可能である。

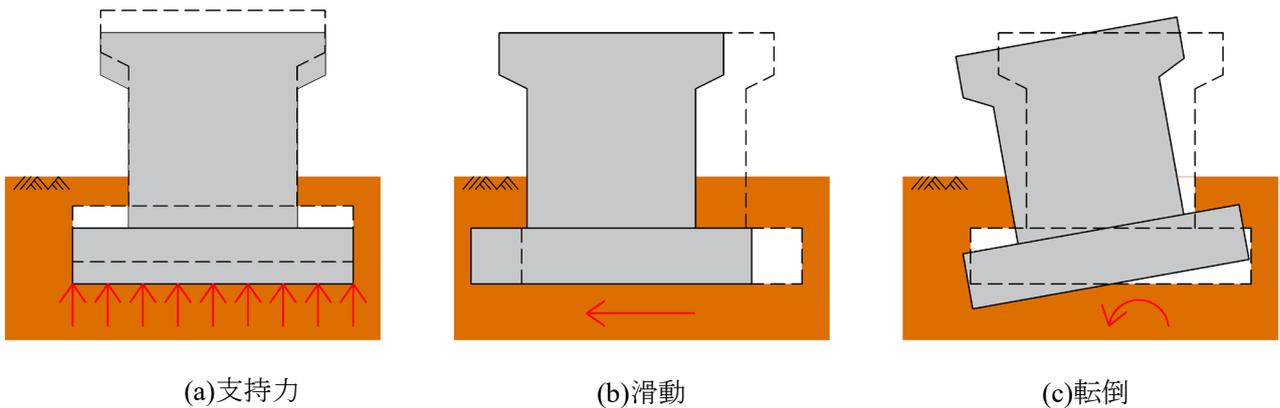


図 4.3.5 安定計算における照査項目（例：直接基礎）

表 4.3.1 各項目の限界状態時における安定計算の結果の例

	照査項目									備考
	支持力			滑動			転倒			
	支持力 (kN)	許容 支持力 (kN)	照査値	せん断力 (kN)	せん断 抵抗力 (kN)	照査値	偏心量 (mm)	制限値 (mm)	照査値	
常時 (洗掘量5.3m)	2000	3000	0.67	500	2000	0.25	875	875	1.00	洗掘量5.3m時において転倒で制限値を超える →洗掘量5.3mが常時における限界の状態
L1地震時 (洗掘量5.0m)	2000	3000	0.67	800	2000	0.40	1750	1750	1.00	洗掘量5.0m時において転倒で制限値を超える →洗掘量5.0mがL1地震時における限界の状態
暴風時 (洗掘量6.5m)	3000	3000	1.00	400	2000	0.20	1200	1750	0.69	洗掘量6.5m時において支持力で制限値を超える →洗掘量6.5mが暴風時における限界の状態

(5) 限界状態時の固有振動数（閾値）の設定

(4)より算出した安定計算上限となる際の洗掘量の関係から、固有振動数と洗掘量の関係を図4.3.6～4.3.8、表4.3.2に示す。以後のモニタリングは、これらの閾値と比較することで、対象橋脚の洗掘による安全性を評価する。

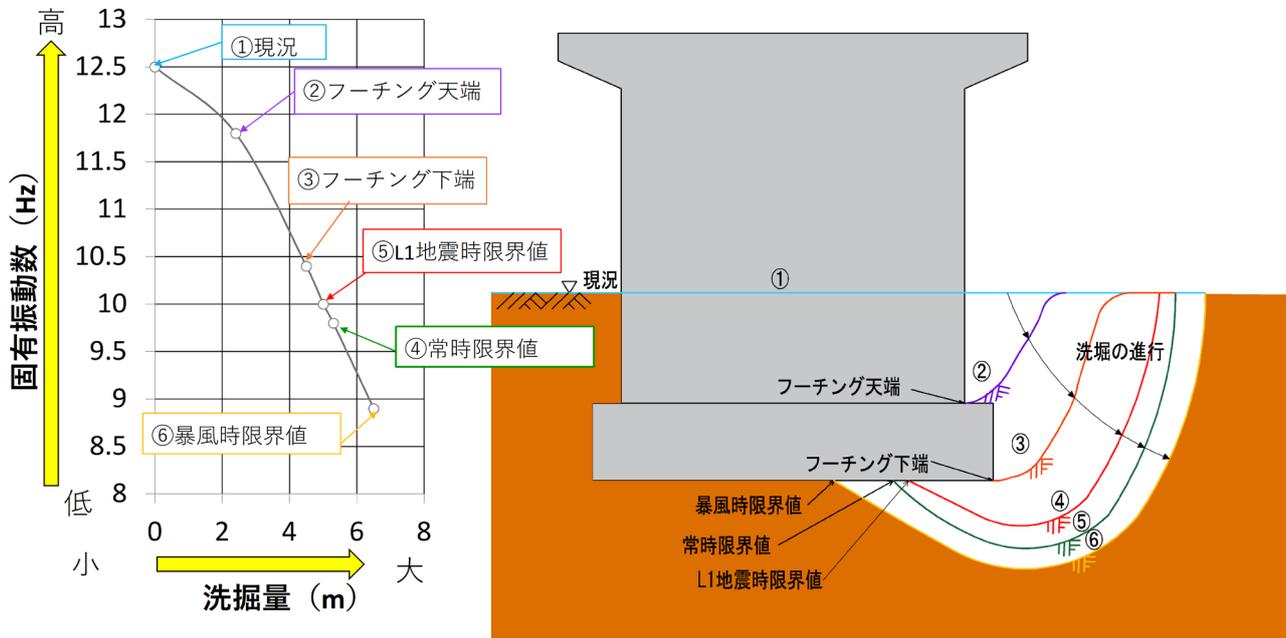


図 4.3.6 固有振動数と洗掘量の関係の例（直接基礎）

表 4.3.2 限界状態時における洗掘量と固有振動数の例

	限界状態時における洗掘量・固有振動数		②モニタリングの計測結果 (Hz)	橋脚の安全性の確認 ②>①
	洗掘量 (m)	①固有振動数 (Hz)		
④常時	5.3	9.80	18.0	OK
⑤L1地震時	5.0	10.00		OK
⑥暴風時	6.5	8.90		OK

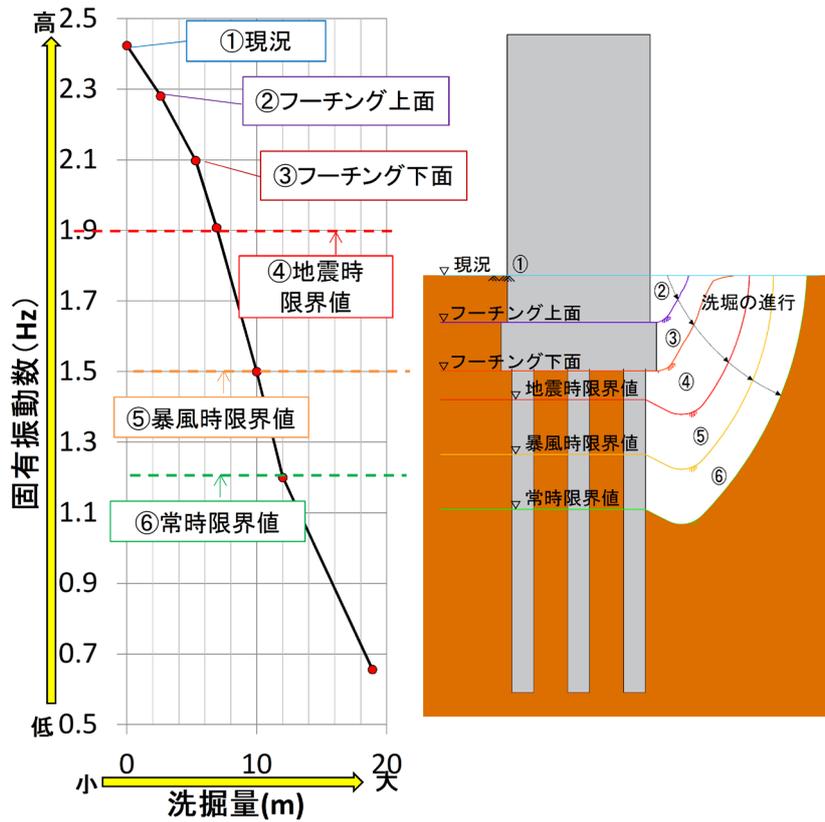


図 4.3.7 固有振動数と洗掘量の関係の例（杭基礎）

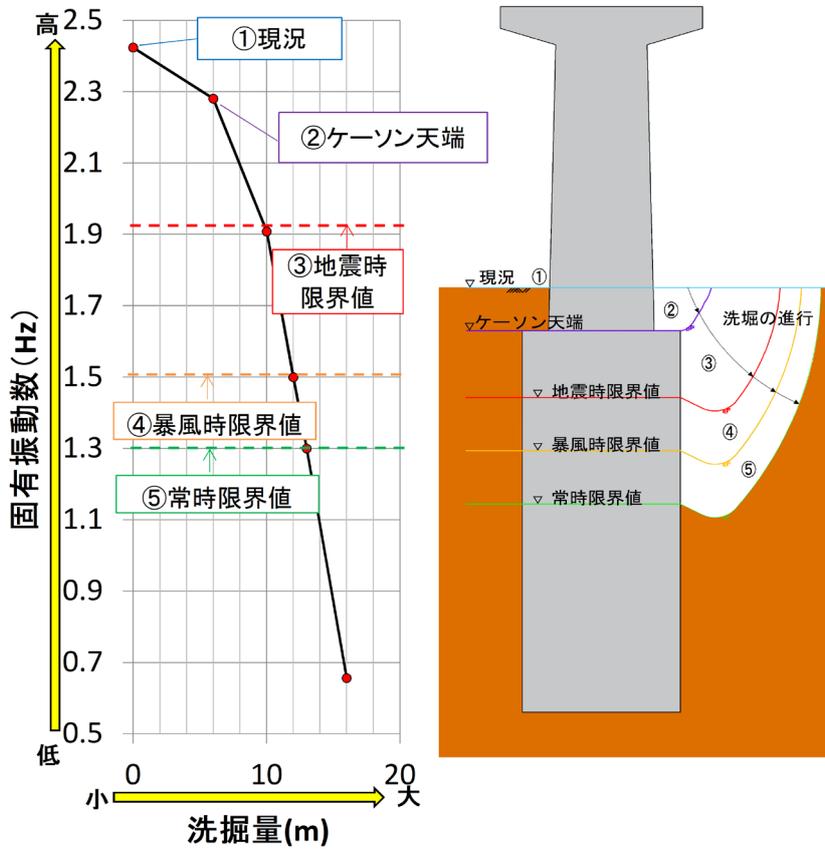


図 4.3.8 固有振動数と洗掘量の関係の例（ケーソン基礎）

4.4 保守

無線加速度センサによる洗掘のモニタリングでは、その計測期間を満足する無線加速度センサの耐久性と設置環境の安定性が重要である。したがって、モニタリングに使用する無線加速度センサ、電源やケーブル配線等については、適切な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。

(1) 無線センサモジュール群

- ・無線加速度センサ設置前には、無線通信状況の確認を行い、通信状況が安定していることを確認する。
- ・計測期間中は、無線センサの固定状況を定期的に確認し、第3者被害が発生しないよう防止に努めることとする。

(2) 中継器

- ・中継器設置前には、無線通信状況の確認を行い、通信状況が安定していることを確認する。
- ・計測期間中は、中継器の固定状況を定期的に確認し、第3者被害が発生しないよう防止に努めることとする。

(3) 配線関係

- ・計測期間中は定期的な点検を行い、配線ケーブルに損傷が無いことを確認する。

5章 無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価（地震）

5.1 技術の概要

本モニタリング技術は、無線通信タイプの加速度センサを用いた地震によるモニタリングと基礎の安全性を評価するものである。

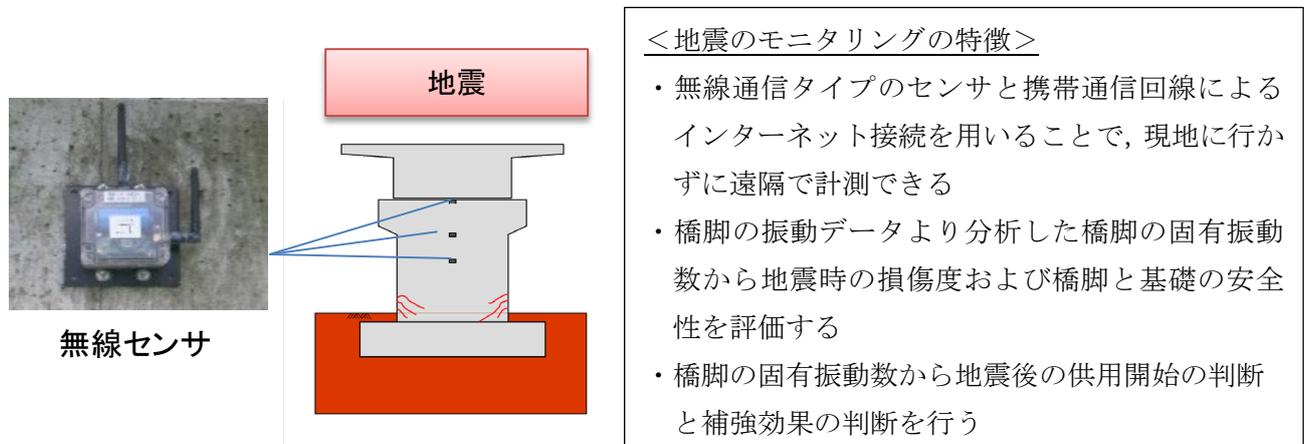


図 5.1.1 地震のモニタリングの特徴

5.1.1 目的

地震のモニタリングは、橋脚の固有振動数から地震後の供用開始の判断と補強効果の判断が可能であり、地震による被災状況や供用可否判定、基礎の安全性について、橋脚の振動データから分析・評価する方法である。本技術は図 5.1.2 に示すように、基本的には衝撃振動試験による測定を行い、地震後、補修補強後など前後の比較を行う。また補修補強を行うまでの経過を常時モニタリングにより観察することで、補修補強を行うまでの橋脚の安全性の評価を行うことが可能である。

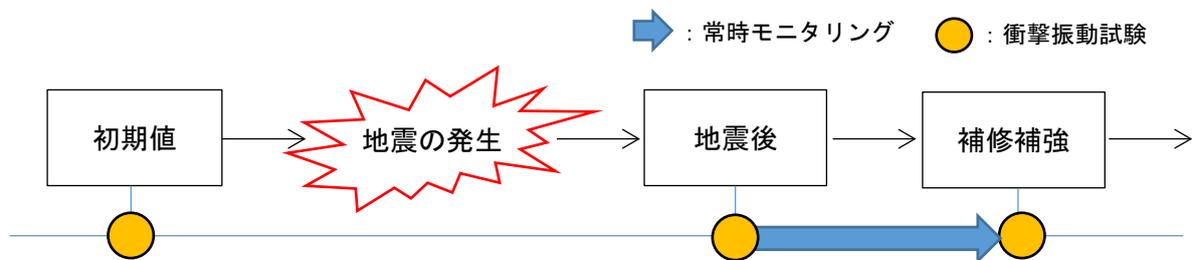


図 5.1.2 地震のモニタリングの時期

5.1.2 システムの概要

モニタリングシステムは、現地に行かずに橋脚の振動データ（常時微動等）を計測し、計測した振動データから橋脚の固有振動数と固有振動モードを分析し、分析結果から橋脚および基礎の安全性を評価するモニタリングシステムであり、全体システムの構成要素は次の通りである。なお①橋脚に取り付ける無線センサモジュール群、②計測した振動データを収集・転送するデータ収集システムは、4章（洗掘）と同じシステムである。

- ① 橋脚に取り付ける無線センサモジュール群 →4章 4.1.2 参照
- ② 計測した振動データを収集・転送するデータ収集システム →4章 4.1.2 参照
- ③ 収集データから安全性を評価するデータ分析・評価システム

(1) 地震時の安全性を評価するシステム

地震時の評価システムは、橋脚および基礎の地震被災度合い（地震損傷状況）を評価（プッシュオーバー解析法を用いる）するシステムと、橋脚および基礎の耐震性能を満足する固有振動数の閾値を算出（固有値解析法を用いる）する橋脚および基礎の必要固有振動数算出から構成される。

（地震時の橋脚および基礎の評価方法については、ラーメン高架橋の健全に関わる柱の剛性評価法の研究，構造工学論文集，Vol,47A,pp.1019-1028,2001.3を参照）。

5.1.3 計測期間

モニタリングの期間は1日1セットを基本とし、1セットの常時モニタリングでは計測データのばらつきを考慮して20回行い、1回の計測時間はサーバー上のデータ容量を考慮し、15秒/回（データ数：3000、サンプリング周波数：200Hz）とする。

なお、新設橋梁、耐震補強を実施した橋梁、現行の耐震設計基準を満たしていない橋梁等に対して、衝撃振動試験による初期値の把握を行うことを推奨する。

表 5.1.1 地震のモニタリングの計測期間

モニタリングの時期	モニタリングの目的
初期値の把握	①～③の橋梁について、衝撃振動試験を1回実施し、初期値を計測する。 ①新設橋梁 ②既設橋梁 <ul style="list-style-type: none"> ・地震による損傷を受けていない健全な状態 ・損傷が把握できた状態 ・耐震補強後等の構造的な変化が行われた状態 ③補修、補強後の状態
地震を受けた橋脚のモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・地震を受けた橋脚に対して、衝撃振動試験を1回実施する。 ・補修、補強を行うまでの経過を常時モニタリングにより確認する。 ・常時モニタリングによる計測は、1日1セット行う。
補修・補強後の橋脚のモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・補修、補強後の橋脚に対して、衝撃振動試験を1回実施する。

5.2 モニタリングの方法

5.2.1 モニタリングの手順

無線加速度センサを用いた地震によるモニタリングの基本的な手順は、図 5.2.1 の通りである。

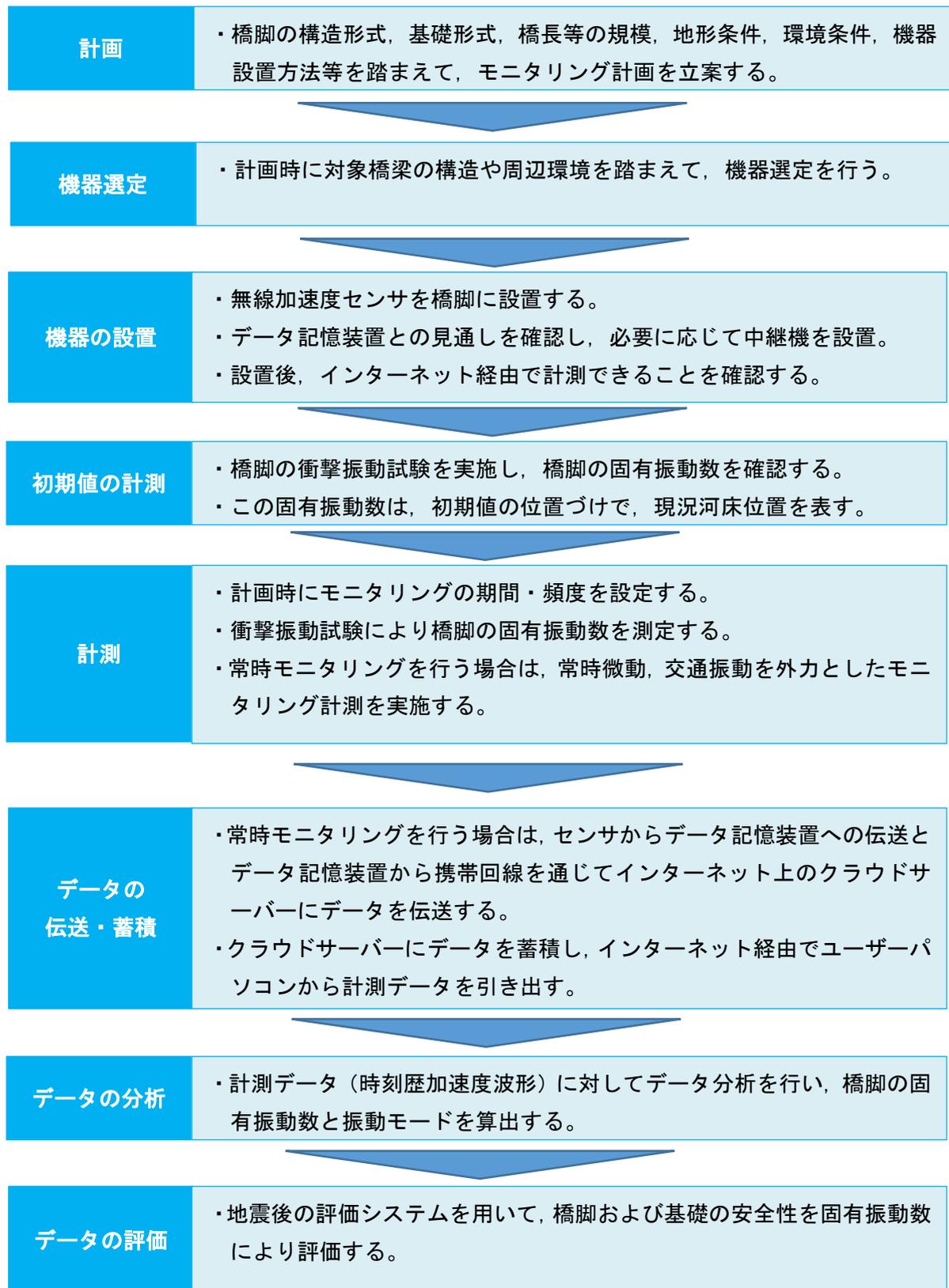


図 5.2.1 無線加速度センサを用いた地震によるモニタリングの手順

5.2.2 計画

モニタリング計測を行う橋梁の種類や規模（橋長，幅員等），下部構造の構造（橋脚，基礎）や橋脚高さ，周囲の地形条件や環境条件を調査して，計測機器の設置・配線方法，計測方法等を十分検討し，目的に則した効率的な計測計画を立案する。なお地震時の対象となる橋梁については，以下のように設定する。

(1) 橋梁の種類や規模

地震のモニタリングの対象とする橋脚の選定は，1.1.3より新設橋梁，耐震補強を実施した橋梁，現行の耐震設計基準を満たしていない橋梁等に対して行うことを推奨する。

(2) センサの設置位置

センサの設置位置は，橋脚の振動モードを把握することを目的として，概ね橋脚の天端・中段・下段の3箇所に設置することが望ましい。

<河川外の橋脚>

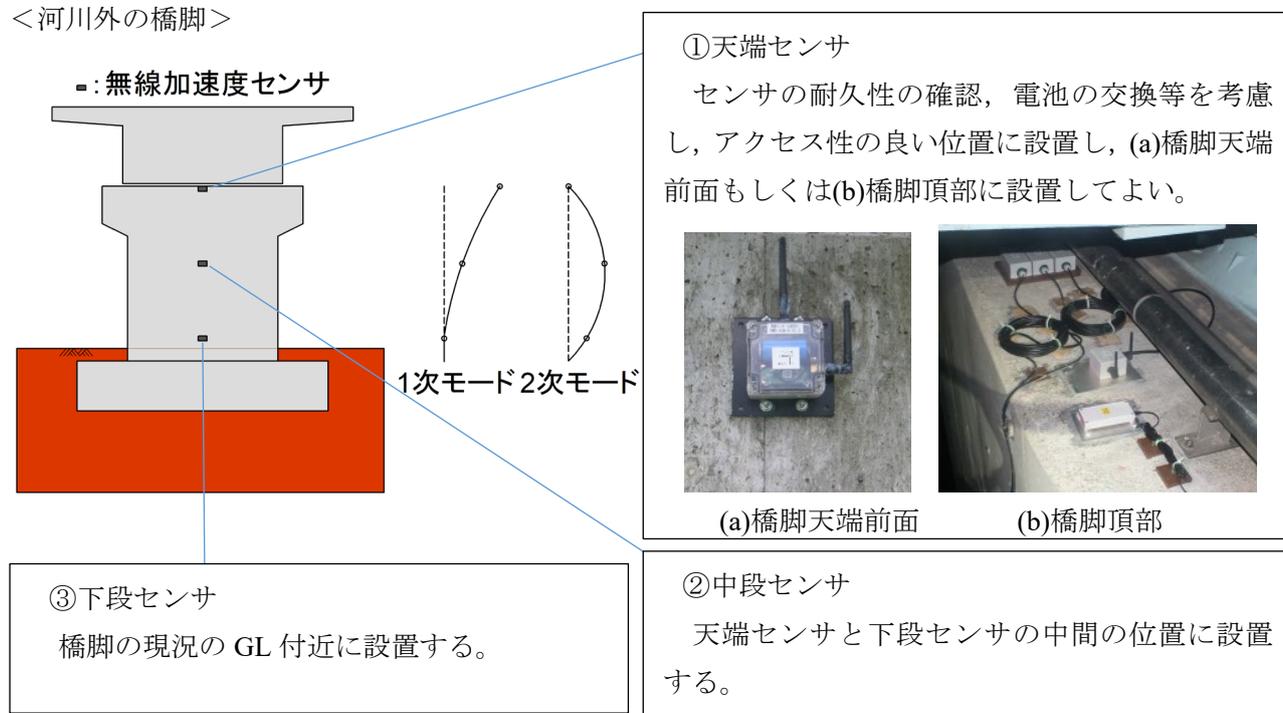


図 5.2.2 河川外の橋脚のセンサの設置位置

(3) 周囲の地形条件や環境条件

計測機器の配置・設置方法，無線通信状態等を調査・検討する。対象橋梁に検査路等が無く，橋脚天端への移動が困難な場合は，橋梁点検車，高所作業車等を用いる場合もあるため事前調査を行う。また計測に必要な電源の確保は，計測方法・計測期間を左右することもあるので十分に事前調査を行う。測定データの伝送には無線を使用するため，事前に現地で無線通信状態を確認してから使用し，通信状態が不安定な場合は中継器を設置する。

(4) 計測期間

計測期間・頻度については、5.1.3より設定する。

5.2.3 機器の選定

機器の選定は「第4章 4.2.3 機器の選定」を参照とする。

5.2.4 無線加速度センサおよび機器の設置

無線加速度センサおよび機器の設置は「第4章 4.2.4 無線加速度センサおよび機器の設置」を参照とする。

5.2.5 初期値の設定

モニタリングの測定結果を評価するにあたり、対象橋脚に対して衝撃振動試験を実施し、現況の固有振動数（初期値）を計測する。衝撃振動試験とは、30kg～50kg程度の重錘を使用し、橋脚天端から0.1m～0.5mの箇所へ衝撃力を与え、その応答から構造物の周波数応答関数を算出し、この関数の振幅の卓越から構造物の固有振動数を把握する試験である。

衝撃振動試験で測定した初期値を設定し、初期値とモニタリングの測定結果を比較することで、洗掘量の絶対評価および橋脚・基礎の安全性を評価することができる。なお、現況の河床位置は、「橋梁定期点検要領（国土交通省 道路局 国道・防災課 H31.3）」損傷番号②⑥洗掘より、対象構造物の定期点検結果から設定する。

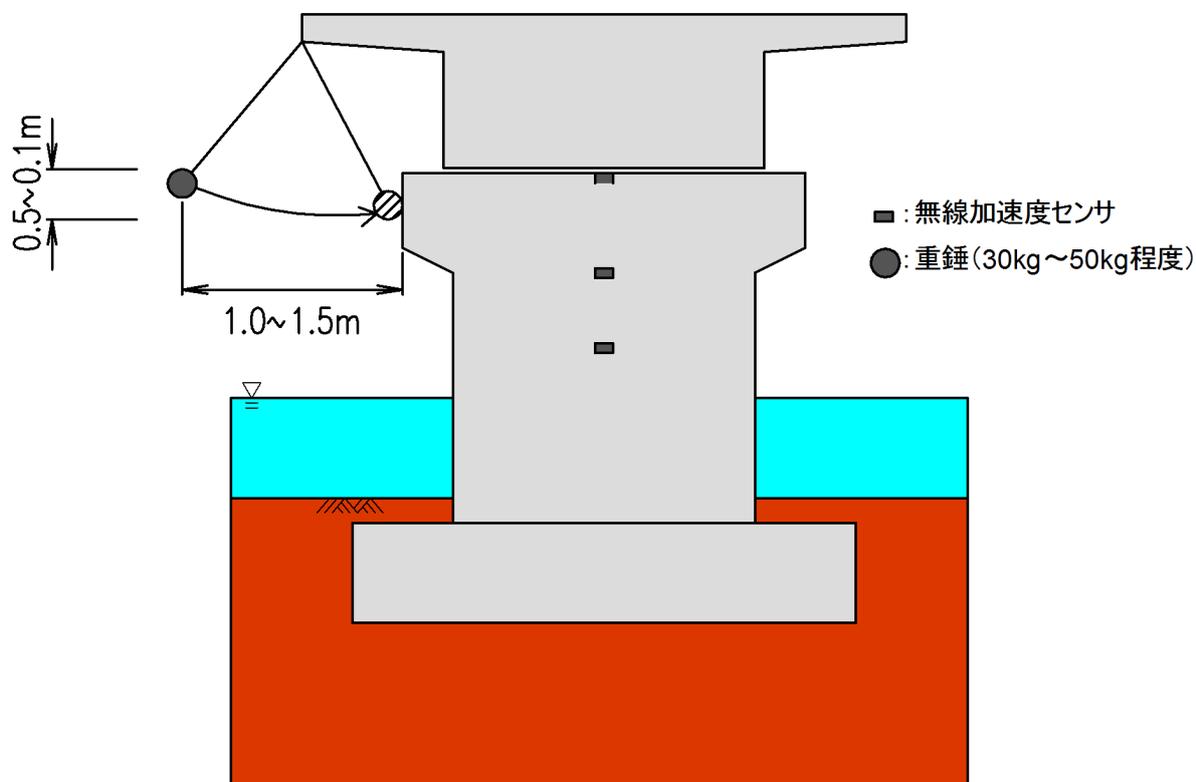


図 5.2.3 衝撃振動試験の概要

5.2.6 計測

計測は「第4章 4.2.6 計測」を参照とする。

5.2.7 データの伝送

データの伝送は「第4章 4.2.7 データの伝送」を参照とする。

5.2.8 データの蓄積

データの蓄積は「第4章 4.2.8 データの蓄積」を参照とする。

5.2.9 データの分析

データの分析は「第4章 4.2.9 データの分析」を参照とする。

5.2.10 費用の目安

地震のモニタリングは衝撃振動試験により行う。1回あたりの概算コストを表5.2.1に示す。

表 5.2.1 衝撃振動試験1回分の概算費用（1基あたり）

項目	費用(千円)	備考(内訳等)
計測に係る機器類一式	100千円	無線センサモジュール 重錘
測定費	200千円	※1
分析費	500千円	固有振動数、振動モードの算出※2
合計	800千円	※3※4

- ※1 センサの設置位置により、高所作業車等の費用が別途必要
- ※2 地震後の被災状態の閾値を算出するための費用が別途必要
- ※3 費用については諸経費(旅費、交通費等)を含んでいない。
- ※4 常時モニタリングを行う場合は、4章4.2.10項を参照とする。

5.3 結果の評価

地震のモニタリングによる計測結果の評価の流れを図 5.3.1 に示す。モニタリングの計測結果は、4.2.9 により算出し、次頁以降に示す地震後の評価方法より算出した橋脚の被災状態の閾値と比較し、地震後の安全性を確認する。

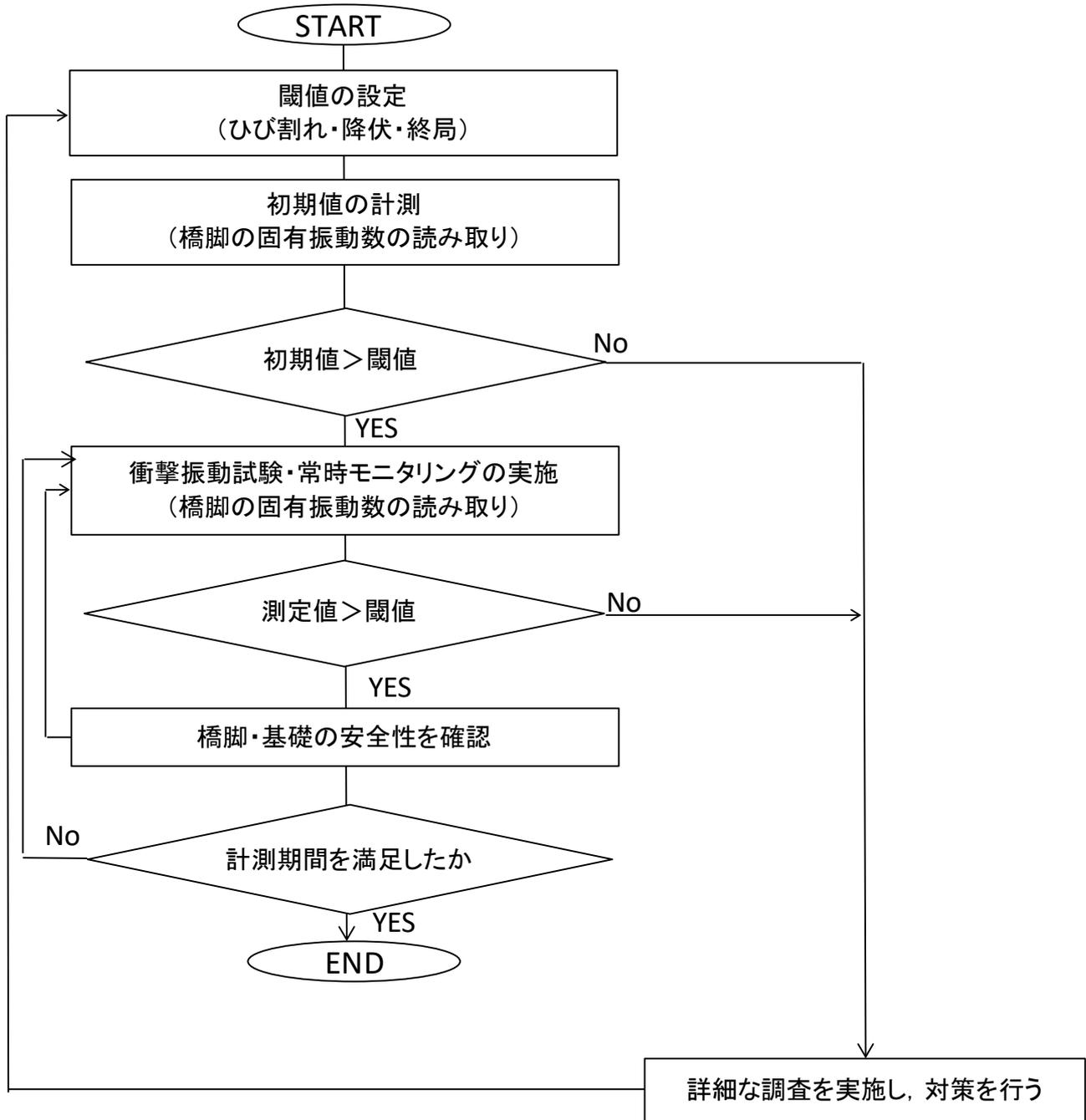


図 5.3.1 地震のモニタリングの結果の評価の流れ

(1) 地震後のモニタリングによる閾値の算出方法

地震後のモニタリングによる閾値の算出方法の流れを図 5.3.2 に示す。結果の評価については、4章 4.3 と同様の橋脚の振動モデルを作成し、地震によって損傷を受けた際の橋脚の剛性を大地震を想定したプッシュオーバー解析により把握する。解析により、震度の規模に対してどの部位にどの程度損傷を受けるか把握し、損傷を解析モデルで考慮することで、降伏時・終局時の固有振動数を算出し、地震被災時の被災度として評価する。

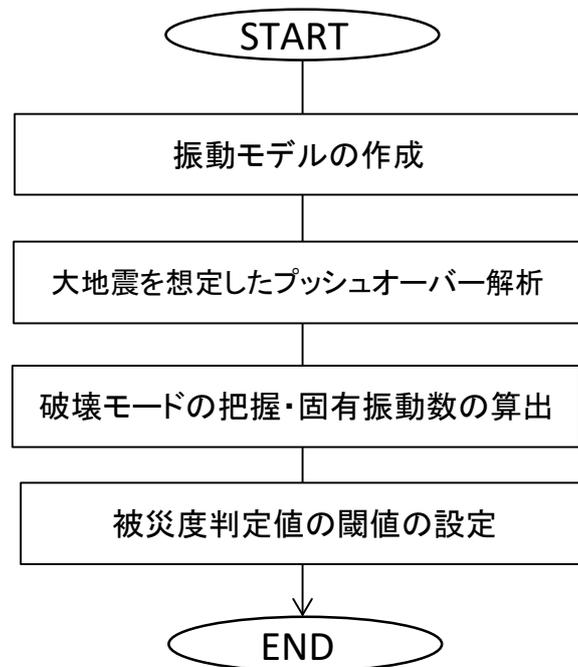


図 5.3.2 地震による限界状態時の固有振動数の評価方法

(2) 大地震を想定したプッシュオーバー解析

地震時の対象橋脚の損傷時の剛性状態を確認するため、大地震による被災を想定したプッシュオーバー解析を実施する。プッシュオーバー解析とは、荷重を段階的に漸増させて与える静的非線形解析であり、橋脚や基礎のような損傷が生じる部材が複数存在する場合、どの部材の損傷が先行するか確認でき、同時に破壊形態（曲げ破壊型、せん断破壊型など）を把握することができる。

解析モデルの構造部材は非線形性を考慮し、図 5.3.4 に示す各損傷状態時における剛性を設定する。なお各損傷状態の剛性は、基礎部が先行して破壊に至る場合は、基礎の安定計算上の限界状態から算出する橋脚の剛性状態とし、橋脚躯体が先行して破壊に至る場合は、降伏時、終局時の橋脚の剛性低下より算出する剛性状態とする。

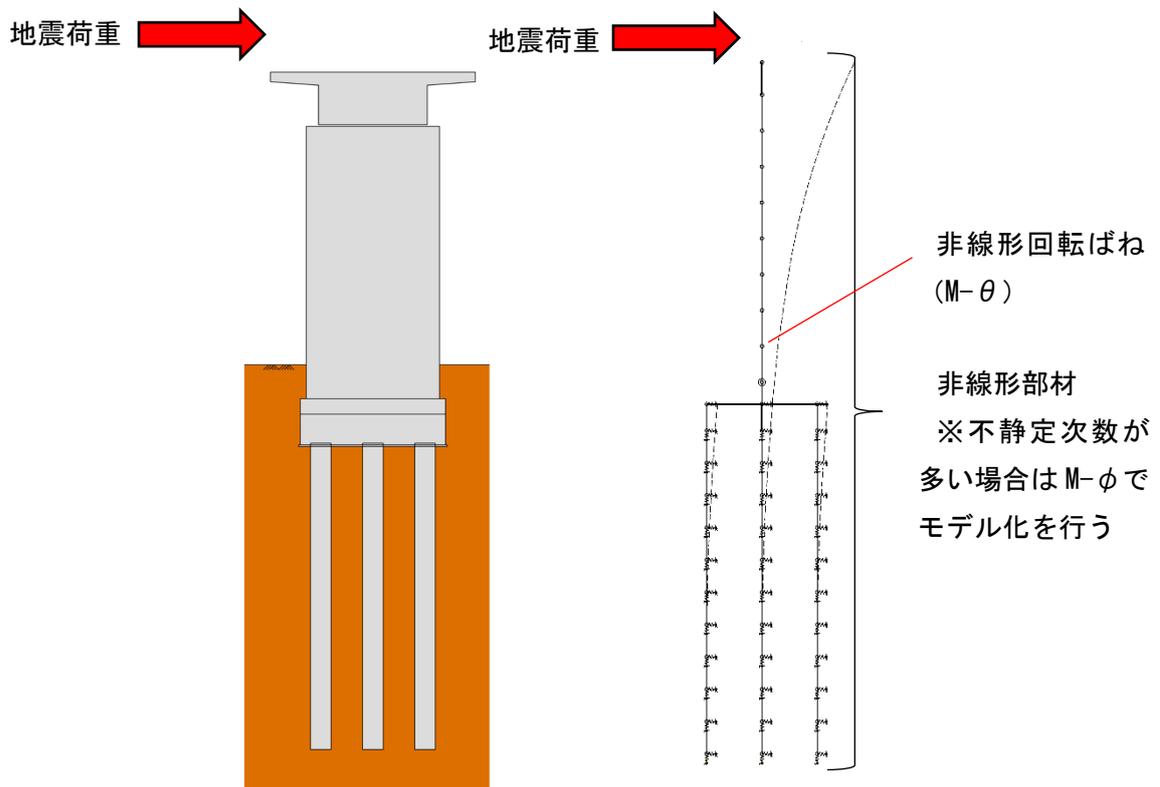


図 5.3.3 地震後の橋脚の損傷度評価方法

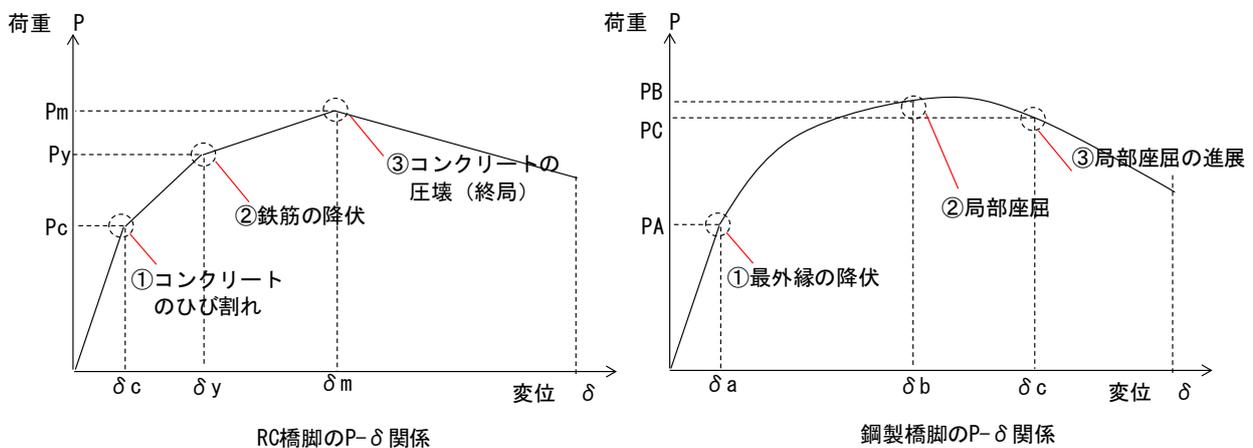


図 5.3.4 地震による損傷状態 (RC 橋脚・鋼製橋脚)

(3) 破壊モードの把握・固有振動数の算出

(1)の結果に基づき、被災度判定を行うための閾値の設定を行う。設定した部材のいずれかが降伏、もしくは終局に至った際の剛性を解析モデルに反映させ、固有値解析を実施する。閾値は基礎部が先行して破壊に至る場合は、基礎の安定計算上の限界状態から算出する橋脚の固有振動数とし、橋脚躯体が先行して破壊に至る場合は、橋脚躯体の降伏時、終局時の剛性低下から算出する橋脚の固有振動数とする。

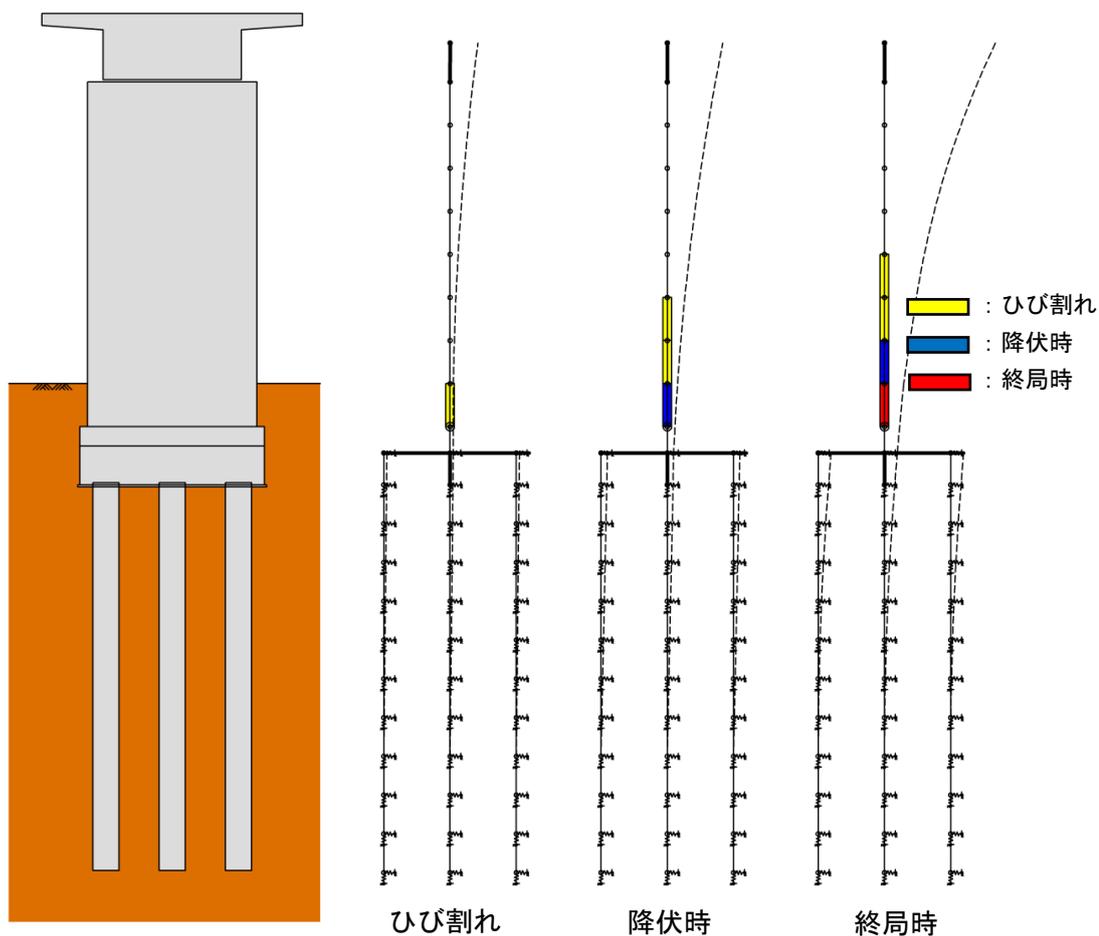


図 5.3.5 地震後の橋脚の損傷度

(4) 被災度判定値の閾値の設定

被災度判定値の閾値の設定の例を表 5.3.1 に示す。

表 5.3.1 地震被災度判定を行うための各損傷状態の閾値の設定の例

	各損傷状態の閾値 (1次モード)	モニタリングの計測結果	判定結果
初期	12.00Hz (1.00)	10.5Hz	計測結果 (10.5Hz) は降伏時の閾値 (10.68Hz) よりも低いことから、鉄筋が降伏している可能性がある。
ひび割れ	11.40Hz (0.95)		
降伏	10.68Hz (0.89)		
終局	9.60Hz (0.80)		

※ () は初期固有振動数に対する低下の割合を表す。

5.4 保守

無線加速度センサによる地震のモニタリングでは、スポット計測とし、計測時における耐久性と安定性が重要である。したがって、モニタリングに使用する無線加速度センサ、電源やケーブル配線等については、適切な保守を行い、各機器の性能を維持する必要がある。

(1) 無線センサモジュール群

- ・無線加速度センサ設置前には、無線通信状況の確認を行い、通信状況が安定していることを確認する。
- ・計測中は、第3者被害が発生しないよう防止に努めることとする。

(2) 中継器

- ・中継器設置前には、無線通信状況の確認を行い、通信状況が安定していることを確認する。
- ・計測中は、第3者被害が発生しないよう防止に努めることとする。

(3) 配線関係

- ・計測期間中は定期的な点検を行い、配線ケーブルに損傷が無いことを確認する。

6章 適用事例

6.1 無線加速度センサを用いた基礎の安全性評価【7編4章の事例】

(1) 適用事例の概要

地震時・洪水時等の異常時による被災状況や供用可否判定や、経年的な河床低下による洗掘の進行状況を遠隔監視する目的で、予め橋脚に複数点設置した無線通信タイプの加速度センサと携帯通信回線によるインターネット接続を用いて、現地に行かずに橋脚の振動データを計測し、計測結果から分析・評価するモニタリングシステムを適用した事例を示す。

(2) 対象橋梁

対象橋梁は平成4年に完成した一級河川の渡河橋である。本橋の橋梁諸元は、橋長402m（支間割：45m+70m+86m+86m+70m+45m）、上部構造形式は単純鋼床版箱桁+4径間連続鋼床版箱桁+単純鋼床版I桁であり、洗掘モニタリングの対象橋脚は、河川内に位置するP2橋脚とした。

(3) モニタリングの手順

1) センサ設置計画及び現地踏査

下部工基礎の洗掘モニタリングを実施するにあたり、現地踏査を実施し、センサの配置計画を表6.1.1のように設定した。

表 6.1.1 モニタリング機器の配置計画

<p>全体図</p>	<p> ■ : 測定対象 ■ : データ記憶装置 </p>
<p>A1 橋台</p> <p>電源設備 データ記憶装置設置 トリガーセンサ設置</p>	<p> ■ : データ記憶装置 (機械ボックス中) ■ : トリガーセンサ — : トリガーケーブル ○ : 電源設備 — : 電源ケーブル </p>
<p>P2 橋脚 (河川内)</p> <p>無線センサモジュール設置</p>	<p> ■ : 無線センサモジュール(2.4GHz) ■ : 外部バッテリー3台 — : バッテリーケーブル </p>

2) センサの選定及び配置

配置計画より使用するセンサを選定した(表 6.1.2)。また、現地踏査の電波の受信状況から、P1 橋脚に中継器を設置することとした。

P2 橋脚, A1 橋台に設置した機器の設置状況を図 6.1.1, 6.1.2 に示す。

表 6.1.2 センサの仕様

機器名	仕様等
<ul style="list-style-type: none"> 無線モジュール MEMS 加速度センサ, アンプ, 無線等 	3 台設置(P2 橋脚) 80×82×56mm
<ul style="list-style-type: none"> 中継機 無線センサモジュールとデータ記憶装置が見通せない場合に使用 	1 台設置(P1 橋脚) 80×160×56mm
<ul style="list-style-type: none"> 外部バッテリー 無線センサモジュールと中継機の大容量の外部バッテリー 	4 台設置 (P1 橋脚 1 台, P2 橋脚 3 台) 80×160×56mm
<ul style="list-style-type: none"> トリガーセンサ 地震発生時にシステムを起動させる加速度センサ(地震時における下部工の被災状況把握を目的) 	1 台設置(A1 橋台) 80×82×56mm
<ul style="list-style-type: none"> データ記憶装置 無線センサモジュールと中継機からの送信データを携帯電話網でインターネット上のデータサーバーに送信 	1 台設置(A1 橋台) 150×220×100mm

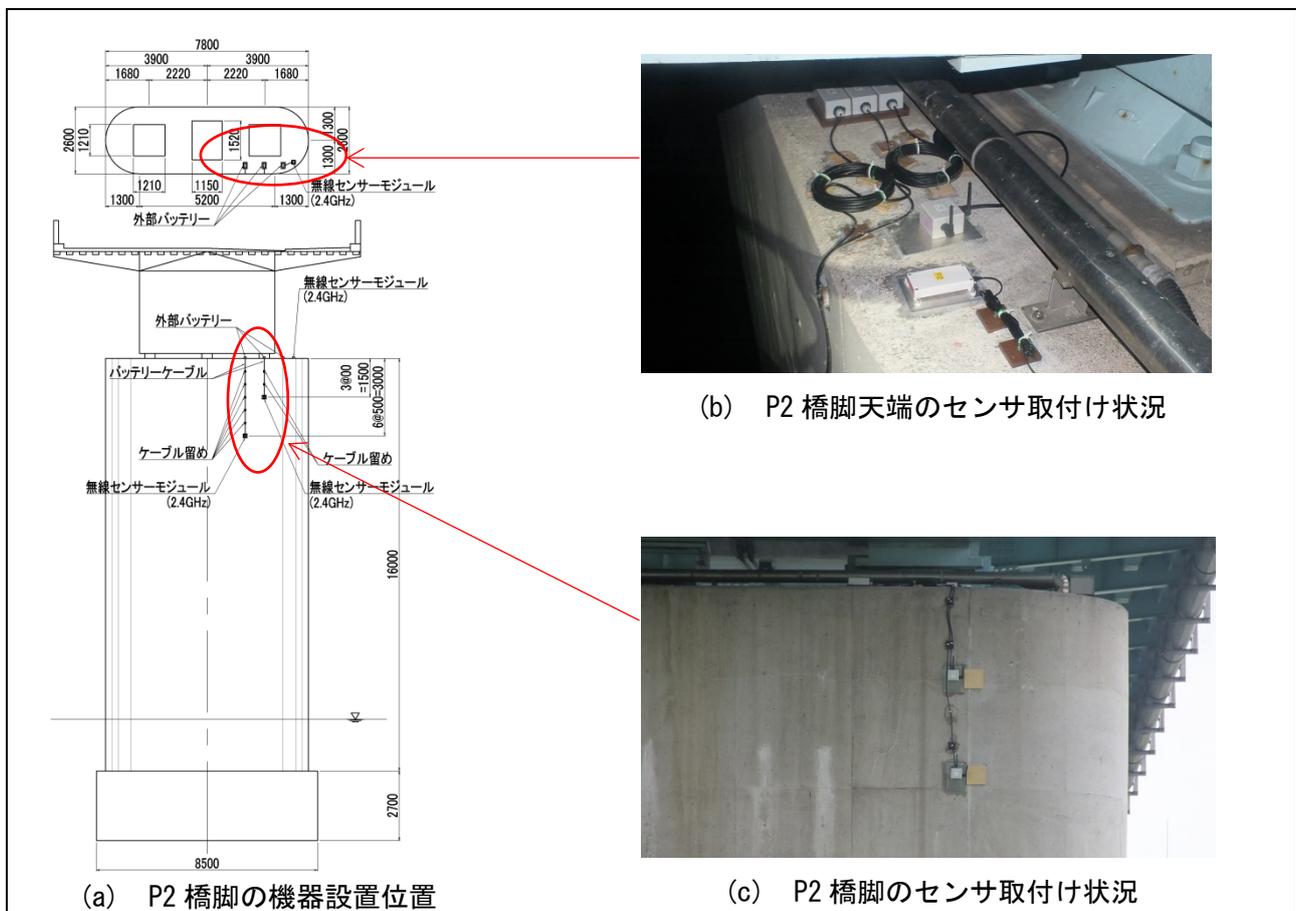


図 6.1.1 P2 橋脚の機器設置状況

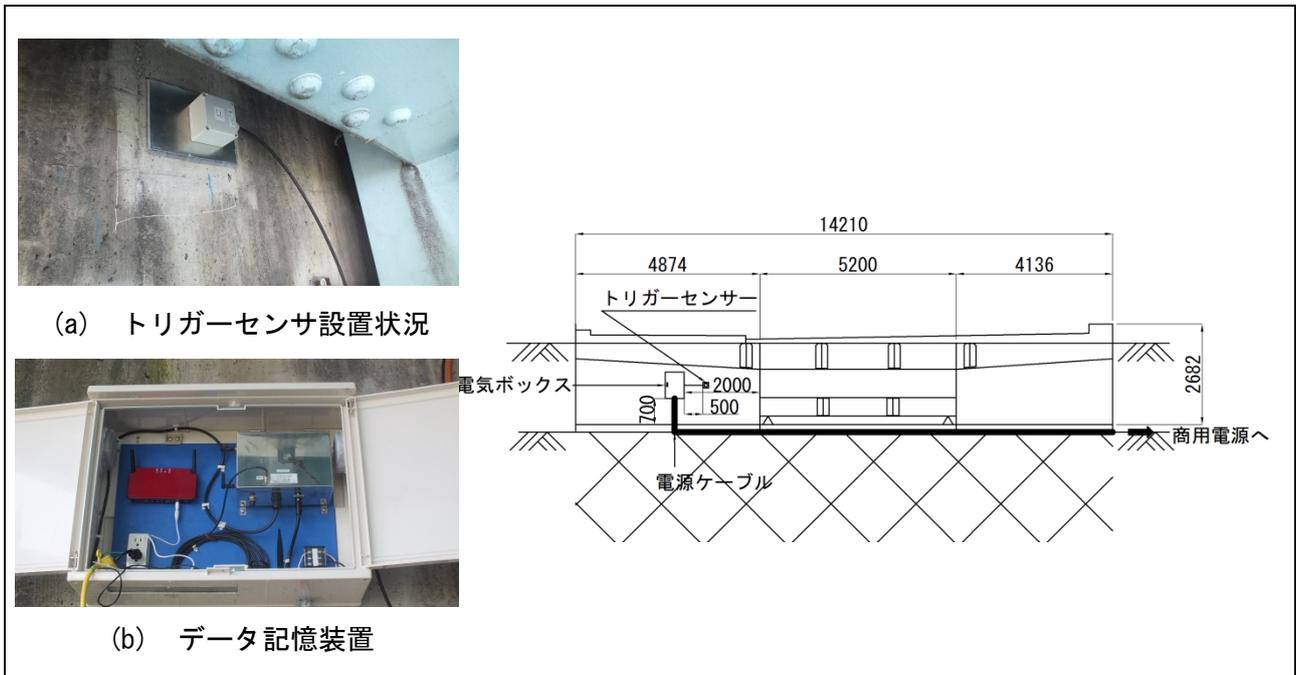


図 6.1.2 A1 橋台の機器設置状況

3) 衝撃振動試験の実施

モニタリングの測定結果を評価するにあたり、対象橋脚に対して衝撃振動試験（図 6.1.3）を実施し、現況の固有振動数（初期値）を計測した。衝撃振動試験は、40kg 程度の重錘を使用し、橋脚天端に衝撃力を与え、その応答から構造物の周波数応答関数を算出し、この関数の振幅の卓越から構造物の固有振動数を把握した。

P2 橋脚の衝撃振動試験結果として、橋軸直角方向（河川流下方向）の加速度応答の周波数スペクトル図を図 6.1.4 に示す。周波数分析結果から、対象橋脚の固有振動数は 2.37Hz であることを確認した。また、現況の解析モデルを用いた再現解析（図 6.1.5）により衝撃振動試験結果を説明し得る地盤定数や土被り量を算定して、対象橋脚の土被り量を確認した。

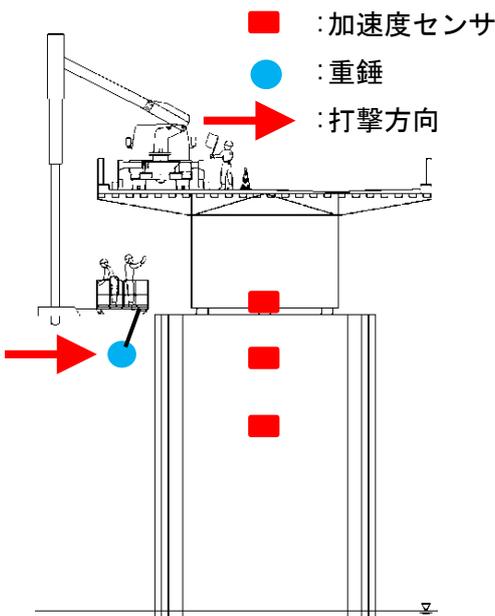


図 6.1.3 P2 橋脚 センサ設置位置

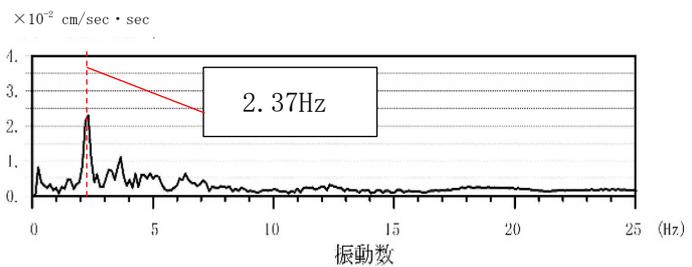


図 6.1.4 衝撃振動試験の周波数分析結果

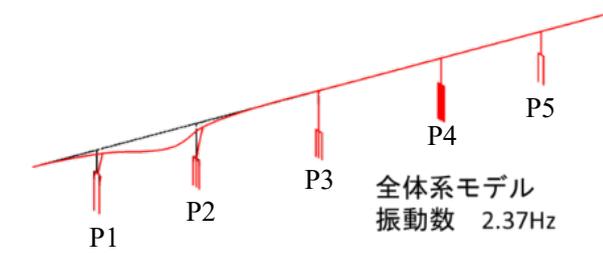


図 6.1.5 再現解析による振動モード図

4) モニタリング計測

本モニタリングシステムの概要を図 6.1.6 に示す。本システムは、現地に行かずに橋脚の振動データ（常時微動等）を計測し、計測した振動データから橋脚の固有振動数と固有振動モードを分析し、分析結果から橋脚および基礎の安全性を評価するものである。モニタリングの測定は、センサ設置時の平成 28 年 4 月から平成 30 年 3 月まで行った。

P2 橋脚の常時微動測定結果として、計測波形の周波数分析結果を図 6.1.7 に示す。周波数分析は、橋軸直角方向および鉛直方向のフーリエ振幅比（H/V スペクトル比）を用いて常時微動波形のランダムノイズの除去を行い、対象橋脚の固有振動数を把握した。

平成 28 年 4 月～平成 30 年 3 月の P2 橋脚の固有振動数の計測結果を図 6.1.8 に示す。固有振動数は P2 橋脚に設置している無線加速度センサから常時微動波形を計測し、計測波形の周波数分析結果（H/V スペクトル比）より算出している。計測期間における固有振動数は平均値 2.34Hz、標準偏差 0.06Hz で推移していることを把握した。

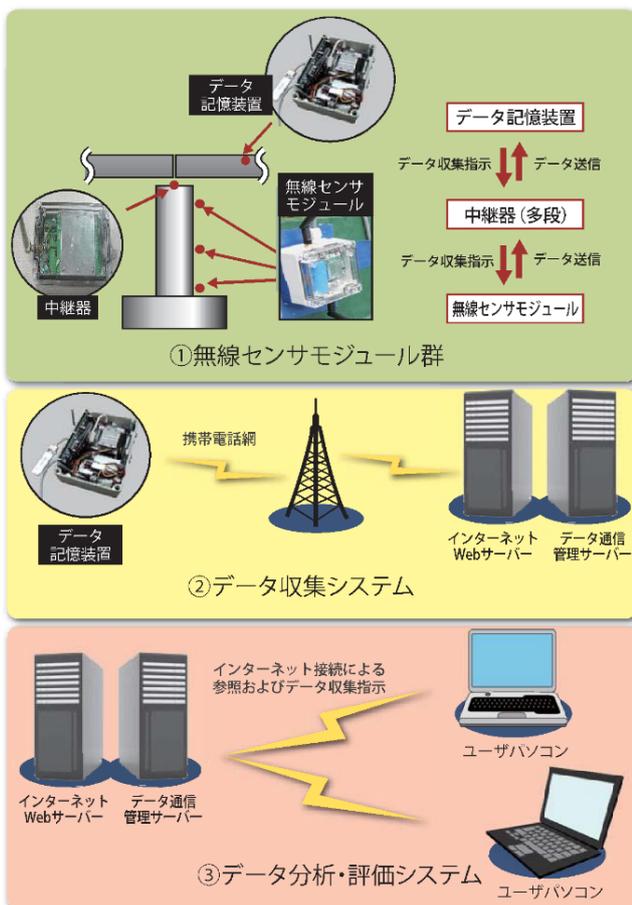


図 6.1.6 データ収集システムの概要

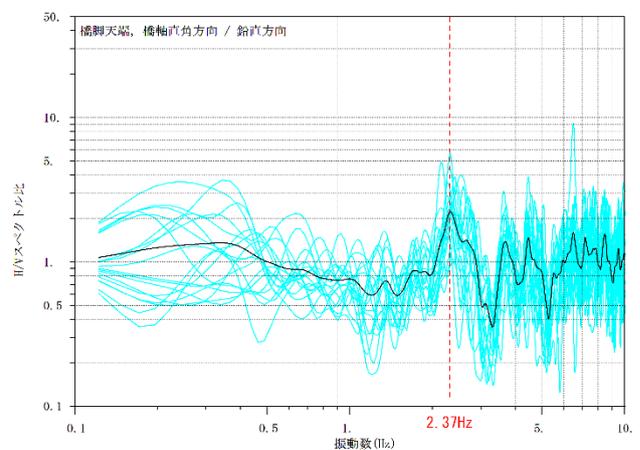


図 6.1.7 H/V スペクトル比

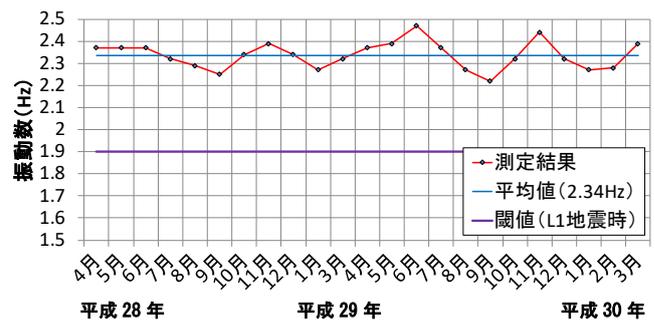


図 6.1.8 常時モニタリング結果 (P2 橋脚)

5) 計測結果の評価

モニタリング計測結果の評価を行うため、下部工基礎の安定計算を行い、基礎の安全性が確保される限界の河床位置と橋脚の固有振動数の関係を把握した。

P2 橋脚の固有振動数と洗掘量の関係を図 6.1.9 に示す。基礎の安定計算は、暴風時と L1 地震時に対して行い、洗掘時の L1 地震時には基礎が先行して降伏するものとし、閾値の設定を行った。解析結果より、L1 地震時は 1.91Hz、暴風時は 0.66Hz が限界値となり、それぞれを限界状態時における固有振動数の閾値として設定した。

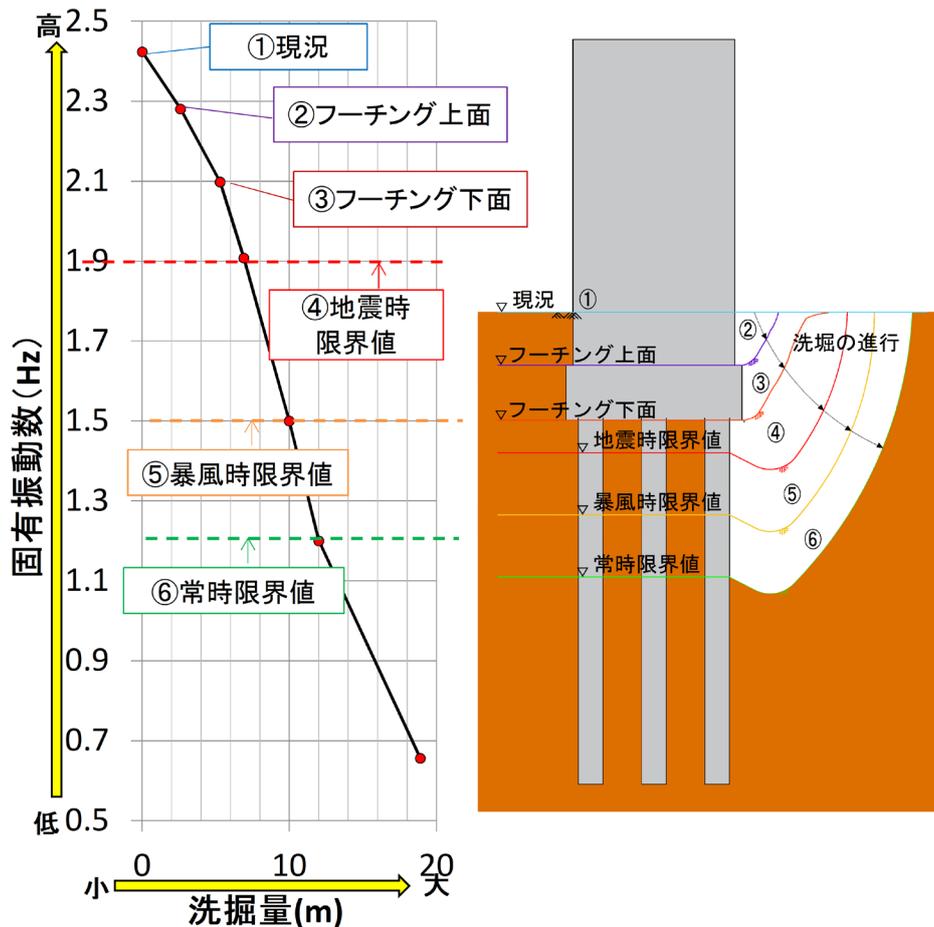


図 6.1.9 固有振動数と洗掘量の関係

前述したように、計測期間中における対象橋脚の固有振動数（図 6.1.8 参照）は常に 2.2Hz 以上であり、下部工基礎の洗掘に関する安全性は確認された。

(4) まとめ

本稿では、固有振動数に着目した下部工基礎の洗掘モニタリングシステムの活用事例について述べた。このモニタリングシステムを用いることで、甚大化する豪雨災害時や今後発生が懸念される大規模地震時における被災状況を遠隔により安全かつ迅速に把握することが可能となり、措置方針の早期立案や措置後の効果確認等に活用できる。

6.2 加速度センサを用いた地震により被災した橋梁の補修効果の確認【7編5章の事例】

(1) 適用事例の概要

1) 熊本地震で被災した橋梁への取り組み

熊本地震で被災した橋梁の復旧作業の効果確認として、モニタリング技術を適用した事例について紹介する。熊本地震の復旧事業は、国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所の実施によるもので、また計測の検討は、事業主体及び国土交通省国土技術政策総合研究所、土木研究所が行った。組合員である土木研究所に対し、RAIMS がモニタリングのための計測機器の選定や計測結果の図示について技術支援を行った。

2) 橋梁の概要

対象橋梁は、平成 28 年 4 月に発生した熊本地震で被災した阿蘇長陽大橋であり、平成 5 年に架設（設計基準は昭和 55 年道路橋示方書）された。橋梁の外景、および主な損傷状況を図 6.2.1 に示す。

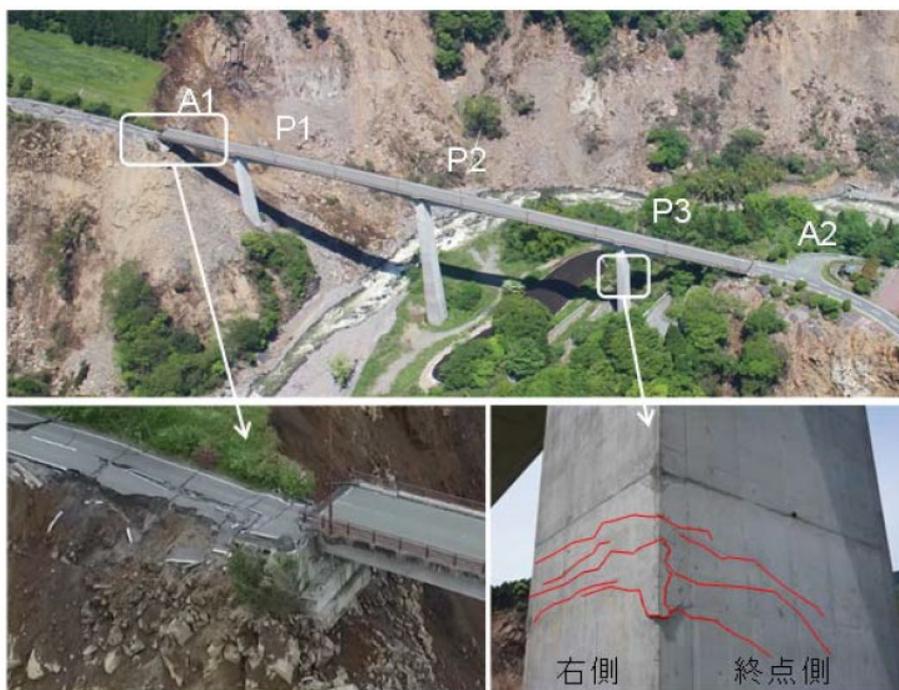


図 6.2.1 阿蘇長陽大橋の外景及び主な損傷状況¹⁾

本橋の橋梁緒元は、橋長 276m(支間割: 39.3m+91.0m+91.0m+53.3m)の 4 径間 PC 連続ラーメン箱桁橋である。また、橋脚は最も高い橋脚高で 68m(P2 橋脚, その他 P1 橋脚: 37m, P3 橋脚: 33m)であり、主鉄筋に段落し部が存在する中空断面構造である。

3) 損傷・復旧概要

地震による主な損傷は、A1 橋台の斜面崩落による沈下や、P3 橋脚の主鉄筋の段落し部となる中間高さ位置で発生した貫通ひび割れである(図 6.2.1, 図 6.2.2)。

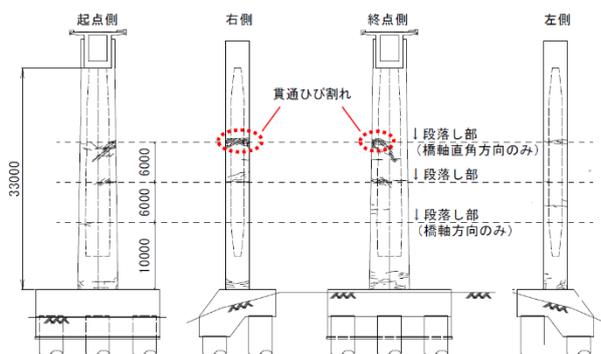


図 6.2.2 P3 橋脚のひび割れ発生位置¹⁾



図 6.2.3 コンクリート充填補修の状況²⁾

この貫通ひび割れにより失われたせん断抵抗機能を回復させるため、P3 橋脚の中空部へのコンクリート充填による補修が行われた(図 6.2.3)。

4) 計測概要

P3 橋脚のコンクリート充填前後での橋脚の振動モードの変化を計測可能とするため、加速度センサは、橋軸方向、橋軸直角方向(X, Y 軸)の時刻同期計測とし、加速度計の設置箇所は、図 6.2.4、表 6.2.1 に示す通り、P3 橋脚の高さ方向に貫通ひび割れを跨ぐ位置に計 5 箇所設置した。以下、橋脚基部を高さ 0m、高さ方向へ設置した順に加速度計を No.1~5 と呼称する。

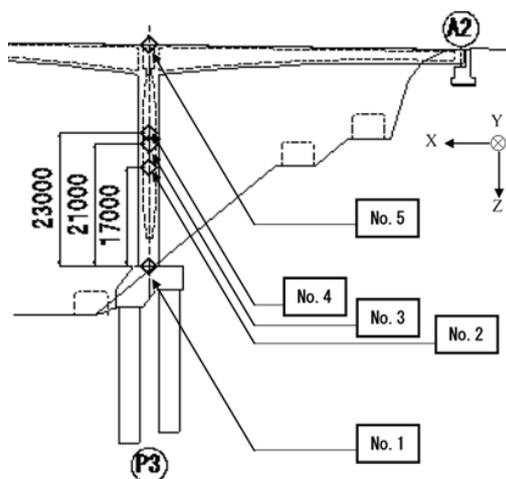


図 6.2.4 加速度計の設置位置¹⁾より抜粋・追記

表 6.2.1 加速度計 No. と設置位置

加速度計 No.	設置位置(橋脚高さ)
No.1	0.0m (橋脚基部)
No.2	17.0m
No.3	21.0m
No.4	23.0m
No.5	38.3m (車道側地覆部)

加速度計は、表 6.2.2、図 6.2.5 に示す通りの性能・外観を有する機器を使用した。

表 6.2.2 使用した加速度計の特性

最大測定加速度	±1G
周波数測定範囲	DC~300Hz (±5%)
直線性誤差	0.03%R0
精度	±0.5%
サンプリング速度	200~256Hz



図 6.2.5 加速度計の設置状況¹⁾

計測作業は、P3 橋脚の中空断面へコンクリートを充填する過程に合わせ、複数回にわたって行った。以下、コンクリート充填段階における各計測のタイミングは、図 6.2.6 に示す通り、計測 1~4 と呼称する。

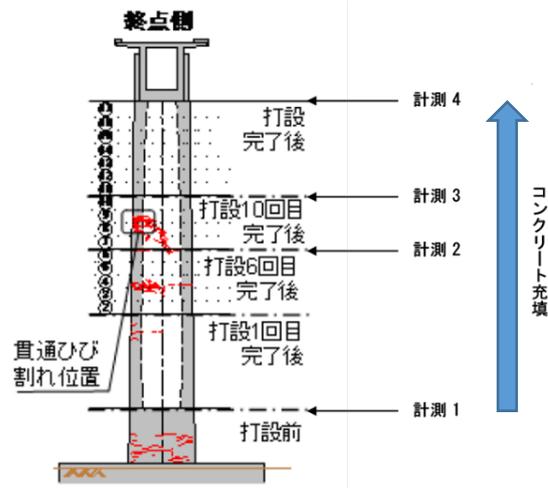


図 6.2.6 コンクリート充填過程と加速度測定タイミング ¹⁾より抜粋・追記

(2) 試験結果

1) 固有振動数による剛性の評価

P3 橋脚の橋脚直角方向は、基部を固定端とした鉛直方向の片持ち梁と見なすことができる。計測タイミング毎に大型車両による強制振動を行い、計測した全加速度計の橋軸方向の強制振動のパワースペクトル例を図 6.2.7, 図 6.2.8, 橋軸直角方向のパワースペクトル例を図 6.2.9~図 6.2.10 に示す。

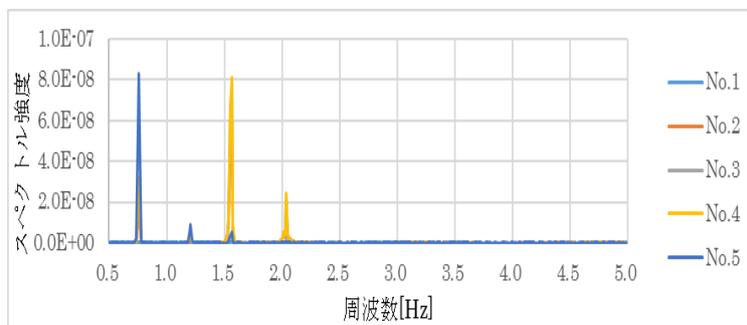


図 6.2.7 振動スペクトル(橋軸方向:計測 1)

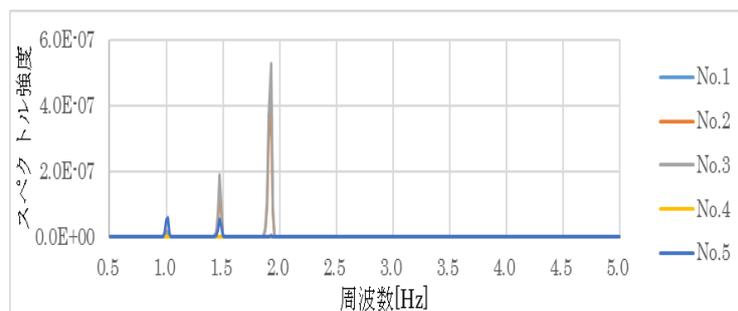


図 6.2.8 振動スペクトル(橋軸方向:計測 4)

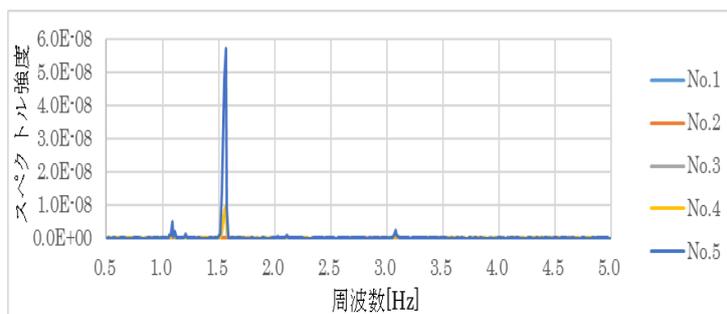


図 6.2.9 振動スペクトル(橋軸直角方向:計測 1)

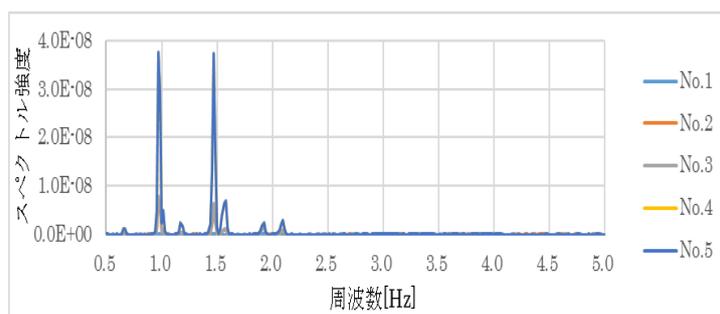


図 6.2.10 振動スペクトル(橋軸直角方向:計測 4)

得られたスペクトルの各ピークから読み取った固有振動数と、シミュレーションで得られた固有振動数とを比較し、一致したピーク周波数の一覧を表 6.2.3 に示す。同表モード次数欄で、黒字表記は全モードの周波数を昇順に計数した次数、赤字は橋軸方向の次数、青字表記は橋軸直角方向の次数を表す。また同表の固有振動数は、赤字は橋軸方向のスペクトル読み取り値、青字は橋軸直角方向のスペクトル読み取り値、黒字は橋軸方向・橋軸直角方向に共通した読み取り値を示し、太字は特にピーク強度が卓越しているものを表す。

表 6.2.3 パワースペクトルのピークから読み取った固有振動数一覧

モード 次数	固有振動数[Hz]						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
計測 1	-	0.76	1.09	-	1.56	2.04	-
計測 2	0.64	0.83	1.11	1.45	1.56	1.91	2.13
計測 3	0.66	0.83	1.14	1.44	-	1.88	-
計測 4	0.66	-	1.17	1.47	1.58	1.92	2.09

表 6.2.3 中の太枠は、計測 1 から計測 4 へ固有振動数が増加しており、コンクリートの充填補修によって剛性が増加し、補強効果を確認できたと考えられる。但し、今回得られた補強前後の固有振動数の変化は小さかったため、解析においては周波数分解能に留意する必要がある。

2) 振動モードの変化によるせん断抵抗力の評価

車両落下による強制振動時のデータを用いて、振動モードの変化を観測し、充填コンクリートによる補修効果の観測を行った。なお分析には、P3 橋脚の中間高さの貫通ひび割れが橋軸直角方向に生じ

ていることを考慮して、橋軸直角方向の計測値を用いた。

図 6.2.11、図 6.2.12 に、計測 1 と計測 4 の各工程における橋軸直角方向の変位振幅波形を示す。図中の変位は、観測された振幅の絶対値の最大値を 1 として正規化した。両図から、計測 4 の振幅は計測 1 と比較して減少し、振動が抑制されたことを確認できた。

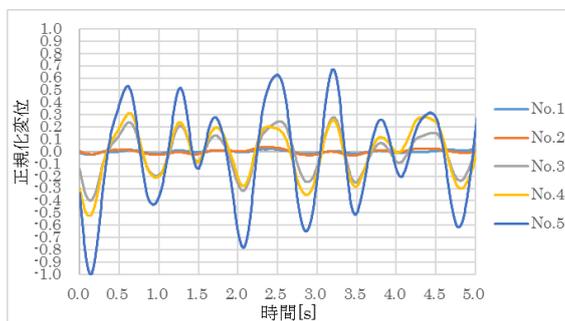


図 6.2.11 橋軸直角方向の変位信号(計測 1)

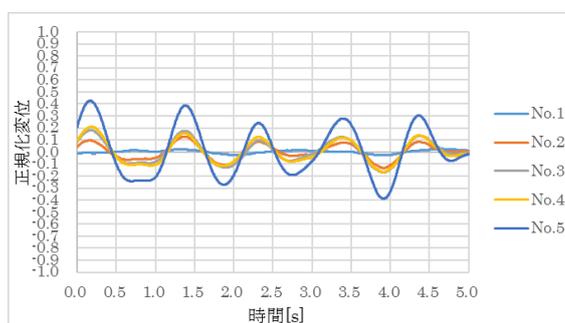


図 6.2.12 橋軸直角方向の変位信号(計測 4)

図 6.2.13、図 6.2.14 は、P3 橋脚の振動モード例である。

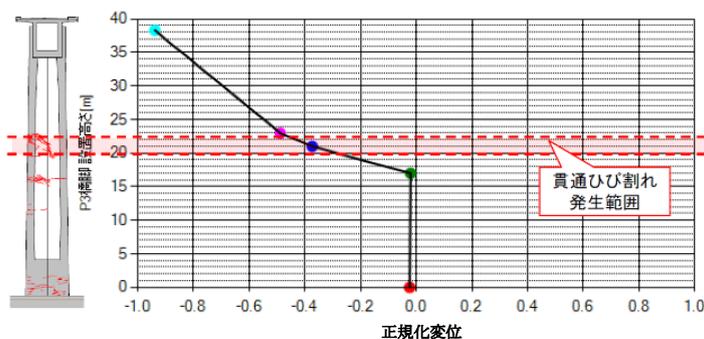


図 6.2.13 橋軸直角方向の振動モード例(計測 1)³⁾

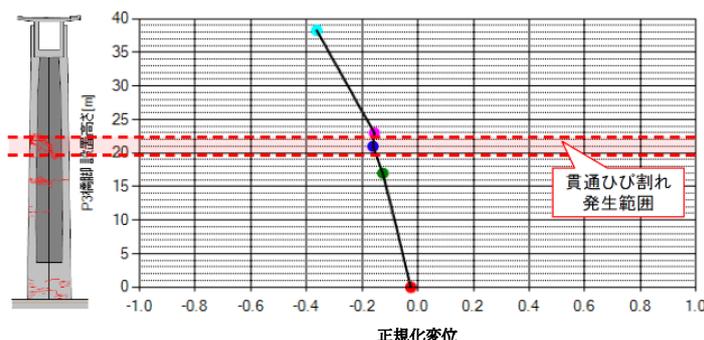


図 6.2.14 橋軸直角方向の振動モード例(計測 4)³⁾

図 6.2.13, 図 6.2.14 は, それぞれコンクリート充填補修前と補修後に測定された振動モードであり, 補修前では, 強制加振後に橋脚中間高さより下には変形がほとんど生じていないのに対し, 補修後では, 貫通ひび割れが生じた位置での変位の急増は見られず, 振動モードが明らかに変化している事を確認した。本結果より, コンクリートの充填による補修効果が確認できたと判断した。

(3) まとめ

加速度センサを用い, 車両を用いた強制加振により振動を計測し, 損傷した橋梁の補修効果を確認した。本事例での解析には強制振動の計測結果が必要であったが, 採用した加速度センサの性能や, 加振方法の違いにより, 実施できる解析手法はケースバイケースで異なる事も判るなどの留意点も確認できた。

(参考文献)

- 1) 澤田守・今村隆浩・中川量太・星隈順一：熊本地震で被災した PC ラーメン橋の復旧とモニタリングの活用, 土木技術資料 Vol. 60 No. 2 pp. 36-39, 2018
- 2) 星隈順一：熊本地震で被災した長陽大橋ルート, 1 年 4 ヶ月ぶりに開通～国総研・土研の高度な技術の総合力が早期復旧に貢献～, 土木技術資料 Vol. 59 No. 10 pp. 46-49, 2017
- 3) 国土技術政策総合研究所 熊本地震復旧対策研究室 HP：熊本地震からの創造的復興 阿蘇長陽大橋の復旧における技術的な工夫, p. 2, 2017 <http://www.nilim.go.jp/lab/pgg/pdf/panel3.pdf>

添付資料 1 : 用語集

用語	意味	類義語・関連語
位相角	時系列データをフーリエ変換することで得られる任意の起点（一般に $t=0$ ）からの振動数ごとの正弦波の遅れのこと。	
ウィンドウ処理	幅広いレンジの画素数を持った画像のある特定の濃度域のみを、表示系の濃度域に変換して表示する処理。	
S/N 比	信号とノイズの比率のこと。	
FFT(高速フーリエ変換, Fast Fourier Transform)	離散フーリエ変換を計算機上で高速に計算するアルゴリズム。	FFT (高速フーリエ変換, Fast Fourier Transform)
LSB	最下位ビットのこと。1 ビットが表す物理量で、これより小さい物理量を表すことはできない。	分解能
LPWA	低消費電力で長距離のデータ通信を行える無線通信技術のこと。	
音響測深	音波を発信し、河床からの反射を受信し、その間の時間を測定することで深さを測る手法のこと。	
回転翼機	回転するプロペラ状の翼（回転翼）によって、上空を飛行する際に必要な揚力や推力を得る航空機のこと。ヘリコプターやジャイロコプター等。	固定翼機
河床	河川の底の地盤のこと。	
キャパシタ	電荷を蓄えたり、放出したりする素子のこと。	コンデンサ
キャリブレーション	測定対象の値（真値）と測定対象の装置による測定値を比較して正しい値になるよう調整すること。	
下部構造	上部構造からの荷重を基礎地盤に伝える構造部分のこと。橋脚、橋台およびそれらの基礎。	下部工
公共測量作業規程	国土交通省が測量計画機関となり実施する公共測量の標準的な作業方法等を定めたもの。	作業規程の準則
コース間重複率	ある飛行コースで計測された帯状のデータと、そのコースに隣接するコースで計測された帯状のデータとの重複（ラップ）率のこと。コース毎のデータを重複	サイドラップ率

	(ラップ) させて計測することで、計測漏れを防止する。	
固定翼機	上空を飛行する際に、主翼が機体に固定されて、機体の前進により揚力を得る航空機のこと。	回転翼機
固有振動数	構造物（橋脚）の持つ固有の値のこと。構造物は、固有振動数と同じ振動の外力にたいして揺れやすい。対象とする振動系が自由振動を行う際の振動数。	固有周波数
固有振動モード	固有振動数で振動している物体における振動の現れ方のことで、振動振幅の節と腹の位置の分布が、その物体固有の状態を表す。	
固有値解析	対象とする構造が持っている固有振動数を求める解析手法。	
サンプリング周波数	単位時間（一般には1秒間）あたりに取得するデータ点数のこと。	サンプリングレート
重錘	錘のこと。衝撃振動試験では、損傷防止のために表面をゴムで被覆した鉄球を用いる。	
周波数特性	周波数と時系列データとの関係を表したもののこと。振動計測では、周波数レンジでの周波数特性が平坦なセンサを用いる必要がある。	
周波数分析	波形を分解し、周波数スペクトルで表したものの。	
衝撃振動試験	重錘などにより構造物に直接打撃力を与えて、構造物の固有振動数を測定し、基礎的な諸元を得たり健全性を判定することができる非破壊検査法。	
常時微動	常に動いている地面のわずかな揺れ。	
上部構造	橋台、橋脚に支持される橋桁その他の構造部分のこと。	上部工
振動数	単位時間（一般に1秒間）あたりの振動回数のこと。	
振動モード	構造物が振動するときの形態のこと。構造物がどのように振動しているかを表す。	
スキャン回数	1秒間あたりにレーザスキャナが走査する回数。	スキャンレート（SR: Scan/Rate） スキャン頻度

スキャン角度	鉛直又は斜め方向に対するレーザスキャナの走査角度。 この角度により、計測されるデータの幅が決まる。	Field Of View(FOV) レーザ照射角度
スタティック法	GNSS 観測（GNSS 衛星のみでの基準点測量）の1つ。 GNSS 測量機を使い、最低 60 分以上の観測時間が必要となる。	
スペクトル解析	時系列データから振動数ごとの強さを求める解析手法のこと。一般にフーリエ変換を求めることを指す。フーリエ変換は、時系列データから、振動数ごとの正弦波振動の強さを求める。	フーリエ変換 フーリエスペクトル
洗掘	流水や波浪により河岸、海岸または河床や海底の土砂が洗い流されること。第7編では特に橋梁の下部構造の周りの土が削り取られる現象を指す。	
対地高度	航空機が飛行する場所の地面からの高度のこと。標高とは異なる。	標高
対地速度	地面に対する物体の速度のこと。飛行機の一般的に計測される対気速度とは異なる。	対気速度
卓越振動数	特に大きい（卓越した）振動振幅をもつ正弦波の振動数のこと。	卓越周波数
単点観測法	GNSS 観測（GNSS 衛星のみでの基準点測量）の1つ。 ネットワーク型 RTK 法により、10 秒程度の観測時間が必要となる。	
定期縦横断測量	河川において、基準となる測線上で定期的を実施する地形測量。得られた成果は、河道計画の立案や維持管理等、様々な目的で利用される。	
天端	構造物の一番高い部分のこと。	
土被り量	土の厚さのこと。基礎底面または上面から地盤面までの距離。	
バイナリデータ	文字以外を含んだ2進数で表現されたデータ形式。 一般的には、文字だけで構成されるデータ形式をテキスト形式と呼び、それ以外をバイナリ形式と呼ぶ。	
パルスレート	1 秒間に照射されるレーザの照射数。一般に、パルスレートが高いほど、高精細に地形・地物を計測できる。	(PR:Pulse/Rate)
パワースペクトル	フーリエスペクトル振幅を2乗した値のこと。各振動数における振動のパワー（振幅の2乗平均値）を表している。	

フィルタリング 処理	不要な情報を信号から除去する処理のこと。	
フーチング	基礎の一部で、橋脚を支持し、荷重を基礎地盤に伝える版状の構造部材のこと。	
フーリエスペク トル	時間信号をフーリエ変換した結果を周波数の関数として表したもの。	
フーリエスペク トル振幅	振動数ごとの正弦波振動の振幅の値のこと。時系列データをフーリエ変換することによって得られる。	
不動点	変位の計測で用いる基準点で、変位が生じないと考えられる場所に設ける。	
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems 機械要素部品、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料などの上に微細加工技術によって集積化したデバイス。	
溶存有機物	液体試料をフィルタでろ過した際に、ろ液に含まれる微小な有機物のこと。	DOM(Dissolved Organic Matter) CDOM (有色溶存有機物 : Colored Dissolved Organic Matter)
4級基準点測量	既知点（既に位置座標が分かっている点）から、新点である基準点の位置を決める基準点測量の1つ。基準点測量は、使用する既知点の種類等により1級～4級に区分される。	
ランダムノイズ	周波数や振幅が不規則な信号。	
レーザクラス	レーザによる人的な障害等を発生することを防止するため、日本工業規格が定めている「レーザ製品の安全基準」JIS C6802 クラス1～クラス4までに分けられ、クラスの数値が高いほど、レーザの危険度は高くなる。	レーザクラス分類
レベル2地震動	橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動のこと。	

第 8 編 のり面・斜面の安定性評価のモニタリング

1 章	のり面・斜面の安定性評価モニタリングの位置づけと種類	8-1
1.1	モニタリングの位置づけ	8-1
1.1.1	本ガイドラインで対象とするのり面・斜面の土砂災害現象と道路土工構造物	8-1
1.1.2	のり面・斜面の点検の現状と課題	8-2
1.1.3	モニタリング斜面の定性的スクリーニング	8-3
1.1.4	モニタリングの位置づけと適用シーン	8-4
1.2	モニタリングの種類と役割	8-6
1.2.1	モニタリング手法の概要及び点検業務との関係	8-6
1.2.2	類似技術の相違点と適用場面の違い	8-8
1.3	費用の目安	8-11
2 章	傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリングシステム	8-14
2.1	技術の概要	8-14
2.1.1	目的	8-14
2.1.2	傾斜センサと無線ネットワークによるモニタリング手法	8-14
2.1.3	点検業務サイクルにおけるモニタリング技術の適用場面	8-16
2.2	モニタリングの方法	8-18
2.2.1	モニタリングの手順	8-18
2.2.2	計画	8-18
2.2.3	設置	8-19
2.2.4	初期設定	8-21
2.2.5	管理項目	8-22
2.2.6	モニタリング	8-22
2.2.7	計測データの解析と評価	8-23
2.2.8	警報発信	8-25
2.2.9	メンテナンス	8-25
3 章	多点傾斜変位と土壌水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング	8-27
3.1	技術の概要	8-27
3.1.1	目的	8-27
3.1.2	システムの概要	8-27
3.1.3	点検業務サイクルにおけるモニタリング技術の適用場面	8-29
3.2	モニタリングの方法	8-30
3.2.1	モニタリングの手順	8-30
3.2.2	計画	8-30
3.2.3	機器の配置と設置	8-31
3.2.4	斜面危険度の評価手法と管理基準値の設定	8-31

3.2.5	早期警報についての基本的な考え方	8-33
3.2.6	計測データの解析および斜面崩壊リスクの評価整理方法.....	8-34
4 章	次世代衛星測位システムによるのり面・斜面の安定性評価モニタリング.....	8-35
4.1	技術の概要.....	8-35
4.1.1	目的.....	8-35
4.1.2	次世代衛星測位システムの概要	8-35
4.1.3	点検業務サイクルにおけるモニタリング技術の適用場面.....	8-39
4.2	モニタリングの方法	8-40
4.2.1	モニタリングの手順.....	8-40
4.2.2	配置計画.....	8-40
4.2.3	機器の設置	8-41
4.2.4	作動確認.....	8-42
4.2.5	閲覧画面の設定や作成.....	8-42
4.2.6	モニタリング	8-42
4.2.7	計測結果の評価.....	8-42
4.2.8	計測結果の閲覧.....	8-43
4.2.9	警報.....	8-43
4.2.10	機器のメンテナンス.....	8-44
4.3	計測結果の評価事例	8-44
5 章	マルチ GNSS によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング.....	8-46
5.1	技術の概要.....	8-46
5.1.1	目的.....	8-46
5.1.2	マルチ GNSS によるモニタリング手法の概要	8-46
5.1.3	点検業務サイクルにおけるマルチ GNSS によるモニタリング技術の適用範囲.....	8-49
5.2	マルチ GNSS モニタリングの方法	8-50
5.2.1	マルチ GNSS モニタリングの手順.....	8-50
5.2.2	計画.....	8-50
5.2.3	基準点, 観測点の選点.....	8-51
5.2.4	機器の設置	8-54
5.2.5	初期値設定	8-54
5.2.6	管理基準値の設定	8-55
5.2.7	モニタリング	8-55
5.2.8	変位量/変位速度の把握	8-56
5.2.9	警報の発信	8-56
5.2.10	機器等の保守.....	8-56
5.3	計測結果の評価.....	8-57

6章	落石危険度振動調査法による岩塊の常時モニタリング	8-59
6.1	技術の概要.....	8-59
6.1.1	目的.....	8-59
6.1.2	システムの概要.....	8-59
6.1.3	点検業務サイクルにおける岩塊の常時モニタリングの適用場面.....	8-62
6.2	モニタリングの手法.....	8-63
6.2.1	モニタリングの手順.....	8-63
6.2.2	振動計の設置.....	8-63
6.2.3	計測・データの取得.....	8-64
6.2.4	振動データの分析処理.....	8-64
6.2.5	データの分析結果の評価.....	8-64
7章	のり面・斜面の安定性評価モニタリングの実施事例	8-67
7.1	落石危険度振動調査法による岩塊の常時モニタリング.....	8-68
7.2	傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリングシステム.....	8-72
7.3	次世代衛星測位システムによるのり面の安定性モニタリング.....	8-76
7.4	マルチ GNSS による自然斜面の安定性評価モニタリング.....	8-80
7.5	多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による道路のり面の安定性評価モニタリング.....	8-82
7.6	多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による自然斜面の安定性評価モニタリング.....	8-84
添付資料 1：用語集		8-86
添付資料 2：斜面土砂災害分類と発生メカニズム		8-91

1章 のり面・斜面の安定性評価モニタリングの位置づけと種類

1.1 モニタリングの位置づけ

1.1.1 本ガイドラインで対象とするのり面・斜面の土砂災害現象と道路土工構造物

図 1.1.1 に、のり面・斜面で発生する主な土砂災害現象を示す。本ガイドラインでは、この中の比較的小規模で急速な斜面変状である「崩壊」、大規模で緩速な「地すべり」、および「落石」の3現象を対象とする。土石流は、現時点では発生予測や健全性評価が困難であるため対象外とする。モニタリングの適用性や設置方法等を検討する場合、これら斜面災害現象の地盤工学的なメカニズムや特徴を理解しておくことが重要ではあるが、紙面の関係から詳細は本編末尾に掲載した添付資料2に譲っているので、参照されたい。図 1.1.2 に、本ガイドラインで対象とするのり面・斜面の道路土工構造物の代表例を示す（参考文献¹⁾を一部修正）。切土のり面、盛土のり面の他、これら人工のり面の崩壊に影響を及ぼす可能性のある近接する自然斜面も対象となる。なお、図中に書かれているのり面保護施設（吹付け、のり枠、擁壁、補強土、グラウンドアンカー等）は道路土工構造物点検要領²⁾の対象とされているが、本ガイドラインで取り扱うモニタリング技術が原理的に土塊や岩塊の変形挙動を検知するものであることから、計器の測定精度等を勘案し、現時点では対象外とした。ただし、例えば擁壁など斜面変状と同等の変状量を示す土工構造物に対してはモニタリング技術の適用が可能と考えられ、今後の研究成果に期待したい。

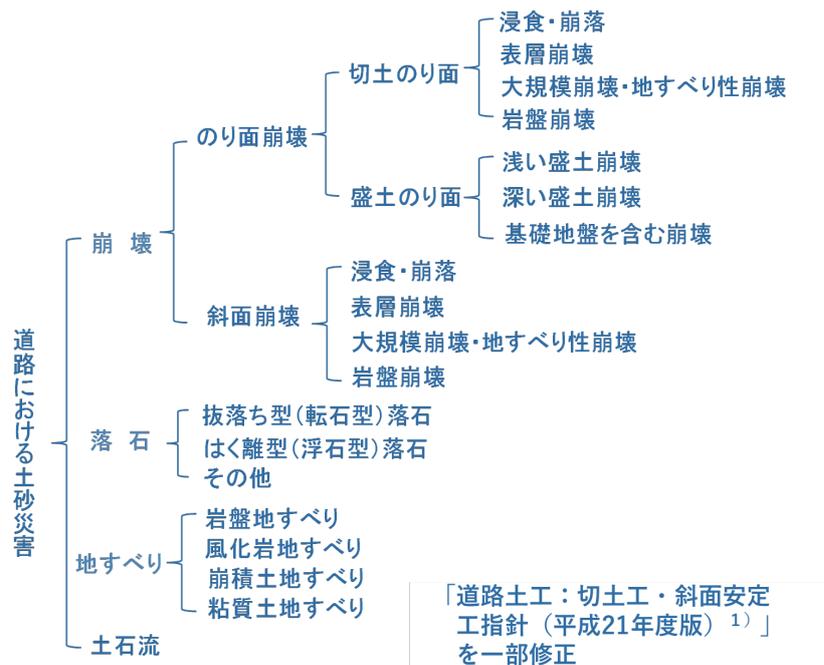


図 1.1.1 道路土工構造物における斜面土砂災害の分類例

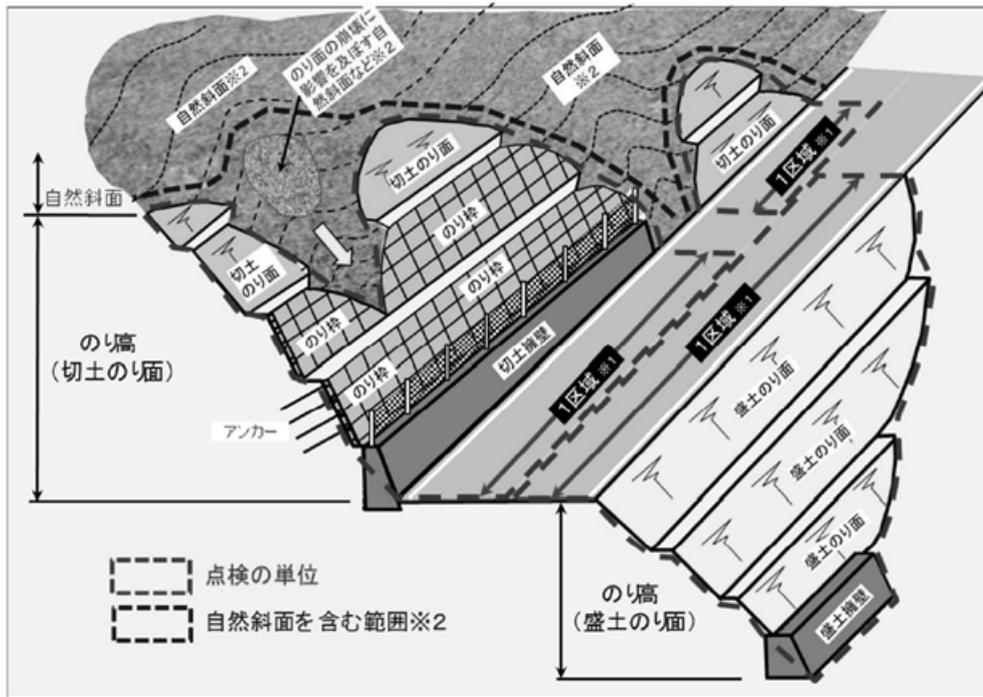


図 1.1.2 対象とするのり面・斜面の道路土工構造物（道路土工構造物点検要領²⁾より抜粋）。

1.1.2 のり面・斜面の点検の現状と課題

のり面・斜面のモニタリングは、インフラ維持管理の「点検⇒診断⇒措置（補修・補強）⇒記録」の基本サイクルをサポート（補助・補完・省力化・効率化・診断や意思決定の高度化等）するために用いられる。モニタリングの位置づけを明確にする目的で、道路土工構造物の点検の流れの現状を図 1.1.3 に例示した。道路におけるのり面・斜面の点検は、昭和 40 年代から道路防災点検（1 回/5 年～1 回/10 年）に基づき実施されてきた。落石・崩壊、岩盤崩壊、地すべり、雪崩、土石流、盛土、擁壁、橋梁基礎の洗堀を対象として巡回目視点検を実施し、対策不要・防災カルテ³⁾を作成して定期監視・要対策の三分類を行い、記録している。平成 29 年 8 月には道路土工構造物点検要領²⁾が施行され、特定道路土工構造物（ $H \geq 15\text{m}$ の切土斜面、及び $H \geq 10\text{m}$ の盛土斜面）に対しては、新たに斜面の健全性に対する診断（斜面の安定性に対する工学的評価）が求められることとなった。

具体的な点検体系は道路維持管理者や都道府県毎に異なるが、一般的には日常点検、定期点検、災害時の臨時点検から構成される。NEXCO 及び幾つかの都道府県道路管理担当者へのヒアリングにより、上記のり面・斜面点検業務の現状における主な課題を調査した。これらは以下のようにまとめられる。

- ① 対象となる斜面の数が膨大で、巡回目視による点検には多大な労力とコストを要している（点検コストと労力）。
- ② 長大のり面の最上段部や降雪期を跨ぐ点検などでは、人間による巡回目視点検自体が非常に困難となる（点検困難箇所の存在）。
- ③ 目視点検のやり方が属人的で、点検箇所、点検数、頻度、評価の仕方等に一定の基準がない（点検技術の統一性と客観性の不足）。
- ④ 道路防災点検は道路本線の安全性への影響の観点から点検を行うもので、斜面の健全度や長期耐久性に基づく診断とはなっていない（斜面土砂災害のメカニズムに対する観点の不足）。このた

め、斜面災害の重症化を防ぐ予防保全対策をすることや、措置の優先順位付けを行うこと、災害の前兆現象が認められた際に斜面の危険性を定量的に把握、監視することなどが難しい。なお、特定土工構造物では今後、健全性の診断（判定区分Ⅰ～Ⅳ）が要求されることとなっており、これへの対応も早急に求められる。

- ⑤ 斜面土砂災害メカニズムを地盤工学的に把握する、という観点の不足は、同時に豪雨や地震時などの緊急時の判断（通行継続、通行止め、通行再開など）を定量的に行うことを困難にしている（業務継続の難しさ）。
- ⑥ 同じく、緊急対策時における様々な判断（工事中の斜面の安全性確認、補強補修効果の確認、これに伴う通行止め解除の判断など）にも明確な工学的基準を設けることができない。

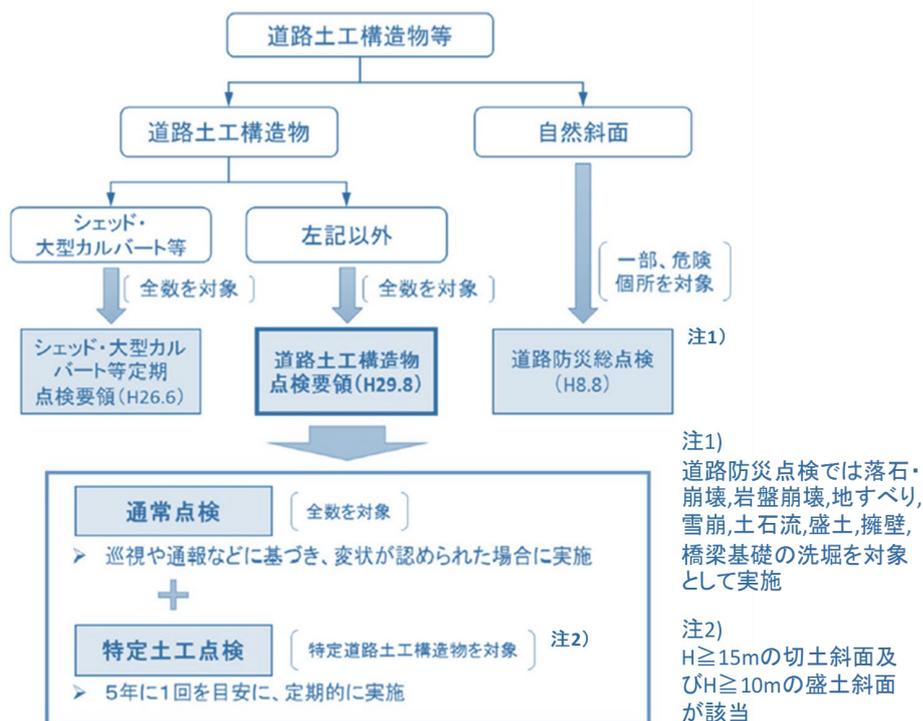


図 1.1.3 道路土工構造物の現状の点検の流れ（例）（道路土工構造物点検要領²⁾）

1.1.3 モニタリング斜面の定性的スクリーニング

のり面・斜面のモニタリングにおいては、モニタリングの検討の前段階において、対象となる斜面の数が膨大で、巡回目視による点検に多大な労力とコストを要する、という課題が存在する。そのため実務上は、点検を行うべき斜面を事前にある程度特定、抽出し、対象数を絞るための定性的なスクリーニングを行うことができれば非常に有用である。現状で想定される手法としては、以下のようなものが考えられる。なお、手法の詳細については参考文献⁴⁾を参照されたい。

- ① 潜在リスクの評価による優先度抽出。
- ② 道路防災点検の判定結果（安定度調査表）を利用し、地質、地形、構造物の形状・規模等により被災可能性が高い斜面を抽出。
- ③ 顕在リスクの評価による優先度抽出。
- ④ のり面保護・排水施設等の機能低下、既設対策工の効果や被災の履歴等からリスクが顕在化している斜面を抽出（道路防災点検カルテを利用）。
- ⑤ 道路の重要性や点検の難易度による優先度抽出。

- ⑥ 防災指定道路・緊急輸送道路・代替ルート不可な道路等を優先抽出し、さらに点検工数の大小（長大切土のり面、降雪や大雨時の点検困難箇所の有無）などから点検の難易度を評価。

上記①～⑥の組み合わせにより、点検を最優先すべき斜面を抽出する。

参考文献⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾には、高速道路において生じた過去の斜面土砂災害の主な発生要因や発生条件が示されている。災害発生条件の主なポイントを以下にまとめておいたので、前述の手法に併せ、点検対象斜面の絞り込みに際して参照願いたい。

- ① 斜面災害は降雨によりもたらされることが多いが、斜面の小規模崩壊は降雨の時間強度が、大規模崩壊は累積雨量が支配的である。
- ② 斜面災害は土工構造物の完成後、5年以内に発生することが多い。
- ③ 道路延長あたりの斜面被災件数は、統計的に切土斜面が盛土斜面の2倍程度となっている。これまでの災害2360件の47%は切土、同じく47%を盛土が占める。自然斜面は3%であるが、被災土量が膨大となる。切土斜面災害は延長10kmにつき2件、盛土は10kmにつき1件の頻度で発生している。
- ④ 切土災害は90%が表層の土砂流出で、そのほとんどが深さ1m以内で発生し、最大でも3m以内で生じていることが多い。盛土斜面は材料（まさ、シラス、泥岩等）と地形（集水、腹付けなど）が組み合わさった条件で発生していることが多い。
- ⑤ 切土災害は本線交通への影響が大きく全体の20%が問題をきたしている。また、切土・盛土斜面の被災事例の約50%は排水構造物が関与している。

1.1.4 モニタリングの位置づけと適用シーン

前項で述べたのり面・斜面点検の現状の課題を解消することが、モニタリングの役割となる。表1.1.1にはNEXCOおよび複数の都道府県道路管理担当者へのヒアリング結果に基づき、モニタリングが果たしうる役割や目的（=モニタリングへの期待）を一覧に取りまとめた。表中には、管理者の目的、維持管理ニーズ別にモニタリングの目的を示し、さらに対象ユーザとして想定される道路管理者（国・NEXCO・区市町村道路管理者）を示している。点検の補助、診断の補助、補修・補強の効果確認、緊急時の対応の4つの区分のそれぞれに、モニタリングの果たす役割が幾つか想定される。

のり面・斜面の土砂災害は、豪雨時や地震時、あるいはそれらが複合した際に頻発するため、ヒアリングした区市町村担当者からは、緊急時の判断（通行継続・通行止め・解除等）への適用がモニタリングの適用シーンとして最も可能性が高いものと指摘された。また、特定土工構造物（ $H \geq 15\text{m}$ の切土、 $H \geq 10\text{m}$ の盛土）保有率の高い国やNEXCOでは、その重要性や本線への影響度、社会的インパクトの高さ等から、予防保全、斜面健全度の工学的評価、災害前兆現象発見時の監視など、診断の補助、高度化への寄与度も高いとの意見が寄せられている。

表1.1.2には、これを踏まえ、モニタリングの導入シナリオ例を幾つか挙げてみた。これらは現時点で実現性が高いと思われるものであり、今後、実現場への適用が始まった際には変更や追加がなされるべきものであるが、これによりモニタリング導入のイメージを持って頂ければ幸いである。

表 1.1.1 モニタリングの位置づけ一覧

区分	管理者の目的	維持管理ニーズ	モニタリングの目的	想定する主たる対象管理者
① 点検の補助	道路防災点検間の変状の見逃しを低減	高度化（精度向上, 訴訟リスク低減）	道路防災点検間（5～10年）の予期せぬ斜面災害を防ぐ(危険度が高まっている斜面で対策まで時間がある場合などに限定)	国・NEXCO主体
	日常・定期点検の頻度を低減する	効率化（点検費用の低減）	日常・定期点検の頻度を減らし点検外注費を低減する	国・NEXCO限定
	点検の労力（費用）を低減	点検の省力化	長大切土や降雪期の点検を代替（近接が難しく、かつ要対策である場合などに限定）	国・NEXCO・県・市町村
② 診断の補助	予防保全対策実施により斜面災害の重症化を防ぐ	診断の高度化（予防保全）	重要度・影響度の高い（対策コストの大きい）斜面で、「カルテ点検の度に状況が変化して重要対策となっている」判定の斜面での予防保全（二次クリーブ状態で設置）	国・NEXCO限定
	措置の優先順位付けを行う	診断の高度化・効率化	変状判定区分の精度向上（「措置が必要」グループの中で対策の優先度を定める。対策したほうが安い場合は不可）	国・NEXCO・県
	斜面健全度の工学的定量評価	診断の高度化	安定度評価の属人化を排除し,工学的メカニズムに基づく斜面の健全度評価の情報を提供	国・NEXCOの特定道路土構造物限定
	供用状態を維持する	診断の効率化	詳細調査までの間の経過観察と監視	国・NEXCO・県
	災害前兆現象発見時の監視	診断の高度化（危険性の監視）	地すべりや崩壊の前兆現象が発見された斜面の危険性の監視	国・NEXCO・県
③ 補修・補強の効果確認	対策の妥当性を確認する	高度化	対策工の効果を確認し,通行止め解除の判断材料を提供する	国・NEXCO限定
④ 緊急時の対応	通行止めの継続・解除の判断	高度化・効率化	応急対策（異常時・災害時）までの間の経過観察と監視および通行止めや解除の判断材料を提供	国・NEXCO・県のみならず,市町村も含む
	通行継続の判断		地すべり兆候下（無対策）での通行止めの判断材料を提供	国・NEXCO・県

表 1.1.2 モニタリングの適用シーン（導入シナリオ）

	想定シーン	モニタリングの目的
シナリオ1	要対策斜面で、長大切土や降雪期などアクセス困難な箇所を目視点検の代替として設置	点検の補助（目視・アクセス困難箇所の点検精度確保）
シナリオ2	防災カルテで「措置が必要」な斜面群の中で優先順位を定量的に判断するために設置	診断の補助（措置の優先順位付け）
シナリオ3	特定道路土工構造物で健全度（Ⅰ～Ⅳ）を定量評価する、あるいは点検結果が変化している状況下で健全度の変化を監視するために設置	診断の高度化（特定土工構造物の安定性評価）
シナリオ4	大規模地すべりなどの前兆現象が発見され継続的監視が必要な場合に、対策工完了までの監視や通行制限解除の判断、あるいは監視に基づき通行を許容する場合（対策工の実施困難な場合）の判断を行うために設置	診断の高度化（危険性の監視）
シナリオ5	災害が発生した斜面の通行安全性、通行制限、対策工の安全等の監視	緊急時（災害時）の対応
シナリオ6	補修・補強工事中の通行安全確認、補修補強効果確認および通行止め解除の判断	補修・補強効果の確認

1.2 モニタリングの種類と役割

1.2.1 モニタリング手法の概要及び点検業務との関係

本ガイドラインで紹介する5つのモニタリング手法の概要を表1.2.1に取りまとめた。なお、本ガイドラインで紹介する技術は、内閣府の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業で取り上げられた新技術に限定している。その他の既往技術に関しては紙面の関係から割愛するが、例えば、道路土工-切土工・斜面安定工指針¹⁾、参考文献⁸⁾、地盤工学ハンドブック⁹⁾などを参照されたい。

表中には、傾斜センサ、衛星測位、落石センサの3つのグループ毎に、各モニタリング技術の測定項目と使用するセンサ、対象とする土工構造物や土砂災害現象、モニタリングの役割、既存手法に対する優位性を取りまとめた。本ガイドラインでは、崩壊、地すべり、落石の3現象を取り扱うが、傾斜センサと衛星測位が崩壊および地すべりを、落石センサが落石を対象としている。ここで留意すべき点として、傾斜センサは崩壊を、衛星測位は地すべりを主な対象として開発された経緯があり、前者は比較的小規模で表層付近の急速なすべりを、後者は大規模かつ深部まで及ぶ緩速なすべりの検知を得意とする傾向にある。一方、近年の技術開発の進展に伴い、その適用領域はお互いにクロスし、地すべり性崩壊のような中間的な現象を共に扱える状況にある。

これら新しいモニタリング技術は、当然、従来ののり面・斜面点検のサイクルや既存の計測モニタリング（いわゆる動態観測）の業務の流れの中で、それをサポート（補助・補完・省力化・効率化・診断や意思決定の高度化等）するために導入される。図1.2.1は、表1.2.1に示した各モニタリング技術が使われるであろう適用シーンを、具体的な点検業務のフロー（道路防災点検の事例）の中で共通的に描いたものである。点検業務の中で、「目視点検困難」「変位箇所が不明瞭」「対策の優先度判定が必要」「災害発生時の施工安全確認」「通行規制解除の判断」「対策工の効果確認」といった条件や要望が生じた場合に、他手法（既存の動態観測含む）との比較検討（導入効果とコストの最適性検討）を行ったうえで、モニタリング手法が優位と判断された場合に、これら新技術が採用される。2章以降では、各モニタリング技術が現在の点検業務サイクルの中のどこで、どう使われるのかを具体的に明示するように心がけた。のり面・斜面に関しては、「動態観測」という名称で既存のモニタリング技術が存在する。モニタリング技術の適用を検討するに際しては、以下に示すような新技術のメリットを十分に勘案し、それが活かされる現場条件であるか否かの判断が重要となる。

目視点検や既存動態観測に対するモニタリング技術の優位性は各技術で異なるが、本ガイドラインで紹介する5技術に関して、そのメリットを総括的にまとめると、以下のようになる。

- ① 現地点検が困難な条件（遠隔、厳冬期、高所、夜間、荒天時等）での計測が可能。
- ② 現地の状況を遠隔かつリアルタイムに把握可能。
- ③ 定点観測により継続的な現象把握が可能（個別斜面の変状データの蓄積も可能）。
- ④ 工学的な閾値を基に斜面安定性の定量的な把握・予測が可能。
- ⑤ 斜面の変状を面的に捉えることができ、かつ変状範囲が不明確な場合でも対応可能。
- ⑥ 安価で簡易な計測装置を利用でき、煩雑かつ頻繁なメンテナンス作業が不要。
- ⑦ 各技術の開発者が計測計画、機器配置、計測結果の評価、ICT技術による可視化や警報システム等のノウハウと豊富な使用実績を有しており、ユーザ側に高度な専門的知識がなくても使用可能。

モニタリング技術の採用は、これらに加え、モニタリングにより得られる情報の有効性、経済性等を勘案して決定されるべきものであることは論を待たない。そのため、各章では技術の概要に加え、モニ

タリング結果の使い方（結果の評価法）を示すこととした。また次節にて、3つのグループ毎にモニタリング費用の目安を概算的に示している。結果の評価手法に関しては、道路土工：切土工・斜面安定工指針¹⁾等に示された閾値に準拠しているが、これらは現時点では、実現場の現象を100%予測できるものではない。あくまで参考値とお考えいただき、評価結果の採用に際しては、道路管理者がその責任を負うものとする。費用に関しても、適用シーンや規模によって変動するため、ある想定された条件での概略コストの幅を提示するにとどめざるを得なかった。詳細なコストに関しては案件毎の照査が必要であることに留意されたい。

表 1.2.1 本篇で紹介するモニタリング手法の概要

モニタリング技術の名称	使用センサと測定項目	対象部位	対象とする主たる斜面災害	主たるモニタリングの役割	従来手法（目視点検・動態観測）に対する優位性
傾斜センサによる斜面の安定性評価モニタリング(2章,3章)	①MEMS傾斜計による斜面表層の傾斜角測定 ②土壌水分計による土壌水分の測定	①切土部 ②盛土部 ③自然斜面部	①斜面崩壊（自然斜面） ②表層崩壊 ③地すべり性崩壊 ④切土,盛土崩壊 ⑤落石	①斜面崩壊前の予兆現象把握 ②斜面変状の見逃し防止 ③斜面変状規模の面的把握 ④個別斜面の変状履歴の蓄積 ⑤不安定岩塊の挙動監視（災害復旧対策時）	①安価で簡単な設置 ②ユーザ側に高度な専門的知識は不要 ③多点計測により斜面変状規模を面的に把握 ④変状範囲が曖昧な場合も適用可 ⑤工学的閾値による斜面の定量的安定性評価
衛星測位による斜面の安定性評価モニタリング（4章,5章）	①GNSSの信号電波の搬送波を利用した干渉測位 ②測位方法はStaticやRTKで誤差評価システムにより計測値算出 ③GNSSセンサー（GNSS電波を受信するアンテナと信号を復号する受信機よりなる）	①切土部 ②盛土部 ③自然斜面部	①斜面崩壊（自然斜面） ②切土,盛土崩壊 ③地すべり ④すべり性崩壊,深層崩壊 ⑤すべり性盛土崩壊	①立入困難箇所のモニタリング ②対象となる変位の詳細（変位量,速度,ベクトル,これらの変化） ③不明瞭な変位の確認	①三次元計測により,変位ベクトルを明瞭に判別 ②夜間、荒天時でも計測可能 ③メンテナンスの負担が少ない ④大変位でも盛り替え不要
振動調査法および傾斜センサによる浮石・落石安定性評価モニタリング（6章）	振動計（速度型タイプ）	落石の可能性のある不安定岩塊(転石・浮石)	落石災害	不安定岩塊の安定度評価	落石の可能性のある転石・浮石に対し,継続的かつ定量的な安定度の評価が可能

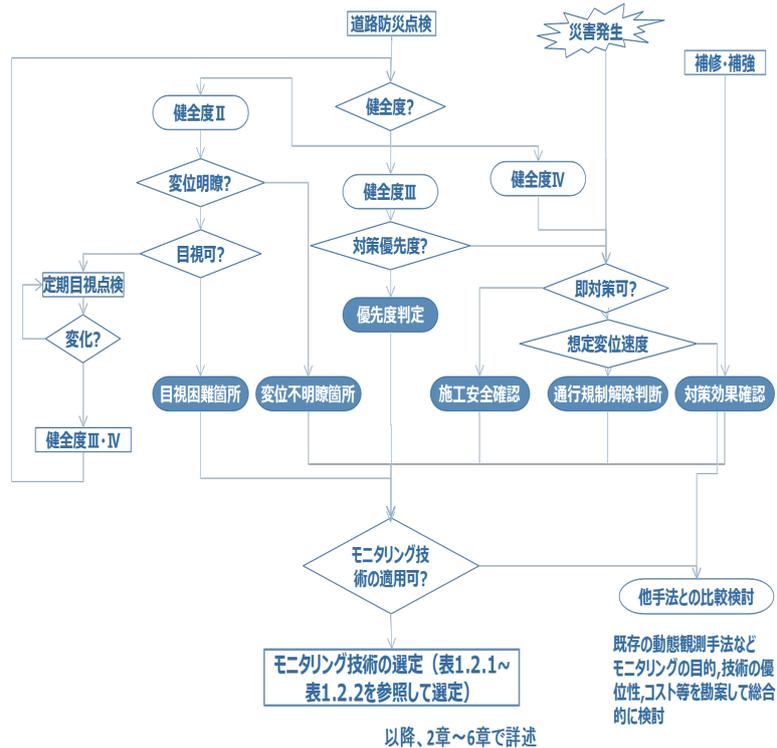


図 1.2.1 のり面・斜面点検業務フローとモニタリング導入の関係（道路防災点検⁴⁾の例）

1.2.2 類似技術の相違点と適用場面の違い

表 1.2.1 では新しいモニタリング手法の役割と優位性を概観する目的で、傾斜センサ及び衛星測位による安定性評価モニタリング手法を一括して取りまとめた。一方、2章～5章で個別に記載するように、本ガイドラインで紹介する技術は、傾斜センサ、衛星測位の各々で類似した2技術が存在している。ここでは、それらの相違点と適用場面の違いについて述べておく。

表 1.2.2 に類似2技術の違いを整理した。傾斜センサの2技術は共にMEMS傾斜センサを用いてお

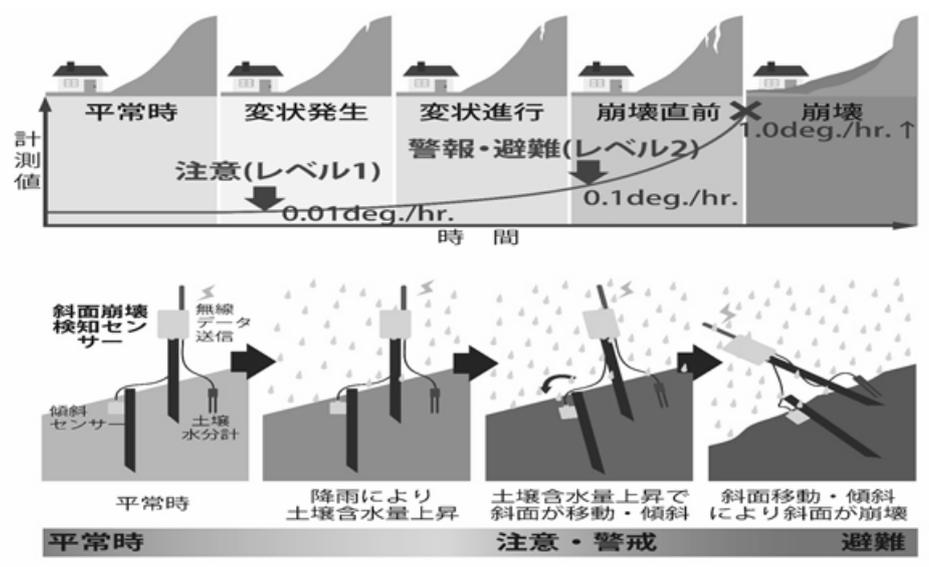
り、モニタリング結果の評価も含めて原理的な違いはない。ただし、3章で紹介する「多点傾斜変位と土壌水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング」では、傾斜センサに加えて土壌水分計がオプションとして準備されている。のり面斜面の崩壊は豪雨時に多くが発生し、そのメカニズムは降雨浸透に伴う土中水分の増加、土塊湿潤重量（ドライビングフォース）の増加と飽和度上昇に伴う地盤強度の低下の複合現象である。従って、土中水分を直接監視することで斜面の不安定化をより精緻に捉えることが可能となる。土壌水分量の監視は、現時点では必須のモニタリングとはなっていないが、今後特定道路土工構造物のような大規模かつ重要度の高い斜面に対して工学的なメカニズムに基づく安定性評価（健全度診断）が義務付けられることになっており、そのためのモニタリング技術として期待される。また特定土工構造物でなくとも、重要度が高い、対策コストが大、長期に渡ってモニタリングを行う必要がある場合等では、この土中水分計を傾斜センサと併用することで評価精度の向上を図ることが可能となる。

衛星測位を用いたモニタリング技術に関しても、次世代衛星測位システム（4章）とマルチGNSS（5章）の2技術を紹介している。表1.2.2に示すように、2技術は衛星測位の計測原理がRTKとStaticで異なっている。RTKはリアルタイム性が高いが測定精度は相対的に低く、逆にStaticは測定精度が高いがリアルタイム計測が難しいという特徴を有する。よって、Staticを原理とするマルチGNSSは地盤の変状量が小さく（計測精度を要する）変状速度の遅い（リアルタイム性を要さない）斜面変状の初期、すなわち地盤の一次～二次クリープ状態のモニタリングに適する。逆にRTKを原理とする次世代衛星測位システムは、地盤の変状量が大きく（計測精度を要さない）変状速度が速い（リアルタイム性を要する）斜面変状の後半、すなわち地盤の二次～三次クリープ状態のモニタリングに適することになる。なお、衛星測位を用いるこの2技術は、良好な天空視界（衛星の見通し）が得られる現場条件での適用が前提条件となることに留意されたい。

図1.2.2、図1.2.3は、上記2技術の相違点を含め、傾斜センサと衛星測位の2つのモニタリング技

表1.2.2 類似2技術の相違点と適用場面の違い

	モニタリング技術	計測手法・原理	モニタリングの目的/ 対象とする地盤変状レベル
傾斜センサ	傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリングシステム（2章）	MEMS傾斜センサ	点検補助,診断補助・安全確認,避難警報発信
	多点傾斜変位と土壌水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング（3章）	MEMS傾斜センサ 土壌水分計	①点検補助,診断補助・安全確認,避難警報発信 ②重要度の高い斜面（特定土工構造物等）の健全度の定量評価
衛星測位	次世代衛星測位システムによるのり面・斜面の安定性評価モニタリング（4章）	RTK測位（リアルタイム性高い、精度低い）	斜面変状の後半： 二次クリープ～三次クリープ現象の検知
	マルチGNSSによるのり面・斜面の安定性評価モニタリング（5章）	Static測位（測定精度高い、リアルタイム性低い）	斜面変状の前半： 一次クリープ～二次クリープ現象の検知



点検の補助

点検間の変状見逃しの低減
 日常点検の頻度低減
 点検費用・手間の低減

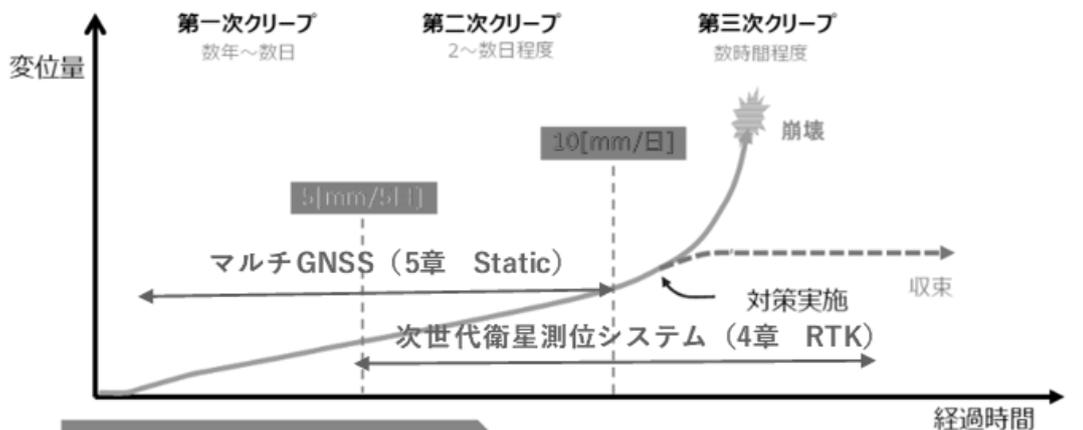
点検の補助・安全確認

予防保全による災害の重症化防止
 措置の優先付け
 健全度の定量評価
 供用状態の維持
 詳細調査までの監視
 災害前兆現象発見時の監視

土壌水分計(3章)による
 評価精度の向上

避難警報発信

図 1.2.2 斜面変状とモニタリングの目的・適用場面の関係 (傾斜センサ)



点検の補助

点検間の変状見逃しの低減
 日常点検の頻度低減
 点検費用・手間の低減

診断の補助

予防保全による災害の重症化防止
 措置の優先順位付け
 健全度の定量評価
 詳細調査までの監視、
 供用状態の維持
 災害前兆現象発見時の監視

安全・効果確認

通行継続の判断
 通行止めの継続・解除の判断
 対策の妥当性確認

斉藤(1987)ほかによるクリープ曲線図
 道路調査会(1988)
 維持管理段階の管理基準値

図 1.2.3 斜面変状とモニタリングの目的・適用場面の関係 (衛星測位)

術に関して、のり面・斜面の変状フェーズ（地盤のクリープ変形次数）毎、モニタリングの目的別に適用技術をマッピングした結果を示す。なお、落石センサの場合は図化していないが、落石の危険性のある不安定岩塊が抽出され要対策と判断され、費用および現地条件から早期の対策が困難である場合などに、常時モニタリングを実施して岩塊を連続監視する場面で用いられる。

1.3 費用の目安

表 1.3.1～表 1.3.3 に、傾斜センサ、衛星測位、落石センサの 3 技術グループ毎にモニタリング費用の目安を概算的に求めた結果を示す。提示した費用の範囲としては、センサ本体の費用、設置工事の費用、データの伝送・蓄積・可視化（監視用アプリケーション等）のシステム構築・運用に要する直接費を計上している。工事費の中の人件費は工数を別途計上した。モニタリング費用は対象とする斜面変状の規模や種類（=設置する機器の数やシステム規模）により異なるため、計器設置数を例示したうえで、想定される範囲として示している。

表 1.3.1 モニタリング費用の目安（傾斜センサ）

モニタリングシステムの例	現場内：無線通信（特定小電力） 現場外：3G/4Gモバイル回線 事務所PCで解析/クラウドサービス
計測器	傾斜センサー（+土壌水分計、オプション）
計測箇所数	観測点：10箇所、データ収集点：1箇所
測定期間	1年間
測定頻度	10分～1時間のインターバル
データ回収方法	モバイル回線データ転送、Webでダウンロード
管理方式	PC閲覧またはWeb閲覧
センサほか機材費 [万円] ※2	180～200万円 ※1 （土壌水分計10個：15万円）オプション
計測システム費※3	月額8,000円～16,000円
機器設置方法	地盤に1.5mの単管を打ち込み計測通信部を設置、地面を1.0m-1.5mの深さで掘削しセンサ部を設置
設置費（機材費のみ人件費含まず）	5～10万円
設置人工	2人2～3日
総計（設置人件費含まず）	約260万～ 約275万～（土壌水分計10個込み）
※1 レンタル可能 ※2 機器はレンタルも可能 ※3 通信費、クラウド費	

表 1.3.2 モニタリング費用の目安（衛星測位）

モニタリングシステムの例	現場内：無線通信（SS/無線LAN） 現場外：3G携帯回線 FTPサーバ 事務所PCで解析/クラウドサービス
計測器	GNSSセンサー
計測箇所数	観測点：7箇所※1、基準点：1箇所
測定期間	1年間
測定頻度	毎秒～1回/1時間
データ回収方法	携帯電話回線
管理方式	PC閲覧またはWeb閲覧
センサほか機材費 [万円] ※2	175～350万円
計測システム費※3,4	月額1,500円～70,000円
機器設置方法	地盤に打ち込んだ基礎鋼管に1.5m程度の鋼管支柱を 連結
設置費（機材費のみ人件費含まず）	約15万円
設置人工	準備2人日、設置4人2日
総計（設置人件費含まず）	約260万～
※1 shamen-net研究会の実績点数の平均から算出	
※2 機器はレンタルも可能 ※3 解析パソコン、Web用クラウド費用は含まず	
※4 電源・電話回線・光回線の初期費用（事務手数料等）は含まず	

表 1.3.3 モニタリング費用の目安（落石センサ）

モニタリングシステムの例	電源：商用電源 通信回線：固定電話 事務所PCで解析
計測器	3成分振動計（速度型タイプ）
計測箇所数	観測点：2箇所（浮石部1箇所、基盤部1箇所）
測定期間	—
測定頻度	1回/毎分～毎時
データ回収方法	固定電話
管理方式	PC閲覧またはWeb閲覧
センサほか機材費 [万円] ※2	280万円
計測システム費	月額20,000円
機器設置方法	浮石部および基盤部に振動計を固定
設置費（機材費のみ人件費含まず）	約40万円※1
設置人工	約40万円※2
総計（設置人件費含まず）	約320万円
※1電気設備工事一式 ※2労務費・掘削埋戻工事費・ユニック車賃料	

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工-切土工・斜面安定工指針平成 21 年度版
- 2) 国土交通省 道路局：道路土工構造物点検要領，平成 29 年 8 月
- 3) (財) 道路保全技術センター：防災カルテ作成・運用要領，平成 8 年 12 月
- 4) 奥園誠之：これだけは知っておきたい斜面防災 100 のポイント，鹿島出版会，1986
- 5) 大窪克己・藤岡一頼・竹本将：高速道路における土構造物の維持管理，土と基礎，Vol. 56, No. 2, pp 2-3, 2008. 2
- 6) 横田聖哉：高速道路における土工構造物（法面）点検の要点：基礎工，総合土木研究所，Vol. 45, No. 7, pp5-8, 2017
- 7) NEXCO 東日本，中日本，西日本：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会(報告書). 2014
- 8) のり面診断・補修補強研究会：吹付のり面診断・補修の手引き（増補版，平成 29 年 11 月）.
- 9) 地盤工学ハンドブック：地盤工学会，1999. 3.

2章 傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリングシステム

2.1 技術の概要

2.1.1 目的

本システムは、のり面・斜面の崩壊発生に係る前兆現象としての変位・変形を把握する手段として、無線機能を搭載した小型・省電力の傾斜センサを対象のり面・斜面へ広範囲に多数設置し、一定間隔で計測したデータを無線で定期的に収集し、そのデータからのり面・斜面の面的な変状をモニタリングすることを目的としている。

本システムでは、のり面・斜面の傾斜角度の変動データおよび面形状を図画像化することにより、遠隔地からでも視覚的に分かりやすく斜面の変状を捉えることができる。本システムを活用した日常的なモニタリングにより、のり面・斜面の異常前兆の早期把握、異常発生時の変状箇所の特特定、維持管理に要する費用削減の効果が期待できる。

2.1.2 傾斜センサと無線ネットワークによるモニタリング手法

(1) システム構成

図 2.1.1 にシステム全体の構成を示し、図 2.1.2 に主要機器の仕様を示す。計測装置は、MEMS 傾斜センサと 920MHz 帯無線を搭載した多数のセンサ端末と、同じく 920MHz 無線を搭載した無線親機 1 台で構成され、多数の傾斜センサのデータは無線で 1 台の無線親機へ伝送・集約される。さらにパケット通信機を用いて公衆無線回線を紹介データを自動的に遠隔地にメール配信し、専用の処理ソフトウェアで傾斜のグラフ化および面形状を図化することにより、遠隔地において、のり面・斜面の状態の変化をモニタリングすることを可能としている。

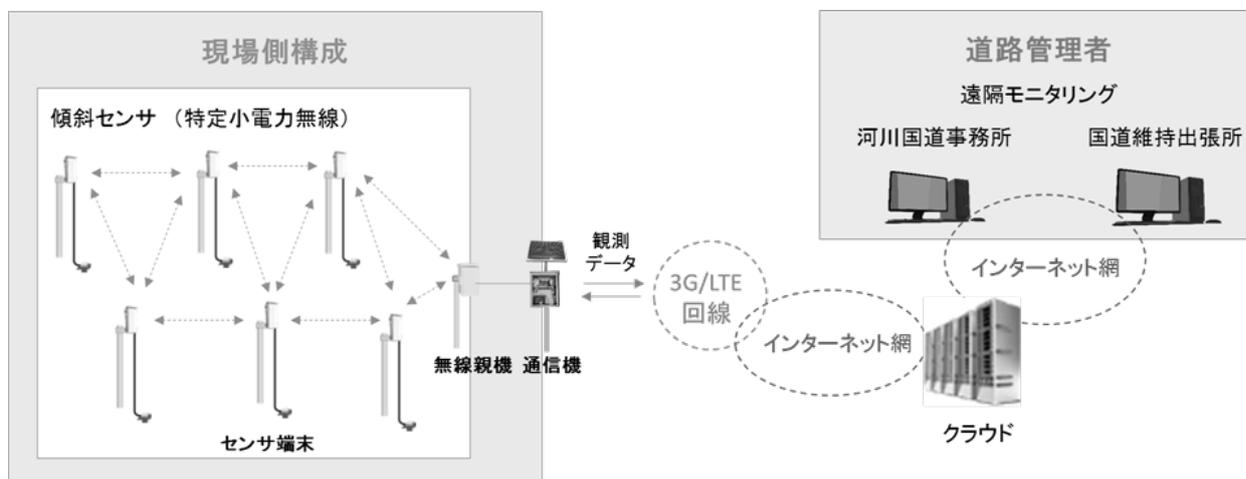


図 2.1.1 システム構成図

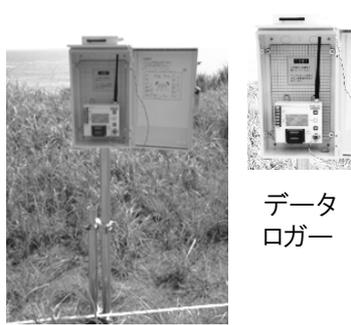
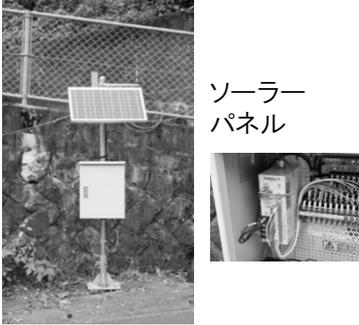
センサ端末	無線親機	パケット通信端末
傾斜精度：±0.1° 無線周波数：920MHz 帯 リチウム電池動作	無線周波数：920MHz 帯 ネットワーク形態：メッシュ データ記録機能	3G, LTE 通信機能 自動観測機能
 <p>無線部</p>	 <p>データロガー</p>	 <p>ソーラーパネル</p>

図 2.1.2 データ収集・伝送に係る機器

(2) 構成技術

傾斜の計測は分解能 0.001° の高精度の MEMS 型センサを使用し、かつカルマンフィルタにより平滑化を行っている。現場での通信には、免許不要な特定小電力無線のうち、無線 LAN で使用される 2.4GHz よりも回折性能が良好で、かつ屋外での電波到達性の高い 920MHz 帯を使用している。ネットワーク構成はメッシュネットワークを採用し、センサ端末から無線親機まで直接届かない場合はマルチホップ伝送を行う。さらに自動ルーティング機能により、無線を中継しているセンサ端末が故障した場合でも、故障機を回避してデータの伝送を行う。電源については、徹底した省電力設計により、小型ソーラユニットと電池の組み合わせで 5 年間の稼動が可能である。よって点検を含めた維持管理が省力化される。これらを独自の現場ネットワークおよびパケット通信機へ接続することにより、遠隔でのモニタリングが可能になる。また、傾斜センサ以外の伸縮計・パイプ歪計・孔内傾斜計・地下水位計・雨量計などの計測機器と統合した運用も可能である。

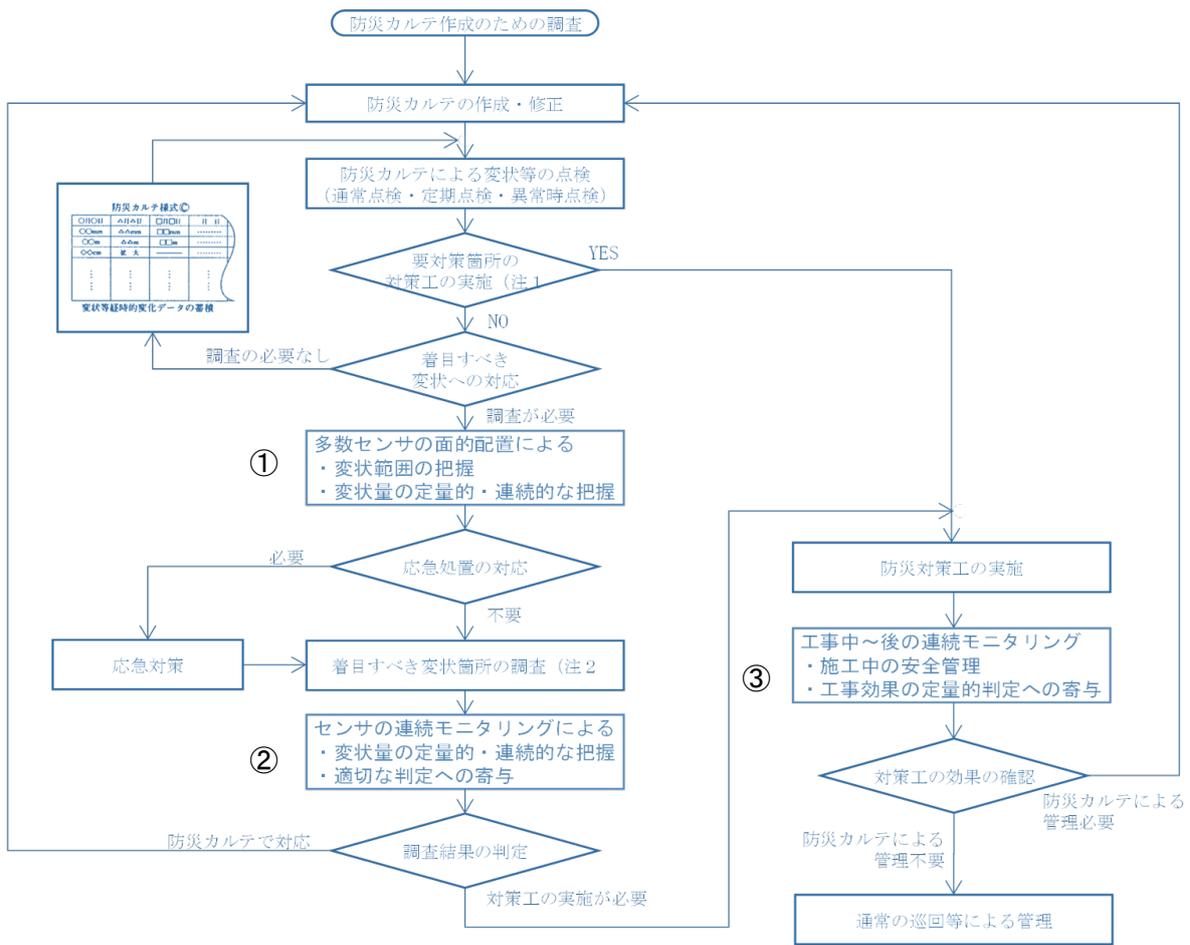
(3) 特徴

- 1) 斜面上の多点の傾斜を高精度に計測することにより斜面の変状を確認できる。
- 2) センサ本体は防水性かつ耐候性があり、計測データは無線伝送であり、電池駆動のため場所を選ばずに設置できる。
- 3) 計測データを随時取得することが可能なため、災害等の発生時にも、すみやかに遠隔から法面・斜面の変状を把握することができる。
- 4) モニタリング対象となるのり面・斜面では、植生繁茂等により運用中に電波環境が悪化することも多いが、本観測システムの無線はメッシュネットワークを構成するため、無線中継点が失われても、自動的に経路探索を行い他の経路で伝送を行う。
- 5) 計測データはクラウドへ伝送され、時系列グラフによる経時的な傾斜変動だけでなく、等値線解析による変動範囲の平面的な表示を行うため、ユーザ側に専門知識がなくても変状の程度や範囲を把握しやすい。
- 6) 無線親機はデータロガー機能を有するためパケット通信機のない現場で閉じた自動観測システムも構築可能である。

2.1.3 点検業務サイクルにおけるモニタリング技術の適用場面

道路防災点検の「防災カルテ点検・管理フロー」に対し、モニタリング技術の適用場面を追記したものを図2.1.3に示す。

変状が生じたのり面・斜面や、変状発生が疑われる場所において、調査が必要と判断された場合(①)に傾斜センサを設置する。多数センサを面的に配置してモニタリングを行うことで、変状範囲を明らかにすることができる。観測データに変状が現れたり、変状範囲が明らかになった段階(②)では、モニタリングを継続しリアルタイムの監視を行い、必要に応じて傾斜センサの移設や追加で監視体制の拡充を図る。対策工事が行われる場合(③)には、工事の対象斜面や上部斜面に傾斜センサを設置してモニタリングすることで、工事施工中の安全管理にも活用でき、さらに施工後も一定期間モニタリングを続けることで、対策効果の判定・評価に寄与できる。



注1) 道路防災総点検により、「対策が必要と判断される」と評価された箇所のうち「対策工までに日数を要する箇所」において、防災対策工の実施を行うかを判断する。
 注2) 着目すべき変状箇所について対策工の実施の必要性について専門技術者により地表踏査等の調査を実施するとともに必要に応じて災害の位置・規模等の想定の見直しを行う。

凡例	元フロー
	モニタリング技術の活用場面

図2.1.3 道路防災点検（防災カルテ点検管理フロー）とモニタリング技術の活用場面（参考文献¹⁾）

のり面や斜面の計測で従来から用いられてきた「伸縮計」は多くの実績があるため、管理基準値が明確に定められているメリットがある。傾斜センサによる本モニタリングでは、伸縮計を追加設置してシステムに組み込むことが容易であることから、傾斜センサによるモニタリングによって変状範囲の拡大や明確化が捉えられた後に、伸縮計を追加するケースとして、図 2.1.4 のような活用フローが考えられる。

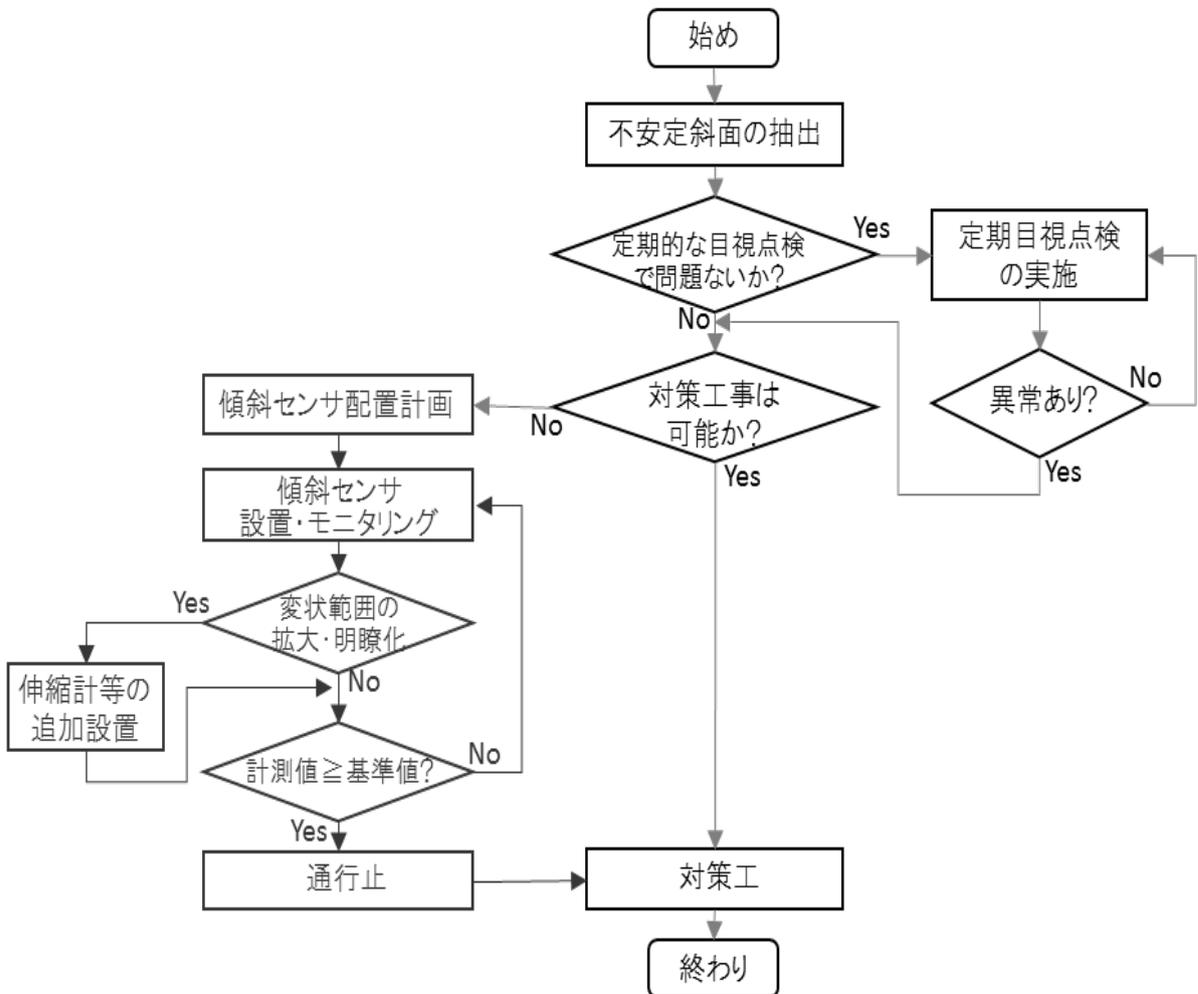


図 2.1.4 点検管理フローとモニタリング技術（傾斜計および伸縮計併用ケース）の活用場面

2.2 モニタリングの方法

2.2.1 モニタリングの手順

本システムによるモニタリングの基本的な手順は、図 2.2.1 のとおりである。

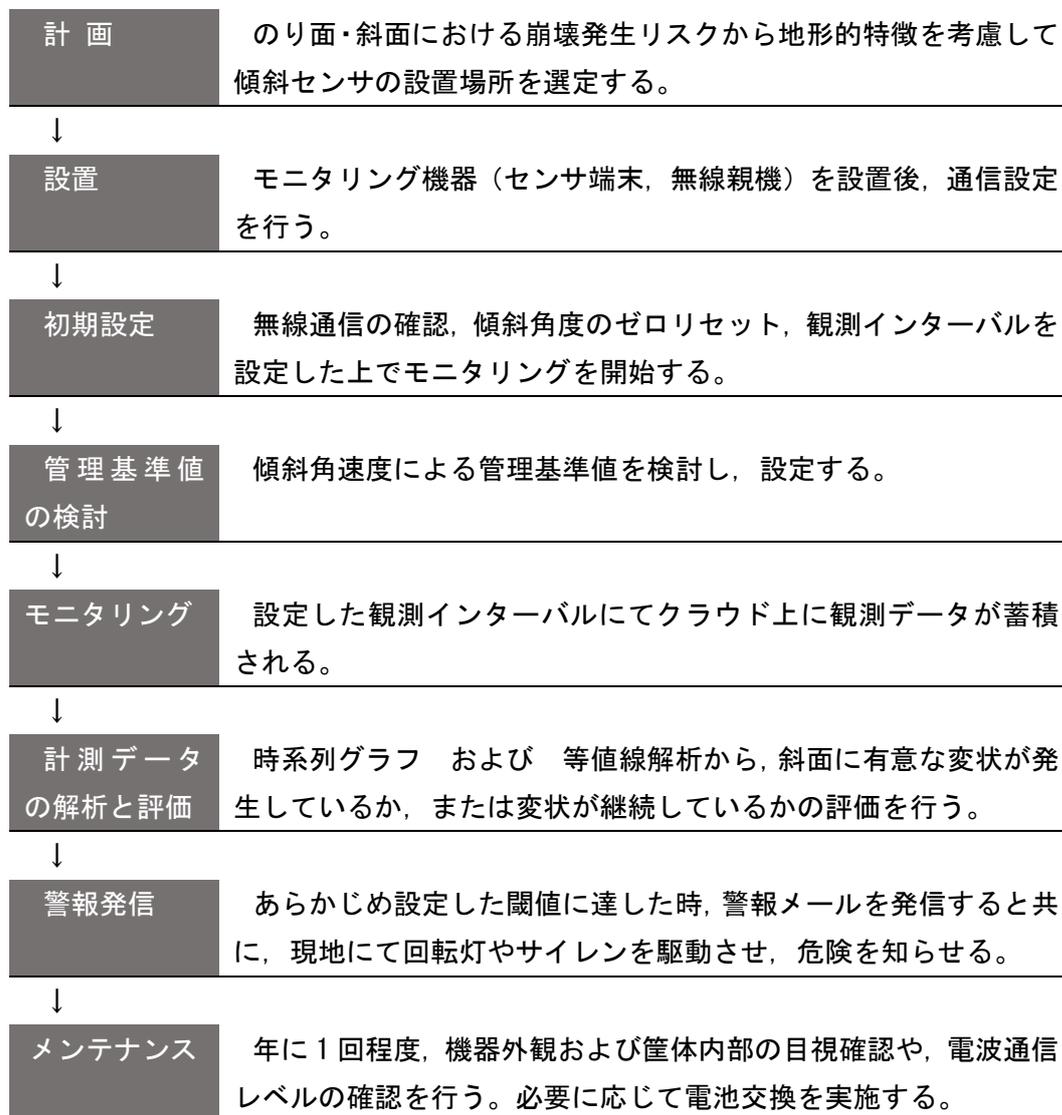


図 2.2.1 モニタリングの手順

2.2.2 計画

(1) 傾斜センサの設置位置

のり面・斜面における，崩壊発生リスクと関連性が高い地形的特徴としては

- ① 崩壊の頭部：崩壊跡地（滑落崖，崩壊跡地形，崖），遷急線
- ② 崩壊跡地：崖錐地形，遷緩線
- ③ 浸食開析：ガリーの発達
- ④ 地下水：湧水の分布

などがある。傾斜センサの設置場所はこれら特徴点を考慮して選定することが望ましいが，専門家の助言が得られない場合は，5～10m程度の等間隔で格子状に設置する。図 2.2.2 に実際の配置例を示す。

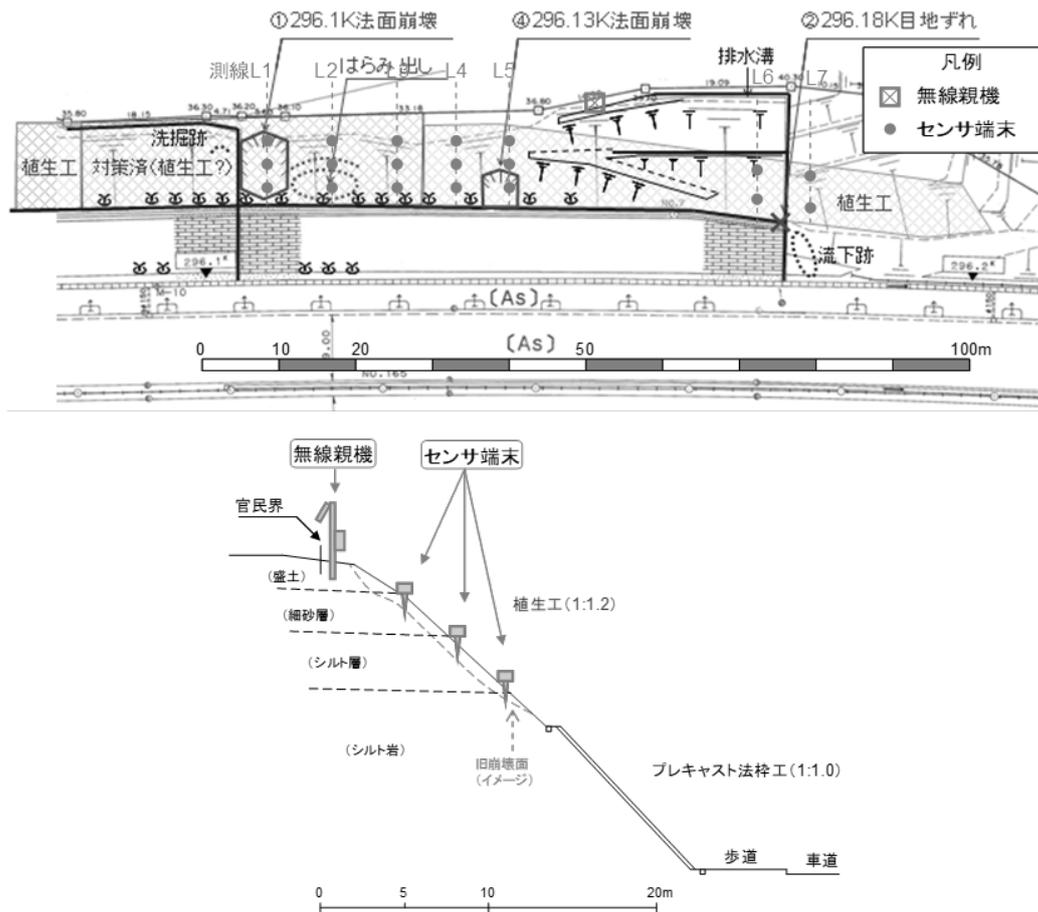


図 2.2.2 傾斜センサの配置事例

(2) 傾斜センサの設置数

本モニタリングシステムでは、

- ① センサ端末（無線子機）20 台までを無線親機 1 台で収録可能。（1 システム 20 台）
- ② 1 現場あたり 4 システムまで、無線の混信なく運用可能。

したがってセンサ端末は 80 台まで 1 つの現場に設置可能である。

(3) センサ端末（無線子機）と無線親機の位置関係

センサ端末（無線子機）と無線親機の距離は、920MHz 帯の特定小電力無線の特性上、見通し 400m 程度、林間では 100m 程度の伝送距離を満たす必要がある。

(4) 遠隔伝送回線

遠隔伝送回線としては、以下の回線に対応している。

- ① 携帯パケット網：NTTdocomo の 3G, LTE パケットによる無線伝送が可能。
- ② 衛星パケット網：NTTdocomo 衛星携帯電話網による伝送が可能。
- ③ 有線回線：独自通信方式による 1km 以上の有線伝送が可能。

2.2.3 設置

設置作業の流れを以下に説明する。

(1) 各機器の設置ポイントを決める。

(2) 無線親機（パケット通信機含む）を設置する。（図 2.2.3）

(3) センサ端末（傾斜センサ）を設置する。（図 2.2.4）

無線親機に近い設置ポイントから順に設置する。設置の都度、電源状態および無線通信状態を確認していく。親機 1 台につき 20 台までのセンサ端末を認識できる。

(4) 全てのセンサ端末を設置・設定後、無線親機側から以下 4 項目を実施する。

①通信テスト→②時計の設定→③全センサ端末のゼロリセットを実行→④記録開始

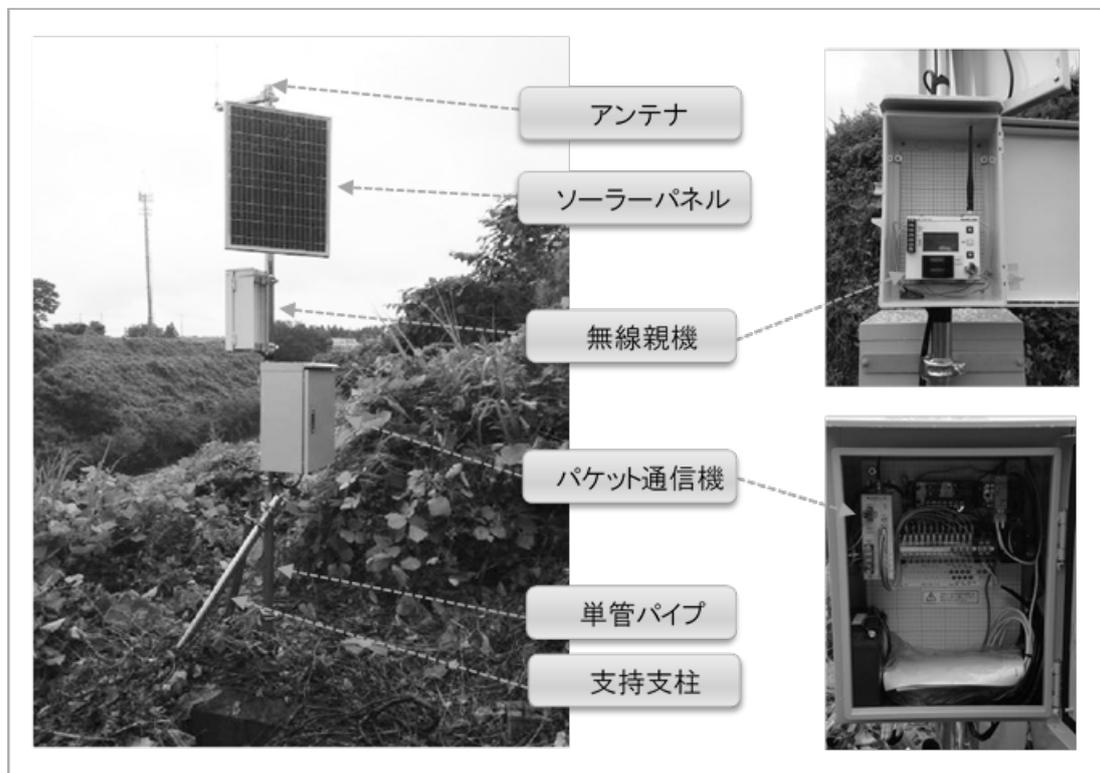


図 2.2.3 無線親機の設置方法

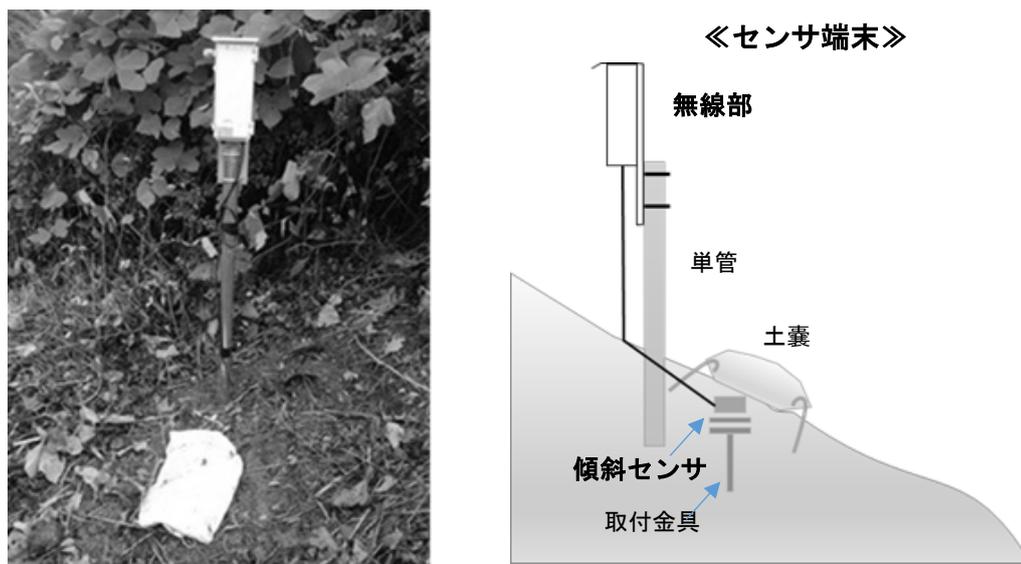


図 2.2.4 センサ端末の設置例（土面設置の場合）

センサ端末の設置手順を図 2.2.5 に示す。

①傾斜センサ埋設のため、観測地点に深さ20cm程度の穴を掘る



②穴の横に単管を取り付け、傾斜センサ取付金具を打込む



③傾斜センサ設置用アルミボールを取り付ける



④傾斜センサをセット



⑤傾斜センサ設置後軽く埋設



⑥単管に無線部を取付



⑦無線部取付完了



⑧遮熱用に土嚢袋を置く



⑨センサ端末設置完了



図 2.2.5 センサ端末の設置手順例（土面設置の場合）

2.2.4 初期設定

(1) 無線通信確認

本機は無線通信でデータ収集を行うため、無線親機および個々のセンサ端末に無線アドレスおよび周波数の設定が必要である。機器設置・設定後は、各端末間で安定した無線通信ができているかを確認する。

(2) 傾斜角度のゼロリセット

設置時の傾斜角度をゼロとしてその後の変動を計測するため、全ての機器を設置後、一旦傾斜値をゼロにする。

(3) モニタリングの開始

上記(1)(2)を実施後、観測インターバルを設定してモニタリングを開始する。観測インターバルは5分～1日の間で任意に設定できる。

2.2.5 管理項目

既往文献より、傾斜角速度 $0.1^\circ / \text{hr}$ （一時間あたり 0.1 度）以上の傾斜変動が継続すると崩壊に至る事例が多く報告されている^{1) 2)} ため、設置当初は傾斜角速度でアラートを管理し、以後のデータ蓄積で新たな知見が得られたら見直していくことが合理的である。

管理基準値は、傾斜角速度 $0.1^\circ / \text{hr}$ を上限に、それより低い段階（例えば 0.05 度/hr）を事前警報の基準値とするなど、複数段階で通知することが可能である。既往文献による経験的な管理基準の提案値を表 2.2.1 に示す。（参考文献^{2) 3)}）

表 2.2.1 傾斜計の管理基準値（案）

レベル	警戒レベル 1 (注意警戒)	警戒レベル 2 (避難準備)	警戒レベル 3 (即避難)
傾斜角速度	$0.01^\circ / \text{hr}$	$0.1^\circ / \text{hr}$	$1^\circ / \text{hr}$

2.2.6 モニタリング

モニタリングは設定した観測インターバルで自動的に行われるため、クラウドを通して現場の計測データを事務所のパソコンからブラウザで確認できる。データは自動でグラフ化され、最新値の取得も可能である。必要ならば、閾値を設定してメールで通知することも可能である。ブラウザ画面を図 2.2.6 に示す。

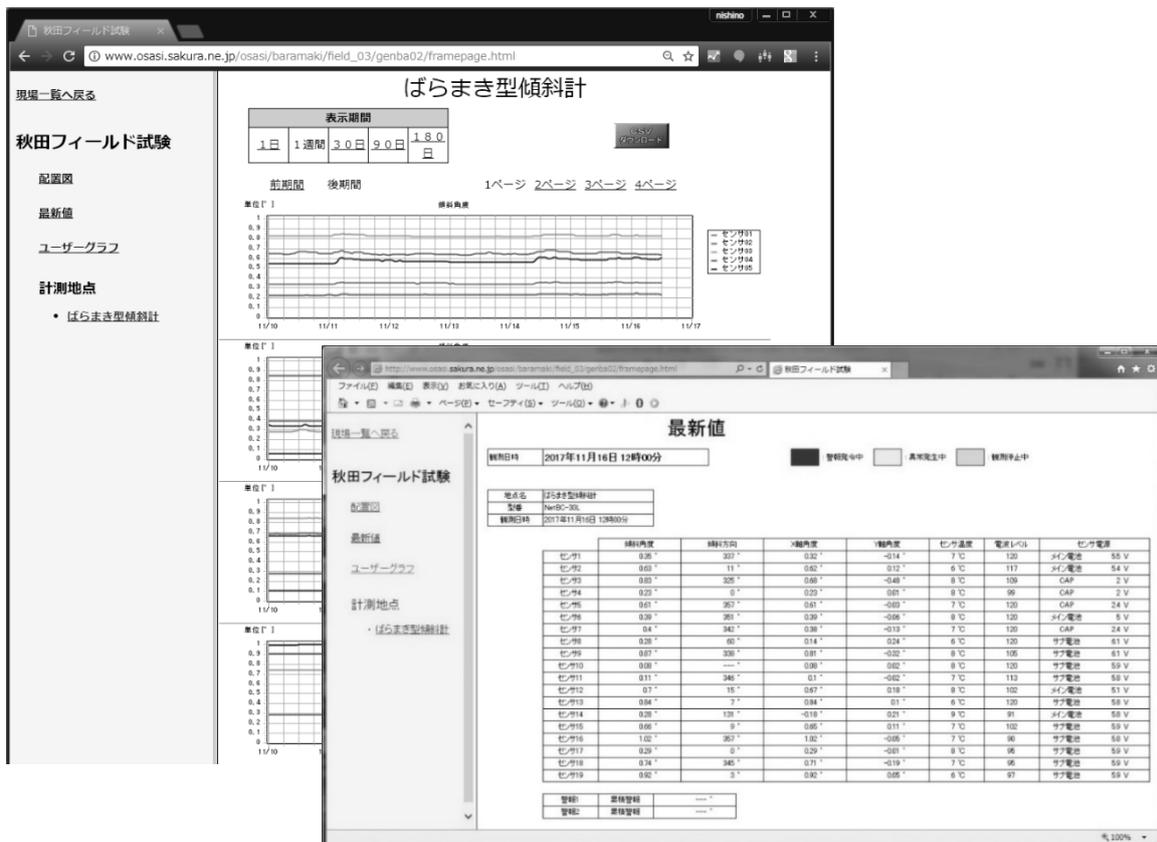


図 2.2.6 ブラウザ画面

2.2.7 計測データの解析と評価

(1) 基準用ダミー傾斜センサを活用した温度変動補正

傾斜センサはほぼ地表面付近に設置するため、気温変化による日周期変動や季節変動が計測データに現れることは避けられない。そこで、同一現場内で斜面変動の影響を受け難い場所や堅固な地盤に基準用のダミー傾斜センサを設置しておく、その計測データはほぼ温度変動とみなせるため、各傾斜センサからダミー傾斜センサの計測データを差し引くことで、気温変化による日周期変動や季節変動を取り除き、大局的な傾斜変動に着目することが可能となる（図 2.2.7）。

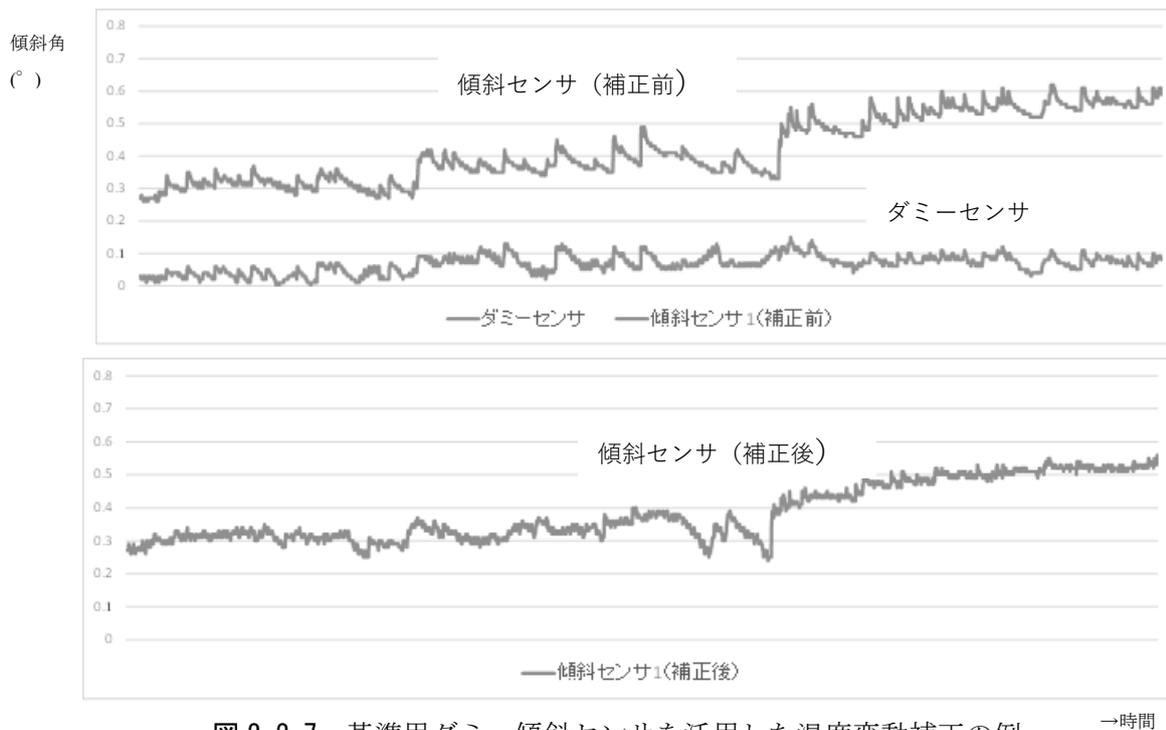


図 2.2.7 基準用ダミー傾斜センサを活用した温度変動補正の例

(2) 時系列グラフによる傾斜角と角速度の併記

管理基準と現在値との比較は、「傾斜角」の時系列グラフと、その時間微分値（1回微分）である「傾斜角速度」の時系列グラフに管理基準値を併記することで、理解を容易とする。

(3) 等値線解析による変状範囲の可視化

1) 傾斜の絶対値での解析

傾斜センサによる「点配置」のデータに対して、等値線解析を行い、等値線（等傾斜線）をグラデーション表記することによって、変状範囲をビジュアルに可視化し、傾斜変動の大小と変状範囲を直感的に判断しやすくする。ここでは傾斜角の「絶対値」を用いるのが効果的である。図 2.2.8 に 1 例を示す。この図で赤色は傾斜角度が大きいことを示している。

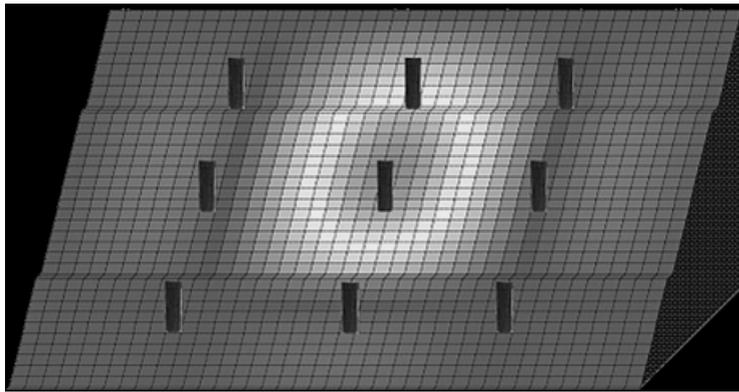


図 2.2.8 等値線解析による平面図表示例画面

2) 傾斜方向を考慮した解析

一方、斜面変動は一般に斜面上部から下部に伝搬するとともに、典型的な円弧すべりにおいては、斜面上部ではスランプ（回転運動）による山側への傾倒，斜面下部では土塊の押し出し・孕み出しによる谷側への傾倒が生じることが想定されるため、「傾斜方向」と「縦断測線（縦断面）から見た上下関係」にも着目することが有効である。

このため傾斜方向を符号化（山側－，谷側＋）して等値線解析を行い，平面図にグラデーション表記することによって，移動体ブロックの頭部・脚部の把握・推測を支援する。図 2.2.9 に断面図と平面図の表示例を示す。この図で赤色は傾斜角度が大きいことを示している。

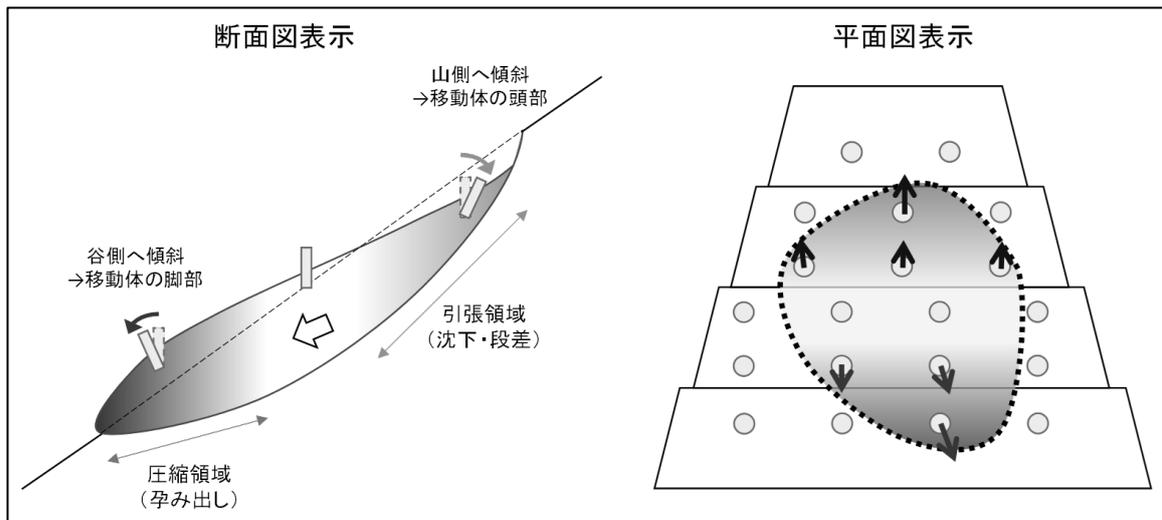


図 2.2.9 等値線解析による断面図表示例

2.2.8 警報発信

警報は4つの項目を設定でき、メールによる通報が可能である。同時に、回転灯やサイレンを駆動させ、現地での警報発報も可能である。警報判定は、傾斜角の絶対値だけでなくその傾斜角速度でも判定することができ、警報値に達した際は自動的に観測インターバルを切り替えることができる。図2.2.10に警報発令のイメージを示す。

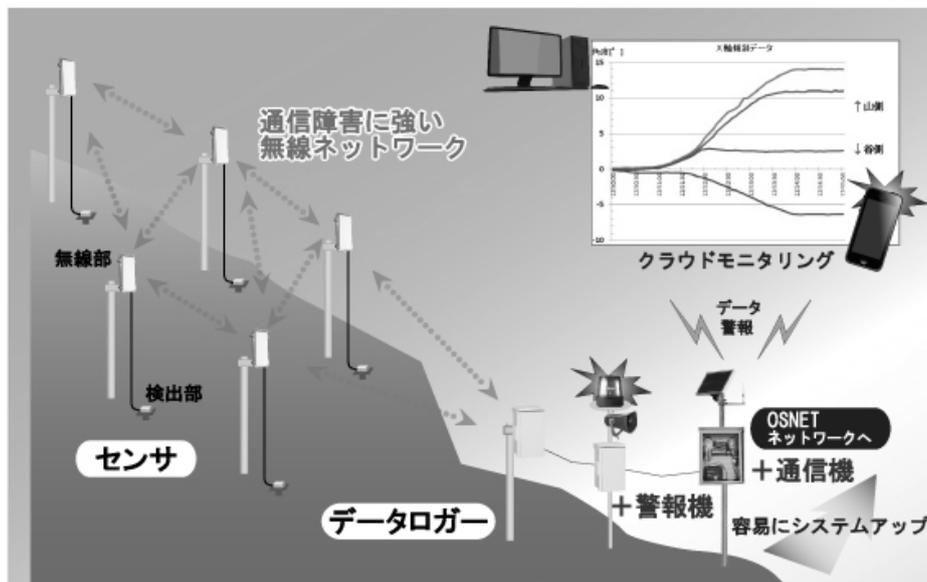


図 2.2.10 警報発報イメージ

2.2.9 メンテナンス

(1) 目視による異常の有無の確認

年1回、図2.2.11に示すような現場点検を行う必要がある。

①機器外観チェック 例：草などの絡まりはないか 埋設したセンサに異常はないか		②機器内部チェック 例：結露による水滴はないか	
無線親機	センサ端末	無線親機	センサ端末
			

図 2.2.11 目視による外観および筐体内部の確認

(2) 電波通信レベル確認

電波通信レベルはクラウド上で確認できる。通信レベルが低い時は植生を除去する，アンテナの高さを上げるなどの対策が必要である。

(3) 電池の交換

電源状態はクラウド上で確認できる。サブ電池に切り替わるタイミングで電池交換すると，無駄なく電源を利用できる。さらに小型ソーラユニットを併用すると，ほぼ電池交換なく長期観測することが可能である。

参考文献

- 1) (財)道路保全技術センター：防災カルテ作成・運営要領，p44（1996）
- 2) 内村ほか：斜面の傾斜変位の監視による崩壊の早期警報，地盤工学会誌，62-2，pp4-7（2014）
- 3) 西江ほか：斜面崩壊の早期警報に関する最近の事例，斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム（2015）

3章 多点傾斜変位と土壤水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング

3.1 技術の概要

3.1.1 目的

斜面崩壊前の予兆現象を効率よくかつ的確に把握するため、安価な傾斜センサを活用した多点計測システムである。図3.1.1に示すように、より設置が簡単な傾斜センサの導入で低コスト化を実現し、多点計測により面的な変状の測定・解析を行うことにより、事前予測の精度が向上できるため、安定かつ高精度の斜面崩壊早期警報システムの構築を実現する。

表層すべりの直前には、特に法尻部の傾斜変位と飽和度の上昇がみられる¹⁾。のり面・斜面の崩壊は豪雨時にその多くが発生し、斜面上部に水が溜まると地中に雨水が浸透することに伴い土中水分の増加や地下水位の上昇が生じ、斜面のバランスが崩れることによる崩壊の危険性が高まる。これらから本技術の計測項目については、傾斜変位と土壤水分量に着目した。

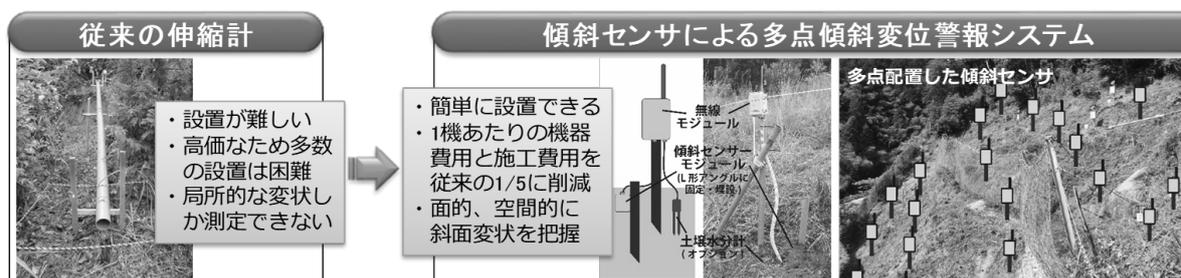


図3.1.1 多点傾斜変位の常時監視の目的

3.1.2 システムの概要

のり面・斜面は、緩みやすべり等を要因として、徐々に傾斜変動していく。本技術では、傾斜変動を捉えることを目的として開発された傾斜センサ（計測機器）を用いたリアルタイム監視によって、土砂災害に対する迅速な情報提供を可能にする。

(1) 計測機器

無線基地局（親機）を現場に設置し、子機・孫機のデータを受信し、サーバに転送する。サーバについては、収集したデータを Web サイトに表示し、データの推移から、一定の判断基準で警報メール等を発信できるようにする。

- ① 子機の機器精度：2軸 MEMS 傾斜計：測定レンジ： $\pm 30^\circ$ ；分解能： 0.003° ；計測精度 0.017°
- ② 孫機の機器精度：3軸 MEMS 傾斜計：測定レンジ： $\pm 90^\circ$ ；計測精度 0.04°
- ③ 土壤水分計(ECH₂O タイプ)：分解能： $0.002\text{m}^3/\text{m}^3$ （計測精度： $\pm 3\%$ ）
- ④ 特定小電力無線：転送距離：無障害時、およそ 600m

図3.1.2に示すように、傾斜センサは、2軸MEMS傾斜計（レンジ $\pm 30^\circ$ ；分解能 0.003° ；計測精度： 0.017° ）とECH₂Oタイプ土壤水分計を搭載している。斜面地盤に打ち込んだ鋼棒に固定した傾斜計で鋼棒の傾斜・回転角度（＝斜面表層の傾斜・回転角度）を計測する。それと同時に土壤水分計（体積水分計）を地表より20cm程度の深さに埋め込み、斜面表層の湿潤状態を計測する。それらを無線通信で繋ぎ、ネットワークシステムを構築する（図3.1.3）。多点計測データの解析により、面的な変状のモニタリングを行う。

(2) 多点傾斜変位の常時監視システムの概要

測定は10分間隔に行われ、毎回の計測データ（傾斜角+体積含水率）は無線データ通信を通して通信基地局に転送・保存され、さらにサーバ上のデータベースまで送信される。各センサの計測データは経時変化のグラフに可視化されることにより、インターネットを介した崩壊前の予兆現象の監視が可能となり、また変状が警報値を超えた際に警報メールを登録者に発信できるため、警報作用を果たすことも可能である。

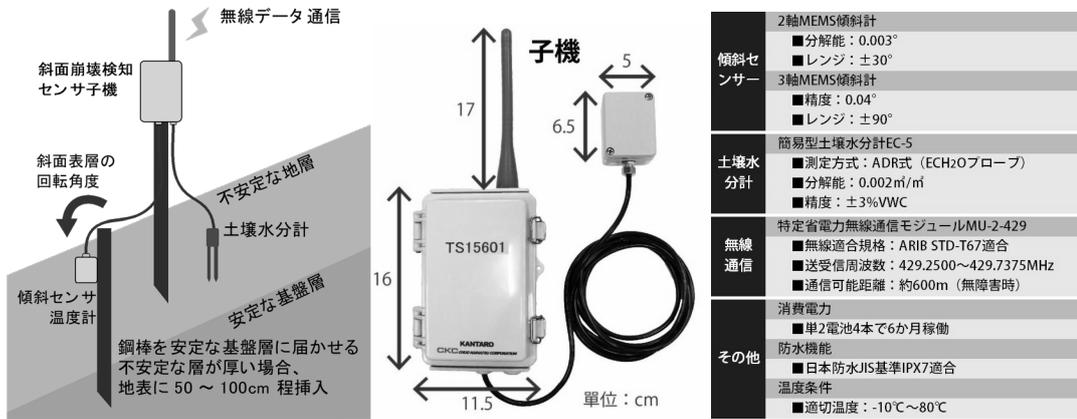


図 3.1.2 斜面崩壊検知センサの設置方法・機器仕様

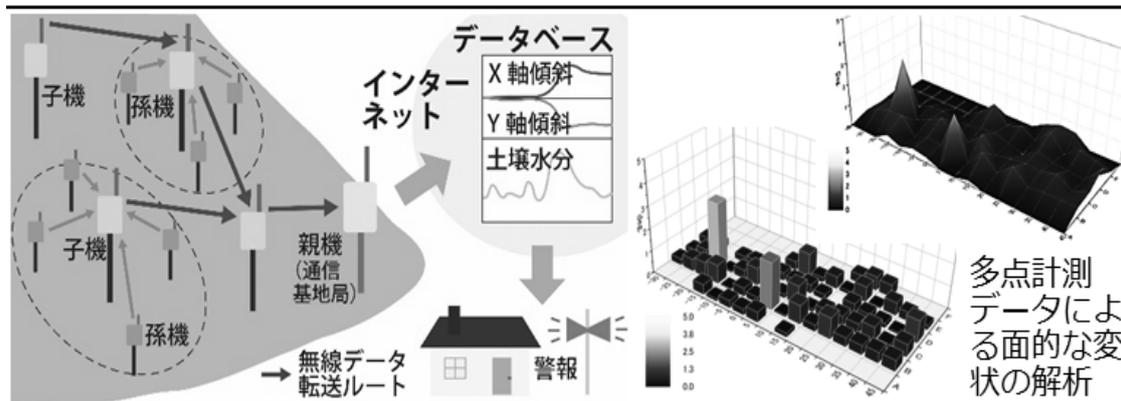


図 3.1.3 多点傾斜変位の常時監視システムの概要

- ① データ収集時間（転送時間）：10分間隔
- ② データセンターによる結果解析：10分～1時間間隔
- ③ 危険状態に応じた計測間隔の自動調整：

斜面傾斜変位は、降雨強度との関係性が強いため、20mm/時（任意設定）を超える降雨の発生時には、自動的にデータ収集間隔を短縮する。これにより、計測センサの精度だけではなく、モニタリングシステムの危険性の判断精度の向上を実現する。

3.1.3 点検業務サイクルにおけるモニタリング技術の適用場面

のり面・斜面の変状点検・スクリーニングを実施することによって斜面の安全性を検討する。「安全性の検討」に関するフローチャートを図 3.1.4 に示す²⁾。設計・施工段階の点検で変状を認めた場合は、関係者間で情報を共有化したうえで「安全性の検討」を行い、「応急的なハード対策」の実施、さらには「安定性検討に際してのハード対策」の実施により、安全が確保されたことを確認したうえで設計・施工を再開する。

「安全性の検討」にあたっては、安全性が確保できない（崩壊リスク大）と判断される場合には、のり面・斜面の変状を感知するセンサを用いて動態観測システム・警報システムと組み合わせた工法で実施する。動態観測システムでは、傾斜センサの多点配置と計測により、斜面の変状を面的に把握することができ、警報判断に寄与し、設計変更の参考情報となる。

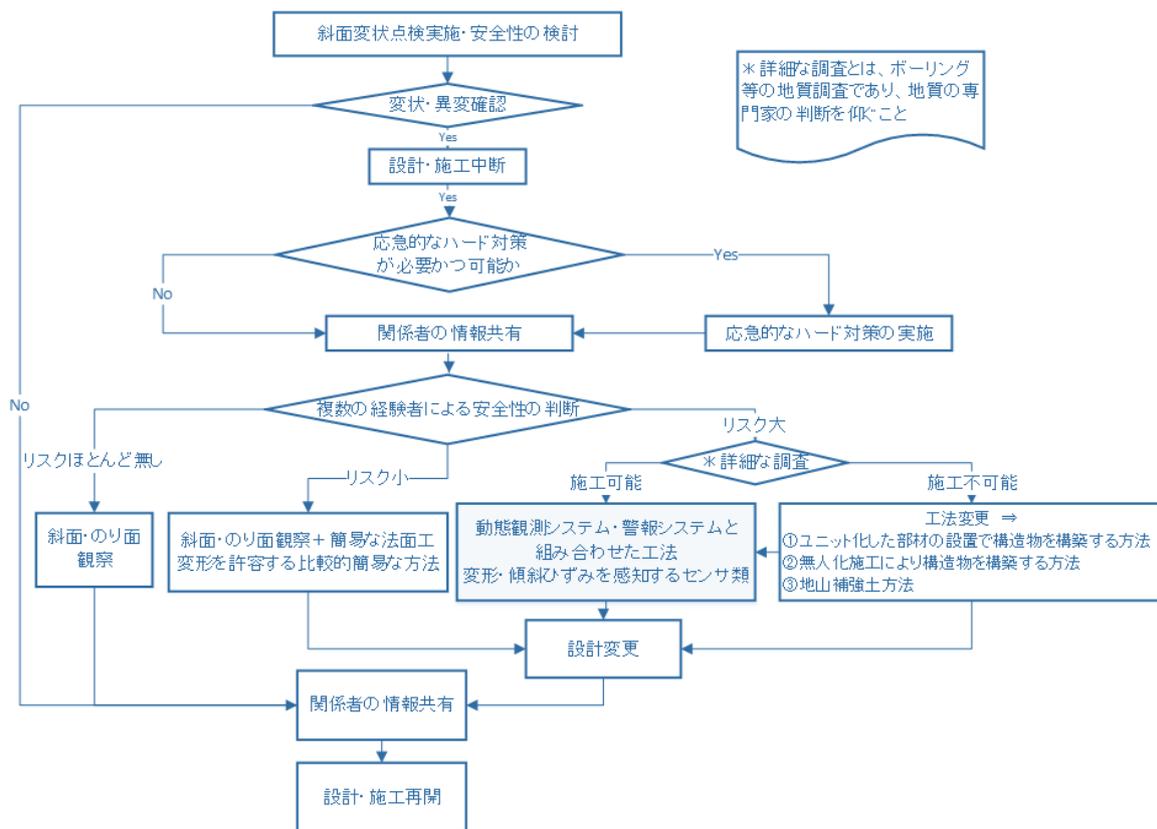


図 3.1.4 「安全性の検討」に関するフローチャート²⁾

3.2 モニタリングの方法

3.2.1 モニタリングの手順

多点傾斜変位と土壌水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価モニタリングの基本的な手順は、図3.2.1のとおりである。

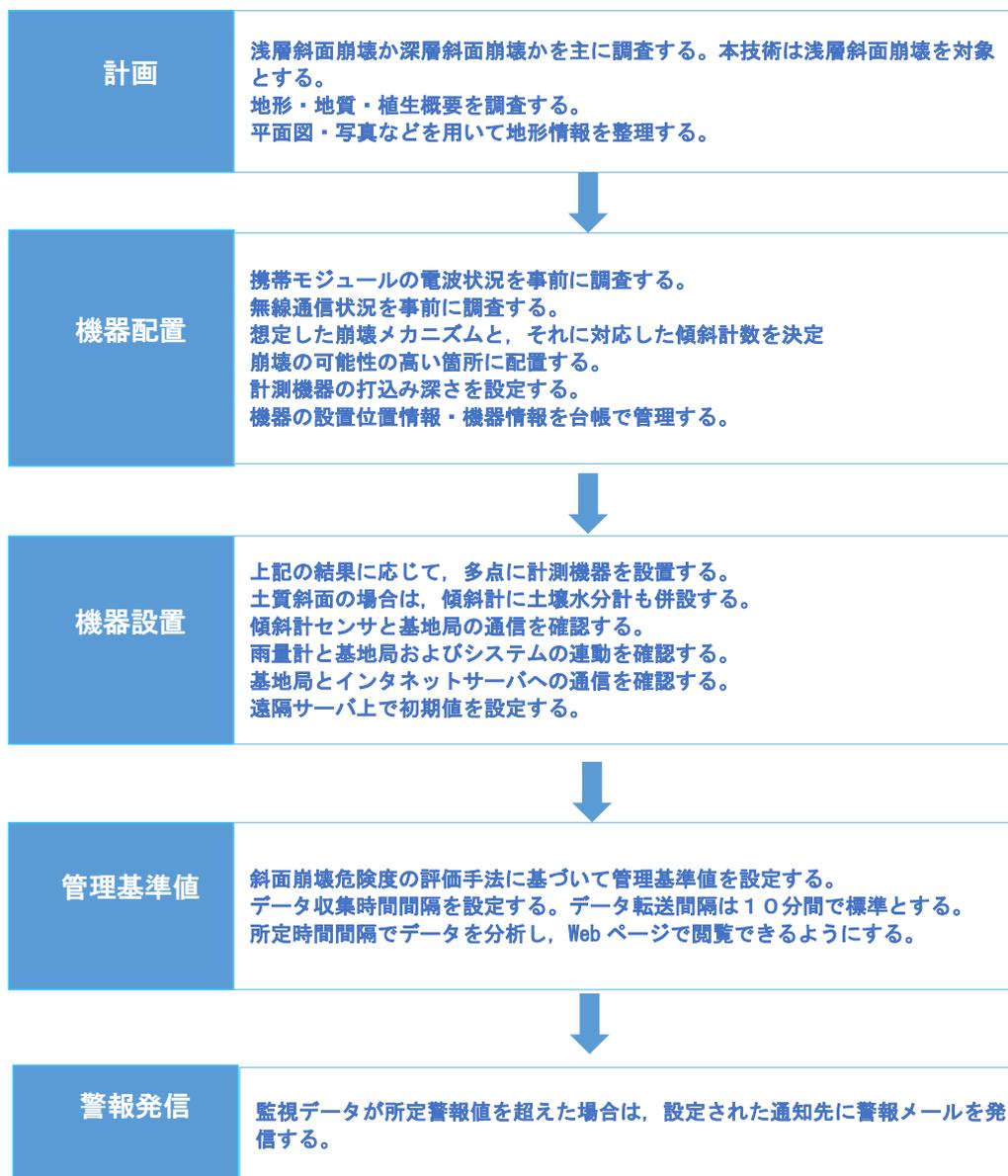


図3.2.1 のり面・斜面の安定性評価モニタリングの手順

3.2.2 計画

計測機器の設置計画を行うために、机上調査（地形、既往文献など）および現地踏査を行い、地形・地質概要をまとめる。崩壊の起こりやすい場所では、その結果として形成された特有な地形がみられる。このような崩壊性要因を持つ地形として、例えば、崖錐地形・崩壊跡地・オーバーハングなどがあげられる。これらのうち該当する地形の数に応じて評点をまとめる。まとめた評点に基づいてセンサの設置間隔を決める。

3.2.3 機器の配置と設置

機器の設置に際しては、鋼棒の打ち込みの深さを、図 3.2.2 に示すように 1m 程度に設定することにより、崩壊層の平均的な動き（傾斜角変化）を取れると考えられる^{3) 4)}。

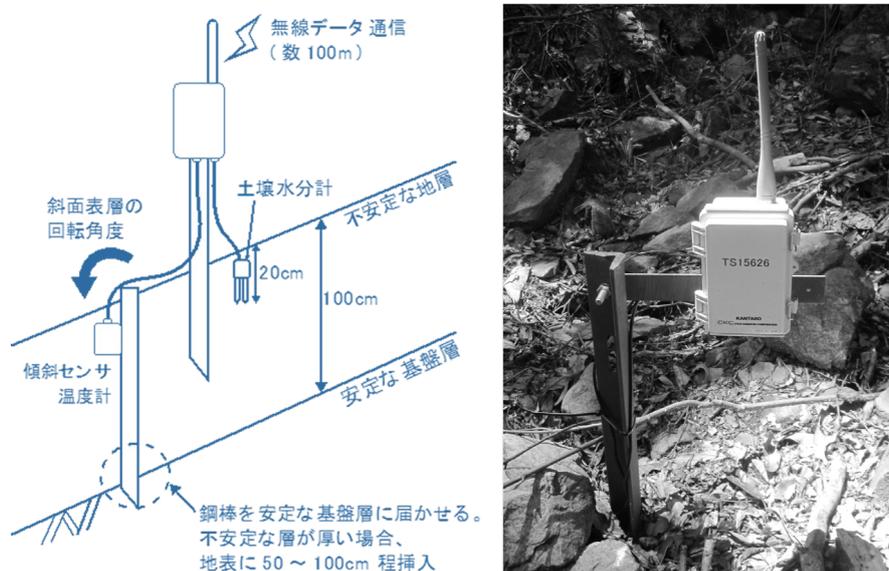


図 3.2.2 傾斜センサの設置模式図

機器の設置時には、鋼棒を打ち込んだ後に、確実に地面に固定されることを確認する。なお、打ち込み深さと測定した傾斜角度から概略の表面変位の推定は可能である。なお、アングルが細長いため、打ち込み時に地盤に与える損傷はほぼないと考えられる。

土壌水分計については、深さが 20cm の地面に埋め込むため、表層土に水分計を差し込んだ後に土を埋め戻す。傾斜計との間隔が数十 cm あるため、変位計測に対する影響はないと考えられる。

計測機器の基本的な配置方針としては、専門家の判断により、配置ポイントを選定する。または、傾斜センサの設置は、現場条件に応じて配置間隔を調整し崩壊の可能性の高い箇所によく配置する。センサの設置間隔は、10m~30m になるように調整する。

3.2.4 斜面危険度の評価手法と管理基準値の設定

斜面が崩壊する場合、傾斜角度の累積値が増加するとともに、崩壊が近づくにつれて、累積値増加の『速度』が上昇する。つまり、傾斜角度の増加速度が小さいほど安定であり、大きくなるほど不安定で崩壊に近づいていると言える。

図 3.2.3 に示したような崩壊事例や不安定化事例を整理し、傾斜角速度と崩壊または安定化するまでの時間(残余時間)をサンプリングした。図 3.2.4 はそのうち傾斜角の経時変化の一例である。

これらの事例のデータを整理して両対数の「傾斜角速度—崩壊残余時間」グラフにまとめると、図 3.2.3 のように幅を持ったデータ範囲が得られる。この図を基に判断すると、「0.01° /hr」を記録すると 10~300 時間後、「0.1° /hr」では 1~15 時間後、「1.0° /hr」では 0.6~5 時間後に崩壊が発生していることがわかる。この傾斜角速度毎の崩壊残余時間の幅は、地形・地質・降雨状況の違いを表していると考えている。従って、傾斜角速度の管理基準値は、安全側の観点から最速で判断すると、「0.01° /hr」

(⇒残余最小 10 時間) で『注意警戒』, 「 $0.1^\circ / \text{hr}$ 」(⇒残余最小 1 時間) で『避難準備』, 「 $1.0^\circ / \text{hr}$ 」(⇒残余最小 36 分) では『即避難』と考える。監視対象並びに保安対象によって、対応が異なることがあろうが、大まかには「 $0.01^\circ / \text{hr}$ 」を確認した時点を、早期警戒のスタートラインと考える。

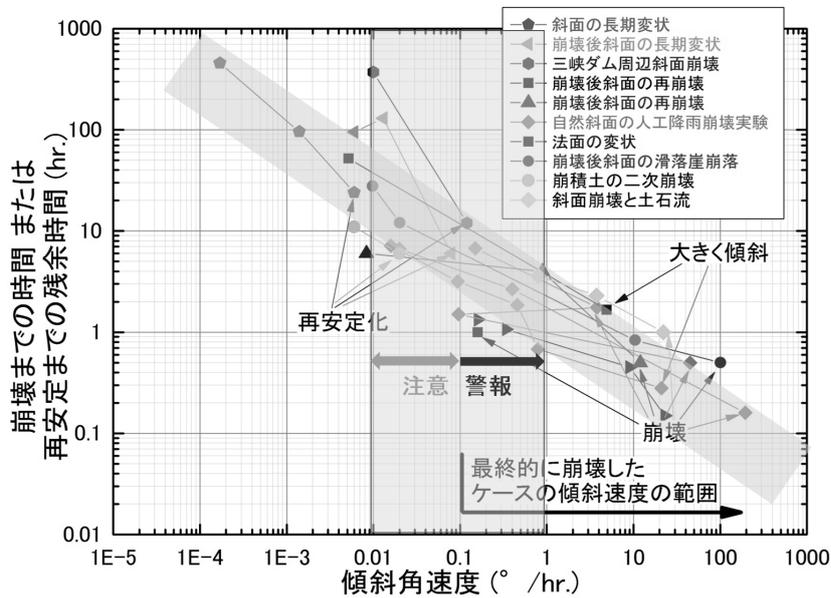


図 3.2.3 実際の事例による崩壊／再安定までの時間と傾斜角速度の関係

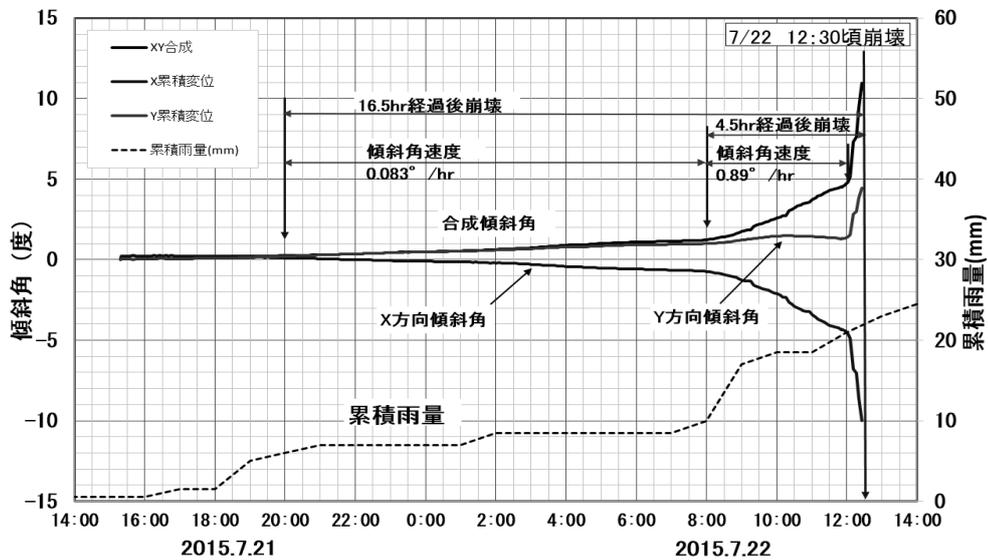
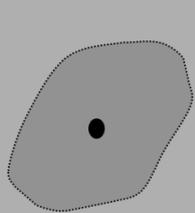
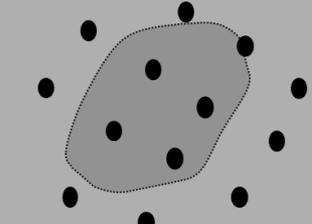


図 3.2.4 表層傾斜計による崩壊前兆の補足例

3.2.5 早期警報についての基本的な考え方

表 3.2.1 に示すように、早期警報を出す場合、多点観測での複数センサの挙動を判断した上で警報発信を考える必要がある。単一センサの場合は、局所の動き、動物の接触や誤作動による誤報が発生しやすい。しかし、適切な配置計画（現場条件に応じて配置間隔を調整）に基づいて多点計測を行うことにより、センサごとのカバー範囲を縮小し、誤報の防止とシステム精度が向上するため、安定性のある危険判断システムとなる。

表 3.2.1 単点～少数点観測と多点観測で安定性のある危険判断の概要

	単点～少数点観測	多点観測
機器設置イメージ		
崩壊捕捉率	低い	高い
クロスチェック機能	低い ⇒機器異常、獣害や悪戯による誤報を生じやすい	高い ⇒機器異常、獣害や悪戯の影響が少なくなる
範囲や規模の把握の精度	低い 局所的なモノか、広がりがあるモノかの判断が難しい	高い 変動の程度と併せて、広がりがある程度判明する。
適用性	予め崩壊の範囲が明瞭な場合に有効 (地すべり、崩壊地)	崩壊範囲が不明瞭な場合に有効 (未崩壊斜面)
警報の内容	単眼的	複眼、多角的
コスト	低い	高い

3.2.6 計測データの解析および斜面崩壊リスクの評価整理方法

(1) 降雨強度と斜面地盤の傾斜変位の整理

豪雨時における斜面地盤の傾斜変位の時間履歴を整理する。

(2) 降雨強度と斜面地盤の土壌水分の整理

豪雨時における各土壌水分計値（体積含水率）の時間履歴を整理する。

(3) 降雨強度と斜面地盤の傾斜角速度の整理

豪雨時の多点計測値を抽出して、斜面ブロックごとに変状進行状況を整理し、斜面全体の傾斜角速度を面的に把握する。

(4) 降雨強度と斜面地盤の累積傾斜角の整理

斜面の傾斜累積変化を面的に把握し整理する。

(5) 多点計測で得られる斜面傾斜角度の解析

日降雨量強度が 20mm（状況に応じて設定）を超えた日の斜面傾斜角度データを抽出して、各傾斜変位を図 3.2.5(a) に示すように三次元でデータとして整理・解析する。斜面の全体的な動きを立体（3D）で表示し、局所な動きか、全体的に動いているか等の変状の情報を施設管理者に伝える。

(6) 多点計測で得られる斜面傾斜角速度の解析

図 3.2.5(b) で示すように、多点計測における斜面傾斜角速度の関係を整理する。多点計測データをリアルタイムで取得することで、斜面の変状がどのように進行しているかを空間的、時間的に把握する。

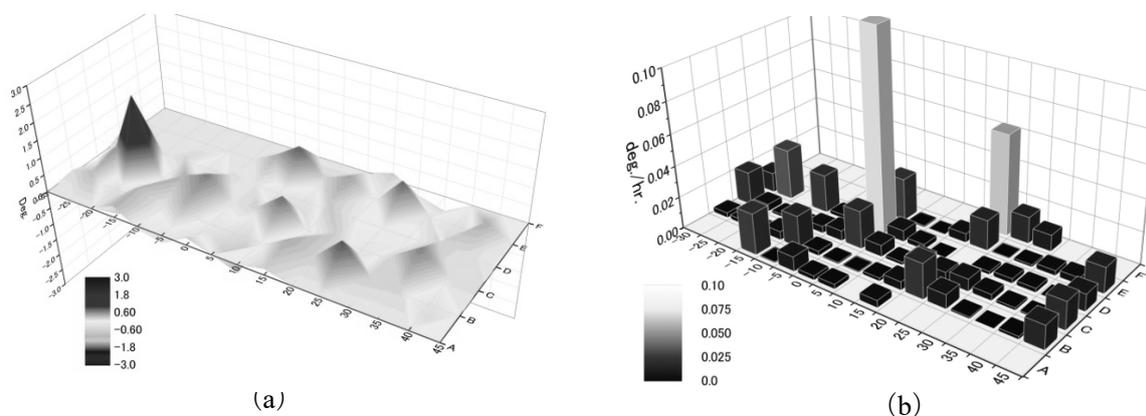


図 3.2.5 多点計測における斜面傾斜角度(a)と斜面傾斜角速度 (b) の 3D 解析イメージ

参考文献

- 1) Orense RP, Farooq K, Towhata I (2004) Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration. *Soils and Foundations* 44(2):15-30.
- 2) 土砂崩壊災害防止検討（斜面崩壊防止のための点検に関する調査研究）委員会報告会，平成 23 年 3 月，建設業労働災害防止協会
- 3) 国土交通省河川局砂防部：土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報の活用のあり方について（前兆現象資料-1），土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会（平成 17 年度），平成 18（2006）年 3 月 31 日
- 4) Uchimura, T., Towhata. I., Wang, L., Nishie S., Yamaguchi, H., Seko, I. and Qiao, J.-P. (2015): Precaution and early warning of surface failure of slopes by using tilt sensors, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.5: 1086-1099.

4章 次世代衛星測位システムによるのり面・斜面の安定性評価モニタリング

4.1 技術の概要

4.1.1 目的

従来の GNSS による斜面の計測では、測量で使用する測位方法（スタティック）を用いているため GNSS 機器のコスト高が避けられなかった。また、測量で使用する測位方法（スタティック）では精度が良いがリアルタイム性に欠けていた。本章で紹介する次世代衛星測位システムは、これら GNSS で補いきれなかった点を改善した新しい斜面の安定性評価のためのシステムである。

リアルタイム性に優れる次世代衛星測位システムは、図 4.1.1 に示すように日常のヘルスマニタリングから災害対応まで利用可能である。

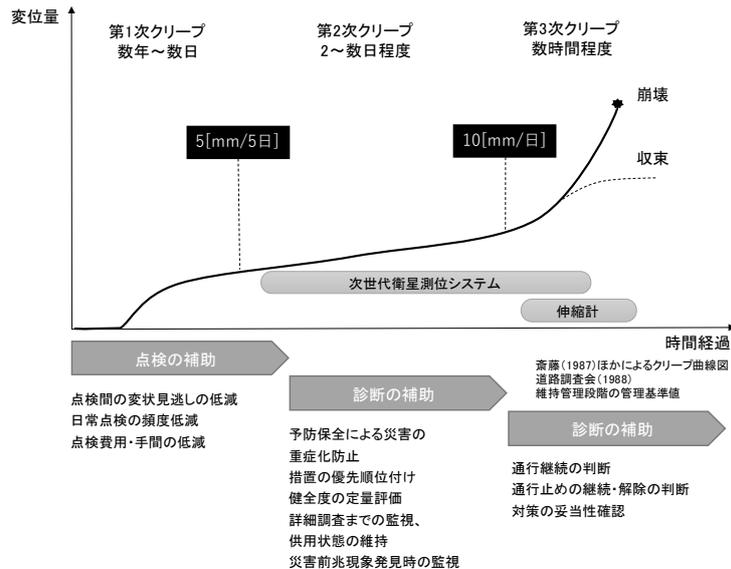


図 4.1.1 次世代衛星測位システムの適用範囲（利用シーン）

4.1.2 次世代衛星測位システムの概要

(1) 本手法の特徴

次世代衛星測位システムは経済性とリアルタイム性に優れたシステムで、新しい通信技術である無線ネットワークを活用することで、設置工事の省力化や維持管理の費用削減が可能となる。

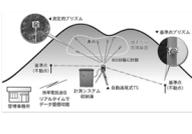
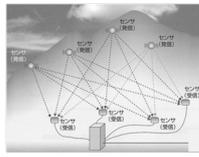
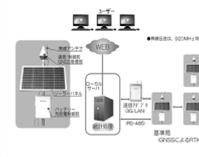
次世代衛星測位システムと既存の衛星測位システムとの違いを表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 既存手法との相違点

項目	GPS を用いた既存システム	次世代衛星測位システム
GNSS の測位方法	スタティック	RTK
測位衛星	GPS	GPS, 準天頂衛星, GLONASS
GNSS の絶対計測精度	5mm (RTK の場合は数 cm)	2mm
精度向上の工夫	なし	新しい誤差評価手法
リアルタイム性	1 時間毎に更新 (スタティックの場合)	毎秒更新も可能
経済性	センサも含め高価	センサも含め安価
データ取得方法, 電源	有線, 一般商用電源	無線, ソーラー電源

既存の代表的な地表面計測機器と比較した場合における次世代衛星測位システムの長所を表 4.1.2 に示す。

表 4.1.2 地表面計測手法と次世代衛星測位システムの比較

		自動追尾トータルステーション	電波位相変位計	衛星測位 (2020年以降に大変革 ⇒ 多衛星時代到来)	
				GPS連続計測	次世代衛星測位システム
技術的特徴	概要				
	計測頻度	計測点数に依存 (数10分毎)	1時間毎	1時間毎	5分毎
	計測精度	2mm+ 1ppm×Dmm (距離に依存)	数mm	1mm程度 (時系列統計処理)	2mm程度 (一般統計処理)
	コスト	高価	やや高価	やや高価	安価
	施工性	難	難	やや難	易

(2) 計測機器および計測方法の概要

1) 計測状況

次世代衛星測位システムにおけるセンサ設置状況を図 4.1.2 に示す。

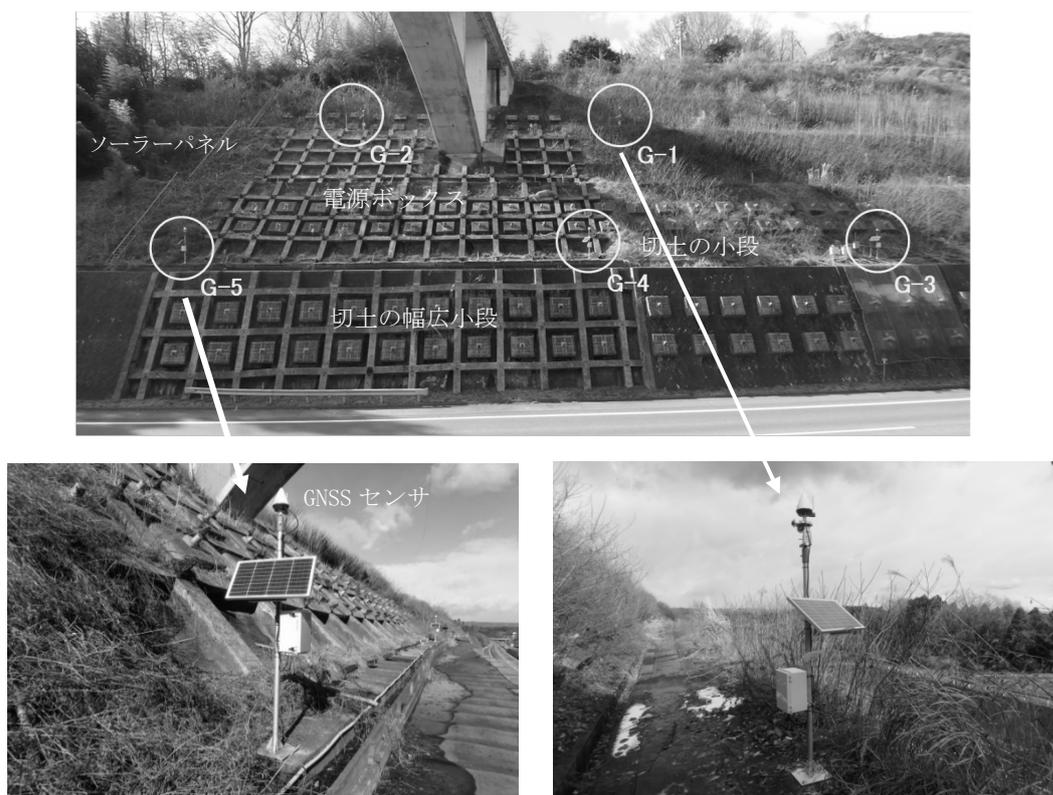


図 4.1.2 次世代衛星測位システムにおけるセンサ設置状況

2) 各ユニットの概観

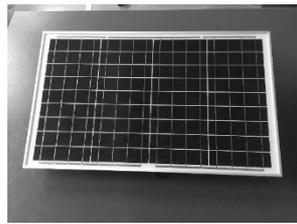
次世代衛星測位システムは、図 4.1.3 に示すように、センサ・電源ボックス・ソーラーパネルから構成される。



RTK センサ（特定小電力無線機能付き）



電源ボックス（充放電コントローラーとバッテリー）



ソーラーパネル

図 4.1.3 次世代衛星測位システムにおける各計測ユニット

3) 計測データの流れ

計測データの流れ図を図 4.1.4 に示す。基準点の情報をブロードキャスト方式で観測点に送信し、観測点のセンサで RTK の解析を行い、その結果を特定小電力無線（920MHz）で通信アダプタに送信する。通信アダプタからは携帯電話で解析結果を監視センターのサーバに送信し、サーバで統計処理（母集団移動平均法、恒星日差分法）を行って誤差評価する。ユーザは、その結果をインターネットによって Web 閲覧する。

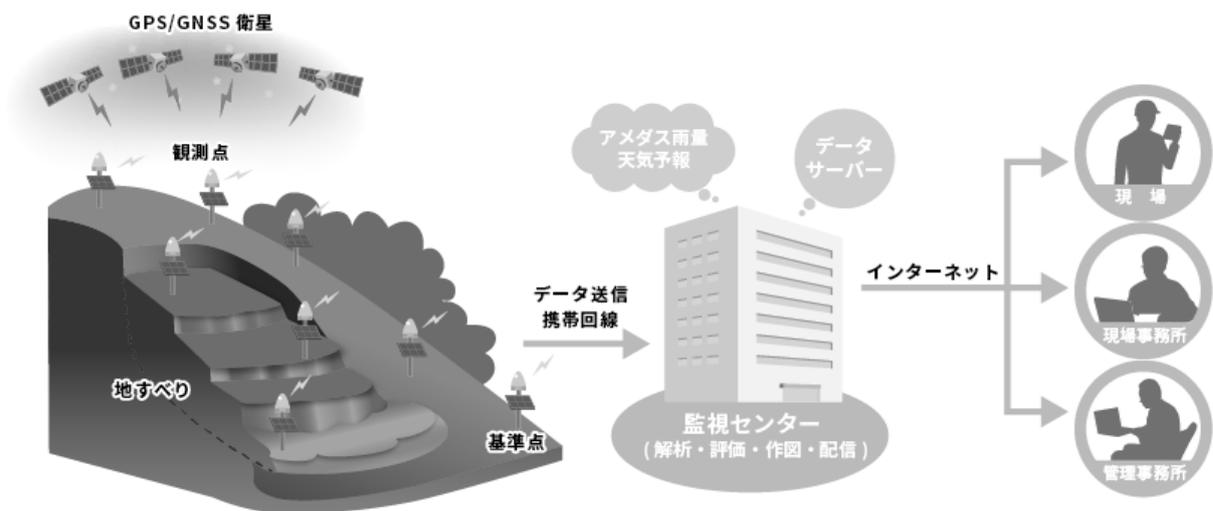


図 4.1.4 次世代衛星測位システムのデータの流れ図

4) 測位方法

測位方法は、RTK（リアルタイムキネマティック GNSS 測定の略）を用いている。RTK は、基準点の観測情報を無線ネットワークで全ての観測点に送信し、観測点の位置をリアルタイムで測定する方法である。精度は数 cm 程度で精密な GNSS 測位方法に比べ精度は若干劣るが、リアルタイム性に優れている。しかし、このままの精度ではデータのバラツキが大きくて土木計測には利用できないため、RTK 解析結果について統計処理（母集団移動平均法、恒星日差分法）を行なうことで高精度な計測（精度 2mm 程度）を可能にしている。

(3) 統計処理方法について

次世代衛星測位システムでは、取得データの統計処理手法として母集団移動平均法と恒星日差分法を使用している。母集団移動平均法は時系列データを平滑化する手法で、直近の n 個のデータの重み付けのない単純な平均である。GNSS 衛星は約 1 日周期で同じ衛星配置を繰り返しているため、母数を 1 日分の時系列データとするとその母数にはあらゆる衛星配置のデータを含んでいる。したがって、1 日分の時系列データの母数は、統計的推測をする上で母集団の特性値が同じになる。

母集団移動平均値の長所は、データ量が多いと移動平均値は最尤推定値となる。一方、母集団移動平均値の短所は、変位検出において母数のデータ分の時間遅れを伴うこと（検出変位は単調増加する）である。一方、恒星日差分法は、同じ衛星配置の計測値と基準値の差分をとる方法で、衛星測位誤差が衛星配置に依存している場合に効果的である。このため、恒星日差分法の長所は、「リアルタイム性」に優れている。

図 4.1.5 には、母集団移動平均法と恒星日差分法の時系列グラフを示す（強制変位：北方向に 5mm の強制変位を与えたもの）。母集団移動平均法のグラフの青点は RTK の生データ、赤線は母集団移動平均値を、恒星日差分法の赤点は差分値を示している。母集団移動平均法のグラフでは、強制変位北方向 5mm に対して母数の時間（1 日）を要して母集団移動平均値が単調増加で 5mm にすり寄っている。一方、恒星日差分法はほぼリアルタイムで 5mm の強制変位を検出している。

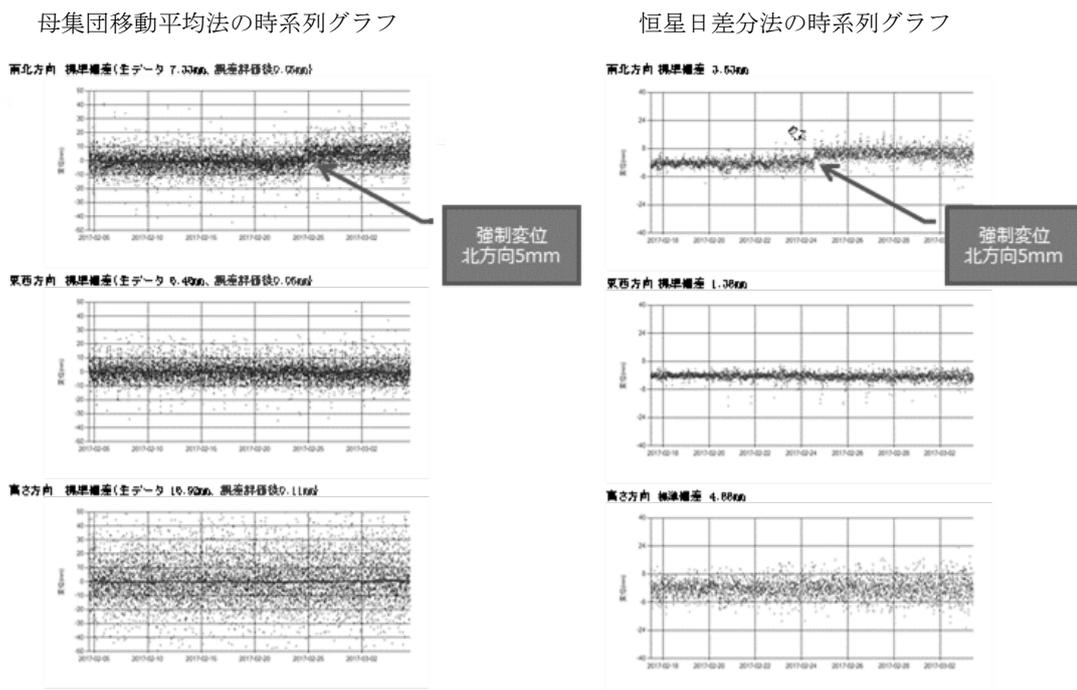


図 4.1.5 母集団移動平均と恒星日差分法の時系列グラフの比較（強制変位実験結果）

4.1.3 点検業務サイクルにおけるモニタリング技術の適用場面

道路土工構造物（切土、盛土等）の点検におけるモニタリング技術の活用場面例を図 4.1.6 に示す。点検において健全度Ⅱに判定されたのり面は仮に地表面変位の管理基準値が 10mm 以上/30 日程度、健全度Ⅲに判定されたのり面は仮に地表面変位の管理基準値が 5mm 以上/5 日程度とした場合では、次世代衛星測位システムの性能で日常のヘルスマニタリングの利用が十分できる。

一方、点検において健全度Ⅳに判定されたのり面を、仮に地表面変位の管理基準値が 10mm 以上/日や 2mm/h（2 時間連続）と考えた場合、次世代衛星測位システムはリアルタイム性にも優れているためこのようなケースでも十分対応できる。なお、次世代衛星測位システムを導入することによって得られるメリットは、①ライフサイクルコストの削減、②点検の高度化・見える化、③交通規制解除の支援、④施工安全管理、⑤対策工の効果判定などが考えられる。

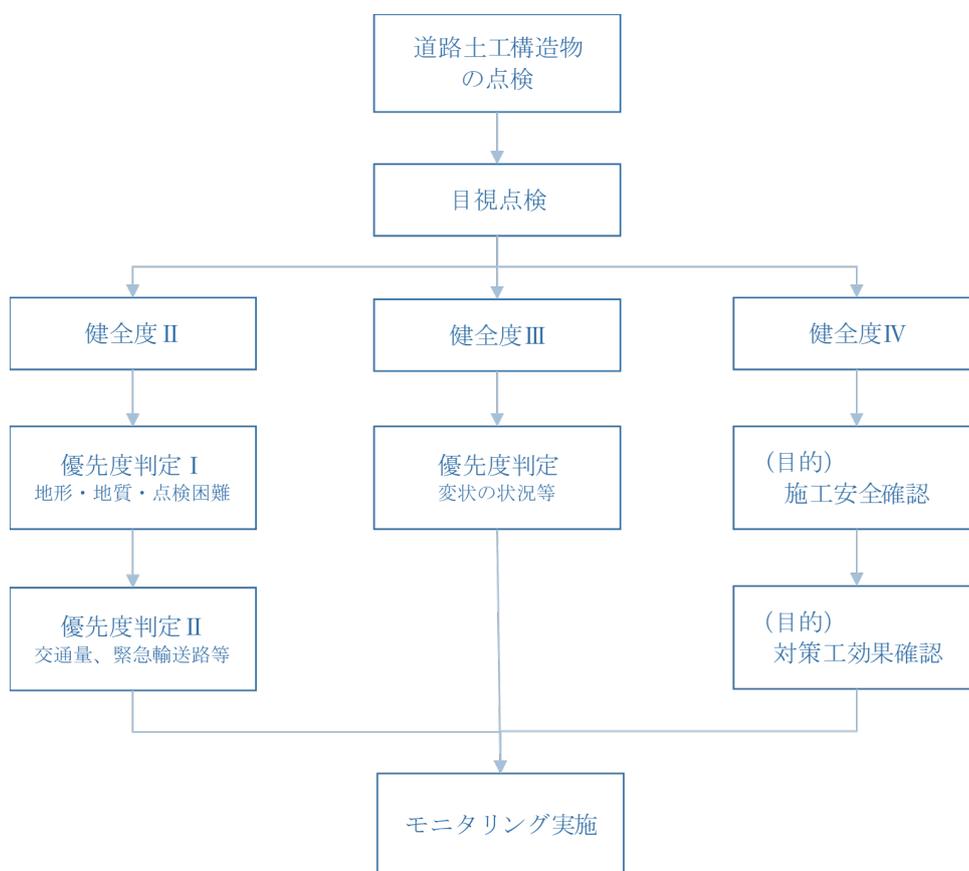


図 4.1.6 点検管理フローとモニタリング技術（次世代衛星測位システム）の活用場面例

4.2 モニタリングの方法

4.2.1 モニタリングの手順

次世代衛星測位システムの基本的な手順は、図 4.2.1 の通りである。

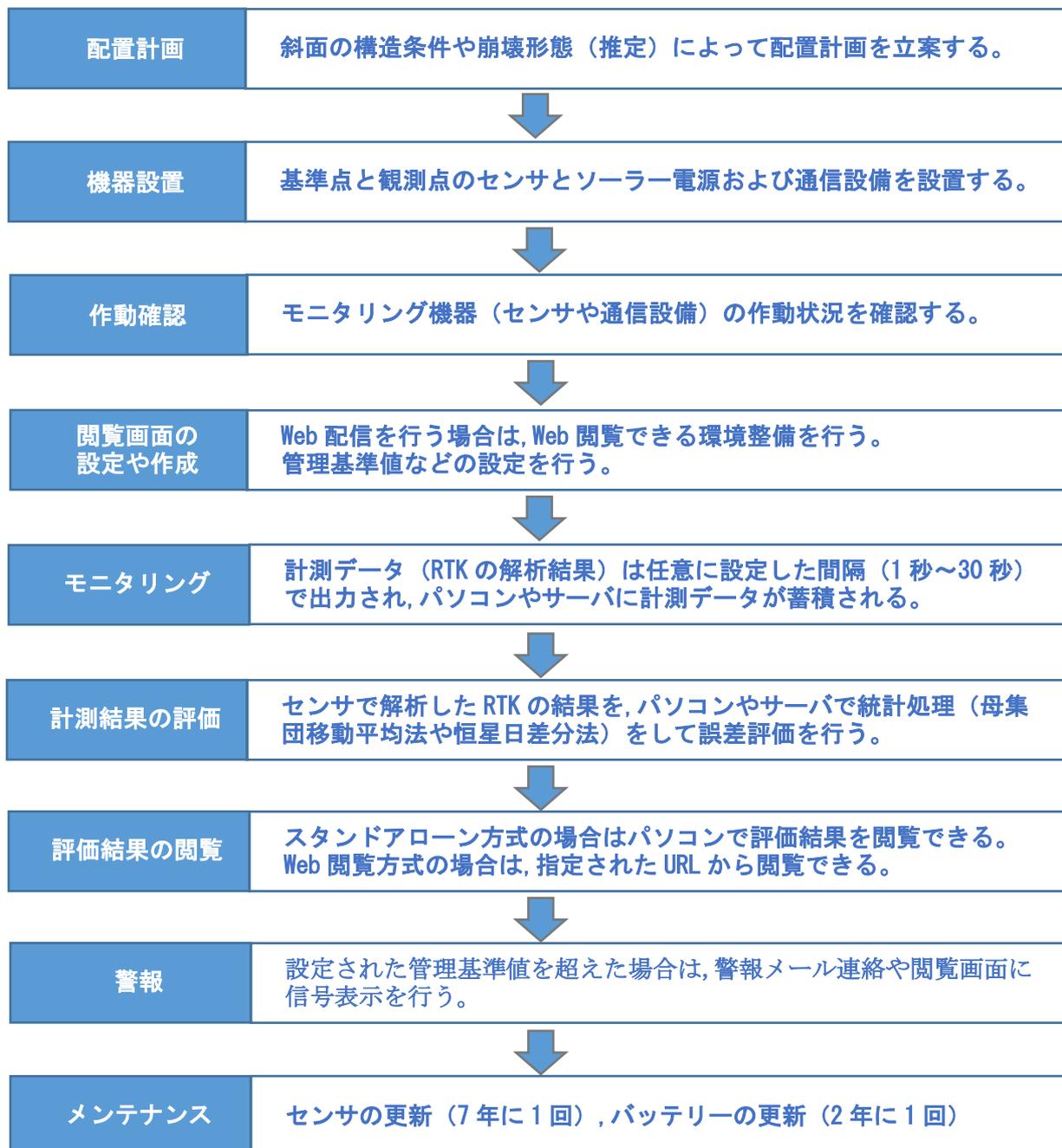


図 4.2.1 次世代衛星測位システムのモニタリング手順

4.2.2 配置計画

配置計画には基準点と観測点の配置計画があるので、それぞれについて説明する。

(1) 基準点の配置計画

基準点は、干渉測位の場合は計測上の不動点となる重要な点である。この基準点が何らかの影響により変位すると、計測点の正確な変位を求めることが難しいため、基準点の配置計画においては次のことに留意すべきである。

- 1) 基準点は不動地盤に設置する。地すべり範囲内や軟弱地盤，痩せ尾根，切土・盛土のり面には設置しない。
- 2) ビルなど構造物も温度変化により変形するので基準点の設置をさける。
- 3) 基準点は上空視界の障害のない箇所に設置する。GPS 計測では，基準点と計測点で同時に同じ GPS 衛星からの電波を受信する必要がある。

(2) 観測点の配置計画

観測点は，斜面の構造条件（平均勾配，高さ，幅）や地形・地質条件から想定できる斜面の崩壊形態によって配置センサ数や配置方法を決定する（センサの平均的な設置数は 1 斜面当り 7 か所：基準点 1 か所，観測点 6 か所）。

観測点のセンサでは基準点の情報をブロードキャスト方式で受信して，その基準点の情報と観測点の計測結果に基づいて RTK の解析を行い，その結果を特定小電力無線で通信アダプタに送信している。

特定小電力無線は 920MHz の電波を使用しているため，回折性が高く通信上の障害物があっても 500m～1km 程度は通信可能であるが，通信環境によって配置計画の変更や中継器を利用することが必要な場合もある。

4.2.3 機器の設置

センサの設置方法は，自然斜面と切土では設置方法が異なる。

(1) 自然斜面におけるセンサ設置方法

自然斜面上などでは安定性を考慮し，支柱となる単管パイプ打ち込み後に，3 点支持で補強してセンサを設置する方式が多い（図 4.2.2）。

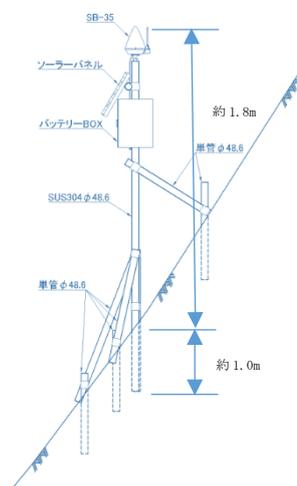


図 4.2.2 自然斜面におけるセンサ設置方法（3 点支持による補強）

(2) 切土におけるセンサ設置方法

切土では，小段のコンクリート上にケミカルアンカーボルトで固定した単管パイプにセンサを直接取り付け方式が多い（図 4.2.3）。

また，観測点を将来移動することなどを考えている場合は，測量用三脚を用いてセンサを設置する事例もある。

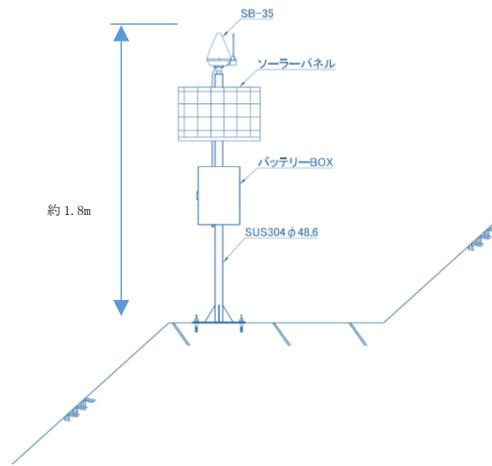


図 4.2.3 切土におけるセンサ設置方法（ケミカルアンカーボルト）

4.2.4 作動確認

観測点の RTK 解析結果がパソコンやサーバの指定されたフォルダに送信されているかを確認する。センサ数が多い場合は、設置前にデータ取得間隔（1 秒～30 秒）の設定をセンサ側で行う。

通信環境が悪くて観測点で基準点の情報が取得できない場合は、センサの特定小電力無線のアンテナを伸ばして対応する。

4.2.5 閲覧画面の設定や作成

パソコンや Web で計測結果を閲覧する際に、センサ設置背景図などのカスタマイズを行う。パソコンや Web で計測結果を閲覧する場合において携帯電話で計測データを転送する場合は、サーバの環境整備を行う。なお、Web 閲覧では指定した URL で ID とパスワードを入力することで閲覧が可能になる。

4.2.6 モニタリング

モニタリングは、4.1.2(2)の 3) 計測データの流れて述べたように、観測点のセンサで基準点の情報と観測点との計測情報に基づいて RTK の解析を行い、その解析結果を通信手段によってサーバに送信する。

なお、RTK の解析ではデータ量が多くなるため、センサ内で RTK 解析を行い通信への負荷を軽減している。

4.2.7 計測結果の評価

計測結果の評価は、4.1.2 の(3)統計処理方法で述べたように、母集団移動平均法と恒星日差分法によって RTK 解析の結果を誤差評価し斜面のリスク評価を行う。

リスク評価を行うに当たって管理基準値を設定する必要があるが、表 4.2.1 の地表面計測の管理基準値を準用して設定を行う事例が多い。

表 4.2.1 一般的な地表面計測の管理基準値

維持管理段階の管理基準値

計測区分と計測機器	対応区分	点検・要注意 又は観測強化	対策の検討	警戒・応急対策 通行止めの検討	嚴重警戒 通行止め
伸縮計	地表面の 変位速度	10mm以上/30日	5~50mm/5日	10~100mm/日	100mm以上/日
地中伸縮計					
光波測距儀					

出典：(財)高速道路調査会 (S63) ⁸⁾

注) GNSS の管理基準値は、伸縮計や光波測距儀の地表面の変位速度の基準値を準用している。

4.2.8 計測結果の閲覧

計測結果はパソコン画面またはブラウザ上で観測サイトにアクセスして ID とパスワードを入力すると閲覧することができる。

図 4.2.4 は Web 閲覧画面の一部の例であるが、センサー一覧画面、時系列グラフ (母集団移動平均法と恒星日差分法)、計測値一覧表 (母集団移動平均法と恒星日差分法)、変位ベクトル図などが閲覧可能である。

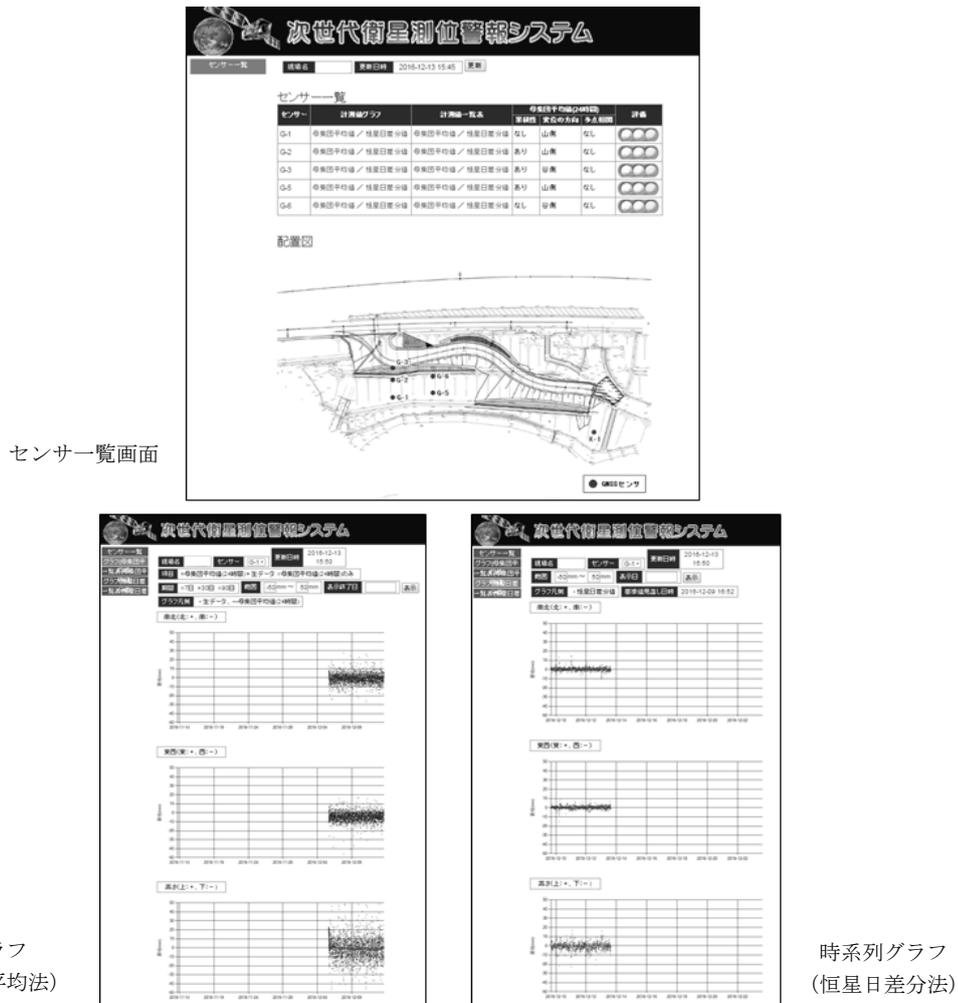


図 4.2.4 Web 閲覧画面の一部

4.2.9 警報

センサーが管理基準値を超過した場合は、指定されたユーザー (複数人設定可能) にメール通知をし、

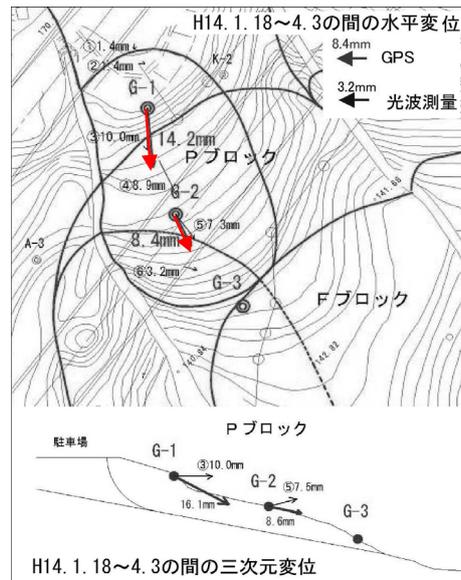


図 4.3.2 地すべり地での計測事例（表面変位とすべり面の関係）

参考文献, 参考資料

- 1) 武石朗・飯島功一郎・江川真史・室井翔太・横田聖哉・藤原優：衛星測位を利用した次世代地すべり検知システム，第 23 回 GPS/GNSS シンポジウム，測位航法学会，pp.132-136，2018
- 2) 藤原優・横田聖哉・武石朗・飯島功一郎・江川真史：RTK-GNSS による地盤変位計測の高速道路法面への適用性に関する検証，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 76, No. 1, 18-31, 2020
- 3) 武石朗・飯島功一郎・江川真史・横田聖哉・藤原優・田山聡：RTK-GNSS による地盤変位計測システムについて（山陽自動車道での実証実験），第 54 回地盤工学研究発表会，地盤工学会，0042，2019
- 4) 藤原優・横田聖哉・久田裕文・武石朗・飯島功一郎・江川真史・室井翔太：RTK-GNSS を用いた常時における法面変位の計測値と管理基準値に関する分析，第 54 回地盤工学研究発表会，地盤工学会，0043，2019
- 5) 奥村欣司・宗形和洋・栗田広夫・永井宏・横田聖哉・武石朗：RTK-GNSS による地盤変位計測システムを用いた斜面監視についての一考案，第 54 回地盤工学研究発表会，地盤工学会，0044，2019
- 6) 村上豊和・殿垣内正人・井上幸一・小西貴士・松本修司・田山聡：新名神高速道路における大阪北部地震時のモニタリング結果の考察，第 54 回地盤工学研究発表会，地盤工学会，0045，2019
- 7) 馬場俊行・増成友宏・武石朗・中里裕臣・吉迫宏・紺野道昭：林間地における GPS による地すべり地表変位観測手法の開発，日本地すべり学会誌，vol. 55, No. 2, pp.15-21, 2018
- 8) 岡本修・安田明生・浪江宏宗：RTK-GPS の地すべり計測への適用に関する実験的研究，日本測量協会 応用測量論文集 Vol. 9, pp. 55~62, 1998
- 9) shamen-net 研究会：知っておきたい GPS/GNSS のはなし，土木工学社，2012
- 10) 日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針，2009
- 11) 国土交通省 道路局：道路土工構造物点検要領，2017
- 12) 高速道路調査会：地すべり危険地における動態観測施工に関する研究（その 3）報告書，1988
- 13) 榎高速道路総合技術研究所，国際航業（株）：のり面変位の観測手法に関する共同研究報告書，2016

5章 マルチ GNSS によるのり面・斜面の安定性評価モニタリング

5.1 技術の概要

5.1.1 目的

マルチ GNSS によるのり面・斜面の安定性モニタリング技術は、維持管理サイクルにおける管理者のニーズに応じて、3次元で高精度の Static 変位モニタリングを行うことにより、微細な変位の段階からのり面・斜面の挙動をモニタリングし、モニタリング手間の省力化、効率化、高度化を図り、適切な対策の実施に資するものである。図 5.1.1 に示すように、利用シーンは変位が懸念される状態から崩壊に向かって変位が加速する第三次クリープの直前まで長期にわたる。

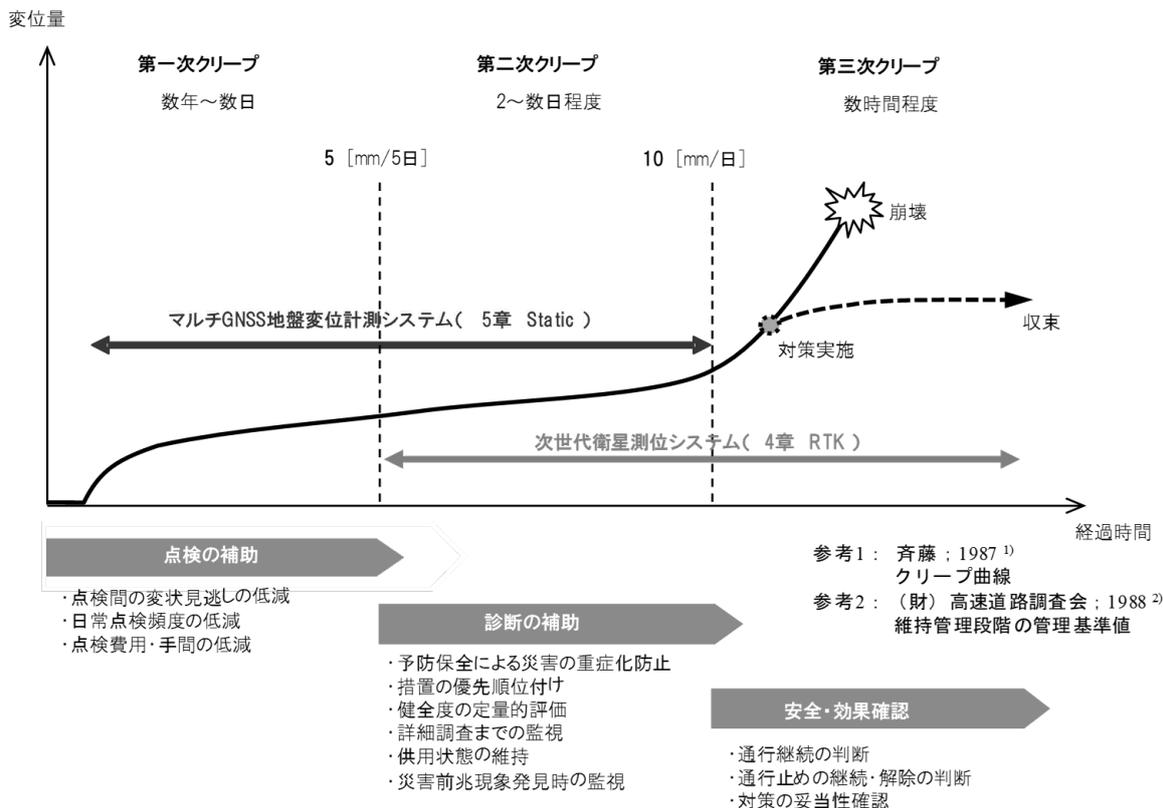


図 5.1.1 マルチ GNSS によるのり面・斜面モニタリングの利用シーン

5.1.2 マルチ GNSS によるモニタリング手法の概要

(1) 本手法の特徴

従来の伸縮計やトータルステーション、測量用 GNSS 機器を用いた変位モニタリング手法と比較すると以下の特徴がある。

- ① システムの低コスト化
- ② マルチ GNSS (GPS [米国] のほかに準天頂衛星システム [QZSS : 日本版 GPS] や GLONASS [ロシア版 GPS] など) に対応したことによる計測可能エリアの増大
- ③ 自立電源、無線通信の採用による設置作業の簡便化
- ④ 高頻度計測による変状把握の迅速化
- ⑤ メンテナンスフリーであることによるランニングコストの低減

一方、樹木によって上空の視界 (以下、上空視通と称す) が十分でない場合、正確な変位計測が

実施できないことに留意する必要がある。

(2) 手法の概要

マルチ GNSS によるモニタリングのフローを図 5.1.2 に示す。

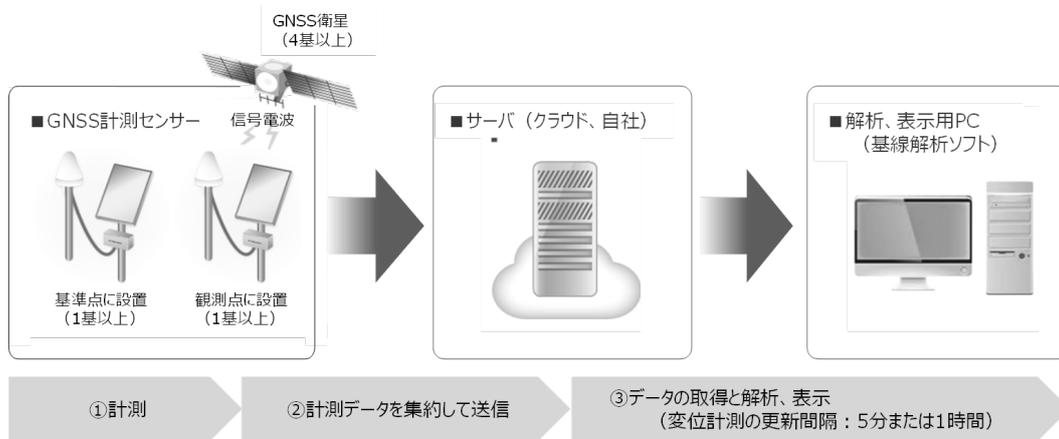


図 5.1.2 マルチ GNSS モニタリングのフロー

- 1) 基準点および観測点において、共通の 4 基以上の衛星からの信号電波を受信
モニタリング対象のり面・斜面に応じ、適切に計測センサを配置する。
- 2) 基線解析により計測点の変位を自動算出
5 分ごとに 1 時間セッションの基線解析を実施する (図 5.1.3)。
ローパスフィルタ、トレンドフィルタ³⁾等の誤差処理を適用する (図 5.1.4)。
- 3) 管理基準値との比較
計測結果が算出されるたびに、管理者があらかじめ定めた変位速度や変位量の管理基準値と比較する。
- 4) 警報発報
管理基準値を超過した場合、関係者にメール通知する (図 5.1.5) ことや回転灯を点灯させて、
周囲に知らせることができる。

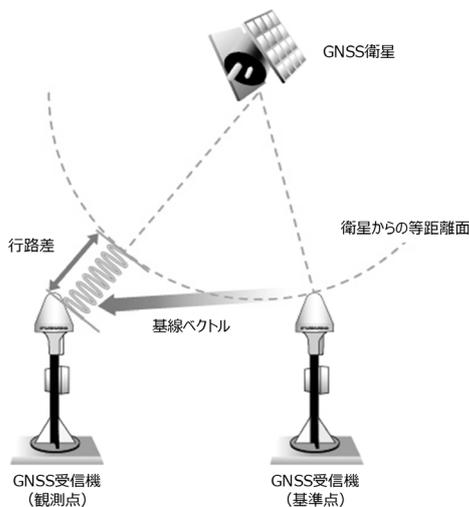


図 5.1.3 基線解析の概念図



図 5.1.5 メール通知の例

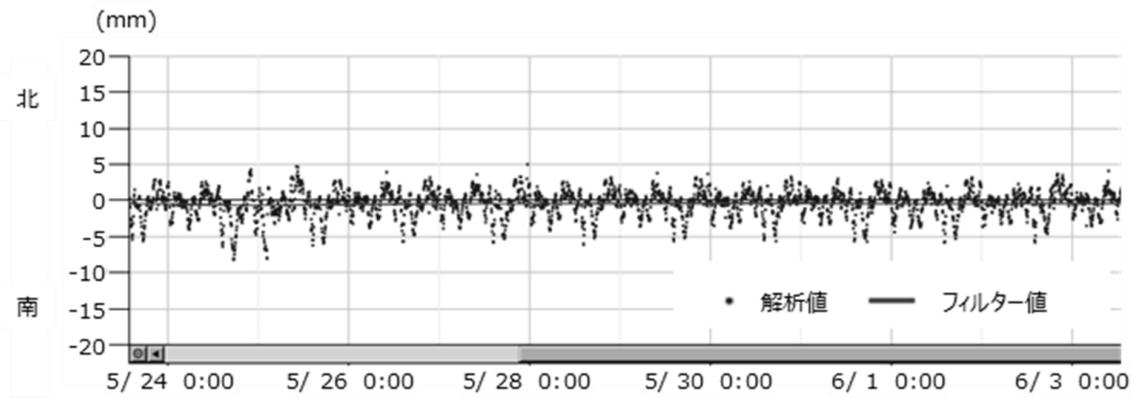


図 5.1.4 基線解析データの誤差処理例

(3) 観測点

のり面・斜面において、変位量を計測するポイントであり、想定される災害の種類や規模、計測したい変位などを総合的に判断して配置する。

(4) 基準点

基線解析は基準点位置が不動のものとして座標を与え、この座標をもとに計測点の座標を求め、初期値からの移動量を変位量とするものである。このため、基準点に変位してしまうと、計測点で求められる変位量には基準点の変位と正反対の動きが加わり、正しい変位量を把握することが困難となる。このため、後述するように基準点の選定には細心の注意が必要である。

5.1.3 点検業務サイクルにおけるマルチ GNSS によるモニタリング技術の適用範囲

マルチ GNSS によるのり面・斜面の安定性モニタリング技術の適用範囲を図 5.1.6 に示す。

主な適用範囲は以下である。

- ① 予防保全段階における目視観察困難箇所でのモニタリング。
- ② 早期措置段階において対策実施優先度の低い箇所でのモニタリング。
- ③ 緊急措置段階や災害発生時、補修・補強時における安全性のモニタリングや対策工の効果確認。

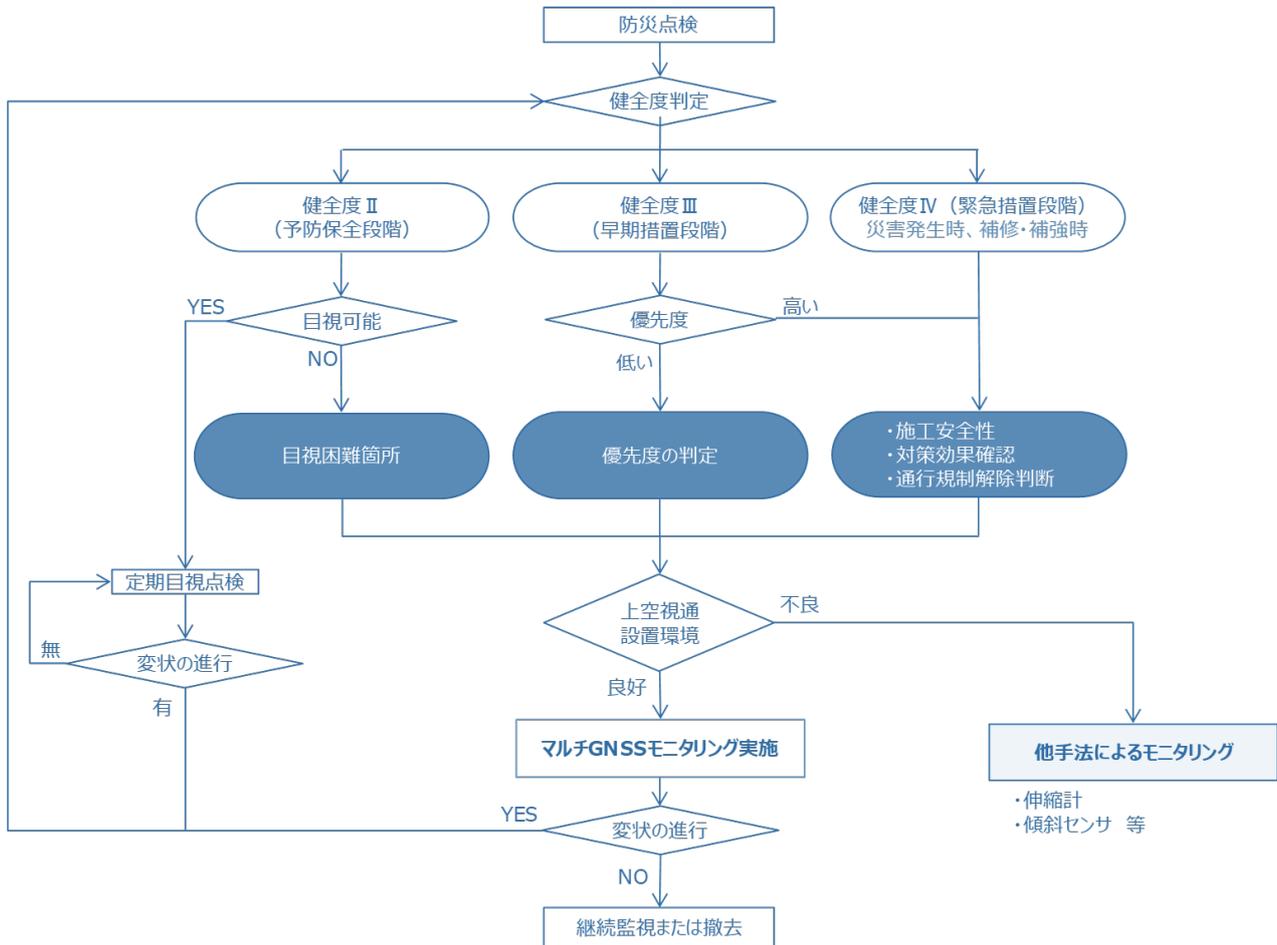


図 5.1.6 マルチ GNSS モニタリングの適用範囲

5.2 マルチ GNSS モニタリングの方法

5.2.1 マルチ GNSS モニタリングの手順

マルチ GNSS によるモニタリングの基本的な手順を図 5.2.1 に示す。

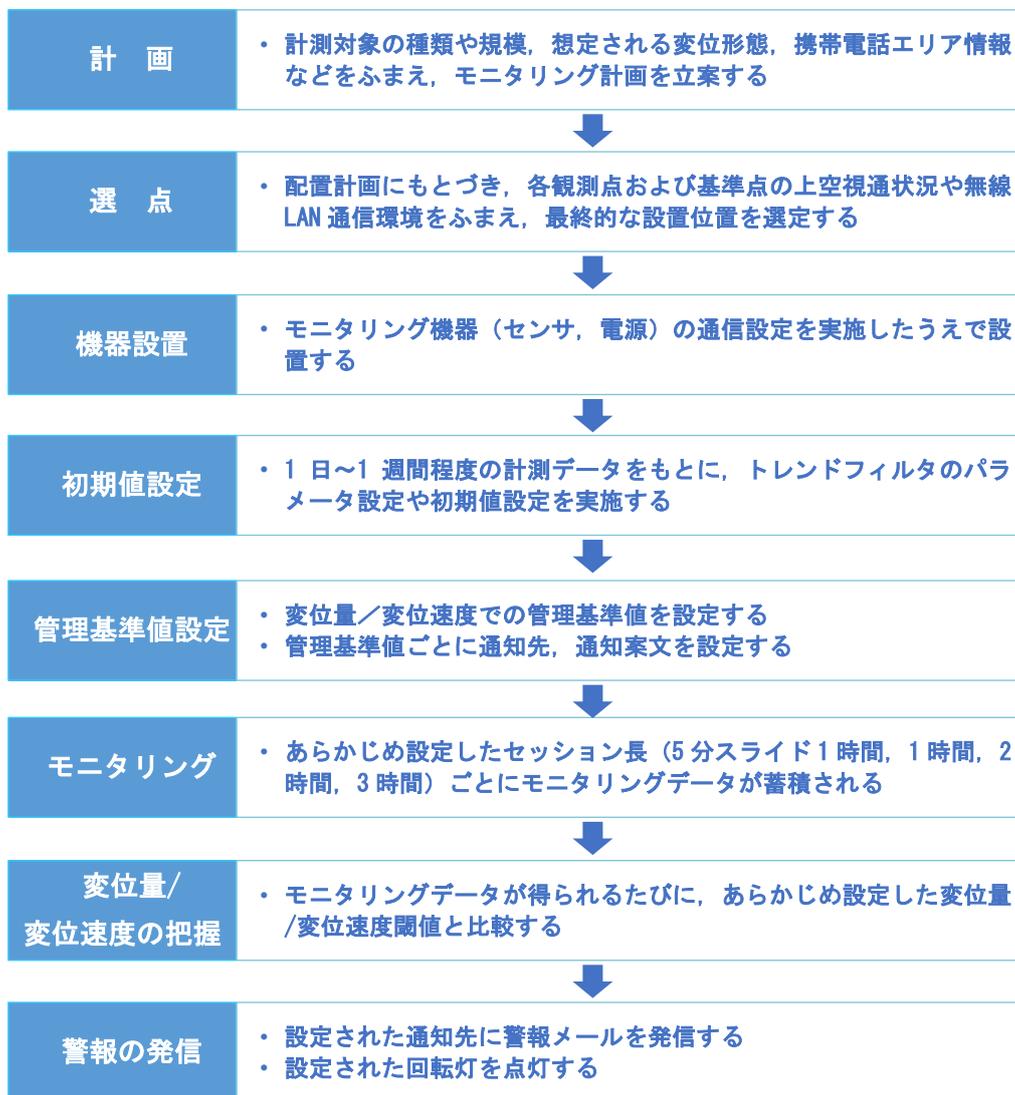


図 5.2.1 マルチ GNSS モニタリングの手順

5.2.2 計画

(1) 観測点の配置計画

観測点は, 観測対象にあわせ, 適切な配置を計画する。あらかじめ変動ブロック等がわかっている場合, 斜面全体で変動有無を確認したい場合, などにより, 配置台数は異なる。また, 全体の数量により費用も上下することから, 費用対効果に見合う適切な数量を決定する。

(2) 通信ネットワーク計画

本システムは現場内のデータ通信に 2.4GHz 帯の無線 LAN を利用する。現場からインターネット間のデータ通信は基本的に携帯電話通信を利用する。計画にあたっては携帯通信サービスの範囲内かどうかを確認する必要がある。サービス範囲外の場合, フレッツ光や ISDN などの有線回線が利用可能か確認する。インターネットへの接続ができない場合は, 現地で定期的にデータ回収する (リ

アルタイム性は失われる)。基準点や観測点の配置計画の後、通信経路を設計することが必要である。現場からインターネットに接続する回線集約器に対し、各点に設置する GNSS センサから無線 LAN で接続する。もし、見通しが取れないなど直接通信ができない場合、中継器を利用する、複数の回線集約器を設置する、などにより不通の解消を図る。なお、中継器、回線集約機は GNSS センサ機能を内蔵しており、配置を工夫することで、機器数量を減らしたり、観測点を増やすことが可能である。

5.2.3 基準点、観測点の選点

(1) 共通条件

1) 上空視通

GNSS モニタリングでは上空 2 万 km (準天頂衛星は 3.6 万 km) の衛星軌道を周回する衛星からの電波を受信、解析している。また、衛星からの電波は微弱であるため、樹木の枝葉や鉄、コンクリートなどで遮断される。そこで、基準点、観測点の上空でいかに障害物を少なくするかが重要である。

基準点、観測点とも仰角 30° 以上がクリアであれば概ね十分である。なお、北側については、図 5.2.2 に示すように、GPS、QZS とともに衛星が飛来しないエリアがあるため、仰角 60° 程度以上がクリアであればよい。

上空視通が劣悪である場合、周囲の樹木の伐採、枝払いにより改善を図る方法のほかに、計画位置から多少位置をずらして上空視通の良好な場所に移動させることも、良好な結果を得るために有効な方法である。

2) 周辺障害物

基準点、観測点の周囲に障害物がある場合、誤差要因となるマルチパスの発生源ともなるため、極力これらから離れた位置が望ましい。障害物となるものは、構造物や建築物などであり、材質によって信号電波を強反射することが懸念される。

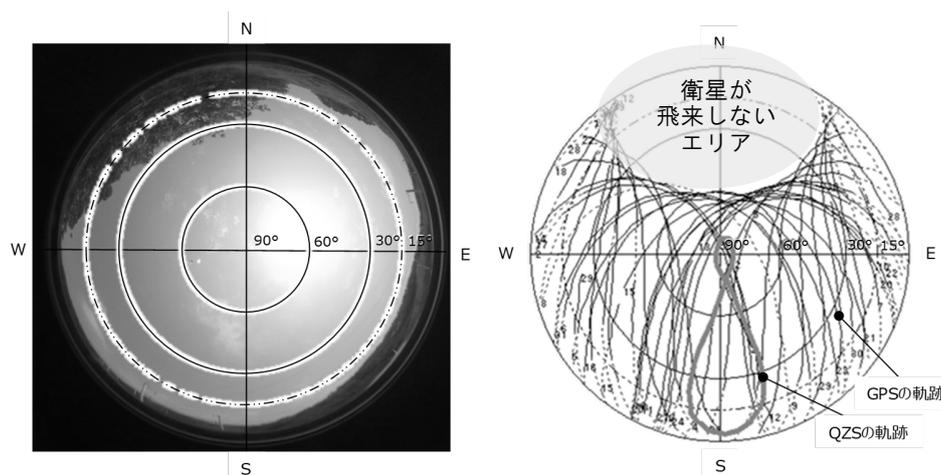


図 5.2.2 上空視通状況写真と GNSS 衛星軌道の例

(2) 基準点

以下の観点で基準点を選点する。

1) 不動性

① 安定岩盤上

最も好ましいが、露岩など、まれに巨転石などを誤認する場合があるので注意する。

② 軟弱地盤でない平坦地

軟弱地盤では沈下による影響が懸念されるため、橋梁の橋台部など沈下しないものに設置する。

③ コンクリート構造物

長大構造物の場合、夏冬の熱膨張・収縮の影響を受けることが懸念される。

2) 各観測点と共通の上空視通

基線解析は観測点と基準点の双方で共通の衛星を観測することが必須である。各観測点と基準点の上空視通の条件が一致することが望ましい。基準点では可能な限り上空を遮蔽する障害物がない状態が望ましいが、基準点と各観測点とで共通する上空視通の全箇所分を極力カバーできる上空視通が得られる地点を選定することが必要である。

3) 第二基準点

基準点の不動性が確実にない場合、あらかじめ基準点の変位を点検するために第二基準点を設けることが望ましい(5.3.(2)参照)。また、基準点と観測点で著しく上空視通が異なる場合(例えば、V字谷の左右岸それぞれに観測点がある場合、それぞれの上空視通は大きく異なり、1点の基準点のみですべての観測点と共通の上空視通をカバーすることは困難である)、第二基準点を設置して基線解析を分担することが有効である。

(3) 観測点

想定される変状種別や規模などを総合的に判断して配置される。選点方法としては、以下の二種類に大別される。

1) あらかじめ主測線、副測線が設定されたケース

主測線および副測線上に規模に合わせて1～数点配置する。

また、変位エリアの拡大を監視するため、変動域外上部や側方部などに配置することも有効である。

2) グリッド状に設置するケース

変動域や移動ブロックが明瞭でない場合、グリッド状に配置することがある。この方法では、等高線に沿って配置する方法や水平方向、鉛直方向に数列ずつ配置する方法などがある。計測対象エリアの大きさによっては、点数が多くなるのが想定され費用の増大につながるため、極力、地形や地質条件をふまえ、1)の方法で選点することが望ましい。

(4)回線集約器

各観測点のデータを3G携帯回線や有線LANを用いて、FTPサーバにデータを転送する装置であり、すべての観測点や中継点から見通しが得られる位置に配置する。回線集約器は観測点機能も有するため、現場内で各点との見通しが得られる観測点または基準点にこれを使用する。基準点が観測エリアと離れるケース、観測点のいくつかが離れるようなケースでは、見通しの得られるエリアごとに回線集約器の配置が必要である。回線集約器と次に述べる中継器の配置イメージを図5.2.3に示す。

(5)中継器

観測点から回線集約器が見通せない場合、中継器を介して、データを回線集約器に転送する。中継器は観測点とは別に適切な位置に配置してもよいが、回線集約器と同様に観測点としての機能を有するため、最短距離で結ばなくても、適当な観測位置に中継点を配置することで、全体費用を抑えることができる。

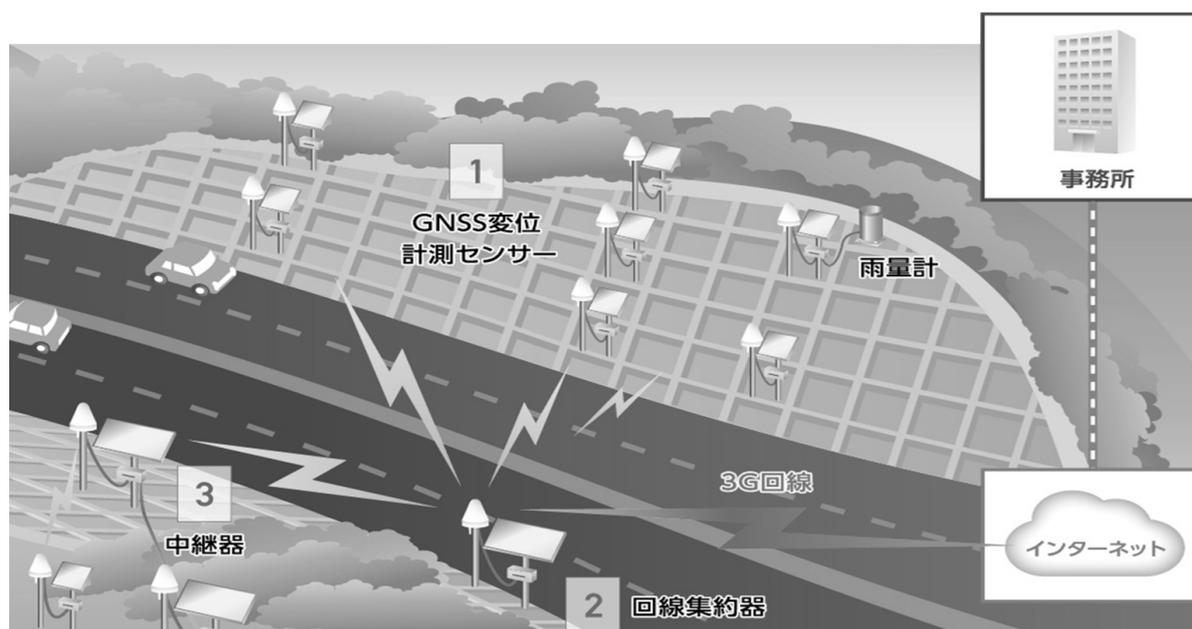


図 5. 2. 3 マルチ GNSS モニタリングシステムを構成する各機器の配置イメージ

5.2.4 機器の設置

基本的には、GNSS センサがおよそ 1~1.5m の高さとなるよう、支柱を設置し、GNSS センサを取り付ける。図 5.2.4 に示すように、

- ① 単管または杭単管を打ち込み、支柱を連結し、クランプ等の遊びによるブレ防止のためのサポート支柱を取り付ける方法
 - ② コンクリート基礎を製作し、その上に支柱を設置し、GNSS センサを取り付ける方法
- の 2 つに大別される。そのほか、構造物に設置する場合には、その形状に合わせて設置方法を都度設計する。

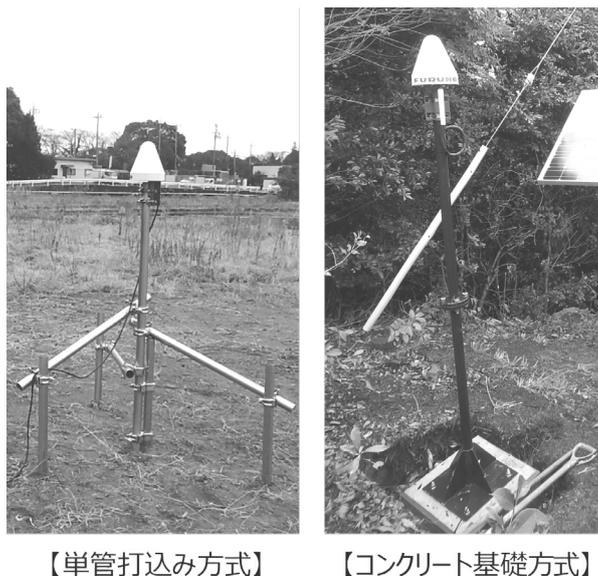


図 5.2.4 機器の設置例

5.2.5 初期値設定

(1) 基線の設定

変位モニタリングを行う観測点と基準点のペア（基線）を作成する。第二基準点がある場合、すべての観測点とペアを作成する、もしくは、精度が良くなる基準点とのペアを作成する。

(2) 初期値設定

変位量の初期値（グラフの原点）をゼロ 0 とするため、観測開始後、1~数日間のデータを平均するなどして、初期値を設定する。すでに変動が出ている場合には、最初の計測値がゼロとなるよう設定する。

(3) ベクトル図設定

基線解析で求められる各時刻の座標 (X,Y,Z の 3 成分) の変位グラフでは、各観測点の動きが直感的に把握しにくい。このため、平面図や断面図上に変位ベクトルを表示したほうがわかりやすい (図 5.2.5)。あらかじめ、現場全体や観測エリア毎の平面図、断面図の画像ファイル (PNG,BMP,JPG 形式) を準備し、ソフトウェアに読み込んだ上で、各観測点をプロットして設定を行う。

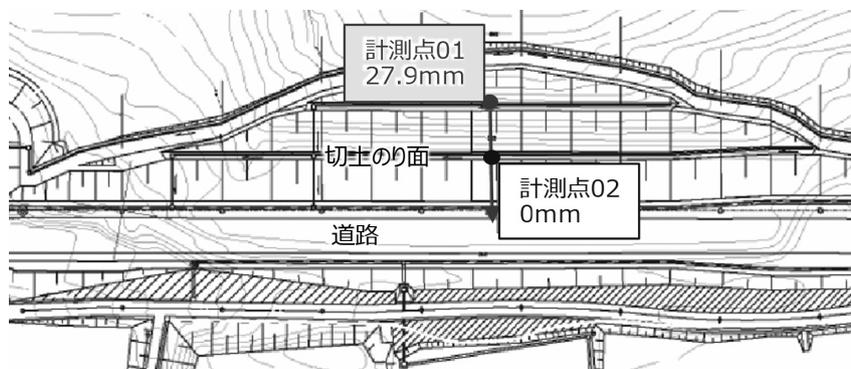


図 5.2.5 変位ベクトル図の例 (平面図)

5.2.6 管理基準値の設定

GNSS 計測による管理基準値として定められているものはほとんど無い。一方、地表面伸縮計や傾斜計などは、これまでの実績や災害時の計測事例等をもとに、いくつかの管理基準値が提唱されている。GNSS 変位計測は観測点の変位量 (移動量) を 3 次元で計測するものであり、計測対象は地表面伸縮計と類似している。そこで、GNSS 変位計測における管理基準値としては、地表面伸縮計による基準値を準用するケースが多い。GNSS モニタリングにおいて三次元で得られる変位量は、ワイヤ伸張方向の伸縮として一次元で記録される地表面伸縮計の変位量と比較し、より大きく把握されるため、当該管理基準値を用いることは、変位に対して安全側の判定であると言える。

表 5.2.1 管理基準値の例

計測機器	対応区分	点検・要注意 または観測強化	対策の検討	警戒・応急対策 通行止めの検討	嚴重警戒 通行止め
	伸縮計 地中伸縮計 光波測距儀	地表面の 変位速度	10mm 以上/30 日	5~50mm/5 日	10~100mm/日

出典：(財) 高速道路調査会 (1988) ²⁾ 維持管理段階の管理基準値

5.2.7 モニタリング

GNSS モニタリングは、無人観測による 24 時間 365 日の運用が可能である。

事務所に設置された PC の基線解析ソフトウェア画面、または、インターネットに接続された PC のブラウザ上で、観測サイトにアクセスし、管理基準値超過の有無や観測機器の設置環境の状態変化などに着目して確認できる。

5.2.8 変位置/変位速度の把握

(1) 変位置

変位の大きさとともに、ベクトル図などで変位の方向を確認できる。確認のポイントは、その計測点で予想される変位に対してどのような変位か（上下方向卓越、他に影響された変位、等々）である。近傍に複数の計測点がある場合、それらの計測点における変位状況も確認する。もし、1箇所のみ変位している場合、ありうる変位かどうかを検討する必要がある（5.3(1)参照）。

(2) 変位速度

管理基準値として示されているものはほとんどが変位速度であり、最新値と単位時間前の計測値との差が変位速度となる。通常、いくつかの変位速度が設定されることが多く、変位が徐々に加速する状況で順番に基準値を超過するケースと突発的な変位により一度に複数の管理基準値を超過するケースとがある。

各々の管理基準値に対応して、点検実施や避難検討などのとるべき対応が定めることが多いので、これに基づき必要な対応を実施する。

5.2.9 警報の発信

(1) 警報メール

基準値超過などの注警報を関係者へ確実に通報するためには、eメールの利用が一般的である。管理基準値の超過時や機器の不具合（一定時間以上データ回収できない、バッテリーの電圧低下等）時に、あらかじめ指定した宛先に警報メールを発信することが可能である。

(2) 回転灯

インターネット上のメールサーバに接続して、上述の警報メールのタイトルや本文中のキーワードに反応して回転灯が点灯し、警報音が鳴動して発報するタイプの機器があり、これらは現地での利用も可能である。

(3) Web 閲覧

情報の共有化のため、複数の担当者が同じ変位ベクトル図や変位置グラフを参照できることが望ましい。本システムでは、PC画面へのリモートアクセスといった簡便な方法からクラウドサーバを用いたWeb共有まで、いくつかの方法で実現可能である。

5.2.10 機器等の保守

(1) 機器の保守

GNSS センサは GNSS 衛星からの電波を受信するアンテナであり、定期的なメンテナンスやキャリブレーションは特に必要がない。太陽電池とバッテリーを主電源とする構成では、定期的に太陽電池の表面の汚れ除去、容量低下に伴うバッテリーの更新（2年に1回程度）が必要である。

(2) 計測環境の保守

各点の選点の際に必要な条件となっている上空視通および無線 LAN 視通について、植生の成長などにより当初確保されていた視通が悪化することが多い。1年に1回程度は観測点周辺や無線 LAN 通信経路を確認し、必要に応じて植生の伐採、枝払いを実施する。

(3) 機器の更新

マルチ GNSS 計測システムは、バッテリー以外の消耗部品がないため、長期間の運用が可能であり、設置後6年程度（10年以上の稼働実績もある）の稼働が期待できる。動作環境温度など計測環

境に大きく依存するが、機器更新の目安としては、使用している電子部品の信頼性低下等を鑑み、6年程度で換装を実施することが望ましい。

5.3 計測結果の評価

(1) 地盤の変位

変位を確認する際は、変位量だけでなくベクトル図などで、変位方向も併せて確認し、変位の特性を把握する。観測エリア内の一部の観測点で変位が発生している場合や鉛直方向に変位が上向きとなっている場合、懸念される本来の変位発生ケースだけでなく、動物の接触などによる、地盤とは無関係の変位を捉えている可能性もあるため、周辺の観測点の変位状況（変位発生時刻や変位方向 等）をふまえ、判断することが望ましい。また、変位の方向が想定される方向と異なる場合、基準点の変位（5.3.(2)）や支柱の傾斜などが疑われるため、慎重に検討する必要がある。

(2) 変位と見誤る見かけの変位

1) 基準点の変位

基準点は不動性を第一に選点するが、まれに基準点が変位することがある。図 5.3.1 に基準点変位の点検フローを示す。第二基準点、電子基準点などから点検し、基準点の変位が確実な場合、基準点の移設を実施する必要がある。

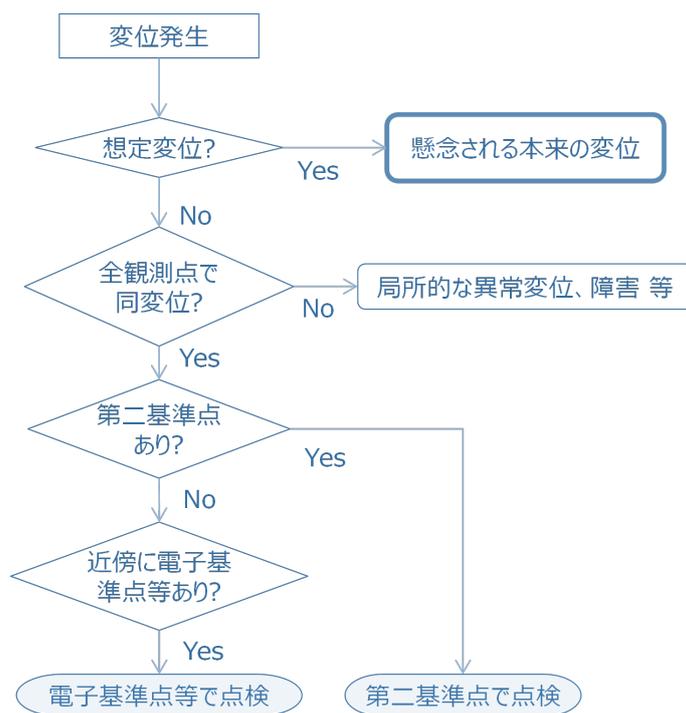


図 5.3.1 基準点変位の点検フロー

2) 対流圏遅延の影響による見かけの変位

各計測点と基準点とで標高差（比高）が大きなケース（数 10m 以上）では、大気中の水蒸気量の差による信号電波の遅延の影響により、高さ方向に見かけの変位を生じることがある。

この対策としては、基線解析処理の際に、大気中の水蒸気量を考慮すればよいが、現地の水蒸気量をリアルタイムかつ正確に把握することは困難であり、近隣の気象官署における観測データ（気

温，気圧，相対湿度）を基線解析時に与えるか，近隣の気象官署の観測データからあらかじめ求めた月ごとの平均値を与えることで，補正が可能である。

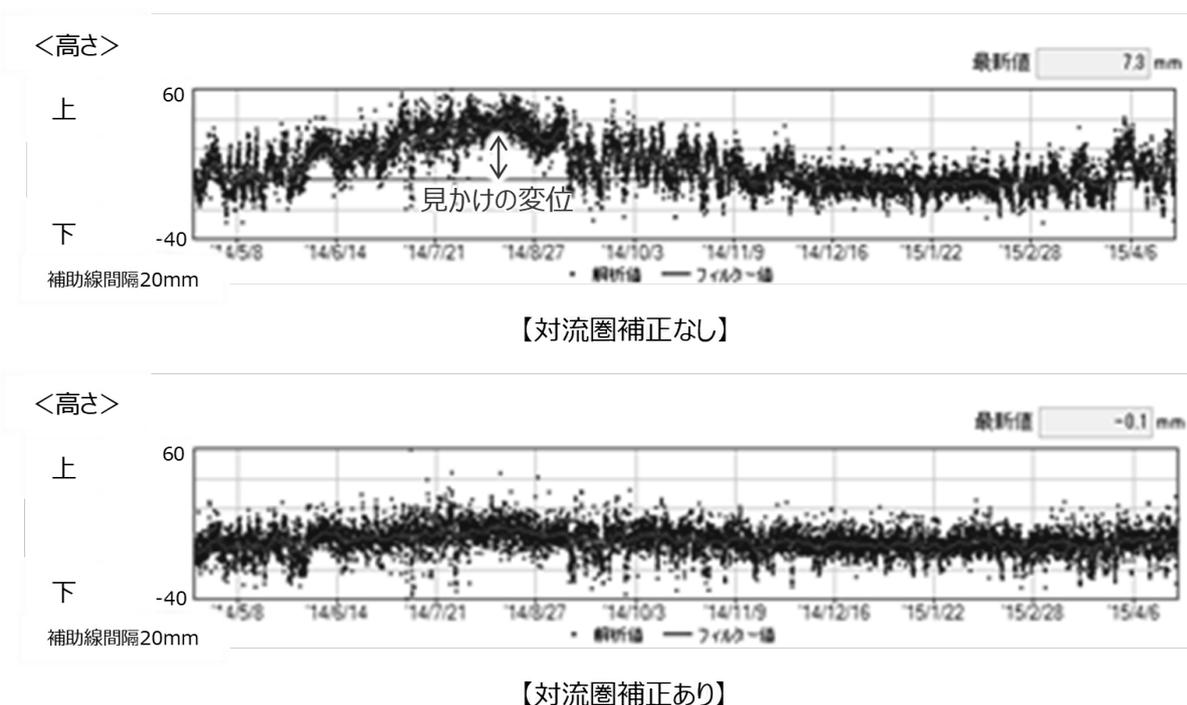


図 5.3.2 対流圏補正の有無による Z 方向変位の差

3) 計測環境の変化による見かけの変位

観測点や基準点の周辺が植生で囲まれている場合，短期的には春～秋にかけての枝葉の繁茂期と冬季の落葉期で，長期的には樹木の成長により，上空視通の開度の変化が，見かけの変位として現れることがある。枝払いや伐採による上空視通の維持が必要となる。

このような上空視通の変化による見かけの変位発生は，各点の近傍に構造物が建設/撤去されるなどによっても生じることもある。この場合，見かけの変位がなくなるよう計測結果にオフセットをかけるなどの対策が有効である。

また，マルチ GNSS モニタリングシステムでは，無線 LAN 通信を用いているため，通信電波の伝播経路上でも上空視通状況と同様の問題があり，無線 LAN 電波強度や欠測状況等を把握しながら，適宜，植生伐採等の対応が必要である。

参考文献

- 1) 斉藤迪孝：斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について，地すべり，Vol. 24, No. 1, pp30-38, 1987
- 2) 財団法人 高速道路調査会：地すべり危険地における動態観測施工に関する研究（その 3）報告書，1988
- 3) Shimizu et al：ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS)，Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 47, No. 1, pp313-328, 2014, など.

6章 落石危険度振動調査法による岩塊の常時モニタリング

6.1 技術の概要

6.1.1 目的

落石災害は、過去の被災事例からすると社会的な影響が非常に大きい。そのため、点検等により落石に対する対策や監視が必要と判断された岩塊については、被害を未然に防ぐためにあらかじめ予防施設や防護施設を設置することが望まれる。しかしながら、現地条件や気象条件等により岩塊へのアクセスに困難が伴う場合や、対策を実施するための予算的制約、人的制約、他の事象との優先度などにより岩塊に対する早期の対策が困難な場合もある。その際には、岩塊について短期的な安定性が保たれているかを監視する必要がある。これらの背景から、岩塊の常時モニタリングによって継続的に落石の安定性が保たれているかを監視する手法は、潜在的なニーズがあると想定される。

本技術は、既往の技術である落石危険度振動調査法¹⁾を活用し、通信機器等のシステムを用いて岩塊をモニタリングするものである。岩塊の安定性の変化を定量的に遠隔地から継続的に監視できる技術であり、対策工の適切な実施時期の判断や、工事中の安全管理等で使用できる技術と考えられる。

6.1.2 システムの概要

(1) システムの構成

岩塊の常時モニタリングに活用される落石危険度振動調査法は、岩塊およびその基盤部に振動計を設置し、計測された岩塊と基盤部の振動特性の相違から岩塊の安定性を評価するものである。岩塊の常時モニタリングは、以下に示す機器等を使用して岩塊の振動特性を常時計測し、人が現場に行く事なく遠隔地で岩塊の安定性を常時監視する事が可能となる技術である。必要な機器については、岩塊がある現場に設置する機器と、管理事務所等の遠隔地に設置する機器に大別される。現地設置機器の模式図を図 6.1.1 に示す。

機器は、対象とする岩塊の浮石部とその基盤部に設置する 3 成分振動計と、その近くに設置し信号を増幅するプリアンプ、増幅した信号を送信システムで伝送する専用のケーブルなどで構成される。なお、振動源は自動車等の雑振動を用いる。

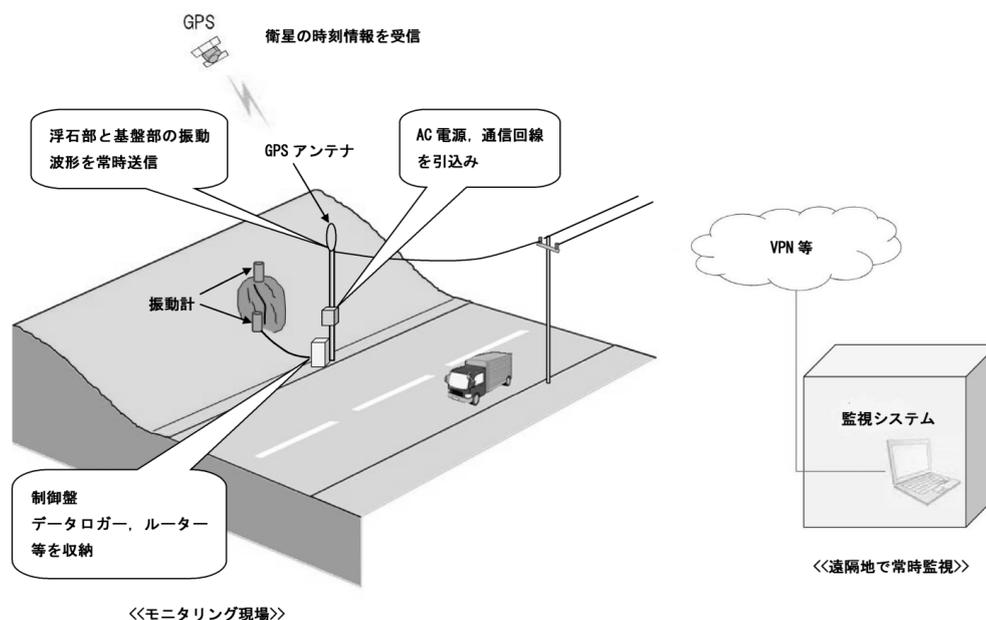


図 6.1.1 現地設置機器模式図

1) 現地設置機器

現地に設置する主な機器を以下に示す（図 6.1.2～6.1.4）。

① 速度型 3 成分振動計

- ・固有周波数：14Hz
- ・測定方向：3方向（水平2，上下1）
- ・減衰定数：0.6

② プリアンプ

③ 制御盤および送信システム

④ その他（電源施設，ケーブル等）



図 6.1.2 速度型 3 成分振動計



図 6.1.3 プリアンプ収納 BOX



図 6.1.4 制御盤収納 BOX
および送信システム

2) 遠隔地設置機器

遠隔地に設置する主な機器を以下に示す（図 6.1.5）。

- ① 収録・分析用パソコン
- ② 受信サーバ



図 6.1.5 収録・分析用パソコンおよび受信サーバ

落石危険度振動調査法は、岩塊の浮石部と基盤部の振動特性の相違により、岩塊の安定性の評価を行う調査法であり、具体的には基盤部に対する浮石部の揺れの大きさを示す RMS 速度振幅比と、

浮石部の揺れの速さを示す卓越周波数，および揺れの収まりやすさを示す減衰定数との関係から岩塊の安定性を評価する。

RMS 速度振幅比・・・振幅比（基盤部に対する浮石部の揺れ易さ）が小さい場合 → 浮石部は安定
振幅比（基盤部に対する浮石部の揺れ易さ）が大きい場合 → 浮石部は不安定

卓越周波数・・・周波数が高い（揺れの速さが大きい）場合 → 浮石部は安定
周波数が低い（揺れの速さが小さい）場合 → 浮石部は不安定

減衰定数・・・値が大きい（揺れが収まりやすい）場合 → 浮石部は安定
値が小さい（揺れが収まりにくい）場合 → 浮石部は不安定

6.1.3 点検業務サイクルにおける岩塊の常時モニタリングの適用場面

落石調査は、不安定岩塊の抽出から始まり、危険度の分類、対策工の検討と進められる。その中で、岩塊の常時モニタリングは、目視では安定性が不明であるが、落下した場合に被害が予測され、監視が必要な場合や、アクセスが困難、対策工の費用がかさむなど、早期の対策工実施が困難な場合に運用されることを想定している。

まずは斜面に点在する浮石・転石等の抽出から始め、目視による安定性評価を行う。小規模な落石で岩塊自体の除去や、対策が容易な場合は監視の対象外とし、早期の対策が困難な場合に岩塊の常時モニタリングを実施する。岩塊の常時モニタリングの適用場面について、図 6.1.6 に示す。

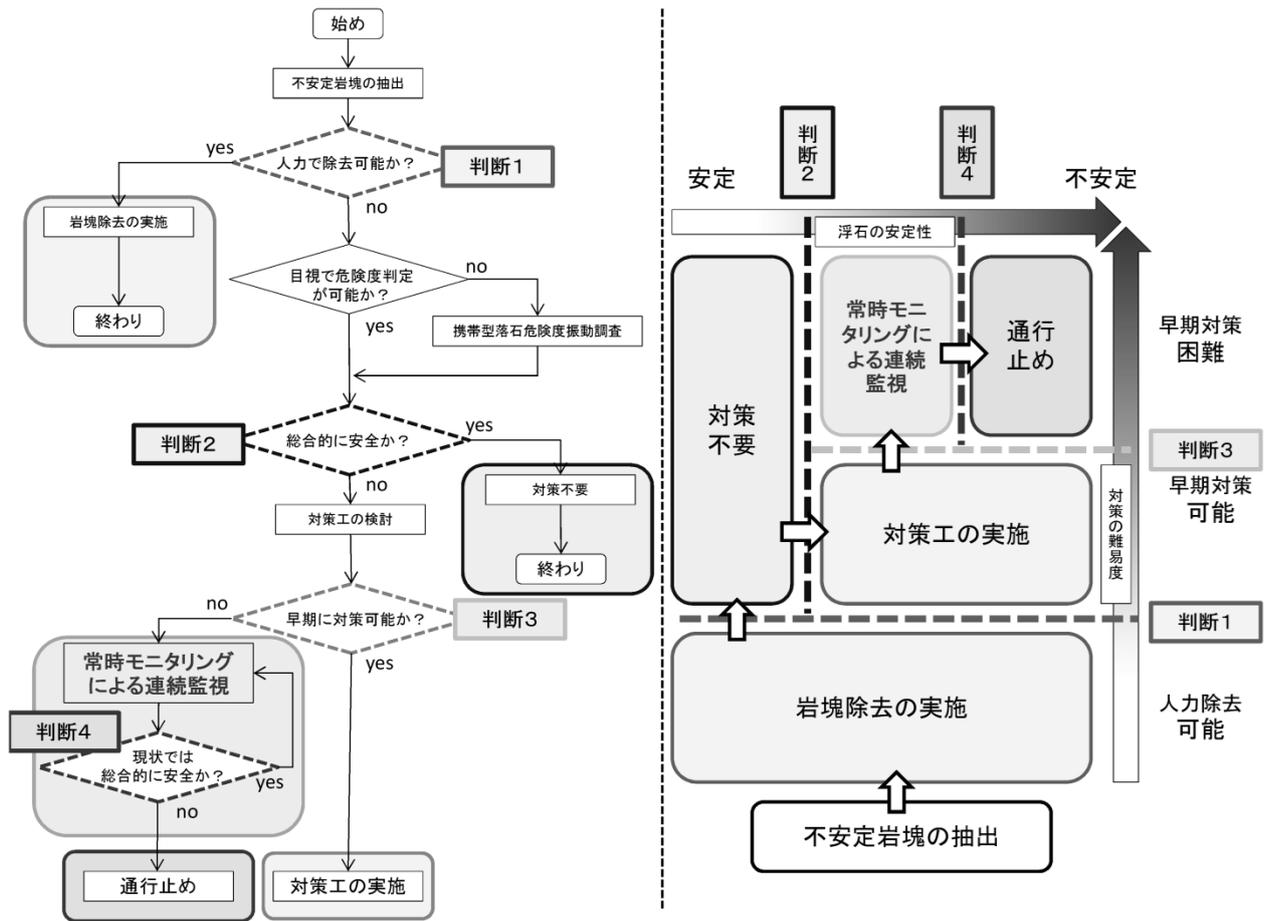


図 6.1.6 モニタリング技術の適用場面

6.2 モニタリングの手法

6.2.1 モニタリングの手順

岩塊の常時モニタリングの基本的な手順は、図 6.2.1 のとおりである。



図 6.2.1 モニタリングの基本的な手順

6.2.2 振動計の設置

振動計は、常時モニタリングの対象とする浮石部とその下の基盤部のそれぞれ一箇所ずつに設置する。浮石部と基盤部の二つの振動計は、方位コンパス等で水平 2 成分（斜面走向方向：X，斜面傾斜方向：Y）の方位を合わせる。図 6.2.2 に振動計の設置位置の模式図を示す。

設置箇所が岩盤のときは振動計を石膏等で固定させ、腐植土等柔らかい箇所の場合は、できるだけ締まった部分に振動計を設置し、設置した周辺の基盤の土は再度よく締め固める。図 6.2.3 に振動計の設置状況の例を示す。

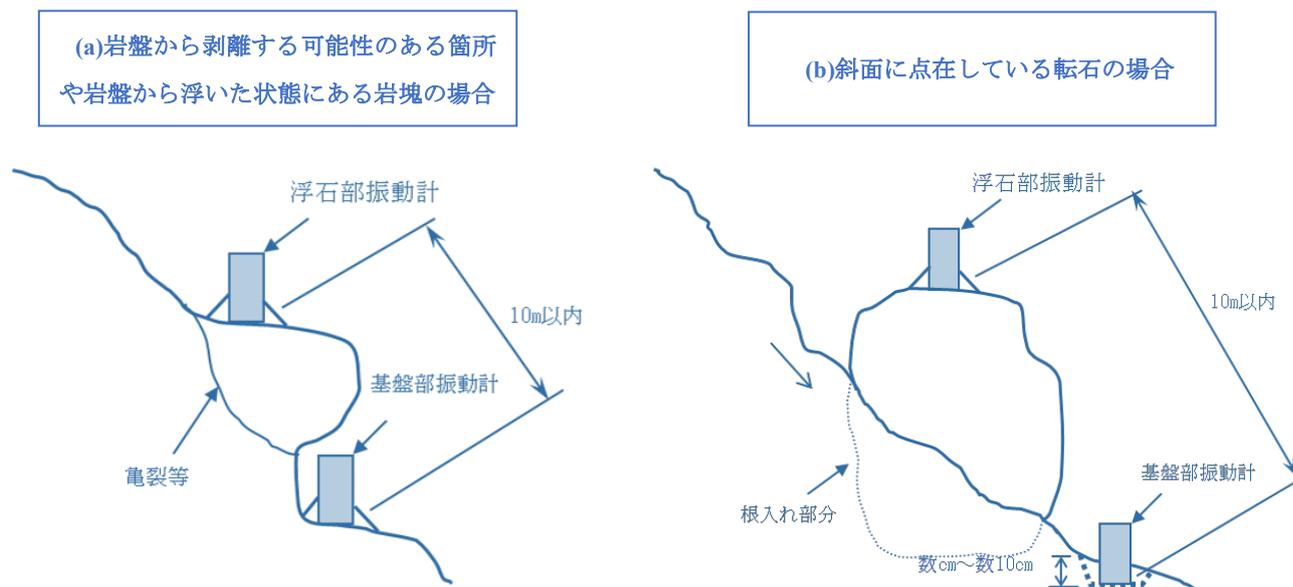


図 6.2.2 振動計の設置位置

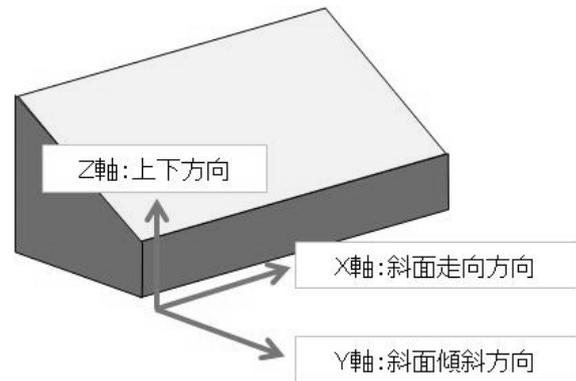


図 6. 2. 3 振動計の設置状況

6. 2. 3 計測・データの取得

落石危険度振動調査法は、近傍の道路交通振動等の雑振動，あるいはカケヤによる打撃等の強制振動を振動源として，浮石部と直近の岩盤や地盤の振動特性を比較することにより，浮石の落石危険度を評価する調査法であり，上記調査法を活用した常時モニタリングにおいても交通機関の振動は有効である。

なお，現地では振動計測以外に，目視により落石形態，岩質，サイズ，根入れ深さ，斜面の傾斜角度や地質，周辺の状況などを可能な限り調査しておく。落石形態とは，落石のタイプが浮石型（剥離型）か転石型（抜け落ち型）かの事であり，浮石型の場合はブロック状かオーバーハングかを調査しておく。

6. 2. 4 振動データの分析処理

計測によって得られた振動データについて，遠隔地での自動計算によって分析処理を行い，以下に示す岩塊の安定性を定量的に評価する指標を算出する。

(1) RMS 速度振幅比

RMS 速度振幅比は浮石部の振動記録と基盤部の振動記録のうち，振幅の大きさを RMS (Root mean square: 二乗した平均の平方根) し比率で評価したものである。RMS 速度振幅比が 1 であれば，基盤部と浮石部は同じ振幅で揺れているが，RMS 速度振幅比が大きな値を示せば，その値だけ浮石部が基盤部より大きな振幅で揺れていることとなり，不安定となる。

(2) 卓越周波数

揺れの速さを示す指標であり，卓越周波数が小さければ，浮石部がゆっくり（長い周期）揺れていることとなり，不安定となる。

(3) 減衰定数

揺れの収まりやすさを示す指標であり，減衰定数が小さいと一度揺れ始めた浮石部の揺れは減衰しにくく，いつまでも揺れていることとなり，不安定となる。

6. 2. 5 データの分析結果の評価

モニタリングにより得られた RMS 速度振幅比，卓越周波数，減衰定数との関係から岩塊の安定性を評価するものである。図 6. 2. 4 および図 6. 2. 5 に安定性評価のためのグラフの例を示す。

(1) RMS 速度振幅比と卓越周波数との関係

図 6. 2. 4 は常時モニタリングの対象とする浮き石部の RMS 速度振幅比と卓越周波数の関係をプロットしたものである。模擬実験，現地計測ともに RMS 速度振幅比と卓越周波数には逆比例の相

関性が認められる。このことから落石危険度の評価に、RMS 速度振幅比と卓越周波数から成る安定性評価グラフを用いることが可能である。図 6.2.4 において、縦軸は卓越周波数、横軸に RMS 速度振幅比であり、左上にプロットされるものほど危険度は低く、右下にプロットされるものほど危険度は高くなる。図中では、後述する判定のしきい値を用いて、分布領域 A、B と分けている。

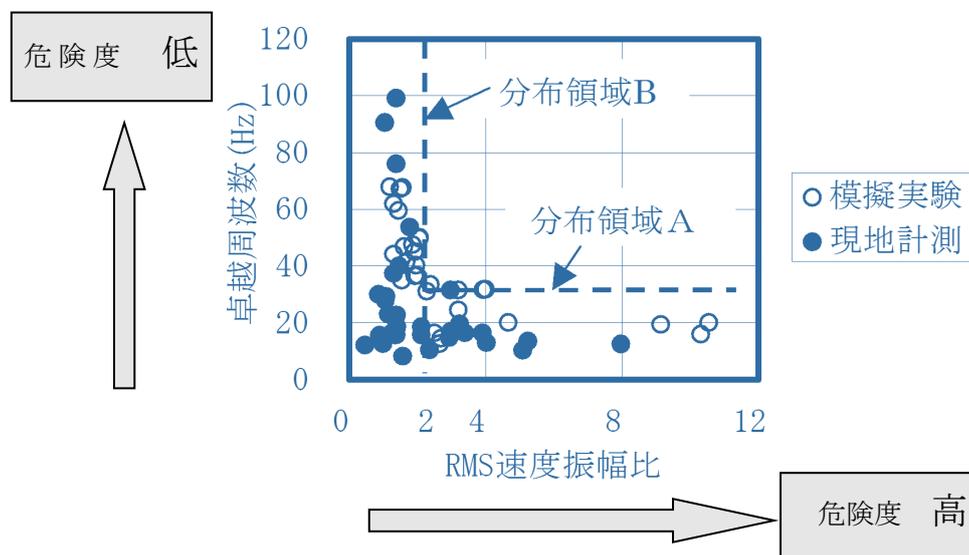


図 6.2.4 RMS 速度振幅比と卓越周波数の関係の安定性評価グラフの例

(2) RMS 速度振幅比と減衰定数との関係

図 6.2.5 は常時モニタリングの対象とする浮き石部の RMS 速度振幅比と減衰定数の関係をプロットしたものである。模擬実験、現地計測ともに RMS 速度振幅比と減衰定数には、逆比例の相関性が認められる。このことから落石危険度の評価に、RMS 速度振幅比と減衰定数から成る安定性評価グラフを用いることが可能である。図 6.2.5 において、縦軸は減衰定数、横軸に RMS 速度振幅比であり、左上にプロットされるものほど危険度は低く、右下にプロットされるものほど危険度は高くなる。図中では、後述する判定のしきい値を用いて、分布領域 A、B と分けている。

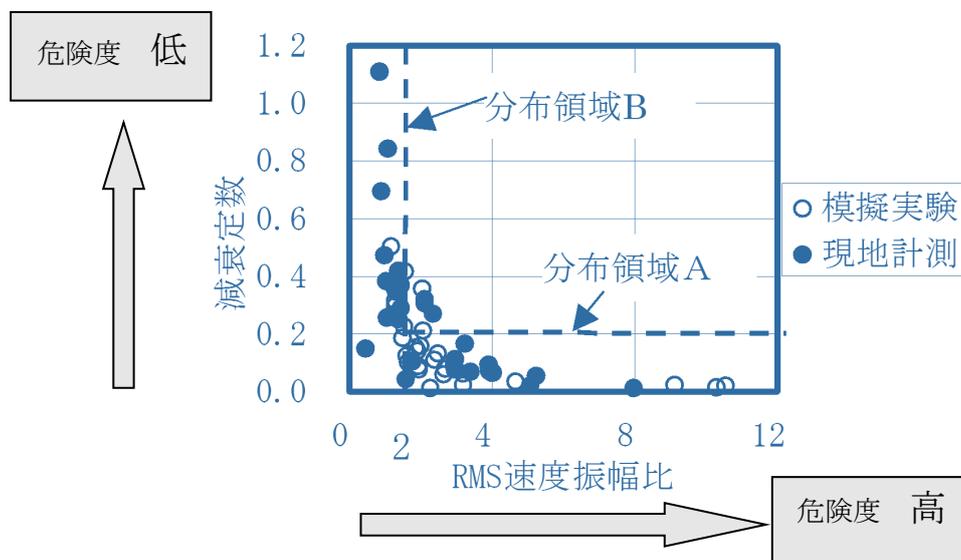


図 6.2.5 RMS 速度振幅比と減衰定数の関係の安定性評価グラフの例

RMS 速度振幅比と卓越周波数および RMS 速度振幅比と減衰定数のいずれの関係も、調査対象である浮石部の結果がグラフの右下に位置する分布領域 A に含まれた場合、危険度は高いと考えられる。また浮石部の結果がグラフの左上に位置する分布領域 B に含まれた場合、危険度は低いと考えられる。

また、それぞれの分布領域内においても、グラフの左上側にプロットされるものほど危険度は低く、右下側にプロットされるものほど危険度は高い。

この分布領域 A、B のどちらにも属さない浮石部が存在する場合は、目視による調査等からさらに詳しい検討を行い、危険度を考慮する必要がある。

分布領域 A：危険度 高

分布領域 B：危険度 低

振動計間の距離が遠いなど、現地条件の影響から卓越周波数と減衰定数が求まらないことがある。その場合は、RMS 速度振幅比のみを用いることで、参考的な結果としておよその危険度を判断する。RMS 速度振幅比が大きい場合は危険度が高く、小さい場合、危険度は低いといえる。

なお、落石振動調査法では、不安定領域の判定のしきい値として、

- ① RMS 速度振幅比が 2 以上
- ② 卓越周波数が 30Hz 以下
- ③ 減衰定数が 0.2 以下

を用いている。

判定のしきい値は模擬実験結果および現地計測結果から提案されているものであるが、実際の判定に当たっては各々の値について安定領域から逸脱するものが無いか確認し、逸脱する場合は他の手法により再調査を行い、総合的に判断するのがよい。

判定方法の詳細は参考文献に詳しいため、参照するとよい。

参考文献

- 1) 緒方健治ほか：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，No.749/VI-61，123-135，2003

7章 のり面・斜面の安定性評価モニタリングの実施事例

本章では、ガイドラインで紹介した5つのモニタリング技術の実施事例を取りまとめる。表7.1に実施事例の一覧を示す。1章で示した6種類のモニタリング適用シナリオを参照し、可能な限り全てのシナリオを網羅できるよう実施事例を選定した。表中に示すように、各事例は適用シナリオ・使用目的・対象斜面・適用されたモニタリング技術の組み合わせが各々異なる。以下では、各事例毎にモニタリングの目的と概要・現場の具体的なシステムやセンサー配置・現場で計測したデータとその評価結果例などを簡潔に記載した。また、最後にインフラ管理担当者の目線から見た「モニタリングがもたらしたメリット」を示した。これらの事例によりモニタリング技術の選定に際して現場適用の具体的なイメージを持って頂ければ幸いと考える。

表 7.1 のり面斜面の安定性モニタリング実施事例一覧

事例No.	適用シナリオ	モニタリングの目的	対象斜面	適用されたモニタリング技術
1	シナリオ1（点検の補助：アクセス困難箇所の点検精度確保） シナリオ2（診断の補助：措置の優先順位付け）	診断の補助及び診断の高度化（措置の優先順位付け）、点検の補助（アクセス困難箇所の点検精度の確保）、安定性の経年監視	高所で発見された不安定岩塊	振動調査法および傾斜センサによる浮石・落石の安定性評価（6章に記載）
2	シナリオ3（診断の高度化：健全度の定量的評価）	既往崩壊履歴のある道路脇のり面の現在の安定性評価	広範囲に渡るのり面斜面全域	傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリング（2章に記載）
3	シナリオ4（診断の高度化：対策工の判断と対策中の危険性の監視）	診断の高度化（不安定領域の特定、対策工実施の判断、対策工事の安全性確保）	盛土斜面および取付け道路（補強土）	次世代衛星測位システムによるのり面・斜面の安定性評価（4章に記載）
4	シナリオ5（緊急時（災害時）の対応）	災害発生時の対応（被災斜面の安定性/危険性判断と監視、施設運用継続の判断、施設管理者・利用者の安全確保と迅速な非難通知）	自然斜面（豪雨により崩壊）	マルチGNSSによるのり面・斜面の安定性評価（5章に記載）
5		災害発生時の対応（災害が発生した斜面の通行安全性、通行制限、対策工の安全等の監視、二次災害防止および復旧工事中の安全確保と警報発信）	切土のり面（台風による豪雨で崩壊）	多点傾斜変位と土壌水分の常時監視によるのり面・斜面の安定性評価（3章に記載）
6	シナリオ6（補修・補強の効果確認）	災害により崩壊した斜面の復旧工事において、通行安全性、対策工の安全等の監視、二次災害防止および復旧工事の補修・補強の効果確認	立木および既設法枠工を巻き込み崩壊した自然斜面	

7.1 落石危険度振動調査法による岩塊の常時モニタリング

【シナリオ 1, 2 : 点検及び診断の補助】

(1) 適用事例の目的と概要

1) 目的

落石の可能性のある不安定岩塊に対し常時モニタリングによって定量的かつ継続的な監視を実施することで、措置の必要性やそのタイミングの判断（意思決定）を行う事を目的としている。

2) 概要

本事例箇所は、防災カルテ点検によって対策が必要とされた岩塊が点在している長野県の一般国道である。傾斜角約 30 度の斜面に位置する縦横約 2m の岩塊を対象に落石危険度振動調査法による常時モニタリングを実施した。この岩塊は高所かつ積雪により冬季のアクセスが困難な箇所に位置しており、点検の補助手段としても有効に活用することができた。

(2) 調査機器の設置

写真 7.1.1 にモニタリング対象岩塊の全景写真を、写真 7.1.2 に振動計設置箇所の拡大写真を示す。浮石部振動計は岩塊に直接モルタルで固定し、基盤部振動計は岩塊下部の地面に埋設することで固定した。振動計の方位は等高線方向が X 成分，斜面の傾斜方向が Y 成分，上下方向が Z 成分となるように設置した。収録機器は写真 7.1.3 に示す収納ボックスに格納し，長期の計測に耐えるように半分埋設してある。



写真 7.1.1 機器設置全景



写真 7.1.2 3成分振動計



写真 7.1.3 収納ボックス

使用した振動計は3成分の動電型タイプで、近くに設置したプリアンプで出力信号を40dB増幅して、約100m離れた国道脇に設置した送信システムへ専用ケーブルで導いた。プリアンプの電源は専用ケーブルで送信システムから供給している。写真7.1.4に送信システムの全景と制御盤内部を示す。送信システムは引込柱と制御盤から成り、AC電源とNTT光回線を引き込んでいる。200Hzでサンプリングした振動波形記録は圧縮して、24時間連続で東京南青山のオフィスの監視システムに送信しており、振動波形をリアルタイムで分析することで、安定性評価指標を求め監視を行っている。なお、表7.1.1に現地に設置した機器一覧を示す。



写真 7.1.4 送信システム全景と制御盤内部

表 7.1.1 設置機器一覧表

品目	数量	主な仕様	備考
3成分振動計	2	固有周波数 10Hz, 電圧感度 0.15Volts/cm/s	速度型
プリアンプ	2	成分数 3ch, 増幅度 40dB	
データロガー	1	成分数 6ch	
ルーター	1		
ONU (光回線終端装置)	1		
UPS (無停電電源装置)	1	100V	

(3) 計測結果

1) 冬季における各指標の挙動

図 7.1.1 及び図 7.1.2 に、2017 年 2 月と 2017 年 3 月の評価指標の変動図を示す。図の上から RMS 速度振幅比、卓越周波数、減衰定数の 3 つの評価指標、気温、降水量と風速の順に並べてある。気温は調査地点から約 2km 離れたところにある気象庁アメダス観測点「浪合」で観測されたデータであり、地温は現地に設置した温度計のデータである。評価指標は、1 分間毎に求めた値の中から浮石部の RMS 速度振幅が $0.1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 以上を示したもののだけを対象にして 60 分間の算術平均を取ったものである。

図 7.1.1 から、2017 年 2 月 6 日から 14 日にかけて Z 方向の RMS 速度振幅比が 2 程度まで小さくなると同時に、X 方向と Z 方向の卓越周波数、減衰定数の値が大きくなった。この期間は気温が零度を

下回り、それと同時に地温も零度を下回っているため、地盤の凍結により浮石部と基盤部が一体化することで岩塊が安定化したと考えられる。

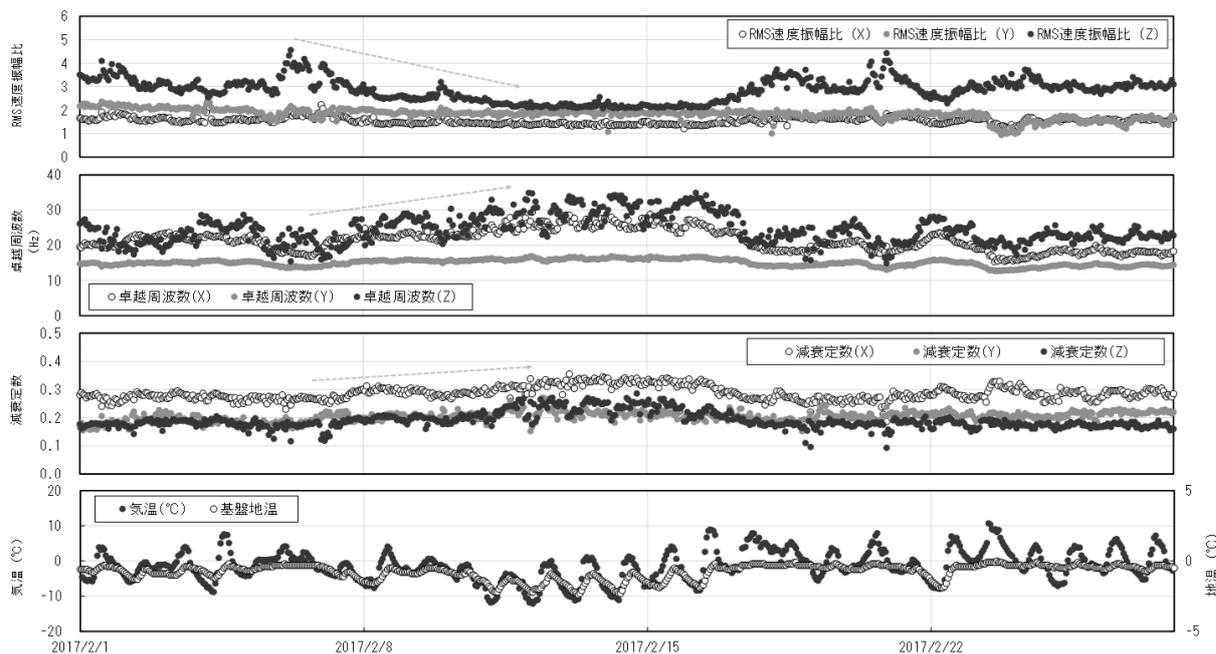


図 7.1.1 2017 年 2 月の評価指標の変動

図 7.1.2 から 2017 年 3 月 10 日以降、Z 方向の RMS 速度振幅比が徐々に大きくなり、X 方向と Z 方向の卓越周波数および減衰定数が低下傾向を示している。この変動は岩塊が不安定化に向かっていることを表しているもので、気温が徐々に高くなり凍結状態が緩んだことにより不安定化を招いたと考えられる。

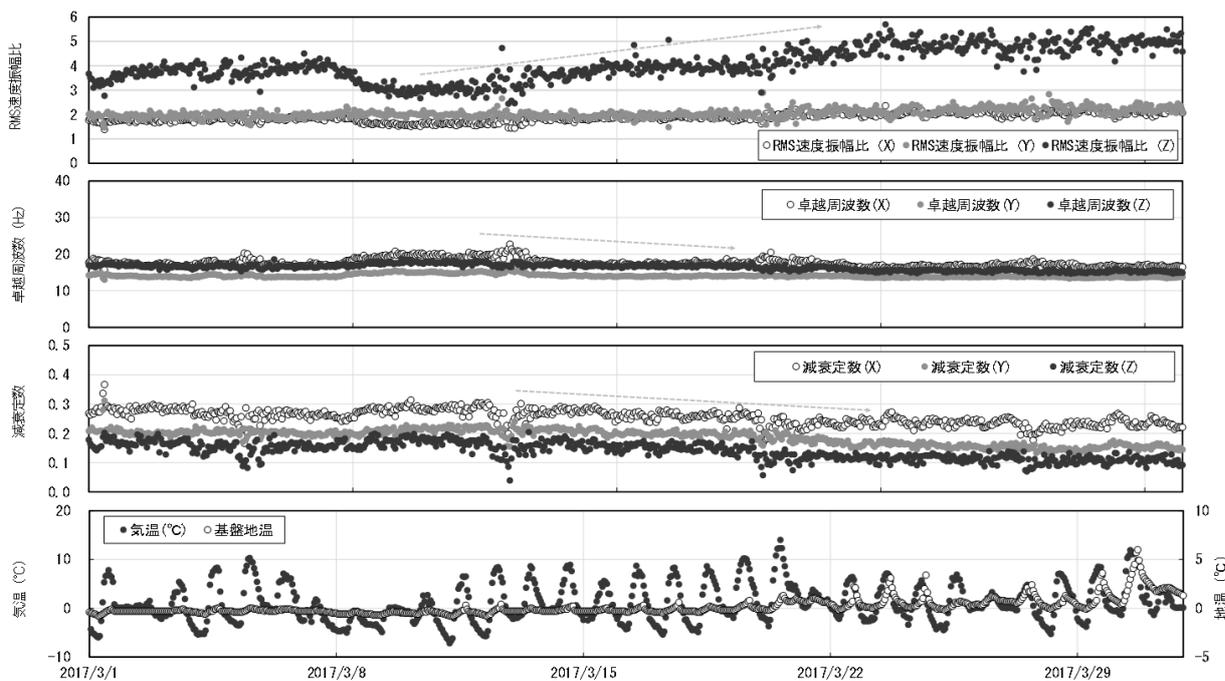


図 7.1.2 2017 年 3 月の評価指標の変動

2) 危険度判定図の推移

図 7.1.3 に 2017 年 2 月 6 日～14 日、図 7.1.4 に 2017 年 3 月 10 日～21 日の危険度判定図を示す。危険度判定図は、上段が RMS 速度振幅比と卓越周波数、下段が RMS 速度振幅比と減衰定数の関係を示したものである。2017 年 2 月 6 日～14 日は、前述のとおり気温の低下に伴い卓越周波数と減衰定数が上昇し、RMS 速度振幅比が低下している期間であり、徐々に安定領域側へ推移している様子がわかる。2017 年 3 月 10 日～21 日は徐々に気温が上昇し温暖化する期間であり、卓越周波数の低下量は小さいが減衰定数は低下し、RMS 速度振幅比が徐々に大きくなり、不安定側に推移している様子がわかる。

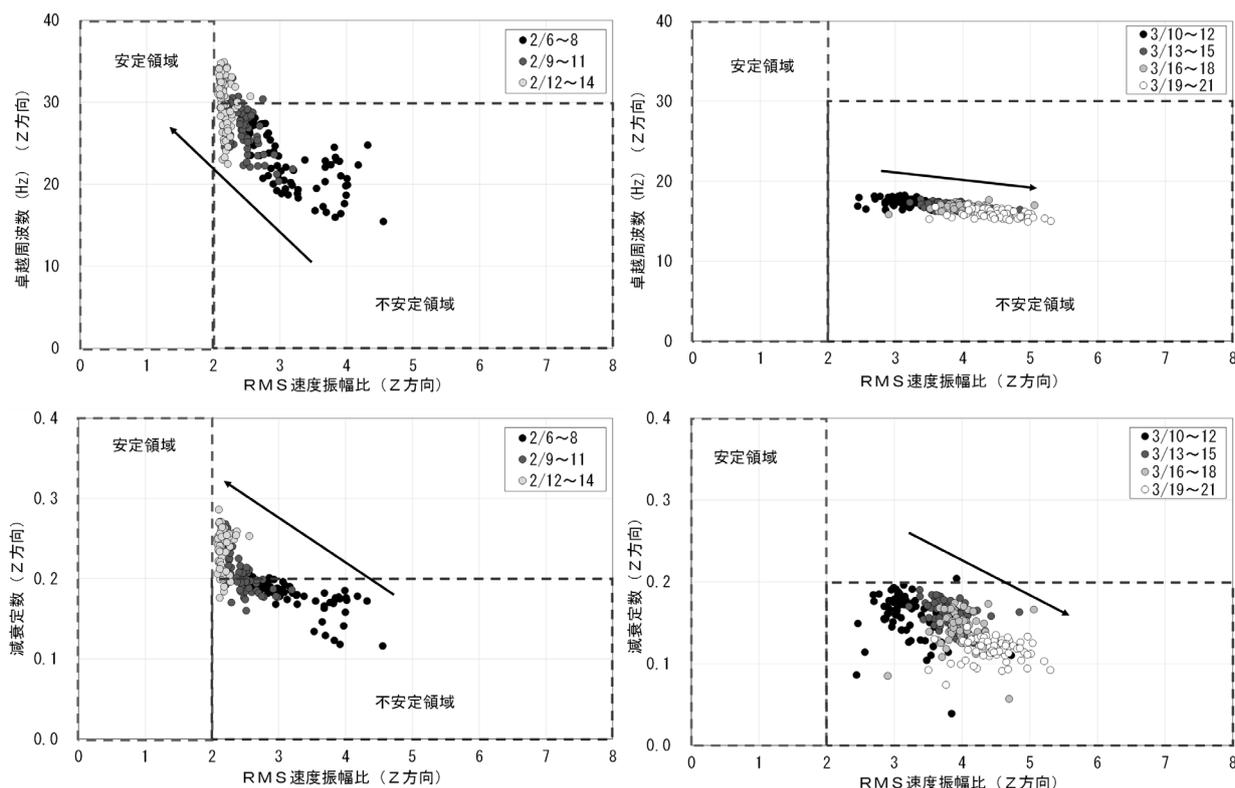


図 7.1.3 危険度判定図(2017年2月6日～14日) 図 7.1.4 危険度判定図(2017年3月10日～21日)

(4) まとめ

今回の計測データから、岩塊の挙動が安定領域から不安定領域に向けて変化する傾向が確認できたが、気温の上昇に伴い凍結状態が緩んだことによるもので、急速な不安定化には至っていないため早期の措置は不要と判断し常時監視を継続した。ただし、今後評価指標に過去に例を見ない大きな変化が現れたときは落石の危険性が高くなったことを示すものであり、通行規制などの措置を講じる必要がある。

以上のように、落石危険度振動調査法による岩塊の常時モニタリングにより、岩塊の安定性について工学的かつ定量的な判断を行う事ができた。また、本事例の計測箇所は高所かつ冬季には積雪の影響により人が現場に立ち入ることが困難な場所であるが、通信機器等のシステムを用いたモニタリングにより遠隔地で岩塊の安定性を常時観測することができた。

7.2 傾斜センサと無線ネットワークによる省電力モニタリングシステム

【シナリオ 3：診断の高度化：健全度の定量的評価】

(1) 適用事例の目的と概要

1) 目的

広範囲にわたるのり面の安定性評価。既往崩壊履歴のある道路のり面に対し、平面的に多点配置した傾斜センサによってのり面の傾斜量を長期モニタリングすることで変状の有無を把握し、のり面の安定性を定量的に評価した。

2) 概要

MEMS 傾斜センサと 920MHz 帯無線を搭載したセンサ端末をのり面に 19 台設置し、のり面の多点傾斜を分解能 0.01° で計測した。その計測データをセンサ端末から無線親機に集約し、パケット通信端末でインターネット網を介してクラウドに送りグラフ化、遠隔地にある道路管理事務所で観測データをリアルタイムに確認した。

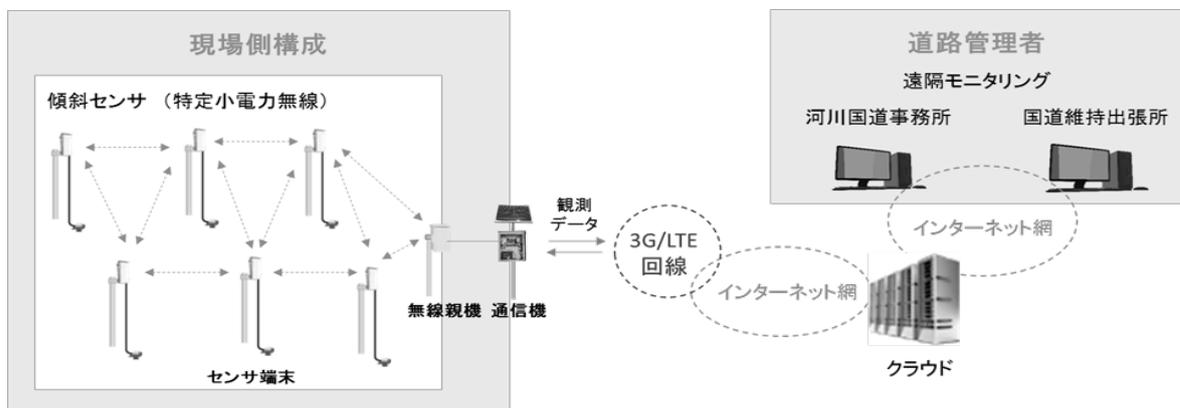


図 7.2.1 モニタリングシステムの構成

(2) センサの配置

のり面上のセンサ端末の設置場所については、既往の崩壊履歴より斜面変状が現れやすいと考えられる箇所を選定し計測対象とした。その配置については横断（水平）方向の間隔を約 10m として測線を決め、斜長（上下）方向の間隔は約 4m として 3 段とした。無線親機とパケット通信端末はソーラー電源で駆動させるため、日当たりを考慮してのり面上部に設置した（図 7.2.2）。

なお、センサ端末から親機に向けての無線経路は自動的に構築される。

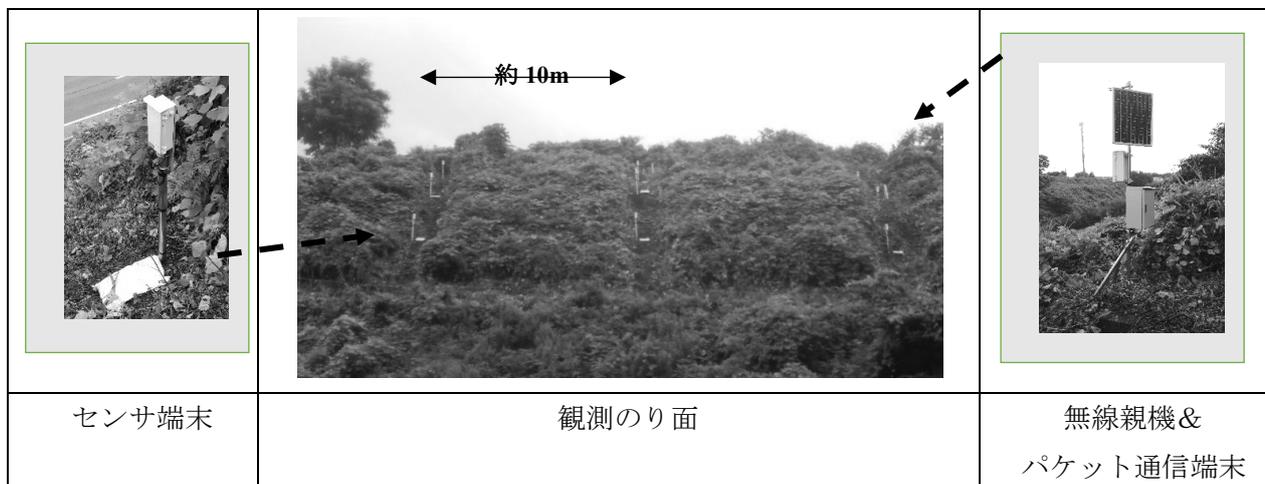


図 7.2.2 モニタリングシステムの設置状況

(3) 計測結果

1) 傾斜データの時系列変化

モニタリングを行った全期間（2015年7月～2017年10月）の測線1, 3, 5の計測データと近隣の気象台の雨量および積雪のグラフを図7.2.3に示す。2016年5月には、その時の傾斜をゼロとするリセット操作をしている。

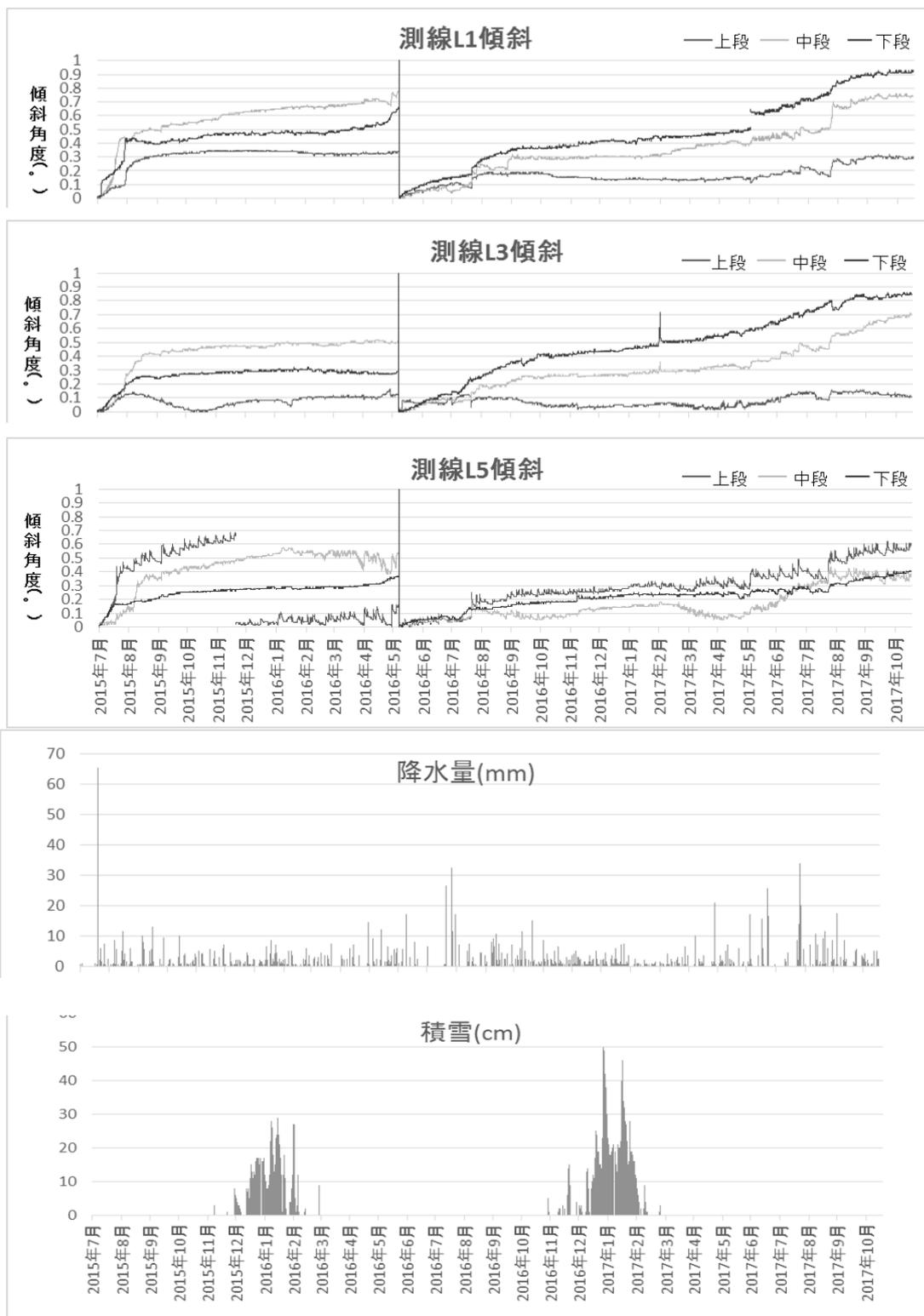
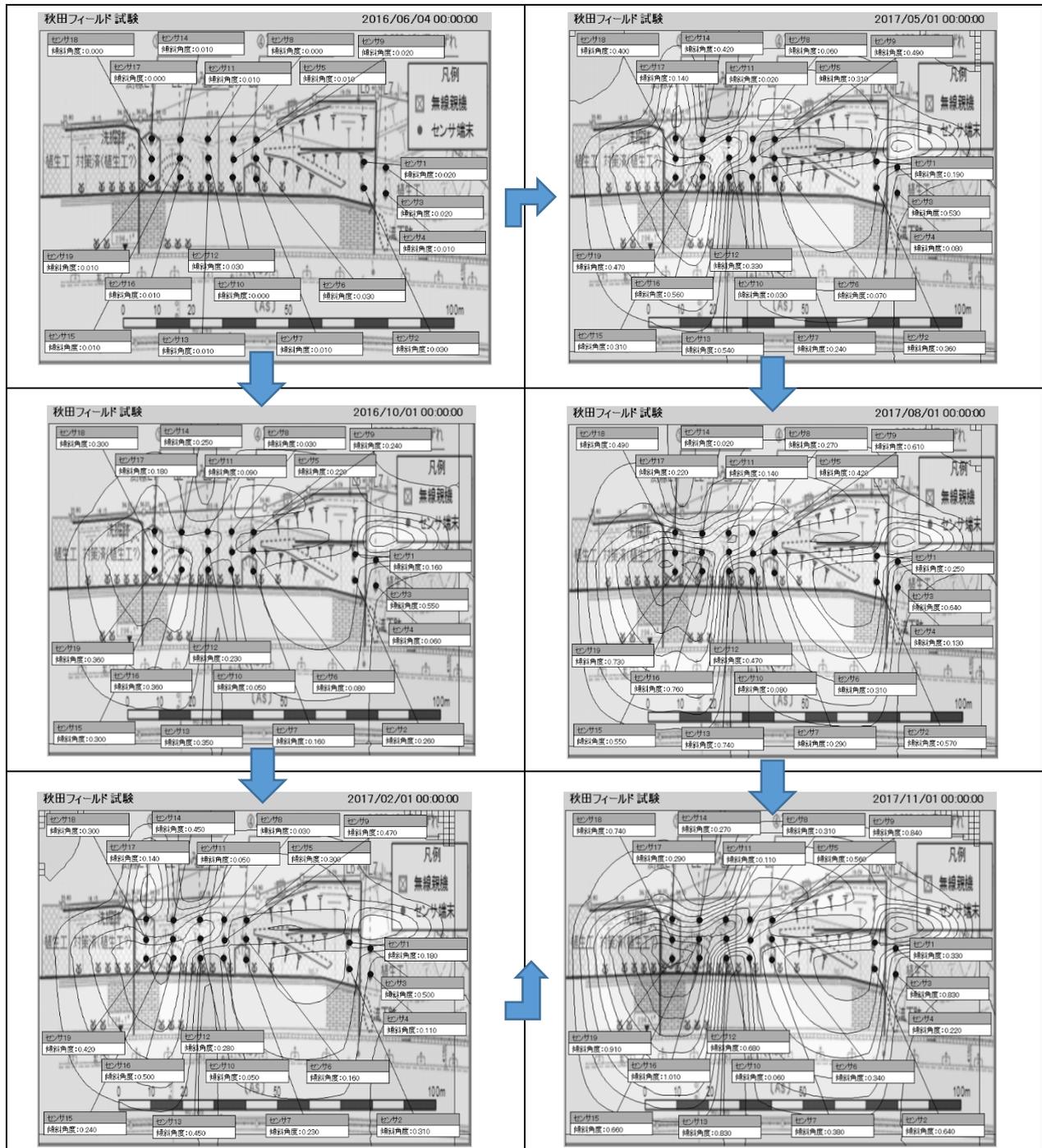


図 7.2.3 傾斜角度の時系列変化と雨量および積雪の関係

2) 傾斜量データの可視化

パソコンにインストールされた専用図化ソフトによって観測現場の平面図上に測定ポイント（センサ端末設置位置）をプロットし、絶対傾斜角で10段階に色表現した。これによりのり面傾斜量の時系列での変化を可視化し、遠隔かつリアルタイムに確認することができる（図7.2.4）。

のり面全体の変状の進展状況をコンタ表示（色表現）することにより、対象斜面の左下部分の傾斜量データが徐々に変化していることを容易に認識することができる。

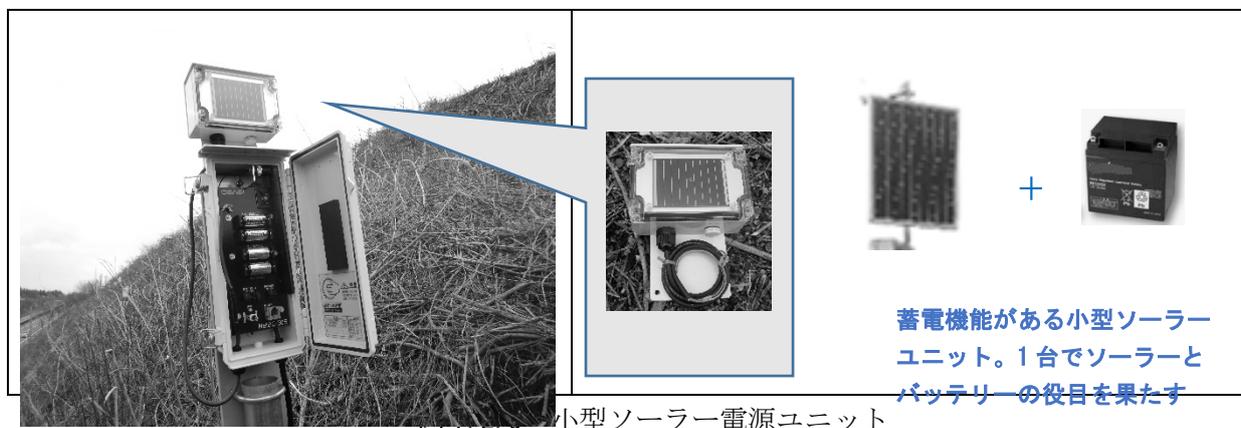


傾斜角は最小値0°を緑、最大値1°を赤とし、10段階で色表現できる。最大値の設定は1°、5°、10°より選択可。

図7.2.4 傾斜角コンタ（色表現）による可視化とリアルタイム監視状況

(4) 計測機器のメンテナンス

2年以上の長期観測を行ったため夏場に簡易なメンテナンスを行った。作業内容としては、草刈り・外観検査・電池交換である。長期観測を行うことにしたため、1回目のメンテナンス時に無線通信距離の関係上電池消費が多い数台のセンサ端末には小型のソーラーユニット（170H×121W×59D）を付加した。このユニットを使用する事により電池交換なしで何年間もの継続観測が可能となる。



(5) まとめ

1) 計測結果に対する考察

本道路のり面における2年3ヶ月の観測の結果、初期状態からのり面の傾斜変動がある程度認められたものの、

- ① 傾斜角の変化は降雨時に顕著となるが、その後、急激に加速する様子は見られず収束
- ② 斜面左下の軟弱地盤（シルト層）が基盤となっている箇所の変化量が相対的に大きいことから、設置金具と地盤との緩みが徐々に進行したと考えられ、この傾斜角の変化はのり面の崩壊につながらないと判断した。モニタリングにより、傾斜データの連続的かつリアルタイムな把握と解析が可能であるため、このような判断が可能となった。

2) モニタリングがもたらしたメリット

- ① のり面全体の平面的な変状を把握することが可能
センサ端末をのり面全体に適度に離して多点設置することにより、局地的ではなくのり面全体の変状モードを確認することができた。
- ② 気象条件に関わらずのり面の状態をリアルタイムに把握可能
どのような気象条件でも一定時間間隔での観測が可能となり、観測データを遠隔事務所においてクラウド上でリアルタイムに確認した。これにより気象条件との関連性も併せ考察する事ができた。
- ③ のり面安定性の工学的・定量的な判断が可能。不安定領域の特定が可能
目視観察による経験的・定性的判断ではなく、傾斜データの連続量に基づき工学的な判断を下すことができ、その結果として、変状が認められる場合も等値線（色コンタ）で可視化することによって不安定領域を特定する事ができた。
- ④ 維持管理費用の削減が可能
本モニタリングは2年3ヶ月で終了したが、さらに継続すれば、のり面の異常前兆を早期に把握することができ、維持管理に要する費用削減の効果が期待できる。

7.3 次世代衛星測位システムによるのり面の安定性モニタリング

【シナリオ 4：診断の高度化（対策工の判断と対策中の危険性の監視）】

(1) モニタリングの目的と概要

道路のり面の不安定化前兆現象が発見され対策工が実施された。対策工の必要性を検討した後、対策工終了までの間のり面の安定性をモニタリングにより継続監視し、対策工事中の危険性の監視と安全性確保に次世代衛星測位システム（RTK を用いた変位計測システム）が利用された。

(2) 適用現場の概要とセンサの設置状況

次世代衛星測位システムを適用した現場は、供用中の高速道路に補強土工法を用いて取り付け道路を建設した箇所である。この取り付け道路の建設後、舗装にクラックが発生したため、そのクラックの原因究明と対策工の必要性の有無を検討する目的でモニタリングを行った。

図 7.3.1 にセンサの配置図、図 7.3.2 に現場状況写真、図 7.3.3 にセンサ設置状況、図 7.3.4 に取り付け道路のクラック写真を示すが、次世代衛星測位システムの GNSS センサは基準点を含めて 6

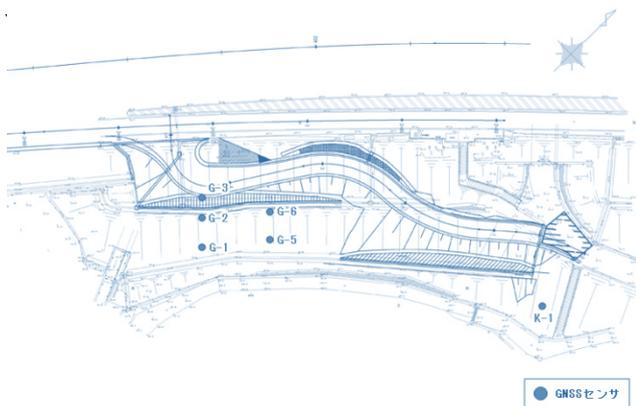


図 7.3.1 センサの配置図



図 7.3.2 現場状況写真



図 7.3.3 センサ設置状況写真



図 7.3.4 取り付け道路のクラック写真

(3) 次世代衛星測位システムについて

1) 次世代衛星測位システムの概要

次世代衛星測位システムは、RTK による変位計測システムで、斜面上に設置する斜面計測専用 GNSS センサと、その計測データを通信手段によってサーバに送信し、サーバで行う誤差評価システムおよびその結果をインターネットで配信する Web システムからなる（図 7.3.5 参照）。

RTK は毎秒でも計算できるため、生データをサーバに送信してサーバで全てを解析する方法ではデータ量が多く通信への負荷が問題になる。そこで、次世代衛星測位システムでは通信の負荷を軽

減するため RTK の計算はセンサで行い、誤差評価はサーバで解析している。

計測データの流れを図 7.3.6 に示す。基準点の情報をブロードキャスト方式で観測点に送信し、観測点のセンサで RTK の解析を行い、その結果を特定小電力無線（920MHz）で通信アダプタに送信する。通信アダプタからは携帯電話で解析結果をサーバに送信し、サーバで統計処理（母集団移動平均法、恒星日差分法）をして誤差評価し、その結果をユーザーはインターネットによって Web 閲覧できる。

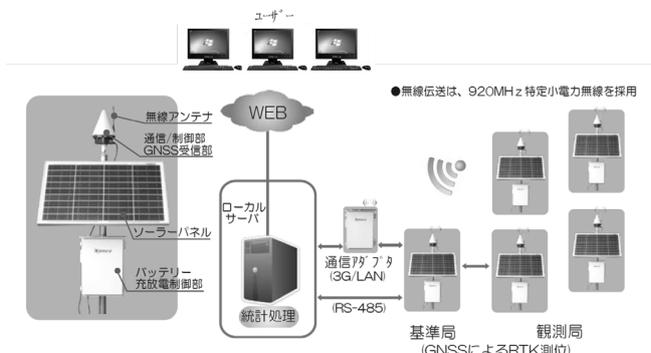


図 7.3.5 次世代衛星測位システムの構成

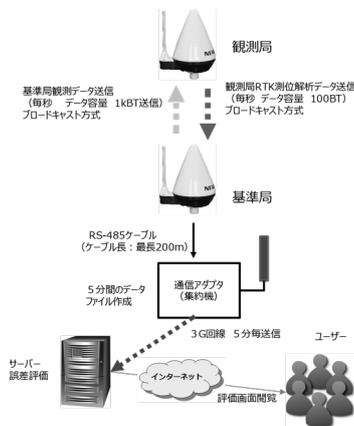


図 7.3.6 次世代衛星測位システムのデータの流れ

2) 計測精度向上のための技術

① 母集団移動平均法

母集団移動平均法は、時系列データを平滑化する手法で、直近の n 個のデータの重み付けのない単純な平均である。

GNSS 衛星は約 1 日周期で同じ衛星配置を繰り返しているため、母数を 1 日分の時系列データとするとその母数にはあらゆる衛星配置のデータを含んでいる。したがって、1 日分の時系列データの母数は、統計的推測をする上で母集団の特性値が同じになる。時系列データなどでバラツキがあるデータでも母集団移動平均を求め、それをグラフに表すことによってデータは平均化され、傾向をつかむことが容易になる。図 7.3.7 は母集団移動平均値の時系列データ（東西方向、+が東方向）の一例を示す。ここで、点は RTK の計算結果、線は母集団移動平均値のラインである。

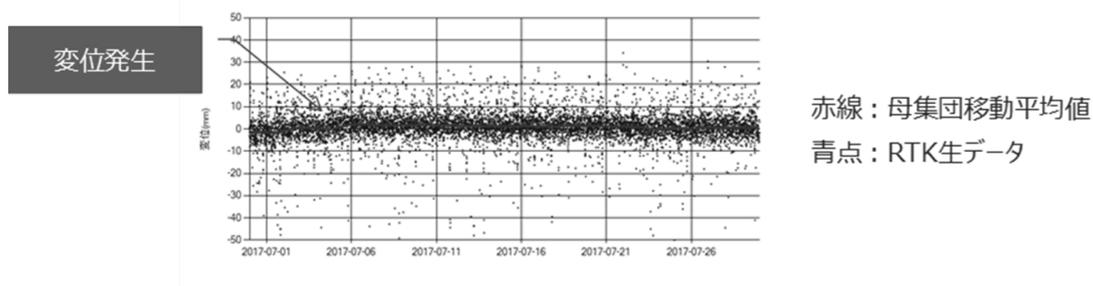


図 7.3.7 母集団移動平均値の時系列グラフ（東西方向）

母集団移動平均の長所は、データ量が多いと移動平均値は最尤推定値となる（中心極限定理や大数の法則より）。一方、母集団移動平均の短所は、変位検出において母数のデータ分の時間遅れを伴うこと（検出変位は単調増加する）である。この母集団移動平均法の短所を補うために、次に説明する恒星日差分法を用いている。

② 恒星日差分法

恒星日差分法は、同じ衛星配置の計測値と基準値の差分をとる方法で、衛星測位誤差が衛星配置に依存している場合に効果的である。恒星日差分法の長所は、「リアルタイム性」に優れていることである。

恒星日とは、衛星が南中してから次に南中するまでを1日とするもので、約23時間56分となる。それに対して太陽日（日本標準時などの方法）は太陽が南中してから次に南中するまでを1日（24時間）とするものである。図7.3.8に示すように恒星日は太陽日より約4分程度早くなるため、恒星日で判断しないと同一衛星配置にならない。

図7.3.9は恒星日差分法の時系列データ（東西方向、+が東方向）の一例を示す。点は恒星日差分値の散布図で、RTKの生データに比べると標準偏差が1/2～1/3になっている。突発的な変位が発生しても移動平均法に比べ早期に検出可能である。

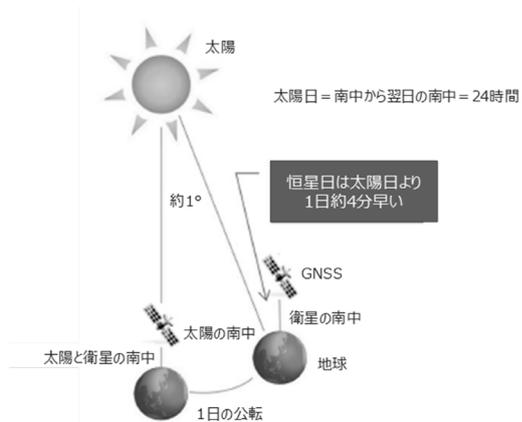


図 7.3.8 恒星日と太陽日の違い

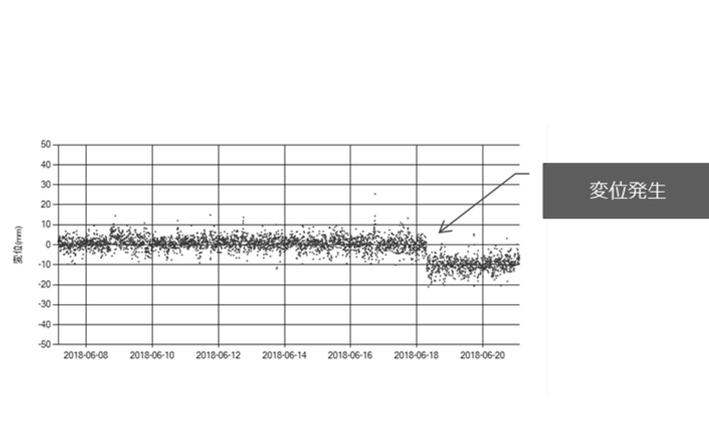


図 7.3.9 恒星日差分法の時系列グラフ（東西方向）

（4）モニタリングの結果

供用中の高速道路に補強土工法を用いて取り付け道路を建設したが、取り付け道路にクラックが発生した。このクラックが、補強土内でのすべりで発生したものか、本線盛土まで影響しているのかを把握する目的で計測した。

現場では、図7.3.1に示すようにGNSSセンサは基準点を含めて6台設置し、2016年12月5日から計測を開始した。そうした中で、2017年10月21日～23日に襲来した台風21号の影響（日降雨量最大85mm）で、一部のセンサにおいて図7.3.10、図7.3.11に示すような顕著な変位が検出され、取り付け道路のクラックも一部で更に開口した。特にG-6の変位は、すべりによる末端の盛り上がりで道路側に変位した（センサ支柱も転倒したため真の変位よりも大きな変位となっている）。

しかし、台風21号の襲来以前の梅雨時期から図7.3.11の赤の領域が不安定化していた。特に本線盛土が不安定になった箇所は、取り付け道路が一番高くなった载荷重が大きな箇所ではなく、盛土建設時に湧水が見られた箇所であることが判明した。

それ以外の取り付け盛土のクラックは、補強土内の不安定化に伴うクラックで、盛土の安定性については問題ないと判断した。モニタリング結果を踏まえ、対策工の検討を始めるとともに、引き続き工事中の安全性確保（危険性の監視）にモニタリング結果が用いられた。

なお、G-3は用地の問題で止む無くガードレールにGNSSセンサを設置したが、ガードレールは袖付

波板が支柱に接続されているため、G-3 は周辺の変位の影響を受けておりその地点の変位とは言えないと判断した。

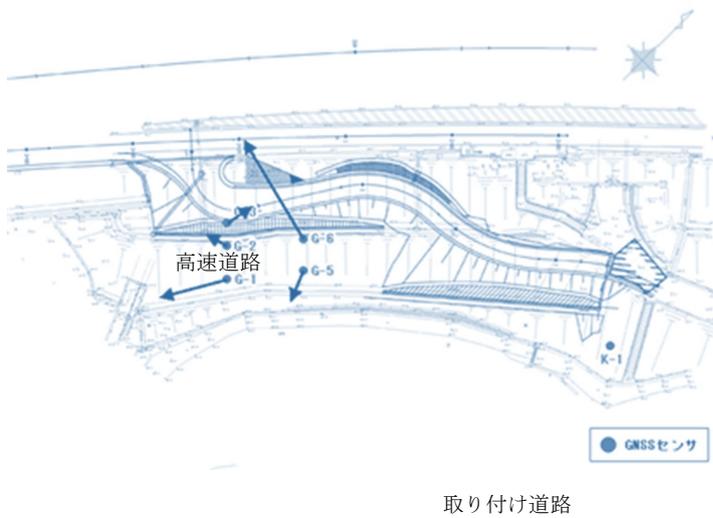


図 7.3.10 水平変位ベクトル図
(台風 21 号時)

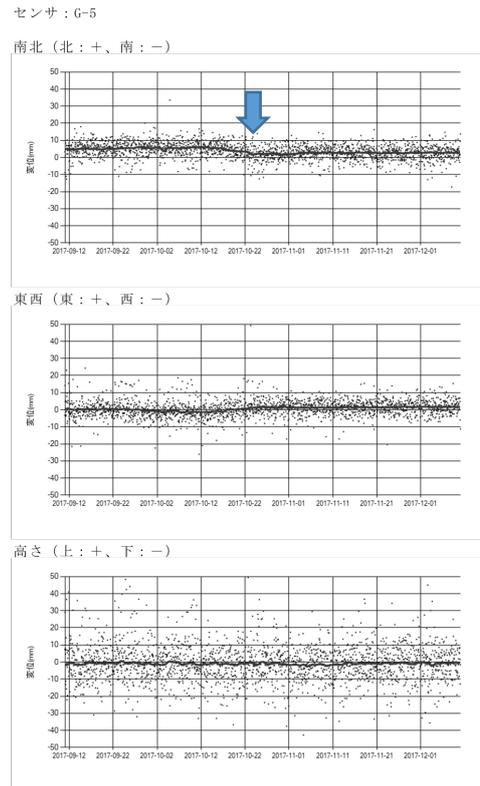


図 7.3.11 センサ(G-5)の時系列グラフ

(5) まとめ

本事例においてモニタリングがもたらしたメリットは以下のようにまとめられる。

- ① のり面崩壊前(2次クリープ段階)での不安定領域の早期特定が可能(不安定領域の特定)
- ② 定量的データに基づく対策工実施の工学的判断が可能(対策工実施の判断)となった
- ③ 継続監視により対策工実施中の危険性の監視が可能(対策工事の安全性確保)となった

参考文献

- 1) 武石朗, 飯島功一郎, 江川真史, 室井翔太, 横田聖哉, 藤原優: 衛星測位を利用した次世代地すべり検知システム, 第 23 回 GPS/GNSS シンポジウム, 測位航法学会, pp132-136, 2018
- 2) 武石朗, 飯島功一郎, 江川真史, 横田聖哉, 藤原優, 田山聡: RTK-GNSS による地盤変位計測システムについて(山陽自動車道での実証実験), 地盤工学会, 第 54 回地盤工学研究発表会, 0042, 2019
- 3) 藤原優, 横田聖哉, 久田裕文, 武石朗, 江川真史, 室井翔太: RTK-GNSS を用いた常時における法面変位の計測値と管理基準値に関する分析, 地盤工学会, 第 54 回地盤工学研究発表会, 0043, 2019
- 4) 奥村欣司, 宗形和洋, 栗田広夫, 永井宏, 横田聖哉, 武石朗: RTK-GNSS による地盤変位計測システムを用いた斜面監視についての一考案, 地盤工学会, 第 54 回地盤工学研究発表会, 0044, 2019
- 5) 加藤大佑, 武石朗, 及川典生, 服部弘通, 寺本哲, 大西吉実: トンネル地表面計測における RTK-GNSS の適用性の検討, 土木学会, 令和元年度土木学会全国大会, CS9-023, 2019
- 6) 藤原優, 横田聖哉, 久田裕文, 武石朗, 飯島功一郎, 江川真史, 室井翔太: RTK-GNSS 測位による常時の法面変位の計測値の評価, 土木学会, 令和元年度土木学会全国大会, III-096, 2019

7.4 マルチ GNSS による自然斜面の安定性評価モニタリング

【シナリオ 5：緊急時（災害時）の対応】

(1) モニタリングの目的と概要

ある民間施設背面の自然斜面が豪雨により崩壊した状況において、再崩壊が懸念されている。

- ① 施設の継続運営に際し、崩壊跡地の安定性（危険性）をリアルタイムに監視すること
- ② 万一の再崩壊時・予兆時に施設利用者、施設管理者への避難を迅速に喚起すること

(2) 適用現場及びモニタリングの概要

1) 現地の地形地質状況（図 7.4.1）

- ① 自然斜面の表層～強風化部が崩落した崩壊跡地
- ② 崩壊規模は幅 50m, 延長 100m, 想定深さ約 5m
- ③ 中生代白亜紀後期の風化溶結凝灰岩を基盤とし、強風化～中風化岩盤となっている



図 7.4.1 現場斜面の状況

2) モニタリングシステムの構成と配置（図 7.4.2）

- ① 崩壊地内に観測点を 3 点配置（図 7.4.3）
- ② 基準点（通信集約機）を斜面下に配置
- ③ 施設事務所内に解析 PC, 回転灯を設置
- ④ 5 分ごとにデータ回収し、解析装置に送信
- ⑤ 観測データを解析し、変位発生時にはメール・回転灯で通知

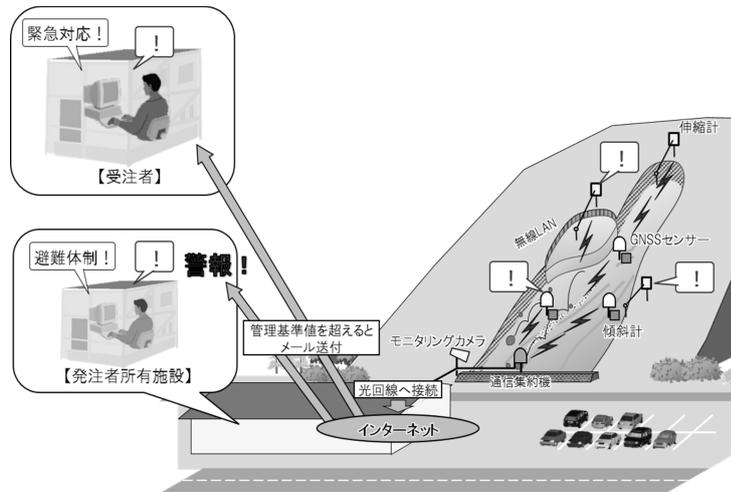


図 7.4.2 モニタリングシステムの全体概要



図 7.4.3 センサの設置状況

3) 緊急時の連絡体制

- ① 管理基準値（表 7.4.1）超過時には関係者（施設管理者、工事関係者）へメール通知する
- ② さらに、施設事務所内の回転灯点灯により施設内関係者に通知する

表 7.4.1 管理基準値

アラートレベル	管理基準値 [変位速度]	パトランプ 色	基準値超過時の対応	
1	現地点検	5mm/[10 日]	黄	現地の点検
2	避難準備	5mm/[5 日]	赤	お客様の避難準備
3	避難準備	10mm/[1 日]	赤	従業員の避難準備
4	全員避難	100mm/[1 日]	赤	全員避難

(3) 計測データ例

6/27～29 および 7/4～7 にまとまった降雨があり、その後変位が発生した際の計測データ例である。

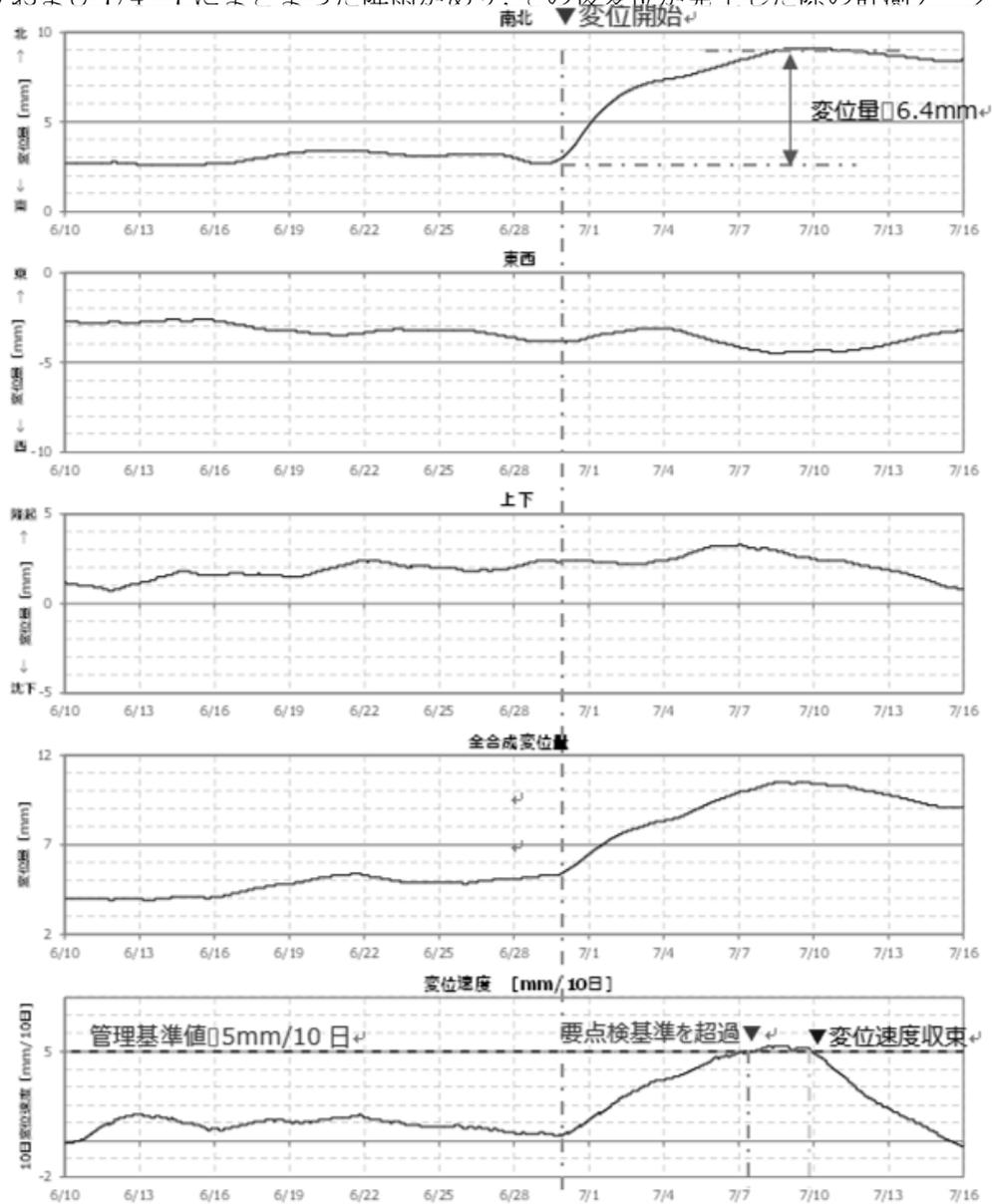


図 7.4.4 現場計測データ

- ① 6/29 に日雨量 100mm 超の降雨(近傍のアメダス観測値)があり、6/30 0:00 頃から変位が発生
- ② 7/7 10:05 に「要点検」の管理基準値 5mm[/10 日]を超過 (最大値は 5.3mm[/10 日])
- ③ 関係者にメール発報，さらに，施設事務所内の回転灯が点灯
- ④ 現地点検を実施 (斜面下部からの目視および現場内踏査)
- ⑤ 目視点検により斜面に異常がないことを確認
- ⑥ 約 61 時間後 (7/9 23:10) に変位速度が 5mm[/10 日]を下回り，変位の収束を確認

(4) まとめ

本モニタリング手法が施設管理者にもたらしたメリットは以下となる

- ① 再崩壊の可能性のある自然斜面の安定性，危険性を定量的かつリアルタイムに判断できた
- ② 施設の営業休止を要する大規模な斜面安定対策を実施することなく，継続運営が可能となった
- ③ 施設利用者，施設管理者の安全性を確保し，危険性検知時の迅速な避難通知が可能となった

7.5 多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による道路のり面の安定性評価モニタリング

【シナリオ 5：災害時の対応】

(1) モニタリングの目的と概要

1) 目的

災害が発生した道路切土のり面の通行安全性・通行制限・対策工の安全性等の監視，及び二次災害防止と復旧工事中の安全確保を目的としてのり面変状監視（モニタリング）を実施した。

2) 概要：道路のり面の崩壊検知事例

現場対象地域は火山噴出物を主とする新第三系の北坂本累層である。北坂本累層は，基盤沈降を伴う火山活動により生じた堆積盆地内で形成され，広域的な熱水変質を受けたグリーンタフ相当層であるとされている。崩壊形態は，①一次崩壊：切土法面の崩壊，溶岩・凝灰角礫岩の風化部の崩壊と，②崩壊斜面に堆積した崩積土の二次崩壊であり，②が今回の観測対象であった。

台風に伴う降雨により切土のり面が崩壊した箇所（図 7.5.1）で，復旧工事の安全確保を目的として，崩積土に傾斜センサを図 7.5.2 と図 7.5.3 に示した 6 箇所に設置した。その後の降雨で崩積土の二次崩壊が発生し，のり面中央部の傾斜計 K-2 が転倒した。図 7.5.4 には，その際ののり面の傾斜方向，のり面と直交方向の値，両方向の合成傾斜角（絶対値），現場近傍のアメダスの累積雨量の推移を示している。傾斜センサの転倒直前には，傾斜角速度はさらに加速した後に転倒する加速クリープ破壊的な挙動を捕捉した。

(2) 計測データ（二次災害を事前に防ぐ成功事例）



図 7.5.1 道路切土のり面被災後の写真

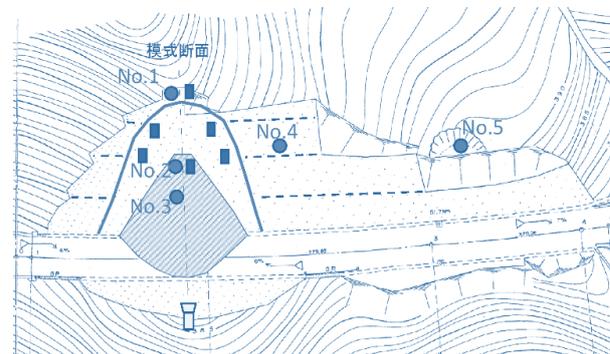


図 7.5.2 被災斜面の機器配置図

図 7.5.4 に観測経過を示す。一次崩壊から時間があまり経過しておらず，元々不安定な崩積土斜面であった。センサ設置直後の 7/21 16:00 から 20:00 にかけての降雨で， $0.083^{\circ}/h$ の傾斜変位が生じ，これが翌朝 8:00 まで続いた。8:00～9:00 の約 10mm の降雨の追い討ちで，傾斜変位速度が $0.89^{\circ}/h$ に加速した。さらに 11:00 以降のさらなる降雨により，12:00 以降傾斜変位速度が 12°

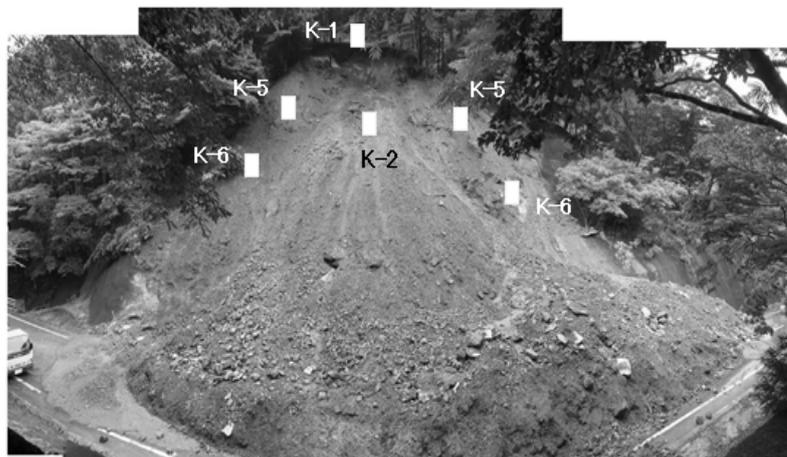


図 7.5.3 道路切土のり面被災斜面の機器設置位置

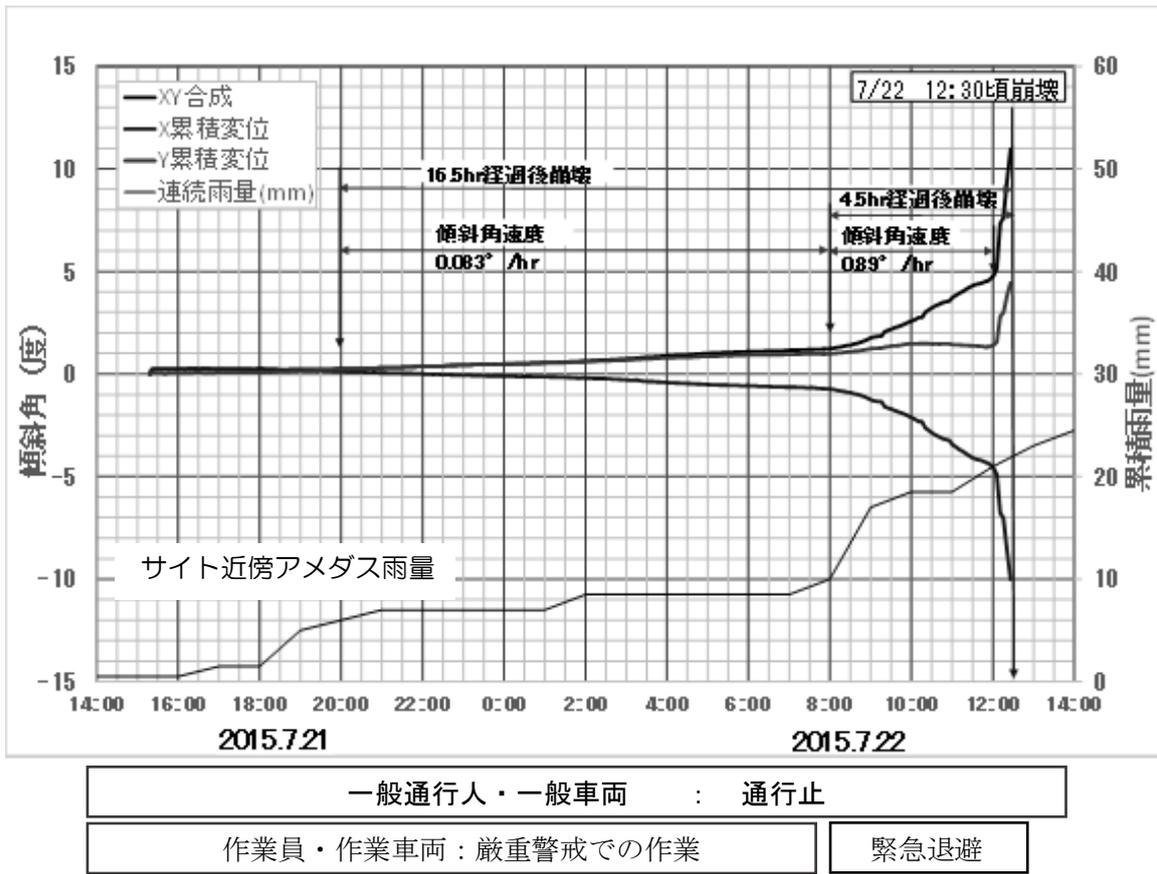


図 7.5.4 傾斜計による崩壊の捕捉例

/hと急激に増加し、12:30 についに崩落した。監視の結果として、7/21 14:00 に図や写真の位置に傾斜センサを設置したところ、K-2 を設置した周囲の崩積土が翌日 12:30 に崩壊し、センサは転倒した。この結果、この状態で崩積土の除去を行うことは困難であると判断し、仮設防護柵を側溝付近に設置することにし、併せて、対面側の法面（高さ 5 m 程度）となっている小山を道路レベルまで平滑に切り下げて幅員を確保し、仮設防護柵を路肩に設置することにした。

(3) まとめ

モニタリングがもたらしたメリット：①多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による安定性モニタリングにより、崩壊斜面の安定性をリアルタイムかつ定量的に把握 ②これにより、災害後の通行安全性や通行制限などの措置の明確化、対策工事中の安全性監視による二次災害の未然防止を可能とした（現場への崩壊警報発信も実際に行われ、退避措置に利用された）。

7.6 多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による自然斜面の安定性評価モニタリング

【シナリオ 6：補修・補強の効果の確認】

(1) モニタリングの目的と概要

1) 目的

災害が発生した自然斜面で復旧工事を行った際の通行安全性・対策工の安全等の監視・二次災害防止、および復旧工事の補修・補強の効果確認を目的として斜面変状監視を実施した。

2) 概要

2011年7月の連続降雨により、国道脇のり面が崩壊した（図 7.6.1）。崩壊範囲は、延長が約 45m で高さが約 29m であった。崩壊箇所は、両側を沢で挟まれた尾根部に位置し、当該地域には中生代後期白亜紀の花崗岩類が分布していた。地盤調査により、花崗岩の風化が深部まで進行してことが判明し、崩壊のり面の上部には、幾つかの開口亀裂や滑落崖に相当する段差が認められた。



図 7.6.1 国道沿いのり面崩壊現場

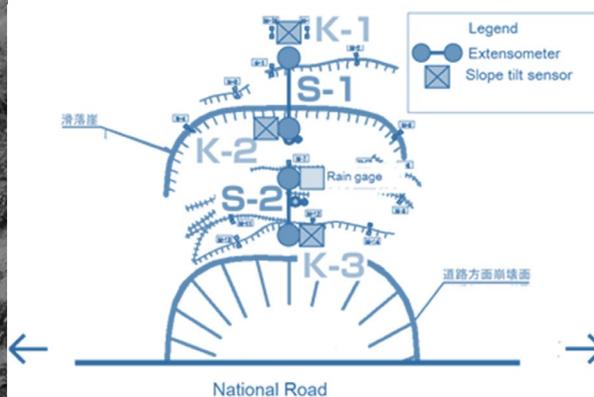


図 7.6.2 機器の設置状況

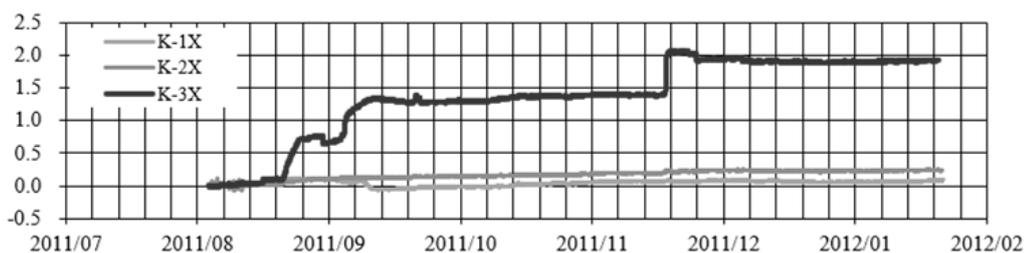
当該国道は、重要な生活道路であり、斜面崩壊が発生した以降に、仮設防護柵および押さえ盛土による復旧工事の間における二次災害の防止と、復旧工事の補修・補強の効果を確認するための目的として、伸縮計・孔内傾斜計・雨量計・監視用 Web カメラおよび斜面崩壊検知センサを設置して、遠隔地からのリアルタイム自動監視を行った。図 7.6.2 は、伸縮計 S-1・S-2 および斜面崩壊検知センサ K-1・K-2・K-3 の設置場所を示したものである。ここで、図 7.6.4(a) に示した斜面崩壊検知センサの X 軸は斜面方向の測定値であり、全て斜面下部の方向に傾斜する結果となっている。図 7.4.3 は補強の効果を確認した写真である。



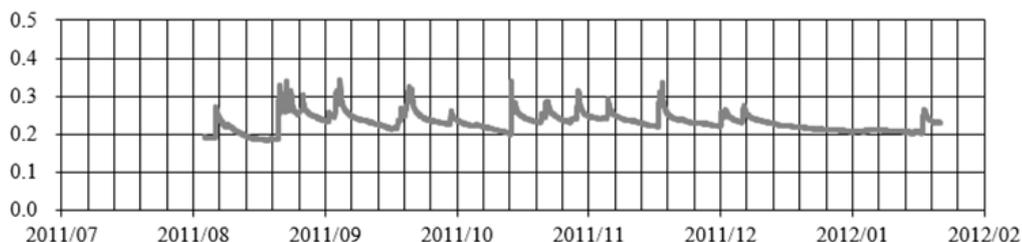
図 7.6.3 補強効果確認後の写真

(2) 計測データの一例

(a) 各センサの斜面方向に対する傾斜角度（度）、+は斜面方向に傾斜、-は斜面方向の反対側



(b) 土壌体積含水率 (VWC・%)



(c) 時間雨量 (mm/時)

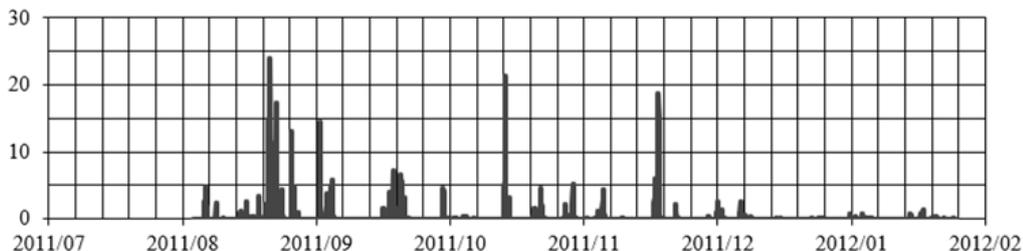


図 7.6.4 傾斜計による斜面崩壊の捕捉例

図 7.6.4(a)に示すように、計器設置後、降雨（図 7.6.4(c)）とともに斜面の変状が発生した。図 7.6.4(b)に示した体積含水率は、斜面表層の深さ 30cm 程度付近の測定値であるが、K-1 や S-1 と同様、降雨に敏感に反応し、体積含水率もまた降雨と強い相関性がある結果が得られた。体積含水率は表層付近の水理特性を示すパラメーターであり、降雨との相関性の強い結果が得られているため、個別斜面の危険度を判断する有力な指標の一つになりえることが示唆された。

斜面の傾斜方向の値・土壌水分計の値と雨量計の時間雨量値を比較した結果、これらデータ間の相関性を確認した。復旧工事終了前には傾斜計観測値が安定し、復旧工事による補修・補強の効果を確認できた（図 7.6.3）。

(3) まとめ

モニタリングがもたらしたメリット：①多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による安定性モニタリングにより、崩壊斜面の安定性をリアルタイムかつ定量的に把握 ②これにより、復旧工事における通行安全性・対策工の安全等の監視、二次災害防止および復旧工事の補修・補強の効果確認という一連の管理者メリットを現地確認

添付資料 1：用語集

用語	意味	類義語・関連語
RTK (測位)	RTKは、Realtime Kinematic の略で、既知点からの補正観測情報を携帯電話や無線を利用して移動局に送信し、移動局の位置をリアルタイムで測定する方法をいう。精度は数 cm 程度で精密な GNSS 衛星の軌道データを後日入手して補正する方法に比べ若干劣るが、リアルタイム性の価値は高い。	Static
FTP サーバ	FTP (File Transfer Protocol: ファイル転送プロトコル) を利用してファイルの送受信を行うソフトウェアにより、ファイルを送受信するために、ネットワーク上に設置されるサーバコンピュータ。	
円弧すべり	土砂が下方に移動するすべり面が円弧形状であるすべり。	
崖錐地形	急崖や急斜面の崖下に形成される円錐状の堆積地形。	
回折性能	電波、光などが障害物の影の部分に回り込む性能。	
観測点	位置（地球上の座標）を測定しようとする点。衛星測位における移動点。	移動点
干渉測位	干渉測位とは、基準地点と未知点とにそれぞれ受信機を置いて同時に同一の組の GNSS 衛星を観測し、両地点を結ぶ基線の長さや方向を求める測位方法である。衛星は最低 4 個を同時観測することが基線解を計算するのに必要で、実際はデータの質を向上させるためには視界内の衛星をできるだけ多く観測する。	
カルマンフィルタ	誤差のある観測値を用いて現在の状態を推定する統計的なフィルタ。	
基準点	地球上の水平位置や高さが既知の点。衛星測位における不動点。	不動点
基線解析	衛星測位の干渉測位法において、衛星からの信号電波を用いて基準点と観測点間の基線ベクトルを求め観測点の位置（座標）を決定するための一連の解析作業。	干渉測位
(地盤の) クリープ	持続荷重作用下において時間の経過とともにひずみが増大する現象。	一次・二次・三次クリープ
降雨強度	瞬間的な降雨の強さのこと。	日降雨量 1 時間降雨量

用語	意味	類義語・関連語
GLONASS	GLONASS は、Global Navigation Satellite System の略で、かつてのソビエト連邦が開発し、現在はロシア宇宙軍の手によってロシア政府のために運用されている衛星測位システムである。アメリカ合衆国によって運用されている GPS や、欧州連合 (EU) によって運用されている Galileo などに対応した、ロシアの衛星測位システムである。	
恒星日差分法	恒星日差分法は、同じ衛星配置の計測値と基準値の差分をとる方法で、衛星測位誤差が衛星配置に依存している場合に効果的である。恒星日差分法の長所は、「リアルタイム性」に優れていることである。	
最尤推定値	最尤推定値とは、確率的にもっとも出現頻度が高くなると予想される値である。	点推定
傾斜角速度	傾斜が変化するスピード。	
3成分振動計	X方向、Y方向、Z方向（水平2、垂直1方向）の3成分の振動を計測可能な振動計。	落石センサ
上空視通	衛星測位において、観測機器上方の衛星の見渡せる範囲。	
斜面崩壊（崩壊）	斜面のある程度のまとまった土や岩が重力によって動く現象のこと。	浅層斜面崩壊、深層斜面崩壊、表層崩壊、岩盤崩壊
地すべり	斜面の一部あるいは全部が地下水の影響と重力によってゆっくりと斜面下方に移動する現象。一般的に移動土塊量が大きいため、甚大な被害を及ぼす。また、一旦動き出すとこれを完全に停止させることは非常に困難。我が国では、地質的にぜい弱であることに加えて梅雨あるいは台風などの豪雨により、毎年各地で地すべりが発生している。	岩盤地すべり、風化岩地すべり、崩壊土地すべり、粘質土地すべり
トレンドフィルタ	計測データ群に確率構造を与えることによって、観測値に含まれるノイズを推定、排除して、真の変位値を推定するためのフィルタ。	時系列統計解析（処理）
斜面崩壊危険度	急傾斜地崩壊危険箇所のうち、診断書（カルテ）で作成された、降雨・地震による斜面崩壊の危険性の評価ランクをさす。	
準天頂衛星システム	日本上空を通る準天頂衛星は、特定の一地域の上空に長時間とどまる軌道をとる人工衛星で、「みちびき」	みちびき、QZSS

用語	意味	類義語・関連語
	は米国製の GPS を補完する測位システムとして計画された日本の準天頂衛星システムである。2018 年にみちびきが 4 機体制になり、アジア・オセアニア地域の各地点では常時見ることができる。2023 年までには 7 機体制になる予定である。	
GNSS	GNSS は、Global Navigation Satellite System (全地球航法衛星システム) の略で、GPS、GLONASS、Galileo、準天頂衛星システム (QZSS) 等の衛星測位システムの総称である。	
GPS	GPS は Global Positioning System (全地球測位システム) の略で、アメリカ合衆国によって運用される衛星測位システムを指す。	
斜面走向方向・傾斜方向	斜面走向方向：斜面と水平面が交差する直線の方 斜面傾斜方向：斜面の傾斜の方。落石などは当然傾斜方向に転がる。また、走向方向とは直角をなす。	流れ盤，受け盤
深層斜面崩壊	山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、すべり面が表層崩壊よりも深部で発生し、表土層だけでなく深層の地盤までもが崩壊土塊となる比較的規模の大きな崩壊現象。	地すべり 土石流
Static (測位)	Static は、干渉測位の 1 つで複数台の受信機で長時間観測する方法である。測量業務等の高精度が必要な作業に用いられる。長時間の観測を行うため観測データが平均化され、大気の揺らぎやマルチパス及び雑音電波の影響を受けにくいため、衛星測位の測位方法の中で特に高い精度を得ることができる。	Kinematic
遷急線	山地斜面を尾根から見下ろしたとき、急に傾斜がきつくなる地点 (遷急点) を結んだ線。	
遷緩線	山地斜面を上方から見下ろしたとき、急に傾斜がゆるくなる地点 (遷緩点) を結んだ線。	
浅層斜面崩壊	山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、厚さ 0.5~2.0m 程度の表層土が、表層土と基盤層の境界に沿って滑落する比較的規模の小さな崩壊のこと。	表層崩壊
体積含水率	土壌全体積のうち水分が占める体積の割合。	土壌水分
等値線解析	図面上である量が同じ値とみなされる点を結び、線を引くことにより視覚的にわかりやすくした解析法。	等高線，等圧線 コンタ

用語	意味	類義語・関連語
自動ルーティング機能	無線通信の経路を自動的に構築する機能。	
道路防災総点検	地震や豪雨・豪雪等の災害に対する道路の防災性の確保を図るための基礎資料を得ることを目的に構造物、道路法面等の点検を全国一斉に実施。近年では平成 8・9 年に実施。また、効率的・効果的な日常管理を目指し、点検結果のデータベース化を図っているところ(国土交通省用語集より)。その後、平成 18 年度に道路における災害危険箇所の再点検を実施している。点検箇所は①対策が必要②カルテ対応③対策が必要ないの 3 分類に総合評価する。	
道路土工構造物点検要領	道路土工構造物(シェッド, 大型カルバートを除く)の安全性の向上及び効率的な維持修繕を図るため, 変状を把握し, 措置の必要性の判断を行う目的で定められたもの。2017 年(平成 29 年)8 月に国土交通省道路局から発出された。	
特定道路土工構造物	道路土工構造物技術基準に規定された重要度 I の道路土工構造物のうち, 長大切土又は高盛土のこと。	
ドライビングフォース	斜面のすべり現象において, 土塊を滑らせる駆動力となる外力。自重や浸透力, 地震力等がこれに相当する。	
土壌水分	土壌に含まれる水分のこと。	体積含水率
土 壌 水 分 計 (ECH ₂ O タイプ)	土壌の誘電率が体積含水率により変動することを利用して高周波電磁波の反射により土壌の誘電率を用いて土壌の体積含水率を測定するセンサ。	誘電率土壌水分計
特定小電力無線	電波法に基づいた無線免許や資格, 届出の必要がなく使用・運用できる無線局のことである。ただし, 特定小電力無線機の製造者は技術適用基準の取得が必要であり, 認証されたことを示す技適マークが付されていないといけない。	特定小電力無線局
パケット通信	音声などのアナログ通信ではなく, データをパケット(小包)に小分けして送受信する通信。他の通信のデータパケットを同じ回線で共有して送受信できるので効率が良い。	回線交換方式
ブロードキャスト方式	ブロードキャスト方式とは, 特定の相手を指定せず, 同じネットワークに参加するすべての機器に向けて一斉	

用語	意味	類義語・関連語
	にデータなどを送信する方式。	
プリアンプ	前置増幅器。レコードや録音テープ（注：落石振動調査法の場合は振動計に相当）から送られてくる弱い信号をメインアンプ（増幅器）に送り込めるまでに増幅すると同時に、音質・特性を適当に調節する。	
母集団移動平均法	母集団移動平均法は、時系列データを平滑化する手法で、直近の n 個のデータの重み付けのない単純な平均である。GNSS 衛星は約 1 日周期で同じ衛星配置を繰り返しているため、母数を 1 日分の時系列データとするとその母数にはあらゆる衛星配置のデータを含んでいる。したがって、1 日分の時系列データの母数は、統計的推測をする上で母集団の特性値が同じになる。 時系列データなどで増減の激しいデータでも、移動平均を求め、それをグラフに表すことによって、データは平均化され、傾向をつかむことが容易になる。	単純移動平均, 加重移動平均, 指数移動平均
マルチホップ伝送	端末同士が直接通信するだけでなく、他の端末を経由することでより広い範囲の端末と通信を可能にする無線伝送。	
マルチパス	建造物や地形などの影響で電波の屈折や反射が生じることで、直接波よりも遅れて到達した電波の経路のこと、また、これに起因して誤差が増大する障害。	
MEMS 傾斜計	Micro Electro Mechanical Systems は、「微小電気機械システム」の頭文字からメムスと呼ばれている。MEMS 傾斜計は、この MEMS を活用した加速度センサのこと。	マイクロマシン
メッシュネットワーク	通信機能を持った端末同士が相互に通信を行うことにより、網の目(mesh)状に形成された通信ネットワーク。	
落石	山やがけの上から石が落ちてくる現象。ひとたび民家や道路などのインフラで落石が発生すると、その危険性から社会的影響が大きい。	トップリング, バックリング
落石振動調査法	不安定岩塊の振動特性と、直近の基盤の振動特性を比較し、不安定岩塊の安定性を評価する調査法。	
リチウム電池	負極に金属リチウムを使った化学電池。	
ローパスフィルタ	衛星測位において、基線解析結果に含まれる日周期変動などの短周期の変動を遮断し、地盤変位による長周期の変動を抽出するために用いるフィルタ。	

添付資料 2：斜面土砂災害分類と発生メカニズム

第1章の図1.1.1には、道路土工-切土工・斜面安定工指針（平成21年度版）¹⁾に拠る斜面土砂災害分類を示した。これと全く同一ではないが、斜面土砂災害の地盤工学的なメカニズムや発生要因、特徴、我が国の想定箇所数、予測手法の現状等を地盤工学ハンドブック（1999）²⁾を参照して取りまとめた結果を図-添付2.1および表-添付2.1に示している（本ガイドラインの対象となる「崩壊」「地すべり」「落石」の3現象に着色した）。モニタリング手法の現場適用性を検討する際には、検討対象となる斜面土砂災害の種類やその前兆現象、発生箇所、発生要因、発生規模、発生（地盤変位）速度、発生予測の現状等を念頭に置いておくことと有用であると考え、準備した。参照されたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工-切土工・斜面安定工指針，平成21年度版
- 2) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，1999.3.

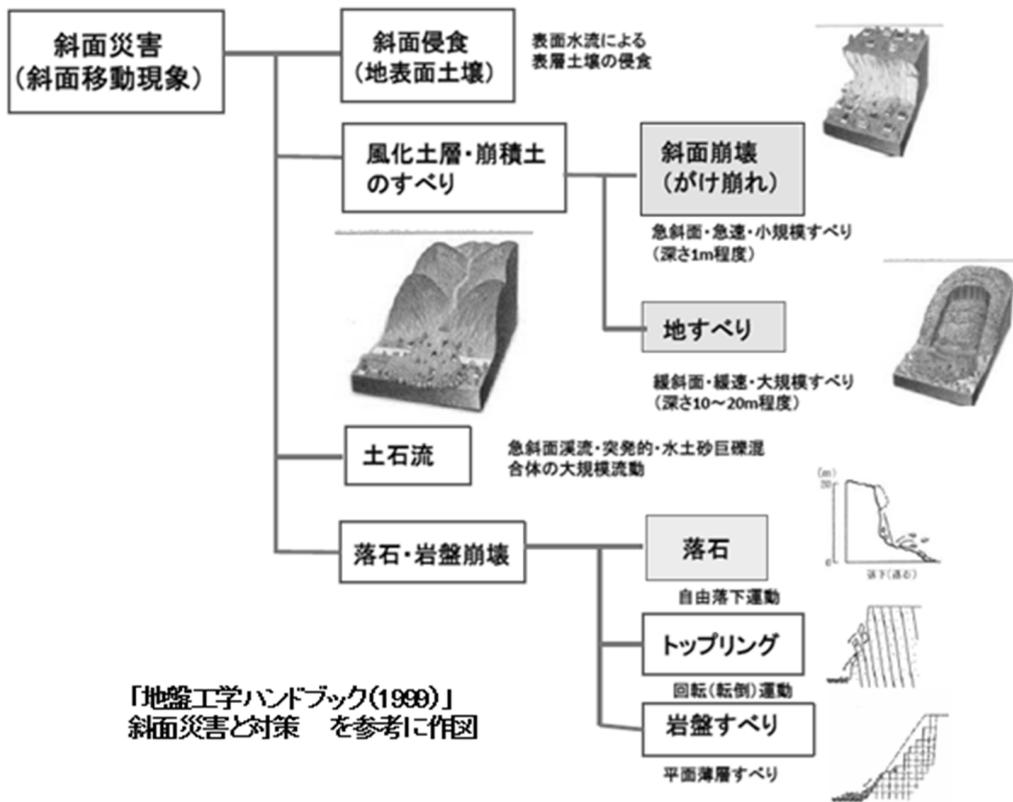


図-添付 2.1 地盤工学ハンドブックにおける斜面災害の分類

表-添付 2.1 斜面土砂災害の分類と特徴（地盤工学ハンドブック 1999²⁾ を参照し作成）

斜面土砂災害の種類		災害発生メカニズム	斜面災害の素因・誘因	災害の規模と特徴	想定箇所数	発生予測手法の現状
斜面侵食(地表面土壌)		地表面土壌の構造破壊→微細粒子による難透水クラストの形成→表面流のせん断力による表土粒子の移動に伴う表面侵食(リル・細溝)の発生→リルの集合・成長に伴うガリ(雨烈)の進展と加速度的な侵食。	素因は収奪的農業、過放牧、過剰伐採等による地表植生の破壊。誘因は降雨(植生破壊による直達降雨の増大)。	斜面の極表層で発生。降雨に伴う段階的、加速度的侵食(リル、ガリ)が特徴。	—	経験的モデルと理論的モデルが公開されている(いずれも自然資源保全局: Natural resources Conservation Service)
風化土層・崩積土のすべり	斜面崩壊(かけ崩れ)	斜面内にある土層のせん断強度が斜面土層に加わるせん断応力より小さくなった場合、その土層にせん断破壊が生じ、破壊面または層を境に斜面の運動が生ずる現象。円弧形状のすべり面をなす場合が多い(層境界の直線・複合すべりもある)。	主な素因は地形的因子(斜面勾配、地形の凹凸等の形状(集水地形など)、断層の存在、地盤の土質力学的特異性等)。誘因は斜面形状の変化、降雨などによる地下水位の変化、地震力の作用など。	小規模な30度以上の急斜面で突発的に発生(平均的な崩壊規模は深さ1.6m、崩壊幅17m、崩壊土量346m ³)。土砂の移動は急速(10mm/日以上)。移動土塊の大半がその下流域に攪乱堆積。主誘因は豪雨と地震。西日本で台風・梅雨時に多く発生。	平成4年調べで全国に8万1850か所(人家・公共施設への危険性のある箇所)で抽出。保全対象が道路のみの場合ははるかに多い。斜面崩壊の発生件数は平成4年～8年の5年間で2392件(約500件/年)。	危険箇所・規模(危険範囲)・発生時期の3つの予測がある。危険箇所と規模の予測は経験的手法(点数制、統計解析等)と物理的モデルに基づく応力解析があるが、斜面崩壊の危険箇所、規模の判定は容易ではない。発生時期の予測は現在の技術レベルでは非常に困難で、動態観測もこまめな。斜面崩壊では「移動地塊の到達範囲の予測」も必要となる。
	地すべり			大規模な、角度10～25度程度の緩斜面で緩慢に移動を繰り返す。平均規模は深さ18m、崩壊幅202m、長さ334m)。土砂の移動は緩速(0.01～10mm/日程度)。発生域内に地塊の大半が残存する。深部に広範囲に分布する断層・破砕帯などの脆弱すべり面沿いに発生。主誘因は融雪や梅雨等の長期の降雨浸透。	平成4年調べで全国に1万1042か所(人家・公共施設への危険性のある箇所)で抽出。保全対象が道路のみの場合ははるかに多い。地すべりの発生件数は平成4年～8年の5年間で595件(約120件/年)。	上記斜面崩壊と同様。繰返し、地すべり地形では発生箇所や規模の予測は可能だが、初生的地すべり箇所の予測は難しい。発生時期の予測は動態観測(伸縮計による変位測定が一般的)が前提。クレープひずみ速度を用いた崩壊時間の予測法もある。誘因である降雨量に着目し、連続雨量と降雨強度から崩壊発生を予測する手法もある。
土石流		15度以上の河床勾配の渓床上の岩屑に多量の水が供給され、土砂巨礫混合体の突発的な大規模流動が発生。	素因は勾配(溪流で河床勾配15度以上)、材料(岩屑など土石流を構成する土砂が山腹や溪流に存在)、水(多量の水が溪流に存在)の3点。誘因は豪雨。	混合体の移動速度は10～20m/sと大。堆積土量2万m ³ 以下、停止長は85%が300m以下。前兆現象は不明。	平成5年調査では全国で7万9318か所の土石流危険溪流が存在。関西が多く、最多は広島県(4930)	土石流危険溪流調査(勾配、堆積物、厚さ、地形、履歴、湧水、流域面積)による。その中に人家が5戸以上もしくは公共設備等がある場合、土石流危険溪流に指定。発生時期については降雨量から規模(土砂堆積)を統計的に予測。
岩石・岩盤崩落	落石	岩塊に富む斜面で、剥離した比較的小規模の岩塊が自由落下運動により落下する現象。	素因は地形(急勾配、オーバーハング)と地質(崖錐・段丘礫層・火山性堆積物・風化花崗岩類等)。誘因は気象(降雨・融雪・凍結融解・風)や地震。	岩塊の個数nで表現できる小規模で、岩塊の直径が1m程度まで。規模は目安として約1～数m ³ 。	落石の発生件数は未知なほど多いと考えられる。一般的に小さな落石の発生回数は年に数回。	落石(岩盤崩壊)の危険度を斜面単位でおおまかに判定するため、測量・空中写真・現地踏査・クリノメータによる亀裂等の走行傾斜評価などを用いた危険度判定法がある。不連続変形法や個別要素法に基づく落石シミュレーションの適用事例も見られる。
	トップリング	移動岩塊の上部より下方の移動量が少ない、いわゆる積木の回転運動に類似する岩塊の転倒現象。				
	岩盤すべり	岩盤斜面において、斜面内の脆弱帯をすべり面として規模の大きな岩盤の移動が比較的緩速に発生する現象。	素因は地形(勾配・尾根型などの形状)と地質(亀裂の発生・脆弱層の有無)。誘因は気象と地震であるが、現段階では結果的に特定できるのは地震のみ。	岩塊の個数ではなく、全体の体積で表現するほうが適切な多量のもので、規模の目安は約数m ³ ～10万m ³ 程度のブロック状に落下～すべり運動を生ずる(平面形状の薄層(1m以内)すべりの形態を取る)。	大規模な岩盤崩壊は100～1000年に1回発生。	

第9編 モニタリングデータの伝送

1章	インフラモニタリングにおける伝送の概要	9-1
1.1	モニタリングデータの伝送	9-1
1.2	伝送の基本構成	9-1
1.2.1	モニタリングシステムの機能と管理拠点	9-1
1.2.2	モニタリングシステムの構築例	9-2
1.2.3	モニタリングシステムを構成する各機能の概要	9-4
1.3	インフラモニタリングの伝送要件によるパターン分け	9-7
2章	ケーススタディ	9-9
2.1	コンクリートのひび割れ幅のモニタリングにおける伝送	9-9
2.2	RC床版のモニタリングにおける伝送	9-10
2.3	のり面・斜面のモニタリングにおける伝送	9-11
3章	目的別伝送シナリオ	9-13
3.1	伝送シナリオの分類	9-13
3.2	シナリオ(1)：データの手持ち回収	9-14
3.3	シナリオ(2)：高速データ通信の利用	9-14
3.4	シナリオ(3)：LPWA サービスの利用	9-14
3.5	シナリオ(4)：定点収集型モニタリング	9-15
3.5.1	無線マルチホップ機能の概要	9-15
3.5.2	機器の選定	9-17
3.5.3	機器設置時の電波伝搬の確認	9-17
3.5.4	センサデータ量とデータ収集時間	9-19
3.6	シナリオ(5)：巡回収集型モニタリング	9-21
3.6.1	機器の選定	9-22
3.6.2	データ受信エリア（範囲）	9-23
3.6.3	データ受信精度（受信成功/失敗）	9-24
3.6.4	データ通信量	9-24
4章	ネットワーク技術の選択	9-26
4.1	センサネットワーク(IAN)向けの有線通信方式	9-26
4.2	センサネットワーク(IAN)向けの無線通信方式	9-26
4.3	広域ネットワーク(WAN)の選択	9-27
参考：	モニタリングシステムにおけるセキュリティの考慮について	9-29
5章	適用事例	9-30
5.1	脱塩補修後の補修効果の遠隔モニタリング	9-30
5.2	加速度センサを用いた床板の遠隔モニタリング	9-35
添付資料 1：	用語集	9-39

1章 インフラモニタリングにおける伝送の概要

1.1 モニタリングデータの伝送

現場に設置するセンサで計測したデータは、以下の様な目的で、現場以外に設置したコンピュータシステムへ格納する場合がある。

- 可視化： センサで計測したデータをグラフ、数値、図式などで表示
- 解析： 計測したデータに数学的処理等を行い意味づけ（例：加速度センサの計測データから固有振動数や傾斜角度を算出するなど）
- 保存： 計測・算出したデータを継続的に蓄積
- 活用： 保存したデータの複雑な事柄を要素や性質に分類（例：センサデータから対象構造物の状態や事象などを人や AI が判断するなど）

本ガイドラインでは、このためにデータを移動する事を「伝送」と呼ぶ。伝送には、データを格納した計測器やメモリカードを運搬する方法から、ネットワークを構築する方法まで、各種の選択肢が考えられる。昨今では、IoT（Internet of Things, 物のインターネット）の普及により、通信機能を持ったセンサの入手や、小容量・低価格の IoT 向けデータ通信サービスの利用などが比較的容易になっている。本章では、これらを踏まえ、モニタリングデータの伝送方法を整理する。

1.2 伝送の基本構成

1.2.1 モニタリングシステムの機能と管理拠点

本節では、モニタリングシステムの主な機能を、国際電気通信連合電気通信標準化部門(ITU-T)が制定する IoT に関する国際勧告を参考に、保存活用プラットフォーム、モニタリングプラットフォーム、広域ネットワーク (WAN¹)、ゲートウェイデバイス、IoT エリアネットワーク (IAN²)、センサデバイスの 6 つに分類する。また、これらの機能を持った設備を運用管理する主な拠点を、道路管理者の実態を踏まえ、保存活用拠点、モニタリング拠点、現場の 3 か所に大別する。ここで、センサデバイスで計測したデータをモニタリングプラットフォームへ移動する方法を「伝送」とする。これらの機能と拠点の関係を図 1.2.1 に示す。なお一部の拠点や機能のみでモニタリングシステムを構成する事もできる。

¹ WAN: Wide Area Network

² IAN: IoT Area Network

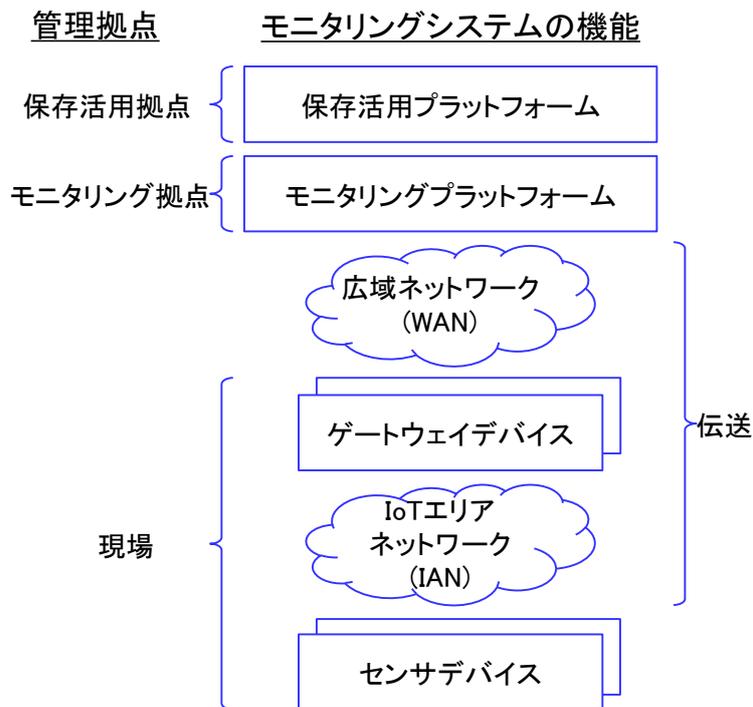


図 1.2.1 モニタリングシステムの主な機能と設置拠点

図 1.2.1 で「現場」とは、センサを設置する一つの構造物または大規模構造物の一区画を指すものとする。「モニタリング拠点」とは、1つまたは複数の現場に設置したセンサデバイスを管理し、データを収集する拠点とする。モニタリング拠点において各現場のセンサが計測したデータを収集し、グラフや表による可視化やデータ変換等を行うコンピュータシステムを、モニタリングプラットフォームと呼ぶ。一方、「保存活用拠点」とは、複数のモニタリング拠点で収集したデータの長期保存や、他のデータと組み合わせたビッグデータ分析などの活用を行う拠点である。本編では、センサデバイスとモニタリングプラットフォーム間の伝送について述べる。保存活用については、本ガイドライン第 10 編「データの保存・活用」を参照されたい。

1.2.2 モニタリングシステムの構築例

インフラモニタリングの対象となる現場には、センサデバイスを設置する。伝送のためにネットワークを構築する場合には、現場で複数のセンサを接続する IAN と、これをモニタリング拠点と接続する WAN の 2 種類のネットワークを考慮し、2つのネットワークを接続するためにゲートウェイデバイスを設置する。モニタリングシステムの構築に当たっては全ての機能を備える必要はなく、図 1.2.2 に示す様に、センサの種類やモニタリングの目的に応じて異なる方式を選択できる。

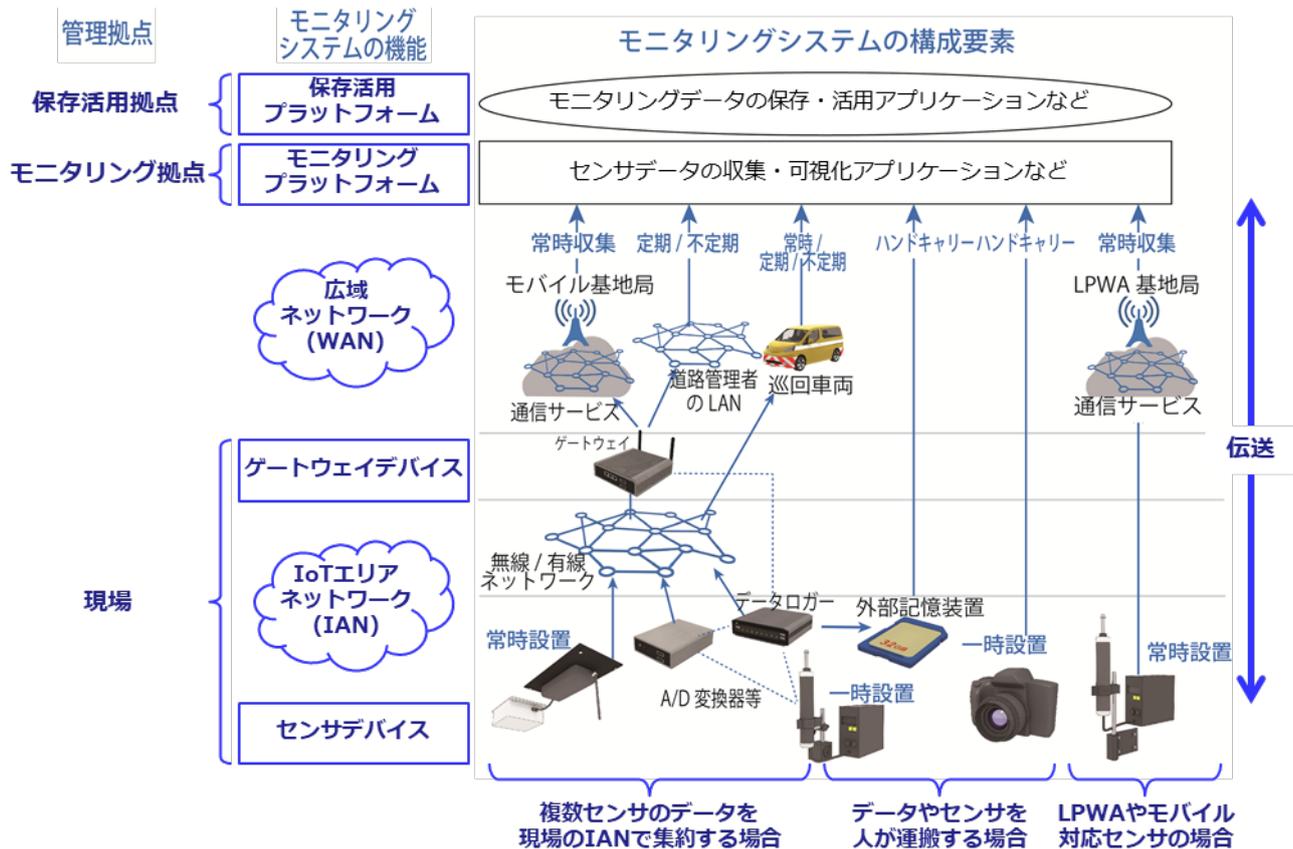


図 1.2.2 モニタリングシステムと伝送機能の構成

図 1.2.2 の下段に、3 種類のモニタリングシステムの構築例を示している。

同図右は LPWA や LTE などのモバイルデータ通信サービスに対応したセンサを利用する場合の例で、現場で IAN を構築する必要が無く、通信事業者のサービスに直接接続してデータ収集ができるため、即時性の必要なモニタリングに適している。この場合、現場のネットワーク設備投資やネットワークの運用管理が不要だが、月額通信サービス利用料が発生する。料金は契約するセンサ数、データ量、通信回数などに応じて設定されるため、場合によっては高額になることもあり、用途が見合うかの検討が必要となる。

同図中央は、センサ機器やメモリカードを人が運搬する場合である。ネットワーク設備は不要で、センサの数が少なく即時性が不要な場合に適している。一方、モニタリングプラットフォームへ即時にデータを反映する事は出来ない。また現場へのアクセスが悪い場合や多数の対象機器がある場合には現地でのデータ回収作業が煩雑になる場合がある。

同図左は現場に複数のセンサがある場合に IAN で相互接続して計測データをゲートウェイに集約し、WAN や巡回車両などを介してモニタリングプラットフォームへデータを送る例である。IAN 設備の設置と運用管理が必要だが、即時にデータをモニタリングプラットフォームへ送る事が出来る。また WAN に通信サービスを利用する場合もゲートウェイへ一本化できるため、通信料金を抑制できる。センサ数が多く、かつ即時にデータを取得したい場合に適している。

1.2.3 モニタリングシステムを構成する各機能の概要

本項では、図 1.2.2 で示した伝送システムを構成する機器やネットワークについて説明する。

(1) センサデバイス

センサデバイスには、通信機能やデータ処理機能などが一体化して IoT に対応したセンサデバイスと、計測機能だけを持った従来型のセンサがある。

前者の IoT 対応センサデバイスは、センサから収集した情報をデジタルデータとしてネットワークへ送信できるほか、計測条件などをモニタリングプラットフォームなどから設定できるものもある。センサデバイスには、センサを内蔵したものと、従来のアナログセンサ等を接続して使用するインタフェースを持ったものがある。ネットワークを構成する 1 端末という意味でノードと呼ばれる場合もある。IoT 対応センサデバイスの機能例を図 1.2.3 に示す。

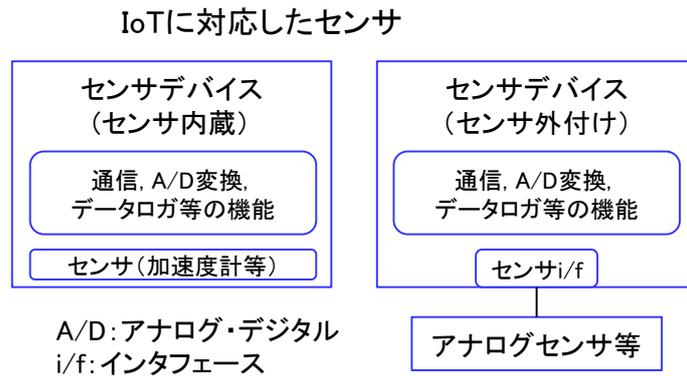


図 1.2.3 IoT 対応センサデバイスの機能例

一方、従来のセンサには、計測値を電圧や電流などのアナログ情報または連続したデジタルデータとして出力する機能だけを持ち、アンプ、A/D（アナログ/デジタル）変換器、データロガーなどの外部装置と現場で接続することで、センサデータの計測やネットワークへの接続ができるものもあり、本編ではこれらの現場に設置する装置一式についてもセンサデバイスと呼ぶ。図 1.2.4 に従来型センサで構成されるセンサデバイスの例を示す。アンプ、A/D 変換器、データロガーなどは、接続できるセンサの機種や台数に限りがある場合があるほか、インタフェースが独自のものもあり、対応した機種を選定する必要がある場合もある。これを考慮し、測定目的やセンサの種類に合わせて選定するとよい。

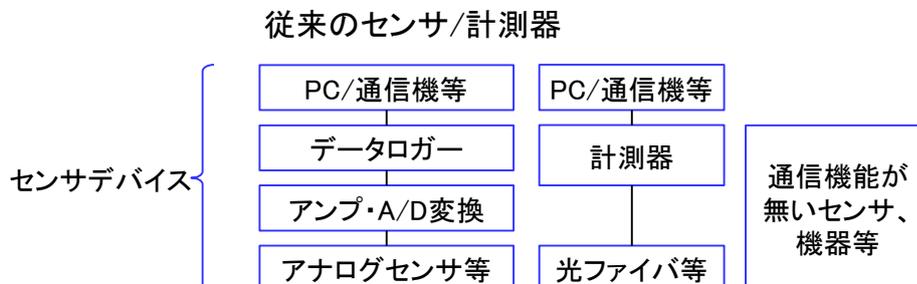


図 1.2.4 従来型のセンサ/計測器でセンサデバイスを構成する例

いずれのセンサデバイスも、センサで計測したデータを全て収集する機能を持つものと、あらかじめ設定した閾値の超過の判定機能や、単位時間当たりの平均値/最大値/最小値などの特徴値を

算出する機能などを持つものがある。

(2)IoT エリアネットワーク(IAN)

IoT エリアネットワークは IoT デバイスやゲートウェイを相互接続するための局所的なネットワークを指す用語で、国際連合の専門機関である国際電気通信連合(ITU³)の電気通信標準化部門(ITU-T⁴)が制定する ITU-T 勧告 Y.4113 (IoT のためのネットワーク要件) で定義されている。

インフラモニタリングにおける IAN は、現場に設置された複数のセンサデバイスとゲートウェイを接続するためのネットワークとする。一般には、利用者が通信設備を設置して、ある一定のモニタリング範囲(1 橋梁、道路の 1 区画、法面の 1 区画など)毎に一つのネットワークを構築し、ゲートウェイなどで広域ネットワーク(WAN)に接続する。センサ数が少ない場合には現場のデータロガーや伝送装置に接続してデータ収集が可能だが、センサを多数設置する場合にはネットワークの構築が有効である。

IAN では各種の有線・無線通信方式が利用できる。有線通信方式では Ethernet が一般的で、大量データや高精細映像などの安定した高速通信が可能となるが、利用するためには線路工事、電源工事、伝送装置の運用管理などが必要となる。PLC (Power Line Communication, 電力線通信)は電力線を使ってデータ通信を行う技術で、電源にモデムを接続して使用するため、通信線路の工事が不要となる。高速 PLC と低速 PLC があり、高速 PLC は屋外での利用に制限がある。

無線通信方式では通信線路の工事が不要となり、電池で 5 年程度動作し電源工事が不要な機種もあるなど、センサデバイス設置の自由度が高い。無線通信にはいくつかの方式がある。無線 LAN (Wi-Fi)は伝送速度が高く、大量のデータや高精細映像などを伝送する場合に適切である。無線 LAN が使用する電波周波数は 2.4GHz 帯と 5GHz 帯が有り、無線局の開設に免許は不要だが、5GHz 帯を屋外で利用する場合は 5.2GHz 帯は登録局の手続きが必要、5.3GHz 帯は屋外での利用不可、5.6GHz 帯は上空での利用不可などの制限があるため、所轄の総務省総合通信局などに確認する。無線 LAN は基地局からセンサまでの通信距離が 10~100 メートル程度のため、広い範囲にセンサを設置する場合には複数の Wi-Fi 基地局を設置し基地局間を幹線ネットワークなどで接続する。端末の電力消費量が比較的高いため電池での長時間の利用は困難である。

920MHz 帯省電力無線は IoT など低速データ通信向けの無線方式で、Wi-Fi と同様に免許が不要である。伝送速度が低いため大量データや映像の通信は困難だが、センサの計測値などの少量のデータを繰り返し収集するのに適しており、通信距離も数 100 メートルから 1 キロメートル程度と比較的長いため、広い範囲でネットワークを組むことができる。またセンサデバイス間でデータを中継するマルチホップ通信技術も標準化されており、これに対応したセンサデバイスではさらに広範囲にセンサを設置することができる。消費電力が低いため、計測頻度やデータ量を調整すれば電池で 5 年程度動作する機種もある。

昨今、LPWA(Low Power Wide Area)と呼ばれる無線通信技術が実用化されている。LPWA は一つの技術ではなく複数の業界標準や独自規格の総称で、方式により性能や機能が異なるが、おおむね従来の 920MHz 帯無線よりもさらに低消費電力で、より長距離の通信を可能とする代わりに、通信

³ ITU: International Telecommunication Union

⁴ ITU-T: International Telecommunication Union – Telecommunication Sector

速度が低く抑えられた方式である。LPWA は、Wi-Fi や 920MHz 省電力無線と同様に自営ネットワークを構築する事もできるが、通信事業者により LPWA サービスが提供されている点が特徴である。これを利用するとネットワーク設備投資やシステムの運用管理コストを抑えて伝送システムを構築できる。通信サービスについては、後述の広域ネットワークで述べる。

現場に設置するデータロガーにデータを蓄積する場合や、データをメモリカード等で運搬する場合には、IAN の構築は不要である。

(3) ゲートウェイデバイス

ゲートウェイデバイスは、IAN を自営ネットワークとして構築する場合に、WAN を接続して遠隔のモニタリング拠点へ伝送するために用いる。ネットワークの境界という意味でエッジと呼ぶ場合もある。ゲートウェイデバイスは、IAN 側のインタフェースには、Wi-Fi、920MHz 帯省電力無線、Ethernet、RS485 等のシリアルポート、アナログポートなど、各種センサを収容するための有線・無線インタフェースを持つ。また WAN 側のインタフェースには携帯電話各社のデータ通信サービスや、LPWA サービスなどのインタフェースを持つ。汎用の IoT ゲートウェイが各社から販売されており、用途やコストに応じて選択が可能である。ゲートウェイデバイスは一般に AC 電源を必要とするが、太陽光発電や蓄電池などにより AC 電源が無くても長期間動作する機種もある。

ゲートウェイではセンサデバイスとモニタリングプラットフォームの間でデータを透過的に伝送するが、センサで計測したデータのうち閾値の超過判定機能や、単位時間当たりの平均値/最大値/最小値などの特徴値算出機能などを持ち、伝送データ量を削減できるものもある。

現場のデータロガーや PC にデータを格納しメモリカード等で運搬する場合や、センサデバイスが直接 LPWA やモバイルデータ通信サービスに接続するインタフェースを持っている場合には、ゲートウェイの設置は不要である。

(4) 広域ネットワーク(WAN)

WAN には、一般に通信事業者が提供する光ファイバ等を利用した高速データ通信サービスや、携帯電話事業者が提供するモバイルデータ通信サービスなどが利用できる。モバイルデータ通信サービスには、スマートフォンなどで利用する高速データ通信サービスと、伝送速度やデータ通信量を低く抑えた IoT 向けサービスがあり、伝送するデータ量や予算に応じて多くの選択肢がある。LPWA サービスは、データ通信量や通信回数などに応じて利用料金が設定され、制約はあるが、比較的低価格のため、条件が合えば WAN としての利用が可能である。

モバイルデータ通信や LPWA サービスを利用する場合は、利用する通信サービスに対応したセンサを選定し、センサ毎にサービスを契約して直接通信する方法が考えられる(図 1.2.5 左)。この場合は、IAN の構築やゲートウェイの設置が不要で初期コストが抑制できるほか、ネットワークの運用を通信事業者が行うため、安定した通信が利用できるメリットがあるが、センサ毎に通信料がかかる。これらのサービスでは通信事業者がモバイル基地局を設置するため、センサと基地局の位置関係によっては通信感度が悪い場合があり、センサの設置位置が制限される場合がある。そこで、センサ間を IAN で接続し、ゲートウェイとモニタリングプラットフォーム間のみモバイル通信サービスを利用することが有効な場合がある(図 1.2.5 右)。この場合は複数のセンサからの通信を 1 回線に集約できるため、通信コストの削減にも貢献する。

また WAN の代替手段として、巡回車、路線バスなどを利用して路車間通信でデータを回収する

方法もある。

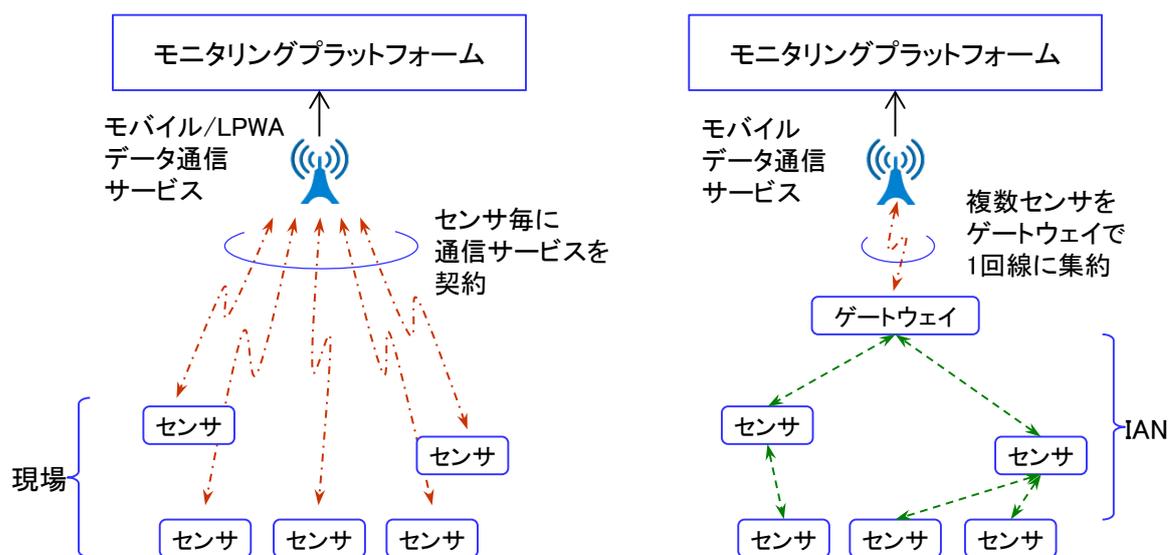


図 1.2.5 データ通信サービスの利用

(5) モニタリングプラットフォーム

モニタリングプラットフォームは、対象拠点のセンサの設置情報などの管理、稼働状態などの監視、センサが計測したデータの収集などを行うコンピュータシステムである。データをデータベースなどに格納して管理したり、用途に応じてグラフや表など人が見やすい形で表示したりするアプリケーションを含む場合がある。またモニタリング拠点に設置したサーバで動作させる場合と、遠隔のデータセンタやクラウドで動作させる場合がある。インフラ管理者の維持管理システムの一部として組み込むなど、他の情報システムとの関係も考慮して配備することが望ましい。

1.3 インフラモニタリングの伝送要件によるパターン分け

インフラモニタリングとは、構造物等の状況を常時もしくは定期・不定期に計測し、状態の変化を客観的に把握する技術である。点検が構造物の状況を比較的長い間隔をあけて時間断面で計測し基準等に照らして評価するのに対し、モニタリングは常時もしくは比較的短い間隔で継続的に計測する点が異なる。

計測を常時行う場合と、定期・不定期に行う場合には、計測周期やセンサ設置のコストなどにより、モニタリングに利用するセンサ設備を常時設置するか計測時のみ一時的に設置するかを判断する必要がある。データ計測周期とセンサ設置の組み合わせは、表 1.3.1 に示す A～E の 5 パターンが考えられる。

表 1.3.1 モニタリングにおけるデータ計測周期とセンサ常設の有無

データ計測周期 センサ設備設置	常時計測 (大容量)	定期・不定期 (中・小容量)	緊急時 (小容量)
常設置	A	B	E
収集時に設置	C	D	

パターン A：センサを常時設置し、データを常時計測

現場からのモニタリングデータ収集と同時に映像監視が必要な場合や、リアルタイムにデータを伝送することが必要な場合には、広域ネットワークまたは専用回線を介した伝送によるデータ収集が望ましい。伝送システムとしてはもっとも高速なシステム構成が求められ、価格も高価になる。

パターン B：センサを常時設置するが、データは定期・不定期に計測

計測したデータを加工（変換、平均化）して代表値として送信する場合や、1日のうちある決められた時間内のみ計測しデータ伝送する場合はこれに当たる。パターン A に比べてデータ伝送量が少ないため、比較的安価に無線を主体としたシステムや路車間通信で回収するシステムにより構築することが可能である。

パターン C：センサは必要時に設置、設置中は常時データ計測

モニタリングの目的やシステム構成により、パターン A に準ずる。データを現場の設備へ蓄積でき、センサの設置期間が短く、即時性が不要で、現場へのアクセスが容易な場合には、データの手持ち回収が有効である。

パターン D：センサは必要時に設置、短期間でデータ計測

モニタリングの目的やシステム構成により、パターン B に準ずる。データを現場の設備へ蓄積でき、センサの設置期間が短く、即時性が不要で、現場へのアクセスが容易な場合には、データの手持ち回収が有効である。

パターン E：センサは常時設置、データは閾値を超えた場合（緊急時）のみ

計測したデータを常時解析・判定し、閾値を超えた場合のみ計測値またはアラート信号の伝送を実施する。データ容量的には非常に小さいが、データがリアルタイムに確実に届く手法が必要。結果としてパターン A と同等のシステムか低容量 LPWA を使ったシステムの構築が必要な場合がある。

2章 ケーススタディ

本章では、ケーススタディとして、IAN および WAN 技術選択に関するいくつかの例を挙げる。

2.1 コンクリートのひび割れ幅のモニタリングにおける伝送

伝送システムの検討に当たり注意しなくてはならないのは、同じ「コンクリートのひび割れ幅をモニタリングする。」という要求に対しても、要求条件に応じてさまざまな伝送システムの構成が考えられる点である。要求を満足し、かつ必要以上に大規模なシステムにならない様な判断が必要である。ここでは3つの例を説明する。

(1) ひび割れ幅のデータを計測しながら、ひび割れの映像を管理者が遠隔で監視する場合

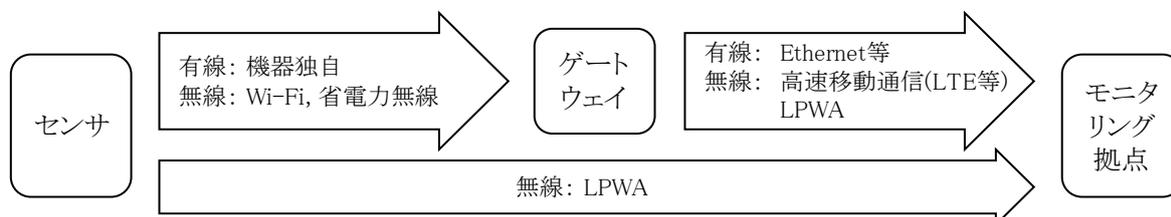
■ 伝送の要件によるパターン分け (1.3 参照) : パターン A



ひび割れを遠隔で目視監視する場合には、現場に設置した監視カメラ等から事務所（モニタリング拠点）まで映像データの伝送が必要となる。映像伝送には高速大容量（フル HD の場合で 13Mbps 程度）の通信回線が必要のため、IoT 向けの低速の省電力無線では対応できない。このため、IAN には映像伝送規格の有線接続などを用い、WAN には LTE などの高速移動体通信サービス、光回線サービス、または道路管理者の構内ネットワーク等でデータを伝送する必要がある。

(2) 現場でデータを加工して定期的に代表値（積分值，平均値，固有振動数等）を送る場合

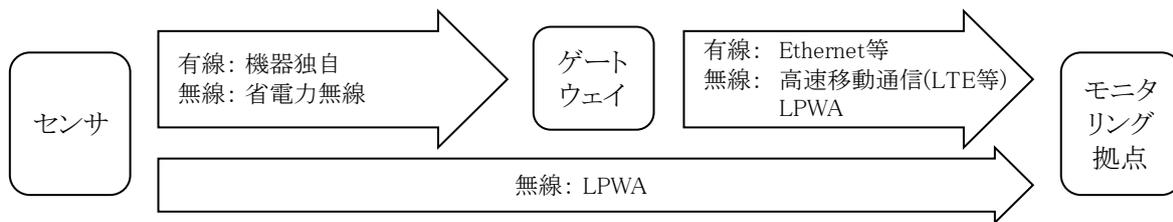
■ 伝送の要件によるパターン分け (1.3 参照) : パターン B



本件で利用するセンサには、計測したデータを全て送るセンサと、代表値のみ抽出して送る機能を持つセンサがある。また代表値を抽出する機能はゲートウェイが持つ場合もある。センサの計測データを全て収集する場合は IAN, WAN 共に比較的大きな伝送量が必要である。センサの種類により必要なデータ転送速度が異なるが、100Hz 程度のサンプリング周波数の 3 軸加速度センサの場合は、データ転送速度が最大 100kbps 程度の省電力無線での伝送が可能であることを確認している。これ以上のデータ量が発生するセンサや、高精細静止画や動画のような大容量データを伝送する場合は、さらに高いデータ転送速度が必要になるため、高速無線 LAN(Wi-Fi)や、Ethernet などの有線ネットワークの利用も考慮する必要がある。代表値のみを抽出するセンサの場合は、比較的低速度の LPWA サービスなどが利用できる。省電力無線は、無線マルチホップネットワークや、巡回車などによる回収システムにも利用可能である。現場で利用できる通信インフラの有無や、伝送にかかる費用などに応じて複数の選択肢から選定する事ができる。

(3) ある一定の閾値を超えた際にアラームを上げる場合

- 伝送の要件によるパターン分け (1.3 参照) : パターン E



閾値を超えた際にアラームを上げるには、センサを現場に常時設置して常に閾値判定を行う必要がある。また、閾値を超えた場合に即座にアラームをモニタリングする拠点へ通知するためには、いつでも通信できる伝送システムを用意する必要がある。アラームのデータ容量は小さいため、(2)と同様に LPWA 等の利用も可能だが、LPWA では通信時刻や回数に制限がある場合もあるため、アラームが即時に確実に通知される事を重視する場合は、(1)と同様の伝送システム構成となる場合がある。アラームの重要性と対応の即時性に応じて伝送システムの構成を選択する必要がある。

2.2 RC 床版のモニタリングにおける伝送

本節では、RC 床版モニタリングの 3 つのシナリオに適用可能な伝送シナリオを考察する。

(1) ひび割れのモニタリングにおける伝送

- 伝送の要件によるパターン分け (1.3 参照) : パターン D

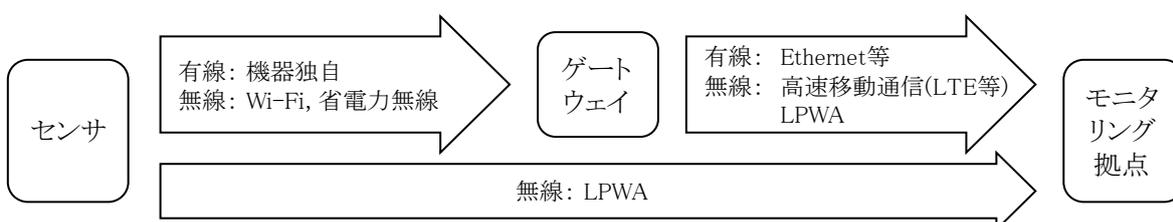


ひび割れモニタリングでは、インフラ現場へカメラ等の計測機器を持ち込んで作業員が計測するもので、現場にセンサは常設しないもしくは、計測時のみ電源供給、データ回収を行う。一般には、カメラに内蔵されたメモリへ撮影画像等のデータを格納し、これをカメラごと回収する。このため、3.2 節の「シナリオ(1) : データの手持ち回収」に相当する。

高精細の画像データはファイルサイズが大きくなるため、撮影する画像データ数に応じた十分な容量のメモリを用意する必要がある。また一度の計測で多数の画像データが生成されること、3次元座標データ(基準点)、ひび割れデータ(ベクトルデータ)、管理情報等の関連情報が同時に複数発生するため、どこで何を計測したかわからなくならないようにする必要がある。データを格納した記録媒体を取り外して運搬する場合はデータ破損を避けるため不要の衝撃や静電気・磁気を避けるなど、取り扱いに注意が必要である。

(2) 変位のモニタリングにおける伝送

- 伝送の要件によるパターン分け (1.3 参照) : パターン C 及び パターン E

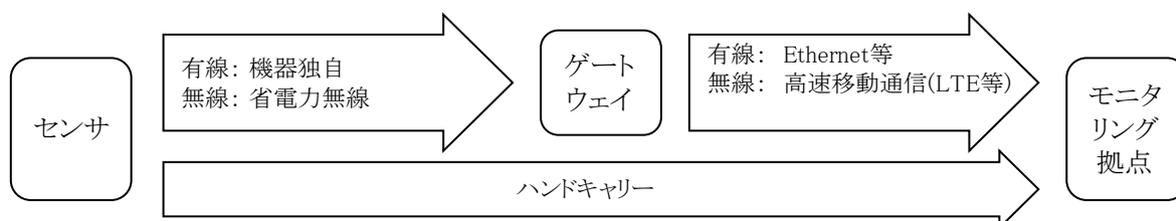


RC 床版の変位のモニタリングは、静的計測と動的計測の二通りのシステム構成がある。静的計測システムは、比較的長い間隔で計測して緩やかな変位を検出し、計測したデータを一旦データロガーに記録する。あらかじめ定めた期間に蓄積したデータを WAN で伝送する場合には、比較的大量になるため、ブロードバンド接続や運搬により伝送を行う。

動的計測システムは急激な変位を検出し、現場で閾値判定して警報発動などの動作を行なう。現場完結の場合は、計測データを保存しない場合もあり、この場合には計測データの伝送は不要であるが、即座にアラーム管理拠点へ通知するためには、いつでもアラームを送信できる伝送システムを用意する必要がある。アラームのデータ容量は小さいため、2.1(2)と同様に LPWA 等の利用も可能。アラームが即時に確実に通知される事を重視する場合は、2.1(1)と同様の伝送システム構成となる場合がある。アラームの重要性と対応の即時性に応じて伝送システムの構成を選択する必要がある。

(3) 振動モードを用いたモニタリングにおける伝送

■ 伝送の要件によるパターン分け (1.3 参照) : パターン C



振動モードを用いたモニタリングは、手動計測型と、遠隔計測型の二通りの方法がある。

手動計測型は、現地に設置したデータロガーにセンサの計測データを記録し、計測後に作業員がデータをモニタリング拠点へ持ち帰り分析用ソフトウェアを使って振動モード分析を行なう。この場合の伝送方式は3.2節の「シナリオ(1): データの手持ち回収」に準ずる。

遠隔計測型は現場にセンサユニットとゲートウェイを設置し、事務所に居ながらデータ収集と分析を行なう。この場合は、センサデータをそのまま伝送する必要があるため、LTE などの高速モバイル通信サービス、または光回線、道路管理者の構内ネットワーク等でデータを伝送する必要がある。こういった広域ネットワークを経由してセンサの計測データを事務所に設置したサーバまで伝送する。詳細には、3.5節のシナリオ「シナリオ(4): 定点収集型モニタリング」に準ずる。

2.3 のり面・斜面のモニタリングにおける伝送

本節ではのり面・斜面の安定性モニタリングのシナリオに適応可能な伝送シナリオを考察する。

まず、のり面・斜面モニタリングの橋梁のモニタリングと異なる伝送の課題について記述する。のり面・斜面のモニタリングを行う際に広大なモニタリング範囲全てに有線で通信ネットワークを組むのは労力がかかる上に草刈等のメンテナンス作業で切断のリスクがあるので、無線でのネットワーク構築となるケースが多い。しかしながら、橋梁に設置する場合に比べて積雪、草木の成長により通信障害が起こる可能性がある。そこで、のり面・斜面の安定性評価モニタリングに使用する現場でのネットワークには積雪、草木の成長による通信障害等を考慮し、以下のことを留意する必要がある。

- ・ アンテナ部の位置を高くする
- ・ 回析性能の良い低い周波数 (920MHz 等) を使用する

- ・ 現場でのネットワークは冗長性を持たせることが望ましい

(1) 多点・広範囲（傾斜，土壤水分計測，位置情報 以下「傾斜等」という。）計測モニタリング

■ 伝送の要件によるパターン分け（1. 3 参照）：パターン B



のり面・斜面にセンサを設置し，傾斜等を一定間隔で計測し，路側に設置されたゲートウェイからデータをモニタリング拠点に伝送集約するシステムである。このシステムの特徴は，モニタリング状況によりデータ計測頻度を変更するシステムもあるため，通常時のデータ伝送量のみならず，異常時のデータ伝送量を考慮したシステム設計が必要となる。当然路側のゲートウェイから，モニタリング拠点間のデータ伝送には LPWA のような通信速度の遅い伝送システムは不向きである。

3章 目的別伝送シナリオ

3.1 伝送シナリオの分類

モニタリングの現場からネットワークを使って事務所やクラウド等へ計測データを伝送するためには、以下のような方法が考えられる。

- (1) データの手持ち回収
- (2) 高速データ通信の利用
- (3) LPWA サービスの利用
- (4) 定点収集型モニタリング
- (5) 巡回収集型モニタリング

(1), (2)は従来のセンサや計測器を用いて計測し既設の通信設備等を利用する方法であるのに対し、(3)~(5)はモニタリング用のセンサを使ってモニタリングシステムを構築する方法である。これらを典型的な伝送シナリオとして、以降の節に解説する。各シナリオを、図 1.2.2 の伝送機能構成に沿って図示し、図 3.1.1 に整理した。本章では、これら 5 シナリオの概要を説明する。

	シナリオ(1) データの手持ち回収	シナリオ(2) 高速データ通信の利用	シナリオ(3) LPWAサービスの利用	シナリオ(4) 定点収集型モニタリング	シナリオ(5) 巡回収集型モニタリング	
伝送シナリオ (主な用途)	既存設備の利用		専用のモニタリングシステムの構築			
	現場でロガー等にデータ蓄積し、即時処理が不要な場合に、記憶媒体や機器自体を逐次回収する。データ量が多い場合に適している。	道路管理者の構内ネットワークやLTE等の高速通信が利用可能な場合、ロガー等を接続してデータ伝送する。データ量が多い場合に適する。	LPWA対応のセンサでモニタリングシステムを構築する。多数のセンサを契約し、少量データを低頻度で送る場合に適している。	省電力無線センサを現場に常設してモニタリングシステムを構築する。加速度センサなど中容量データのモニタリングに適している。	路肩に設置した無線センサのデータを通過する車両で収集するモニタリングシステム。即時処理が不要で中容量データの収集に適する。	
対応する床板シナリオ	ひび割れ画像、変位計	変位計	(未実施)	振動	変位計ほか	
伝送システムの構成	モニタリング拠点	モニタリングシステム	モニタリングシステム	モニタリングシステム	モニタリングシステム	
	広域ネットワーク WAN	手持ち回収	高速データ通信(構内NW, LTE等)	データ通信サービス	データ通信サービス	巡回車両
	ゲートウェイデバイス		ゲートウェイ		ゲートウェイ	
	IoTエリアネットワーク		Wi-Fi, Ethernet等		920MHz帯無線ネットワーク(1:N, マルチホップ)	920MHz帯無線ネットワーク
センサデバイス	データロガー、常時設置、一時設置、センサー	データロガー、常時設置/一時設置、センサー	LPWA対応センサ	常時設置、センサー	常時設置、センサー	
特長/メリット	大量データの収集が可能。現場に伝送設備が不要。	大量データの伝送が可能。大量データの蓄積されたデータが多い場合に向く。	データが少量で計測頻度が低いセンサを多量に設置する場合に、低コストで伝送システムを構築・運用できる。	加速度など中容量データを確実に伝送する。電池で数年間動作可能。GWで複数センサを集約する費用効果がある。	道路管理者の巡回車や地域の路線バス等に受信機を設置し低コストの定期収集手段が構築できる。	
注意点	データの即時確認は出来ない。都度、現場への出張や立入りが必要となる。現場でデータの保全対策が必要。	現場のLAN設備等への接続には事前に道路管理者のIT部門への申請等が必要。	センサ数、通信回数等に応じ利用料が変わる。利用できる地域は限られ、対応するセンサも少ない。(2018.4時点)	電波特性上、大量データの伝送には向かない。電池では間欠駆動のため全データは取れない。数年毎に電池交換要。	大量データ伝送は困難。月額通信費は不要。	

図 3.1.1 主な伝送シナリオの用途とシステム構成例

3.2 シナリオ(1) : データの手持ち回収



現場で測定したデータを即時にモニタリング拠点やデータセンタ等へ送る必要が無く、計測器等に内蔵されたメモリや、現場に設置したデータロガー等へ計測データを収録できる場合には、メモリ媒体を交換したり、センサをそのままモニタリング拠点まで運搬したりする事により、データを手持ちで運搬して回収する事ができる。なお記録媒体は破損しやすいため、運搬に当たっては、過度な衝撃・振動を与えず、また静電気・磁気などを避け、慎重に扱わなければならない。

この方法では伝送のためのネットワーク設備の設置は不要となるが、データ回収のために現場への出張と立入りが都度必要となる。両者のコスト、手間などを考慮して判断すべきである。

3.3 シナリオ(2) : 高速データ通信の利用



現場で道路管理者の構内ネットワークなどへ接続ができる場合には、計測器やデータロガー等を接続して管理拠点のサーバなどへデータ転送することが考えられる。一般に構内ネットワークは高速なデータ通信ができるため、映像の伝送や大量のデータ通信も可能である。

道路管理者の構内ネットワークへの接続には、一般に利用者の ID・パスワードや接続する設備へのアクセス権の付与などが必要となるため、事前に道路管理者の IT システム管理部門へ確認が必要である。

3.4 シナリオ(3) : LPWA サービスの利用



LPWA データ通信サービスを契約し、LPWA インタフェースを内蔵したセンサから直接データを送る方式。一般に LPWA データ通信サービスは端末 1 台当たり 1 契約が必要で、契約する端末数と 1 日あたりの通信回数によりサービス費用が大きく異なる。多くのセンサを契約し低頻度で計測する場合は低コストでデータ収集できる。また、センサ端末を電池で長期間動作させる事ができる無線方式のため、配線が不要のメリットがある。通信距離は数キロから数十キロと長距離の到達性が特徴だが、距離を延ばすためには伝送速度を下げることがあり、1 回に通信できるデータ量が少なくなるため、大量のデータを発生するセンサには向かない。また通信事業者のサービスエリア内で利用する必要があり、またビル影などで電波状態が悪い場所では通信できない場合があるため、現時点では利用できる場所が限られているため、道路の様に長い区間にセンサを配備する用途には向かない場合がある。また、現時点で LPWA 対応のインフラモニタリング向けセンサはほとんど市販されていないため、必要なセンサに LPWA 対応させるための開発が必要となる。

3.5 シナリオ(4)：定点収集型モニタリング



定点収集型モニタリングとは、現場のインフラ構造物等に設置したセンサから集めた計測データを、広域ネットワークなどを経由して事務所やデータセンタに設置されたサーバへ継続的に送る方法である。この方法は現場に行かずに定常的にデータを収集できる点が特徴である。センサを現場に固定的に設置するため、長期間の電池駆動ができる省電力無線センサを利用すると、通信線路や電源が不要でモニタリング設備のメンテナンスが容易となる。

本節では、RAIMS で実証実験を行った、無線マルチホップを利用したモニタリングシステムの構築例を紹介する。

3.5.1 無線マルチホップ機能の概要

Wi-Fi など通常の無線システムは、無線ネットワークを集約する無線親機と個々の無線端末間で直接電波が届く必要があるため、ネットワークを構築できる範囲は無線親機からの電波到達距離に限られる。これを 1:N 通信と呼ぶ。1:N 通信方式でより広い範囲のネットワークを構築するには、無線親機を複数設置してその間を別の有線ネットワークで繋ぐなどのシステム設計や線路工事が必要となる。これに対し無線マルチホップ通信では無線端末が他の無線端末からのデータを中継するため、無線親機から電波が届かない場所に無線端末を設置しても、近隣に他の無線端末があれば同じネットワークに収容する事ができる。両方式の違いを図 3.5.1 に示す。特に橋梁等の大規模構造物のモニタリングではセンサを設置したい場所が必ずしも電波の到達性が良いとは限らないが、センサを広い範囲に多数設置する場合には、データを無線で中継する無線マルチホップ通信が適している。

また、橋梁の床版や主桁に無線機能を備えたセンサ装置を設置する場合、装置の電源の確保が困難な場合が多い。そのため、定点収集型モニタリングに適用する伝送システムの要件として、電池で動作が可能な省電力無線を利用したセンサ装置が望ましい。920MHz 帯の無線機器は消費電力が低いため電池駆動に適しており、1 日当たりの計測時間を抑える事により電池で 5 年以上動作する機器も実用化されている。さらに、無線で使う周波数帯は国が管理しており、無線機器の運用には原則として免許または登録および電波使用料の支払いが必要だが、920MHz 帯は技術基準適合証明を受けた無線機器であればこれらが不要のため、インフラ管理用の専用ネットワークの構築に適している。

免許不要の 920MHz 帯無線機器は発射する電波の強さが 20mW と微弱だが、Wi-Fi に利用される 2.4GHz 帯や 5GHz 帯と比べると電波の到達性が高く、障害物などの周辺環境に依存するものの、数十 m から数百 m の間隔でセンサを設置できる。また通信速度は 100kbps 程度と低い。

無線マルチホップ機能は、無線装置が自律的に周辺の無線装置を探索し、電波環境などに応じて最適な通信経路を自律的に決定する。このため、電源が必要となるため設置場所が限定されるゲートウェイ装置(図 3.5.1 の親機)に対して、センサ端末同士が電波の届く範囲にあれば設置場所は任意に決める事ができるほか、柔軟にネットワークを構築することができる。また、無線装置を冗長に設置することで、無線装置の故障や電池切れなどの障害が発生したとしても、代替となる無線装置がセンサデータの中継を行うことが可能となり、障害に対して堅牢なネットワークを構築することができる。

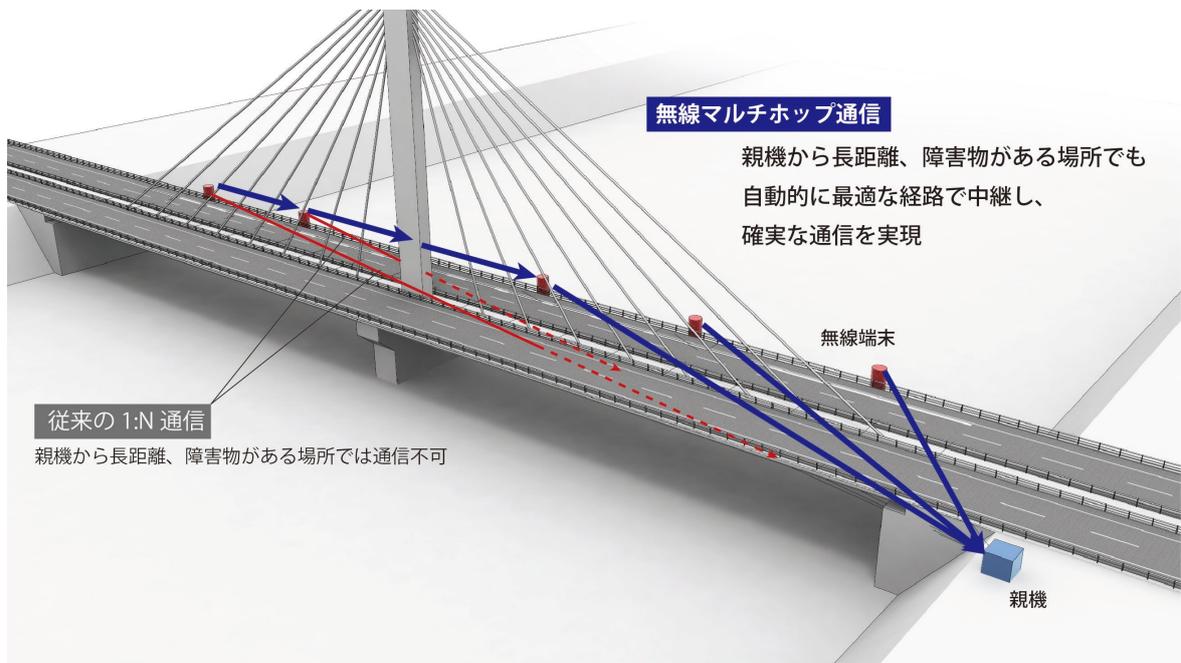


図 3.5.1 マルチホップ通信方式

また、従来の無線マルチホップネットワークでは、中継装置は常に自身宛のセンサデータを受信する必要があるため、中継装置に電源が必要であった。橋梁モニタリングシステムの要件として、電池駆動かつマルチホップ中継が可能なスリープルータ機能を有することが望ましい。

3.5.2 機器の選定

前節では、無線マルチホップ機能の橋梁モニタリングでの有効性について述べた。無線マルチホップ機能を備えた無線装置の選定に当たっては、想定する計測条件に合った電池寿命(消費電流)、スリープ周期、接続数などを確認する必要がある。また加速度センサなどの連続的にデータを生成するセンサを複数設置する場合には、一定の伝送速度、時刻同期精度などを満足する必要がある。一例として、3軸加速度センサを無線マルチホップ接続で常時設置し、1日の指定時間に5分程度のデータを収集する場合には、表3.5.1に示す無線装置仕様が必要と考えられる。

表 3.5.1 無線加速度センサ装置の仕様諸元

項番	項目	仕様	備考
1	無線周波数	920MHz 帯 (922.3~928.1MHz)	
2	無線規格	IEEE802.15.4g / ARIB STD-T108 準拠 IEEE802.15.4e (MAC スリープ機能)	
3	送信出力	20mW	
4	伝送速度	最大 100kbps	
5	消費電流	送信時：50mA 以下 受信時：30mA 以下 スリープ時：数 μ A	電池寿命：5 年以上 を実現可能なこと
6	動作温度・湿度	-20℃~+70℃ 25%~85%RH	設置環境に依存
7	接続数	最大 100 台	
8	中継ホップ数	最大 30 ホップ	
9	スリープ周期	最大 2 秒	
10	時刻同期	同期精度：10ms 以下	

項番 10 の時刻同期に関しては、例えば 100Hz のサンプリング周波数で加速度データを測定し、複数の箇所で計測したセンサデータの比較を行う場合、センサデータのタイムスタンプが 10ms 以上ずれると、橋梁の異常を判断することが難しくなる。そのため、各無線装置が 10ms 以下の精度で時刻同期できる機種を選定するべきである。

3.5.3 機器設置時の電波伝搬の確認

マルチホップ無線装置の設置の際には、隣接する無線装置間での無線の到達性を確認しておく必要があるため、センサ設置工事の前に、無線通信する区間での電波伝搬を測定する事が望ましい。橋梁で電波伝搬測定を行なう様子を図 3.5.2 と図 3.5.3 に示す。

電波伝搬測定は、図 3.5.2 に示す様に、床版下の検査路などを用いて、作業員 2 名が設置予定の場所に無線装置を仮設置し、地上の作業員から無線でコマンドを送信し、無線装置間の受信電界強度(RSSI, received signal strength indicator)とパケットエラー率(PER, Packet Error Ratio)を測定する。無線の伝搬環境は変動することがあるため、測定を数分間連続して行う。またアンテナは出来るだけ見通しの良い場所に設置し、手などで遮らないように注意する。安定的に無線通信が可能な受信電波強度は無線方式や機器ごとに推奨値が定められている。またパケットエラー率はデータの用途に応じて許容できる範囲を設定する。センサの設置位置でこれらを満足することを確認する。



図 3.5.2 電波伝搬測定（検査路付近の様子）

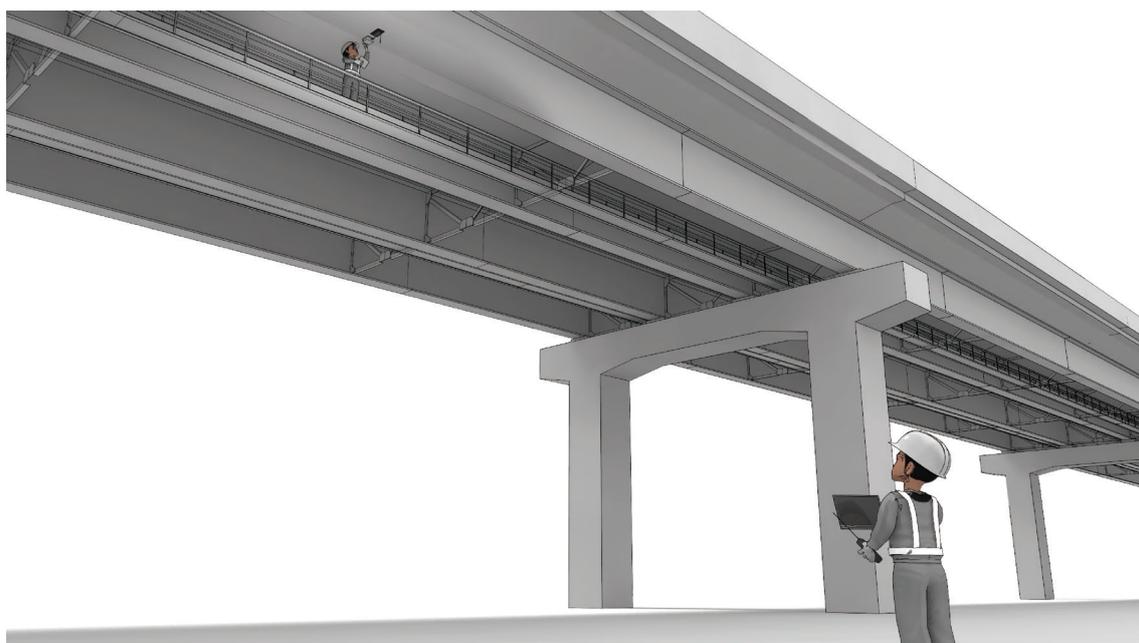


図 3.5.3 電波伝搬測定（地上から見た様子）

隣接する無線装置間で電波到達が確認できない場合は、設置場所を見直して無線装置もしくはアンテナを見通しの良い場所に設置するか、もしくは中継用の無線装置を設置して隣接装置間での無線の到達性を確保する必要がある。図 3.5.4 と表 3.5.2 は、実際に高速道路で電波伝搬測定を行った結果である。図 3.5.4 に示す丸(●)は無線センサ装置の設置場所を示しており、0091～A006 が無線センサ装置の識別番号である。各センサは図 3.5.2 に示したように床版裏に設置した。表 3.5.2 の値は無線装置間の受信電界強度を示しており、例えば、無線装置 0091 と隣接する 0092 との受信電界強度は-53dBm であった。無線装置の設置環境や受信性能によるが、過去の実験データによると、920MHz 帯の無線が安定的に通信可能な受信電波強度は-90dBm 程度以上であることが望ましい。本設置環境においては隣接間の受信

電界強度は-75dBm 以上あるため、安定してマルチホップ通信ができると考えられる。

ただし、本環境ではゲートウェイから最も遠い A006 装置でもゲートウェイとの距離が 100m 程度と比較的近く、受信電界強度が-75dBm であることから、ゲートウェイと各無線装置を直接 1 ホップで通信するスター型のネットワーク接続が可能であった。このため、マルチホップ環境での測定実験に当たっては、無線装置の転送先を明示的に指定する固定経路設定によりマルチホップネットワークを作って実施した。

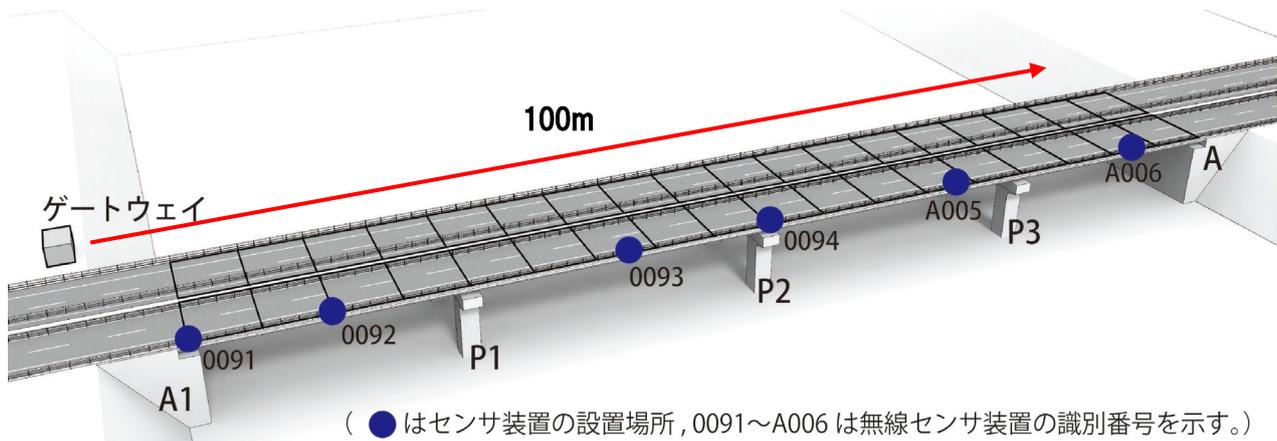


図 3.5.4 無線装置の設置場所

表 3.5.2 無線装置間の受信電界強度

送信 \ 受信	GW	0091	0092	0093	0094	A005	A006
GW		-75dBm	-59dBm	-57dBm	-57dBm	-74dBm	-75dBm
0091	-75dBm		-53dBm	-80dBm	-86dBm	-85dBm	-91dBm
0092	-58dBm	-53dBm		-75dBm	-75dBm	-84dBm	NG
0093	-56dBm	-82dBm	-75dBm		-60dBm	-70dBm	-80dBm
0094	-57dBm	-89dBm	-75dBm	-60dBm		-66dBm	-86dBm
A005	-74dBm	-88dBm	-84dBm	-71dBm	-66dBm		-88dBm
A006	-75dBm	-92dBm	NG	-80dBm	-86dBm	-87dBm	

3.5.4 センサデータ量とデータ収集時間

(1) 920MHz 帯無線の送信データ量（スループット）の制限

本ガイドラインで推奨する 920MHz 帯無線の技術規格には、10% Duty と呼ばれる送信時間の制限が規定されており、60 分のうち 10% の 6 分間しか電波を使う事ができない。そのため、1 対 1 で対向する無線装置間で単位時間に送信できる最大データ量（スループット）は、定格伝送速度の 100kbps に対して 10kbps 程度となる。これは、920MHz 帯は免許不要で誰でも使える周波数帯のため、特定の端末が電波を占有することなく、多くのシステムで譲り合って使う事による共存を目的とした規格である。スループットより多くのデータを送ろうとすると、無線区間でデータが欠損する可能性があるため、センサから発生するデータ量に応じてセンサの計測頻度などを調整する必要がある。

すなわち、センサの数が多い場合は 920MHz 帯無線ではデータが欠損する可能性があるため、シェーピング、圧縮、等の機能を持ったセンサを使う事が望ましい。

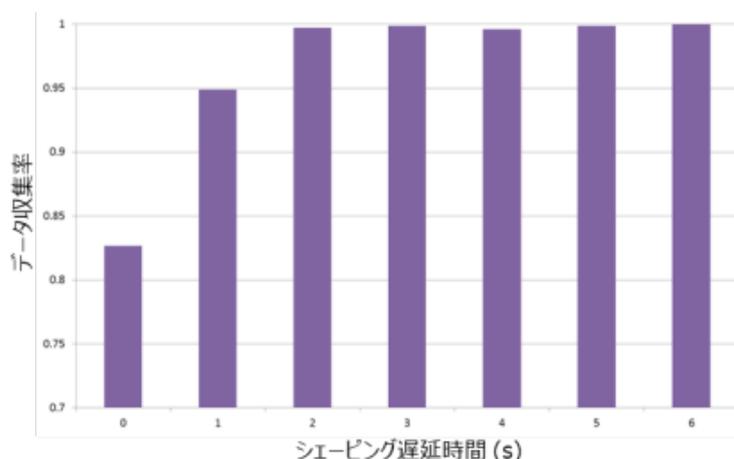
(2) シェーピング機能を利用したデータ損失回避の例

スループットを超えるデータが発生する場合、シェーピングと呼ばれる帯域制御により損失を低減することができる。シェーピングとは、無線装置からセンサデータを送信する際に遅延を加えることにより、ネットワークの通信量を一定に抑える方法である。シェーピング時間が短く、単位時間あたりのデータ発生量が多いほど（加速度センサの場合はサンプリング周波数が高いほど）データ損失率が高くなり、データ収集率が低下することが分かっている。参考に、RAIMS で行った伝送実験の測定条件とその結果を示す。

測定条件：

- ・ 使用センサ：3 軸加速度センサ
- ・ サンプリング周波数：100Hz, 200Hz, 400Hz, 800Hz
- ・ シェーピング時間：0～7s（サンプリング周波数、シェーピング時間を変更することで単位時間あたりのデータ発生量を調整）
- ・ ネットワークトポロジー：マルチホップ固定経路（最大 6 ホップ）

実験結果の一例として、図 3.5.4 の無線加速度センサ No.0094 から 4 ホップでデータ収集した場合の、シェーピング時間とデータ収集率の関係を表したグラフを図 3.5.5 に示す。この例では、シェーピング時間を 2 秒以上に設定することでデータ収集率を 95%以上とすることが可能であった。加速度センサなど多くのデータが発生する無線センサ端末はシェーピング時間を設定できる機種を選ぶ事が望ましい。



(図 3.5.4 の無線加速度センサ 0094 から 4 ホップでデータ収集した例)

図 3.5.5 シェーピング時間とデータ収集率の関係

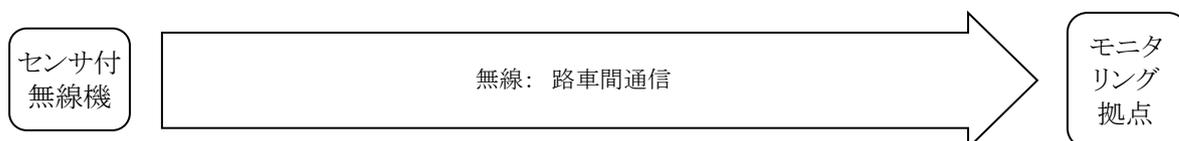
(3) マルチホップ無線のスループット

マルチホップ通信では、ホップ数の増加に伴いスループットが低下する。一般的には n ホップ時にはスループットが $1/n$ となるため、実効スループットが 10kbps のネットワークで 5 段のマルチホップ中継を行うとスループットは 2kbps 程度となる。また電池駆動の無線マルチホップ端末は、予め設定した周期で間欠動作するため、動作周期に応じて中継段毎に遅延が発生する事も考慮が必要である。十分なシェーピング時間を設定するとマルチホップ無線でも多くのデータが収集できるが、

データ収集に要する時間が長くなる。

以上より、電池駆動のマルチホップ無線機器を用いてモニタリングシステムを構築する際は、センサのデータサイズや収集にかかる時間などの条件を考慮する必要がある。このため、センサの種類や計測の目的などに応じて有線ネットワークの利用も含め伝送手段を使い分けることを推奨する。

3.6 シナリオ(5)：巡回収集型モニタリング



巡回収集型モニタリングは、路肩などに設置したセンサ付き無線機から送信されるデータを車両で走行しながら取得する方式である。本節では、RAIMS で実証実験を行った同方式の構築例を紹介する。

巡回収集型モニタリングにおけるシステムは、センサデバイス（無線機能付）、受信端末、タブレット端末（上位サーバへのデータ通信用）で構成される（図 3.6.1 参照）。

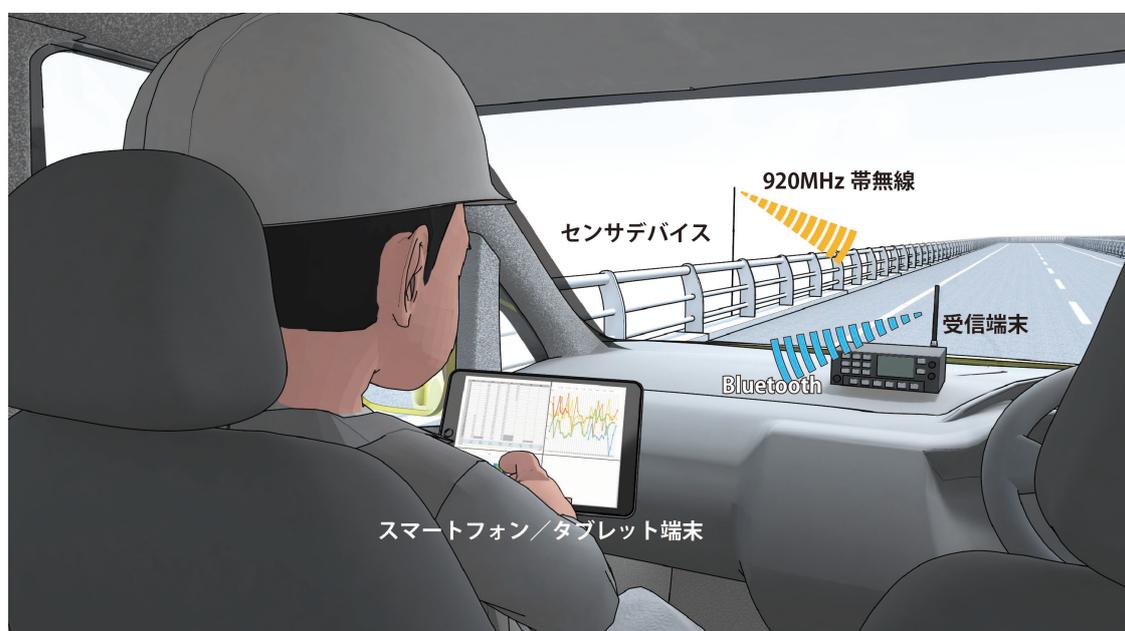


図 3.6.1 巡回収集型モニタリングイメージ

広域に点在する複数の構造物をモニタリングする場合において、通常の定期巡回など他の業務に付随して計測したデータを収集することでコストメリットが出てくる。その際も車両の停車、車両からの下車する必要もないため、作業への負担も少ない。例えば自治体においては、定期運行バスや配送業者などとの提携により、モニタリングにおけるデータ収集のコスト低減が期待される。

但し導入時には、移動しながらの無線通信となるため以下の点に留意する必要がある。

1. データ受信エリア（範囲）
2. データ受信精度（受信成功/失敗）
3. データ通信量

以降で、実証実験（評価）を踏まえた上記留意点について述べるものとする。

3.6.1 機器の選定

巡回収集型モニタリングで利用する無線装置の選定に当たっては、無線出力、通信速度、電源容量などを確認する必要がある。一例として、次節以降で説明する実証実験の結果を得るために必要な受信端末の仕様諸元を、表 3.6.1 に示す。また、平成 29 年度の実験に採用した端末の外観を図 3.6.2 に示す。

表 3.6.1 受信端末の仕様諸元（一例）

項番	項目	仕様	備考
無線部 (1)		920MHz (センサデバイス通信用)	
1	通信規格	ARIB STD-T108 準拠	
2	使用チャネル	33~61	
3	電波出力	20mW	
4	通信速度	50kbps	
無線部 (2)		Bluetooth v2.1 EDR (タブレット端末通信用)	
5	通信規格	ARIB STD-T66 準拠	
6	通信速度	240kbps 以下	
7	電波出力	Class2	
8	接続先機器	1 台	
9	プロファイル	SPP : 仮想シリアルポート	
本体部			
10	外形寸法	60 mm × 110 mm × 13 mm	
11	重量	53g (76g : 電池込み)	
12	電源	ニッケル水素二次電池	
13	動作温度	0°C ~ 40°C	
14	連続動作時間	最大 8 時間	



図 3.6.2 受信端末の概観（一例）

3.6.2 データ受信エリア（範囲）

センサから計測データを受信するにあたり、走行条件（速度や車線等）やセンサデバイス（無線送信機能付）の設置条件を踏まえた受信エリアを確認しておく必要がある。

実証実験（走行試験）では以下の条件でデータ受信エリアの評価を行っている。

- ・ 走行条件：上り線/下り線，走行車線/追越車線（走行車線は 80km/h，追越車線は 100km/h）
- ・ 設置条件：防護柵および床版先端部，橋台天端部 ※全て下り線側に設置

図 3.6.3 に実証実験結果の一例を示す。



図 3.6.3 走行試験結果（下り走行車線/時速 80km）

結果として、防護柵および床版先端部にセンサデバイス（送信アンテナ）設置する場合には、センサデバイスの手前約 500m～600m から受信開始し、センサデバイスを通過した後は約 200m までは受信可能範囲であると言える。車両通過後は人体や車体の影響を受けて受信距離が短くなると考えられる。走行条件（速度や車線等）による違いはあまり見られない。また橋台天端部にセンサデバイスを設置する場合には受信可能範囲は約 200m まで狭くなるため、送信アンテナだけでも防護柵および床版先端部に設置することが望ましい。

最終的には送信するデータ量との関係にもなるが、無線通信失敗などによる通信リトライまで考慮すると、見通しの良い環境において約 200m がデータ受信エリア（範囲）と考えるのが妥当である。

3.6.3 データ受信精度（受信成功/失敗）

特に屋外環境での無線通信においては、センサデバイスの設置条件等により受信失敗が起きる可能性もあり、データ受信精度（受信失敗）も考慮する必要がある。

実証実験（パケットロス試験）では以下条件でデータ受信精度の評価を行っている。

- ・ 設置条件：防護柵および床版先端部，橋台天端部 ※下り線側に設置
- ・ 受信条件：センサデバイスより 10m 間隔で計測

図 3.6.4 に実証実験結果の一例を示す。

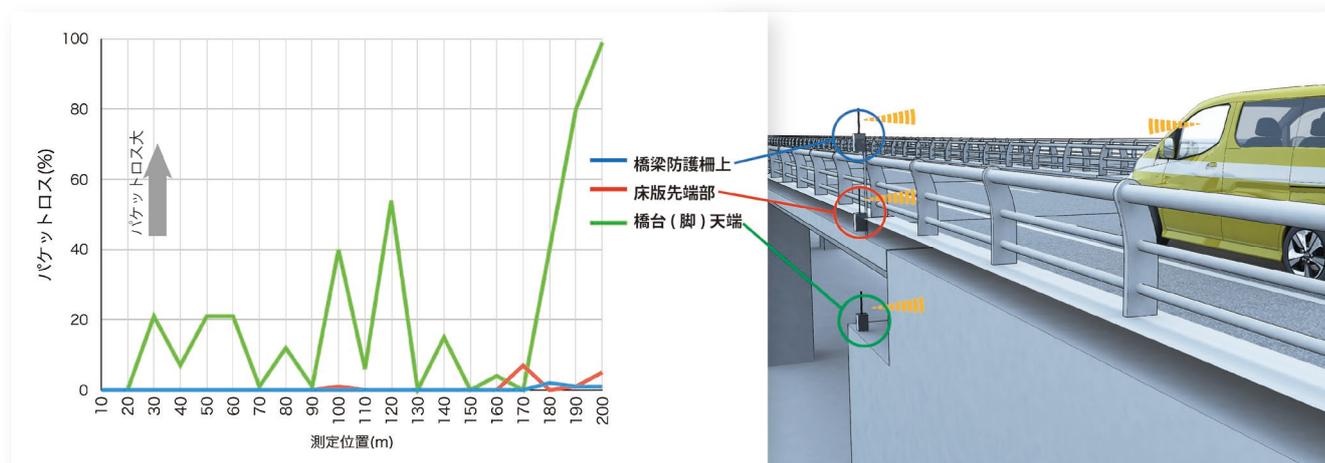


図 3.6.4 パケットロス試験結果

結果として、防護柵および床版先端部にセンサデバイス（送信アンテナ）設置する場合には、170m地点まではパケットロス（受信失敗）も無く、安定した無線通信が可能である。逆に橋台天端部にセンサデバイスを設置した場合には、他の道路附帯設備（看板やガードレール等）や法面や樹木等に複数回反射した合成波を受信することになり、複雑な受信特性（パケットロス発生）となる。

繰返しとなるが、対象構造物の構造形式や計測位置を踏まえた上で、センサデバイスを設置することが望ましい。

3.6.4 データ通信量

次に巡回収集におけるデータ通信量について述べる。巡回収集は、移動しながらのデータ収集を想定しており、定点収集型のデータ収集方式と比較して1回で収集できるデータ通信量にも制限が出てくる。

1回の走行で収集するデータ量を約 8,000Byte（1回/時間の計測データを3週間分と仮定）で設定し、実証実験を行ったところ、センサデバイス1台のみ稼働していた場合は、ほぼ100%のデータ取得率である。

但し実環境においては計測対象が複数存在することもあり、これについても実証実験でデータ取得率を評価した（図 3.6.5 参照）。

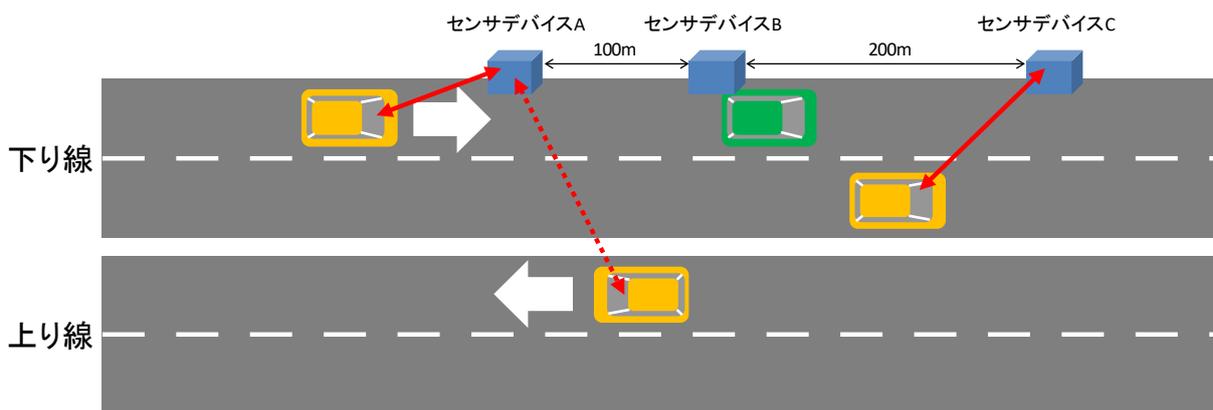


図 3.6.5 複数台デバイスの実証実験イメージ

2台のセンサデバイス稼動時に、2台のセンサデバイス間が100~300mにおいて、1台目が100%のデータ取得率に対して、2台目は平均約95%のデータ取得率であった。また3台のセンサデバイス稼動時には、1台目が100%、2台目が平均約95%、3台目が平均約87%とかなりデータ取得率が下がる結果となった。3台とも約3,000Byteのデータ量に設定したところ、全て100%のデータ取得率となる。

従って巡回収集型の留意点として、1回の走行で収集するデータ量と各センサデバイス間の距離を設計時点で検討する必要がある。データ量については、計測視点で計測間隔や必要なデータ種別が決まってくるものと考えられ、それによって1回で収集できる期間も変動する。参考として表3.6.2に例を示す。

表 3.6.2 巡回収集型モニタリングにおけるデータ収集例

センサ種別	計測方法	計測項目	計測データ量
固有振動数計	一定周期	固有振動数 (x軸, y軸, z軸) 3成分	計測1回ごとに 1成分 2byte
ひずみ計	一定周期	たわみ 1成分	計測1回ごとに 1成分 2byte

固有振動数やひずみなど静的計測においては、十分なデータ量を収集することが出来ると思われるが、加速度などの動的計測や、静止画、動画などのデータ量が大きくなるものについては、巡回収集には適していないと考える。

4章 ネットワーク技術の選択

センサからゲートウェイまでを接続する IoT エリアネットワーク技術の選定について、有線、無線方式に分けて説明する。有線方式は、インフラ管理者にとっては目視点検時に邪魔になることや、断線や落雷の恐れがあることから、バッテリー駆動で長期間動作可能なセンサデバイスが開発されている。一方、無線通信では1ホップ当たり数百ms程度の遅延が起きる事、バッテリー駆動の省電力無線では通信速度が100kbps程度となるなど、制限事項もある。有線では遅延が少なく、比較的高速な通信が可能となる一方、センサとエッジ設備間の通信フォーマットは専用の方式が使用されることが多く、センサの追加、故障時の交換時には、同一製品を使用する必要がある。最近では複数の無線インタフェースに対応したゲートウェイも存在することから、今後は多様なシステム構成が可能になることが期待される。

4.1 センサネットワーク (IAN) 向けの有線通信方式

インフラ現場で道路管理者の構内ネットワークが利用できる場合や、通信会社のブロードバンド接続サービスなどを契約して回線終端装置やルータ等のネットワーク設備を施設できる場合は、これに計測器やデータロガー等を接続して伝送する事が考えられる。高精細画像、映像ストリーミングなどの大容量のデータや、データロガーに蓄積した大きなファイルを転送する場合には、有線通信方式の利用が適している。また、計測データをサーバで即時に処理する必要がある場合には、遅延が起こる可能性のある無線方式よりも、有線通信方式が適している。

4.2 センサネットワーク (IAN) 向けの無線通信方式

一般にセンサネットワークに用いられる各種無線方式の関係を図 4.2.1 に示す。無線を利用したセンサデータ収集とセンサの運用管理などを行う場合は、センサの設置が数百メートル程度の範囲内で、100kbps 以下程度の低速通信で収集できるデータ量であれば、免許不要で専用ネットワークが作れる 920MHz 帯無線が適している。画像、動画などの大きなデータや、大量のセンサデータ転送には、数 Mbps の高速通信が可能な Wi-Fi や携帯電話のデータ通信サービスの利用が適切である。但し Wi-Fi は通信距離が数十メートル程度のため、用途は限られる。また携帯電話網は月額でサービス利用料金が掛かる。高精細動画によるモニタリングなどを行う場合には、さらに大容量のデータ通信ができる光ファイバなどの有線ブロードバンドサービスの利用も考慮する必要がある。一方、通信速度は低いものの、10km 程度の長距離の無線通信ができる LPWA や、携帯電話の LTE 技術で省電力化を進めた NB-IoT などの新技術を使ったサービスが発表されており、IoT 向けデータ通信サービスとして一般に利用できるようになると考えられる。これらは通信事業者が提供するサービスのため利用料金が発生するものの、IoT 専用の低速データ通信のため、光ファイバなどのブロードバンド通信や携帯電話料金よりは安価な価格設定となっているものが多く、モニタリングの種類や設置場所などの条件によっては導入検討の対象となる。但し、通信サービスを利用する場合は、モニタリング現場が同サービスのカバーエリア内であることを確認し、さらにカバーエリア内であっても通信条件の良い場所にセンサを設置する必要がある点に注意が必要である。

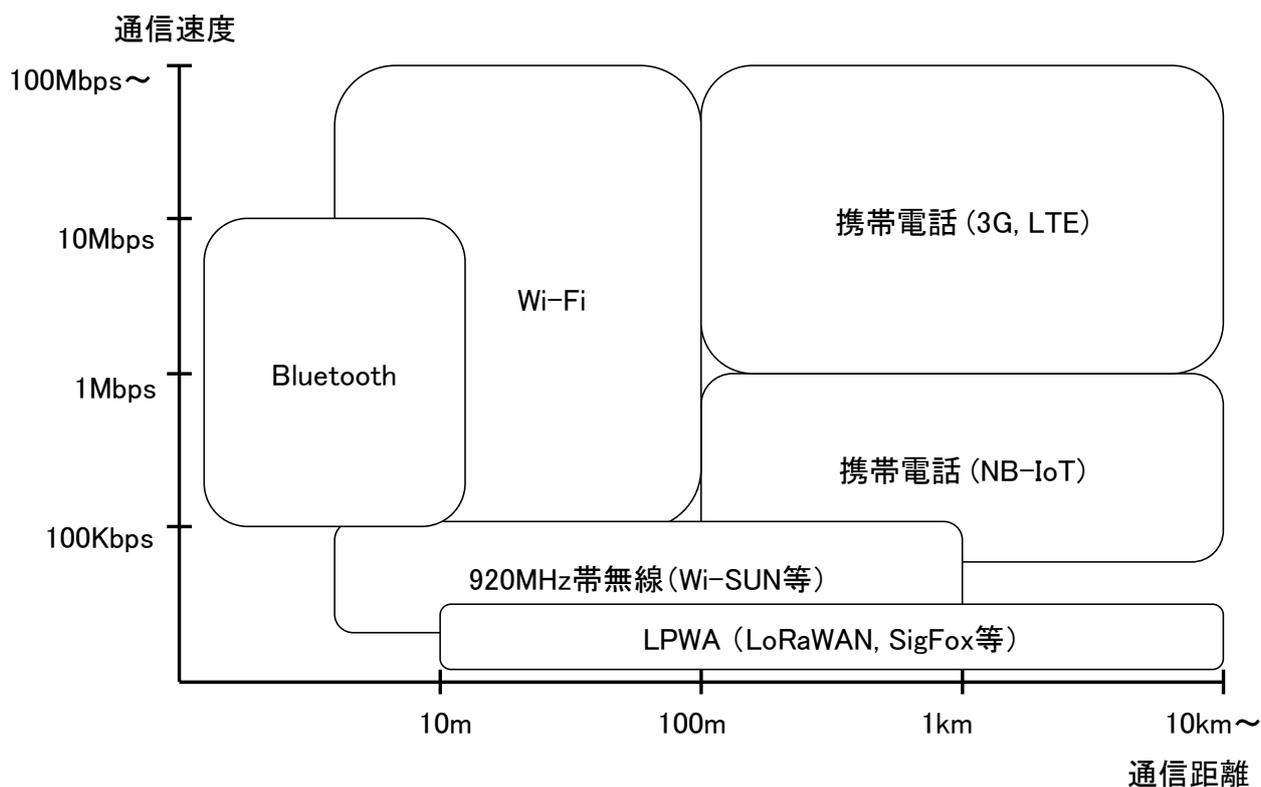


図 4.2.1 IoT で利用される主な無線通信方式 (一例)

4.3 広域ネットワーク (WAN) の選択

広域ネットワークを利用した伝送シナリオを導入する場合は、通信会社が通信容量やオプションの有無などに応じて IoT 向けに多様な料金体系のデータ通信サービスを提供している。また、対応するセンサデバイスであれば、ゲートウェイを介さずに直接広域ネットワークへつなげる事ができる LPWA サービスの提供も始まった。用途に応じてこれらの通信方式から選択が可能である。

インフラモニタリングの伝送システム構築検討の参考とするため、IoT エリアネットワーク、および広域ネットワークとして国内で利用できると思われる無線通信方式を表 4.3.1 にまとめた。なお昨今では非常に多くの IoT 向け通信方式や通信サービスが検討されており、機能や料金も頻繁に更改されているため、表の内容は本稿の執筆時点で公開されている範囲の情報であることをご承知おき頂きたい。

表 4.3.1 インフラモニタリング向けの主な無線通信方式 (2018年4月現在)

	920MHz 帯	Wi-Fi	LPWA			
			LoRaWAN	SigFox	LTE Cat.M1 (カテゴリーM1)	LTE Cat.NB1 (NB-IoT)
推進 団体	Wi-SUN Alliance, 各社	Wi-Fi Alliance	LoRa Alliance, 各社	SigFox 社	3GPP	3GPP
運用 形態	自営網のみ	自営網/ ホットスポット	自営網/ 通信サービス	通信サービス	通信サービス	通信サービス
NW 構成	1:N, マルチホップ	1:N	1:N	1:N (通信事業者 に接続)	1:N (通信事業者 に接続)	1:N (通信事業者 に接続)
通信 速度	100kbps	11M/54Mbps	0.98k~30kbps	0.1kbps	1Mbps (上り, 下りとも)	上り 62kbps 下り 26kbps
通信 形態	双方向(上下対象)	双方向(上下対象)	双方向 (下りは条件付)	上り中心 (下りは条件付)	双方向 (上下対称)	双方向 (上下非対称)
通信 距離	1km/1Hop (最大 16Hop)	1~50m	5~15km	10~50km	20km 程度	20km 程度
周波 数	920MHz 帯	2.4GHz/5GHz	920MHz 帯	920MHz 帯	LTE と同じ	LTE と同じ
特長	<ul style="list-style-type: none"> ・免許不要 ・到達性が高い ・マルチホップ可 ・電池で 5 年動作する製品あり ・通信料不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・免許不要 ・通信速度速い ・対応機器多い ・相互接続可能 ・通信料不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・免許不要 ・低消費電力 ・自営, 通信サービスの 2 つの選択肢 ・自営網の場合は通信料不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・免許不要 ・超低消費電力 ・1 社のサービスなので異なるベンダの製品でも繋がりやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ・有料サービス ・カバーエリア広い ・国際標準規格 IoT 用としては通信速度が早い ・LTE より低コスト・省電力 ・2018 年 4 月国内サービス開始 	<ul style="list-style-type: none"> ・有料サービス ・カバーエリア広い ・国際標準規格 ・Cat.M1 よりも通信は遅い ・LTE より低コスト・省電力 ・2018 年 4 月国内サービス開始
主な 用途	加速度センサなど中程度のデータ伝送	画像・映像や、蓄積ログなどの大量データの伝送	計器読取り等の少量データを低頻度で大量のセンサから収集	ON/OFF 等の信号を大量のセンサから低頻度で収集	中容量の蓄積ログ等のデータ伝送, センサのソフトウェア更新など	加速度センサなど中程度のデータ伝送
注意 点	<ul style="list-style-type: none"> ・画像, 蓄積ログなどの大量データの通信は困難 ・通信距離は周辺環境に依存 	<ul style="list-style-type: none"> ・バッテリーで長時間運用は困難 ・通信距離が短く, 物陰等の通信困難 ・干渉が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・通信回数と端末数で価格設定 ・下りは条件付き ・インフラ用端末は少ない ・利用可能エリアに制限あり ・ベンダ間の互換性は保証無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・通信回数と端末数で価格設定 ・下りは条件付き ・インフラ用端末は少ない ・利用可能エリアに制限あり ・通信速度が非常に低い 	<ul style="list-style-type: none"> ・通信料がかかる ・対応するセンサ端末がまだ少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・通信料がかかる ・対応するセンサ端末がまだ少ない

参考： モニタリングシステムにおけるセキュリティの考慮について

IoT システムのセキュリティに関しては、IPA、IoT 推進コンソーシアム等がチェックリストやガイドラインなどの参考文献を発行している。モニタリングシステムの構築に当たっても、以下の文書などを参考とする事が望ましい。

- [1] IPA（独立行政法人情報処理推進機構）、「ネットワークカメラシステムにおける情報セキュリティ対策要件チェックリスト」第2版，2018年3月30日。
https://www.ipa.go.jp/security/jisec/choutatsu/nwcs/checklist_nwc.pdf
- [2] IPA（独立行政法人情報処理推進機構）、「更新：WPA2 における複数の脆弱性について」，2017年11月10日。 https://www.ipa.go.jp/security/ciadr/vul/20171017_WPA2.html
- [3] IoT 推進コンソーシアム，総務省，経済産業省，「IoT セキュリティガイドライン ver1.0」，平成28年7月。 https://www.soumu.go.jp/main_content/000428393.pdf

5章 適用事例

5.1 脱塩補修後の補修効果の遠隔モニタリング

(1) 適用事例の概要

コンクリート箱桁橋の塩害補修効果をモニタリングする目的で、断面修復及び脱塩処理を施した床版に鉛照合電極や腐食センサを埋設し、その電気的特性を測定してきた。これまでの測定方法は、作業員が現地に赴き、テスターを用いて測定しており、作業員が高速道路の路側帯を徒歩で移動するなど、危険を伴う作業が発生していた。

本事例では、これに対し、既設の塩害センサに無線マルチホップ伝送機能を備えた通信装置を接続し、また電源敷設工事が困難な場所においては、商用電源を必要としないゼロエネルギーゲートウェイを設置することで、遠隔からの常時モニタリングを実現した際の、無線伝送システムを紹介する。

図 5.1.1 にコンクリート箱桁橋の外観を示す。センサ設置場所にアクセスするには非常駐車帯に車を駐車して路側帯を約 250m 歩行し、P29 付近の検査路への降り口からコンクリート箱桁内部に侵入し、約 140m を徒歩で移動する必要がある。

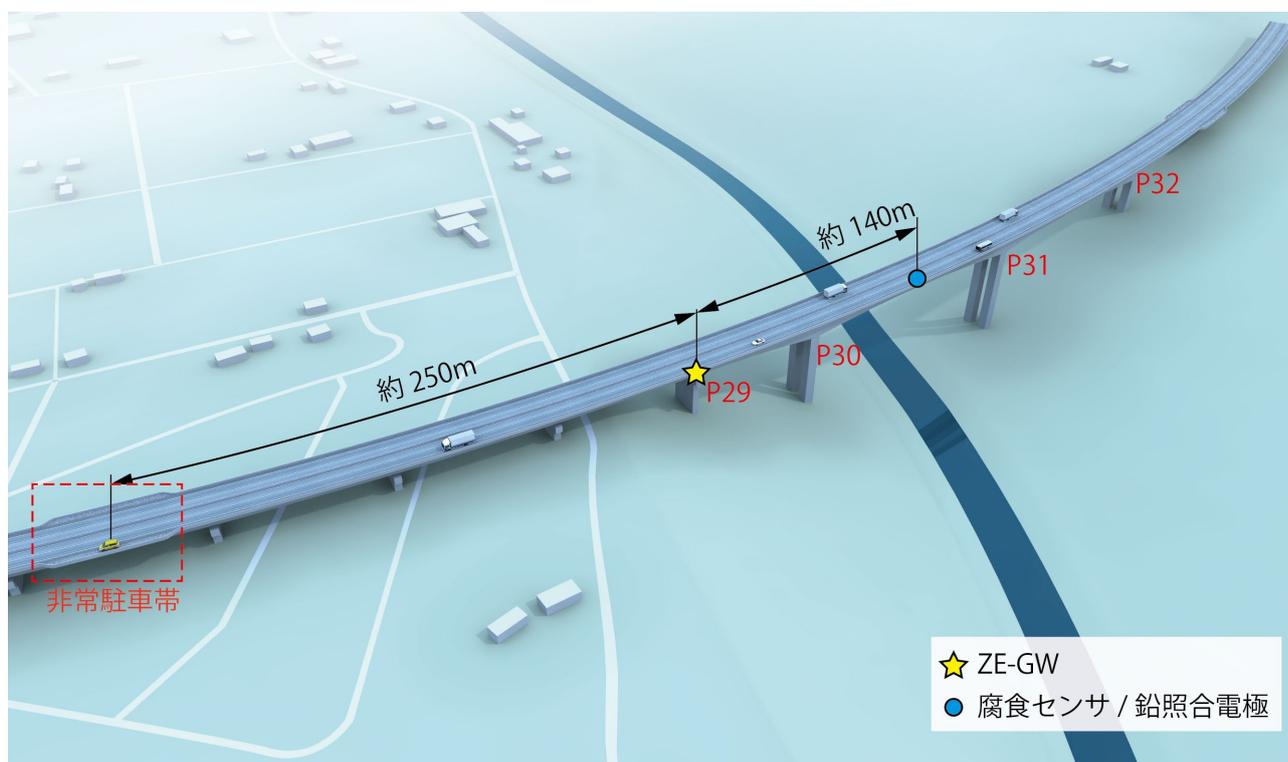


図 5.1.1 コンクリート箱桁橋の外観

(2) 計測技術

1) 設置方法

コンクリート箱桁橋におけるセンサ IF 無線機と無線中継器の設置場所を図 5.1.2 に示す。検査路の入口付近は電波強度が弱いため、検査路上と地上に中継器を設置することとし、無線中継器は合計で 7 台を設置した。

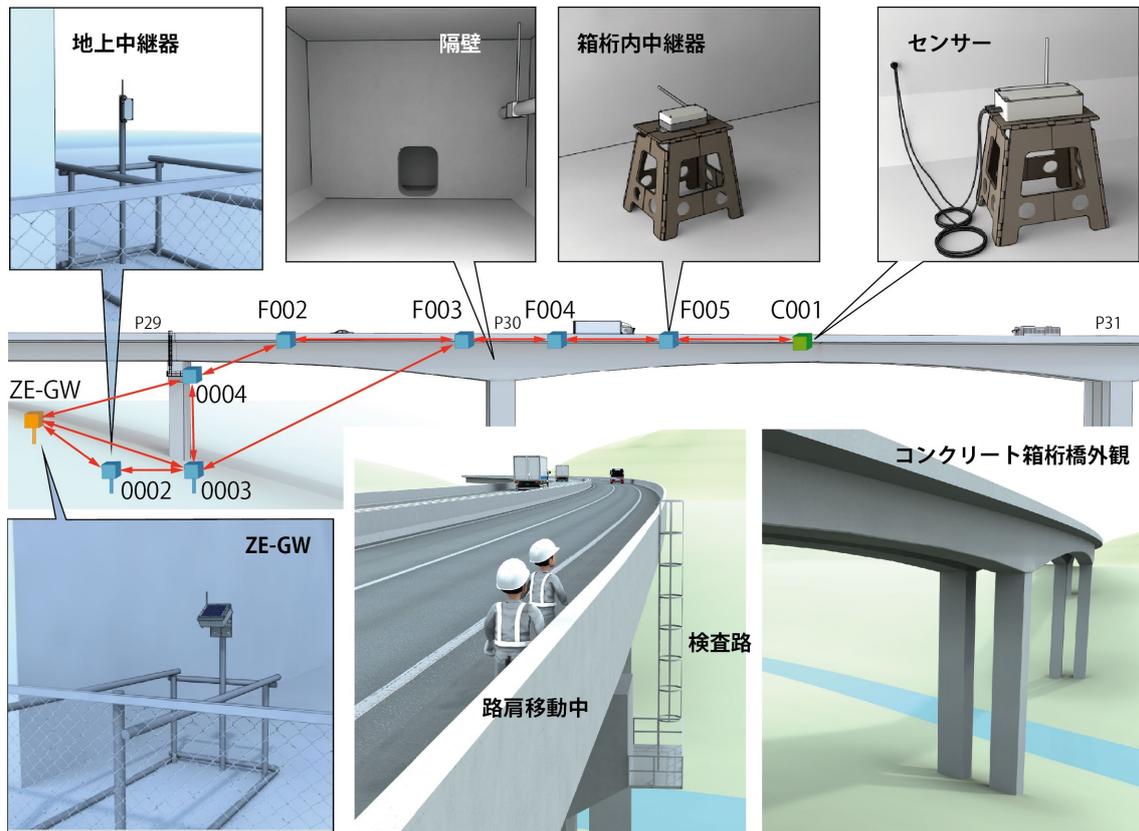


図 5.1.2 無線中継器の設置場所

2) 計測方法

本実証実験で用いたシステム構成を図 5.1.3 に示す。

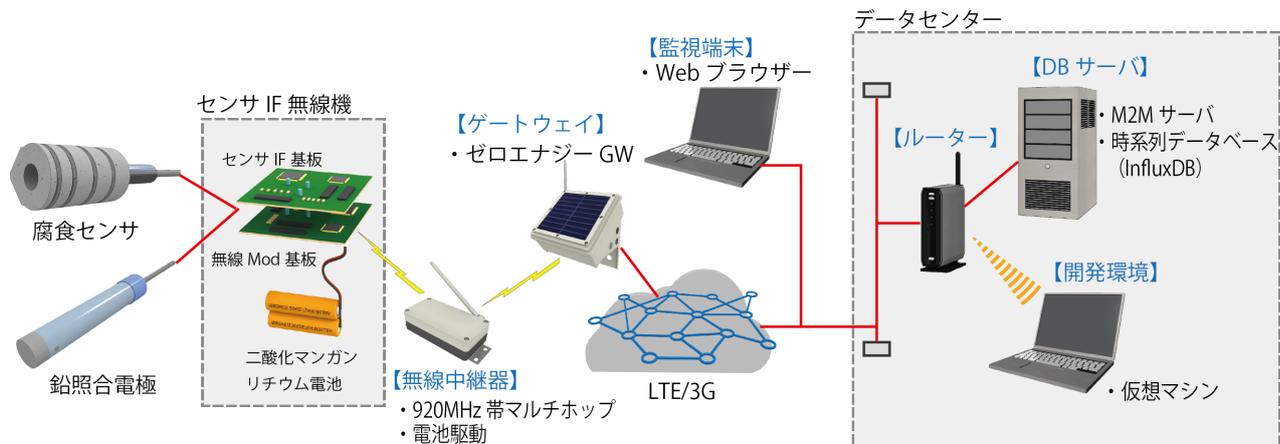


図 5.1.3 システム構成

センサ IF 無線機は、腐食センサ CS5 と鉛照合電極 PbM-5 の電気的特性を測定するセンサインタフェース基板と、無線モジュール基板、二酸化マンガンリチウム電池から構成される。測定したデータは、920MHz 無線マルチホップ機能を備えた無線中継器によって、ゲートウェイに送信される。ここでのゲートウェイは電源工事を必要としない太陽光パネルを備えたゼロエナジーゲートウェイ (ZE-GW) を使用した。ZE-GW は太陽光パネルと二次充電電池を備えており、設定した時刻になると電源が起動し、センサ IF 無線機から収集したデータを携帯電話回線経由でサーバに送信する。サーバではセンサデータをデータベースに保存し、Web ブラウザからサーバに接続することでセンサデータを参照することができる。

3) 使用材料等

本実証実験で用いたセンサ IF 無線機、無線中継器の仕様諸元を表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 無線中継器の仕様諸元

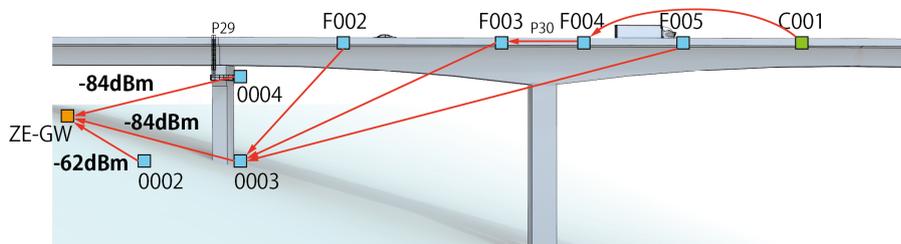
項番	項目	仕様	備考
1	無線周波数	920MHz 帯 (922.3~928.1MHz)	
2	無線規格	IEEE802.15.4g / ARIB STD-T108 準拠 IEEE802.15.4e (MAC スリープ機能)	
3	送信出力	20mW	
4	伝送速度	最大 100kbps	
5	消費電流	送信時：50mA 以下 受信時：30mA 以下 スリープ時：数 μ A	電池寿命：5 年以上を実現可能なこと
6	動作温度・湿度	-10°C~+50°C 25%~85%RH	
7	接続数	最大 100 台	
8	中継ホップ数	最大 30 ホップ	
9	スリープ周期	最大 2 秒	
10	時刻同期	同期精度：10ms 以下	

(3) 計測結果

1) ネットワークトポロジー

ネットワークトポロジーを図 5.1.4 に示す。

2019年11月26日



2019年12月6日

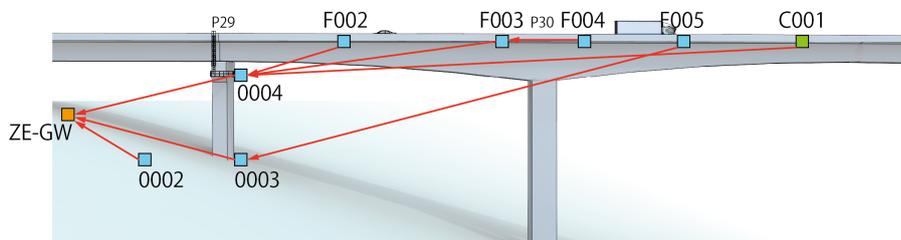


図 5.1.4 ネットワークトポロジー

図より地上に設置した中継器 0003、検査路上に設置した中継器 0004 が中継装置として機能していることが分かる。また ZE-GW と周辺中継器の無線強度は、基準値である-90dBm より電界強度が強いため、バックアップ回線として問題ないことが分かった。

設置直後の 11/26 の時点では、塩害センサ C001 は、中継器 F004、中継器 F003、中継器 0003 を経由して ZE-GW までは、4 ホップで接続していることが分かる。その後、12/6 の時点では、塩害センサ C001 は、0004 を経由した 2 ホップで接続している。このトポロジーの変化は、中継器が自律的に最適な無線経路を探索するアルゴリズムが動作しているためである。隣接する中継器間では、1 時間に 1 回の制御信号受信時に ZE-GW までの通信コストを算出しており、その結果、通信コストが低い経路を見つけると途中の中継器をスキップすることがある。

今回の設置で ZE-GW 周辺に複数の中継経路が確認できたので、今後、中継器の故障や電池切れが発生しても動的に経路を切り替えることで、継続的なデータ収集が可能な見込みである。

2) センサデータ

本システムでは、塩害センサに加えて中継器の温湿度や電池電圧、ZE-GW の発電量などのセンサデータを収集しており、鉛照合電極に関しては鉄筋腐食の電圧値をシステムで監視している。この様子を

図 5.1.5 に示す。過去の鉄筋コンクリート供試体の塩害促進試験において、鉄筋腐食による電位の変化と腐食状況を比較した結果、電位が -350mV を境に腐食が発生していることを確認している。そのため、管理画面上には閾値 (-350mV) を設定し、鉛照合電極の電圧値が閾値を下回った場合は管理者にメールで通知する機能を備えている。



図 5.1.5 鉛照合電極の計測値と閾値

(4) まとめ

モニタリングデータ伝送の事例として、腐食センサや鉛照合電極などの塩害センサの無線伝送化について紹介した。本事例を通じて高所やアクセスに危険伴う近接困難な場所に設置されたセンサのデータの収集に無線マルチホップ伝送が有効であることを確認した。また商用電源を必要としないゼロエナジーゲートウェイを用いることで電源敷設工事が不要となり、設置コストや運用コストを大幅に削減できることを確認した。

5.2 加速度センサを用いた床板の遠隔モニタリング

(1) 適用事例の概要

本事例では、1974年に供用が開始された鋼3径間連続鉄桁橋×2連(橋長276.9m)の橋梁(図5.2.1)において、RC床版取替後の健全性回復の診断を行なうため、加速度センサを用いた遠隔モニタリングシステムを構築した際の、伝送機能を中心に紹介する。同システムは、加速度センサを路下(図5.2.2)に設置、床版の振動を計測してデータセンターへ伝送し、サーバで逐次解析して活荷重変位と固有振動数を算出するものである。現場で商用電源の利用が困難だったため、電池駆動の無線加速度センサおよび太陽光発電と蓄電池で動作するZE-GW(ゼロエナジーゲートウェイ)を利用した。これにより電源工事と配線工事が不要となり、迅速に遠隔モニタリングシステムを構築出来た。



図 5.2.1 モニタリング箇所



図 5.2.2 路下状況

(2) 計測技術

1) モニタリング技術

床版取替前後の橋梁に対し、加速度センサを用いたモニタリング技術により、効率的な健全性評価を行う。対象橋梁では2020年5月から床版改修を行っており、改修工事により床版の劣化が改善される事に加え、床版の構造がRCからPCへ変更されたため、橋梁全体の剛性が変化し、振動特性(固有振動、たわみ等)に影響を及ぼしていることが推測される。このため、表5.2.1に示す計測項目をモニタリングする事とした。

表 5.2.1 適用するモニタリング技術

モニタリング技術	計測項目
加速度センサを用いた 振動モニタリング	固有振動数 たわみ量

2) 設置方法

橋梁のA2⇄P6、P6⇄P5間の上り線床版をモニタリング対象とし、図5.2.3の位置に加速度センサを設置した。センサは電池駆動で無線接続のため配線が無い(図5.2.4)。P5～A2の区間は商用電源が取れないため、P6の橋脚付近に太陽光発電機能を備えたゼロエナジーゲートウェイ(ZE-GW)を設置した。設置に当たっては太陽光パネルを南向きとし、かつ太陽光発電に必要な日照時間を確保できる位置まで単管パイプを伸ばした(図5.2.5)。

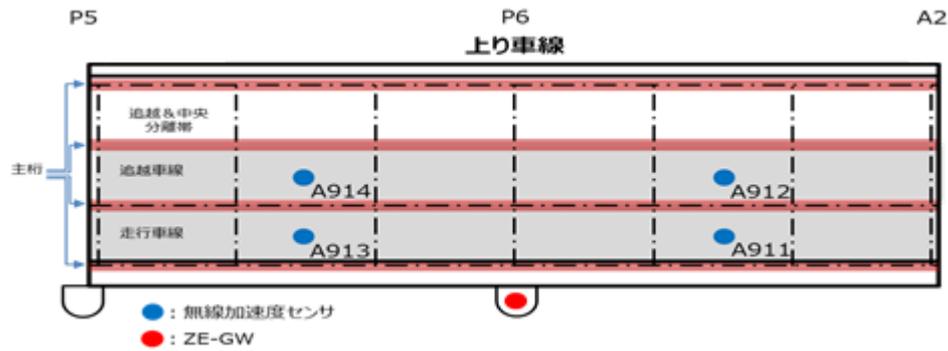


図 5.2.3 各センサの設置位置



図 5.2.4 センサ設置状況



図 5.2.5 ZE-GW 設置状況

(3) 計測方法

1) システム構成

本事例で構築した遠隔モニタリングシステムの構成を図 5.2.6 に示す。計測データをデータセンターへ伝送し蓄積することで現場への立ち入りが不要となり、また PC やタブレット等からインターネット経由で活荷重変位や固有振動数の現状確認と過去データの参照が可能となった。また条件に合致すると通知するなどのアプリケーション追加も容易になる。

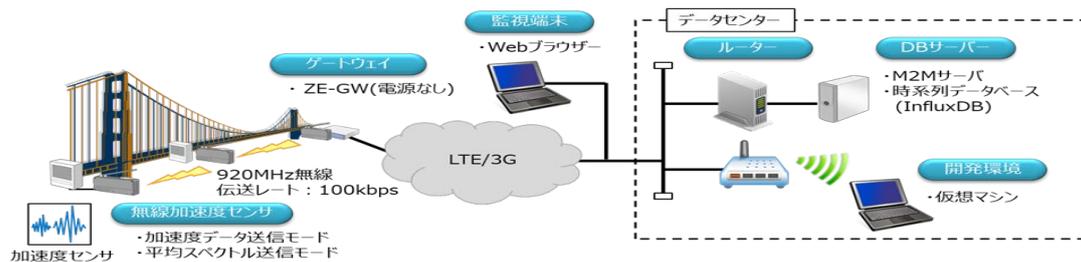


図 5.2.6 モニタリングシステム構成

2) 計測条件

無線加速度センサで長期間データを収集する場合、電池消費を抑えるために1日の短時間のみ計測し、それ以外は低消費電力のスリープ状態となるようセンサを設定する。また ZE-GW は悪天候等で発電量が不足する可能性があるため、無線加速度センサと同様のスリープ動作により消費電力を抑える設定とした。

これを踏まえ本事例では対象路線の交通量が安定する夜間に計測する事とし、各センサを表

5.2.2 に示す時間帯のみ起動させた。採用した加速度センサはたわみ量（活荷重変位）を算出するために加速度データをそのまま送信するモードと、固有振動数を測定するためセンサが FFT 処理で算出した平均スペクトルを送信するモードを備えていたため、これを時間帯により切り替えて ZE-GW 経由でサーバに伝送した。利用した加速度センサの無線仕様を表 5.2.3 に示す。

表 5.2.2 各センサの計測条件

センサ	センサ位置	生データ送信モード収集時間 (3 軸加速度データ)	平均スペクトルモード収集時間 (ノード内 FFT 処理)
A911	P6-A2 間走行車線	21:00~21:05	22:00~22:05
A912	P6-A2 間追越車線	23:00~23:05	22:00~22:05
A913	P5-P6 間走行車線	24:00~24:05	25:00~25:05
A914	P5-P6 間追越車線	26:00~26:05	25:00~25:05

表 5.2.3 920MHz 無線仕様諸元

項目	仕様	項目	仕様
無線周波数	920MHz 帯 (922.3~928.1MHz)	動作温度・湿度	-10°C~+50°C、25%~85%RH
無線規格	IEEE802.15.4g / ARIB STD-T108 準拠、IEEE802.15.4e	接続数	最大 100 台
送信出力	20mW	ホップ数	最大 30 ホップ
伝送速度	最大 100kbps	スリープ周期	500m 秒
消費電流	スリープ時：数 μ A	時刻同期	同期精度：10ms 以下

3) 計測データ

計測データの一例として、各センサで計測しサーバに伝送した 3 軸加速度データから算出した各センサの重力方向 (Z 軸) の平均値による周波数差分を図 5.2.7 に示す。また、設置した無線センサ間の電波強度を図 5.2.8 に示す。今回採用した無線加速度センサの推奨電波強度は最小-90dBm 以上のため、全ての区間で必要な電波強度が得られていることが判る。一般に無線機間の電波到達性は周辺環境により異なるため、電波強度を測定した上で設置位置を決定する。本事例で床版裏のセンサと橋脚に設置した ZE-GW 間の見通しは悪かったが、路下での電波の回り込みにより良好な電波強度が得られたと考えられる。

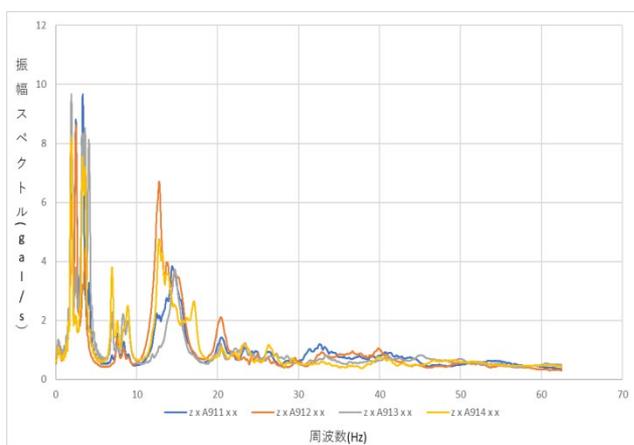


図 5.2.7 各センサの Z 軸平均値による周波数差分

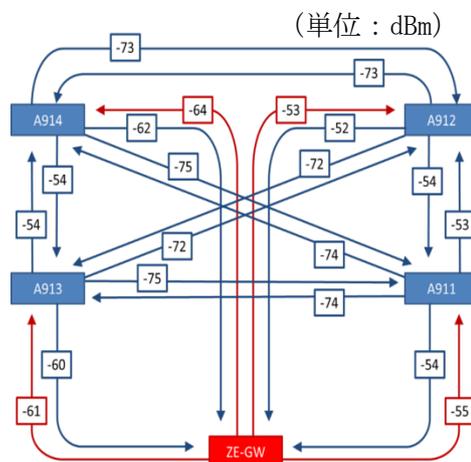


図 5.2.8 各センサ、ZE-GW 間の電波強度

図 5.2.9 に、センサの 3 軸加速度データ、ZE-GW の発電量、各無線加速度センサの電池電圧と温度を示す。ZE-GW は日照時間が少ない冬季でも伝送に必要な発電量が賄えており、取得した加速度データは欠落なく安定してサーバに転送できていることが判る。

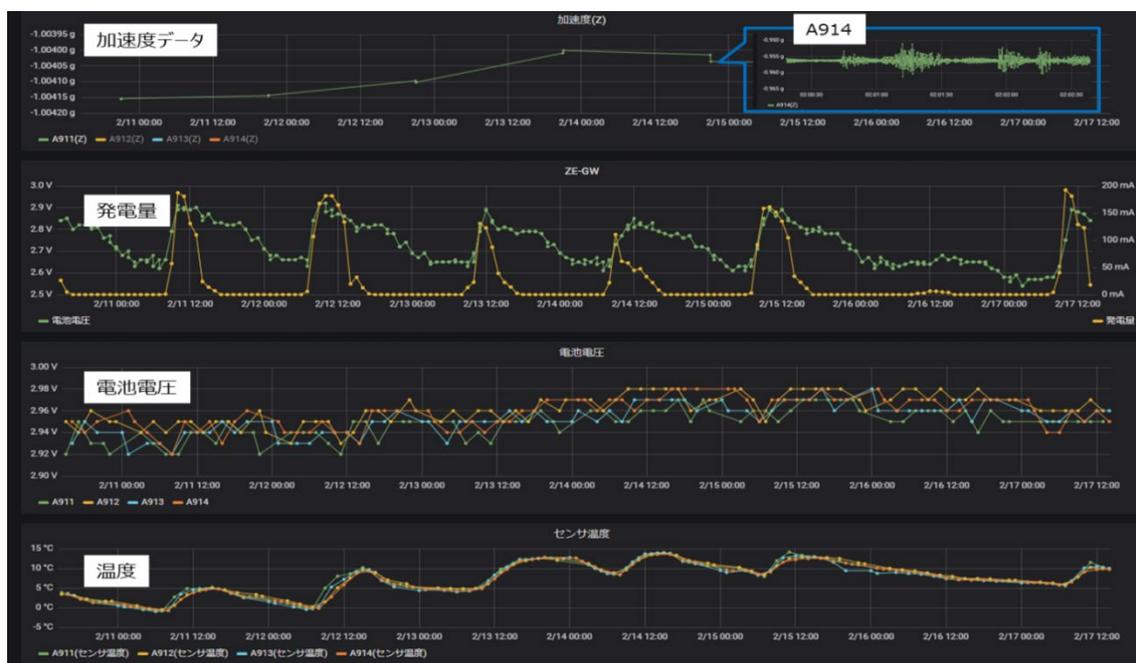


図 5.2.9 ZE-GW の発電量、各無線加速度センサの電池電圧・温度

(4) まとめ

床版の活荷重変位と固有振動数のモニタリングのため、センサで計測した 3 軸加速度データおよび周波数スペクトルを無線ネットワーク経由で遠隔から収集する事例を示した。無線伝送を活用することで、商用電源を必用としない低コストな常時モニタリングシステム構築が可能である。

添付資料 1：用語集

用語	意味	類義語・関連語
A/D変換機	アナログインタフェースを持つセンサや計測器の出力を、デジタル形式のデータに変換する装置	
I o T	Internet of Things の略。様々な物が通信機能を持ち、人が介在せずに相互に通信することにより、各種データの収集、蓄積、AI分析、設定、制御などを行う事を示す。	
I o Tエリアネットワーク	モニタリングシステムの機能分類の一つ。現場に設置するセンサデバイス、ゲートウェイ、データロガー等の機器を接続し、各機器にアドレスなどを付与して通信先を特定する機能を持つネットワークを示す。	近距離無線ネットワーク
I o Tゲートウェイ	I o Tエリアネットワークに接続されたセンサデバイスを、広域ネットワークを介してクラウドやデータセンタ上の I o Tプラットフォームへ接続する装置。	
LPWA	Low Power Wide Area ネットワークの略で、センサネットワーク向けの無線通信技術。複数の業界標準や独自規格の総称で、方式により性能や機能が異なるが、おおむね低消費電力で、数キロ～数 10 キロメートル程度の長距離の通信ができる代わりに、通信速度を低く抑えた方式。	
幹線ネットワーク	ネットワークシステムの基幹となるネットワーク設備。例えば Wi-Fi 基地局間を結ぶ有線 LAN と TCP/IP の運用に必要となる DNS 等のサーバ群などを示す。	バックボーンネットワーク
ゲートウェイ	I o Tエリアネットワークと広域ネットワークを相互接続する装置。複数のインタフェースを備える場合もある	ゲートウェイデバイス、エッジ
ゲートウェイデバイス	モニタリングシステムの機能分類の一つ。現場に設置した設備等と接続して、広域ネットワークを介してモニタリングプラットフォームへデータを伝送するための設備。主に現場に設置する。	
計測データ	センサや計測器等で計測した伝送の対象となるデータを示す。	
現場	モニタリングシステムを設置する管理拠点の一つ。モニタリングの対象とするインフラ構造物の一区画が設置された拠点を示す。	

用語	意味	類義語・関連語
広域ネットワーク	モニタリングシステムの機能分類の一つ。現場とモニタリングプラットフォームを接続するネットワーク。道路管理者の構内ネットワーク、携帯電話事業者のデータ通信サービス、LPWA など IoT デバイス向け通信サービス、巡回車両からの路車間無線通信など、様々な方法が選択できる。	
センサデバイス	モニタリングシステムの機能分類の一つで、現場に設置しセンサによる計測機能を持つ端末設備。センサの計測機能だけを持つものと、センサ端末内に A/D 変換機能や通信機能を内蔵し、IoT エリアネットワークに直接接続できるものがある。	ノード
専用ネットワーク	通信事業者のサービスを使わずに利用者が装置を用意して構築・運用するネットワーク。無線マルチホップや LAN など。	自営網
通信回線	コンピュータや端末装置を接続して情報をやり取りするために必要な電気回路。	通信線路
通信線路	通信のために設置するケーブル等の設備	通信回線
データロガー	現場で計測データを格納する装置	データ収録機
ノード	センサ、通信機能、データ処理機能などが一体化した端末装置	センサデバイス
保存活用プラットフォーム	モニタリングシステムの機能分類の一つで、複数のモニタリング拠点で収集・解析したデータの中長期保存やビッグデータ分析等を行うシステム。サーバ等のシステム設備は保存活用拠点で管理する場合とデータセンタやクラウドで運用する場合がある。	
保存活用拠点	モニタリングシステムを設置する管理拠点の一つ。複数のモニタリング拠点から収集したデータの中長期にわたる保存や、保存した複数のデータや他のデータを組み合わせるビッグデータ分析等を行う拠点を示す。	
マルチホップ	無線通信方式の一つで、センサデバイスからのデータを近隣のセンサデバイスが中継する方式。無線親機から直接電波の届かない場所に設置されたセンサデバイスでも、電波の届く範囲に他の無線センサデバイスがあればデータを収集する事ができる。	

用語	意味	類義語・関連語
モニタリングプラットフォーム	モニタリングシステムの機能分類の一つで、一つまたは複数の現場で計測したセンサデータの収集、FFT 等の解析、表やグラフ等による可視化などを行うシステム。PC やサーバ等のシステム設備はモニタリング拠点で管理する場合とデータセンタやクラウドで運用する場合がある。モニタリングプラットフォームと保存活用プラットフォームは機能と役割の違いを示すもので、サーバの設置場所や運用方法には依存しない。	
モニタリング拠点	モニタリングシステムを設置する管理拠点の一つ。一つまたは複数の現場のモニタリング業務を管理する拠点を示す。ここでモニタリングデータの解析や可視化等を行う場合もある。	

第10編 データの保存・活用

1 章	概要	10-1
1.1	データの保存・活用とは	10-1
1.2	本編の記述範囲と記載内容	10-1
1.3	土木分野におけるモニタリングデータの保存・活用に関する現状認識.....	10-3
1.4	モニタリングデータの保存・活用の目的.....	10-5
1.4.1	モニタリングデータ保存・活用の必要性.....	10-5
1.4.2	モニタリングデータの保存・活用の目的.....	10-5
1.4.3	モニタリングデータの保存場所	10-6
2 章	保存活用プラットフォームに保存されるデータの選定及びデータ形式、属性情報の与え方	10-7
2.1	保存活用プラットフォームに保存されるデータの選定	10-7
2.1.1	データの選定の目的.....	10-7
2.1.2	データの種類	10-7
2.1.3	データの選定	10-7
2.2	データ形式、属性情報の取り組み.....	10-9
3 章	保存活用システム事例	10-11
3.1	画像によるひび割れモニタリング（静止画）データの保存活用システム.....	10-11
3.1.1	保存活用システムの目的	10-11
3.1.2	モニタリングシステムの構成及び概要.....	10-11
3.1.3	保存活用システムへのデータ保存例	10-12
3.2	変位計によるモニタリング（変位センサ）データの保存活用システム.....	10-14
3.2.1	保存活用システムの目的	10-14
3.2.2	モニタリングシステムの構成及び概要.....	10-14
3.2.3	保存活用システムへのデータ保存例	10-15
3.3	振動モードを用いたモニタリング（振動センサ）データの保存活用システム.....	10-18
3.3.1	保存活用システムの目的	10-18
3.3.2	モニタリングシステムの構成と概要	10-18
3.3.3	保存活用システムへのデータ保存例	10-19
4 章	システム	10-22
4.1	PC/サーバ/クラウドについて	10-22
4.2	コールドストレージについて.....	10-22
5 章	データ保存	10-24
5.1	ファイル保存	10-24

5.1.1	フォルダ構成	10-24
5.1.2	オブジェクトストレージ	10-25
5.2	データベース	10-26
5.2.1	データベースの動向.....	10-26
5.2.2	データ管理方法.....	10-27
5.3	インフラモニタリングデータの保存に関する先進的取り組み	10-29
5.3.1	NoSQL+RDBMS (+ファイル保存)【3D データ-センサデータ-点検調書連携】	10-32
5.3.2	NoSQL 保存【劣化予測・点検優先度予測 (ビッグデータ) 分析の概念検証】	10-37
6 章	分析事例の紹介.....	10-43
6.1	データ分析手法の概要とモニタリングデータへの適用性	10-43
6.2	土木インフラを対象とした分析事例	10-44
6.2.1	他分野での分析事例.....	10-44
6.3	実証事例	10-47
6.3.1	点検調書分析	10-47
6.3.2	インバリエント分析による異常検知	10-51
6.3.3	トポロジカルデータ解析による実証実験事例.....	10-55
6.3.4	構造物維持管理システムによるデータ活用	10-61
付資料 1 : 既存報告のまとめ		10-69
添付資料 2 : データ形式 まとめ		10-70
添付資料 3 : 用語集		10-72

1章 概要

1.1 データの保存・活用とは

インフラの現場に設置するセンサや計測器などで取得した計測データは、伝送により現場 PC、ロガーに保存され、現場での解析・分析処理後、状態監視や点検・診断に用いられる。

各現場から取得されたデータ、解析・分析されたデータは、道路管理者のクラウド（又はサーバ）に一元保存・管理され、維持管理に向けた傾向分析や劣化予測に活用される。また、分析結果は状態監視のための閾値決定の支援などにも使われる。図 1.1.1 に本章で定義したデータの保存・活用の範囲を示す。

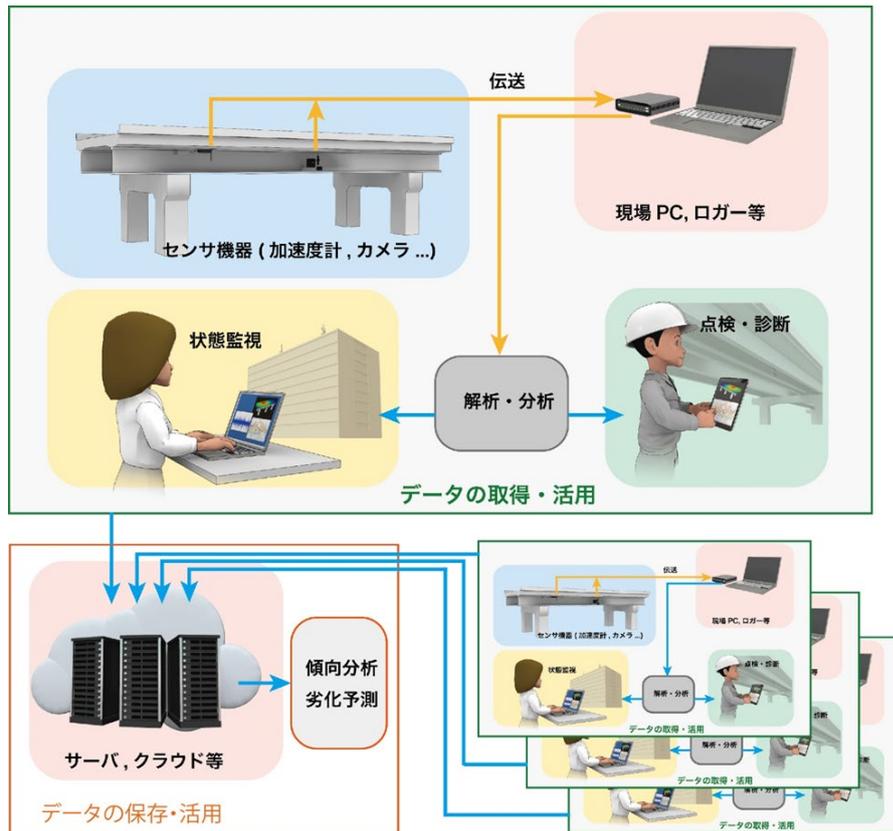


図 1.1.1 モニタリングシステムにおける「データの保存・活用」の範囲

1.2 本編の記述範囲と記載内容

図 1.2.1 に示すように、本編で取り扱う範囲はセンサデバイス～モニタリング拠点（事務所など）での一次処理・一時的保存の後の保存活用拠点（サーバ/クラウド）での多種多様な大量データの長期に渡る保存とその活用方法である。本編では、今後この領域の現状認識と技術的課題、保存活用システムの具体的な適用イメージ（検証構成（一部机上検証））、保存活用プラットフォームに保存すべきデータの選定、保存活用プラットフォームに保存されるメタデータの定義、保存・活用を目的とした保存活用プラットフォームの要件、適用可能な現状技術、あるいは今後適用が有望と思われる ICT 技術等を整理した。なお、本領域は、大量で且つ長期間収集されたモニタリングデータが必要であり、現時点において実施例はまだ無い。今後、モニタリングシステムが普及し、大量なデータが長期間に渡り取得されたのちに、保存・分析方法の実証が行われる。

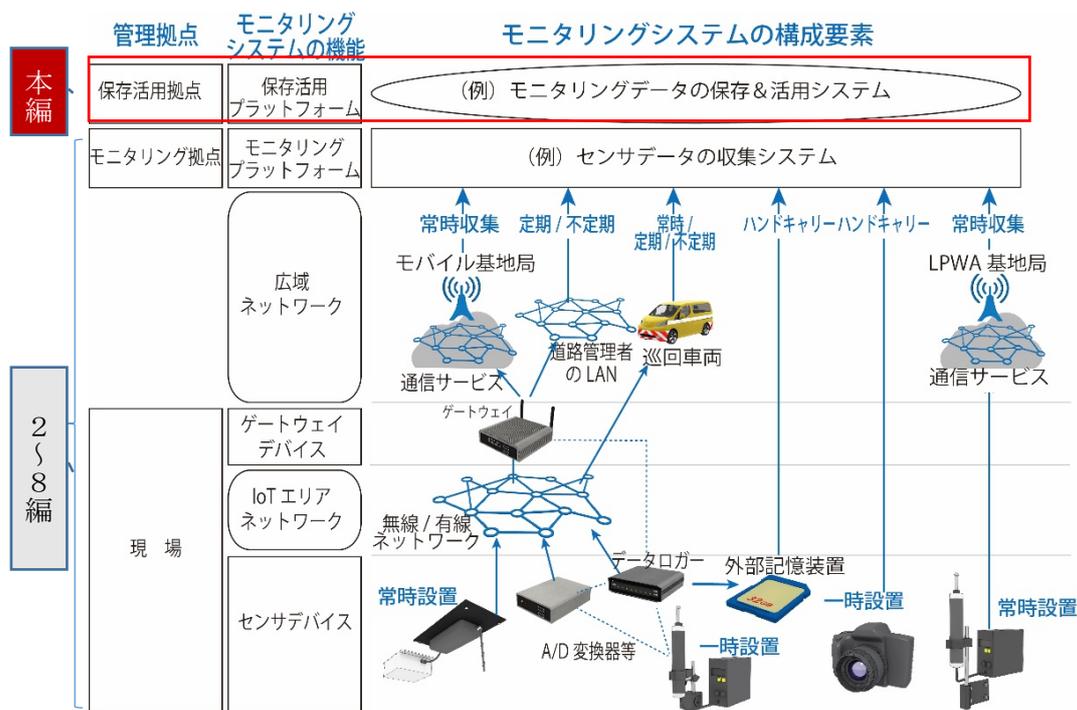


図 1.2.1 データの流れ及び本編の記述範囲

モニタリングデータの保存・活用に関して本編で記載している内容を、以下、予め概観しておきたい。

1章ではモニタリングデータの保存・活用に関する関連指針・学会提言・最新研究・土木技術者の期待等を取りまとめると共に保存・活用の目的や保存主体、保存場所などを具体的に整理している。これらは管理者ニーズやモニタリングシステムの適用シナリオの仮説設定に利用可能である。

2章では、保存活用プラットフォームに保存されるデータ選定およびメタデータの定義に関する情報を取りまとめている。RAIMSで実証的に取得した実橋梁のモニタリングデータの種類やデータ形式、データ特性、データ量等を整理した。これらの情報はシステム構築のための前提条件として利用可能である。データの保存方法を検討するためには、モニタリングデータの基本的な属性情報やメタデータ定義、それらの標準化の方向性に関する知見が必要となる。その検討は現在なお進行中ではあるが、土木学会・総務省・経済産業省等の最新の取り組み状況を整理した。

3章では、モニタリングシステムの具体的なシステム全体像を3種類、RAIMSで現場実証した実例をもとに例示した。図 1.2.1 に示したデータの流れを、静止画像によるひび割れ計測、変位センサ、振動センサという特徴的な3つのモニタリング手法毎に整理し、データの種類やデータ量、伝送方法、システム詳細などを具体的に示した。これにより、システム構築の具現化の糸口となるであろうシステムのイメージを提供することを意図した。

4章と5章は、これらの整理結果を受け、モニタリングデータの保存・活用を可能とするためのシステムとデータ保存方法に関する現時点での最新ICT技術を整理した。センサデータがビッグデータの3特性（大量性、多様性、多頻度性）を有することから、クラウドやコールドストレージ、NoSQL系のデータベースなど、保存活用プラットフォームに必要なと思われる幾つかのICT技術を提示している。「5.3 インフラモニタリングデータの保存に関する先進的取り組み」では、これら収集した最新情報を用いて、システム構築やデータ処理の流れの実現性を検証するための概念検証（PoC: Proof of Concept）を試行した結果を報告している。

6章では、モニタリングデータの活用に注目し、実橋梁の諸元・点検・運用データ、橋梁疲労破壊試験データ、実橋梁モニタリングデータなど、RAIMS等の活動で取り扱った実データを用いて、点検優先度予測、異常検知、構造同定等の4種類の分析を試行した事例を掲載した。モニタリングデータの利活用方法や分析方法に関しては、現状、未確定な部分が多いが、1章で整理した土木技術者側の期待像を参考に、現時点でそれに最も即していると思われる分析手法を試行した。

以上の情報収集と整理、実施事例や分析事例の提示によって、モニタリングデータの取得から分析までの全体システムを構築するための基礎的な情報をRAIMSの実証結果をベースに整理した。

1.3 土木分野におけるモニタリングデータの保存・活用に関する現状認識

土木分野におけるモニタリングデータの保存・活用に関する現状認識（課題、要件、期待像など）を概観する目的で、関連する既存のガイドラインや指針、学会提言や最新のSIP報告等の情報を収集、整理し、表1.3.1に取りまとめた。表は、収集結果に対して、インフラモニタリングデータの①データモデリング ②データの保存 ③データの活用について、特に本ガイドラインに有用と思われる事項を抜粋して示している。なお収集結果の詳細は、編末の添付資料1に別途示しているので参照されたい。

表 1.3.1 土木分野におけるモニタリングデータの保存・活用に関する指針類の現状

既存ガイドライン・指針の出典	データモデリング	データの保存	データの活用
社会インフラのためのセンサ標準化ガイドラインおよび運用の手引き（案）：土木学会土木情報学委員会 センサ利用技術小委員会	センサデータに対して標準化するデータ項目を規定（データの標準仕様としてuicodeを含むユニークIDを提案）。	記憶媒体はCDまたはDVDでの保存を推奨。クラウドサービスを利用した長期データ保存方法の可能性も示唆	—
橋梁構造物のモニタリングに関する通達RVS13.03.01（オーストリア）	—	加工前の生データの蓄積の必要性を提言（問題発生時に元データを調べられるように）	モニタリングデータを使って、確率論的な計算方法を採用してもよいことを記載
CIM技術検討会 橋梁WG（コンクリート橋）ガイドライン：日本建設情報総合センター	設計段階の物性情報、施工段階の材料情報、維持管理段階での活用情報を予め属性として付与できるようにモデル内に登録することを推奨。	—	—
実構造物への適用性を重視した各種センサ技術の調査と体系化研究委員会：日本コンクリート工学会	—	センサデータをクラウドで管理しビッグデータ活用や予備解析へ応用。クラウドによる情報の共有化。モニタリングデータをBIM、CIM等の三次元モデルに格納して多重分析。	複数の大量センサデータ（ビッグデータ）を分析。熟練者のスキルなしで構造物に対する一定の評価。従来手法と異なる新しい分析。マルコフ分析等の将来予測。実測値のフィードバックによる予測精度向上の可能性。
SIP：高度なインフラ・マネジメントを実現する多種多様なデータの処理・蓄積・解析・応用技術の開発	IoTを想定したインフラ維持管理向けデータモデル（過去に蓄積されたデータや今後想定されるセンサーデータなど、多種多様なデータの取得から活用までを対象とした「道路情報表現仕様（第1版）」）を整理。	複数種のデータベースをまたいで検索できるwebベースの「道路情報データベース共通API仕様（第1版）」を開発（連邦型道路管理データベースラッパーや標準API（REST+JSON型）を整備。	複数のデータベースに登録された地理情報を結びつけて検索するなど、データの統合や連携による有効活用が可能。現場での利用形態を反映した対話的なユーザーインターフェースを開発。
NEDO委託事業「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」プロジェクト：技術研究組合NMEMS技術研究機構	多種多様なセンサからの様々なデータフォーマットやインターフェースの差異を吸収する通信仕様を策定。蓄積されたデータを容易に利活用するため、オープンデータで採用されているRDF（Resource Description Framework）形式でデータ提供する仕組みを構築。	データの収集・蓄積・提供の仕組みを共通的なプラットフォームとして構築することで、設備や通信コストの削減、及び、多種多様なデータの横断的な活用が可能。クラウドサービスの活用についても検討中。	計測されたAEから橋梁の健全性を定量的に評価する手法を開発するなど、モニタリングデータを使った診断手法についても開発中。

①データモデリングに関しては、土木学会や CIM のガイドラインの中に、センサデータや CIM データで標準化すべきデータ項目や属性情報、ucode を含むユニーク ID、維持管理段階での活用情報の属性付与等の記載が見られる。SIP「高度なインフラ・マネジメントを実現する多種多様なデータの処理・蓄積・解析・応用技術の開発」では、IoT を想定したインフラ維持管理向けデータモデルとして、「道路情報表現仕様（第 1 版）」が示されており、データモデルの標準化によるデータの継続性や統合容易性の担保の必要性が指摘され始めている状況にある。NMEMS 技術研究機構が NEDO 委託事業として進めている「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」の試みでは、センサデータの多様性に対応するために、センサ側（ロガー）のアウトプットデータに対し「共通のヘッダ+計測データ」の形で共通インタフェースのデータ仕様を定めると共に、データ形式としてオープンデータで採用されている RDF（Resource Description Framework）形式でのデータ提供の仕組みを構築中である。

②データの保存に関しては、今後、クラウドによる長期保存、データベース化、情報の共有化、ビッグデータ活用や予備解析への対応が必要との認識が示されており、CIM 等の三次元モデルにモニタリングデータを格納し、データ保存プラットフォームとして多重分析を行う等も期待されている。前掲 SIP では連邦型道路管理データベースの考え方が採用され、その運用のためのラッパーや標準 API など、先進的な試みが示されている。一方、これらを実現するためにはアクセス権限やセキュリティ等を含む高度な ICT 知識が必要との問題認識も提示されている。NMEMS 技術研究機構も、多種多様なデータの収集・蓄積・提供をクラウド環境で行うための共通プラットフォームの構築を進めている。

③データの活用に関しては、多種多様な大量モニタリングデータを用いたビッグデータ分析や高度な見える化、将来予測解析等により、熟練者のスキルなしで構造物に対する一定の評価を行うことへの期待が示されている。同時に、モニタリング結果により何らかのアクションを行う場合の判断基準（閾値）の明確化が課題であるとの認識が見られる。中には将来予測の精度を上げるためには実測値のフィードバックシステムが必要との指摘もあり、モニタリングデータの AI 的な利活用の方向性も見受けられるなど、ビッグデータ解析や AI に対する期待を感じさせる（実際、オーストリアの橋梁モニタリングに関する通達ではモニタリングデータを用いた確率論的な計算方法を用いて限界基準を決定しても良いことが明示的に示されている）。NMEMS 技術研究機構も、橋梁床版で計測された AE のデータを用いた健全度診断等、モニタリングデータを用いた診断方法の開発を進めている。

以上のような土木分野からの期待に応えるためには、多種多様な大量インフラモニタリングデータのデータモデリングの考え方（データの継続性や可用性を担保するため）、大量データをデータベース化し、クラウドで安全に長期保存する方法（情報の共有、見える化、各種分析を実現するため）、従来では把握できなかった新しい分析や高度な可視化、モニタリング結果によるアクションを可能にする評価方法、モニタリングデータを用いてインフラの健全度を診断する方法等に対する最新 ICT 技術の適用性を検討する必要があるものと思われる。

1.4 モニタリングデータの保存・活用の目的

1.4.1 モニタリングデータ保存・活用の必要性

例えば第2編 RC床版のモニタリングでは図 1.2.1 中に示すように、現場でのセンサデバイスによるデータ収集及びデータの一次処理、現場からモニタリング拠点（事務所）へのデータ伝送及び、モニタリング拠点内で行われるデータ処理について述べている。変位計データは現場エッジレイヤでの一次処理（算出）より物理量に変換（波形データ（電気信号）⇒変位量（物理量））され、伝送（第9編）によりモニタリング拠点に送られる。伝送されたデータは、その目的（主に監視）のため、モニタリング拠点（例；事務所）内で閲覧及び一定期間保存される。

本モニタリング拠点に送られて来るデータは蓄積され、時間と共にデータ量は増大し保存される。また保存されたデータが適切に管理されていない場合データ活用が難しく、結局は「保存されただけで十分に生かせない」ことになる。モニタリングデータを生かすためには、データの保存・活用（高度分析による活用）が必要となる。

1.4.2 モニタリングデータの保存・活用の目的

1.3 で述べたように、土木分野でのデータの保存・活用の目的は、“多種多様な大量モニタリングデータを用いたビッグデータ分析や高度な見える化、将来予測解析等により熟練者のスキルなしで構造物に対する一定の評価を行うこと、モニタリング結果により何らかのアクションを行う場合の判断基準（閾値）の明確化”などであった。ただし、これらの目的に対してはまだ研究段階であるが、研究開発及び実現化のためにも今からデータの保存は必要であると考ええる。

また、流通しやすい形式に保存されたモニタリングデータ、活用のために行った分析結果（モニタリングデータの分析データ）等は、利便性や価値が向上しており社会資産となる。さらに、定期点検調査等との連携が行えれば、維持管理業務の効率化、高度化に対して必須のものとなる。

本編では保存活用システムへのデータの保存・活用の目的として以下の3つに分けた。

(1) 保存・管理

データ保存・管理は、道路管理者によって行われる。管理者に集められるデータ量は大量であり、また長期間（橋梁の供用期間）の保存・管理が必要である。保存されたデータの活用は、道路管理者および道路管理者から委託された複数の民間業者が行う。また、保存されたデータは他の道路管理データ（定期点検調査書、詳細点検調査書）との連携も行われる。

(2) 維持管理・分析

保存活用システムに保存されたデータは長時間保存されることにより時系列データとなり、分析に用いられ状態把握や劣化予測等の維持管理業務に活用される。劣化予測の精度が向上すれば予防保全へ繋がる。また、他の橋梁との比較も容易となり、統計的分析（AI分析含む）にも活用される。さらに、これらの分析結果を使った数理最適化技術により補修計画の高度化に貢献する。

(3) 監視

センサやカメラ等で得られたモニタリングデータは、まずは対象構造物の現状を把握するために、データの処理結果を表示する。モニタリングデータを処理し、物理量（例：ひずみ量、たわみ量、ひび割れ密度）に変換の後、ユーザに表示される。物理量に閾値がある場合、その値を超過したか否かにより、管理者に知らせる。保存活用システムに保存されたデータは、監視で利用する閾値の算出、更新に使われる。

1.4.3 モニタリングデータの保存場所

(1) モニタリングデータ保存者について

現在、社会インフラの維持管理業務の一つとして定期点検作業が民間の点検業者により行われている。点検業者は、点検作業及び調書作成を行い、それらを所定の形式に纏めて管理者に納品物として提出する。納品後、収集されたデータ（生データ含む）は点検業者が保存することは無い。

以上の理由から、モニタリングデータの保存も同様に、データの保存は民間のモニタリング業者（点検業者）ではなく、管理者が行うと想定する。

(2) モニタリングデータ保存者（道路管理者）：

- 1) 国（本省，地方整備局，道路事務所）
- 2) 自治体（県，市町村），自治体に委託された団体（維持管理センター等）
- 3) 高速道路会社および民間道路管理会社

(3) 保管場所：本編内では図 1.2.1 中のデータ保存場所である「モニタリング拠点」及び「保存活用拠点」は以下を想定する。

1) モニタリング拠点

国：国道事務所

自治体：市町村役所，県の道路事務所

道路管理者：現場を管理する事務所

2) 保存活用拠点

国：地方整備局

自治体：都道府県（建設技術センター等を含む）

高速道路会社および民間道路管理会社：本社又は支社

2章 保存活用プラットフォームに保存されるデータの選定及びデータ形式、属性情報の与え方

2.1 保存活用プラットフォームに保存されるデータの選定

2.1.1 データの選定の目的

図 1.2.1 のデータの流れて従って収集される保存活用プラットフォームに保存されるモニタリングデータは、図中のセンサデバイスの中でのカメラによる①画像データなどメディアデータ、およびその他のセンサデバイスからの②振動データなどの数値データの 2 種類に分けられる。

各々のデータは、可能であれば全データを保存活用プラットフォームに保存すべきであるが、高コストになり、また目的に応じて加工したデータも保存すべきかなど、多種の課題がある。本章では、保存するデータの選定の考え方の例を示す。

2.1.2 データの種類

(1) 本ガイドライン記載の主なデータを以下の 4 つに分ける

1) 画像データ：写真や動画

基本的に今後永続的に保存する必要のある大容量データ。非圧縮データ（生データ）と圧縮データ（軽量化データ）のように用途に応じて複数パターンでの保存が考えられる。

2) センサデータ：センサ（計測器）より収集するデータ。

サンプリング間隔によるが、基本的に大容量となる時系列データ。

3) テキストデータ

点検調書の記述内容など

4) 構造物データ

本編では橋梁の CAD データ（3D モデル含む）を指す。損傷情報などは本データに含める。

(2) 各データの保存量は、

データ保存量=1 回の収集データ量×データの収集頻度（測定頻度）×保存期間となる。

2.1.3 データの選定

表 2.1.1 に保存活用プラットフォームに保存するデータの選定（案）を示す。可能であればすべてのデータを保存し、過去とのデータとの比較や、分析に活用することが望ましいが、データ管理コスト等を考慮して案とした。

表中の「データの種類」は本ガイドラインで特にデータ量の多いものや、定期点検調書の様なデータの種別をあげている。また、管理されている全橋梁数（3000 橋と仮定）およびモニタリングの対象橋梁数（300 橋）および、データの収集周期や、保存期間は「仮定」とし、「保存データ」の算出に使用している。「保存データの選定」は、RAIMS 内で議論を行い、以下の三段階に分けた。

○：全データを保存。

△：加工データのための保存でも良いが、保存した方が望ましい。

▲：実質保存不可能なデータ容量となる。波形データの一部のみを保存。

表 2.1.1 保存するデータの選定 (案)

データの種類	画像データ (撮写写真)	センサーデータ (変位計)	センサーデータ (加速度センサー)	テキストデータ	構造物データ (CAD)				
コメント	第2編2章 「画像によるひび割れのモニタリング」他	第2編4章 「変位計によるモニタリング」他	時間当たりのデータ量は変位計と同じと仮定 最長保管期間を供用期間 (30年と仮定) とした						
目的	定期点検	静的計測	動的計測	静的計測	損傷図、CIMデータ				
収集 (又は更新) 周期	1回/5年	1回/60分	100Hz	1回/60分	1回/5年				
管理者の モニタリング対象橋梁数	3000 (全橋梁)	300 (全橋梁の10%)	300 (全橋梁の10%)	300 (全橋梁の10%)	3000 (全橋梁)				
最長保管期間 (一例)	供用期間	1年 (更新工事まで)	1年 (更新工事まで)	供用期間	供用期間				
【費用】 【データ (GB)【保存期間】	生データ	撮影写真 129,600	測定値 (波形) 0.6	測定値 (波形) 30,000	測定値 (波形) 18	測定値 (波形) 900,000	環境情報、X E、所見など	CAD図 (1橋梁 0.5GBと仮 定、更新による 容量増大はわ ずか)	1500
	加工データ	正規化写真 72,000	統計値など 0.3	統計値など 0.3	統計値など 9	統計値など 9	-	-	-
	分析 (解析) 結果 (統計値含む)	バケトル図 54	閾値など 0.3	閾値など 0.3	閾値など 9	閾値など 9	-	-	-
保存データの選定	生データ	△	○	▲	○	▲	○	○	○
	加工データ	○	○	○	○	○	○	○	○
	分析 (解析) 結果 (統計値含む)	○	○	○	○	○	○	○	○

○：全データを保存。

△：加工データのみの保存でも良いが、保存した方が望ましい。

▲：実質保存不可能なデータ容量となる。波形データの一部分のみを保存。

2.2 データ形式、属性情報の取り組み

保存活用プラットフォームの構築を具現化するためには、データのモデリング方法、データ形式、属性情報の与え方等がある程度確定し、標準化することが必要と思われる。これらの検討は、現在各種機関で始まったばかりという状況にある。その流れを概観すると以下となる。

(1) 土木学会及び CIM ガイドライン

センサデータや CIM データで標準化すべきデータ項目や属性情報、ucode を含むユニーク ID、維持管理段階での活用情報の属性付与等を提言。

(2) SIP「高度なインフラ・マネジメントを実現する多種多様なデータの処理・蓄積・解析・応用技術の開発」

IoT を想定したインフラ維持管理向けデータモデルとして、「道路情報表現仕様（第 1 版）」を提言。データモデルの標準化によるデータの継続性や統合容易性の担保の必要性を指摘。

(3) NMEMS 技術研究機構「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」（NEDO 委託事業）

センサデータの多様性に対応するために、センサ側（ロガー）のアウトプットデータに対し「共通のヘッダ+計測データ」の形で共通インタフェースのデータ仕様を定めると共に、データ形式としてオープンデータで採用されている RDF（Resource Description Framework）形式でのデータ提供の仕組みを構築中。

(4) 総務省スマート IoT 推進フォーラム インフラモニタリングタスクフォース

総務省が推進している「スマート IoT 推進フォーラム インフラモニタリングタスクフォース (<https://smariot-forum.jp/tech-strategy/tech-std/infra-mon-tf>)」の中でセンサデータ形式の標準化の議論が開始されている。データの保存のみならず、その後の利活用を考えると、様々な情報群（センサデータ、橋梁諸元、CIM の 3D モデルや設計・施工・施工管理情報、交通量・天候・災害・環境等のオープンデータなど）から分析目的に応じて適切な情報を容易に取り出し、分析側に引き渡せるように配慮しておく必要がある。議論は現在も継続中であるが、センサデータのメタ情報を一意的に固定、センサメーカーに強要する事には運用上の無理があるという制約条件の下で、以下に示すような情報モデルを必須のメタ情報として盛り込むことのみを規定し、それ以外はセンサメーカーやインフラ管理者毎のメタ定義に従いデータを保存する方向性が打ち出されている。

a) 設置情報モデル：橋梁 ID、部位 ID、センサ名 ID、設置目的、取り付け日などを標準化

b) センサデバイス情報モデル：センサ名 ID を必須情報として各センサ毎に必要な情報（センサ依存）を保持

c) メタデータ（生データ）：センサ ID と計測時刻（TIME）を必須情報として各センサ毎の属性情報（センサ依存）を保持

d) メタデータ（加工データ）：分析に用いる高次データ。センサ ID と計測時刻（TIME）を必須情報として、加工データおよび加工条件を記載した属性情報（センサ依存）を保持

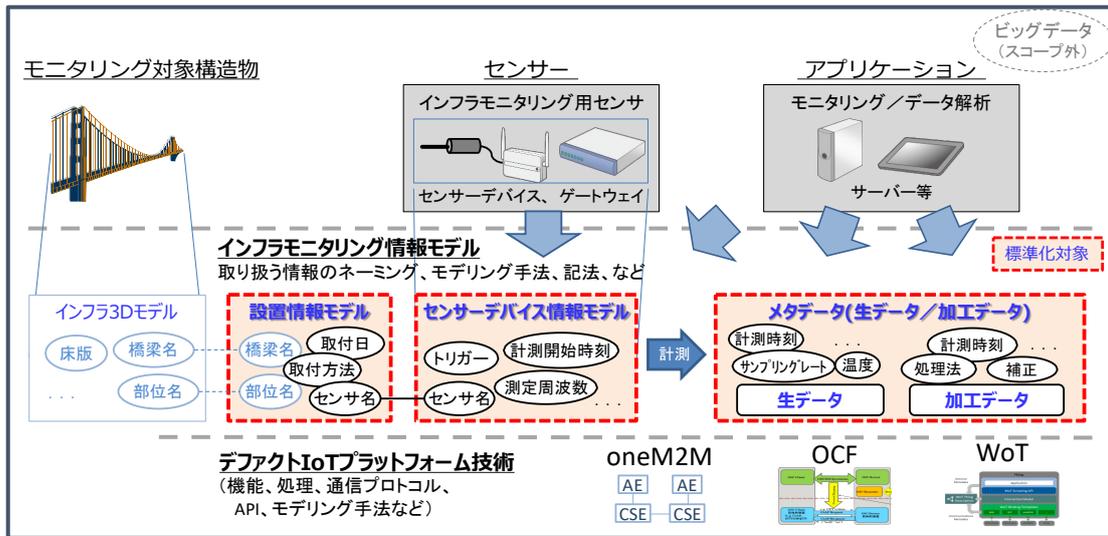


図 2.2.1 総務省スマート IoT 推進フォーラム インフラモニタリングタスクフォース
で想定しているメタデータ定義

出典：(一社) 情報通信技術委員会, TTC 技術レポート TR-1074 「インフラモニタリング情報モデル標準化のためのガイドライン」, 2019 年 3 月) より

3章 保存活用システム事例

本編では、「第2編 RC床版のモニタリング」記載のユースケースを中心として、ひとつの橋梁を対象にモニタリングのユースケースを示す。ユースケースは以下の3ケースとした。モニタリングの仕様、モニタリング方法は第2編の記載とし、本章では以下のモニタリングデータのフローと必要な保存活用システムを示す。

3.1 画像によるひび割れモニタリング（静止画）データの保存活用システム

3.1.1 保存活用システムの目的

1.4.2 で示した目的の中で、ひび割れモニタリングの静止画データは、自動では収集されないため、監視（リアルタイム監視）には使用しない。従って、保存活用システムの目的は「維持管理・分析」「保存・管理」となる。

(1) 保存・管理

データの一元化管理

分析のための多種多数データ連携

(2) 維持管理・分析

分析（ビッグデータ分析・AI分析）

損傷の自動（半自動）抽出

損傷度合いの自動（半自動）判断

劣化予測（将来的な経年劣化）

3.1.2 モニタリングシステムの構成及び概要

ひび割れモニタリングは、第2編で述べたとおり、損傷画像を評価するシステムであり、現場ではカメラ、トータルステーション等を用いる。データ伝送は主にハンドキャリアで行う。伝送環境が整っている場所では、広域ネットワークの利用も可能だが、伝送データ量が多いため有線が用いられる。

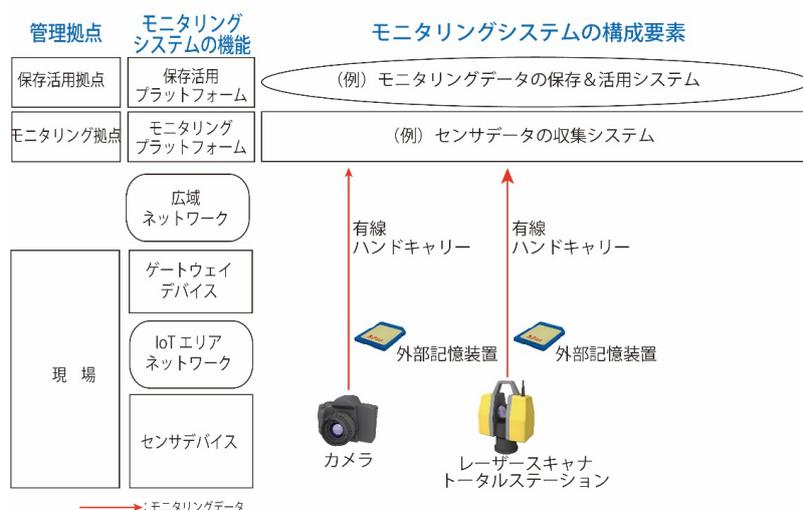


図 3.1.1 ひび割れモニタリング

表 3.1.1 ひび割れモニタリング 全体システム概要

(現場) センサデバイス	<ul style="list-style-type: none"> ● 静止画カメラ：床版のひび割れデータ収集（撮影） ● レーザスキャナ：点群データを収集 ● トータルステーション：撮影の位置情報を収集
(現場) ゲートウェイデバイス	無し
(モニタリング拠点) モニタリングプラットフォーム	● ハンドキャリーで持ち込まれたデータを、パソコンで処理後、分析などに利用
(保存活用拠点) 保存活用プラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数橋梁のデータ（ビッグデータ）を一元化保存 ● ビッグデータ解析（AI 解析）による、自動化、閾値の作成

3.1.3 保存活用システムへのデータ保存例

(1) 保存すべきデータ

本節では、ひび割れモニタリングの保存するデータについて、第2編の「2章 画像によるひび割れモニタリング」をユースケースとして述べる。本ユースケースでは、データの取得及び評価のためのデータの加工は第2編の図 2.1.1 及び 2.2.4 撮影～2.2.8 データの保管 の手順で進められる。また、第2編の 2.2.8 より、床版1パネル当たりの保存すべきデータ及びデータのフォーマットと容量は以下の表 3.1.2 となる（第2編 表 2.2.3 と同じ）。

表 3.1.2 ひび割れモニタリング

名称	種類	フォーマット	容量(参考)
① 撮影データ	画像データ	JPEG	60MB
② 正射投影データ	画像データ	JPEG	40MB
③ 正射投影データの四隅の座標値	テキストデータ	TXT	1KB
④ ひび割れ判読データ	ベクトルデータ	DXF (DWG), SFX	20KB
⑤ その他損傷データ	ベクトルデータ	DXF (DWG), SFX	1KB
⑥ 標定点データ（3次元座標データ）	テキストデータ	TXT	1KB
⑦ レンズキャリブレーションパラメータ	テキストデータ	TXT	1KB

*データ容量は床版1パネル当たりの参考値であり、橋梁の種類や規模等によって異なる。

なお、添付資料2の表に画像データ及び図形データの形式例を示す。現在、これらのデータ形式は任意である。また、添付資料2に示すXMLを代表とするデータ記述言語（ドキュメント形式）を用いたデータ形式も選択可能である。また、今後ひび割れ画像が大量に収集されるときには、データ圧縮方法などの検討が行われると思われる。

(2) データ量見積もり

一橋梁のデータ量を、第2編の2.2.9 費用の目安で定義した橋梁（第2編：図2.2.8 概算経費試算のためのモデル（1支間））を参考とし、モニタリング拠点（事務所）及びデータ保存活用拠点での保存容量を見積もった（表3.1.3）。

- 1) 一橋梁：1支間，床版パネル数：24
- 2) モニタリング拠点の管理する橋梁数：300（モニタリング拠点の管理配下の全橋梁数と仮定）
- 3) 保存活用拠点の管理する橋梁数：3000（保存活用拠点の管理配下の全橋梁数と仮定）

表 3.1.3 各データの保存量

データ名称	橋梁当たりの容量 (MB)	データ容量 (MB) 橋梁数 300 の場合	データ容量 (MB) 橋梁数 3000 の場合
撮影データ（画像データ）	1,440	432,000	4,320,000
正規化データ（画像データ）	960	160,000	2,400,000
ひび割れ判読データ/ その他損傷データ/他（テキストデータ）	0.6	180	1,800

(3) データ保存場所と、目的・データ

データの保存場所による保存データと活用目的を表3.1.4に示す。

表 3.1.4 データの保存場所と活用目的

保存場所	目的	データ	ハード/保存デバイス	保管期間
モニタリング拠点	◇維持管理・分析	・ひび割れ判読データ/ その他損傷データ	PC/HDD	<5年
保存活用拠点	◇維持管理・分析 ◇保存・管理	・撮影データ ・正規化データ ・ひび割れ判読データ/ その他損傷データ	サーバ・クラウド/HDD・テープ等	>5年

(注) 大容量データ（撮影データ，正規化画像）の複数箇所での重複した保管はコスト課題となるため，重複は避ける。

3.2 変位計によるモニタリング（変位センサ）データの保存活用システム

3.2.1 保存活用システムの目的

1.4.2 で示した目的の中で、変位モニタリングのデータの目的は、「監視」「維持管理・分析」「保存・管理」の3つとなる。特に第2編で述べたように主に「監視」に用いられ、損傷の進行を計測しながら道路運行の維持に用いられている。計測は常時行われ警報発信などのリアルタイム処理となる本処理はゲートウェイデバイスや事務所のパソコンによって行われる。保存活用システムは、本リアルタイム処理に使われる参照データ（閾値）の作成・更新に使われる。

(1) 監視

異常検知

(2) 維持管理・分析

分析（ビッグデータ分析・AI分析）

劣化予測（将来的な経年劣化）

(3) 保存・管理

データの一元化管理

分析のための多種多数データ連携

閾値の作成・更新

3.2.2 モニタリングシステムの構成及び概要

変位センサを用いたモニタリングのシステムは、第2編で述べたとおり動的測定と静的測定があり、変位計、パソコン、アプリケーションで構成される。動的測定は、リアルタイムでデータ収集し評価するシステムであり、現場から広域ネットワークで構成される。静的測定は、主にログ解析のためにデータを収集するため、リアルタイムの必要性は低く、センサデータは手動でパソコンに収集される。

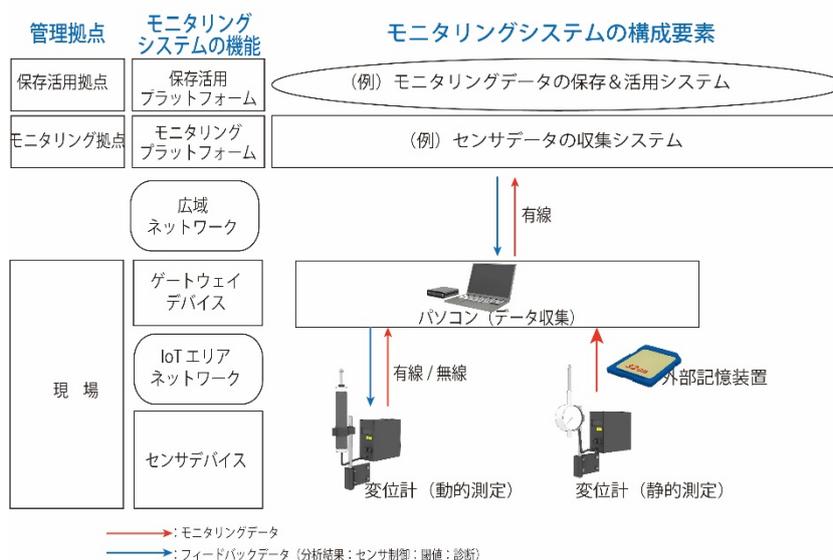


図 3.2.1 変位モニタリング

表 3.2.1 変位モニタリング 全体システム概要

(現場) センサデバイス	<ul style="list-style-type: none"> ● 変位計（静的計測法）（動的計測法）：床版の変位データを収集
(現場) ゲートウェイデバイス	<ul style="list-style-type: none"> ● 変位があらかじめ決められた閾値を超えた場合は、警報機を作動させる ● デバイスで収集したデータを、パソコンもしくは外部記憶装置に保存
(モニタリング拠点) モニタリングプラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> ● 専用のネットワークで持ち込まれたデータを、パソコンで処理後、警報機の実動等に活用
(保存活用拠点) 保存活用プラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数橋梁のデータ（ビッグデータ）を一元化保存 ● ビッグデータ解析（AI 解析）による、自動化、閾値の作成

3.2.3 保存活用システムへのデータ保存例

本節では、変位のモニタリングの保存するデータについて、第2編の4章 変位計によるモニタリングの記載内容をユースケースとして述べる。本ユースケースでは、データの取得及び評価のためのデータの処理、収集は第2編の図4.2.1の手順で進められる。この場合、保存すべきデータは以下の3つとなる。

また、第2編にあるように、床版の変位計測に用いられるロッド式変位計による計測は「静的計測法」と「動的計測法」の2つの測定方法がある。

(1) 保存すべきデータ

1) 変位データ（ロッド式変位計）：CSV

変位データ（動的計測）：連続計測（サンプリング周波数：100Hz）

変位データ（静的計測）：間欠計測：1回/1時間

2) 変位データの属性情報：CSV, TEXT

分析用情報：測定日時、変位計番号など

管理情報：橋梁名、部材番号、収録器番号など

3) 監視データ：：CSV, TEXT など

傾向の判断に用いるデータ（時間最大値・時間平均値・日最大値・日平均値収録）

警報発令情報：閾値、発令日時、発令回数

監視データごとの変位データの属性情報（分析用情報、管理情報）が紐づけられる

表 3.2.2 変位モニタリング 保存すべきデータ

データ名称	種類	フォーマット	容量 (参考) 1 年間
変位データ (動的計測)	波形データ	CSV	100GB
変位データ (静的計測)	数値データ	CSV	2.0MB
変位データの属性情報	テキストデータ	TEXT	<1MB
監視データ	テキストデータ	TEXT	<1MB

なお、添付資料 2 の表にセンサデータに用いられるドキュメントデータの形式例を示す。現在、これらのデータ形式は任意である。また、添付資料 2 に示す XML を代表とするデータ記述言語 (ドキュメント形式) を用いたデータ形式も選択可能である。また、今後ひび割れ画像が大量に収集されるときには、データ圧縮方法などの検討が行われると思われる。

(2) データ保存量の見積もり

一年間の計測で保存されるデータ量を表 3.2.3 に示す (第 2 編 表 4.2.2 を参考に作成)。計測期間は第 2 編で述べたように修繕工事までの 1 年としている。また、変位データの属性情報及び監視データはデータ量が小さいため見積もりからは除いた。

また、橋梁の床版数、変位計数は以下と仮定した。

- 1) 変位計数 : 1 個
- 2) モニタリング拠点管理下の橋梁数 : 30 (モニタリング拠点の管理下の全橋梁数の 10% に設置と仮定)
- 3) 保存活用拠点の管理下の橋梁数 : 300 (保存活用拠点の管理下の全橋梁数の 10% に設置と仮定)

動的計測の場合、一橋梁当たり 100GB を超える。バイナリで保存した場合、データ容量は約半分であるが、それでも膨大であり、①コールドストレージなどの安価な保存方法、②保存を考慮した測定方法 (間欠測定)、③保存するデータの選定 などの検討が必要である。

表 3.2.3 各データの保存量

データ名称	橋梁当たりの容量 (MB)	データ容量 (MB) 橋梁数 30 の場合	データ容量 (MB) 橋梁数 300 の場合
変位データ (動的計測)	100,000	3,000,000	30,000,000
変位データ (静的計測)	2	60	600

(3) データ保存場所と、目的・データ

データの保存場所による保存データと活用目的を表 3.2.4 に示す。

表 3.2.4 データの保存場所と活用目的

保存場所	目的	データ	ハード/保存 デバイス	保管期間
モニタリング拠点	◇監視	・監視データ	PC/HDD	<1年
保存活用拠点	◇監視 ◇維持管理・分析 ◇保存・管理	・変位データ ・変位データの属性情報 ・監視データ	サーバ・クラウド/HDD・テープ等	>1年

3.3 振動モードを用いたモニタリング（振動センサ）データの保存活用システム

3.3.1 保存活用システムの目的

1.4.2 で示した中で、振動モードを用いたモニタリングのデータは、「監視」「維持管理・分析」「保存・管理」となる。このうち「監視」については現在の状態の把握、及び継続的にモニタリングを行うことによる構造性能の変化の把握が考えられる。また「維持管理・分析」については将来的には劣化予測などへの活用が期待される。

(1) 監視

- 状態把握
- 構造性能の変化の把握

(2) 維持管理・分析

- 分析（ビッグデータ分析・AI分析）
- 劣化予測（将来的な経年劣化）

(3) 保存・管理

- データの一元化管理
- 分析のための多種多数データ連携

3.3.2 モニタリングシステムの構成と概要

振動モードを用いたモニタリングのシステムは、第2編で述べたとおり手動計測型と遠隔計測型がある。手動計測型は現場で収集したデータを持ち帰り評価するシステムであり、加速度センサ、ロガー、アプリケーションで構成される。遠隔計測型は、事務所など遠隔地からデータ収集し評価するシステムであり、センサを含む子機(センサユニット)、親機(ゲートウェイ)、アプリケーションとそれらをつなぐ近距離・広域ネットワークで構成される。

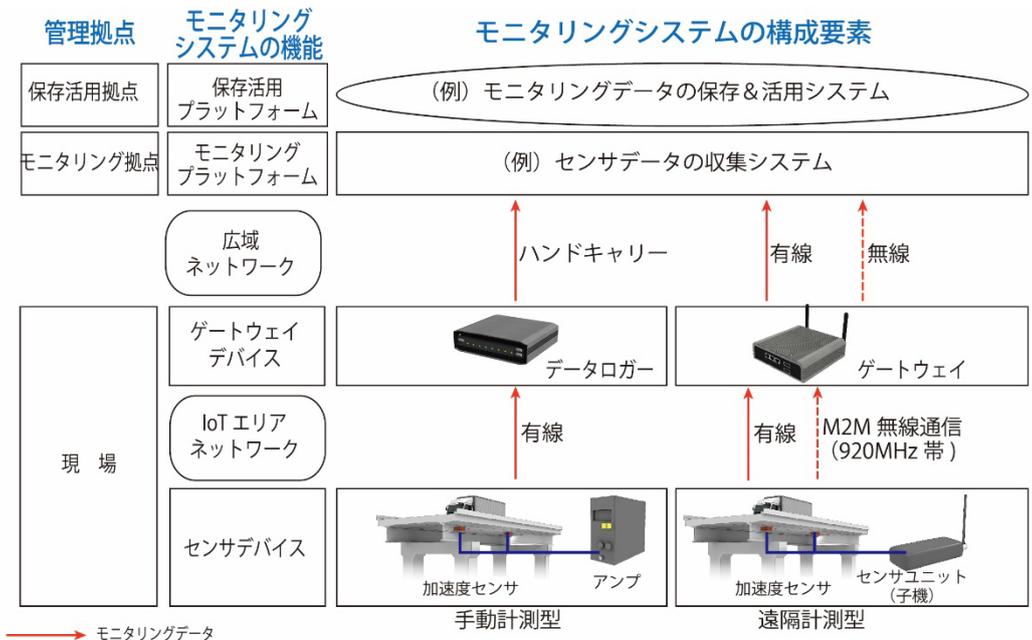


図 3.3.1 振動モードを用いたモニタリング

表 3.3.1 振動モードを用いたモニタリング 全体システム概要

(現場) センサデバイス	<p>加速度センサ：床版に生じる加速度データを収集</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 手動計測型：加速度センサをアンプへ接続，有線にてエッジレイヤのデータロガーへ送信 ● 遠隔計測型：センサユニット（子機）でデータ収集し，有線もしくは M2M 無線通信（920MHz 帯）にてエッジレイヤのゲートウェイ（親機）へ送信
(現場) ゲートウェイデバイス	<p>データの集約，保存，デバイス制御，及びアプリケーションへのデータ送信</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 手動計測型：データロガーにて加速度データを収集，保存，および子機の動作を制御する ● 遠隔計測型：ゲートウェイ（親機）にて子機データ集約する。またデータ保存，各子機の状態監視，動作制御，アプリケーションへのデータ送信を行う
(モニタリング拠点) モニタリングプラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> ● 回収したデータの分析と蓄積，及び評価の表示やデータを閲覧する ● また遠隔計測型の場合は，ネットワークを介して子機や親機の状態管理・動作制御を行う
(保存活用拠点) 保存活用プラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数橋梁のデータ（ビッグデータ）を一元化保存 ● 将来的にはビッグデータ解析（AI 解析）による自動化など

3.3.3 保存活用システムへのデータ保存例

本節では，振動モードのモニタリングの保存するデータについて，第 2 編の 6 章 振動モードによるモニタリング（振動センサ）の記載内容をユースケースとして述べる。

(1) 保存すべきデータ

保存するデータの種類とファイル形式の一覧を表 3.3.2 に示す。これらデータは，第 2 編 6 章の図 6.2.1 および図 6.2.5 の作業フローの中で生成される。

表 3.3.2 保存するデータ

データ名称	内訳	ファイル形式	備考
モニタリングデータ	時刻歴波形 ※1	CSV	数値データ
分析データ	周波数スペクトル ※2	CSV	数値データ
	振動モード	WMV	振動モードごとの動画データ

※1 加速度振幅の時刻歴波形

※2 加速度振幅と位相の周波数スペクトル

保存するデータのうち，モニタリングデータは加速度の時刻歴波形で，そのファイル形式は CSV とする。モニタリングデータを例えばフーリエ変換処理することで生成される，加速度や位相の周

波数スペクトルのデータも保存する。そのファイル形式も CSV とする。さらに、固有振動数における振動モードのデータも保存する。そのファイル形式は WMV とする。振動モードのファイルは動画であり、対象構造物固有の振動モードの形状を直感的に把握できる。

(2) データ保存量の見積もり

1 回のモニタリングにおける、各データの保存量の概算例を、表 3.3.3 に示す。ここで、1 回のモニタリングは繰り返し 10 回計測することを前提にしている。なお遠隔計測型により継続的にモニタリングを行う場合は、モニタリング回数に応じ保存量を検討する必要がある。

表 3.3.3 各データの保存量

<手動計測型> 1 回のモニタリング

データ名称	橋梁当たりの容量 (MB)	データ容量 (MB) 橋梁数 30 の場合	データ容量 (MB) 橋梁数 300 の場合
加速度の時刻歴波形	約 500	約 15,000	約 150,000
加速度の周波数スペクトル	約 20	約 600	約 6,000
振動モードの可視化データ	約 100-200	約 3,000-6,000	約 30,000-60,000

表 3.3.3 における前提条件を以下に記述する。

1) モニタリングデータ

加速度の時刻歴波形

サンプリング周波数：600Hz

床版あたり、加速度センサを 11 点設置（第 2 編 6.2.4 を参照）

2) 監視データ

加速度振幅と位相の周波数スペクトル

振動モードの可視化データ

3) 橋梁の径間数（=床版数）：1 パネル

4) モニタリング拠点管理下の橋梁数：30 （モニタリング拠点の管理下の全橋梁数の 10% に設置と仮定）

5) 活用・活用拠点管理下の橋梁数：300 （保存活用拠点の管理下の全橋梁数の 10% に設置と仮定）

これら保存量は、道路管理者が対象橋梁数などを加味して適切に設定する必要がある。

6) データの保存情報

データの保存場所や活用目的など保存情報に関する一覧を表 3.3.4 に示す

表 3.3.4 データの保存場所と活用目的

保存場所	目的	データ	ハード/保存デバイス	保管期間
モニタリング拠点	◇監視	<ul style="list-style-type: none"> ・時刻歴波形(※1) ・周波数スペクトル(※2) ・振動モード 	PC/HDD	<5年
保存活用拠点	<ul style="list-style-type: none"> ◇監視 ◇維持管理・分析 ◇保存・管理 	<ul style="list-style-type: none"> ・時刻歴波形(※1) ・周波数スペクトル(※2) ・振動モード 	サーバ・クラウド/HDD・テープ等	>5年

※1 加速度振幅の時刻歴波形

※2 加速度振幅と位相の周波数スペクトル

データは、道路管理者の事務所など、確実にデータを保存できかつ必要な時に容易に取り出せる場所へ保存する。保存デバイスは、PC, HDD, サーバ, クラウドなどとする。保管期間は、監視目的であれば5年未満とする。目的が維持管理・分析の場合、5年以上が望ましい。

これら保存情報は、道路管理者が対象橋梁数などを考慮して適切に設定する必要がある。

4章 システム

4.1 PC/サーバ/クラウドについて

前述した保存デバイスは目的に合わせて選択するのがよい。各保存デバイスの特徴を図4.1.1に示す。利用者が多い場合はクラウドが適しており、セキュリティを重視する場合はサーバが適しているが、今後は高いセキュリティ性も含めサービスの充実が進むクラウドが利用されると思われる。

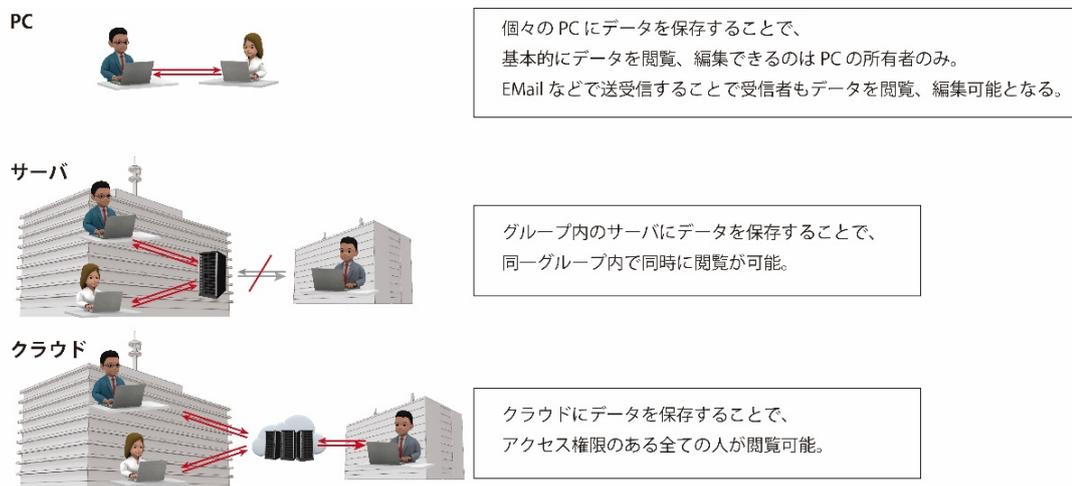


図 4.1.1 PC/サーバ/クラウドの特徴

また、各保存デバイスの概要を表4.1.1に示す。

表 4.1.1 各保存デバイスの概要

	PC	サーバ	クラウド
コスト	◎ ハード費用のみ	○ 高スペックPCのハード費用が主	○ 運用コストが発生する
保存容量	△ 約1TB	○ 約100TB	◎ ほぼ制限無し
拡張性	△ 拡張HDDの購入が必要	△ 新規サーバ構築が必要	◎ 好きなタイミングで拡張可能
マルチユーザ利用	× 基本的に1人のみ	○ 社内の人間がアクセス可能	◎ 関係者全てがアクセス可能
災害対策	△ 故障してデータが消える可能性あり	△ 停電でデータが消える可能性あり	◎ データセンターで管理
セキュリティ	○ ウイルス対策ソフトで対応	○ 社内に専門家がいればよい	◎ データセンターで管理

4.2 コールドストレージについて

保存活用システムに保存される社会インフラ維持管理データの特徴として、大容量・長期保存があげられる。収集したデータは、社会インフラの更新が行われるまで保存が必要である。社会インフラの供

用期間は工業製品と比較して各段に長く（工業製品の寿命が5年程度に対して、社会インフラは30～50年以上）、これらのデータの保存コストは膨大となり課題である。

そのため、解決方法として（1）保存コストを削減、（2）保存データの価値を向上させる の2つの方法がある。（1）の具体的な方法として（1-a）システム費用の削減、（1-b）保存すべきデータの選別による保存量の低減 がある。また、（2）の方法としてデータの販売（提供）を目的としたデータビジネスへの活用がある。本節では（1-a）システム費用の削減方法としてクラウドのサービスであるコールドストレージについて述べる。

図 4.2.1 に各保存装置の応答時間と GB 単価/月の関係図を示す。保存装置（デバイス）として、半導体である DRAM, FLASH メモリ、ハードディスクドライブである HDD, Low-speed-Large Capacity HDD, 外部保存装置としての Optical Disc, Tape が挙げられている。

また、応答時間は、保存装置からデータを読み出すときに最初のデータが送られてくるまでにかかる待ち時間であり、半導体から HDD の場合は、応答時間は秒単位以下であり、コールドストレージと呼ばれる Low-speed-Large Capacity HDD で 10 秒、Optical Disc, Tape で 100 秒以上となる。一方、保存費用（GB 単価）は応答時間に比例し、応答時間が遅いほど安い。

保存活用システムに保存されるモニタリングデータで、計測から長時間を経たデータは使用頻度が少なくなるため、応答時間が遅いコールドストレージに保存することは利用上問題無い。また、コールドストレージに保存されたデータは、分析利用などの目的に応じてシステム内で自動的に HDD に移動することも可能である。

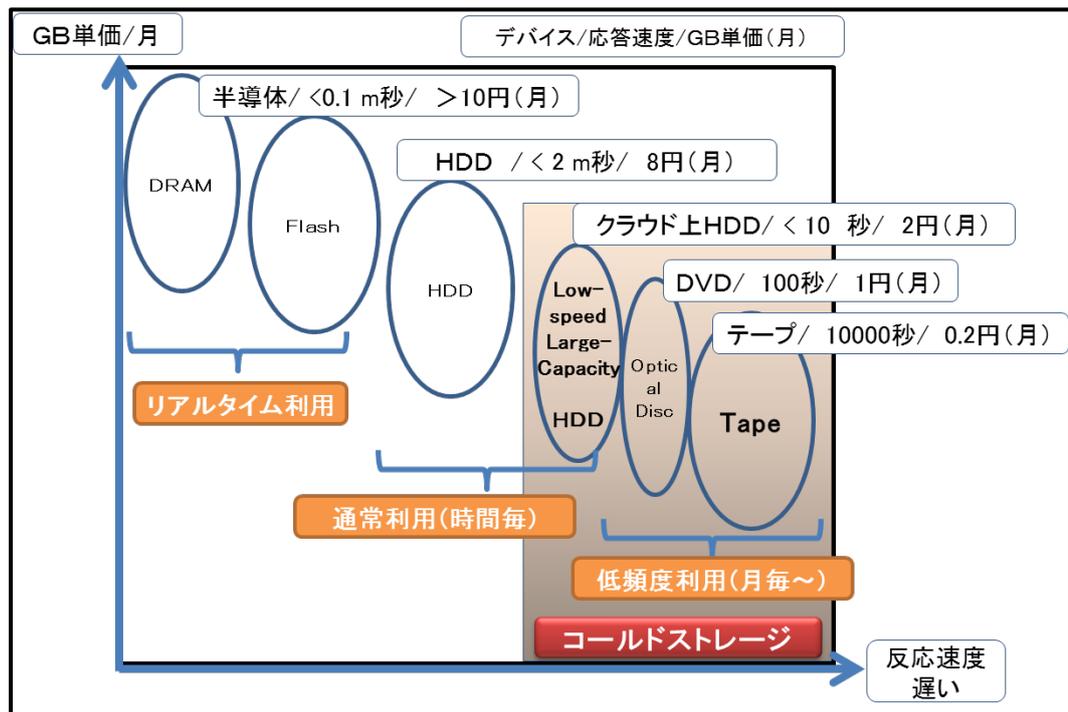


図 4.2.1 : 保存装置の応答時間と GB 単価/月の関係図
 (雑誌 FUJITSU 66 4 (07 2015) の図を元に追記)

5章 データ保存

本章ではデータ保存の方法について述べる。収集されたデータ保存として簡易な方法としては、「ファイル保存」がある。一方、データ検索や更新を容易にするためにはデータベース化することが望ましい。ここでは、フォルダ保存及びデータベースについて紹介する。

5.1 ファイル保存

5.1.1 フォルダ構成

データの保存方法として、図 5.1.1 にフォルダ構成の例を示す。フォルダ構成を決めることにより、第三者でも比較的容易に必要なデータ（ファイル）にアクセスが出来る。ただし、データの検索や更新及び分析を行うには、データベース化が適している。

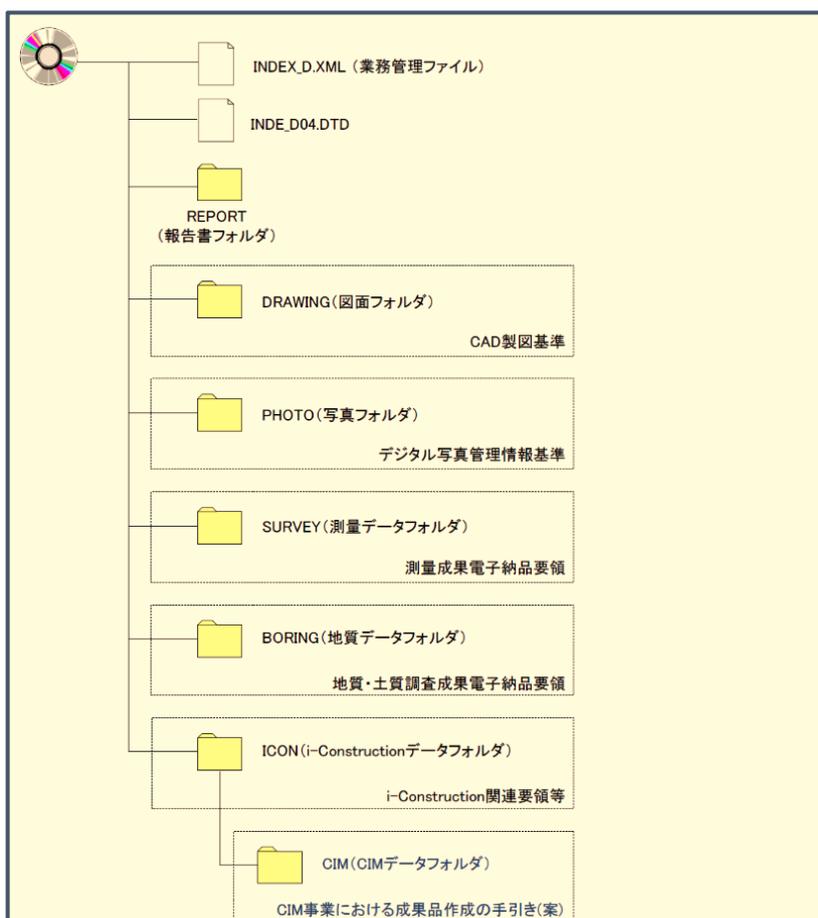


図 5.1.1 フォルダ構成例

(平成 29 年 3 月 国土交通省 CIM 導入ガイドライン (案) 第 1 編 共通編

1.5.2 成果品のフォルダ構成)

5.1.2 オブジェクトストレージ

オブジェクトストレージとはデータ本体にメタデータと ID を付与したものをオブジェクトという単位で保存するストレージ。以下に画像データをイメージしたオブジェクトの一例を示す。

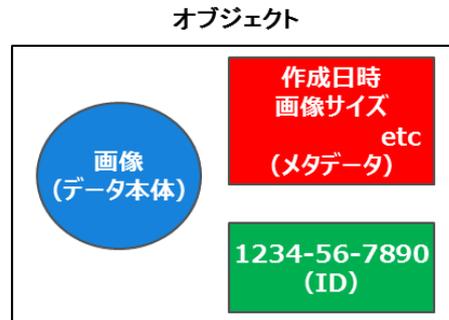


図 5.1.2 オブジェクトの一例

オブジェクトストレージには前述したファイル保存と比較し、大きな違いが 2 点ある。

(1) 格納構造

ファイル保存のようなフォルダによる階層構造はなく、一つの大きなストレージにフラットにオブジェクトを保存する。

(2) 格納方法

オブジェクトの入出力は REST API と呼ばれるコマンドにより操作する。そのため、ID さえ分かれば、格納場所を覚えておく必要がない。

上記差異についてデータを車に、保存場所を駐車場に例えると、以下のイメージとなる。ファイル保存の場合、青い車は「3F の C ブロックに駐車した」ということを自分で覚えておく必要があるが、オブジェクトストレージの場合、係員（コマンドにより動くプログラム）付きの駐車場に保管するため、キー（ID）さえあれば青い車をどこに駐車したかは関係なく取り出せる。

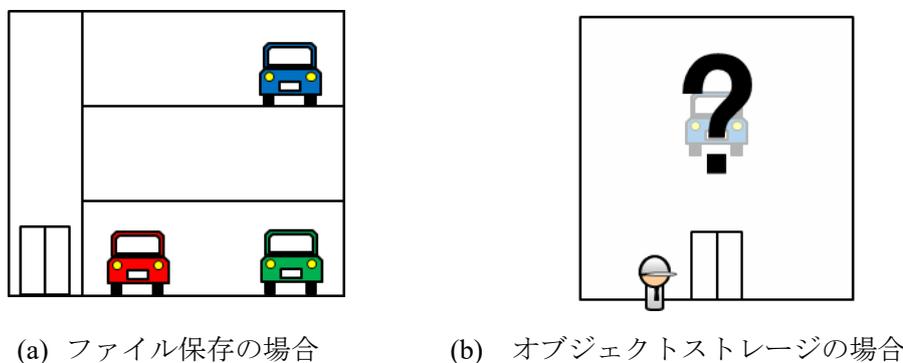


図 5.1.3 ファイル保存とオブジェクトストレージの比較

5.2 データベース

5.2.1 データベースの動向

データベースとはデータの保存・検索・更新など整理された情報の集まりを意味する。これまでもっとも使用されてきたデータベースがリレーショナルデータベース・マネージメント・システム (RDBMS) である。このリレーショナルデータベース (RDBMS) は、「テーブル」といわれる表形式の構造でデータを管理する関係モデルを使ったデータベースであり、データが構造化され項目属性に変化がない場合に有効なデータベースである。

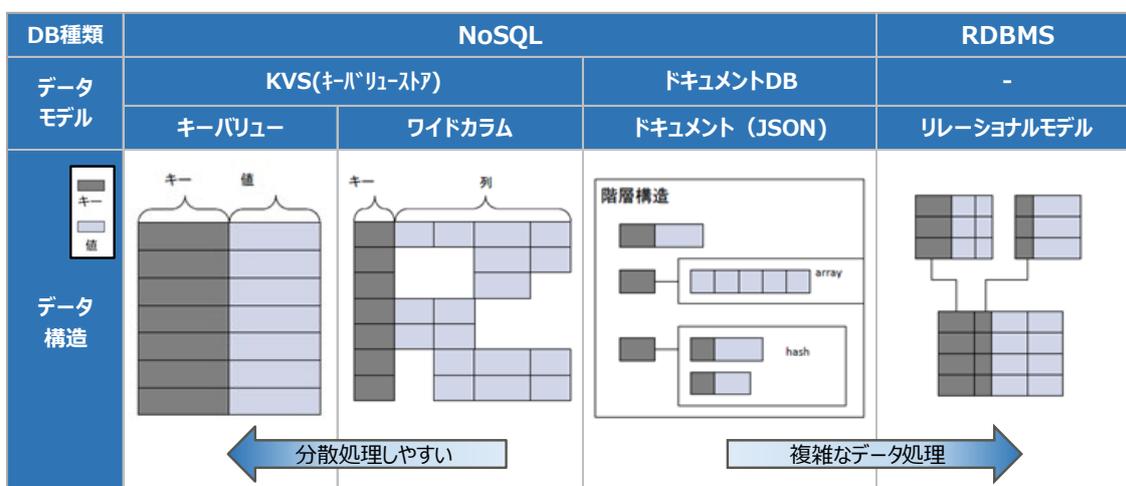
一方、「NoSQL」という近年登場している、RDBMS 以外のデータベースがある。RDBMS の場合、データが「大量」かつ「頻繁」に生まれ、かつ「多様」で「変化」するものである場合、複雑に絡み合うデータの抽出／変換においてスキーマの再定義などが発生して、管理作業やシステム運用にも影響を及ぼすことがある。このような状況を打開するために、NoSQL というデータベースが必要とされるようになってきている。以下に「データベースの特性」(表 5.2.1) と「NoSQL と RDBMS のデータ構造」(表 5.2.2) を示す。

表 5.2.1 データベースの特性

	RDBMS	NoSQL
データ定義	データ形式を事前に理解しておく必要があるが、データ同士の関連性を保持できる	データ型の定義が必要ないため、当初意図していたものと異なる型のデータを扱うこともできる
メリット	<ul style="list-style-type: none"> SQLを使用し複雑な検索ができる トランザクションの仕組みあり 	<ul style="list-style-type: none"> シンプルなデータ構造で自由に拡張できる
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> データ構造をあらかじめ定義しているため拡張にはコストがかかる 	<ul style="list-style-type: none"> SQLが使用できないので、条件検索などが苦手 堅牢なトランザクションは未サポート
データベースモデル	<ul style="list-style-type: none"> データを表で表現 データ間の連携を外部キーで表現 関連に方向はない 厳格なスキーマ定義が事前に必要 	<ul style="list-style-type: none"> データをノードで表現 データ間の連携をリレーションモデルで表現 関連に方向を持つ 事前のスキーマ定義は必要なし

データ特性（形式・規模）の課題を吸収し、データ目的に最適なデータベースシステムを選定する必要がある。

表 5.2.2 NoSQL と RDBMS のデータ構造



各 NoSQL の製品情報 (表 5.2.3) 及び特徴 (表 5.2.4) を以下にまとめる。

表 5.2.3 各 NoSQL の製品情報

種別名	OSS	商用版・商用製品	クラウドサービス
キーバリュー型 (分散KVS型)	<ul style="list-style-type: none"> Redis Memcached Riak 	<ul style="list-style-type: none"> Oracle Coherence Oracle NoSQL Database Enterprise Edition Pivotal GemFire 	<ul style="list-style-type: none"> Amazon ElastiCache (Redis または Memcached) Microsoft Azure Redis Cache
ワイドカラム型 (列指向型)	<ul style="list-style-type: none"> Cassandra Hbase 	<ul style="list-style-type: none"> DataStax Enterprise (Cassandraの商用版) 	<ul style="list-style-type: none"> Google Cloud Bigtable
ドキュメント型	<ul style="list-style-type: none"> MongoDB Couchbase CouchDB RavenDB 	<ul style="list-style-type: none"> MongoDB Enterprise Edition MarkLogic 	<ul style="list-style-type: none"> Amazon DynamoDB Microsoft Azure DocumentDB IBM Cloudant

表 5.2.4 各 NoSQL の特徴

キーバリュー型	
内容	<ul style="list-style-type: none"> キーに対してバリュー（値）をもつ構造 高速なパフォーマンスとデータ分散が行えるために拡張性に優れている データの読み込みがRDBと比較して高速である。
カラム型	
内容	<ul style="list-style-type: none"> データはRDBと同様にレコード(行)で管理され、アクセスはキーバリューと同じようにキーを使用して列単位に処理される。 非定型の大規模データを格納することを主な目的としており、行ごとに任意の名前のカラム(列)を無数に格納でき、RDBより柔軟性とパフォーマンス、拡張性で優れており、データの書き込みが高速である。
ドキュメント型	
内容	<ul style="list-style-type: none"> キーに対してバリューではなく、JSONやXMLのスキーマレスでデータ構造が柔軟な、より複雑なドキュメントとしてデータを格納 複雑なデータ構造を扱うアプリケーションにおいては、生産性が高く柔軟に開発できる。

5.2.2 データ管理方法

センサデータや画像データの管理方法として、データベースに保存してデータの関連性を分析し各業務に有益な情報として活用することは極めて重要なことである。しかし、現在のさまざまなセンサデータ間では、同じ意味の項目であってもセンサデータごとに表現方法が異なることがあり、単純に関連付けが出来ないことがあり、データクレンジングにより「全角と半角対応」「区切り文字対応」「空白」「誤り対応」などの調整作業が必要になる。

データ活用には各データ連携の課題は解決しなければならないが、まずデータ保存の観点では以下のようなデータ保存モデルが考えられる。

- ① ファイル保存
- ② RDBMS 保存
- ③ RDBMS+ファイル保存
- ④ NoSQL 保存
- ⑤ NoSQL+RDBMS (+ファイル保存)

各データ保存モデルの特性を以下の表 5.2.5 に示す。

表 5.2.5 データ保存モデルの特徴

データ保存モデル	内容	活用	時系列データ	大容量データ	導入難易度
①ファイル保存	センサーデータでも画像データでもフォルダ構成を整理して保存	保存しているだけであり、活用するためには、インデックス化とアプリケーション整備が必要	フォルダ名やファイル名で区別	◎	低
②RDBMS保存	センサーデータ間の関連性を設計、データクレンジングして、構造化データとして保存。画像データの保存は不向き。	RDBMSの標準SQLで抽出・加工が可能	年月日の時間項目で時系列処理可能	△	中
③RDBMS + ファイル保存	②の保存、および構造化できていないセンサーデータと画像データはファイルで保存。	アプリケーション整備によりRDBMSとファイルデータの活用が可能	SQL結果とファイルデータをアプリケーションで結合	○	中
④NoSQL保存	センサーデータでも画像データでも保存可能。	メディアファイルに属性を埋め込み、データ関連性の定義により、NoSQL機能で参照可能	可能であるが不向き	◎	中高
⑤NoSQL + RDBMS (+ファイル保存)	データにより、特性を生かせる媒体に保存	各データを活用するAPIの整備が必要	API整備により可能	◎	高

5.3 インフラモニタリングデータの保存に関する先進的取り組み

本章では、インフラモニタリングデータや分析に必要な関連データ（橋梁諸元・点検・運用・CIM・外部オープンデータ等）の保存方法、適切なデータベース等に関する最新の知見を整理してきた。最後に、これら最新の ICT 技術がモニタリングデータの保存活用に本当に適用可能かを確認するための概念検証（PoC：Proof of Concept）の結果を報告する。PoC は一般的にシステムの「効果・効用」、「技術的実現性」、「具体性」を確認する目的で行うものであり、実システムの構築には至らないことをあらかじめお断りしておきたい。ただし、具体性を検証するものであるため、PoC の対象は、これまでに記載してきた（分析はこの後の 6 章に記載している）具体的な情報をパーツとして繋げたものとした。表 5.3.1 には、ガイドラインで記載してきた内容と、PoC の前提条件との関連性を取りまとめた。検証のシナリオ、検証用サンプルデータとメタデータ定義、検証用データベース、検証の前提とした分析手法については、本ガイドラインの中で記載したものを忠実に用いた。

概念検証で想定したモニタリングシステムの活用シナリオを表 5.3.2 に示す。モニタリングデータの保存活用目的を監視（モニタリング拠点）と維持管理・分析（保存活用拠点）に大別し、橋梁規模や用いているデータの種類、可視化や分析手法、分析結果の利用方法別に 7 つのシナリオを想定した。それぞれに適切と思われるデータ保存方法を仮定し、技術的実現性を検証すべき活用シナリオとして、以下の 3 シナリオを抽出した。

(1) シナリオ 2, 3

単一橋梁（もしくは複数の可能性もあり）の大量複数センサデータを NoSQLDB に保存し、時系列の異常検知分析に用いるケース。大量のセンサデータの登録・保存・取り出しが容易に可能かどうか、センサ仕様の変更や廃止、追加等が頻繁に行われた際に、データの継続性を担保しながら同様な操作が可能かどうかを検証する。

(2) シナリオ 4

主として単一橋梁の監視を目的に、センサデータと関連データを同一システム上で可視化するケース。センサデータと画像データに加え、関連データとしては橋梁の 3D（構造）データと点検調査情報を例として取り上げた。RDB, NoSQL, ファイル保存といった複数のデータ保存形式を併存させた状態でデータ連携 API によりこれらを統合し、ビューワによりこれらを連動した形で可視化するシステムの技術的実現性を検証する。

(3) シナリオ 7

膨大な数の複数橋梁を対象として、膨大な数のセンサデータと多様な関連データ（橋梁諸元・点検調査・運用情報・CIM 設計施工情報・外部オープンデータ）の中の、分析に必要な情報項目（インスタンス）を関連情報と共に同一の NoSQLDB に蓄積し、橋梁劣化予測・点検優先度予測分析に用いるケース。外部オープンデータは事前に対象が把握可能である場合以外に、将来的には機械学習（AI）的な分析の可能性を鑑み、関連する外部データを自動取得するケースも想定。

このうち、シナリオ 4 の検証結果を 5.3.1 に、またシナリオ 2,3 とシナリオ 7 はデータの処理としては連続した流れになることから、これらの検証結果を 5.3.2 に取りまとめる。

図 5.3.1～図 5.3.2 は、本章で提案したデータ管理方法、データベース、データ分析方法の一覧を再掲し、今回の PoC で取り上げた手法や検討対象としたデータベースを示した。

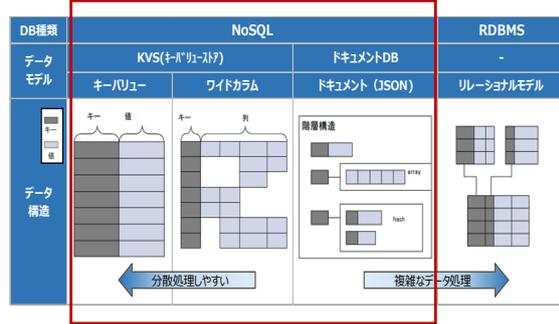
表 5.3.1 ガイドラインの記載内容と PoC の前提条件との関係

記載箇所	記載内容	概念検証への利用
1.3 土木分野におけるモニタリングデータの保存・活用に関する現状認識	モニタリングデータの保存・活用に関する関連指針・学会提言・最新の研究事例・土木技術者の期待等の現状を整理	検証シナリオの仮説策定
2. 保存活用プラットフォームに保存されるデータの選定及びデータ形式、属性情報の与え方	RAIMSの実証実験の中で、実橋梁で実際に取得したモニタリングデータの種類とデータ量を整理。さらにデータモデリングの考え方や標準化に関する土木学会・総務省・経産省等各機関の取り組みの現状を整理	検証用サンプルデータの種類とデータ形式の仮説策定
5. データ保存	モニタリングデータの保存に適するデータ保存方法、データベース、データ管理方法に関する最新のICT情報を整理。ビッグデータ特性を有するセンサデータの現実的なデータベースとして、従来のRDBと異なるNoSQL系データベースを含めた幾つかのデータ管理方法を提案	検証用DBおよびシステムの仮説策定
6. 分析事例の紹介	取得したモニタリングデータの利活用方法の実例を示す目的で、実橋梁の諸元・点検・運用データや床版疲労破壊実験データ、実橋梁計測データ等を用い、点検優先度予測・インバリエント分析・トポロジカルデータ解析・構造同定解析による損傷評価手法の4種類の分析事例を蓄積	モニタリングデータの分析シナリオに関する仮説策定

表 5.3.2 PoC で想定した活用シナリオと前提条件

活用シナリオ	保存・活用の目的	橋梁の数	データの種類	可視化、分析手法	結果の活用方法	データ保存モデル	ICT技術の課題
1	監視 (モニタリング拠点)	単一橋梁	単独センサデータ	時系列表示による監視	閾値超過時にアラーム	ファイル保存、RDB	—
2			5.3.2 複数センサデータ	6.3.2 インバリエント分析	異常検出 (閾値なし)	NoSQL (大量)	データの登録・保存・取出しの容易性、センサ変更時のデータ継続性の担保 (5.3.2で報告)
3			6.3.3 トポロジカルデータ解析				
4			3Dデータ-センサデータ-点検調査連携 5.3.1	5.3.1 3Dデータ-センサデータ-点検調査連携による橋梁監視	可視化 (ビューフ)	NoSQL+RDBMS+ファイル保存	技術的適用性と具体性の概念検証 (5.3.1で報告)
5	維持管理・分析 (保存活用拠点)	複数橋梁	複数センサデータ	6.3.4 構造同定解析による劣化損傷評価	材料特性の変化から劣化状況を判断 (橋梁エンジニア)	RDB (非リアルタイム保存)	—
6			橋梁諸元、点検、運用データ	6.3.1 点検優先度予測解析 (数理最適化)		RDB、NoSQL (大量)	— (データ統合・クレンジング)
7			5.3.2 6に加え、複数センサデータと外部オープンデータの自動追加	5.3.2 劣化予測・点検優先度予測 (ビッグデータ) 分析	橋梁の健全度 (劣化) と影響度の予測。モニタリングデータの閾値設定。	全データ (分析に必要なすべてのインスタンス) をNoSQL保存	データの登録・保存・取出し (共通キー) の容易性、センサ変更時のデータ継続性の担保、センサ・諸元・点検・外部データ連携と分析データ取出しの容易性の概念検証 (5.3.2で報告)

データ保存モデル	内容	活用	時系列データ	大容量データ	導入難易度
1.ファイル保存	センサーデータでも画像データでもフォルダ構成を整理して保存	保存しているだけで、活用するためには、インデックス化とアプリケーション整備が必要	フォルダ名やファイル名で区別	◎	低
2.RDBMS保存	センサーデータ間の関連性を設計、データクレンジングして、構造化データとして保存。画像データの保存は不向き。	RDBMSの標準SQLで抽出・加工が可能	年月日の時間項目で時系列処理可能	△	中
3.RDBMS +ファイル保存	②の保存、および構造化できていないセンサーデータと画像データはファイルで保存。	アプリケーション整備によりRDBMSとファイルデータの活用が可能	SQL結果とファイルデータをアプリケーションで結合	○	中
4.NoSQL保存	センサーデータでも画像データでも保存可能。	メタファイルに属性を埋め込み、データ関連性の定義により、NoSQL機能で参照可能	可能であるが不向き	◎	中高
5.NoSQL +RDBMS (+ファイル保存)	データにより、特性を生かせる媒体に保存	各データを活用するAPIの整備が必要	API整備により可能	◎	高



5.3.2

図 5.3.1 PoC で取り上げたデータ管理法とデータベース

区分	分析の目的	目的変数 (従属変数)	手法		
			量的	質的	質/量混合*
統計的傾向分析	値を把握	なし	・表可視化(個々の値を把握)、・統計量算出(代表値を把握)		
	データ分布を把握		・散布図、・ヒストグラム(度数分布を把握)		
地理的傾向分析	空間分布を把握		・路線傾向把握(路線上の分布を把握)、・地図可視化(地理的分布を把握)		
時間的傾向分析	時間変遷を把握		・時間傾向把握(時間変遷を把握)		
ルール抽出 (探索的 データ分析)	データの相関/ 共起を調べる	なし	・相関図 ・相関係数 ・因子分析	・クロス集計 ・アソシエーション分析 ・ベイジアンネットワーク	・統合多重相関分析
	データの相違を 調べる (仮説検証)		・t検定(対応の無い2変数) ・F検定(2変数) ・分散分析(3変数以上)	・カイ二乗検定(2変数間/ 3変数以上)	
	データ削減(縮退/ 要約)		・主成分分析(PCA)		
	類似性評価/クラスタ リング		・クラスター分析 ・数量化IV類	・数量化III類	
推定 (多変量解析/ 機械学習)	量の推定 (回帰)	量的	・重回帰分析	・数量化I類	・統合重回帰分析
	質的推定 (判別/識別)	質的	・判別分析 ・決定木分析 ・SVM	・数量化II類 ・アソシエーション分析	・損傷予測寄与分析 ・bias補正混合判別予測

5.3.1

5.3.2

図 5.3.2 PoC で取り上げた分析手法

東京大学大学院情報学環「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座(2018)「社会連携講座の活動成果の概要 2014～2017」P7, (URL:<http://advanced-infra.org/archives/1353>) の表の一部を加工

5.3.1 NoSQL+RDBMS (+ファイル保存)【3D データ-センサデータ-点検調書連携】

図 1.2.1 に示す保存活用プラットフォームは、表 5.3.2 のシナリオ 1~7 すべてのデータの保存活用を実現するプラットフォームである。また、本プラットフォームに適したデータ保存モデルは、5.2.2 で述べたデータ保存モデルのうち、センサデータや画像データ、点検調書データの特徴を生かし、且つ今後円滑にデータ活用するためには 5 つ目の NoSQL+RDBMS (+ファイル保存) のデータ保存モデルが適切であると考えられる。図 5.3.3 にシステム構成図の一例を示す。また、それぞれのデータ特性を簡潔に以下に示す。

(1) 画像データ

橋梁の 3D モデルのデータ。橋梁全体の母数が決まっているため、今後爆発的に増大することはない。

(2) 画像データ

基本的に今後永続的に保存する必要のある大容量データ。非圧縮データ（生データ）と圧縮データ（軽量化データ）のように用途に応じて複数パターンでの保存が考えられる。

(3) 点検調書データ

基本的に今後永続的に保存する必要のあるデータ。

(4) センサデータ

サンプリング間隔によるが、基本的に大容量となる時系列データ。

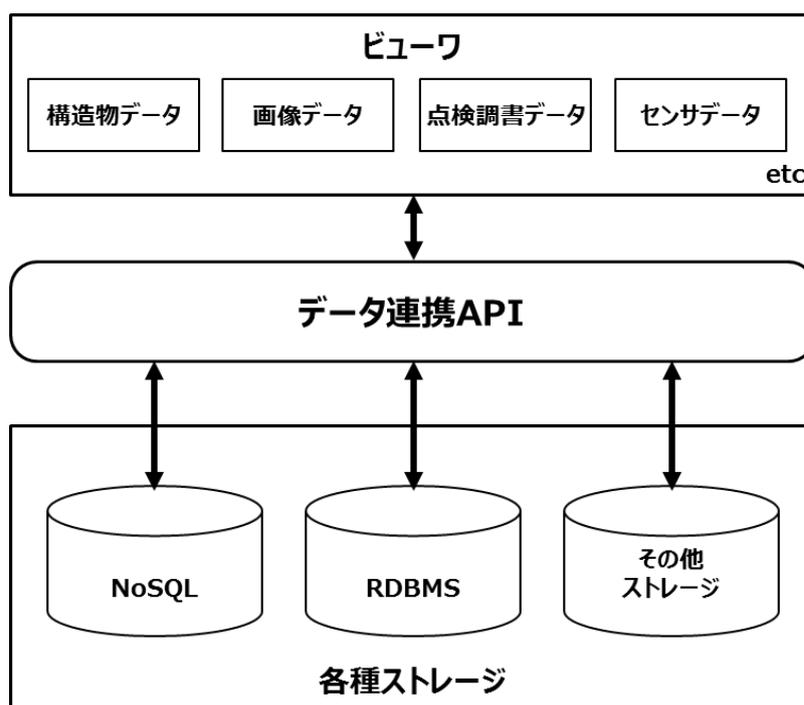


図 5.3.3 システム構成図の一例

1) 取り組み事例の目的（性能評価）

本項では、**図 5.3.3** のシステムの性能評価を行った。本結果はある限定条件下での取り組みではあるが、実橋梁でのモニタリングデータを使った取り組み事例である。

2.1 および**表 2.1.1** 保存するデータの選定の関係と、本取り組み事例の結果参考に、実際の保存活用プラットフォームのシステム設計への素材として役立つことを目指して行った。

評価すべき性能の中で、特に円滑なデータ活用には目的のデータに迅速にアクセスできることが重要である。そのため、本システムの性能の定量的評価の把握を目的とし、一例としてセンサデータの格納処理性能および抽出処理性能を測定した。

また、さらに本取り組み事例の結果と、2.1 および**表 2.1.1** 保存するデータの選定を考慮し、保存活用プラットフォームのシステム設計への素材として役立つことを目的としている。

2) 性能評価の実験条件

上記のデータ特性により、それぞれのデータを以下ストレージに保存した。

NoSQL : センサデータ

RDBMS : 構造物データ（橋梁の 3D モデル）

オブジェクトストレージ：画像データ，点検調書データ，センサデータ

図 5.3.3 で示した構成をクラウド上に構築することで関係者が適宜アクセスできる環境を整えた。また、センサデータ（加速センサのデータ）は利用頻度が高いと思われる現在から 3 ヶ月前までの新しいデータを NoSQL に保存し、利用頻度が低いと思われる 3 ヶ月前より古いデータをオブジェクトストレージに保存することでシステム性能と保存コストの最適化を試みた。

円滑なデータ活用には目的のデータに迅速にアクセスできることが重要である。そのため、今後の性能向上を目的とし、一例としてセンサデータの格納処理性能および抽出処理性能を測定した。以下条件で測定した結果を参考値として示す。

① 前提条件

- ・センサデータ約 106 GB（csv データ形式）がすでにクラウド上に保存されていること
 - ※センサデータ約 106 GB：サンプリング周期 0.01 秒の加速度センサ 1 つの 248 日分データに相当

② 測定環境

- ・ OS : Microsoft Windows Server 2012 Standard R2(x64)
- ・ メモリ : 16 GB
- ・ HDD 容量 : 9360 GB（システム領域含む）
- ・ CPU : Intel Xeon E3-12xx(Sandy Bridge)（4 コア）
- ・ 測定範囲 : **図 5.3.4** 中 測定範囲①～測定範囲③

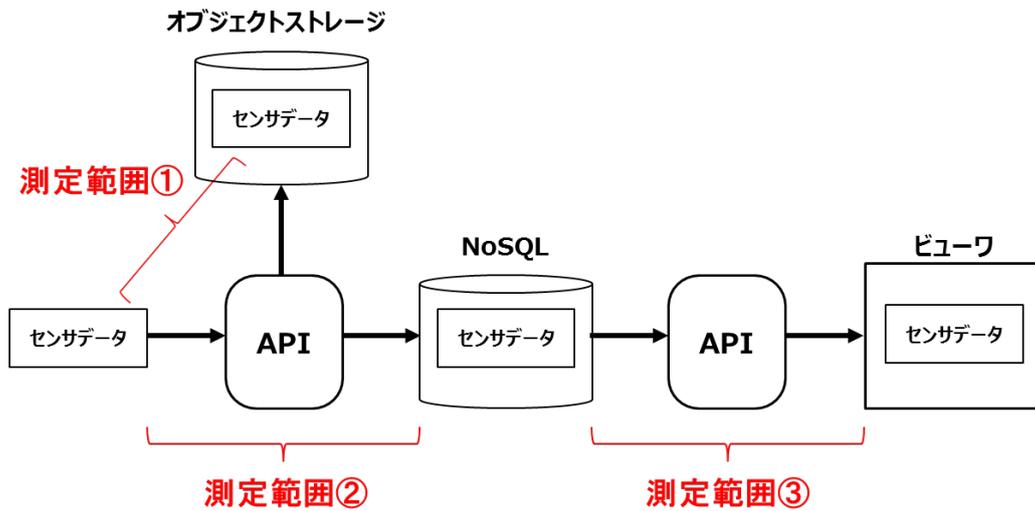


図 5.3.4 センサデータ抽出処理性能の測定範囲

③ 測定内容

- ・測定範囲①（オブジェクトストレージへの格納処理性能測定）
csv データ形式のセンサデータ約 106GB をオブジェクトストレージに格納する時間を測定する。
- ・測定範囲②（NoSQL への格納処理性能測定）
csv データ形式のセンサデータを NoSQL に格納するための変換時間（データ正規化時間）と格納時間（DB 書き込み時間）を測定する。まず 1 日分を格納し、続いて 1 日分、10 日分、236 日分を格納し、最終的に 248 日分を格納する時間を測定する。また、CPU 使用数を変更して同様の格納時間を測定する。
- ・測定範囲③（NoSQL からの抽出処理性能測定）
NoSQL に格納されたセンサデータ約 106GB においてコマンド入力による画面表示と可視化ツールによる画面表示のそれぞれにかかる時間を測定する。

④ 測定結果

- ・測定範囲①（オブジェクトストレージへの格納処理性能測定）：約 3.4 時間
- ・測定範囲②（NoSQL への格納処理性能測定）

表 5.3.3 センサデータ容量毎の格納処理時間測定結果(CPU 使用数：1)

	データ容量		
	428MB(1日分)	4.22GB(10日分)	101GB(236日分)
変換時間	3.8分	38.2分	15.1時間
格納時間	8.4分	77分	25.5時間
合計時間	12.2分	115.2分	40.6時間

表 5.3.4 CPU 使用数毎の格納処理合計時間測定結果

CPU使用数	データ容量		
	428MB(1日分)	4.22GB(10日分)	101GB(236日分)
1	12.2分	115.2分	40.6時間
3	4.2分	38.8分	15.2時間
4	3.7分	33.3分	13.9時間

- ・測定範囲③ (NoSQL からの抽出処理性能測定)

表 5.3.5 各抽出条件における抽出処理時間測定結果

抽出条件		データ容量
内容	レコード数	106GB(248日分)
248日分抽出	2,140,410,169	—
12日分抽出	103,568,234	—
1時間分抽出	359,700	4.6分
248日分抽出 (6時間間隔)	993	12分
12日分抽出 (15分間隔)	1153	37.7秒
1日分抽出 (15分間隔)	97	4.7秒

上記結果より、オブジェクトストレージへの格納時間は約 3.4 時間であった。すでにクラウド上にデータがある場合、大容量データのコスト削減を夜間バッチで実施すると、1 日あたり約 200GB をオブジェクトストレージに移行できる計算となる。

格納処理時間において、表 5.3.3 よりデータ容量の増大にほぼ比例して変換時間、格納時間が増大することが分かる。また、表 5.3.4 より CPU 使用数を増加すると、格納処理を並列して実施できるため格納処理合計時間を短縮できる。ただし、今回の測定環境では CPU 使用数を 4 つにしても CPU 使用数 3 つの場合と大差ない結果となっている。この結果より、CPU 使用数には CPU 性能を活かすための最適数が存在することが分かる。

抽出処理時間において、表 5.3.5 よりコマンド入力と可視化ツールによる表示時間の差はほぼないことが分かる。サンプリング周期 0.01 秒の加速度センサデータを 248 日分グラフ表示させるために 1 日間隔でプロットする場合、12.5 分かかる結果となった。6 時間間隔で表示させる場合との差異がほぼないことからグラフ表示させる時間よりも 248 日分のデータを検索するための時間が支配的であることが推察される。また 12 日分のデータを抽出する場合には 15 分間隔でプロットしても

0.7 分という結果となり、推察が裏付けられる（データ容量が 1/20 となることから 12.5 分×1/20=0.625 分という計算結果とほぼ一致する）。今回利用したデータはサンプリング周期 0.01 秒の加速度データであったが、表示速度を向上させるためにはサンプリング周期をより長くすることやデータのある期間で平均して、平均値のみを保存するなどの方法がある。

今後の課題としては抽出処理性能のみならず、格納処理性能の向上も必要である。今回の測定では事前に NoSQL にデータを保存したが、クラウド上の NoSQL に今回利用したデータを格納するためには約 20 時間を要した。248 日分のデータを一度に保存するのではなく、1 日、あるいは 1 時間単位毎にクラウド上に保存していくことでリアルタイム性の向上は可能であるが、システムとして通信方式、データフォーマット最適化などの技術面での改良にも検討が必要である。



図 5.3.5 可視化ツールによるセンサーデータグラフの一例

5.3.2 NoSQL 保存【劣化予測・点検優先度予測（ビッグデータ）分析の概念検証】

活用シナリオ 2, 3 では、単一橋梁（もしくは複数の可能性もあり）の大量複数センサの時系列データを NoSQLDB に保存し、異常検知分析に用いることを想定した。データ量は膨大となり、また複数センサの種類やセンサメカを事前に統一することは不可能（様々な種類、データ形式のセンサデータを受け入れざるを得ない）と想定した。さらに、センサは技術開発に伴い仕様変更や精度向上等が行われ、これに伴う計器の属性の追加変更、センサの盛替えや廃止、置き換え等が頻繁に発生することを想定しておく必要がある。これらセンサデータの性質はいわゆるビッグデータの 3 特性（大量性、多様性、多頻度性）に相当するものであり、複雑に絡み合うデータの抽出／変換においてスキーマの再定義などが都度発生する RDBMS の場合、データ管理作業やシステム運用に多大な労力と開発コストを要することが予想される。既出の表 5.2.1~表 5.2.4 では、このような前提の下で、大量のセンサデータの登録・保存・取り出しを容易に行い、センサ仕様の変更や廃止、追加等が頻繁に行われた際にも、データの継続性を担保しながら同様な操作が可能となる（都度アプリケーションの開発が要らない）データ保存方法として、データ構造がシンプルで拡張性に優れた NoSQLDB を紹介した。本項ではまず、その技術的実現性を検証する。

さらにシナリオ 7 では、膨大な数の複数橋梁が対象となり、センサデータの量や多様性、多頻度性はさらに増していく。これに加えて、橋梁劣化予測・点検優先度予測分析に用いる多様な関連データ（橋梁諸元・点検調書・運用情報・CIM 設計施工情報・外部オープンデータ等）がこれに付加される。情報の可視化ではなく、統計分析がデータ活用の目的となるため、この場合、5.3.1 のような異なる DB 格納、連携 API による結合とビュー出力では対応できず、統計分析に用いる定性的、定量的情報（テキスト、数値情報の別に関わらず）を同列のインスタンスとして同一 DB（NoSQLDB）内に保存しておく必要がある。外部オープンデータは気象・地震・交通量・凍結防止剤散布量・塩害マップ・アル骨マップなど多種多様なものが想定され、現時点で一意に確定することは難しい。さらに、将来的に「何が劣化要因になっているのか分からない」状態の中で、試行錯誤的に外部情報を取り込み、劣化予測結果の最適化を図る AI 的な分析が登場することも想定される。このような場合に備えて、データの登録・保存・取り出しの技術的実現性や開発容易性の検証を行うのが後半部である。

(1) PoC（概念検証）の実施手順

1) サンプルデータの作成

RAIMS で取得した橋梁センサデータの形式を参照して模擬サンプルデータ（50 万件）を作成した。総務省 IoT 推進フォーラムの最新動向を基に、分析を可能とするための必須メタ情報を組み込んだ。また、センサの盛替え・属性情報の変更・廃止・追加等を追跡できるよう、幾つかの変更履歴を想定したセンササンプルデータを準備した。分析用の関連データに関しては、橋梁諸元・点検情報と CIM の設計・施工情報（想定）、外部オープンデータとして国土交通省の交通センサデータ、気象庁地震データをインターネットからダウンロードし、データ処理に必要な部分のみを抽出加工してサンプルを作成した。これらのデータ例を図 5.3.6、図 5.3.7 にまとめて示す。

総務省インフラTF標準化を
想定したデータモデリング

No	センサー別I/F定義				備考
	項目(M001)	項目(M002)	項目(M003)	項目(M004)	
1	bridge_id	bridge_id	bridge_id	bridge_id	センサー共通項目
2	parts_id	parts_id	parts_id	parts_id	センサー共通項目
3	keiki_id	keiki_id	keiki_id	keiki_id	センサー共通項目
4	create_date	create_date	create_date	create_date	センサー共通項目
5	dataA	dataA	dataA	dataA	
6	dataB		dataB		
7	dataC				
8		dataD		dataD	
9		dataE		dataE	
10		dataF			
11				dataH	
12				dataI	
13			dataW		

センサーデータ属性の変更、
センサの廃止・追加を想定

図 5.3.6 センサーデータのモデリングと必須メタ、変更・改廃履歴

【橋梁諸元・点検データ】

bridge_name	prefecture	city	rosen	北緯(度分秒)	東経(度分秒)	点検記録	架設年次	橋長m	最大支間長m	適用基準	耐震補強	橋梁ID
旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	II	1973	49	24	1	3	K001
富士見橋/新富士見橋	北海道	猿払村/虻田郡倶知安町/宗谷郡猿払町	国道238号線	42.53.57/45.16.44	140.46.22/142.13.32	I	1965	140	35	1	6	K002

【交通センサデータ】

路線番号	天候	8時台	9時台	自動車 交通量 12時間	自転車 交通量 24時間
国道232号線	晴れ	22	26	300	499
国道232号線	晴れ	146	114	1434	
国道232号線	晴れ	93	85	993	1167
国道232号線	晴れ	54	52	464	591

【気象庁地震データ】

地震の発生日時	震源地名	緯度	経度	深さ	M	最大震度
2019/02/08	宗谷海峡	45°59.7'N	143°05.4'E	354km	M4.8	1
2019/02/08	鹿児島湾	31°23.0'N	130°37.1'E	9km	M2.4	1
2019/02/08	福島県沖	37°23.9'N	141°30.9'E	29km	M4.3	2

【CIM設計施工データ】

橋梁ID	部位	部位ID	設計基準強度	鉄筋径	設計指針	施工条件	施工日	施工時気温	TIFfilePath
K001	床版	B01	100N	D30	1980道路橋示方書	パイプクーリング	2000/8/9	35.8	AAA/aaa/K001.tif

図 5.3.7 関連データサンプル例

2) NoSQLDB への登録・格納・データ抽出アプリケーションの実装

サンプルアプリケーションを実装し、ドキュメント型 NoSQLDB (MongoDB) およびキーバリュ型 NoSQLDB (KVSDDB) に格納 (マッピング) した上で、1)のサンプルデータの登録、保存および分析用データの抽出を行った。ワイドカラム型の NoSQLDB は RDB と同様データ構造の変更に伴い都度カラムのスキーマ定義をし直す必要があるため、机上検討の段階で実装対象から外した。キーバリュ型の KVSDDB は最もシンプルな NoSQLDB であるため複数データの統合出力のような複雑な処理を単体で行うことができないが、対象データが膨大になった場合の処理速度性能や分散処理の容易性という将来的な優位性を勘案し、実装を行った。ただし、KVSDDB 上で複雑な処理を行うために、特殊なデータモデリングと処理 API (CDS : <http://maeda-cds.com/> 前田建設) を併用している。本 NoSQLDB については、シナリオ 7 で触れる。

図 5.3.8 に PoC の流れを、図の右半分には実装上行った具体的なシナリオ（表 5.3.2 の想定シナリオとは異なり、データ処理の流れを確認する目的のためにかなり単純化）を示している。

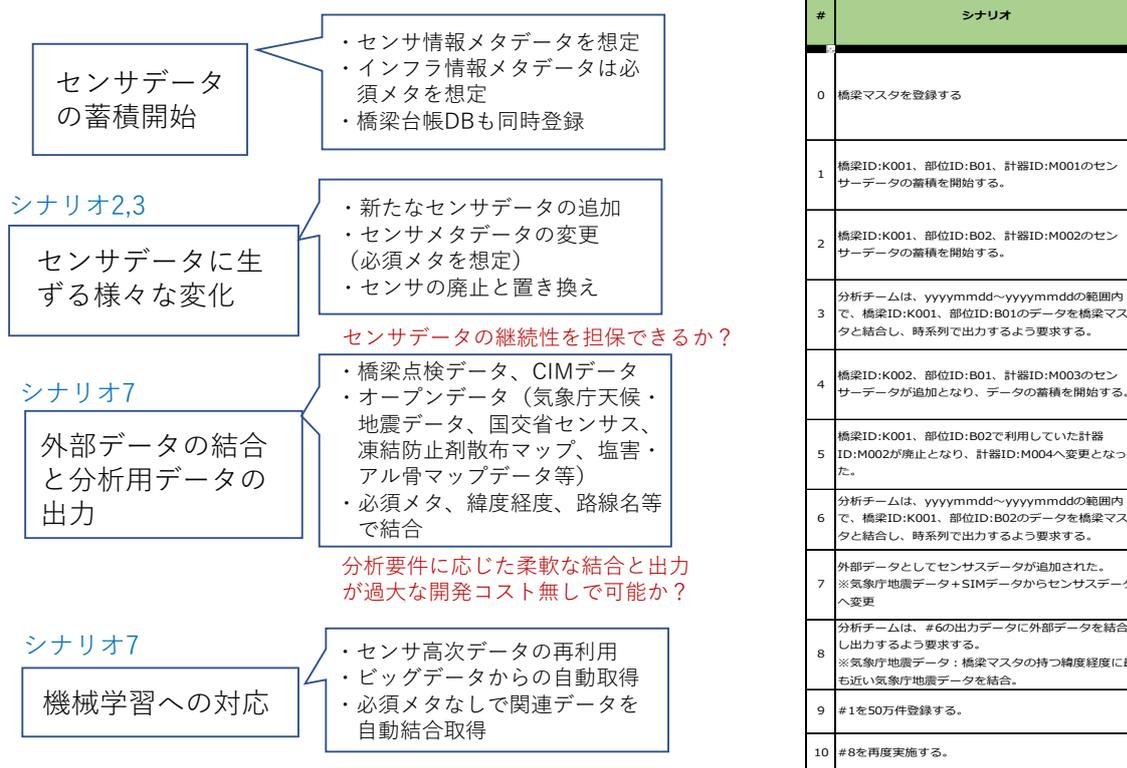


図 5.3.8 PoC 実装におけるデータ処理および出力手順

(2) センサデータの登録・保存・取り出しの実証結果

ドキュメント型 NoSQLDB (MongoDB) を用いてセンサデータと橋梁台帳情報を統合出力した結果の一例を図 5.3.9 に示す。センサデータおよび橋梁諸元データの登録および結合取り出しは、MongoDB に準備されている現行の機能を使用することで容易に実装された。センサデータ単独では分析結果の解釈が困難と考え、最初から橋梁諸元情報を紐づけたが、橋梁 ID、部位 ID、センサ ID、取得時刻 (Create Date) の必須メタ情報(総務省スマート IoT 推進フォーラムの方向性)をメタデータに埋め込むことで、データの統合出力も容易に実装された。図中の下には併せて出力したセンサデバイス情報 (センサおよびメーカ依存) を示している。登録時にセンサ ID をキーとして同一 MongoDB 内に保存しておき、出力時に紐づけて出力すれば、容易に分析時のセンサデータの解釈を行うことが可能となる。図 5.3.10 は、同一橋梁でのセンサの廃止・盛替えに伴うデータ継承の確認結果を、図 5.3.11 には複数橋梁からの複数センサデータの出力結果を示している。センサ属性情報の違いや統廃合、データ欠損等があっても、図のようにデータの継続性を確保した上でデータの統合と出力を容易に行うことが可能であった。

必須メタ			センサデータ					橋梁諸元データ									
bridgId (橋梁ID)	partId (部位ID)	keikId (センサメタID)	createDate (取得時刻)	dataA	dataB	dataC	橋梁名	県名	市区町村名	路線名	北緯<度分秒>	東経<度分秒>	点検記録	架設年次	橋長m	適用基準	耐震補強
K001	B01	M001	2018/7/27 0:00	1.001	5.555	25.234	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1970	実施済
K001	B01	M001	2018/7/27 1:00	1.002	5.556	26.234	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1970	実施済

keikId (センサメタID)	製造会社ID	機器Ser.ID	製造会社URL	計測開始Date	装置内部時刻	計測トリガ	バッテリー電圧	地震トリガ	精度	計測条件	コールドストレージID	dataA(校正係数)	dataB(校正係数)	dataC(校正係数)
M001	KY116654	KYD-1000987	https://www.sensortec.co.jp/	2016/1/2 11:45	# 0:00:001	1min.	100V	75gal	±0.2%	温度 < 80%	YRAIMS YKDYK001 YB01	変位 -0.987m / μ	加速度 0.122gal / μ	回転角 3.451rad / μ

図 5.3.9 センサデータ、橋梁諸元情報、センサデバイス情報の統合出力事例

partsId (部位ID)	keikId (センサID)	createDate (計測日時)	dataA	dataD	dataE	dataH	dataI	dataF	橋梁名	県名	市区町村名	路線名	北緯<度分秒>	東経<度分秒>	点検記録	架設年次	橋長m	適用基準	耐震補強
B02	M002	2018/7/28	100.001	a00000001	1.226	null	null	3.33331	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済
B02	M002	2018/7/28	100.002	a00000002	2.678	null	null	3.33341	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済
B02	M004	2018/8/3	0.124	ABC	2.542	ZZZ	xxx	null	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済
B02	M004	2018/8/3	0.555	CDS	45.556	QQQ	Axx	null	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済

keikId (センサメタID)	製造会社ID	機器Ser.ID	製造会社URL	計測開始Date	装置内部時刻	計測トリガ	バッテリー電圧	地震トリガ	精度	計測条件	コールドストレージID	dataD(校正係数)	dataE(校正係数)	dataH(校正係数)	dataI(校正係数)	計器改廃履歴
M004	KY117880	KYD-1100987	https://www.sensortec.co.jp/	2018/1/2 11:45	# 0:00:004	100min.	100V	50gal	±0.2%	温度 < 80%	YRAIMS YKDYK001 YB02	ひずみ / μ	加速度 0.324gal / μ	画素数 ビット	抵抗値 _ohm / μ	2018/1/2MOO2廃止 MOO4変更

図 5.3.10 センサデータの廃止変更に伴うデータ継承の確認事例

bridgId (橋梁ID)	partId (部位ID)	keikId (センサメタID)	createDate (取得時刻)	dataA	dataB	dataC	dataD	dataE	dataF	dataW	橋梁名	県名	市区町村名	路線名	北緯<度分秒>	東経<度分秒>	点検記録	架設年次	橋長m	適用基準	耐震補強
K001	B01	M001	2018/7/27 0:00	1.001	5.555	25.234	null	null	null	null	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1970	実施済
K001	B01	M001	2018/7/27 1:00	1.002	5.556	26.234	null	null	null	null	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1970	実施済
K001	B02	M002	2018/7/27 2:00	1.003	null	null	a00001	1.226	3.333	null	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1970	実施済
K001	B02	M002	2018/7/27 3:00	1.004	null	null	a00002	2.678	3.333	null	旭橋	北海道	遠別町/天塩郡遠別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1970	実施済
K002	B01	M003	1900/1/0 0:00	1.225	4.667	null	null	null	1243.7	1357.8	富士見橋/新富士見橋	北海道	猿払村/虻田郡倶知安町/宗谷郡猿払町	国道238号線	42.53.57/45.16.44	140.46.22/142.13.32	I	1965	140	道示1960	-
K002	B01	M003	1900/1/1 0:00	1.234	2.659	null	null	null	1357.8	1357.8	富士見橋/新富士見橋	北海道	猿払村/虻田郡倶知安町/宗谷郡猿払町	国道238号線	42.53.57/45.16.44	140.46.22/142.13.32	I	1965	140	道示1960	-

図 5.3.11 複数橋梁、複数センサデータの統合出力事例

(3) センサ以外の関連情報との統合・取り出しの実証結果

図 5.3.12 は、既出の廃止統合後のセンサデータに、センサスの交通量データ（オープンデータ）を統合した結果を示す（MongoDB）。外部データには必ずしも必須メタは含まれていないが、この

場合は橋梁諸元情報に含まれる路線名でセンサ交通情報を紐づけ、統合的に出力している。このようにテキスト情報の中に一致する(完全一致もしくは部分一致)インスタンスが含まれていれば、現状の機能により比較的容易にデータの統合出力が可能となることを確認した。ただし、例えば路線名が完全一致ではなく「国道 232 号」「K232」のように表記揺れがある場合、同義語の辞書を作製するなどアプリケーション側の工夫が必要となる(元データの段階でクレンジングを施す方法もある)。これ以外にも、気象庁地震データは緯度経度情報を用い、橋梁の緯度経度位置と震央位置が最も近い地震データをアプリケーションにより探索して結合出力できることを確認している(出力例は省略)。

(4) 近未来に想定されるビッグデータ分析への対応

近未来的には、膨大な数の複数橋梁から取得される膨大な量のセンサデータを対象としたビッグデータ解析が行われることが予想される。センサデータについては、生データ(一次データ)のみならず、異常検知のような時系列解析で得られたセンサの特徴量、いわゆる高次データが再帰的に NoSQLDB に格納され、有効な数値情報として統計解析に再利用される可能性もある(6章に示す鉄道バラストの分析事例参照)。これに加えて、橋梁劣化予測・点検優先度予測分析に用いる外部関連データもさらに多様化し、オープンデータをリアルタイムに取得、統合するようになると、そのデータ量もまた、膨大になる。この場合、大規模データの分散処理が容易なキーバリュー(KVS)型の NoSQL を別途準備しておくことが得策ではないかと思われる。

キーバリュー型の KVSDB(okuyama)を用いて図 5.3.12 と同様の交通量センサデータとの統合出力を行った。CDS の既存 API を用いてシンプルな KVSDB の上でデータを操作することにより、これも容易に実現可能であった。図 5.3.13 は、これに加えて気象庁地震データ、CIM 設計施工情報、凍結防止剤情報、塩害・アル骨マップ情報などを再帰的に付加していった場合の出力イメージを示している。実装の関係上、データ処理が論理的・実装上可能であることを確認し、一部結果を想定して作製している(なお、このように外部データを特定したうえでの統合であれば、MongoDB でもアプリケーションにより対応可能である)。これが際限なく連続する(あるいは、取得するオープンデータを事前に指定せず、結合可能な外部データを自動的に取得する)場合、CDS 独自のデータ処理 API(展開・抽出・集約)を用いて、統合可能な全てのキーでインスタンス情報(定量、定性)を自動結合することが可能である。MongoDB の場合、事前に指定しない情報との結合は原理的に不可能であり、分析側が能動的に外部データを特定し、都度アプリ開発を行うことが必須となる。ただし問題もある。CDS の API では同値関係にあるキーで結合可能なものを全て自動結合してしまうため、不要なキー結合が発生する可能性がある。結合対象のデータによっては、出力後のデータクレンジング(不要な結合の排除)を別途考慮する必要があり、その処理は分析側に委ねられる。

将来、分析対象が(事前に想定できない)あらゆる種類の外部情報に拡大し、機械学習(AI)的に分析データを統合し、最適化を測るような(例えば、橋梁の劣化程度を最も再現性良く表すようなセンサの閾値と橋梁諸元、運用条件の組み合わせを求めていくなど)分析が行われる場合、このような並列処理に適した KVS 型の NoSQLDB が威力を発揮するかもしれない。

一方、モニタリングの目的はおそらく、最初は橋梁の状態監視、すなわち 5.3.1 で述べたような時系列データの可視化から始まると考えられる。そのシステム構築には相当のコストが発生するた

め、将来的にこのような高度分析の必要性が生じた場合でも、そのシステムをリプレイスすることなく、温存・活用しながらバックヤードで高度分析に対応できるようなデータ処理の仕組みを組み込んでおくことで、システムの追加開発コストを大きく抑えることが可能となろう。図 5.3.14 は、そのような状況を想定し、5.3.1 のシステムを活かしつつ、MongoDB に格納されたデータを適宜コンバートおよびバックアップしておいた KVSDB (5.3.2 で記載) を後付けで準備し、多様な外部関連データの増加爆発に対応するイメージを表している。情報爆発が生じてからシステムの検討を行っているのは遅きに失することになりかねない。インフラモニタリングデータが蓄積され始めたら、出来るだけ早期から、このようなシステムの検証を並行して進めることが、将来のシステム構築コスト (ライフサイクルコスト) 低減の観点から重要ではなからうか。

センサス交通量データ

bridgeId (橋梁 ID)	partId (部位 ID)	keikId (センサ ID)	createDate (計測日時)	dataA	dataD	dataE	dataH	dataI	dataF	橋梁名	県名	市区町村名	路線名	北緯<度分秒>	東経<度分秒>	点検記録	架設年次	橋長m	通用基準	耐震補強	路線番号	天候	8時台	9時台	自動車類交通量昼間12時間	自動車類交通量24時間
K001	B02	M002	2018/7/29	100.019	a0000019	1.224	null	null	3.33511	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	22	26	300	499
K001	B02	M004	2018/7/29	100.019	a0000019	2.678	null	null	3.33511	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	146	114	1434	
K001	B02	M004	2018/8/3	0.124	ABC	2.542	ZZZ	xxx	null	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	93	85	993	1167
K001	B02	M004	2018/8/3	0.124	ABC	2.542	ZZZ	xxx	null	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	54	52	464	591

図 5.3.12 センサデータ, 諸元データ, センサデータの統合出力事例

路線名で結合

必須メタ	センサデータ (廃止変更履歴継承)	橋梁諸元・点検データ																	
bridgeId (橋梁 ID)	partId (部位 ID)	keikId (センサ ID)	createDate (計測日時)	dataA	dataD	dataE	dataH	dataI	dataF	橋梁名	県名	市区町村名	路線名	北緯<度分秒>	東経<度分秒>	点検記録	架設年次	橋長m	道
K001	B02	M002	2018/7/29	100.019	a0000019	1.224	null	null	3.33511	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道
K001	B02	M004	2018/7/29	100.019	a0000019	2.678	null	null	3.33511	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道
K001	B02	M004	2018/8/3	0.124	ABC	2.542	ZZZ	xxx	null	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道
K001	B02	M004	2018/8/3	0.124	ABC	2.542	ZZZ	xxx	null	旭橋	北海道	通別町/天塩郡通別町	国道232号線	44.39.10	141.47.35	III	1973	49	道

交通量 (センサ) データ 地震 (気象庁) データ CIM設計施工情報 凍結防止剤情報 塩害・アル骨情報

点検記録	架設年次	橋長m	通用基準	耐震補強	路線番号	天候	8時台	9時台	自動車類交通量昼間12時間	自動車類交通量24時間	震央地名	深さ	M	最大震度	部位	設計基準強度	鉄筋種	設計指針	養生条件	施工日	施工時気温	TIF/PP4th (CIM標準7-9種別)	凍結防止剤散布量 (t/年)	塩害指数	アル骨マップ
III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	22	26	300	499	宗谷海峡	354km	M4.8	3	床版	100N/m ²	D30	1978道示方書	パイプクーリング	2000/8/9	35.8	AAA/asa/K001.tif	152	B	該当
III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	146	114	1434		鹿児島県	9km	M2.4	3	床版	100N/m ²	D30	1978道示方書	パイプクーリング	2000/8/9	35.8	AAA/asa/K001.tif	152	B	該当
III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	93	85	993	1167	福島県沖	29km	M4.3	2	床版	100N/m ²	D30	1978道示方書	パイプクーリング	2000/8/9	35.8	AAA/asa/K001.tif	152	B	該当
III	1973	49	道示1978	実施済	国道232号線	晴れ	54	52	464	591	福島県沖	30km	M4.4	2	床版	100N/m ²	D30	1978道示方書	パイプクーリング	2000/8/9	35.8	AAA/asa/K001.tif	152	B	該当

路線名で結合 緯度経度で結合 橋梁ID_部位IDで結合 路線名で結合 緯度経度で結合

図 5.3.13 多様化した関連情報との統合出力事例 (イメージ)

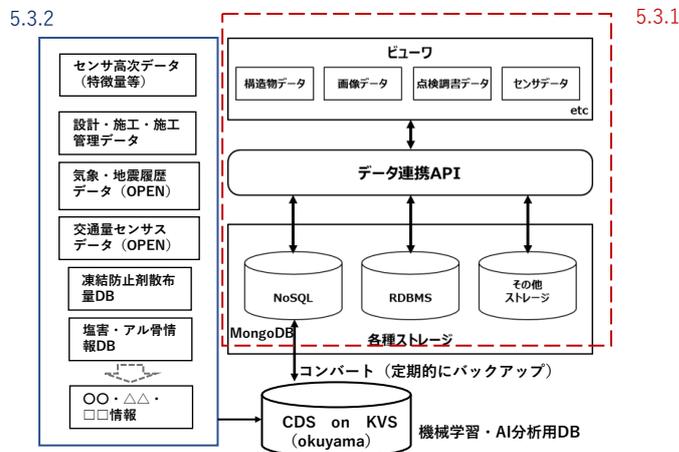


図 5.3.14 外部関連情報の爆発・増加に対するシステム対応のイメージ

6章 分析事例の紹介

1.3 では、土木分野におけるモニタリングデータの保存・活用に関する現状認識を取りまとめた。データ分析に関しては、多種多様な大量モニタリングデータを用いたビッグデータ分析、高度な見える化や将来予測解析等により熟練者のスキルなしで構造物に対する一定の評価を行うこと等への期待が示された。また同時に、モニタリング結果により構造物への何らかのアクションを行う場合の判断基準（閾値）の明確化が課題であるとの認識が示されると共に、将来予測の精度を上げるための実測値のフィードバックシステムや確率論的な手法の適用等、モニタリングデータの利活用に関する今後の期待が示唆された。

本章では、これを受け、土木インフラのモニタリングデータに有用と思われる分析手法の全体像を概観するとともに、インフラ構造物やプラント構造物を対象とした幾つかの既往の適用事例を紹介することで、モニタリングデータ分析のイメージを示したい。

6.1 データ分析手法の概要とモニタリングデータへの適用性

IoT 技術の進展により、業務の運用や意思決定へのデータ利活用の重要性が増大している。一方、社会インフラにおいては、高度経済成長期以降、急ピッチで建設されてきた施設が耐用年数とされる 50 年を越え始め、長寿命化と維持管理コスト低減施策が深刻な課題として認識されており、モニタリングシステム技術を活用した施策に期待が高まっている。6.2、6.3 では、社会インフラ維持管理業務の高度化をめざしたデータ分析手法や適用事例を紹介する。

データ分析には様々な手法が存在するが、どの手法を用いるのがよいかは、モニタリングシステムを業務へどう活用するかの目標設定と分析に必要なデータの整理とあわせて検討する必要がある。例えば、モニタリングデータの傾向を捉えた閾値判断をしたいのか、モニタリング対象をスクリーニングするための要因抽出をしたいのかでは適用する手法も扱うデータの種類も異なってくる。社会インフラ維持管理分野で適用するデータ分析手法についての取組みは各企業や研究機関などでされているが、表 6.1.1 に東京大学大学院情報学環「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座（RIAII）において、分析の目的と扱うデータ種類により、データ分析手法を類型化した一例を示している。

表 6.1.1 データ分析手法の類型化例^{*1}

区分	分析の目的	目的変数 (従属変数)	手法		
			量的	質的	質/量混合*
統計的傾向分析	値を把握	なし	・表可視化(個々の値を把握)・統計量算出(代表値を把握)		
	データ分布を把握		・散布図・ヒストグラム(度数分布を把握)		
地理的傾向分析	空間分布を把握		・路線傾向把握(路線上の分布を把握)・地図可視化(地理的分布を把握)		
時間的傾向分析	時間変遷を把握		・時間傾向把握(時間変遷を把握)		
ルール抽出 (探索的 データ分析)	データの相関/ 共起を調べる	なし	・相関図 ・相関係数 ・因子分析	・クロス集計 ・アソシエーション分析 ・ベイジアンネットワーク	・統合多重相関分析
	データの相違を 調べる (仮説検証)		・t検定(対応の無い2変数) ・F検定(2変数) ・分散分析(3変数以上)	・カイニ乗検定(2変数間/ 3変数以上)	
	データ削減(縮退/ 要約)		・主成分分析(PCA)		
	類似性評価/クラス リング		・クラスター分析 ・数量化Ⅳ類	・数量化Ⅲ類	
推定 (多変量解析/ 機械学習)	量の推定 (回帰)	あり	量的 ・重回帰分析	・数量化Ⅰ類	・統合重回帰分析
	質の推定 (判別/識別)		質的 ・判別分析 ・決定木分析 ・SVM	・数量化Ⅱ類 ・アソシエーション分析	・損傷予測寄与分析 ・bias補正混合判別予測

*1) 東京大学大学院情報学環「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座(2018)「社会連携講座の活動成果の概要 2014～2017」P7, ([URL:http://advanced-infra.org/archives/1353](http://advanced-infra.org/archives/1353))

6.2 土木インフラを対象とした分析事例

6.2.1 他分野での分析事例

橋梁モニタリングデータや点検データを用いた分析手法(表 6.1.1)の適用イメージを示す目的で、他研究機関で実施された2つの分析事例を示す。一つ目は鉄道の道床(バラスト)、二つ目はプラントの事例である。前者は道床の点検データ、変位データ、諸元データを用いて点検優先度の抽出を行っており、橋梁の点検・モニタリング・諸元データをこれらに置き換えて考えていただければと思う。後者はプラントの複数センサデータの相関性の崩れから異常を検知するもので、明確な閾値が存在しない橋梁の劣化(異常)の発生を、膨大なセンサデータの変化から自動的に判別するイメージとなる。

(1) bias 補正混合判別予測手法による鉄道道床の変状判別事例

東京大学大学院情報学環「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座(RIAII)により実施された事例である。bias 補正混合判別予測手法を用いた変状判別モデルを構築することで、突発的、事後的な対応を減らし、鉄道道床のより効率的な補修サイクルの実現を模索している。bias 補正混合判別予測手法は、表 6.1.1 の中では質/量混合の推定(多変量解析/機械学習)に相当する。道床補修実績データ(道床変状)、軌道変位データ(劣化)、設備諸元データ(諸元)を学習用データとし、補修実績データを目的変数とする変状判別モデルを構築する。優先して補修を実施すべき箇所を設定することが可能となり、効率的な補修計画の立案と見逃しの防止がもたらされるとしている。前年度データで構築した判別モデルに当該年度データを適用し、算出された事後確率値を参考に当該

年度の道床補修計画を立案する。データの蓄積により、モデルの汎用性や推定精度のさらなる向上を図ることができるとしている。

□ 検討手順

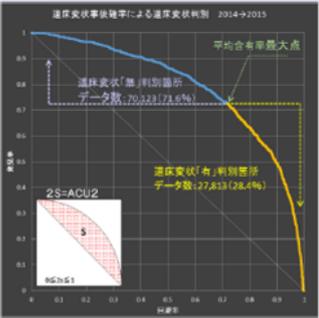
- 軌道変位データ、線路線形等の諸元データ、道床検査データ、道床補修実績データを用いて、対象区間で道床変状が発生している確からしさを算定する道床変状判別モデルを構築する。
- 区間毎の変状発生の確からしさの値より道床変状のリスクを評価することで、道床補修を実施すべき箇所を選定と補修優先順位の付与を行い、効率的な補修計画の策定を支援する。

道床変状判別モデルの構築	道床変状の判別と補修計画	効果の検証
【学習用データ】13km区間,52項目,97945件 ✓ 道床補修実績データ(道床変状) ✓ 軌道変位データ(劣化) ✓ 設備諸元データ(諸元) 【分析手法】 ✓ bias補正混合判別予測 【目的変数、説明変数】 ✓ 補修実績データを目的変数に、軌道変位データ、諸元データを説明変数と、道床変状判別モデルを構築 ✓ 説明変数は自動選択によって16項目に	【判別用データ】13km区間,16項目,97936件 ✓ 軌道変位データ(劣化) ✓ 設備諸元データ(諸元) 【判別予測】Cross validation ✓ 補修対象路線の軌道変位データ、諸元データを用いて、道床発生の判別を実施 ✓ 発見率:72.5%、見逃し率:0.42% 【前年度実績モデルによる今年度補修計画】 ✓ 前年度のデータで構築したモデルに今年度のデータを適用し、その事後確率を参考に当該年度の補修計画を立案	【安定した判別モデル】 ✓ 全データで一定水準の判別予測精度を実現 ✓ 発見率:72.5% ✓ 見逃し率:0.42% 【補修計画の効率化】 ✓ 約13kmの半数にて補修区間の抽出を行った場合、モデル活用の方がランダム抽出と比べ抽出数は約1.5倍に

□ 効果:効率的な補修計画と突発的対応の低減

- 道床変状事後確率値を参考に、優先して補修を実施すべき箇所を設定することが可能となり、効率的な道床補修計画の立案と突発的な道床状態の悪化の抑制(見逃しの防止)に繋がる。
- 前年度のデータで構築した道床変状の道床変状判別モデルに当該年度のデータを適用して道床変状の事後確率値を算出し、その値を参考に当該年度の道床補修計画を立案する。

□ 効果の検証



道床変状事後確率による道床変状判別 2014→2015

平均含有率最大点

道床変状「無」判別器
データ数:70,023(71.6%)

道床変状「有」判別器
データ数:27,813(28.4%)

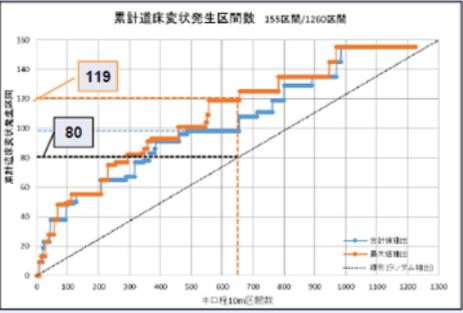
2S=ACU2

5

0.05

モデル構築一判別	発見率	回避率	見逃し率
2011→2012	56.55	83.38	1.05
2012→2013	77.37	77.05	0.37
2013→2014	69.90	74.68	0.49
2014→2015	72.54	72.09	0.42

- ✓ 学習用データと評価用データが独立した交差検定を実施
- ✓ 各年、一定の判別精度を維持



累計道床変状発生区間数 355区間/1260区間

累計道床変状発生区間数

平均1区間/区間数

119

80

ランダム抽出

判別モデル抽出

✓ 今回のデータでは、13kmの半数の区間で道床補修対象箇所を抽出する場合、①ランダム抽出と②判別モデルによる抽出、を比較すると、抽出できる変状箇所数は、②119個所で、①80個所の約1.5倍になる。

図 6.2.1 bias 補正混合判別予測手法による鉄道道床の変状判別モデル例

東京大学大学院情報学環「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座(2018)「社会連携講座の活動成果の概要 2014~2017」P21, (URL:<http://advanced-infra.org/archives/1353>)より

(2) インバリエント分析技術によるプラントの異常予兆検知事例

経済産業省「平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業(自主保安高度化に向けた実証事業) 報告書」の中で示されている事例である。インバリエント分析は表 6.1.1 の中ではルール抽出(探索的データ分析)に該当する分析手法である。センサ間の関係性に着目し、通常の状態から逸脱した関係性をグラフ化し、異常予兆検知と異常箇所を推定する。第一ステップでは

異常のない状態の操業データを用いて通常の状態をモデル化しセンサ間の関係性を数式・数値化する。第二ステップでは作成したモデルとプロセスデータ（異常状態を含む）を比較し、センサ間の関係性の崩れから、通常とは異なる状態（異常の予兆）を異常度としてグラフ化すると共に、異常箇所を推定する。図 6.2.2 の事例では、運転員の検知よりも 1 分前に早期検知する結果となり、また推定された異常箇所の推定結果（センサ）の上位には異常箇所を類推できるセンサ（ヒヤリハット事例と関連性の高いセンサ）が多くランクインし、異常箇所を早期に推定できることが可能となった（赤が故障箇所）とされている

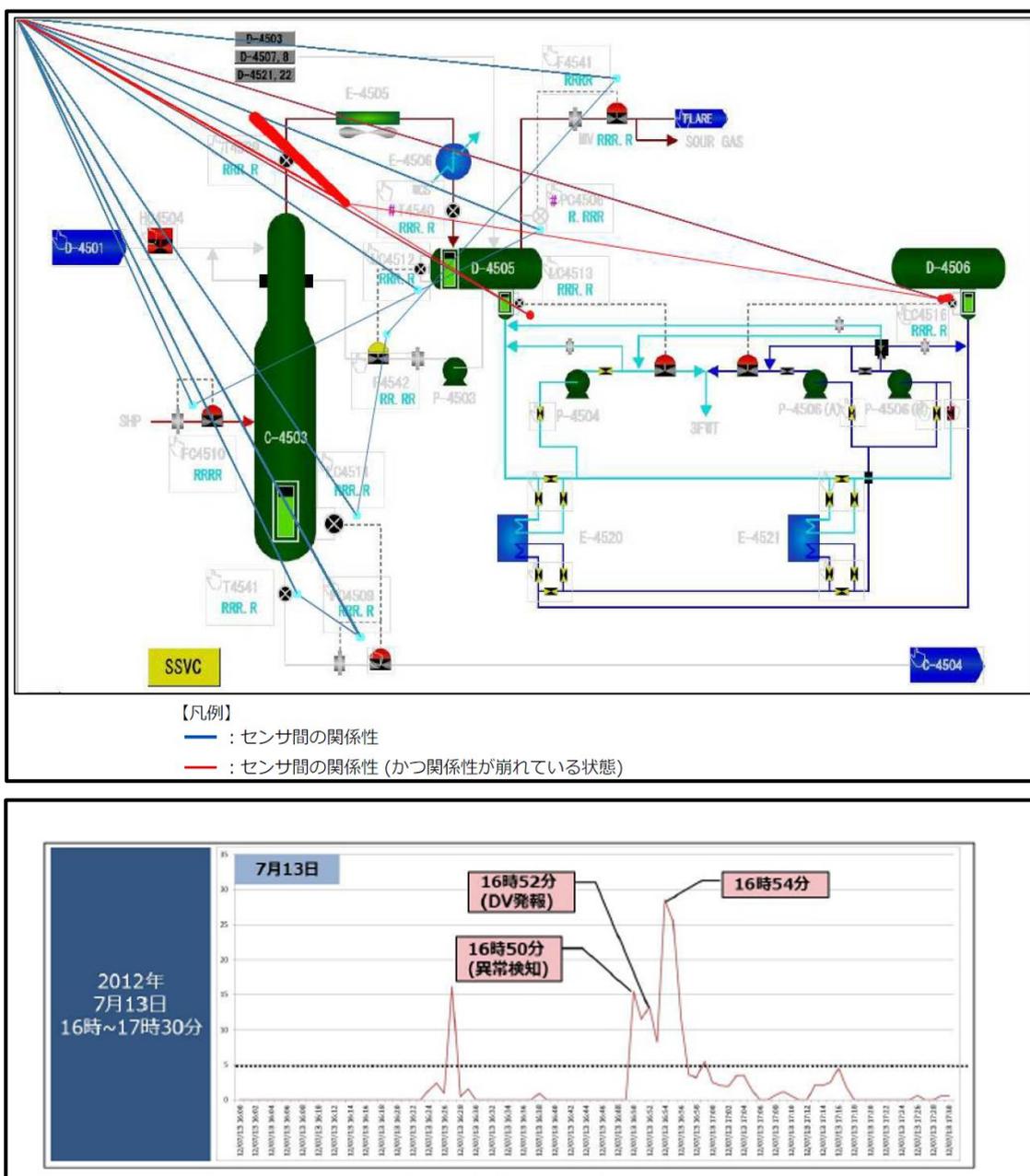


図 6.2.2 インバリエント分析技術によるプラントの異常予兆検知事例
 (経済産業省「平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業
 (自主保安高度化に向けた実証事業) 報告書」より)

6.3 実証事例

6.3.1 点検調書分析

(1) 分析概要

市町村等の橋梁の維持管理では、橋梁毎に健全性「Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ」の診断を行なっている。健全性「Ⅲ」は「道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。」りと定義されているが、限られた予算と人員のなか担当職員が措置に優先順位をつけ対応している。

措置の優先順位は橋梁の劣化状況の他に市町村毎の橋梁の重要性や橋梁の構造等多面的に判断されており、担当職員の経験への依存が大きい業務といえる。また、措置が未実施の橋梁については、未措置の状態でも供用している期間のリスク回避のための経過観察が必要であり、モニタリング技術適用へのニーズがあると想定される。

本実証は、既存の点検調書や諸元・運用データ等「量的値」と「質的値」が混在するデータ項目を用いて統計的手法により機械学習する「点検優先度予測手法」²⁾を適用し、業務担当者が橋梁診断の支援として活用する可能性について実証した。分析に用いた手法は、東京大学大学院情報学環「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座で研究成果が報告され、社会インフラ企業の土木インフラ維持管理分野での分析に実績のある手法である。なお本分析はモニタリング対象を自動的に選定するものではなく、最終的には担当者の判断による対象選定を支援することを前提としている。

具体的には、富山市にご協力頂き、道路橋梁の維持管理部署で健全性「Ⅲ」と診断した橋梁を措置の優先度で3つの区分（Ⅲa～Ⅲc）に判定する業務を対象に、判定結果（Ⅲa～Ⅲc）のデータ項目を「目的変数」、既存の点検結果や諸元情報、橋梁の重要性等のデータ項目を「説明変数」と設定し、統計的手法による機械学習で分析モデルを作成（学習）した。

この分析モデルへ「説明変数」のデータ項目を投入することで「目的変数」である橋梁の健全性「Ⅲ」の区分（Ⅲa～Ⅲc）を機械的に予測した。また、区分（Ⅲa～Ⅲc）の判定に「説明変数」である各データ項目が与えた影響の大きさから、判定結果へ与えた影響の値（絶対値）が最も大きい項目に対する比率を影響度として算出し、各データ項目の影響度を確認した。

本実証での分析を「点検調書分析」とし、概要を図6.3.1に示す。

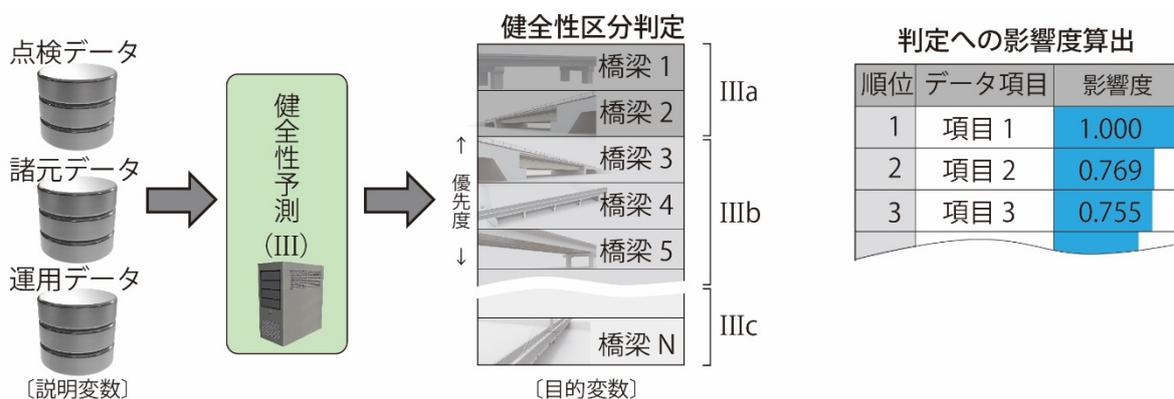


図 6.3.1 点検調書分析の概要

(2) 分析内容

1) 分析手順

本実証の分析手順を図 6.3.2 に示す。

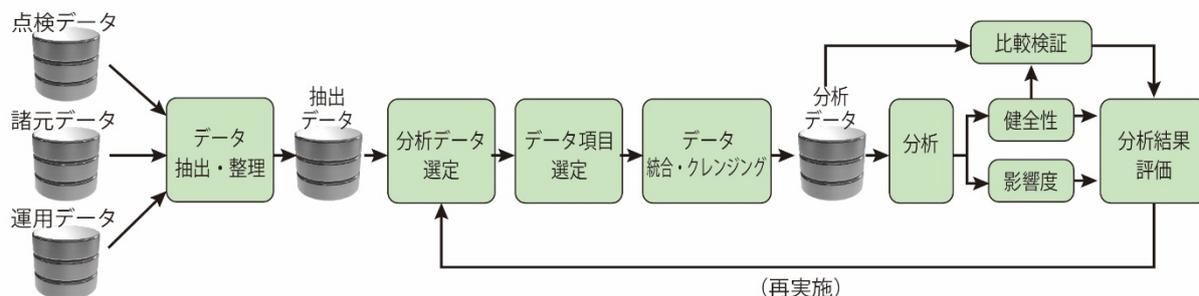


図 6.3.2 分析手順

2) 抽出データ作成

富山市では、富山県の「富山県橋梁点検マニュアル（平成 18 年 6 月策定，平成 27 年 4 月改定）」³⁾により、橋梁ごと 5 年に 1 回を基準とした定期点検を実施し、点検結果等を「富山県橋梁維持管理システム」へ記録し、蓄積・保存していた。本実証では「富山県橋梁維持管理システム」から出力した「点検データ」及び「諸元データ」を使用した。また、「運用データ」として富山市で作成している「橋梁一覧データ」（富山市で橋梁管理に使用）を使用した。

表 6.3.1 抽出データ

内容	点検データ	諸元データ	運用データ
データ元	「富山県橋梁維持管理システム」より出力	「富山県橋梁維持管理システム」より出力	橋梁管理担当者様管理「橋梁一覧データファイル」
ファイル形式	CSV	CSV	Excel
データ項目数	31 項目	35 項目	175 項目
データレコード数	1,569 件	1,498 件	2,393 件
データサイズ	312KB	440KB	4,212KB

3) 分析データ作成

分析データとして、「健全性」が「Ⅲ」と診断された橋梁を「分析データ」として選定し、3つの区分（Ⅲa～Ⅲc）へ診断した結果のデータ項目を「目的変数」、その他のデータ項目を「説明変数」とした。

次にデータ分析の観点から、カンニングにあたるデータ項目や未登録が多いデータ項目、自由記述欄のように内容の精査と仕分けが必要なデータ項目等を分析対象から削除した。

各データ項目で橋梁を一意に特定できる「橋梁コード」をキーとしてデータの統合を行ない、最終的に分析に使用したデータ件数は以下の通りとなった。

- ・データレコード数：112 件（橋梁数（分割した 1 橋含））
- ・データ項目数：101 項目（「目的変数」1 項目含）

4) 分析結果

「健全性」の診断においては、橋長や架設年次、点検による評価点等「量的値」と上部工形式や施工業者、橋梁の重要性等「質的値」から総合的に判断される。そのため「量的値」を「重回帰分析」、「質的値」を「数量化Ⅰ類」と、混在した統計分析手法として「統合重回帰分析」による機械学習で予測を実施した。

今回の分析対象は112橋梁とデータ数が少なく、過年度分が同様のデータ項目で管理されていないため、機械学習で「目的変数」を予測するモデルを作成し、データ項目から「目的変数」を削除した後「説明変数」だけで「目的変数」である「健全性」区分（Ⅲa～Ⅲc）を予測し判定する検証（Closed Validation）とした。また、「目的変数」判定への「影響度」が大きい「説明変数」の順位について分析を行なった。

設定した「健全性」Ⅲの3つの区分（Ⅲa～Ⅲc）に対する正解率は100%(Closed)であった。従って、今回の分析データは健全性を予測するために必要なデータが揃っていると推察される。

今後、多くの検証用データが揃えば、機械学習した分析モデルによる Open での実証も可能となる。

「健全性」の予測に対するデータ項目の「影響度」を算出した。これはデータ項目毎の値の差異が健全性の予測値へ与える影響度合いを算出したもので、最も「影響度」が大きいデータ項目を「1.00」とし、以下、影響の大きさの比率を算出した。「影響度」の上位10項目を表6.3.2に示す。

表 6.3.2 影響度上位データ項目及び「質的値」影響度内訳

順位	データ項目	影響度
1	上部施工業者	1.00
2	下部工 HI	0.91
3	適用示方書 I	0.84
4	支承 HI	0.77
5	支承本体 HI	0.76
6	躯体 HI	0.72
7	橋長	0.57
8	基礎 HI	0.53
9	広域農道	0.52
10	地域	0.37

順位	要因/影響度	影響度内訳
1	上部施工業者	建設 A 社 0.285 建設 B 社 0.183 建設 C 社 0.154 建設 D 社 0.104 建設 E 社 0.085 建設 F 社 0.058 建設 G 社 0.039 建設 H 社 0.0356 建設 I 社 0.0171 (空白) 0.0092 建設 J 社 0.0084 建設 K 社 0.0058 建設 L 社 0.0019
3	適用示方書 I	昭和 48 年指針 0.180 昭和 47 年道示 0.147 昭和 31 年道示 0.107 昭和 53 年道示 0.083 昭和 46 年道示 0.079 昭和 43 年道示 0.075 昭和 14 年道示 0.038 昭和 55 年道示 0.038 昭和 34 年道示 0.033 平成 6 年道示 0.024 (空白) 0.020 大正 15 年細則 0.018 昭和 47 年道示 0.002
9	広域農道	○ 0.497 × 0.018
10	地域	大沢野 0.228 大山 0.036 婦中 0.034 山田 0.029 細入 0.026 八尾 0.020 富山 0.001

また、本分析で使用した環境について以下に示す。本実証で分析に要した機械的な処理時間は機械学習、予測ともに数分であったが、PCの処理能力や扱うデータ量、採用する統計的手法等により分析にかかる処理時間は大きく変化する。ただし、処理結果に差異を生じるものではない。

① 実証 PC 環境

- ・ OS : Microsoft Windows 7 Ultimate (64bit), CPU : Xeon Core X5650 2.66GHz×2, Memory : 48GB

② 統計分析環境

- ・ 「R ver.3.4.3」 : OSS の統計解析向けのプログラミング言語, およびその開発実行環境

(3) 考察

本分析を適用することにより、橋梁の維持管理情報から健全性「Ⅲ」における補修対策実施優先度に相当するⅢa～Ⅲcを予測できた。従って、健全性「Ⅲ」の橋梁に対し、優先的に対策を実施する橋梁、経過観察のためにモニタリングを行なう橋梁の選定に本分析を活用することが出来ると考えられる。

本実証は同一データによる検証(Closed)であったが、今後、点検データや諸元データが継続的に蓄積されることで、過去の分析モデルを活用した当年度診断の予測(Open)への適用実証も可能となり、橋梁維持管理担当者の意思決定業務の見える化、迅速化の支援に寄与することが見込める。また、健全性「Ⅰ～Ⅳ」まで範囲を広げた診断の予測への適用も可能であると考ええる。

予測に与える影響度のデータ項目について、施工品質に関わるデータ項目が上位にランクしていることは分析モデルに対する納得性が高いといえる。「量的値」も納得性のあるデータ項目が上位にランクしており、分析モデル利用への信頼感を与えるものと考ええる。

一方、影響度の高い項目としては、「橋長」や「地域」など地域性にかかわる項目が上位に来ており興味深い傾向がみられた。また、HIが健全性に影響があることは容易に想像出来るが、下部工、支承、上部工等HIで差がでており、今後データ項目間の関連性や深堀りも必要と考えられる。また、施工関連の項目が上位にあがるのは橋梁の種別によるものであるか施工方法によるものであるか等、データ項目がもつ意味を深堀りし分析していくことで、橋梁のモニタリングに有効な知見が得られる可能性があると考ええる。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領，平成 31 年 3 月
- 2) 長谷川隆, et al. : "インフラ保全向け点検優先度予測手法の研究開発と鉄道施設 (道床) メンテナンスデータによる評価." 研究報告 情報システムと社会環境 (IS), vol.2016-IS-138, No.5, pp.1-6, 平成 28 年 12 月
- 3) 富山県土木部道路課：富山県橋梁点検マニュアル，平成 18 年 6 月策定，平成 27 年 4 月改定

6.3.2 インバリエント分析による異常検知

(1) インバリエント分析とは

インバリエント分析技術とは、複雑な設定やドメイン知識がなくとも、複数のセンサから得られる観測データから、平常時のシステムに成り立つ不変関係 (Invariant : インバリエント) を自動的に見つけ、それらの不変関係を関係式としてモデル化し、現在の観測データとモデルからの予想値を比較して「いつもと違う」動きを発見する技術である。具体的には、インバリエント分析技術では監視ポイントの時系列データ間に存在する定常的な不変関係を、網羅的、自動的かつ高速に抽出する。抽出した局所的な関係を積み上げることで、システム全体をモデル化することができる。

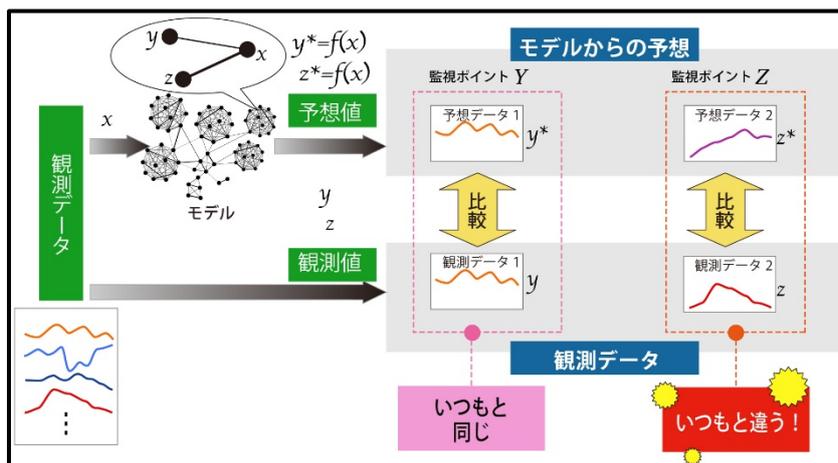


図 6.3.3 インバリエントモデルによる異常検知イメージ¹⁾

図 6.3.3 に示すイメージのように、はじめに、定常状態のシステムから採取した観測データからインバリエントモデルを生成しておくことで、監視対象のシステムから集められた時系列データと関係式から予想値が得られる。関係式から得られた予想値と実際の観測値を比較して同じであれば、インバリエントモデル生成時と現在のシステムの状態が「いつもと同じ」と判断できる。一方、関係式から得られた予想値と実際の観測値を比較して異なる場合は、システムの状態が「いつもと違う」と判断できる。

(2) 分析の目的

分析の目的は以下とし、インフラ構造物へのインバリエント分析技術の適用可能性を確認した。

【目的】

- ・インフラ構造物の不可逆的な状態の変化 (劣化) の進行状況を、センサ間の関係性に着目する事で定量的に把握できることを確認する。

(3) 分析対象データ

分析対象としては、平成 27 年度床版モニタリング実験で得られた連続計測データを使用した。実験は 2018/7/8 14:06~8/31 15:18 に実施された。図 6.3.4 に室内実験の様子を示す。連続計測データのうちリファレンスデータの一覧は表 6.3.3 のとおりである。

供試体 (橋梁床版) の劣化進行は、一般的には不可逆であるとされており、単調に劣化が進行していくと考えられる。そこで、劣化が起きていない状態を学習させるため、連続計測データのうち

初回の動的載荷期間(7/8 14:06~14:59)をインバリエント分析技術の学習期間とし、残り期間をインバリエント分析技術による検証期間とした。

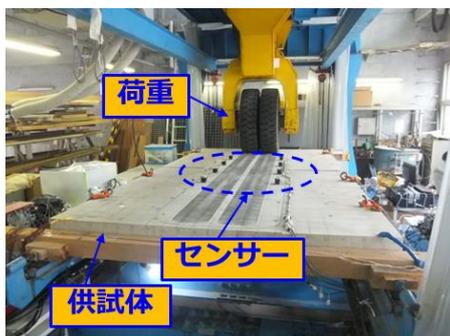


図 6.3.4 室内実験の様子

表 6.3.3 リファレンスデータ一覧

計測センサ (センサ記号)	計測項目
	荷重
	移動水平変位
鉛直変位計 (DV-x)	鉛直変位 (たわみ)
パイ型変位計 (PIL-x, PIU-x)	ひび割れ幅
コンクリート内部歪計 (CMS-x)	コンクリート内部歪
鉄筋歪ゲージ (MRS-x, DRS-x)	鉄筋歪
熱電対 (CT-x)	コンクリート内部温度
	外気温

(4) 作成したインバリエントモデル

学習期間のデータを使って、インバリエント分析技術によりモデル化を行った。生成したモデルの例を図 6.3.5 に示す。各点はセンサを、各線は関係性を、各線の太さは関係性の強さを示す。また関係性の強いセンサの多くに「PIL-x : ひび割れ幅 (下面)」と、「DV-x : 鉛直変位 (たわみ)」が含まれていることが確認できた。

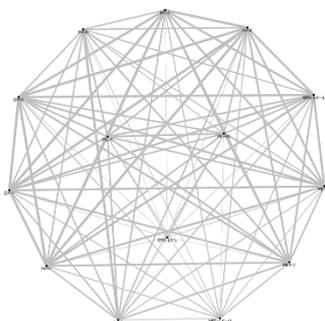


図 6.3.5 インバリエントモデルの例

(5) 分析結果：検知された異常度の変化と損傷程度との比較

作成したモデルにより検証期間のデータを分析した結果の一部(7/8~7/17 分)を図 6.3.6 に示す。分析結果から、損傷程度の進行に従い、異常度が増加していることがわかる。7/8~7/17 の期間において供試体の異常度が増加しており、損傷程度の進行を捉えることができている。また、損傷程度の変化のタイミングで異常度の変化がみられており、損傷程度の状態を定量的に判断できる可能性が示されている。ただし、7/17 以降 (損傷程度 d 以降) では異常度が 90%を超える高い状態が続いていた。これは、モデルを生成した期間と比べ、状態がかけ離れている (十分に乖離している) ことを意味している。なお、異常度が全く変化しない期間(図 6.3.6 において点線で示す)はデータが存在しない (走行試験を行っていない) 期間である。

次に、異常度①における破壊されたインバリエント (関係性) を確認した結果を図 6.3.7 に示す。異常度①では、「DRS-L9-L, PIL-10」間、「DRS-L9-L, DV-4」間などの「DRS-L9-L」との間に作成されたインバリエントに破壊が発生している。これは、「DRS-L9-L : 下側配力筋歪 (下面)」と他

のセンサとの間に作成されたインバリエントが異常度の増加に影響を与えていると考えられる。

その他、異常度②～⑤の箇所においても、それぞれ同様にインバリエントの破壊が発生していることが確認できた。

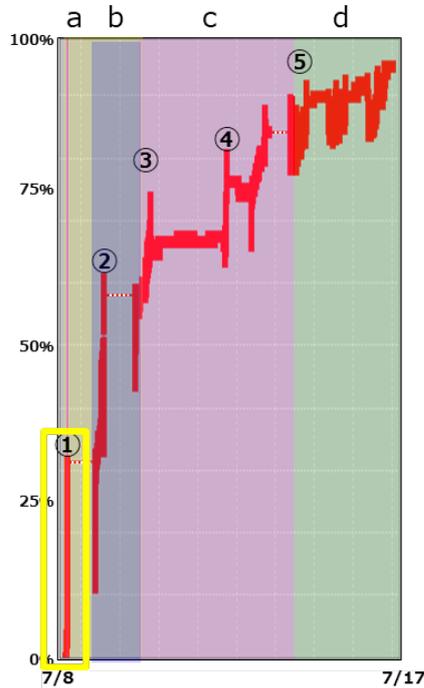


図 6.3.6 分析結果（概要）

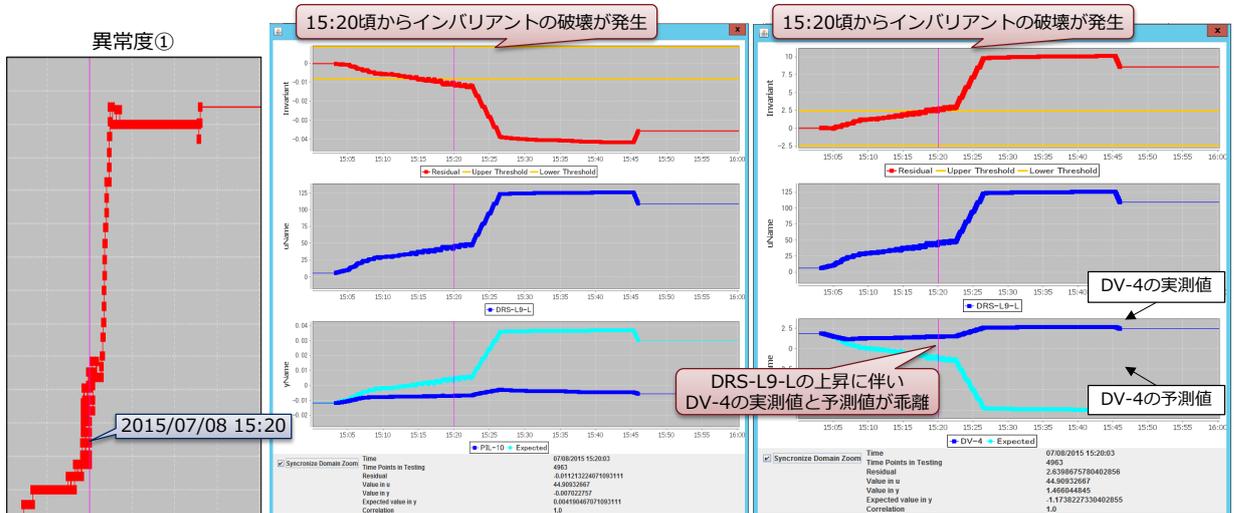


図 6.3.7 異常度①付近の破壊されたインバリエント

(6) モデルリフレッシュによる分析結果

損傷程度 d 以降（異常度⑤以降）では、異常度が高くなりすぎるため、有効な判定ができない。このため、モデルリフレッシュによる追加検証を検討した。損傷程度 d 以降の損傷を捉えるため、図 6.3.8 のとおり、損傷程度 d の開始から約 1 日間を学習データとして使用してモデル化を行い、残り期間を検証期間とした。分析の結果、図 6.3.9 の通り、モデルのリフレッシュを行うことで、

損傷程度 d 以降も異常度の増加を捉えることができ、継続して監視ができることを確認した。

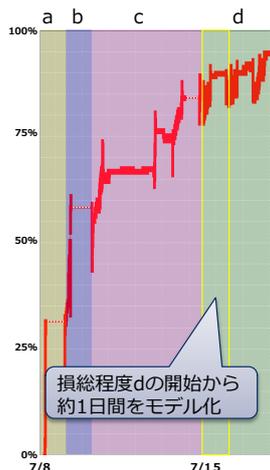


図 6.3.8 モデルリフレッシュのための学習期間

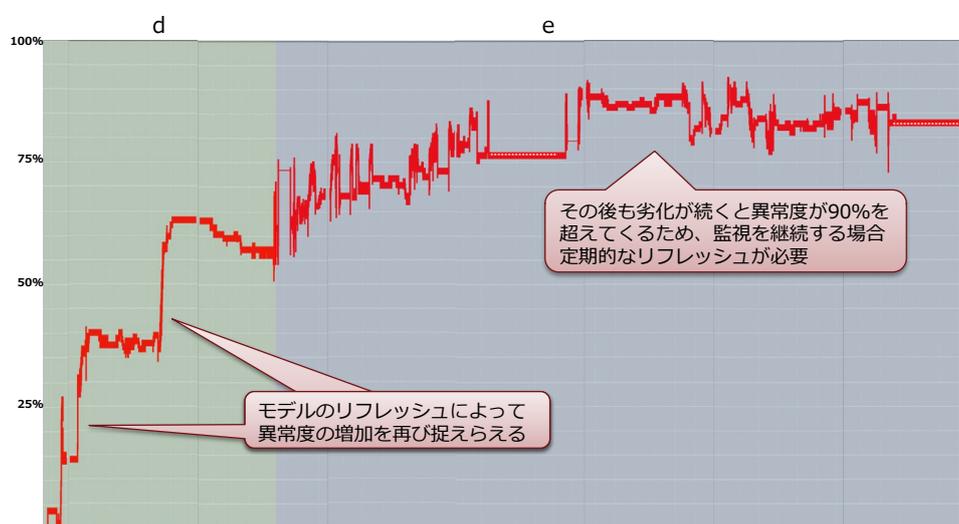


図 6.3.9 リフレッシュしたモデルによる分析結果

(7) 考察

(2) で挙げた分析の目的である「インフラ構造物の不可逆的な状態の変化(劣化)の進行状況を、センサ間の関係性に着目することで定量的に把握できることを確認する。」について、「(5) 分析結果：検知された異常度の変化と損傷程度との比較」に示したとおり、損傷程度の進行に応じるように、インバリエント分析技術が示す異常度が増加することがわかる。よって、インバリエント分析技術を用いてインフラ構造物の劣化を検知できる可能性があるといえる。

参考文献

- 1) 棗田 昌尚, 落合勝博, 朝倉敬喜, 林司: インバリエント分析技術の大規模物理システムへの適用—原子力発電所の監視への適用を例に一, 情報処理学会デジタルプラクティス Vol.6 No.3, July. 2015
<<http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/column/14/548422/082900096/>>

6.3.3 トポロジカルデータ解析による実証実験事例

本項では、トポロジカルデータ解析 (Topological Data Analysis 以後 TDA と略す) を用いた橋梁モニタリングデータの分析手法とその適用事例を紹介する。TDA は、統計的な手法では解析が困難なデータを位相幾何学により「形」として捉えることができる技術として注目され始めている。

(1) 分析手法

分析対象は加速度センサによるモニタリングデータである。手法の概要を図 6.3.10 に示す¹⁾。本手法は、加速度センサデータから橋梁床版の「振動パターン」がどのように変化していくかを分析することによって損傷度合いを評価するものである。分析の前処理として、モニタリングデータを適当な期間 (分析対象の橋梁規模、通過車両の速度に応じて設定する) の振動パターンデータとして切り分けておく。

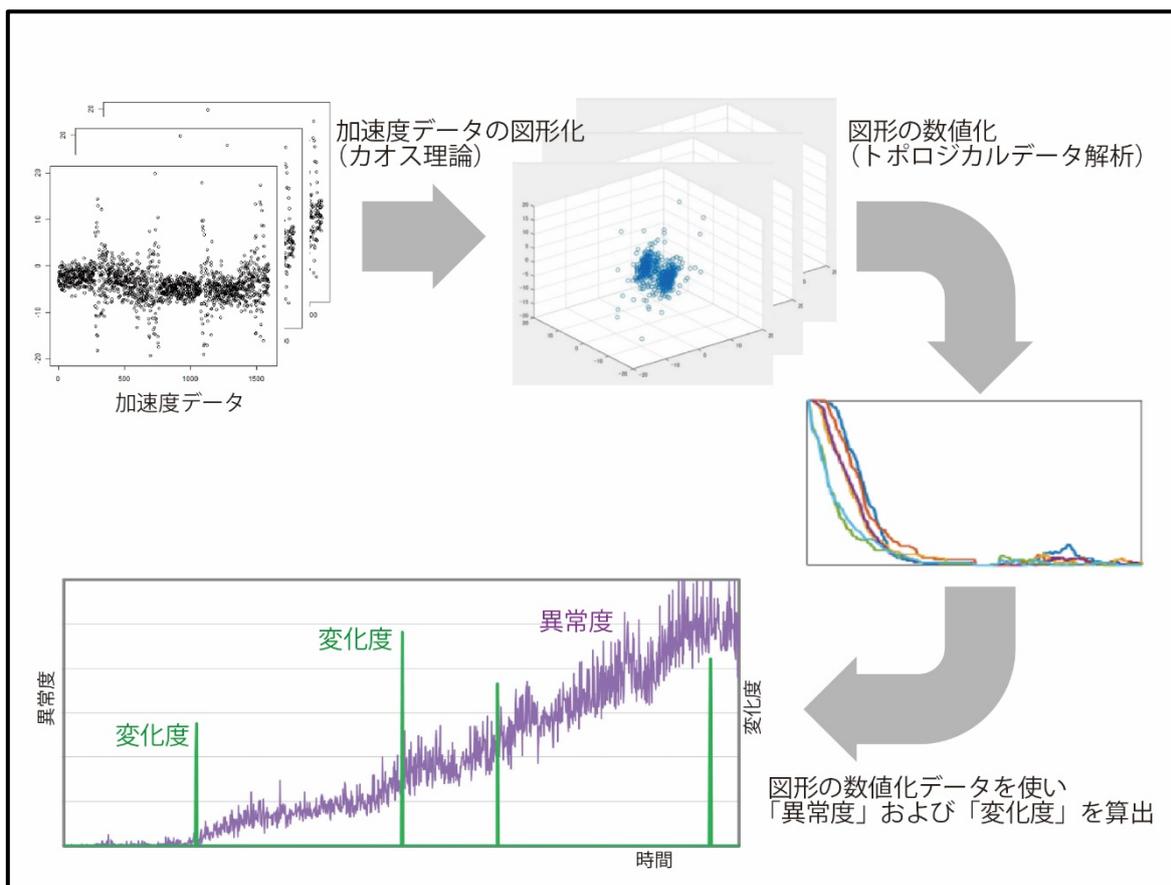


図 6.3.10 TDA を用いた加速度センサデータの分析手法¹⁾

1) 振動パターンデータの図形化

TDA を用いた手法のねらいは、時系列データである振動パターンデータが持つ情報を図形として抽出し、その特徴を分析することである。時系列データから情報を抽出する手法として、カオス理論で使われるアトラクターを使用する。時系列データに対するアトラクター変換とは、例えば、連続する 3 つの時刻の値を座標とする 3 次元空間の点とし、取る 3 点の時刻を 1 つずつずらしていくことで得られる点を集めることで構成するというものであり、これにより得られるアトラクターは 3 次元空間の点の集合となる。

2) TDA による図形の数值化

時系列データから構成されたアトラクターは点の集合となっており、点の配置情報を特徴量として抽出する手段として Persistent homology を適用した。膨らませる球の半径を離散化し、各半径時の穴の数を各要素の値として順に並べてできるベクトルをアトラクターの特徴量とする。このようにして作成したベクトル (Betti 系列と呼ぶ) を分析に用いる。

3) 異常検知による損傷評価

振動パターンデータのうち正常状態 (健全な状態) とみなすことができるデータを用いて基準状態を設定しておき、これを基準として、各モニタリング時点のデータの異常度 (損傷度合い) を計算する。また、変状発生を検知を目的として、直前のデータを基準として差を変化度として計算し、差が大きくなった箇所を変化検知点として検出する。

(2) 適用事例 1 (平成 27 年度輪荷重走行実験データの分析)

RAIMS が平成 27 年度に山口大学で実施された輪荷重走行実験では、リファレンスとして内部ひずみ (サンプリング周期は 200Hz)、および外部からのモニタリングとして加速度センサデータ (サンプリング周期は 100Hz または 256Hz) が、全実験期間 (約 50 日) を通じて連続計測された。各データは、

- ① RC 実験床版が健全な状態から抜け落ち破壊に至るまでの劣化進行の精細な分析
- ② 連続的な劣化進行に対するモニタリング技術の適用性の検討

を目的として採取されたものである。本手法による分析結果は、図 6.3.11 に示す通りである。

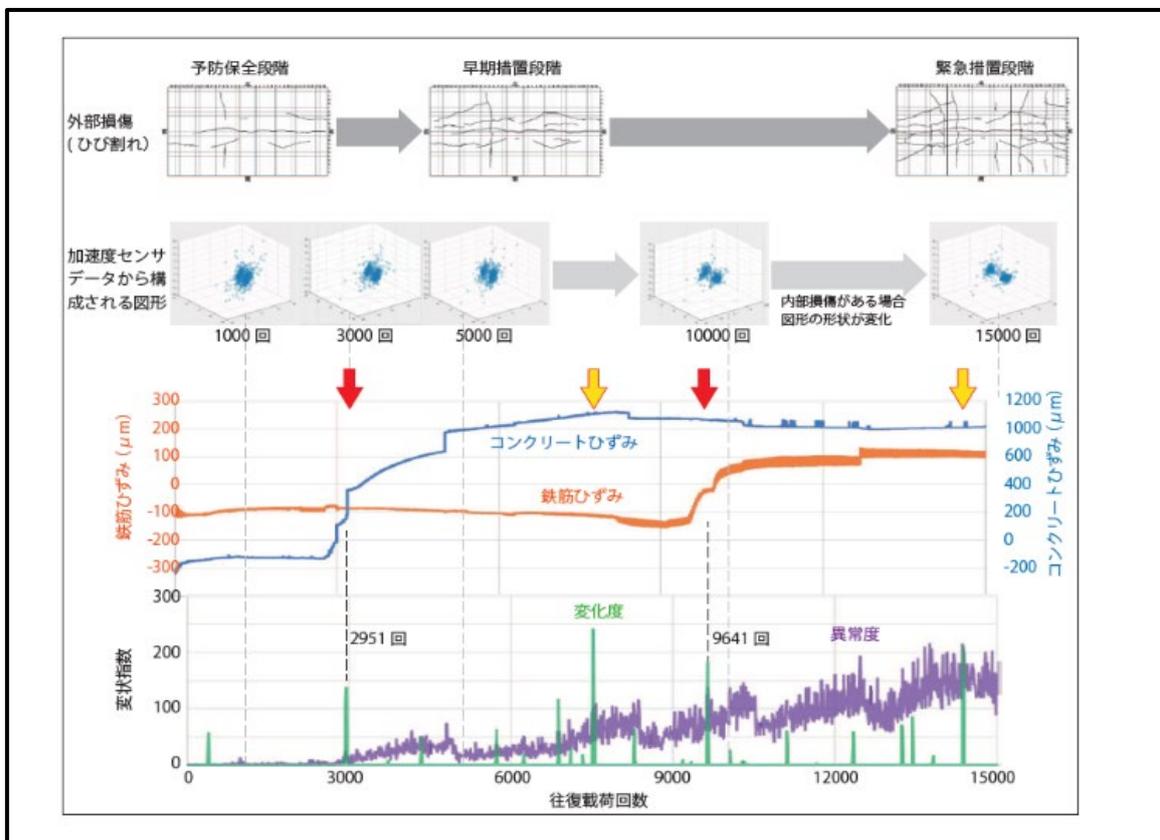


図 6.3.11 輪荷重走行実験データの分析結果¹⁾

図 6.3.11 の最上段には、外観の推移が損傷度評価とともに示され、二段目には図形化された加速度センサデータの推移、三段目にはリファレンスの内部ひずみの推移、最下段には TDA により導かれた加速度センサデータの特徴量から計算された異常度と変化度の推移が示されている。外観の記録は輪荷重を止めたタイミングでしか得られないため、輪荷重が連続的に動いている間に発生する疲労劣化の進行を詳細にとらえるのは不可能であった。リファレンスとして連続計測された内部ひずみの推移を見ることにより、劣化進行の誘因となった変状を部分的ではあるがとらえることができた。TDA により計算された変化度が大きい時点は劣化進行の誘因となった内部ひずみの変状発生ポイントとよく一致しており（赤色矢印参照）、外部センサ（加速度センサ）のモニタリングデータに本手法を適用することで、内部損傷の発生を推定できていることが示唆されている。内部ひずみデータの変状発生ポイント以外でも変化度が大きい時点が見られるが（黄色矢印参照）、ひずみセンサの配置がない場所での内部損傷発生を反映していると推察される。

(3) 適用事例 2（実橋梁モニタリングデータの分析）²⁾

分析対象は、RAIMS が実施した 2 つの現場実証実験で採取された 3 軸加速度センサデータである。輪荷重走行実験では試験床版のライフログが得られたのに対し、実橋梁データ分析では、輪荷重走行実験結果を参考にモニタリング時点の状態を診断することになる。

1) 大森川橋（下り線）

東北自動車道の大森川橋は鋼合成単純桁橋であり、橋長は 36.3m、床版形式は RC 床版である。3 軸加速度センサ（サンプリング周期は 100Hz）の配置は図 6.3.12 に示すとおりである。

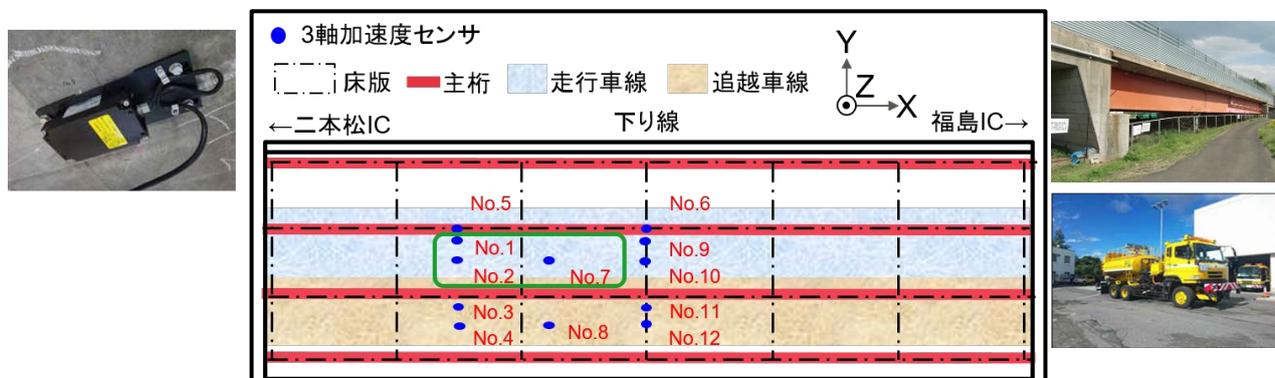


図 6.3.12 大森川橋実証実験での 3 軸加速度センサ配置

データ分析にあたっては、図 6.3.12 右下に示す基準車両が通過した走行車線下の No.1, No.2, No.7 のモニタリングデータを対象とした。走行車線の車速を 90km/h 程度とすれば各車両は 1.45 秒程度で橋梁を通過すると想定されることから、加速度センサデータ（Y 軸）を車両の通過前後を含めた 3 秒の振動パターンとして切り分けた。振動パターンデータは基準車両が通過した前後の 10 分間から抽出した。分析結果は図 6.3.13 に示すとおりである。

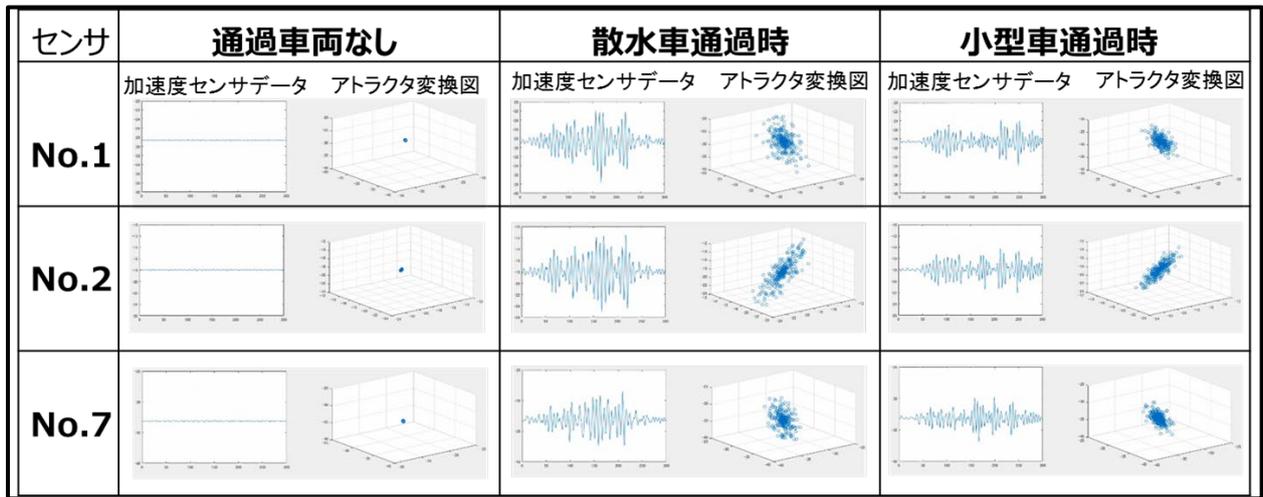


図 6.3.13 大森川橋実証実験データの分析結果(参考文献2) の図-3の一部を加工)

図 6.3.13 に示されるように、振動パターンデータをアトラクター変換して得られる図形は、通過する車両の重量やサイズによって大きくなったり小さくなったりするものの単独のボール状で推移している。この結果と輪荷重走行実験の結果を併せれば、床版内部の鉄筋は弾性体としての健全性を維持したままであると推察される。

2) 城山川第二橋（上り線）

中央自動車道の城山川第二橋は鋼単純活荷重合成鈹桁橋＋鋼3径間鈹桁橋であり、上り線の橋長は103.2m、床版形式はRC床版である。計測対象となるRC床版および3軸加速度センサ（サンプリング周期は100Hz）の配置は図 6.3.14 に示すとおりである。

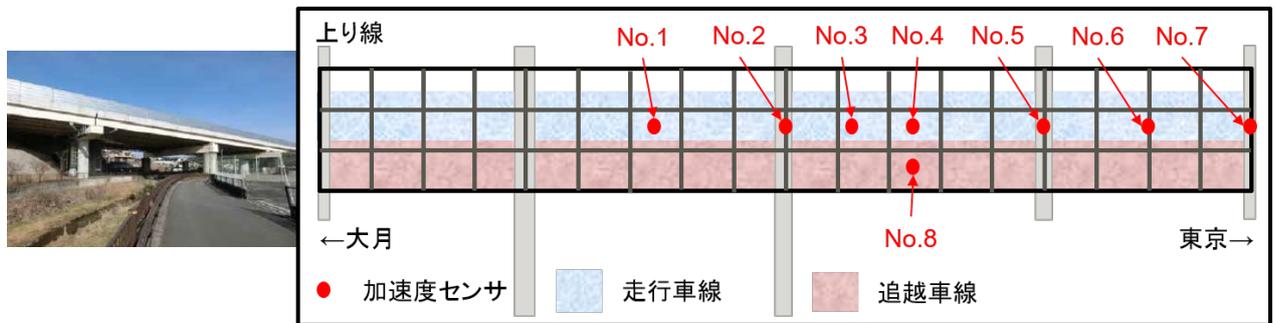


図 6.3.14 城山川第二橋実証実験での加速度センサ配置²⁾

データ分析にあたっては、大森川橋の場合と同様に、たわみの影響が大きいと思われる No.1, No.4, No.6, No.8 のモニタリングデータを対象とした。また大森川橋の場合との比較のために、加速度センサデータ (Y 軸) を 3 秒の振動パターンとして切り分けた。城山川第二橋の実証実験では大森川橋の場合のような基準車両の走行は実施されなかったため、3 つの任意時刻の振動パターンデータを分析対象とした。分析結果は図 6.3.15 に示すとおりである。

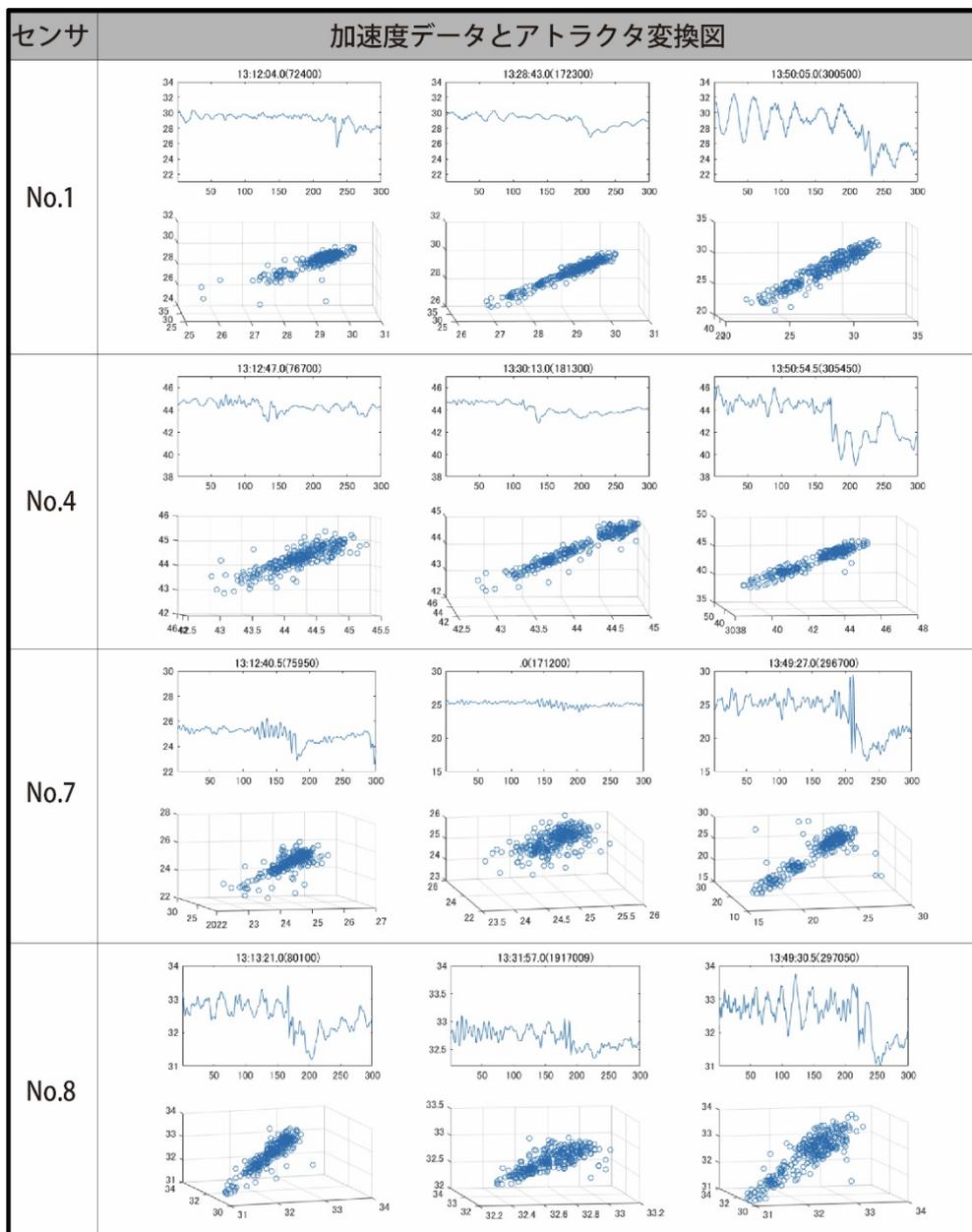


図 6.3.15 城山川第二橋実証実験データの分析結果²⁾

図 6.3.15 には、3 つ時刻の振動パターンデータとそれをアトラクター変換することにより得られた図形を対として表示している。アトラクター変換して得られた図形は、大森川橋の場合と異なり、単一のボール状とは言えず、一部は 2 つに千切れる傾向が見られる。振動パターンデータそのものも、大森川橋の場合は不規則雑音のような波形であったのに対し、城山川第二橋の場合は、車両通過時点で段差が現れており、輪荷重走行実験の結果を踏まれば内部の鉄筋の弾性体としての健全

性が損なわれつつあり、疲労劣化傾向にあることが疑われる。他のセンサデータや分析手法と併せた総合的な評価が必要である。

(4) 今後の実橋梁データへの適用に向けて

実橋梁のモニタリングでは、ほとんどの場合、新設時とモニタリング時の状態の差異が不明であり、モニタリング開始前のデータ蓄積が皆無と想定される。したがって、本技術の適用にあたっては、本報のような実験床版のライフログとの照合の他、点検ごとの推移を記録し、最初の点検時からの異常度を評価する、前回のモニタリングデータと比較することにより変化度を評価する、といったことを繰り返すという対応が必要になる。

参考文献

- 1) 梅田祐平, 金児純司, 菊地英幸: トポロジカルデータアナリシスと時系列データ解析への応用, 雑誌 Fujitsu 69(4), P.97-P.103, 2018 加速度データの図形化(カオス理論)方法については, 例えば次の論文に記載されている。池口 徹, 合原 一幸: 力学系の埋め込み定理と時系列データからのアトラクタ再構成, 応用数理, 7 巻 4 号, p. 260-270, 1997
- 2) 金児純司, 梅田祐平 et al.: トポロジカルデータ解析を用いた橋梁モニタリングデータの分析, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, CS9-011, pp21-22, 2018

6.3.4 構造物維持管理システムによるデータ活用

(1) 構造物維持管理システムの適用範囲

本システムの機器は、基本的に現場において常時計測を行うことを目的としている。そのため、①電池で5年間駆動すること、②ワイアレスによるデータの通信を行うこと、③長期計測へ対応した機器の耐久性の確保していること、④管理者の机上からデータの取得、計測間隔の変更などが容易に行える操作性を有しているなどの機器的特徴がある。

また、計測したデータから構造物の損傷状況などが管理者に容易に理解できるような定量的指標にして提示することを提案している。

1) 本システムの維持管理における役割

本書では、モニタリングの役割について第1編3.2「モニタリングの位置づけ」で示されているように、①点検の補助、②診断の補助、③補修・補強等の効果の確認、④緊急時の対応を補助するとしている。本システムは上記について以下のように適用を図ることができる。

① 点検の補助

道路橋の定期点検においては、近接目視または打音による確認が定められている。そのためには、点検対象物に近づくための足場などが必要となる。本システムのセンサ機器の設置によりその加速度やひずみなどの計測データと目視点検結果の結び付けにより、足場などを設置することなく必要な時に適切なデータを取得することが可能になる。それにより、第1編表3.2.1に示す（タイプB）定期点検の範囲を絞り込み、点検時間費用を削減することに適用できる。

また、適切なデータを適切な時期に取得でき、かつ評価することが可能になれば、定期点検の時期の延長などに対してもその可能性が広がることになると思われる。

② 診断の補助

現場計測作業のIoT化により計測データを管理者の机上へ伝送し、かつその長期的データの変状から現場の状況がどの程度の損傷状態であるかを容易に把握することが可能である。また、現場の損傷状態は現場点検の結果のように「ひび割れ状態」や「鋼材の腐食状態」など定性的な表現ではなく、構造物の剛性が初期状態からどの程度変化しているかを定量的に示し、構造物の安全性を適切な指標として提示するようにしている。

そのため、（タイプC）予防保全対策を取るべき状態に達したことを把握する、（タイプD）定量的データを取得し、比較する、（タイプE）健全度評価のために定量的データを取得する、（タイプF）通行制限あるいは通行止めにするべき状態に達したことを確認する、（タイプG）補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認するなどに適用できる。

③ 補修・補強の効果を確認

（タイプH）対策の効果、持続性を確認することに適用できる。

④ 緊急時の対応を補助

地震などによる構造物に加わる地震力などを適切に計測するためのトリガ機能や時刻同期性を有しており、それにより（タイプI）被災地域での被災分布などから早期に緊急対応をすべき区域や交通開放を早期に行うことができる区域などの判断をすることができる。

2) 構造物維持管理システムの利点と運用フロー

本システムは現場に常設をして、長期間データを計測することにより構造物のゆっくりとした損傷の進行を発見することを目的として開発をされたものである。このように、数年といった長

期に渡る計測期間において効率的な管理を行うためには計測による定量的な監視の実施が必要である。そのためには、耐久性の高いセンサ機器、かつ信頼性のある通信技術が必要である。その上で、ゆっくりとした損傷による変化が分かり易い評価指標で示すことが必要であり、かつ指標に変化があった場合に、なぜ変化したのかを明らかにする必要もある。

計測値を評価するまでの本システムのフローを図6.3.16に示す。

計測したデータを事務所のサーバに伝送した後に、サーバ内において計測値の評価を行う。評価指標としては、①特性カルテを提案し、②その指標が初期状態からどの程度変化したかを構造同定解析により明らかにする。そして、点検結果と構造同定の結果を比較し、技術者が妥当性を評価する。その上で、③点検結果と同定結果を踏まえた構造物の劣化シナリオとして、構造同定

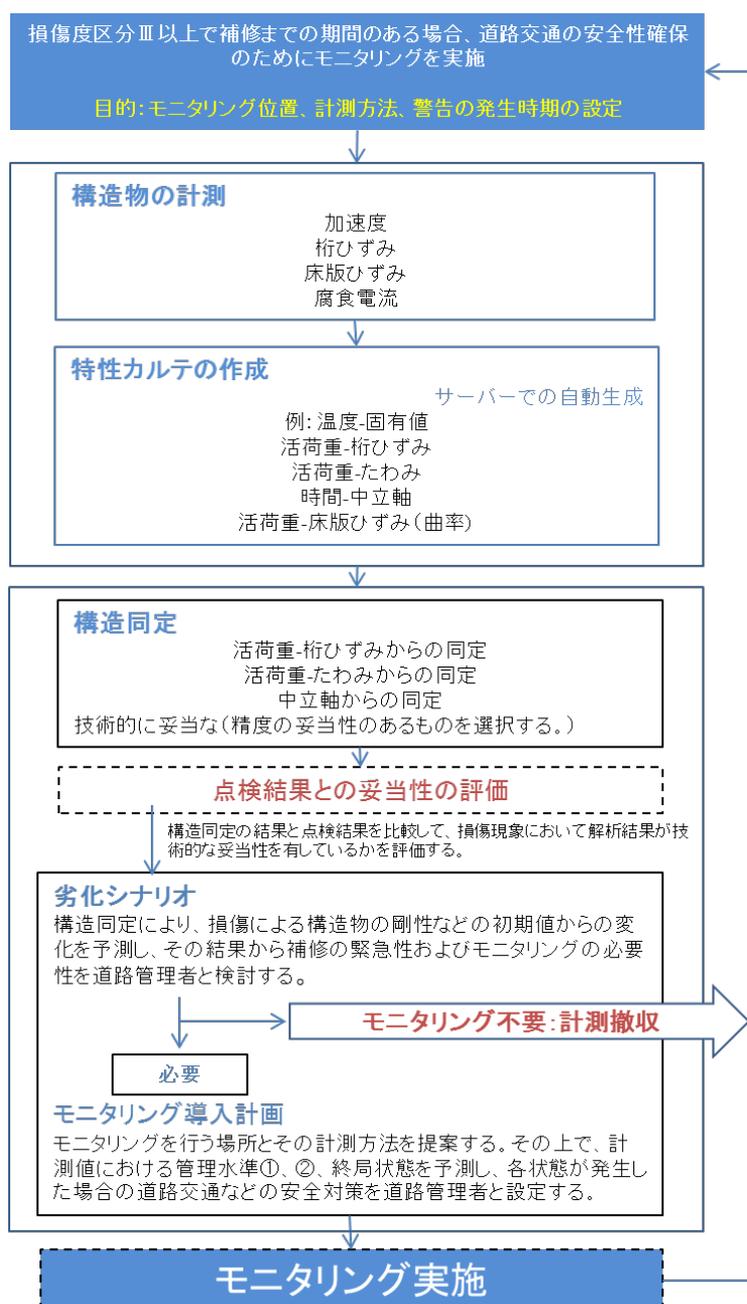


図6.3.16 システムフロー

の結果から指標の初期状態からの変化および損傷要因を判断し、構造物の緊急性を判断する。④モニタリングが必要と判断された場合はモニタリング導入計画において、状態の計測位置、計測方法、計測値の管理水準を設定するとともに、各状態における安全対策について管理者と協議を行う資料を提案する。

(2) 構造物維持管理システムの機能要件と概要

1) 省電力化した計測システムにより屋外環境での長期信頼性の確保

消費電力を極力少なくしたセンサを採用し、一日に2、3回程度の計測タイミングによる定時計測システムの構築などにより計測システムとしての省電力化を図っている。また、ワイアレス通信装置を持った計測機器（以下センサノード）は電池で5年以上の稼働を行い、そのセンサノードは防塵・防水構造（IP65）と結露対策の両立を確保している。

2) 簡易設置が可能なワイアレス通信を用いた遠隔モニタリング

計測対象構造物内のセンサノードは920MHzの通信帯を用い、データの伝送を行う。各センサノードからのデータは基地局に収集され、携帯電話網の採用により遠隔地のサーバに送信する。各計測者はWebを介して各地から計測データの監視を行う。このようなワイアレス通信により、従来の有線システムでは1か月ほど要したシステムの設置作業が1週間ほどで完了することができた。

3) 地震や台風時など異常時におけるトリガ機能の設定

センサノードは、地震の初期振動をトリガとしての地震振動計測を実現し、また台風など進行が予測されるときに計測間隔の変更などにより適切なデータ量を確保するなど、異常時においても効率的なモニタリングが実施できる。

4) 多様な劣化損傷への対応

各センサノードには、加速度、ひずみ、ACM、温湿度などのセンサが接続可能であり、そのデータを通信することができる。また、各センサノード間は、GPSを活用した高精度時刻同期（1ms以下）により面的な分析可能なデータの取得となっている。

(3) 構造同定の説明

加速度やひずみの計測結果から、橋梁の応答値として固有振動数、中立軸、活荷重と桁ひずみなどの相関を「特性カルテ」として評価する考え方について第4編第6章6.3.1項に示した。ここで構造物の劣化を評価するには、計測された値と構造物が竣工した時点、つまり健全な時（以下、初期値）からの変化がその「特性カルテ」でわかることが重要であると考えられる。しかし、ほとんどの構造物には加速度やひずみの初期値は存在しない。そのため、構造物の構造パラメータにおいてその材料特性の初期値（ヤング係数E、剛性I、密度 ρ など）と計測された加速度やひずみ値から構造同定を行った構造パラメータの材料特性の値を比較することにより、構造物の劣化損傷状態を評価することとしている。

本項で示す構造同定方法は、計測された加速度やひずみ値などにより、その値を示すための構造パラメータにおける材料特性の値を逆解析により求める。ここで示す構造パラメータとは、構造物の材料特性（ヤング係数E、剛性I、密度 ρ など）となる。例えばRC床版を有する鋼橋をモデルとした場合には構造体として床版コンクリート、鋼材、支承ゴム体の材料特性を考慮することになる。

1) 加速度からの構造同定とひずみ値からの構造同定の評価の違い

本システムでは、加速度から構造同定を行う場合とひずみから行う場合とは異なると考えている。

加速度など振動情報（固有振動数、減衰など）から構造同定を行う場合、その計測結果には構造系全体の振動情報（1次～N次の振動）が含まれている。よって、その同定結果は構造系全体を俯瞰して評価したものになる。例えば、3径間の連続桁の場合、側径間、中央径間の床版コンクリート部分、鋼材部分のそれぞれの構造パラメータの剛性などの変化は、構造体全体を総合的に評価し振動情報として計測されているものとなる。そのため、評価関数が多岐にわたるため、ベイズ推定などの数学的手法を用いることで適切な解を導くことができる。

それに対してひずみ計測では、桁の断面内の力に対して構造物の応力状態を示したものである。しかし、計測される損傷箇所に対しては、他の損傷箇所の影響を受けてはいるがそれを知るには他の箇所のひずみ計測を同時に実施しなくてはならないといった、加速度計測とは異なった応答値である。よって、上記に示すような加速度による全体系の評価を行い、その上で局所的な観測を行う場合、または他の部位の損傷が少なく、局所的な損傷だけ进行评估する場合には、その対象部分の応力状態进行评估することが構造力学的に最もわかりやすい。この場合、注意すべき点は、損傷箇所は一般に剛性が低下しているために、断面力が集中するのではなく、他の健全な部分に力の分配が起こっている場合が考えられる。

そのため、損傷部分のひずみとその近傍のひずみを比較し、力の再分配などを検討することで損傷の程度を調査する必要がある。例えば、腐食により鋼桁の板厚が減少している場合などは、その桁の損傷部分と近傍の桁部分进行评估し、力の再分配进行评估などを行うことになる。

2) 加速度計測によるベイズ推定を用いた構造同定の概要（固有振動数からの推定）

① 構造同定分析

設置された加速度計の情報から、構造同定（動特性）を行うために、システム同定手法の一つである Eigensystem Realization Algorithm (ERA) および Natural Excitation Technique (NExT) を組み合わせた、NExT-ERA と呼ばれる手法を用いて分析を行った。その結果、車両通行時の強制振動時の加速度波形（図 6.3.17）から NExT により自由減衰応答波形（図 6.3.18）を取得、その波形に対する ERA を実施することにより表 6.3.4 に示すような固有振動数、モード形、減衰定数などを求めることができる。

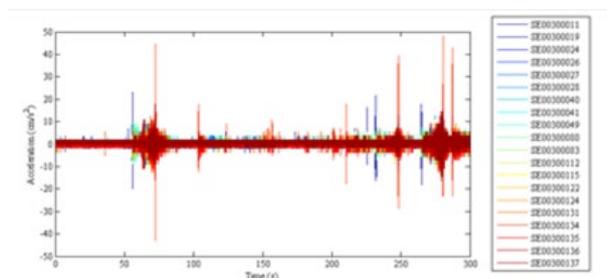


図 6.3.17 加速度波形の例

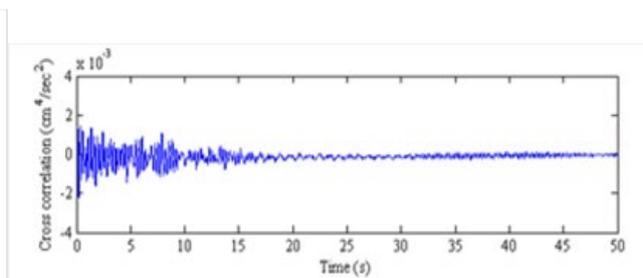


図 6.3.18 NExT により得られた自由減衰応答波形の例

表 6.3.4 同定された振動モードおよび減衰定数

	モード	固有振動数(Hz)	減衰定数
1	鉛直1次	1.09	0.009
2	鉛直2次	1.65	0.012
3	鉛直3次	2.04	0.005
4	ねじれ1次	2.84	0.027
5	ねじれ2次	3.17	0.021
6	ねじれ3次	3.84	0.010
7	鉛直4次	4.06	0.023

② FEM モデルを用いたベイズ推定による構造同定

対象橋梁について、FEM モデルの構築を行い、FEM モデルに含まれるパラメータの影響度を検証するとともに、加速度の計測に基づき、ベイズ推定、特に、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を用いて各パラメータの変動分布を求めた。

NExT-ERA により得られた固有振動数のうち、1次、2次、3次の3つのモードの固有振動数を考慮して、ベイズ推定により FEM モデルの材料特性の確率分布評価を行っている。対象橋梁の中央径間の床板において損傷等を考慮し、FEM モデルでは、床版をソリッド要素、鋼桁部をシェル要素、支承をバネ要素でモデル化した。ここでは、FEM モデルの構造パラメータとして、鋼材ヤング率 (E_s)、鋼材密度 (ρ_s)、鋼材ポアソン比 (ν_s)、鉄筋コンクリート剛性 (E_c)、鉄筋コンクリート密度 (ρ_c)、鉄筋コンクリートポアソン比 (ν_c)、支承の橋軸ゴム係数 (K_L) および鉛直ゴム係数 (K_V) を設定し、それらの変動分布を求めることとした。

パラメータの感度解析から、ポアソン比の影響が小さいことが明らかとなったため、鋼材ヤング率 (E_s)、鋼材密度 (ρ_s)、鉄筋コンクリート剛性 (E_c)、鉄筋コンクリート密度 (ρ_c)、支承の橋軸ゴム係数 (K_L) および鉛直ゴム係数 (K_V) を対象として変動分布を求めることとした。特に、床板コンクリート剛性 E_c については、中央径間にひび割れが顕著に確認されていることから、中央径間 ($E_{c,center}$) と側径間 ($E_{c,outer}$) に区別し、部材位置毎の違いを考慮できるよう設定した。FEM モデルについては参考文献 1) の図 17 を、解析サンプル数 1,000 として分析した結果の例 (1 月) については参考文献 3) の Figure. 6 を参照。

側径間の鉄筋コンクリート剛性 ($E_{c,outer}$) は 17.8GPa といった値であるに対して中央径間の床板コンクリート剛性は 9.9GPa 程度と算出された。本橋は中央径間の床版部分に 1m ピッチに断面を貫通したひび割れがあり、構造同定により剛性の低下傾向を確認することができた。

3) ひずみ計測による中立軸の計測結果を用いた剛性の同定

FEM モデルを用いて単位荷重を載荷した場合の上下フランジの応力度を算出し中立軸を求めることとした。ここでは、パラメータとしては固有振動数の結果、および点検結果から床版コンクリートのヤング係数を変化させることが最も有効であると考えた。また、床版の剛性については前項で算出された剛性を用いて解析を行った。中立軸の位置を求めた FEM 解析結果を図 6.3.19 示す。

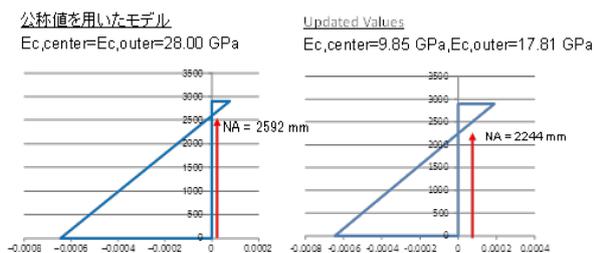


図 6.3.19 推定された中立軸の位置

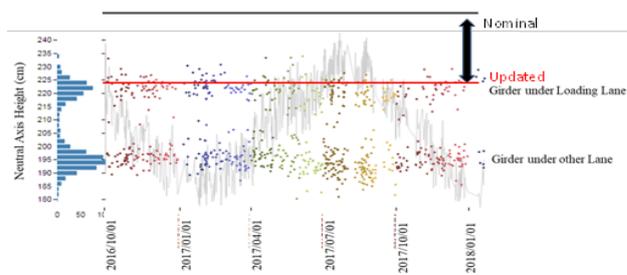


図 6.3.20 計測された中立軸の位置と計算値の比較

図 6.3.19 の左図は床版コンクリートの剛性を中央径間，側径間とも公称値の 28GPa とした。図 6.3.19 の右図は中央径間の床版コンクリートの剛性を 9.85GPa とし，側径間の剛性を 17.8GPa とした。図 6.3.20 に計測値と解析値の比較を示すが，妥当性があると考えられた。

(4) 特性カルテと構造同定評価による劣化の評価

・活荷重に対する桁ひずみの評価

床版のひずみ計測により算出した活荷重と床版の下面の橋軸方向のひずみより合成桁とした桁の特性カルテを図 6.3.21 に示す。また，構造解析により床版のクラックがない場合と橋軸直角方向に 1m ピッチでクラックが生じた場合の解析結果を示す。その結果，計測結果は橋軸直角方向に 1m ピッチでクラックが生じた場合と同様な傾きを示し，解析の妥当性を示すことができる。

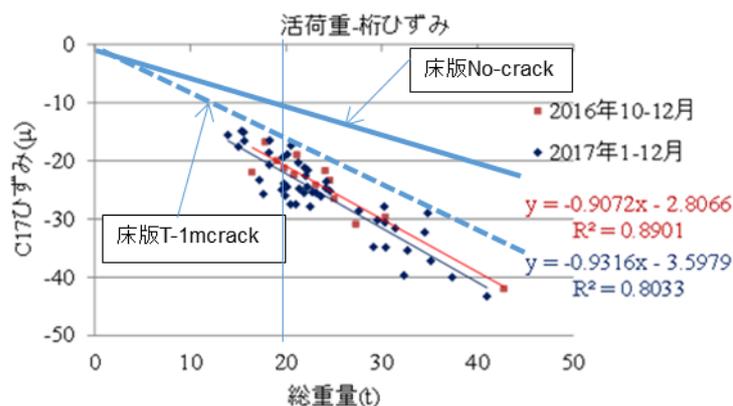


図 6.3.21 活荷重とひずみの特性カルテ

(5) 異常時検知方法

微小な振動数変化などを検知できるとされる位相空間分析の適用を試みる。本手法は，位相空間での軌跡形状を分析する手法であり，様々な分野に適用が試みられている技術である。位相空間とは，加速度の時系列データのある時間区間のデータとそこから所定の時間ずらした時間区間との関係を表したものであり，例えば，ある時間区間の振幅値 (Dim1) を横軸とし，そこからある時間動かした波形の振幅値 (Dim2) を縦軸として表したものを位相空間という。この際，どの程度時間をずらすのかということが重要で，データの特徴に基づき決定されるパラメータである。位相空間において軌跡形状として示され，図 6.3.22 のように楕円などの軌跡を形成するが，計測される加速度の中に通常の加速度と異なる振動が計測された場合，その位相空間の形状が異なることになる。この手法では，位相空間における軌跡形状 (Phase Space Topology) に着目し，基準時 (例えば健全時) の軌跡形状と計測値 (モニタリング時) の軌跡形状の差分 (Change of Phase Space Topology,

CPST) を数値化し評価指標としている。概念図を図 6.3.23 に示す。

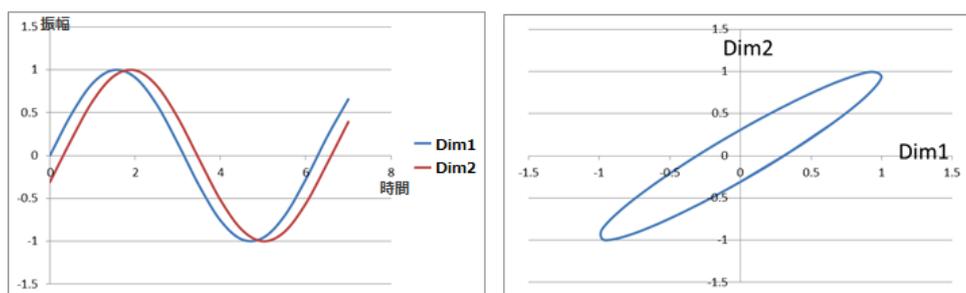


図 6.3.22 位相空間の概念図

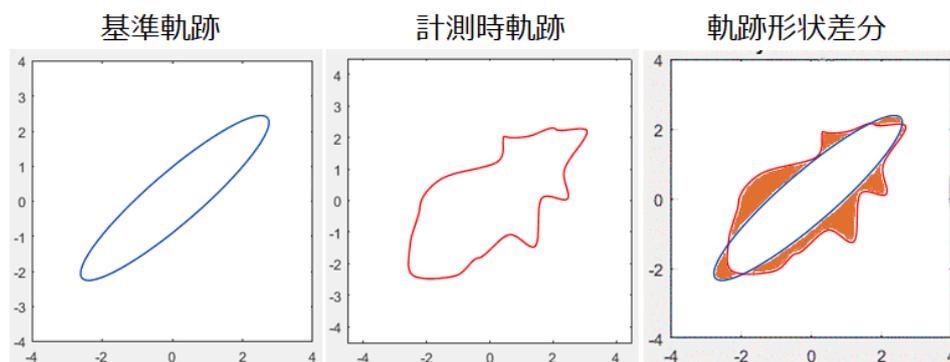


図 6.3.23 位相空間の形状軌跡

平成 30 年 4 月 9 日島根県太田市を震源とした地震により計測されたデータにも適用し、以下のような結果を得ている。計測地点は震源地から約 100km 離れていたが、振動トリガにより、支承の上下で同期して加速度が計測された。支障の上下の相対的な関係の中に異常が生じていないかどうかを本技術で評価するため、橋台天端に設置された下のセンサ (lower) を参照データとし、upper センサに対して NExT を適用したデータを、分析対象とした。また、トリガ計測により得られた地震時のデータに加えて、地震前後の定時計測データを用いて、地震前と比べ地震後に通常と異なる挙動が生じていないかどうかを CPST により比較評価した。地震前、地震中、地震後のデータから求めた CPST 比較すると、地震発生時に CPST が地震前に比べて大きくなり、注目している地震後の CPST については、地震前とほぼ変わらない値に戻った。このことから、この地震においては、構造物の振動特性等の変化が起こっていないと判断できた。地震前、地震中、地震後の分析対象としたデータ、位相空間の形状および CPST の変化については、参考文献 2)の図-15、図-16、図-17 を参照。

参考文献

- 1) 西田, 高瀬, 幡山, 佐々木: 社会インフラへのモニタリング技術の活用 (2), OMRON TECHNICS
- 2) 西田, 黒田, 佐々木: 省電力化を図ったワイアレスモニタリングセンサによる橋梁の損傷評価に関する提案, 橋梁と基礎, 第 54 巻第 6 号, pp31-36, 2020
- 3) Eiichi Sasaki, Porjan Tuttipongsawat, Natdanai Sinsamutpadung, CONDITION EVALUATION OF A HIGHWAY BRIDGE WITH RC DECK USING MONITORING DATA OBTAINED BY WIRELESS SENSORS, MAY 24-26, 2018, CASTED2018

付資料1：既存報告のまとめ

既存ガイドライン・指針の 出典	データモデリングに関する記載や今後の期待	データの保存に関する記載や今後の期待	データの活用に関する記載や今後の期待	モニタリングシステム全般に関する記載や今後の 期待	適用事例の例示
社会インフラのためのセン サ標準化ガイドラインおよび 適用の手引き(案)：土 木学会土木情報学委員会 センサ利用技術小委員会	センサデータに対して標準化するデータ項目を規定 (データの標準仕様としてucodeを含むユニークIDを 提案)。固定的な情報としては、場所、属性 (ID、 構造物の緒元、管理者等)、使用センサ、計測デー タの種類、精度 (有効桁数) データの固有性、互換 性、継続性を確保するため個別認識ID (ucode) の 使用を提言。	記憶媒体はCDまたはDVDにての保存を推奨 (USB メモリやSDカードは自然放電によるデータ喪失の 可能性あり)。また、クラウドサービスを利用し た長期データ保存方法の可能性も示唆。	—	データの精度、継続性を担保できるよう、機器や システムの更新・構成方法と記録の保存を適宜行 うことを提案(メンテナンスの簡便化)。	山留めや構造物の変位計測、橋梁等の振動 や地盤変動を計測する加速度計測、切土のリ 面の変動調査、山留めの4事例を例示。
橋梁構造物のモニタリング に関する通達RS15.03.01 (オーストリア)	—	測定器 (センサ) からデータ送信中継器 (オプ ション) までを記載 (クラウド等の記載なし)。 加工前の生データの蓄積の必要性を提言 (問題発 生時に生データを調べられるように)。	限界基準の決定に関しては、静的計算値もしくは 適用設計基準による。モニタリングデータを使っ て、ONORM EN1990に基づく確率的な計算方 法を採用してもよいことを記載。	長期モニタリングシステムにより限界基準値の確 認がなされる場合には、施設の管理期間中におけ る警報発令計画の立案が必要。	ひび割れ幅、変形量、支承の変動、伸縮継 手の変動、アンカー作用力と鋼材張力、 ケーブル作用力の動的測定、橋脚の沈下 量、下部工の傾斜角、振動測定、疲労測 定、車両重量計測システム (WIM) の11の 事例を例示。
CIM技術検討会 橋梁WG (コンクリート橋) ガイ ドライン：日本建設情報総 合センター	設計段階の物性情報、施工段階の材料情報(ミルシー ト・品質管理情報)、維持管理段階での活用情報を 予め属性として付与できるようにモデル内に登録す ることを推奨。	—	—	—	PC橋梁上部工、RC下部工 (橋台、橋脚) を 対象として、CIM三次元モデル作成方法を具 体的に例示
実構造物への適用性を重視 した各種センサ技術の調査 と体系化研究委員会：日本 コンクリート工学会	将来センサデータをクラウドで管理しビッグデー タ活用や予備解析へ応用することを提言 (活用に はアクセス、セキュリティ管理等を含む高度なICT 知識が必要との認識)。クラウドによるデータ保 管を有効な情報共有化手段として位置付け、さら にモニタリングデータとBIM、CIM等の三次元モ デルに格納し、設計、施工時のデータと合わせた データ駆動プラットフォームとして多重分析して 行く可能性にも期待。	複数の大量センサデータを分析し熟練者のスキル なしで構造物に対する一定の評価を行える可能 性。モニタリングの結果何らかのアクションを行 う際の判断指標 (閾値) の明確化が課題。ビッグ データを活用して従来の把握できなかった新しい 分析の可能性 (事故概念を排除し、データの連続 性と事象のみに基づく分析)。変化点や特異的な データを容易に把握できる見える化、蓄積データを用 いたマルコフ分析等の将来予測に期待 (予測精度 向上には、実測値のフィードバックシステムが必 要との提言)。	—	—	アーチ橋における情報化施工、FBG光ファイ バーを用いた橋梁モニタリング、成田国 際空港誘導路橋梁モニタリング、高瀬バス による橋梁モニタリングシステム、ユビキタ スネットワークによる土砂災害監視システ ム、超高層ビルの健全度モニタリング (健 固ロケットワー)、深層学習による画像処 理を用いたコンクリートの変位抽出、ラマ ン分光法を用いたコンクリート構造物の劣 化診断、の9事例を例示
SIP：高度なインフラ・マ ネジメントを実現する多 様なデータ処理・蓄 積・解析・応用技術の開発	IoTを想定したインフラ維持管理向けデータモデル (過去に蓄積されたデータや今後想定されるセン サデータなど、多様なデータ取得から活用 までを対象とした「道路情報表現仕様 (第1版)」) を整理。高速道路・国道・地方道など異なるイン フラ管理者にも適用可能で、構造物の諸元とメンテナ ンス情報 (点検・診断・補修) の両方を記述可能。	データのデータベースに依存せず、複数種の データベースをまたいで検索できるwebベースの 「道路情報データベース共通API仕様 (第1版)」 を開発 (連邦型道路管理データベースラッパーや 標準API (REST + JASON型)) を整備。短期間・低 コストで既存システムの稼働を維持しつつ、複数 のデータベースを統合することが可能。	複数のデータベースに登録された地理情報を結び つけて検索するなど、データの統合や連携による 有効活用が可能。現場での利用形態を反映した対 話的なユーザーインターフェースを開発。本社・支 社・事務所・現地などとの間で、同時に同じ情報を 共有すること。また施設や位置に関する情報を複 合的に観点から把握することで、的確な判断が可能 となる。	—	地域大学や技術センター等が、本クラウド システムをベースに、インフラ維持管理 データを活用した業務改善や技術アドバイザー ス、人材育成等のサービスを地元自治体に 提供 (平成29年度から東北大学、山形県で 実施予定)。

添付資料 2：データ形式 まとめ

表 画像データ例

拡張子	特徴
.CR2/.CRW .SR2/.ARW .NEF	RAW 画像(撮像素子からの生データ)のファイル形式 カメラメーカーで異なる .CR2/.CRW:Canon, .SR2/.ARW:Sony, .NEF:Nikon
.jpg/.jpeg/ .jpe	<ul style="list-style-type: none"> ・圧縮率が高い。 ・フルカラー (約 1677 万色) の画像を扱える。 ・圧縮すると不可逆圧縮で画質が劣化する。 ・圧縮率を 1/5~1/30 で指定できる。
.png	<ul style="list-style-type: none"> ・フルカラー (約 1677 万色) の画像を扱える。 ・圧縮しても可逆圧縮で画質が劣化しない。 ・背景などを透明にすることができる。
.gif	<ul style="list-style-type: none"> ・データ容量が小さい。 ・最大 256 色。 ・圧縮すると不可逆圧縮で画質が劣化する。 ・背景などを透明にすることができる。 ・アニメーションを作ることができる。
.svg/.svgz	<ul style="list-style-type: none"> ・テキストデータで記述された画像 ・テキストエディタで編集可能 ・SVG 圧縮すると, 最大 80%程度小さくできるが, 編集不可となる。
.tif/.tiff	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の画像をひとつのファイルとして保存できる。 ・データ容量が大きい。 ・フルカラー (約 1677 万色) の画像を扱える。 ・圧縮しても可逆圧縮で画質が劣化しない。 ・Web 上では使えない。
.bmp/.dib	<ul style="list-style-type: none"> ・フルカラー (約 1677 万色) の画像を扱える。 ・データ容量が大きい。(非圧縮)

表 図形データ例

形式	特徴
.dxp	CDBurnerXP というソフトで作成されたデータのファイル形式
.dwg	AutoCAD という CAD ソフトで作成されたデータのファイル形式
.sfx	Microsoft Self-Extractor というソフトで作成されたデータのファイル形式

表 データ記述言語 例

形式	特徴
XML	eXtensible Markup Language の略語 ドキュメント形式であり，タグにより「情報の意味」と「情報の内容」に分けてテキストで記述する。ホームページに利用されることが多いが，地形データを XML 形式で記述した LandXML などがある。
JSON	JavaScript Object Notation の略語 ドキュメント形式であり，XML と比べると簡潔に構造化されたデータを記述する。

表 ドキュメントデータの形式 例

形式	特徴
.txt	文字のみのデータのファイル形式
.csv	カンマで区切られたデータのファイル形式
.tsv	タブで区切られたデータのファイル形式
.dat	あるアプリケーション独自の形式で保存されたデータのファイル形式
.bin	あるアプリケーション独自の形式で保存されたバイナリデータのファイル形式

添付資料 3：用語集

用語	意味	類義語・関連語
アンプ	増幅器	アンプリファイヤー
オープンソースソフトウェア	ソフトウェアのソースコードが無償で公開され、改良や再配布を行うことが誰に対しても許可されているソフトウェア	フリーソフト
キー	データを識別するための記号や数字	キーバリュー, 主キー
キャリブレーションパラメータ	規格や基準に整合するように機器を調整するための数値	
クラウド	ハードウェアやソフトウェアを所有せずに、インターネットを通じて利用したいサービスを必要な時に必要な分だけ利用できるサービスの総称	クラウドサービス
コールドストレージ	ほとんど使用されない、またはアクセスされないデータを保存する物	
サンプリング周波数	1秒間にセンサ等のアナログ波形からデジタル値を取得する回数	
周波数スペクトル	横軸を周波数、縦軸を強さとしてグラフ化したもの	
スキーマ	データベースにどのような種類のデータをどのように格納するかを定義したもの	スキーマレス
トータルステーション	距離を測る光波測距儀と角度を測るセオドライトを組み合わせて同時に測量できる機器	
トランザクション	データベース管理システム内で実行される、分けることのできない一連の情報処理の単位	
バイナリ	コンピュータが処理・記憶するために2進化されたファイルまたはその内部表現の形式	バイナリデータ
ビッグデータ	大容量かつ様々な種類、形式が含まれるデータ	テラバイト, ペタバイト
メタデータ	データの上位データを言う。例：データの項目名（場所, 時間, 変位量）, 説明（サイズ, 測定機器）など	
ラッパー	本来の機能を覆い隠し、本来とは異なる環境や方法で同じ機能を提供するもの	ラッピング
レーザスキャナ	レーザを照射することで対象物の空間位置情報を計測できる機器	点群データ

用語	意味	類義語・関連語
API	あるアプリケーションと別のアプリケーションの間で情報のやりとりをすることでそれらを連携させるもの	
Optical Disc	光の反射により情報を読み書きする記憶媒体	光ディスク, CD, DVD
SQL	データベース管理システム (RDBMS) において, データの操作や定義を行うためのデータベース言語 (問い合わせ言語)	
ucode	インターネットがいつでもどこでも利用できる環境において個々のモノや場所を識別するために割り振られる ID 番号の体系	ユビキタスコンピューティング, ID タグ

参考 問い合わせ一覧

本ガイドラインは、モニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）の組合員で章ごとの執筆を担当しています。内容について、ご不明な点がございましたら、以下担当までご連絡をお願いします。（メール送信の際には、「_atmark_」を「@」に置き換えて下さい。）

第1編 総則	
1章 2章	株式会社 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 Tel : 042-791-1621 E-mail : -
3章 4章	国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター Tel : 029-879-6773 E-mail : caesar_atmark_pwri. go. jp

第2編 RC床版のモニタリング	
1章	鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部 新井 崇裕 Tel : 03-5544-1435 E-mail : arai-tak_atmark_kajima. com
2章	国際航業株式会社 先端技術・事業開発部 中村 和弘 Tel : 042-307-7421 E-mail : kazuhiko_nakamura_atmark_kk-grp. jp
3章 5章	鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部 岩井 稔 Tel : 03-5544-0645 E-mail : m-iwai_atmark_kajima. com
4章	株式会社共和電業 エンジニアリング本部 立野 恵一 Tel : 042-489-7329 E-mail : tatenoe_atmark_kyowa-ei. co. jp

6 章	<p>日本電気株式会社 第二都市インフラソリューション事業部 Tel : 044-435-1913 E-mail : ovst_atmark_sid.jp.nec.com</p>
-----	--

第3編 コンクリート桁のモニタリング	
1 章	<p>前田建設工業株式会社 I C I 総合センター 先進技術開発センター 小原 孝之 Tel : 0297-85-6171 E-mail : obarat_atmark_jcity.maeda.co.jp</p>
2 章	<p>西日本高速道路株式会社 技術本部 技術環境部 構造技術課 Tel : 06-6344-7392 E-mail : -</p>
3 章	<p>日本電気株式会社 第二都市インフラソリューション事業部 Tel : 044-435-1913 E-mail : ovst_atmark_sid.jp.nec.com</p>
4 章	<p>能美防災株式会社 第1 技術部 長澤 正浩 Tel : 03-3265-0509 E-mail : m_nagasw_atmark_nohmi.co.jp</p>
5 章	<p>日本工営株式会社 道路事業部 交通インフラマネジメント部 松山 公年 Tel : 03-3238-8113 E-mail : a4043_atmark_n-koei.co.jp</p>

第4編 鋼桁のモニタリング	
1章	<p>前田建設工業株式会社 I C I 総合センター 先進技術開発センター 小原 孝之 Tel : 0297-85-6171 E-mail : obarat_atmark_jcity.maeda.co.jp</p>
2章 8章	<p>株式会社共和電業 エンジニアリング本部 立野 恵一 Tel : 042-489-7329 E-mail : tateno-e_atmark_kyowa-ei.co.jp 蓮池 康志 Tel : 042-489-7329 E-mail : hasuike-y_atmark_kyowa-ei.co.jp</p>
3章	<p>日本電気株式会社 第二都市インフラソリューション事業部 Tel : 044-435-1913 E-mail : ovst_atmark_sid.jp.nec.com</p>
4章	<p>能美防災株式会社 第1技術部 長澤 正浩 Tel : 03-3265-0509 E-mail : m_nagasw_atmark_nohmi.co.jp</p>
5章	<p>N E C ネットズエスアイ (株) ビジネスデザイン統括本部 デジタルタウン推進本部 第二ビジネス推進G 堀籠 敬樹 Tel : 03-4582-2950 E-mail : -</p>
6章	<p>オムロンソーシアルソリューションズ株式会社 事業開発統轄本部 コミュニティソリューション事業本部 モニタリング事業統括部 黒田 卓也 Tel : 077-588-9709 E-mail : takuya.kuroda_atmark_omron.com</p>

7 章	株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 Tel : 042-791-1621 E-mail : -
-----	--

第 5 編 斜張橋の斜材システムのモニタリング	
1 章 2 章	沖電気工業株式会社 IoT プラットフォーム事業部 橋爪 洋 Tel : 048-431-5180 E-mail : hashizume808_atmark_oki.com 社会インフラソリューション事業部 筒井 英夫 Tel : 03-3454-2111 E-mail : tsutsui464_atmark_oki.com

第 6 編 塩害環境下のコンクリート構造物のモニタリング	
1 章～5 章	日本工営株式会社 道路事業部 交通インフラマネジメント部 松山 公年 Tel : 03-3238-8113 E-mail : a4043_atmark_n-koei.co.jp

第 7 編 橋脚および基礎のモニタリング	
1 章 4 章 5 章	株式会社福山コンサルタント インフラマネジメント事業部 宮村 正樹 Tel : 03-5296-9407 E-mail : m.miyamura_atmark_fukuyamacousul.co.jp
2 章	株式会社パスコ 河川環境部 河川技術課 小澤 淳真 Tel : 03-5435-3614 E-mail : aatwsa1813_atmark_pasco.co.jp

3章	<p>長野計器株式会社 開発センターF B G技術課 名取 努 Tel : 0268-41-1003 E-mail : t_natori-m_atmark_naganokeiki.co.jp</p>
----	---

第8編 のり面・斜面の安定性評価のモニタリング	
1章	<p>前田建設工業 I C I総合センター 石黒 健 Tel : 0298-85-6171 E-mail : isigurot_atmark_jcity.maeda.co.jp</p> <p>東日本高速道路株式会社 技術本部 総合技術センター 横田 聖哉 TEL : 048-749-0606 E-mail : s.yokota_aa_atmark_e-nexco.co.jp</p>
2章	<p>(株) オサシ・テクノス 未来創造部 古島 広明 Tel : 03-5510-1392 E-mail : kojima_atmark_osasi.co.jp</p> <p>国土防災技術株式会社 技術本部 第二技術センター 土佐 信一 TEL : 06-6155-4839(代) E-mail : s-tosa_atmark_jce.co.jp</p>
3章	<p>中央開発株式会社 技術センター 王 林 Tel : 03-3208-5252 E-mail : wang_atmark_cknet.co.jp</p>

4章	国際航業（株） モニタリング部 武石 朗 Tel：042-7404-7210 E-mail：akira_takeishi_atmark_kk-grp.jp
5章	古野電気株式会社 船用機器事業部システムソリューションビジネスユニット Tel：0798-63-1270 E-mail：dana-sales_atmark_furuno.co.jp
6章	株式会社 高速道路総合技術研究所 道路研究部 土工研究室 Tel：042-791-1621 E-mail：－

第9編 モニタリングデータの伝送

1章～5章 (3章 3.6を 除くを除く)	沖電気工業株式会社 社会インフラソリューション事業部 筒井 英夫 Tel：03-3454-2111 (代表) E-mail：tsutsui464_atmark_oki.com 山道 昇 Tel：03-3454-2111 (代表) E-mail：yamamichi015_atmark_oki.com 関西テクノロジーサーチセンター 野崎 正典 Tel：06-6260-0700 E-mail：nozaki765_atmark_oki.com 沖コンサルティングソリューションズ株式会社 川西 素春 Tel：03-5445-6015 E-mail：kawanishi381_atmark_oki.com
-----------------------------	---

3章 3.6	株式会社日立製作所 IoT・クラウドサービス事業部 上松 正史 Tel : 03-5471-3436 E-mail : masafumi.uematsu.tt_atmark_hitachi.com
--------	--

第10編 データの保存・活用	
1章～5章 (5章 5.3.2 を除く) 6章 6.3.3	富士通株式会社 社会システム事業本部 防災システム事業部 Tel : - E-mail : fj-SS-infra-mainte_atmark_dl.jp.fujitsu.com
5章 5.3.2 6章 6.1、 6.2	前田建設工業株式会社 I C I 総合センター 石黒 健 Tel : 0298-85-6171 E-ma : isigurot_atmark_jcity.maeda.co.jp
6章 6.3.1	株式会社日立製作所 水・環境ビジネスユニット 環境事業部 情報システムエンジニアリング部 田中 俊和 Tel : 03-6271-7047 E-mail : toshikazu.tanaka.gh_atmark_hitachi.com
6章 6.3.2	日本電気株式会社 第二都市インフラソリューション事業部 Tel : 044-435-1913 E-mail : ovst_atmark_sid.jp.nec.com
6章 6.3.4	オムロンソーシアルソリューションズ株式会社 事業開発統轄本部 コミュニティソリューション事業本部 モニタリング事業統括部 黒田 卓也 Tel : 077-588-9709 E-mail : takuya.kuroda_atmark_omron.com

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4408 December 2020

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754