共同研究報告書
整理番号第 611 号

道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の利活用に関する共同研究報告書

令和７年８月

国立研究開発法人土木研究所
一般財団法人橋梁調査会
株式会社川金コアテック
株式会社ニコン・トリンブル
日本電気株式会社
パナソニックコネクト株式会社

Copyright © (2025) 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。

共 同 研 究 報 告 書
第 611 号 2025 年 8 月

道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の利活用に関する共同研究

国立研究開発法人土木研究所
一般財団法人橋梁調査会
株式会社川金コアテック
株式会社ニコン・トリンブル
日本電気株式会社
パナソニックコネクト株式会社

要　旨：

道路橋の早期供用再開を実現するためには，道路の被災状況を迅速かつ的確に把握し，残存性能に基づき適切な応急対策・復旧工法を選定する必要がある．本共同研究では道路の震後点検・監視技術を対象に，震後点検の効率化・高度化に向け以下の研究を実施した．1) 新技術を現場に適用するために求められる要件を整理，2) 新技術を利活用するための要件を確認できる標準的な性能評価方法を検討，3) 震後調査全体の一連の流れの中での新技術の適用方法の提案を行った．

キーワード：**道路橋，震後点検，新技術**

共同研究参加者名簿

機関	氏名	所属	担当期間
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	大住 道生 小林　巧 吉谷　薫	上席研究員 研究員 交流研究員	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3
一般財団法人 橋梁調査会	日里　正夫 堂前　満 入山　浩壱 大黒屋　信英 石井　豊 嘉賀　郁弥	企画部　調査役 企画部　調査役 企画部　調査役 企画部　企画課長 企画部　企画課長代理 企画部	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R6.3 R6.4～R7.3
株式会社 川金コアテック	姫野　岳彦 高畦　武志 長山　祐樹	執行役員橋梁事業部部長 メンテナンス部副部長 橋梁事業部市場開発部 グローバル開発 G 係員	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3
(共同開発※1) 立命館大学	川崎　佑磨 井上　和真	准教授 准教授	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3
株式会社 ニコン・トリンブル	木村 博之 大村 和則 増田 栄作 泉 隼人	マーケティング課マネージャー マーケティング課グループリーダー マーケティング課グループリーダー 開発課グループリーダー	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3
日本電気株式会社	久村　孝寛 木下　耕介 矢野　友貴宏	ビジュアルインテリジェンス研究所 主幹研究員 ビジュアルインテリジェンス研究所 研究員 ビジュアルインテリジェンス研究所 研究員	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3 R5.4～R7.3
パナソニックコネクト 株式会社	山本　俊明 内田　康秀	現場ｾﾝｼﾝｸﾞ事業本部 ｿﾘｭｰｼｮﾝ 3 部 ｼｽﾃﾑ開発 2 課 課長 機構開発部 機構設計 2 課 主事	R5.4～R7.3 R5.4～R7.3

※1 株式会社 川金コアテックと共同で AE 波に関する技術の開発を行う.

道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の利活用に関する共同研究
目次

第1章　はじめに

1.1　研究の背景および目的…… 1

1.2　報告書の構成…… 2

第2章　現行の震後点検の方法と課題

2.1　現行の震災復旧の流れ…… 3

2.2　道路橋の震後点検に適した点検支援技術の開発動向に関する予備調査 …… 5

2.3　道路橋の震後点検に技術を活用する際のニーズの例 …… 5

第3章　震後点検で収集すべき点検項目を明確化するための熟練技術者の思考様式の解明に向けた検討

3.1　熟練技術者の思考様式を解明することの必要性…… 8

3.2　思考様式の論理が可視化されることによる利点…… 8

3.3　熟練技術者の思考様式に関する仮説……10

3.4　熟練技術者の思考様式に関する仮説の検証……13

3.5　仮説演繹法による技術的判断の論理の例示……38

第4章　地震によって生じた損傷を代表できる計測指標

4.1　計測指標の収集方針……45

4.2　既往の知見から収集される計測指標の例……45

4.3　道路橋支承部の地震時損傷を再現する載荷実験により得られた計測指標 ……49

第5章　デジタル技術の能力の評価方法に関する検討

5.1　デジタル技術の能力評価の目的…… 102

5.2　計測原理に基づく既存技術の分類…… 103

5.3　計測精度の評価方法の検討…… 104

5.4　本章の結論と今後の課題…… 112

第6章　技術の適用性に関する事例的検討

6.1　ハンディ型レーザスキャナによる点群取得技術…… 113

6.2　TLS（地上型）レーザスキャナによる点群取得技術 …… 174

6.3　SfM/MVS による点群取得技術 …… 198

6.4　動画像を用いた微小変位計測技術…… 218

6.5　画像撮影技術…… 237

6.6　AE 波および AE 計測システムを用いたゴム支承の内部損傷評価 …… 266

6.7　フェーズドアレイによるピン部材の損傷検知技術 …… 293

6.8　衛星 SAR による橋の異常変位検知技術 …… 341

6.9　生成 AI（LLM）を用いた診断補助 …… 363

6.10　震後点検で使用する調査結果記入様式（案）と作成自動化ソフトウェア …… 391

6.11　本共同研究で扱ったデジタル技術の震後点検における適用タイミングの例 …… 407
謝辞 …… 408
付録
付録 1　震後点検調書様式（案）
付録 2　支承部の地震時損傷を再現する際か実験　設計計算書
付録 3　熟練技術者へのインタビュー調査結果（けばとり，整文）

第1章　はじめに

1．1　研究の背景および目的

大規模地震発生後の道路橋の震災復旧では，迅速な交通開放と確実な措置を両立することが社会的に要請される。それに加えて大規模地震発生後には，1) 時間的制約（例えば，人命救助の壁：72 時間），2) 機材・資材の制約（例えば，橋梁点検車や足場が無い条件での点検，復旧のための資材の不足），3) 人材の制約（例えば，行政職員や点検技能者が十分に参集できない状況，技術者数の不足），4) 電気・通信・水道などのライフラインや道路交通網の途絶といった制約条件が表面化する。こうした制約条件下で短期間に多くの道路橋を点検し，損傷の有無や被害の程度を評価して適切な措置を行うことは容易ではない。実際に 2016 年の熊本地震では震度 6 弱以上を観測した地域に約 15,700 橋の道路橋が存在し[1.1)]，これらに対して人間が点検～措置等を可能な限り効率的に，かつ，確実に行い一刻でも早く交通開放を行わなければならない状況が存在した。大規模地震発生後には突発的に膨大な数の点検需要が生じるため，今後もそれを人間のみが担い続けることは必ずしも合理的ではなく，デジタル技術等を活用し効率化することが望まれる。

そこで，本共同研究では大規模地震発生後の道路橋の異常時点検（以下，震後点検と呼ぶ。）に先端的なデジタル技術を導入することで，従来の人間を中心とした点検手法等では対応が困難であった時間的制約・空間的制約を乗り越え，より迅速で確実な震後点検を実現するための研究を実施した。

具体的には，各種画像撮影技術（UAV やアクションカメラ等），画像を解析し変位等を算出する技術，点群取得技術（レーザスキャナや SfM），衛星 SAR による変位検出技術，AE 計測技術，超音波探傷技術（フェーズドアレイ），生成 AI（LLM）等の多様なデジタル技術に対して，1) 実際の震後点検で使用する状況を想定した検討（令和 6 年能登半島地震での試行等），2) デジタル技術の能力（特に損傷検出精度）の評価方法に関する検討，3) 技術活用を前提とした調査調書案の作成及びその自動化ソフトの開発等を行った。

特に 2) のデジタル技術の能力評価について，あらゆるデジタル技術には損傷検出精度等の能力に限界があることは自明であるが，能力が不足することが問題ではなく，デジタル技術の能力の限界が不明確であることが問題であると考えており，それを明確にした上でデジタル技術を用いることが特に震後点検では重要となると考えている。なぜならば，震後には道路橋の走行安全性や構造安全性に直結する損傷が生じやすいことが想定されるため，措置方針に関するできるだけ確実な技術的判断等を迅速に行うことが重視されるためである。

確実な判断を下すためには自ずと確実な根拠が必要となるため，点検結果や診断結果には措置方針に関する技術的判断の確実な根拠となることを期待している訳であるが，デジタル技術の能力が不明確である場合は曖昧な根拠にしかならない。それが措置方針の決定において重要な根拠であれば再度別の方法（人間による近接目視点検等）で補完する必要があり，結果的に復旧が遅くなる。初めから

人間による近接目視点検を行った方が早く復旧できるのであれば，デジタル技術を用いる理由は乏しいものとなる。デジタル技術を使うことで逆に復旧の迅速さや確実さが損なわれては意味がない。

一方，能力の限界が事前に明確化されていれば，「判明していない情報」等を念頭に置いた技術的な判断が可能となる。そのため，デジタル技術の活用にあたっては，適用可能な損傷の種類や損傷検出精度の限界，運用可能な環境条件などを十分に把握し，適切な手順に基づいて点検を行う必要があると考えている。

以上のように，震後点検には多くの制約条件が伴うが，デジタル技術を取り込み技術的な限界や適用条件を踏まえたうえで最大限に活用することにより，社会的に要請される「迅速かつ確実な復旧」の実現を後押しできると考える。本報告書で示す検討が今後の震後点検における点検効率化・高度化の一助となり，さらなる技術開発や運用手順の整備に寄与することを期待する。

1．2　報告書の構成

第 1 章に研究の背景および目的を示し，第 2 章に現行の点検方法とその課題，第 3 章に震後点検で収集すべき点検項目を明確化するための熟練技術者の思考様式の解明に向けた検討，第 4 章に地震によって生じた損傷を代表できる計測指標，第 5 章にデジタル技術の能力の評価方法に関する検討，第 6 章に技術の適用性に関する事例的検討を述べる.

参考文献

1.1) 国土交通省：道路構造物の被災状況のとりまとめ，第 5 回道路技術小委員会，資料 2，2016.

第 2 章　現行の震後点検の方法と課題

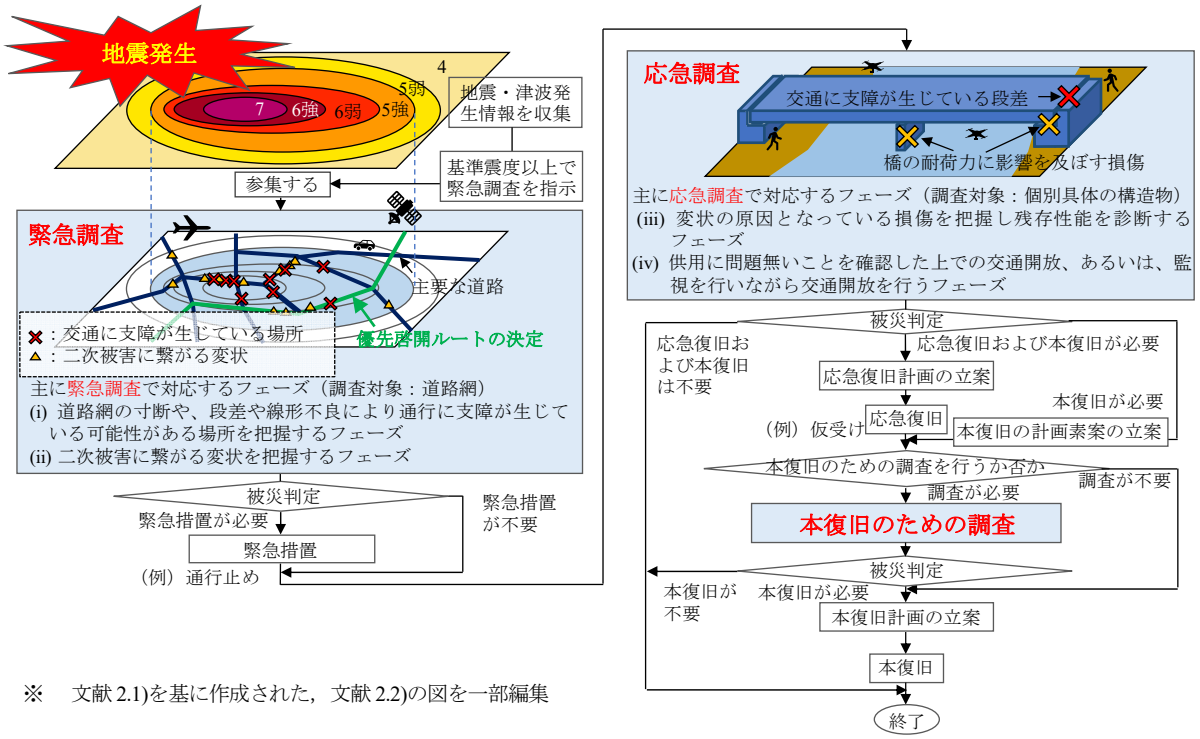
2．1　現行の震災復旧の流れ

図-2.1.1 に震災復旧の流れの例[2.1), 2.2)]を示す。国や地方自治体，高速道路会社等の道路管理者の主体により進め方は異なるが，震災復旧の流れはおおよそ類似しており図-2.1.1 の通りである。なお，震災復旧は道路網に対して行われ，道路橋だけが対象ではない。

地震が発生し基準震度を超えた場合にはまず，1) 概略的な被災状況および重大な被害の有無を把握するため緊急調査が行われ，2) その結果に基づいて通行規制や被害拡大防止措置等の緊急措置が行われる。緊急調査は車両走行によるパトロールや道路利用者からの通報の情報を基に行われることが多い。3) 緊急調査の後に道路構造物全体の被災状況を包括的に調査し，損傷の状態を踏まえた二次被害防止対策や道路交通確保の緊急性に基づく応急調査を実施し，4) 応急復旧が行われ，5) あわせて路線の重要性・構造物の被災度および復旧の難易度に基づく本復旧の計画素案が立案される。6) その後，本復旧計画を立案し本復旧が行われる。

震災復旧は緊急調査→緊急措置→応急調査→応急復旧→本復旧のための調査→本復旧（→復興）の順で進むが，各フェーズによって取り得る措置が異なっており，それゆえに震後点検で取得する必要のある情報もフェーズにより変化する。初動の緊急調査時には橋の耐荷力にとって致命的な損傷や車両走行に直接影響を及ぼす損傷の収集が必要とされ，本復旧のための調査では変状を網羅的に収集し恒久的な復旧に必要となる措置を行う。

現行の調査等では UAV 等一部技術を除き，技術の活用が進んでおらず，人間が行う場合が多い。



※　文献 2.1)を基に作成された，文献 2.2)の図を一部編集

図-2.1.1　震災復旧の流れの例

2．2　道路橋の震後点検に適した点検支援技術の開発動向に関する予備調査

本項では主に定期点検での技術の利活用を念頭に置いて整理が行われている国土交通省の「点検支援技術性能カタログ」[2.3)]から，震後点検に適した点検支援技術の開発動向に関する予備調査を実施した結果を述べる。調査は令和 4 年度に実施したため，その時点でのカタログを基に整理している。なお，震後点検を想定したカタログはない。

調査は，1) 地震で損傷を受けやすい箇所の調査に適した技術の開発動向と，2) 地中部，水中部，高所の調査に適した技術の開発動向の 2 つの観点で行った。令和 4 年度時点の「点検支援技術性能カタログ（橋梁)」には全 114 技術が掲載されていた。その中で 2 つの観点で抽出した技術数を**表-2.2.1** と**表-2.2.2** に示す。なお，カタログでは開発者が自己申告で技術のスペックや能力を整理し，その能力（精度や運動性能等）を確認されたものが掲載される。そのため，定期点検での活用を念頭に置いた技術が，震後点検のある用途に適しているか確認されたわけではない点には注意する必要がある。

加えて，例えば支承部の点検を想定した技術には小型 UAV 技術，ロボット+ひび割れ検出技術等が該当していた。また，桁端部や支承取付部の点検を想定している技術には内視鏡による狭隘部の点検技術，橋脚・橋台については，ひび割れ検出技術やうき検出技術が該当していた。水中部の調査には洗掘を発見する技術等が該当していた。

定期点検では経年劣化を発見することが重要であるが，震後点検では地震動による損傷を発見することが重要である。同じ部位の点検であっても変状の様態は作用によって異なるため，点検目的に照らして，慎重に技術を選択する必要がある。

表-2.2.1　地震で損傷を受けやすい箇所の調査に適する可能性がある技術の開発数

点検部位	支承部	支承取付部	橋台・橋脚・基礎	桁端部
登録されている数	18	3	46	2

表-2.2.2　地中部，水中部，高所の調査に適する可能性がある技術の開発数

点検部位	地中部	水中部	高所
登録されている数	0	13	26

2．3　道路橋の震後点検に技術を活用する際のニーズの例

1 章で述べた通り，大規模地震発生後には 1) 時間的制約，2) 機材・資材の制約，3) 人材の制約，4) 電気・通信・水道などライフラインや道路交通網の途絶等の制約条件が顕在化する。その制約条件の中で点検～措置等を可能な限り効率的に，かつ，確実に行い一刻でも早く交通開放を行わなければならない。簡単には，これら要件を満たす技術が震後点検で役立つ技術である[2.4)]。

図-2.3.1 に震災復旧のフェーズ毎の点検ニーズの変化のイメージを示す。**図-2.1.1** でも述べたが，震災復旧には発災直後の初動から復旧，復興まで多段階のフェーズがあるが，それぞれに技術に求められる要件が異なる。震後点検には様々な調査が存在しており，それら調査の全てにデジタル技術の活用による効率化や高度化の余地があると同時に，それぞれの調査に各種デジタル技術の向き不向き

が存在する。例えば，低精度であっても道路網の広い範囲のおおよその状態を把握できる衛星等の技術，道路橋の特定の部材の状態を高精度に把握できる点検支援技術等がそれに該当する。

例えば，緊急調査では(i)落橋により道路網が寸断されている場所や，落橋に至っていなくとも段差や線形不良により通行に支障が生じている可能性がある道路橋を把握するフェーズ，(ii)支承部の損傷等の二次被害に繋がる変状が生じていることを把握するフェーズが存在する。その後の応急調査では，(iii)変状の原因となっている損傷を把握し，残存性能を診断するフェーズ，(iv)監視を行いながら交通開放を行うフェーズ等が存在する[2.2)]。

デジタル技術を用いて震後点検を効率化・高度化するためには，各フェーズのニーズに沿ったデジタル技術の開発が必須である。震後点検ではデジタル技術に対して，全てのフェーズにおいて迅速な調査であることが要求され，調査対象に応じた所要の損傷検知精度が要求され，さらに，発災後の状況（道路網の寸断，悪天候，夜間等の点検の時間帯，人員不足，使用できる機材等の条件（アクセス可能性，計測時の距離，停電下の運用，使用の簡便さ等））に対応できることが要求される。

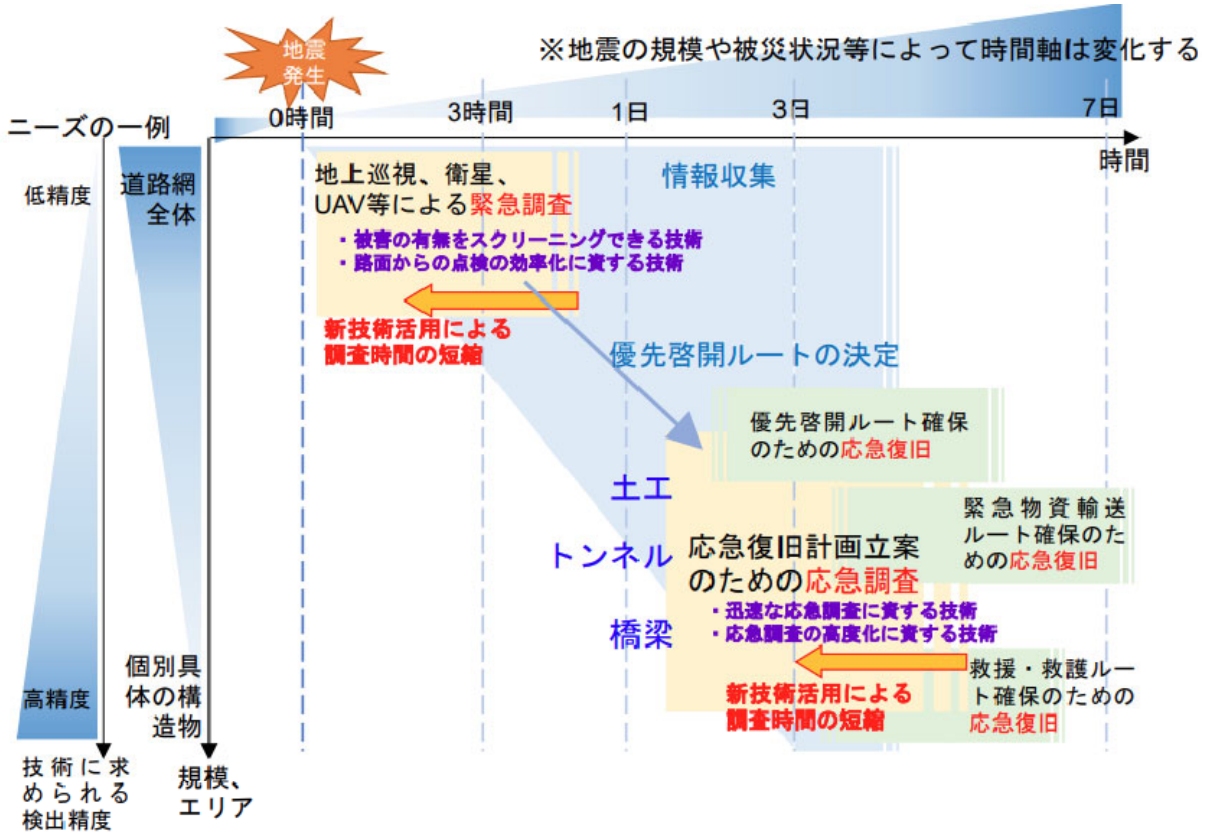


図-2.3.1　震災復旧のフェーズ毎の点検ニーズの変化のイメージ

参考文献

2.1) 日本道路協会：道路震災対策便覧，震災復旧編，令和 4 年度改訂版.

2.2) 小林巧，大住道生：道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けたデジタル技術の利活用に関する検討，土木技術資料，特集，関東大震災から 100 年後の耐震技術，pp.32-35，令和 5 年 9 月.

2.3) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ．https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/（最終閲覧日：2025 年 3 月 5 日）

2.4) 吉谷薫，小林巧，大住道生：道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の適用性，～令和 6 年能登半島地震での試行事例～，土木技術資料，66-9，2024.

第 3 章　震後点検で収集すべき点検項目を明確化するための熟練技術者の思考様式の解明に向けた検討

3．1　熟練技術者の思考様式を解明することの必要性

点検を効率化するためにデジタル技術を導入する際には，ただデジタル技術を使用すれば必ず点検が効率化されるわけではない。

ある変状に関する情報を点検で収集する際に人間技術者が点検するよりも点検時間が短くなる，あるいは，人間技術者が点検するよりも費用が低くなる等の条件をデジタル技術が満たすことで初めて点検が効率化される。さらにその前提として，デジタル技術で収集した変状等の情報はすべからく措置方針の決定に資する技術的判断の根拠となることが望まれる。変状があることも，無いことも，判断の根拠としては重要である。デジタル技術で収集した情報が技術的判断に何も生かされない場合は，デジタル技術を活用する理由は乏しいものとなる。

そのため，この技術的判断に必要な「点検項目」を要件として設定することがデジタル技術活用時には重要であると考える。人間技術者は様々な変状を目視や触診等で把握できるが，それと比較して多くのデジタル技術は原理的に「変位量」や「ひずみ量」等のある指標でしか変状を測れず，また，その指標の多くは，部材等の状態を間接的に把握するものである。なお，ここでの「ある点検項目」とは，点検の目的である措置方針に関する技術的判断を下すためにその判断の根拠となる変状を指す。それが明らかであれば，たとえば，「変形している」等の人間技術者が見た目で把握できる変状を，変位や角度等に変換する理由が生まれ，また，変状を指標に変換することで初めて多くのデジタル技術が活用でき，それにより人間の点検を一部代替できる可能性が生まれる。この変状を指標に変換する観点については **4 章**で検討する。

本章では，その前段の措置方針に関する技術的判断を下すためにその判断の根拠となる変状とは何か，ということを論点の一つとしている。要するに，熟練技術者はどのような変状を根拠として通行止め等の判断を下すのか，という問いである。それを明らかにするためには，まず，熟練技術者の思考様式を解明する必要がある。思考様式が解明されることで，判断（結論）とその根拠（変状）の因果関係が明確となり，逆説的に判断に必要となる変状を明確化できると考える。

これらを明らかにするため，本章では熟練技術者の思考様式が仮説演繹法に基づくという仮説を立て[3.1]，それを半構造化インタビュー等で検証[3.2]する。

3．2　思考様式の論理が可視化されることによる利点

道路橋の震災復旧では国内では便覧[3.3]や指針[3.4]として，たとえば米国ではマニュアル[3.5),3.6)]として技術的判断を下す際の指針が整備されている。しかし，これらの多くは被災経験に基づく地震後に優

先すべき橋梁の点検項目やいわゆる「危険な損傷」の例示が多く，なぜ通行止めが必要かや，なぜ重大な二次被害につながる危険があるかは読み手の理解や解釈によって補完され，現場で個別に技術的判断が下されている。

大規模地震は稀にしか生じないため被災事例を収集し整理することは有用であるが，それだけでなく，損傷により「なぜ通行止めを行うか」という技術的判断の過程が論理的に正しく明確に記述されると措置の必要性を説明する際に有用である。

なぜならば，技術的判断の過程が論理的に正しく明確に記述されることにより a) 誰でも一連の技術的判断の過程の正当性が確認でき（技術的判断の正当性の確認），b) 損傷により通行止めを行うことの説明性が担保され（技術的判断の説明性の担保）， c) 技術的判断に最も影響するという意味での優先点検項目が明確化され（点検の効率化），d) その論理の前提を超える事態がどこにあるのかを議論する糸口になる（技術的判断の不確実性の明確化）ためである。

また，これらに加え人による判断を前提とした合理化に留まらない重要な利点も存在する。それは e) 技術伝承に寄与する点（技術伝承に寄与），f) 内面知[3.7)]の可視化により維持管理におけるデジタルトランスフォーメーション（以下，DX という。）の実質化に寄与する点（維持管理の DX の実現に寄与）である。

以上に挙げた項目（a)〜f)）は技術的判断における論理を可視化することの必要性や利点を全て示せているかは不明であるが，文献[3.1)]で提示された必要性や利点である。これらについて下記で引用する。

a)　技術的判断の正当性の確認

地震時には橋の構造安全性に直結する損傷が生じやすいため判断を行う人の技術的判断の正当性が道路管理者等の技術的判断に関わる者の誰もが確認できることは重要である。その際に，判断を下すべき責任ある人が，状況や情報を踏まえて判断を下し，偽情報や不正な情報が混入していないことを確認できることが重要である。なお，ここでの「正当性」は行為の結果や手続きとしての道徳的正当性[3.8),3.9)]の意味で用いている。

b)　技術的判断の説明性の担保

地震時には橋の一部部材に損傷が生じた状態でそれが橋の機能に影響を及ぼさないことを技術的に判断，又は損傷による影響が小さいことを技術的に判断，あるいは緊急措置・応急措置を行った上で交通開放を行う行政的で技術的な判断を行う状況が想定される。その際に「なぜ交通開放が可能と（行政的・技術的に）判断したか」，又は，「なぜ通行止めを（行政的・技術的に）判断したか」を道路管理者は道路利用者に説明する必要がある（専門的アカウンタビリティの観点[3.10)]）。その際にも明確な論理は必須である。

c)　点検の効率化

点検においてどの部位のどのような損傷を優先して発見するべきかは，必ずしも明らかにされていない。橋の措置の必要性の技術的な判断の根拠となる点検結果が明確化できればその「根拠」が橋の状態に直結する損傷であるため必要以上に点検結果の正確さや記録を求める必要がなく，「根拠」とな

る損傷を収集すればよく，その結果，点検の効率化にもつながる。

d)　技術的判断の不確実性の明確化

ここでの「技術的判断の不確実性」とは点検結果等取得した情報の不完全さに起因する不確実性（例えば，点検手段に内包される損傷検知精度の不足や外観目視で把握が難しい損傷の存在等），点検結果を解釈する際の不確実性（例えば，変状としてのひび割れから損傷を特定する段階において，人により損傷の解釈が異なる場合等）等を含めた技術的判断の結果に影響を及ぼす不確実性全般を指す。判断を行う人の論理を明確化することが出来れば，形式的となり，論理の根拠が明確となり，その前提を超える事態がどこにあるのかについて考えることが可能となり，現行の点検が有する不確実性に関する議論の一助となる。

e)　技術伝承に寄与

技術経験豊富な団塊の世代が第一線を退き，技術力の低下が指摘されている中で建設業界の中でも若い世代への技術継承が喫緊の課題として議論されている [3.11)]。特に耐震工学の分野では道路橋等構造物に甚大な被害を及ぼした 1995 年の兵庫県南部地震から 30 年近くが経過し，そこからの復旧・復興，技術水準の向上，技術基準や技術資料の抜本的な改善を行った熟練技術者の方々が第一線を退こうとしている。その時代を経たことにより耐震性能が向上し，地震に強い安心・安全な社会の実現に大きく近づいたことは事実であるが，一方で地震による被災は今なお生じている。地震発生直後の迅速で確実な判断には技術力が必須である。技術的判断の可視化はそれら技術伝承にも資すると考える。

f)　維持管理の DX の実現に寄与

国として点検支援技術等の利用が推進されている [3.12)]が，デジタルの利用は一手段であり，維持管理等を効率化するためにデジタルを導入することがデジタイゼーション（Digitization），維持管理等のプロセス全体をデジタル化することがデジタライゼーション（Digitalization），デジタルの活用を通じて社会制度の変革を促すことが DX（Digital Transformation）[3.13)]である。その上で，維持管理の DX を実現するためには人の行為（点検・記録・措置）の合理化だけではなく，人の判断（いわゆる診断等の技術的判断）の合理化が必要でその手段の一つとして維持管理のデジタル化に向けた検討を行うことが重要である。人の行動や判断の合理化の過程に暗黙知の形式知化があり，暗黙知はデジタルに組み込むことが困難であるためこれら検討が重要と考える。

3．3　熟練技術者の思考様式に関する仮説

本節では，文献 [3.2)]で検討された論理学的アプローチに基づき，熟練技術者の思考様式に関する仮説を立てる。論理の内，論理学の知見に基づき体系立てられて示されるものを本報告書では論理体系と呼ぶ。

技術的判断を行う際の論理体系を論じた文献 [3.14)-3.17)]は複数存在する。西川 [3.14), 3.15)]は「点検により見つけた現状の損傷から逆算して複数の可能性の中から損傷（病名）を特定し，原因を除去しつつ補修する，これが維持管理の仕事」とした上で維持管理における診断は帰納法だとしている。金澤 [3.16)]は

診断におけるバイアスを軽減させ誤診を防ぐ観点から認知科学的に演繹法，帰納法，仮説形成法を組合せて診断することが良いことを述べている。杉崎ほか [3.17]はルールベースなどの演繹と帰納の連携からAI活用の在り方を模索している。

このように技術的判断を行う際の論理体系は帰納法か演繹法か，その他か意見が分かれているが道路橋の技術的判断の論理を可視化する方法として本研究では以下の考察に基づき仮説演繹法 [3.18]というアプローチを仮説として採用する。

図-3.3.1 に仮説演繹法の論理体系の例を示す．仮説演繹法に基づく技術的判断では点検結果を基にそれらを整理・分析して帰納的に仮説を立て（仮説法），その観念上の仮説に整合する論拠を大前提として演繹的に技術的判断の結果を導くものである。ここでは，「根拠」を点検結果等の事実（**図-3.3.1** の「比較的容易に発見できる損傷」），「論拠」を事実から知識等を用いて推測（**図-3.3.1** の「比較的容易に発見できる損傷から導かれる仮説」）する際に必要な知識等とする。

帰納法では可能性の高い結論しか下せないため意識のうちにある事物の像である観念と現実を一致させるために，演繹法を用いて真とみなせる論拠の命題（大前提）と証明済みの事実（技術的判断の結果に直結する損傷）を基に実然的な技術的判断を行うものである。

ここで用いた観念には定義が諸説あり [3.19]，それと厳密に定義が一致するような使い方ではない点に注意が必要である．本研究で扱うものはメンタルシミュレーションと呼ぶ方が適切である [3.20]．そのような意味で観念を用いている．また，本研究では議論を単純化するため演繹的論証に用いる論理体系を定言的三段論法” $(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow C) \vdash (A \rightarrow C)$ ”に限定する。

また，文献 [3.1]の**図-3.3.2** の図式を仮定することにより論理学の下記ルールを技術的判断における論理に外挿できる。

・論理学は論理体系の正しさを保証するが結論の真偽は保証しない。
・命題の真偽で構成される論理（体系）は前提となる命題の真偽に依存して結論の真偽が決定される。

論理学は「演繹」を扱い，正しい思考の形式・法則を研究する学問であり，論理学で示された論理体系を用いることでその論理の正しさが保証される [3.21]。

論理学では論理体系の正しさを保証するが結論の真偽は保証しない。結論が真であることを保証するためには前提が真であることを示す必要があるが本研究では前提が真であることを「既往の文献や，橋梁技術者にとって常識である知識」に基づき技術的判断することとする。

「科学の研究が正しいとされるのは実験結果が真理を反映するからではない。その時点における科学者集団の知見に照らして理論が整合性を持ち，説得力がある，そして実験値が理論予想とほとんどずれない場合に，正しいと暫定的に認定される」[3.22]ことと同様に橋梁技術者集団の知見に照らして論証が整合性を持ち説得力がある，そして技術的判断が推論とほとんどずれない場合に正しいと暫定的に認定され得ることを本研究では前提としている。「既往の文献や，橋梁技術者にとって常識である知識」にも根拠や論拠は存在するはずであるが，本研究において論拠の最小単位を「既往の知見や橋梁技術者にとって常識である知識」とした。

ここでの「論拠の最小単位」とは，無条件に真だと認めてしまう論拠の命題である。「既往の文献や，橋梁技術者にとって常識である知識」にも根拠や論拠は存在するが，その根拠や論拠は暗黙知で構成される場合も多く，文章として記述され形式知化されているとは限らないものである。なお，ここまでの論理学的アプローチの適用限界については，文献[3.1)]で言及されている。以上より，熟練技術者の思考様式を仮説演繹法であるという仮説を立てた。次節ではその仮説を検証する。

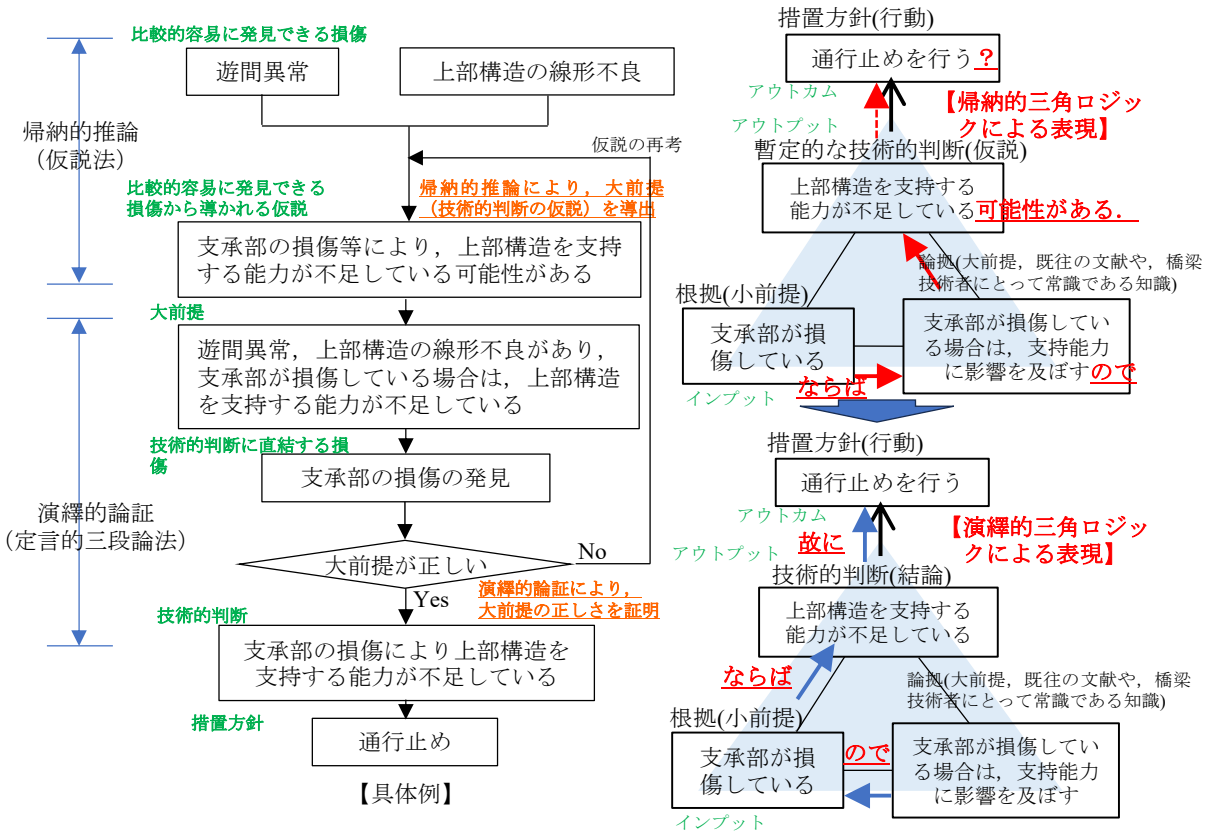


図-3.3.1　仮説演繹法の論理体系の例

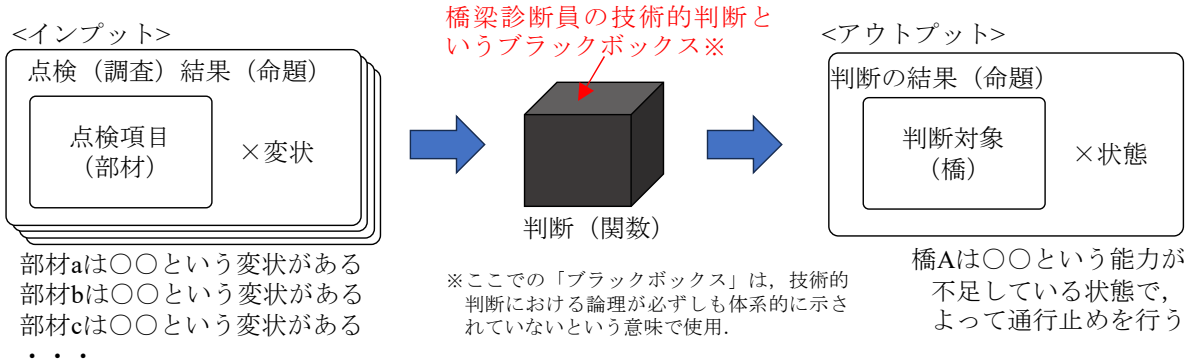


図-3.3.2　技術的判断の流れの図式

3．4　熟練技術者の思考様式に関する仮説の検証

本節では熟練技術者の思考様式が仮説演繹法に基づくという仮説[3.1)]に対して，それを実際の橋梁診断員に対する半構造化インタビューや質問票調査等を用いて検証[3.2)]する。

3.4.1　検証方法

3.4.1.1 調査対象者

調査対象者は合計 14 名であり，その多くが日常の定期点検業務で道路橋の点検・診断に携わる。後述の質問票調査を行う際に，調査対象者の現職に就く前の経歴や，定期点検や震後点検での診断経験橋梁数を調査した。前職の経験や知識が橋梁の点検や診断に活かされ，回答に反映されると考えたためである。

図-3.4.1 に定期点検の診断経験がある橋梁数と点検・診断従事年数の関係を，**図-3.4.2** に震後点検の診断経験がある橋梁数と点検・診断従事年数の関係を，**表-3.4.1** に前歴を示す。これらによると 14 名の内，2 名は道路橋の点検・診断の経験がない。定期点検の経験（**図-3.4.1**）では，30 年間で約 5,000 橋の点検・診断を経験している調査対象者もいるが，多くは 15 年以下で 1,000 橋の経験を持つ。一方，震後点検の経験（**図-3.4.2**）を持つ調査対象者は 5 名に留まり，多くは 100 橋以下である．前歴は建設コンサルタントやゼネコン，橋梁メーカー等である（**表-3.3.1**）。

なお，調査は 2 日間に分けて実施した。14 名は統計的なサンプル数としては多くは無いが，熟練技術者の総数や調査対象者の時間的制約等を考慮し，人数を決定した。1 日目には道路橋の点検・診断の経験がない 2 名を含む計 7 名，2 日目にその他の 7 名に対して調査を行った。両日とも，午前中に質問票調査を実施し，午後にインタビュー調査を実施した。なお，時間の制約により，後述の Q3 のみ一人，回答できずサンプル数が少ない。

3.4.1.2 質問票調査項目

質問票調査では 3.4.1 a)の内容に加え，損傷が橋の能力に及ぼすことに関する感覚等を調査した。ここで「損傷が橋の能力に及ぼすことに関する感覚」とは，**写真-3.4.1** と「一般的な 2 径間連続桁橋（4 主桁の上部構造，可動－固定－可動の支持条件）に対して，ご自身の感覚に当てはまることについて教えてください」と質問を提示し，橋の部材に対してその損傷程度と橋としての能力の関係に対して保有する感覚について調査した。

例えば，「主桁がどのような状態であれば橋の耐荷力に影響を及ぼさないと判断するか教えてください」という問いに対して，1) 損傷なし，2) 残留応力が生じていることが疑われるものの弾性，3) 一つの桁が降伏，4) 複数の桁が降伏，5) 複数の桁が座屈や圧壊と選択肢を提示し，仮想的な点検場面を想定し，調査対象者が保有する感覚の程度を調査した。

3.4.1.3 半構造化インタビュー（焦点インタビュー）

半構造化インタビューにはいくつか種類があるが，本研究では「焦点インタビュー」[3.23)]を用いる。焦点インタビューでは調査対象者等に対して一様な刺激（画像等）を与えた後に，あらかじめ決められた質問を中心にインタビューを行う。質問は非構造化質問，半構造化質問，構造化質問の順番で行い，徐々に構造化を増した質問を行う。まず非構造化質問から行うのは，インタビュアーの認識の枠組みを調査対象者に押し付けることを防ぐためである[3.23)]。また，インタビューに併せてアイトラッキング計測等を実施した。詳細は後述する。

なお，インタビューによるデータは，調査対象者自身が意識・言語化できた内容（主に形式知表現）に限定される。そのため，インタビューによるデータは，認知心理学的な思考過程を必ずしも完全に再現したとは言い難いことが指摘されている[3.23)]。そもそも形式知化できないものが暗黙知に分類される[3.1),3.24)]ため，暗黙知的な技能や無意識的な判断過程は，インタビューだけでは把握が困難である。前述した通り，本研究では報告書や口頭説明等の形式知表現（言語・記号）を分析対象としている。これが調査方法としての限界である。

また，説明が他者を想定した社会的なものである以上，本研究で扱う仮説演繹法に限らず，多くの説明がそうであるように，完全な形式知化や完全な論理則に基づく説明が行われていない場合であっても，説明は説明として成立する。人間は誰しも，一般的に完全な因果関係を説明することはせず（できず），説明を受ける側が共通の文化的背景及びそれに付随する知識等を有し，また，その説明の内容を信じること，他者の中で自身と同様の理解で再構成されることを暗に前提としている[3.2)]。これは形式知化の限界でもある。

形式知化を行うことと思考様式を示すことの違いはこの点にあると考えている。この観点から，思考様式を調査するための方法としてインタビューを選択している。

a) 提示した画像及び質問項目

本研究で使用した刺激は**写真-3.4.2～3.4.5** である。**写真-3.4.2** は PCT 桁橋の塩害の画像，**写真-3.4.3** は実際の震後点検を想定し足場や橋梁点検車が配備できず，下路点検ができず，橋面から状態を推測しなければならない状況を想定した画像，**写真-3.4.4** は鋼鈑桁端部が腐食している画像，**写真-3.4.5** は震後点検に特有の段落とし部を起点とした曲げせん断破壊が生じている画像である。写真は文献 3.24)～3.26)から引用した。

定期点検に多く見られる環境劣化の画像（**写真-3.4.2**，**3.4.4**）と震後点検に特有な地震動による損傷の画像（**写真-3.4.3**，**3.4.5**）を混在させた理由は，1) 定期点検と震後点検の際の推論の違いを把握するためであり，2) また，震後点検では地震動による損傷に加え，経年劣化も同時に生じている現場が多いため，損傷の原因が劣化であるか地震動であるかを判別することも重要であるためである。また，刺激として少数の画像を選んだ理由は推論の効果をより明確に把握するためである。

例えば，前述の通り，震後点検では足場等の配備ができずに下路点検ができない現場も多い．定期点検でも部材内部や地中内部も含め，全ての部材等を近接目視で把握できる訳ではない。そのため限

られた情報から推論することが重要になるが，正にその推論の論理性を把握したい意図があったためである。

これら画像を PC の画面に表示した状態で**表-3.4.2** の質問をした。なお，場面の想定と非構造化質問の 2 つの役割を担う Q1 の質問は全員に実施したが，それ以外の質問は必要に応じて実施した。なぜならば，調査対象者により Q1 の質問を行った時点で，変状の発見～措置方針に関する内容まで全てを答える人や，画像から見つかる変状のみを答える人等，反応が様々であるためである。質問に際してはできるだけ誘導しないように Q1 を聞いた後の時間を長く取る等の配慮を行った。また，一つの画像に対して 10 分程度の回答時間とした。

なお，**表-3.4.2** の質問項目は文献 3.1)で考察されている仮説演繹法を技術的判断の論理に適用した例に基づいて設定した。**図-3.4.3** に仮説演繹法の流れと質問の対応及び仮説演繹法を実際の技術的判断に適用した例[3.1)]をそれぞれ示す。この例では「比較的容易に発見できる損傷をインプットとし，「既往の文献や，橋梁技術者にとって常識である知識」を論拠として，帰納的推論に大前提（暫定的な技術的判断（仮説））を導き，そこから技術的判断の結果に直結する損傷等をインプットし，論拠に基づいた演繹的論証を行い，技術的判断の結果を実然的に述べる形でアウトプットし，アウトカムである「通行止めを行う」措置方針が決定される論理体系がある」[3.1)]とされている。

これは要するに，点検結果（事実，根拠）から画像や眼前にない損傷（根拠の仮説）を推測し，そこに知識に基づく推測（論拠）を加え，結論の仮説を導くと同時に帰納的に正当化し，その後の追加調査等で根拠の仮説が妥当であることを確認した上で，仮説が事実に変化することで演繹的な論証が成立するという論理モデルでモデル化した，一連の思考様式である。

ここで重要な点は，根拠の仮説の妥当性が追加調査等で確認された場合に，仮説が事実に変化することで演繹的論証が成立する点である。つまり，**図-3.3.1** の前半の帰納的推論と，後半の演繹的論証が，根拠と論拠の入れ替えにより成立する。この特性から前半の帰納的推論が検証できれば，自ずと後半の演繹的論証の検証にもなる。なぜならば，根拠と論拠が形式知表現として表出していれば，後はそれらの真偽を確認するだけであるためである。

以上より，以下では前半の帰納的推論の検証を行う。しかし，一方で，追加調査等で根拠の仮説が誤りであることが判明した場合（**図-3.3.1** の「大前提が正しい」が No の場合）には，点検結果（事実）が更新され，再度，根拠の仮説が設定される。仮説の設定とその仮説の検証の反復により，妥当な結論に到達するという論理モデルであるため，厳密には「仮説の検証」及びその反復のみ今回の検討方法では，検証できない点に留意する必要がある。

一方，一般に熟練技術者は複数の仮説を立てるわけであるから，仮説演繹法の流れを検証する本研究の目的に照らせば，この影響は少ないと考えられる。

本節では，道路橋点検における技術的判断で仮説演繹法の思考様式が卓越するかを検証する目的があり，**図-3.4.3** の Q1 以外は，調査対象者の回答に対する根拠や論拠を探索するための質問を想定した。

b) アイトラッキング計測

画像（**写真-3.4.2～3.4.5**）を刺激として，アイトラッキング計測を実施した。用いたアイトラッカーはTobii社のPro ナノ(サンプリングレート:60 Hz, 角膜反射法, 精密度:最適条件で0.10° RMS2, 正確度：最適条件で0.3°）である。PCはMicrosoft社のSurface Pro7（画面サイズ：12.3インチ）を用いた。

アイトラッキング計測は調査対象者が点検時にどの部位に着目し，変状の有無を判断しているかを可視化する目的で用いた。これは**図-3.4.3** での比較的容易に発見できる変状から仮説を立てる際に，変状を変状として認識しているか等の判断に関する場面の考察に用いることを想定している。

c) 録音等とインタビュー結果の整理方針

インタビュー調査時には調査対象者に許可を取り録音等を行った。録音データに対しては，逐次起こし→けばとり→整文の順番で整理した。**図-3.4.4** に逐次起こしの例を，**図-3.4.5** にけばとり文の例を，**図-3.4.6** に整文の例をそれぞれ示す。整文の作成に際しては以下の方針で行うこととした。

i) である調に整える。

ii) 命題的記述に整える。主語（A）が状態（B）である等．観察に基づく事実には下線を引く。

iii) 写真からわかる事実を述べる際には断定「～である」「～がある」と記述する。

iv) 推測された事象を述べる際には「～可能性がある」と記述する。

v) そのほかの意見については「～と考える」と記述する。

vi) 命題間の接続を意識した整文とする。根拠を述べる時には「～ため」，論拠を述べる時には順接の「～ので」「～のであれば」，逆接の「～であっても」を用いる。措置方針に関する内容を述べる際には「ゆえに～」を用いる。根拠は写真からわかる事実に基づいた発言，論拠は写真のみではわからない推測や知識等を含む発言とする。

vii) 常用漢字表，当用漢字表の漢字に統一する。

viii) 同じ回答者の表記ゆれは統一するが，別の回答者間の回答の表記ゆれは統一しない。「橋脚」と「ピアー」，「伸縮装置」と「フィンガー」と「櫛歯」等。

ix) 「耐荷力」「耐久性」「その他の性能」は統一する。

なお，前述の通り，演繹的論証が「根拠（の仮説）の検証」により成立することを踏まえれば，写真1枚を提示し，所見を述べる本調査では原理的に帰納的推論しか行い得ない。

根拠と論拠の入れ替えにより，帰納的推論が演繹的論証に変化する論理モデルであるので検証としては帰納的推論で実施しているが，少なくとも上記特性より，本調査結果はすべて帰納的推論であるといえる。たとえば，「塩害により鋼材が腐食膨張しているので，コンクリートはりに軸方向のひび割れが生じている。」という発言があった場合，形式としては論拠（塩害，腐食膨張）→根拠（軸方向のひび割れ）の順であり，演繹的論証となる。しかし，**写真-3.4.2** のみでは塩害であることも，腐食膨張していることも確証し得ないため，この論証は成立しない。加えて，日本語に特有の曖昧さから，実際には帰納的推論「コンクリートはりに軸方向のひび割れが生じているため，鋼材の腐食膨張が生

じている可能性がある。原因は塩害である可能性がある。」を行っている場合であっても，これらは形式が異なりその確度が異なるだけで，意味的にはほぼ同じとなる。

以上の「本調査では原理的に帰納的推論しか行い得ない」という理由から，整文を行う際に根拠→論拠→結論の順番になるように意識的に並べ替えている。この整文の妥当性は 3.4.2.4 で定量的に検証する。

3.4.1.4　倫理的配慮

調査対象者に以下の 9 項目について説明を行い，承諾が得られた調査対象者から同意書に署名を得た。説明内容は，1) 個人情報の利用目的及び目的外利用の禁止について，2) 個人情報の第三者提供の不可について，3) データ削除依頼への対応及び個人情報の開示依頼の方法について，4) インタビュー時の録音・録画への同意について，5) インタビュー時のアイトラッカーによる調査への同意について，6) インタビュー時の心拍計測への同意について，7) 質問票調査への同意について，8) 後日の追加質問について，9) 調査結果公開時の手続きについてである。

また，本研究は国立研究開発法人土木研究所で倫理審査を受けた。インタビュアーは，調査対象者に対して本研究の目的について説明し，書面による同意を得た後に半構造化インタビュー等を実施した。

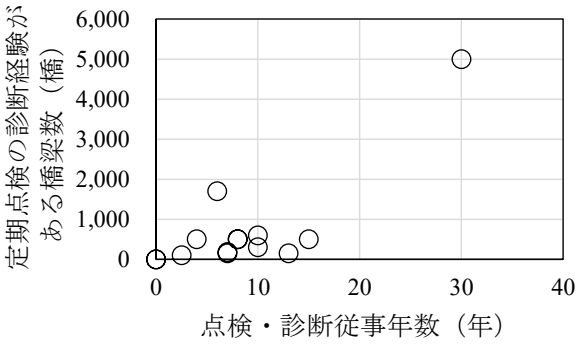


図-3.4.1　定期点検の診断経験がある橋梁数と点検・診断従事年数の関係

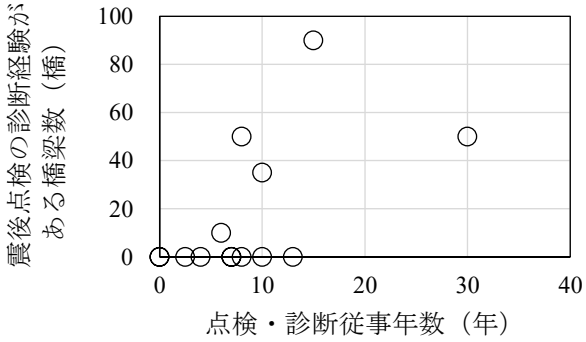


図-3.4.2　震後点検の診断経験がある橋梁数と点検・診断従事年数の関係

表-3.4.1　調査対象者の前歴（複数回答可）

	現職に就く前の仕事歴	人数（人）
1	なし	1
2	コンサルタント（道路橋の点検）	3
3	コンサルタント（道路橋の設計）	3
4	その他コンサルタント	2
5	ゼネコン	2
6	鋼橋メーカー	3
7	PC 橋梁メーカー	1



写真-3.4.1　例示した一般的な 2 径間連続桁橋（4 主桁の上部構造，可動－固定－可動の支持条件）



写真-3.4.2　PCT 桁橋の塩害



写真-3.4.3　地震後に橋面から橋の状態を推測する状況



写真-3.4.4　鋼鈑桁端部の腐食



写真-3.4.5　段落とし部を起点とした曲げせん断破壊

表-3.4.2　半構造化インタビュー時の質問項目

Q 1.	あなたは今，点検をするために橋の現場に着きました．　この写真で気づいたことを全て述べてください．
Q 2.	○○を見つけ，あなたはどう思いますか？
Q 3.	あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じていますか？
Q 4.	この写真から，この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われますか？
Q 5.	○○性能の低下を疑った理由は何ですか？
Q 6.	もし疑いを持った時，（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいですか？
Q 7.	答えた見立てについて，それの根拠となる考え方は何ですか．（知識，経験，常識，学習等)
Q 8.	最後に，今の回答結果の正しさの自信について 10 点満点で教えてください．

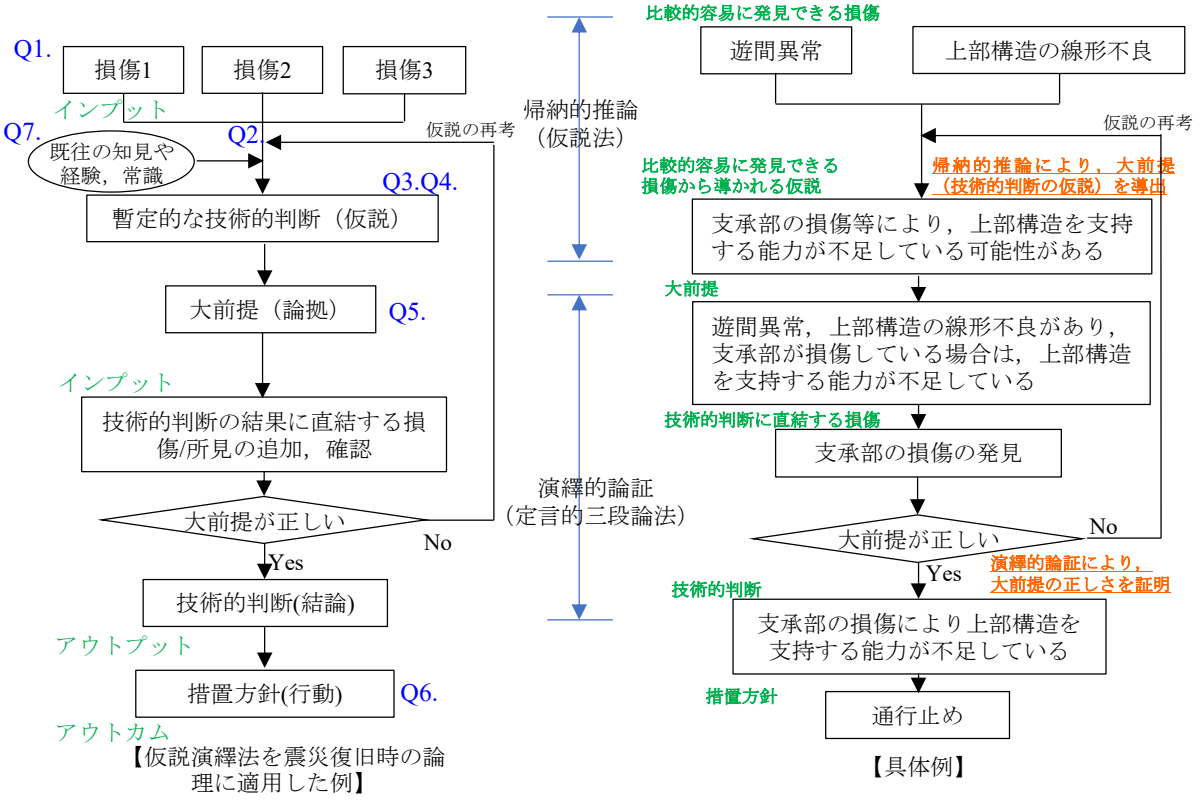


図-3.4.3　仮説演繹法の流れと質問の対応及び仮説演繹法を実際の技術的判断に適用した例 [3.1)]

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. **はい。えー，**まずコンクリート橋，**まぁ，**RC 橋か PC 橋か，ちょっとはっきりとしませんけれども，**えー，**下面側のウェブに亀裂が多数見られると。**と**いうことと，下面にも橋軸方向の亀裂が何カ所か見られます。**えー，**これについて，考えられる理由というのは，もし RC 橋だとすれば，何らかの理由で塩分，もしくは水分が桁内部に侵入して鉄筋が腐食し，**えー，**かつ，膨張しているということでこのようなひび割れが起きている可能性があるという風に考えられます。**まぁ，**その他，一部分ですけれどもコンクリート表面に塗装をしているような跡が見られます。塗装そのものの目的というものははっきりとしませんけれども，部分的なものですから，何かひび割れ，もしくは，**あー，**剥落を抑えるために，施工された可能性もありますけれども，**まぁ，**このような中途半端なものですと，全体的な防食機能としては不十分なのかなという気はしています。**まぁ，**概略以上です。

図-3.4.4　逐次起こしの例（**写真-3.4.2** の例）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. まずコンクリート橋，RC 橋か PC 橋か，ちょっとはっきりとしませんけれども，下面側のウェブに亀裂が多数見られるということと，下面にも橋軸方向の亀裂が何カ所か見られます。これについて，考えられる理由というのは，もし RC 橋だとすれば，何らかの理由で塩分，もしくは水分が桁内部に侵入して鉄筋が腐食し，かつ，膨張しているということでこのようなひび割れが起きている可能性があるという風に考えられます。その他，一部分ですけれどもコンクリート表面に塗装をしているような跡が見られます。塗装そのものの目的というものははっきりとしませんけれども，部分的なものですから，何かひび割れ，もしくは，剥落を抑えるために，施工された可能性もありますけれども，このような中途半端なものですと，全体的な防食機能としては不十分なのかなという気はしています。概略以上です。

図-3.4.5　けばとり文の例（**写真-3.4.2** の例）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. RC 橋か PC 橋かは判断ができない。コンクリートの桁下面とウェブ側面に何か所かひび割れがある。もし，RC 橋であれば，何らかの理由で塩分もしくは水分が桁内部に侵入し鉄筋が膨張するので，それによってひび割れが生じた可能性がある。その他，コンクリート表面の一部で塗装された跡がある。部分的な塗装であるため，ひび割れや剥落を抑えるために施工された可能性がある。ただし，このような中途半端な塗装では，全体的な防食機能としては不十分であると考える。

図-3.4.6　整文の例（**写真-3.4.2** の例）

3.4.2　調査結果

3.4.2.1　橋梁診断員が持つ感覚について

図-3.4.7 に技術者が一般に有する感覚について調査した結果を述べる。同図によると，判断がばらついている項目と，ばらつきが少なく橋の能力に影響を及ぼす範囲の線引きが明確な項目がある。今回の調査対象者が上部構造に関する業務経験を経て橋梁診断員としての仕事に就いた対象者が比較的多いこともあるが（**表**-3.4.3），上部構造に関する**図**-3.4.7 (a)～(d)はばらつきが少なく，支承部や下部構造に関する**図**-3.4.7 (e)～(h)については回答のばらつきが大きいことがわかる。支承部や下部構造については橋の能力に影響を及ぼす範囲の線引きが調査対象者によりばらつく傾向がある結果であった。

3.4.2.2　変状の有無に関する判断について

写真-3.4.6～**写真**-3.4.9 にアイトラッキング結果の抜粋を示す。4 種類の写真に対し，実務経験が多い調査対象者から左側に並べ，最も右側には実務経験がない調査対象者の結果を示す。

先行研究[3.27]では，「熟練者は隣接する部材等も含めて画像内の広範囲を観察して情報を収集しているのに対し，非熟練者は主に損傷個所を視認している傾向」であると報告されているが，それと傾向が一致する**写真**-3.4.2 と**写真**-3.4.3，それと傾向が一致せず熟練者ほどピンポイントで確認している**写真**-3.4.4，熟練者も非熟練者も傾向が変わらない**写真**-3.4.5 の 3 つの傾向が確認された。

写真-3.4.2 と**写真**-3.4.3 は，**写真**-3.4.4 と**写真**-3.4.5 と比べ，点検時に確認すべき対象が写真内で広く分散していることが影響したと推測している他，**写真**-3.4.4 では支点直上の補剛材等，技術的判断を下す際に確認すべき対象が一部に定まっている点，また，**写真**-3.4.5 では目を引く損傷が写真の中で一部のみに存在する点等が影響したと推測される。

本研究では，この視覚情報の中で橋の能力に影響を及ぼす損傷として抽出され，それに基づいてどのような論拠（知識等の画像から得られない証拠等）と紐づいて，結論を論理的に推論しているかを分析する。以下では，実務経験が少ない 2 名を除いた，12 名の回答結果を中心に考察を進める。

3.4.2.3　半構造化インタビューの主な結果

本節では以下の手順で最も仮説演繹法に合致する可能性がある論理的な回答を選出した。まず，最も理想的な条件で仮説演繹法の適用性を検討し，その後，3.4.2.4 でこの回答以外の回答に対する今回の検討条件内における仮説演繹法の適用性及び適用範囲を定量的に検討する。

仮説演繹法が成立するのであれば，論理的に妥当な回答は以下の式の得点が高い回答であると考えられる。

$$P = \sum_{i=1}^{n} (A_i \times B_i \times C_i \times D_i) \tag{3.1}$$

ここで，P は一連の推論の得点，A は根拠の数，B は根拠と意味がつながる論拠の個数，C は論拠

と意味が繋がる結論の個数，D は結論と意味が繋がる措置方針の個数である。また，前述の整文の方針 vi)でも一部記載したが，ここでの「根拠」とは写真からわかる事実に関する発言（例えば，ひび割れがある等)，「論拠」とは写真のみではわからない推測や知識等を含む発言（例えば，ひび割れを見て内部の鋼材の膨張に言及する等)，「結論」とは橋や部材等の能力に言及する発言（例えば，はり部材の曲げ耐力が低下している等)，「措置方針」とは措置方針に関する発言（例えば，曲げ補強や通行止めを行う等）とする。

また，この式(3.1)を用いることで，根拠・論拠・結論・措置方針に関する回答数が多く，かつ，それらの意味が文脈として繋がるほど得点 P が上昇するため，仮説演繹法に合致する可能性がある回答を抽出できると考えた。一方，定性的な要素も残っており，特に「A と意味が繋がる B の個数」と変数を定義しているため，A と B の意味が繋がるかは筆者の理解に依存しており，この点は今後の課題である。

また，以下ではその他の理由で特徴的であった回答を抜粋している。この特徴的な回答には，結論や措置方針に関する技術的判断が妥当である場合でも，そこに至る論理の繋がりが不鮮明である例を中心に抽出した。また，これら回答には整文の方針 i)～ix)に従った下線等を用いている。なお，以下に示す文章は整文である。

a) **写真-3.4.2** に対する回答例

まず，**写真-3.4.2** に対する論理的な回答を**図-3.4.8** に示す。**図-3.4.8** では，支間長の情報から PC 橋であると判断し，主桁と横桁の軸方向のひび割れとコンクリートの浮きを根拠に，ひび割れの形態から塩害もしくは中性化が生じていると論拠を提示し，再劣化も疑いながらも，主桁に曲げひび割れが出ていない根拠に基づき，上部構造の耐荷力が低下していない可能性があることを帰納的に推論している。正に仮説演繹法の仮説法を用いている。ただし，ここで「床版は問題が生じていない」としているが，この発言については，床版に錆び汁があることもあり調査対象者の間で意見が分かれた。この発言には根拠が示されていないため,順序立てて推論を行うことの重要性が示された例と言える。

その順序立てて論理的に思考することの重要性を裏付ける事例を**図-3.4.9** と**図-3.4.10** に示す。**図-3.4.9** では途中で論理が飛躍しており，回答で示された考えに対する根拠づけと論拠づけが不明確であり，結果的に措置方針が絞り切れていない。また，**図-3.4.12** では「表面被覆しているため，塩害が生じている可能性がある」と因果が逆転している。

図-3.4.9 と**図-3.4.10** に共通する事項として，典型的な塩害の事例ゆえに，結論を前提にした回答となっており，根拠（事実）→論拠（知識等）→措置方針に関する技術的判断といったプロセスが省略されたことにより，1 文 1 文は妥当だがその論理の繋がりが不明確である。

b) **写真-3.4.3** に対する回答例

次に，**写真-3.4.3** に対する論理的な回答を**図-3.4.11** に示す。**図-3.4.11** では検査路の位置から写真手前側が橋台であると推定し，壁高欄のずれ，添架管用のパイプの切断，縁石が飛んでいることを根拠に，上部構造と下部構造の相対変位が生じていることを推論し，伸縮装置が橋軸直角方向と上下

方向にずれていることを根拠に，写真に写っていない下部構造の移動やピン・ローラー支承の破壊の可能性を論拠に基づき推論し，耐荷力の低下という結論を導いている。この回答も仮説演繹法に基づいている。

加えて,**図-3.4.10** と**図-3.4.11** は同じ回答者である。同じ回答者でも経験が豊富な事象(**図-3.4.10**)に対しては，経験に基づいたプロトタイプ的な判断（代表性ヒューリスティック）が先にあり，それを裏付ける根拠を後から補足する思考様式（確証バイアス）が卓越したと考えられる。一方，経験が少ない震後点検（**図-3.4.10**）では，そのようなバイアスやヒューリスティックに思考が阻まれずに，論理的な思考が行われたと考えられる。

また，重視する論拠の違いで判断が分かれた例を**図-3.4.12** に示す。この事例では伸縮装置の段差と，伸縮装置部を境に手前側が低いことを根拠に橋台の耐荷力の低下を疑った事例である。

地震直後の点検では橋梁点検車や足場の手配が困難な場合も多く，橋面の情報のみで交通可否に関する技術的判断を下さなければならない場面も多く存在する [3.28]。その際に，上部構造側が沈下している場合は支承部あるいは上部構造が損傷していることが推測され，下部構造側が沈下している場合は下部構造側が損傷している，あるいは上部構造が浮き上がっている場合が多い。ただし，今回の事例では段差だけでなく上部構造と下部構造の橋軸直角方向の相対位置がずれていることから，その場合は支承部の損傷を疑う必要がある。**図-3.4.12** では，重視する根拠と論拠の違いにより，ある種の選好が生じ回答が変化した事例である。

c) **写真-3.4.4** に対する回答例

次に，**写真-3.4.4** に対する論理的な回答を**図-3.4.13** に示す。**図-3.4.13** では主桁の下フランジやウェブの部分的な腐食や断面減少を根拠に，その損傷が発生している場合は主桁の耐荷力が低下することを論拠に，主桁の耐荷力が低下しているという結論を推論している。また，支承の色が特徴的であることを根拠に，溶融亜鉛メッキの可能性を推測している。この事例も思考様式が仮説演繹法に則ることがわかる。

一方，**図-3.4.14** は「溶融亜鉛メッキ」の知識が不足していたことが原因で十分な推論ができなかった事例である。桁端部と支承部は同じ環境条件であるので，同時に腐食するはずであるという確証バイアスの影響を受けており，仮説を支持する情報を多く発言している。

d) **写真-3.4.5** に対する回答例

次に，**写真-3.4.5** に対する論理的な回答を**図-3.4.15** に示す。**図-3.4.15** では橋脚基部の部分的な破壊，コンクリート断面の破壊，鉄筋のはらみ出し，斜め 45 度方向のひび割れが生じているという根拠に基づいて，有効断面がないという論拠を提示し，橋脚の水平方向の耐荷力がほぼない状態である可能性を結論として述べている。この回答も仮説演繹法に則っている。

e) 回答に対する考察

以上より，仮説演繹法の適用性について検証され，また，仮説演繹法に基づくことで論理学的に妥当な回答が得られることが示された。

また，人間に特有の課題も示された。それは論理的思考を妨げているヒューリスティック，バイアス，選好等の思考様式や特徴である。また，**図-3.4.14** の回答例では高い専門性が求められる知識の有無が結論等を変化させることも確認された。

3.4.2.4　仮説演繹法の適用性に関する定量的検証

半構造化インタビュー等で質的なデータを取得しているが，本研究では自然言語処理に基づく手法を用い，その検証を定量的に行う。

(1)　自然言語処理に基づく手法

本研究で用いた自然言語処理に基づく手法は，Sentence-BERT[3.29), 3.30)]と cos 類似度による意味的類似度，及び単語の係り受けを判読する依存構造木の距離[3.31), 3.32)]による構文的類似度の 2 種類である。これら 2 つの手法を用いて，論理的な回答と複数あるその他の回答の組に対して，その 2 つの文章を意味的類似度と構文類似度でスコア化した。

Sentence-BERT[3.29), 3.30)]はディープラーニングにより文脈情報を学習しており，文全体の意味やニュアンス，単語間の関係性を考慮したベクトルを生成でき，これにより，単語の順序や文章の意味的な類似度を算出できる。また，従来の BERT と比べ計算速度が速い特徴を有する．用いたモデルは paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2[3.33)]である。

依存構造木[3.31), 3.32)]は文中の単語どうしの係り受けを一本の木のように接続したものであり，それにより文の骨格が把握できる。句構造より簡潔で語順変動に強く，多言語横断的な比較が容易である特徴を有する. 解析には, 日本語の Universal De-pendencies に準拠した解析器である GiNZA[3.34)]を用いた。また，2 つの文の構文類似度には木編集距離[3.35)]を用いた。

本研究で提案するこのアプローチでは，周辺単語により決定される深層意味表現という計算語用論的水準と，依存構造という形式言語学的水準を並列で評価し，両者を独立・可換な量として提示する。Sentence-BERT は語彙の置換や構文変換に頑健であり，依存構造木の距離は語順に敏感であるため，両尺度を併用することにより，単一尺度系で把握が困難な構文的再配列を伴う意味の等価性や，語彙的な遷移を伴わない構文的な差異を高分解能で識別できる。

アルゴリズムの実装には python（version. 3.13）を用い，エディターには ChatGPT の Canvas を用いた。

(2)　整文作業の妥当性に関する定量的検証

前述した整文の方針の妥当性について，本節では量的に検証を行う。

図-3.4.16 に同じ調査対象者のけばとり文と整文どうしの意味的類似度及び構文類似度を示す。ばらつきがあるものの，意味的類似度の平均値は 0.79，構文類似度の平均値は 0.57 であった。

一般に 0.7～0.8 以上であれば類似度が高く，0.4～0.7 が中程度の類似度があるとされる．これに基

づくと，整文の前後で傾向として，意味的には大きく変化していないが，構文としては中程度の再構成（文節の統合点分割，修飾語の移動等）が行われたことがわかる。構文類似度が高くはないが，前述の通り，今回の検討条件においては原理的に帰納的推論しか行い得ないことを理由に，根拠と論拠の入れ替えを行っているため，数値としては大幅な構文の構造変更までは行っておらず，文章の意味も変わっておらず，作業は妥当であったことが，定量的に確認されたといえる。

次に論理的な回答とその他の回答を比較する。**図-3.4.17** に論理的な回答とその他の回答の意味的類似度及び構文類似度（けばとり文による比較），**図-3.4.18** に論理的な回答とその他の回答の意味的類似度及び構文類似度（整文による比較）をそれぞれ示す。これら図の Q2 及び Q4 には，震後点検を経験していない技術者の回答が分析に含まれていない。

これによると，各回答としては整文の前後で論理的な回答との類似度の関係が変化しているが，平均値としては，意味的類似度が 0.72→0.76，構文類似度が 0.53→0.61 となっており，わずかに上昇傾向があるものの，大きく変化はしていない．このことから，整文の前後で回答全体の平均像としては，論理的な回答との距離関係に大きな変化が起きていないことが定量に確認された。

(3)　仮説演繹法の適用性に関する統計的検証

ここまでの論理的な回答の例示等により，1) 式(1)の得点が最も高い回答について震後点検と定期点検の両方で，変状写真に対する思考様式が仮説演繹法で説明できることが示された他，2) 論理的思考を妨げているヒューリスティック等の思考様式や特徴等の課題も示された。本節では，仮説演繹法に基づく論理的な回答とその他の回答とのスコアについて統計的な検定を経て分析を行うことで，仮説演繹法の適用性について検討を行う。

図-3.4.19 に Q1～Q4 のスコア分布を示す。この図は，意味的類似度及び構文類似度の算出時に，基準及び比較対象とする回答を入れ替え，全ての組合せに対して計算した結果である。定性的には，論理的な回答を基準とした場合でも，他の標本集団と比較しても分布に大きな傾向の違いがない結果であり，論理的な回答を代表としても外れ値ではないことがわかる。

次に，論理的な回答とその他の回答の類似性を統計的に検定（非劣性検定，非劣性マージン= 0.05～0.2，$\alpha = 0.05$）により定量的に検証する。非劣性検定は簡単には，同等性検定の片側検定である。この検定により，スコアが統計的に閾値を上回り，意味的・構文的に類似しているといえるかを確認する。

非劣性マージンについて，0～1 のスコアを念頭に置くと，たとえば意味的類似度スコアが 0.7 と 0.75 を同じとみなす場合など，マージンが 0.05 程度で経験的にスコアがほぼ一致しているといえる。完全一致する文章を検出する場合に，0.05 用いられる場合が多い。一方，マージンが 0.1～0.15 の範囲であれば，スコアはおおよそ一致しているといえ，また，誤差等と本来のばらつきを切り分けることができる水準でもある。非劣性マージン 0.1～0.15 は，意味的類似度としては意味がおおよそ整合し，構文類似度としては係り受けの多少のずれがあるものの，論理展開を損なわない程度であると想像できる。

一方，マージンが 0.15-0.2 とすると異義文等も含まれてしまうおそれがある。

また，同等性検定は薬学で発展した統計的手法であるが，医学・薬学分野の経験則である 0.5 SD（SD：標準偏差）[3.36), 3.37)]に基づけば，スコアの標準偏差の平均から逆算すると，意味的類似度のマージンの最低値は 0.057，構文類似度のマージンの最低値は 0.114 であった。以上の考察から，明確な選定基準がないものの，本研究では非劣性マージン 0.1～0.15 を「おおよそ一致」とみなして検定を行う方針とした。

また，今回用いたモデル[3.33), 3.34)]の推定精度及び日本語タスクであることを考慮し，完全一致とみなせる閾値が意味的類似度 0.8 以上[3.38), 3.39)]，構文類似度 0.85 以上[3.37), 3.40)]とする先行研究等を念頭に置くと，最低限，意味的類似度スコアが 0.7～0.75 以上の閾値，構文類似度が 0.75～0.8 以上の閾値でおおよそ類似しているとみなせると考える。

図-3.4.20 に論理的な回答と類似した回答の割合を示す。凡例の数字は類似しているとみなすスコアの閾値である。非劣性マージン 0.1～0.15 の範囲に着目すると，論理的な回答とその他の回答の意味的類似度が 0.7 以上の割合は整文が 75%以上，けばとり文が 100%の回答が類似していた。また，構文類似度が 0.75 以上の割合は整文で 0～25%であり，けばとり文は 0%であった。

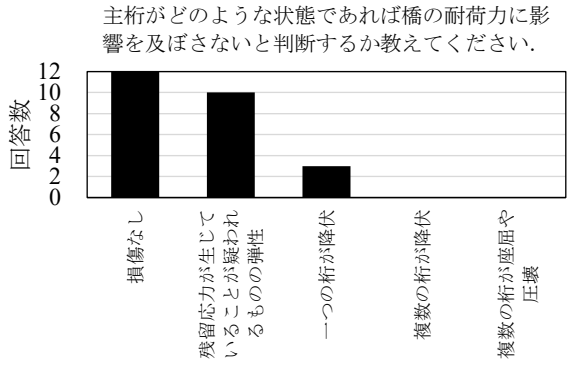
この結果から，仮説演繹法に最も近い「論理的な回答」と同じ意味とみなせる論拠・根拠・結論の文章・文節・単語等が，その他の回答においても約 8 割以上で出現するが，構文類似度の低さから，その並び順や係り受けは様々であったことが定量的に示された。構文類似度の割合の低さは，主語が抜ける等の日本語特有の文法の曖昧さや，前述した根拠や論拠を言語化していない回答が影響していると推測される。一方，意味的類似度の割合の高さより，各技術者の回答は，使用した単語やその語順が異なる場合でも，含まれている単語の意味の内容は非常に類似しており，統計的にはほぼ重なる。これは，技術的判断に必要な重要な知識が技術者間で共有されていることを示している。

次に 1) 文章を命題単位に最も近いと仮定できる文節単位に句読点を基準に分割し，2) Sentence-BERT（paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2）を用いて各文節をエンコードし，文節同士のコサイン類似度を計算し，数値化した。その後，3) 異なる回答間で意味的に同一とみなせる文節の集合に対して，文節の出現頻度をカウントした。その結果を**表-3.4.3**～**表-3.4.6** に示す。意味的に共通すると判定された文節が頻度の数だけあるため，ここでは 3 つほど代表して示す。また，それぞれ根拠と論拠と結論と措置方針のどれに該当するかを表中に記載した。客観的で再現性のある方法として Sentence-BERT を用い機械的に分類したため，逆の意味が同じ項目として分類されたもの（**表-3.4.3** の 2 等）や，意味が異なる項目が同じ項目として分類されたもの（**表-3.4.4** の 2 等）が一部に含まれるものの，おおよそ分類としては適切であり，意味的な類似度が高く，かつ，出現頻度が高い文節を抽出できていると考える。また，頻度が高くなるほど平均類似度が低下する傾向があるが，おおよそ 0.7 以上の類似度がある文節が抽出できている。

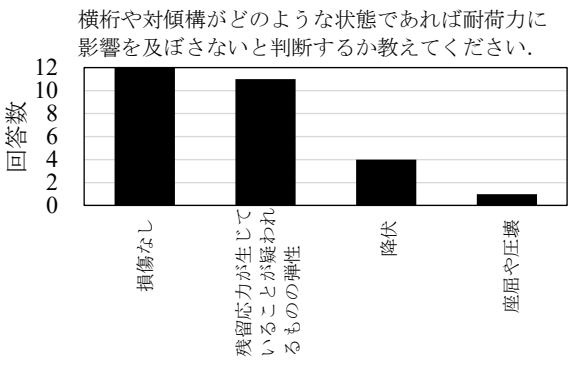
厳格に帰納的推論・演繹的論証を行うためには，命題の並び順（すなわち，構文）が重要であるが，少なくとも根拠・論拠・結論は多くの回答で類似した意味で存在することから，目視で見た事実（根

拠）より，自らの知識（論拠）に基づき，結論を導くという，厳格な論理則に基づかないという意味での”緩い”仮説演繹法は熟練技術者間で広く成立していることが示唆される。

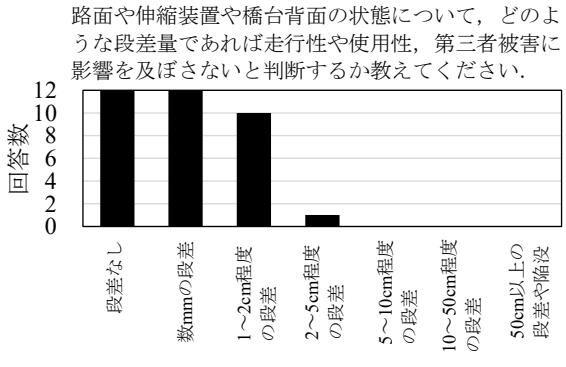
なお，この知見の更なる一般化のためには，統計的に十分な人数に調査対象者を増やし，追加検証を行う必要がある。併せて，今回の実験条件のように室内で写真を提示した場面想定法に基づく調査ではなく，実際の現場で帰納的推論→演繹的論証のプロセスの確認も必要である。これらは今後の課題である。



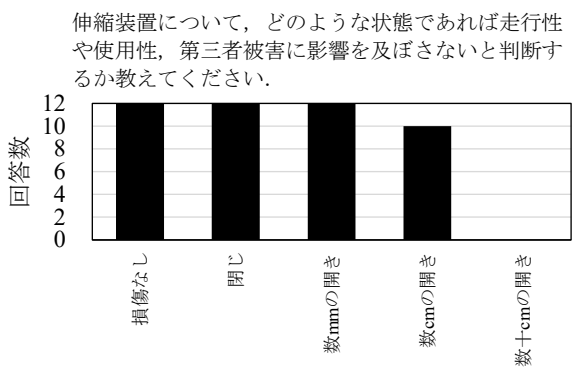
(a) 主桁



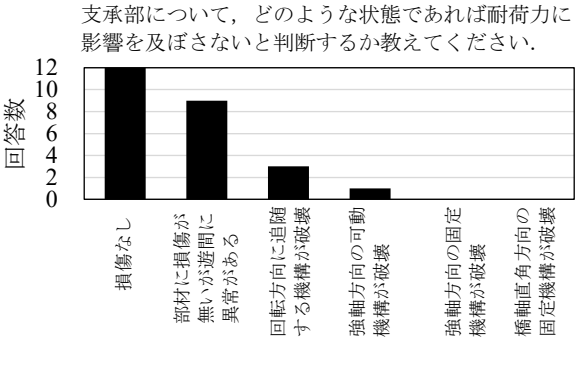
(b) 横桁や対傾構



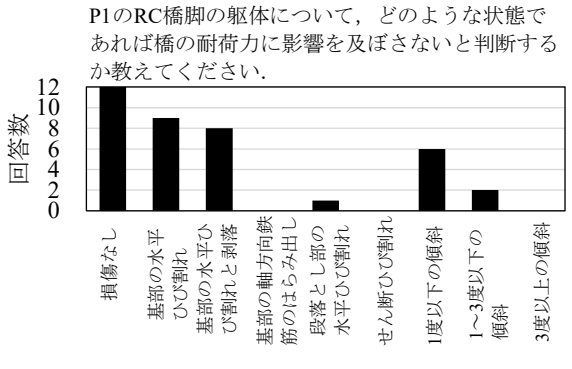
(c) 路面や伸縮装置や橋台背面の段差等



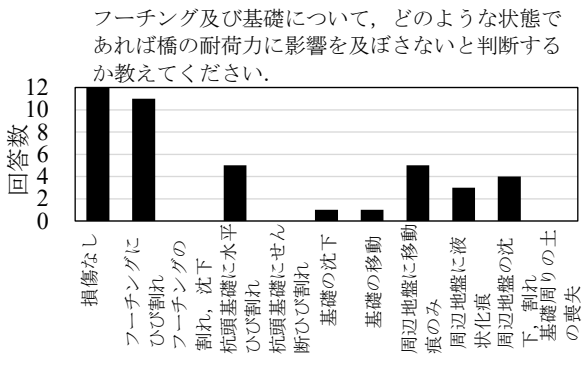
(d) 伸縮装置の開き等



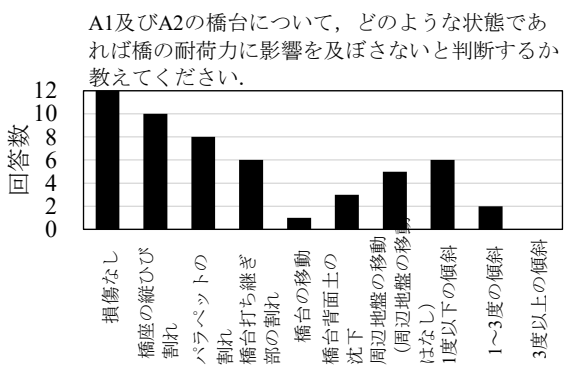
(e) 支承部



(f) 橋脚

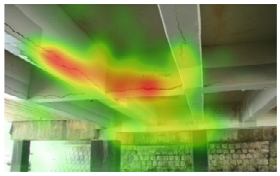


(g) フーチング及び基礎

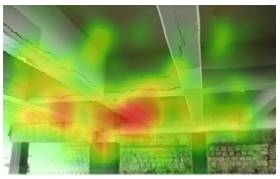


(h) 橋台

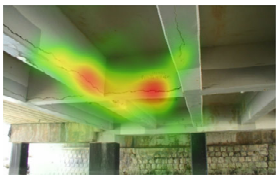
図-3.4.7 技術者が一般に有する感覚



(a)　点検従事年数：30年，定期点検経験数：5,000 橋



(b)　点検従事年数:6 年，定期点検経験数：1,700 橋

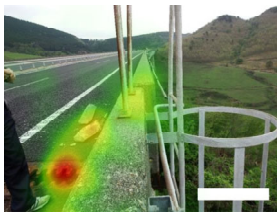


(c)　点検従事年数：4年，定期点検経験数：500 橋

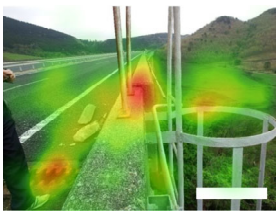


(d　点検従事年数：0年，定期点検経験数：0 橋

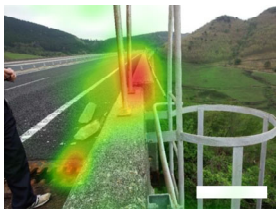
写真-3.4.6　アイトラッキング結果の抜粋（**写真-3.4.2**）



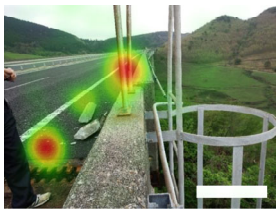
(a)　点検従事年数：30年，震後点検経験数：50 橋



(b)　点検従事年数:6 年，震後点検経験数：10 橋

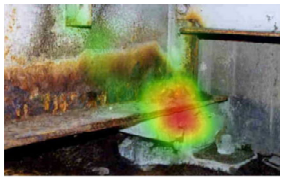


(c)　点検従事年数：4年，震後点検経験数：0 橋

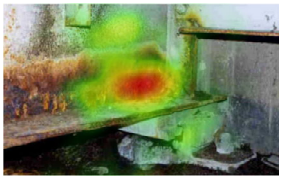


(d)　点検従事年数：0年，震後点検経験数：0 橋

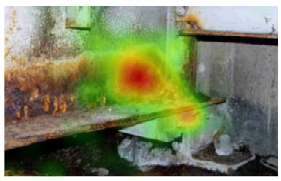
写真-3.4.7　アイトラッキング結果の抜粋（**写真-3.4.3**）



(a)　点検従事年数：30年，定期点検経験数：5,000 橋



(b)　点検従事年数:4 年，定期点検経験数：500 橋

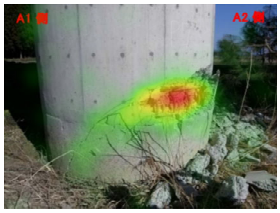


(c)　点検従事年数：8年，定期点検経験数：500 橋



(d)　点検従事年数：0年，震後点検経験数：0 橋

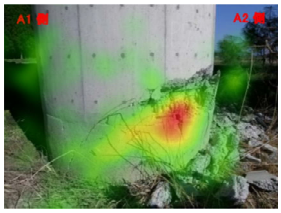
写真-3.4.8　アイトラッキング結果の抜粋（**写真-3.4.4**）



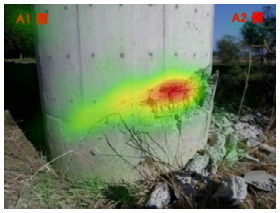
(a)　点検従事年数：30年，震後点検経験数：50 橋



(b)　点検従事年数:8 年，震後点検経験数：50 橋



(c)　点検従事年数：6年，震後点検経験数：10 橋



(d)　点検従事年数：0年，震後点検経験数：0 橋

写真-3.4.9　アイトラッキング結果の抜粋（**写真-3.4.5**）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．
A. 支間長 40m の PC 橋で，主桁下面に橋軸方向のひび割れ，中間横桁に軸方向と下面にひび割れが生じている．コンクリートの浮きが生じている．下面にひび割れが生じているため，塩害もしくは中性化により鋼材が腐食膨張している可能性がある．床版は問題が生じていない．主桁と横桁と床版の全てが被覆材で覆われているため，塩害もしくは中性化で補強補修した可能性がある．コンクリートの浮きが生じている箇所も補修しているため，断面修復材の再劣化が生じている可能性がある．主桁に曲げひび割れが生じていないため，耐荷力は低下していない可能性がある．PC 鋼材位置は健全で周りの軸方向鉄筋のみが腐食している可能性がある．
Q. それ以外の性能の低下は疑われるか？
A. 塩害である場合，T 型断面は飛来塩分を巻き込みやすく，河川上は湿潤であり，ひび割れ幅が大きいため，耐久性が低下している可能性がある．
Q. もし疑いを持った時，（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？
A. 緊急措置としての通行止め等は必要ない段階であると考える．ただし，コンクリートの浮きが生じているため，第三者被害の防止措置の観点で叩き落とし等の対策を取る必要があると考える．

図-3.4.8　写真-3.4.2 に対する論理的な回答（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．
A. 主桁の下端にひび割れと剥離が生じている．横桁の下端にひび割れと剥離が生じている．それら変状が生じているため，内部鉄筋に腐食が生じている可能性がある．架橋位置がわからないが，ひび割れの入り方が塩害特有のものであるため，塩害の影響がある可能性がある．
（上下の文章で論理の飛躍が発生）
早急に断面復旧を行う必要があると考える．しかし，塩分が入っている場合は断面復旧の効果がわからないと考える．塩分計測をするまでもないと考えるが，補修方法については検討が必要だと考える．モニタリングを行うべき状態の可能性がある．（以下省略）

図-3.4.9　写真-3.4.2 に対する回答の一つ（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．
A. PC の T 桁で塩害による再劣化が生じていると考える．ひび割れと部分的な剥離が生じており，内部鉄筋の腐食と膨張が生じている可能性がある．さび汁が出ていないが，コンクリートのひび割れ幅が大きいため内部の鋼材が腐食膨張している可能性がある．表面被覆しているため，塩害が生じている可能性がある．（以下省略）

図-3.4.10　写真-3.4.2 に対する回答の一つ（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．
A. 壁高欄の軸線がずれている．検査路があるため，手前がアバットである可能性がある．壁高欄の軸線のずれと添架物用のパイプの切断が生じているため，上部構造と下部構造の相対変位が生じた可能性がある．縁石が飛んでいるため，径間側が動いた可能性がある．伸縮装置の遊間異常もあるため，地震による損傷が生じている可能性がある．伸縮装置は橋軸直角方向と上下方向がずれているため，下部工の移動やピン・ローラー支承の破壊が生じている可能性がある．
Q. この写真から，この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？
A. 走行性の低下が生じている可能性がある．ピン・ローラー支承が破壊しているのであれば，耐荷力が低下している可能性がある．
Q. もし疑いを持った時，（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？
A. 緊急的には段差を解消し，走行性を確保する必要があると考える．その後，詳細な調査を行う必要があると考える．

図-3.4.11　写真-3.4.3 に対する論理的な回答（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．
A. 橋軸直角方向のずれが生じている．伸縮装置の櫛歯が橋軸方向に異常に広がっている．高欄でずれ，目違いが生じている．
Q. この写真から，この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？
A. 伸縮装置部の段差が生じており，手前が下がっているため，橋台の沈下が生じている可能性があり，橋台の耐荷力が低下している可能性がある．（以下省略）

図-3.4.12　写真-3.4.3 に対する回答の一つ（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. 鈑桁の桁端部である．主桁の下フランジやウェブの部分的な腐食や断面減少がある．支承は白い色であるため，溶融亜鉛メッキの可能性がある．主桁の下フランジやウェブの部分的な腐食や断面減少が生じているため，伸縮装置部の漏水により桁端部に水が流れている可能性がある．断面減少があるため，主桁の耐荷力が不足する可能性がある．桁端部には曲げモーメントがかからないので，鉛直補剛材を含めた支点の鉛直方向の耐荷力を確認する必要があると考える．そのためには，ウェブの下縁の断面積や鉛直補剛材の一番下の断面積が確保されているかを確認する必要があると考える．

Q. もし疑いを持った時，（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 交通開放を行う場合に，断面減少が大きなものであるのであれば，桁が崩壊することは無いと考えるが，支点上の耐荷力が不足する可能性がある．ゆえに，サンドルによる待受けを行い，急激な段差が起きることを防ぐ必要がある可能性がある．

図-3.4.13　写真-3.4.4 に対する論理的な回答（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. 主桁桁端部に腐食が生じているため，桁端や排水管から水が来ている可能性がある．支承は腐食していないため，下フランジやウェブに水が伝っている可能性がある．支承が固着している可能性があるため，層状さびを取って主桁の亀裂が無いか確認する必要があると考える．垂直補剛材に亀裂があるように見えるため，支承の回転が拘束されて主桁に影響が出ている可能性がある．

Q. この写真から，この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 支圧がかかる断面積が残っているのであれば，鉛直荷重は支持できる状態であると考える．亀裂があるのであれば，鉛直荷重が支持できない可能性がある．腐食が生じており，下フランジとウェブの腐食が進行しているため，耐久性が低下している可能性がある．（以下省略）

図-3.4.14　写真-3.4.4 に対する回答の一つ（整文）

Q. あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. 橋脚の基部に部分的な破壊が生じている．コンクリートの断面が破壊し，鉄筋も部分的にはらんでいる．ひび割れが斜め 45 度方向に入っている．それら変状の原因は地震の可能性がある．橋脚の引張サイドのコンクリートが破壊し，45 度方向の斜めひび割れが生じているため，有効断面がない可能性がある．これら変状から，鉛直方向の耐荷力はまだ残存している可能性がある．しかし，水平方向の耐荷力がほぼない状態である可能性があるので，車両を走行させることは危険である可能性がある．ゆえに，道路管理者に連絡を行い，通行止めの措置を判断頂いた方が良いと考える．

図-3.4.15　写真-3.4.5 に対する論理的な回答（整文）

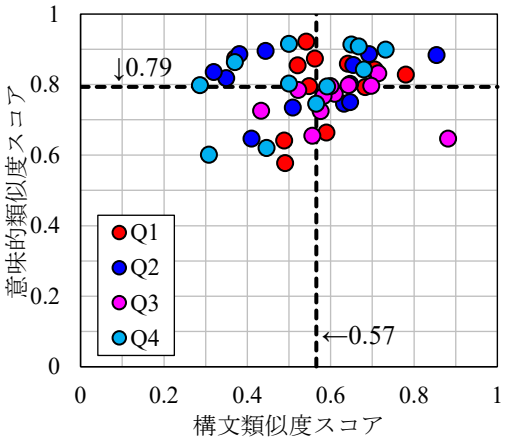


図-3.4.16　同じ調査対象者のけばとり文と整文どうしの意味的類似度及び構文類似度

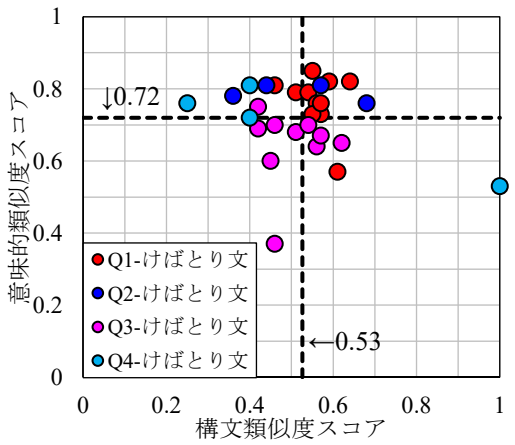


図-3.4.17　論理的な回答とその他の回答の意味的類似度及び構文類似度（けばとり文による比較）

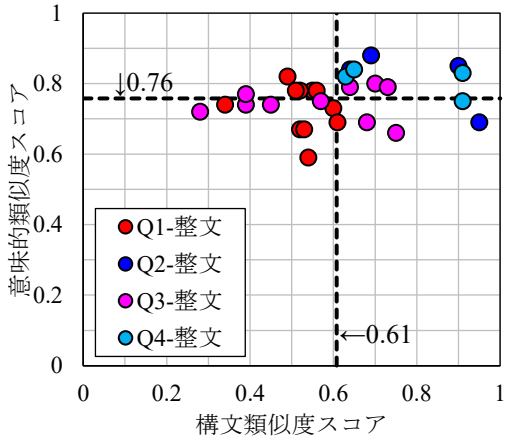
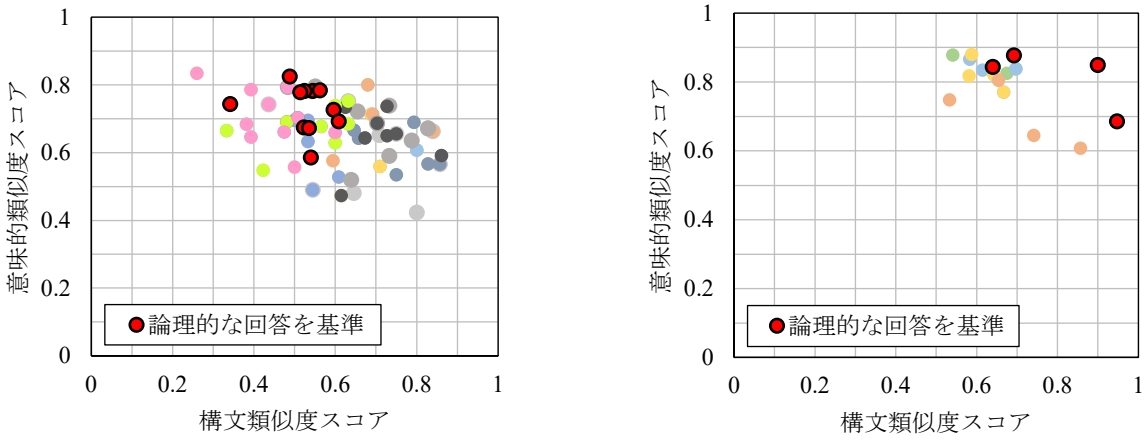
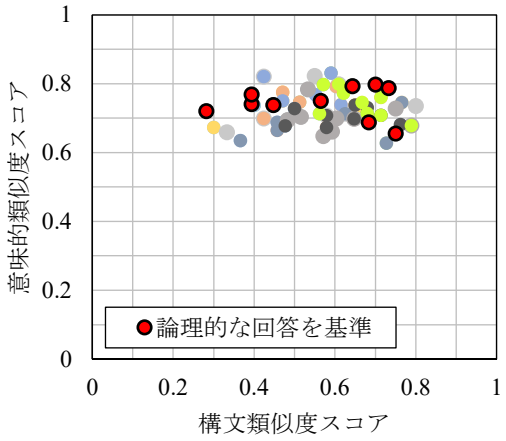


図-3.4.18　論理的な回答とその他の回答の意味的類似度及び構文類似度（整文による比較）

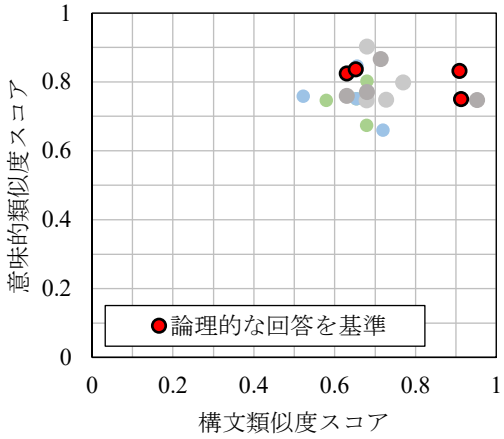


(a) Q1

(b) Q2

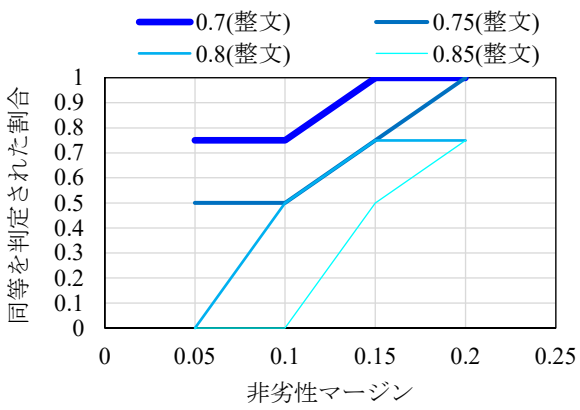


(c) Q3

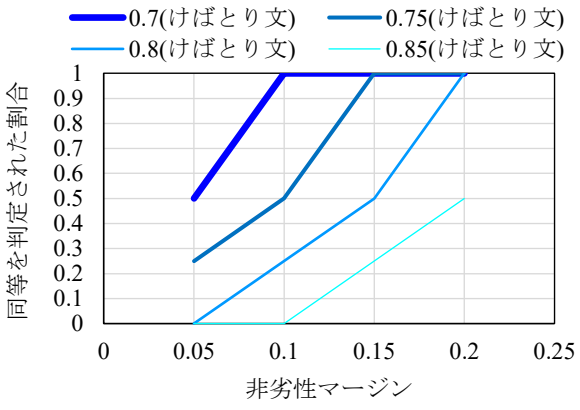


(d) Q4

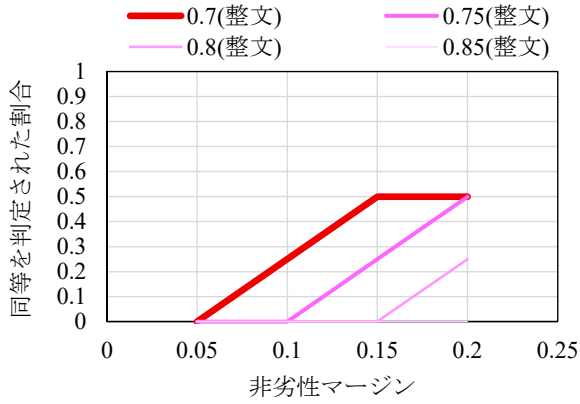
図-3.4.19　全ての組合せのスコア分布



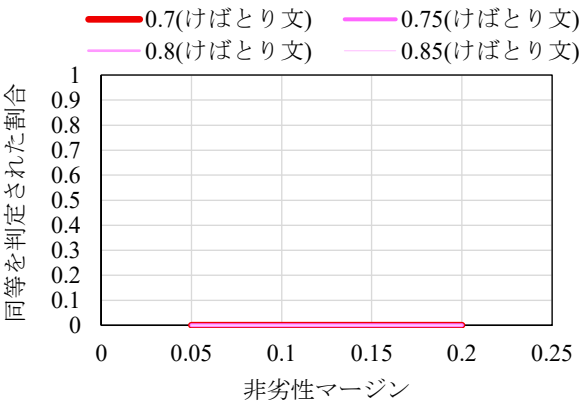
意味的類似度スコア（整文）



意味的類似度スコア（けばとり文）



構文類似度スコア（整文）



構文類似度スコア（けばとり文）

図-3.4.20　論理的な回答との類似度スコアの非劣性検定結果

表-3.4.3　複数の調査対象者間で意味的類似度が高く頻出する文節（写真-3.4.2）

	Sentence-BERT で意味的に共通すると判定された文節群の抜粋	頻度	平均類似度
1	それによってひび割れが生じた可能性がある．主桁の下フランジ・下面・側面・ウェブと横桁の下面にひび割れがある．中間横桁に軸方向と下面にひび割れが生じている．　等　（**根拠**）	42	0.595
2	状況によっては耐荷力が急激に低下する可能性がある． 上部構造全体の支持や横桁の荷重分配の能力が低下している可能性があり， 耐荷力に及ぼす影響は軽微である可能性がある．　等　（**結論**）	25	0.778
3	もし，ただし，しかし，　等	16	0.807
4	何らかの理由で塩分もしくは水分が桁内部に侵入し鉄筋が膨張するので， 内部鉄筋の腐食による鋼材の断面減少が生じている可能性がある． 鋼材の断面減少が疑われる場合であっても，　等　（**論拠**）	16	0.718
5	塩害であると仮定すると，ひび割れの入り方が塩害特有のものであるため， 塩害の影響がある可能性がある．　等　（**論拠**）	11	0.874
6	コンクリートの桁下面とウェブ側面に何か所かひび割れがある． コンクリートの桁下面とウェブ側面に何か所かひび割れがあるため， コンクリート片が一部剥落する可能性があるので，　等　（**根拠**）	10	0.812
7	表面被覆されている可能性がある．表面被覆しているため，桁が表面被覆されているため，（**根拠**）	3	0.882
8	主桁や横桁に曲げひび割れが生じていない．主桁に曲げひび割れが生じていないため，縦方向にひび割れが出ていないため，（**根拠**）	3	0.863
9	拡幅部から水が浸入する可能性があるので，水が侵入しているので，水が浸入し，（**論拠**）	3	0.861
10	PC 鋼材の腐食が生じている可能性がある． PC 鋼材位置は健全で周りの軸方向鉄筋のみが腐食している可能性がある． あるいは内部の PC 鋼材が腐食している可能性があるので，　（**論拠**）	3	0.853

表-3.4.4　複数の調査対象者間で意味的類似度が高く頻出する文節（写真-3.4.3）

	Sentence-BERT で意味的に共通すると判定された文節群の抜粋	頻度	平均類似度
1	伸縮装置部の移動が生じているため， 上部構造を支持する支承部に大きな変状が生じている可能性がある． 伸縮装置部に水平面内のずれが生じている他に，　等　（分類結果では**根拠**と**論拠**が混在）	46	0.583
2	壁高欄に約 10cm の橋軸直角方向のずれが生じている． 伸縮装置のフィンガープレートの遊間が橋軸方向に大きく開いていると同時に橋軸直角方向にずれが生じている．上部構造の橋面が下がるので，　等　（**根拠**）	35	0.577
3	また，ゆえに，その上で，　等	16	0.807
4	コンクリート片が路上にある．壁高欄のコンクリートの一部が接触したので，コンクリート片が落下した可能性がある．　等　（分類結果では**根拠**と**論拠**が混在）	16	0.670
5	ピン・ローラー支承が破壊している可能性があるので， 手前が橋体だと仮定しピンローラー支承が破壊したのであれば， ピン・ローラー支承が損傷している可能性があるが，　等　（**論拠**）	11	0.693
6	耐荷力が低下している可能性がある．耐荷力が低下している可能性がある． 支承部の荷重伝達機能を担う部材の耐荷力が低下している可能性がある．　等　（**結論**）	10	0.869
7	走行性が低下している可能性がある．走行安全性が低下している可能性がある． 走行性能が低下している可能性がある．等　（**結論**）	5	0.892
8	ピンローラー支承のサイドブロックの損傷や支承本体の横方向のずれが生じている可能性がある．支承に損傷が生じている状態であっても，斜材に損傷がある場合は，等　（**論拠**）	5	0.807
9	水平方向にもずれている．それらが水平方向に移動している可能性がある． 水平方向に移動しているので，　等　（**根拠**）	4	0.849
10	上下方向の段差も生じているため，あるいは上下に段差が生じている． 段差が上下方向であるのであれば，　（**根拠**）	3	0.904

表-3.4.5 複数の調査対象者間で意味的類似度が高く頻出する文節（写真-3.4.4）

	Sentence-BERT で意味的に共通すると判定された文節群の抜粋	頻度	平均類似度
1	下フランジに層状の腐食があるため，腐食は相当進んでいる可能性がある． 主桁自体が腐食しており，　等　（**論拠**）	20	0.736
2	主桁の耐荷力が不足する可能性がある．支点上の耐荷力が不足する可能性がある． 耐荷力が低下している可能性がある．　等　（**結論**）	19	0.756
3	断面減少があるならば，断面減少が大きなものであるのであれば， ケレンをかけて板厚減少が大きいのであれば，　等　（**論拠**）	15	0.720
4	伸縮装置部の漏水により桁端部に水が流れている可能性がある． 水が溜まりやすい可能性がある．原因が伸縮装置部の漏水なのであれば，　等　（**論拠**）	15	0.711
5	支点部周辺の支点上補剛材や下フランジが腐食しているため， 主桁や鋼材や横桁に腐食があるため， 主桁の垂直補剛材や下フランジに腐食が生じているが，　等　（**根拠**）	7	0.765
6	そのためには，ゆえに，ただし，　等	4	0.866
7	土砂や水の滞留が生じやすく，腐食や土砂の堆積により固着が生じている可能性がある． 土砂が堆積しているため，　等　（**論拠**）	4	0.825
8	下フランジやウェブの立ち上がりの所の腐食が著しいため，下フランジとウェブが腐食しているため，下フランジとウェブの腐食が進行しているため，　（**根拠**）	3	0.838
9	遮水と再塗装が必要であると考える．再塗装で良いと考える． 当て板補強と再塗装を行う必要があると考える．　（**措置方針**）	3	0.794
10	桁端部であるため，桁端部であるため，　（**根拠**）	2	1.000

表-3.4.6　複数の調査対象者間で意味的類似度が高く頻出する文節（写真-3.4.5）

	Sentence-BERT で意味的に共通すると判定された文節群の抜粋	頻度	平均類似度
1	橋脚の基部に部分的な破壊が生じている．コンクリートの断面が破壊し， それら変状の原因は地震の可能性がある．　等　（**根拠**）	53	0.564
2	鉄筋も部分的にはらんでいる．軸方向鉄筋が座屈しているため， 鉄筋がむき出しになり，　等　（**根拠**）	16	0.720
3	水平方向の耐荷力がほぼない状態である可能性があるので，耐荷力が低下している可能性がある．耐荷性能がかなり低下している可能性がある．　等　（**結論**）	13	0.838
4	ゆえに，ゆえに，ゆえに，　等	4	1.000
5	通行止めの措置を判断頂いた方が良いと考える．通行止めが必要と考える． 通行制限が必要だと考える．　等　（**措置方針**）	4	0.769
6	再構築を行う必要があると考える．補強や改修が必要であると考える． 断面補修や補強が必要だと考える．（**措置方針**）	3	0.840
7	また，また，	2	1.000
8	道路管理者に連絡を行い，道路管理者に連絡する必要がある．　（**措置方針**）	2	0.964
9	ひび割れが斜め 45 度方向に入っている． 45 度方向の斜めひび割れが生じているならば，　（**根拠**）	2	0.906
10	上側（上部構造や支承部）にずれが生じている可能性がある． 上部構造や支承部で横ずれが生じている可能性がある．　（**論拠**）	2	0.905

3.5　仮説演繹法による技術的判断の論理の例示

ここまでの一連の検討により，熟練技術者の思考様式に対して，多くの技術者は明確な論理則に基づかないとはいえ，仮説演繹法的な思考を想定することの妥当性が検証されたといえる。仮説演繹法を用いることで，根拠となる変状から措置方針を導くことができる。点検で収集すべき情報は，措置方針の決定に資する情報，措置方針の決定を行う際の根拠となる情報であるべきことから点検項目を想定できる。本節では仮説演繹法が成立することを前提に，橋の耐荷力や使用性等の観点から，それらに直結する損傷を逆算して例示した事例を示す。

本節では仮説演繹法による技術的判断の論理を記述し例示するため BP 支承を有する多径間の直線状の鋼鈑桁橋を例に示す。**図-3.5.1** に BP 支承（支承版支承）を有する多径間の直線状の鋼鈑桁橋の例[3.41), 3.42)]を示す。点検項目となる主な構成部材は下記の通りである。

(A) 橋面を構成する部材等：舗装，伸縮装置，照明柱，高欄，落下物防止柵，地覆
(B) 上部構造を構成する部材等：主桁，横桁，対傾構，端対傾構，補剛材，床版，高力ボルト
(C) 上下部接続部を構成する部材等：セットボルト，上沓，下沓，アンカーボルト，サイドブロック，すべり板，圧縮ゴム，ベースプレート，各種取付ボルト，遊間　等
(D) 下部構造を構成する部材等：橋台，橋脚，フーチング，杭，ケーソン，土留め（パラペットやウィング）　等
(E) 周辺地盤を構成する部材等：橋台背面土，基礎地盤

これら部材がある損傷を受けた状態となっていることを命題として記述し，それをインプットし橋の状態に関する技術的判断の結果を**表-3.5.1** に整理した。この損傷部材の事例は既往のマニュアル等[3.5), 3.6), 3.43), 3.44)]から抽出した。被災事例は構造形式の判読が困難な事例も多く存在することから多径間の直線状の鋼鈑桁橋に拘らず，部材単位の損傷事例を収集した。

また，損傷により低下する能力については道路橋示方書等[3.45)]に記載されている各構造や部材の役割や照査項目（どの方向の何を照査しているか）を参考とした。たとえば上部構造には「自動車の通行」等の記載が，下部構造には「高さを保持する」「荷重を地盤に伝え，支持する」等の記載が，上下部接続部（支承部）には「荷重を伝達」「相対変位に追随」等の記載が存在しこれは正に設計時に期待している能力であり，橋梁に関する知識および技能を有する橋梁診断員であれば皆が理解していることであろう。

本節では，手続きの再現性を確保し，論理体系によって導かれた結論が真であること保証するために根拠となる損傷が発見され既知（真）となったことを仮定した上で，道路橋示方書等基準やマニュアル類[3.45)-3.47)]に記載されている形式化された知を論拠とすることで「論拠の根拠」等が真であることを仮定した上で，更に一介の橋梁技術者である著者ら[3.1)]の内省によりその論拠として記載された命題が真であることを確認している。

論理学は前提が真であることを認めたならば結論も真と必ず認めなければならない推論である「演繹」の学問であるため，前提となる根拠や論拠が真であれば結論が真であることは自ずと保証される。

また，**表-3.5.1** の「連動して生じうる損傷」は既往のマニュアル等[3.5),3.6),3.43),3.45)]からも抽出すると同時に道路橋示方書における設計振動単位[3.46)]を参考に連動して挙動する部材の集合を考慮する等，筆者らの工学的な判断も加味している。

表-3.5.1 の演繹的論証の具体例を以下に示す。

大前提：　　全ての M は P だ。

小前提：　　全ての S は M だ。

結　論：ゆえに，全ての S は P だ。

大前提：（伸縮装置部の遊間異常，上部構造の大移動（線形不良を含む），上部構造を構成する部材の損傷，遊間異常等が生じており，）セットボルトが破断している場合（M）は，水平方向の荷重伝達機能が喪失しており[3.46)]，重大な二次被害につながる危険がある状態である（P）。

小前提：A 橋（S）は，上記変状のいくつかが生じており，セットボルトが破断している（M）。

結　論：ゆえに，A 橋（S）は水平方向の荷重伝達機能が喪失しており，重大な二次被害につながる危険がある状態である（P）。

措置方針：そのため，A 橋は通行止めを行った。

大前提：（伸縮装置部の遊間異常，上部構造の大移動（線形不良を含む），上部構造を構成する部材の損傷，遊間異常等が生じており，）セットボルトが破断している場合（M）は，水平方向の荷重伝達機能が喪失しており[3.46)]，重大な二次被害につながる危険がある状態である（P）。

小前提：B 橋（S）は多少の伸縮装置部の遊間異常が生じているが，それ以外のセットボルト等の支承を構成する部材や上下部構造には損傷が生じていない（¬M）。

結　論：ゆえに，B 橋（S）は重大な二次被害につながる危険がある状態ではなく，使用上の問題がない（¬P）。

措置方針：そのため，B 橋は通行止めを行わなかった。

大前提：（遊間異常橋台背面の沈下，橋台パラペットの破損，支承部を構成する部材の損傷，下部構造本体（橋台，橋脚，基礎）の沈下，周辺地盤の沈下等が生じており，）10mm 以上[3.47)]の路面段差が生じている場合（M）は，定常走行が困難である（P）。

小前提：C 橋（S）は，段差が 5mm 程度生じているが，それ以外の部材に損傷等は生じていない（¬M）。

結　論：ゆえに，C 橋（S）は定常走行に影響を及ぼす状態にない（¬P）。

措置方針：そのため，C 橋は通行止めを行わなかった。

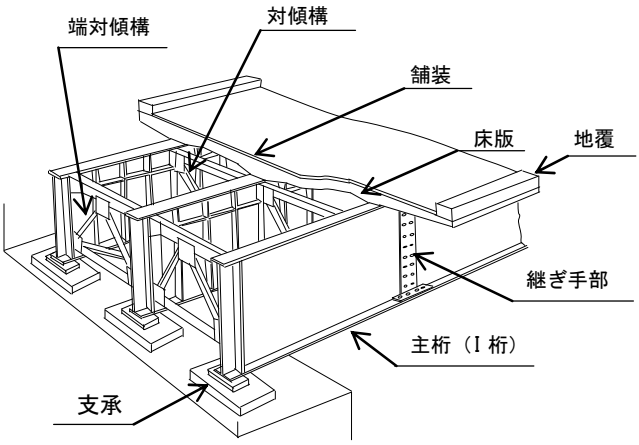
なお，定常走行とは速度の制限を行わずに走行が可能な状態を意味する。

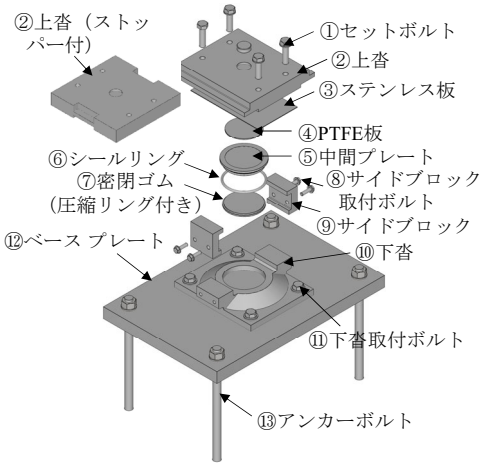
上記三段論法において，「M」の命題に記載された損傷が演繹的論証時に根拠となる橋の能力（いわ

ゆる耐荷性能や使用性等）の低下に直結する損傷であり点検優先度が高い損傷と言える。また，かっこ書きで記載された損傷は能力の低下に直結する損傷と連動して生じることが想定され，それゆえに帰納的推論に基づき橋の能力の低下に直結する損傷の発見に繋がる損傷（以下，帰納的推論の根拠に繋がる損傷）である。ただし，帰納的推論の根拠に繋がる損傷は連動して生じる損傷であるので，能力の低下に直結する損傷が含まれないわけではない。連動して橋の能力の低下に直結する損傷が複数発生する可能性もあるわけである。また，下線部は一つの命題を示す.「¬M」は「M でない」を意味する否定の論理記号である。

定言的三段論法によれば，根拠となる大前提と小前提が真であれば自ずと結論も真となり，健全な論証が成立する。これにより，損傷により通行止めを行うことの説明性や損傷程度に応じて通行止めを行わなくとも良い行政的判断・技術的判断の説明性が保証され得る。

地震発生後には時間の制約と機材・人材の制約が特に顕在化しやすいが，その制約条件の中で迅速な交通開放を行うことと確実に措置をすることが社会から要請される。本節では仮説演繹法の成立を想定し，あらかじめ被災を想定し点検項目を絞ることによる効率化を期待して体系的な整理方法を模索したものの，後者の確実な措置を念頭に置くとできる限り多くの情報を抜けなく収集することが重要となり，2 つの要求が対立する。時間の制約がある中で橋梁工学の知見に立脚した優先すべき点検項目の選出は今後の課題である。





鋼鈑桁橋の構造の例（文献 3.41）より引用）　　BP 支承の構造の例（文献 3.42）より引用）

図-3.5.1　BP 支承を有する多径間の直線状の鋼鈑桁橋の例

表-3.5.1　具体的な演繹的論証による論拠と根拠と結論の命題の関係及び，帰納的推論の根拠に繋がる損傷の例

	インプットの中で技術的判断の結果に直結する損傷（点検優先度の高い損傷）		アウトプット（措置方針を決定した理由となる低下が疑われる能力）		インプットの中で性能に影響を及ぼす損傷と連動して生じることが想定される損傷の例（帰納的推論の根拠に繋がる損傷）
	点検項目（部材名）	変状（判断の根拠であり，論拠を裏付ける部材の状態．参考文献は論拠となる既往の知見等．）	左記の損傷を根拠として，既往の知見や橋梁技術者にとって常識である知識を論拠とすれば，措置の必要性の判断の論理を示せるもの		
(A)橋面上にある部材等	伸縮装置	路面段差[3.3),3.44)]	使用性（走行性）[3.3)]※1	←	遊間異常，橋台背面の沈下，橋台パラペットの破損，支承部を構成する部材の損傷，下部構造本体（橋台，橋脚，基礎）の沈下，周辺地盤の沈下
		開き[3.3),3.44)]			
		部品の破損[3.3),3.44)]	使用性（走行性，第三者被害）[3.3)]※1		
	照明柱	傾き[3.44)]	使用性（第三者被害，利用者の安全性が低下）[3.44)]※1	←	（連動して生じることが想定される損傷は少ない）
		折れ[3.44)]			
		部品の破損[3.44)]			
	落下物防止柵	部品の破損[3.44)]	使用性（第三者被害，利用者の安全性が低下）[3.3)]※1	←	（連動して生じることが想定される損傷は少ない）
	地覆	部品の破損[3.44)]	使用性（第三者被害，利用者の安全性が低下）[3.44)]※1	←	上部構造の移動による衝突痕，橋台パラペットの破損，支承部を構成する部材の損傷
(B)上部構造を構成する部材等	主桁	座屈等降伏変形[3.3), 3.44)]	耐荷性能[3.3), 3.44)]	←	横桁・対傾構の座屈・亀裂等，支承部を構成する部材に損傷，橋台の傾斜・沈下・移動，橋脚の傾斜・沈下・残留変位，基礎の残留変位，周辺地盤の残留変位
		亀裂[3.3), 3.44)]			
	横桁・対傾構・補剛材	座屈等降伏変形[3.3)]	耐荷性能[3.3)]※1	←	主桁の座屈・亀裂等，支承部を構成する部材に損傷，橋台の傾斜・沈下・移動，橋脚の傾斜・沈下・残留変位，基礎の残留変位，周辺地盤の残留変位
		亀裂[3.3)]			
(C)上下部接続部を構成する部材等	セットボルト	破断[3.3),3.44)]	耐荷性能[3.3),3.44)]	←	伸縮装置部の遊間異常，上部構造の大移動（線形不良を含む），上部構造を構成する部材の損傷，遊間異常，すべり板の逸脱，橋台の傾斜・沈下・移動，橋脚の基部鉄筋のはらみ出し・せん断ひび割れ・傾斜・沈下・残留変位等，基礎の残留変位，周辺地盤の沈下・大変位
	下沓	突起の破断[3.3),3.44)]	耐荷性能[3.3),3.44)]		
	台座コンクリート	押し抜きせん断ひび割れ[3.3),3.44)]	耐荷性能[3.3),3.44)]		
	各種取付ボルト	破断[3.3),3.44)]	耐荷性能[3.3),3.44)]		
	アンカーボルト	抜け出し[3.3)]	耐荷性能[3.3)]※1		
	サイドブロック	変形[3.3)]			
(D)下部構造を構成する部材等	橋台	傾斜[3.3)]	耐荷性能[3.3)]	←	周辺地盤の沈下・大変位
		沈下[3.3)]			
		移動[3.3)]			
	特にRC橋脚	基部鉄筋のはらみ出し[3.3),3.44)]	耐荷性能[3.3),3.44)]	←	高欄同士の接続箇所の開き，上部構造の線形不良，支承部を構成する部材の損傷，周辺地盤の沈下・大変位
		段落とし部のひび割れ[3.3),3.44)]			
		せん断ひび割れ[3.3),3.44)]			
		傾斜[3.3)]	耐荷性能[3.3)]※1		
		沈下[3.3)]			
		残留変位[3.3)]			
	杭	せん断ひび割れ[3.3)]	耐荷性能[3.3)]	←	周辺地盤の沈下・大変位
		残留変位[3.3)]			
	ケーソン	残留変位[3.3)]	耐荷性能[3.3)]	←	周辺地盤の沈下・大変位
(E)周辺地盤を構成する部材等	橋台背面土	沈下[3.3)]	使用性（走行性）[3.3)]※1	←	橋台や橋脚の傾斜・沈下，基礎の破壊，支承部を構成する部材の損傷
	基礎周辺地盤	大変位[3.3)]	耐荷性能[3.3)]		
		沈下[3.3)]	耐荷性能[3.3)]		

※1　損傷程度や構造形式，その状態により措置の必要性は様々である点検項目（→演繹的論証時に前提条件を指定する項目）

参考文献

3.1) 小林巧，大住道生：道路橋の地震後の緊急措置に関する技術的判断の論理の可視化，土木学会論文集，80 巻，11 号，2024.

3.2) 小林巧，森伸一郎，羽鳥剛史，中畑和之，大住道生，大黒屋信英：道路橋点検における技術的判断の思考様式の解明に向けた実証的研究，土木学会論文集，81 巻，●号，2025.（査読中）

3.3) 公益社団法人日本道路協会：道路震災対策便覧，震災復旧編，令和 4 年度改訂版，2022.

3.4) 東北地方整備局道路部，国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案），Ver. 1.0，2012.

3.5) Manager, Bridge Engineering Program, CSEE, University at Buffalo, The State University of New York.: Post-Earthquake Bridge Inspection Guidelines, Final Report for NYSDOT SPR Project # C-06-14, Development of Post-Earthquake Bridge Inspection Guidelines, *Cornell Trans-portation Infrastructure Research Consortium (TIRC)*, 2010.

3.6) Oklahoma Department of Transportation.: POST-EARTHQUAKE BRIDGE INSPECTION Manual, October, 2017.

3.7) 大崎正瑠：暗黙知を理解する，東京経済大学，人文自然科学論集，2009.

3.8) Suchman, M.C.: Managing legitimacy: strategic and institutional approaches, *Academy of Management Review*, Vol.20, No.3, pp.571-610, 1995.

3.9) 羽鳥剛史，小林潔司，鄭蝦榮：討議理論と公的討論の規範的評価，土木学会論文集，D3（土木計画学），Vol.69，No.2，pp.101-120，2013.

3.10) 越水一雄，羽鳥剛史，小林潔司：アカウンタビリティの構造と機能：研究展望，土木学会論文集 D，Vol. 62，No.3，pp.304-323，2006.

3.11) 例えば，柴田松雄，河田博之，長谷川修，川本正和，吉留洋一，安藤繁雄，柳瀬晴朗，塩満利昭：技術力の継承に関する取り組みについて，2007.

3.12) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ，2024. https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/（最終閲覧日：2024 年 5 月 22 日）

3.13) 総務省：令和 3 年 情報通信白書，2021. https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd112210.html（最終閲覧日：2024 年 5 月 21 日）

3.14) 西川和廣：インタビュー「土と風の対話」，第 11 回 橋梁調査会専務理事　西川和廣さん，JSCE Blogs，2013. http://blogs.jsce.jp/2013/10/11.html（最終閲覧日：2023 年 9 月 4 日）

3.15) 西川和廣 : 橋の架け替え 3 原則, 橋の減築を提唱, 耐候性鋼材などの診断, 補修技術も検討, 道路構造物ジャーナル NET，2016. https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/11082/?spage=3（最終閲覧日：2023 年 9 月 4 日）

3.16) 金澤文彦：橋梁診断の信頼性向上，論説，土木技術資料，62-5，pp.6-7，2020.

3.17) 杉崎光一，阿部雅人，山根達郎，全邦釘：インフラメンテナンスにおける専門知の構造，AI・データサイエンス論文集，pp.8-19，2021.

3.18) 梅枝愛郎：診断と論理，－仮説演繹法－，Kitakanto Med J，60，pp.375-381，2010.

3.19) 吉田健太郎：事物の像としての観念，－「第三省察」におけるデカルト的観念説－，Bulletin of Aichi Univ. of Education, 65(Humanities and Social Sciences), pp.71-84, 2016.

3.20) ゲーリー・クライン，佐藤佑一（監訳）：決断の法則，人はどのようにして意思決定するのか？，筑摩書房，2022.

3.21) 野矢茂樹：まったくゼロからの論理学，岩波書店，2020.

3.22) 小坂井敏晶：矛盾と創造－自らの問いを解くための方法論，祥伝社，2023.

3.23) ウヴェ・フリック（著），小田博志（監訳）：新版 質的研究入門，<人間の科学>のための方法論，春秋社，2011.

3.24) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 土木施設災害調査速報，国総研資料，第 646 号，土研資料，第 4202 号，2011.

3.25) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋の定期点検に関する参考資料（2013 年版），-橋梁損傷事例写真集-，国総研資料，第 748 号，2013.

3.26) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立行政法人土木研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告，国総研資料，第 967 号，土研資料，第 4359 号，2017.

3.27) 青島亘佐，玉井宏樹，野間康隆，樋口祐治，府川和樹，山口雄也，山田洋輔，吉元大介，江口康平，大島義信：視線情報による橋梁健全性診断の暗黙知抽出に関する検討，AI・データサイエンス論文集，3 巻 J2 号，2022.

3.28) 小林巧，吉谷薫，大住道生：道路橋の震後点検における UAV や自撮り棒の活用方法に関する実践的研究，AI・データサイエンス論文集，5 巻 3 号，2024.

3.29) Reimers, N. and Gurevych, I.: Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks, Proceeding of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP), 2019.

3.30) Pia, B., Noir, N., Theodor, S. and Peter, K: Deep Learning in Natural Language Processing for Analysis of Document Similarity, TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, 2021.

3.31) Kübler, S., McDonald, R. and Nivre, J: Dependency Parsing, Morgan & Claypool, 2009.

3.32) Kong, L., Schneider, N., Swayamdipta, S., Bhatia, A., Dyer, C. and Smith, N. A.: A Dependency Parser for Tweets, EMNLP 2014, 2014.

3.33) Sentence-Transformers.: paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2 – Model Card, GitHub. https://huggingface.co/sentence-transformers/paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2

3.34) Megagon Labs. :GiNZA: A Japanese NLP Library using spaCy, GitHub.

https://github.com/megagonlabs/ginza

3.35) Zhang, K. and Shasha, D.: Simple Fast Algorithms for the Editing Distance Between Trees and Related Problems, SIAM J. Computing, 18(6), pp.1245–1262, 1989.

3.36) Geoffrey, R. N., Jeff, A. S. and Kathleen, W. W.: Interpre-tation of Changes in Health-related Quality of Life, The Remarkable Universality of Half a Standard Deviation, *Medical Care*, 41, 2003.

3.37) Geoffrey, R. N., Jeff, A. S. and Kathleen, W. W.: The truly remarkable universality of half a standard deviation: confirmation through another look, *Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research*, Volume 4, 2004.

3.38) Reimers, N. and Gurevych, I.: Making Monolingal Sen-tence Embeddings Multilingual using Knowledge Distilla-tion, arXiv:2004.09813, 2020.

3.39) Ciancone, M., Kerbona, I., Schaeffer, M. and Siblini, W.: MTEB-French: Resources for French Sentence Embedding Evaluation and Analysis, arXiv:2405.20468, 2024.

3.40) Rohini, B., Sudip, K. N., Partha, P. and Alexander, G.: Recognizing Textual Entailment by Soft Dependency Tree Matching, *Computacion y Sistemas*, 2015.

3.41) 日本道路協会：道路橋点検必携，橋梁点検に関する参考資料，2015.

3.42) 小林巧，浅子卓也，大住道生：支承部の地震損傷が橋に及ぼす影響の観点での被災度判定，桁橋の支承版支承を例に，土木技術資料，特集，関東大震災から 100 年後の耐震技術，pp.36-41，2023.

3.43) 小林巧，大住道生：道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けたデジタル技術の利活用に関する検討，土木技術資料，特集，関東大震災から 100 年後の耐震技術，pp.32-35，2023.

3.44) 東北地方整備局道路部，国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案），Ver. 1.0，2012.

3.45) 日本道路協会：道路橋示方書，2017.

3.46) 日本道路協会：道路橋支承便覧，改訂版，2018.

3.47) 日本道路協会：道路維持修繕要領，1978.

第 4 章　地震によって生じた損傷を代表できる計測指標

4．1　計測指標の収集方針

道路橋の設計においては，設計条件下で要求される荷重支持能力および構造安全性を確保する観点から，橋の状態が想定される区分にあることを所要の信頼性で実現する性能として，耐荷性能の照査が行われる。現行の設計手法では荷重を基準とした照査体系が確立されており，部材ごとに定量的な照査を行った結果に基づき，客観的基準を用いて橋の状態を区分することが可能である。一方，震後点検においては，地震によって変状が生じた部材の能力を評価し，複数の部材の状態を総合的に判断して措置方針を決定するための技術的判断を下す必要がある。しかしながら，変形などの損傷が生じた部材の能力を定量的に評価する手法は必ずしも十分に体系化されておらず，実務の場では熟練技術者の知識と経験に依存した定性的な評価が行われるのが実情となっている。この課題に対処するために，3 章では熟練技術者の思考様式を解明する観点から，措置方針の決定に資する技術的判断を下すためにその判断の根拠となる点検項目を抽出する方法を示した。震後点検では構造上損傷を許容しない部位，一定の損傷を許容する部位，損傷すると使用性に影響を及ぼす部位等を中心に情報を収集する必要がある[4.1)]。しかし，これら点検項目の情報収集は，人の目視による場合が多く，デジタル技術の活用など特定の指標をデータ化あるいは数値化して計測する技術の活用が十分に図られていない。こうした背景のもと，デジタル技術を活用してこれらの点検項目を客観的かつ効率的に計測するためには，点検項目の判断基準を適切な指標へと変換し，デジタル技術による計測が可能な形式で整理することが求められる。そこで，本章では，変位や角度などの定量的な指標と部材の能力の関係を整理し，部材の能力評価に寄与する計測指標を収集する。さらに，これらの指標は，降伏相当変位等，部材の構造力学的特性に応じた指標として整理する方針とする。このような変位等で部材等の能力を直接評価することで,従来把握が困難であった部材ごとの損傷程度をより的確に評価できるようになり，既設橋梁の状態評価がより良いものになることが期待される。

しかしながら，橋梁を構成する全ての部材について耐荷力に影響を及ぼす変位量を個別に把握することは，現状では十分な知見が無いので困難である。そこで本章では，既往の実験結果から荷重と変位の関係が示されている文献の一部を整理し，損傷を代表できる計測指標として 4．2 に例示するとともに，本共同研究の一環として行った実験から得られた計測指標を 4．3 に整理した。

4．2　既往の知見から収集される計測指標の例

4.2.1　RC 橋脚試験体（模型）の降伏相当ひび割れ幅

橋脚の降伏相当ひび割れ幅については，橋梁を構成する各種部材・部位のなかでも，特に RC 橋脚に関する既往の実験研究が十分蓄積されている。例えば，小林ら[4.1)]は橋脚の降伏相当ひび割れ幅に関

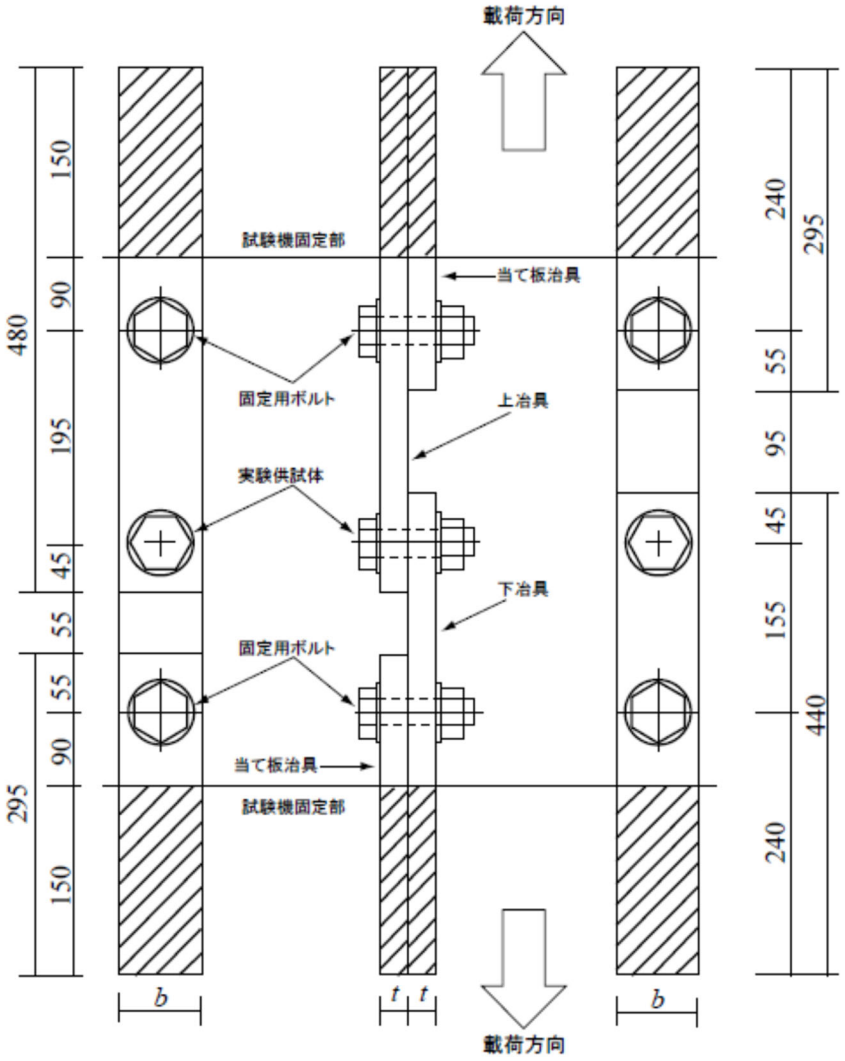
する既往研究の一部を整理しており，その結果を**表-4.2.1** に示す。実際の計測時において，これらの研究で行われた実験の諸元と同様とみなせる橋脚柱であれば，これらの計測指標を用いて部材の降伏の有無を把握できる可能性があると考える。ただし，これらの指標は例えばかぶり厚さや鉄筋径によっても異なる可能性があるため，計測指標とそれが適用できる条件の関係性については今後の課題である。

表-4.2.1 RC 橋脚試験体（模型）の降伏相当ひび割れ幅 [4.1)]

No.	既往の文献	試験体（模型）の詳細	ひび割れ幅の指標
1	高橋ほか（2009）[4.2)]	RC 柱（曲げ破壊型），HW：200×240 主筋：SD295，帯筋：SD295	帯筋降伏時：0.1mm 主筋降伏時：0.2mm
		RC 柱（せん断破壊型），HW：200×240 主筋：SD785，帯筋：SD295	帯筋降伏時：0.1mm
2	大髙ほか（2004）[4.3)]	RC 柱（せん断破壊型），HW：300×300 主筋：SD345，帯筋：SD295A	0.1～0.2mm
3	文野ほか（2001）[4.4)]	RC 柱（曲げ破壊型），HW：200～500， 鋼材はSR 材	0.2mm 前後
4	柳瀬ほか（2002）[4.5)]	RC 梁、PRC 梁（せん断破壊型），HW： 300×200，主筋：SD495，帯筋：SD295A	0.2mm 程度（※PC 梁の事例）

4.2.2 支承部を構成する六角ボルトの降伏相当変位

支承部のボルトに関する既往の研究は複数報告されているが，ここでは土木研究所 [4.6)]にて実施された支承部を構成する六角ボルトのせん断載荷実験に関する結果を代表例として示す。本実験では，ボルト呼び径及び強度区分をパラメータとしてボルトが破断する際の荷重のばらつきについて検討している。実験は**図-4.2.1** に示す治具に固定したボルトに対してせん断方向への載荷を行い，**写真-4.2.1** に示すようにボルト頭部の側面に設置した変位計により変位量を計測する方法で行われている。**表-4.2.2** にボルト諸元及び得られた計測指標を示す。実験は各 Case3 本（Case1 は 2 本）行われているが，本表の計測指標は安全側の代表値として，各 Case において最も降伏相当変位が小さい値を示している。ここに示す計測指標は，**4.3** で示す本共同研究の一環で実施した実験結果と整理方針を整合させ，降伏相当変位（δ）を基準とし，その 0.5，1，2，3，5，10 倍の値を示している。本計測指標の適用範囲は明確に示せていないが，実際の計測時において本実験で対象とした六角ボルトと同様の諸元・載荷方向であれば，これらの計測指標を用いて部材の降伏の有無を把握できる可能性があると考える。





単位：mm

Case	板幅b(mm)	板厚t(mm)	穴径φ(mm)
1, 4, 7, 11	75	25	24
2, 5, 8	75	25	28
3	100	25	35
6, 9	100	28	35
10	75	28	20

図-4.2.1　実験に使用した治具

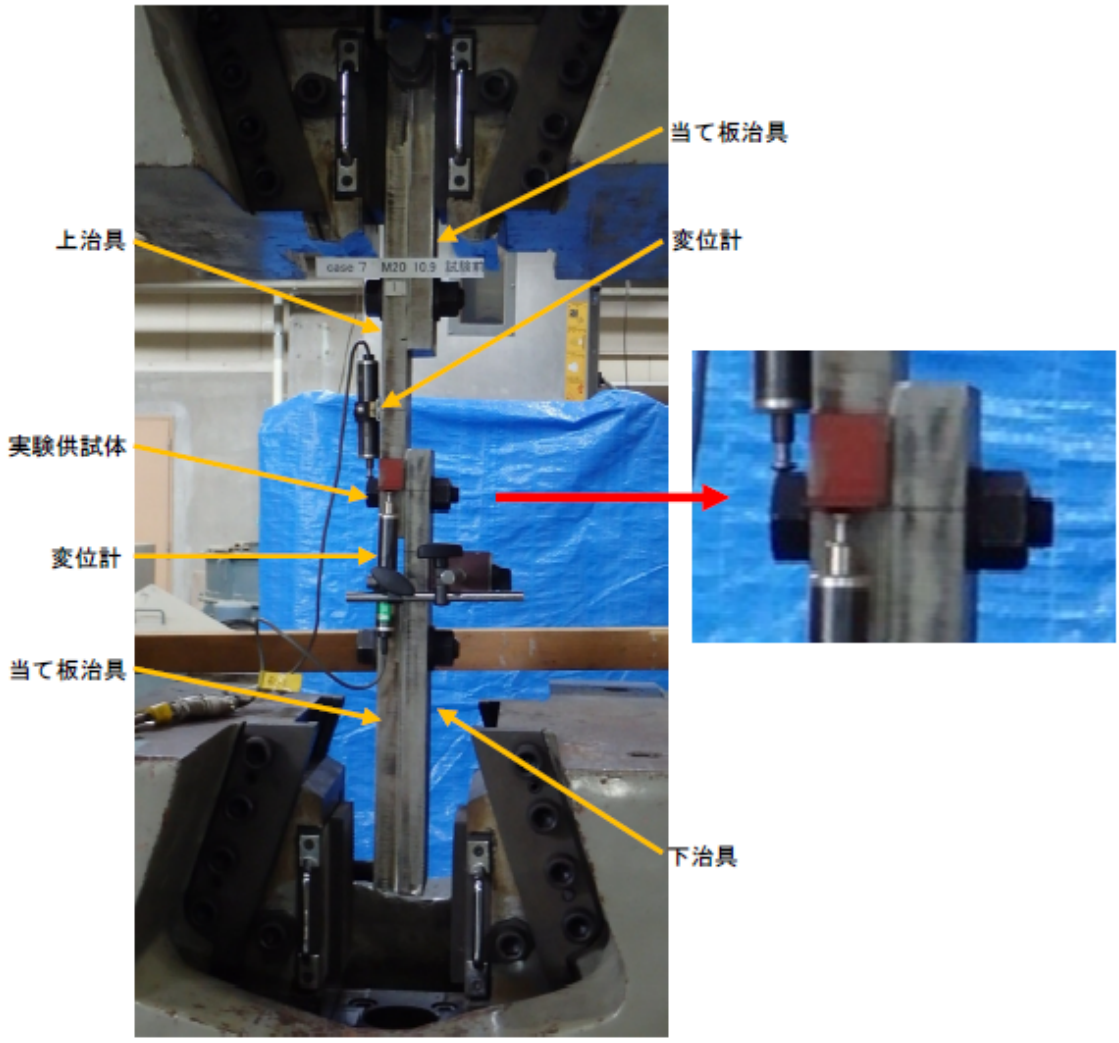


写真-4.2.1　変位計設置状況

表-4.2.2　ボルト諸元および実験で得られた六角ボルトの計測指標一覧

Case	強度区分	呼び径×首下サイズ	計測指標（mm）						
			1/2 δ	δ	2 δ	3 δ	5 δ	10 δ	破断時
1	4.8	M20×80	0.640	1.280	2.560	3.840	-	-	5.702（4.46 δ）
2	4.8	M24×90	0.560	1.120	2.240	3.360	-	-	5.176（4.62 δ）
3	4.8	M30×100	0.432	0.864	1.728	2.592	4.320	8.640	8.800（10.19 δ）
4	8.8	M20×80	0.728	1.456	2.912	4.368	-	-	4.648（3.19 δ）
5	8.8	M24×90	0.756	1.512	3.204	4.536	-	-	4.808（3.18 δ）
6	8.8	M30×100	0.656	1.312	2.624	3.936	6.560	-	7.080　（5.40 δ）
7	10.9	M20×80	1.024	2.048	-	-	-	-	4.000（1.95 δ）
8	10.9	M24×90	0.988	1.976	-	-	-	-	3.912（1.98 δ）
9	10.9	M30×100	1.204	2.408	4.816	-	-	-	5.120（2.13 δ）
10	12.9	M16×80	1.016	2.032	4.064	-	-	-	4.128（2.03 δ）
11	12.9	M20×80	0.86	1.72	-	-	-	-	3.432（2.00δ）

4．3　道路橋支承部の地震時損傷を再現する載荷実験により得られた計測指標

（1）方針及び実験概要

本実験では，地震時に生じる損傷を再現する載荷実験を行い，部材に実際に生じた変位と耐荷力との関係の把握を試みた結果を整理する。本実験では，道路橋の支承部を実験対象として選定した。支承部は構成部材や形式が多種多様であり，アンカーボルト等の一部の部材を除き損傷後の状態について十分な研究がなされていない。なお，支承部の中でも本実験では鋼部材に限定した。鋼部材はその変位量と耐荷力の関係が十分に明確になっておらず，その関係性の把握による意義が大きいと考えるためである。 把握する変位量は力学的観点から得られる指標として載荷対象の降伏相当変位（δ）とし，δの 1/2，1，2，3，5，10 倍に対応する各計測対象の変位量を整理した。**表-4.3.1** に本実験で得られる指標の整理方針の例を示す。

表-4.3.1　本実験で得られる指標の整理方針の例

変位量計測対象	実際の計測対象	載荷対象の降伏変位相当（δ）を基準とした計測対象の変位量（mm）					
		1/2 δ	δ	2 δ	3 δ	5 δ	10 δ
セットボルトの水平変位量	セットボルト頭部の軸直角方向変位						
セットボルトの水平変位量	主桁下フランジと上沓の相対水平変位						
・・・	・・・						

（2）計測指標の取得対象の選定

1）計測指標の取得対象の選定条件

本実験では，過去の主要な地震で損傷事例の報告数が多い部品から載荷対象を選定する方針とした。損傷事例の集計は 2000 年～2016 年に発生した主要な地震について，土木研究所の被災調査資料（**表-4.3.2**）を基に実施した。集計対象とする支承形式は，主要構成部品が鋼材であり，損傷事例の多い BP 支承（支承板支承），1 本ローラー支承，ピン支承，ピンローラー支承，ゴム支承の 5 つの形式に限定した。また，これらの支承を構成する鋼材部品のうち，定量的な計測指標の設定が可能と想定される損傷を選定対象とした。なお，損傷事例として計上する条件は，集計元資料において損傷が明記されている場合に限る。

表-4.3.2　損傷事例の収集対象となる地震[4.7)~4.15)]

調査年度	対象地震名	土研資料番号
2000（H12）	平成 12 年（2000 年）鳥取県西部地震	3769
2003（H15）	宮城県沖の地震	3914
2004（H16）	平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震	203
2007（H19）	平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震	4086
2007（H19）	平成 19 年（2007 年）能登半島地震	4087
2008（H20）	平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震	4120
2011（H23）	長野県北部の地震	4274
2011（H23）	平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震	4295
2016（H28）	平成 28 年（2016 年）熊本地震	4359

2）載荷ケースの選定結果

各支承の損傷事例数一覧を**表-4.3.3**(a)～(d)に示す。各表の事例数は支承線単位で計上している。本実験では支承を構成する部品単位で載荷実験を行うため，共通する部品が多いピン，ピンローラー，1 本ローラー支承については，それらを構成する部品の損傷事例数を**表-4.3.33**(a)に合算した。また，**表-4.3.33** (b)BP 支承及び(c)線支承については部品の損傷傾向を把握するために支承条件（固定・可動）の違いで区分して集計したが，損傷事例数としては合算している。表中で灰色にハッチングされた項目は，選定条件を満たす部品のうち損傷事例数が多いものを示しており，それらを実験対象として選定（非選定）した理由についても併記している。これらの集計結果を基に，本実験の載荷ケースを**表-4.3.4** の通り選定した。なお，セットボルトを対象とした実験については，荷重の方向によってセットボルトの破壊形態が異なるため，CASE1 及び CASE2 に分けて実施することとした。

表-4.3.3　損傷事例数

(a) ピン，ピンローラー，1 本ローラー支承

部品名	損傷事例数				選定理由
	ピン	1 本 ローラー	ピン ローラー	合計	
ピン	12	0	3	15	選定（CASE4）
ピンキャップ	1	0	0	1	
ピンカバー脱落	1	0	0	1	
サイドブロック 取付ボルト	0	26	14	40	選定（CASE5）
サイドブロック	0	0	2	2	
下沓	1	0	0	1	
ローラーの逸脱 ・ずれ	0	21	7	28	正常な位置以外に位置する状態が損傷であり，定量的な計測指標の設定が困難であるため実験ケースから除外
ローラーカバー	0	3	8	11	
アンカーバーの抜け	7	0	2	9	
沓座モルタル	21	6	2	29	コンクリート材のため実験ケースから除外
橋座コンクリート	8	11	0	19	コンクリート材のため実験ケースから除外

(b) BP 支承

部品名	損傷事例数			選定（非選定）理由
	可動	固定	合計	
セットボルト	7	9	16	選定（CASE1，2）
上沓ストッパー	16	14	30	選定（CASE3）
サイドブロック取付ボルト	13	5	18	選定（CASE6）
下沓	6	5	11	
アンカーボルト	2	2	4	
沓座モルタル	14	14	28	コンクリート材のため実験ケースから除外
橋座コンクリート	3	3	6	

(c) ゴム支承

部品名	損傷事例数	選定（非選定）理由
セットボルト	0	
上沓取付ボルト	5	
支承本体	29	ゴム材のため実験ケースから除外
下沓取付ボルト	4	
サイドブロック取付ボルト	9	選定（CASE5）
ベースプレート取付ボルト	3	
アンカーボルト	2	
沓座モルタル	7	
橋座コンクリート	4	

(d) 線支承

部品名	損傷事例数			選定（非選定）理由
	可動	固定	合計	
上沓ストッパー	2	4	6	
下沓	16	13	29	脆性的な破壊が多く，定量的な計測指標の設定が困難であるため非選定
アンカーボルト	10	14	24	セットボルトの損傷形態と類似しているため非選定
沓座モルタル	19	21	40	コンクリート材のため非選定
橋座コンクリート	1	4	5	
ピンチプレート	8	4	12	脆性的な破壊が多く，定量的な計測指標の設定が困難であるため非選定

表-4.3.4 載荷ケース一覧

実験ケース名	計測指標の取得対象部材	想定する損傷位置
CASE1	セットボルト 01	首下のせん断破壊
CASE2	セットボルト 02	首下の曲げ破壊
CASE3	上沓ストッパー	突起部の破壊
CASE4	ピン	くびれ部の破壊
CASE5	サイドブロック取付ボルト 01（ゴム支承用）	首下の破壊
CASE6	サイドブロック取付ボルト 02（BP 支承用）	首下の破壊

3）計測指標の取得対象部材の寸法決定方針

支承部を構成する部品の諸元は荷重規模などの条件によって異なるため，降伏や破断に至る変位量も部品の諸元ごとに異なる。そのため，部材単位で残存能力を確認するには，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標をあらかじめ把握し，致命的な損傷を見逃さないようにする必要がある。

そこで本実験では，支承部に一般的に使用される諸元のうち各部品が降伏や破断に至る変位量が最小となる諸元を持つ部品を対象に実施し，得られた指標をその部品に生じる損傷の計測指標の代表値

として採用する方針とした。なお，各部品に一般的に使用される諸元の範囲については，**表-4.3.5** に示す資料を参考に設定した。

表-4.3.5　載荷対象の寸法根拠資料 [4.16)~4.20)]

道路橋支承標準設計（ゴム支承・すべり支承編）	S51.1
道路橋支承標準設計（ピン支承・ころがり支承編）	S54.2
道路橋支承標準設計（線支承・高力黄銅支承板支承）	S57.10
道路橋支承標準設計（ゴム支承・ころがり支承編）	H5.4
道路橋支承標準設計（すべり支承編）	H5.4

(3) 載荷方法

載荷方法は単調漸増載荷とし，載荷対象の計算上の降伏荷重のおおよそ 3 分の 1（安全率 3 に相当）を基準値として，載荷と除荷を繰り返す方式とした。具体的には，初回の載荷重は基準値まで，2 回目は基準値の 2 倍，3 回目は基準値の 3 倍とし，載荷対象が降伏に至るまで段階的に載荷重を増加させた。また，ジャッキで制御可能な載荷重の分解能を考慮し，基準値は 10kN 単位で設定した。載荷対象が降伏した後は，載荷対象の降伏変位（δ）を基準として，δの整数倍に相当する変位値を基に載荷と除荷のタイミングを適宜設定した。載荷と除荷のタイミングの概要を**図-4.3.1** に示す。

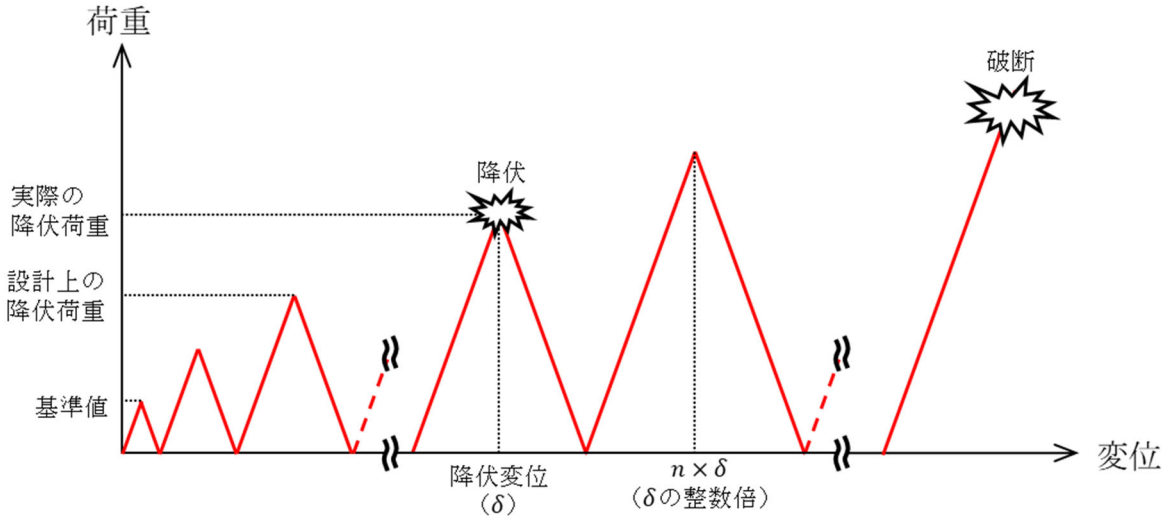


図-4.3.1　載荷と除荷のタイミングの概要

(4) 載荷ケースの実験結果

各載荷ケースの実験概要及び実験結果を以下に示す。なお，治具の設計計算書は**付録 2** に記載しているため，そちらを参照されたい。

1） CASE1：セットボルト 01

ⅰ）実際の損傷と実験ケースの設定に関する方針

セットボルトは，支承部と上部構造を接続し，水平方向の荷重を伝達する部品である。**写真-4.3.1** にセットボルトの損傷例を示す。本ケースでは，セットボルトにせん断力のみが作用して破壊に至るケースを想定して実験を実施した。

また，セットボルトは通常 4 本以上配置され，これらが協働して荷重に抵抗することから，本実験でも 4 本配置したセットボルトに対して載荷した。さらに，道路橋支承標準設計において，支承部に使用するボルトの最小径は M20，強度区分の最小値は 4.6 と規定されているが，本実験では市場性を考慮し，ボルト径 M20，強度区分 4.8 を採用した。

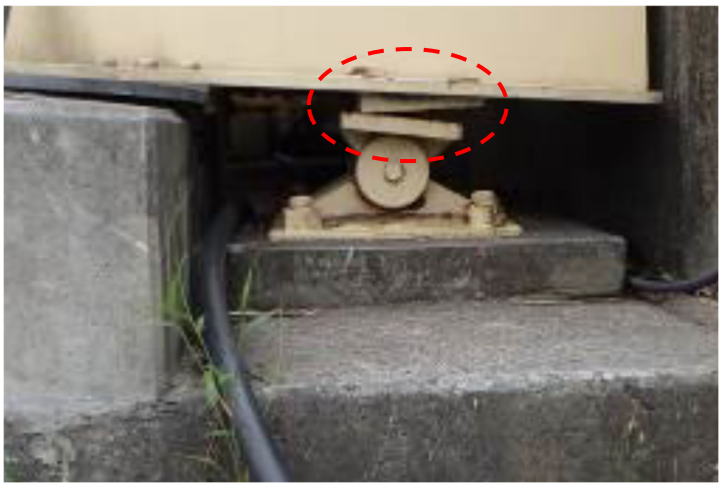


写真-4.3.1　セットボルトの損傷例 [4.9)]

ⅱ）載荷対象の設置方法

本ケースでは，**写真-4.3.2** に示すオックスジャッキを使用した。また，**図-4.3.2** 及び**写真-4.3.3** に示すような治具を使用して実験を実施した。セットボルトは**図-4.3.2(b)**に示す主桁下フランジを模した治具 4（ねじ切り無し）と上沓を模した治具 7（ねじ切り有り）を固定する形で 4 本設置し，治具 4 にジャッキにより水平方向に載荷しセットボルトにせん断力を作用させる計画とした。また，セットボルトは一般的に支圧接合で設計されるため，本実験では手締め程度の力でセットボルトと治具を固定した。さらに，各セットボルトは載荷方向に 200mm 間隔，載荷方向と直角方向に 500mm 間隔で設置した。

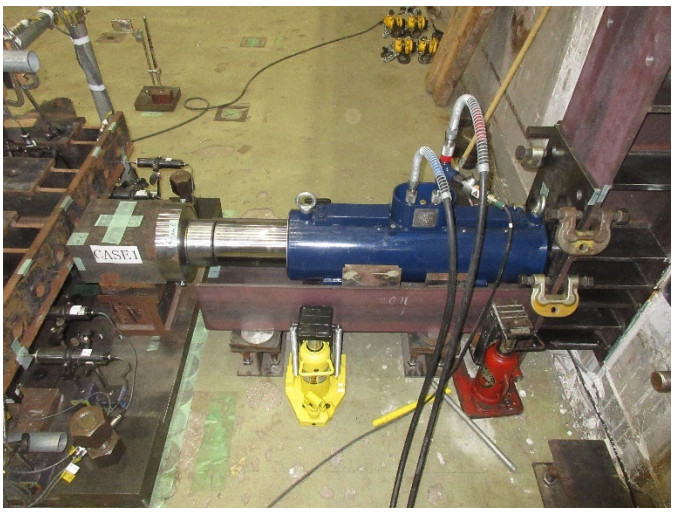
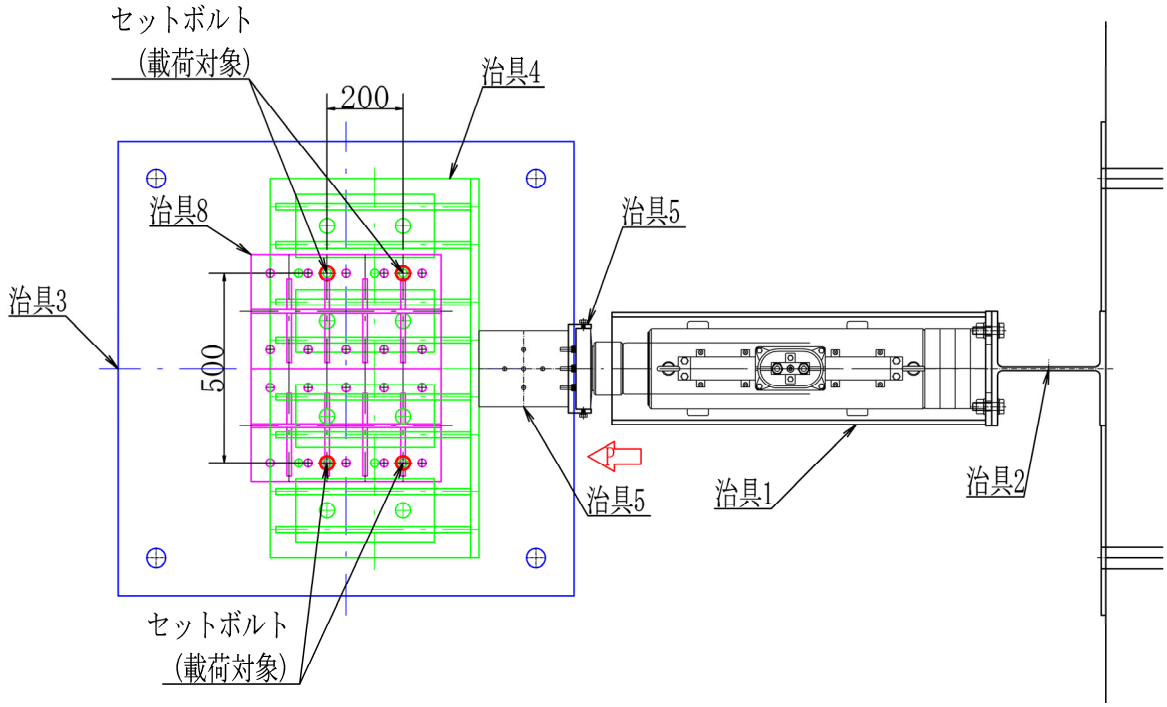
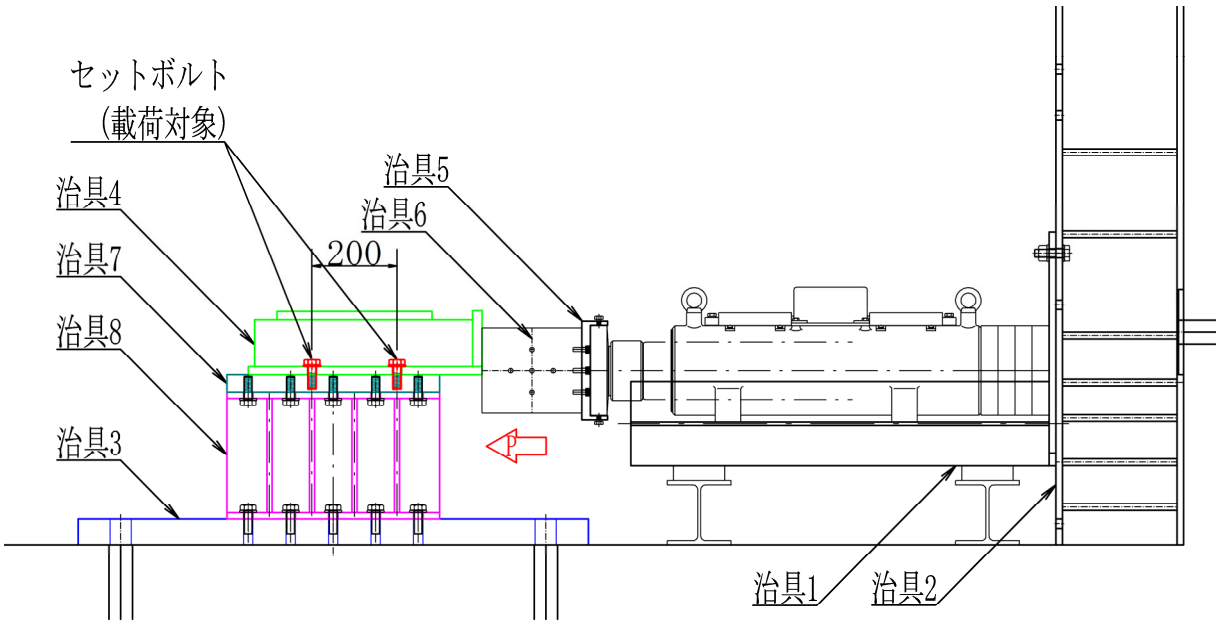


写真-4.3.2　オックスジャッキ：RM-10050（1000kN，ストローク 500mm）

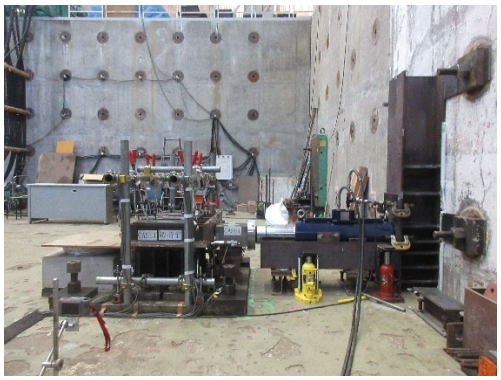


(a)　平面図

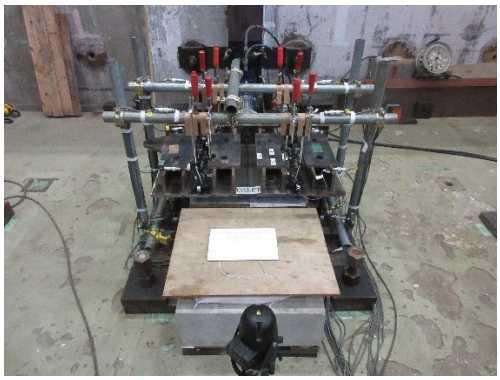


(b) 断面図

図-4.3.2　載荷計画図（CASE1）



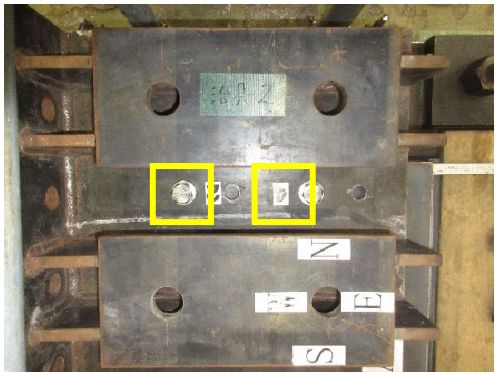
(a) 治具側面



(b) 治具正面



(c) セットボルト取付状況（その 1）

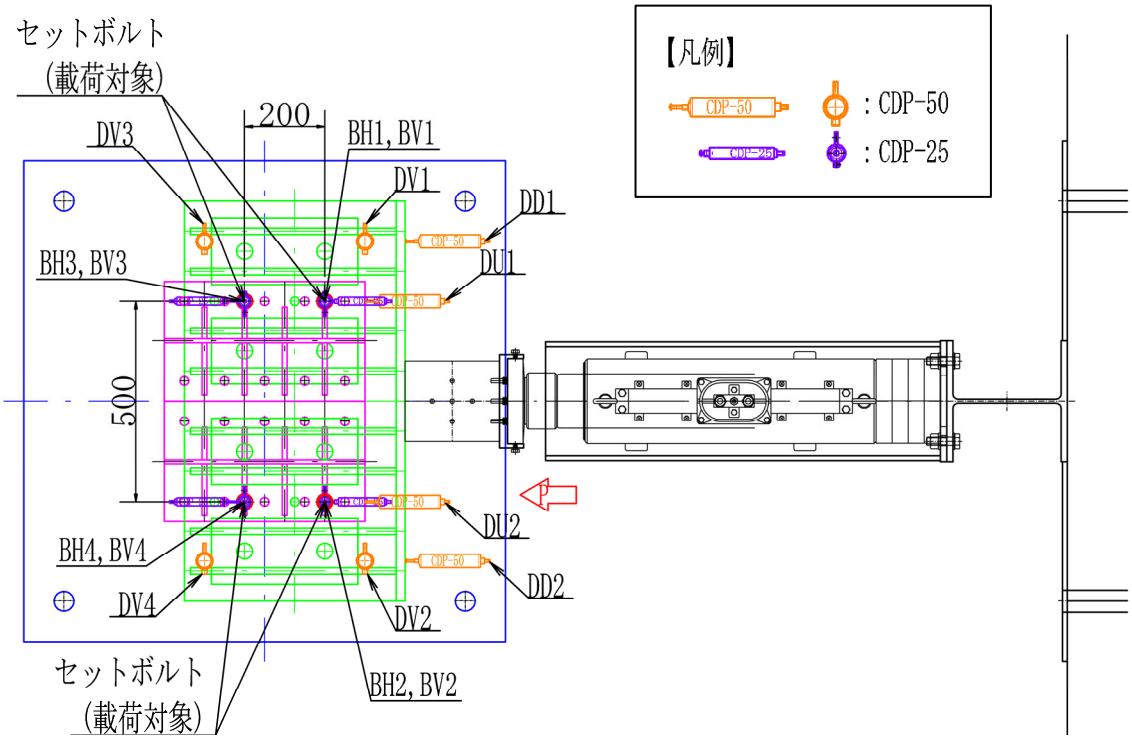


(d)セットボルト取付状況（その 2）

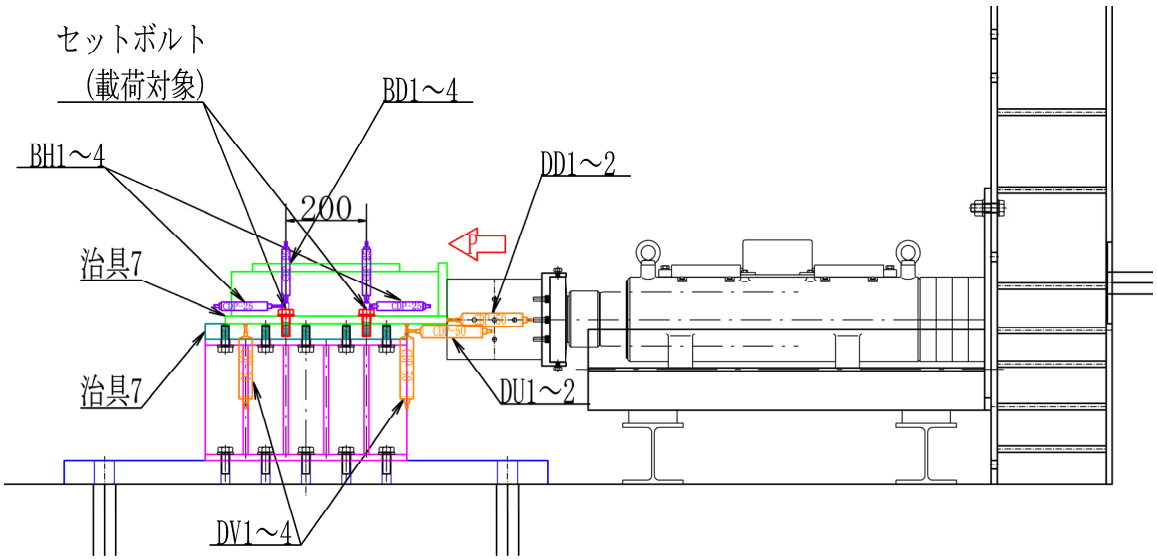
写真-4.3.3　治具写真（CASE1）

iii）変位計の設置位置

本ケースでは高感度変位計（CDP-25 及び CDP-50，東京測器研究所）を使用して変位量を計測した。変位計設置位置を**図-4.3.3** に示す。BH1～4 及び BV1～4 は各セットボルトの水平・鉛直方向変位を計測している。また，DU1～2 及び DV1～4 は治具 4 の水平・鉛直変位を，DD1～2 は治具 7 の水平変位を計測している。



(a) 平面図



(b) 側面図

図-4.3.3　変位計設置位置（CASE1）

iv）載荷結果

各ボルトの荷重と水平変位の関係を**図-4.3.4** に，治具 4 の荷重と水平変位の関係を**図-4.3.5** に示す。各ボルト及び治具 4 の水平変位量は，**図-4.3.3** に示す治具 7 の水平変位量（DD1 及び DD2 の計測値）を差し引いて実変位量を算出した。本ケースでは，**付録 2** に示す計算式に基づき基準値を 60kN と設定し，240kN まで 60kN 刻みで載荷と除荷を繰り返した。その結果，274.9kN でセットボルトが降伏に至ったと判断した。**図-4.3.6** に BH1'の荷重と水平変位の関係を代表とした載荷と除荷のタイミングを示す。セットボルトの変位量の基準値は水平方向の降伏変位（δ）が最小である BH1'=2.417mm とした。その後，BH1'=4.047mm（1.67δ）に達した直後，全てのボルトが破断した。

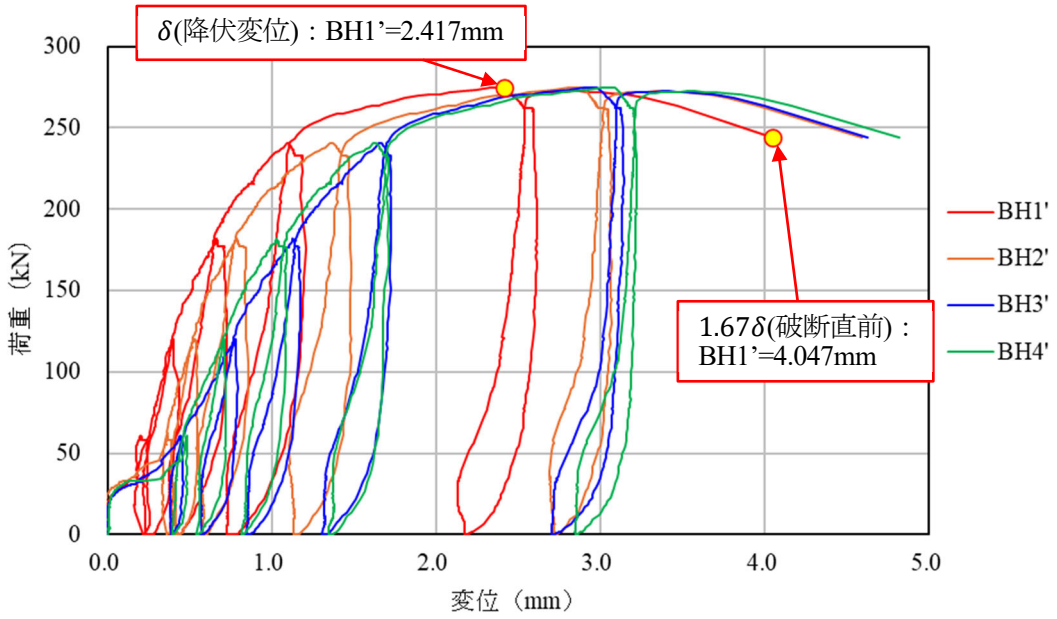


図-4.3.4　各セットボルトの荷重と水平変位の関係（CASE1）

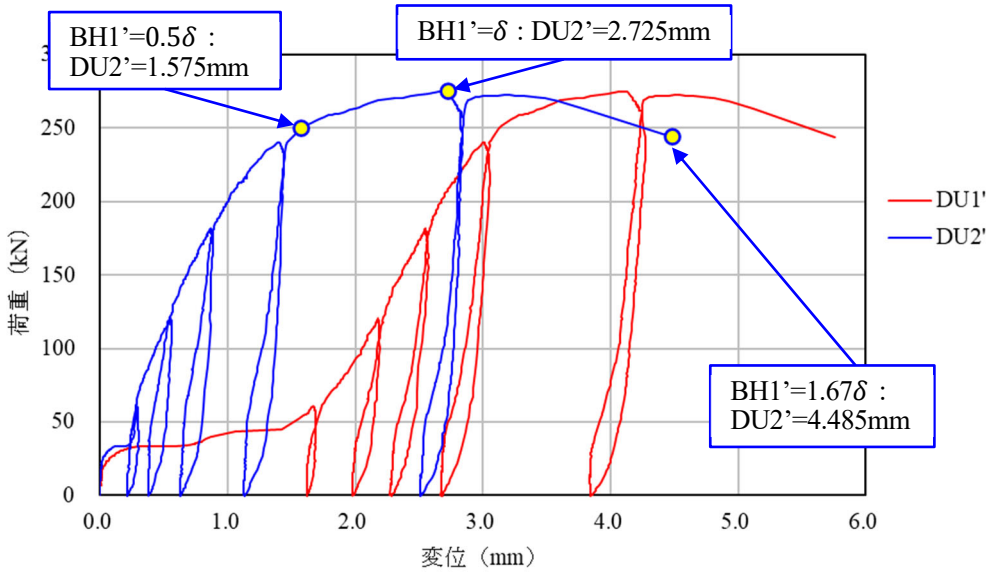


図-4.3.5　治具 4 の荷重と水平変位の関係（CASE1）

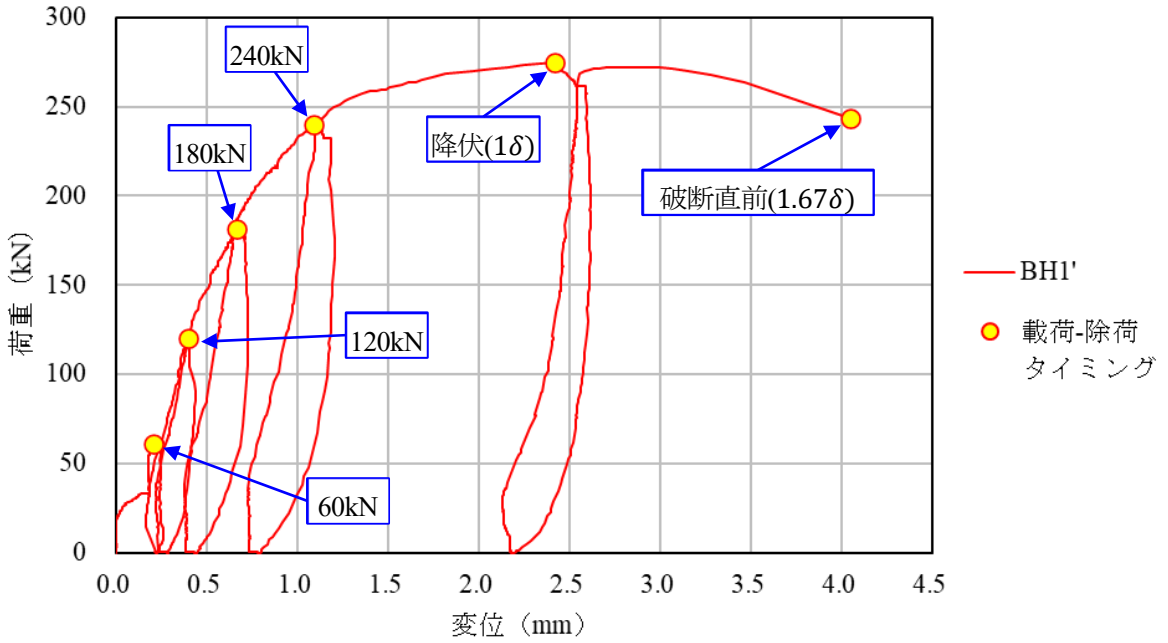


図-4.3.6　載荷と除荷のタイミング（CASE1）

v）計測指標の取得

本ケースで取得したセットボルトの耐荷力に影響を及ぼす計測指標を**表-4.3.6** に示す。ただし，これらの計測指標は代表値の 1 例であり，実際の調査で**表-4.3.6** に示す降伏相当変位を超える値が計測された場合でも，必ずしもその部材が降伏に至っているとは限らない。本実験で得られた計測指標は，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標を整理した例として提示している。

表-4.3.6　セットボルトの荷重変曲点などに相当する計測指標の例（CASE1）

変位量計測対象	実際の計測対象	単位	載荷対象の降伏変位相当（δ）を基準とした計測対象の変位量		
			1/2δ	δ	1.67δ
セットボルトの水平変位量	セットボルト頭部の軸直角方向変位	(mm)	1.196	2.417	4.047
セットボルトの水平変位量	主桁下フランジと上沓の相対水平変位	(mm)	1.545	2.725	4.485

2） CASE2：セットボルト 02

ⅰ）実際の損傷と実験ケースの設定に関する方針

セットボルトは，支承部と上部構造を接続し，水平方向の荷重を伝達する部品である。**写真-4.3.4** にセットボルトの損傷例を示す。本ケースでは，セットボルトにせん断力及び上揚力が共に発生し破壊に至るケースを想定して実験を実施した。

また，セットボルトは通常 4 本以上配置され，これらが協働して荷重に抵抗することから，本実験でも 4 本配置したセットボルトに対して載荷した。さらに，道路橋支承標準設計において，支承部に使用するボルトの最小径は M20，強度区分の最小値は 4.6 と規定されているが，本実験では市場性を考慮し，ボルト径 M20，強度区分 4.8 を採用した。

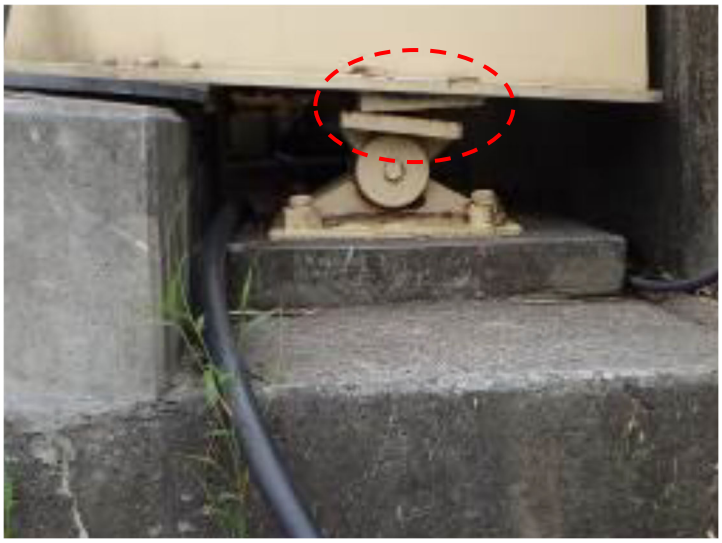


写真-4.3.4 セットボルトの損傷例 [4.9)]

ⅱ）載荷対象の設置方法

本ケースでは，**写真-4.3.5** に示すジャッキを使用した。また，**図-4.3.7** 及び**写真-4.3.6** に示すような治具を使用して実験を実施した。セットボルトは**図-4.3.7**(b)に示す主桁下フランジを模した治具 4（ねじ切り無し）と上沓を模した治具 9（ねじ切り有り）を固定する形で 4 本設置した。さらに，セットボルトに曲げモーメントが生じるように治具 9 に 36° の傾斜を設けた。この傾斜角度は一般的な 4 主桁の鈑桁において外桁の支承部に作用する水平-鉛直方向荷重比に基づき設定している。なお，詳細な算出根拠は**付録 2** に記載している。本ケースでは治具 4 に補助治具 1 を取りつけ，その補助治具 1 に水平方向に載荷することで治具 4 を介してセットボルトに曲げモーメントを作用させた。

また，セットボルトは一般的に支圧接合で設計されるため，本実験では手締め程度の力でセットボルトと治具を固定した。さらに，各セットボルトは載荷方向に 200mm 間隔，載荷方向と直角

方向に 500mm 間隔で設置した。

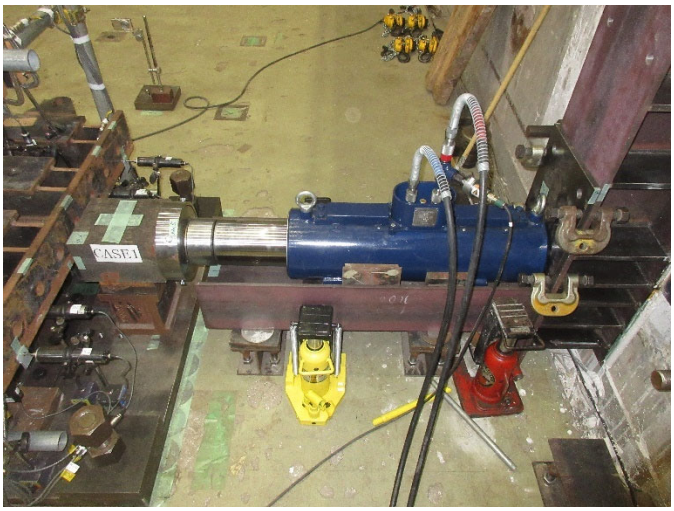
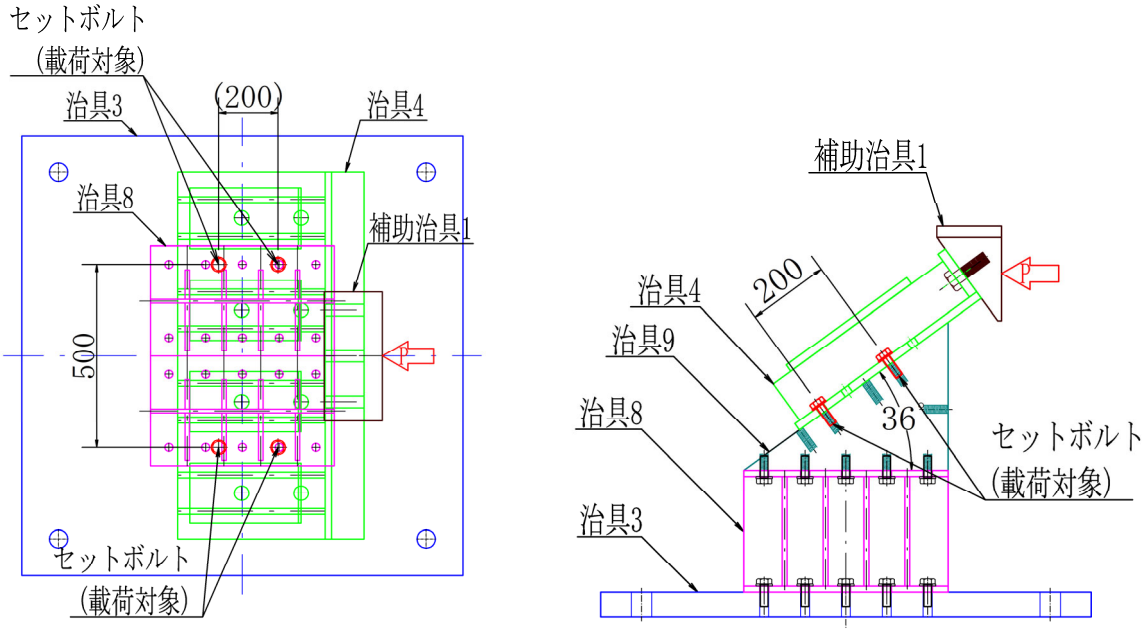
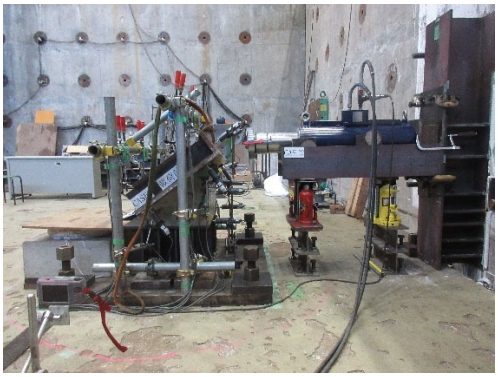


写真-4.3.5　オックスジャッキ：RM-10050（1000kN，ストローク 500mm）

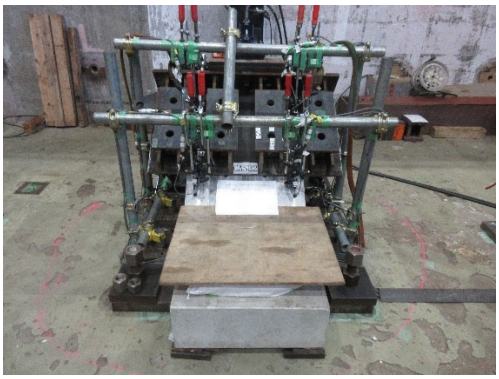


(a) 平面図　　(b) 断面図

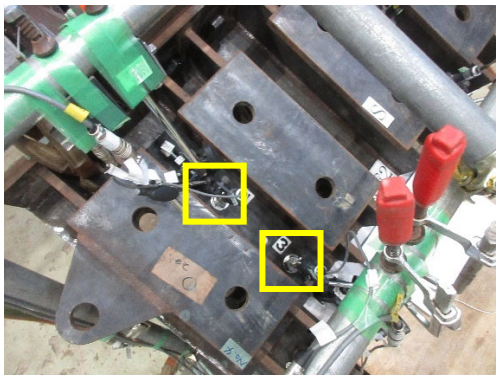
図-4.3.7　載荷計画図（CASE2）



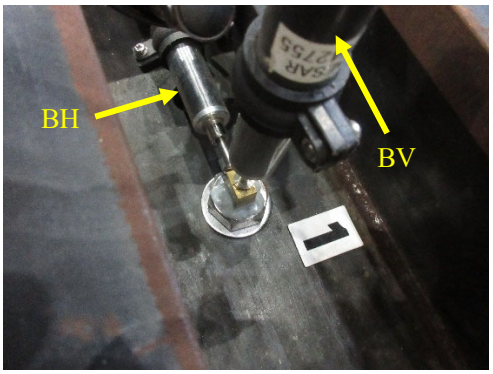
(a) 治具側面



(b) 治具正面



(c) セットボルト取付状況

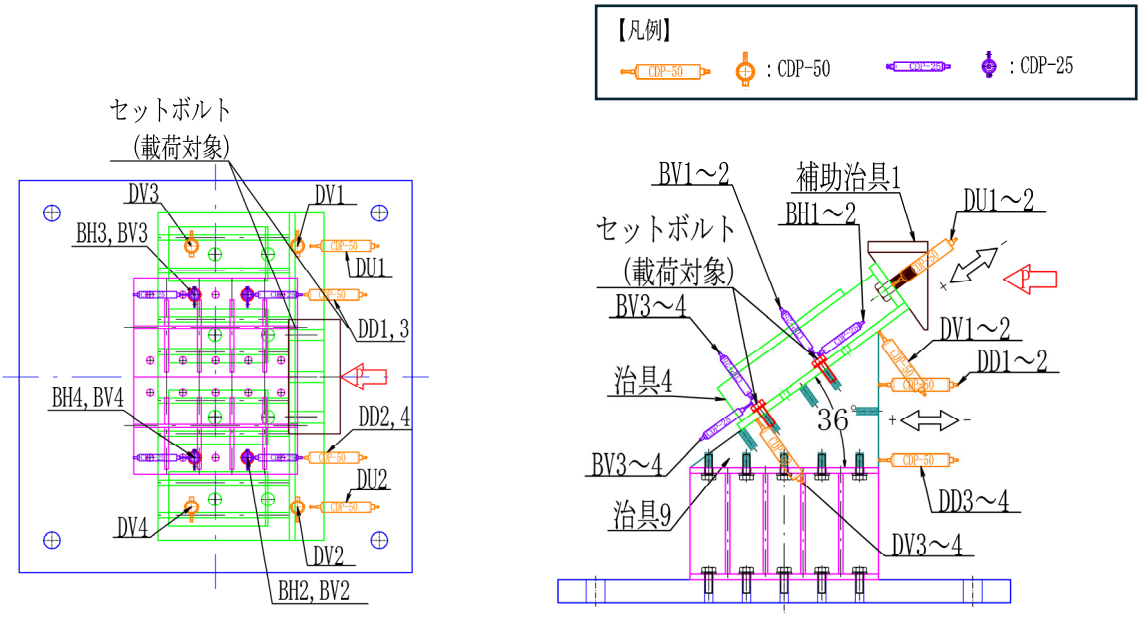


(d) 変位計取付状況

写真-4. 3. 6　治具写真（CASE2）

iii）変位計の設置位置

本ケースでは高感度変位計（CDP-25 及び CDP-50）を使用して変位量を計測した。変位計設置位置を**図-4. 3. 8** に示す。BH1～4 及び BV1～4 は各セットボルトの斜面に沿った方向及び斜面に対して垂直な方向の変位を計測している。また，DU1～2 及び DV1～4 は治具 4 の斜面に沿った方向及び斜面に対して垂直な方向の変位を，DD1～4 は治具 9 の水平方向の変位を計測している。



(a) 平面図　　(b) 側面図

図-4. 3. 8　変位計設置位置（CASE2）

iv）載荷結果

各ボルトの荷重と水平変位の関係を**図-4. 3. 9** に示す。水平変位（BH1'～BH4'）は，各セットボルトに水平方向に設置した変位計の計測値（BH1～BH4）から治具 9 の水平変位（DD1～DD3 又は DD2～DD4 の平均値に斜方向角度（cos 36°）を考慮した値）を差し引いて算出した。載荷重の基準値は**付録 2** に基づき 70kN と設定し，140kN まで 70kN 刻みで載荷と除荷を繰り返した後，173.7kN で各セットボルトがほぼ同時に降伏に至ったと判断した。**図-4. 3. 10** に示す降伏荷重付近の荷重とセットボルトの斜面に沿った方向の変位の関係から，セットボルトの斜面に沿った方向の変位量の基準値は降伏変位（δ）が最小である BH3'=0.834mm を代表値とした。その後，P=187.5kN 程度をピークとして荷重が低下し，各セットボルトの斜面に沿った方向の変位が 3.3～4.3mm に達した際に前列（ジャッキ側）のセットボルト（BH1'及び BH2'）が破断した。なお，破断直前の変位量の最小値は BH1'=3.309mm（BH3'の降伏変位を基準とし，3.97δ）であった。

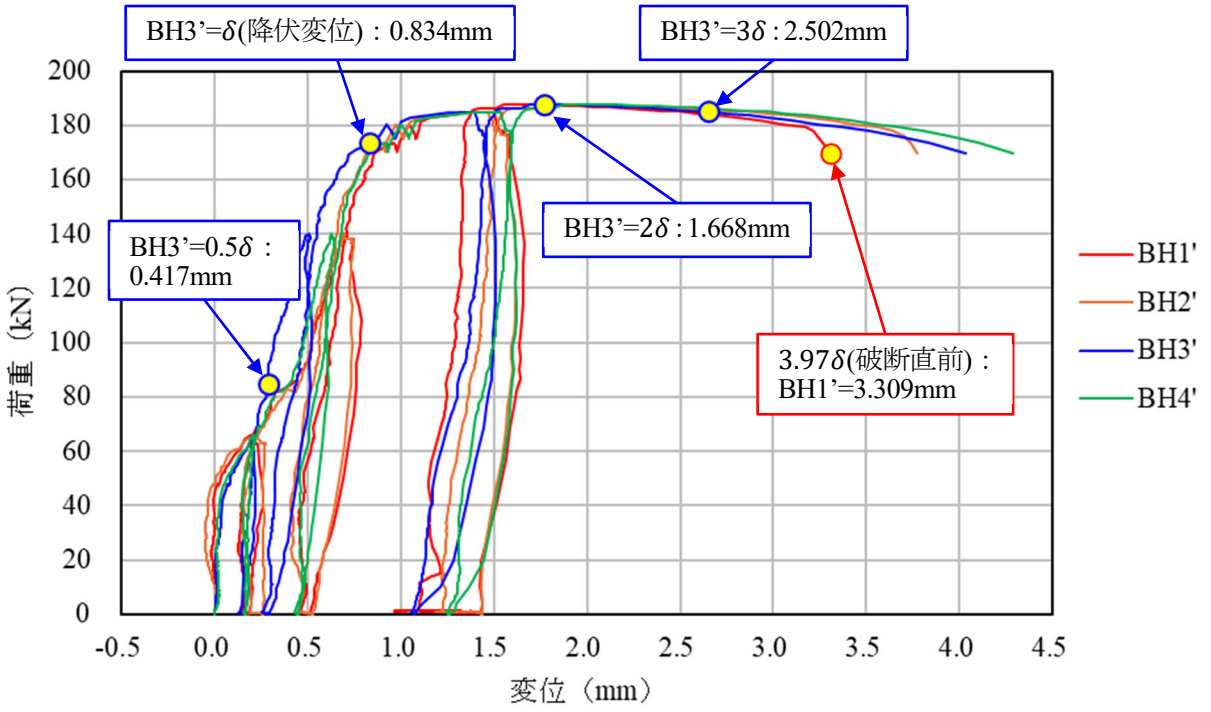


図-4.3.9　各セットボルトの荷重と斜面に沿った方向の変位の関係（CASE2）

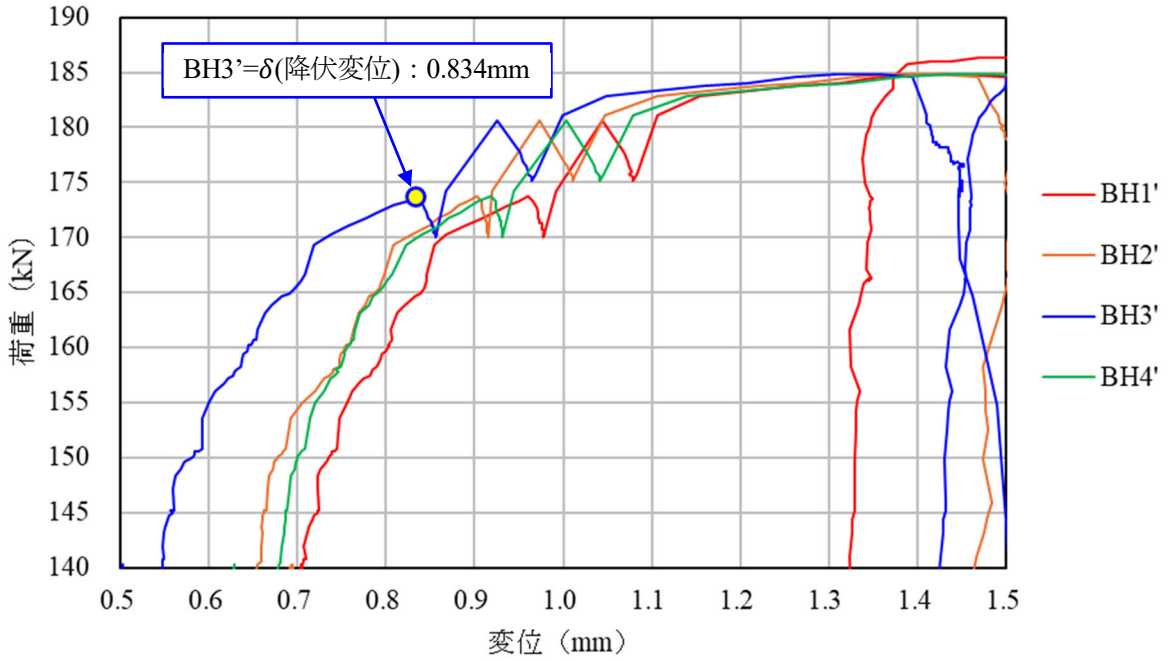


図-4.3.10　降伏荷重付近の各セットボルトの荷重と斜面に沿った方向の変位の関係（CASE2）

続いて，各セットボルトの荷重と斜面に対して垂直な方向の変位の関係を**図-4.3.11** に示す。鉛直変位（BV1'～BV4'）は，各セットボルトに斜面に対して垂直な方向に設置した変位計の計測値（BV1～BV4）から治具 9 の水平変位（DD1～DD3 又は DD2～DD4 の平均値に斜方向角度

（sin 36°）を考慮した値）を差し引いて算出した。セットボルトの斜面に対して垂直な方向の変位は，前列（BV1’及び BV2’）と後列（BV3’及び BV4’）で大きく異なる傾向を示した。後列のセットボルトでは弾性域において斜面に対して垂直な方向の変位が負側に生じているが，これは後列のセットボルトが治具 4 に生じるモーメントの起点に近く，載荷による治具 4 の角度変化の影響を強く受けたためと推測される。計測指標となるセットボルトの斜面に対して垂直な方向の変位は，斜面に沿った方向の変位が降伏相当変位の各倍数に達した際の BV1～BV4 の最小値とした。最後に，BH1’を代表とした本ケースの載荷と除荷のタイミングを**図-4. 3. 12** に示す。

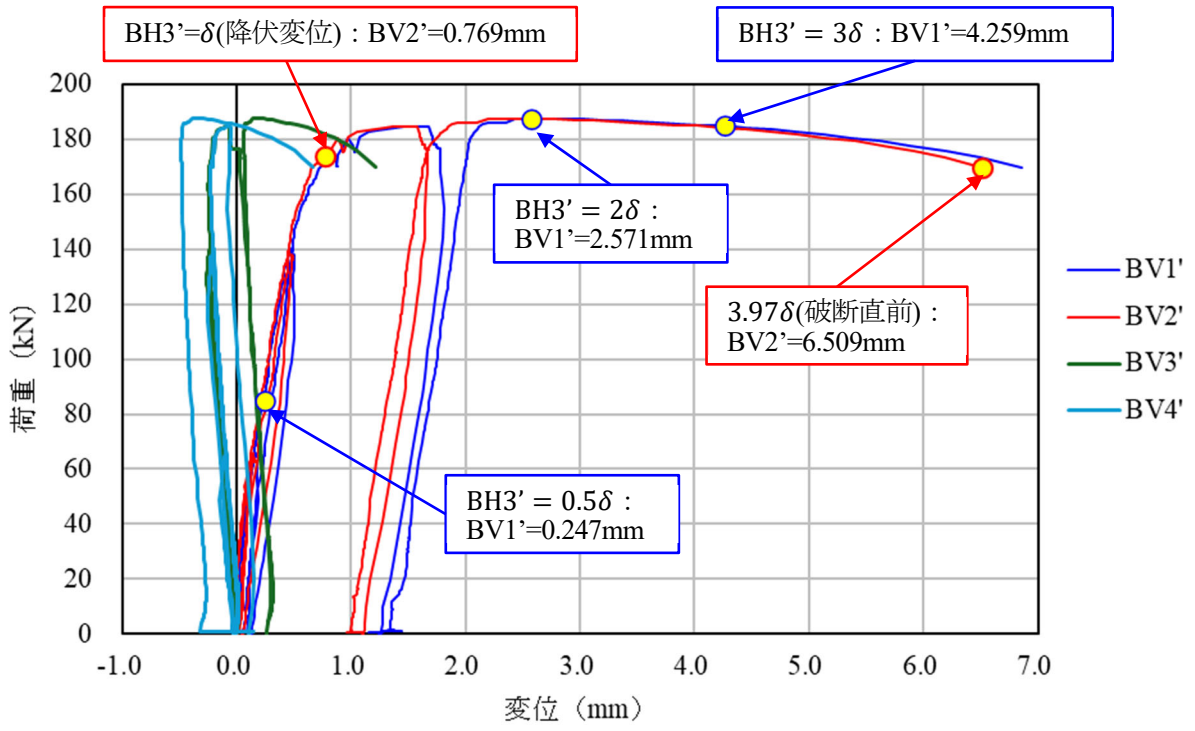


図-4. 3. 11　各セットボルトの荷重と斜面に対して垂直な方向の変位の関係（CASE2）

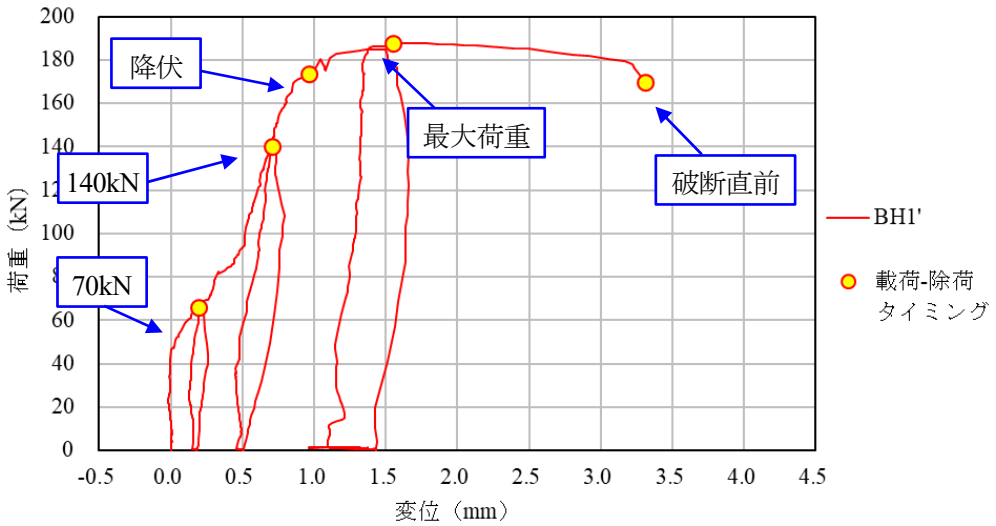


図-4. 3. 12　載荷と除荷のタイミング（CASE2）

ｖ）計測指標の抽出

本ケースで取得したセットボルトの耐荷力に影響を及ぼす計測指標を**表-4.3.7** に示す。ただし，これらの計測指標は代表値の 1 例であり，実際の調査で**表-4.3.7** に示す降伏相当変位を超える値が計測された場合でも，必ずしもその部材が降伏に至っているとは限らない。本実験で得られた計測指標は，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標を整理した例として提示している。

表-4.3.7 セットボルトの荷重変曲点などに相当する計測指標の例（CASE2）

変位量計測対象	実際の計測対象	単位	載荷対象の降伏変位相当（δ）を基準とした計測対象の変位量				
			$1/2\delta$	δ	$2\ \delta$	$3\ \delta$	$3.97\ \delta$
セットボルトの斜面に沿った方向の変位量	セットボルト頭部の軸直角方向変位	(mm)	0.417	0.834	1.668	2.502	3.309
セットボルトの斜面に対して垂直な方向の変位量	セットボルト頭部の軸方向変位	(mm)	0.247	0.769	2.571	4.259	6.509

3） CASE3：上沓突起部

ｉ）実際の損傷と実験ケースの設定に関する方針

上沓は上部構造に固定され，突起部と下部構造に固定されるサイドブロックが嵌合することで水平方向の荷重を伝達するとともに上下部構造の相対水平変位を設計で想定した範囲内に抑える。しかし，地震時には上沓の突起部が損傷する事例が確認されており，これを再現する実験を計画した。**写真-4.3.7** に上沓突起部の損傷例を示す。道路橋支承標準設計における BP 支承の上沓の最小形状寸法を**図-4.3.13** に示す。本ケースでは，最小形状寸法とは異なるものの，それに近しい規模（**図-4.3.14**）を使用して載荷実験を実施した。



写真-4.3.7　上沓突起部の損傷例 [4.14)]

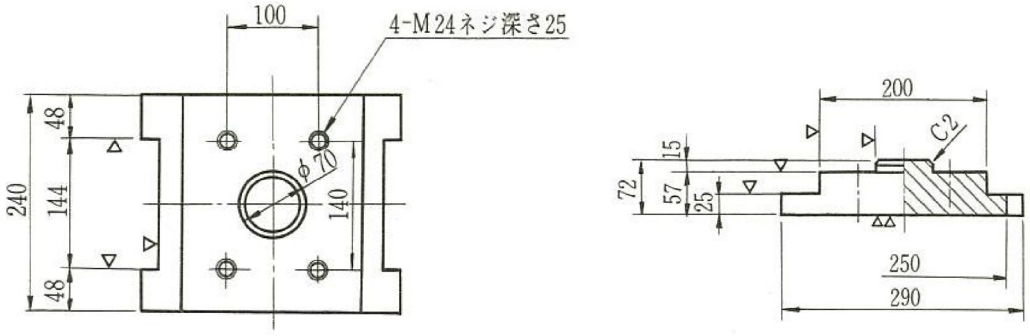


図-4.3.13　支承標準設計に示されている BP 支承の上沓の最小形状 [4.16)]

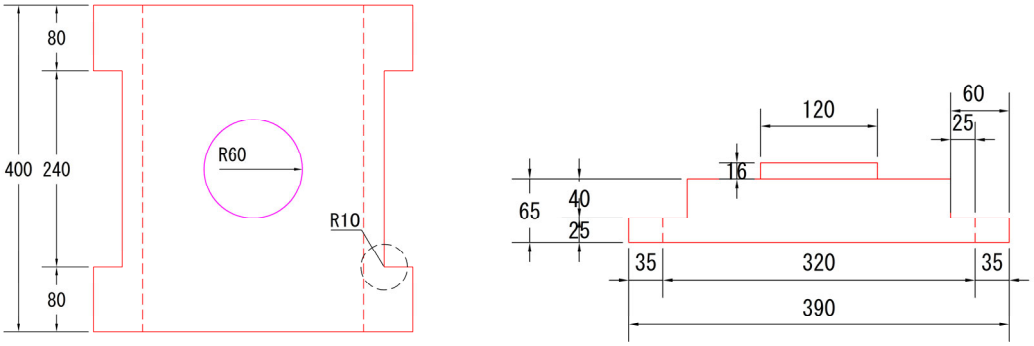


図-4.3.14　本ケースで使用した上沓の形状寸法

ii）載荷対象の設置方法

本ケースでは，**写真-4.3.8** に示すジャッキを使用した。また，**図-4.3.15** 及び**写真-4.3.9** に示す治具を使用して実験を実施した。上沓は通常の設置状態から 90° 回転させ，立てた状態で設置した。上沓側面から水平に載荷し上沓を水平方向に移動させることで，固定した治具 13 を通じて下側の突起部内側に荷重を加える計画とした。その際，上沓には下側の突起部を中心としたモーメントが生じるため，モーメントによる回転を防ぐ目的で，治具により側面及び上下面から挟み込み上沓を固定した。

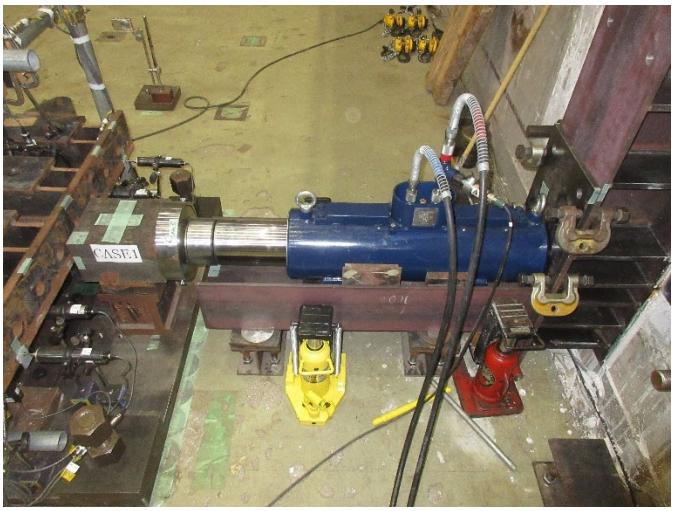
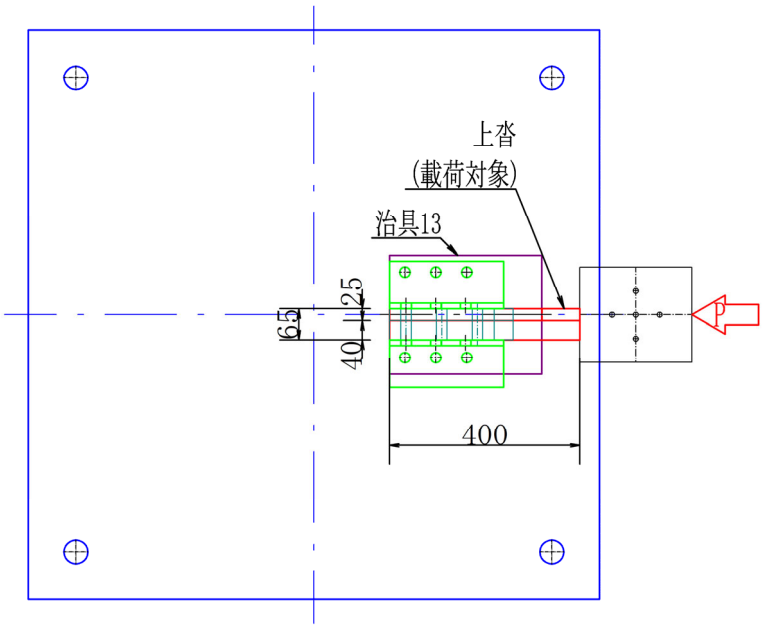
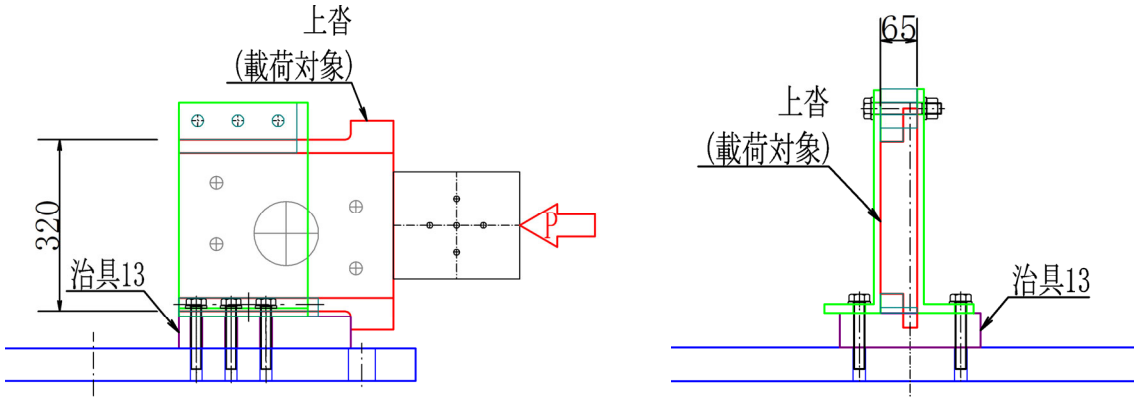


写真-4.3.8　オックスジャッキ：RM-10050（1000kN，ストローク 500mm）

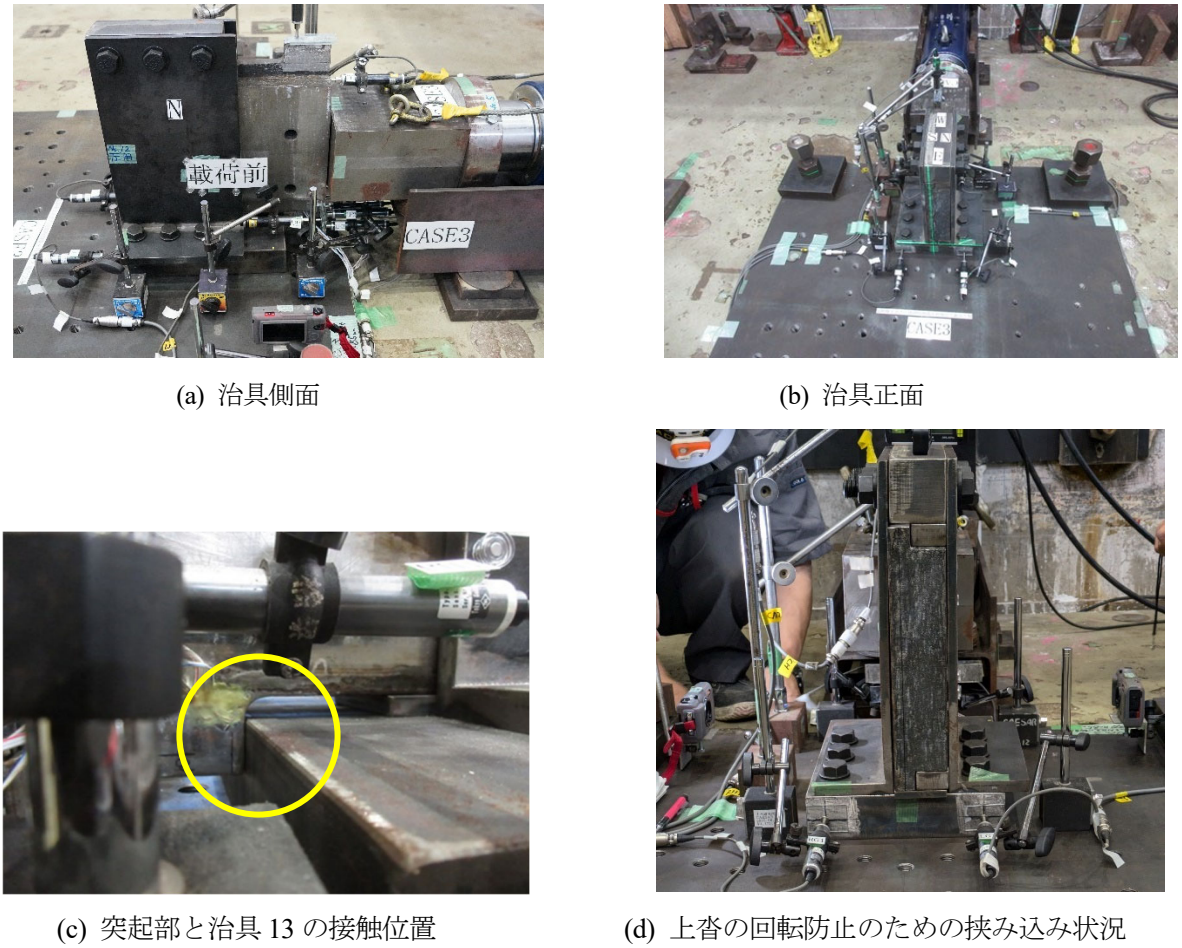


(a) 平面図



(b) 側面図　　(c) 正面図

図-4.3.15　載荷計画図（CASE3）



(a) 治具側面　　(b) 治具正面

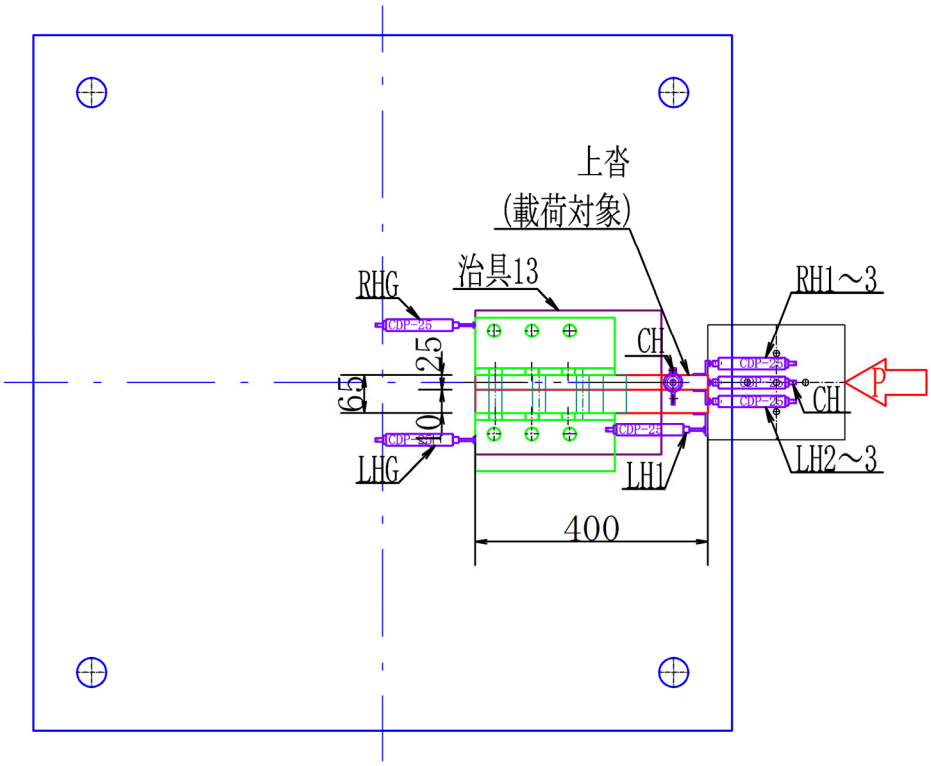
(c) 突起部と治具 13 の接触位置　　(d) 上沓の回転防止のための挟み込み状況

写真-4.3.9　治具写真（CASE3）

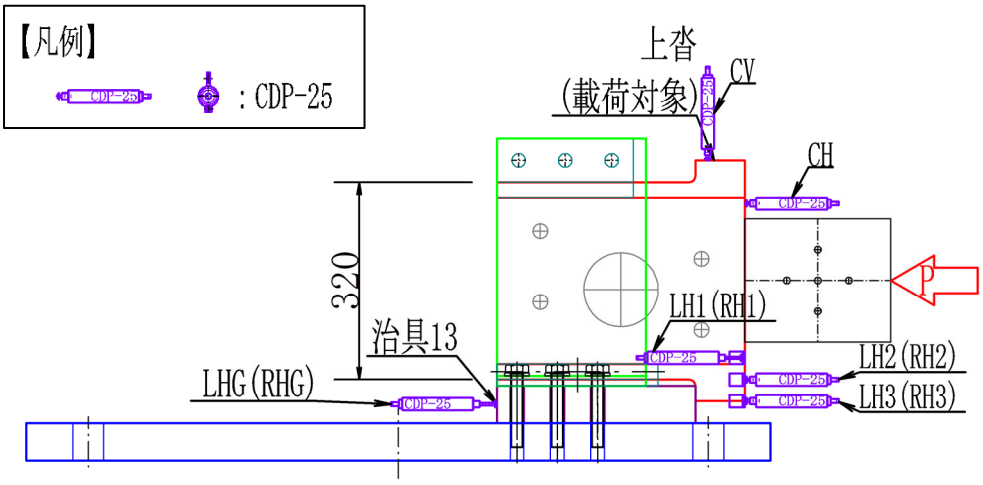
iii）変位計の設置位置

本ケースでは変位量の計測に高感度変位計（CDP-25）並びにひずみゲージ（1 軸（FLA5-11）及

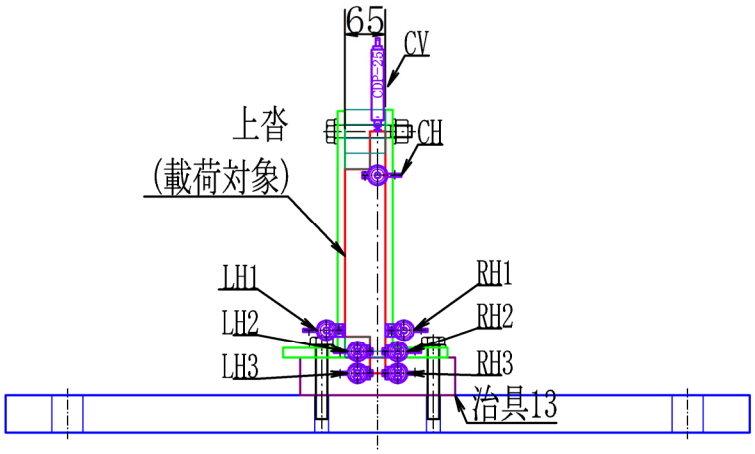
び 3 軸（FRA5-11），東京測器研究所）を使用した。変位計設置位置を**図-4. 3. 16**(a)～(c)に示す。CH，LH1～3 及び RH1～3 は上沓側面の水平変位量を計測しており，CV は上沓の鉛直変位量を計測している。また，LHG 及び RHG は治具 13 の水平移動量を計測している。さらに，ひずみゲージ設置位置を**図-4. 3. 17**(a)～(b)に示す。本ケースでは上沓側面に 1 軸ゲージを，上沓と治具 13 の干渉部側面に 3 軸ゲージを設置して計測を実施した。



(a) 平面図

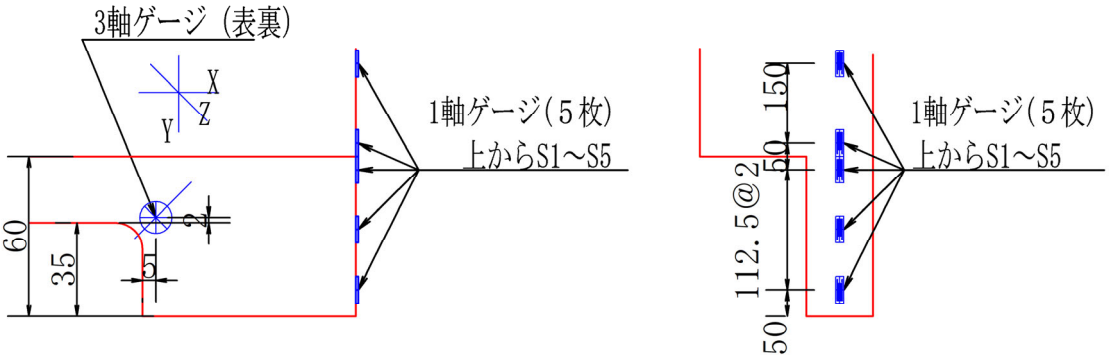


(b) 側面図



(c) 正面図

図-4.3.16　変位計設置位置（CASE3）



(a) 側面図　　(b) 正面図

図-4.3.17　ひずみゲージ設置位置（CASE3）

iv）載荷結果

上沓側面に設置した 1 軸ひずみゲージの荷重とひずみ関係を**図-4.3.18** に示す。本ケースでは，**付録 2** に基づき基準値を 210kN と設定し，210kN 時点で載荷と除荷を実施した後，250kN 付近で 1 軸ひずみゲージの荷重とひずみ関係が変化し始めたため，277kN 時点での S2=2000 μを載荷と除荷のタイミングの基準値（δ）と設定し除荷を実施した。S2～S4 ゲージの降伏点付近の荷重とひずみ関係の拡大図を**図-4.3.19** に示す。その後，2δ（R1x が到達），及び 5δ（L1z が到達）のタイミングで除荷を実施した。突起部付け根に設置した 3 軸ひずみゲージの荷重とひずみ関係を**図-4.3.20** に示す。5 δ以降はひずみゲージの計測結果の信頼性が低いと判断したため，RH1=10mm のタイミングで除荷を実施した。さらに，P=395.7kN で荷重が最大に達しそれ以上の増加が見られなくなったため，CH=24.8mm のタイミングで除荷を実施し，その後の載荷は突起部の破断まで継続した。載荷と除荷の各タイミングについて CH を代表として**図-4.3.21** 図-4.3.21 に示す。

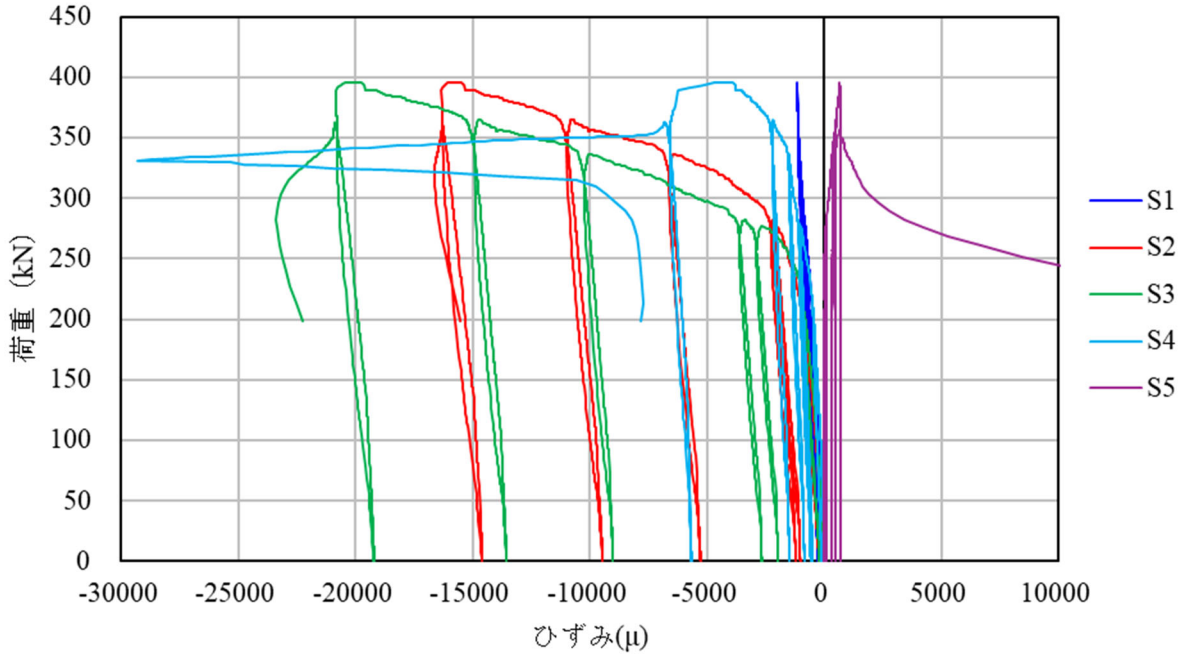


図-4.3.18　1 軸ひずみゲージの荷重とひずみの関係（CASE3）

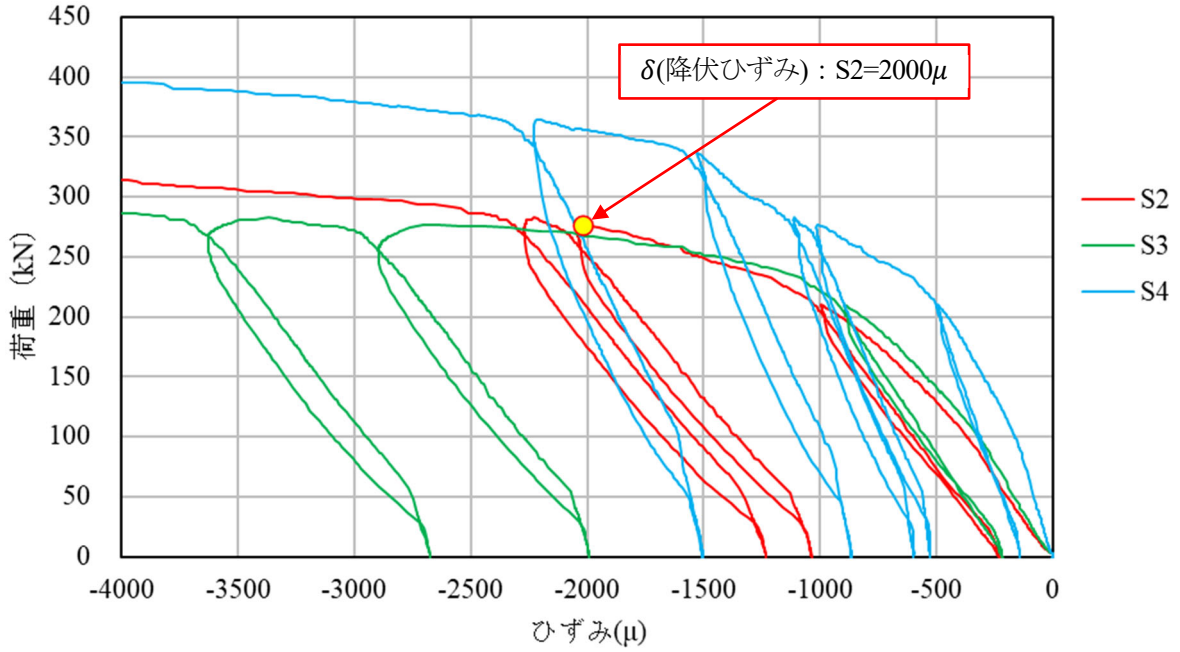


図-4.3.19　降伏点付近の 1 軸ひずみゲージの荷重とひずみの関係（CASE3）

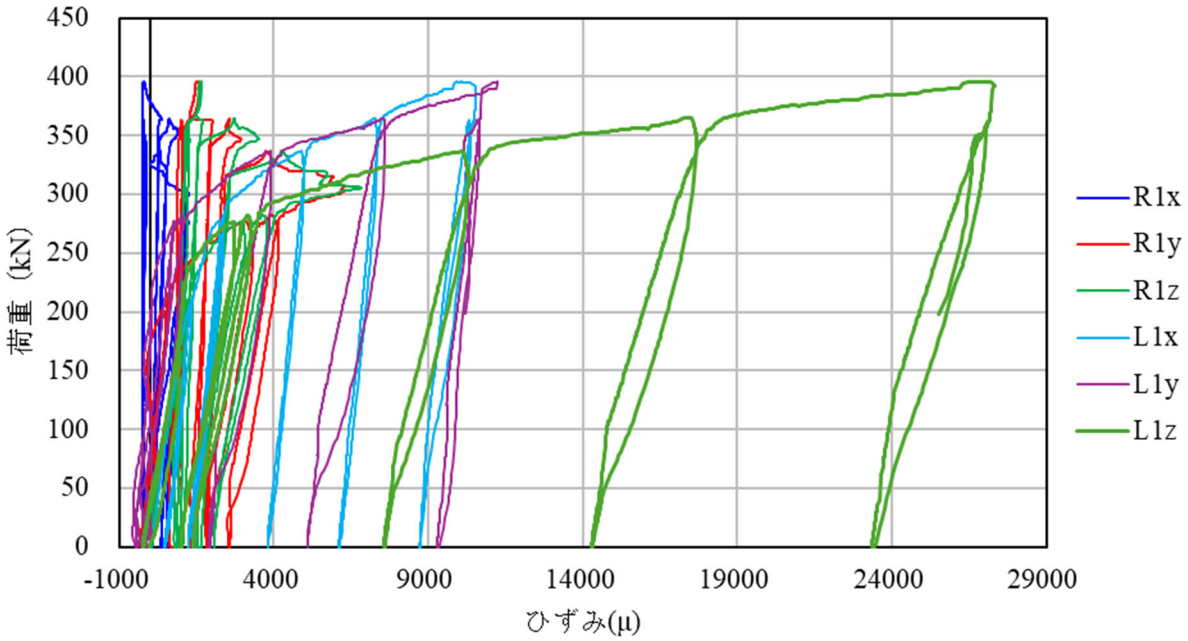


図-4.3.20　3 軸ひずみゲージの荷重とひずみの関係（CASE3）

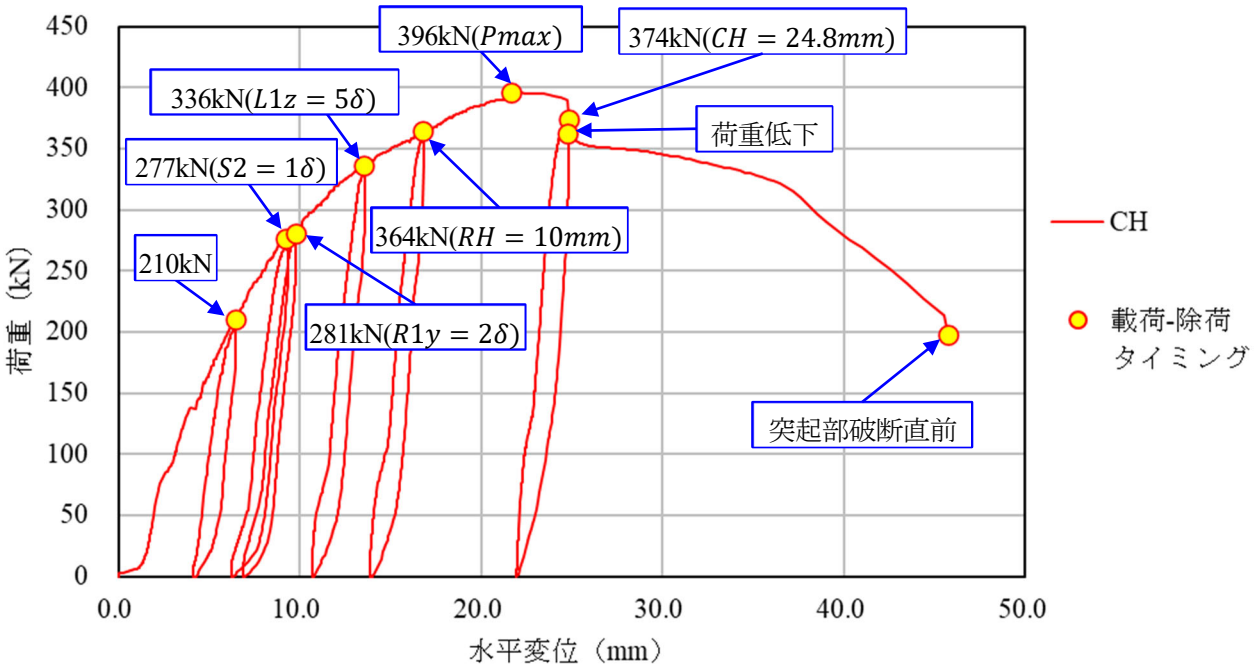


図-4.3.21　載荷と除荷のタイミング（CASE3）

次に突起部側面の荷重と変形角の関係を図-4.3.22 に示す。各グラフは変位計間の区間角度を示しており，H1-H2 及び H2-H3 は CH-H1 の角度に対する相対角度である。また，各区間の角度を算出する際の変位量は R 側と L 側の変位計の計測結果の平均値を使用した。載荷と除荷のタイミングは 1 軸ひずみゲージ S2 の降伏変位相当（2000 μ）を基準に設定したが，実際には 1 軸ひずみゲージ S3 が 1500 μ付近で降伏する傾向が見られたため，S3 の降伏相当変位を基準として変位角を整理

した。S3= δ（1500 μ）時点における突起部の区間角度は H1-H2 間が 0.122°，H2-H3 間が 0.017°であった。なお，CH=24.8mm 時点から除荷を行う途中で R（L）H1～3 の変位計が計測限界に達したため，破断直前の区間角度は算出できなかった。

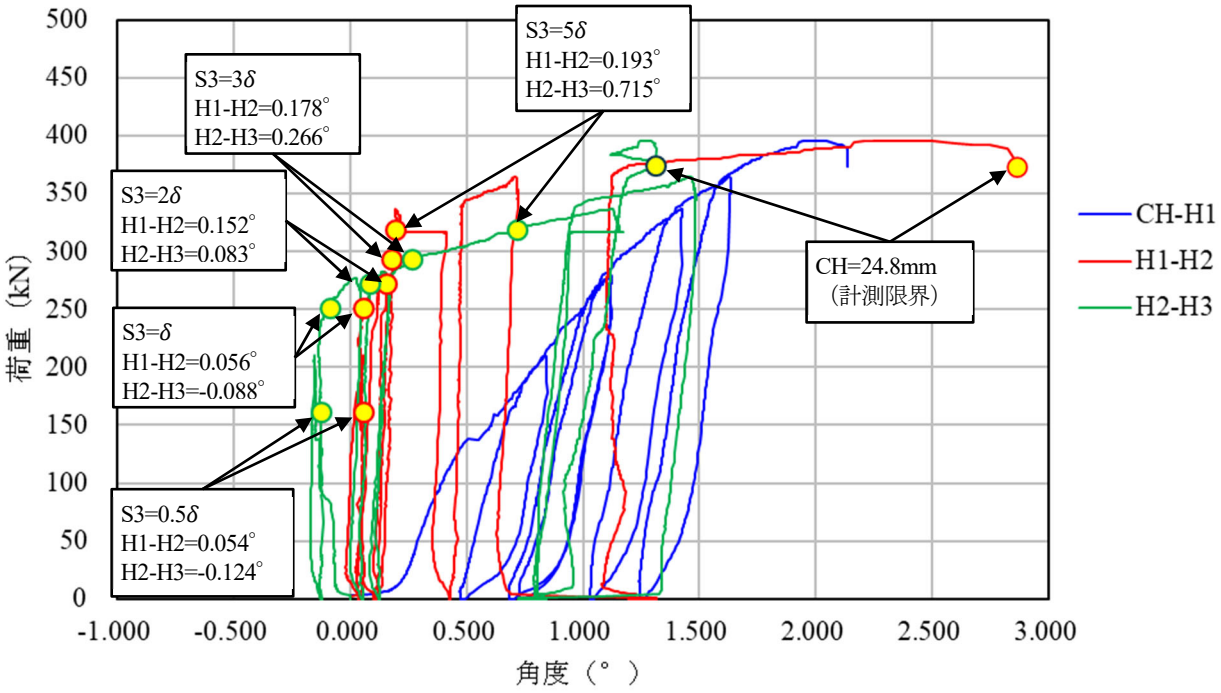


図-4.3.22　突起部の荷重と変位角の関係（CASE3）

ｖ）計測指標の取得

本ケースで取得した上沓突起部の耐荷力に影響を及ぼす計測指標を**表-4.3.8** に示す。ただし，これらの計測指標は代表値の 1 例であり，実際の調査で**表-4.3.8** に示す降伏相当変位を超える値が計測された場合でも，必ずしもその部材が降伏に至っているとは限らない。本実験で得られた計測指標は，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標を整理した例として提示している。

表-4.3.8　上沓突起部の荷重変曲点などに相当する計測指標の例（CASE3）

変位量計測対象	実際の計測対象	単位	載荷対象の降伏相当変位（δ）を基準とした計測対象の変位量				
			1/2δ	δ	2 δ	3 δ	5 δ
上沓突起部の角度	上沓厚さ減少位置から突起部付け根までの角度	（°）	0.054	0.056	0.152	0.178	0.193
上沓突起部の角度	突起部付け根から先端までの角度	（°）	-0.124	-0.088	0.083	0.266	0.715

4）CASE4：ピン（くびれ部）

ｉ）実際の損傷と実験ケースの設定に関する方針

ピンはピン支承，ピンローラー支承及び 1 本ローラー支承に含まれる部品の一つである。ピンの回転により橋軸方向への回転変位に追随し，ピン中央のくびれ部が上沓及び下沓と嵌合して橋軸直角方向の水平荷重に抵抗する。しかし，地震時には橋軸直角方向の荷重によってピンのくびれ部が破断する損傷事例が確認されており，これを再現する計画とした。**写真-4.3.10** にピンローラー支承を例としたピン及びくびれ部の位置を，**写真-4.3.11** にピンの損傷例を示す。また，道路橋支承標準設計におけるピンの最小形状寸法を**図-4.3.23** に示す。本ケースでは，最小形状寸法とは異なるものの，それに近い規模のピン（**図-4.3.24**）を使用して載荷実験を実施した。



写真-4.3.10　ピン及びくびれ部の位置

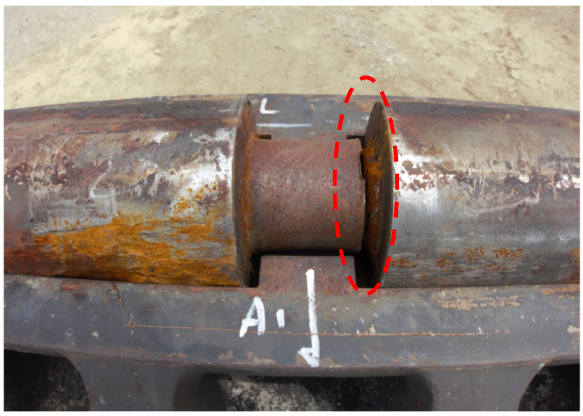


写真-4.3.11　ピンのくびれ部の損傷例

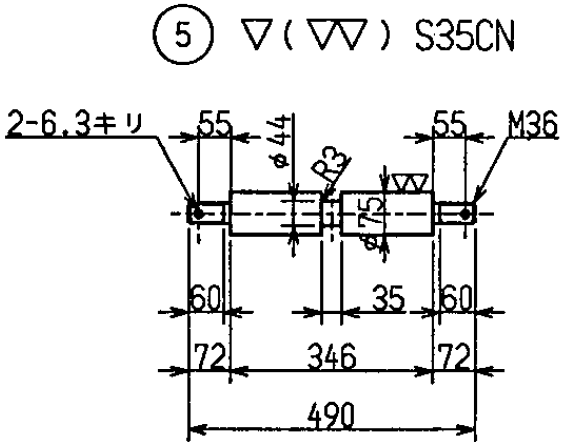


図-4.3.23　支承標準設計に示されているピンの最小形状[17)]

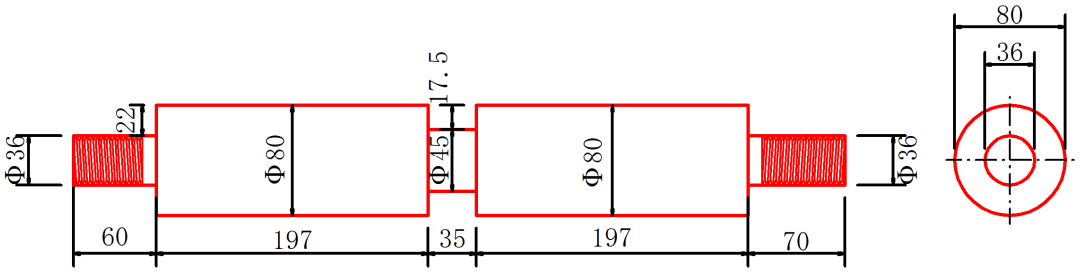


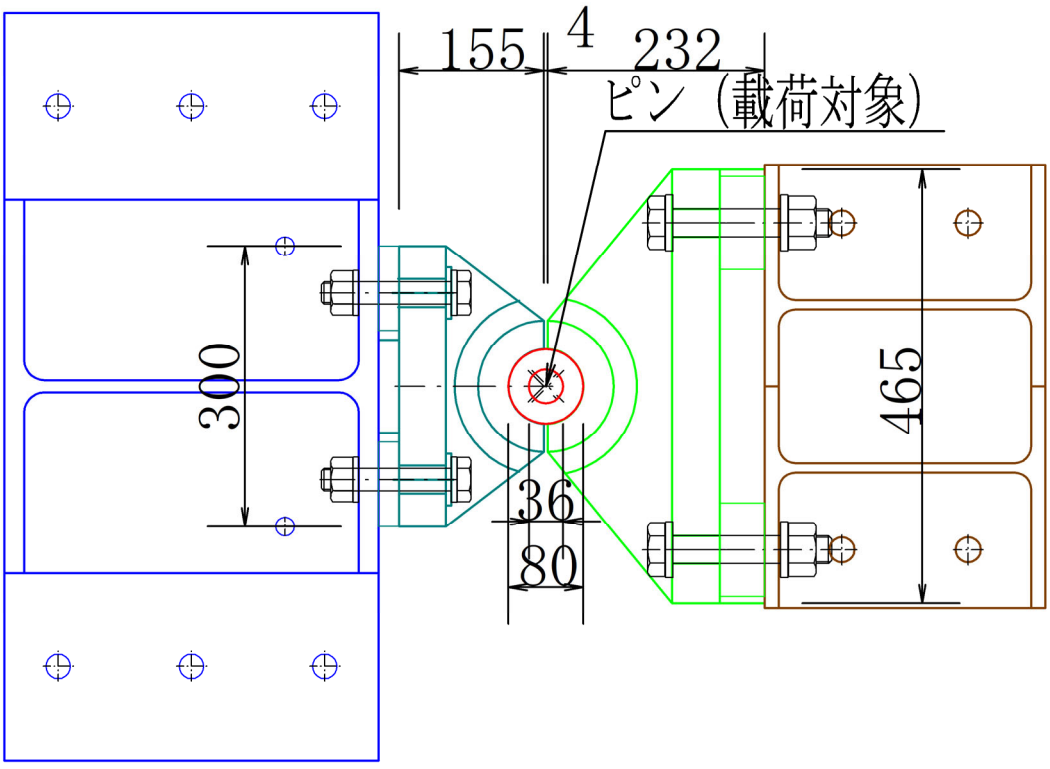
図-4.3.24　本ケースで使用したピンの形状寸法

ⅱ）載荷対象の設置方法

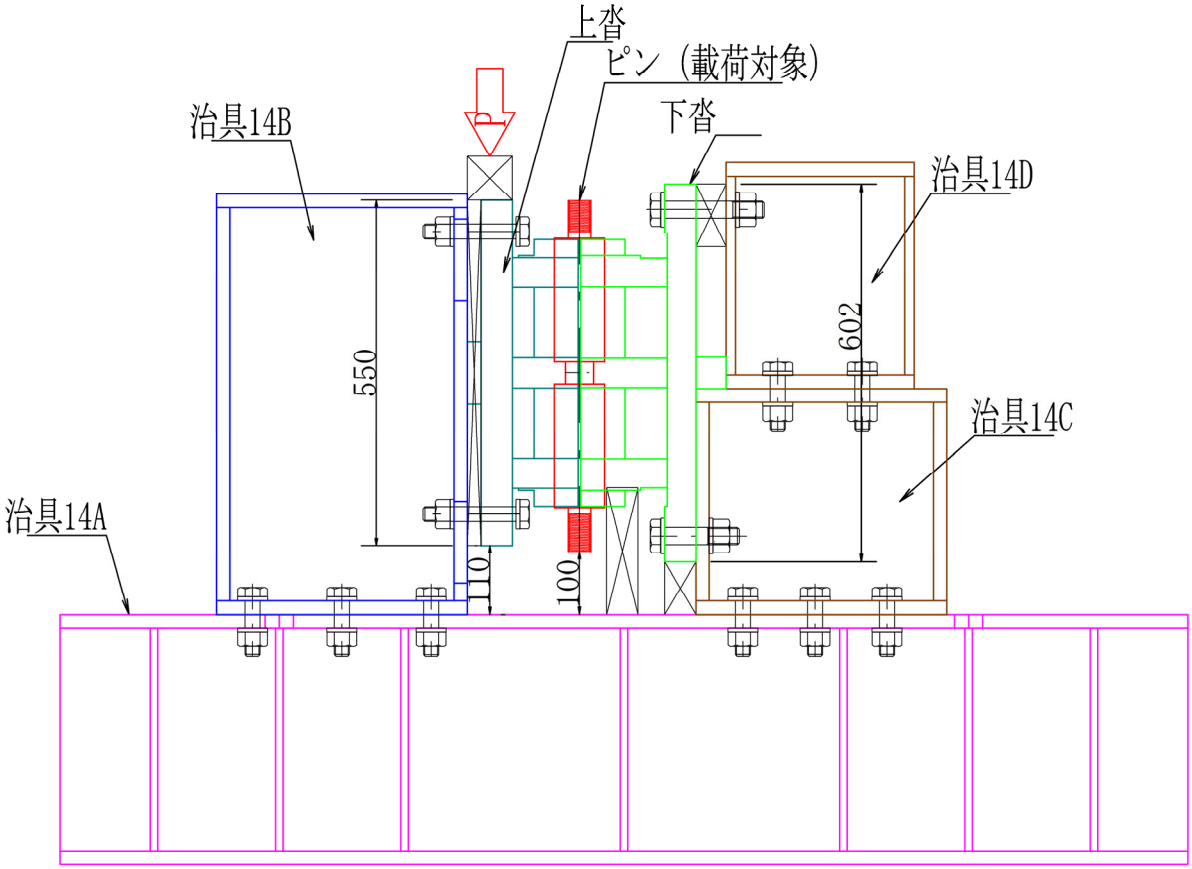
本ケースでは，**写真-4.3.12** に示す大型構造物繰返し載荷試験装置を使用した。また，**図-4.3.25** 及び**写真-4.3.13** に示すような治具を使用して実験を実施した。支承は 90° 回転させ，ピンの部材軸方向が鉛直となるように設置した。さらに，下沓を完全固定し，上沓を上下にスライド可能な状態で設置し，上沓を下方向にスライドさせることでピンとの嵌合部に荷重を加える計画とした。



写真-4.3.12　大型構造物繰返し載荷試験装置

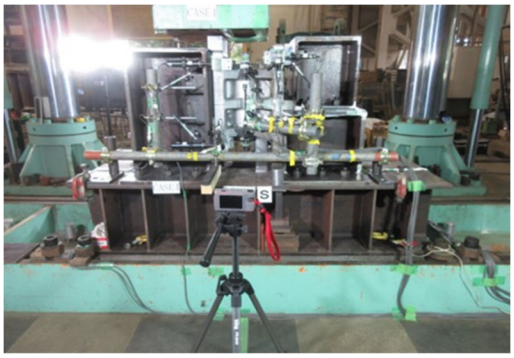


(a) 平面図



(b) 側面図

図-4.3.25　載荷計画図（CASE4）



(a) 治具正面



(b) 上下沓の結合状況



(c) ピン部ターゲット設置状況

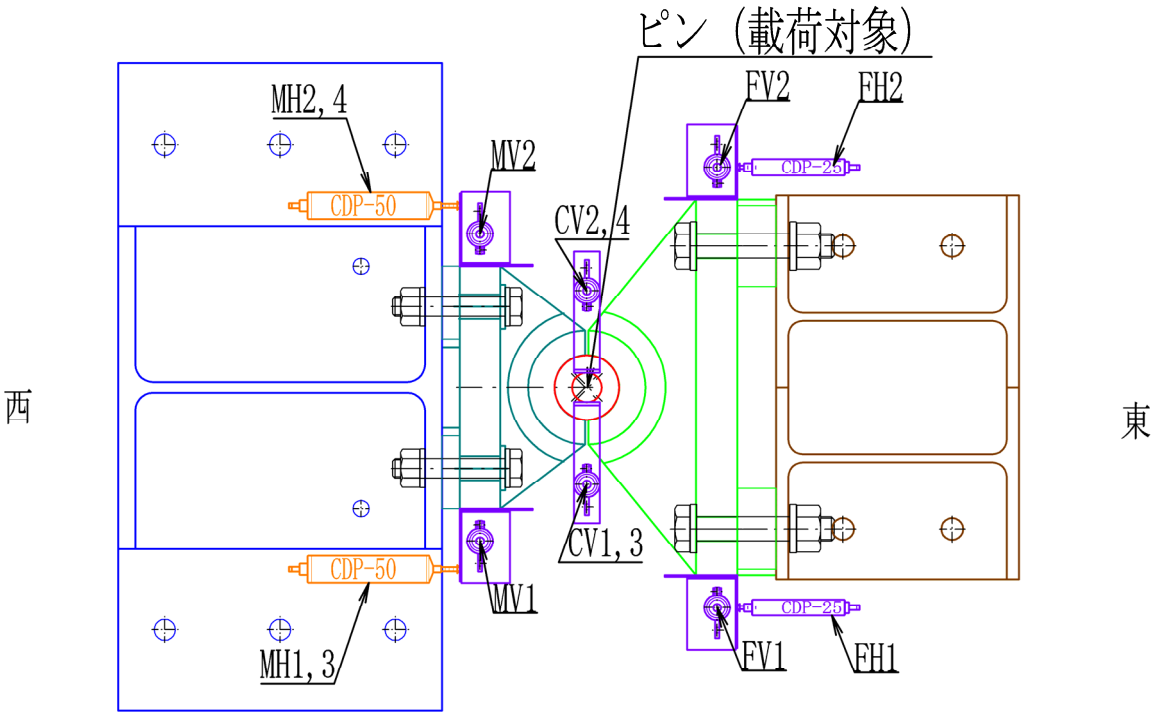


(d) 下側ピン先端の安全対策

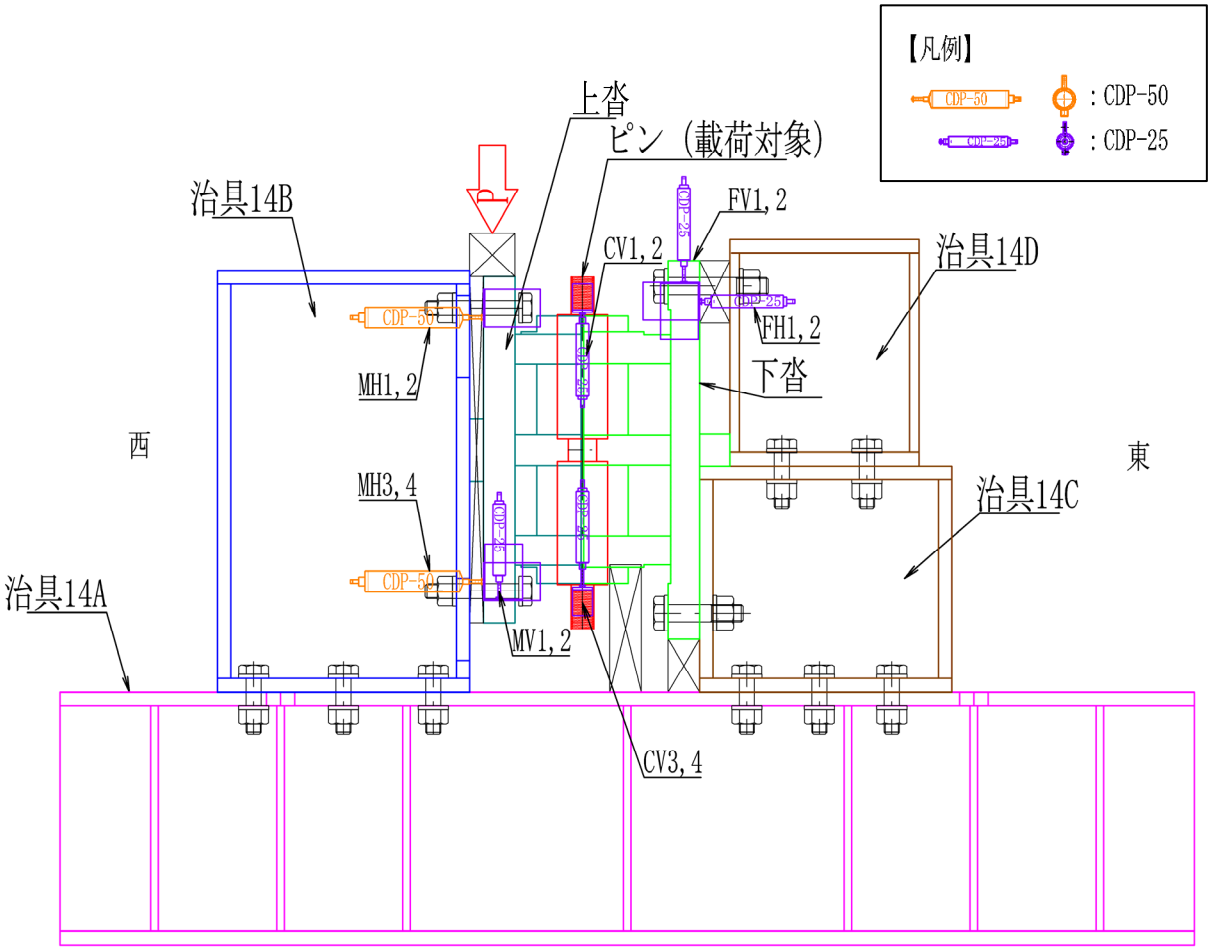
写真-4.3.13　治具写真（CASE4）

iii）変位計の設置位置

本ケースでは変位量の計測に高感度変位計（CDP-25 及び CDP-50）並びに集中ひずみゲージ（FXV1-11，東京測器研究所）を使用した。変位計設置位置を**図-4.3.26** 図-4.3.16（a）～（b）に示す。MH1～4 及び MV1～2 は上沓の水平・鉛直変位を，FH1～4 及び FV1～2 は下沓の水平・鉛直変位を計測している。また，CV1～2 及び CV3～4 はピンの上側及び下側の鉛直変位を計測している。さらに，ひずみゲージ設置位置を**図-4.3.27** に示す。本ケースではくびれ部下端の表裏に集中ゲージを設置した。



(a) 平面図



(b) 側面図

図-4.3.26　変位計設置位置（CASE4）

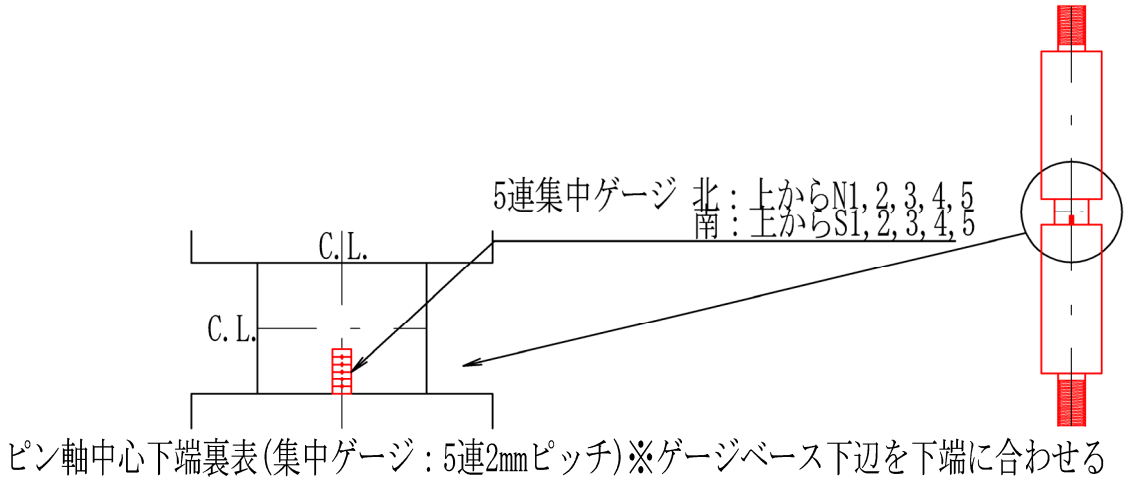


図-4.3.27　ひずみゲージ設置位置（CASE4）

iv）載荷結果

ピンの鉛直方向の伸び量(=くびれ部の伸び量)及び載荷と除荷のタイミングを**図-4.3.28** に示す。CV‘はピン下部の鉛直変位量（CV1～2）の平均値から，ピン上部の鉛直変位量（Cv3～4）を差し引くことにより算出した実変位量である。本ケースでは，**参考資料-1** に基づき基準値を 170kN と設定し，340kN まで載荷と除荷を繰り返した。その後，412kN 付近でピンのくびれ部が降伏に至ったと判断し，降伏相当変位をδ=0.15mm に設定した。さらに CV’=0.45mm（3 δ ）で除荷を実施した。最終的には P=690.72kN を最大点として荷重の低下が見られたため，CV’=1.5mm（10 δ ）地点で除荷を実施した。また，この時点で上沓及び下沓に傾きが生じていることが確認されたため，くびれ部との嵌合が外れる可能性を考慮し，これ以降の載荷は中止した。

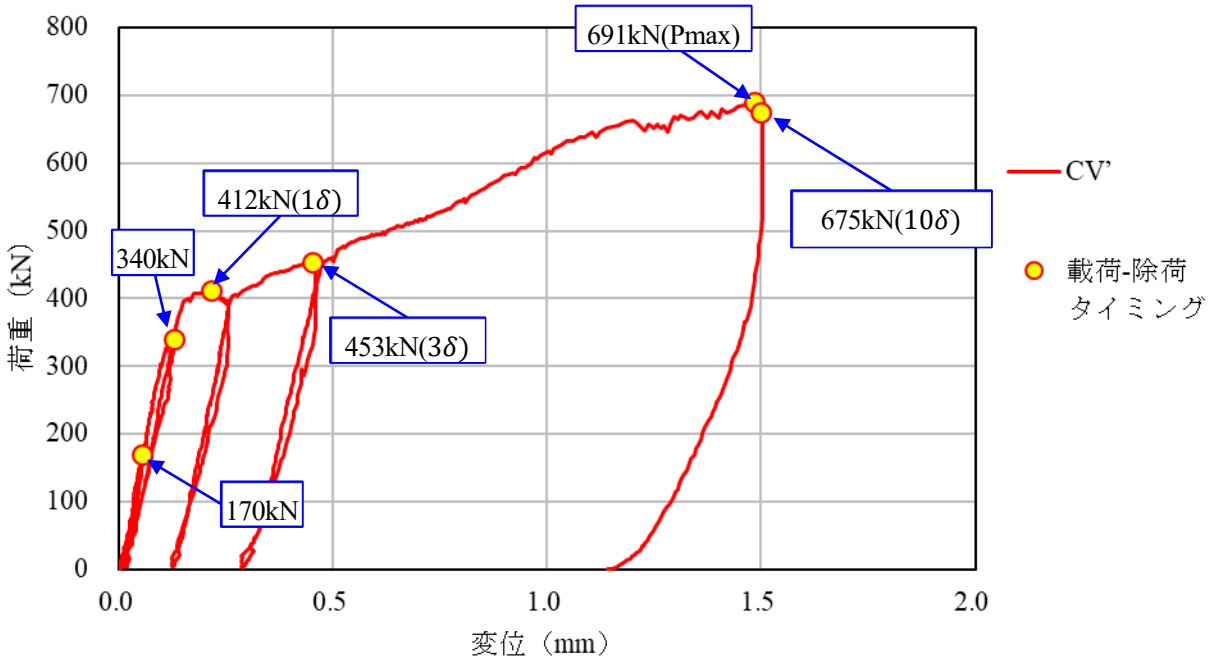


図-4.3.28　くびれ部の伸び量及び載荷と除荷のタイミング

次に，くびれ部の伸び量に関する計測指標を**図-4.3.29** に示す。また，くびれ部に設置した 1 軸ひずみゲージの計測ステップ-ひずみ関係を**図-4.3.30** 及び**図-4.3.31** に示す。なお，各項目における“N”及び“S”の表記は，くびれ部の北側及び南側に設置したひずみゲージをそれぞれ示している。また，計測ステップは 2 秒間隔で実施した。各ひずみについては，荷重最大点直前に急激な低下が確認された。この現象はひずみゲージがくびれ部から剥がれたことによるものと推測される。

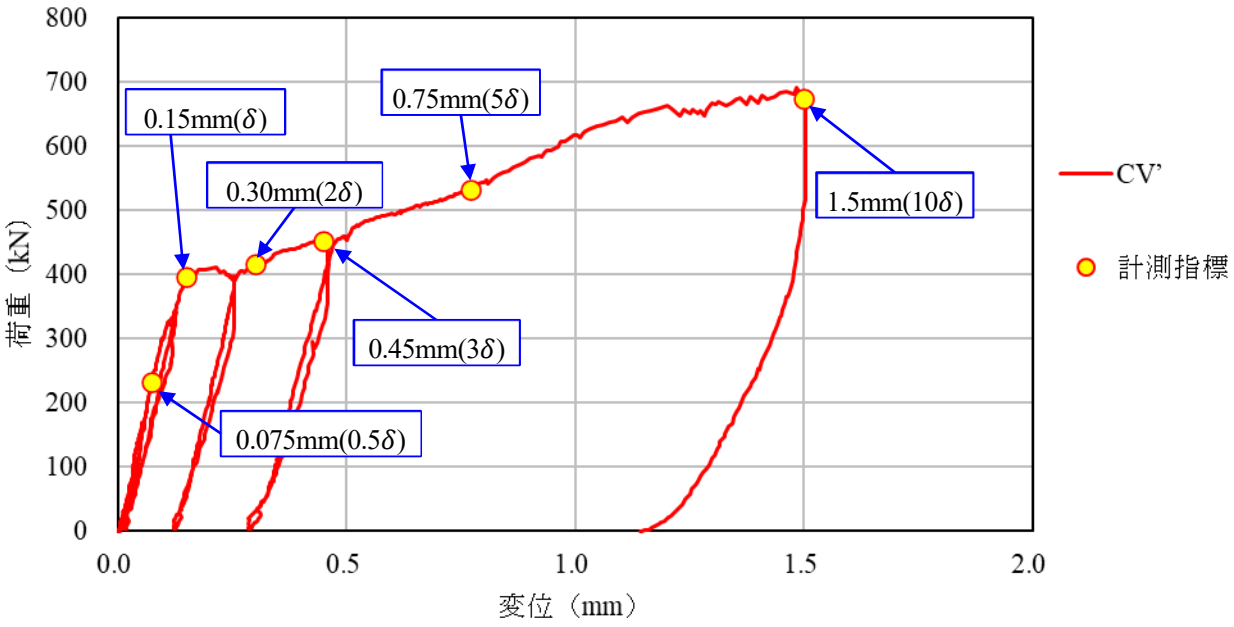


図-4.3.29　くびれ部の伸び量における計測指標

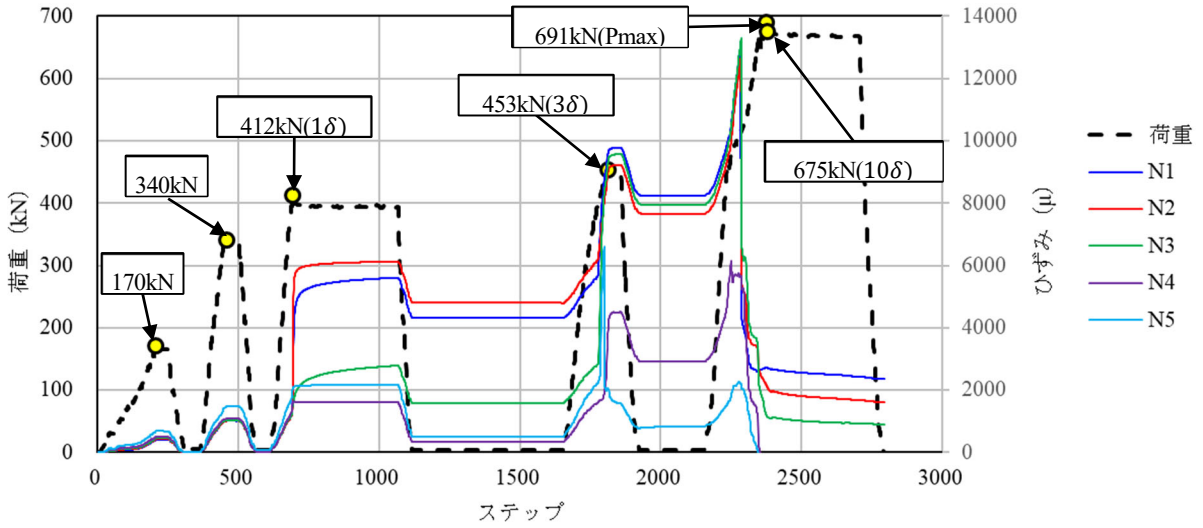


図-4.3.30　くびれ部の計測ステップ-ひずみ関係（北側）

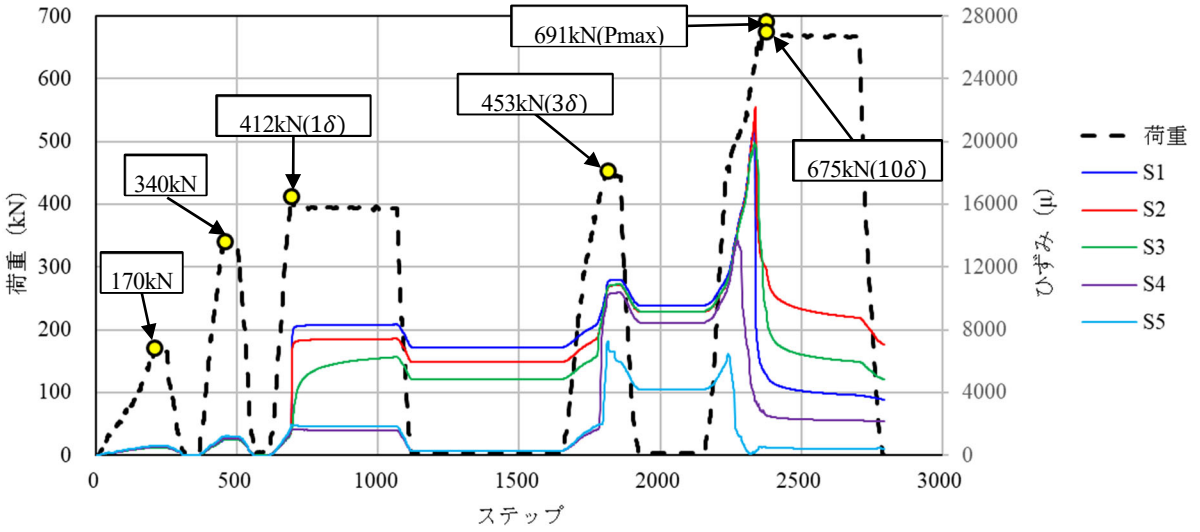


図-4.3.31　くびれ部の計測ステップ-ひずみ関係（南側）

ｖ）計測指標の取得

本ケースで取得したピンの耐荷力に影響を及ぼす計測指標を**表-4.3.9** に示す。ただし，これらの計測指標は代表値の 1 例であり，実際の調査で**表-4.3.9** に示す降伏相当変位を超える値が計測された場合でも，必ずしもその部材が降伏に至っているとは限らない。本実験で得られた計測指標は，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標を整理した例として提示している。

表-4.3.9　ピンの荷重変曲点などに相当する計測指標の例（CASE4）

変位量計測対象	実際の計測対象	単位	載荷対象の降伏相当変位（δ）を基準とした計測対象の変位量					
			1/2δ	δ	2 δ	3 δ	5 δ	10 δ
ピンのくびれ部の伸び量	正常時に対するピンの総延長の増加量	(mm)	0.075	0.150	0.300	0.450	0.750	1.500

5）CASE5：サイドブロック取付ボルト 01（ゴム支承用）

ⅰ）実際の損傷と実験ケースの設定に関する方針

ゴム支承用のサイドブロックは，サイドブロック取付ボルトによってベースプレートに固定され，橋軸直角方向に作用する水平荷重に抵抗するとともに，同方向への移動を制限する。しかし，地震時にはサイドブロックに作用する水平荷重によりサイドブロック取付ボルトが損傷する事例が確認されている。本ケースでは，この損傷を再現する計画とした。**写真-4.3.14** にサイドブロック取付ボルトの損傷例を示す。

また，サイドブロック取付ボルトは通常 4 本以上配置され，これらが協働して荷重に抵抗する。そのため，本ケースでも 4 本配置したサイドブロック取付ボルトに対して載荷を実施した。なお，道路橋支承標準設計にはゴム支承用のサイドブロック取付ボルトに関する規定がないため，本ケースでは他の支承形式で使用されているサイドブロック取付ボルトの諸元を準用し，ボルト径 M20 及び強度区分 4.8 を採用した。ただし，道路橋標準設計においてはサイドブロック取付ボルトの強度区分の最小値は 4.6 と規定されているが，本ケースでは市場性を考慮して 4.8 を採用している。



写真-4.3.14　ゴム支承用サイドブロック取付ボルトの損傷例 [4.15)]

ⅱ）載荷対象の設置方法

本ケースでは，**写真-4.3.15** に示すジャッキを使用した。また，**図-4.3.32** 及び**写真-4.3.16** に示す治具を使用して実験を実施した。ゴム支承の上沓とサイドブロックが衝突しサイドブロック取付ボルトに損傷が発生するため，本ケースにおいてもサイドブロック頂点付近に水平に荷重を載荷する方針とした。

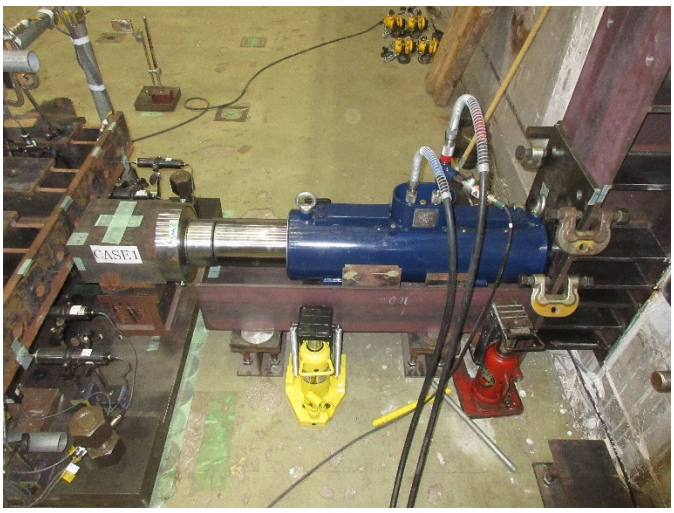
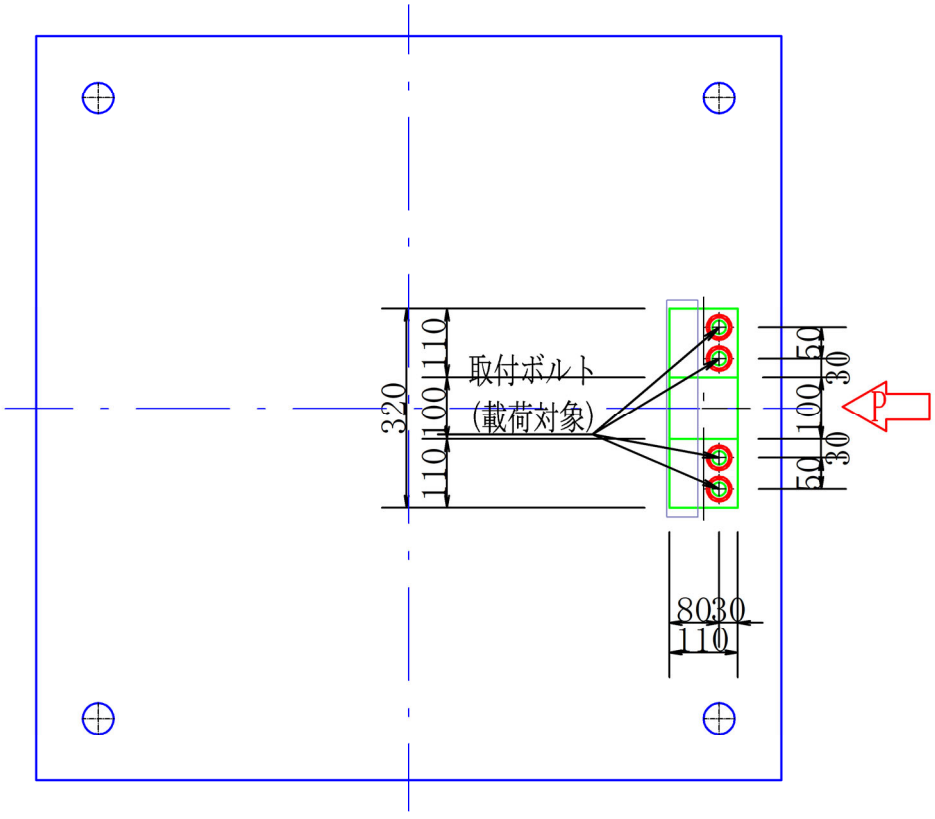
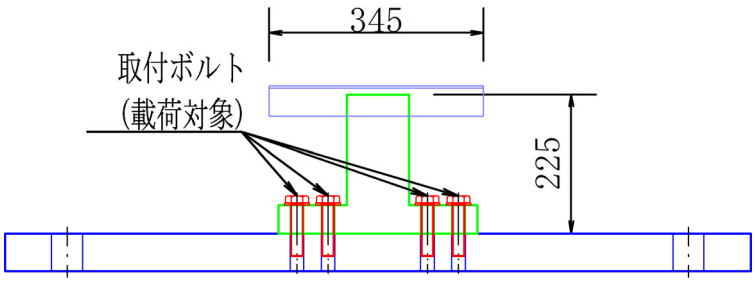


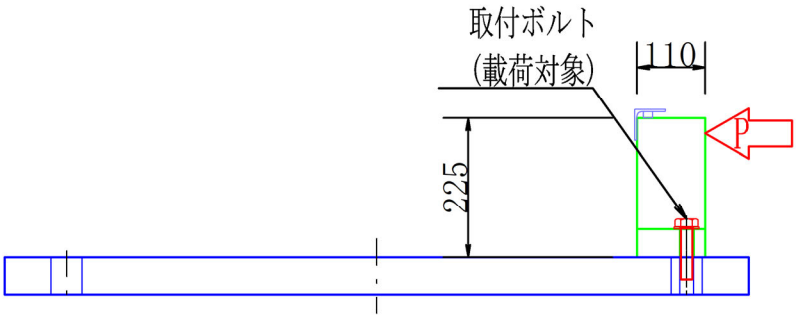
写真-4.3.15　オックスジャッキ：RM-10050（1000kN，ストローク 500mm）



(a) 平面図



(b) 正面図



(c) 側面図

図-4.3.32　載荷計画図（CASE5）



(a) 治具正面



(b) 治具側面



(c) 載荷対象ボルト 1，2

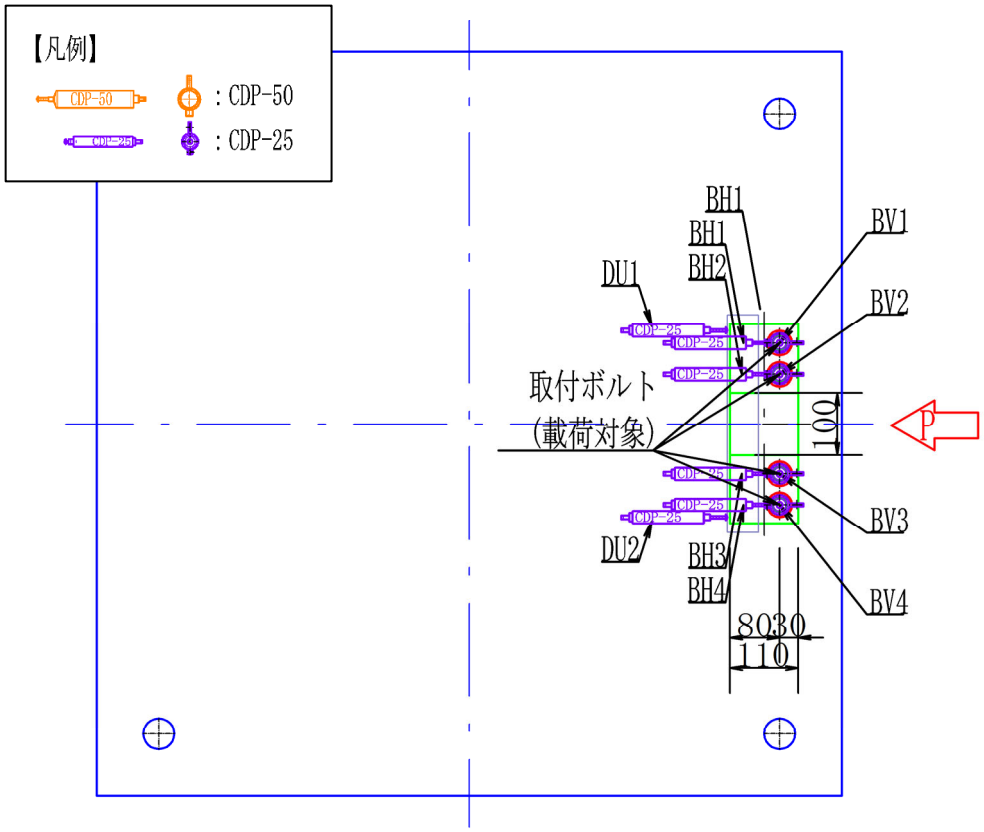


(d) 載荷対象ボルト 3，4

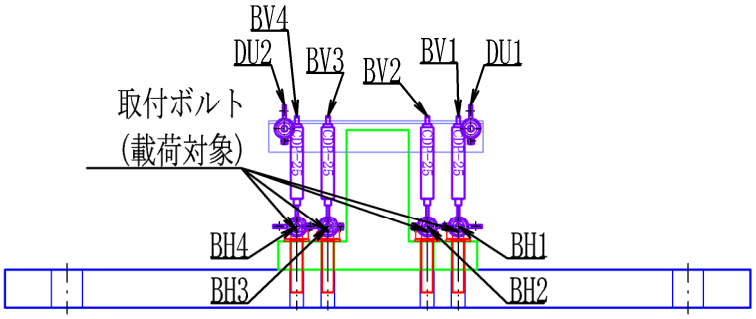
写真-4.3.16　治具写真（CASE5）

iii）変位計の設置位置

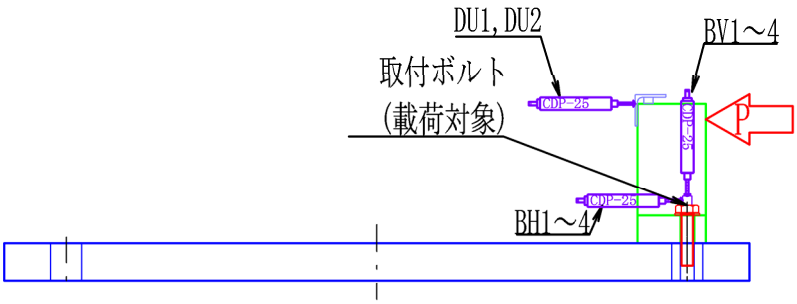
本ケースでは変位量の計測に高感度変位計（CDP-25）を使用した。変位計設置位置を図-4.3.33 図-4.3.16 に示す。BH1～4 及び BV1～4 はサイドブロック取付ボルトの水平・鉛直変位を，DU1～2 はサイドブロック頂点の水平変位をそれぞれ計測している。



(a) 平面図



(b) 正面図



(c) 側面図

図-4.3.33　変位計設置位置（CASE5）

iv）載荷結果

サイドブロック取付ボルトの荷重と鉛直変位の関係を**図-4.3.34** に，荷重と水平変位の関係を**図-4.3.35** に示す。本ケースでは，**付録 2** に基づき基準値を 50kN と設定し，200kN まで載荷と除荷を繰り返した。ただし，2 回目の載荷では目標値を 100kN としていたが，一時的に荷重の低下が確認されたため 80kN で除荷に切り替えた。また，荷重と鉛直変位の関係に基づき 160kN 付近でボルトが降伏したと判断し，BV1=0.15mm を載荷と除荷タイミングの基準として実験を継続した。荷重と鉛直変位の関係の降伏相当変位付近の拡大図を**図-4.3.36** に示す。その後，BV=0.45mm（3δ），0.75mm（5δ），1.5mm（10δ）の各時点で除荷を実施した。BV1 を代表とした載荷と除荷の各タイミングを**図-4.3.37** に示す。なお，5δに至る直前に P=219.749kN を最大として荷重の低下が確認された。最終的には，10δ後の載荷タイミングで各ボルトがほぼ同時に破断した。

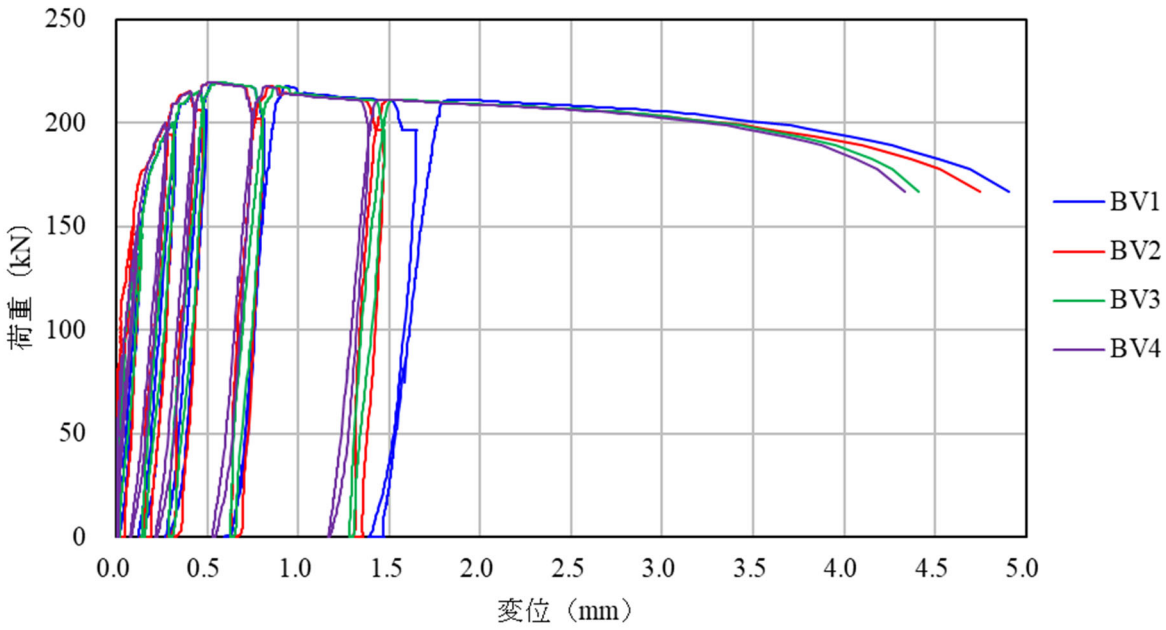


図-4.3.34　サイドブロック取付ボルトの荷重と鉛直変位の関係（CASE5）

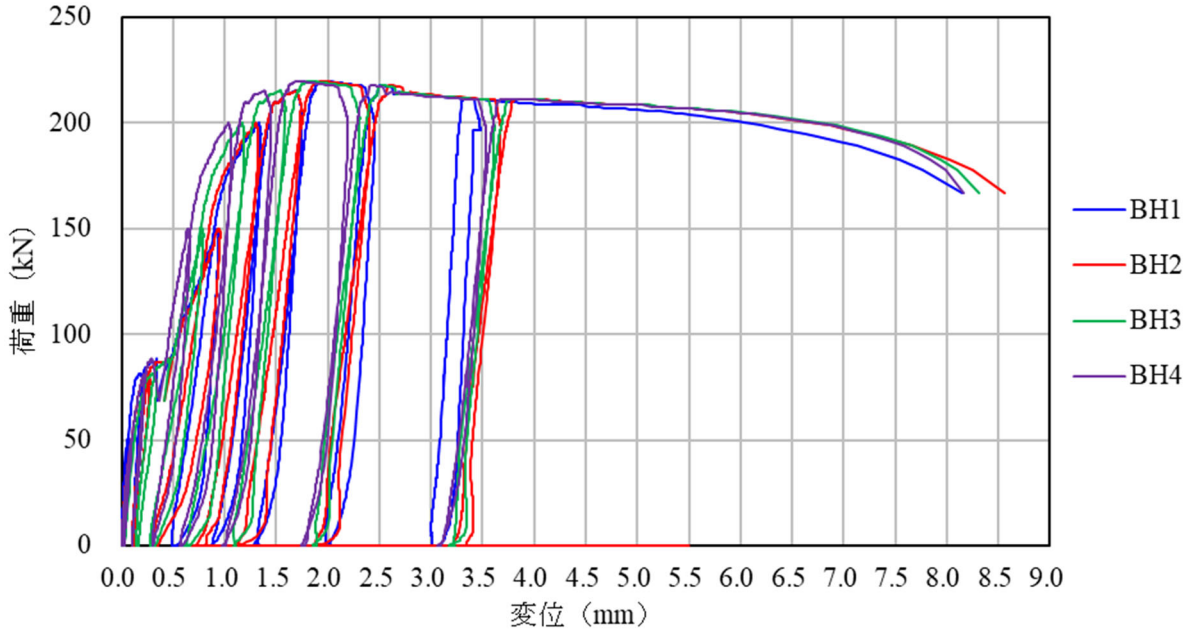


図-4.3.35　サイドブロック取付ボルトの荷重と水平変位の関係（CASE5）

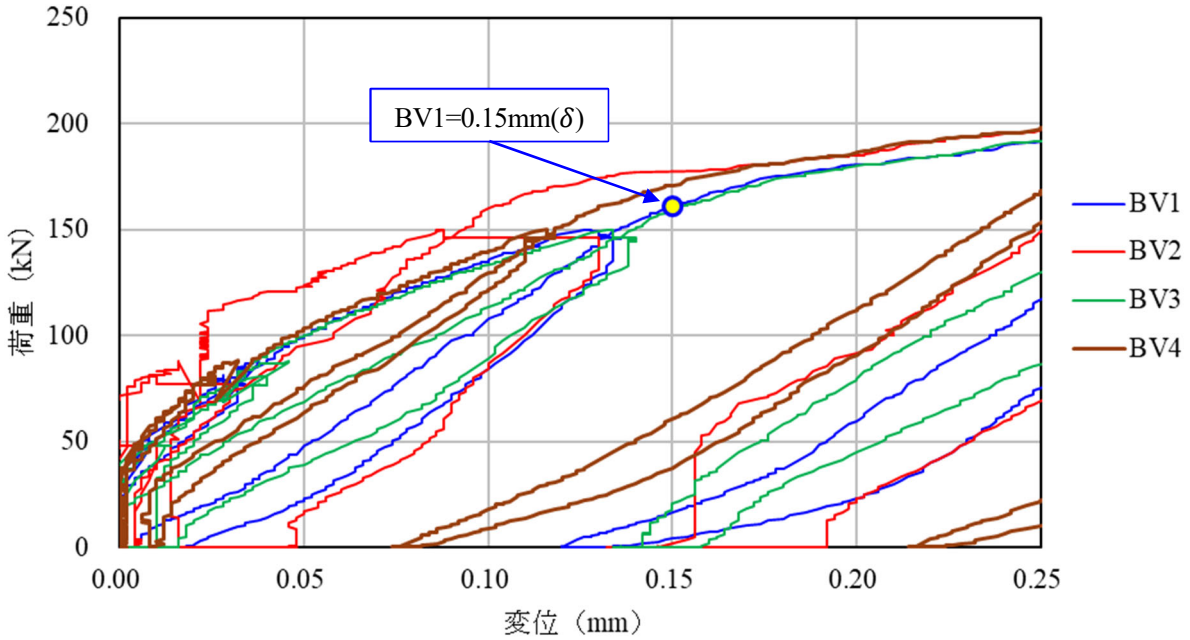


図-4.3.36　荷重と鉛直変位関係における降伏相当変位付近の拡大図

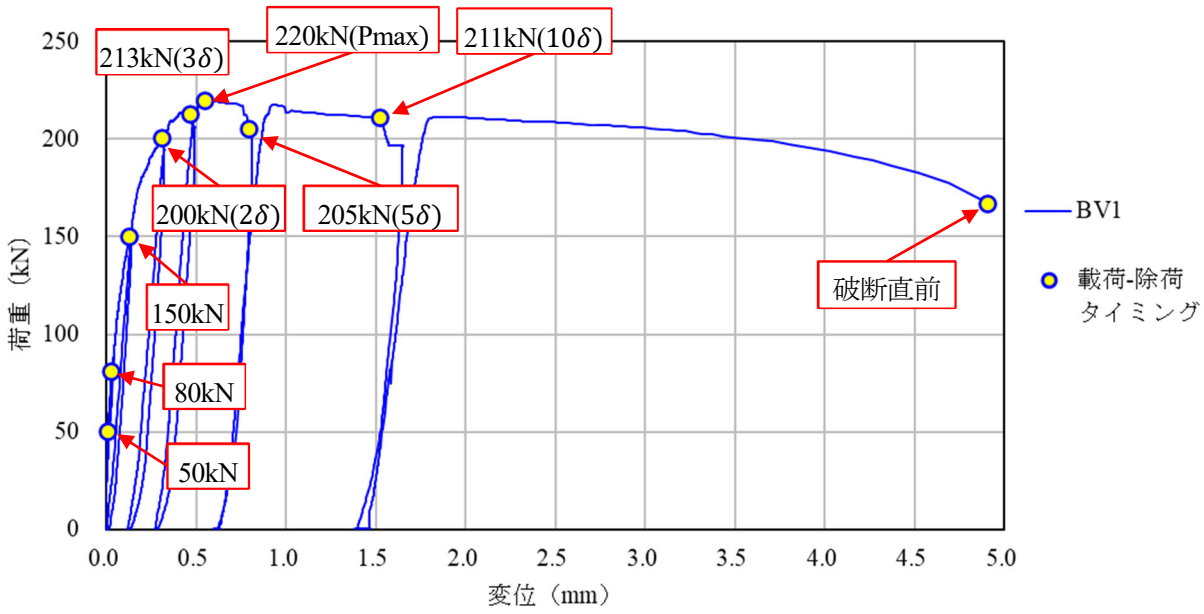


図-4.3.37　載荷と除荷の各タイミング（CASE5）

次に，鉛直方向の降伏相当変位（BV1=0.15mm）を基準とする各計測指標を代替可能な荷重と水平変位の計測指標を**図-4.3.38** に，荷重とサイドブロック本体の傾斜の関係を**図-4.3.39** に示す。なお，水平変位の計測指標は，各ボルトの中で最も変位量が小さい BH4 を代表とした。また，ボルトの鉛直方向変位とサイドブロックの傾斜角の関係は，サイドブロックの橋軸直角方向における回転中心とボルト位置までの距離に依存する。そのため，図-に示す計測指標は同程度の寸法を有するサイドブロックに適用可能な目安値として提示している。

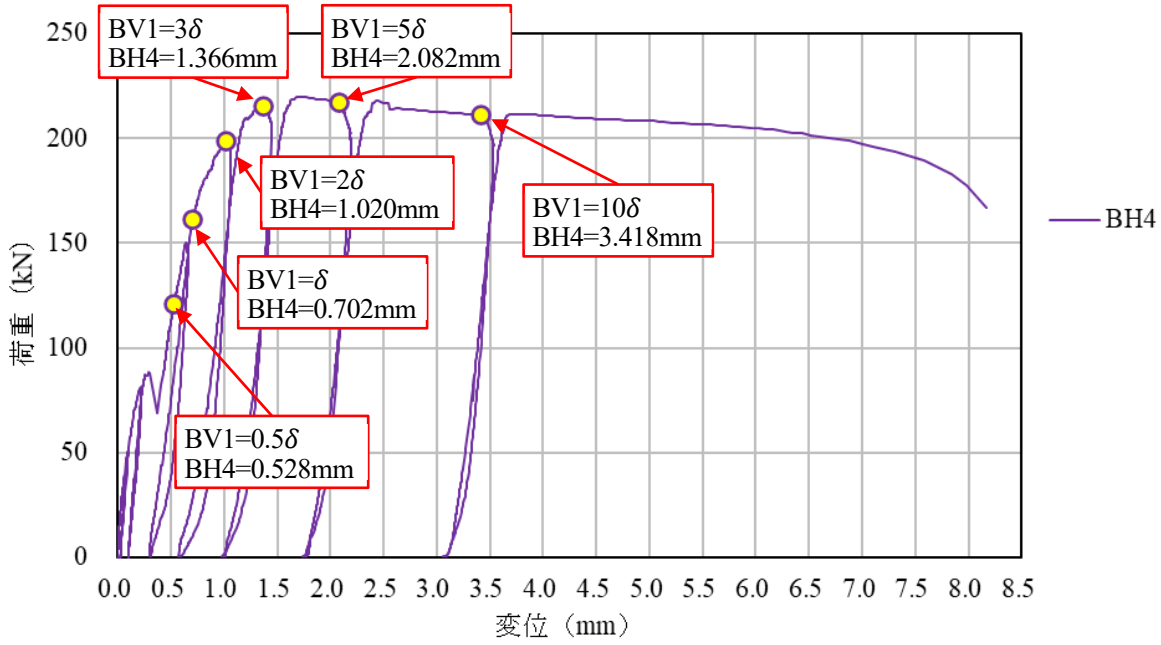


図-4.3.38　鉛直変位の計測指標を代替する水平変位の計測指標（CASE5）

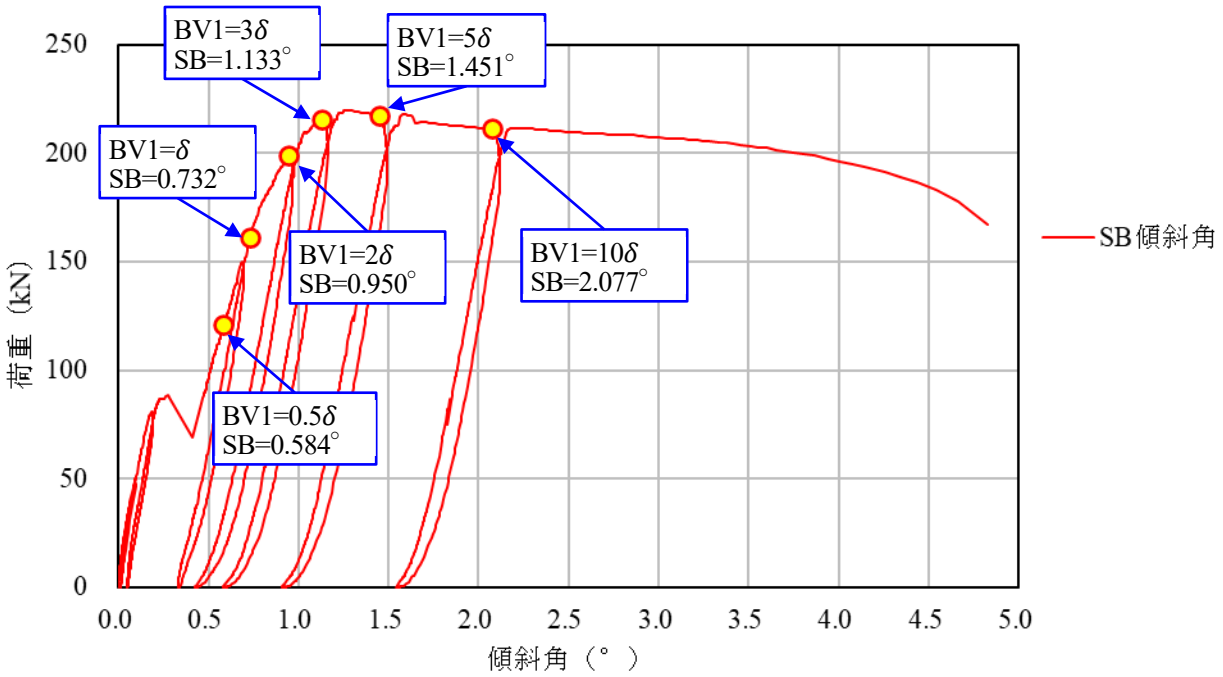


図-4.3.39　鉛直変位の計測指標を代替するサイドブロック本体の傾斜角（CASE5）

ｖ）計測指標の取得

本ケースで取得したピンの耐荷力に影響を及ぼす計測指標を**表-4.3.3** に示す。ただし，これらの計測指標は代表値の 1 例であり，実際の調査で**表-4.3.30** に示す降伏相当変位を超える値が計測された場合でも，必ずしもその部材が降伏に至っているとは限らない。本実験で得られた計測指標は，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標を整理した例として提示している。

表-4.3.3　ゴム支承用サイドブロック取付ボルトの
荷重変曲点などに相当する計測指標の例（CASE5）

変位量計測対象	実際の計測対象	単位	載荷対象の降伏相当変位（δ）を基準とした計測対象の変位量または変位角					
			1/2δ	δ	2 δ	3 δ	5 δ	10 δ
ボルトの鉛直変位量	ボルト頭部の変位量	(mm)	0.075	0.150	0.300	0.450	0.750	1.500
ボルトの水平変位量	ボルト頭部の変位量	(mm)	0.528	0.702	1.020	1.366	2.082	3.418
サイドブロック本体の傾斜角	サイドブロック背面の傾斜角	(°)	0.584	0.732	0.950	1.133	1.451	2.077

6）CASE6：サイドブロック取付ボルト 02（BP 支承用）

ｉ）実際の損傷と実験ケースの設定に関する方針

BP 支承用のサイドブロックは，サイドブロック取付ボルトによって下沓に固定され，鉛直方向上向きに作用する荷重（上揚力）に抵抗するとともに，水平方向への移動を制限する。しかし，地震時にはサイドブロックに作用する上揚力によりサイドブロック取付ボルトが損傷する事例が確認されている。本ケースでは，この損傷を再現する計画とした。**写真-4.3.17** にサイドブロック取付ボルトの損傷例を示す。

また，サイドブロック取付ボルトは通常 2 本 1 組で配置され，これらが協働して荷重に抵抗する。そのため，本ケースでも 2 本配置されたサイドブロック取付ボルトに対して載荷を実施した。道路橋支承標準設計における BP 支承サイドブロックの最小形状寸法を**図-4.3.40** に示される通りであり，サイドブロック取付ボルトの最小形状は M20，強度区分 4.6 と規定されている。本ケースでは，**図-4.3.40** と同形状のサイドブロックを作成し，最小形状のボルトを使用して載荷実験を実施した。ただし，ボルトの強度区分については市場性を考慮して強度区分 4.8 を採用した。



写真-4.3.17　BP 支承用サイドブロック取付ボルトの損傷例 [4.15)]

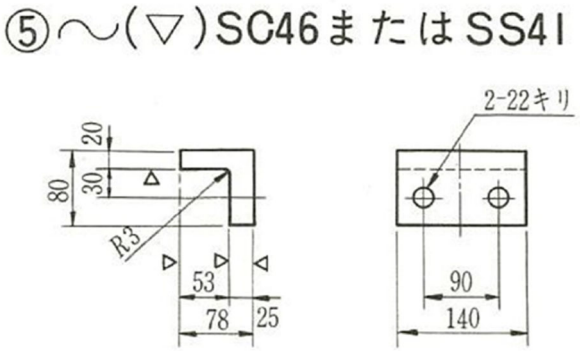


図-4.3.40　支承標準設計に示されている BP 支承の上沓の最小形状 [4.16)]

ii）載荷対象の設置方法

本ケースでは，**写真-4.3.18** に示すジャッキを使用した。また，**図-4.3.41** 及び**写真-4.3.19** に示す治具を使用して実験を実施した。本ケースでは，**図-4.3.42** に示すように，L 型のサイドブロックを 90° 回転させ，門型に組み上げた治具の間からサイドブロックに載荷する方針とした。

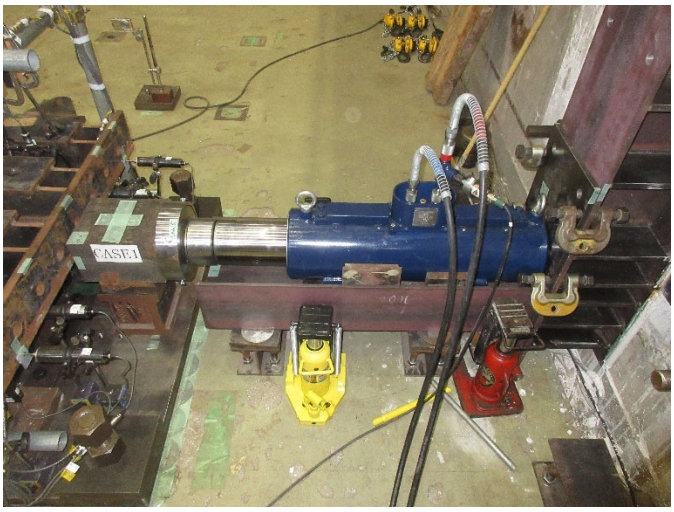
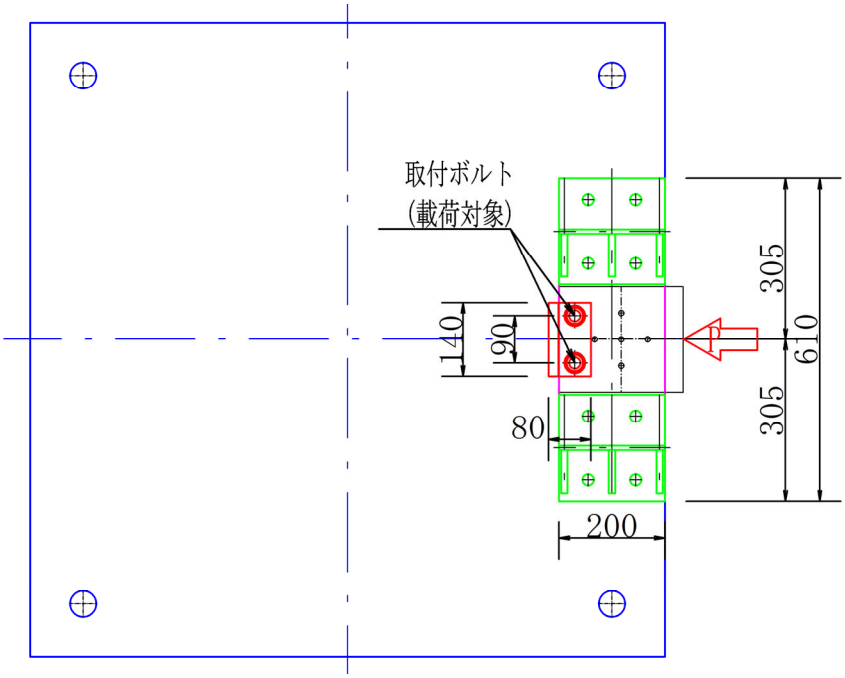
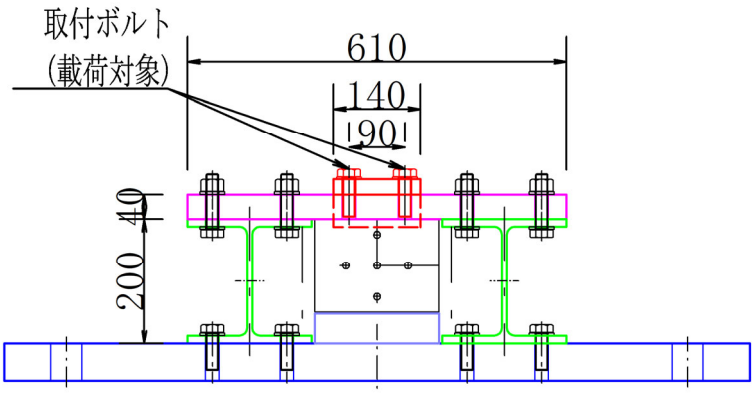


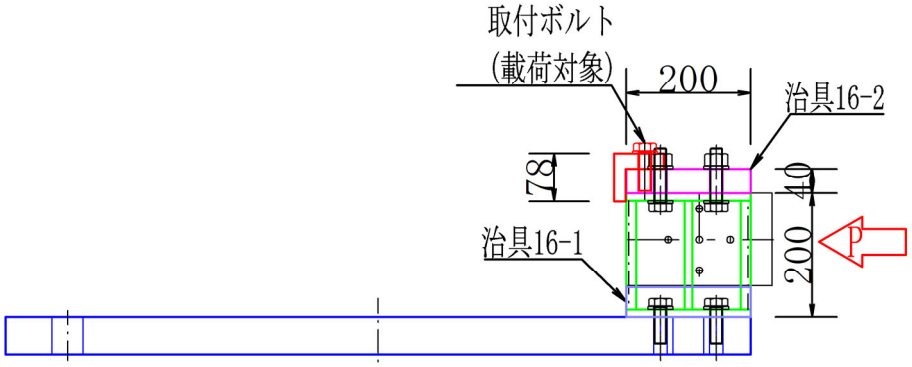
写真-4.3.18　オックスジャッキ：RM-10050（1000kN，ストローク 500mm）



(a) 平面図

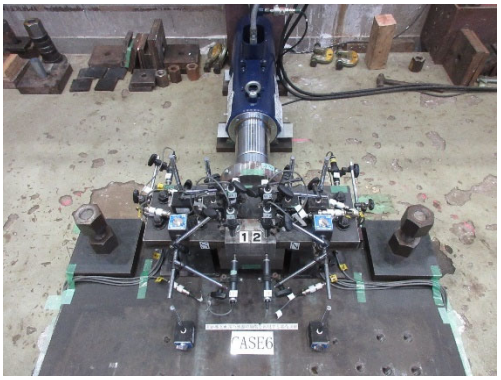


(b) 正面図

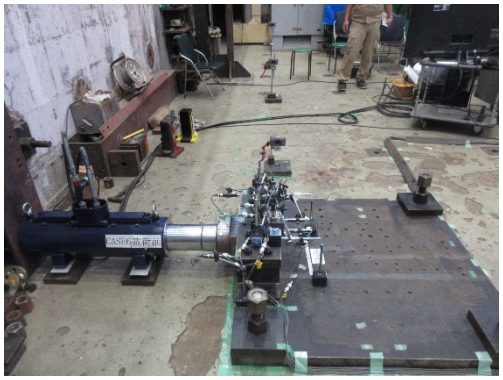


(c) 側面図

図-4.3.41　載荷計画図（CASE6）



(a) 治具正面



(b) 治具側面



(c) 載荷対象（サイドブロック）



(d) 載荷対象ボルト

写真-4.3.19　治具写真（CASE6）

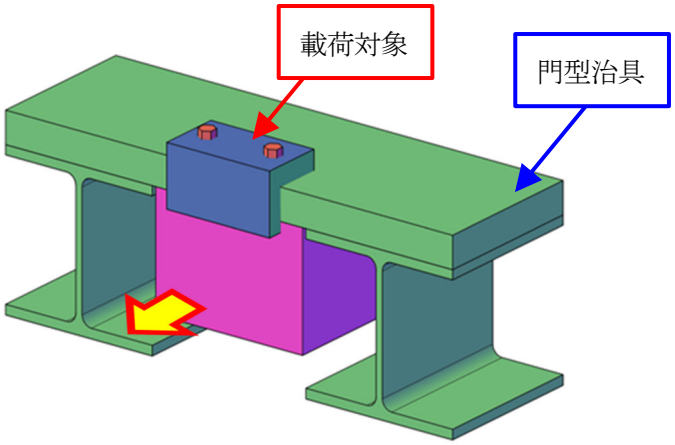
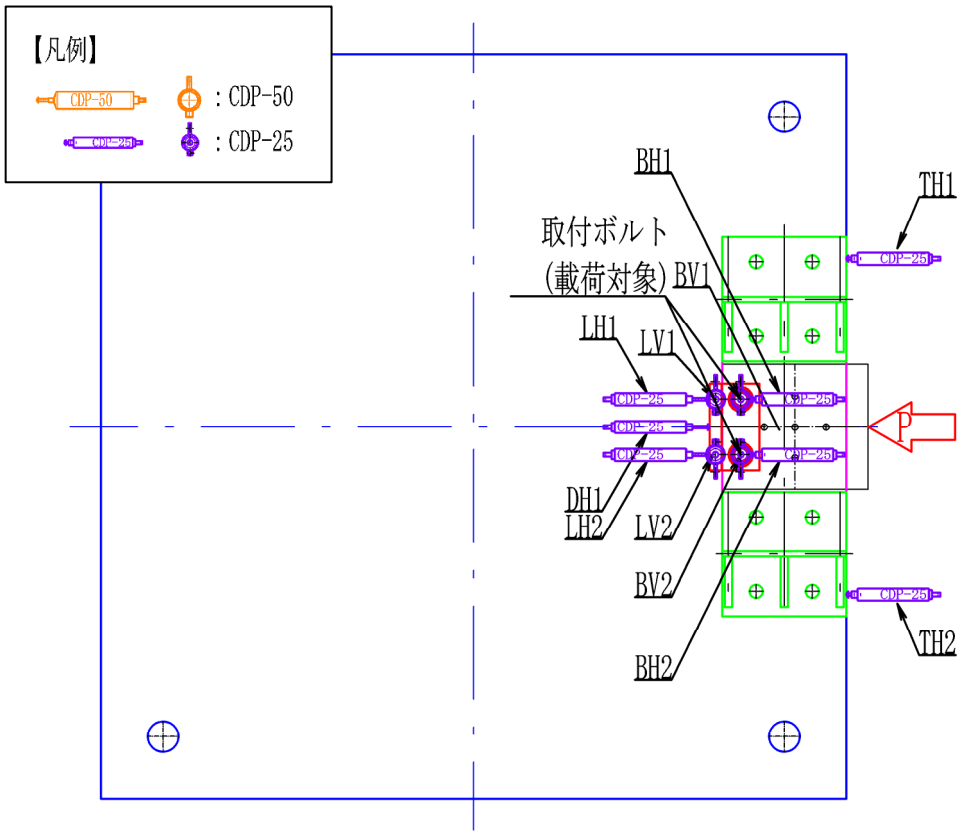


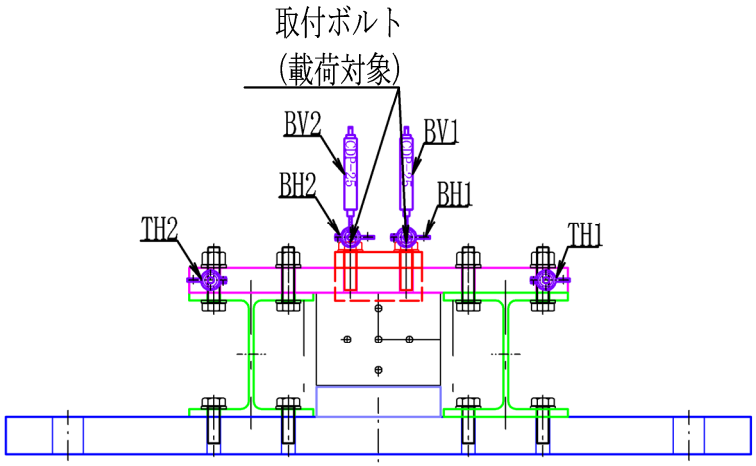
図-4.3.42　載荷イメージ図

iii）変位計の設置位置

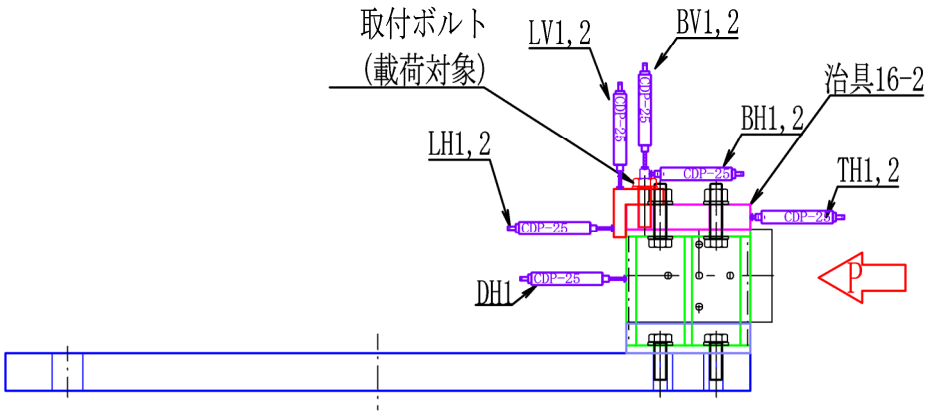
本ケースでは変位量の計測に高感度変位計（CDP-25）を使用した。変位計設置位置を**図-4.3.33** 図-4.3.16 に示す。BH1～2 及び BV1～2 はサイドブロック取付ボルトの水平・鉛直変位を，LH1～2 及び LV1～2 はサイドブロックの水平・鉛直変位を，TH1～2 は治具 16-2 の水平方向の変位量をそれぞれ計測している。また，DH1 はジャッキの水平方向の移動量を計測するために，載荷実験中に設置した。


【凡例】
CDP-50
: CDP-50
CDP-25
: CDP-25
BH1
TH1
取付ボルト
(載荷対象)
BV1
LH1
LV1
CDP-25
P
DH1
LH2
LV2
BV2
BH2
TH2

(a) 平面図


取付ボルト
(載荷対象)
BV2
BV1
BH2
BH1
TH2
TH1

(b) 正面図



(c) 側面図

図-4.3.43　変位計設置位置（CASE6）

iv）載荷結果

サイドブロック取付ボルトの荷重と鉛直変位の関係を**図-4.3.44** に示す。本ケースでは，**付録 2** に基づき基準値を 40kN と設定し，120kN まで載荷と除荷を繰り返した。。また，載荷時には，荷重と鉛直変位の関係に基づき 120kN 付近でボルトが降伏したと判断し，BV1=0.05mm を載荷と除荷タイミングの基準として実験を継続した。その後，BV=0.45mm（5δ），1.0mm（20δ），2.0mm（40δ）の各時点で除荷を実施した。なお，6δ付近で P=181.853kN を最大として荷重の低下が確認された。最終的には 40δ 後のタイミングで荷重が急激に低下したため載荷を終了した。BV2 を代表とした載荷と除荷のタイミングを**図-4.3.45** に示す。

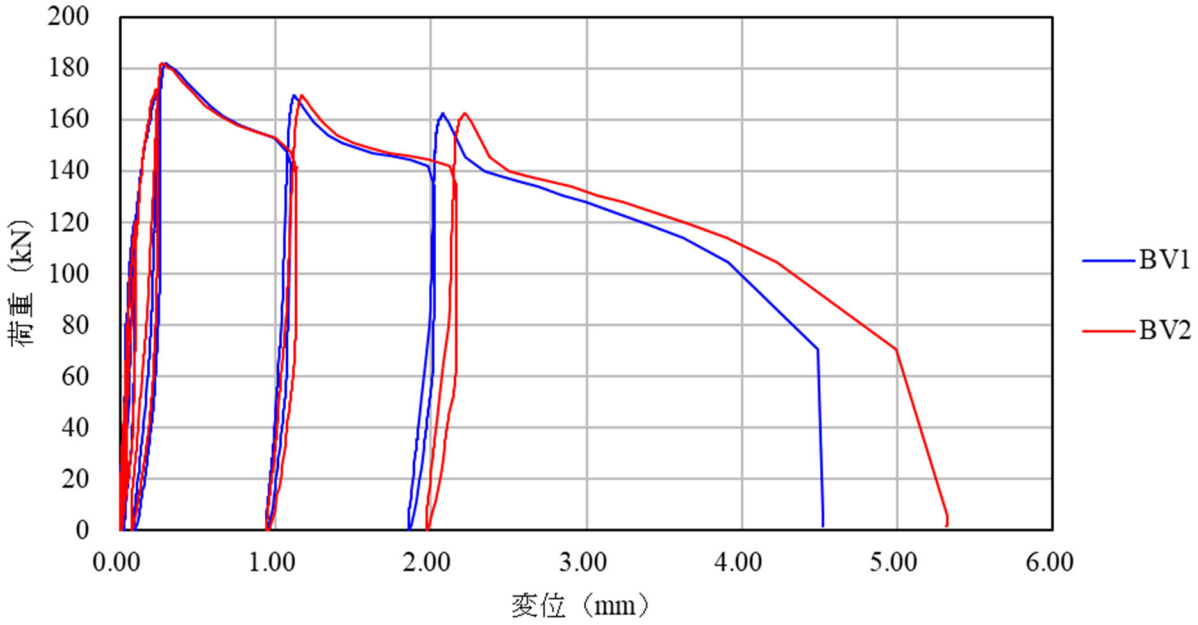


図-4.3.44　サイドブロック取付ボルトの荷重と鉛直変位の関係

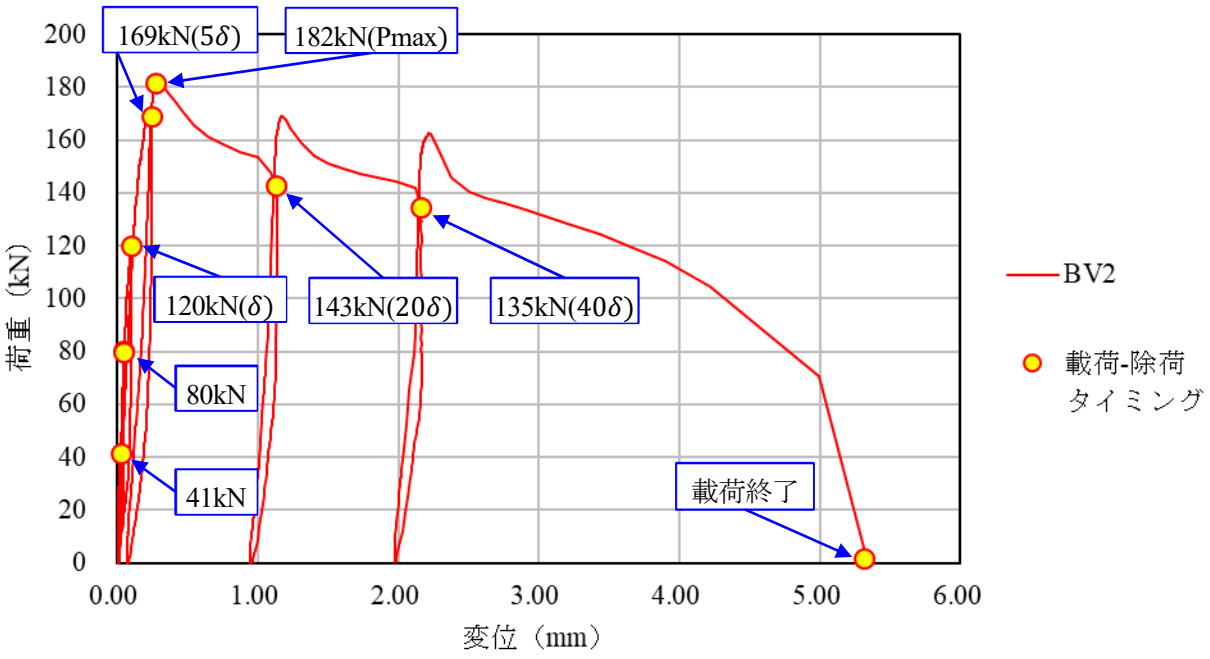


図-4.3.45　載荷と除荷のタイミング（CASE6）

図-4.3.46 に，降伏相当変位付近の荷重とボルトの鉛直変位の関係を示す。載荷時には，BV2＝0.05mm を降伏相当変位と判断し，これを基準に載荷タイミングを設定した。しかし，鉛直方向の変位量の変化において，0.1mm 程度までグラフが不規則に変動している様子が確認された。この変動は，ボルト孔の遊間が詰まる際に生じたものであると推測される。

このため，降伏相当変位の評価方法として，グラフの不規則な変動が収束し（すなわち，ボルト孔の遊間が詰まり），かつ荷重と変位関係の傾きが変化する点を基準とすることが適切であると判断した。そこで，計測指標の整理においては，BV2＝0.15mm を基準となる降伏相当変位として採用した。

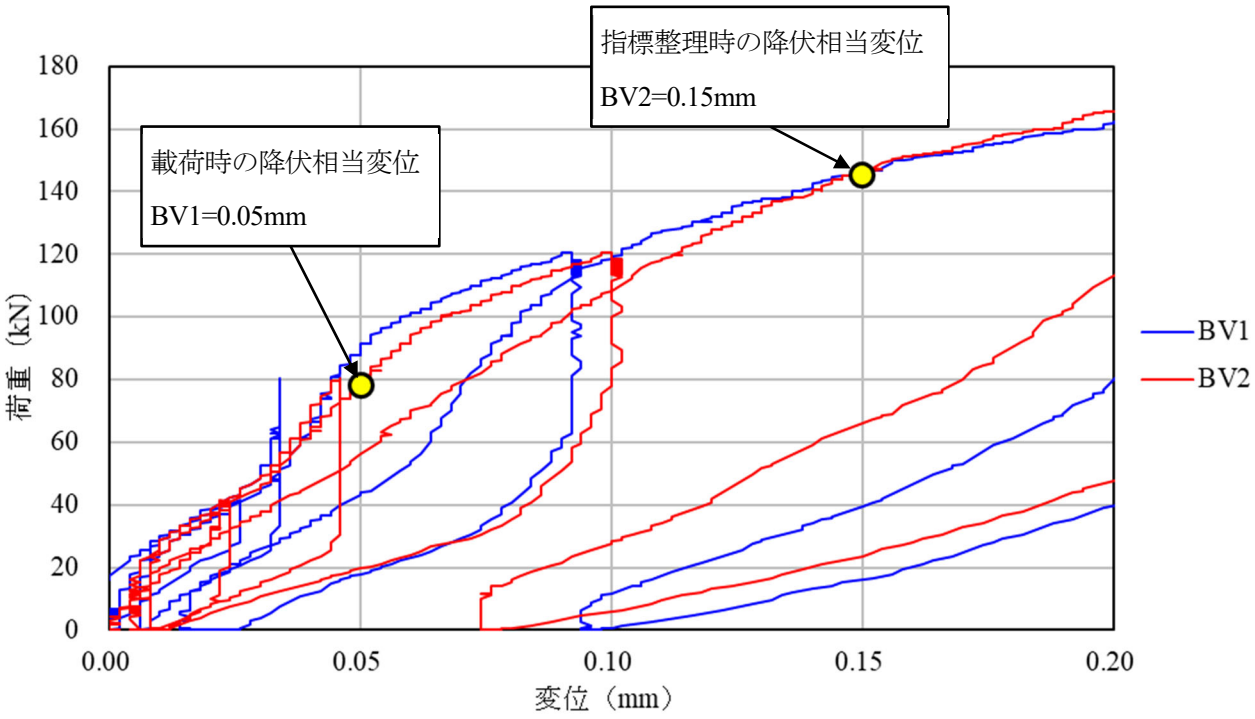


図-4.3.46　降伏相当変位付近の荷重とボルトの鉛直変位の関係（CASE6）

ｖ）計測指標の取得

本ケースで取得したピン BP 支承用サイドブロック取付ボルトの耐荷力に影響を及ぼす計測指標を**表-4.3.11** に示す。ただし，これらの計測指標は代表値の 1 例であり，実際の調査で**表-4.3.11** に示す降伏相当変位を超える値が計測された場合でも，必ずしもその部材が降伏に至っているとは限らない。本実験で得られた計測指標は，荷重と変位関係上の変曲点などに相当する指標を整理した例として提示している。

表-4.3.4　BP 支承用サイドブロック取付ボルトの
荷重変曲点などに相当する計測指標の例（CASE6）

変位量計測対象	実際の計測対象	単位	載荷対象の降伏変位相当（δ）を基準とした計測対象の変位量または変位角					
			1/2δ	δ	2 δ	3 δ	5 δ	10 δ
ボルトの鉛直変位量	ボルト頭部の変位量	(mm)	0.075	0.150	0.300	0.450	0.750	1.500

参考文献

4.1) 小林巧，吉谷薫，大住道生 : 道路橋の震後点検における UAV や自撮り棒の活用方法に関する実践的研究，AI・データサイエンス論文集，2024.

4.2) 高橋典之，高橋絵里，中埜良昭 : 鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 2，2009.

4.3) 大髙正裕，林和彦，椿龍哉 : 正負交番荷重を受ける RC 柱のせん断ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 2，2004.

4.4) 文野正裕，永山憲二，前田匡樹，田才晃 : RC 柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 3，2001.

4.5) 柳瀬圭児，大野義照，李振宝，南宏明 : 鉄筋コンクリート梁のせん断ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 2，2002.

4.6) 国立研究開発法人　土木研究所 : 支承部を構成する六角ボルト及びアンカーボルトのせん断載荷実験，土木研究所資料　第 4422 号，2022.

4.7) 建設省　土木研究所 : 平成 12 年（2000 年）鳥取県西部地震緊急調査報告書，土木研究所資料第 3769 号，2000.

4.8) 独立行政法人　土木研究所 : 平成 15 年 5 月 26 日宮城県沖の地震の被害に係わる現地調査報告書，土木研究所資料　第 3914 号，2003.

4.9) 国土交通省　国土技術政策総合研究所，独立行政法人　土木研究所 : 平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震土木施設災害調査報告, 国土技術政策総合研究所研究報告　第 27 号, 土木研究所報告　第 203 号, 2006.

4.10)　国土交通省　国土技術政策総合研究所, 独立行政法人　土木研究所, 独立行政法人　建築研究所 : 平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料　第 439 号，土木研究所資料　第 4086 号，建築研究資料　第 112 号，2008.

4.11)　国土交通省　国土技術政策総合研究所, 独立行政法人　土木研究所, 独立行政法人　建築研究所 : 平成 19 年（2007 年）能登半島地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料　第 438 号，土木研究所資料　第 4087 号，建築研究資料　第 111 号，2008.

4.12)　国土交通省　国土技術政策総合研究所, 独立行政法人　土木研究所, 独立行政法人　建築研究所 : 平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料　第 486 号，土木研究所資料　第 4120 号，建築研究資料　第 115 号，2008.

4.13)　国土交通省　国土技術政策総合研究所，独立行政法人　土木研究所 : 平成 23 年（2011 年）長野県北部の地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料　第 770 号，土木研究所資料　第 4274 号，2013.

4.14)　国土交通省　国土技術政策総合研究所，独立行政法人　土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料　第 814 号　土木研究所資料　第 4295 号，2014.

4.15)　国土交通省　国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人　土木研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料　第 967 号　土木研究所資料　第 4359 号，2017.

4.16)　社団法人　日本道路協会：道路橋支承標準設計（ゴム支承・すべり支承編），1976.

4.17)　社団法人　日本道路協会：道路橋支承標準設計（ピン支承・ころがり支承編），1979.

4.18)　社団法人　日本支承協会：日本道路協会　道路橋支承標準設計図面集　昭和 56 年改訂版（線支承・高力黄銅支承板支承），1982.

4.19)　社団法人　日本道路協会：道路橋支承標準設計（ゴム支承・ころがり支承編），1993.

4.20)　社団法人　日本道路協会：道路橋支承標準設計（すべり支承編），1993.

第 5 章　デジタル技術の能力の評価方法に関する検討

5. 1　デジタル技術の能力評価の目的

地震時損傷は橋の構造安全性に影響を及ぼす場合も多く，それら損傷の見落としはリスクが高いため，震後点検では可能な限りそれら損傷を発見する必要がある。一方，あらゆるデジタル技術には損傷検出精度等の能力に限界がある。また，その計測結果にはばらつきが生じる。したがって，計測結果を基に損傷が生じていないと確実に判断するためには，計測結果に含まれるばらつき等を適切に評価し，計測結果に反映する必要がある。要するに，各技術の計測精度をばらつきも含め評価し，確実に損傷がわかる範囲を明確化することが本章の検討の目的である。

一方，現状，デジタル技術の能力評価は開発者が独自に行う場合が多い。しかし，実際の運用現場では気温変化，降雨，振動ノイズなど多数の外乱要因が重なる。また，計測対象との距離や材質等の条件も個別に異なるため，試験室レベルで得られるカタログスペックがそのまま適用できるとは限らない。点検支援技術性能カタログに登録されている技術に関しては，実際の運用現場を想定した計測条件で能力評価が実施されているが，運用現場ごとの計測条件の違いが能力に及ぼす影響については考慮されていない場合も多い。さらに，これらの能力評価から得られた計測精度等の評価結果を実際の計測結果にどのように考慮するか，その方針は使用者の判断に委ねられている。

こうした状況を踏まえ，本章では，デジタル技術の計測精度に焦点を当て，その統一的な評価方法について検討する。特に，損傷の見落としを回避するためには，損傷を確実に把握できる能力を有した技術を選定し，かつ，その技術に期待される計測精度が現地で適切に発揮される必要がある。そのためにも，事前に精度評価を実施し能力の限界を把握することが重要であると考えている。そこで，本章では，この事前の精度評価により計測機器の特性や人による解釈等に起因する結果のばらつきの範囲を把握し，実際の運用現場で得られた計測値に反映することで損傷の見落としがないとみなせる補正方法について検討する。

5. 2　計測原理に基づく既存技術の分類

点検で用いられるデジタル技術の代表例として，点検支援技術性能カタログに登録されている技術をアウトプット時の計測データ別に分類した図を**図-5. 2. 1** に示す。なお，本章では変位等の物理指標に加え，画像や波形データなどのあらゆるデータ形式を総称して計測データと定義する。本図では，橋梁を対象とした技術のうち，データ収集・通信技術を除く 175 技術を対象とした。なお，アウトプット時の計測データが複数ある技術の場合は，それぞれの項目に計上しているため，データ数と技術数は一致しない。本分類において，画像撮影や 3 次元点群データの取得のみを目的とし，損傷の検知を人による目視判断や別技術との組み合わせによって行う技術は“画像”や“形状”のカテゴリーに分類している。また，波形の変化を定性的に把握する技術は各種“波形”として分類している。一方で，損傷検知の半自動化や，人による損傷検知が計測結果の中間処理に含まれる技術など，明確な分類が困難な技術も存在するため，これらについては筆者らの判断に基づきアウトプットデータの特性を踏まえて分類している。本図の結果より，計測データは“数値を評価する定量的な計測データ”と“波形等の変化を評価する定性的な計測データ”の 2 種類に大別されることが分かる。したがって，本章では，この 2 種類のデータに対して，それぞれに適した評価方法を検討することとする。

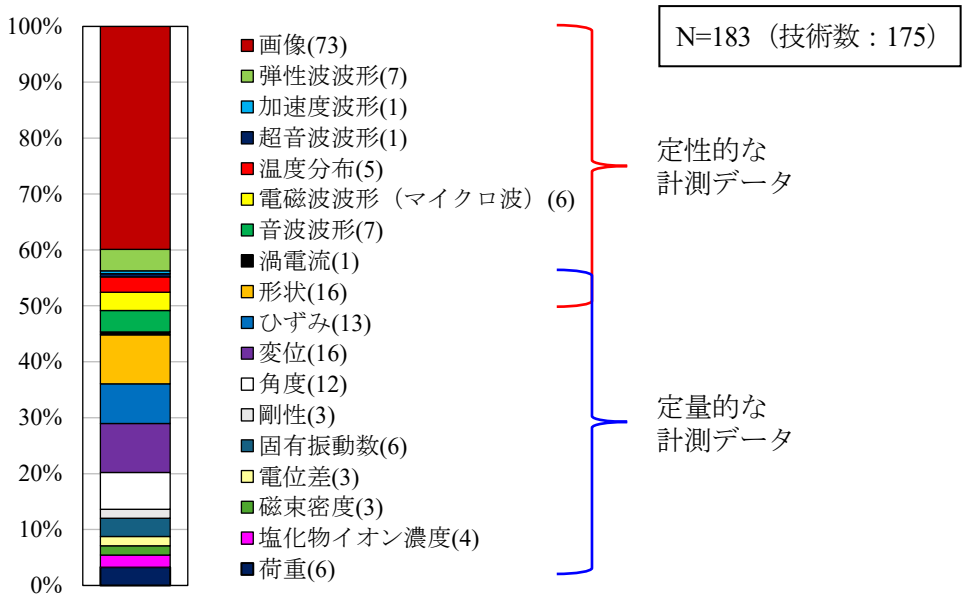


図-5. 2. 1　点検支援技術性能カタログ登録技術の計測データ別の分類

5. 3　計測精度の評価方法の検討

5.3.1　定量的な計測データの評価方法

（1）評価方針

本節では，変位や角度などの定量的な計測データをアウトプットとする技術の計測精度の評価方法を検討する。また，指標となる値が大きいほど損傷の程度が大きくなるケースに焦点を当てて議論する。

定量的な計測データには，偶然的要因による計測値のばらつき（偶然誤差）と，計測原理や機器の特性によって生じる真値に対する計測値のかたより（系統誤差）が含まれる。また，アルゴリズムのランダム性などの統計的な分布を持たない変動要因が計測値に含まれる技術も存在する。実際の計測時には，これらの誤差や変動が計測結果にそれぞれどの程度内在しているか把握できないため，計測値が真値を過大または過小に評価しているかを判別することは難しい。特に真値を過小評価している場合，実際に生じている損傷を見落としている可能性があり，大きなリスクを伴う。このような見落としは確実に回避すべきである。

そこで，本節では，これらの誤差や変動を含む計測結果の範囲を事前に把握し，実際の計測時の結果から真値が存在し得る範囲を推定する方法論を提案する。これにより，損傷を過小に評価することがないよう，実際の計測結果を適切に補正することが可能となる。なお，統計的な分布を持たない値の変動が生じる技術であっても同時にばらつきやかたよりも存在する。また，この変動とばらつきやかたよりの影響は不可分である場合が多い。したがって，統計的な分布を持たない値の変動が生じる技術については，その技術の計測原理を踏まえた補正の適用方法を個別に設定する方針する。具体的な検討方針としては，既知の正解値を所要の回数計測し，計測結果のばらつきやかたよりから補正量を算出する。**図-5.3.1** に精度評価の概念図を示す。既知の正解値に対し計測結果が大きくなる方向へ恒常的にかたよりが生じており，ばらつきを考慮しても計測値が常に正解値より大きい場合，損傷を過小評価するリスクはないため，補正は不要となる。一方で，既知の正解値に対して計測結果が小さくなる方向へ恒常的なかたよりが生じ，ばらつきを考慮しても計測値が常に正解値より小さい場合や，ばらつきによって正解値と計測値の大小関係が変化する場合には，損傷を過小評価するリスクを回避するために計測結果を補正する必要がある。補正の要否は，事前の精度評価結果によって判別できる。

なお，本報告書では，計測結果のばらつきやかたよりによって生じる計測値の分布範囲を“誤差の分布範囲”と定義する。

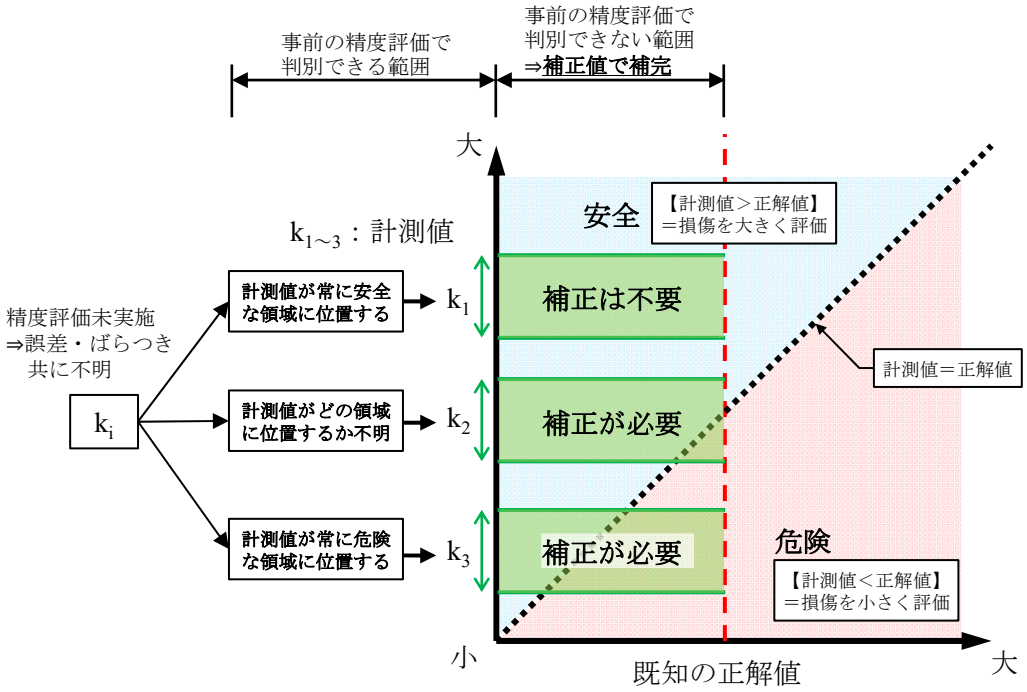


図-5.3.1　精度評価の概念図

(2) 計測結果の補正量の算出方針

事前の精度評価では，ばらつきやかたよりの程度を把握することは可能であるものの，実際の計測結果が計測値のばらつきの分布内のどのような位置関係にあるかを特定することは困難である。また，技術によっては，ばらつきとかたよりが不可分となった分布範囲として算出される場合もある。そのため，本評価では，ばらつきとかたよりの影響が共に含まれていると判断できる値を算出し，補正量として適用する。これにより，計測値が誤差の分布範囲内のどの位置にあっても，真値を過小に評価していないと判断できる値を算出することが可能となる。この処理で得られた補正値を，損傷を評価する際の代表値として採用することで，計測技術に内在するばらつきやかたよりを考慮し，損傷の見落としがないとみなせる安全余裕を確保した値として扱うことができる。

図-5.3.2 に，計測技術を用いて既知の正解値を計測した場合の計測値のばらつきの概念図を示す。本図では，計測結果のかたよりは考慮せず，統計的なばらつきが生じている場合を想定して示している。左側のグラフでは，横軸に既知の正解値，縦軸に計測値を示している。計測値にかたよりが生じていない場合，既知の正解値と計測値が一致する点を中心に計測結果にばらつきが生じる。この左側のグラフにおいて，ある 1 つの既知の正解値（t_l）に対する複数回の計測結果を抜粋した概念図が右側の図である。計測結果のばらつきは，既知の正解値と計測値が一致する点を中心に分布するため，確率的な区間等を用いることで，そのばらつきの範囲を評価することが可能である。例えば，ばらつきが正規分布に従う場合，信頼区間を用いることで計測値のばらつきの範囲を定量的に示すことができる。

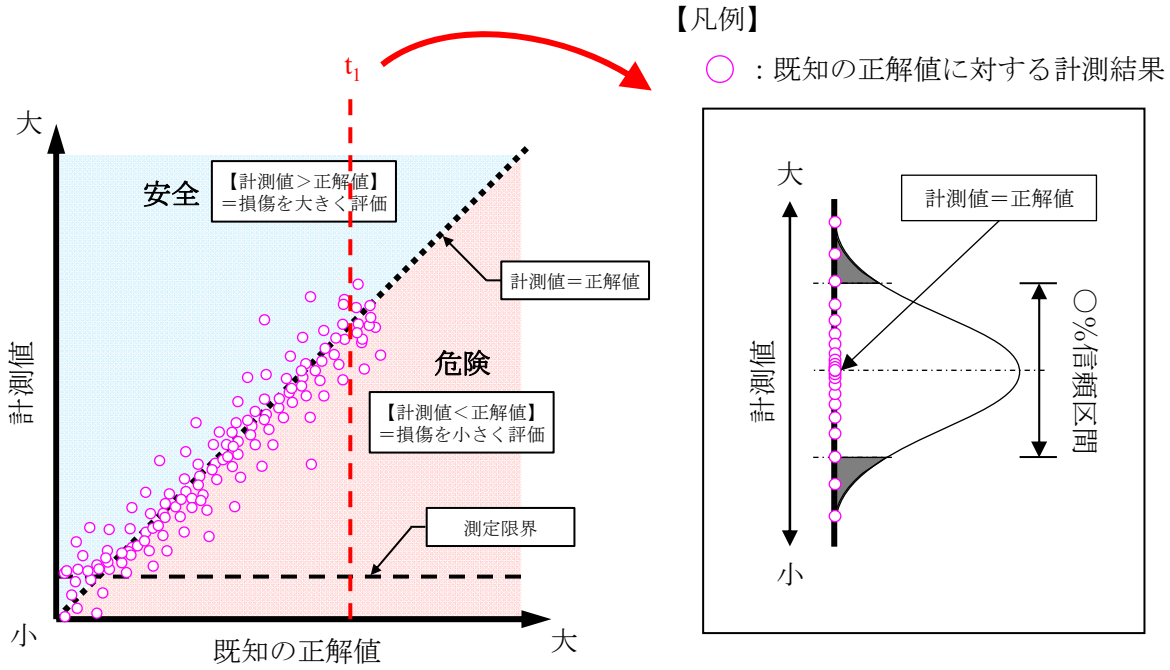
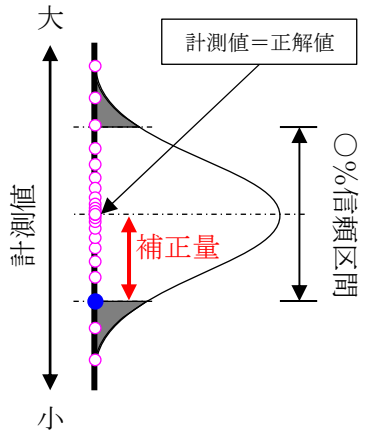


図-5.3.2　既知の正解値を計測した場合の計測結果のばらつき

補正量の算出にあたっては，実際の計測値とばらつきの範囲の関係性を考慮し，最も損傷を過小評価してしまっている計測値のケースを基準とする。本検討では，数値が大きいほど損傷の程度も大きくなる場合を想定している。この場合，計測値が信頼区間の下限に位置する場合が最も損傷を過小評価することになるため，信頼区間の下限と正解値の差分を補正量として設定する（**図-5.3.3**）。



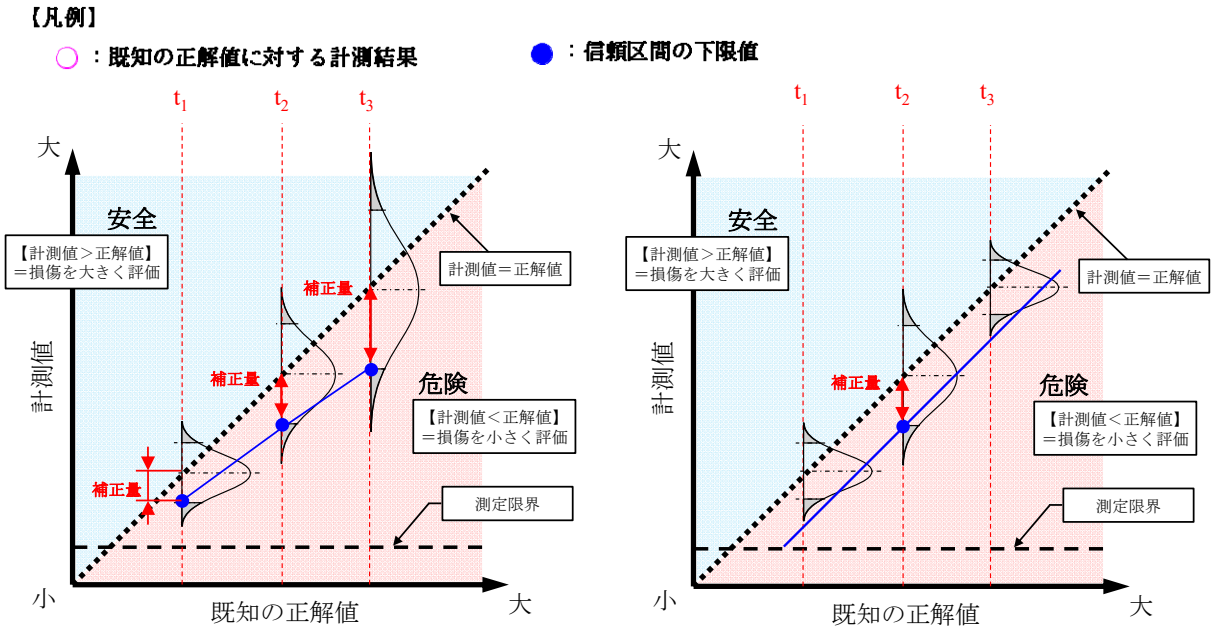
【凡例】

○ ：既知の正解値に対する計測結果

● ：信頼区間の下限値

図-5.3.3　補正量の算出基準

ただし，全ての正解値に対して計測を行い，そのばらつきを算出することは現実的ではない。そのため，本検討では，異なる既知の正解値を 3 点程度選定し，その計測結果のばらつきを基に補間を行う手法が適切であると判断する。例えば，正解値の大きさによって計測結果のばらつきが変動する計測技術の場合，事前評価を実施した正解値の間においては線形補間を行い，他の正解値における計測結果のばらつきを推定する方法が考えられる。また，正解値の大きさとばらつきの程度に相関が認められる場合には，その関係式を算出し，関数的に補間を行うことで他の区間のばらつきを推定することが可能となる。さらに，正解値の大きさと計測結果のばらつきに相関が無いと考えられる計測技術の場合，複数の正解値に対する計測結果のばらつきのうち，最も安全余裕が確保できる値をその計測技術の代表的な補正量として適用する。**図-5.3.4**(a)～(b)に各ケースにおける補正量算出の概念図を示す。



(a) 正解値とばらつきに相関がある場合　　(b) 正解値とばらつきに相関がない場合

図-5.3.4　補正量算出の概念図

(3) 計測技術の測定限界における精度評価方法

一般的に，計測技術には計測値が取り得る範囲の上限と下限（測定限界）が存在する。**図-5.3.5** に計測値と補正後の計測値（以下，補正値と呼称する。）の関係を示す。事前の精度評価により求めた補正量を W とすると，計測値が T_1 の際の補正値 L_1 は T_1+W となる。測定限界の設定においては，その計測技術による計測結果のばらつきが含まれている可能性がある。そのため，計測値が上限値側の測定限界 T_2 を示した場合であっても，計測結果のばらつきを考慮した補正値 L_2 は T_2+W となる。また，計測値が 0 の場合は，補正値 L_0 は W となる。このとき，W の値のみで損傷と判断されてしまう技術

は，計測対象に対して誤差が大きすぎるためその計測対象には使用することができない。補正量 W が計測値に応じて変化する場合であっても，同様の考え方に基づき，計測値 T_i に対応する補正量W_iを考慮すればよい。また，下限側の測定限界が負の値を取る計測技術であっても，補正量 W を加えることで補正が可能である。ただし，計測値の大小と損傷の程度の大小の関係に留意し，適切な方向へ補正量を適用する必要がある。

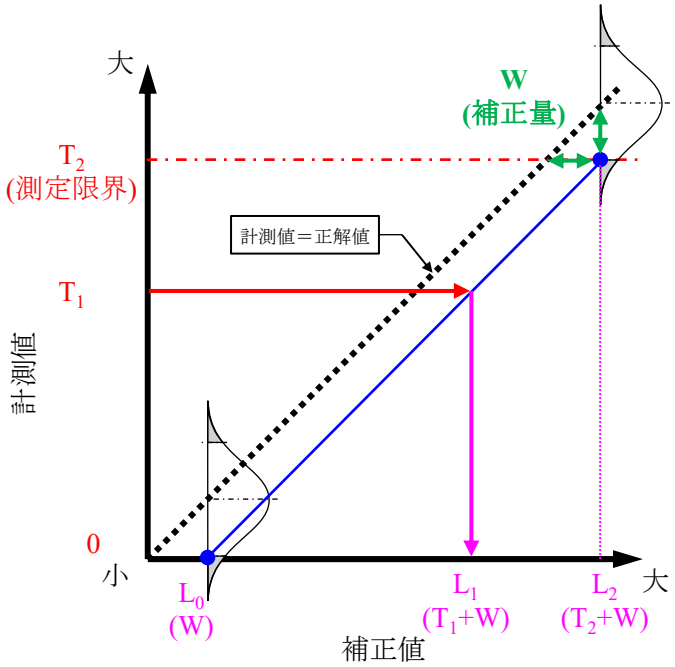


図-5.3.5　計測値の測定限界を考慮した計測値と補正値の関係

また，計測技術の中には，主に測定限界付近において計測結果の乱れ（ノイズ）が発生する特徴を有するものが存在する。ノイズが発生する範囲では，計測結果が値としての意味を持たず，信頼性のある計測値として扱うことができない。この場合，最も損傷が過小評価される値，すなわちノイズが発生する範囲内で計測値が最大となる値を採用し，ノイズが発生する範囲においては常にこの最大値に補正量を考慮した補正値を適用する。**図-5.3.6** にノイズが発生する場合の補正値の設定方法の概念図を示す。本図では，計測結果のばらつきを W とし，上限側の測定限界を T_3 とする。また，測定限界の下限側と上限側におけるノイズ発生範囲の境界値をそれぞれ T_1 及び T_2 とする。下限側の 0 から T1 までの範囲においては，計測値は意味を持たないため，ノイズ発生範囲の上限値 T_1 に補正量Wを考慮した値を補正値 L_1 として適用する。また，上限側の T_2 から T_3 の範囲においても計測値は意味を持たないため，ノイズ発生範囲の上限値 T_3 に補正量 W を考慮した値を補正値 L_2 として適用する。

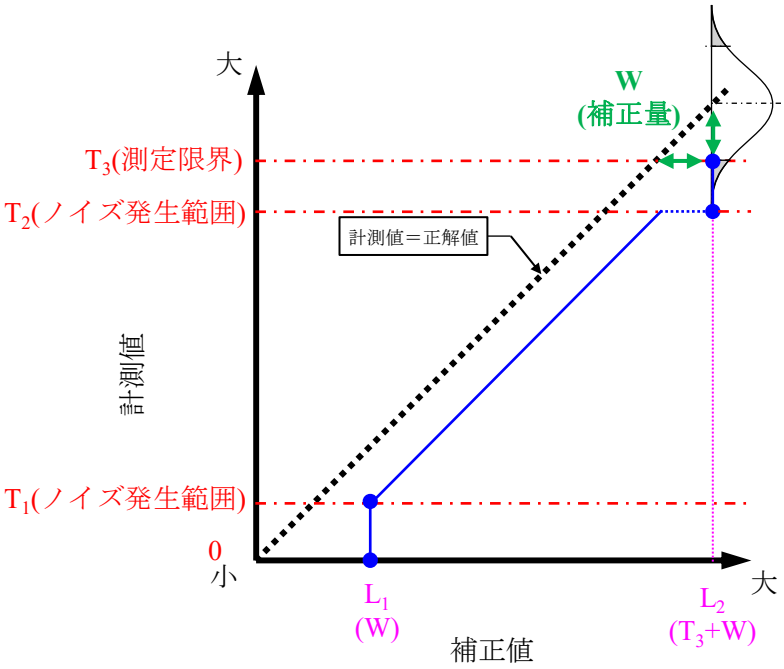


図-5.3.6　ノイズが発生する場合の補正値の設定方法

(4) 計測結果のかたよりに対する精度評価方法

計測技術の中には，計測結果のばらつきの分布中心が正解値と一致せず，1 方向にかたよる特徴を有するものがある。この場合，前述した計測結果のばらつきやノイズに加え，かたよりも考慮した補正を行う必要がある。**図-5.3.7** に精度評価における計測結果のばらつきが正解値に対してかたよりを生じている場合の概念図を示す。この場合，図中の t_2 及び t_3 のように，計測結果のかたよりの方向と正解値の関係によらず，ばらつきとかたよりを共に考慮した誤差の分布範囲として評価する。誤差の分布範囲から算出される所要の安全余裕を確保した値が正解値を過小評価する可能性がある場合は，その差分を補正量として見込む。一方，t_1 のように，誤差の分布範囲による安全余裕を考慮したとしても，計測結果が損傷を過小評価する可能性がない場合は，計測値の補正は不要となる。

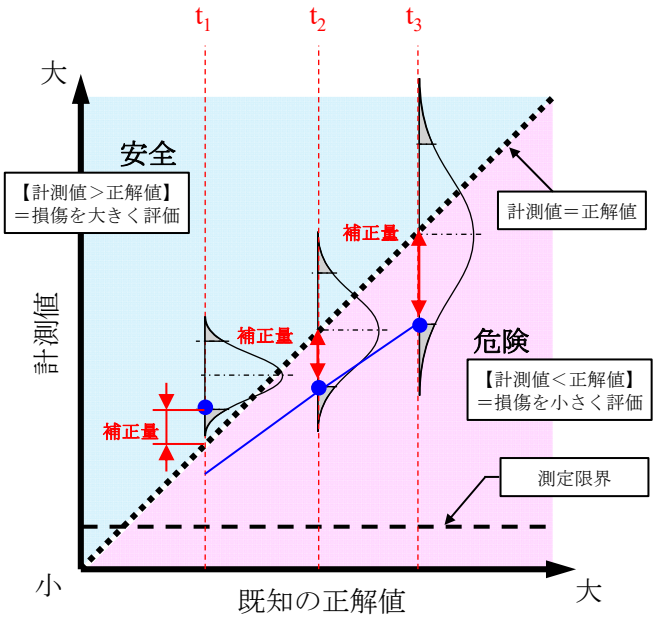


図-5.3.7　精度評価におけるかたよりの評価方法

5.3.2　定性的な計測データの評価方法

(1) 損傷検出方法による定性的な計測データの分類

本節では，定性的な計測データをアウトプットとするデジタル技術について，その評価方法を検討する。一般に，定量的なデータが数値や測定器の直読値などの明確な数値指標に基づくのに対し，定性的な計測データは，画像・波形の形状など，単独の数値に変換しづらく，人の判断や複数の評価指標を総合して損傷の有無や異常の可能性を示す技術が多い。そのため，定量的な計測データと比較し，損傷の検出方法が多岐にわたる。また，データの解釈には専門的な知識や資格が必要となる場合もある。**表-5.3.1** に，点検支援技術性能カタログに登録されているデジタル技術のうち，定性的な計測データをアウトプットとする技術を損傷検出方法の特徴により分類した例を示す。

表-5.3.1　定性的な計測データの損傷検出方法の特徴による分類

分類例	技術の例	内容
画像や形状を取得する技術	カメラ，レーザスキャナ　等	画像や形状を取得し，そのデータを基に人が損傷を判定する技術。損傷の抽出後に定量的な計測が可能な技術も存在する。
視覚情報の分布傾向により，異常を検出する技術	赤外線サーモグラフィー　等	計測対象の状態を視覚的なデータに変換し，他領域との比較によって異常を検出する技術。人による観察に基づく判断だけでなく，固有の評価基準によって損傷度合いを自動評価する手法も存在する。
波形の変化傾向により，異常を検出する技術	弾性波計測技術，磁束密度の変化を補足する技術　等	健全な状態における波形データとの乖離を人が判断することにより，異常を検出する技術。反射エコーの形状や周波数の差など，異常検出原理は様々である。
長期的な計測により，異常を検出する技術	剛性評価技術　等	長期間にわたりモニタリングを行うことで，通常時の計測データからの逸脱や経時変化から損傷の進展や異常を判断する技術。

(2) 計測精度の評価方針

定性的な計測データの評価方法は，データ形態の多様性や人間の認知を伴う判断プロセスを含むため，定量的な指標を扱う手法と比べると標準化が困難である。例えば，人間の解釈における結果の変動範囲をあらかじめ把握しておくことで，実際の計測時における結果の変動範囲を推定できるとも考えられる。しかし，人間の解釈に起因する結果の変動は，そ知識や経験の偏りやそれに基づく判断プロセスの違いから生じる個人差を含むため，設定した変動範囲の妥当性を保証することが困難である。

そのため，本報告書では，定性的な計測データをアウトプットとするデジタル技術の評価方法は，技術ごとに個別に設定する方針としている。

5. 4　本章の結論と今後の課題

本章では，デジタル技術の能力評価に関する方針について検討した結果を示した。デジタル技術が出力する計測データや，採用する計測原理は極めて多岐にわたるため，あらゆる手法に対して個別に具体的な評価方法を設定することは現実的ではない。しかし，本章で提示した評価方針に基づき，事前に各デジタル技術の能力範囲を把握しておけば，実運用時に損傷を見落とすリスクを低減し，信頼に足る計測結果を得ることが可能となる。また，事前の能力評価を行うことで，実際の環境条件や対象構造物に合わせ，損傷の把握に必要な能力を有する技術を的確に選定・活用できると考えられる。

また，定量的な評価が困難とされる定性的な計測データ（画像解析や波形形状など）を出力する技術については，熟練者の知見により生じる結果のばらつきを事前に可視化することで，当該技術の能力を一定の範囲で定量的に評価できる可能性を示した。ただし，データの多様性や複数の評価指標を定性的に評価し結果を判断する必要性があることから，現状では一般化は困難であり，今後の課題である。

第 6 章　技術の適用性に関する事例的検討

6. 1　ハンディ型レーザスキャナによる点群取得技術

6.1.1　本項の構成

本項では，ハンディ型のレーザスキャナにより取得した点群を使用し，対象物の変位や角度を計測する技術について，その試行例を示す。まず，6. 1. 2 では，本技術の計測原理等や使用時の留意点等について説明する。次に，6. 1. 3 では点群データの処理に主成分分析及び RANSAC 法を採用し，2 つの部材面間の距離計測及び単一の部材面の相対的な変位量の計測する場合の精度評価の方法について提案する。続いて，6. 1. 4 では，本技術の特性に基づき，実際の震後点検における具体的な活用可能性について整理する。最後に，6. 1. 5 では，現地調査で取得した被災橋梁の点群データを用いた部材の変形量の計測事例を紹介する。この中では，事前の精度評価を行わず統計的手法により計測結果の定量的に評価した事例と，本項で検討した精度評価結果を適用して計測結果を定量的に評価した事例について示す。

6.1.2　技術の概要及び計測の仕組み

（1）技術の概要

レーザスキャナとは，非接触型の 3D スキャナに分類される計測機器であり，対象物の 3 次元座標を取得するために用いられる。対象物にレーザ光を照射し，反射光の特性から対象物との距離を 3 次元座標として算出する仕組みを備えている。得られた 3 次元座標は 3 次元点群データとして扱われ，3 次元空間内の任意の部材の位置関係や角度・寸法を計測することで，部材の変形や位置関係の異常を検知できる。なお，非接触型のレーザ光を用いる技術としては光投影法や光切断法なども存在するが，本項で扱うレーザスキャナは反射光の特性から直接距離を算出する方式の機器に限定する。また，本項では点群データや処理プロセスを経たデータを用いて形状寸法を測る行為を“計測”，対象の点群データを得る行為を“取得”と定義する。

レーザスキャナを搭載する機器は**表-6.1.1** の通り分類できる。このうち，本項の検討で使用した機器はハンディタイプのレーザスキャナ（以下，本機器と呼称。）に分類される。

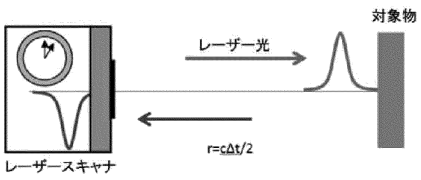
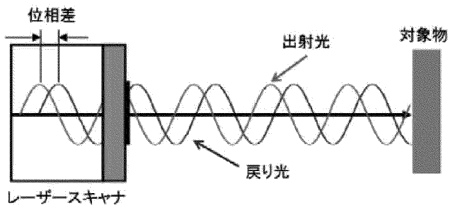
表-6.1.1　レーザスキャナを搭載する機器に着目した分類例 [6.1.1)~6.1.5)を基に作成]

地上型（TLS）	三脚等に機器を固定し点群を取得する。複数位置で点群を取得し，レジストレーションしたデータを使用する場合が多い
地上移動体搭載型（MMS）	車両等に測位装置と点群取得装置を搭載し，道路を移動しながら点群を取得する。
ハンディ型	使用者が機器を手に持ち移動しながら点群を取得する。ハンディ型の専用スキャナやスマートフォンに内蔵された LiDAR を活用した点群取得機器が該当する。
航空機型（ALS）	有人航空機に点群取得装置が搭載されており，広範囲の点群データの取得に適している。
UAV 型（ULS）	無人航空機（UAV）に点群取得装置が搭載されており，中～広範囲の点群データの取得に適している。

（2）点群の取得の方式

レーザ光を用いた点群の取得方式には飛行時間差方式（Time of Flight）と位相差方式（Phase Shift）の 2 種類があり（**表-6.1.2**），本機器は飛行時間差方式を採用している。

表-6.1.2　レーザを用いた点群取得の仕組み [6.1.6)]

	飛行時間差方式 (Time of Flight)	位相差方式 (Phase Shift)
イメージ		
点群取得の仕組み	短い光パルスを照射し対象物で乱反射した戻り光を受光部で検知するまで時間を計測することにより，光の速度から距離を求める	強度変調をかけた光を連続照射し，出射光と対象物で反射した戻り光との間に生じた位相の差を測定することにより距離を求める

（3）本項の検討で使用した機器

1）機器の仕様

本機器の仕様を**表-6.1.3** に示す。

表-6.1.3　本項の検討で使用したレーザスキャナの仕様[6.1.7)]

外観	仕様	
	機器名称	Leica BLK2GO
	重量	775g（バッテリー含む）
	連続使用時間	45～50 分 （1 バッテリー当り）
	内臓メモリ	6 時間
	レーザクラス	1（IEC 60825-1）
	レーザ波長	830 nm
	スキャン範囲	水平：360° 鉛直：270°
	測定範囲	0.5m～25m
	スキャンスピード	420,000 点/秒
	カメラ画素	1200 万画素
	レンジノイズ[注1, 注2]	±3 mm
	室内精度[注3, 注4]	±10 mm

注 1　距離計測の平均値に対する各単一距離計測の差（1σ）

注 2　アルベド（反射率）78%の場合

注 3　距離計，角度計，Visual SLAM の精度を含めた屋内環境での 3D ポイント誤差（1σ）

3D ポイント誤差の定義は Leica 社独自の基準であり非公開

注 4　2 分間のスキャンで取得したデータを用いて算出

2）使用条件

本機器の使用条件を**表-6.1.4** に，動作環境を**表-6.1.5** にそれぞれ示す。

表-6.1.4　本項で使用した機器の使用条件[6.1.7)]

項　　目	条　　件
機器の構成	スキャナ本体及び解析ソフト
使用ソフト	Leica 社の専用解析ソフト (Leica Cyclone REGISTER 360 及び Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition))
必要最小人員	1 人
資格の必要性	不要

表-6.1.5　動作環境 [6.1.7)]

項　　目	条　　件
耐久性	屋内及び屋外用
動作温度	0～＋40℃
防塵/防水	IP54(IEC 60529)

3）使用方法と留意点

本機器は，人が手に持って移動しながらスキャンを行う方法（以下，手持ち取得と呼称。）を標準として想定している。一方，ロープ等に吊り下げて使用する方法（以下，吊り下げ取得と呼称。）も可能である。ただし，点群を取得する際は自己位置推定のための 2 軸 Lidar が機器内部で常に高速回転するため，機器には振動が発生する。手持ち取得ではある程度振動は抑制されるものの，吊り下げ取得では振動を抑えにくいため位置情報の誤差が生じやすく，取得した点群のばらつきが増加する。振動抑制対策を講じない場合，取得時間が長くなるほど位置情報の誤差が大きくなり，データが破損する場合がある。なお，本項で後述する能登半島地震における調査では，振動抑制対策を講じずに吊り下げ取得を実施したところ，取得時間が 15 分程度を超えると点群データが破損する傾向が見られた。

6.1.3　技術の精度評価

（1）精度評価の方針

本節では取得した点群の分布から部材面の位置を推定し，距離や変位，角度を計測する場合の計測結果の精度評価方法について検討する。計測は，2 つの部材面間の距離，及び単一の部材面における相対変位量（角）の 2 通りのケースを想定している。なお，本技術の計測結果における物理指標は相対的な座標値であるため，実際は各座標値の差分から距離や変位，角度を算出する。

点群から部材の面を推定する方法は多岐にわたる[6.1.8)]が，本試行では主成分分析（推定した部材面に対する点群の誤差の分布範囲を評価する方法）及び RANSAC（点群から推定した部材面の位置の誤差の分布範囲を評価する方法）について検討する。

（2）計測精度に影響を及ぼす要因及び点群取得時の前提条件

距離計測の精度は，部材面の位置の推定に用いる点群の取得精度が大きく影響する。レーザを用いた計測では，点群の取得精度は反射レーザの減衰と相関があるとされる。反射レーザの減衰の程度（発射レーザと反射レーザの減衰比，SNR）は式（6.1.1）[6.1.9)]で示すことができる。

$$SNR = \frac{\cos\alpha}{\rho^2}\pi\gamma\eta_{sys}\eta_{atm} \tag{6.1.1}$$

ここに，α　　：レーザ入射角（rad）

ρ　　：計測距離（m）

γ　　：反射特性値

η_{sys}　　：システム損失

η_{atm}　　：大気損失

本機器の点群の取得精度は，式（6.1.1）に加え自己位置推定機能に生じる位置情報の誤差の影響も大きく受ける。式（6.1.1）を踏まえ，**表-6.1.6** に本機器の点群取得精度に影響を及ぼす要因の例を示す。なお，本機器は移動を伴いながら点群を取得するため，1 つの部材面を構成する点群には，異なる入射角で得られた点が混在するほか，反射特性に影響を与える材質や色も部材面ごとに異なる。これらの条件を部材面単位で個別に設定し，計測精度を詳細に評価することは困難である。また，大気損失の影響については，その考慮方法が明らかになっていない。そのため，精度評価に使用した点群と実際の調査時に取得した点群の取得条件の違いが精度に与える影響を厳密に考慮することは困難である。したがって，本項における精度評価の前提条件は，精度評価を適用するための目安として扱い，点群取得時の取得時間及び取得距離の 2 項目のみを採用するものとする。

表-6.1.6　点群取得精度に影響を及ぼす要因の例

影響を及ぼす要因の例	
レーザの計測性能	機器に依存
自己位置推定性能	機器に依存
取得距離	反射レーザの減衰に影響
レーザの入射角	反射特性値に影響
材質(表面粗度，色)	反射特性値に影響
大気中の粒子の存在	大気損失に影響
気温	レーザの速度に影響

(3) 精度評価の適用条件

前述のとおり，取得した点群の精度に影響を及ぼす要因は多岐にわたり，点群取得時の前提条件を統一した場合であっても，同一条件下における点群の密度分布や分布範囲が大きく異なる可能性がある。したがって，本評価の適用にあたっては，前述の条件に加え，取得した点群の分布特性を考慮し，精度評価の適用が可能な分布を有する点群であるかを判別した上で，適用範囲内の分布を有する点群にのみ評価を適用する方針とすることが望ましい。したがって，各手法の精度評価のまとめの小節において，取得した点群が精度評価の適用範囲に該当するかを判断するための基準も，併せて示す方針とする。

(4) 計測処理手順

取得した点群は推定したい部材面以外の範囲も含まれているため，事前に対象とする部材面を構成する点群のみ抽出する必要がある。また，本検討ではデータの処理速度を考慮して，ランダム・ダウンサンプリングを実施した。なお，この処理を適用しても点群の分布傾向に大きく影響が無いことは別途確認している。

さらに，各手法を用いて推定された部材面は**図-6.1.1**のように部材の内部側にかたよる傾向が確認された。したがって，部材面のうち機器が位置する側を表面，部材内部側を裏面，部材厚が薄く両側から取得した点群が一体となった場合を両面と呼称し，距離を計測する2つの部材面のかたよりの方向に応じて精度評価の場合分けを行うこととした。このかたよりによる場合分けは，2 つの部材面間の距離を計測する場合に考慮する。**図-6.1.2**に計測の処理手順のフローを，**表-6.1.7**にかたよりの方向に応じた精度評価の場合分けをそれぞれ示す。

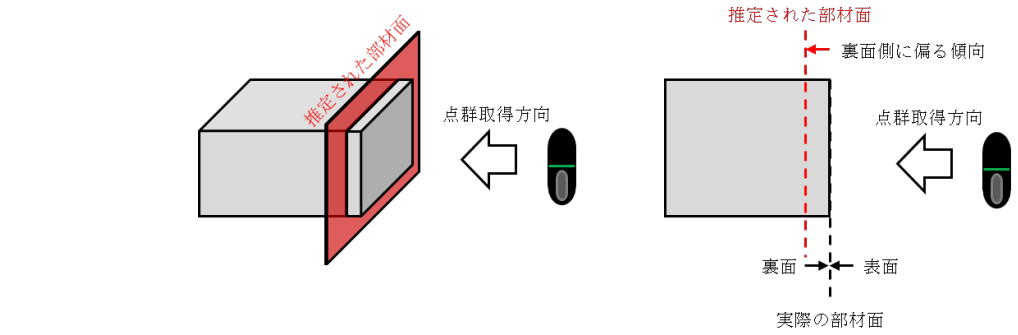


図-6.1.1　推定された部材面の位置のかたより（系統誤差）

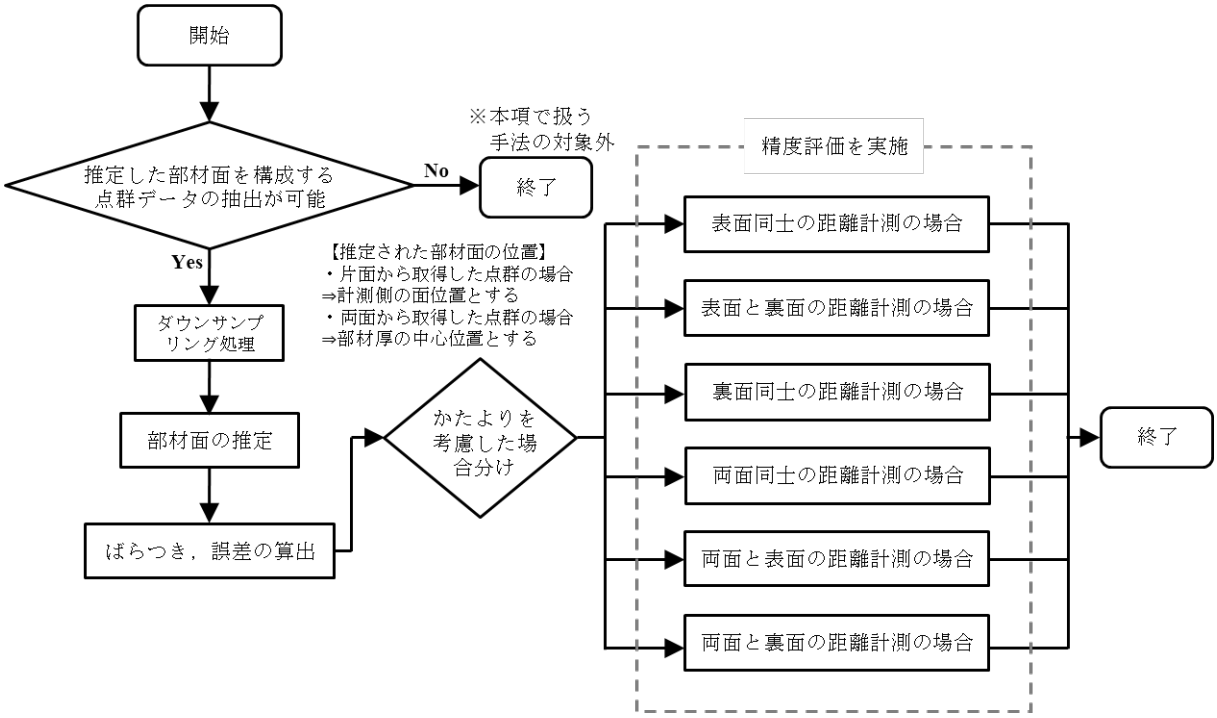
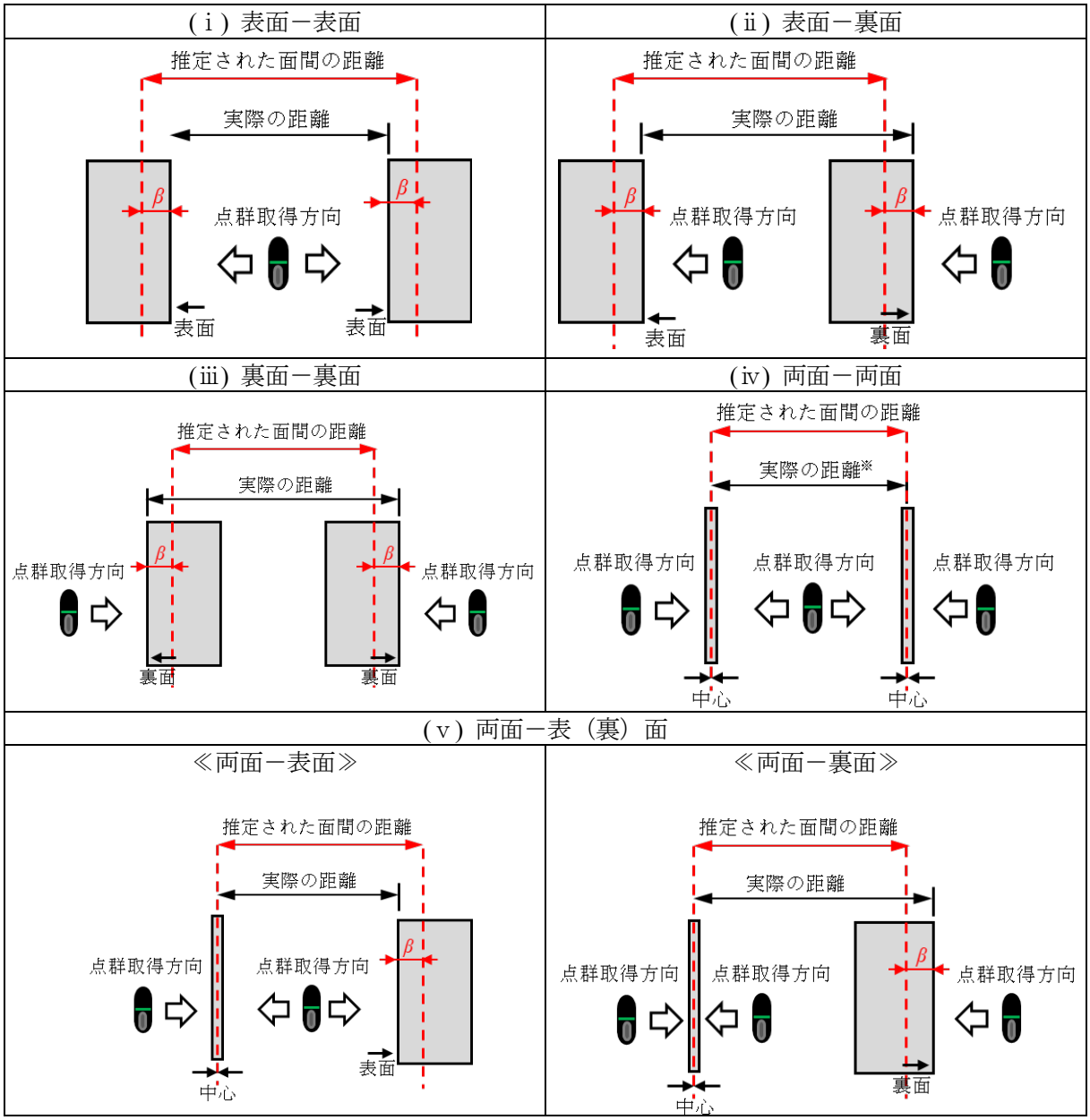


図-6.1.2　計測の処理手順のフロー

表-6.1.7　かたよりの方向に応じた精度評価の場合分け



注 1　βは実際の部材面の位置に対する推定された部材面の位置のかたよりを示す。

注 2　部材面の片側のみの抽出が困難な部材面は，推定された部材面の位置を部材中心とする。

（例：鈑桁のウェブやフランジ等は両側から取得した点群が一体化し，一方の面を構成する点群のみの抽出が困難である。）

（5）2 つの部材面間の距離を計測する場合における精度評価（主成分分析）

1）点群取得時の前提条件

精度評価に用いる点群の取得は，土木研究所敷地内の屋内実験施設で実施した。取得対象は寸法計測が可能な実験施設内の各種機材・治具（いずれも鋼部材）を対象とした。精度評価の前提条件は**表-6.1.8** に示す通り，点群取得時間は 5 分程度，対象物から 1～3m の距離とした。

表-6.1.8　精度評価の前提条件

点群取得時間	5 分程度
点群取得距離	1～3m

2）計測処理手順

主成分分析はある部材面を構成する点群の共分散行列の固有値と固有ベクトルを求めることで，点群の重心を通る面を推定する手法である [6.1.8)] 。主成分分析により推定された 2 面間の距離を計測しその精度を評価する。具体的な処理手順は，まず推定したい部材面を構成する点群のみ抽出し，点の個数が 10,000 点を超える場合はランダム・ダウンサンプリングを実施する。次に主成分分析を実施し，推定された部材面の平面の方程式及び法線方向の標準偏差を算出する（**図-6.1.3**）。なお，推定された部材面のばらつきは標準偏差により評価するため，点群のばらつきは推定された部材面の法線方向に対して正規分布に従うことを前提条件とする。

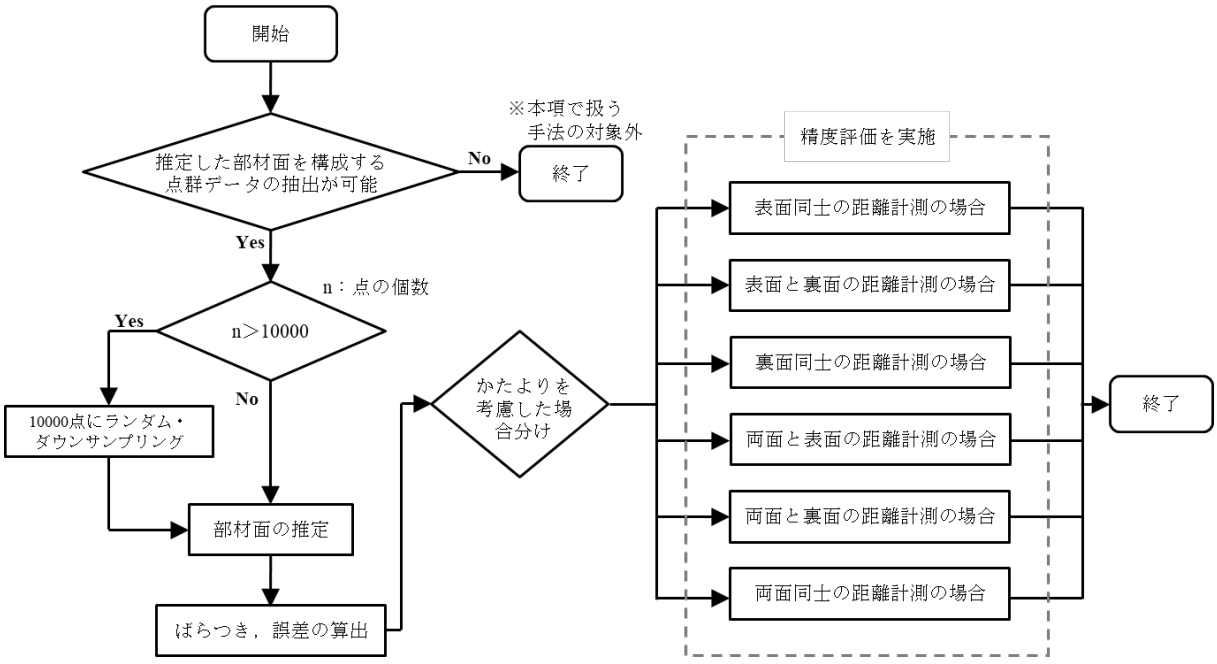


図-6.1.3　主成分分析による処理手順のフロー

3）ばらつきの算出方法

独立した確率変数を持つ 2 つのデータの和または差を算出する場合，そのばらつきは分散の加法性よりそれぞれの確率変数の分散の和の平方根に等しい（**図-6.1.4**）。各部材面を構成する点群の分布は異なるため，それぞれの点群から推定される部材面の位置は独立した確率変数を持つデータとみなせる。したがって， 2 つの部材面間の距離のばらつきは，それぞれの部材面の分散の和の平方根で示される。

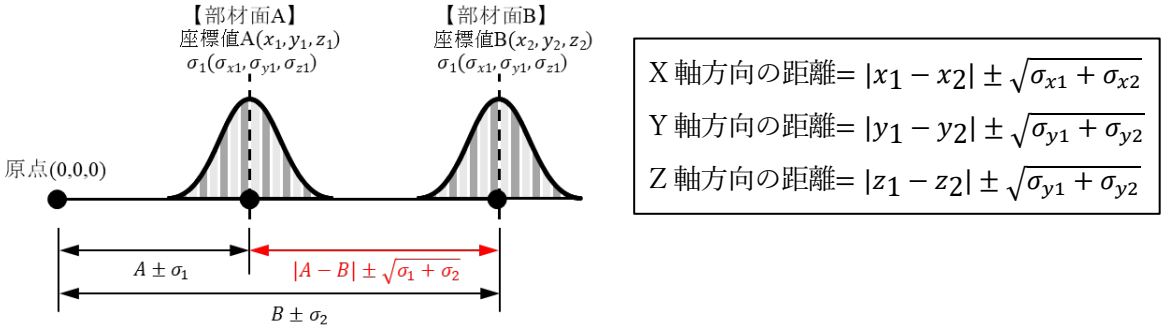


図-6.1.4　推定された部材面間の距離のばらつき

4）計測結果の精度評価

5 章に示す定量的な物理指標を計測する技術の精度評価では，既知の正解値に対して複数回の計測を実施し，計測結果の誤差の分布範囲に基づいて所要の安全余裕を考慮した補正量を設定する。また，本報告書では計測対象（正解値）の値が大きいほど損傷の程度が大きくなる場合を想定しているため，この補正量を計測結果に加えた値を補正後の計測値としている。**図-6.1.5** に標準的な補正量の算出方法及び点群を使用した場合の補正量の算出方法を示す。

一方，点群を用いた計測では計測対象となる部材面が多数の点で構成され，各点の座標値から 1 つの部材面の位置を定める。計測値は 2 つの部材面間の距離となる。そのため，計測値ひとつひとつに対してばらつきとかたよりが内在する。したがって，複数の計測結果のばらつきとかたよりに基づいて補正量を算出するのではなく，複数回の計測結果のうち最も安全余裕を確保できるばらつきとかたよりを有する計測結果を代表値として補正量を算出する方針とした。

さらに，計測対象の起点と終点はそれぞれ独立した確率変数により位置が算出されるため，計測結果のばらつきとかたよりの大きさは 2 点間の距離の大きさ（正解値の大きさ）には依存しない。これを踏まえ，本項の精度評価では異なる正解値での距離計測を 3 箇所以上実施し，その中で最も安全側のばらつきとかたよりを有する計測結果を代表値として補正量を算出し，計測結果の大きさにかかわらず適用する方針とする。この際，距離計測に使用する部材面は重複させないものとする。また，前述した部材面のかたよりによる場合分けは考慮する。**図-6.1.6**(a)～(b)に補正量が正解値の大きさに依

存する場合とそうでない場合における補正量の算出方針の違いを示す。**図-6.1.6**(a)は計測値を縦軸に，既知の正解値を横軸に取って示しており，**図-6.1.6**(b)は正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って示している。

なお，本項の検討においては，安全余裕を 95%信頼区間に設定し，計測値及びそのばらつきとかたよりを 0.1mm 単位で算出し，補正量は 1mm 単位で算出する方針とする。

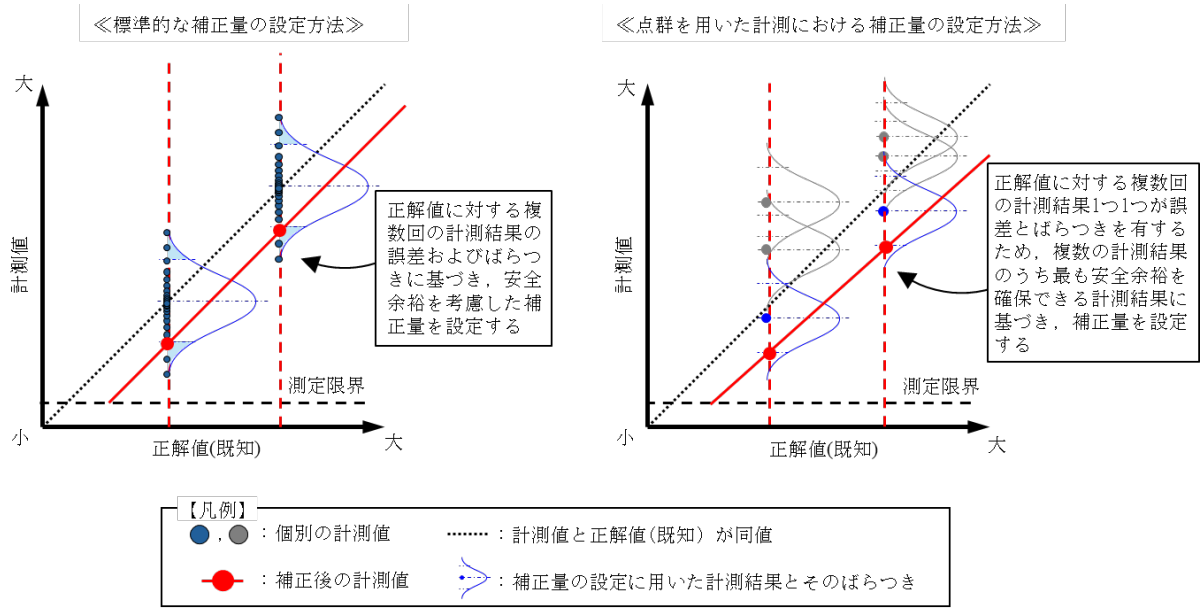
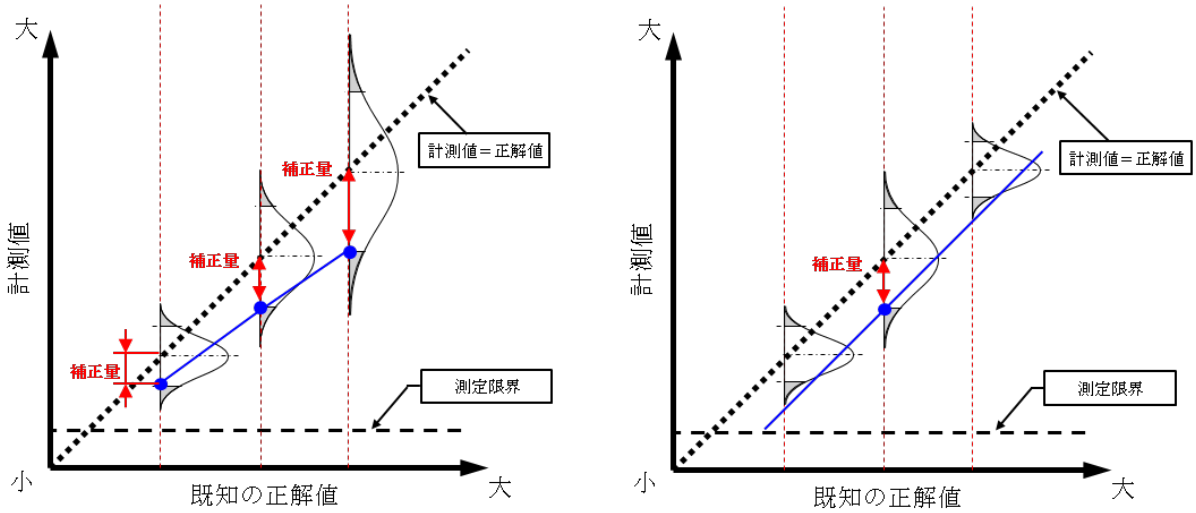
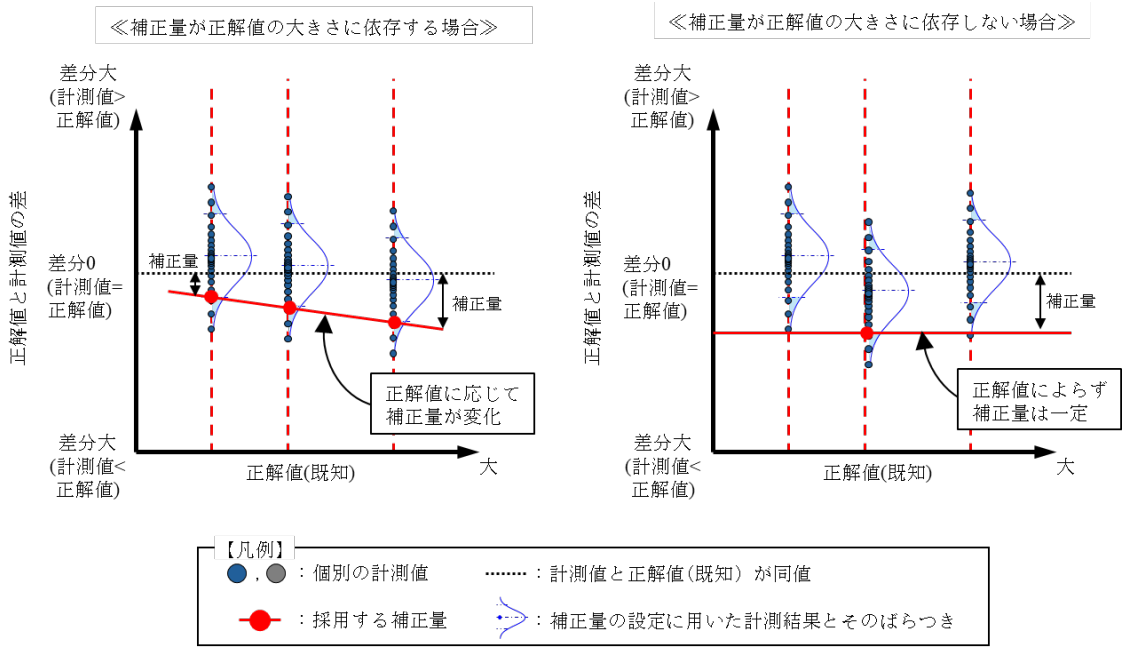


図-6.1.5　補正量の算出方法



(a)　縦軸に計測値，横軸に既知の正解値を取った場合



(b)　縦軸に正解値と計測値の差分，横軸に既知の正解値を取った場合

図-6.1.6　補正量が正解値の大きさに依存する場合とそうでない場合の算出方法

ｉ）表面－表面

表-6.1.9 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.10** には計測結果の正解値に対する誤差及びばらつき，算出された補正量を示す。正解値と計測値の差分を縦軸に，正解値を横軸に取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.7** に示す。また，同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“表面－表面”の位置関係にある部材間距離を計

測する際の補正量は 3mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果のばらつきとかたよりによる損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.9 点群データの取得条件と補正前の計測値（表面－表面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値
—	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	720	725.3
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	720	727.4
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	720	730.6
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	720	729.3
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	720	731.2
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	1212	1219.8
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	1212	1220.6
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	1212	1225.0
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	1212	1224.6
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	1212	1225.4
T_構_01	7 分 45 秒	1～3m 程度	2455	2474.3
T_構_02	6 分 28 秒	1～3m 程度	2455	2472.3

表-6.1.10 算出した補正量（表面－表面）

データ番号	正解値	計測値	誤差	標準偏差 (σ)	95%信頼区間 (1.96σ)	誤差-1.96σ	補正量の代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
04_01	720	725.3	5.3	3.3	6.5	-1.2	
04_02	720	727.4	7.4	5.0	9.7	-2.4	
04_03	720	730.6	10.6	6.4	12.5	-1.9	
04_04	720	729.3	9.3	5.3	10.3	-1.0	
04_05	720	731.2	11.2	7.1	13.9	-2.7	**3**
04_01	1212	1219.8	7.8	4.3	8.4	-0.5	
04_02	1212	1220.6	8.6	4.5	8.8	-0.3	
04_03	1212	1225.0	13.0	6.2	12.2	0.8	
04_04	1212	1224.6	12.6	3.2	6.3	6.2	
04_05	1212	1225.4	13.4	3.6	7.0	6.3	
T_構_01	2455	2474.3	19.3	5.5	10.8	8.5	
T_構_02	2455	2472.3	17.3	5.0	9.7	7.5	

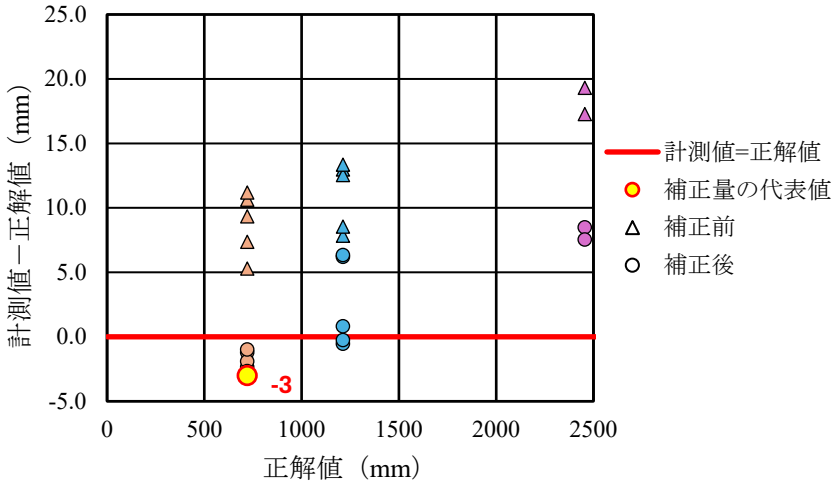


図-6.1.7　正解値と補正前後の計測値の差分（表面－表面）

ⅱ）表面－裏面

表-6.1.11 には計測に用いた点群データの取得条件及び計測結果の一覧を，**表-6.1.12** には計測結果の正解値に対する誤差及びばらつき，算出された補正量を示す。正解値と計測値の差分を縦軸に，正解値を横軸に取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.8** に示す。また，同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“表面－裏面”の位置関係にある部材間距離を計測する際の補正量は 16mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果のばらつきとかたよりによる損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.11　点群データの取得条件と補正前の計測値（表面－裏面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値
―	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
SB_01_01	4 分 25 秒	1～3m 程度	180	180.5
SB_01_02	4 分 41 秒	1～3m 程度	180	180.6
SB_01_03	4 分 25 秒	1～3m 程度	180	182.3
SB_01_04	4 分 41 秒	1～3m 程度	180	182.3
01_01	6 分 22 秒	1～3m 程度	285	283.5
01_02	5 分 23 秒	1～3m 程度	285	283.8
01_03	6 分 5 秒	1～3m 程度	285	283.6
01_04	4 分 43 秒	1～3m 程度	285	283.9
02_01	6 分 16 秒	1～3m 程度	285	283.5
02_02	5 分 18 秒	1～3m 程度	285	283.7
02_03	4 分 44 秒	1～3m 程度	285	283.6
03_01	6 分 43 秒	1～3m 程度	285	281.8
03_02	5 分 38 秒	1～3m 程度	285	282.8
03_03	5 分 38 秒	1～3m 程度	285	283.0
03_04	5 分 38 秒	1～3m 程度	285	282.9
03_05	5 分 36 秒	1～3m 程度	285	282.9
03_06	5 分 32 秒	1～3m 程度	285	283.6
03_07	５分 36 秒	1～3m 程度	285	283.5
03_08	5 分 34 秒	1～3m 程度	285	283.0
T_構_01	7 分 45 秒	1～3m 程度	1247	1249.0
T_構_02	6 分 28 秒	1～3m 程度	1247	1248.7

表-6.1.12　算出した補正量（表面－裏面）

データ番号	正解値	計測値	誤差	標準偏差(σ)	95%信頼区間(1.96σ)	誤差-1.96σ	補正量の代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
SB_01_01	180	180.5	0.5	5.0	9.8	-9.2	
SB_01_02	180	180.6	0.6	5.0	9.9	-9.3	
SB_01_03	180	182.3	2.3	5.1	10.0	-7.7	
SB_01_04	180	182.3	2.3	5.5	10.7	-8.5	
01_01	285	283.5	-1.5	6.3	12.4	-13.9	
01_02	285	283.8	-1.2	6.4	12.6	-13.8	
01_03	285	283.6	-1.4	6.9	13.5	-14.9	
01_04	285	283.9	-1.1	6.0	11.7	-12.8	
02_01	285	283.5	-1.5	6.5	12.7	-14.2	
02_02	285	283.7	-1.3	6.0	11.7	-13.0	
02_03	285	283.6	-1.4	5.6	10.9	-12.4	
03_01	285	281.8	-3.2	6.2	12.2	-15.4	**16**
03_02	285	282.8	-2.2	6.3	12.3	-14.5	
03_03	285	283.0	-2.0	6.6	13.0	-15.0	
03_04	285	282.9	-2.1	6.3	12.4	-14.5	
03_05	285	282.9	-2.1	6.5	12.8	-14.9	
03_06	285	283.6	-1.4	6.3	12.3	-13.7	
03_07	285	283.5	-1.5	6.3	12.4	-13.9	
03_08	285	283.0	-2.0	6.2	12.1	-14.1	
T_構_01	1247	1249.0	2.0	3.6	7.1	-5.1	
T_構_02	1247	1248.7	1.7	3.5	6.8	-5.0	

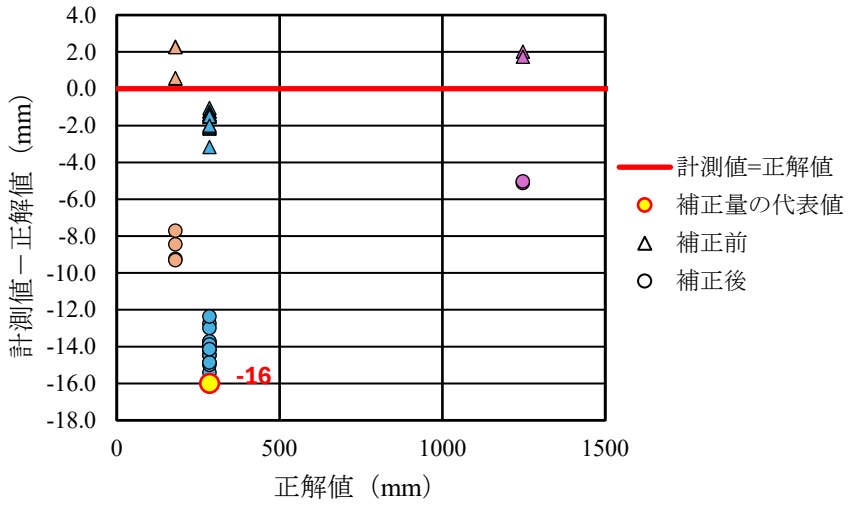


図-6.1.8　正解値と補正前後の計測値の差分（表面－裏面）

iii）裏面－裏面

表-6.1.13 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.14** には計測結果の正解値に対する誤差及びばらつき，算出された補正量を示す。正解値と計測値の差分を縦軸に，正解値を横軸に取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.9** に示す。また，同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“裏面－裏面”の位置関係にある部材間距離を計測する際の補正量は 33mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果のばらつきとかたよりによる損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.13　点群データの取得条件と補正前の計測値（裏面－裏面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値
―	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	40	31.3
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	40	31.0
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	40	26.4
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	40	27.1
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	40	26.4
01_01	6 分 22 秒	1～3m 程度	200	186.1
01_02	5 分 23 秒	1～3m 程度	200	188.2
01_03	6 分 5 秒	1～3m 程度	200	191.5
01_04	4 分 43 秒	1～3m 程度	200	192.8
03_01	6 分 43 秒	1～3m 程度	200	184.6
03_02	5 分 38 秒	1～3m 程度	200	184.2
03_03	5 分 38 秒	1～3m 程度	200	184.8
03_04	5 分 38 秒	1～3m 程度	200	189.8
03_05	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	188.1
03_06	5 分 32 秒	1～3m 程度	200	188.3
03_07	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	186.9
03_08	5 分 34 秒	1～3m 程度	200	189.0
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	413	399.1
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	413	405.3
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	413	403.0
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	413	401.7
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	413	400.8

表-6.1.14　算出した補正量（裏面－裏面）

データ番号	正解値	計測値	誤差	標準偏差(σ)	95%信頼区間(1.96σ)	誤差-1.96σ	補正量の代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
04_01	40	31.3	-8.7	4.2	8.2	-16.9	
04_02	40	31.0	-9.0	4.4	8.6	-17.7	
04_03	40	26.4	-13.6	5.8	11.3	-24.9	
04_04	40	27.1	-12.9	5.2	10.2	-23.1	
04_05	40	26.4	-13.6	6.8	13.3	-26.9	
01_01	200	186.1	-13.9	8.2	16.0	-30.0	
01_02	200	188.2	-11.8	7.1	13.8	-25.6	
01_03	200	191.5	-8.5	6.2	12.1	-20.6	
01_04	200	192.8	-7.2	6.1	12.0	-19.3	
03_01	200	184.6	-15.4	7.9	15.5	-30.8	
03_02	200	184.2	-15.8	8.1	15.9	-31.7	
03_03	200	184.8	-15.2	8.1	15.9	-31.1	
03_04	200	189.8	-10.2	6.5	12.7	-23.0	
03_05	200	188.1	-11.9	7.4	14.5	-26.3	
03_06	200	188.3	-11.7	6.9	13.5	-25.2	
03_07	200	186.9	-13.1	8.0	15.7	-28.8	
03_08	200	189.0	-11.0	6.9	13.4	-24.4	
04_01	413	399.1	-13.9	9.4	18.3	-32.2	**33**
04_02	413	405.3	-7.7	7.5	14.7	-22.4	
04_03	413	403.0	-10.0	8.0	15.7	-25.7	
04_04	413	401.7	-11.3	8.0	15.7	-27.0	
04_05	413	400.8	-12.2	8.5	16.7	-28.8	

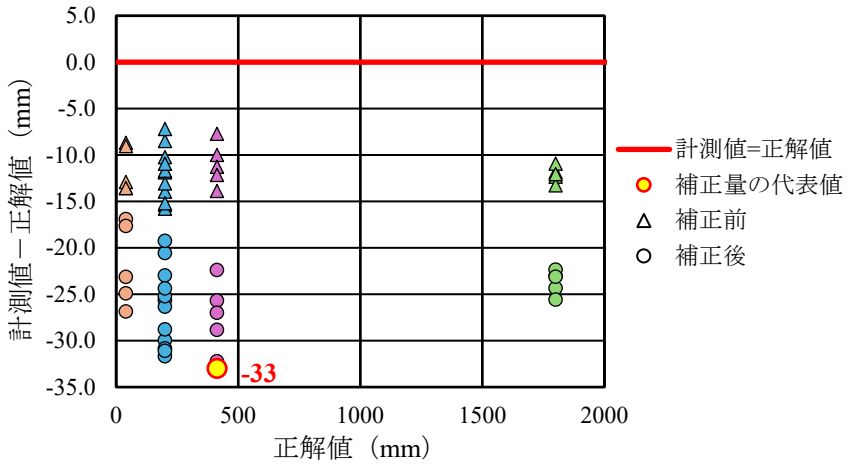


図-6.1.9　正解値と補正前後の計測値の差分（裏面－裏面）

ⅳ）両面－両面

表-6.1.15 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.16** には計測結果の正解値に対する誤差及びばらつき，算出された補正量を示す。正解値と計測値の差分を縦軸に，正解値を横軸に取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.10** に示す。また，同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“両面－両面”の位置関係にある部材間距離を計測する際の補正量は 17mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果のばらつきとかたよりによる損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.15　点群データの取得条件と補正前の計測値（両面－両面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値
―	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	200	200.7
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	199.5
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	200	200.0
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	200	200.7
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	200	201.0
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	200	198.7
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	198.2
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	200	198.4
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	200	197.7
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	200	197.8
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	700	697.5
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	700	698.5
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	700	697.4
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	700	697.3
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	700	696.4
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	1100	1095.9
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	1100	1096.2
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	1100	1095.6
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	1100	1095.7
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	1100	1096.3

表-6.1.16　算出した補正量（両面－両面）

データ番号	正解値	計測値	誤差	標準偏差(σ)	95%信頼区間(1.96σ)	誤差-1.96σ	補正量の代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
04_01	200	200.7	0.7	6.3	12.4	-11.7	
04_02	200	199.5	-0.5	6.2	12.2	-12.7	
04_03	200	200.0	0.0	5.9	11.7	-11.6	
04_04	200	200.7	0.7	5.2	10.2	-9.6	
04_05	200	201.0	1.0	5.7	11.1	-10.2	
04_01	200	198.7	-1.3	6.4	12.4	-13.8	
04_02	200	198.2	-1.8	6.4	12.5	-14.3	
04_03	200	198.4	-1.6	6.4	12.5	-14.1	
04_04	200	197.7	-2.3	6.2	12.2	-14.4	
04_05	200	197.8	-2.2	6.9	13.6	-15.8	
04_01	700	697.5	-2.5	5.5	10.9	-13.3	
04_02	700	698.5	-1.5	5.8	11.4	-12.9	
04_03	700	697.4	-2.6	5.8	11.3	-13.9	
04_04	700	697.3	-2.7	5.3	10.5	-13.2	
04_05	700	696.4	-3.6	5.3	10.3	-14.0	
04_01	1100	1095.9	-4.1	6.4	12.5	-16.6	**17**
04_02	1100	1096.2	-3.8	6.0	11.8	-15.7	
04_03	1100	1095.6	-4.4	5.9	11.6	-16.0	
04_04	1100	1095.7	-4.3	5.8	11.3	-15.6	
04_05	1100	1096.3	-3.7	6.1	12.0	-15.7	

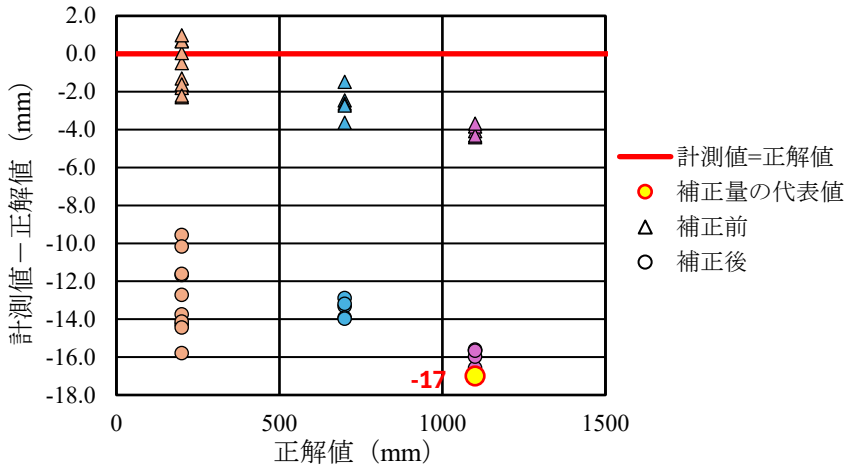


図-6.1.10　正解値と補正前後の計測値の差分（両面－両面）

ｖ）両面－表（裏）面

両面－表（裏）面における誤差の分布範囲は，ｉ）～ⅳ）の場合分けに基づく分布範囲の組み合わせにより算出することが可能である。**図-6.1.11** にｉ）～ⅳ）の場合分けにおける正解値に対する計測値の誤差の分布範囲を示す。“ｉ）表－表”及び“ⅲ）裏－裏”の場合において，正解値に対する計測値の誤差の絶対値の取り得る範囲は 5.3mm～19.3mm である。この 2 つの場合では，計測対象である 2 つの部材面が共に計測値が大きく（または小さく）なる方向にかたよりが生じるため，片面あたりの誤差の分布範囲は 2.7mm～9.7mm 程度と算出される。

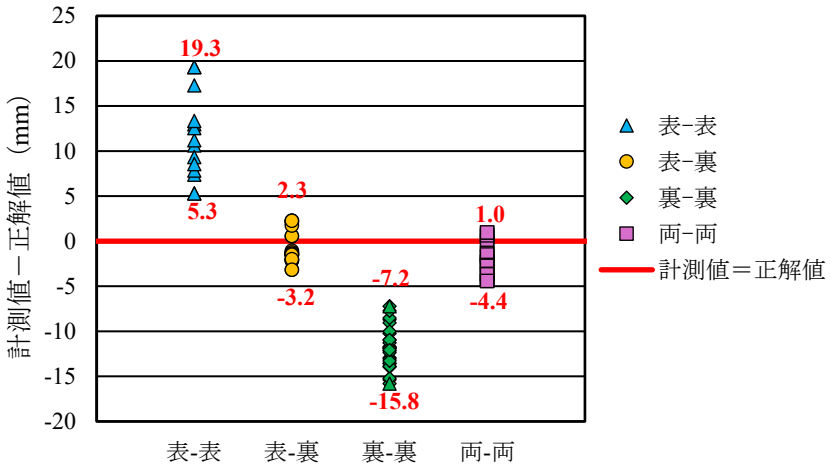


図-6.1.11　ｉ）～ⅳ）の場合分けにおける誤差の範囲

一方，“ⅱ）表－裏”及び“ⅳ）両－両”の場合，2 つの部材面のかたよりは逆方向に生じて互いに打ち消されることから，計測結果に含まれるかたよりではなく，計測対象である 2 つの部材面を構成する点群の分布特性の違いによる差であると推定される。この場合，2 つの部材面の誤差の分布範囲における差の絶対値の最大を考慮すれば良い。この場合，差の最大値は 4.4mm となるため，片面あたりの点群の分布の違いによる誤差は 2.2mm と算出される。

以上の結果より，“ｖ）両面－表（裏）面”の場合における補正量の算出にあたり考慮すべき誤差は，系統誤差 2.7mm～9.7mm 及び点群の分布の違いによる誤差 2.2mm である。本報告書では計測対象（正解値）の値が大きいほど損傷の程度が大きくなる場合を想定しているため，最も計測値が小さくなる場合の誤差から算出した補正量が最も安全余裕を確保できる。したがって，ｉ）～ⅳ）の場合分けにおける誤差の最大値を組み合わせ，補正量算出のための誤差を+0.5mm（-11.9mm）と算出した。誤差の組み合わせイメージを**図-6.1.12** に示す。

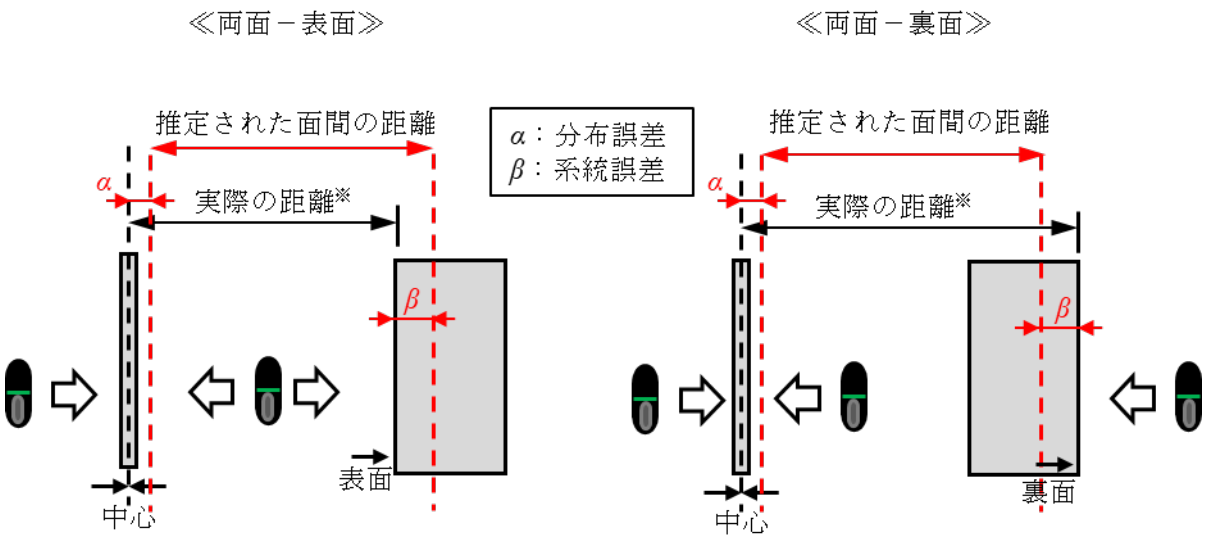


図-6.1.12　誤差の組み合わせ

次に，図-6.1.13 にｉ）～ⅳ）の場合分けにおけるばらつき（σ）の範囲を示す。精度評価における場合分けは，計測対象である 2 つの部材面の点群取得方向の相対位置関係に基づいているが，各部材面の点群のばらつきはいずれの場合においても正規分布である。そのため，ｉ）～ⅳ）の計測結果におけるばらつきの最大値 9.4mm を補正量算出のための代表値として採用する。

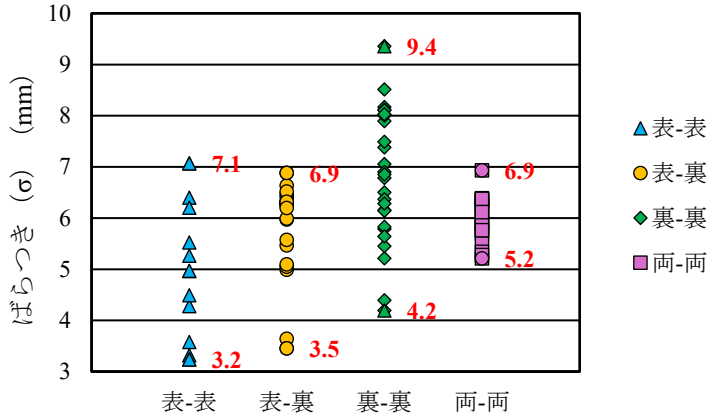


図-6.1.13　ｉ）～ⅳ）の場合分けにおけるばらつき（σ）の範囲

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“両面－表（裏）面”の位置関係にある部材間距離を計測する際の補正量は 18mm 及び 32mm と算出される。表-6.1.17 に算出した補正量を示す。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果の誤差やばらつきによる損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.17　算出した補正量（両面－表（裏）面）

場合分け	分布誤差（α）	系統誤差（β）	合計誤差	標準偏差（σ）	95%信頼区間（1.96σ）	誤差-1.96σ	補正量の代表値
－	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
両面－表面	-2.2	2.7	0.5	9.4	18.3	-17.8	**18**
両面－裏面	-2.2	-9.7	-11.9	9.4	18.3	-31.3	**32**

5）補正量のまとめ

表-6.1.18 にｉ）～ｖ）において算出された補正量の一覧を示す。主成分分析を用いて点群から 2 つの部材面の位置を算出しその距離を計測する場合は，部材面の位置関係における場合分けを考慮した補正値を使用することで，計測結果の誤差の分布範囲による損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

また，点群取得時の条件が同一であっても，点群の分布特性によりばらつきの範囲が大きく異なる可能性がある。そのため，本手法では平面の法線方向の標準偏差の計測方向への成分を指標とし，本精度評価を適用する上での前提条件として定める方針とする。**図-6.1.14** に精度評価に用いた 2 つの部材面の計測方向への合成標準偏差の分布範囲を示す。本図より，本節の精度評価は計測方向への合成標準偏差が 10mm 以下となる点群であることが前提条件となる。

表-6.1.18　主成分分析により部材面を推定した場合の補正量一覧

場合分け	補正量（mm）
表面－表面	3
表面－裏面	16
裏面－裏面	33
両面－両面	17
両面－表面	18
両面－裏面	32

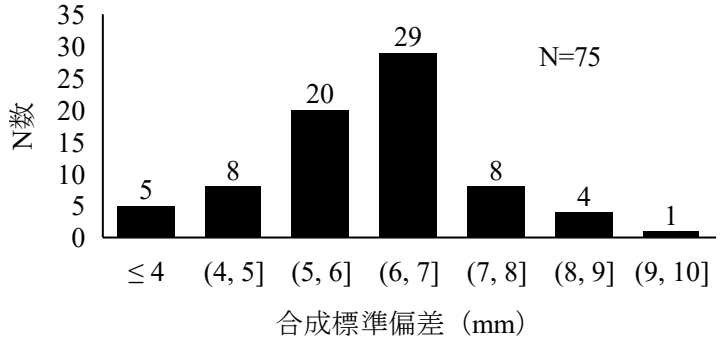


図-6.1.14　合成標準偏差の分布範囲

（6）2 つの部材面間の距離を計測する場合における精度評価（RANSAC 法）

1）点群取得時の前提条件

精度評価に用いる点群の取得は，土木研究所敷地内の屋内実験施設で実施した。取得対象は寸法計測が可能な実験施設内の各種機材・治具（いずれも鋼部材）を対象とした。精度評価の前提条件は**表-6.1.19** に示す通り，点群取得時間は 5 分程度，対象物から 1～3m の距離とした。

表-6.1.19　精度評価の前提条件

点群取得時間	5 分程度
計測距離	1～3m

2）計測処理手順

RANSAC 法とは点群データからプリミティブ形状（平面，直方体，円，球，円柱など，係数や次数が少ない式で定義できる形状）を推定する手法である [8]。この手法では，まず，点群データ内からランダムに 3 点を選択し，その 3 点を通る平面を仮定する。次に，その平面に対し指定した偏差以内に位置する点の個数をカウントし，その数が事前に指定した条件を満足すれば仮定した平面位置を採用し，条件を満たさない場合は再度別の 3 点を選択し同様の処理を実行する（**図-6.1.15**）。

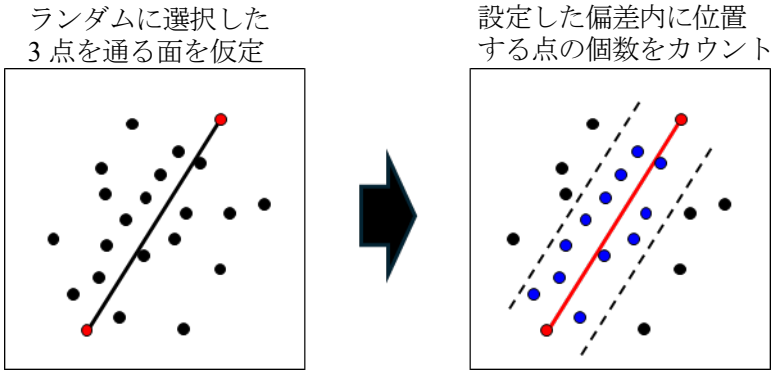


図-6.1.15　RANSAC 法による面推定の概要

計測は推定された 2 つの部材面間の距離を対象とする。しかし，前述した RANSAC 法のアルゴリズムのランダム性により，前提条件が同一であっても RANSAC 法を実行するたびに推定される面の位置は変動する。また，この変動範囲は正規分布に従わない。このため，本検討では同一条件下で RANSAC 法を 100 回実行し，その結果の変動範囲に基づいて補正量を算出する方針を採用する。

なお，RANSAC 法の実行のためには事前に偏差及び偏差内の点の最小個数を設定する必要がある。本検討では，対象点群の主成分分析により得られた計測方向の標準偏差（1σ）を 1mm 単位で切り上げた値を偏差として設定する。また，偏差内の点の最小個数は計測方向の標準偏差（1σ）内に存在する点の個数を目安とし，元の点群の点の個数の 8 割を 1000 点単位に丸めた値を初期値として設定す

る。

また，点群の分布特性によっては指定した初期条件を満たす面が存在しない可能性がある。そこで本検討では，RANSAC 法による処理が 5 回連続で失敗した際に偏差内の点の最小個数の設定を 1,000 点減じて再度処理を実行する方針とする。さらに，偏差内の点の最小個数の設定が 1000 点に達しても条件を満たす面が生成されない場合には，偏差内の点の最小個数を 100 点ずつ減じて処理を継続する。RANSAC 法による面推定の処理手順のフローを**図-6.1.16** に示す。

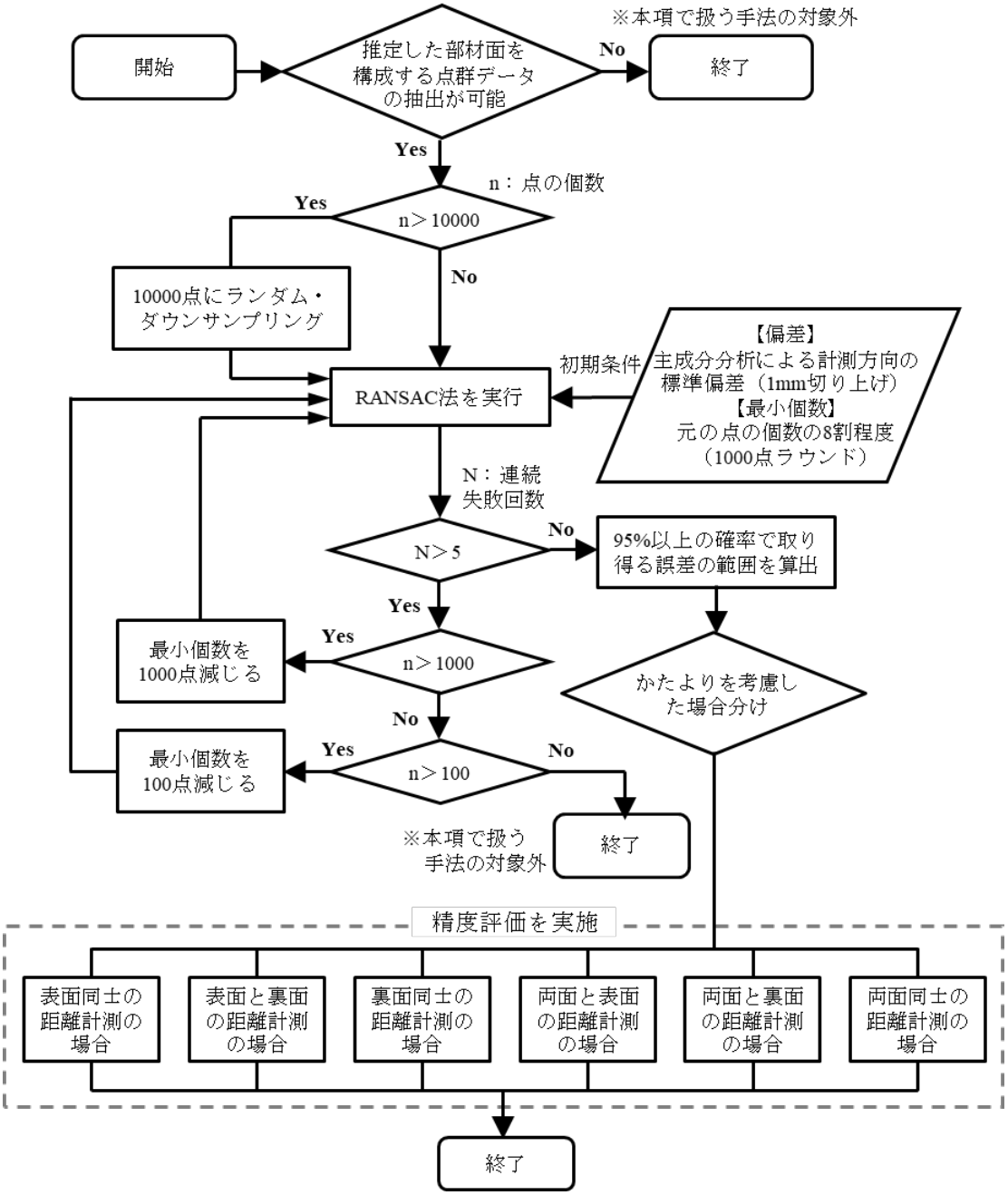


図-6.1.16　RANSAC 法による面推定の処理手順のフロー

3）変動範囲の算出方法

RANSAC 法では推定された面の位置座標の変動範囲から適切な補正量を算出する必要がある。そこで，本手法では推定された面の座標値の変動範囲から両側 5%（片側 2.5%）を外れ値と判定して除去し，残りの範囲をもって推定された部材面が取り得る値の変動範囲と定める方針を採用する。具体的には， RANSAC 法を 100 回実行し，得られた位置座標を 0.1mm 単位で丸めたうえで，最大値及び最小値からそれぞれ出現回数が 3 回未満（片側当たり 2.5%以下）となる値の範囲を外れ値として除去する。これにより推定された部材面の変動範囲を設定する。RANSAC 法によって推定された部材面が取り得る変動範囲の設定イメージを**図-6.1.17** に示す。

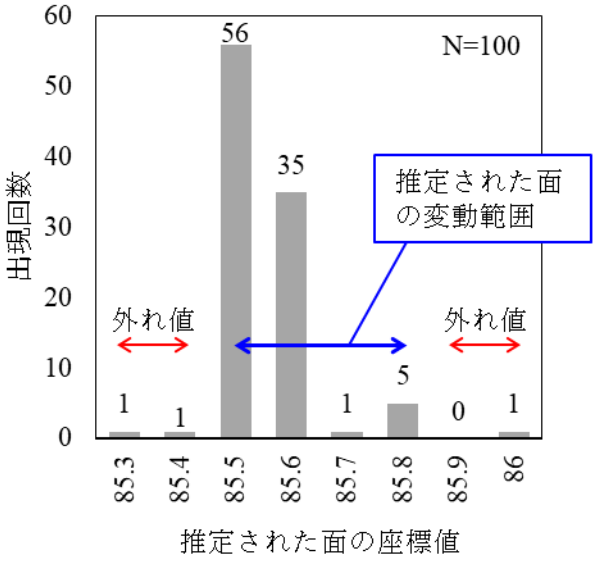


図-6.1.17　RANSAC 法により推定された部材面の変動範囲の設定イメージ

次に，推定された 2 つの部材面の変動範囲から補正量を算出する。本報告書では正解値の値が大きいほど損傷の程度が大きくなる場合を想定しているため，正解値に対して最も小さくなる値を代表値として採用することで最も安全余裕を確保できる補正量が算出される。したがって，**図-6.1.18** に示すように，2 つの部材面の分布範囲から最も計測結果が小さくなる値を基に補正量を算出する。

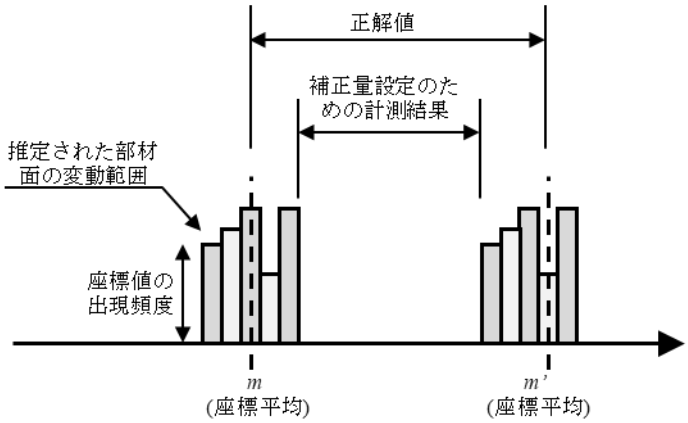


図-6.1.18　補正量算出のための計測結果の算出方法

4）計測結果の精度評価

RANSAC 法で推定した部材面の計測では，処理過程のアルゴリズムにランダム性が含まれるため，推定した部材面の位置座標の変動範囲は統計的なばらつきを有さない。そのため，前述の通り設定した位置座標の変動範囲において，補正量が最大となる計測結果を代表値として補正量を算出する。**図-6.1.19** に計測値の補正方法を示す。

さらに，計測対象となる 2 つの部材面はそれぞれ独立した処理により位置が算出されるため，計測結果の誤差やばらつきの大きさは 2 点間の距離の大きさ（正解値の大きさ）には依存しない。これを踏まえ，本項の精度評価では異なる正解値での距離計測を 3 箇所以上実施し，その中で最も安全側の計測結果を代表値として補正量を算出し，正解値の大きさに関わらず適用する方針とする。この際，距離計測に使用する部材面は重複させないものとする。また，前述した部材面のかたよりによる場合分けは考慮する。**図-6.1.20**(a)～(b)に補正量の大きさが正解値に依存する場合とそうでない場合における補正量の算出方針を示す。**図-6.1.20**(a)は計測値を縦軸に，既知の正解値を横軸に取って示しており，**図-6.1.20**(b)は正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って示している。

なお，本項の検討においては，計測値の変動範囲を 0.1mm 単位で算出し，補正値は 1mm 単位で算出する方針とする。

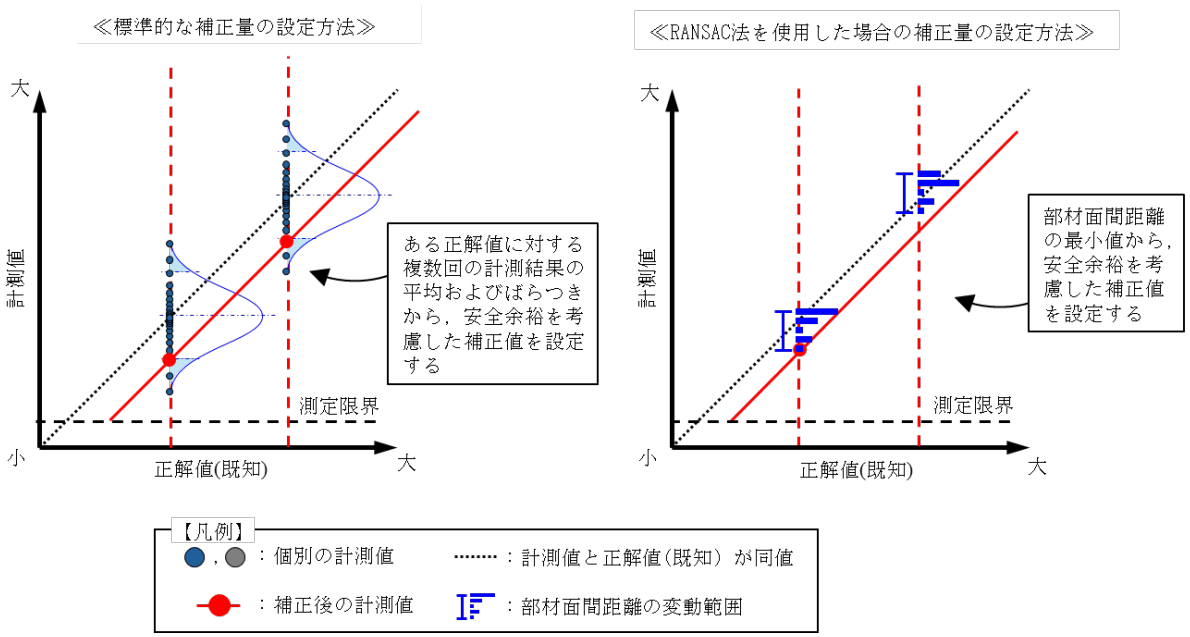
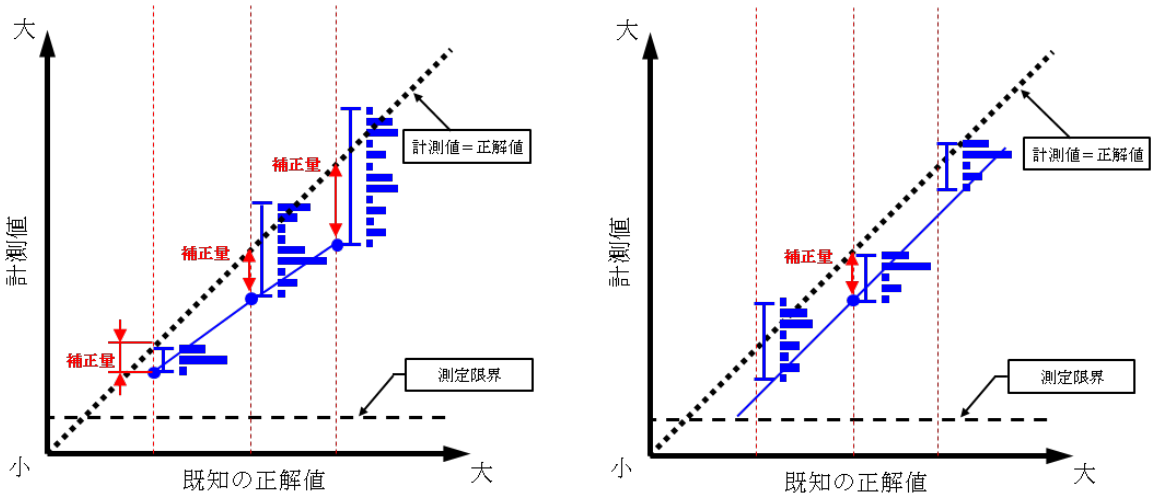
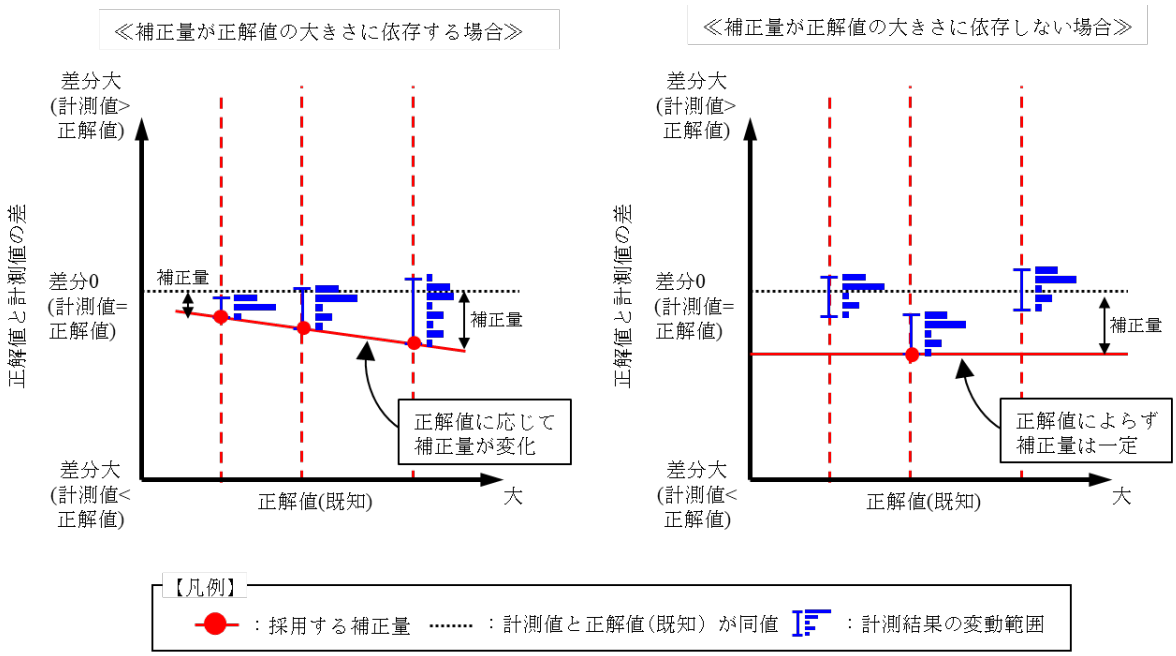


図-6.1.19　補正量の設定方法の例



(a)　縦軸に計測値，横軸に既知の正解値を取った場合



(b)　縦軸に正解値と計測値の差分，横軸に既知の正解値を取った場合

図-6.1.20　補正量が正解値の大きさに依存する場合とそうでない場合の算出方法の例

ｉ）表面－表面

表-6.1.20 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.21** には算出された補正量を示す。また，正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.21** に示す。同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“表面－表面”の位置関係にある部材間距離を算出する際の補正量は 0mm となる。これは，本方法を使用した計測結果の変動範囲は正解値よりも恒常的に大きいため，損傷を過小評価する可能性が無いことを示している。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，得られた計測結果は誤差や変動範囲の影響による損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.20　点群データの取得条件と補正前の計測値（表面－表面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値(平均)
—	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	720	725.2
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	720	727.0
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	720	729.7
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	720	728.8
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	720	730.6
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	1212	1219.7
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	1212	1220.1
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	1212	1224.6
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	1212	1224.4
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	1212	1224.7
T_構_01	7 分 45 秒	1～3m 程度	2455	2473.9
T_構_02	6 分 28 秒	1～3m 程度	2455	2471.9

表-6.1.21　算出した補正量（表面－表面）

データ番号	正解値	計測値 (最小)	補正量 (計測値(最小)-正解値)	補正量の 代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
04_01	720	725.1	5.1	**0**
04_02	720	725.8	5.8	
04_03	720	727.2	7.2	
04_04	720	726.9	6.9	
04_05	720	728.4	7.6	
04_01	1212	1219.6	8.0	
04_02	1212	1220.0	12.5	
04_03	1212	1224.5	12.3	
04_04	1212	1224.3	10.6	
04_05	1212	1222.6	7.6	
T_構_01	2455	2473.4	18.4	
T_構_02	2455	2470.5	15.5	

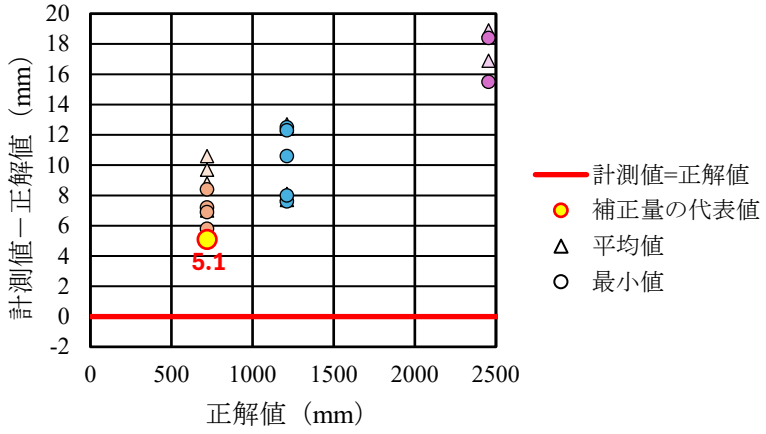


図-6.1.21　正解値と補正前後の計測値の差分（表面－表面）

ⅱ）表面－裏面

表-6.1.22 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.23** には算出された補正量を示す。また，正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.22** に示す。同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“表面－裏面”の位置関係にある部材間距離を算出する際の補正量は 3mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果の誤差や変動範囲の影響による損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.22　点群データの取得条件と補正前の計測値（表面－裏面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値(平均)
―	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
SB_01_01	4 分 25 秒	1～3m 程度	180	180.5
SB_01_02	4 分 41 秒	1～3m 程度	180	180.6
SB_01_03	4 分 25 秒	1～3m 程度	180	182.1
SB_01_04	4 分 41 秒	1～3m 程度	180	182.2
01_01	6 分 22 秒	1～3m 程度	285	283.5
01_02	5 分 23 秒	1～3m 程度	285	283.6
01_03	6 分 5 秒	1～3m 程度	285	283.6
01_04	4 分 43 秒	1～3m 程度	285	283.8
02_01	6 分 16 秒	1～3m 程度	285	283.3
02_02	5 分 18 秒	1～3m 程度	285	283.8
02_03	4 分 44 秒	1～3m 程度	285	283.8
03_01	6 分 43 秒	1～3m 程度	285	282.5
03_02	5 分 38 秒	1～3m 程度	285	283.0
03_03	5 分 38 秒	1～3m 程度	285	282.9
03_04	5 分 38 秒	1～3m 程度	285	282.9
03_05	5 分 36 秒	1～3m 程度	285	282.9
03_06	5 分 32 秒	1～3m 程度	285	283.4
03_07	５分 36 秒	1～3m 程度	285	283.4
03_08	5 分 34 秒	1～3m 程度	285	283.0
T_構_01	7 分 45 秒	1～3m 程度	1247	1249.1
T_構_02	6 分 28 秒	1～3m 程度	1247	1248.9

表-6.1.23　算出した補正量（表面－裏面）

データ番号	正解値	計測値 (最小)	補正量 (計測値(最小)-正解値)	補正量の 代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
SB_01_01	180	180.4	0.4	
SB_01_02	180	180.6	0.6	
SB_01_03	180	182.0	2.0	
SB_01_04	180	182.1	2.1	
01_01	285	283.5	-1.5	
01_02	285	283.5	-1.5	
01_03	285	283.5	-1.5	
01_04	285	283.6	-1.4	
02_01	285	283.2	-1.8	
02_02	285	283.7	-1.3	
02_03	285	283.6	-1.4	
03_01	285	282.4	-2.6	**3**
03_02	285	282.9	-2.1	
03_03	285	282.8	-2.2	
03_04	285	282.8	-2.2	
03_05	285	282.8	-2.2	
03_06	285	283.3	-1.7	
03_07	285	283.2	-1.8	
03_08	285	282.9	-2.1	
T_構_01	1247	1249.0	2.0	
T_構_02	1247	1248.9	1.9	

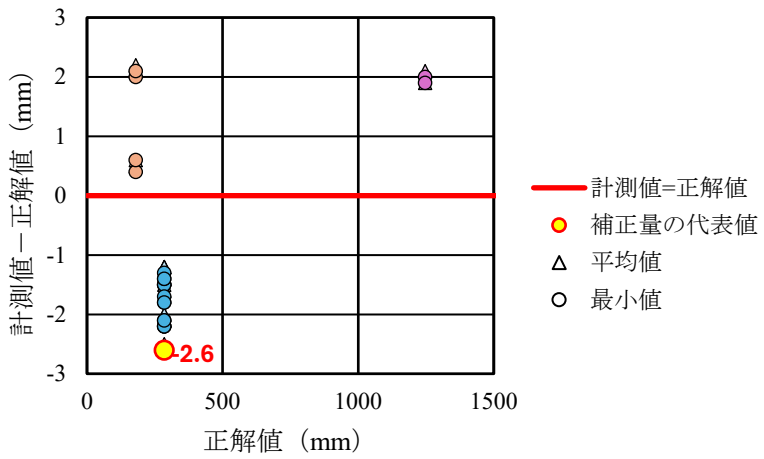


図-6.1.22　正解値と補正前後の計測値の差分（表面－裏面）

iii）裏面－裏面

表-6.1.24 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.25** には算出した補正量を示す。また，正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.23** に示す。同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“裏面－裏面”の位置関係にある部材間距離を算出する際の補正量は 16mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果の誤差や変動範囲の影響による損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.24　点群データの取得条件と補正前の計測値（裏面－裏面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値(平均)
—	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	40	31.4
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	40	31.2
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	40	26.6
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	40	27.2
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	40	26.8
01_01	6 分 22 秒	1～3m 程度	200	186.2
01_02	5 分 23 秒	1～3m 程度	200	188.1
01_03	6 分 5 秒	1～3m 程度	200	191.8
01_04	4 分 43 秒	1～3m 程度	200	192.7
03_01	6 分 43 秒	1～3m 程度	200	184.9
03_02	5 分 38 秒	1～3m 程度	200	184.3
03_03	5 分 38 秒	1～3m 程度	200	184.9
03_04	5 分 38 秒	1～3m 程度	200	189.8
03_05	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	188.2
03_06	5 分 32 秒	1～3m 程度	200	188.3
03_07	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	187.2
03_08	5 分 34 秒	1～3m 程度	200	189.0
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	413	398.7
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	413	404.8
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	413	402.8
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	413	401.4
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	413	400.7

表-6.1.25　算出した補正量（裏面－裏面）

データ番号	正解値	計測値 (最小)	補正量 (計測値(最小)-正解値)	補正量の 代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
04_01	40	31.4	-8.6	
04_02	40	31.1	-8.9	
04_03	40	26.6	-13.4	
04_04	40	26.9	-13.1	
04_05	40	26.4	-13.6	
01_01	200	186.1	-13.9	
01_02	200	188.1	-11.9	
01_03	200	191.6	-8.4	
01_04	200	192.6	-7.4	
03_01	200	184.7	-15.3	
03_02	200	184.3	-15.7	**16**
03_03	200	184.8	-15.2	
03_04	200	189.7	-10.3	
03_05	200	188.1	-11.9	
03_06	200	188.3	-11.7	
03_07	200	187.0	-13.0	
03_08	200	189.0	-11.0	
04_01	413	398.1	-14.9	
04_02	413	404.7	-8.3	
04_03	413	402.6	-10.4	
04_04	413	401.2	-11.8	
04_05	413	400.5	-12.5	

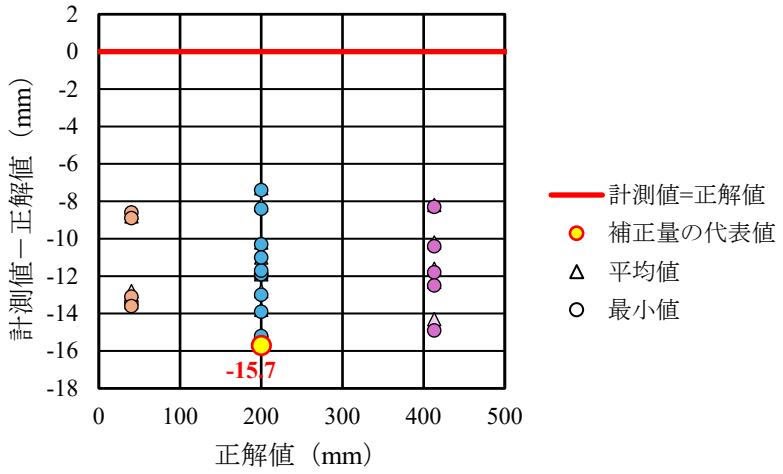


図-6.1.23　正解値と補正前後の計測値の差分（裏面－裏面）

iv）両面－両面

表-6.1.26 には計測に用いた点群データの取得条件及び補正前の計測値を，**表-6.1.27** には算出した補正量を示す。また，正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.1.24** に示す。また，同図には正解値と補正前の計測値の差分も併せて示している。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて“両面－両面”の位置関係にある部材間距離を算出する際の補正量は 6mm となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，この補正量を適用した補正後の計測値を計測結果とすることで，計測結果の誤差や変動範囲の影響による損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.26　点群データの取得条件と補正前の計測値（両面－両面）

データ番号	点群取得時間	取得対象との距離	正解値	計測値(平均値)
―	(分秒)	(m)	(mm)	(mm)
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	200	200.1
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	199.6
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	200	199.8
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	200	200.7
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	200	200.9
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	200	199.5
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	200	198.2
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	200	198.5
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	200	197.8
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	200	197.7
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	700	697.3
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	700	698.4
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	700	696.4
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	700	696.9
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	700	696.1
04_01	5 分 42 秒	1～3m 程度	1100	1095.8
04_02	5 分 36 秒	1～3m 程度	1100	1096.2
04_03	5 分 35 秒	1～3m 程度	1100	1095.7
04_04	5 分 32 秒	1～3m 程度	1100	1095.6
04_05	5 分 29 秒	1～3m 程度	1100	1096.0

表-6.1.27　算出した補正量（両面－両面）

データ番号	正解値	計測値 (最小)	補正量 (計測値(最小)-正解値)	補正量の 代表値
—	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
04_01	200	199.0	-1.0	
04_02	200	197.7	-2.3	
04_03	200	198.9	-1.1	
04_04	200	199.6	-0.4	
04_05	200	200.5	0.5	
04_01	200	198.9	-1.1	
04_02	200	197.4	-2.6	
04_03	200	198.5	-1.5	
04_04	200	197.4	-2.6	
04_05	200	197.0	-3.0	
04_01	700	697.2	-2.8	
04_02	700	697.9	-2.1	
04_03	700	696.4	-3.6	
04_04	700	696.7	-3.3	
04_05	700	695.5	-4.5	
04_01	1100	1095.5	-4.5	
04_02	1100	1096.1	-3.9	
04_03	1100	1094.8	-5.2	**6**
04_04	1100	1095.5	-4.5	
04_05	1100	1095.9	-4.1	

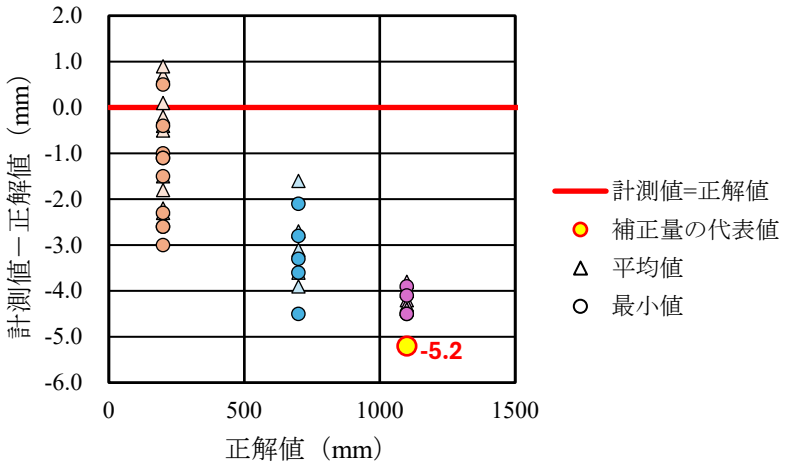


図-6.1.24　正解値と補正前後の計測値の差分（両面－両面）

ｖ）両面－表（裏）面

両面－表（裏）面における推定された部材面の位置座標の変動範囲は，ｉ）～ⅳ）の場合分けに基づく位置座標の変動範囲の組み合わせにより算出できる。**図-6.1.25** にｉ）～ⅳ）の場合分けにおける正解値に対する計測結果の最小値の変動範囲を，正解値に対する誤差として示す。“ｉ）表－表”及び“ⅲ）裏－裏”の場合において，正解値に対する誤差の絶対値の取り得る範囲は 5.1mm～18.4mm である。この 2 つの場合では，計測対象である 2 つの部材面が共に計測値が大きく（または小さく）なる方向にかたよりが生じるため，片面あたりの変動範囲は 2.6mm～9.2mm 程度と算出される。

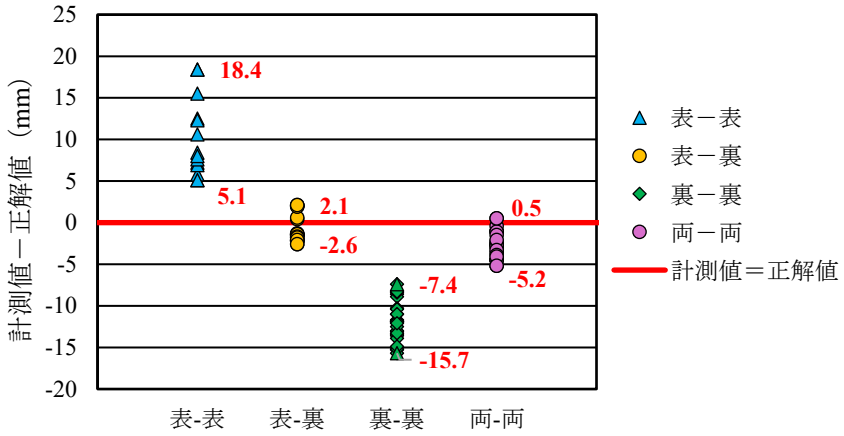


図-6.1.25 ｉ）～ⅳ）の場合分けにおける計測結果の最小値の誤差の分布範囲

一方，“ⅱ）表－裏”及び“ⅳ）両－両”の場合，2 つの部材面のかたよりは逆方向に生じて互いに打ち消されることから，計測結果のかたよりではなく，計測対象である 2 つの推定された部材面を構成する点群の分布特性の違いによる差であると推定できる。この場合，変動範囲の差の絶対値の最大を考慮すれば良いこととなり，その値は 5.2mm である。したがって，片面あたりの点群の分布特性の違いによる差は 2.6mm と算出される。

以上の結果より，“ｖ）両面－表（裏）面”の場合における補正量の算出にあたり考慮すべき変動範囲は，かたより 2.6mm～9.2mm 及び点群の分布特性の違いによる差 2.6mm となる。本報告書では計測対象（正解値）の値が大きいほど損傷の程度が大きくなる場合を想定しているため，変動範囲内において最も計測値が小さくなる場合に基づいて算出した補正量が最も安全余裕を確保できると判断される。したがって，ｉ）～ⅳ）の場合分けにおける誤差の最大値を組み合わせ，補正量を 0mm 及び 12mm と算出した。誤差の組み合わせイメージを**図-6.1.26** に，算出した補正量を**表-6.1.28** に示す。

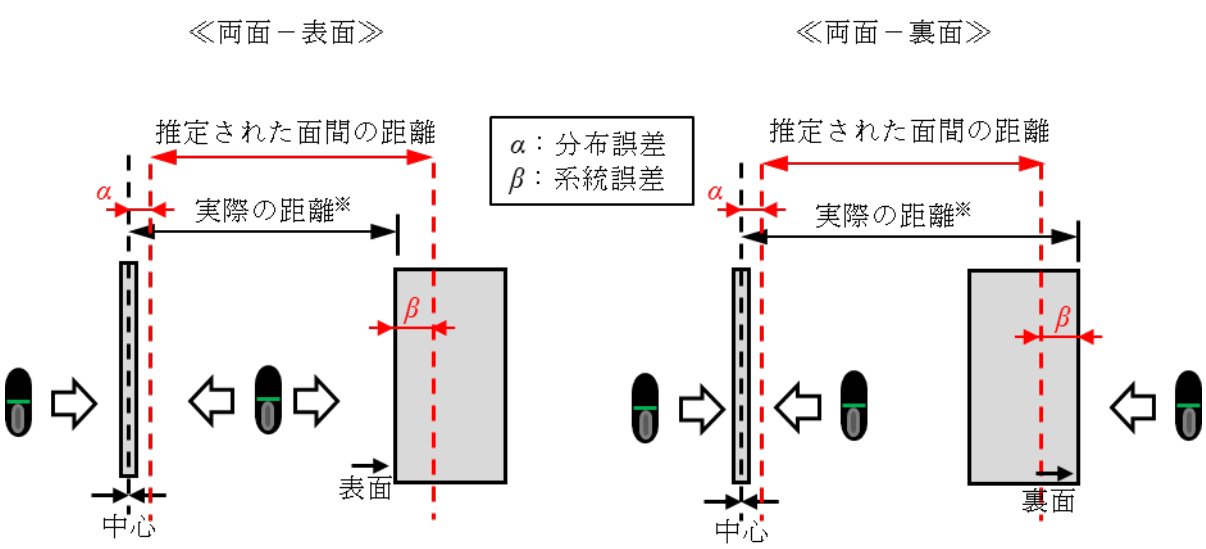


図-6.1.26　誤差の組み合わせ

表-6.1.28　算出した補正量（両面－表（裏）面）

場合分け	分布誤差 (α)	系統誤差 (β)	合計誤差	補正量の代表値
－	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
両面－表面	-2.6	2.6	0	**0**
両面－裏面	-2.6	-9.2	-11.8	**12**

5）補正量のまとめ

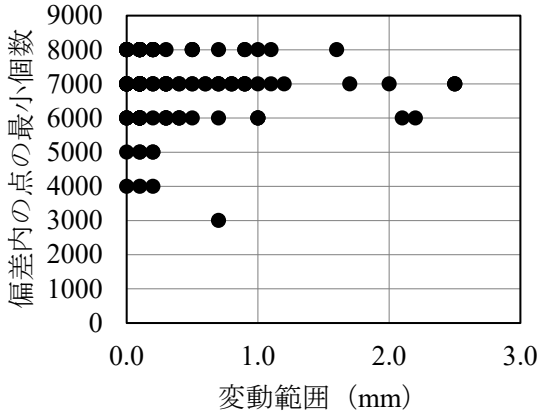
表-6.1.29 にｉ）～ｖ）において算出した補正量の一覧を示す。RANSAC 法を用いて点群から部材面の位置を算出しその距離を計測する場合は，部材面の位置関係に応じた補正を適用することで，計測結果の誤差や変動範囲による損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.1.29　主成分分析により部材面を推定した場合の補正量一覧

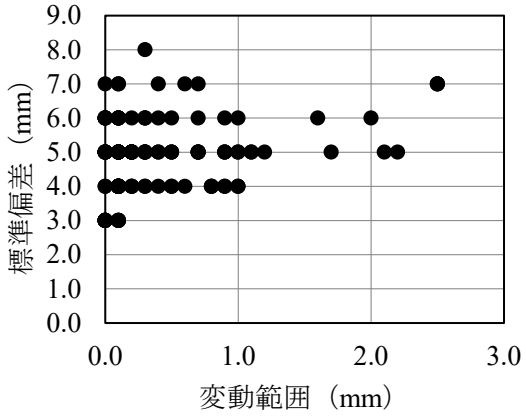
場合分け	補正量（mm）
表面－表面	0
表面－裏面	3
裏面－裏面	16
両面－両面	6
両面－表面	0
両面－裏面	12

また，点群取得時の条件が同一であっても，点群の分布特性により推定された面の変動範囲が大きく異なる可能性がある。さらに，RANSAC 法の処理条件となる偏差の幅や偏差内に含まれる最小

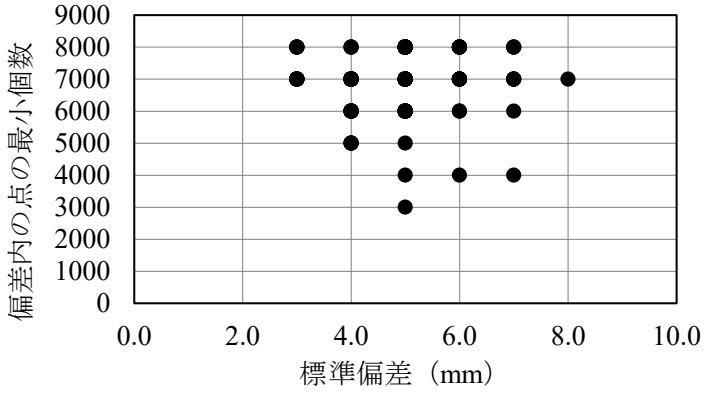
点数の設定によっても推定される面の分布が変動する。そのため，点群の分布特性と RANSAC 法による面位置の変動範囲には必ずしも明確な相関があるとは限らない。**図-6.1.27**(a)～(c)に RANSAC 実行時の偏差内の点の最小個数，偏差（標準偏差）及び変動範囲の関係を示す。本図の通り，各条件の間に明確な相関は確認できないものの，偏差内の点の最小個数が大きい場合に変動範囲が広くなる傾向にあり，かつ，標準偏差が大きい場合にも変動範囲が広くなる傾向が確認される。



(a)　偏差内の点の最小個数と変動範囲の関係



(b)　偏差（標準偏差）と変動範囲の関係



(c)　偏差内の点の最小個数と偏差（標準偏差）の関係

図-6.1.27　RANSAC の実行条件及び推定された面の分布幅の関係

本手法では，偏差の幅として用いた平面の法線方向の標準偏差の計測方向成分を指標とし，本精度評価の適用における前提条件として定める方針とする。**図-6.1.27** より，本節の精度評価は計測方向への標準偏差が 8mm 以下となる点群であることを前提条件とする。なお，本手法の前提条件は 1 つの面における点群データの標準偏差であり，主成分分析による精度評価を実施する際の合成標準偏差を指標とした前提条件とは異なるため，適用時には注意が必要である。

（7）単一の部材の変形量を計測する場合の精度評価（RANSAC 法）

1）精度評価の方針

点群を用いた計測では，単一の部材の変形量を評価することができる。この場合，部材面を小領域に分割し，各小領域の相対的な変化を捉えることで，変形量を算出する。

2 つの部材面間の距離を計測する場合における精度評価では，計測値が大きいほど損傷の程度が大きくなる場合を想定し，計測値が大きくなる方向に補正を適用することで安全余裕を確保する方針を示した。

一方，単一の部材面の変形量を計測する場合，小領域に分割したデータは連続しているため，データの境界において位置座標の連続性が保持される必要がある。また，損傷の程度が大きくなる変形方向は，鋼部材の座屈モード等，部材に生じる損傷の特性により異なる。そのため，誤差や変動範囲から算出される補正量を一定方向に最大限見込むことが，必ずしも適切な安全余裕の確保に繋がるとは限らない。

以上を踏まえ，本節の精度評価では，推定した部材面が基準軸に対して取り得る角度や変位量の変動範囲の算出に留め，実際の計測おいては，部材の変形特性を考慮した上で適切な方向に補正量を見込む方針とする。

また，前節では，2 つの部材面の位置関係によって精度評価を場合分けし，点群の取得方向に起因するかたよりを考慮した。一方，本節では，単一の部材面の点群が同一方向から取得されていることを前提とし，点群の取得方向によるかたよりは考慮しないものとする。

なお，主成分分析は，点群の分布の重心から平面の方程式及び法線方向の標準偏差を算出する手法である。しかし，平面の方程式は推定された面の平面方向の広がりを推定することはできない。そのため，平面の法線方向への点群の分布からは，平面の角度のばらつきを算出することができない。したがって，部材面の角度を計測する場合には本手法は適用外と判断する。

2）計測の処理手順及び誤差や変動範囲の算出方法

RANSAC 法の処理手順及び変動範囲の算出方法は，2 つの部材面間の距離を計測する場合と同様の方法を適用する。ただし，単一の部材面を計測する手法では，事前評価にて基準となる既知の正解値が存在しないため，計測結果のかたよりによる誤差は評価しない。そのため，実際の計測値が変動範囲内において最も最大（最小）側に位置する可能性を考慮して，計測値に対して正負両方向に変動範囲を見込み，変位量及び角度を算出する方針とする。

3）計測結果の精度評価

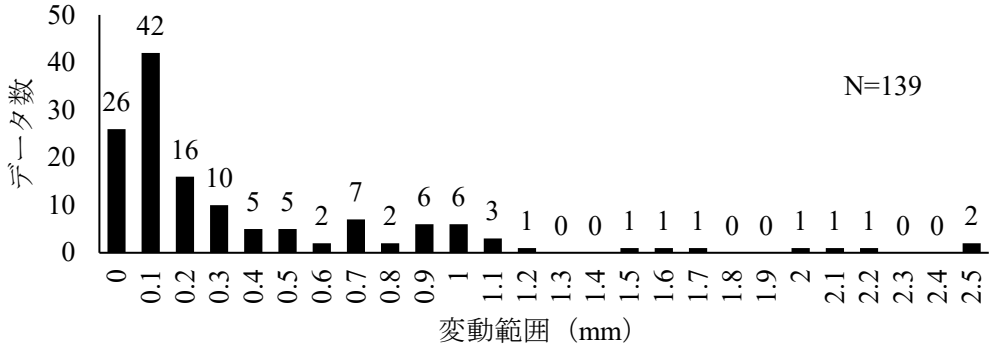
本節の精度評価は，単一の部材面の変位量及び角度を計測することを目的とし，部材面を小領域に分割した点群データを対象に，推定された面の相対的な変位量及び角度の変化を把握する場合を想定

している。その方針として，基準軸に対する変位量及び角度の変動範囲を算出し，計測対象の変形特性を踏まえて適切にその影響を計測結果に考慮する手法を採用している。

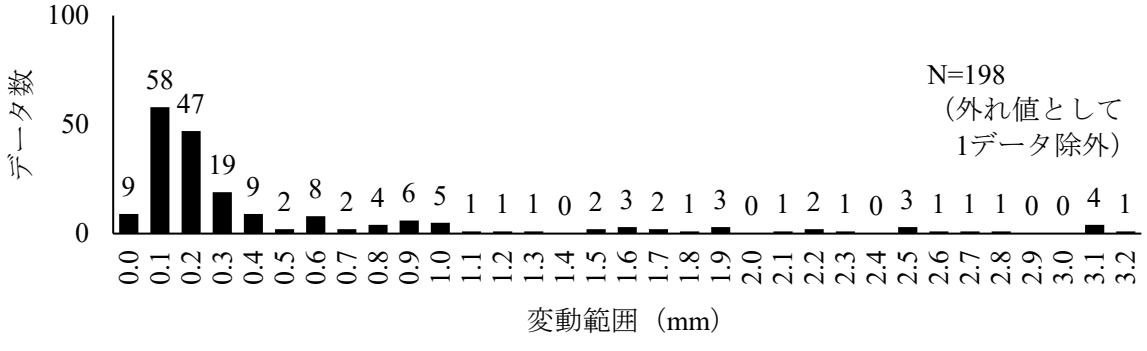
本節の検討においては，安全余裕を 95%信頼区間相当に設定し，変位量及び角度の変動範囲を算出する。対象とするデータは，①2 つの部材面間の距離を計測する際の精度評価に使用した RANSAC データ（計 139 データ，取得時間：5 分程度，取得距離：1～3m），②鋼アーチ橋の吊材の点群データから得られた RANSAC データ（計 199 データ，取得時間：15 分程度，取得距離：5～10m）の 2 種類を使用した。**図-6.1.28**(a)～(b)に①及び②から得られた変位量の変動範囲の分布を，**図-6.1.29**(a)～(b)に①及び②から得られた角度の変動範囲の分布を示す。**図-6.1.28**(b)のみ変動範囲が 7.3mm となるデータが 1 つあったため外れ値として除外しているが，外れ値の定量的な判断基準については今後の課題である。本検討では，外れ値を除いた値から，最も変動範囲が大きい値を補正量として設定する。

実際の計測では，計測値が分布範囲のどの位置に相当する値であるかを事前に把握することは困難であるため，実際の計測値に対して両方向に変動範囲の広がりを持つものと仮定し，計測値の補正量を設定する。なお，計測値及びその変動範囲は 0.1mm 及び 0.1° 単位で算出する方針とする。

本節の検討結果より，RANSAC 法により推定した単一の部材面の変位量の変動範囲は±3.2mm，角度の変動範囲は±1.5° と設定する。

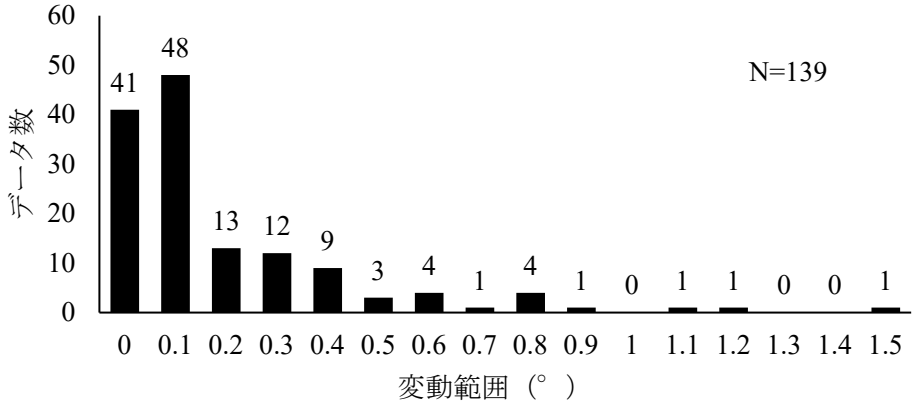


(a) ①から得られたデータの変位量の変動範囲の分布（取得時間：5 分程度，取得距離：1～3m）

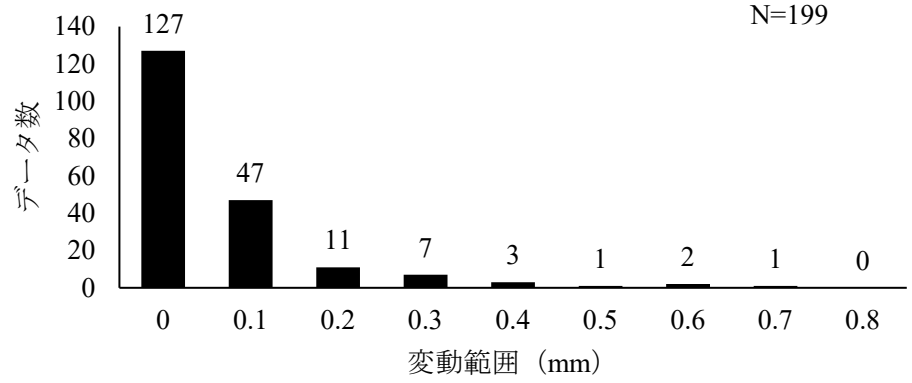


(b) ②から得られたデータの変動範囲の分布（取得時間：15 分程度，取得距離：5～10m）

図-6.1.28 変位量の変動範囲の分布



(a) ①から得られた角度の変動範囲の分布（取得時間：5 分程度，取得距離：1～3m）



(b) ②から得られた角度の変動範囲の分布（取得時間：15 分程度，取得距離：5～10m）

図-6.1.29 角度の変動範囲の分布

また，点群取得時の条件が同一であっても，点群の分布特性により推定された面の変動範囲が大きく異なる可能性がある。さらに，RANSAC 法は処理にランダム性を含み，偏差の幅や偏差内に含まれる偏差内の点の最小個数の設定によっても推定される面の分布が変動する。そのため，点群の分布特性と RANSAC 法による面位置の変動範囲には必ずしも明確な相関があるとは限らない。また，変位量については②のデータの変動範囲が大きく，角度については①のデータの変動範囲が大きい結果となった。本検討では，点群取得時の前提条件として点群取得時間及び取得距離を定めているが，これらの条件と変動範囲の関係の明確化については今後の課題である。

本手法では，偏差の幅として用いた平面の法線方向の標準偏差の計測方向成分を指標とし，本精度評価の適用における前提条件として定める方針とする。本節の精度評価では，2 つの部材面間の距離を計測する場合の条件と整合させ，計測方向への標準偏差が 8mm 以下となる点群であることを前提条件とする。

6.1.4 震後点検で想定される活用方法

3 次元点群データは，構造物の 3 次元形状を面として取得することが可能であるため，各部材面間の距離や位置関係，及び基準軸や基準点に対する変位量及び角度を定量的に把握することができる。また,点群データは色情報を併せて取得できる場合が多く,点密度が十分に確保されている場合には,構造物の表面変状の詳細な把握にも寄与する。さらに，構造物および周辺地形の点群データを取得することにより，広範囲にわたる地形変動の状況を把握することが可能となる。**表-6.1.30** に，想定される活用方法の概要を示す。

表-6.1.30 想定される活用方法

活用方法	内容
被害の概要把握	取得した点群データを目視により確認することで，対象構造物及び周辺地形の被災概要を把握する。
構造物の部材面間の相対位置の計測	後処理により部材面を推定し，事前評価による誤差やばらつきを考慮した補正値を用いて，座標値の差分から複数の部材間距離を計測する。
基準点（軸）に対する相対変位（角度）の計測	後処理により部材面を推定し，事前評価による誤差やばらつきを考慮した補正値を用いて，基準軸に対する相対変位量（角度）を計測する。
表面変状の把握	取得した点群データを目視により確認することで，形状変化を伴わない，あるいは点群の取得精度では検知が困難な微細な形状変化を伴う変状を把握する。
時系列比較によるデータの差分比較	地震前後，あるいは地震後の一定期間において同一箇所の点群データを取得し，位置情報のレジストレーションにより重ね合わせたうえで，その差分を計測（あるいは目視による比較）することで，構造物に生じる変化を把握する。

このように，3 次元点群データは被災構造物の外観から得られる情報を網羅的に取得する手段として有用である。しかしながら，その把握能力は点群の点密度等，データ精度に大きく依存する。また，レーザ照射機器から直線的に視通が確保されている必要があり，欠落のないデータの取得を実現するためには複数位置からの点群データ取得が必要となる。さらに，計測にはノイズ除去や面推定などの後処理が必要であり，即時的なデータ入手は困難である。加えて，現地で取得した点群が計測箇所を適切に含んでいるかどうかを判断する方法はないため，必要な範囲のデータを確実に取得するためには，現地で取得したデータを人が逐次確認しながら主観で判断する必要がある。

以上を踏まえ，3 次元点群データを震後点検で活用する場合に想定される，検知対象となり得る損傷の例を**表-6.1.31** に示す。

表-6.1.31　検知対象となり得る損傷の例

活用方法	検知対象となり得る損傷の例
被害の概要把握	橋台背面段差，周辺構造物の被害状況、周辺地盤面の割れ　他
構造物の部材面間の相対位置の計測	各種部材の変形量及び移動量，遊間の異常　他
基準点（軸）に対する相対変位（角度）の計測	各種部材の変形角，橋台の傾斜　他
表面変状の把握	コンクリート壁面のひび割れ　他
時系列比較によるデータの差分比較	部材・部位の変形量及び変形角，異物の有無　他

6.1.5　能登半島地震調査における試行例

（1）試行内容の概要

2024 年 1 月 1 日に発生した令和 6 年能登半島地震を受け、同年 2 月 26～27 日に本共同研究において現地調査を実施した。その中で，調査対象橋梁（以下，A 橋と呼称する。）について上部構造の点群データを取得した。本試行では，事前の精度評価を行わず統計的手法により計測結果を定量的に評価した事例と、本項で検討した精度評価結果を適用して計測結果を定量的に評価した事例について示す。この点群データを用いて，変形量等の定量的な計測を実施した。なお，本試行の内容は，“(8) 計測機器の事前評価により上部構造のゆがみを調査した例”を除き，参考文献 6.1.10）にて報告しているため，詳細はそちらを参照されたい。

（2）調査対象橋梁及びその被災状況

A 橋は 1958 年に架設された橋長 46m の鋼アーチ橋 （ランガー橋）である。支承条件は A1 橋台がピンローラー支承（可動），A2 橋台がピン支承（固定）である。A 橋の地震後の状態を**写真-6.1.1**(a)～(f)に示す。地震発生後に実施した筆者らによる目視点検では A2 橋台側の支承部のセットボルトが上下流側共に破断していた。また，上部構造の下弦材端部が A2 橋台パラペットに衝突し，パラペットの割れおよび下弦材端部の変形が確認された。 A1 橋台側については橋台と背面地盤の位置関係の異常や下流側支承のみローラーカバーの外れが確認された。なお，内部のローラーの状況までは確認できていない。**写真-6.1.1**(e)～(f)に示す通りその他の上弦材や吊材，桁端部以外の下弦材等の上部構造を構成する部材には地震に起因すると推定される目視点検でわかる程度の大きな変状は確認されなかった。しかし，**写真-6.1.1**(b)～(c)から分かるように A2 橋台側では上部構造と下部構造，支承部に相対的な残留変位が生じていることが確認された。また，A1 橋台側では下流側支承のみローラーカバーが外れている状況から下流側支承部のみ過大な相対変位が生じた可能性が示唆される。これらの変状から上部構造に変形または水平方向への回転が生じている可能性が推定される。**図-6.1.30** に推定される損傷パターンを示す。以上より，下弦材桁端部を除き上部構造を構成する部材には目視では明確な変状が確認されなかったものの，上部構造に部材の変形や残留変位を伴うゆがみが生じている

可能性が想定される状態であった。そこで，目視では認識できない損傷の検知を目的として A 橋の 3 次元点群を取得し，点群から作成した 3 次元モデルを用いて部材の変形状況の調査を試みた。

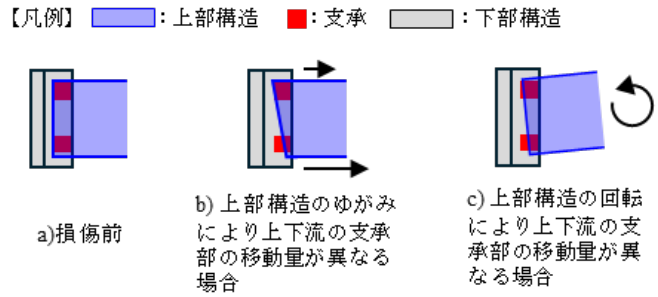
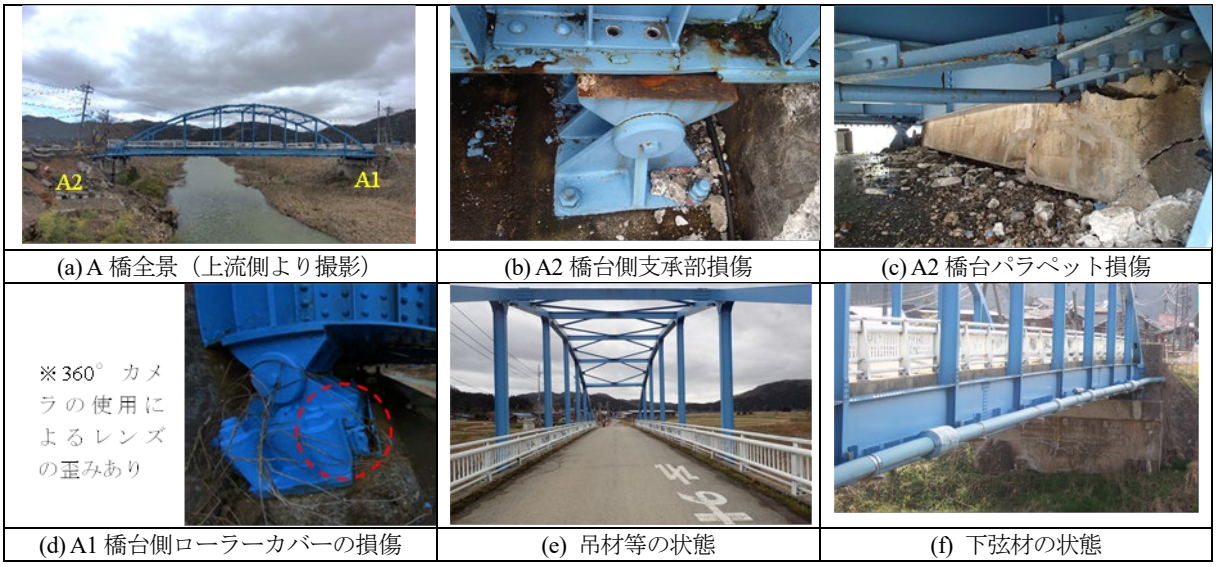


図-6.1.30　推定される損傷パターン



(a) A 橋全景（上流側より撮影）　(b) A2 橋台側支承部損傷　(c) A2 橋台パラペット損傷

(d) A1 橋台側ローラーカバーの損傷　(e) 吊材等の状態　(f) 下弦材の状態

写真-6.1.1　A 橋の地震後の状態

（3）点群取得方法

点群取得は本機器を手に持った取得者が橋面を 15 分程度往復し（以下，手持ち取得と呼ぶ。），後処理で周辺地形を除いた約 6000 万点のデータを取得した。ただし，橋面から取得できない下弦材については，林ら[6.1.11]が橋面から橋脚上の支承部の点群を取得した方法を参考に先端に本機器を取り付けたロープを角材に固定し吊り下げて取得する方法（**写真-6.1.2.** 以下，吊り下げ取得と呼ぶ。）を用いた。吊り下げ取得は軸方向の部材長が約 46m の下弦材に対して実施し，下弦材側面に添架管がある場合はデータの欠損を避けるために吊り下げたスキャナを上下方向に移動させながら点群を取得した。吊り下げ取得は上下流側の下弦材に対し各 13 分程度実施し，後処理で他部材や地形を除いた約 200 万点のデータを取得した。

また，本機器で取得した点群は絶対座標を持たないため，吊り下げ取得で得られた下弦材の点群データと手持ち取得で得られた他の上部構造の点群データに対し，ICP を用いて両点群の座標の位置合

わせを実施した。統合した点群データを**図-6.1.31** に示す。



写真-6.1.2　吊り下げ取得実施状況



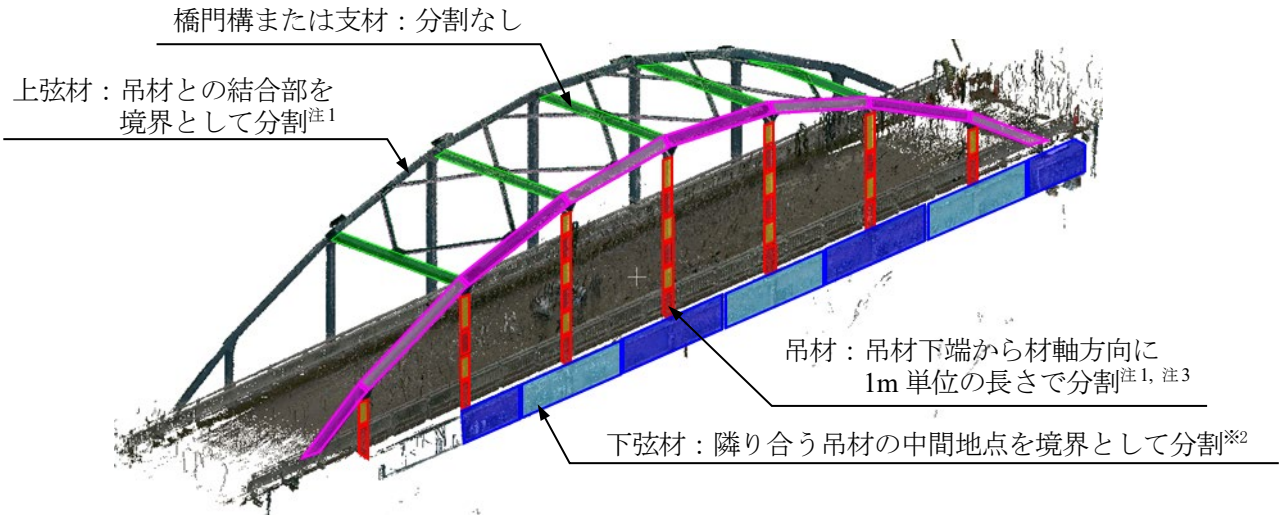
図-6.1.31　取得した点群データ

(4) 計測用モデル作成方針

震後点検では部材に生じた変形を検知する必要があるため変形した形状が平均化されないよう適切に領域を分割する必要がある。そこで，本研究では部材（上弦材，下弦材，吊材，橋門構，支材）単位に点群を分割した上でさらに,単一部材内での変形を検出するために一定の区間単位に分割した。それにより曲がった形状の部材が表現できると考えた。各部材の点群の分割イメージを**図-6.1.32** に示す。

上弦材は吊材との結合部で部材の XZ 平面内の角度が変化するため吊材との結合部を境界とした区間に分割した。下流側下弦材は吊材の中間地点に変形が生じる場合を想定し隣り合う吊材の中間地点を境界とした区間に分割した。吊材は各部材が座屈した場合の変形傾向を二次モードまで把握できる分割数とし正確な面推定が可能な分割サイズも踏まえ部材軸方向に 1m 単位で分割した。また，面推定の際のノイズとなる可能性を考慮し,吊材と上弦材を接合するガセットは解析データから除外した。これらのルールに従い分割した点群データに対してそれぞれ解析処理を行い，変形量等の計測を実施

した。



注 1　左図では下流側部材に代表させて分割位置を表現しているが，上流側についても同様の方針でデータを分割して解析している

注 2　　上流側のデータは欠損

注 3　ガセットは面推定のノイズとなるため解析対象から除外

図-6.1.32　各部材の点群分割イメージ（下流側部材を代表として示している）

また，RANSAC 法を使用した場合，推定された面は例えば四角形の面のみ推定され角の 4 点が一致しない等，平面内の形状までは正確に生成されない場合も多く確認された。このような場合は筆者らが手動で修正した。例えば吊材のウェブおよびフランジを推定した場合，**図-6.1.33** に示すようにフランジの外側に突出して生成されたウェブの推定面はフランジとウェブの推定面の交線を境界として形状を修正した。

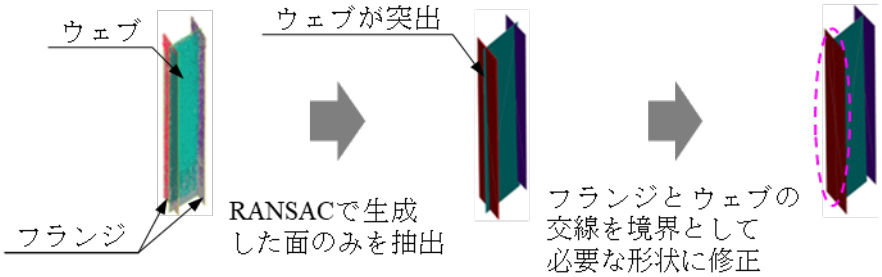


図-6.1.33　推定した面からの形状推定例

(5) 座標軸のキャリブレーション

取得した点群は相対的な座標を持ち，初期の座標軸の方向は機器内部で自動的に設定される。変形

量の計測のためには，座標軸をキャリブレーションし基準となる軸を設定することが望ましい。本検討では，計測の簡便さを考慮してZ軸（鉛直方向）は変形が生じていない場合の吊材の軸方向に，X軸およびY軸（平面方向）はそれぞれ橋軸方向および橋軸直角方向に一致するようキャリブレーションを試みた。詳細なキャリブレーション方法については参考文献6.1.10）を参照されたい。

（6）点群データのレジストレーション

計測に用いる点群は，手持ち取得及び吊り下げ取得の2種類の方法で取得したため，ICP法を用いてデータのレジストレーションを実施した。具体的には，それぞれの方法で取得した点群データに対して手動で初期位置合わせを行い，**表-6.1.32**に示す条件を適用してICPを実行した。

表-6.1.32　ICP実行条件

Number of iterations	20
RMS difference	1.0E-05
Final overlap	100%

（7）統計的手法により上部構造のゆがみを調査した例

1）面推定の解析方針

分割した点群から部材面を推定する手法は，RANSAC法を採用した。解析条件としては，偏差を一律0.05mに統一し，偏差内の点の最小個数は各データに対して手動で設定し，1000点単位で調整した。ただし，偏差内の点の最小個数を1000点としても面が生成されない場合は，100点単位で設定値を再調整した。また，形状がH型鋼である吊材や支材，下弦材については，ウェブ及びフランジに対して同時にRANSAC法を実行した。ただし，ウェブやフランジを構成する点群の個数に著しい差が見られ，適切な条件下で面が生成されないと判断された場合には，個別に条件を変更して面を生成した。なお，RANSAC法による面推定は部材面ごとに1回実行した結果を採用している。

2）計測結果

点群データから推定した部材面を基に生じている変形を計測した。対象部材は上弦材，下弦材（下流側のみ）吊材，橋門構，支材，路面である。これらの部材の推定面の橋軸方向および橋軸直角方向への傾きによる変位を計測した。**図-6.1.34**に後述する各計測結果の確認位置を示す。

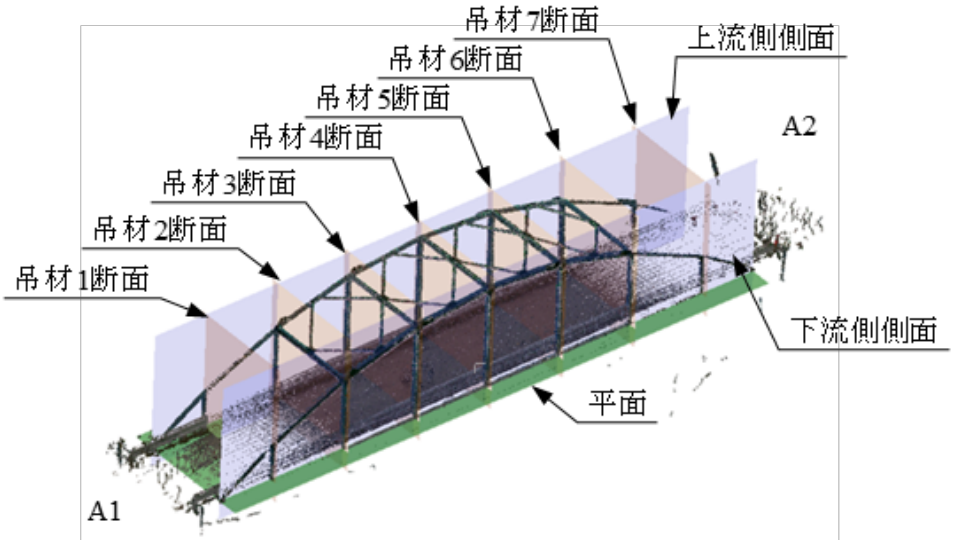


図-6.1.34　計測結果の確認位置

図-6.1.35 (a)～(g)の図は路面と吊材と橋門構または支材を辺とする断面である。(a) 吊材 1 および(g) 吊材 7 の断面では吊材上端で上下流の上弦材を接続する部材が無く，(b) 吊材 2 および(f) 吊材 6 の断面では橋門構，その他の断面では支材で接続されている。図中の黒線は各部材の基準軸を示し，赤色のグラフは外側フランジ，青色のグラフは内側フランジを示す。各点の数値は推定された面毎の推定面の上辺中点と下辺中点の Y 座標（橋軸直角方向）の差分を計測し，吊材下端を基準とした橋軸直角方向への累積変位で表している。変位量は上流側（図中左側）を＋方向とした。各点の高さは吊材下端を基準に分割区間（約 1m）の間隔でプロットしており上端の区間のみ吊材高さの端数を考慮した 1m 以上 2m 以下の間隔となっている。路面および橋門構または支材は下流側（図の右側）を基準とした高さ方向の変位を示しており，路面の変位は上下流の吊材下端のウェブ中点を結んだ線上における路面を推定した面の上下流の Z 座標（鉛直方向）の差分を計測し，橋門構または支材の変位は部材下面または下フランジの推定面における上下流の辺の中点での Z 座標（鉛直方向）の差分を計測している。図の視認性を考慮して各変位量は倍率を 100 倍にして表示している。

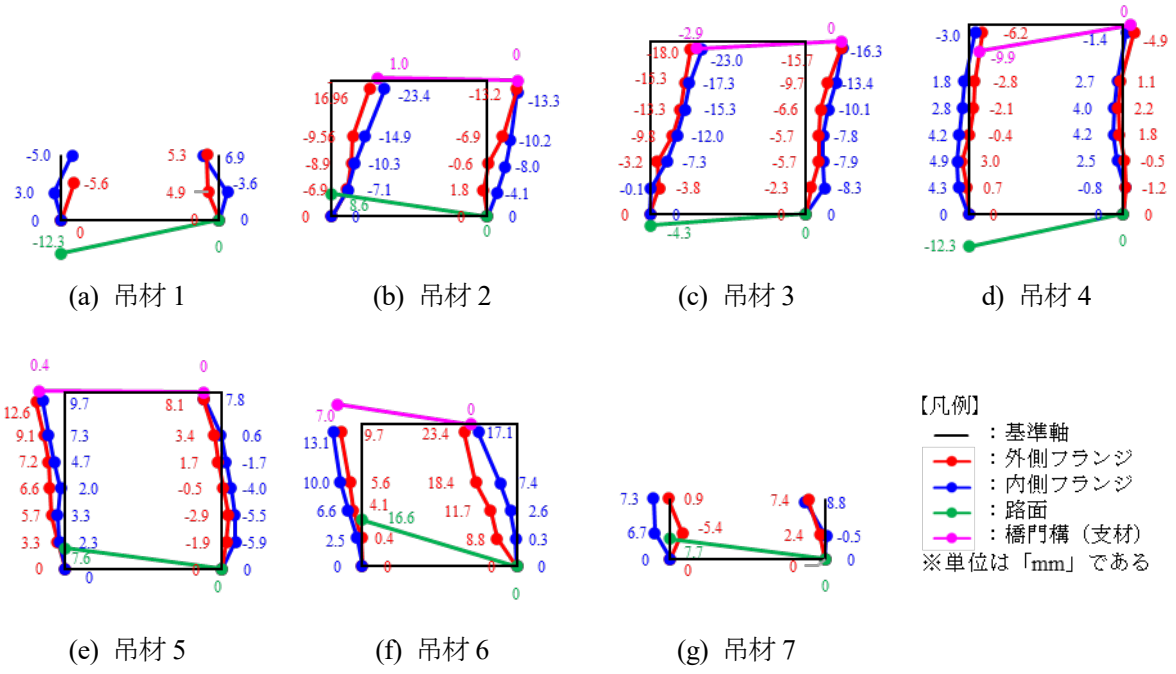
図-6.1.35 の A1 側（ (a) 吊材 1）から各断面を順に確認すると(b) 吊材 2～(d) 吊材 4 の断面は下流側（図の右側）に吊材が変位している傾向があり，(e) 吊材 5～(f) 吊材 6 の断面では逆に上流側（図の左側）に変位している。(a) 吊材 1 および(g) 吊材 7 の断面以外では，同一断面内の上下流/内外フランジでは同様の変位傾向が確認できる。(a)吊材 1 および(g) 吊材 7 の断面は吊材高が約 2m 程度と低く分割数が少ないため傾向が表れにくい結果となった。また，桁端部付近は取得した点群の点密度が低く，面推定の精度が低いことも要因として考えられる。

吊材フランジの変位傾向は**図-6.1.36** に示す平面図の上弦材内側面の橋軸直角方向への変位傾向とも一致している。

図-6.1.35 において，上下流への傾きの最大変位はそれぞれ上流側に 23.4mm（ (f) 吊材 6，下流側

外側フランジ）および下流側に-23.4mm（(b) 吊材 2，上流側内側フランジ）であった。

なお，外側フランジと内側フランジで変位量に差があるが，点群が有するばらつきの影響であるか変位の計測プロセスにおける誤差の影響であるかは特定していない。推定された面に垂直な方向に対する点群のおおよその標準偏差は 3～8 mm 程度あった。統計的に有意に変形しているか否かは 3）統計的手法によるばらつきの定量的評価，にて後述する。



(a) 吊材 1　(b) 吊材 2　(c) 吊材 3　d) 吊材 4

(e) 吊材 5　(f) 吊材 6　(g) 吊材 7

図-6.1.35　路面と吊材と橋門構または支材を辺とする断面

図-6.1.36 の平面図には上下流の吊材 1 を基準とした上下流の上弦材内側面の橋軸直角方向への累積変位および吊材下端の橋軸直角方向の累積変位を示している。上弦材内側面は各推定面の下辺の起終点端部における Y 座標（橋軸直角方向）の差分を計測し，吊材下端はウェブ下辺の中点における Y 座標（橋軸直角方向）の差分を計測している。いずれも上流側（図中上側）への変位量を＋方向としており，図の視認性を考慮して各変位量は倍率を 100 倍にして表示している。変位量は吊材位置においてプロットし，吊材の無い桁端部は上弦材のみプロットしている。また，方向が異なることに注意する必要があるが，併せて下流側を基準とした橋門構または支材の橋軸方向への変位（A2 側が＋方向）を示している。橋門構または支材の変位は部材下面の推定面または下フランジの推定面における上下流の辺の中点での X 座標（橋軸方向）の差分を計測している。上弦材は A1 側で下流側に変位した後 A2 側で上流側に変位しており，上下流で同様の変位傾向が確認できる。

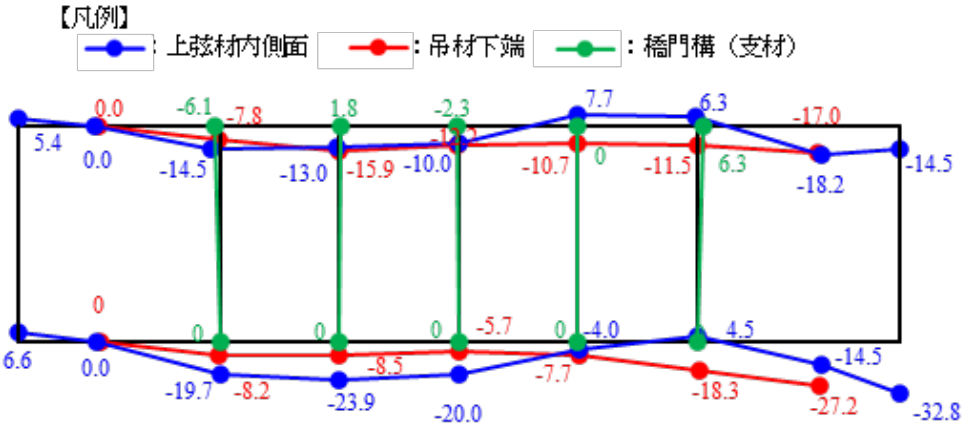
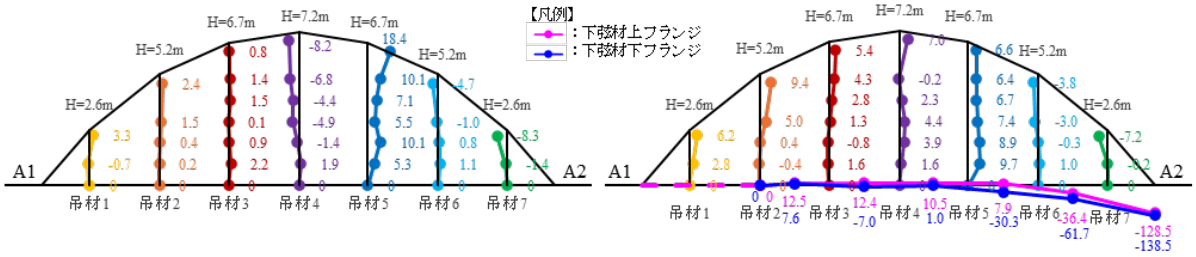


図-6.1.36　平面図

図-6.1.37 (a), (b)に示す側面図は各吊材の分割区間毎のウェブの橋軸方向への累積変位を示している。各点の数値は分割データ毎に推定面の上辺中点と下辺中点の X 座標（橋軸方向）の差分を計測し累積変位で表しており，A2 側を変位量の＋方向としている。累積変位を示す各点の高さは吊材下端を基準に吊材分割区間（約 1m）の間隔でプロットしており，上端の区間のみ吊材高さの端数を考慮した 1m 以上 2m 以下の間隔となっている。また，下流側のみ下弦材の上フランジ（ピンク色）および下フランジ（青色）の吊材 2 位置を基準とした鉛直方向への累積変位を示しており，各点の数値は分割データ毎の上下流端のウェブとの交点における Z 座標（鉛直方向）の差分を計測している。下弦材の上下フランジは，隣り合う吊材との結合部の中間地点を境界として分割しているため吊材下端とはプロット位置が異なる。下流側下弦材の吊材 2 より A1 側は点群データが欠損したため図中に示していない。また，図の視認性を考慮して各変位量は倍率を 50 倍にして表示している。吊材ウェブの変位は吊材 4～5 を除き，上下流で同様の傾向を示している。一方で吊材 4～5 では上流側で大きく変位が生じ，かつ，上下流で変位傾向が異なる。同図における下流側下弦材の鉛直方向への変位傾向を見ると，吊材 5 付近から変化量が増加しており当該位置付近で変形が生じている可能性が示唆される。



(a) 上流側　　(b) 下流側

図-6.1.37　側面図

図-6.1.38 (a), (b)には上下流の吊材ウェブの XY 平面内の回転変位を，図-6.1.39 には図-6.1.38 のプロットの概要図を示している。縦軸がウェブの回転角度，横軸が分割した吊材の各区間を示している。吊材に回転方向の異常が生じていない場合吊材ウェブの面内方向は橋軸直角方向と等しいため，橋軸直角方向を 0° の基準とし，基準からの回転量を示している。値は右回りを正として計測している。各吊材の回転変位からは傾向が確認できないが，上下流共に吊材 5 が最も回転量の変化が大きく 2° 以上の回転変位が確認される。吊材 5 は図-9 の側面図に示すウェブの橋軸方向の変位についても他の吊材と比較して大きな変位が生じており，かつ，下弦材の鉛直方向の変化量が増加する位置でもあるため，ウェブの回転変位からも吊材 5 付近での上部構造のゆがみが示唆される結果となった。

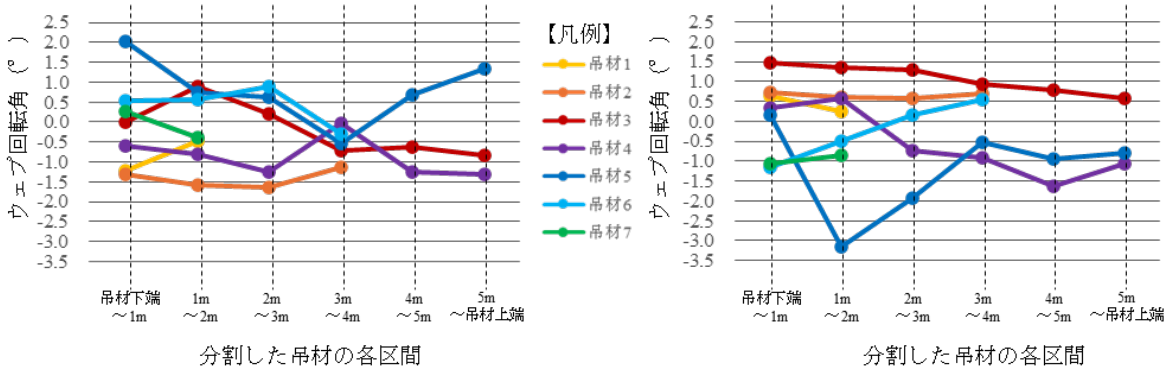


図-6.1.38　吊材ウェブの回転角

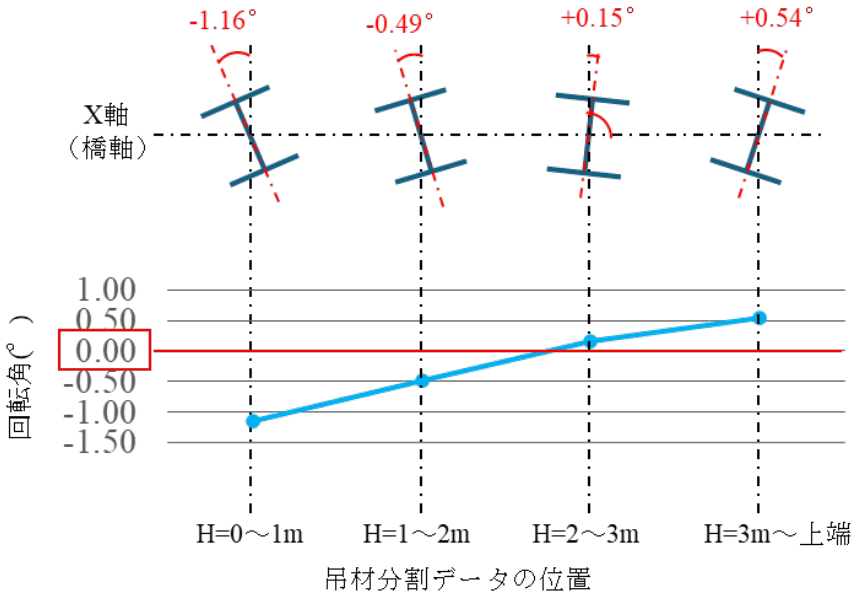


図-6.1.39　回転角のプロットの概要図

以上より，変位の計測結果からは吊材を始めとした上部構造を構成する部材に変形が生じ，構造全

体にゆがみが生じている可能性が示唆された。一方で，点群データはばらつきを，推定した部材の各面の値は誤差を有しており，本結果のみでは上部構造にゆがみが生じていると判断はできない。ゆがみが生じていると判断するためには，これらのばらつきや誤差を評価した上で変位や回転が生じていることを示す必要がある。

3）統計的手法によるばらつきの定量的評価

点群を分割した各区間において，RANSAC 法で推定した面に対する点群のばらつきは上下流の吊材 1 および吊材 7 の内外フランジを除いて正規分布しているとみなせる分布形状であった。そこで点群全体を母集団，面推定に用いた分割区間の点群を標本とし，t 分布を用いた統計的仮説検定によって変位傾向の有意差の有無を判断できると考えた。具体的には RANSAC 法に用いた点群内の点の個数および各点から推定面への垂直距離の標準偏差を用いて検定を実施し，有意な差が生じているとみなせる閾値を算出し，計測した変位量と比較した。

表-6.1.33 に代表部材断面における水平・鉛直方向の変位の有意差検定結果を示す。表中には統計的に有意差があるとみなせる変位量の閾値の部材単位の最大値および最小値とそれらが算出された分割区間の諸元を示す。傾向として，標本数すなわち点の個数が多い支間中央付近の部材にて有意差があるとみなせる変位量の閾値が小さくなり，点の個数が少ない桁端部付近の部材にて有意差があるとみなせる変位量の閾値が大きくなることは自明であるが，点群は N 数が非常に多い。特に下弦材は桁端部から端部吊材までの距離が長いため吊材 7 位置のデータの標本数が最も多い。また，下弦材の吊材 2 位置のデータは一部欠損したため，最も少ない標本数となった。いずれのデータも十分な標本数を有しており，有意差があるとみなせる変位量の閾値は全て 1mm 未満となり変位量が 0mm の箇所を除き，計測した全ての変位に対して 99.9%信頼区間で統計的に有意であることが確認された。

表-6.1.33　代表部材断面における t 検定結果（水平・鉛直変位）

部材名		変位方向	有意水準	有意水準の境界となる値 (mm)		標準偏差 (mm)	標本数 (個)
吊材	フランジ	橋軸直角方向（y）	0.1%	最大	0.345	3.595	1,180
		橋軸直角方向（y）	0.1%	最小	0.026	3.136	157,229
	ウェブ	橋軸方向（x）	0.1%	最小	0.176	3.492	4,271
		橋軸方向（x）	0.1%	最大	0.023	4.020	331,117
上弦材	内側面	橋軸直角方向（y）	0.1%	最大	0.252	3.852	2,536
		橋軸直角方向（y）	0.1%	最小	0.026	3.230	172,876
吊材	フランジ	橋軸直角方向（y）	0.1%	最大	0.425	3.443	718
		橋軸直角方向（y）	0.1%	最小	0.026	2.533	103,613
	ウェブ	橋軸方向（x）	0.1%	最大	0.197	3.723	3,884
		橋軸方向（x）	0.1%	最小	0.023	3.966	319,744
上弦材	内側面	橋軸直角方向（y）	0.1%	最大	0.248	3.820	2,565
		橋軸直角方向（y）	0.1%	最小	0.025	3.322	190,497
下弦材	上フランジ	鉛直方向（z）	0.1%	最大	0.319	7.815	6,498
		鉛直方向（z）	0.1%	最小	0.207	8.080	16,464
	下フランジ	鉛直方向（z）	0.1%	最大	0.542	8.274	2,526
		鉛直方向（z）	0.1%	最小	0.256	8.547	12,041
	ウェブ	橋軸直角方向（y）	0.1%	最小	0.224	7.359	11,642
		橋軸直角方向（y）	0.1%	最大	0.102	7.580	59,407
橋門構	内側面	橋軸方向（x）	0.1%	最大	0.032	3.304	112,619
		橋軸方向（x）	0.1%	最小	0.028	3.210	140,777
	下面	鉛直方向（z）	0.1%	最大	0.029	3.191	129,169
		鉛直方向（z）	0.1%	最小	0.028	3.488	165,749
支材	ウェブ	橋軸方向（x）	0.1%	最大	0.029	3.090	121,315
		橋軸方向（x）	0.1%	最小	0.025	3.360	201,362
	下フランジ	鉛直方向（z）	0.1%	最大	0.017	2.778	274,975
		鉛直方向（z）	0.1%	最小	0.015	2.686	344,549

この結果は 3～8 mm 程度の標準偏差があり，**図-6.1.35～図-6.1.37** の値そのものは，例えば外側フランジと内側フランジの値に差がある通り，誤差を有していると推測されるデータであるが，基準から変位差が生じている点に関しては統計的有意性が確認されたと言うことである。正確な変位差の推定には至っていないが，変位は統計的有意に生じている。

表-6.1.34 に代表部材断面における回転変位の有意差の確認結果を示す。表中には統計的に有意差があるとみなせる変位量の閾値の部材単位の最大値および最小値とそれらが算出された分割区間の諸元を示す。

部材の回転変位$\Delta\theta$は各データから推定したウェブの回転平面方向の長さLと推定面に垂直な方向への変位量δ_xから式（6.1.2）を用いて表すことができる。

$$\tan\Delta\theta = \frac{\delta_x}{L} \qquad (6.1.2)$$

ここで，δ_xはLに対して十分小さいため，$\Delta\theta$はδ_x/Lと近似できる。また，吊材ウェブの幅は一定であるという前提から，$1/L$は定数とみなせるため，回転変位$\Delta\theta$のばらつきの分布の形はウェブの推定面に垂直な方向への変位量δ_xのばらつきの分布の形と等しいとみなせる。従って，変位量δ_xのばらつきの分布の形が正規分布に従う点群から推定された面であれば，t 分布を用いた統計的仮説検定によって回転変位量に対する有意差の有無を判断できる。

水平・鉛直変位と同様にいずれのデータも十分な標本数を有しているため有意差があるとみなせる回転変位量の閾値は全て 0.1° 未満となり，計測した全ての変位に対して 99.9%信頼区間で統計的に有意であることが確認された。これも変位と同様に正確な回転変位差の推定には至っていないが，回転変位は統計的有意に生じていることを意味する。

表-6.1.34 代表部材断面における t 検定結果（回転変位）

部材名		変位方向	有意水準	有意水準の境界となる値（°）		標準偏差 (mm) 注1	標準偏差 (°) 注2	標本数 (個)
吊材	ウェブ	回転方向(θ)	0.1%	最大	0.028	3.492	0.648	4,271
		回転方向(θ)	0.1%	最小	0.004	3.587	0.665	266,683
吊材	ウェブ	回転方向(θ)	0.1%	最大	0.030	3.723	0.690	3,884
		回転方向(θ)	0.1%	最小	0.003	3.966	0.735	319,744

注 1　ウェブの推定面に垂直な方向に対する標準偏差

注 2　現地計測によりウェブ幅を 309mm と仮定し算出

（8）計測機器の事前評価により上部構造のゆがみを調査した例

1）解析方針

分割した点群から部材面を推定する手法として，RANSAC 法を採用した。解析条件は，主成分分析によって得られた平面の法線方向の標準偏差を各成分方向に分解し，1mm 単位で切り上げた値を用いた。偏差内の点の最小個数は，元の点群の個数の 0.8 倍（1000 点単位で四捨五入）を基準とし，RANSAC 法による推定面が 5 回連続で生成されない場合は偏差内の点の最小個数を 1000 点単位で減じて再試行し，面が生成されるまで上記の処理を繰り返した。ただし，偏差内の点の最小個数を 1000 点としても面が生成されない場合は，100 点単位で設定値を再調整した。なお，RANSAC 法による面推定は部材面ごとに 1 回実行した結果を採用した。

2）計測結果

計測位置及び確認断面は(6)に示す検討と同様の位置に設定した。ただし，(6)の検討結果を踏まえ，実際に変形が生じている可能性が最も示唆された吊材（内外フランジ及びウェブ）を計測対象とする。また，RANSAC 法による計測結果に精度評価を適用する条件として，各点群データの主成分分析によって得られた平面の法線方向の標準偏差の計測方向成分が 8mm 以下である必要がある。本節の検討ではこの条件を考慮し，該当しないデータは計測対象から除外した。

図-6.1.40 (a)～(e)及び**図-6.1.41** (a)～(e)の図は，橋軸方向に対して同一の位置座標位置にある上下流の吊材を左右の辺に持つ断面（以下，吊材断面と呼称。）である。各図において左側が＋方向（上流側）である。**図-6.1.40** は分割した各推定面の基準点に対する橋軸直角方向（Y 軸）への変位量（mm）を，**図-6.1.41** は分割した各推定面の基準軸に対する角度（°）を示す。なお，変位量の基準は内外フランジの下端を 0 とした相対変位とし，各分割データの上端の値を示している。また，図の視認性を考慮し，各変位量は倍率を 100 倍にして表示した。

前述した計測方向の標準偏差の適用条件に基づき，吊材 1 及び吊材 7 の分割データはほぼ全て除外されたため，**図-6.1.40** 及び**図-6.1.41** には示していない。また，吊材 2 の上流側内フランジ下端のデータ，吊材 6 の上流側外フランジの下端のデータが適用条件外であったが，参考値として計測結果を示している。これらの図より，起点側の断面では下流側（図中右側）に吊材が傾斜し，終点側の断面になるにつれて上流側（図中左側）に傾斜が変化する傾向が確認される。さらに，**図-6.1.42** に吊材 1 断面及び吊材 7 断面における部材面の推定結果を示す。図中に示す値のうち，下線を引いている値は分割データ上端の吊材下端を基準点とした橋軸直角方向（Y 軸）への相対変位を表し，下線のない値は各部材面の傾斜角を示している。図より，各分割データの連続性が確保されていない箇所が明確に確認されることから，本適用条件の設定方針は本節の検討においておおむね妥当であると判断できる。

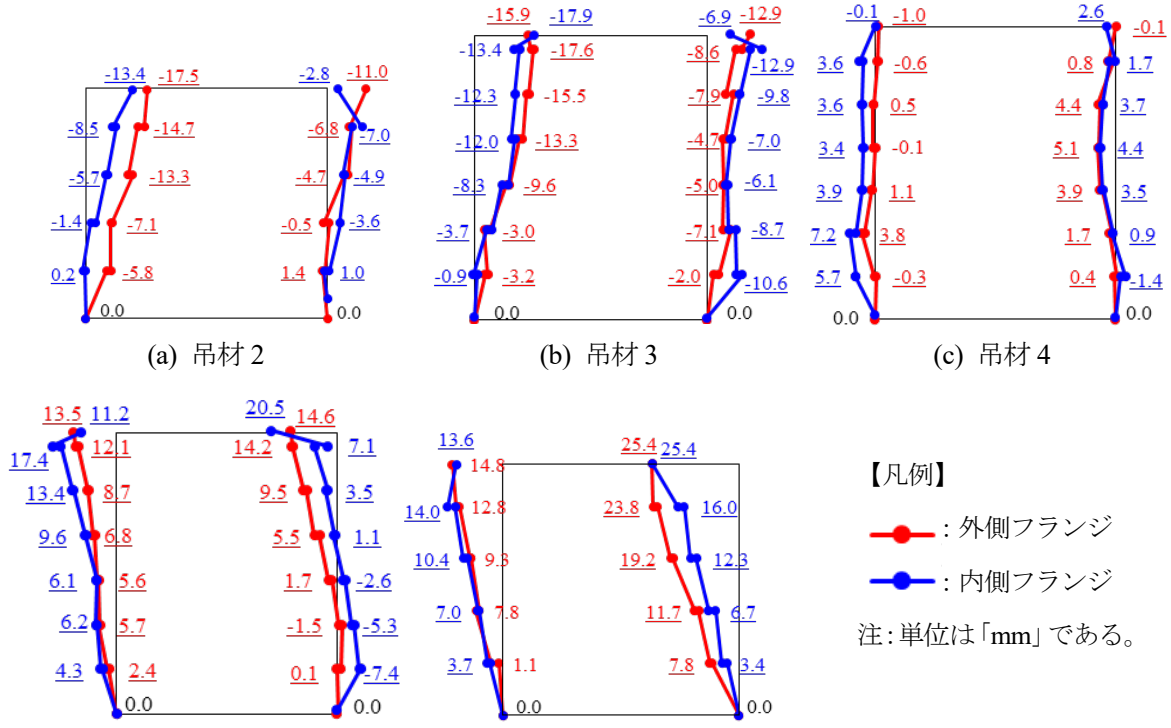
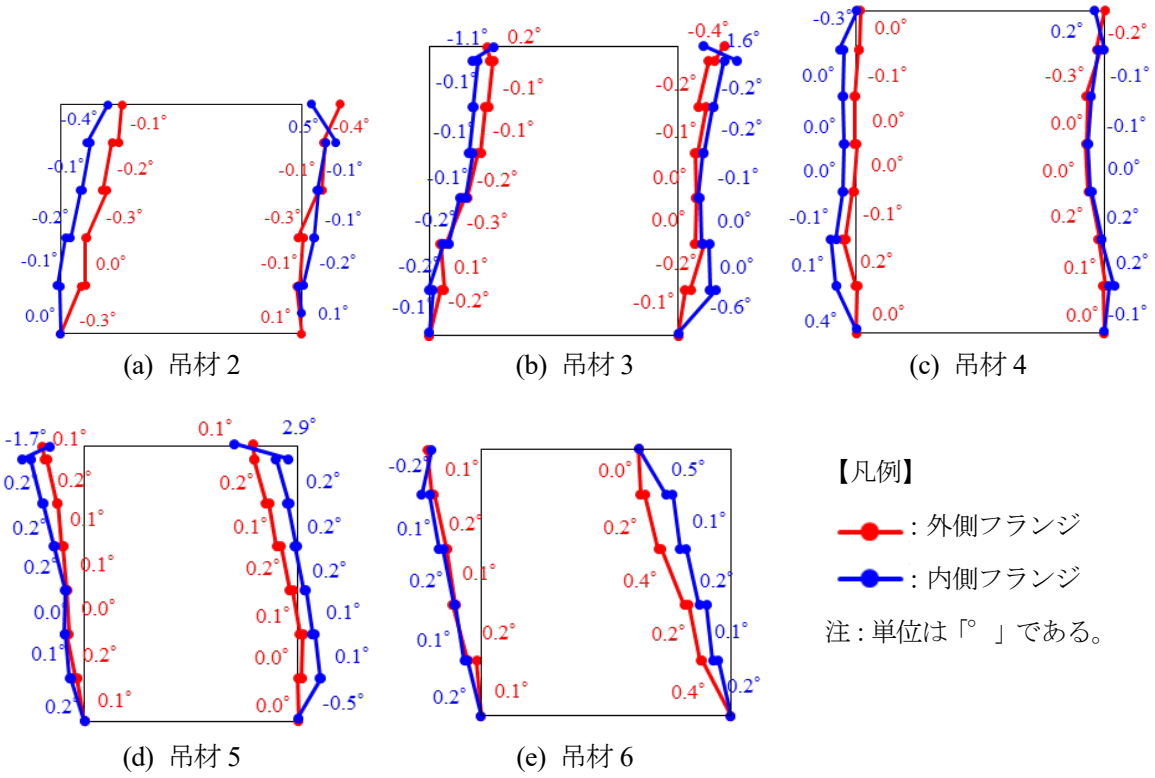


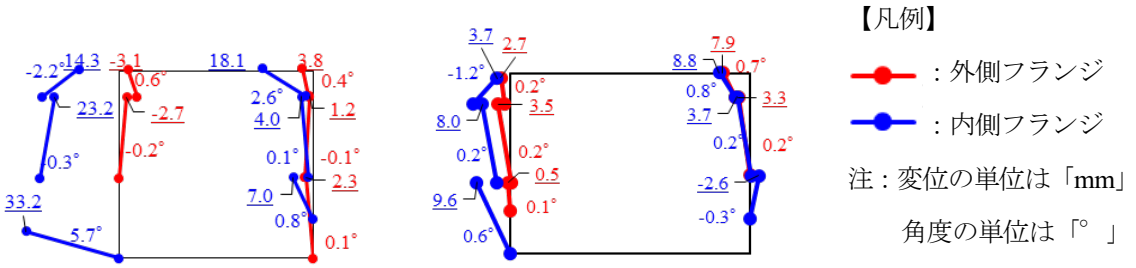
図-6.1.40　吊材断面における分割データの変位量



(a) 吊材 2　(b) 吊材 3　(c) 吊材 4

(d) 吊材 5　(e) 吊材 6

図-6.1.41　吊材断面における分割データの傾斜角



(a) 吊材 1　(b) 吊材 7

図-6.1.42　吊材 1 断面及び吊材 7 断面における分割データの計測結果

単一の部材面の変位量に対する事前の精度評価における補正量は±3.2mm である。**図-6.1.40** に示す結果より，吊材 4 断面を除く各吊材断面において，下端と上端の変位量の差が補正量±3.2mm を超過していることが確認された。これにより，吊材 2 及び吊材 3 断面では下流側への傾斜，吊材 5 及び吊材 6 断面では上流側への傾斜が生じていると判断できる。また，各吊材の上端及び下端の変位量の差から算出される吊材全体の変位量の変動範囲を**表-6.1.35** に示す。ただし，変位量の最大値及び最小値は，基準点に対する距離の絶対値が最大及び最小となる値を示している。表より，吊材 4 を除いた各吊材には少なくとも変位が生じており，その値は最大で 29mm 程度（吊材 6）であることが確認できる。

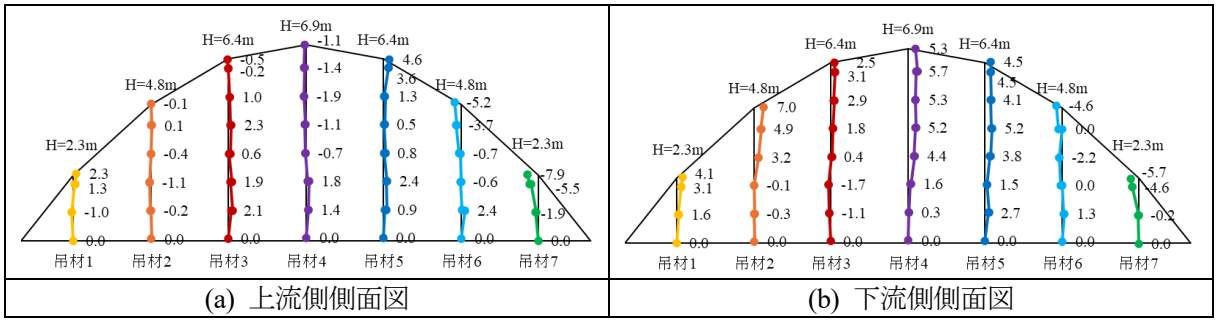
表-6.1.35　吊材全体の変位量の変動範囲

吊材位置			変位量（mm）		
			計測値	最大	最小
吊材 2	上流側	外フランジ	-17.5	-20.7	-14.3
		内フランジ	-13.4	-16.6	-10.2
	下流側	外フランジ	-11.0	-14.2	-7.8
		内フランジ	-2.8	-6.0	0.0
吊材 3	上流側	外フランジ	-15.9	-19.1	-12.7
		内フランジ	-17.9	-21.1	-14.7
	下流側	外フランジ	-12.9	-16.1	-9.7
		内フランジ	-6.9	-10.1	-3.7
吊材 4	上流側	外フランジ	-1.0	-4.2	0.0
		内フランジ	-0.1	-3.3	0.0
	下流側	外フランジ	-0.1	-3.3	0.0
		内フランジ	2.6	5.8	0.0
吊材 5	上流側	外フランジ	13.5	16.7	10.3
		内フランジ	11.2	14.4	8.0
	下流側	外フランジ	14.6	17.8	11.4
		内フランジ	20.5	23.7	17.3
吊材 6	上流側	外フランジ	14.8	18.0	11.6
		内フランジ	13.6	16.8	10.4
	下流側	外フランジ	25.4	28.6	22.2
		内フランジ	25.4	28.6	22.2

次に、**図-6.1.41** に示す吊材フランジの角度について評価を行う。事前評価の結果，推定された部材面が取り得る角度の範囲は±1.5°である。各吊材断面における隣接する分割データ間の相対的な角度変化は，おおむねこの範囲内に収まっている。一方，吊材 3 断面の下流側内フランジ上端の推定面及び吊材 5 断面の上下流内フランジ上端の推定面については，隣接する推定面に対して 1.5°以上の角度変化が生じており，部材面の変形が発生していると判断される。ただし，各吊材の上下端の推定面は，他の推定面と比較して角度や変位量の変化が顕著に大きい。この要因として，推定した部材面を構成する点群に，吊材と接続する他の部材の点群が混在している可能性が考えられる。なお，これらの結果が吊材端部の変形によるものなのか，あるいは他の部材面を構成する点群の影響によるものなのかを定量的に判断する方法については，今後の課題とする。

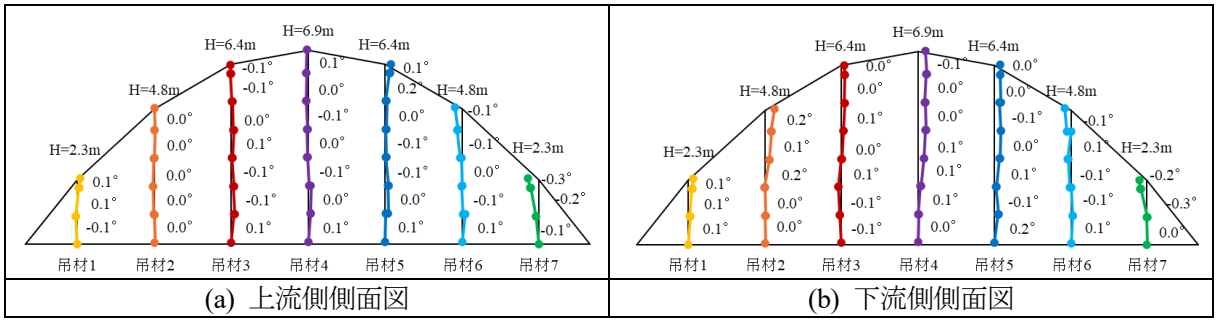
図-6.1.43(a)～(b)及び**図-6.1.44**(a)～(b)に示す側面図は，各吊材の分割区間ごとのウェブの橋軸方向（X 軸）に対する累積変位及び角度をそれぞれ示している。変位量については，各吊材の下端を基準点とした相対変位とし，各分割データの上端の値を A2 側を正の変位方向として示している。累積変位を示す各点の高さは吊材下端を基準に吊材分割区間（約 1m）の間隔でプロットしている。また，図の視認性を考慮して各図の高さ方向の比を実寸法の 2 倍程度に，各変位量は倍率を 50 倍に拡大して表示している。

上流側の吊材 5 の下端から 2 つ目のデータを除き，事前の精度評価を適用するための適用条件は満足していた。事前の精度評価に基づくと，変位量の分布範囲は±3.2mm，角度の分布範囲は±1.5°である。**図-6.1.43** 及び**図-6.1.44** に示す結果では，上下流の全吊材において変位量及び角度ともにこの分布範囲内に収まっていることが確認できるため，各分割データの連続性は保持されていると判断することができる。また，部材面の推定結果の誤差を考慮した変位量の最大値は，上流側吊材では-11.1mm（吊材 7），下流側では 10.2mm（吊材 2）となった。



(a) 上流側側面図　　(b) 下流側側面図

図-6.1.43　橋軸方向への吊材ウェブの変位量（mm）



(a) 上流側側面図　　(b) 下流側側面図

図-6.1.44　橋軸方向への吊材ウェブの角度（°）

以上より，A 橋の吊材については橋軸直角方向に最大 29mm 程度，橋軸方向に 12mm 程度の変位が生じていることが明らかとなった。本節の検討では，事前に機器の精度評価を実施することにより，実際の計測結果に基づき，部材に生じている変位量及び傾斜の範囲を定量的に示した。さらに，部材に影響を及ぼす変位量の指標を用いて本計測結果を評価することで，本橋に生じている損傷が橋の状態に与える影響を定量的に評価することが可能となる。

参考文献

6.1.1) 国土交通省:地上移動体搭載型レーザスキャナを用いた出来形管理の監督・検査要領(土工編)(案), 2023.

6.1.2) 吉田守, 吉田光伸 : モービルマッピングシステム(MMS)の最新動向, 三菱電機技報, 88(2), pp.144-147, 2014.

6.1.3) 国土交通省 歩行空間の 3 次元地図ワーキンググループ : 3 次元点群データ活用要件, 令和 5 年度第 2 回会議, 資料 5, 取得・統合方法, 2024.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000052.html（最終閲覧日 : 2024 年 10 月 2 日)

6.1.4) 山場淳史, 渡辺豊, 二谷卓, 佐野俊和 : 3 次元レーザスキャナを搭載したドローンを用いたレーザ計測による森林地形と樹高の抽出及び TLS との比較, 森林利用学会誌, 33 巻 3 号, pp.169-174, 2018.

6.1.5) 櫻井淳, 田中成典, 中村健二, 今井龍一, 窪田諭, 重高浩一 : レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発, 土木学会論文集 F3（土木情報学）, 72 巻 2 号, pp. I_209-I_218, 2016.

6.1.6) 新発田知哉 : 3.地上型レーザスキャナの特性, 写真測量とリモートセンシング, 52 巻 6 号, pp.285-288, 2013.

6.1.7) LEICA BLK2GO : 移動体ハンディレーザスキャナ データシート.
https://shop.leica-geosystems.com/（最終閲覧日 : 2024 年 10 月 2 日)

6.1.8) 日高菜緒 : 点群データ処理アルゴリズムの総括及び土木分野での活用事例と展望, AI・データサイエンス論文集, 4 巻 3 号, 2023.

6.1.9) 横森壮喜, 伊達宏昭, 金井理, 森部義規 : TLS 点群に対する誤差楕円体推定と複数点群位置合わせ処理への応用, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.138-139, 2022.

6.1.10) 吉谷薫, 小林巧, 大住道生 : 震後点検における点群計測による鋼アーチ橋のゆがみ調査, AI・データサイエンス論文集, 5 巻 3 号, 2024.

6.1.11) 林祐葵, 小林巧, 大住道生 : 道路橋の震後調査の効率化・高度化に向けた 3 次元レーザスキャナの試行検討, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.2, No.1, pp.169-178, 2023.

6. 2　TLS（地上型）レーザスキャナによる点群取得技術

6.2.1　技術の概要及び計測の仕組み

（1）技術の概要

1）レーザスキャナ

レーザスキャナとは，非接触型の 3D スキャナに分類される対象物の 3 次元座標を取得する計測機器である。対象物にレーザ光を照射し，反射光の特性を利用して対象物との距離を 3 次元座標として取得する。取得した 3 次元座標は 3 次元点群データとして扱われる。なお，本項では点群データや処理プロセスを経たデータを用いて形状寸法を測る行為を“計測”と呼称し，対象の点群データを得る行為を“取得”と呼称する。

設計図面等の情報や，地震が起きる前の点群データがあれば，取得した点群データと比較を行い大きな変形が起きていないか点検することができる。事前情報がない場合でも，橋脚や橋台の鉛直に対する角度が異常となっていないかの点検を行うことができる。

2）レーザスキャナを搭載する機器に着目した分類例

レーザスキャナを搭載する機器は**表-6.2.1** の通り分類できる。このうち，本項の検討で使用した機器は地上型のレーザスキャナに分類される。

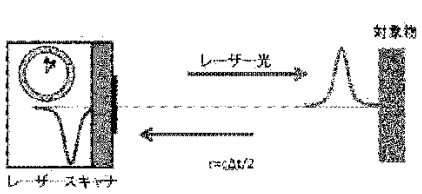
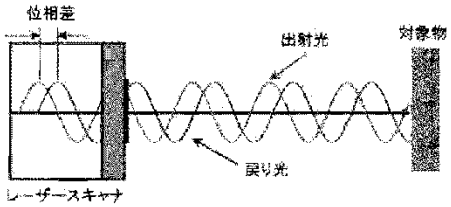
表-6.2.1　レーザスキャナを搭載する機器に着目した分類例 6.2.1)~6.2.10)を基に作成

地上型（TLS）	地上移動体搭載型（MMS）	ハンディ型
		
三脚等に機器を固定し点群を取得する。1 方向から点群を取得するため，機器に対して手前側の物体にレーザが遮られ点群データが欠落する範囲が発生する。一方，点群取得中の機器の移動による誤差が生じないため，個々のデータは取得中の移動を伴う機器に対して比較的高精度となる。	車両等に測位装置と点群取得装置を搭載し，道路を移動しながら点群を取得する。	使用者が機器を手に持ち移動しながら点群を取得する。ハンディ型の専用スキャナやスマートフォンに内蔵された LiDAR を活用した点群取得機器が該当する。
航空機型（ALS）	UAV 型（ULS）	
		
有人航空機に点群取得装置が搭載されており，広範囲の点群データの取得に適している。	無人航空機（UAV）に点群取得装置が搭載されており，中～広範囲の点群データの取得に適している。	

(2) 計測の仕組み

レーザを用いた点群取得の仕組みは**表-6.2.2** に示す通り，飛行時間差方式（Time of Flight）と位相差方式（Phase Shift）があり，本機器には位相差方式（Phase Shift）が用いられている。レーザ光を用いた計測の仕組みとして，その他に光投影法や光切断法を用いた技術もあるが，本項で扱うレーザスキャナは対象物からの反射光の特性から直接距離を算出する仕組みを有する機器とする。

表-6.2.2　レーザを用いた点群取得の仕組み [6.2.11)]

	飛行時間差方式 (Time of Flight)	位相差方式 (Phase Shift)
イメージ		
点群取得の仕組み	短い光パルスを照射し対象物で乱反射した戻り光を受光部で検知するまで時間を計測することにより，光の速度から距離を求める	強度変調をかけた光を連続照射し，出射光と対象物で反射した戻り光との間に生じた位相の差を測定することにより距離を求める

（3）本項の検討で使用した機器

1）機器の仕様

本項の検討で使用した機器の仕様を**表-6.2.3** に示す。

表-6.2.3　本項の検討で使用したレーザスキャナの仕様 [6.2.6)]

外観	仕様	
	機器名称	Trimble X12
	外寸	150 mm (W) x 258 mm (D) x 328 mm (H)
	重量	7.7kg（バッテリー含む）
	連続使用時間	2.5 時間 （1 バッテリー当り）
	測距方式	超高速位相差シフト測定
	レーザクラス	1（IEC 60825-1）
	レーザ波長	1500 nm
	スキャン範囲	水平：360° 鉛直：320°
	測定範囲	0.3m～365m （有効範囲 250m）
	スキャンスピード	最大 218.7 万点/秒
	カメラ解像度	80 メガピクセル
	距離精度	≤1 mm + 10 ppm/m
	動的チルト補正精度	＜.004°

2）使用条件

本項で使用した機器の使用条件を**表-6.2.4** に，動作環境を**表-6.2.5** にそれぞれ示す。

表-6.2.4　本項で使用した機器の使用条件 [6.2.6)]

項　　目	条　　件
機器の構成	スキャナ本体及び解析ソフト
使用ソフト	Trimble 社の専用解析ソフト (Trimble Perspective 及び Trimble Business Center)
必要最小人員	1 人
資格の必要性	不要

表-6.2.5　動作環境 [6.2.6)]

項　　目	条　　件
耐久性	屋内及び屋外用
動作温度	-10～＋45℃
防塵/防水	IP54(IEC 60529)

3）使用方法と留意点

本項で使用した機器（Trimble X12）は整準台から着脱できる機器で，固定ねじ（定芯桿）がセットされたカーボン製三脚にレーザスキャナを固定した。本機器は各載荷，除荷のポイントから同条件にて計測するため，三脚と整準台は固定し，載荷中のみ安全のため機器を取りはずすことで，同じ場所から計測を行った。

照射したレーザは対象物の一点から反射することが理想的である。だが，実際にはある程度の範囲で反射する。正対した場合，反射面は円形であるが，相対角が大きくなると楕円形に歪み，誤差の要因となるため，対象物に対しおおむね正対した位置に据え付けることが望ましい。

一か所からのフルドーム（360°全方位）点群取得時間は，設定する点群密度により 23 秒から約 39 分と大きく異なる。このため，対象物を含む領域のみの点群を取得するエリアスキャンを用いることが，作業時間の観点から現実的である。

スキャンを何か所から行うかは，対象物の大きさと形状に大きく依存する。また，後のレジストレーション（取得した複数の点群の合成）の精度に影響するため，オーバーラップ（点群の重なった部分）が 50%以上であることが望ましい。しかし，形状が複雑な場合は事前にオーバーラップを見積もることが難しい。このため，計測のたびに Trimble X12 の制御ソフトである Trimble Perspective 上でレジストレーション結果を確認し，不足するようなら補完する位置での追加取得を行うことで，確実に合成可能な点群を取得できる。

6.2.2　技術の精度評価

（1）精度評価の方針

本機器は点群を取得するため， 点群の位置関係から変形量を計測することができる。ただし，三脚の据え付けやレジストレーション（複数の点群の合成）の誤差を考慮すると，数 mm 程度の誤差となることが予測される。これに対し，今回計測する道路橋の部材の変形は，一般に数 mm から 10mm 程度であることが事前に予想されており，降伏前の小さな変形は誤差に埋もれてしまって検出できない恐れがあった。しかし，本機器はカタログ値として精度 0.004°のチルトセンサを保有しており，これは長さ 1000mm に対し 0.07mm に相当する。このため，理想的な環境条件下における鉛直に対する角度の計測には十分な精度を持つと期待される。

以上から，本節では計測精度を評価するために取得した点群に対し，実際に道路橋の震後点検で使用する際の環境条件や方法を想定し，i) 点群間の距離計測による変形量の計測 ii) RANSAC 面推定による鉛直に対する角度推定による変位量の計測の 2 つの手法について精度評価を行う。

（2）計測精度に影響を及ぼす要因及び精度評価の前提条件

距離計測の精度は機器と部材面の距離が影響する。本試行に用いられた計測機 Trimble X12 の点群計測の精度に関する仕様を**表-6.2.1** から抜粋し，**表-6.2.6** に示す。

表-6.2.6　Trimble X12 点群計測精度

距離精度	≤ 1mm + 10ppm/m
測定範囲	0.3m～365m （有効範囲 250m）
動的チルト補正精度	< .004°

(3)本手法の計測精度評価

本機器の能力評価のために，路橋支承部の地震時損傷を再現する実験の 2 つの CASE で点群の取得を行った。**表-6.2.7** に点群を取得した実験を示す。これらの実験では，本機器以外に変位計を用いて変形量が計測されている。これらは非常に高精度であるため，変位計の計測値を正解値として本機器の精度評価を行う。

表-6.2.7　点群を取得した実験

	実験対象
CASE5	サイドブロック取付ボルト 01（ゴム支承用）
CASE6	サイドブロック取付ボルト 02（BP 支承用）

1）精度評価の前提となる計測条件

点群取得対象は寸法計測が可能な実験施設内の各種機材・治具（いずれも鋼部材）を対象とした。精度評価の前提条件は**表-6.2.8** に示す。部材面との相対角は正対する位置であることが望ましいが，機材正面は安全上の懸念があるため，CASE6 においては約 60° の位置に配置した。**図-6.2.1** に例として CASE6 での配置を示す。

表-6.2.7　精度評価の前提条件

	CASE5	CASE6
計測距離	約 2.1m	約 2.4m
部材面との相対角	約 0°	約 60°

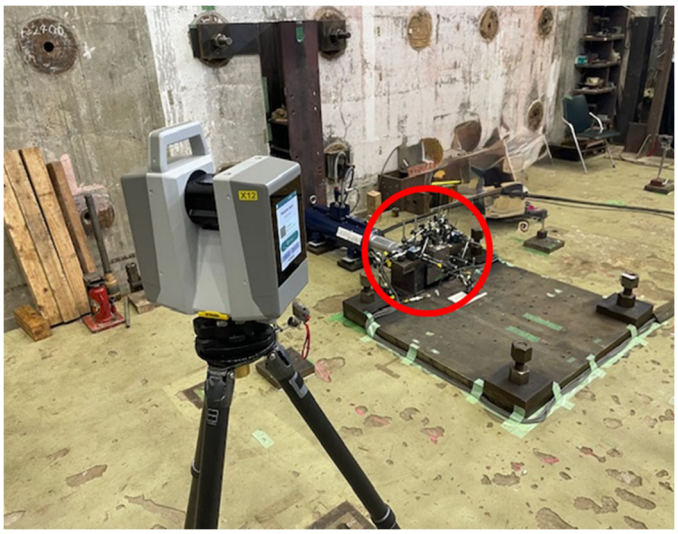


図-6. 2. 1 計測器の配置(CASE6)

2）計測の処理手順

i) 点群間の距離計測

変位計の近傍（先端の上下 0.05mm の範囲）の部分点群の座標値を取得し，変形の前後の座標の変位を計測する。変形前の座標は近傍座標の重心とする。変位は，変形前の座標と変位後の各座標との差分とする。

ii) RANSAC 面推定

RANSAC ではまず，部材面を構成する点群から，ランダムに 3 点をピックアップし， 3 点が通る面を求め，その面からの距離が，しきい値内にある点の数を数える。これを繰り返し，最も近傍点の多い面を推定面として採用する手法である。具体的な処理手順として，まず推定したい部材面を構成する点群以外をおおむね削除することで，他の対象ではない面を推定することを防ぐ。その後 RANSAC にて推定された部材面の法線方向から，鉛直に対する相対角を算出する。部材面の変形は部材が固定される位置を回転中心として変形するため，部材と治具の幾何的な関係から変形量を式（6.2.1）で示すことができる。 **図-6. 2. 2** に RANSAC による計測の処理手順のフローを，**表-6. 2. 8** に RANSAC の条件を示す。RANSAC は，繰り返し回数が少ない場合や誤差しきい値が大きい場合には，外れ値が計測される可能性が高くなる。本試行ではいくつかの条件を試行し，10 回推定して外れ値が出なかった条件を採用した。精度評価では，10 回の推定値を統計的に評価した。

$$\delta = l(tan\theta - tan\theta_0) \tag{6.2.1}$$

ここに，l　　：回転中心から変形の計測点までの距離（mm）

θ　　：部材面の鉛直に対する相対角（rad）

θ_0　　：載荷前の部材面の鉛直に対する相対角（rad）

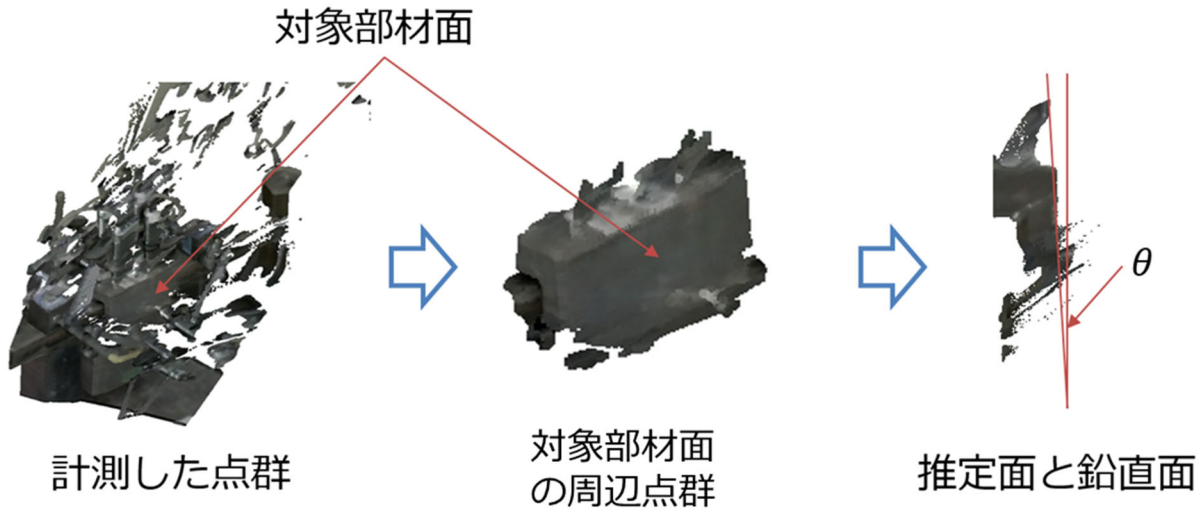


図-6.2.2　RANSAC による計測の処理手順のフロー

表-6.2.8　RANSAC の条件

繰り返し回数	20000 回
誤差しきい値	0.1mm
試行回数	10 回

3)　計測結果の精度評価

各 CASE の変位計による正解値と計測結果の差分を誤差として評価する。

CASE5：サイドブロック取付ボルト 01（ゴム支承用）

本 CASE の部材構成を**図-6.2.3** に示す。変位計 DU1，2 の平均値を正解値として，計測値との差分を評価した。各手法での計測値と正解値の関係を**図-6.2.4** に示す。また，各手法での誤差の統計値を**表-6.2.9**，**表-6.2.10** に記す。

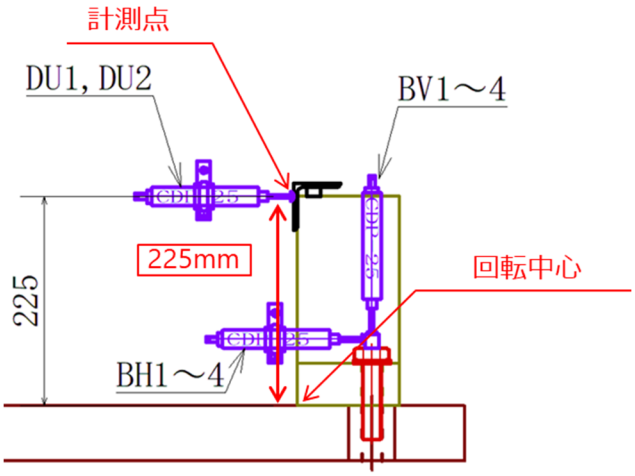


図-6.2.3　変位計(DU1，2)の計測点と回転中心(CASE5)

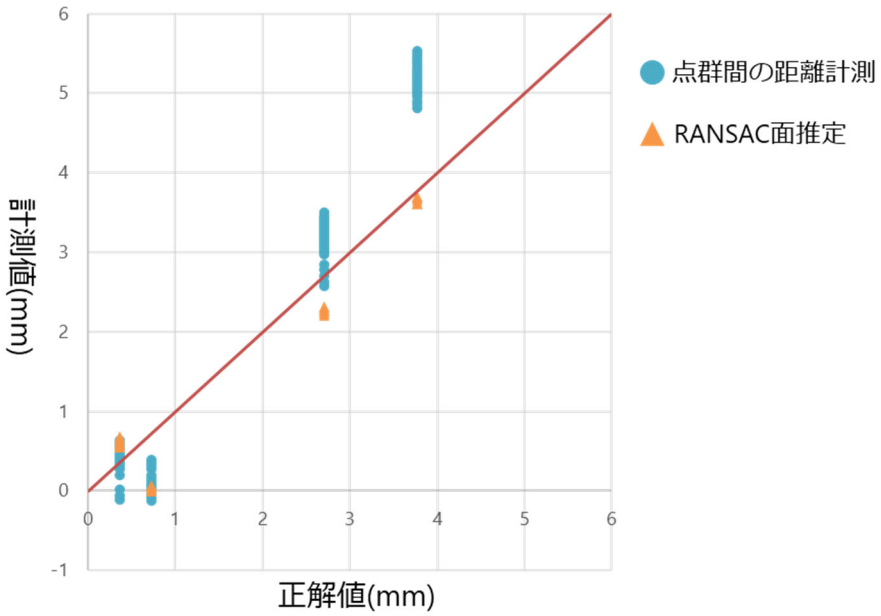


図-6.2.4　計測値と正解値の関係(CASE5)

表-6.2.9　誤差の統計値(CASE5，点群間の距離計測)

計測ステップ	載荷荷重 (kN)	正解値 (mm)	平均計測値 (mm)	平均誤差 (mm)	標準偏差 σ (mm)	95%信頼区間 1.96 σ (mm)
310	50.200	0.4	0.4	0.0	0.2	0.4
795	81.206	0.7	0.1	0.6	0.1	0.3
3211	150.109	2.7	3.1	-0.4	0.2	0.4
3793	200.309	3.8	5.2	-1.4	0.2	0.3

表-6.2.10　誤差の統計値(CASE5，RANSAC 面推定)

計測ステップ	載荷荷重 (kN)	正解値 (mm)	平均計測値 (mm)	平均誤差 (mm)	標準偏差 σ (mm)	95%信頼区間 1.96 σ (mm)
310	50.200	0.4	0.6	-0.2	0.0	0.1
795	81.206	0.7	0.0	0.7	0.0	0.0
3211	150.109	2.7	2.3	0.4	0.0	0.1
3793	200.309	3.8	3.7	0.1	0.0	0.1

CASE6：サイドブロック取付ボルト 02（BP 支承用）

本 CASE の部材構成を**図-6.2.5** に示す。変位計 LH1，2 の平均値を正解値として，計測値との差分を評価する。各手法での計測値と正解値の関係を**図-6.2.6** に示す。また，各手法での誤差の統計値を**表-6.2.11**，**表-6.2.12** に記す。

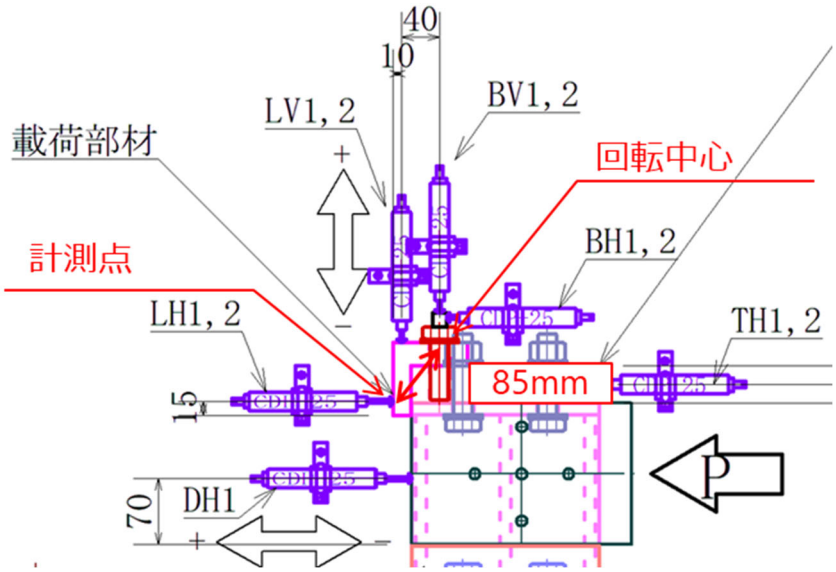


図-6.2.5　変位計(LH1，2)の計測点とボルト固定部

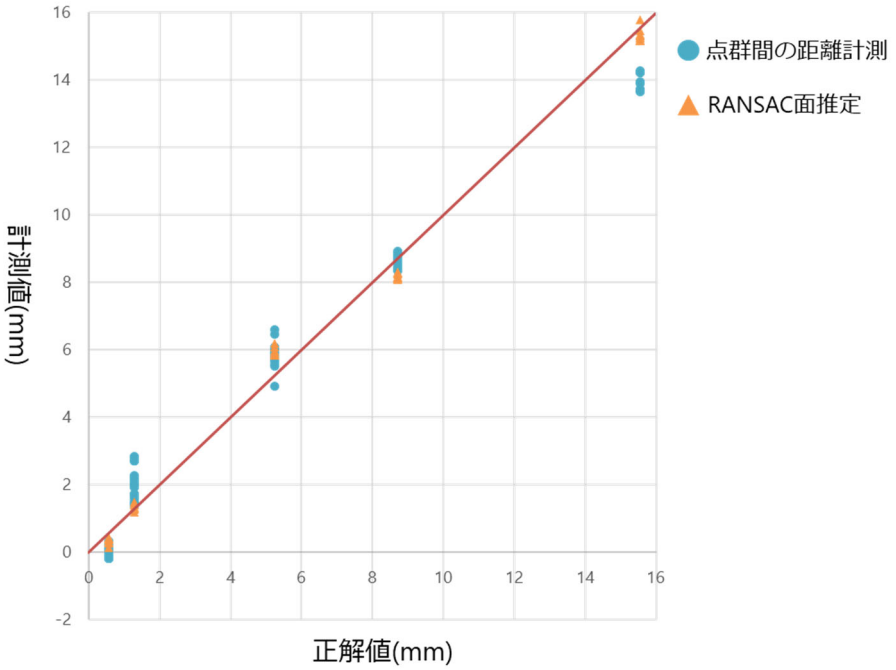


図-6.2.6　計測値と正解値の関係(CASE6)

表-6.2.11　誤差の統計値(CASE6，点群間の距離計測)

計測ステップ	載荷荷重 (kN)	正解値 (mm)	平均計測値 (mm)	平均誤差 (mm)	標準偏差 σ (mm)	95%信頼区間 1.96 σ (mm)
220	41.341	0.6	0.0	0.6	0.2	0.3
1325	120.333	1.3	2.1	0.8	0.4	0.8
3763	181.853	5.3	5.8	0.6	0.3	0.6
5371	134.606	8.7	8.7	0.0	0.2	0.3
5772	1.723 (破断)	15.6	14.0	1.6	0.2	0.5

表-6.2.12　誤差の統計値(CASE6，RANSAC 面推定)

計測ステップ	載荷荷重 (kN)	正解値 (mm)	平均計測値 (mm)	平均誤差 (mm)	標準偏差 σ (mm)	95%信頼区間 1.96 σ (mm)
220	41.341	0.6	0.4	0.2	0.1	0.2
1325	120.333	1.3	1.4	0.1	0.1	0.2
3763	181.853	5.3	5.9	0.7	0.1	0.2
5371	134.606	8.7	8.2	0.5	0.1	0.2
5772	1.723 (破断)	15.6	15.3	0.2	0.2	0.3

1.96 σ が i) 点群間の距離計測では最大 0.8mm，ii) RANSAC 面推定では最大 0.3mm となった。また，RANSAC について式 6.2.1 を逆算して角度に換算すると，0.1°となる。これらから本機器での計測結果は有効数字 1 桁で扱うことが妥当であると考えられる。

上記の検証結果は**表-6.2.7** 以内の距離であれば適用できるが，距離が長い場合は，**表-6.2.6** の距離精度の ppm 項の分の追加が必要である。安全性に関するしきい値に，この値を補正することで，判断を行うことができる。

参考検討：

例として以下では，本試行 CASE6 での部材の異常検知を，より現実的な条件で試みる。精度評価では詳細な部材の設計情報を用いたが，詳細な図面が入手できないことを想定して，部材の上下端間の水平方向の差が異常となっていないかを検知する。

取得した点群の代表的な 2 点をピックし，L 字部材の高さ方向の寸法を計測したところ 81mm であった。RANSAC で得られた部材面の角度と得られた寸法を式（6.2.2）に適用することで L 字部材の上下端間の水平方向の差を算出し，**表-6.2.13** に示す。

$$\delta_L = h\tan\theta \tag{6.2.2}$$

ここに，h　：L 字部材の高さ方向の長さ（mm）

θ　：部材面の鉛直に対する相対角（deg）

表-6.2.13　L 字部材の上下端間の水平方向の差の推定値

計測ステップ	載荷荷重 (kN)	θ(deg)	δ_L(mm)
220	41.341	90.1	-0.1
1325	120.333	89.3	1.0
3763	181.853	86.2	5.2
5371	134.606	84.7	7.2
5772	1.723 (破断)	79.9	14.0

本試行で使用した部材は鋼であり，仮に切削で製造され，寸法の許容差が中級[6.2.13)]の 0.3mm までであったとすると，それ以下の変形は，製造上の誤差と区別がつかない。このため，0.3mm 以上の変形を異常とすると，載荷荷重 40kN は異常とは判断できないが，載荷荷重 120kN は異常と判断できる。120kN は本試行での降伏応力と同程度であるため，本変形を異常と判断することは適切と考えられる。

以上のように，計測対象となる部材の製造，施工時に考えられる誤差がわかれば，図面がなくても部材が異常な変形をしているかどうかを，計測した点群から推測できる。

6.2.3　震後点検で想定される活用方法

本計測器は 250m 離れた遠距離からでも，計測器の位置から視認可能な範囲であれば計測ができる。このため，危険性を判定する前に橋梁に近接することなく，計測を行うことができる。

本試行では，対象となる部材面を計測可能な位置に計測器を配置したが，実環境においては橋梁の下からの計測となり，支承は橋脚の影に隠れてしまう。このため実際の震後点検では，上部構造の移動などの周辺部材を計測することにより，間接的に支承の破損を推測する補助として活用することが今後の検討課題である[6.2.12)]。

その他には，任意の点間距離や面の傾斜角の計測，土量の計測，設計 3D モデルや過去に計測した点群データがあれば，比較による差分の解析を行うことができる。

6.2.4　能登半島地震調査における試行例

Trimble X12 を用いて 2 つの補強土壁の点群計測を行うことで状態を可視化し，異常の範囲や程度を調査した。

本試行は 10～60m 程度の距離から行われたため，60m での精度を補正値とする。精度評価の結果と，**表-6.2.6** から補正値は 0.07m となる。

(1) 実地調査事例 1

1) 点群の取得

表-6.2.14 に点群を取得した諸条件を記す。また，取得した点群の概観を**図-6.2.7** に示す。

表-6.2.14　点群取得条件 (橋梁 A)

計測モード	高速
計測箇所	14 か所
所要時間	約 2 時間

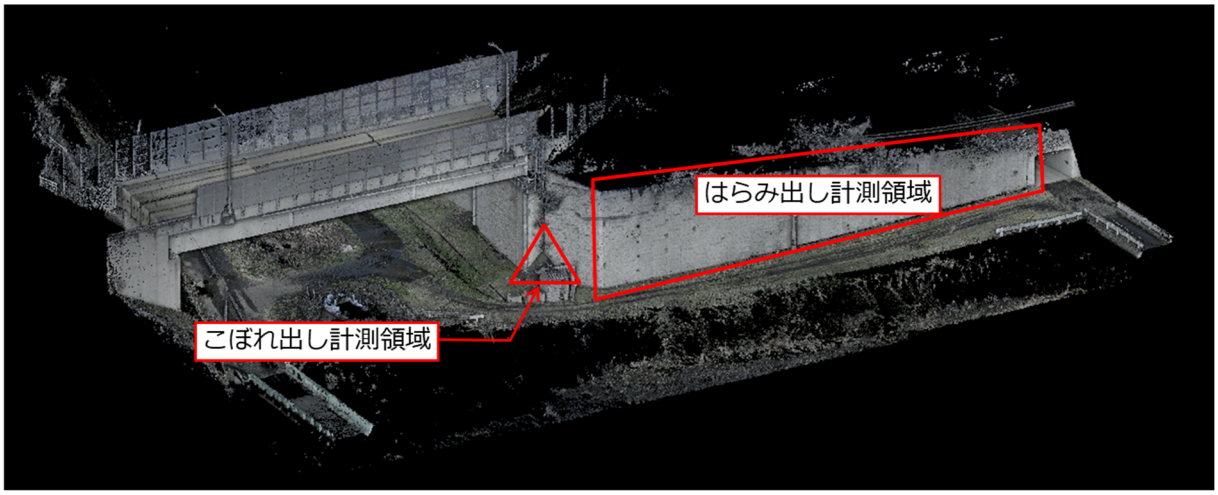


図-6.2.7　取得した点群の概観

2)　点群によるはらみ出しの計測

図-6.2.8 に計測領域の寸法，**図-6.2.9** にはらみ出しの基準面 (設計面がないため鉛直面を基準面としてはらみ出し量を算出)，**図-6.2.10** に計測したはらみ出し量のヒートマップを，**図-6.2.11** にはらみ出し量が多い箇所の断面図を示す。青い領域がはらみ出し量の大きな領域である。青い領域をランダムサンプリングで調べたところ，最大で 0.16m のはらみ出しがあった。設定した補正値 0.07m とあわせると 0.23m となる。

多く使われる鉛直線に対し壁高の 3%かつ 0.3m 以内の規格を適用すると，計測領域の鉛直面の高さ鉛直線は 9.5m であるため，基準は 0.28m となる [6.2.14]。このため，本計測領域においては，はらみ出しは認められるものの，基準値内に入っていることが確認できる。

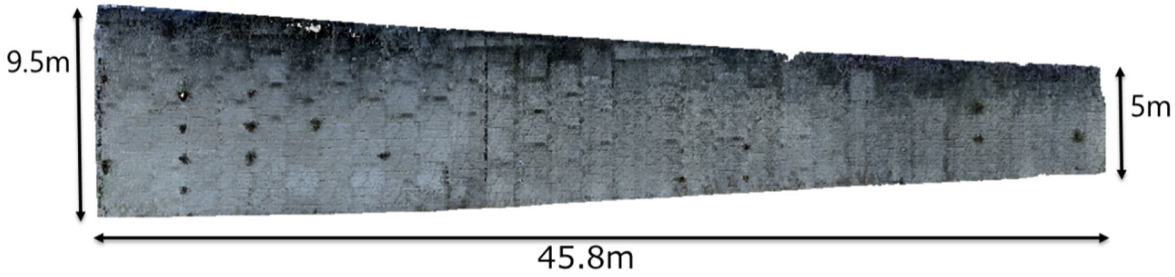


図-6.2.8　計測領域の寸法

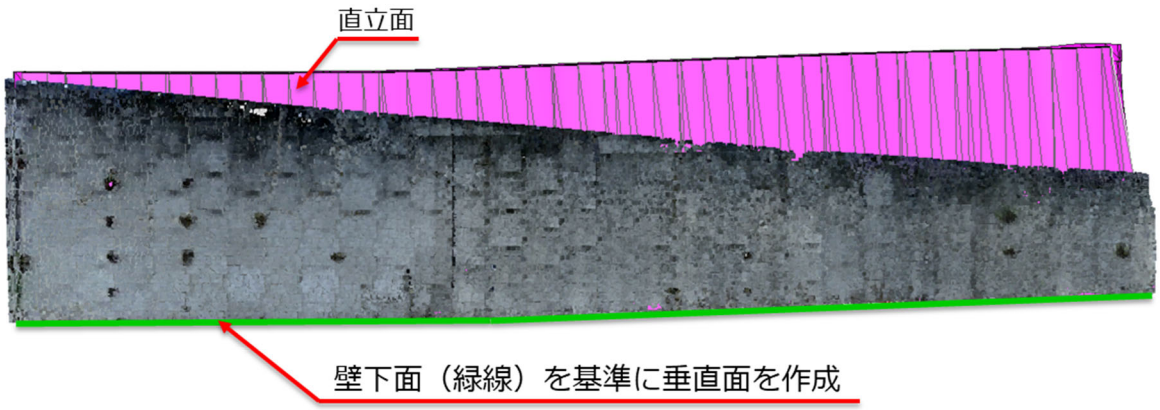


図-6.2.9　はらみ出し基準直立面

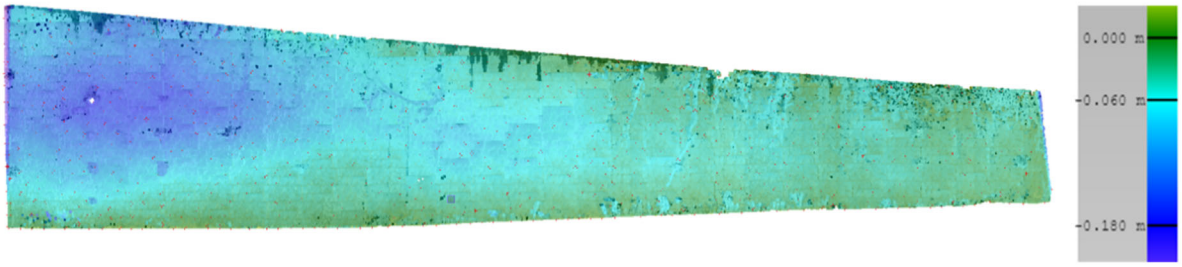


図-6.2.10　はらみ出し量のヒートマップ

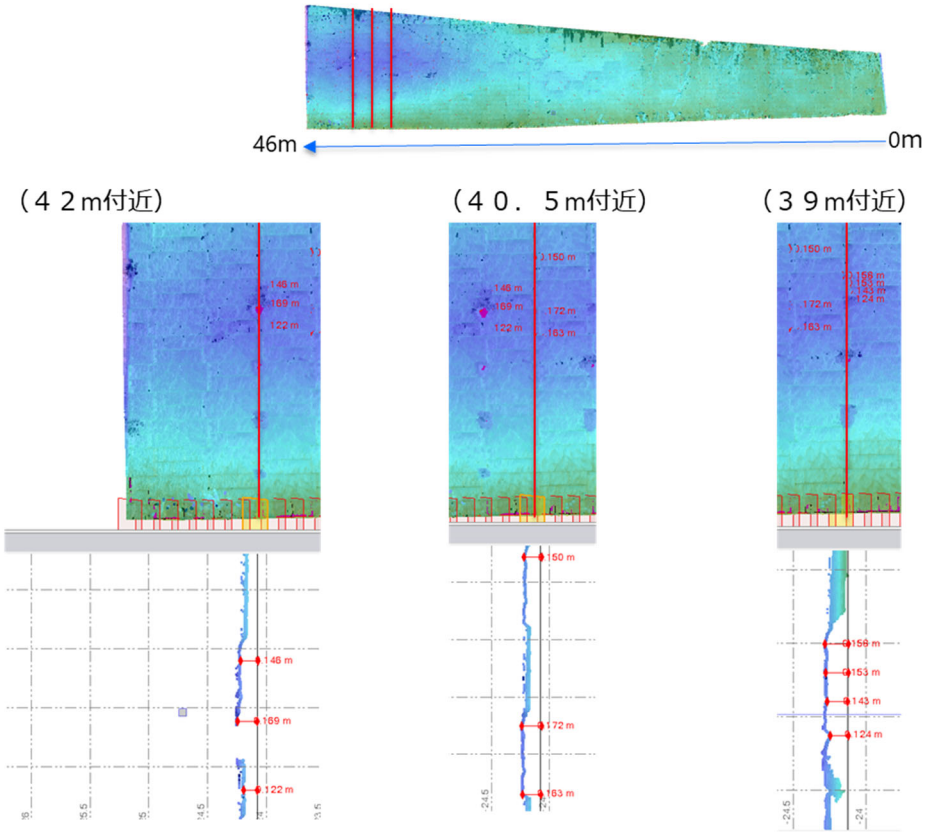


図-6.2.11　はらみ出し量が多い 3 か所で断面取得

3)　こぼれ出しの計測

図-6.2.12 に計測領域を示す。計測領域の点群から体積を計測したところ 7.6 m^3であった。



図-6.2.12　こぼれ出しの計測領域

(2) 実地調査事例 2

1) 点群の取得

本橋梁は 3 面の補強土壁を持ち，東西に分かれている。**表-6.2.15** にそれぞれの点群を取得した諸条件を記す。また，取得した点群の概観を**図-6.2.13** と**図-6.2.14** 示す。

表-6.2.15 点群取得条件

	東 A	東 B	西
計測モード	高速	高速	高速
計測箇所	7 か所	6 か所	8 か所
所要時間	約 1 時間	約 1 時間	約 1 時間

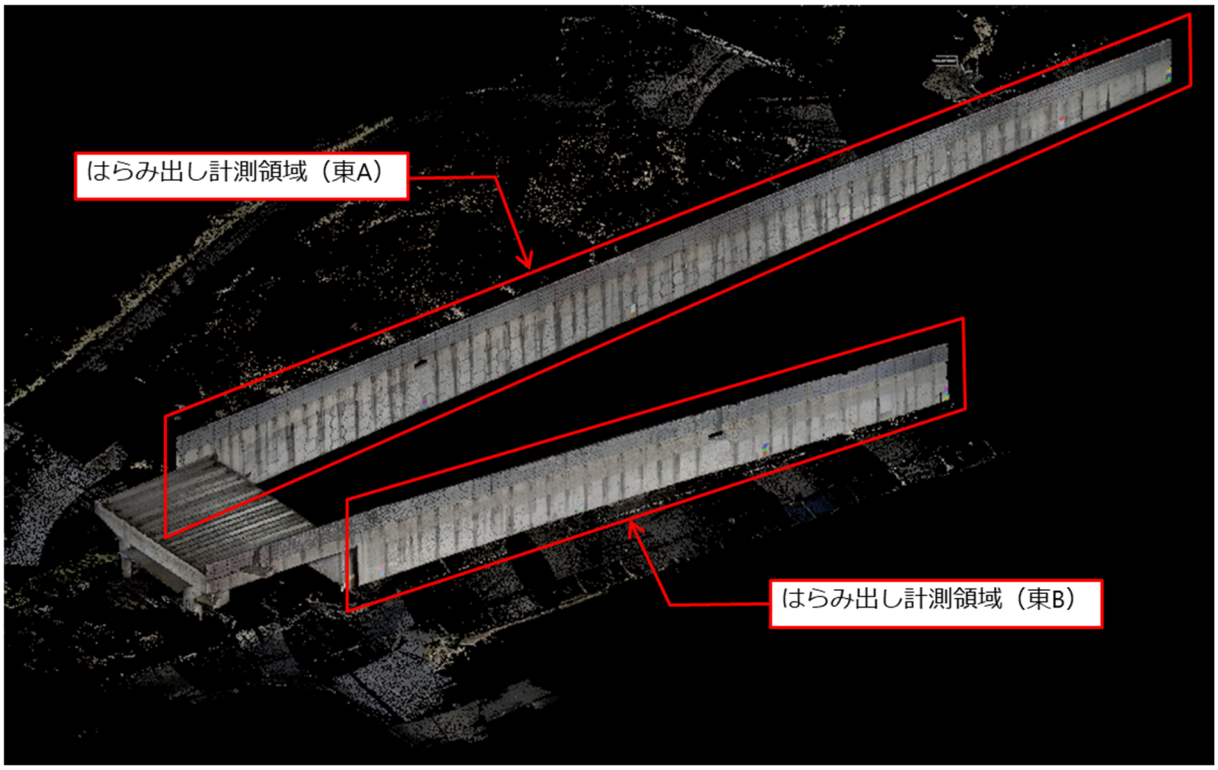


図-6.2.13 取得した点群の概観(東)

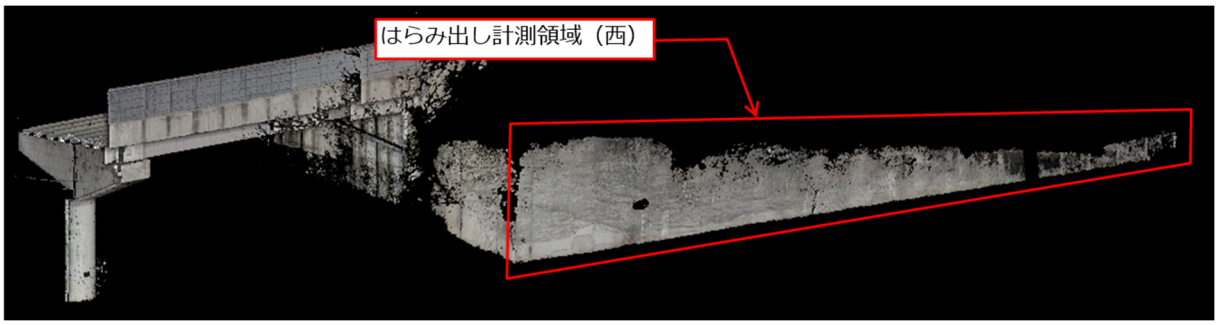


図-6.2.14 取得した点群の概観(西)

2)　はらみ出しの計測 (東 A)

図-6. 2. 15 に計測領域の寸法，**図-6. 2. 16** にはらみ出しの基準面，**図-6. 2. 17** に計測したはらみ出し量のヒートマップを，**図-6. 2. 18** にはらみ出し量が多い箇所の断面図を示す。青い領域がはらみ出し量の大きな領域である。青い領域をランダムサンプリングで調べたところ，最大で 0.16m のはらみ出しがあった。設定した補正値 0.07m とあわせると 0.23m となる。

多く使われる鉛直線に対し壁高の 3%かつ 0.3m 以内の規格を適用すると，はらみ出しのある領域の鉛直面の高さ鉛直線は 7.6m であるため，基準は 0.23m となる [6.2.14]。このため，本計測領域においては，はらみ出しが基準値を超えていることがわかる。

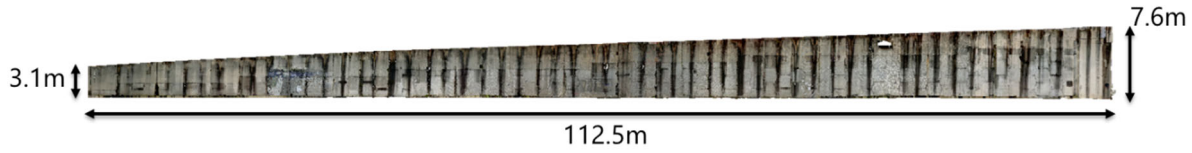


図-6. 2. 15　計測領域の寸法 (東 A)

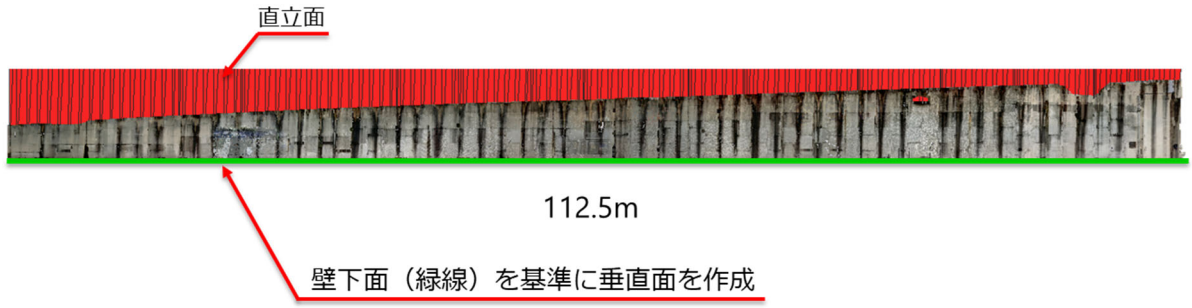


図-6. 2. 16　はらみ出し基準直立面 (東 A)

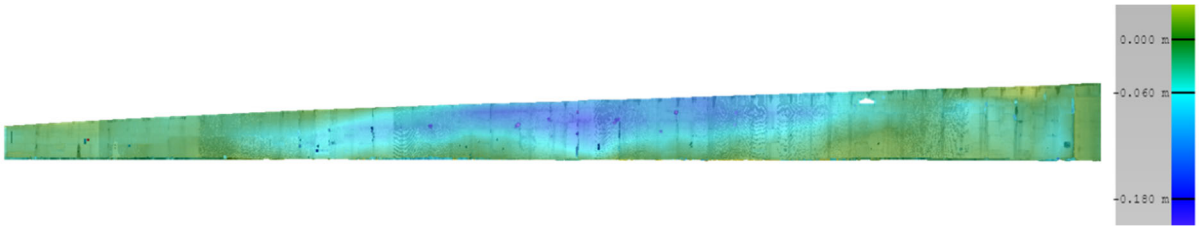


図-6. 2. 17　はらみ出し量のヒートマップ (東 A)

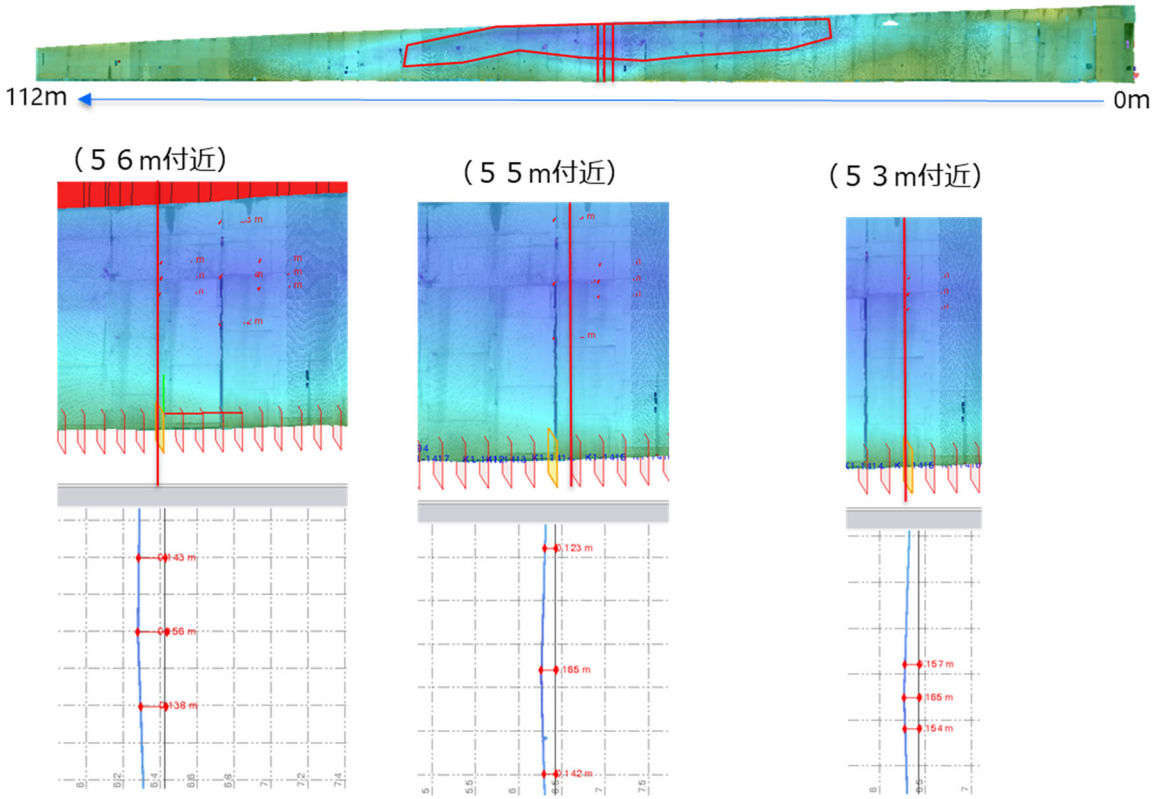


図-6.2.18　はらみ出し量が多い 3 か所で断面取得(東 A)

3)　はらみ出しの計測 (東 B)

図-6.2.19 に計測領域の寸法，**図-6.2.20** にはらみ出しの基準面，**図-6.2.21** に計測したはらみ出し量のヒートマップを，**図-6.2.22** にはらみ出し量が多い箇所の断面図を示す。青い領域がはらみ出し量の大きな領域であり，黄色い領域が逆に奥側に変位のある領域である。青い領域の周辺をランダムサンプリングで調べたところ，最大で 0.17m のはらみ出しがあった。黄色い領域の周辺をランダムサンプリングで調べたところ，最大で 0.06m の奥側への変位があった。設定した補正値 0.07m とあわせるとはらみ出しは 0.24m，奥側への変位は 0.13m となる。

多く使われる鉛直線に対し壁高の 3%かつ 0.3m 以内の規格を適用すると，計測領域の鉛直面の高さ鉛直線は 6.5m であるため，基準は 0.20m となる [6.2.14)]。このため，本計測領域においては，はらみ出しが基準値を超えていることがわかる。

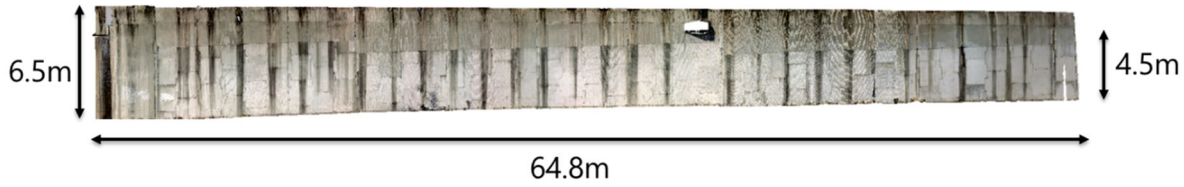


図-6.2.19　計測領域の寸法 (東 B)

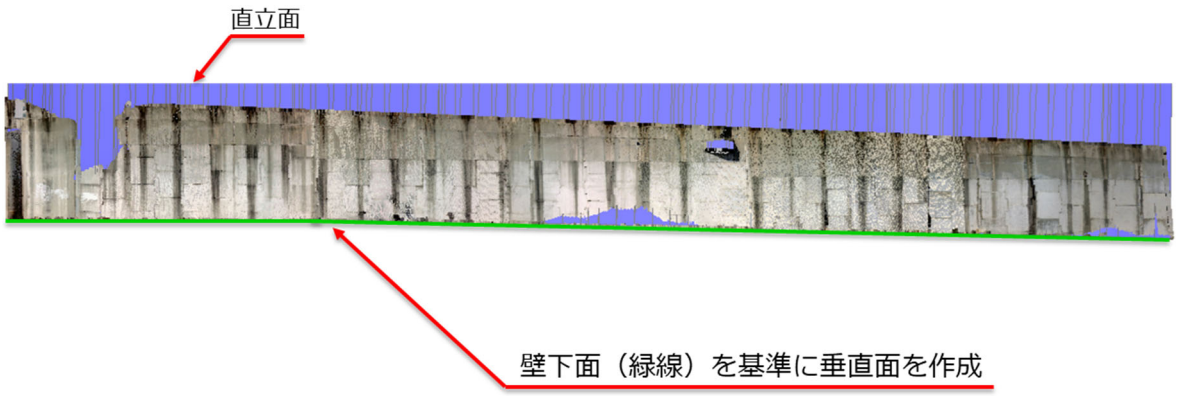


図-6.2.20　はらみ出し基準直立面 (東 B)

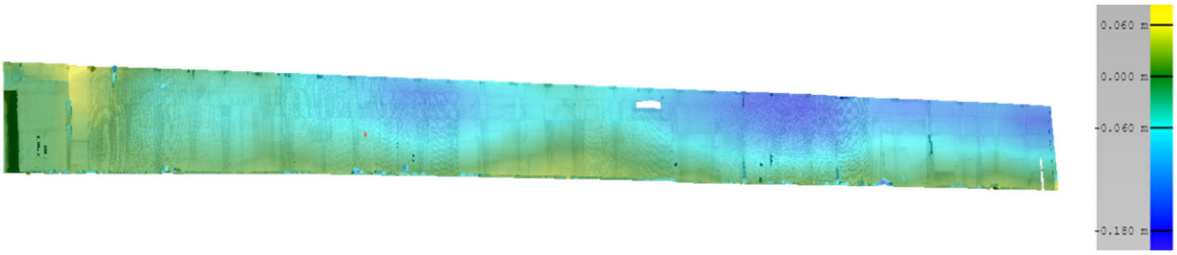


図-6.2.21　はらみ出し量のヒートマップ (東 B)

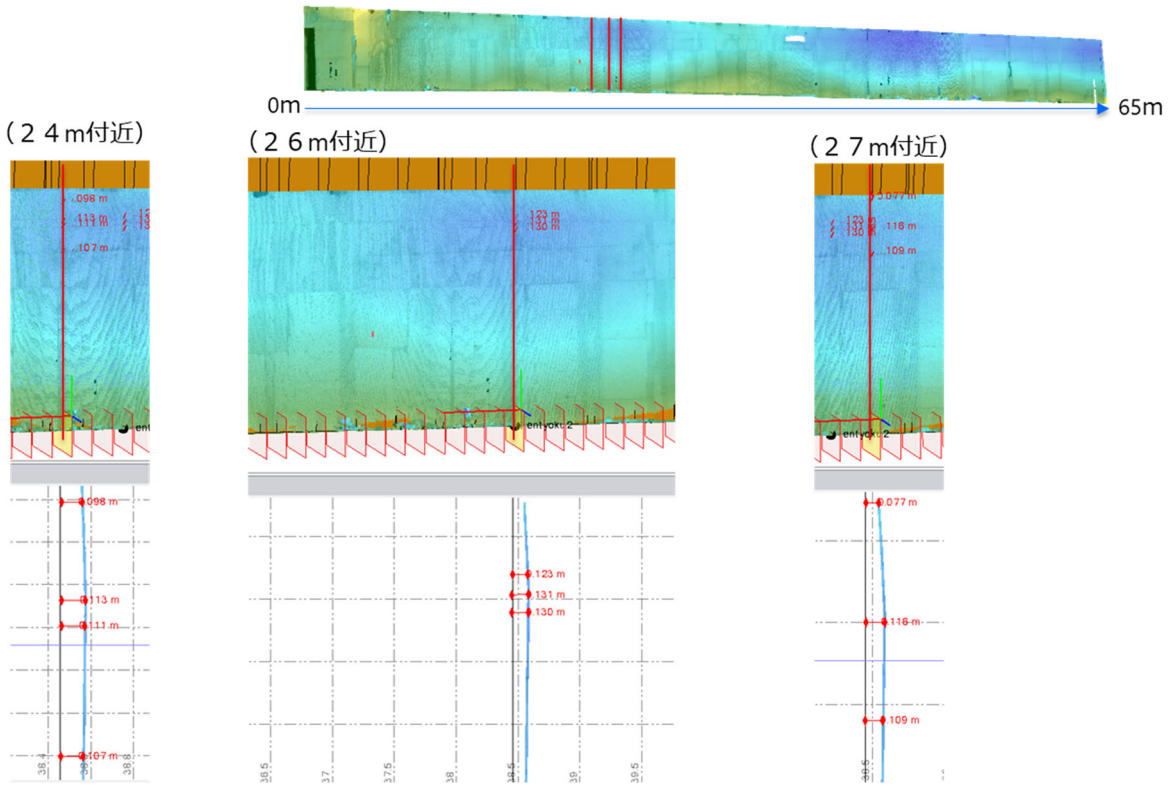


図-6. 2. 22　はらみ出し量が多い 3 か所で断面取得 (東 B)

4)　はらみ出しの計測 (西)

図-6. 2. 23 に計測領域の寸法，**図-6. 2. 24** にはらみ出しの基準面，**図-6. 2. 25** に計測したはらみ出し量のヒートマップを，**図-6. 2. 26** にはらみ出し量が多い箇所の断面図を示す。青-紫色の領域がはらみ出し量の大きな領域である。青-紫色の領域の周辺をランダムサンプリングで調べたところ，0.30m 以上のはらみ出しがあった。設定した補正値 0.07m とあわせるとはらみ出しは 0.37m となる。

多く使われる鉛直線に対し壁高の 3%かつ 0.3m 以内の規格を適用すると，計測領域の鉛直面の高さ鉛直線は 6.5m であるため，基準は 0.22m となる [6.2.14]。このため，本計測領域においては，はらみ出しが基準値を超えていることがわかる。

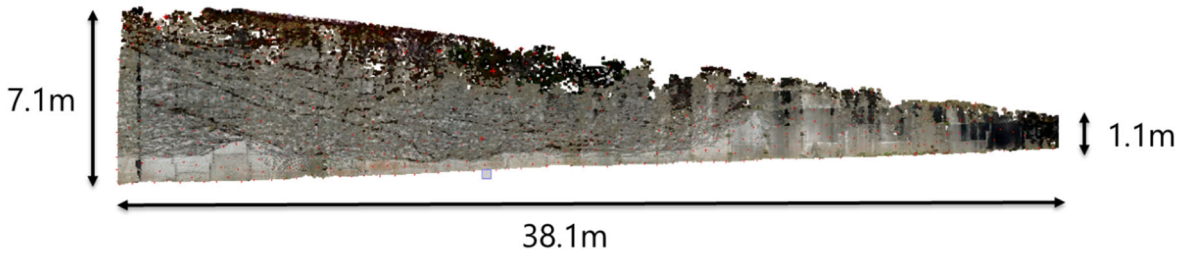


図-6. 2. 23　計測領域の寸法 (西)

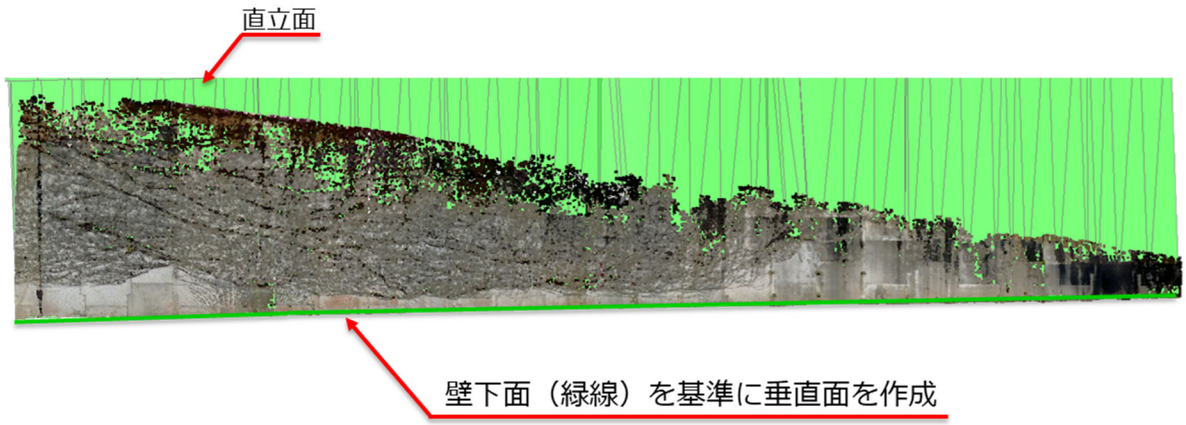


図-6.2.24　はらみ出し基準直立面 (西)

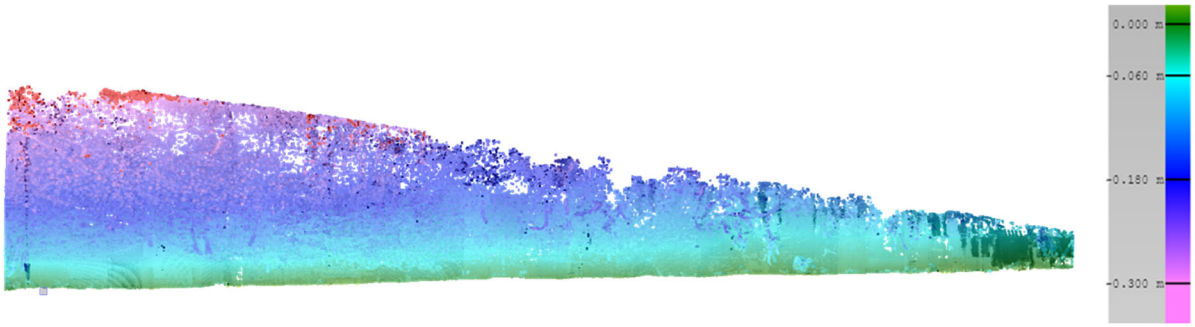


図-6.2.25　はらみ出し量のヒートマップ (西)

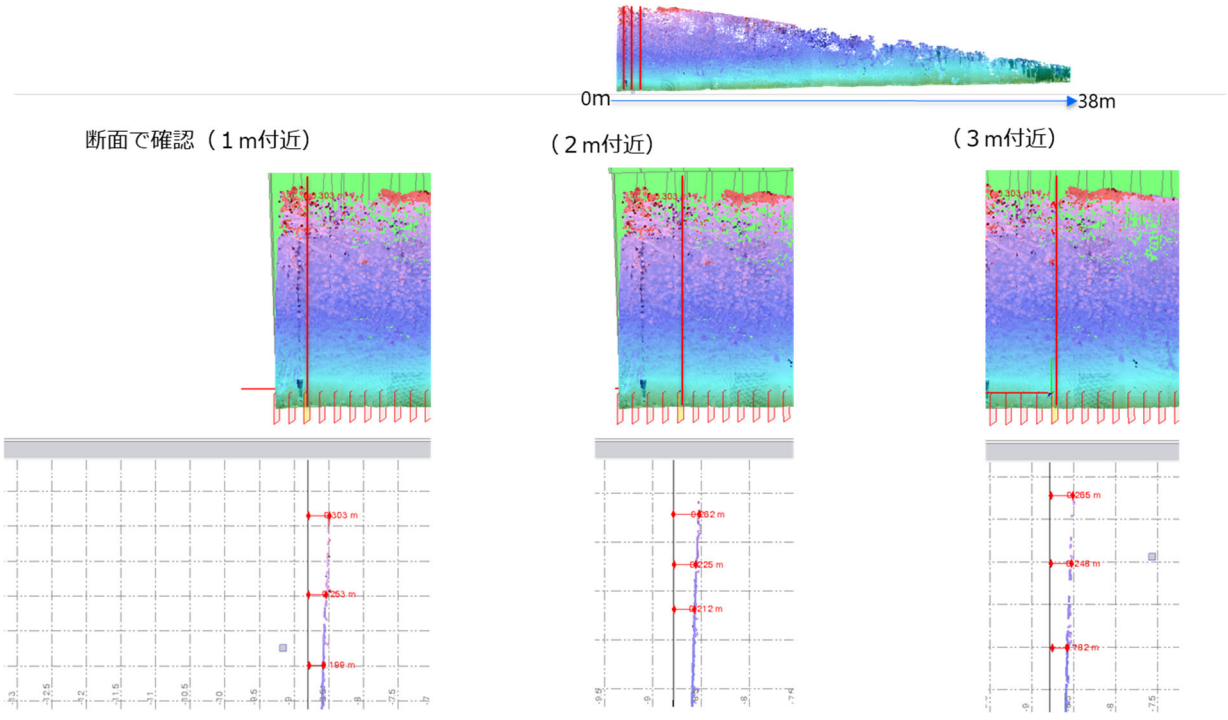


図-6.2.26　はらみ出し量が多い 3 か所で断面取得(西)

参考文献

6.2.1) 国土交通省:地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理の監督・検査要領（土工編）（案），2023.

6.2.2) 吉田守，吉田光伸：モービルマッピングシステム(MMS)の最新動向，三菱電機技報，88(2)，pp.144-147，2014.

6.2.3) 国土交通省 歩行空間の 3 次元地図ワーキンググループ：3 次元点群データ活用要件，令和 5 年度第 2 回会議，資料 5，取得・統合方法，2024.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000052.html（最終閲覧日：2024 年 10 月 2 日)

6.2.4) 山場淳史，渡辺豊，二谷卓，佐野俊和：3 次元レーザースキャナを搭載したドローンを用いたレーザー計測による森林地形と樹高の抽出及び TLS との比較，森林利用学会誌，33 巻 3 号，pp.169-174，2018.

6.2.5) 櫻井淳，田中成典，中村健二，今井龍一，窪田諭，重高浩一：レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），72 巻 2 号，pp. I_209-I_218，2016.

6.2.6) Trimble X12 データシート，
https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0101_geospatial/trimble_x12_datasheet.pdf

6.2.7) Trimble MX9 データシート，https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0101_geospatial/trimble_mx9.pdf

6.2.8) GoSLAM RS100i カタログ, https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0101_geospatial/goslam_rs100i.pdf

6.2.9) Yellow Scan ホームページ，https://www.yellowscan.com/

6.2.10) Exyn Nexys / Nexys Pro 製品カタログ，
https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0301_building/exyn_nexys/nexys_pro.pdf

6.2.11) 新発田知哉：3.地上型レーザースキャナの特性，写真測量とリモートセンシング，52 巻 6 号，pp.285-288，2013.

6.2.12) 小林巧，大住道生：道路橋の地震後の緊急措置に関する技術的判断の論理の可視化，土木学会論文集，80 巻，11 号，2024.

6.2.13) JIS B 0405 削り加工寸法の普通許容差

6.2.14) 土木研究所ほか:補強土壁の維持管理手法の開発に関する共同研究，共同研究報告書 第 486 号，2016.

6．3　SfM/MVS による点群取得技術

6.3.1　技術の概要及び計測の仕組み

（1）技術の概要

SfM（Structure from Motion）及び MVS（Multi-View Stereo）は，画像から 3 次元モデルを再構成する技術の一種である。SfM は，各画像中に存在する特徴点の対応関係を解析し，撮影時のカメラ位置，姿勢，内部パラメータを推定することで，対象物の疎な三次元点群を再構成する手法である。また，MVS は，SfM によって得られた初期点群およびカメラパラメータを基盤とし，多視点ステレオ計測により各画像の画素毎に深さ・法線を算出し，これらを統合し，対象物の密な 3 次元点群を生成する手法である。得られた 3 次元点群データを用いて 3 次元空間内の任意の部材の位置関係や角度・寸法を計測することで，部材の変形や位置関係の異常を検知できる [6.3.1)]。

（2）3 次元点群生成の仕組み

1）SfM（Structure from Motion）

SfM の処理過程の概要を**図-6.3.1** に示す。SfM は，まず，入力された各画像から特徴点を抽出し，特徴量の類似性に基づいて，対象物上の同一箇所を撮影していると推定される画像間で特徴点のマッチングを行う。次に，マッチングした特徴点ペアの幾何学的検証を行い，誤対応の特徴点を除去する。その後，最適な初期画像ペアを選択し，画像を逐次追加しながらカメラの位置・姿勢（カメラポーズ）とタイポイントの座標を推定する処理を繰り返す。この処理により，特徴点の 3 次元座標を持つ疎な 3 次元点群モデルが生成される。

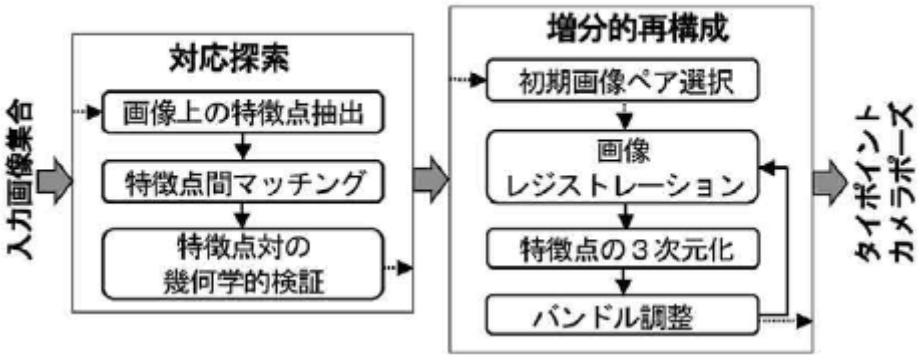


図-6.3.1　SfM の処理過程 [6.3.1)]

2）MVS（Multi-View Stereo）

MVS には近年，多くの手法が提案されているが，本項の検討で使用した COLMAP では，PatchMatch Stereo を拡張した手法 [6.3.2)] が採用されている。具体的な処理手順は以下の通りである。

まず，ピクセルごとに初期の深度値と法線をランダムに割り当てる。次に，フォトメトリック整合性（輝度やテクスチャの類似性）およびジオメトリック整合性（幾何学的一貫性）を考慮し，確率的な手法によって最適な深度値および法線を更新する。このプロセスでは，近傍ピクセルの情報を活用し，空間伝播（Spatial Propagation）と視点伝播（View Propagation）を繰り返すことで，より適切な深度・法線の推定を行う。

この更新を複数回繰り返すことで，高精度な深度マップを推定する。最後に，各画像で推定された深度マップを統合し，高密度な点群を生成する。この統合処理においては，各視点の深度推定値の信頼度を考慮して最適な深度を選択するとともに，異常値を除去し，整合性の高い点群を抽出する。

（3）本項の検討で使用した機器

1）撮影機材の仕様

本項の検討では，**表-6.3.1** に示すカメラを使用して SfM/MVS の処理に用いる画像を撮影した。

表-6.3.1　本項の検討で使用した撮影機器の仕様 [6.3.3)]

	カメラ 1
機種名称	SONY α7RIV
外観	
センサー	フルサイズ
センサーサイズ （横×縦）	35.7mm×23.8mm アスペクト比 3：2
センサー画素数 （横×縦）	9504×6336 pixel 6100 万画素 (フルサイズ撮影時)
焦点距離 （35mm 換算）	24mm

2）解析ソフトの仕様

本項の検討では，SfM/MVS の処理に COLMAP を使用した。COLMAP はオープンソースソフトウェアである。解析ソフトの仕様を**表-6.3.2** に，解析ソフトの使用条件を**表-6.3.3** 示す。

表-6.3.2 本項の検討で使用した解析ソフトの仕様 [6.3.4)]

項目	内容・仕様
名称	COLMAP（オープンソース）
対応 OS	Windows, macOS, Linux
言語	C++ (CUDA 対応)
主要アルゴリズム	SIFT 特徴点抽出，特徴点マッチング，バンドル調整，PatchMatch MVS
入力データ形式	JPEG, PNG, TIFF 等の静止画
出力データ形式	カメラパラメータファイル，スパース点群（PLY 形式），Dense 点群（PLY 形式）
ライセンス	BSD ライセンス（商用利用可能）

表-6.3.3 本項で使用した機器の使用条件 [6.3.4)]

項目	内容
ハードウェア要件	・CPU：マルチコア（Intel i7 以上推奨） ・GPU：CUDA 対応 NVIDIA GPU（GTX 10xx 以上推奨） ・メモリ：最低 16GB，推奨 32GB 以上
ソフトウェア要件	・OS：Windows 10, macOS, Ubuntu Linux ・依存ライブラリ：CUDA Toolkit，CUDNN，OpenCV 等
動作環境	・コマンドラインおよび GUI モードが利用可能 ・Python スクリプト連携も可能
利用上の制約	・大量の画像データを扱う場合，計算時間が長くなる可能性 ・GPU のメモリ容量に依存

3）活用時の留意点

COLMAP を用いた SfM/MVS による 3 次元点群モデルの生成を実施する際には，いくつかの課題と留意点が存在する。まず，点検作業では現場で撮影した画像を持ち帰って解析を行うため，撮影画像の不足が発覚した場合，再度現地に赴き追加撮影を行うことが難しい。そのため，撮影時には十分なオーバーラップを確保し，計画的に画像を取得することが求められる。

また，橋梁の構造上，撮影可能な視点が限られることも点群生成の精度に影響を与える。例えば，主桁の間や支承部のように，カメラが入り込めない狭隘部や死角となる箇所では，十分な画像が取得できず，点群の欠損が発生する可能性がある。このような場合，ドローンや自撮り棒を活用し，撮影可能な視点を拡張するなどの対応が必要となる場合がある。

さらに，SfM/MVS による 3 次元点群モデルの生成には膨大な画像枚数が必要であり，数百～数千枚の画像を用いることで高密度な点群を得ることが可能となる。しかし，その分データ容量が増大し，生成される点群ファイルも数 GB～数十 GB に及ぶことから，ストレージの確保と適切なデータ管理が不可欠である。また，解析に要する時間も長く，MVS 処理には数時間を要するため，撮影直後に即時的な計測結果を得ることは困難である。この点を踏まえ，計測に必要な精度が確保できる撮影枚数や条件を検討し，必要十分な撮影枚数で解析を実施することが望ましい。

また，COLMAP で生成された点群にはスケール情報が含まれず，実際の寸法と一致しないため，ス

ケール調整を行う必要がある。これを補うためには，撮影時に画角内の構造物を計測しておくことや，既知の寸法を持つターゲットを設置し，後処理でスケール調整を行うことが望ましい。

さらに，特徴点がほとんど存在しない画像を解析に用いると，特徴点検出が正常に行われずエラーとなる可能性がある。そのため，撮影時には画角内に特徴点となり得る情報（テクスチャやエッジが明瞭な部分）が含まれるように，適切な撮影位置を検討する必要がある。

以上のように，COLMAP を用いた 3 次元点群モデルの生成では，撮影計画の適切な立案，データ管理，解析時間の考慮，スケール補正，特徴点の確保といった点に留意することで，より高精度で実用的な点群データを取得することが可能となる。

6.3.2 技術の精度評価

(1) 精度評価の方針

本節では計測精度を評価するために取得した点群の座標値を用いて部材面の位置を推定し，部材面同士の相対位置関係から部材等の寸法形状や変位を計測する。ここでの計測における物理指標は座標値である。点群から部材の面を推定する方法は多岐にわたる[6.3.5)]が，本試行ではRANSAC（点群から推定した部材面の位置の変動範囲を評価する方法）について検討する。

(2) 計測精度に影響を及ぼす要因及び精度評価の前提条件

ⅰ）計測精度に影響を及ぼす要因

距離計測の精度は，部材面の位置推定に用いる点群の取得精度に大きく依存する。しかしながら，SfM/MVS は入力画像に基づき複数のパラメータを用いて内部処理を行うため，生成される点群の精度とその要因との明確な相関関係を算出することは困難である。したがって，本項で検討する精度評価の前提条件としては，点群生成に用いた画像枚数および撮影したカメラの画素数の 2 点に限定し，撮影時のカメラパラメータは Auto 機能を用いる。また，SfM/MVS の処理においては処理ソフトの初期条件を使用する方針とする。一般的に SfM/MVS を実施する際には，使用する画像群のオーバーラップ率が 80%以上であることが望ましく，撮影視点は対象物を囲むように配置され，上下方向にも複数の角度から撮影されることが望ましい。本項の検討においては，これら撮影視点等の条件を SfM/MVS 解析に使用する画像群の前提条件として定めた。**表-6.3.4** に点群生成精度に影響を及ぼす要因の例を示す。

表-6.3.4 点群生成精度に影響を及ぼす要因の例

影響を及ぼす要因の例		精度評価の前提条件
オーバーラップ率	80%以上が望ましい	満足していることを前提とする
解像度	特徴点の抽出に影響	画素数として考慮
カメラの内部パラメータ（焦点距離，歪み補正等）	点群のスケール誤差や歪みに影響	
撮影視点	点群の欠損に影響	被写体を囲むように撮影されており，かつ上下方向にも複数角度から撮影されていることを前提とする。
撮影距離	特徴点の抽出に影響	撮影距離として考慮
画像枚数	特徴点の抽出，欠損，歪み等に影響	画像枚数として考慮
被写体の特徴点分布	特徴点の抽出に影響	

ⅱ）取得した点群の前提条件

前述のとおり，取得した点群の精度に影響を及ぼす要因は多岐にわたり，取得時の前提条件を統一した場合であっても，同一条件下における点群の密度分布が大きく異なる可能性がある。したが

って，本評価の適用にあたっては，前述の条件に加え，取得した点群のばらつきの程度を考慮し，精度評価の適用が可能な分布を有する点群であるかを判別した上で，適用範囲内の分布を有する点群にのみ評価を適用する方針とすることが望ましい。なお，後述する検討結果を踏まえ，各手法の精度評価のまとめの小節において，取得した点群が精度評価の適用範囲に該当するかを判断するための基準を示す。

ⅲ）スケール調整

SfM/MVS 技術によって生成された点群データは本来スケールを持たない。そのため，精度評価や実運用に際しては，適切なスケール調整が必要となる。本項では，計測値の増加に伴い損傷の程度も大きくなる状況を想定する。このような状況下でスケール調整に伴う値の変動を考慮すると，損傷の見落としがないとみなせる補正量を算出するためには，スケール調整前の点群データが実寸法に対して最も大きくなる条件を仮定してスケール調整を行う必要がある。具体的なスケール調整の手順は後述する。

(3) 計測処理手順

生成した点群は推定したい部材面以外の範囲も含まれているため，事前に対象とする部材面を構成する点群のみ抽出する必要がある。また，本検討ではデータの処理速度を考慮して，ランダム・ダウンサンプリングを実施した。なお，この処理を適用しても点群の分布傾向に大きく影響が無いことは別途確認している。**図-6.3.2** に計測の処理手順のフローを示す。

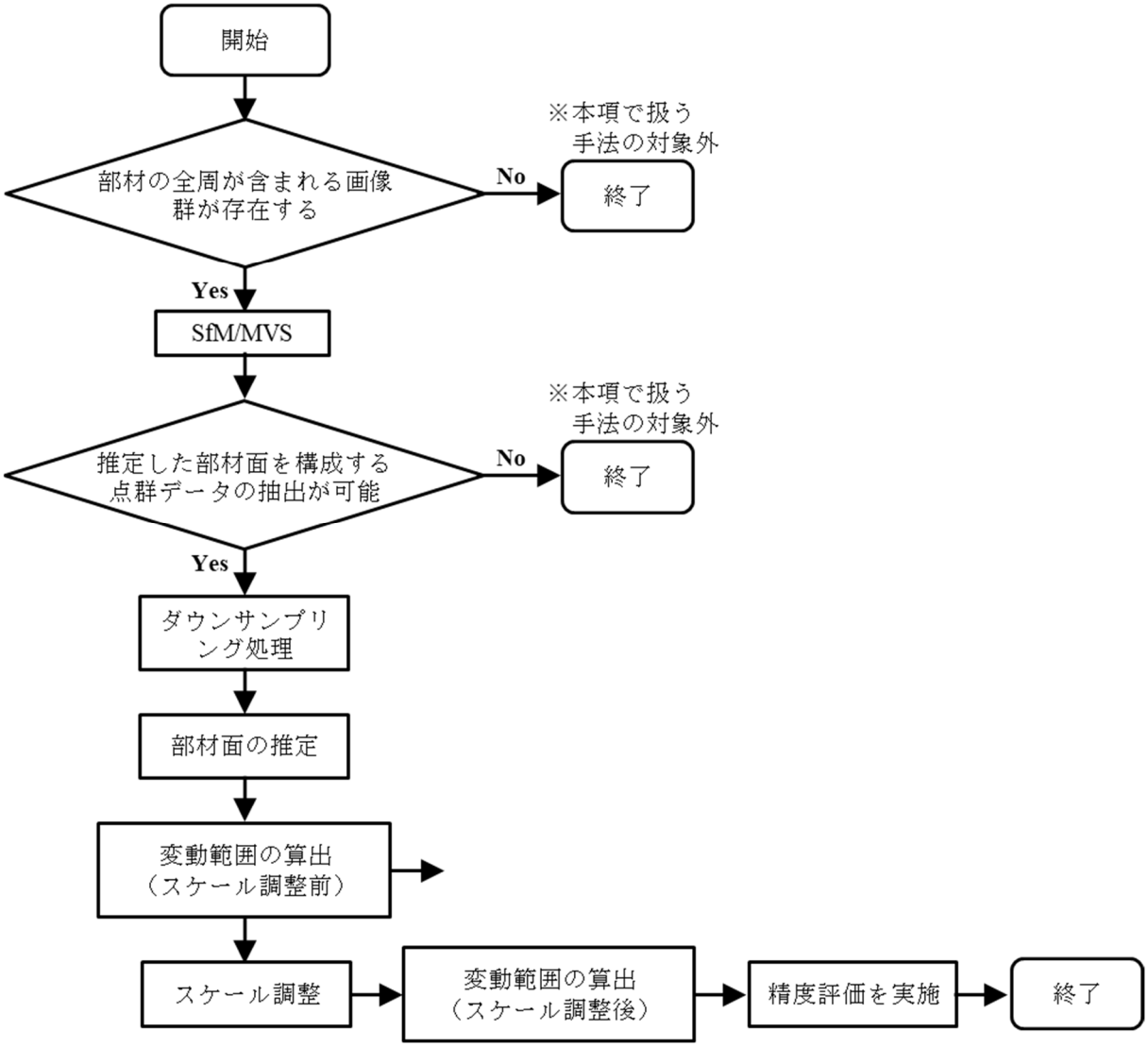


図-6.3.2　計測の処理手順

（4）RANSAC を用いた計測精度評価

1）精度評価の前提となる点群取得時の条件

精度評価に用いる点群の取得は，土木研究所敷地内の屋内実験施設で実施した。取得対象は寸法計測が可能な実験施設内の各種機材・治具（いずれも鋼部材）を対象とした。精度評価の前提条件は撮影機器，撮影枚数及び撮影距離とし，**表-6.3.5** に示す通り，画像枚数は 150 枚（対象物の全周を等間隔で撮影した 50 枚の画像のセットを，撮影角度を変えて 3 周分使用），対象物から約 1m の距離とした。

表-6.3.5　精度評価の前提条件

撮影機器	SONY α7RIV
撮影枚数	150 枚
撮影距離	約 1m

2）計測の処理手順

ｉ）RANSAC 法の処理手順

RANSAC 法とは点群データからプリミティブ形状（平面，直方体，円，球，円柱など，係数や次数が少ない式で定義できる形状）を推定する手法である [6.3.5]。この手法では，まず，点群データ内からランダムに 3 点を選択し，その 3 点を通る平面を仮定する。次に，その平面に対し指定した偏差以内に位置する点の個数をカウントし，その数が事前に指定した条件を満足すれば仮定した平面位置を採用し，条件を満たさない場合は再度別の 3 点を選択し同様の処理を実行する（**図-6.3.3**）。

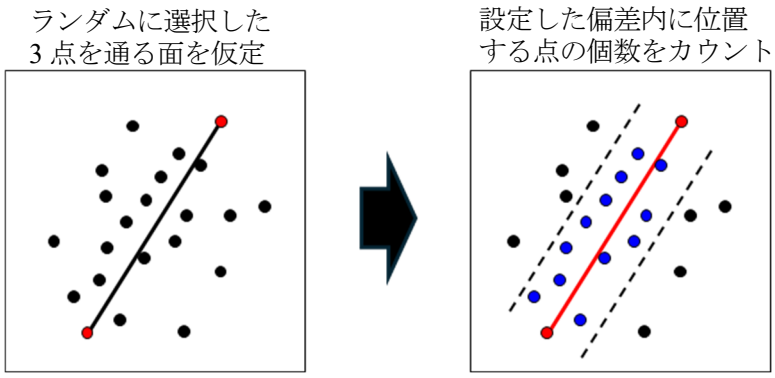


図-6.3.3　RANSAC 法による面推定の概要

計測は推定された 2 つの部材面間の距離を対象とする。しかし，前述した RANSAC 法のアルゴリズムのランダム性により，前提条件が同一であっても RANSAC 法を実行するたびに推定される面の位置は変動する。また，この変動範囲は正規分布に従わない。このため，本検討では同一条件下で RANSAC 法を 100 回実行し，その結果の変動範囲に基づいて補正量を算出する方針を採用する。

なお，RANSAC 法の実行のためには事前に偏差及び偏差内の点の最小個数を設定する必要がある。本検討では，対象点群の主成分分析により得られた計測方向の標準偏差（1σ）を 1mm 単位で切り上げた値を偏差として設定する。また，偏差内の点の最小個数は計測方向の標準偏差（1σ）内に存在する点の個数を目安とし，元の点群の点の個数の 8 割を 1000 点単位に丸めた値を初期値として設定する。

また，点群の分布特性によっては指定した初期条件を満たす面が存在しない可能性がある。そこで本検討では，RANSAC 法による処理が 5 回連続で失敗した際に偏差内の点の最小個数の設定を 1,000 点減じて再度処理を実行する。さらに，偏差内の点の最小個数の設定が 1000 点に達しても条件を満たす面が生成されない場合には，偏差内の点の最小個数を 100 点ずつ減じて処理を継続する。RANSAC 法による面推定の処理手順のフローを**図-6.3.4** に示す。

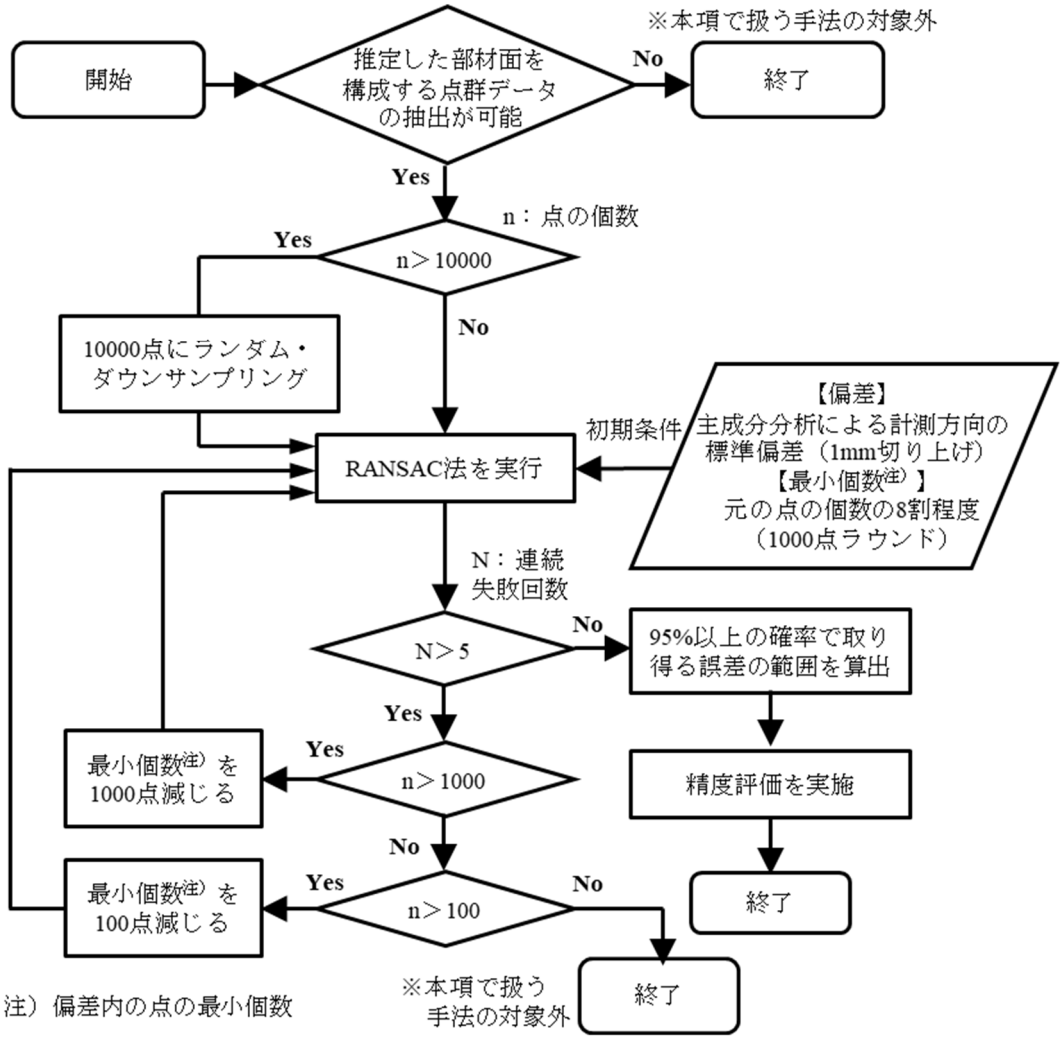


図-6.3.4　RANSAC 法による面推定の処理手順のフロー

RANSAC 法では推定された面の位置座標の変動範囲から適切な補正量を算出する必要がある。そこで，本手法では推定された面の座標値の変動範囲から両側 5%（片側 2.5%）を外れ値と判定して除去し，残りの範囲をもって推定された部材面が取り得る値の変動範囲と定める方針を採用する。具体的には， RANSAC 法を 100 回実行し，得られた位置座標を 0.1mm 単位で丸めたうえで，最大値及び最小値からそれぞれ出現回数が 3 回未満（片側当たり 2.5%以下）となる値の範囲を外れ値として除去する。これにより推定された部材面の変動範囲を設定する。RANSAC 法によって推定された部材面が取り得る変動範囲の設定イメージを**図-6.3.5** に示す。

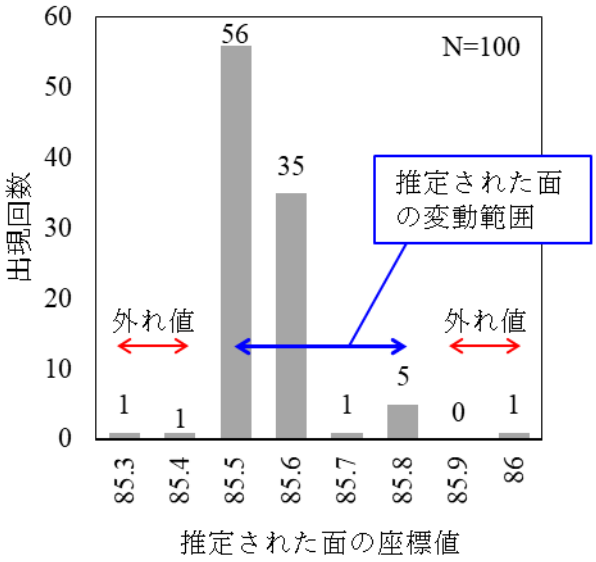


図-6.3.5　RANSAC 法により推定された部材面の変動範囲の設定イメージ

次に，推定された 2 つの部材面の変動範囲から補正量を算出する。本報告書では正解値の値が大きいほど損傷の程度が大きくなる場合を想定しているため，正解値に対して最も小さくなる値を代表値として採用することで最も安全余裕を確保できる補正量が算出される。したがって，**図-6.3.6** に示すように，2 つの部材面の分布範囲から最も計測結果が小さくなる値を基に補正量を算出する。

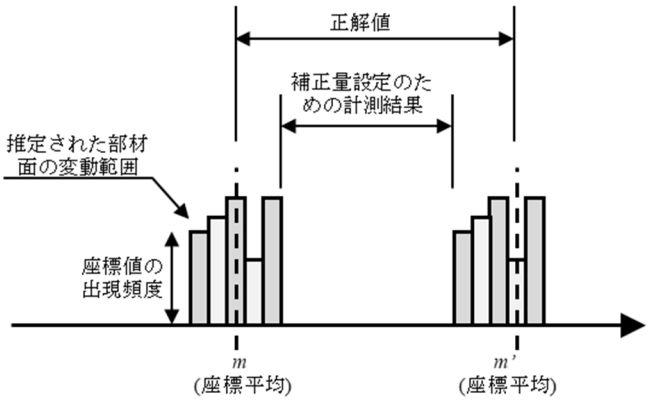


図-6.3.6　補正量算出のための計測結果の算出方法

ⅱ）スケール調整

本技術で生成した点群を用いて計測結果と既知の正解値を比較し，精度評価を実施するためには，事前に適切なスケール調整を行う必要がある。点群データはデータごとにスケール比が異なるため，スケール比の算出は生成した点群データ単位で必要となる。スケール比は，スケール調整前の点群データから推定された部材面の計測結果と既知の正解値の比に基づいて算出する。この際，損傷の見落としや過小評価を避けるためには，真のスケール比に対して想定するスケール比が常に大きく

設定される必要がある。具体的には，同一の点群データを複数の点群に分割したデータの中で，最もスケール比が大きく算出された結果を採用する。また，部材面の計測結果自体にも変動範囲が存在する。スケール比の算出に用いる値が大きくなるほど想定するスケール比も大きくなるため，スケール比の算出にあたっては，この変動範囲の最大値を用いることとする。このような処理を採用することで，分割データ間におけるスケール比の変動や計測結果自体の変動を踏まえた上で損傷の見落としや過小評価をしていないとみなせるスケール調整が可能になると考える。

3）計測結果の精度評価

RANSAC 法で推定した部材面の計測では，処理過程のアルゴリズムにランダム性が含まれるため，推定した部材面の位置座標の変動範囲は正規分布に従わない。そのため，前述の通り設定した位置座標の変動範囲において，補正量が最大となる計測結果を代表値として補正量を算出する。**図-6.3.7** に計測値の補正方法を示す。

さらに，計測対象の起点と終点はそれぞれ独立した処理により位置が算出されるため，計測結果の誤差やばらつきの大きさは 2 点間の距離の大きさ（正解値の大きさ）には依存しない。これを踏まえ，本項の精度評価では異なる正解値での距離計測を 3 箇所以上実施し，その中で最も安全側の計測結果を代表値として補正量を算出し，正解値の大きさに関わらず適用する方針とする。この際，距離計測に使用する部材面は重複させないものとする。また，前述した部材面のかたよりによる場合分けは考慮する。**図-6.3.8(a)～(b)**に補正量の大きさが正解値に依存する場合とそうでない場合における補正量の算出方針を示す。**図-6.3.8(a)**は計測値を縦軸に，既知の正解値を横軸に取って示しており，**図-6.3.8(b)**は正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って示している。

なお，本項の検討においては，計測値の変動範囲を 0.1mm 単位で算出し，補正値は 1mm 単位で算出する方針とする。

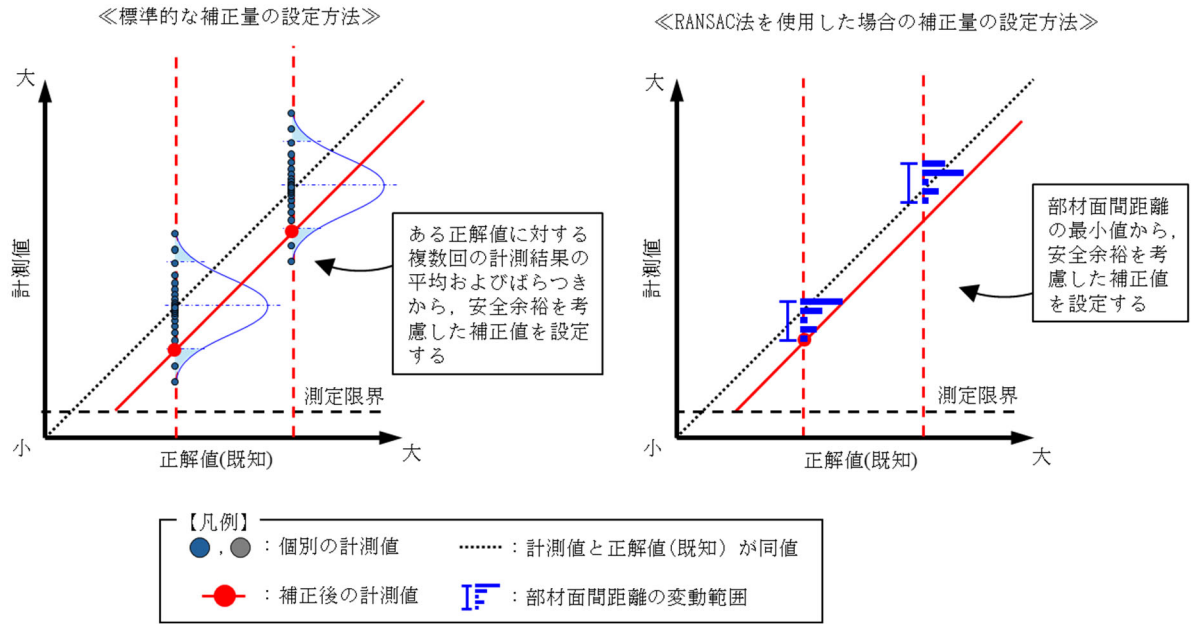
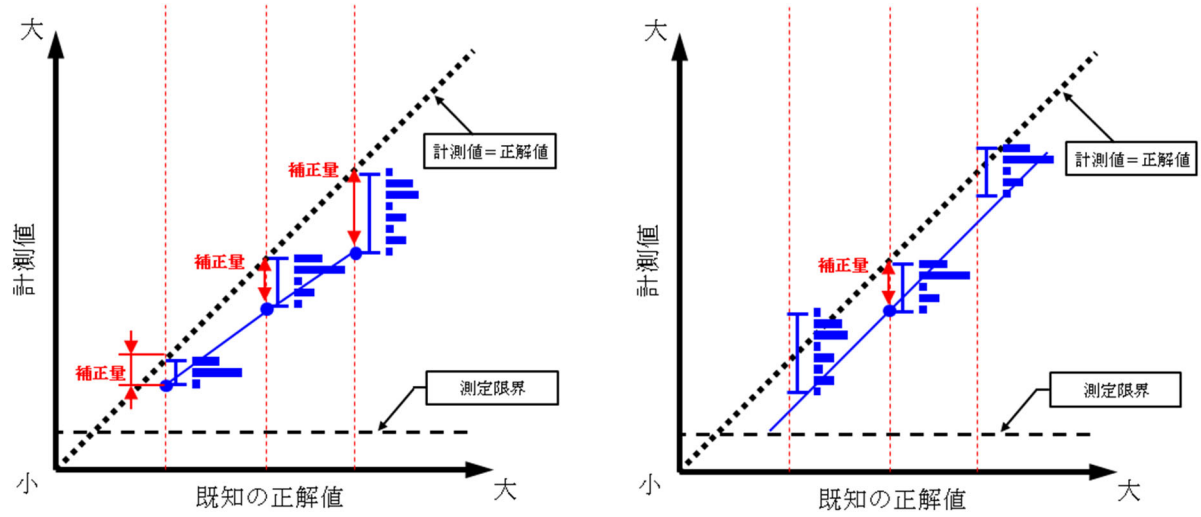
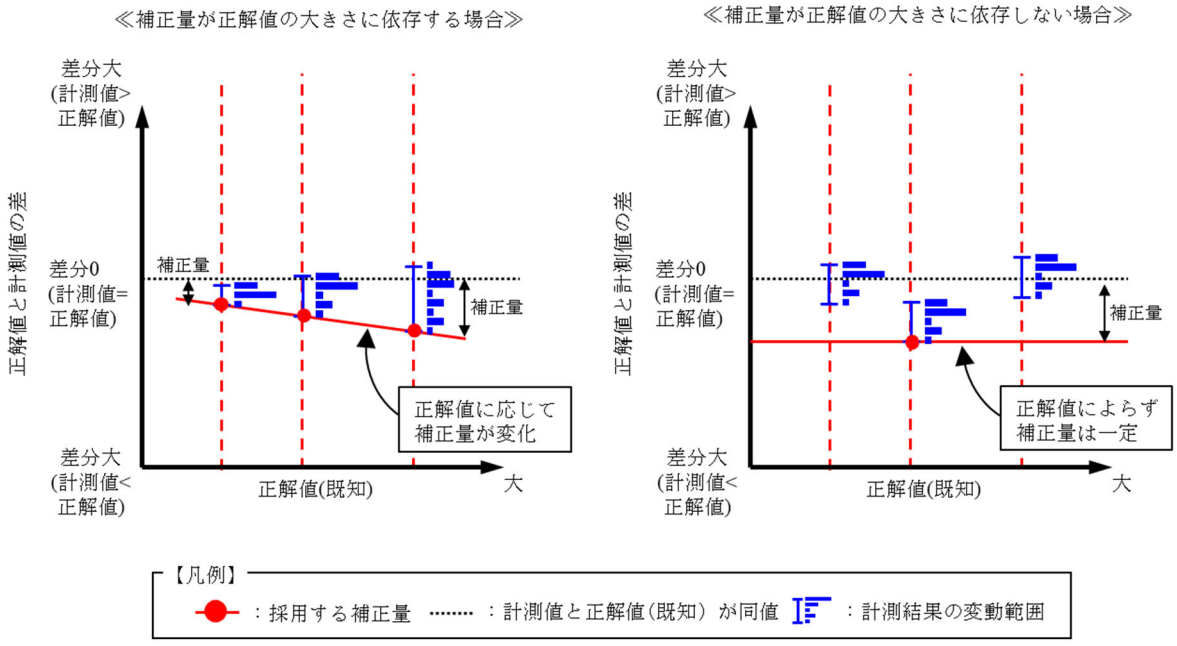


図-6.3.7　補正量の設定方法



(a)　縦軸に計測値，横軸に既知の正解値を取った場合



(b)　縦軸に正解値と計測値の差分，横軸に既知の正解値を取った場合

図-6.3.8　補正量が正解値の大きさに依存する場合とそうでない場合の算出方法

表-6.3.6 に既知の正解値とそれに対するスケール調整前の計測結果を示す。本項の精度評価で生成した点群データからは，既知の正解値との対応付けが可能な計測箇所が 2 か所しか抽出できなかったため，これを用いて精度評価を実施する方針としている。また，採用するスケール比を下線で示している。

表-6.3.6　スケール調整前の計測結果及び既知の正解値に対するスケール比

データ番号	正解値	計測値（スケール調整前）			計測値の最大と正解値のスケール比
		平均	最大	最小	
―	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	―
03_01	65	124.1	124.3	123.0	2.078
03_02	65	224.5	224.5	224.4	3.472
03_03	65	220.1	220.2	220.1	3.390
03_04	65	168.1	168.1	168.0	2.606
03_01	200	415.7	415.7	415.3	1.912
03_02	200	694.2	694.3	693.8	3.454
03_03	200	677.8	677.9	677.7	3.388
03_04	200	521.2	521.2	521.2	2.586

次に，算出されたスケール比を適用した計測結果，既知の正解値に対する差分を**表-6.3.7** に示す。また，正解値と計測値の差分を縦軸に，横軸に正解値を取って正解値と補正後の計測値の差分を示した図を**図-6.3.9** に示す。

以上の結果から，本項で使用した技術を用いて 2 つの部材間距離を算出する際の補正量は **6mm** となる。本精度評価の前提となる計測条件と同条件で計測を実施する場合，適切にスケール調整を実施した後，本補正量を計測結果に適用することで得られた計測結果は誤差やばらつきによる損傷の見逃しがないと判断できる値として取り扱うことが可能となる。

表-6.3.7　スケール調整後の計測結果と補正量

データ番号	正解値	計測値（スケール調整後）			正解値との差分			補正量
		平均	最大	最小	平均	最大	最小	
―	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	―
03_01	65	59.7	59.8	59.2	-5.3	-5.2	-5.8	**6**
03_02	65	64.7	64.7	64.6	-0.3	-0.3	-0.4	1
03_03	65	64.9	65.0	64.9	-0.1	0.0	-0.1	1
03_04	65	64.5	64.5	64.5	-0.5	-0.5	-0.5	1
03_01	200	200.0	200.0	199.8	0.0	0.0	-0.2	1
03_02	200	200.0	200.0	199.9	0.0	0.0	-0.1	1
03_03	200	200.0	200.0	199.9	0.0	0.0	-0.1	1
03_04	200	200.0	200.0	200.0	0.0	0.0	0.0	0

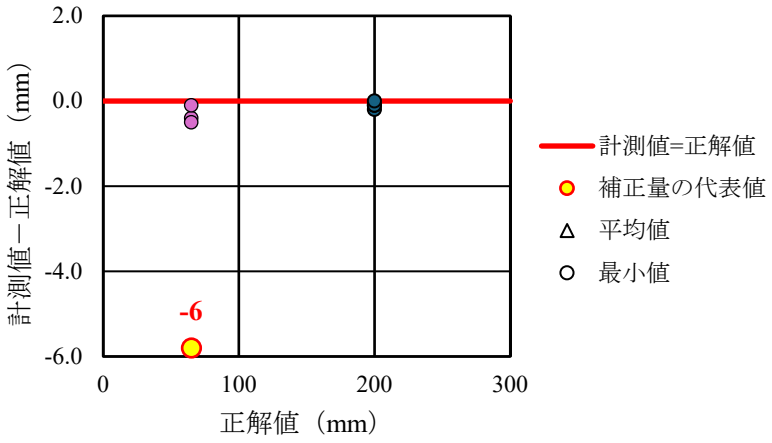


図-6.3.9　正解値と計測値の差分

6.3.3　震後点検で想定される活用方法

3 次元点群データは，構造物の 3 次元形状を面として取得することが可能であるため，各部材面間の距離や位置関係，及び基準軸に対する傾斜角を定量的に把握することができる。また，点群データは色情報を併せて取得できる場合が多く，点密度が十分に確保されている場合には，構造物の表面変状の詳細な把握にも寄与する。さらに，構造物および周辺地形の点群データを取得することにより，広範囲にわたる地形変動の状況を把握することが可能となる。**表-6.3.8** に，想定される活用方法の概要を示す。

表-6.3.8　想定される活用方法

活用方法	内容
被害の概要把握	取得した点群データを目視により確認することで，対象構造物及び周辺地形の被災概要を把握する。
構造物の部材面間の相対位置の計測	後処理により部材面を推定し，事前評価による誤差やばらつきを考慮した補正値を用いて，座標値の差分から複数の部材間距離を計測する。
基準点（軸）に対する相対変位（角度）の計測	後処理により部材面を推定し，事前評価による誤差やばらつきを考慮した補正値を用いて，基準軸に対する相対変位量（角度）を計測する。
表面変状の把握	取得した点群データを目視により確認することで，形状変化を伴わない，あるいは点群の取得精度では検知が困難な微細な形状変化を伴う変状を把握する。
時系列比較によるデータの差分比較	地震前後，あるいは地震後の一定期間において同一箇所の点群データを取得し，位置情報のレジストレーションにより重ね合わせたうえで，その差分を計測（あるいは目視による比較）することで，構造物に生じる変化を把握する。

このように，3 次元点群データは被災構造物の外観から得られる情報を網羅的に取得する手段として有用である。しかしながら，その把握能力は点群の点密度等，データ精度に大きく依存する。また，レーザ照射機器から直線的に視通が確保されている必要があり，欠落のないデータの取得を実現する

ためには複数位置からの点群データ取得が必要となる。さらに，計測にはノイズ除去や面推定などの後処理が必要であり，即時的なデータ入手は困難である。加えて，現地で取得した点群が計測箇所を適切に含んでいるかどうかを判断する方法はないため，必要な範囲のデータを確実に取得するためには，現地で取得したデータを人が逐次確認しながら主観で判断する必要がある。

以上を踏まえ，3 次元点群データを震後点検で活用する場合に想定される，検知対象となり得る損傷の例を**表-6.3.9** に示す。

表-6.3.9　検知対象となり得る損傷の例

活用方法	検知対象となり得る損傷の例
被害の概要把握	橋台背面段差，周辺構造物の被害状況，周辺地盤面の割れ　他
構造物の部材面間の相対位置の計測	各種部材の変形量及び移動量，遊間の異常　他
基準点（軸）に対する相対変位（角度）の計測	各種部材の変形角，橋台の傾斜　他
表面変状の把握	コンクリート壁面のひび割れ，鋼材の塗膜割れ（亀裂）　他
時系列比較によるデータの差分比較	部材・部位の変形量及び変形角，異物の有無　他

6.3.4　福島県沖地震で被災した支承の震後点検を模擬した試行例

（1）試行概要

本試行の対象とするピンローラー支承（以下，支承 A 及び支承 B と呼称。）を**写真-6.3.1**(a)～(b)に示す。これらの支承は福島県沖地震で実際に被災したものである。また，生成した点群から計測可能な損傷の程度を検討するために，これらの支承には被災時に発生した実損傷に加え，地震時に生じる可能性のある変状を模擬的に付与している。付与した模擬変状を**表-6.3.10** に，支承を構成する部材のラベリングを**図-6.3.10**(a)～(c)に示す。本試行では，この付与された模擬変状を計測し，事前の精度評価を用いてその計測結果の評価を試みた。



(a) 支承 A

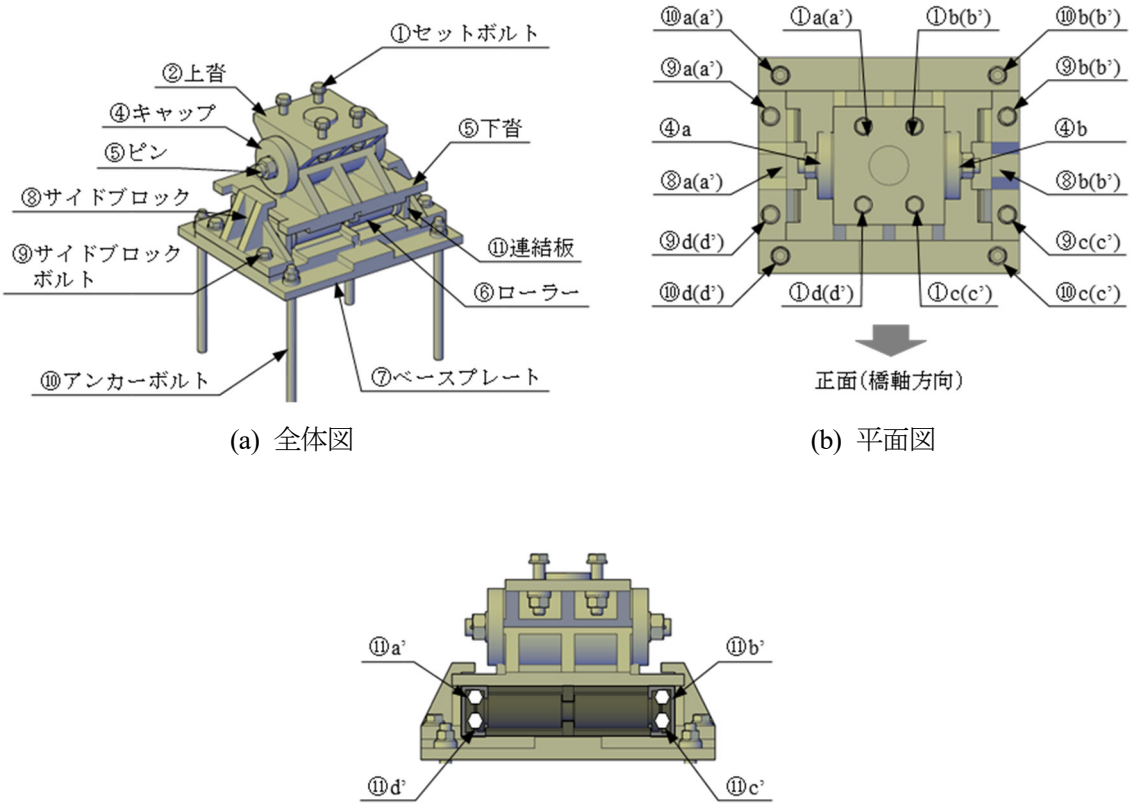


(b) 支承 B

写真-6.3.1　試行対象とする支承

表-6.3.10　付与した模擬変状

部品名	設定変状	支承 A				支承 B			
		a	b	c	d	a’	b’	c’	d‘
①セットボルト	ゆるみ・抜け出し	0mm	—	—	2mm 程度	0mm	27mm 程度	ナット喪失	2mm 程度
②上沓	下沓とのずれ	b 側に+5mm				b 側に+36mm			
③ピン	突出	0mm	13.0mm			0mm	57mm		
④キャップ	突出	ピンに付随	ピンに付随			ピンに付随	ピンに付随		
⑤下沓	上沓とのずれ	0mm(変状は上沓にて管理)				0mm(変状は上沓にて管理)			
⑥ローラー	カバー脱落	カバー脱落	カバー脱落			設定変状無し			
⑦ベースプレート（底板）	—	—				—			
⑧サイドブロック	—	—	—			—	—		
⑨サイドブロックボルト	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑩アンカーボルト	喪失(診断対象外)	喪失	喪失	喪失	喪失	喪失	喪失	喪失	喪失
⑪連結板	—	—				—			



(a) 全体図　　(b) 平面図

(c) 正面図（橋軸方向）

図-6.3.10　支承を構成する部材のラベリング

(2) 点群生成の前提条件

表-6.3.11 に点群生成時の前提条件を示す。両支承ともに点群生成時の前提条件は事前の精度評価の適用範囲内であることを確認した。

表-6.3.11　点群生成時の前提条件

撮影機器	SONY α7RIV
撮影枚数	150 枚
撮影距離	約 1m

(3) スケール調整

SfM/MVS 技術によって生成された点群データは，初期状態ではスケールを持たない。そのため，実運用時には，計測対象について現地で少なくとも 1 点以上の寸法計測を行い，その結果を基にスケール調整を実施する必要がある。本試行では支承 A，B のスケール調整の基準を上沓上端の橋軸直角方向の長さと設定した。実測データは筆者らがメジャーを用いて 2 回計測した結果の平均を使用している。**表-6.3.12** に算出された各支承のスケール比を示す。

表-6.3.12 各支承のスケール比

	実測値 (平均)	計測値 (スケール調整前)	スケール比
単位	(mm)	(mm)	―
支承 A	553.5	2065.1735	3.731
支承 B	551.0	1951.426	3.542

(4) 計測結果

点検する部材は，ピンローラー支承のピンとした。ピンは，ピンと上下沓の嵌合により，橋軸直角方向への変位に対して抵抗する役割を担う部材である。過去の被災事例では，橋軸直角方向への水平荷重により，ピンの嵌合部（くびれ部）の破断が多く確認されている。本項では，このくびれ部の破断の有無を上下沓側面とピンに接続されているキャップとの離隔から判断する方針とし，模擬変状を付与した b 側のピンを計測する。ただし，計測対象に付与した模擬変状はキャップの内側と下沓側面の離隔であるが，生成した点群からはキャップの内側を構成する点群の抽出が困難であったため，キャップの表側の面を用い，キャップの厚みを考慮して離隔を算出した。また，支承 B のピンに付与した変状は下沓側面の内側の突出部からの離隔としたため，この突出量を考慮して離隔を算出した。**表-6.3.13** にスケール調整後の離隔の計測結果と設定値（真値とみなせる値）を，**表-6.3.14** にスケール調整前の座標差を基に算出した離隔の根拠を示す。

表-6.3.13 計測結果（スケール調整後）

	設定値	計測値	補正量	補正値
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
支承 A	5	4.1	6	10.1
支承 B	57	48.8	6	54.8

表-6.3.14 計測値の算出根拠

	キャップ 表面	下沓側面	差(スケール調整前)	スケール比	差(スケール調整前)	キャップ厚 (+突出量)	計測値
	―	―	(mm)	―	(mm)	(mm)	(mm)
	①	②	|①-②|	―	④	⑤	④-⑤
支承 A	1691.979	1471.414	220.565	3.731	59.1	55	4.1
支承 B	-7388.150	-6939.067	449.083	3.542	126.8	78(49+28)	77.8

注）支承 B はキャップ厚 49mm，突出量 28mm として算出している。

注）キャップ厚及び下沓側面の突出量は，筆者らがメジャーを用いて計測した値である。

表-6.3.14 より，支承 A の計測結果からは，事前の精度評価結果を適用することで損傷を過小評価していないとみなせる値を算出できていることが確認できた。一方，支承Ｂについては事前の精度評価結果を適用したとしても，設定した損傷を過小評価している結果となった。理由として，支承Ｂの

下沓側面がやや湾曲した形状になっており，正しい面位置が推定されなかった可能性や，本項の精度評価に用いたデータ数が少なく，適切な変動範囲が算出されていなかった可能性が考えられる。事前の精度評価における適切なデータ数や部材面を構成する点群の抽出結果の妥当性については今後の課題としたい。

参考文献

6.3.1) 金井理：SfM-MVS 技術の動向，写真測量とリモートセンシング，60 巻 3 号，pp.95-99，2021.

6.3.2) Johannes L. Schonberger1， Enliang Zheng，Marc Pollefeys，Jan-Michael Frahm : Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo，Computer Vision – ECCV 2016，pp.501-518，2016.

6.3.3) Sony Corporation："α7 IV: Specifications," Sony Official Website, https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-7M4/spec.html.（最終閲覧日：2025 年 2 月 16 日）

6.3.4) Johannes L. Schoenberger：COLMAP-Structure-from-Motion and Multi-View Stereo, https://colmap.github.io/tutorial.html

6.3.5) 日高菜緒：点群データ処理アルゴリズムの総括及び土木分野での活用事例と展望，AI・データサイエンス論文集，4 巻 3 号，2023.

6. 4　動画像を用いた微小変位計測技術

6.4.1　技術の概要及び計測の仕組み

（1）技術の概要

本技術は，計測対象箇所を動画で撮影し肉眼では確認できない微小な変位や振動を計測することが可能な光学式の計測技術である。市販のデジタルカメラの動画撮影機能を使用し，録画データを解析する。計測時には，計測対象箇所にセンサーやターゲットシール等を取り付ける必要は無く，画像として映るもの（構造上の特徴点，ボルト等の金具，模様，汚れ等）があれば計測が可能である。また，画像上に映る 1 点のみでなく複数個所を同時に計測することができるため，各部位の連携した動作や対象物全体の動作を確認するなど，同時多点計測が可能である。

計測対象箇所をデジタルカメラで映し動画撮影を行い，その動画ファイルをパソコン上で動作する解析用ソフトウェアにて分析処理を行う。分析処理においては，動画中の連続する 2 枚の画像を比較し，その変位量（位置的なずれ量，単位は画素）を計算する。この計算を繰り返すことで，計測対象箇所の変位や回転角の時系列データを出力する。

なお，計測ポイントは画像上で任意の複数点を指定することが可能であり，X/Y 変位グラフ，周波数グラフ（FFT），時間軸たわみ量グラフ，加速度グラフ，回転角グラフ，変位ベクトル表示等の出力ができる。サブピクセル単位（1 画素以下の単位）での微小な動作を可視化することができる。

（2）計測の仕組み

サブピクセル単位の変位は，次の 2 つの処理にて算出される。

1）ブロックマッチングによりピクセル単位で変位を算出

ブロックマッチングでは，基準となる画像から任意領域の画像を取り出してテンプレート画像とし，比較する画像から対象領域を切り出してテンプレート画像との相関値を算出するテンプレートマッチングを行う。テンプレートマッチングの計算方法には，**図-6.4.1** に示すゼロ平均正規化相互相関（Zero means Normalized Cross Correlation：ZNCC）を使用する。

$$ZNCC(d_x, d_y) = \frac{\sum\sum[(I(d_x+x, d_y+y)-\mu_I)(T(x,y)-\mu_T]}{\sqrt{\sum\sum[I(d_x+x, d_y+y)-\mu_I]^2}\sqrt{\sum\sum[T(x,y)-\mu_T]^2}}$$

図-6.4.1 ゼロ平均正規化相互相関（ZNCC）

2）上記 1）で計算される相関値の関数フィッティングによる内挿とサブピクセル単位の変位推定

ブロックマッチングによりピクセル単位で求めた相関値から，二次元相関関数を推定する。この相関関数の相関値が最大となる位置をサブピクセル単位で算出するために，相関値が最も大きくなる画素とその周辺 8 画素の相関値に対して二次元関数をフィッティングし，二次元関数が最大となる位置

をサブピクセル単位の変位とする。

算出においては整数値に値が偏るピクセルロッキング現象が生じるため，Estimation Error Cancelation（EEC）を用いて誤差低減を行う。EEC は 0.5 画素だけ平行移動した画像も移動量推定に用いることで，影響を緩和する手法である。

（3）本項の検討で使用した機器

1）機器の構成

本項の検討で使用した機器の構成を**図-6.4.2** に示す。

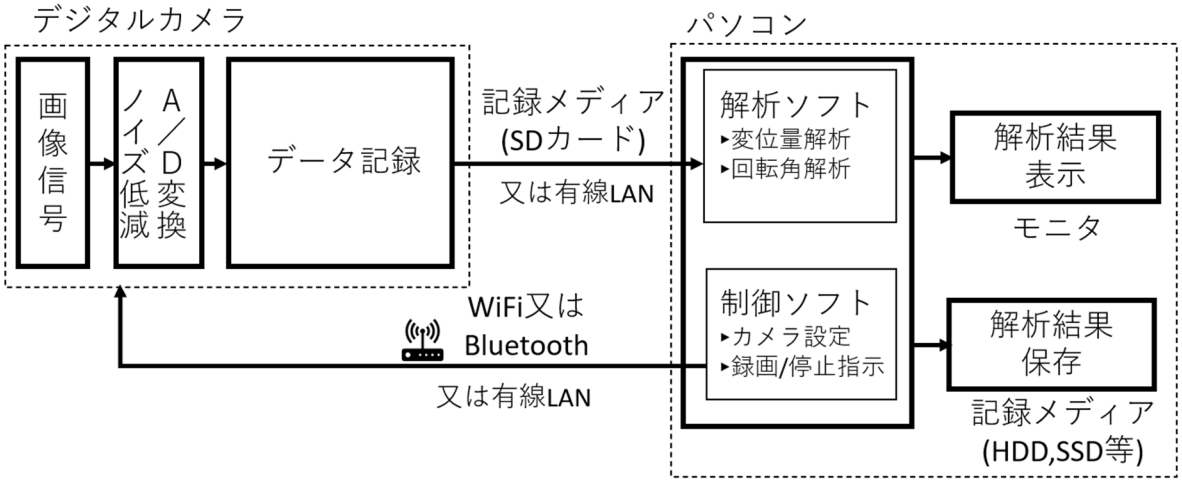


図-6.4.2 本項の検討で使用した機器の構成

2）機器の仕様

本項の検討で使用した機器およびソフトウェアの仕様を**表-6.4.1** に示す。

表-6.4.1 本項の検討で使用した機器およびソフトウェアの仕様

1	機器名称	デジタルカメラ	
	型式	パナソニック製　LUMIX BGH1	
	仕様	カメラ有効画素数	1028 万画素
		動画記録レート	4K 撮影時：最大 60fps，Full-HD 撮影時：最大 240fps
		外形寸法	幅 約 93.0mm × 高さ 約 93.0mm × 奥行 約 78.0mm
		重量	約 545g（本体のみ）
	外観		

2	機器名称	望遠レンズ（目安として，撮影対象物との撮影距離が 5m 以上の場合に使用）	
	型式	パナソニック製　H-PS45175	
	仕様	焦点距離	45-175mm
		外形寸法	最大径 61.6mm，全長 90.0mm（先端～マウント基準面）
		重量	約 210g
	外観		
3	機器名称	広角レンズ（目安として，撮影対象物との撮影距離が 5m 以内の場合に使用）	
	型式	パナソニック製　H-PS14042	
	仕様	焦点距離	14-42mm
		外形寸法	最大径 61.0mm×全長 26.8mm（先端～マウント基準面）
		重量	約 95g
	外観		
4	機器名称	パソコン	
	型式	パナソニック製　Let’s note FV1	
	仕様	CPU	インテル® Core™ i5-1135G7 プロセッサー
		外形寸法	幅 283.5mm×奥行 203.8mm×高さ 24.5mm（突起部除く）
		重量	約 0.999kg（付属のバッテリーパック装着時）
	外観		
5	ソフトウェア名称	LUMIX Tether（パナソニック）	
	機能	・デジタルカメラの設定機能 ・デジタルカメラの制御機能 ・ライブビュー，テザー撮影機能 ・録画ファイル転送機能	
6	ソフトウェア名称	微小変位振動計測ソフトウェア（パナソニック）	
	機能	・観測点指定機能 ・変位分析機能 ・振動モード分析機能 ・フィルター機能（不要帯域除去，ドリフトカット，DC 成分除去）	

3）使用条件

本項の検討で使用した技術は光学式で微小な変位量を計測する方式であり，デジタルカメラを固定して計測対象箇所の動画撮影を行う必要がある。また，サビピクセル単位での変位量の計測は，計測対象の各画素に対して前述のブロックマッチング等の処理を用いて算出される。そのため，計測にあたっては次の使用上の条件を確認の上で実施する必要がある。

ⅰ）計測対象を安全に撮影できる場所（カメラ等の機器の設置場所）が確保できること。

ⅱ）カメラと計測対象間に遮蔽物（雑草，雑木林等）がないこと。状況に応じて撤去が必要である。

ⅲ）降雨，降雪などが撮影動画に映り込み，計測対象が遮られる状況でないこと。
ⅳ）計測対象の外観にテキスチャ（模様や汚れ等）があること。テクスチャが無い場合は変位量を捉えることができない。
ⅴ）カメラならびに三脚が交通振動や風等で揺れる設置環境でないこと。

4）計測作業の流れ

計測を行う作業の流れは次の通り。

ⅰ）計測対象を撮影できる場所（計測対象に対して正対する位置）にカメラを設置し，制御ソフトを使用して，カメラの露出，画角，フォーカスを調整する。
ⅱ）制御ソフトを使用して動画撮影を実行し，撮影した動画データは SD カードに記録される。
ⅲ）記録した動画データをパソコンに転送し，解析ソフトを使って計測対象の任意の位置を選択して変位量の時刻歴データを算出する。
ⅳ）変位の時刻歴データから計測対象箇所の回転角を算出する。

現地計測に要する時間は，計測準備に 30 分，計測に 1 分程度，データ確認に 20 分，機器の撤去に 10 分程度を要する。

計測される変位量と回転角の時刻歴データは csv ファイルにて保存される。また，グラフ表示，撮影した画像への変位量のベクトル重畳表示等の出力機能を装備している。

6．4．2　技術の精度評価

本技術の精度評価として，セットボルトで固定された治具に徐々に載荷したときの各部の変位を計測し，変位計（東京計測 CDP-50）をリファレンスとして計測値との比較を行った。

治具の垂直方向には計 4 個の変位計が設置されている。治具の両側面から 2 台のカメラで撮影を行い，変位計と同じ箇所の変位を本技術にて算出する。

計測対象箇所を**図-6.4.3～図-6.4.4** に示す。本技術では，変位を水平方向と垂直方向で出力する。尚，本検証では変位計の方向が垂直になるように画像を回転させている。

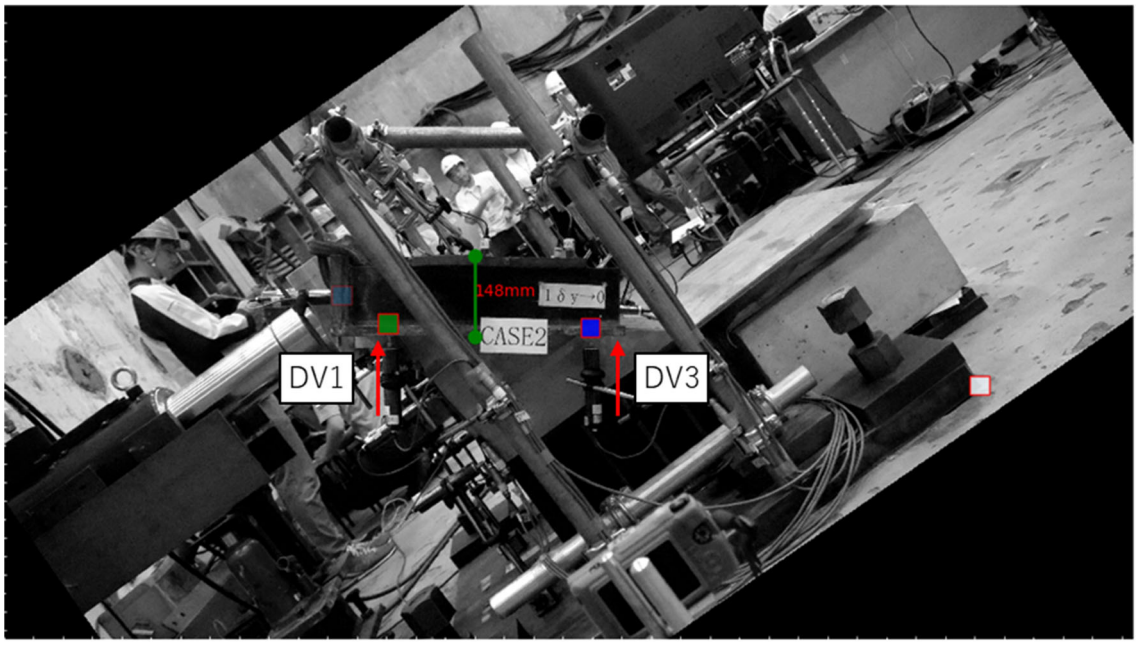


図-6.4.3 カメラ 1 の計測箇所

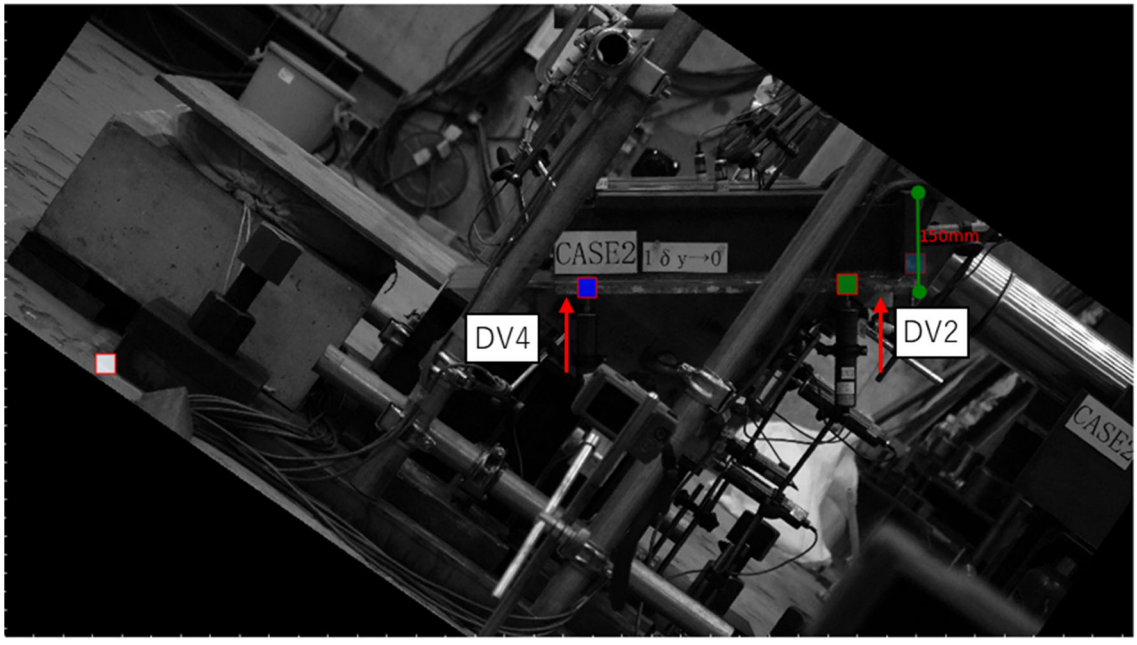


図-6.4.4 カメラ 2 の計測箇所

各計測箇所での計測結果を，図-6.4.5～図-6.4.8 に示す。

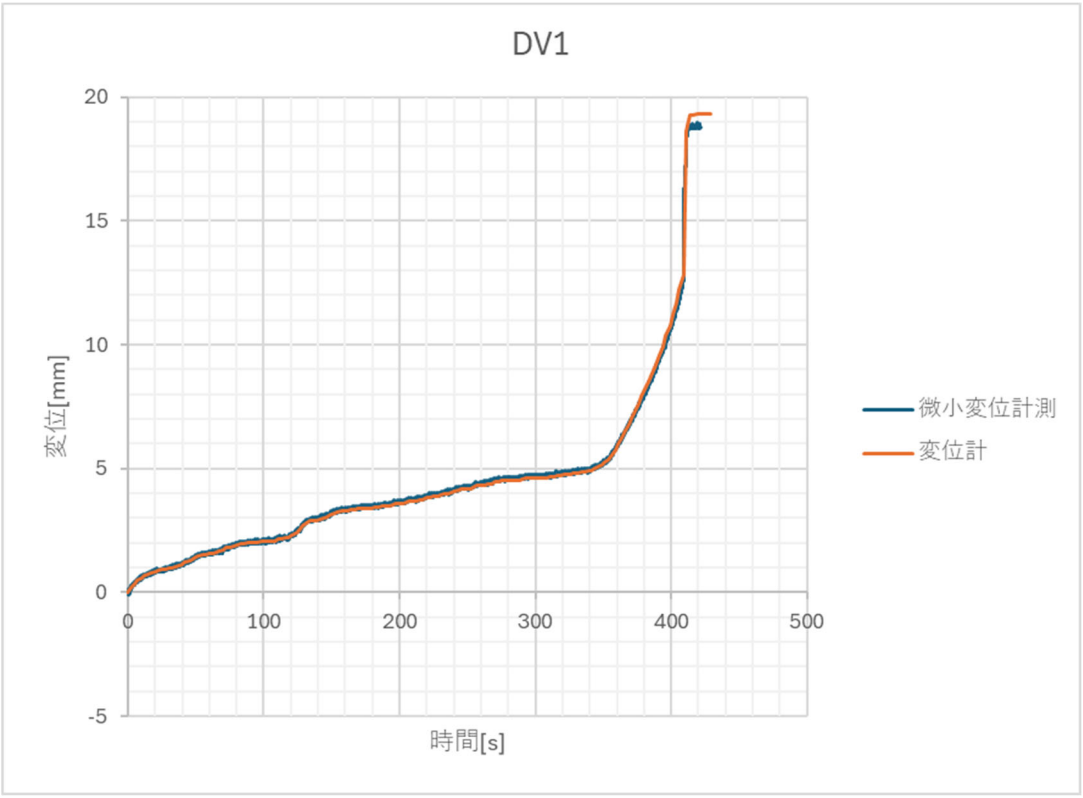


図-6.4.5 計測箇所 DV1（カメラ 1）の変位

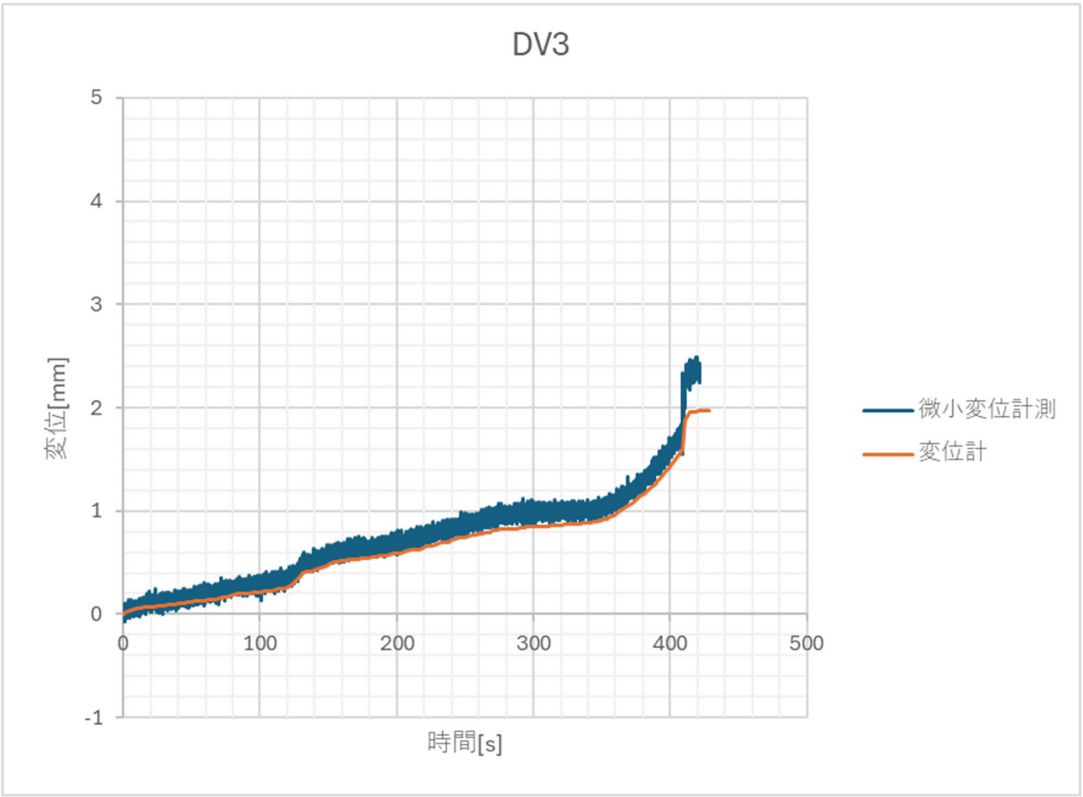


図-6.4.6 計測箇所 DV3（カメラ 1）の変位

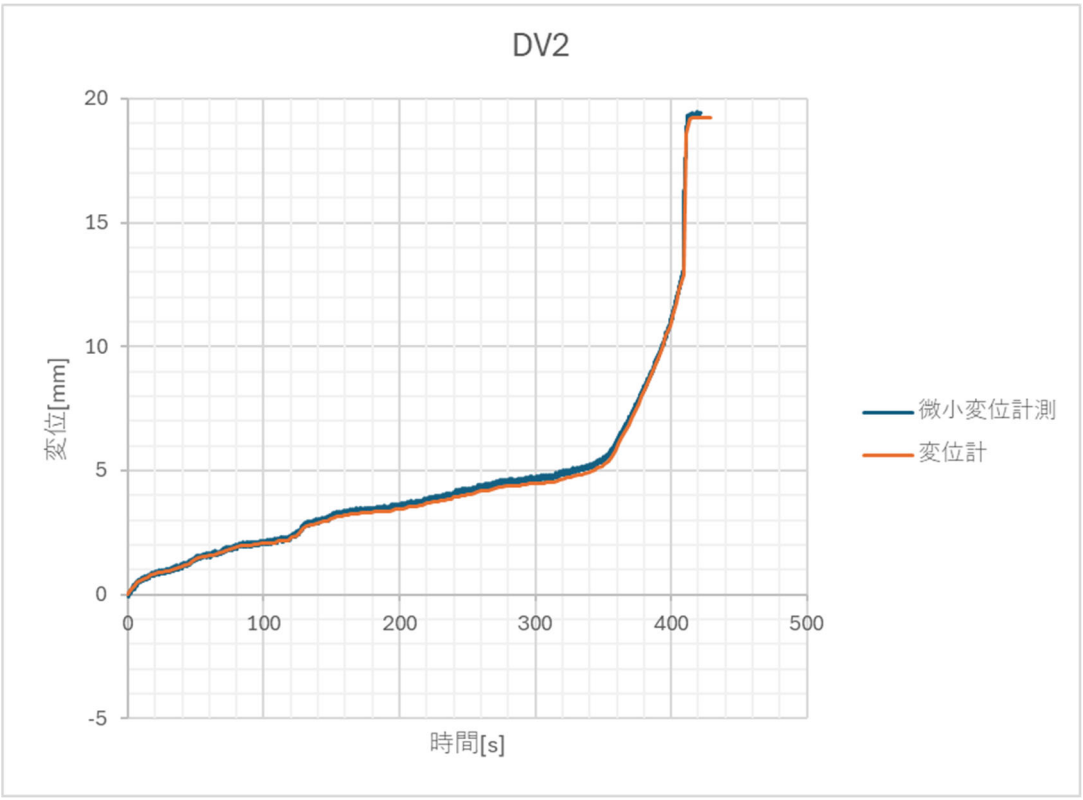


図-6.4.7 計測箇所 DV2（カメラ 2）の変位

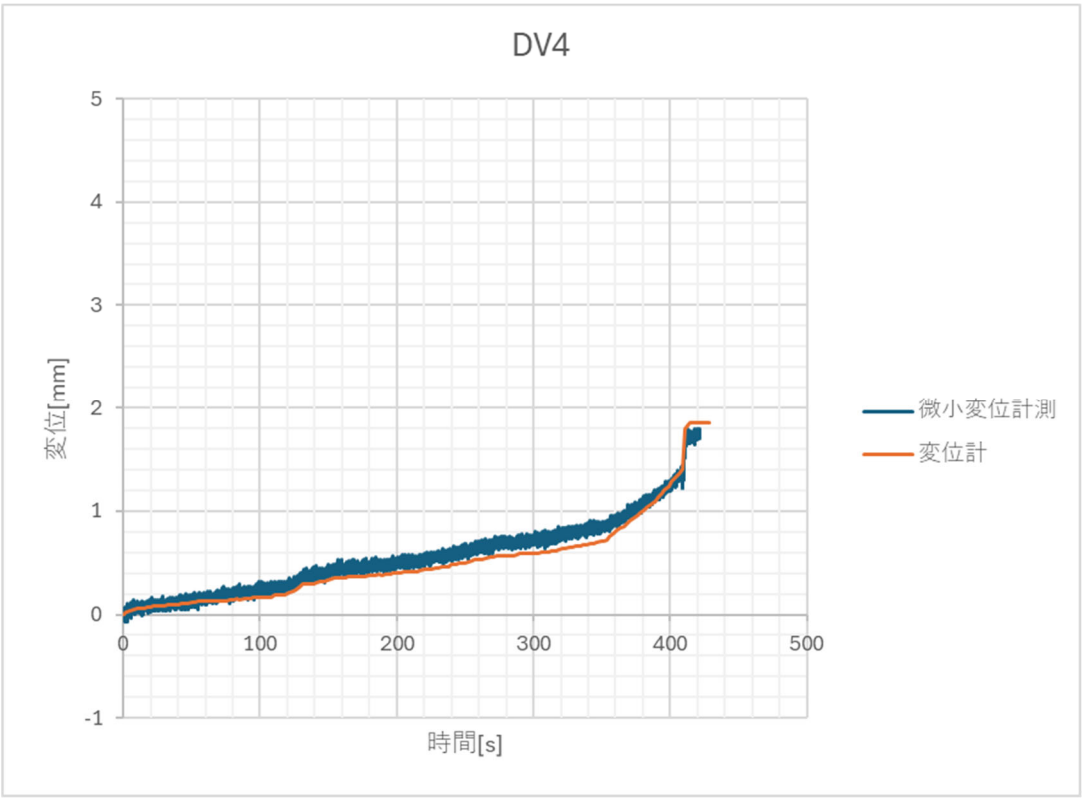


図-6.4.8 計測箇所 DV4（カメラ 2）の変位

全計測点の微小変位計測と変位計の関係を**図-6.4.9** に示す。

変位計に対する微小変位計測のずれは，平均：0.07mm，ばらつき 3σ：0.3mm となった。

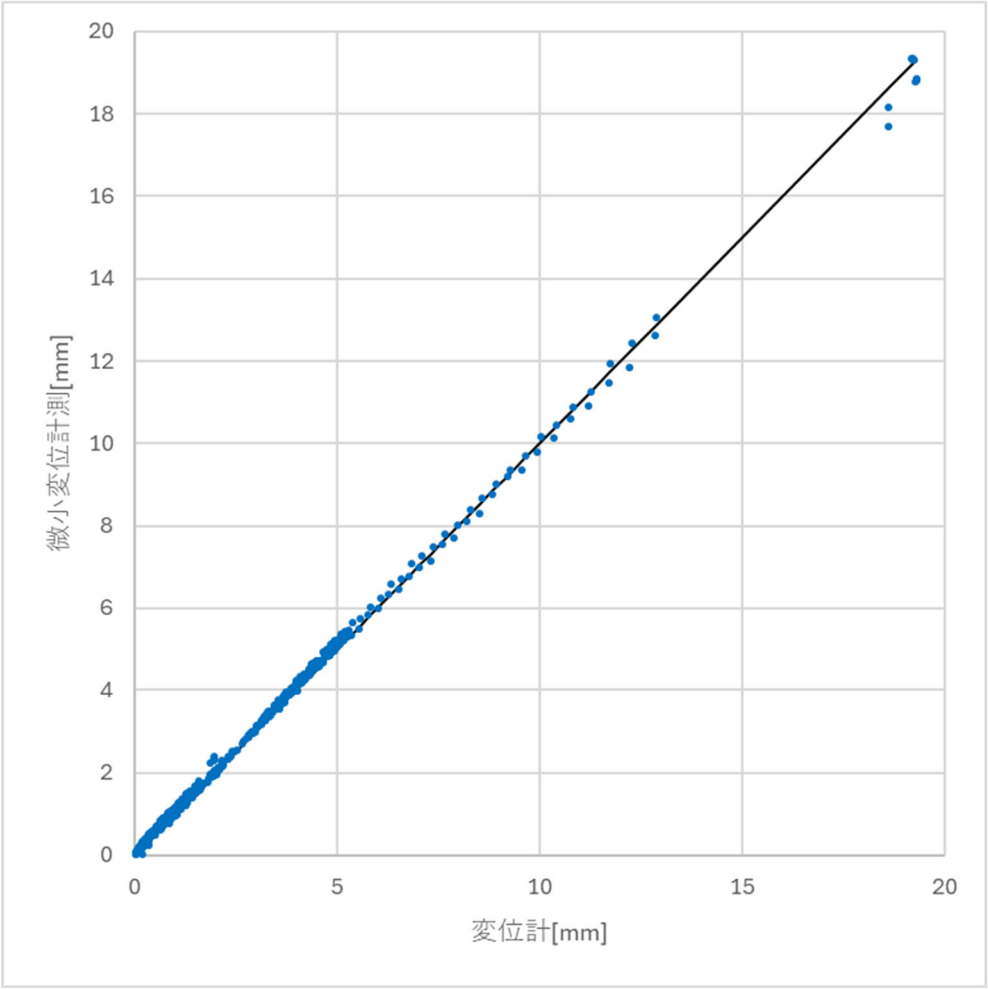


図-6.4.9 微小変位計測と変位計の相関関係

6.4.3　震後点検で想定される活用方法

本技術の特徴に照らせば，震後点検では次の活用方法が想定できる。

・橋梁の支承と桁端部の微小な動作を計測し，支承は正常に機能しているかを確認する。

・橋梁の桁のたわみ量を計測し，健全性と走行性を確認する。

・斜張橋ケーブルの振動モードを計測し，ケーブルの張力に緩みが無いかを確認する。

また，本技術は震後の点検にて次の利点があるものと考えられる。

・計測ポイントに何も付けたり貼り付けたりする必要はないため，安全確保が厳しい現場の中でも簡易的な計測が行える可能性があるほか，近接困難箇所の計測が行える。また，原状復帰の手間が不要である。
・過去の計測データがあれば，現在の状況と比較することで劣化進行状況を確認することができるが，過去のデータが無くても，動くべきでないところが静止しているか等の確認にて，構造物の健全性確認の可能性がある。

6.4.4　能登半島地震調査における試行例

（1）調査対象および調査目的

目視確認では挙動確認が困難な支承部を対象に，支承の各部の動きを可視化する目的で，動画撮影による計測を行うこととした。能登半島現場の橋梁の中で，車両通行時による支承の動作確認が可能な橋梁を対象に調査を実施した。

（2）計測方法および処理手順

支承に対して橋軸直角方向の位置にデジタルカメラを三脚にて設置して，動画撮影を行った。撮影した動画ファイルをパソコン上に保存し，保存したファイルを解析ソフトに取り込み，計測対象ポイントを指定し，各部の変位の解析を実施した。

なお，撮影時の風の影響でデジタルカメラに揺れが生じるため，支承の台座部を固定点（不動点）として計測を行うこととした。

各支承の位置を**図-6.4.10** に，各支承の計測ポイントを**図-6.4.11～図-6.4.14** に示す。

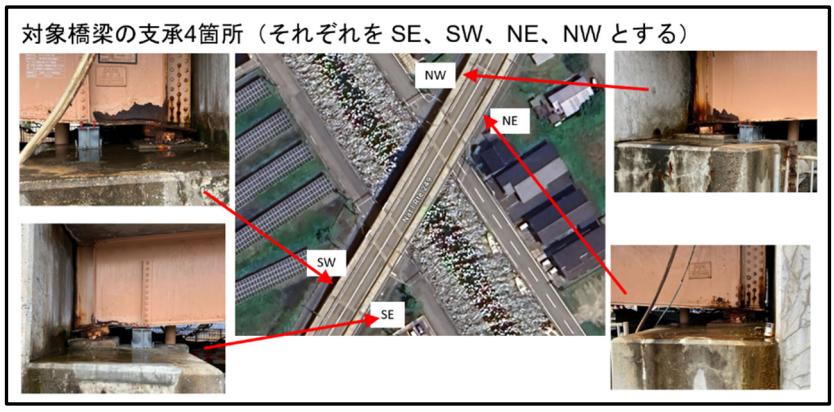


図-6.4.10　対象橋梁の 4 箇所の支承の位置



図-6.4.11　支承：SE の撮影画角と解析ポイント

デジタルカメラから支承部までの距離	：	6.5m
デジタルカメラの焦点距離	：	175mm
動画記録フレームレート	：	60fps
動画撮影時間	：	60 秒



図-6.4.12　支承：SW の撮影画角と解析ポイント

デジタルカメラから支承部までの距離	：	5m
デジタルカメラの焦点距離	：	118mm
動画記録フレームレート	：	60fps
動画撮影時間	：	104 秒



図-6.4.13　支承：NW の撮影画角と解析ポイント

デジタルカメラから支承部までの距離	：	4.5m
デジタルカメラの焦点距離	：	100mm
動画記録フレームレート	：	60fps
動画撮影時間	：	50 秒



図-6.4.14　支承：NE の撮影画角と解析ポイント

デジタルカメラから支承部までの距離	：	4.5m
デジタルカメラの焦点距離	：	100mm
動画記録フレームレート	：	60fps
動画撮影時間	：	66 秒

（3）計測結果

1）支承：SE の計測結果

支承：SE の変位ベクトル表示（倍率 400 倍）を図-6.4.15 に示す。桁端部の垂直変位-Y が下方向に大きい図中の③は，車両走行時の動作を可視化している。また，支承の回転機構の異常および桁の下フランジ変形部で車両通行時に折れ曲がりを示す挙動が確認できる。

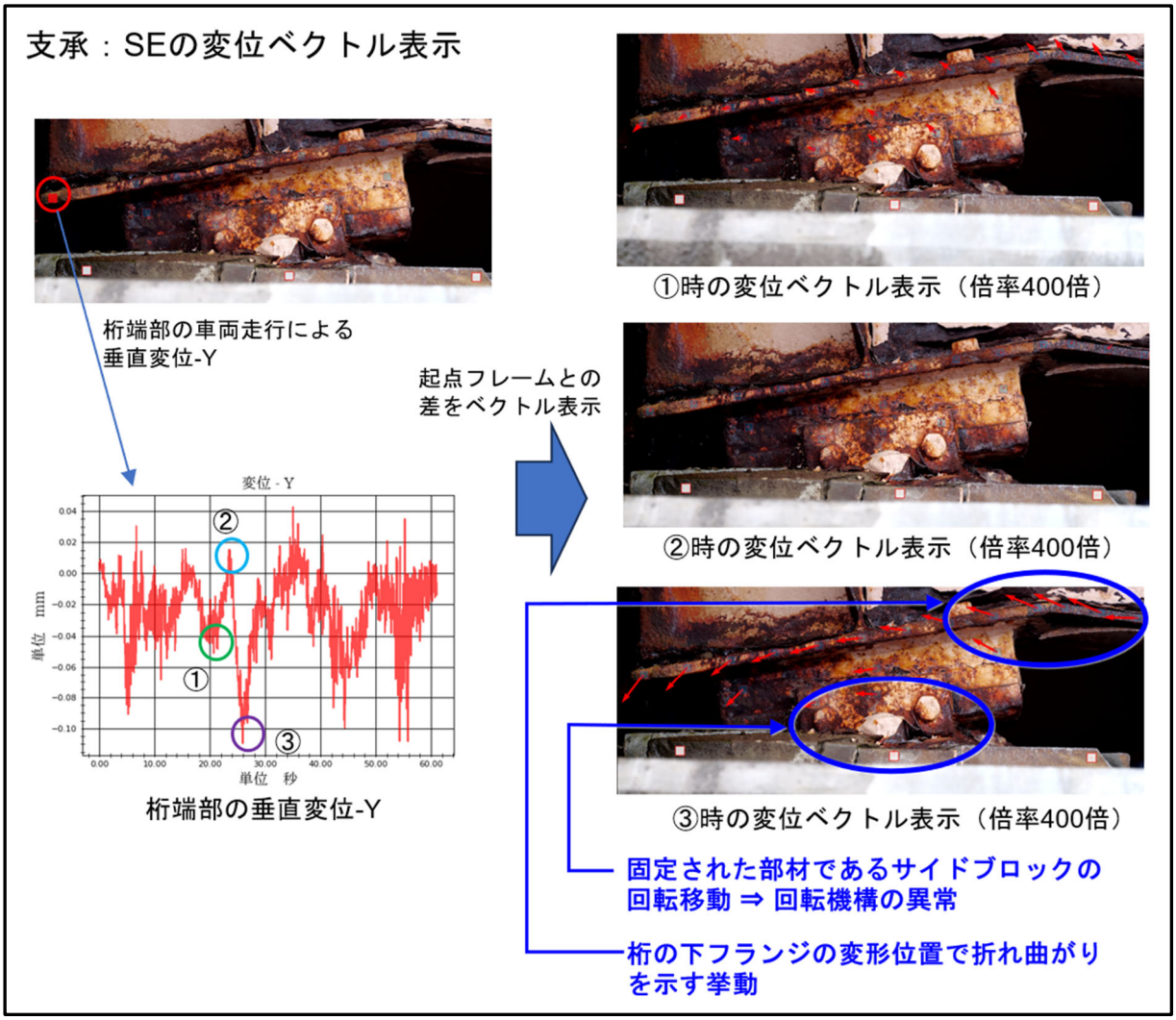


図-6.4.15　支承：SE の変位ベクトル表示（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

支承：SE の変位グラフを図-6.4.16 に示す。垂直方向の変位-Y については，緑の支承中心部を境に変位方向が異なっていることが確認できる。

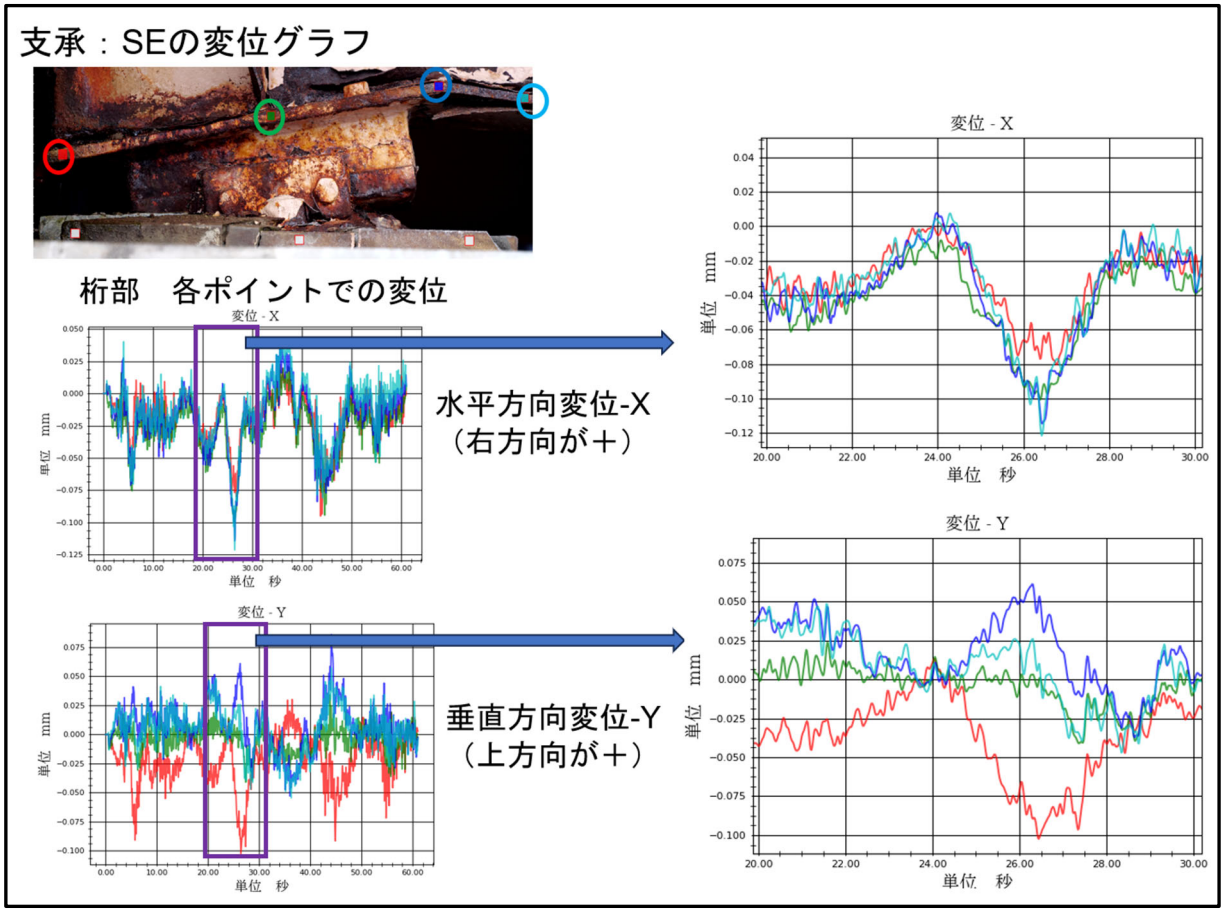


図-6.4.16　支承：SE の変位グラフ（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

2）支承：SW の計測結果

支承：SW の変位ベクトル表示（倍率 400 倍）を図-6.4.17 に示す。桁端部の垂直変位-Y が下方向に大きい図中の③は，車両走行時の動作を可視化している。また，支承の回転機構の異常および桁の下フランジ変形部で車両通行時に折れ曲がりを示す挙動が確認できる。

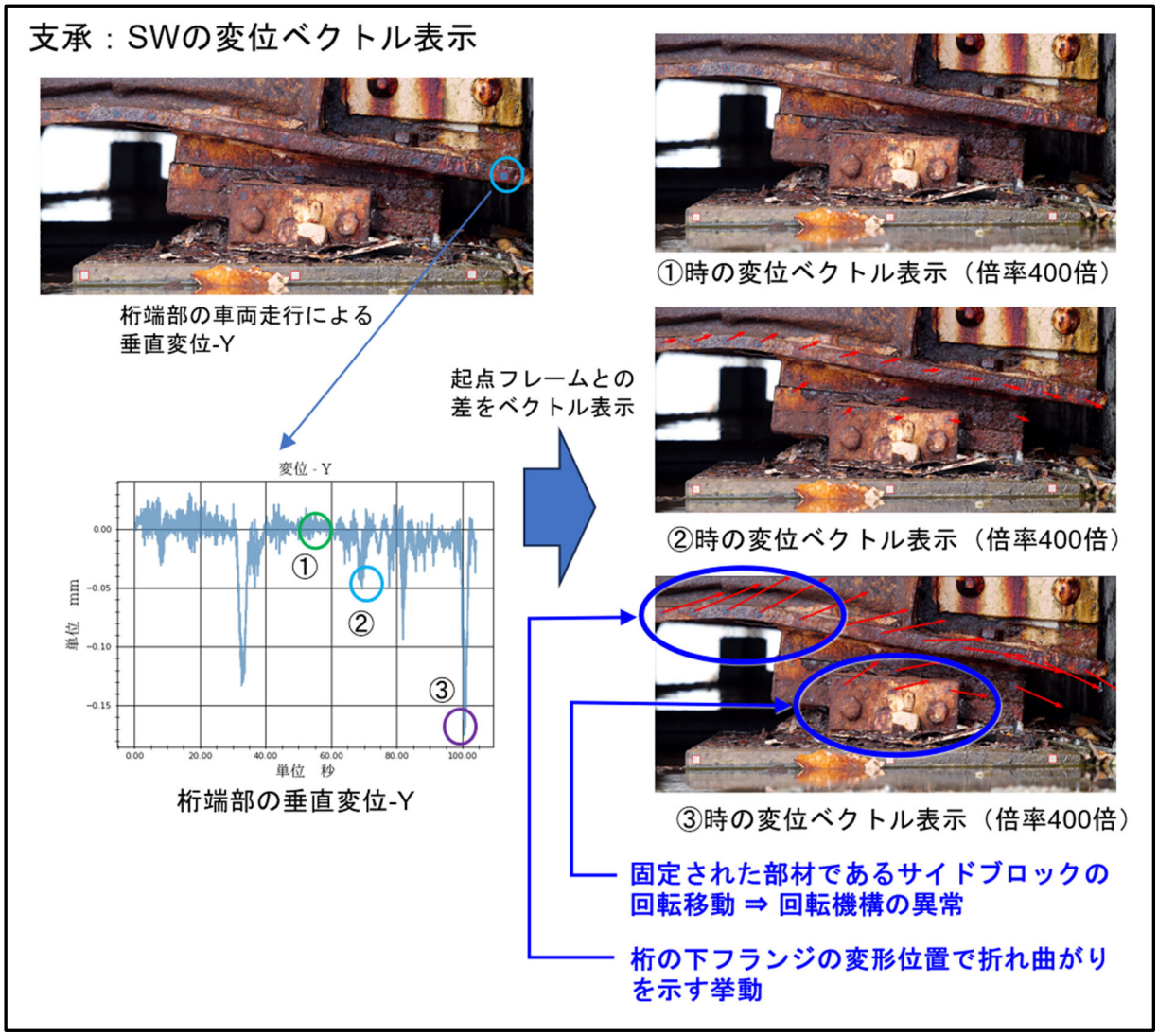


図-6.4.17　支承：SW の変位ベクトル表示（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

支承：SW の変位グラフを図-6.4.18 に示す。

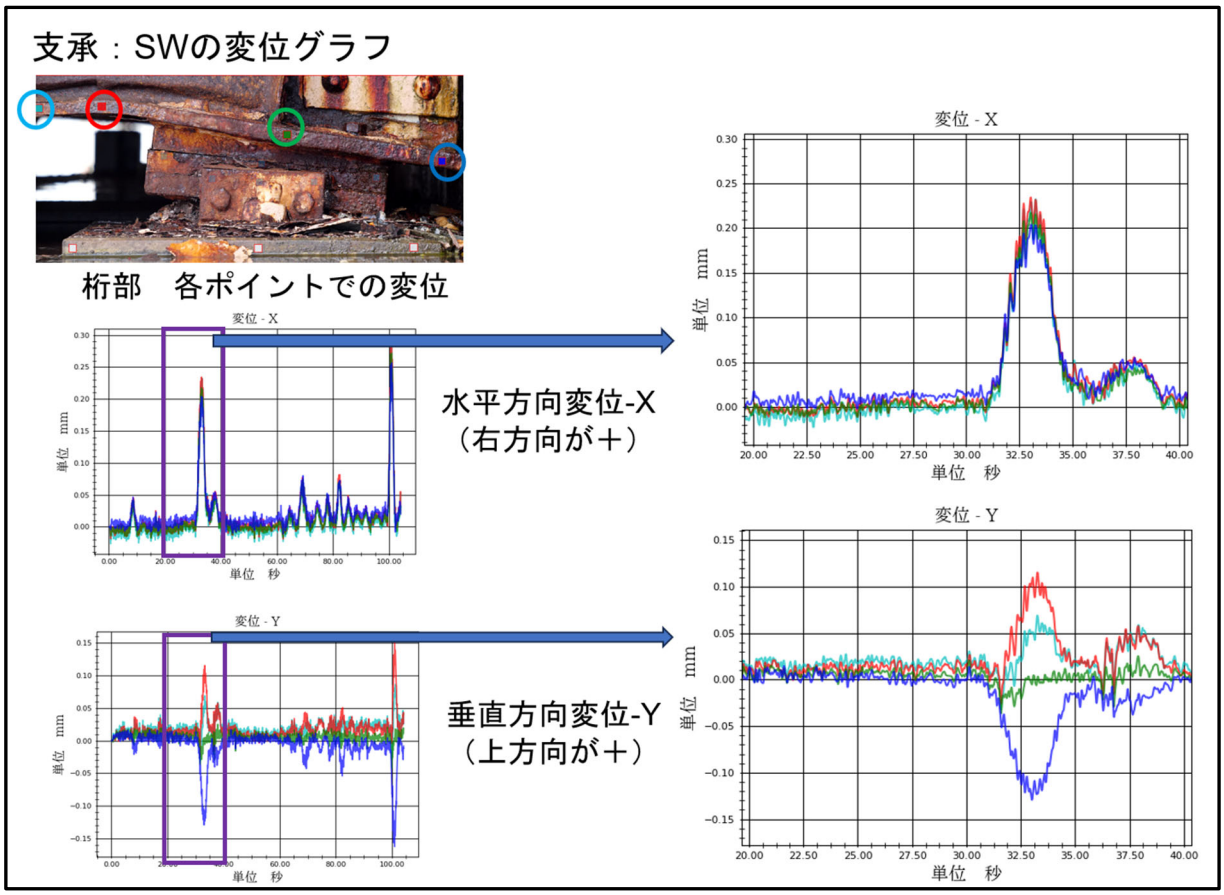


図-6.4.18　支承：SW の変位グラフ（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

3）支承：NW の計測結果

支承：NW の変位ベクトル表示（倍率 400 倍）を図-6.4.19 に示す。

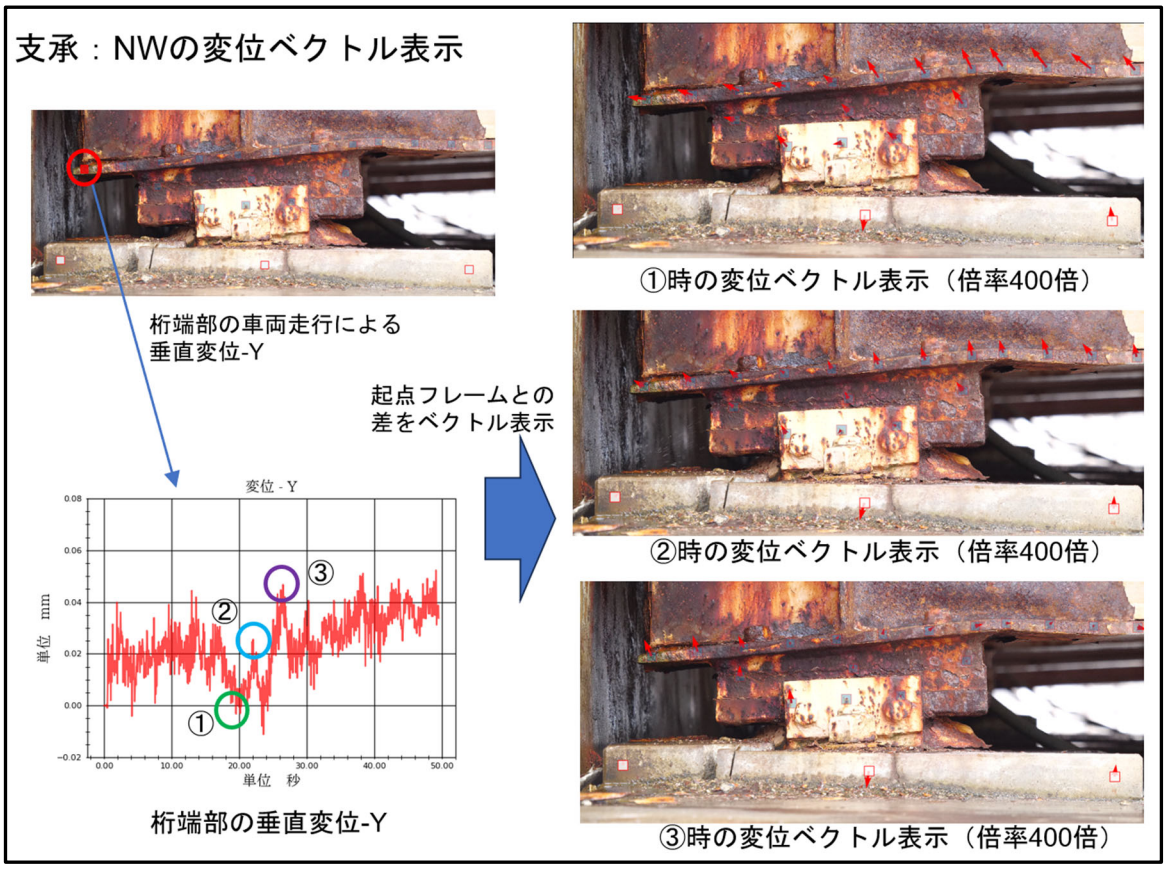


図-6.4.19　支承：NW の変位ベクトル表示（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

支承：NW の変位グラフを図-6.4.20 に示す。

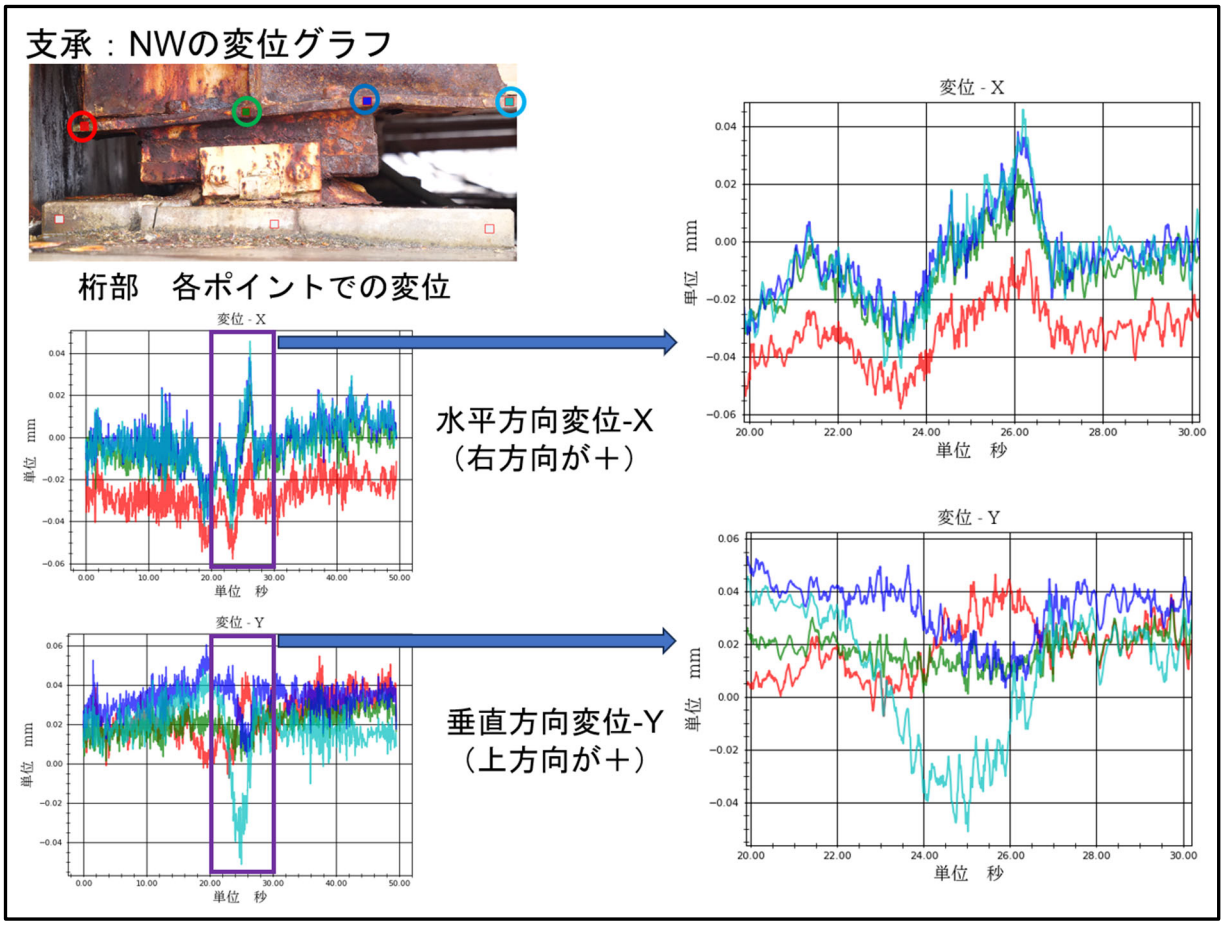


図-6.4.20　支承：NW の変位グラフ（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

4）支承：NE の計測結果

支承：NE の変位ベクトル表示（倍率 400 倍）を図-6. 4. 21 に示す。

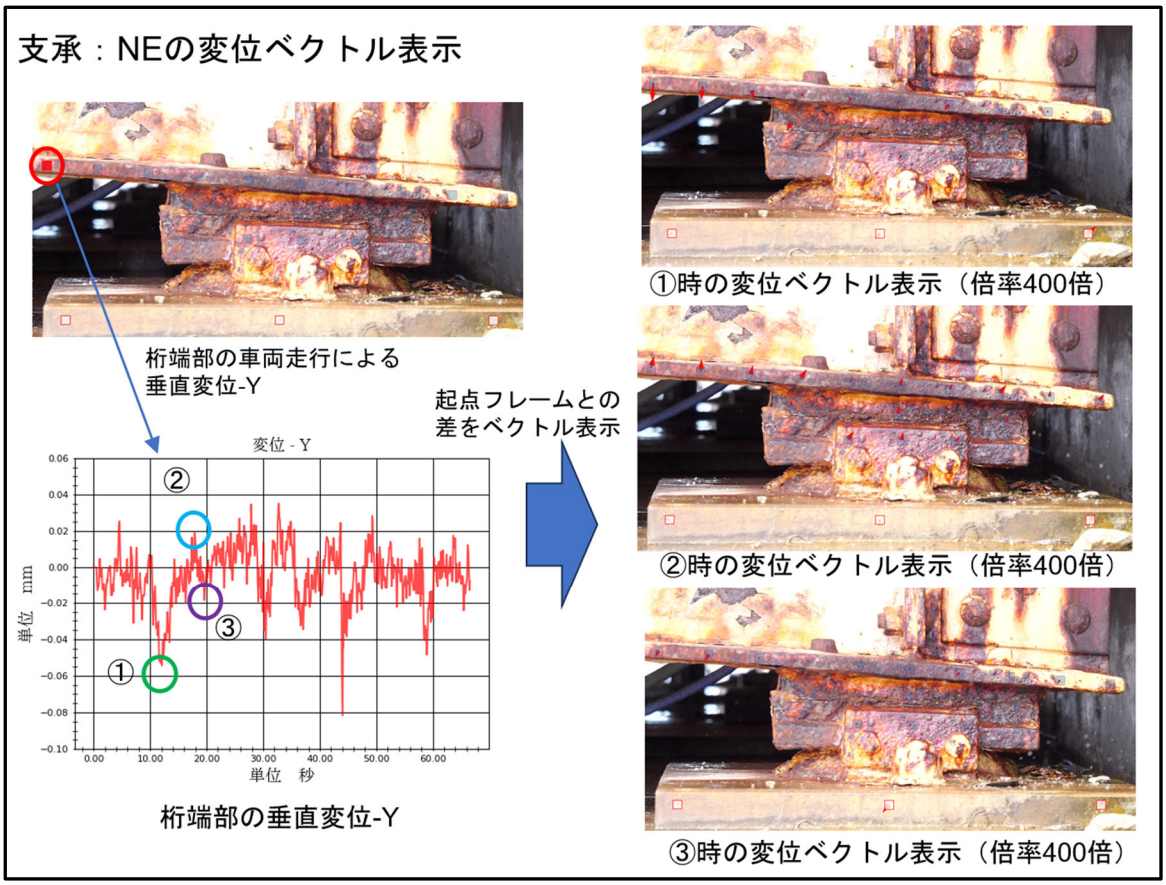


図-6. 4. 21　支承：NE の変位ベクトル表示（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

支承：NE の変位グラフを図-6.4.22 に示す。

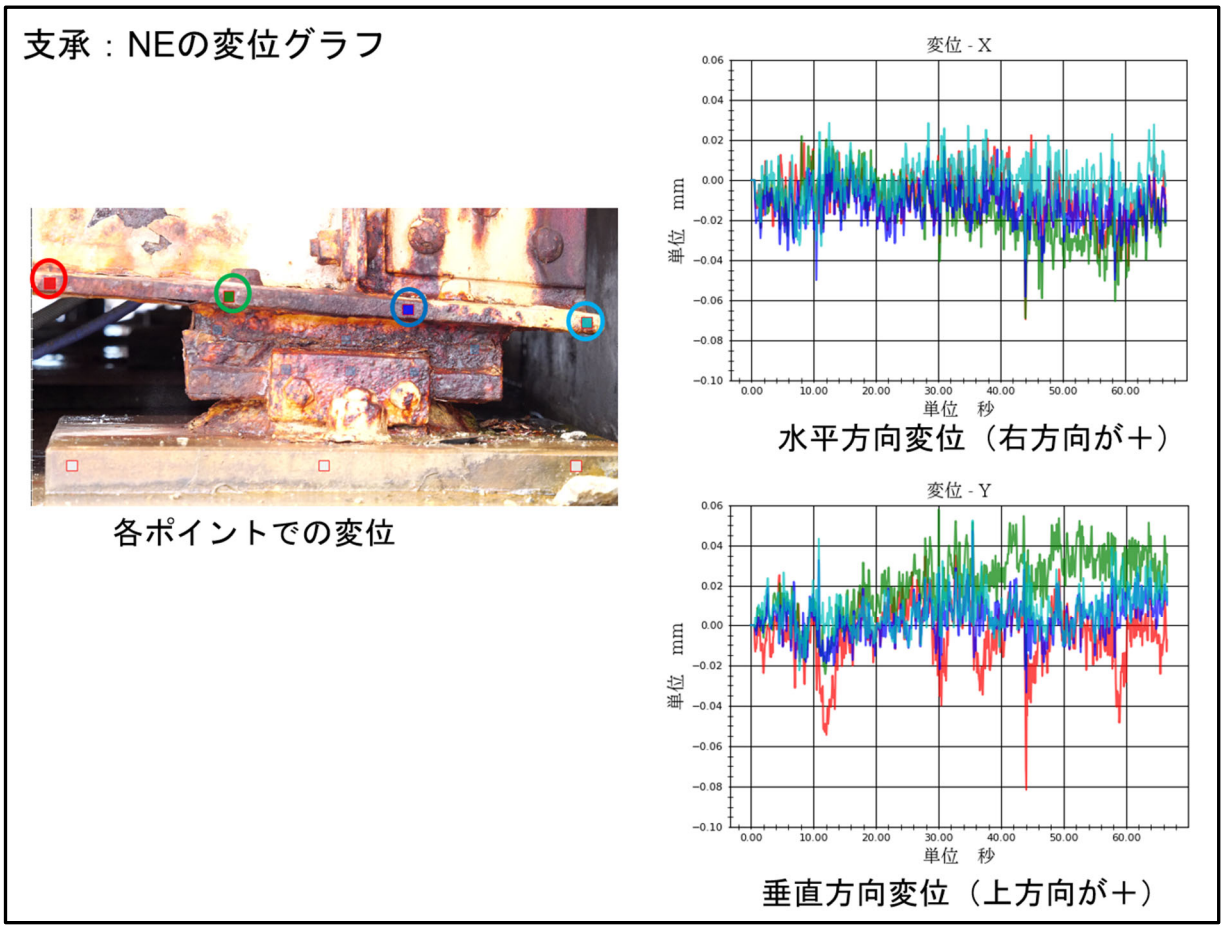


図-6.4.22　支承：NE の変位グラフ（グラフの X,Y は画面上での方向を示す）

(4) 試行結果

今回，本技術を用いて，地震で損傷した対象橋梁の支承部を計測した結果，確認できたポイントを下記に示す。

・SE，SW の支承については，桁の下フランジの変形位置を境に変位の移動方向が変わっている。車両通行時に変形位置で折れ曲がりを示す挙動となっていることが確認できる。

・SE，SW の支承については，固定された部材であるサイドブロックが回転しており，支承の回転機構の異常が確認できる。

従来の支承の計測手法の多くは過去の計測データとの差分比較により点検が行われるが，本技術は支承部の微小動作を可視化できることから，設計時の理想的な支承部挙動に照らせば，地震前のデータが無くとも震後点検が行える可能性があることを確認できた。また，肉眼での近接確認や打音確認等での点検が難しい支承部の動作確認に関しては，同時多点計測が行える光学式の本技術が有効と考えられる。

6．5　画像撮影技術

6.5.1　技術の概要及び計測の仕組み

（1）技術の概要

本項で用いる画像撮影技術は，手持ちのカメラ（一眼レフカメラを含む）やUAVに搭載されたカメラ，アクションカメラ等である。

（2）本項の検討で使用した機器

1）機器の仕様

事前の精度評価では以下の5つのカメラを使用した。使用した2種類のUAVのスペックは，UAVa（センササイズ：1/2.3型，35 mm換算の焦点距離：20 mm，画素数：4,056×3,040）と，UAVb（センササイズ：1型，35 mm換算の焦点距離：24 mm，画素数：5,472×3,648）である。3種類のカメラのスペックはカメラA（フルサイズ，焦点距離24 mm，画素数9,504×6,336），カメラB（1型，焦点距離24 mm，画素数5,472×3,648），カメラC（センササイズは非公開，焦点距離28 mm，画素数4,032×3,024）である。

2）使用条件

撮影は静止画で行い，カメラの条件は実際の現場での使用を想定しオートモードを使用した。

6.5.2　技術の精度評価

（1）精度評価の方針

画像撮影技術は汎用性に優れた技術であり，原理的には多くの変状を撮影できる。一方，震後点検では致命的な損傷の見逃しが許されないため，どのような環境条件下であれば確実に変状を取得できるかを明確にした上で使用することが望まれる。そのための検討を本項では行う。

なお，画像に映る変状は，人間が変状の有無を確認することを前提にすると定性的な指標である。最近はAI等で変状の有無を把握する技術もあるが，あくまで本項の主題は画像撮影技術であり，AI等が変状の有無を把握する場合でも人間が把握できることが重要であると考え，以下の検討を行った。

（2）損傷識別精度に影響を及ぼす要因及び精度評価の前提条件

画像に映る変状の識別精度に及ぼす要因としては，カメラのスペック（画素分解能，ISO感度等），ターゲットのサイズ，撮影距離，輝度や照度等多岐にわたる。これ以外にもあるが，本項ではスペックが異なるカメラを複数準備し，変状を模擬した幾何学模様（後述）のサイズを変更し，撮影距離を変えながら，照度条件も変えながら検討を行った。

(3) 損傷識別精度評価

本項では前述の通り，カメラの種類を変えながら，特に輝度コントラストや照度，撮影距離といった観測条件ごとの変状の視認性の違いを評価するための方法について検討を行う。一方，地震時の損傷は多種多様に存在する。そこで本研究では文献[6.5.1),6.5.2)]で取り扱われている多様な地震時の損傷を 2 次元画像上で識別するための幾何学的特徴として単純化し，集約し，分類することを試みた。

図-6.5.1 に被災事例と画像上の情報分類例を示す。画像上のあらゆる地震時損傷は部材を認識した上で最低でもここに上げる 4 つの幾何学的特徴の組合せを把握することで人は地震時損傷の有無を認識できることが可能であると考えられる。4 つの幾何学的特徴は，1) 連続した幅の情報，2) 十分に幅を持つ対象の境界線が角度を変えて移動する情報，3) 十分に幅を持つ対象の境界線が平行に移動する情報，4) 本来ないものに関する情報とした。

例えば，ひび割れや亀裂は，画像上では連続した幅の情報である。RC 橋脚基部の損傷はひび割れとしての連続した幅の情報に加え，橋脚の傾きは角度の情報である。損傷程度によっては本来ない異物の情報としてコンクリート片や，鉄筋がはらみ出した様子がある。支承部の大移動，支承部の部品の変形，ピン等の抜け出し等もこれら 4 つの幾何学的特徴として分類できると考えた。

あらゆる地震時損傷を幾何学的特徴に変換することで画素分解能や輝度コントラスト等といった 2 次元画像としてのパラメータと幾何学的特徴の視認性の議論に変換できる。そのように地震時損傷を幾何学的特徴に変換した上で，それら幾何学的特徴の画像上の視認性を論点とした検討を行う。また，それに加え，画像から判読できる可能性のある物理的指標等はその変形量や変形角，亀裂が橋梁の構造安全性の診断のための性能評価指標の閾値としてどのような工学的な意味を有するのかを念頭に置き検討を進める必要があると考えている。

この分類に基づいて作成した撮影対象が**図-6.5.2** である。4 つの幾何学的特徴に関する情報を模擬している．**図-6.5.2** (a)の亀裂等を模擬したパネルは木本・松田[6.5.3)]の検討を参考に，亀裂幅を変えた線と亀裂幅の視認性に輝度コントラストが及ぼす影響を把握するためにグレースケールを重ね合わせた。グレースケールについては RGB 値を(255,255,255)～(50,50,50)の 9 段階とした。亀裂を模擬した線の RGB 値は(0,0,0)である。また，設定した亀裂幅は 0.03～2.0 mm の 11 段階とした。また，画像は縦方向と横方向で画素分解能が異なるため 2 方向のパネルを作成した。

図-6.5.2 (b)の変形角を模擬したパネルは 0.5 °～45 °までの 8 段階の角度の線を記載した。地震時には支承部の部品や橋脚等，地震力を受けた様々な部材が角度を変えて変形している，あるいは，傾斜していることがある。支承部の鋼部品については 1°よりも十分に小さい変形角が生じた時点で降伏より深刻な塑性化に至っている場合が想定される。例えば，林ほか[6.5.4)]で示されている橋梁のサイドブロックで想定される変形角の計算値の 0.17 °はその変化が近接目視や画像上で視認できるとは限らず，また，降伏に至った状態でも破断していなければ耐力を受け持つことは可能であるとの工学的判断に基づき目視でも把握できる可能性がある 0.5 °を最小角度として設定した。

図-6.5.2 (c)は変形量および移動量および六角ナットを模擬したパネルである。変形量については

RGB が(0,0,0)の黒帯同士の差を 0.1 mm～10 cm までの 11 段階で設定した。地震時には様々な部材で様々な変形量が生じ得る。例えば鋼部材の降伏時の変位量は 1 mm に満たない。アンカーボルトの抜け出し量は数 mm～数 cm 程度である場合が多い。遊間の移動は数 cm 程度～数十 cm 程度である場合が多い。段差量は 2～3 cm の段差が定常走行の限界であり 10 cm 以上の段差は緊急車両が徐行で走行できる限界とされている [6.5.5)]。このように，変形量や移動量については点検対象とする部材に応じて様々である。

また，異物や外観の異常については変状の大きさが様々であり寸法を決定することが困難であるため，支承部の部品の中で比較的小さい部品であり，かつ，多くの支承に同じ大きさの規格品が使用されるナットの寸法を指標とした。ナットがナットとして視認できれば支承を構成する他の部品，あるいは支承より大きい部材等も視認できると考えた。

図-6.5.3 にパネルを用いた実験の概要を示す。**図-6.5.3** の撮影対象の位置に**図-6.5.2** の 4 種類のパネルを設置した。パネルの設置位置は地震時には支承部や橋脚基部が損傷しやすいため支承部の位置 A，橋脚天板付近の位置 B，橋脚基部周辺の位置 C の 3 箇所とした。後述の UAV では 3 箇所の撮影対象を撮影したが，カメラでは位置 C の撮影のみ行った。**表-6.5.1** に撮影対象位置での平均 lux 値を示す。

実験は 2 種類の UAV と 3 種類のカメラを使用し，撮影対象の距離を変更させながらそれぞれの撮影対象の静止画を撮影した。距離は 0.76，1.0，1.2，2.0，3.0，4.0，5.0，7.4，10.0，11.8，15.0，20.0 m の 12 段階を基本とし，撮影機材の性能により接近できない場合は撮影を行わなかった。また，画像撮影を実施した日は雨風の無い，快晴の日を選択した。

使用した 5 種類のカメラは前述の通りである。撮影は静止画で行い，カメラの条件は現場での使用を想定しオートモードを使用した。分析は，撮影距離を変えて撮影した画像を PC のディスプレイ画面上で拡大し，どこまで視認できるかを調査した。

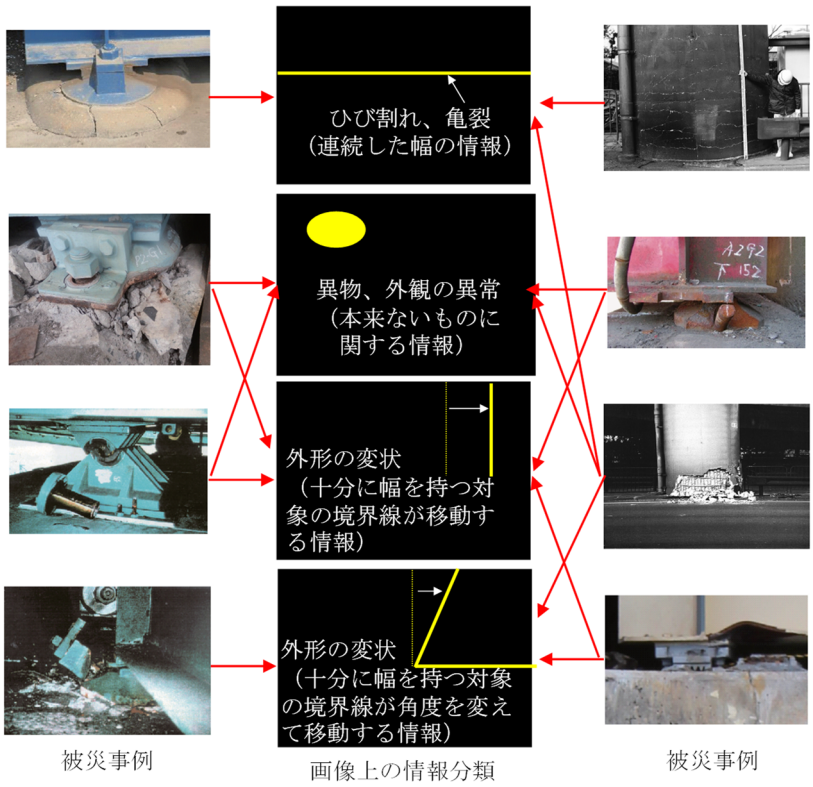


図-6.5.1　被災事例と画像上の情報分類例

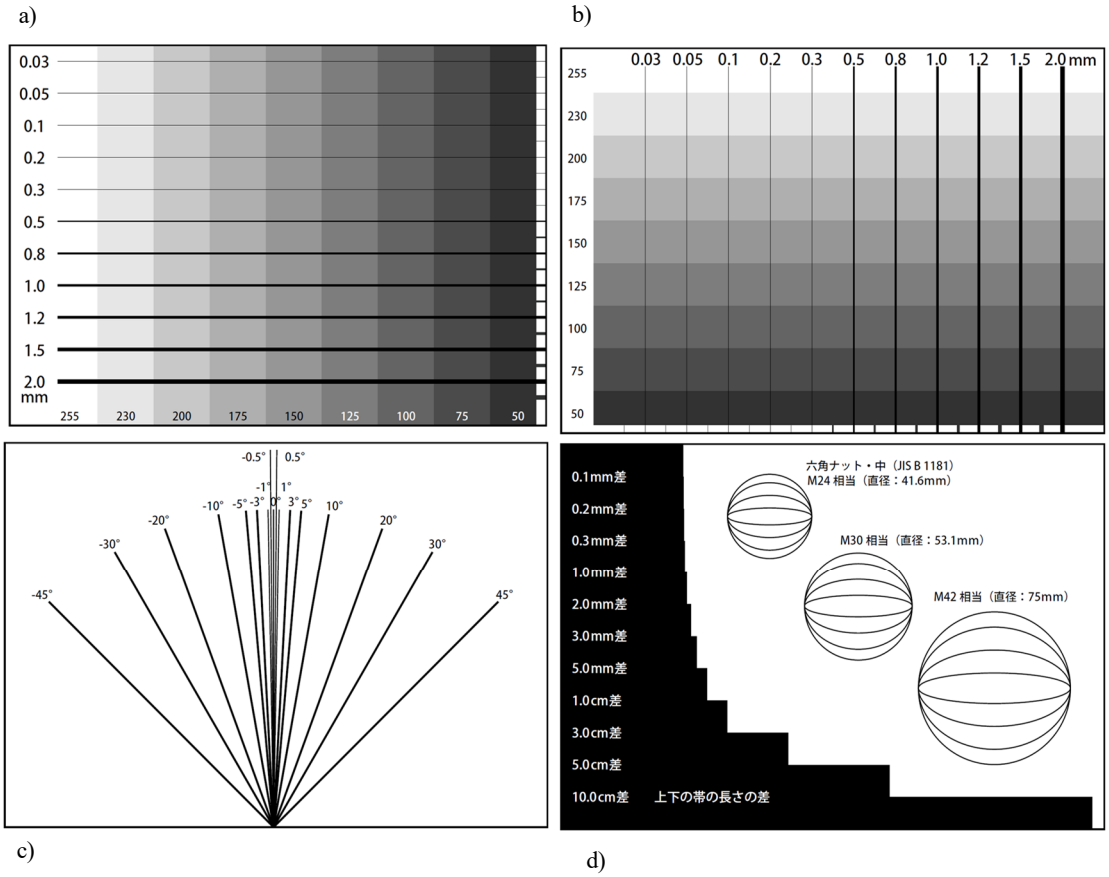


図-6.5.2　作成した撮影対象（実際は 4 種類のパネルそれぞれが A4 サイズである）

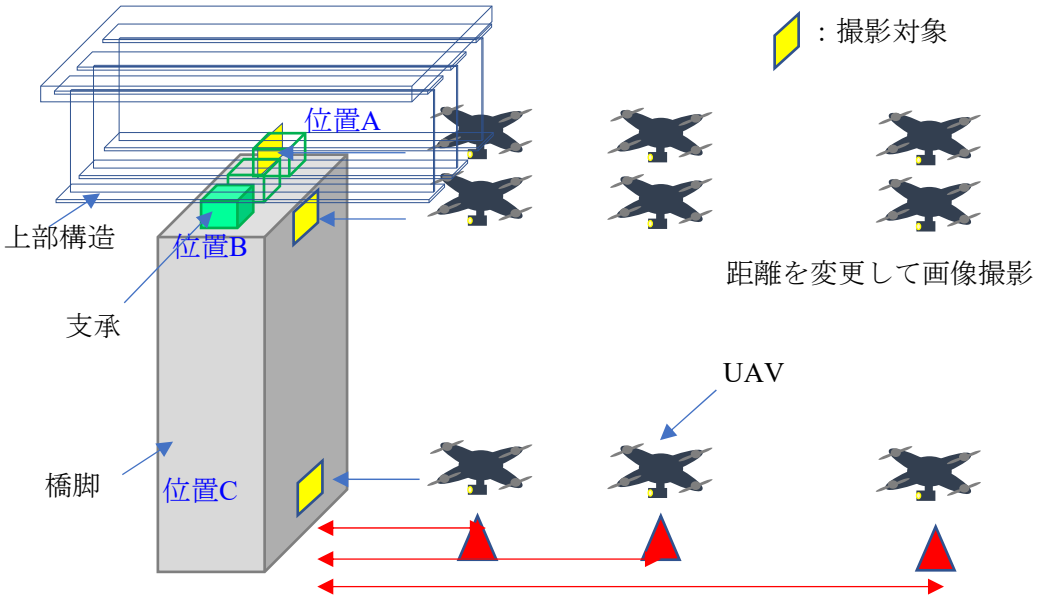


図-6.5.3　実験方法

表-6.5.1　撮影対象位置での平均 lux 値

	UAVa，カメラ A, B, C	UAVb
位置 A	1,305 lux	375 lux
位置 B	2,040 lux	1,450 lux
位置 C	3,340 lux	2,600 lux

4)　観測条件別の撮影距離と把握できる幾何学的特徴の関係

図-6.5.4 に撮影距離別の撮影対象の画像上の見え方の違い（UAVa の例）を示す。撮影距離が離れるほど，模様に対する分解能が低下し，視認性が低下することがわかる。このような撮影結果からどこまで視認できるかを調査する。

図-6.5.5 に，撮影距離と識別可能な幾何学特徴の関係を示す。これら図は，撮影距離ごとに識別可能な幾何学的特徴の程度を整理しており，損傷検知に関するカメラの性能曲線である。凡例の数字は RGB 値である。亀裂を模擬した実線の RGB 値は(0,0,0) 輝度コントラストが明瞭な条件であり，RGB 値が(50,50,50)は輝度コントラストが不明瞭な条件である。ただし，輝度コントラストは照度等の条件により変化する。特に支承部や鋼部材の塗装の色は多様であるため，同じ撮影距離でも，おおよそこの範囲で輝度コントラストに応じて，認知可能な亀裂幅がばらつくと推測される。

図-6.5.5 (a)において，UAVa は撮影対象から 0.76 m まで近接可能であり，UAVb は 3.0 m まで近接可能であった。対象に近接する能力は UAVa が優れている。しかし、RGB 値が(125,125,125)の条件においては，同じ亀裂幅 0.2 mm を視認するために UAVa は 1.0 m まで近接する必要があり，UAVb は

3.5 m まで近接する必要があった。損傷が検知可能な精度について，撮影可能距離とカメラの性能の 2 つに依存していることがわかる。カメラの性能や輝度コントラスト等の撮影条件によって，視認可能な亀裂幅が大きくばらつくことがわかった。

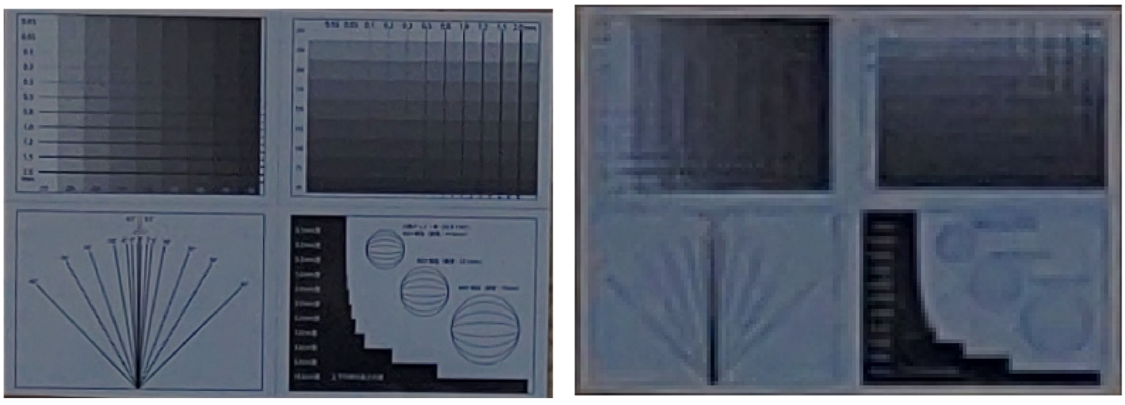
図-6.5.5 (b)に撮影距離と識別可能な変形角の関係を示す。鋼部材の変形角は僅かであっても降伏している可能性があるため，可能な限りそれを検知したい。例えば変形角 1°であれば，機体 A に搭載されたカメラであれば 3 m まで，機体 B に搭載されたカメラであれば 5 m まで近接する必要がある。

図-6.5.5 (c)に撮影距離と識別可能な変形量や移動量の関係を示す。変形量については，他の幾何学的特徴と比べ差が小さい。おおよそ 5.0 m 離れた位置から，2 mm の変形量や移動量を視認できる見込みがある。

また，六角ナットを模擬した円は，撮影距離 20.0 m 以内ではそれが視認できなくなることは無いと推測された。六角ナットを模擬した円は，撮影距離が離れるにつれて線がぼやけて見えなくなるが，その線が描かれた領域は 20.0 m 離れても把握できるため，M24（直径 41.6 mm）が認識できなくなることは無いと考えられる。

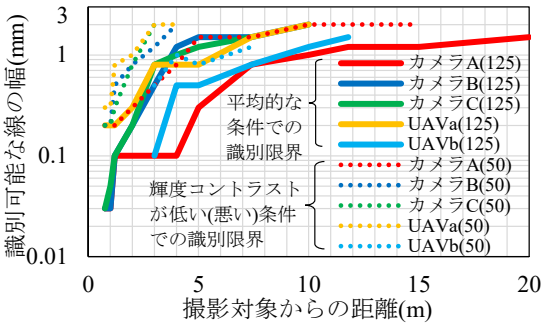
また，位置 A～C の違いによる照度の差は，性能曲線に及ぼす影響は小さく，撮影距離が損傷検知精度に支配的な影響を及ぼすことが明らかとなった。

以上の検討により，点検指標である各種幾何学的特徴と，撮影距離の性能曲線例が示せた。例えば対象から 10.0 m の撮影距離では，2 mm 以上の亀裂幅（RGB 値が(125,125,125)の場合），5°以上の変形角，10 mm 以上の変形量が把握できる見込みがある。点検者が把握したい損傷に応じて撮影距離を変更することが望まれる。

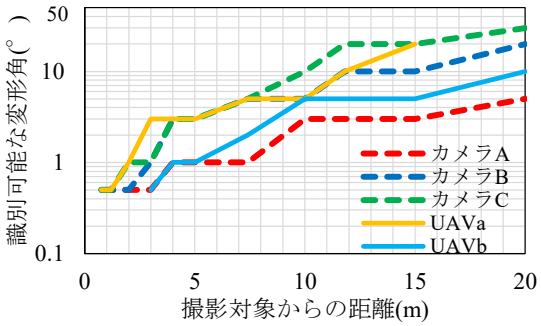


(a) 3 m 離れた位置からの撮影写真　　(b) 10 m 離れた位置からの撮影写真

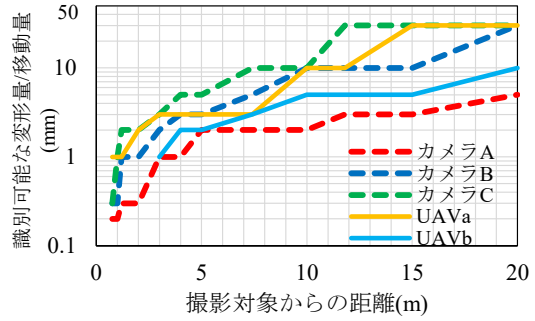
図-6.5.4 撮影距離が変わった際の視認性の違い（UAVa の例）



(a) 撮影距離と識別可能な線の幅の関係



(b) 撮影距離と識別可能な変形角の関係



(c) 撮影距離と識別可能な変形量や移動量の関係

図-6.5.5　撮影距離と識別可能な幾何学特徴の関係

5)　実変状を用いた能力評価結果の検証

前項の検討では,紙面に描かれた幾何学模様に対して検討を行ったが,実際の損傷は立体的であり,輝度コントラストや影の入り方等の観測条件も異なる。そこで，実際の地震時損傷に対して，撮影距離を変えた前項と同様の実験を行い，評価結果の検証を行った。

写真-6.5.1 に，実際の地震時損傷を受けた支承と破壊試験後のコンクリートブロックを示す。当該支承は，2022 年 3 月 16 日 23:36 に発生した福島県沖地震（Mj=7.4）で被災した支承である。それを譲り受け，実験のために**写真-6.5.1** のように地面に設置した．また，支承は実環境に近い条件で撮影するために，日陰を模擬するための木製のフランジを取り付けた。これら支承には，上下沓のずれや，ピンの破断および抜け出し，セットボルトの破断，部材の移動等が生じている。支承は 2 基（支承-1，支承-2）であり，ABCD は面の区別である。

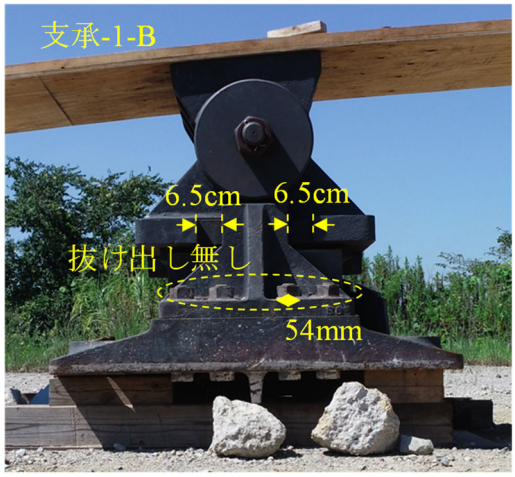
また，支承-2 の下にあるコンクリートブロックは地震による実損傷ではないが，正負交番による破壊試験を行った後のコンクリートブロックを切り出したものである。これを用いて様々なひび割れ幅の視認性を検討した。

これら実物に対して，撮影距離を変え UAV による静止画撮影を行った。**図-6.5.6** に実物を用いた検証実験の概要を示す。距離を 1，3，5，7.4，10，11.8，15，20 m と変えながら撮影を行った。前項と同様に撮影は静止画で行い，カメラの条件は現場での使用を想定しオートモードを使用した。分析は撮影距離を変えて撮影した画像を PC のディスプレイ画面上で拡大しどこまで視認できるかを調査した。ここでは，UAVa の結果を示す。

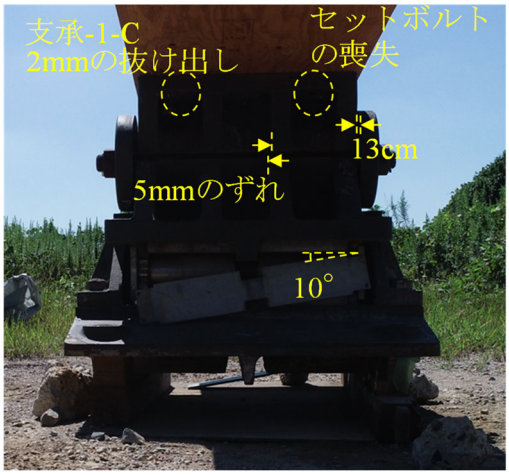
図-6.5.7 に UAVa での検証結果を示す。グレーで示した**図-6.5.5** の性能曲線の上に，実損傷の識別可否判読結果をプロットしている。紙面上の幾何学模様に基づいた性能曲線と，実損傷の視認性判読結果がおおよそ整合することがわかる。特に**写真-6.5.1 (e)** と**写真-6.5.1 (f)** の通り，コンクリートのひび割れ幅の視認性に関して，コンクリート部とひび割れ部の輝度コントラストは大きく，ひび割れが明瞭である。コンクリート部の RGB 値は約 150 程度であり，**図-6.5.2 (a)** では RGB 値が 125 と 255 の間の線に該当する。そのような分析からも性能曲線と実損傷の判読結果が整合している。

また，識別可能な変形角については実損傷の事例数が少ないものの，不整合な結果とはなっていない。識別可能な変形量については撮影対象からの距離が 20 m の観測条件において，一部性能曲線の上側で識別不可なものがあったが，それ以外は整合している。性能曲線と不整合となったものは，**写真-6.5.2** の箇所であり，支承の塗装が暗色であり輝度コントラストが低く結果として視認性が不足したと推察される。

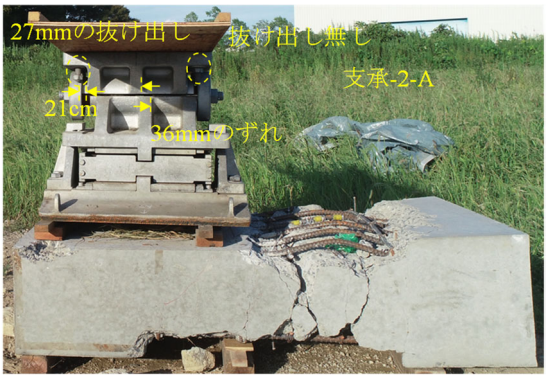
以上の結果から，前項の性能曲線で損傷の視認性に関するカメラの能力をほぼ確認できることが検証された。一方，確認線の幅だけでなく，移動量や角度に輝度コントラストが及ぼす影響を考慮する等の改善点があることが示された。



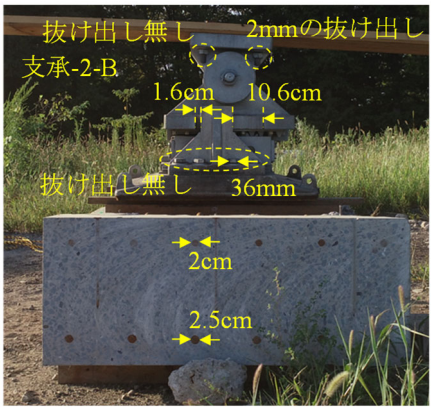
(a) 支承-1 の面 B の変状



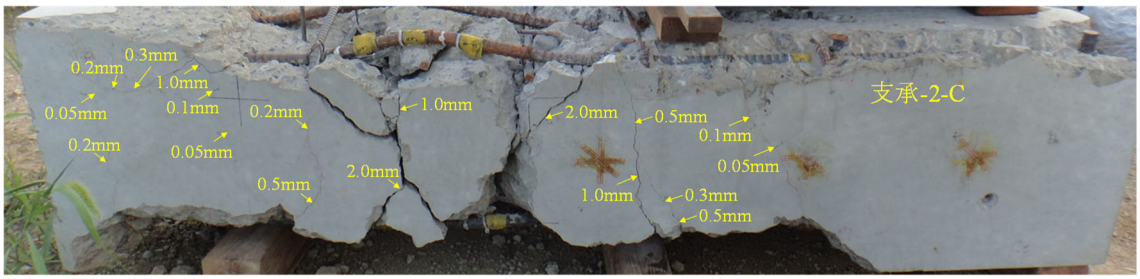
(b) 支承-1 の面 C の変状



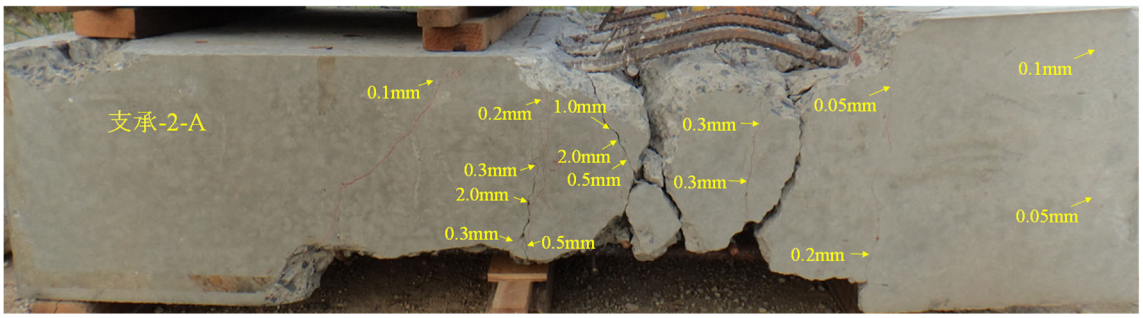
(c) 支承-2 の面 A の変状



(d) 支承-2 の面 B の変状

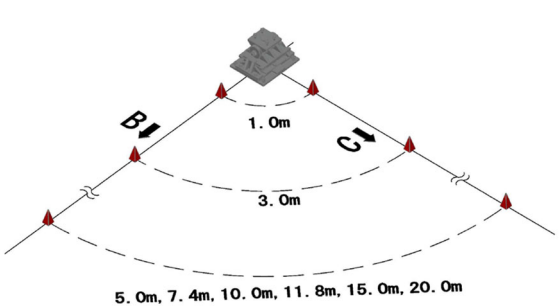


(e) コンクリートブロックの面 C の変状

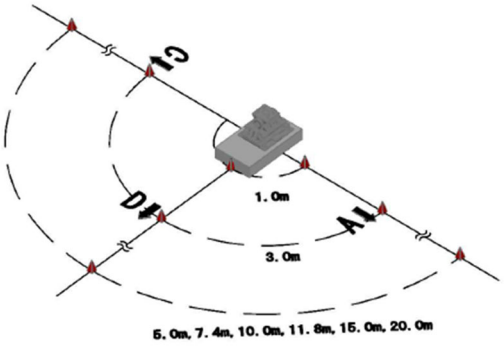


(f) コンクリートブロックの面 A の変状

写真-6.5.1 地震で損傷した支承と破壊試験後のコンクリートブロック

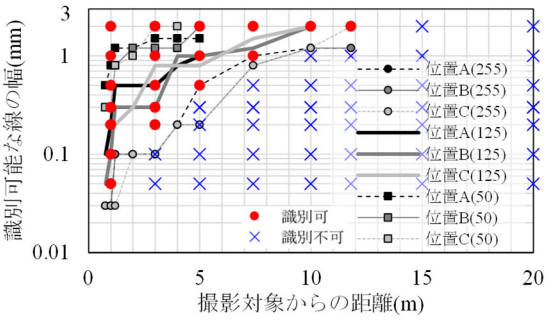


(a) 支承-1 の実験概要

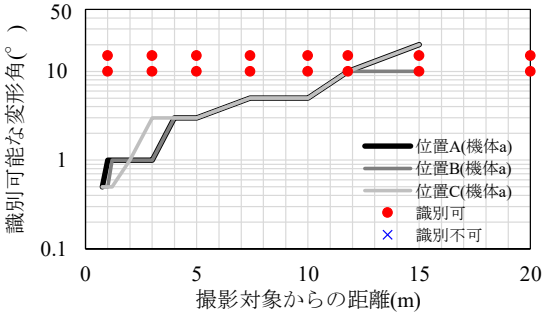


(b) 支承-2 の実験概要

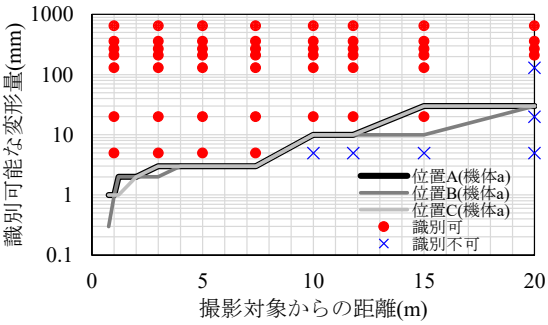
図-6.5.6　実物を用いた検証実験の概要



(a) 撮影距離と識別可能な線の幅の関係



(b) 撮影距離と識別可能な変形角の関係



(c) 撮影距離と識別可能な変形量や移動量の関係

図-6.5.7　撮影距離と識別可能な幾何学特徴の関係（UAVa での検証結果）

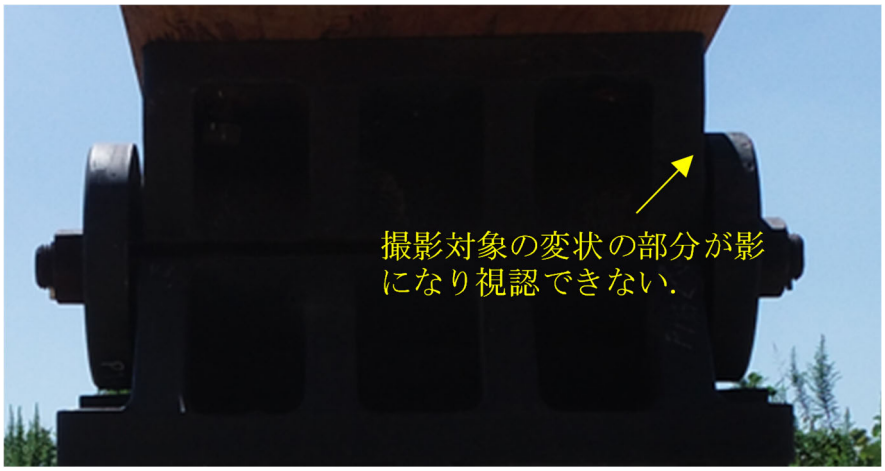


写真-6.5.2　視認性が不十分な画像の例

6.5.3　評価結果を用いた運用例

6.5.3.1 活用計画

本節では令和 6 年（2024 年）1 月 1 日 16:10 に石川県能登地方を震源とする Mw7.6 の地震で被災した道路橋を対象に筆者が点検した事例を示す。点検前には，以下の 3 ステップを経て点検手段を選択および事前の想定をした。

1) 点検調査の目的に照らして収集すべき変状を想定する（後述の a)に該当）。

2) その変状を検出するために必要となる撮影距離を**図-6.5.5** から想定する（後述の b)に該当）。

3) 点検調査の方針および手段を明確にする（後述の c)に該当）。

図-6.5.5 に基づくことで，画像撮影技術の能力の限界を把握した上で，点検の目的に応じた点検手段の選択できる点がポイントであると考えている。

a)　点検調査の目的と収集すべき変状の想定

初動の緊急調査や応急調査に技術を活用することも望まれるが，本研究では緊急用務空域が完全に解除（2 月 14 日）された後 [6.5.6)]の 2 月 26 日～27 日の調査を例に用いる。この時期は本復旧のための調査を進めている段階に該当し，そのため変状をできるだけ網羅的に収集し，恒久的な復旧の方針を立案するための情報収集を行う必要があった。なお，本調査は道路管理者や道路管理者から依頼を受けた点検技能者が行う調査（目視点検等）を模擬したものである。

表-6.5.2 に本復旧のための調査の計画立案にあたり，事前に想定していた変状の一例を示す。**表-6.5.3** は**表-6.5.2** の根拠の一部である。部材の寸法や構造細目等により部材性能を評価するための物理的指標（点検で取得したい変状）が変化する。最も小さい部類の変状は鋼製部材の変形・変形角やひび割れ幅等である。鋼製部材の亀裂については亀裂幅だけでなく，亀裂長さや深さ等も重要であり，鋼部材の亀裂は他の変状と比べ相対的に小さい場合が多い。

b)　カメラの能力および撮影距離の想定

今回，近接撮影点検に用いたカメラは 2 種類ある。前述の UAVa と自撮り棒に取り付けたアクションカメラ（SJCAM SJ11 Active（1/2.8 型，焦点距離 20 mm，画素数 14M，以下カメラ D と呼ぶ。）である。アクションカメラは変形を正確に検出するために，魚眼レンズではなく，できるだけ歪みが少ないものを選択した。また，本研究で使用した自撮り棒は長さが 5m である。

ここで，カメラ D については事前の能力確認を行っていないが Auto で撮影することを前提とすると，スペックは UAVa に最も近いことから UAVa の性能曲線（**図-6.5.5**）を目安値として援用した。UAVa の性能曲線によると撮影距離と把握できる見込みのある変状の関係の目安は**表-6.5.4** の通りである。

表-6.5.2 の物理的指標と比較すると，小さい部類の変状（0.1 mm の幅や，0.17 °の変形角，1 mm の変形量／移動量）の取得は困難である。

c)　点検調査の方針および手段

足場が無いことを前提にした点検手段として本研究では以下と**写真-6.5.3** にある 5 つの手段を組合せて震後点検を行う方針とした。

I)　人による近接目視点検

II-1) 自撮り棒による近接撮影点検（橋面から撮影）

II-2) 自撮り棒による近接撮影点検（地上から撮影）

III-1) UAV による近接撮影点検（橋面から操縦）

III-2) UAV による近接撮影点検（地上から操縦）

なお，**写真-6.5.3** に使用した写真は実際の調査の様子であり，本研究で用いた写真は全て能登半島地震被害調査で撮影したものである。

部材の寸法によって診断のために取得する必要がある変状の大きさは様々である（**表-2**）が，前述の点検目的（変状をできるだけ網羅的に収集し，恒久的な復旧の方針を立案するための情報収集を行う必要がある）に照らし，できるだけ近接目視点検（I）を行い，人が近接できない場合は現場条件に応じてできるだけ近接してカメラで撮影する手段（II-1～III-2）を取ることとした。

また，どの手段を用いるかは現場で判断する方針とした。これは， 震後点検でも予め xROAD（全国道路施設点検データベース）[6.5.13)]等で定期点検結果の確認や地図の確認等を行うものの，1) 突発的に生じた地震で現地がどのような状態であるかは調査前には不明であり，2) 予め桁下高さ等を加味した点検計画を立てる時間的余裕が無いためである。ここで 1) については，例えば**写真-6.5.4～6.5.7** のように電柱や木が倒れ本来何もない空中を電線や枝が覆い UAV の飛行や自撮り棒の使用が困難な状況，盛土の崩壊や落石等により道路や人道が寸断し近づけない状況，電線や路面の崩壊等で近づくことが危ない状況，通信や電機等のライフラインが断絶している状況等が該当する．大規模地震発生直後にはこのような状況の想定が必要である。

なお，本研究で取った手段は定期点検での「自らの近接目視によるときと同等の信頼性で健全性の診断を行うことができる情報が得られると判断した方法」[6.5.14)]の条件を満たす方法ではないと考えている。なぜならば，b) で述べた通り今回使用したカメラで近接撮影点検を行っても取得できない変状があり，それら変状の中には診断等の技術的な判断に必要な情報であり，近接目視点検で取得できるものも含まれるためである。本研究では震後点検を対象としているため，足場が無いという制約条件の中で取り得る手段を前提に点検計画を考えている。

表-6.5.2　調査の計画にあたり，事前に想定していた変状の一例

No.	取得したい損傷の例	部材性能を評価するための物理的指標	備考
1	ゴム支承（□1,350×450 を仮定）耐久性限界のせん断ひずみ量：70%	水平変位：210 mm 変形角：35 °	文献 6.5.7)に基づく計算値．ゴム総厚 300 mm を仮定.
2	ゴム支承（□1,350×450 を仮定）部材の限界状態 1 のせん断ひずみ量：112.5 %	水平変位：338 mm 変形角：48 °	文献 6.5.7)に基づく計算値．ゴム総厚 300 mm を仮定.
3	ゴム支承（□1,350×450 を仮定）部材の限界状態 3 のせん断ひずみ量：250 %	水平変位：750 mm 変形角：68 °	文献 6.5.7)に基づく計算値．ゴム総厚 300 mm を仮定.
4	ゴム支承（□400×230 を仮定）耐久性限界のせん断ひずみ量：70%	水平変位：149 mm 変形角：35 °	文献 6.5.7)に基づく計算値．ゴム総厚 149 mm を仮定.
5	ゴム支承（□400×230 を仮定）部材の限界状態 1 のせん断ひずみ量：112.5 %	水平変位：167 mm 変形角：48 °	文献 6.5.7)に基づく計算値．ゴム総厚 149 mm を仮定.
6	ゴム支承（□400×230 を仮定）部材の限界状態 3 のせん断ひずみ量：250 %	水平変位：373 mm 変形角：68 °	文献 6.5.7)に基づく計算値．ゴム総厚 149 mm を仮定.
7	ボルト類の抜け出し	設定が困難（本研究では 1mm 程度のオーダーを仮定）	本研究での仮定であり，値に根拠は無い.
8	部品の移動（遊間等を想定．1mm 程度のオーダーで移動がわかれば 1cm の変化は検出できると仮定）	設定が困難（本研究では 1mm 程度のオーダーを仮定）	本研究での仮定であり，値に根拠は無い.
9	支承部品の降伏時の残留変形（サイドブロックの降伏による残留変形の例）	0.17 °	文献 6.5.4)より引用．計算値.
10	RC 橋脚の降伏相当ひび割れ	軸方向鉄筋降伏：0.2 mm	表-3 の既往の試験体試験結果より引用．降伏時のひび割れ幅は，寸法や配筋により変化する.
11		帯鉄筋降伏：0.1mm	
12	橋面段差量	1 cm	文献 6.5.8)における定常走行の限界値である.
13	周辺地盤の変状	設定が困難	
14	・・・		

表-6.5.3 RC 橋脚試験体（模型）の降伏相当ひび割れ幅

No.	既往の文献	試験体（模型）の詳細	ひび割れ幅
1	高橋ほか（2009）[6.5.9]	RC 柱（曲げ破壊型），HW：200×240 主筋：SD295，帯筋：SD295	帯筋降伏時：0.1mm 主筋降伏時：0.2mm
		RC 柱（せん断破壊型），HW：200×240，主筋：SD785，帯筋：SD295	帯筋降伏時：0.1mm
2	大髙ほか（2004）[6.5.10]	RC 柱（せん断破壊型），HW：300×300，主筋：SD345，帯筋：SD295A	0.1～0.2 mm
3	文野ほか（2001）[6.5.11]	RC 柱（曲げ破壊型），HW：200～500，鋼材は SR 材	0.2 mm 前後
4	柳瀬ほか（2002）[6.5.12]	RC 梁、PRC 梁（せん断破壊型），HW：300×200，主筋：SD495，帯筋：SD295A	0.2 mm 程度 （※PC 梁の事例）

表-6.5.4 UAVa の性能曲線に基づく撮影距離と把握できる見込みのある変状の関係の目安

撮影距離	把握できる線の幅の目安	把握できる変形角の目安	把握できる変形量／移動量の目安
1 m	0.2 mm（0.3 mm）	0.5 °	1 mm
2 m	0.3 mm（1 mm）	1 °	2 mm
3 m	0.8 mm（2 mm）	3 °	3 mm
5 m	0.8 mm	3 °	3 mm
10 m	2 mm	5 °	10 mm

※ 線の幅の目安で（）内の数値は輝度コントラストが低い（悪い）条件での識別限界である．把握できる線の幅の目安値は，輝度コントラストに大きく依存する．



(I)　近接目視点検



(II-1) 近接撮影点検
(自撮り棒を橋面から降ろし，撮影)



(II-2) 近接撮影点検
(自撮り棒を地上から持ち上げ，撮影)



(III-1) 近接撮影点検
(操縦者が橋面にいる状況で UAV を操縦)



(III-2) 近接撮影点検
(操縦者が地上にいる状況で UAV を操縦)

写真-6.5.3　本研究で検討する 5 つの点検手段



写真-6.5.4　電柱が倒れている現場



写真-6.5.5　落石がある現場



写真-6.5.6 河川の護岸が崩壊している現場



写真-6.5.7　地盤災害の現場

6.5.3.2 実践

表-6.5.5 に点検対象とした道路橋およびその部位の適用事例を示す。これらは前項で立てた計画に基づき，実際に点検を行った道路橋の一例である。前述の通り点検手段は，できるだけ近接目視点検（I）を行い，人が近接できない場合は現場条件に応じて近接撮影点検（II-1～III-2）を実施した。この中の 3 事例を自撮り棒や UAV で撮影した画像を交えて紹介する。

a) A 橋の例

A 橋は，橋長 210 m の 3 径間 PC 連続ラーメン橋である。**写真-6.5.7** に A 橋の調査写真例を示す。

A 橋周辺では斜面崩壊や地すべりが多発しており，地盤変状の概況把握に UAV を使用した。また，A1 橋台のように規模の大きい破壊が生じている場合は，近接撮影では逆に変状の位置関係がわからないため，被災メカニズムの推定のために UAV で橋台全体を撮影した。

また，ラーメン橋では橋脚基部と隅角部での塑性化が設計時に想定される場合が多いが，ラーメン隅角部については近接撮影点検を橋面からの自撮り棒による撮影（II-1）と操縦者が地上を移動しながら UAV による撮影（III-2）を行ったが，2-3 m 程度まで近接したいずれの写真にもひび割れが確認されなかった。2 m まで近接撮影しているため，**表-6.5.4** から少なくとも 0.3 mm より幅が大きいひび割れは無いと言える。

b) E 橋の例

E 橋は，橋長 80 m の鋼単純上路ワーレントラス橋である。**写真-6.5.8** に E 橋の調査写真例を示す。この道路橋は山奥に位置しており，桁下にアクセスするための人道・獣道すら無い現場条件であった。

そのため，現地で自撮り棒や UAV の使用を試みたが，以下の理由で支承部の点検が出来なかった。一つ目は桁高が非常に高い形式の上部構造であったため，5 m の自撮り棒では橋面から支承部を確認することが出来なかったためである。

二つ目は桁下にアクセスするための人道・獣道すらない現場条件であったため，桁下に操縦者が移動できず目視内飛行の範囲で桁下点検が出来なかったためである。そのため，橋面から操縦者が UAV の位置を確認できる範囲での写真や橋面の写真しか撮影できなかった。

なお，E 橋については別途，道路管理者から依頼を受けた点検技能者が桁下に到達し近接目視点検を実施していることをここで補足する。自撮り棒や UAV を用いた近接撮影点検が出来なかった事例として価値があると考えここに掲載しているが，交通開放にあたっては人による点検を行った上で判断が下されている。

c) G 橋の例

G 橋は，橋長 46 m の鋼単純ランガー橋である。**写真-6.5.9** に G 橋の調査写真例を示す。この事例は，1) 基本的には人による点検で十分である一方，2) 人による点検でも画像撮影技術による点検で

も診断に必要な変状の全てを収集することが困難であった事例である。

1) については画像撮影技術で収集できる情報は全て近接目視点検・遠望目視点検での情報収集が可能であった。**写真-6.5.9 (a)** の上部構造の接合部の写真は，遠望目視点検でも塗膜割れが確認されなかった。腐食や塗膜割れが生じている場合は叩き点検を行う場合もある。診断に必要な情報が何かを考えた上で点検を行う必要がある。**写真-6.5.9 (b)** の上空から上部構造を撮影した写真は，遠望からの画像撮影点検でわかる上部構造の歪みが無いかを把握し，また，周辺地盤の変状と道路橋の位置関係を把握する目的で撮影したものである。基本的には必要ない場合が多い。**写真-6.5.9 (c)** の支承部の写真は，添付管がありUAVで近接できなかった事例である。自撮り棒であれば**写真-6.5.9 (d)** のように近接できるが，G橋でははしごがあり人が近接可能であった。人が近接できたことによりボルト類の触診ができた。**写真-6.5.9 (a) (c) (d)** では少なくとも2 m以内までは近接しているため，**表-6.5.4** から0.3 mm以上の亀裂幅，1 °以上の変形角，3 mm以上の変形量／移動量が確認できるはずである。

一方，G橋は**写真-6.5.9 (e)** のように支承取付ボルトが破断し，上部構造が移動し，橋台パラペットと桁（下弦材）が衝突していた。支承部品の破断・破壊に伴い上部構造の移動が誘発される状態である場合は上部構造に残留応力や残留変位が生じている可能性がある。しかし，上部構造の残留応力等については，多くの場合は近接目視点検でもわからない場合が多い。支承部の損傷状態や上部構造の移動量等からそれらを推測することが多い。例えば基礎の地中内の変状も同じであるが，点検で取得できる情報と，診断等の技術的な判断に必要な情報には乖離があり情報の非対称性が存在する。本研究の主題から外れるが，措置やその必要性に関する技術的な判断のために必要であるが近接目視点検では直接得られない情報を取得できる技術は重要である。

表-6.5.5　点検対象とした道路橋およびその部位の適用事例

	上部構造形式	支承部形式	下部構造形式	近接目視点検／遠望目視点検で変状を収集した部位	近接撮影点検で変状を収集した部位	
					自撮り棒+アクションカメラ	UAV
A橋	3径間PC連続ラーメン	ゴム支承	逆T式橋台，深礎杭	・路面，伸縮装置部 ・上部構造内部 ・下部構造躯体(橋脚基部，杭天板，橋台) ・支承部 ・背面土(補強土壁) ・落橋防止装置	・ラーメン隅角部	・路面，伸縮装置部 ・ラーメン隅角部 ・橋台 ・背面土（補強土壁） ・周辺地盤
B橋	2径間連結T桁	ゴム支承	逆T式橋台，壁式橋脚，場所打杭	・路面，伸縮装置部 ・上部構造 ・支承部(橋台) ・下部構造躯体（橋台） ・背面土 ・落橋防止装置	・支承部（橋脚）	未使用（暴風のため使用不可）
C橋	PC単純PCT桁	パッド型ゴム支承	逆T式橋台，場所打杭	近接目視点検可能な部位全て	未使用	未使用
D橋	PC単純PCI桁	パッド型ゴム支承	逆T式橋台，直接基礎	近接目視点検可能な部位全て	未使用	未使用
E橋	鋼単純上路ワーレントラス	BP支承	不明	・路面	未使用	・上部構造 ・周辺地盤
F橋	PC単純PCT桁	パッド型ゴム支承	逆T式橋台，直接基礎	・路面 ・上部構造 ・下部構造躯体	・支承部	未使用
G橋	鋼単純ランガー	ピン・ローラー支承	重力式橋台	・路面 ・上部構造（路面から見える範囲） ・下部構造躯体 ・支承部	・支承部	・上部構造（上弦材や下弦材，吊材等)
H橋	2径間PC単純PCT桁	パッド型ゴム支承	逆T式橋台	・路面 ・上部構造 ・下部構造 ・支承部	未使用	未使用
I橋	2径間PC中空床版	パッド型ゴム支承	逆T式橋台	・路面 ・上部構造 ・下部構造 ・支承部	未使用	未使用
・・・						



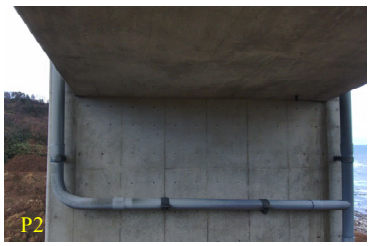
(a) UAV を用いて撮影した画像（全景）



(b) UAV を用いて撮影した画像（A1 橋台）



(c) UAV を用いて撮影した画像（A1 橋台）



(d) UAV を用いて撮影した画像（P2 隅角部）



(e) UAV を用いて撮影した画像（P2 隅角部）



(f) 自撮り棒を用いて撮影した画像（P2 隅角部）

写真-6.5.7 A 橋の調査写真例



(a) UAV を用いて撮影した画像（全景）



(b) UAV を用いて撮影した画像（上部構造）



(c) 人が撮影した画像（壁高欄）



(d) 人が撮影した画像（伸縮装置）

写真-6.5.8 E 橋の調査写真例



(a) UAV を用いて撮影した画像（上弦材や接合部等）



(b) UAV を用いて撮影した画像（上部構造および周辺地盤）



(c) UAV を用いて撮影した画像（支承部）



(d) 自撮り棒を用いて撮影した画像（支承部）



(e) 人が近接して撮影した画像（支承部）

写真-6.5.9 G 橋の調査写真例

6.5.3.3 実践で判明した内容や気づきの整理

表-6.5.5 や前項の点検事例を踏まえ，現場で選択した手段の傾向や，実践したことで判明した内容として以下が挙げられる。

1) 単径間の小規模橋梁の中で近接が容易な道路橋の点検手段は近接目視のみで十分であった。単径間の小規模橋梁に多い機能分離型支承としてパッド型ゴム支承とアンカーバーを採用している場合は遠望目視点検でも致命的な損傷の有無までは判断できる道路橋が多かった。なお，恒久的な復旧のためにはやはり近接目視点検を行うことが望ましいと考える。
2) 鋼上部構造や支承部のボルト類の点検では，本来は触診等を行うことが望ましいが，近接撮影点検（II-1～III-2）ではそれができなかった。
3) 支承部を確認する目的で自撮り棒を使用することが多かった。多くの震後点検の現場では，上部構造躯体や下部構造躯体に対して自撮り棒を使用する場面は少なく，近接目視点検・遠望目視点検で十分であると考えられる現場が多かった。例外として，橋 G のように支承部の部品が破壊し上部構造の位置が移動している道路橋において上部構造の残留応力について把握することが今回の手段（I～III-2）では困難であった。ただし，知識と技能を持つ技術者であれば支承部品の破断／破壊や上部構造の移動程度から残留応力が生じているか否かを推測可能であると考える。
4) 桁下にアクセスできず，橋面からのみ自撮り棒を降ろせる現場条件の場合（II-1），上部構造の桁数が多い構造形式では内桁に位置する支承部や，外桁に取りついた支承部の内側の状態を確認できなかった。
5) **写真-6.5.3** (III-1)の現場のように，転落防止柵がある現場では橋面から自撮り棒を降ろせなかった。また，一般的な形式の上部構造では，高欄の高さが約 1 m，床版の厚さが約 0.3 m 程度あるので，点検にあたっては桁高に加えて約 1.5 m の自撮り棒の長さが必要であった。
6) 地面から自撮り棒を持ち上げ支承部の近接撮影（II-2）が可能である現場は比較的少なかった。河川に架かる道路橋では手段 II-2 ができない場合も多い他，下部構造躯体の地表面からの高さが 5 m 以上のものも多かったためである。
7) 多くの現場では近接目視点検や自撮り棒の活用により必要な箇所の画像取得が可能であったものの，桁高が高い上部構造や，地盤変状が卓越する現場では UAV が有効であった。ただし，橋 E のように目視内飛行で点検を行うことができない現場条件もあった。
8) 今回の能登半島地震は冬（1 月 1 日）に発災したこともあり，豪雨・豪雪・暴風の影響も強く受けた。特に厳しい制約条件となったのは暴風であり，地上で 5 m/s を超える場合は飛行できない UAV の機種が多い他，自撮り棒であってもそれが長いほど暴風のあおりを受けやすく，現場での点検の難易度が高まった。
9) ここまでで述べていないが，アクションカメラの多くはスマートフォン等と Bluetooth で接続するものが多い。Bluetooth 接続であるので，自撮り棒で橋面から桁下にアクションカメラを移動させた際に通信が途切れる事象が多く発生した。アクションカメラ自体は震後点検を想定した設計を行っ

ていないが機器が改善された場合は有効な方法になり得ると考える。

以上の一連の考察と実践的な経験に基づいて手段ごとに要点を整理したものが**表-6.5.6** である。限定的な経験から挙げている事項であるためこの表で記載された事項の普遍性は不明である。その点については引き続き事例を蓄積する必要があると考えているが，一方で大規模地震は稀にしか生じないため，限定的な経験であってもそれが現場にとって有用である場合があると考え整理している。

表-6.5.6 本研究で検討した手段の要点整理

	メリット	デメリット
方法 I（近接目視点検）	・人が変状を確認 ・打音・触診等が可能 ・雨天や防風でも調査可能	・足場が必要な現場が多い
方法 II-1（自撮り棒を橋面から降ろし撮影）	・足場が無くとも支承部を確認可能（おおよそ自撮り棒の長さ-1.5m 程度まで） ・雨天や防風でも調査可能	・撮影後に写真から変状を確認 ・打音・触診等ができない ・防護柵がある場合は調査が困難 ・内桁の支承部の確認が困難
方法 II-2（自撮り棒を地上から持ち上げ，撮影）	・足場が無くとも支承部を確認可能（おおよそ自撮り棒の長さの高さまで） ・雨天や防風でも調査可能	・撮影後に写真から変状を確認 ・打音・触診等ができない ・適用できた現場が少なかった
方法 III-1（操縦者が橋面にいる状況で UAV を操縦）	・足場が無くとも支承部を確認可能（UAV が近接可能な範囲のみ，下路点検を行う際には目視外飛行とならないように注意）	・撮影後に写真から変状を確認 ・打音・触診等ができない ・雨天や防風では調査が困難
方法 III-2（操縦者が地上にいる状況で UAV を操縦）	・足場が無くとも支承部を確認可能（UAV が近接可能な範囲のみ）	・撮影後に写真から変状を確認 ・打音・触診等ができない ・雨天や防風では調査が困難

6.5.3.4 実践で得られた知見の一般化に向けた考察

震後点検では膨大な数の道路橋を対象にできるだけ迅速に，かつ，確実に点検を行う必要がある。本節では実践で得られた知見を一般化するための考察を行う。ここでの一般化とは，能登半島地震だけの経験とするのではなく，他の地域で大規模地震が生じた際にどのように震後点検を行うことが望ましいか，あるいはどのように準備を整えることが望ましいかという観点である。

一般化にあたり道路橋の構造的特徴の観点に注目した考察を行う。具体的には，1) 単径間の小規模橋梁で近接が容易な道路橋の点検手段は近接目視のみで十分であった，2) 上部構造の桁数が多い構造形式では内桁に位置する支承部や，外桁に取りついた支承部の内側の状態を確認できなかった，3) 桁高に加えて約 1.5 m の自撮り棒の長さが必要であった，4) 河川に架かる道路橋では手段 II-2 が困難な現場も多く，船や胴長が必要な場合や，出水期である場合，下部構造躯体の地表面からの高さが 5 m 以上のものも多い，5) 桁高が高い上部構造では UAV が有効であった等である。これらは国内で保有する道路橋の数量や特徴に照らせば，効率的な点検手段の一般化に向けた手掛かりが得られる可能性があると考える。

a) 国内の道路橋の構造的特徴

特に桁高については，上部構造形式別に支間長と，支間長と桁高の比が整理されている[例えば 6.5.15)-6.5.17)]。このデータは，実際に架設された道路橋を対象に構造形式別に支間長の適用範囲や桁高に関するデータを収集し整理されたものである。道路橋の設計時に支間長等の目安として使用される。これら資料を参考に上部構造形式別に支間長の範囲の目安と桁高の範囲の目安を図化したものが**図-6.5.8** である。おおよその傾向として支間長が長くなるほど桁高が高くなる。

これに基づいて自撮り棒の点検に直結する桁高のみを抽出したものが**図-6.5.9** である。デザインデータブック等 [6.5.15)]では支間長に対して「一般的によく適用される範囲」や「比較的適用される範囲」という分類でデータ化が行われている。その範囲と支間長－桁高比を用いて**図-6.5.9** を作図している。いわゆる床版橋や桁橋の多くが 5 m 以下の桁高であることがわかる。

一方，下部構造の高さについては体系的に整理された事例は少ない。橋台については重力式橋台が適用高さ 3～6 m，逆 T 式橋台が 5～15 m，ラーメン式橋台が 10～15 m 等 [6.5.17)]の整理が行われたものもあるが，橋脚については筆者らが調べた範囲ではデータが無い。これは下部構造の高さは道路線形やその連続性によって決定される場合が多いためであると推測している。河積阻害率や橋脚を設置する地盤の条件等があるとは言え，多くは上部構造の支間長や，橋脚の寸法（簡単には，高く太くする，細く短くする）を調節し，所要の耐荷力を満たすように設計される場合が多いためである。これら理由から手段 II-2 の適用可能性を橋の構造的特徴の観点から一般化することは困難であると考えた。また，「4)河川に架かる道路橋では手段 II-2 が困難な現場も多く，船や胴長が必要な場合や，出水期である場合，下部構造躯体の地表面からの高さが 5 m 以上のものも多い」という経験に基づく主張に対して，データから根拠を示せたと考える。

以上の国内の道路橋の構造的特徴に基づき，自撮り棒を用いた手段（II-1）と UAV を用いた手段（III-1，III-2）の適用時の適否について考察を行う。

b) 知見の一般化に向けた考察

図-6.5.9 より国内の桁橋や床版橋の多くは桁高が 5 m 以内であることがわかる。高欄や床版の高さがあることから，「3) 桁高に加えて約 1.5 m の自撮り棒の長さが必要であった」が，それを考慮したものが図中の赤破線である。自撮り棒には長さが様々あるが，今回用いた 5 m の長さの自撮り棒を前提にすると，これらは今回用いた自撮り棒で点検が可能と推測される構造形式である。例えば，商品として長さ 10 m の自撮り棒等もあるが，その場合は 8.5 m（10 m-1.5 m）以内の桁高の構造形式であれば点検が可能と推測される。実際に使用した”感想”としては，5 m を超える長さは重量もあり取り回しの難易度が高い。

一方，橋面からの自撮り棒による点検（手段：II-1）の弱点は「2) 上部構造の桁数が多い構造形式では内桁に位置する支承部や,外桁に取りついた支承部の内側の状態を確認できなかった」点である。一般に少数主桁やトラス形式，長大橋では一支承線上の支承数が 2-3 個等と少なくなる傾向がある。その場合でも手段 II-1 では桁内側の支承部品の状態を確認することは困難である場合が多い。これを避けるには，例えば手段 I，II-2，III-2 を用いることが望ましいと考えている。手段 III-1 は目視外飛行となる恐れがある点に注意が必要である。

また，**図-6.5.9** において桁高が高い構造形式（例えば橋 E）については自撮り棒での点検には限界があるので，本節で想定した手段の中では，足場が無い条件では手段が UAV（III-1，III-2）以外には取り得ない。構造的特徴からも「5) 桁高が高い上部構造では UAV が有効であった」経験が根拠づけられ整合したと考える。

では国内の道路橋の上部構造形式はどのような割合であるか。地震後には膨大な数の道路橋を対象に迅速かつ確実な点検を行う必要があるので，どの構造形式が多いかは重要な情報である。道路統計年報 [18]として公開されているデータからそれらを集計したものが**図-6.5.10** である。政令指定都市の道路橋は全て都道府県に集約して整理している。この図から明確なのは，1) 床版橋と桁橋が多くを占めていることと，2) 都道府県によって床版橋と桁橋の割合の傾向に大きな違いが無いことである。

前述の通り，床版橋と桁橋の多くは桁高が 5 m 以内である（**図-6.5.10**）。手段 II-1 の弱点である桁中間に位置する支承部の点検をどこまで重視するかは別途議論が必要であるが，大多数の道路橋では暫定的な点検（緊急調査等）としては，近接目視点検や自撮り棒による近接撮影点検で十分である可能性がある。

一方，**図-6.5.10** で数が少ないとは言え，トラス橋やアーチ橋，ラーメン橋，斜張橋，吊橋は規模（支間長）が大きい道路橋に採用される場合が多い（**図-6.5.8**）。規模が大きい道路橋は緊急輸送道路として重要な位置づけである橋である場合も多い。そのため，規模が大きい道路橋の点検調査は最も迅速性が要求されることも多い。これらに対しては UAV や，本研究で取り上げていないがロープア

クセス等が特に有効であると考えられる。

重要なのは，迅速で確実な交通開放を実現するための点検手段として，様々な状況（例えば，**写真-6.5.4～6.5.7**）を想定し，適切な手段（例えば，I～III-2 であるが，これに限らない）を選択できるように日頃から準備を行うということである。近接目視点検がよい状況，足場が無く近接目視点検が出来ないため近接撮影点検しか取り得ない状況等様々に想定し得る。大規模地震は突発的に生じ，その被災地域の特定の行政や個人に社会的への影響が大きい判断を迫られる状況も多い。

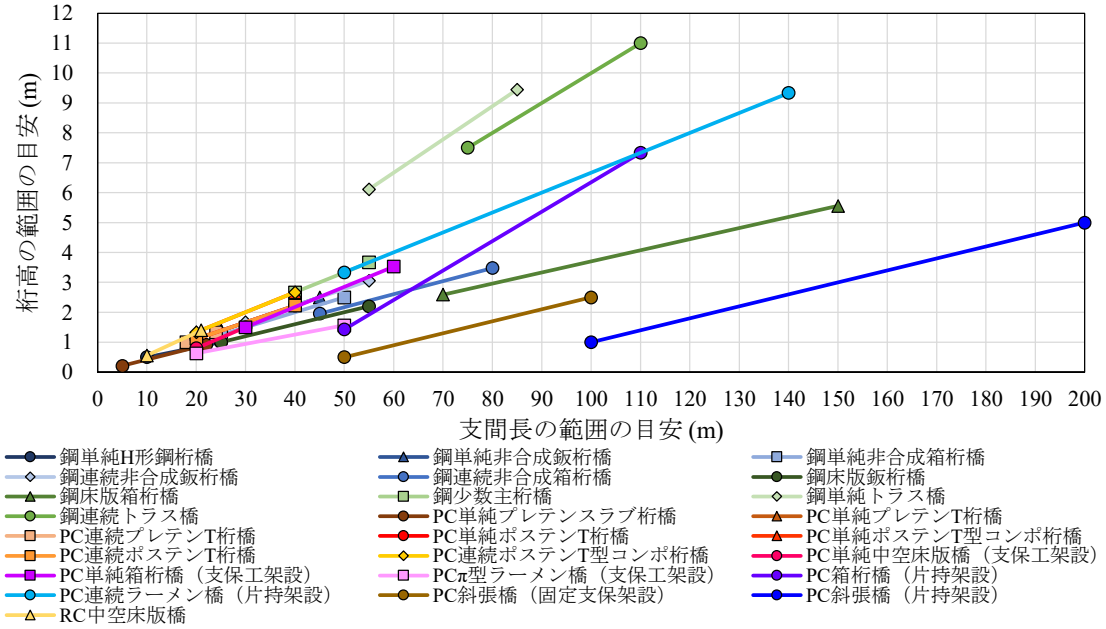


図-6.5.8　国内の道路橋の上部構造形式別の支間長と桁高の関係

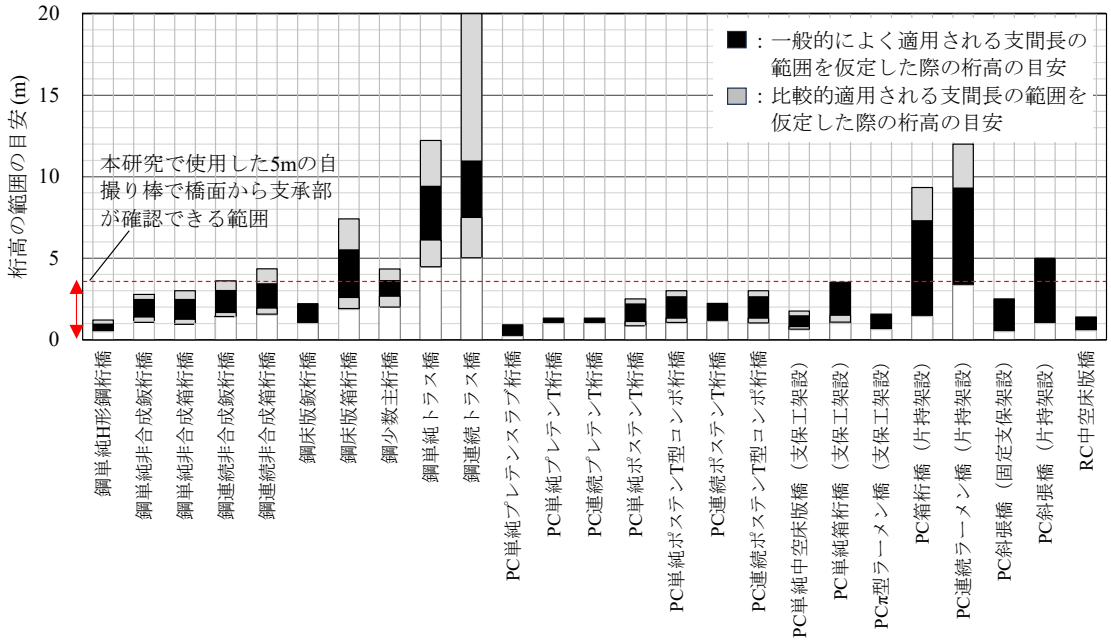


図-6.5.9　国内の道路橋の上部構造形式別の桁高の目安

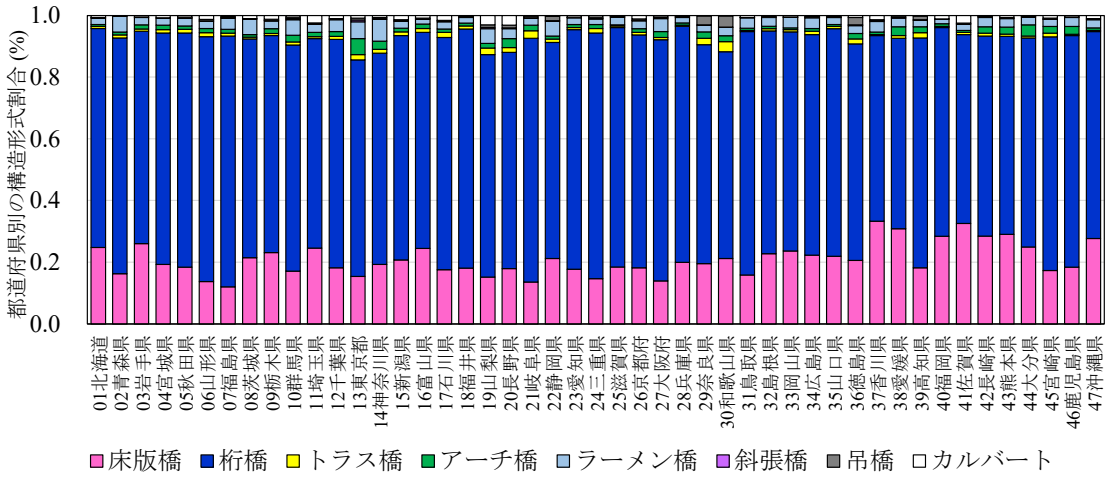


図-6.5.10　都道府県別の上部構造形式割合

参考文献

6.5.1) 公益社団法人日本道路協会：道路震災対策便覧，震災復旧編，令和 4 年度改訂版，令和 5 年 3 月.

6.5.2) 東北地方整備局 道路部，国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室 : 道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案），Ver. 1.0，平成 24 年 2 月，2012.

6.5.3) 木本啓介，松田浩 : デジタル画像の画素分解能とコンクリートの視認可能なひびわれ幅に関する検証，土木工学・材料工学論文集，第 35 号，2019.

6.5.4) 林祐葵，小林巧，大住道生 : 道路橋の震後調査の効率化・高度化に向けた 3 次元レーザスキャナの試行検討，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.2，No.1，pp.169-178，2023.3.

6.5.5) 常田賢一，小田和広，中平明憲，林健二，依藤光代 : 段差走行実験に基づく地震時の道路の性能評価および交通運用，土木学会地震工学論文集，pp.596-604，2007.

6.5.6) 国土交通省 : 緊急用務空域の公示．https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html（最終閲覧日：2024 年 6 月 4 日）

6.5.7) 日本道路協会：道路橋支承便覧，平成 30 年 12 月.

6.5.8) 日本道路協会：道路維持修繕要領，昭和 53 年 7 月.

6.5.9) 高橋典之，高橋絵里，中埜良昭 : 鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 2，2009.

6.5.10) 大髙正裕，林和彦，椿龍哉 : 正負交番荷重を受ける RC 柱のせん断ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 2，2004.

6.5.11) 文野正裕，永山憲二，前田匡樹，田才晃 : RC 柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 3，2001.

6.5.12) 柳瀬圭児，大野義照，李振宝，南宏明 : 鉄筋コンクリート梁のせん断ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 2，2002.

6.5.13) 国土交通省：xROAD，全国道路施設点検データベース．https://road-structures-db.mlit.go.jp/

6.5.14) 国土交通省 道路局 国道・技術課 : 橋梁定期点検要領（案），令和 6 年〇月　改訂版，意見照会版. https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001719757.pdf（最終閲覧日：2024 年 5 月 27 日）

6.5.15) 日本橋梁建設協会：’21 Design Data Book，デザインデータブック，2021 年 5 月改訂版.

6.5.16) 日本道路協会：道路橋点検必携，～橋梁点検に関する参考資料～，平成 27 年版.

6.5.17) 中部地方整備局：道路設計要領，第 5 章 橋梁，2023. https://www.cbr.mlit.go.jp/road/sekkeiyouryou/index.htm（最終閲覧日：2024 年 6 月 7 日）

6.5.18) 国土交通省 : 道路統計年報 2022，橋梁の現況，表 41　構造形式別、都道府県別橋梁の現況《合計》. https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2022/nenpo03.html（最終閲覧日：2024 年 6 月 7 日）

6. 6　AE 波および AE 計測システムを用いたゴム支承の内部損傷評価

6.6.1　技術の概要及び計測の仕組み

(1) 専門用語の解説

本文中で使用している専門用語の一部について，定義を**表-6.6.1** と**表-6.6.2** に示す。

表-6.6.1　計測系専門用語の定義

専門用語	定義
アコースティック・エミッション（AE）	6．6．1（3）に示す。
超音波探傷（UT）法	高周波の超音波を試験対象（材料や構造物）に与えて，内部の欠陥を検出する非破壊検査手法のこと。
累積 AE ヒット数	検知した AE 信号の総数のこと。AE 信号のひとかたまり（1 波形）を 1AE ヒットとする。
RMS	検出された波形の包絡線検波した値を二乗して相加平均し，その平方根をとった値である。特に，連続型 AE が検出される場合には，AE の発生率を評価できるものとされている。
連続型 AE	AE 信号の分類の 1 つで，比較的低い振幅で長時間にわたって継続的に発生する AE 信号を示す。短時間に大きな振幅で発生する AE は突発型 AE と呼ばれる。
ファンクションジェネレータ	任意の波形を電気信号として出力できる試験装置のこと。本研究では Tektronix 社の AFG3021C を使用した。
励起	ファンクションジェネレータで生成した波形について，物理的な力に変換するアクチュエータ（AE センサ）を用いてゴム支承に加振すること。
パルス波	短時間だけ発生し，その後急激に消失する波形。
1 次卓越周波数	FFT 解析の結果（フーリエスペクトル）において，最も大きな振幅（エネルギー）を持つ最初のピークの周波数のこと。
減衰	モノが振動するエネルギーを吸収・発散し，時間の経過とともに振動を減少させる現象のこと。

表-6.6.2　構造物系専門用語の定義

専門用語	定義
粘弾性特性	材料が「粘性（Viscous）」と「弾性（Elastic）」の両方の性質を持つこと。
等価減衰定数	構造物や材料のエネルギー減衰特性を表す指標で，振動系における実際の減衰効果を等価的に表現するための値。

(2) 背景

我が国の橋梁には，1995 年に発生した兵庫県南部地震以降，積層ゴム支承（以下，ゴム支承と記す。）が積極的に導入された。現在使用されているゴム支承の多くは供用開始から 20 年以上が経過してお

り，経年劣化や大規模地震などにより，ゴム支承の損傷や破断が報告されている。

ゴム支承は外周を被覆ゴムで覆われた構造であり，外観に損傷が発生しない限りその健全性を正確に判断することは難しい。最終的に破断すると外観にひび割れが確認できるため，取り換えの判断が可能となるが，破断する前の段階（積層ゴム内部での部分的な内部鋼板との接着剥離や空隙の発生による不連続部分が内在した状態など）では外観にひび割れが顕在化していないため，内部の損傷状態が不明で取換えの判断が難しいゴム支承の存在も考えられる。

現在ゴム支承の点検方法は目視点検のみで，非破壊検査技術は確立しておらず内部損傷を検出できないのが現状である。

そこで本項では，非破壊検査法の受動的な（passive）手法であるアコースティック・アミッション（AE）法と能動的（active）な手法である AE 計測システムを活用した超音波探傷（UT）法を用いてゴム支承の内部損傷評価を試みた。

（3）技術の概要

アコースティック・エミッション（AE）とは，「固体材料が変形あるいは破壊する際に，それまで固体内部に蓄えていたひずみエネルギーが解放されて弾性波が生じる現象，またはそのようにして発生する弾性波動」として定義される [6.6.1), 6.6.2)]。この原理を利用して，内部のひび割れの発生やその進展，あるいは材料の変異（鉄筋腐食など）で生じる弾性波を，材料表面に設置した AE センサ（主に圧電素子を利用）で検出し，AE 発生頻度や AE 波形パラメータなどによる個体内部の損傷度を評価する手法である。

図-6.6.1 に AE 法と代表的な非破壊検査法の 1 つである超音波探傷（UT）法との比較を模擬的に示す。AE 法は応力下で固体内に生じる破壊現象などのそのものを捕らえるが，UT 法は超音波を入射することにより反射波や透過波を解析することにより損傷を検出する手法である。また，これらの手法は損傷の有無，大きさ，位置などの特定が現在は定性的に行える。

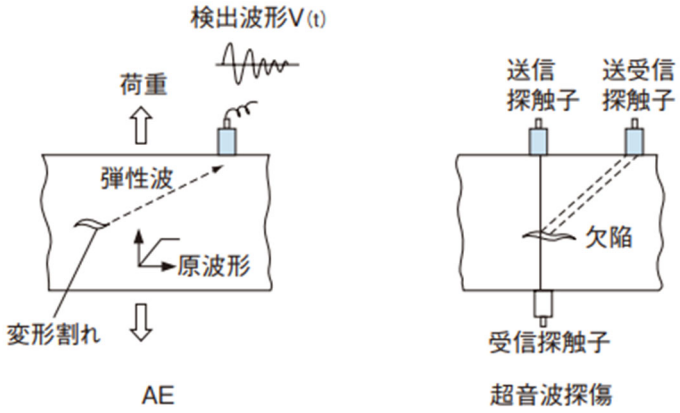


図-6.6.1　AE 法と超音波探傷（UT）法の比較

(4) 計測の仕組み

AE 計測システムを**図-6.6.2** に示す。AE センサに到達した弾性波は電気信号に変換され，増幅器，フィルタを経て AE 波として記録される。記録された AE 波形の一例を**図-6.6.3** に示す。AE 計測システムでは，AE 波形だけでなく**図-6.6.3** に示すように検出された AE 波形の各種パラメータなどが計算されて記録される。したがって，超音波探傷試験における計測システムとしても活用が期待できる。

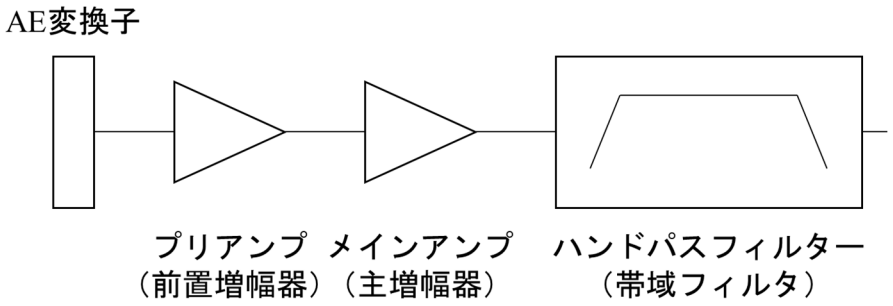


図-6.6.2　AE 計測システム

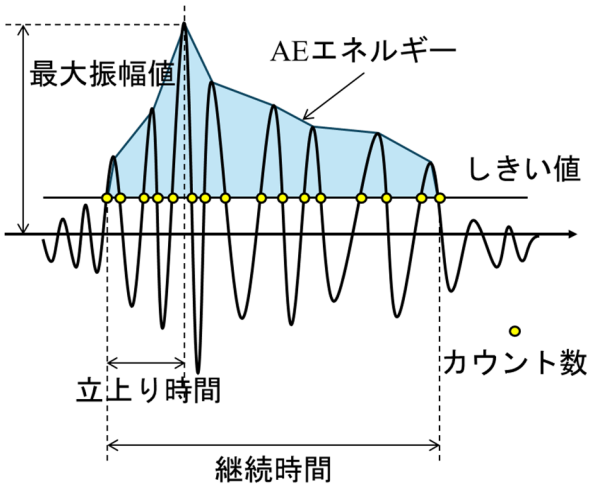


図-6.6.3　AE 波形とパラメータの一例

(5) 実験方法

本検討での活用事例について，**表-6.6.3** に示す実験・計測方法で検討を進めた。

表-6.6.3 本検討での検討内容一覧

検討手法	室内実験	現地計測
AE 法 （繰り返し圧縮載荷）	6.6.2（1）	-
UT 法 （AE 計測システム活用）	6.6.2（2）	6.6.4（1）および（2）

1) AE 法（繰り返し圧縮載荷）によるゴム支承の損傷評価

ゴム支承に車両の通行により励起された振動（以下，交通振動と記す。）による活荷重が十分に与えられるケースを想定している。**図-6.6.4** に損傷検知のイメージを示す。地震後にゴム層内部に損傷が存在する場合，活荷重による鉛直荷重によって内部損傷（ひび割れや空洞）が開閉し，その際に弾性波が生じてゴム表面に設置した AE センサで検知できることを想定している。この手法を現地で活用する場合，多量の交通振動と計測時間が必要であることから，数時間から数日のモニタリング計測が必要となる。

2) AE 計測システムを活用した超音波探傷（UT）法によるゴム支承の損傷評価

ゴム支承に交通振動による活荷重が十分に与えられないケースを想定している。**図-6.6.5** に損傷検知のイメージを示す。例えば，地震後に直ちに損傷評価をしたい場合，通行規制されている箇所では交通振動が期待できない状態も多く存在する。そこで，検出センサとして AE センサ，計測器として AE 計測器を活用した UT 法での損傷評価について検討している。ゴム内部を伝搬する超音波は，ゴムの粘弾性特性によって高周波成分が減衰しやすい傾向がある。また，高周波成分は波長が短いため，内部欠陥が大きい場合には，散乱などによって減衰する。そのため，高周波成分を検出しやすい AE センサを使用し，超音波を励起するために，この実験ではファンクションジェネレータを使用した。

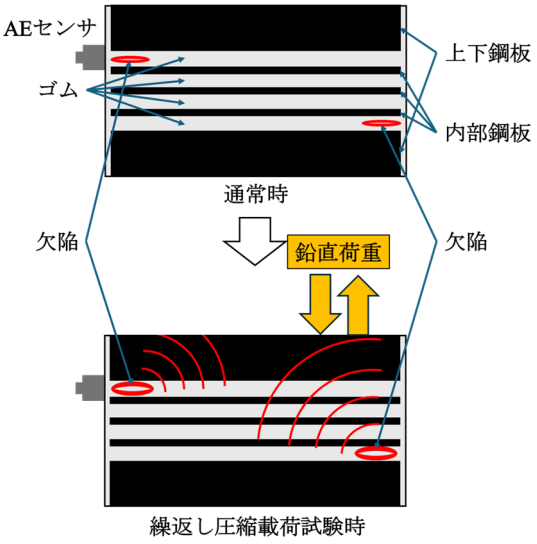


図-6.6.4　損傷イメージ（AE 法）

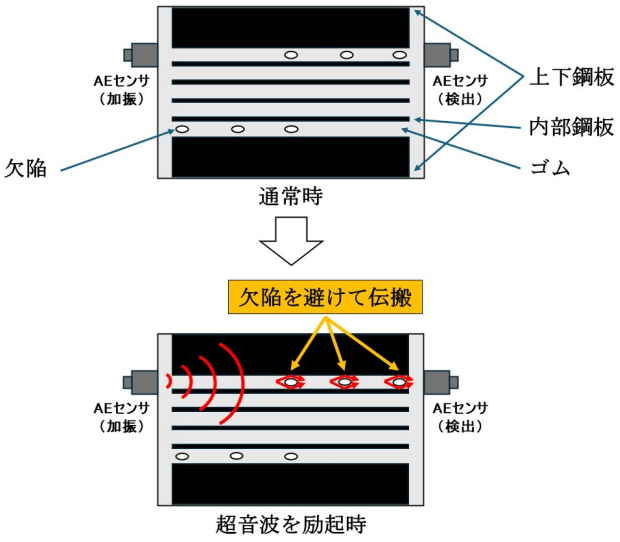


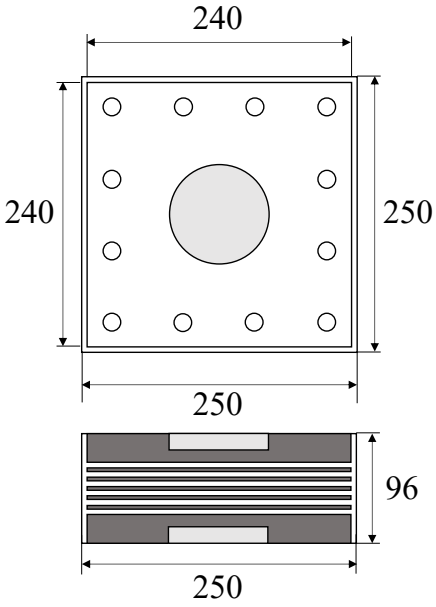
図-6.6.5 損傷イメージ（UT 法）

6.6.2　技術の精度評価（室内実験）

（1）模擬地震波を受けたゴム支承の AE 法による内部損傷評価

ここでは，6．6．1（5）1）で挙げた AE 法を用いた繰返し圧縮載荷試験によるゴム支承の損傷評価に関する室内実験の取り組みを紹介する。既往研究[6.6.3)]では，ゴム支承に対して，せん断ひずみが 175%，250%，300%の繰返しせん断試験を行った。そして，せん断試験の前後で交通振動を模擬した繰返し圧縮載荷試験を実施し，AE 計測を行った。しかし，せん断試験で与えられたせん断変位は，実際に供用されているゴム支承に対して地震動によって受けるせん断変位とは異なる。また，ゴム支承の残存耐震性能と得られた AE データとの相関については検討されていなかった。そこで本検討では，ゴム支承に与えるせん断変位として模擬地震波を与えた。AE 計測は，模擬地震波の載荷前後で実施した。上述の実験および計測を連続して実施することで，ゴム支承の性能低下と得られた AE パラメータの挙動を比較検討し，ゴム支承の残存耐震性能について AE 法を用いて推定可能か検討した。なお，記述量の都合上，本報告書には実験概要や結果を一部簡略化して示すが，詳細については参考文献 4)を参照されたい。

供試体（ゴム支承）の概要を**図-6.6.6** に示す。実験で使用した供試体は，事前に最大せん断ひずみ300%のせん断を受けているものを使用した。供試体設置時に鉛直荷重を 5~10kN 載荷し，このときの鉛直変位を固定した状態で，せん断ひずみ 70%で 11 回加振，せん断ひずみ 175%で 11 回加振，せん断ひずみ 250%で 6 回加振，せん断ひずみ 300%で 2 回加振した。すなわち，既にゴム支承内部に損傷を内在している可能性が高いものを使用している。模擬地震波載荷⇒繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⇒性能確認試験の 1 セットを基本として実験を実施した。性能確認試験は，残存耐震性能を算出するために，せん断試験と繰返し圧縮載荷試験・AE 計測の後に実施した。せん断ひずみは 175%で 11 回加振した。死荷重相当の支承設計値が面圧 6MPa に相当する圧縮力とされているため，本供試体では鉛直荷重を 345.6kN（＝240mm×240mm×6MPa）に設定した。4 回目と 6 回目の AE 計測については，性能確認試験の影響を確認するため，直前に模擬地震波載荷は行っていない。各回で AE 計測から得られた AE データと性能確認試験から得られた残存耐震性能評価を比較することで相関関係について検討した。



（単位：mm）

図-6.6.6　供試体の概要

模擬地震波については，熊本地震によるゴム支承破断事例に着目し，実際の地震動を模擬した波形を解析により作成した。模擬地震波（最大せん断ひずみ 175%）の解析結果と実験用せん断ひずみ時刻歴波形の比較を**図-6.6.7** に示す。今回使用した載荷試験機器が出力可能な速度に調整したせん断ひず

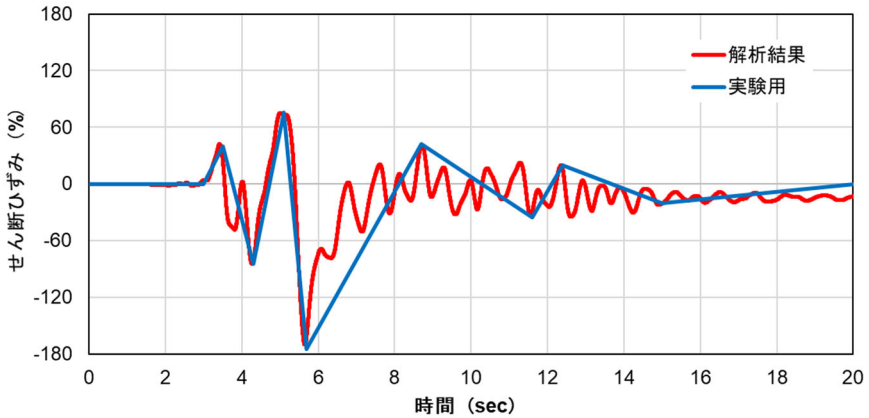


図-6.6.7　解析結果と実験用波形の比較

みの時刻歴（実際に与えたせん断ひずみの時刻歴）の一例を**図-6.6.8**，模擬地震波載荷の状況を**写真-6.6.1** に示す。その後，実橋梁のゴム支承が受ける交通振動を仮定して，繰返し圧縮載荷試験を実施した。**図-6.6.4** に示したように，ゴム支承が圧縮されることで，ゴム支承内部の損傷によってできた空隙が開閉することで弾性波が発生することを想定して AE 計測を行った。繰返し圧縮載荷試験の状況を**写真-6.6.2** に，荷重履歴を**図-6.6.9** に示す。

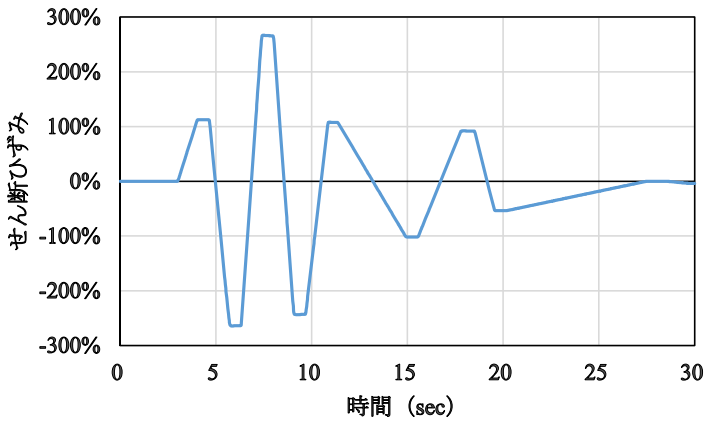


図-6.6.8　せん断ひずみ 250%に調整した模擬地震波



写真-6.6.1　模擬地震波載荷の状況



写真-6.6.2　繰返し圧縮載荷試験の状況

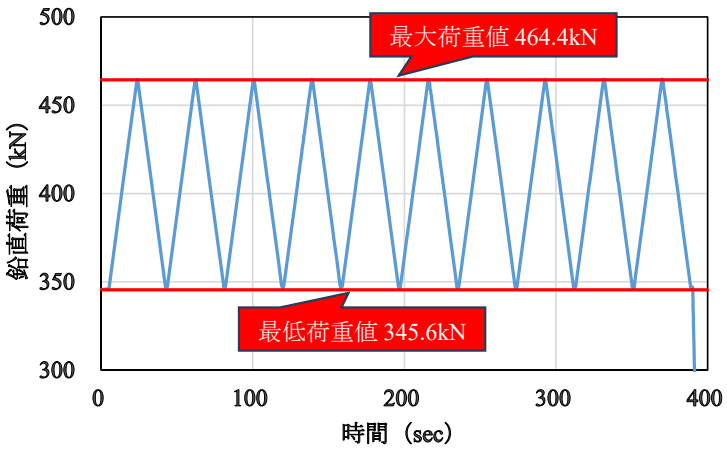


図-6.6.9　繰返し圧縮載荷試験の荷重履歴

AE センサは共振周波数 60kHz の共振型センサを 8 個使用した。AE センサの設置箇所を**図-6.6.10** に示す。ゴム材料は引張に弱いため，ゴム支承内部で最も大きな引張応力を受け [6.6.5)]，脆弱であると考えられる箇所に設置している。しきい値は 40dB よりも低く設定するとノイズを検出したため，40dB（電圧表記では 0.01V）に設定した。得られた AE 現象のうち，**図-6.6.3** に示す AE パラメータのカウント数が 1，AE エネルギーが 0，平均周波数が 30kHz～90kHz 以外の AE 現象はノイズ（評価対象

外のデータ）として除去した。また，最初に 345.6kN を超えるまでの時間に発生した AE 現象も，対象時間外として除去した。

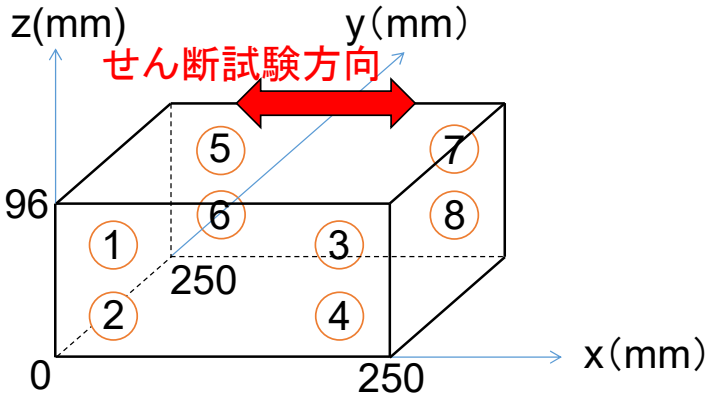


図-6.6.10　AE センサの設置位置

実験結果の一例として，AE 計測結果とゴム支承の性能値を表す指標として等価減衰定数※を比較した結果を**図-6.6.11** に，本実験で実施した計測セット回を示したものを**表-6.6.4** に示す。なお，**図-6.6.11** 中のプロットに付記している数字は，**表-6.6.4** に示している試験番号である。AE 計測結果は，「繰返し圧縮載荷試験・AE 計測」で実施した結果を，等価減衰定数は，「性能確認試験」で得られた結果を示しており，各計測は全 6 回実施している。そのため，プロットは 6 箇所で，図内のプロット付近に記載している数値が計測したセット番号を示している。AE 計測結果は累積 AE ヒット数※と RMS を，残存耐震性能を示す 1 つの指標として等価減衰定数を用いた。等価減衰定数と累積 AE ヒット数に相関は確認できなかったが，等価減衰定数と RMS には，等価減衰定数が低下すると，RMS が増加するという相関が確認できた。累積 AE ヒット数は，検出された AE 波形の数を示しているだけであるため，例えば微小な空隙が多い場合は AE ヒット数が多くなり，微小な空隙が一つの大きな空隙になった場合には AE ヒット数が少なくなると考える。そのため，本実験において AE ヒット数の低下は，元々存在していた損傷領域（ひび割れ）が

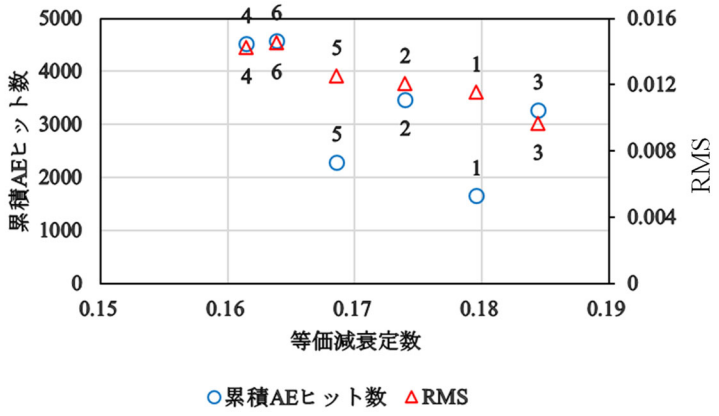


図-6.6.11　AE 結果と残存耐震性能の比較

模擬地震波載荷によって広がった可能性を示唆しているのではないかと推察する。RMS は一つの波形の中でしきい値をどれだけ超えているか，波形の大きさなど波形情報を多く含んでいる。これらのことから, AE ヒット数が少なくても検知した AE 現象が大きい場合には, RMS が増加する傾向がある。等価減衰定数に着目すると，内部損傷による空隙の数あるいは体積が増加することで，ゴム同士の摩擦によって発生する熱エネルギーが減少し，振動による運動エネルギーを十分に熱エネルギーに変換できず，等価減衰定数が低下したと考えられる。そのため，模擬地震波の載荷が増える毎に，損傷の数や領域が増加して等価減衰定数が低下し，AE パラメータの一つである RMS 値（AE 発生率）が増加する傾向を示したと思われる。本実験で使用したゴム支承は，既に最大せん断変位 300%を受けた支承であるため，1 回目の計測から既に損傷が内在している可能性がある。そのため，計測したセット回によっては, RMS が低下するタイミングも存在するが, 総じて増加傾向であることは確認できる。この傾向が損傷評価として有効な指標になり得るか，残存耐震性能と相関があるかは，今後の室内実験などによって検討を進める。ゴム支承の取り換えは，支承機能を目安に判断されるべきであると考える。そのため，得られた AE 計測結果から残存耐震性能を推定することは重要であると考える。

（2）AE 計測システムを利用した超音波探傷（UT）法によるゴム支承内部の損傷評価

表-6.6.4　実施した AE 計測セット

日程	試験内容
2021/6/24	最大せん断ひずみ 300%のせん断試験
2022/10/17	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測 1
2023/1/18	性能確認試験 1
2023/1/26	地震模擬波形載荷（175%）
2023/2/7	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測 2
2023/2/16	性能確認試験 2
2023/2/16	地震模擬波形載荷（250%）
2023/2/16	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測 3
2023/2/17	性能確認試験 3
2023/6/16	性能確認試験 3’
2023/6/23	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測 4
2023/6/27	性能確認試験 4
2023/7/21	地震模擬波形載荷（250%）
2023/7/21	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測 5
2023/7/25	性能確認試験 5
2023/7/28	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測 6
2023/7/31	性能確認試験 6

ここでは，6．6．1（5）2）で挙げた AE 計測システムを活用した超音波探傷（UT）法を用いて，ゴム支承（以降，室内ゴム支承と記す）を**図-6.6.12** に示す計測を行った。ファンクションジェネレータで入力波形を加振センサから励起した。ゴム支承内部または表面を伝搬した弾性波は，加振センサの対面に設置した検出センサで電気信号として検出した。加振センサおよび検出センサには共振周波数 60kHz の AE センサを使用した。これは AE 法を使用したゴム支承の損傷評価における過去の事例[例えば6.6.6)]を参考にした。入力波形は，加振電圧を調整したパルス波を与えた。加振電圧の大きさについては，各計測時に十分に検出可能な 10V に設定した。

試験のフローを**表-6.6.5** に示す。実験開始前に加硫ゴム内部の弾性波速度を計測したところ，約 1600m/s であった。ファンクションジェネレータでパルス波形を 1Hz で入力した後に，ゴム支承を伝搬した弾性波を AE センサで検出する時間を設けるため，ジェネレータを 4 秒間 OFF した。4 秒間としたのは，計測前の事前確認において，ジェネレータから入力したパルス波※が完全に消失することを確認できたためである。また，表中に記載されている「慣らし」とはジェネレータを OFF にして加振していない状態であり，ノイズの有無を確認する目的で行った。試験開始から終了までの 15 秒間，弾性波検出のしきい値を 35dB として AE 計測を実施した。

表-6.6.5　試験のフロー

試験開始
↓
慣らし（5 秒）
↓
ジェネレータ ON（1 秒）
↓
ジェネレータ OFF（4 秒）
↓
慣らし（5 秒）
↓
試験終了

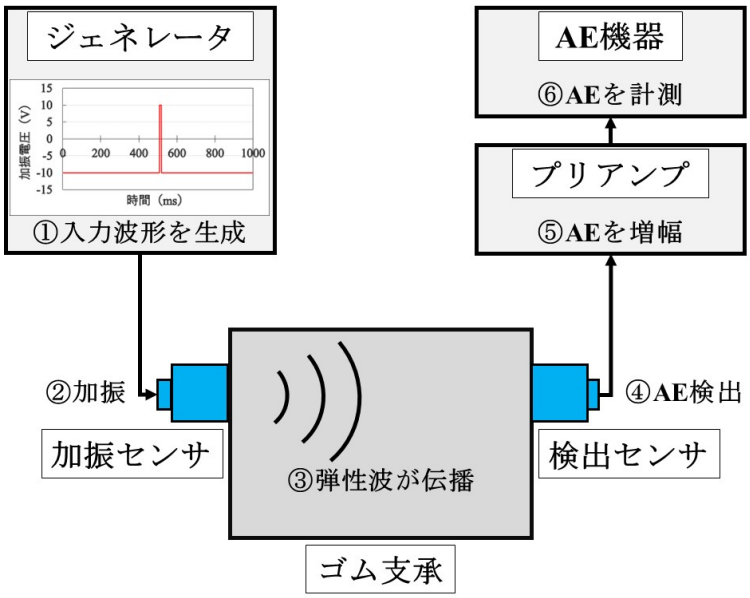


図-6.6.12　計測概要

供試体諸元を**表-6.6.6**，供試体概要を**図-6.6.13** に示す。欠陥を空隙（発砲スチロール）により模擬した。空隙つまり欠陥の諸元は**表-6.6.6** に記載の通りである。空隙なしを健全支承，空隙ありを内部損傷支承と呼ぶ。欠陥は鋼板に挟まれた内部ゴム層かつ鋼板端部に配置しており，小片欠陥を 1 つ配置したもの，小片欠陥を 2 つ配置したもの，長細い欠陥を設置したものの 3 ケースを用意した。小片が 1 つの欠陥は内部損傷 1 か所と定義し，加振センサから空隙までの距離に応じて 2 種類の試験パターンを用意した。「内部損傷 1 か所①」は，加振センサから 10mm の位置に小片欠陥が存在する。「内部損傷 1 か所②」は，加振センサから 167mm の位置に小片欠陥が存在する。また，小片欠陥が 2 つの供試体を内部損傷 2 か所，長細い欠陥を内部損傷 1 本と表記する。実験の状況を**写真-6.6.3** に示す。

表-6.6.6　供試体諸元

室内ゴム支承（RB）		健全	内部損傷			
空隙種類		無	1か所	2か所		1本
寸法(mm)		180×180×115.8				
内部ゴム1層厚(mm)		7				
内部鋼板1枚厚(mm)		3.2				
S_1：一次形状係数		5.71				
S_2：二次形状係数		4.57				
空隙	X(mm)		10	10	170	10~170
	Y(mm)		10	10	10	10
	Z(mm)		82	82	82	82

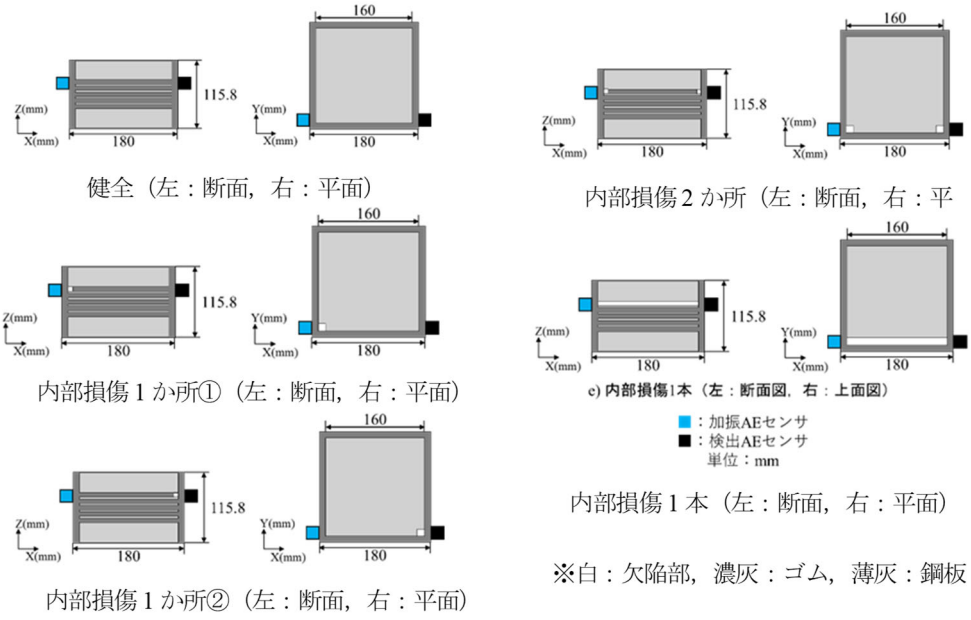


図-6.6.13　供試体（室内ゴム支承）概要



写真-6.6.3　室内実験の状況

1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した計測 3 回分の FFT 結果を**図-6. 6. 14** から**図-6. 6. 18** に示す。正規化は，フーリエ振幅が異なるスペクトル同士の卓越周波数を比較するために行った。**図-6. 6. 14** から**図-6. 6. 18** に示すように，各 3 回の FFT 結果は，1 次卓越周波数で正規化するとスペクトル形状と卓越周波数が一致した。室内ゴム支承はいずれにおいても，計測 3 回の結果はほぼ同等であり試行回数によるばらつきの影響は少ないと考えられるため，以降は計測 1 回目の結果を使用して各支承の比較を行った。また，健全支承と内部損傷支承は 88kHz 近傍の卓越周波数が共通し，内部損傷支承のみ 36kHz 近傍で卓越する特徴を確認できた。

1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6. 6. 19** から**図-6. 6. 22** に示す。健全支承と内部損傷支承では正規化した FFT 結果は一致しない。そして，健全支承と「内部損傷 1 か所①」，「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」の損傷規模が小さい支承は 1 次卓越が 88kHz で共通し，104kHz 近傍でも卓越が見られた。「内部損傷 1 本」の損傷規模が大きい

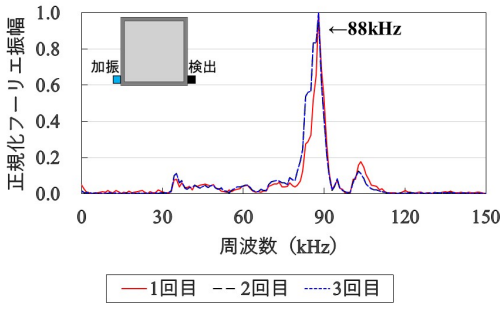


図-6. 6. 14　室内健全の正規化 FFT 結果

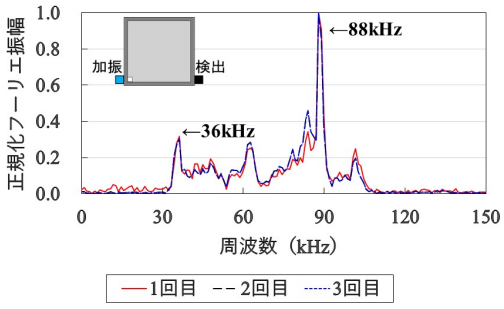


図-6. 6. 15　内部損傷 1 か所①の正規化 FFT 結果

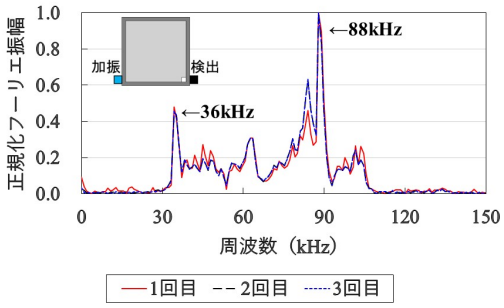


図-6. 6. 16　内部損傷 1 か所②の正規化 FFT 結果

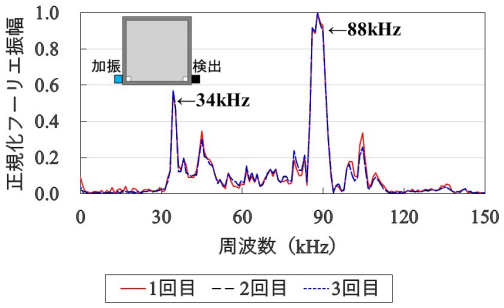


図-6. 6. 17　内部損傷 2 か所の正規化 FFT 結果

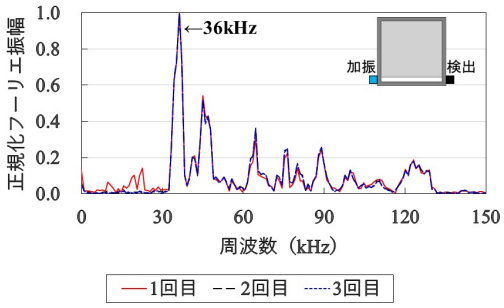


図-6. 6. 18　内部損傷 1 本の正規化 FFT 結果

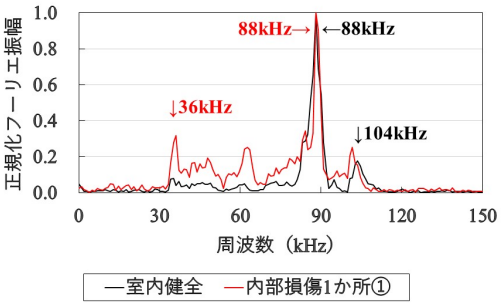


図-6. 6. 19　健全と内部損傷 1 か所①の比較

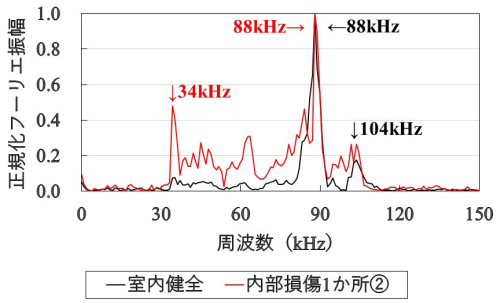


図-6.6.20　健全と内部損傷 1 か所②の比較

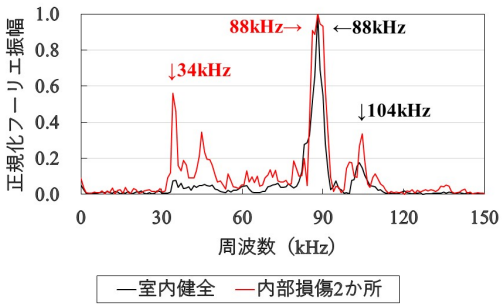


図-6.6.21　健全と内部損傷 2 か所の比較

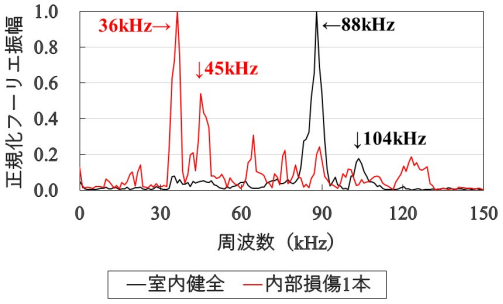


図-6.6.22　健全と内部損傷 1 本の比較

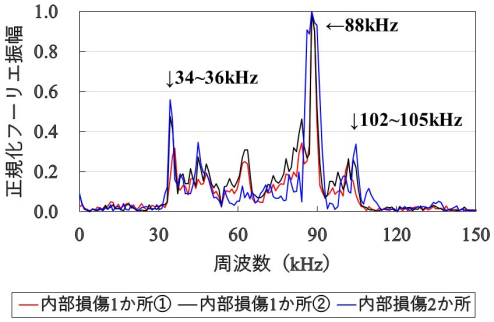


図-6.6.23　室内ゴム支承の正規化 FFT 結果

支承は，88kHz で卓越するが 36kHz 近傍で 1 次卓越が確認できた。内部損傷支承については，いずれも 36kHz 近傍で卓越する特徴が確認できた。「内部損傷 1 本」のみ，全体的に 88kHz よりも低周波成分で卓越することを確認できた。 内部損傷が大きくなるほど弾性波の伝搬距離が長くなり，高周波成分が減衰した可能性が考えられる。以上を踏まえると，「内部損傷 1 本」の正規化した FFT 結果は健全支承や他の内部損傷支承と異なり，主に低周波成分で卓越していたことから透過弾性波が内部損傷の影響を受けたと推測される。本実験では，内部ゴム層の損傷規模が大きい場合，88kHz よりも低周波成分で卓越する可能性が考えられる。

「内部損傷 1 か所①」，「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」で 1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6.6.23** に示す。「内部損傷 1 か所①」は加振センサから 10mm，「内部損傷 1 か所②」は 167mm の位置に欠陥が存在する。内部損傷 2 か所は加振センサから 10mm と 167mm の位置にそれぞれ欠陥が存在する。**図-6.6.23** に示すように，いずれのゴム支承も卓越周波数やスペクトル形状は同様であり，加振センサから内部損傷までの距離条件を変化させたが，FFT 解析では明確な相違を確認することができなかった。また，**図-6.6.23** の「内部損傷 2 か所」が示すように，加振センサと検出センサの直線距離に占める内部損傷の割合が大きいゴム支承では，36kHz 近傍での卓越傾向が大きいことが確認できた。

しかし，いずれのゴム支承も同様の FFT 結果を示していたことから，FFT 結果やその卓越周波数のみに着目した分析のみでは内部損傷の位置や規模について同定することはできなかった。

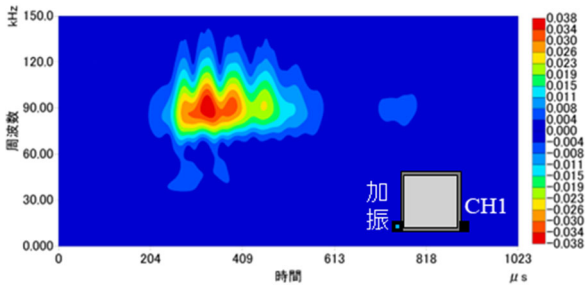


図-6.6.24　室内健全の Wevelet 結果

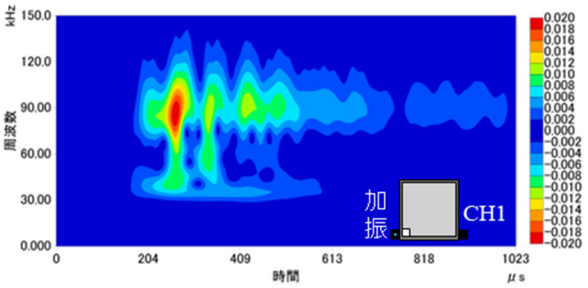


図-6.6.25　内部損傷 1 か所①の Wevelet 結果

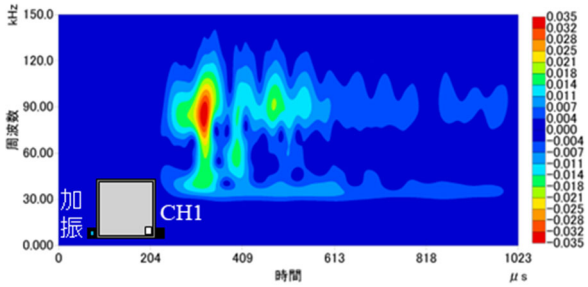


図-6.6.26　内部損傷 1 か所②の Wevelet 結果

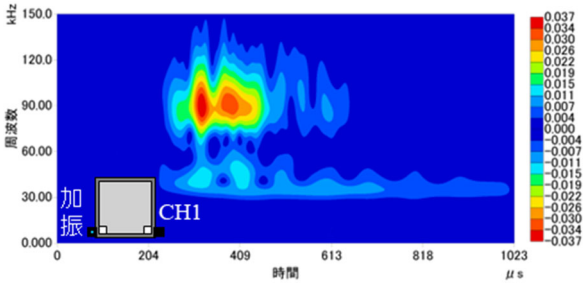


図-6.6.27　内部損傷 2 か所の Wevelet 結果

次に，Wevelet 結果を**図-6.6.24** から**図-6.6.28** に示す。図内の色はフーリエ振幅値の大小を示している。周波数卓越やその時刻歴に共通点と相違点が確認できる。そのため，内部損傷が積層ゴム支承に内在することで透過した弾性波が影響を受けることを明確にした。そして，室内健全支承を除く内部損傷支承では，36kHz 近傍の周波数が強く反応している特徴が共通する。さらに，内部損傷 1 本の場合は，フーリエ振幅値の大きな現象が 36kHz 近傍に確認することができる。また，約 200μsec から 620μsec まで継続しており，他の内部損傷支承よりも長い時間卓越していることが分かる。Wevelet 結果の外観も異なることが確認できる。そのため，内部損傷 1 本のように，比較的大きな損傷が内在する場合，弾性波の伝搬経路に影響を及ぼし，周波数特性とその時刻歴に変化が生じることが確認できた。また，**図-6.6.28** の Wevelet 結果に示すように，内部損傷 1 本の時刻歴では高周波成分のフーリエ振幅が最初から減衰していることが確認できる。そのため，FFT 結果が低周波成分で卓越した原因として，透過弾性波が内部損傷を避けることで伝搬距離（周期）が長くなり高周波成分が減衰した可能性が考えられる。このことから，内部損傷が明らかに大きい場合，Wevelet 結果で損傷位置や規模について推定できる可能性がある。

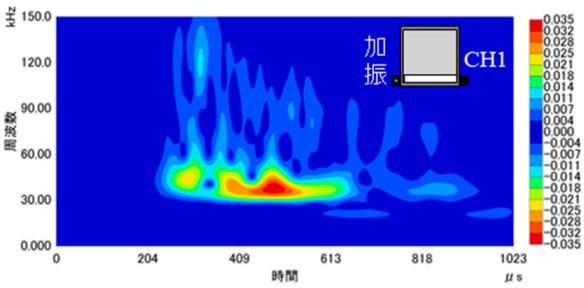


図-6.6.28　内部損傷 1 本の Wevelet 結果

6.6.3　震後点検で想定される活用方法（交通振動による活荷重が望めない場合の技術）

ゴム支承は地震により設計耐力以上のせん断力や引張力を受けると，ゴム層の剥離や破断（ゴムと鋼板との接着面の剥離），空隙の発生といった内部損傷が発生する可能性がある。近年の大規模地震では，ゴム支承の破断事例が多く報告されているが，同橋梁に架設されているゴム支承でも被害状況には個体差がある。周囲を被覆ゴムで覆ったゴム支承は，大きく変形しても外観に異常が無ければ健全なように見えるが，同橋梁に破断したゴム支承があるとすればその健全性は懐疑的である。

本項では，技術の適用事例として「AE 法による損傷評価」を 6．6．1（5）1）で，「AE 計測システムを利用した超音波探傷法による損傷評価」を 6．6．1（5）2）で紹介した。いずれも，現状（健全あるいは損傷を含んだ状態）から，損傷が進展したことを評価可能か室内実験で検討した。前者については，交通振動を模擬した繰返し圧縮載荷試験を実施している。この手法は，車両が伸縮装置部を通過する際に生じる振動がゴム支承に伝わることを想定しており，供用中でも通行規制することなくモニタリング計測できることをイメージしている。したがって，多くの交通量が見込めること，輪荷重が通過する位置の直下付近にゴム支承が設置されていること（活荷重がより伝わりやすい），などが条件として必要であり，受動的（passive）な手法である。

震後点検では，交通規制などによって車両交通量が見込めない場合や速度規制などで大きな活荷重が見込めない場合がある。この時，6．6．1（5）1）で紹介した手法では，長時間モニタリングしても，少量の結果しか見込まれず評価が困難である。そこで，活荷重に依存せず振動を励起する能動的（active）な手法として，UT 法の検討を進めた。現地計測の対象として選定した橋梁は，活荷重が見込める橋梁であったが交通量が非常に少ないこと，伸縮装置部に多大な損傷を受けており，活荷重が加わったとしてもゴム支承まで伝達しない可能性があったため，6．6．1（5）2）で紹介した「AE 計測システムを利用した超音波探傷法による支承内部の損傷評価」を適用した。

6.6.4　検討事例（現地計測）

（1）計測対象橋梁

本検討で計測対象として選定した橋梁（以降，A 橋と記す）は令和 6 年能登半島地震で被災した 2 径間連続鋼桁橋：2000 年架設の橋である。A 橋を**写真-6.6.4** に示す。下流側を G1 とし上流側に向かって 8 基の支承が架設されている。

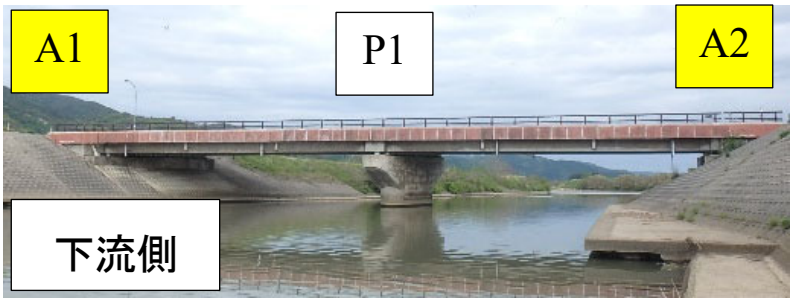


写真-6.6.4　計測対象の橋梁

(2) 現地計測 1 回目

2024 年 2 月 25 日に実施した現地計測（A2G8, A1G1）のセンサ位置を**表-6.6.7** と**表-6.6.8** に示す。また，**写真-6.6.5** と**写真-6.6.6** に計測したゴム支承を示す。A2G8 には外観上のせん断ひずみを確認できるが，ゴム支承断面に対して微小であることから，ここでは長方形断面として考えた。また，破断支承（A1G1）についても同様に長方形断面として考えた。A 橋に供用中のゴム支承は，橋軸直角方向の A 面の対面に AE センサを設置することが物理的に不可能であった。そのため，橋軸方向の B 面とその対面に加振センサと検出センサを設置した。AE センサはゴム支承の外観目視で確認することができた内部鋼板の位置に基づいて，室内実験と同様に内部ゴム 1 層目かつ鋼板端部を挟むように設置して AE 計測を実施した。現地計測の状況を**写真-6.6.5** と**写真-6.6.6** に示す。

表-6.6.7　A 橋ゴム支承のセンサ座標

（A2G8，A1G1）

	室内実験		現地計測 A 橋			
	健全支承・ 内部損傷支承		外観変状が無い支承 （A2G8）		破断支承 （A1G1）	
	加振	検出	加振	検出	加振	検出
X（mm）	0	180	0	400	0	417
Y（mm）	10	10	40	40	40	40
Z（mm）	82	82	170	170	170	170

表-6.6.8　A 橋ゴム支承のセンサ位置箇所（A2G8，A1G1）

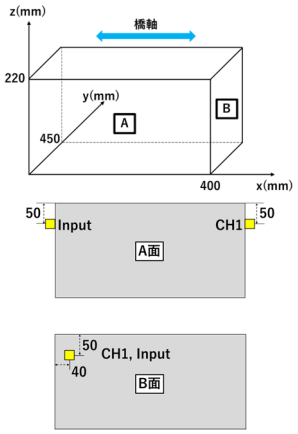
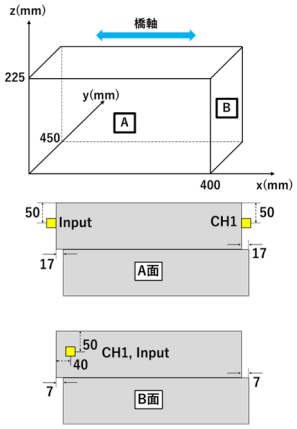
外観変状が無い支承 （A2G8）	破断支承 （A1G1）
	



写真-6.6.5　外観変状が無い支承（A2G8）



写真-6.6.6　破断支承（A1G1）



写真-6.6.7　A1G1 の計測状況



写真-6.6.8　A2G8 の計測状況

A 橋計測で 1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6.6.29** に示す。**図-6.6.29** に示すように，正規化した FFT 結果の概形や卓越周波数の傾向は，「外観変状が無い支承」と「破断支承」で異なることが確認できる。そのため，弾性波の伝搬経路は全く異なると推測される。「外観変状が無い支承」は，88kHz 付近で 1 次卓越が確認できたが，35kHz 付近でもフーリエ振幅が卓越しており，この特徴は室内実験の「健全支承」とは異なる結果が得られた。一方，「破断支承」では，48kHz で 1 次卓越，36kHz で 2 次卓越が確認できた。

A 橋の「外観変状が無い支承」と室内実験の健全支承，内部損傷支承のそれぞれについて，1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6.6.30** と**図-6.6.31** に示す。ここで，ゴム支承の寸法は A 橋計測と室内実験で異なる。しかし，内部構成が同じゴム支承同士の比較であることから，FFT 結果の卓越周波数が寸法の影響を大きく受けないと仮定して比較を行った。**図-6.6.30** に示すように，いずれのゴム支承も 1 次卓越が 88kHz で一致した。また，外観変状が無い支承のみ 36kHz で卓越し，同様のスペクトル形状を示した。そして，**図-6.6.31** に示すように，「外観変状が無い支承」の FFT 結果のスペクトルは「内部損傷 1 か所①」や「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」の内部損傷支承と同様の形状と卓越周波数を示すことも確認できる。本検討では，外観目視で破断しておらず残留変位も少ない特徴に基づいて「外観変状が無い支承」と定義した。しかし，室内実験の内部損傷モデルの支承で特徴的に表れた

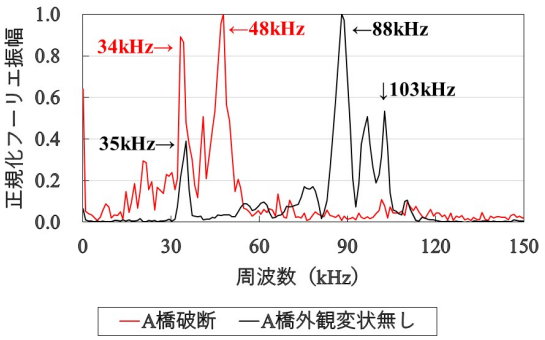


図-6.6.29　A 橋支承の正規化

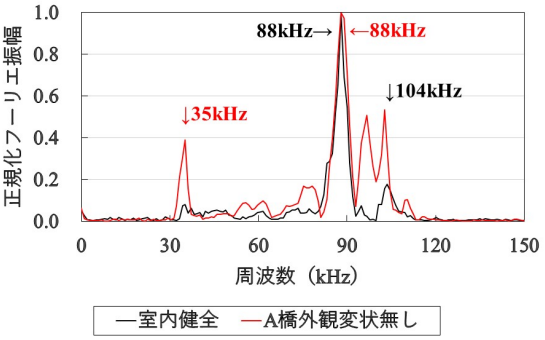


図-6.6.30　室内健全と A 橋の比較

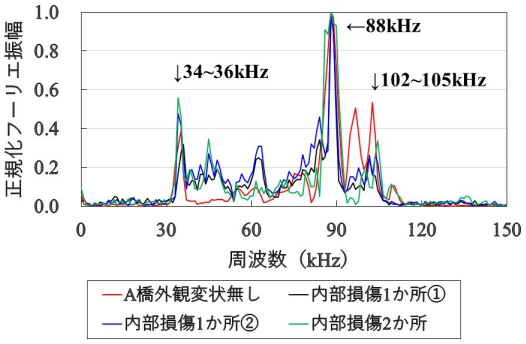


図-6.6.31　室内内部損傷と A 橋の比較

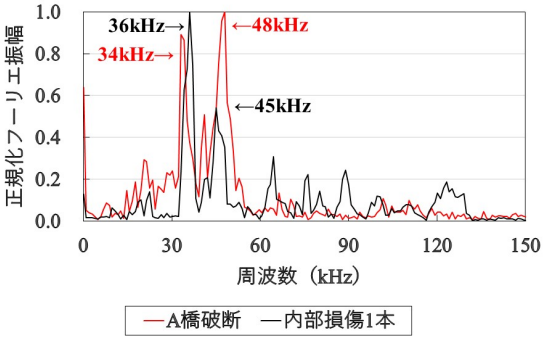


図-6.6.32　内部損傷 1 本と A 橋破断の比較

36kHz 近傍における周波数卓越やスペクトル形状に基づくと，加振・検出センサ間に内部損傷が存在する可能性も否定できない。

A 橋の「破断支承」と室内実験の「内部損傷 1 本」のゴム支承について，1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6.6.32** に示す。**図-6.6.32** に示すように，いずれのゴム支承も 88kHz 近傍よりも低周波成分で卓越する傾向が一致した。また，88kHz 近傍で顕著な卓越が起こらない点で他の室内ゴム支承や A 橋の「外観変状が無い支承」と FFT 結果の特徴が異なる特徴が確認できた。そして，いずれのゴム支承も室内実験での内部損傷支承で特徴的に表れた 36kHz 近傍における卓越が一致することも確認できる。つまり，A 橋の「破断支承」の内部に損傷が生じていると仮定すると，室内実験と同様の傾向が確認できた。

しかし，室内実験の供試体で模擬した内部損傷と供用中のゴム支承で実際に発生する内部損傷では，破断面等に差異があると考えられることに留意する必要がある。そして，AE 計測ができたゴム支承は各 1 基と少ない。そのため，現地計測データも増やして評価の妥当性を検証する必要がある。

Wevelet 結果を**図-6.6.33** と**図-6.6.34** に示す。**図-6.6.28** の内部損傷 1 本の Wevelet 結果と**図-6.6.34** の A 橋破断支承の Wevelet 結果を比較すると，**図-6.6.32** に示すような 1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果は 36kHz 近傍を含む低周波成分で卓越する傾向が一致した。**図-6.6.28** と**図-6.6.33** に示すように，両者は低周波成分で卓越する傾向は同様であるが，破断支承は 1 次卓越に要する時間が内部損傷 1 本よりも短く，409μs より前に 1 次卓越することが確認できる。内部損傷 1 本の Wevelet 結果は，409μs に遅れて 1 次卓越している。ここで，室内実験の Wevelet 結果で 1 次卓越に要した時間に着目すると，内部損傷 1 本を除く内部損傷支承や室内健全支承は 409μs より前に 1 次卓越している。この 409μs という時間については固定されるものではなく，本実験において確認できた時間である。

外観変状が無い支承（A2G8）の Wevelet 結果に着目する。**図-6.6.33** に示すように，A 橋の外観変状が無い支承は周波数卓越の特徴が破断支承と明らかに異なり，409μs より前に 1 次卓越している。室内実験の Wevelet 結果と比較すると，A 橋の外観変状が無い支承は，内部損傷支承に特徴的な 36kHz 近傍の周波数卓越を有するが，88kHz 近傍における 1 次卓越とその卓越時間・卓越継続時間の特徴が健全支承と同様である。ここで，**図-6.6.31** に示す「A 橋の外観変状が無い支承」，「内部損傷 1 か所①」，「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」の正規化した FFT 結果と比較すると，正規化した FFT 結果では 36kHz 近傍で卓越する傾向は同様である。

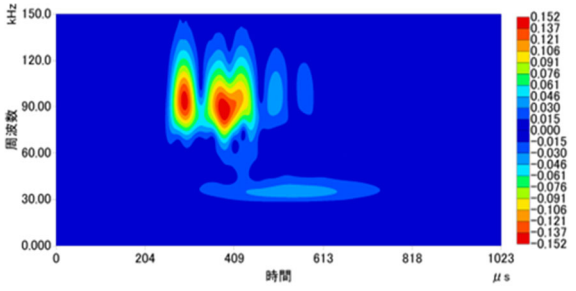


図-6.6.33　A2G8 の Wevelet 結果

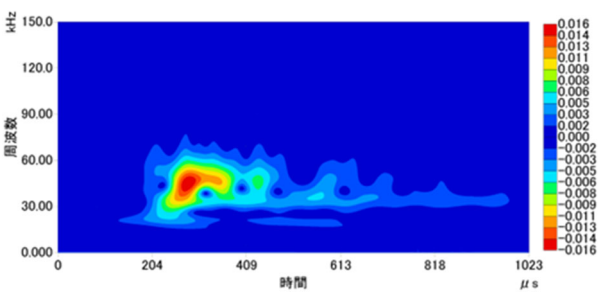


図-6.6.34　A1G1（破断）の Wevelet 結果

しかし，外観変状が無い支承の Wevelet 結果は，それ以外より遅れて 36kHz 近傍で卓越し，卓越時間も短いことがわかる。36kHz 近傍の卓越時間が短い点では加振センサから内部損傷までの距離が近い「内部損傷 1 か所①」と同様な傾向をしたため，内部損傷が生じていると考えられる。ただ、36kHz 近傍の周波数卓越が起きる時間は室内実験のいずれのケースとも一致しないため，内部損傷の規模と位置が既知な室内実験で追加検証を行う必要がある。

（3）現地計測 2 回目

2024 年 11 月 22 日に実施した現地計測（A1G2）の計測状況を**写真-6.6.9** と**写真-6.6.10** に，センサ位置を**表-6.6.9** と**表-6.6.10** に示す。外観上のせん断ひずみが確認できるが，ゴム支承断面に対して微小であることから，ここでは長方形断面として考えた。また，2 回目の現地計測では加振センサの位置を 4 通り実施したため，センサ配置は 4 パターン存在する。 AE センサはゴム支承の外観目視で確認することができた内部鋼板の位置に基づいて，室内実験と同様に内部ゴム 1 層目かつ鋼板端部を挟むように設置して AE 計測を実施した。**表-6.6.9** の赤字で示した AE センサについては，加振センサの位置を表している。

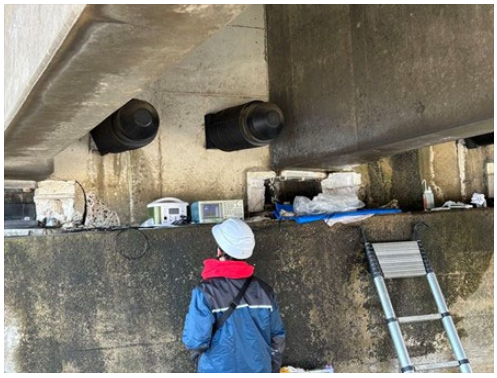


写真-6.6.9　A1G2 の計測状況-その 1

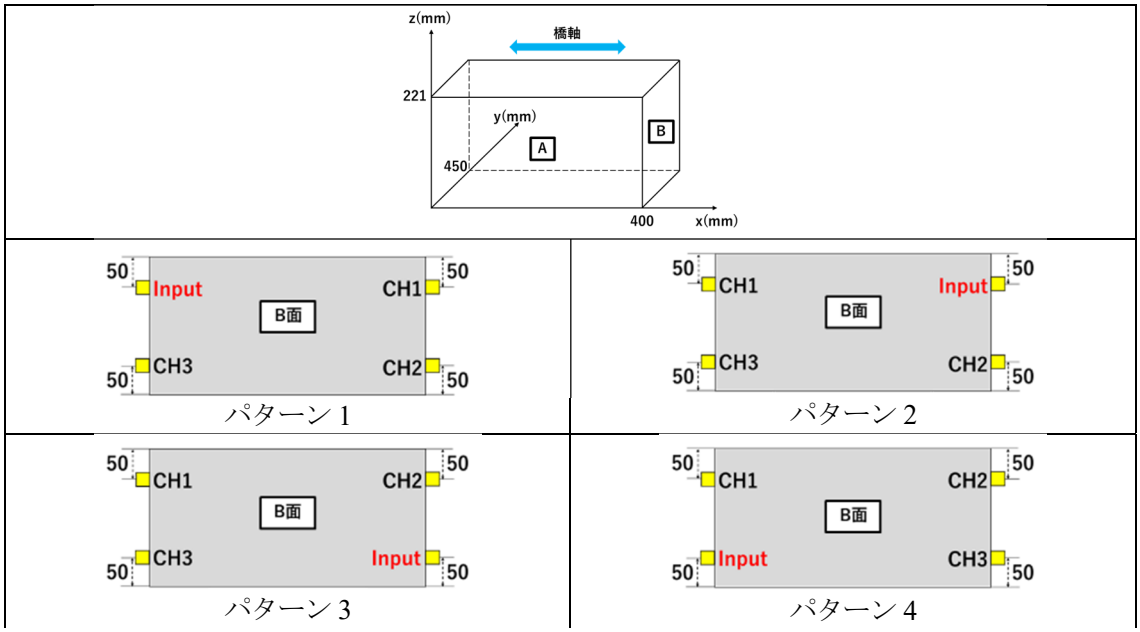


写真-6.6.10　A1G2 の計測状況-その 2

表-6.6.9　A 橋ゴム支承のセンサ座標（A1G2）

	外観変状が無い支承							
	パターン 1				パターン 2			
	加振	CH1	CH2	CH3	加振	CH1	CH2	CH3
X（mm）	360	360	360	360	360	360	360	360
Y（mm）	0	450	450	0	450	0	450	0
Z（mm）	171	171	50	50	171	171	50	50
	パターン 3				パターン 4			
	加振	CH1	CH2	CH3	加振	CH1	CH2	CH3
X（mm）	360	360	360	360	360	360	360	360
Y（mm）	450	0	450	0	0	0	450	450
Z（mm）	50	171	171	50	50	171	171	50

表-6.6.10　A 橋ゴム支承のセンサ設置箇所（A1G2）



ここでは，加振電圧 10V のデータについて記載する。まずは，センサ配置のパターン 1 とパターン 2 の結果を示す。加振センサ対面に設置した AE センサの検出波について，1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6.6.35** から**図-6.6.38** に示す。現地計測 2 回目（A1G2）と 1 回目（A2G8），現地計測 2 回目（A1G2）と室内実験（内部損傷 1 本）をそれぞれ比較している。

Wevelet 結果を**図-6.6.39** から**図-6.6.40** に示す。パターン 1 と 2 は，1 次卓越周波数が一致した。その他の箇所は，スペクトルの外形は異なるが，ほぼ同様の周波数で卓越していることがわかる。パターン 1 と 2 の Wevelet 結果は，周波数卓越とその時刻歴は外観上，同様の傾向を示すことも確認できる。そのため，同じゴム層を挟む対面同士の AE センサについては，加振位置と検出位置を入れ替えても同様の周波数卓越が得られた。また，**図-6.6.39** と**図-6.6.40** はいずれも外観上の変状を確認できなかった支承であり，加振センサ対面の検出センサの結果であるが，A1G2 と A2G8 で Wevelet 結果の傾向が異なる。分類上，外観変状が無い支承としたが残留変位の影響により，内部の状態が両者で異なることも考えられる。A1G2 と A2G8 のスペクトル形状はいずれも合致しないが同様の周波数卓越を示す箇所が確認できる。パターン 1 と 2 は，室内実験の内部損傷支承に特徴的であった 36kHz 近傍に周波数卓越を有していないが，75kHz の 1 次卓越周波数と 47kHz の周波数卓越が一致する。「内部損傷 1 本」は 45kHz で 2 次卓越している。つまり，内部損傷の規模が大きい室内ゴム支承においても 47kHz 近傍で強い周波数卓越をしていた。

しかし，47kHz 近傍以外で「内部損傷 1 本」と一致する周波数卓越はない。前項で示したように，時刻歴で高周波成分が減衰する傾向も確認できず，Wevelet 結果の全体的な傾向は，室内実験で用意した内部損傷支承の結果とパターン 1 と 2 の結果で合致しなかった。また，パターン 1 と 2 の Wevelet

結果は 1 次卓越周波数とは別の 47kHz 近傍で 2 回の周波数卓越をした。周波数卓越する時間こそ異なるが，この傾向は 1 次卓越周波数とは別の 36kHz 近傍で周波数卓越した「内部損傷 1 か所①」，「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」に近い。室内実験に用いた内部損傷支承の種類，加振センサ・内部損傷・検出センサの位置関係の種類には限りがある。そのため，本検討で使用した室内実験における内部損傷パターンとは異なる損傷パターンであると考えられる。

以上より，パターン 1 と 2 の FFT・Wevelet 結果では，室内実験の結果と共通する点，共通しない点を確認できた。パターン 1 と 2 の FFT 結果は，内部損傷の規模が大きいゴム支承と 47kHz 近傍の周波数卓越が共通したため，本研究の限りでは，47kHz 近傍の周波数卓越も内部損傷が内在する指標となり得る。

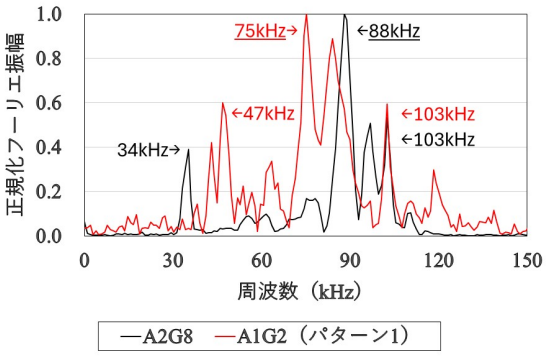


図-6.6.35 A2G8 と A1G2（パターン 1）

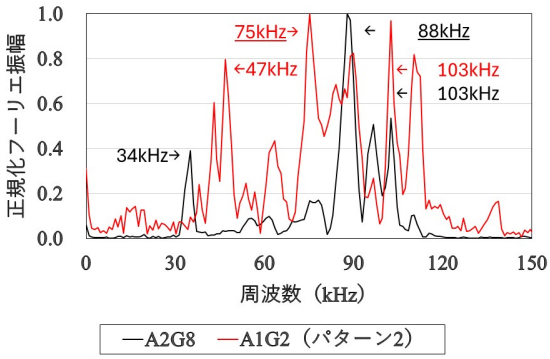


図-6.6.36 A2G8 と A1G2（パターン 2）

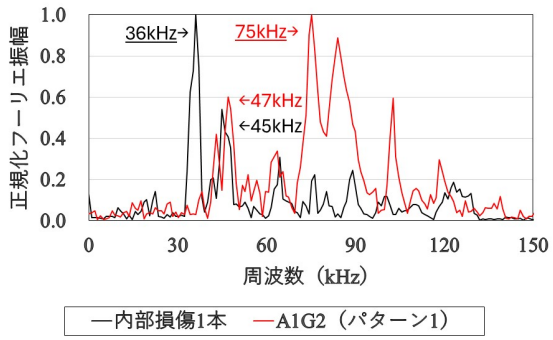


図-6.6.37 内部損傷 1 本と A1G2（パターン 1）

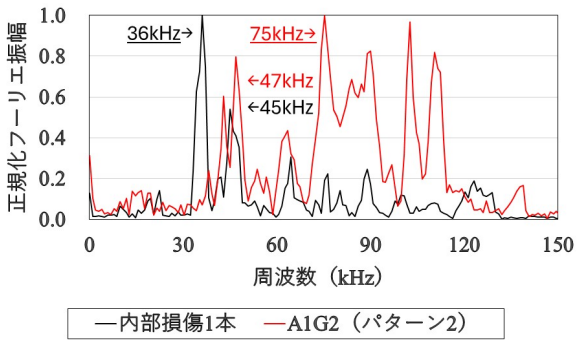


図-6.6.38 内部損傷 1 本と A1G2（パターン 2）

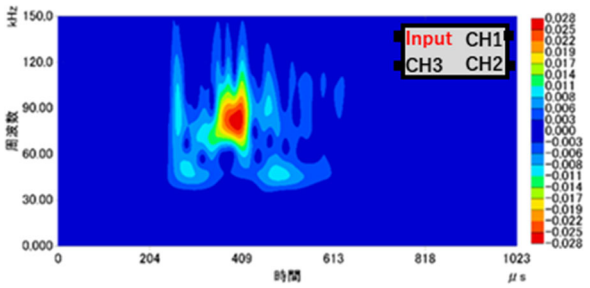


図-6.6.39 A1G2（パターン 1）の Wevelet 結果

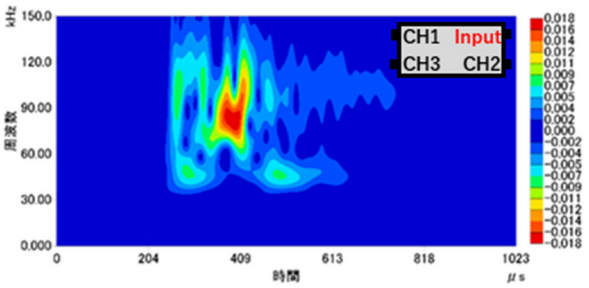


図-6.6.40 A1G2（パターン 2）の Wevelet 結果

次に，センサ配置のパターン 3 とパターン 4 の結果を示す。加振センサ対面に設置した AE センサの検出波について，1 波目に検出した弾性波を高速フーリエ変換し，1 次卓越周波数で正規化した FFT 結果を**図-6. 6. 41** から**図-6. 6. 44** に示す。現地計測 2 回目（A1G2）と 1 回目（A2G8），現地計測 2 回目（A1G2）と室内実験（内部損傷 1 本）をそれぞれ比較している。パターン 3 とパターン 4 は同じゴム層を挟んで AE センサを配置しており，加振センサ・検出センサ位置を入れ替えて AE 計測を行った。

Wevelet 結果を**図-6. 6. 45** から**図-6. 6. 46** に示す。パターン 3 の 1 次卓越周波数が 36kHz であるのに対して，パターン 4 は 90kHz と異なる。しかし，パターン 3 においても 90kHz 近傍で 1 次卓越に迫る周波数卓越が確認でき，パターン 4 は 36kHz 近傍で 1 次卓越に迫る周波数卓越が確認できる。その他の箇所は，数値は異なるが同様の位置で周波数卓越が確認できる。そして，**図-6. 6. 45** と**図-6. 6. 46** に

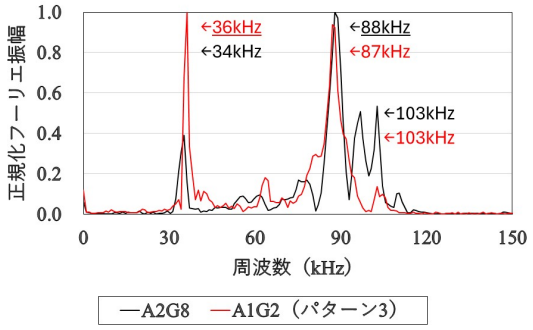


図-6. 6. 41 A2G8 と A1G2（パターン 3）

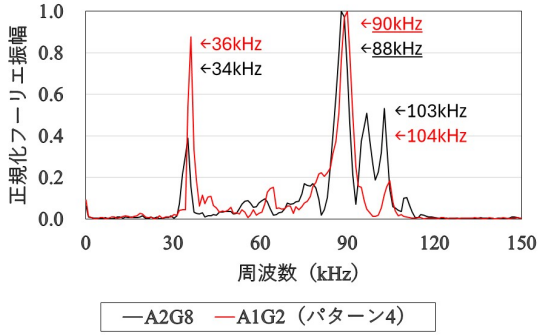


図-6. 6. 42 A2G8 と A1G2（パターン 4）

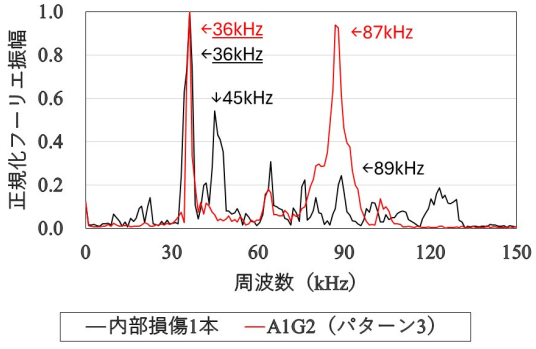


図-6. 6. 43 内部損傷 1 本と A1G2（パターン 3）

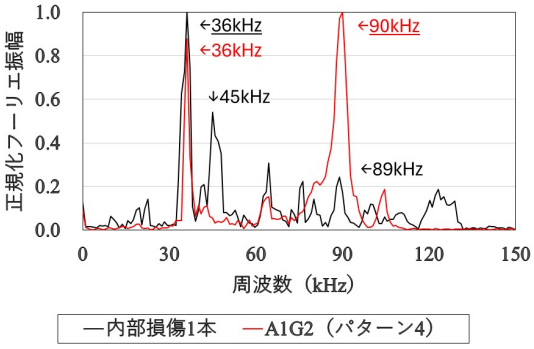


図-6. 6. 44 内部損傷 1 本と A1G2（パターン 4）

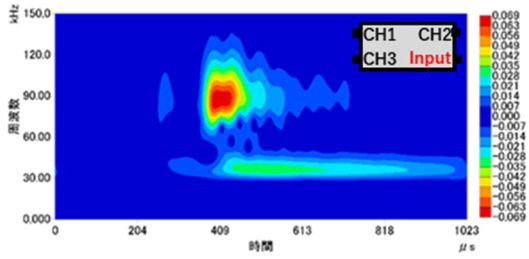


図-6. 6. 45 A1G2（パターン 3）の Wevelet 結果

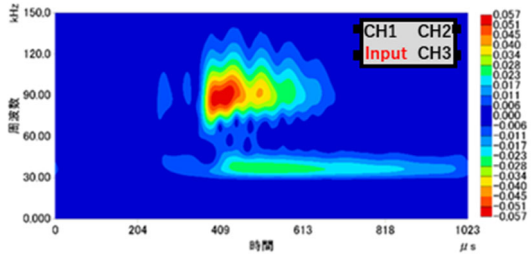


図-6. 6. 46 A1G2（パターン 4）の Wevelet 結果

示すように，パターン 3 と 4 の Wevelet 結果は，周波数卓越とその時刻歴は外観上，同様の傾向を示すことも確認できる。前述したパターン 1 と 2 の結果を踏まえると，同じゴム層を挟んだ対面同士の AE センサについては，卓越周波数が異なるものの，加振位置と検出位置を入れ替えても同様の結果が得られた。

Wevelet 結果について，周波数卓越の位置は A1G2 と A2G8 で同様ではあるが，88kHz 近傍や 36kHz 近傍の卓越継続時間の傾向は両者では異なる。パターン 1 と 2 と同様に，分類上は外観変状が無い支承としたが内部損傷が存在する可能性がある。A2G8 と A1G2 のスペクトル形状はいずれも合致しないが，パターン 3 と 4 は 36kHz 近傍または 88kHz 近傍に周波数卓越を有するスペクトル形状の特徴が合致している。つまり，A1G2 は室内実験の内部損傷支承に特徴的であった 36kHz 近傍に周波数卓越を有する傾向が一致した。そして，A1G2 は A2G8 や「内部損傷 1 か所①」，「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」の内部損傷支承と同様の周波数卓越を示したと言える。

しかし，内部損傷の規模が大きいゴム支承に特徴的である 88kHz 近傍にほとんど周波数卓越を持たず主に低周波成分で卓越するほどの傾向は確認できない。Wevelet 結果に着目すると，周波数卓越や 36kHz 近傍の卓越継続時間が継続する特徴が「内部損傷 1 か所①」，「内部損傷 1 か所②」，「内部損傷 2 か所」に近い傾向である。「内部損傷 1 本」のように，時刻歴で高周波成分が減衰する傾向も確認できない。そのため，パターン 3 と 4 の加振センサ・検出センサ間については，透過弾性波の高周波成分が大きく減衰するほどの内部損傷はないと推察される。

以上より，現地計測 2 回目のパターン 3 と 4 については，室内実験や現地計測 1 回目と同様の傾向を確認することができた。室内実験の結果に基づくと，パターン 3 と 4 の加振センサ・検出センサ間に内部損傷が存在する可能性がある。また，透過弾性波の FFT 結果や Wevelet 結果を踏まえると，内部損傷の規模については，「内部損傷 1 本」ほど大きな規模ではないと考える。

6.6.5 まとめ

1) 内部損傷が既知である室内実験の Wevelet 結果では，周波数卓越や卓越の時刻歴に相違点を確認できた。このことから，内部損傷がゴム支承に内在することで透過弾性波が影響を受けることを明確にした。
2) 内部損傷 1 本のように比較的大きな損傷が内在する場合，FFT 結果は低周波成分で卓越し，Wevelet 結果の時刻歴では時間とともに高周波成分が減衰することを確認した。このことから，透過弾性波は内部損傷を避けて周期が長くなることで高周波成分が減衰した可能性がある。
3) 外観変状が無い支承（A1G2）では，センサ配置を 4 通り計測したが，内部損傷が小さい室内ゴム支承で特徴的に表れた 36kHz 近傍の卓越傾向が一致する場合と一致しない場合を確認した。
4) 内部損傷 1 本で 2 次卓越した 47kHz 近傍の周波数卓越を，外観変状が無い支承（A1G2）で確認した。47kHz 近傍の周波数卓越も内部損傷が内在する評価項目となる可能性も考えられる。
5) 加振センサと検出センサが同じ内部ゴム層を対面同士で挟む場合，加振・検出位置を入れ替えても同様の結果が得られた。
6) 本研究で現地計測した A 橋で，外観変状から損傷状態が評価できないゴム支承において，計測結果では内部損傷が存在する可能性が示された。しかし非破壊試験法であるため，その真偽については支承内部を観察しない限り判断ができない。もし同支承が取り換えとなる場合には，その評価の可能性についても検討できれば良いかと考える。
7) 本研究で適用したゴム支承の平面寸法は，AE 法による損傷評価に関する室内実験で 250×250mm，UT 法による損傷評価に関する室内実験で 180×180mm，現地計測で 400mm×400mm であった。紹介したいずれの手法も，ゴム支承のサイズなどに影響を受けると思われる。そのため，今回使用したゴム支承よりも大きな平面寸法のゴム支承に対しては，本手法で評価可能か検討した上で適用可否を判断する必要がある。
8) NASA では，宇宙開発プロジェクトの評価のため，**図-6.6.47** に示す技術成熟度レベル（TRL；Technology Readiness Level）[6.6.7)]が導入されている。現在では，航空宇宙分野だけではなく，建設も含めた幅広い分野で技術評価の基準として利用されている。本手法による検討は，TRL で評価すると TRL4～TRL5 の範囲だと思われる。今後は，実環境における計測事例を増やしつつ，評価システムとしての確立，運用に向けて検討を進めていきたい。

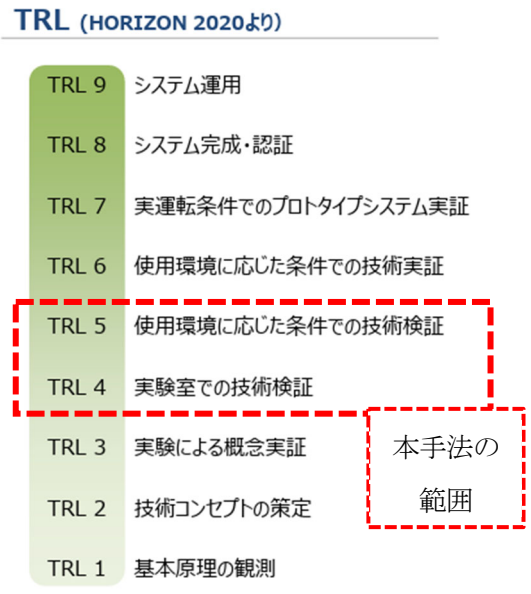


図-6.6.47 技術成熟度レベル（TRL）

参考文献

6.6.1) 日本非破壊検査協会:非破壊検査シリーズ アコースティック・エミッション試験 I, pp. 4-21, 2008.

6.6.2) 大津政康:アコースティック・エミッションの特性と理論―構造物の診断と破壊現象解析―第 2 版, pp. 11-26，森北出版，2005.

6.6.3) 田中陽裕，川崎佑磨，植田健介，伊津野和行 : 繰返しせん断変形が積層ゴム支承の AE 特性に与える影響，土木学会論文集 A1，Vol.74，No.4，pp. I_481-I_489，2018.

6.6.4) 室田亮馬，川崎佑磨，井上和真，姫野岳彦，後智貴，井澤亮介 : 模擬地震波を複数回与えたゴム支承の AE 法による内部損傷評価と残存耐震性能の比較, 土木学会論文集特集号(地震工学), Vol.81, No.13，23-13146，2024.

6.6.5) 崔準祜，成炫禹，原暢彦，今井隆，植田健介 : 軸応力をパラメータとした積層ゴム支承のせん断特性確認実験の再現解析とゴム支承の局部応力変化に関する検討，土木学会論文集 A1，Vol. 74，No. 4，pp. I_795-I_802，2018.

6.6.6) 川崎佑磨，寺村直人，伊津野和行，岡田慎哉 : AE 法による積層ゴム支承の損傷評価に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.71，No.2，244-254，2015.

6.6.7) 経済産業省 : グリーンイノベーション基金事業の今後の進め方について，資料 2，2021.

6. 7　フェーズドアレイによるピン部材の損傷検知技術

6. 7. 1　技術概要および計測原理

（1）超音波フェーズドアレイ試験用語

1）超音波：超音波探傷試験に用いる縦波，横波などの波の総称。
※一般的には 20 kHz 以上とされる。

2）超音波ビーム：媒質中で超音波の大部分のエネルギーが伝搬する領域。

3）音響インピーダンス：媒質の密度ρと音速 c との積で表される媒質固有の値。音圧反射率及び音圧通過率の算出に用いられる。

4）音圧：超音波によって生じる圧力。

5）音速：超音波探傷試験に用いる縦波，横波などの波が媒質中を伝搬する速度。

6）探傷面：探触子を走査する試験体の表面。

7）底面：パルス反射・垂直探傷法における探傷面の反対側の面。

8）境界面：異なった音響インピーダンスをもち，音響的に接触している二つの媒質の境界。

9）反射源：超音波ビームが音響インピーダンスの不連続によって，反射される境界面。

10）縦波：媒質粒子の振動方向と振動の伝搬方向とが同じ波のモード。
※固体中で，音速が最も速い。

11）横波：媒質が固体で，媒質粒子の振動方向と波の伝搬方向が直角の波のモード。

12）モード変換：超音波が境界面で反射又は屈折によって他のモードに変換すること。

13）パルス：超音波探傷試験で用いる極めて短い時間だけ持続する信号。

14）エコー：試験体のきず，底面，境界面などから反射して受信された超音波パルス及びそれが探傷器の表示器に現れた指示。

15）きずエコー：試験体健全部の音響インピーダンスときずの音響インピーダンスとの違いによって，きずから反射したエコー。

16）底面エコー：超音波ビーム中心軸に対して垂直な試験体の底面から反射したエコー。
※通常，垂直探触子で平行な面をもつ試験体を探傷しているときの裏面からのエコーに用いる。

17）多重エコー：2 個以上の境界面又はきずの間で繰り返される超音波パルスの多重反射によって生じるエコー。

18）残留エコー：パルス反射法において，多重エコーが，次の送信パルスが送信された後も残留し，探傷図形に現れるエコー。

19）妨害エコー：探傷図形上のきずエコーが現れる部位に現れ，探傷の妨害となるエコー。くさび内エコー，残留エコー，林状エコー，形状エコーなどを含めた総称である。

20）くさび内エコー：斜角探触子において，振動子から送信された超音波がくさび内で複雑に反射し，振動子に戻るエコー。

※妨害エコーの一種である。

21）林状エコー：試験体内部にある多くの微小の反射源（主として結晶粒界）によるエコー。
※きずエコーは，含まない。

22）集束距離：集束探触子の音源から集束点までの距離。

23）集束点：超音波ビームが集束され最大音圧を示す点。

24）集束範囲：超音波ビームが集束される深さ方向の範囲。

25）振動子：電気エネルギーを音響エネルギーに変換する，又はその逆をする素子。
※圧電セラミックス，圧電セラミックスと樹脂とから成るコンポジット材及びポリマー（高分子圧電材料）が広く用いられている。

26）フェーズドアレイ探触子：超音波ビームの角度や収束距離を電子制御するため，複数個の振動子で構成され，それらが異なった振幅又は位相で独立して作動するように作られた探触子。

27）探触子：超音波の送信や受信を行うために，1 個以上の振動子を組み込んでいる電気–音響変換器。

28）素子／エレメント：アレイ探触子を構成する振動子の最小単位。

29）フェーズドアレイ探傷器：フェーズドアレイ探触子を操作させるために用いる多チャンネル装置。

30）電子走査：アレイ探触子の複数の素子を電子的に切り替えて超音波ビームを走査する方式の総称。

31）機械走査：アレイ探触子を機械的に走査すること。宮動及び手動の両方の走査を含む。

32）フォーカルロー：フェーズドアレイの動作に必要な，各素子に設定する送信や受信のディレイや電圧などのソフトウェア，ハードウエア上の全ての設定。

33）エレベーション：素子幅と直交する方向の寸法。素子長さ。

(2) 技術の概要

道路橋の点検で一般的に活用されている非破壊試験方法を計測目的別に分類すると，**図-6.7.1** に示すようにきずの検出（いわゆる探傷）とひずみ測定とに大別することができる。きずの検出はさらに内部きずを対象とする試験方法と，表層部きずを対象とする試験方法とに大別することが出来る。内部きずを対象とした試験方法の超音波探傷試験について，以下に記す。

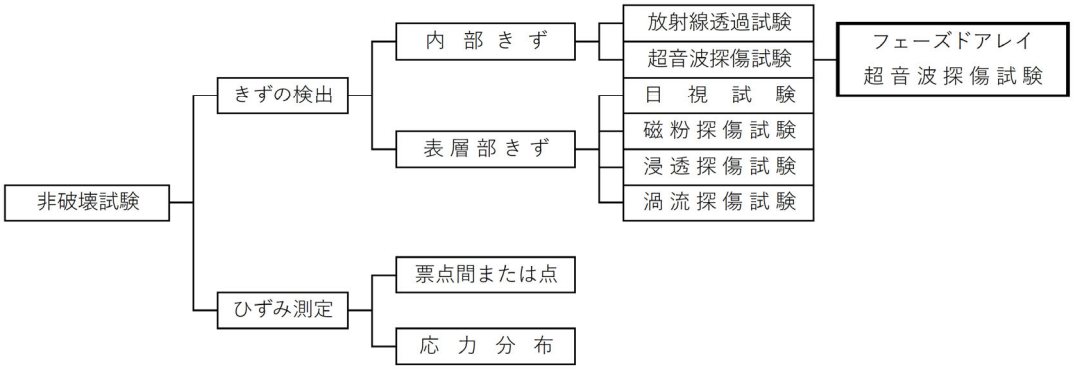


図-6.7.1　非破壊試験の適用区分 [6.7.1)]

1）フェーズドアレイ超音波探傷試験（PAUT）

超音波探傷試験（UT）とは，周波数の高い音波（超音波）を利用して内部きずを検出する非破壊検査技術の 1 つである。

探触子から試験体内部に超音波を伝播させ，きず，底面，若しくは境界面等より反射した超音波パルス（エコー）を受信し，その強さと反射した範囲に基づいて，きずの大きさや形状を推定することにより，評価を行うものである。

PAUT は超音波探傷試験（UT）の応用技術で，複数の素子が配列された特殊な探触子を用いる。**図-6.7.2** にフェーズドアレイ超音波探傷法の原理図を示す。

個々の素子の発振を電子的に制御することにより，任意の超音波ビームを形成することが可能である。超音波ビームを電子走査した範囲の探傷結果を断面画像としてリアルタイム表示させることができ，試験体内部の状態を視覚的に捉えることが可能である。

PAUT は探触子走査を超音波ビームの電子走査に代替できるので，最小限の探傷面から内部きずやその分布を把握できる。

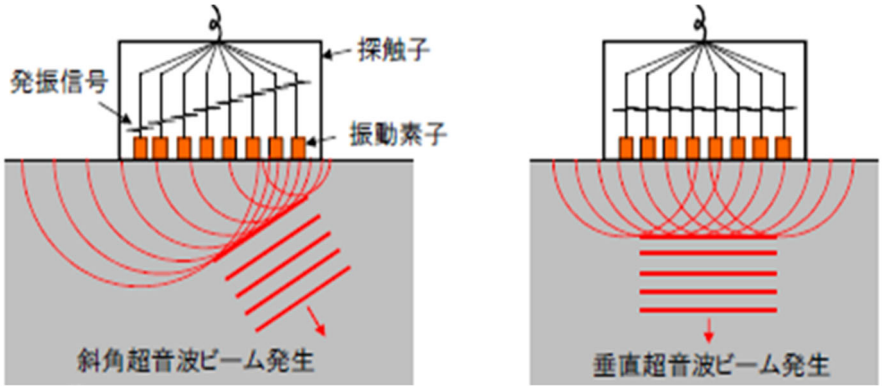


図-6.7.2　フェーズドアレイ超音波探傷法原理図

PAUT は通常，安全性が重要な産業分野で利用が進みはじめている。例えば，航空機，自動車，原子力及び火力発電所，石油化学プラントなどがある。

非破壊検査業界で NDIS 2002「超音波フェーズドアレイ試験用語」，NDIS 2429「超音波フェーズドアレイ試験法通則」が成立し，今後は，「フェーズドアレイ法による鋼溶接部の超音波探傷試験方法」，「フェーズドアレイ探傷器の電気的性能測定方法」，「フェーズドアレイ装置の性能測定方法」が標準化委員会で規格化を諮っている。

(3) 計測原理

超音波探傷では，検査の部位や検査材の形状により，探触子を移動（走査）している。
上記の探触子を移動する走査は除外し，超音波フェーズドアレイ探傷独自の走査方法は JIS Z 2300：2020 [6.7.2)] で，「セクタ走査」と「リニア走査」が定義される。

1) リニア走査 [6.7.3)]

「フェーズドアレイ探触子を用いて，送受信を位相制御することにより同一平面・探触子の真下で超音波ビームを平行に移動させる走査」と JIS に定義される。下図は，リニア走査の例である。

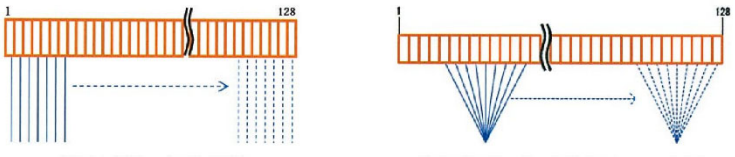


図-6.7.3　リニア走査の例

2) セクタ走査 [6.7.3)]

「位相制御配列探触子を用いて，送受信を位相制御することにより同一平面で超音波ビームを扇方に移動させる走査」と JIS に定義される。下図は，セクタ走査の例である。

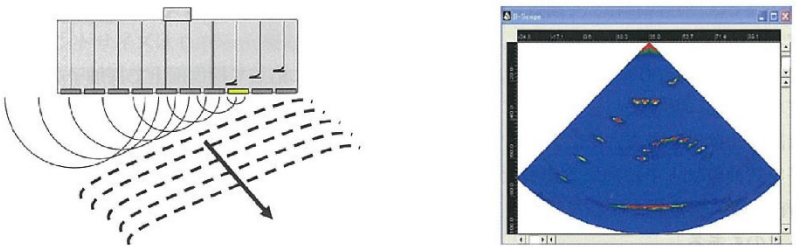


図-6.7.4　セクタ走査の例

3）表示方法 [6.7.3)]

立体像を 3 面に投影して表示する。これを，B，C，D スコープ表示といい，JIS Z 2300　非破壊試験用語で定義される。

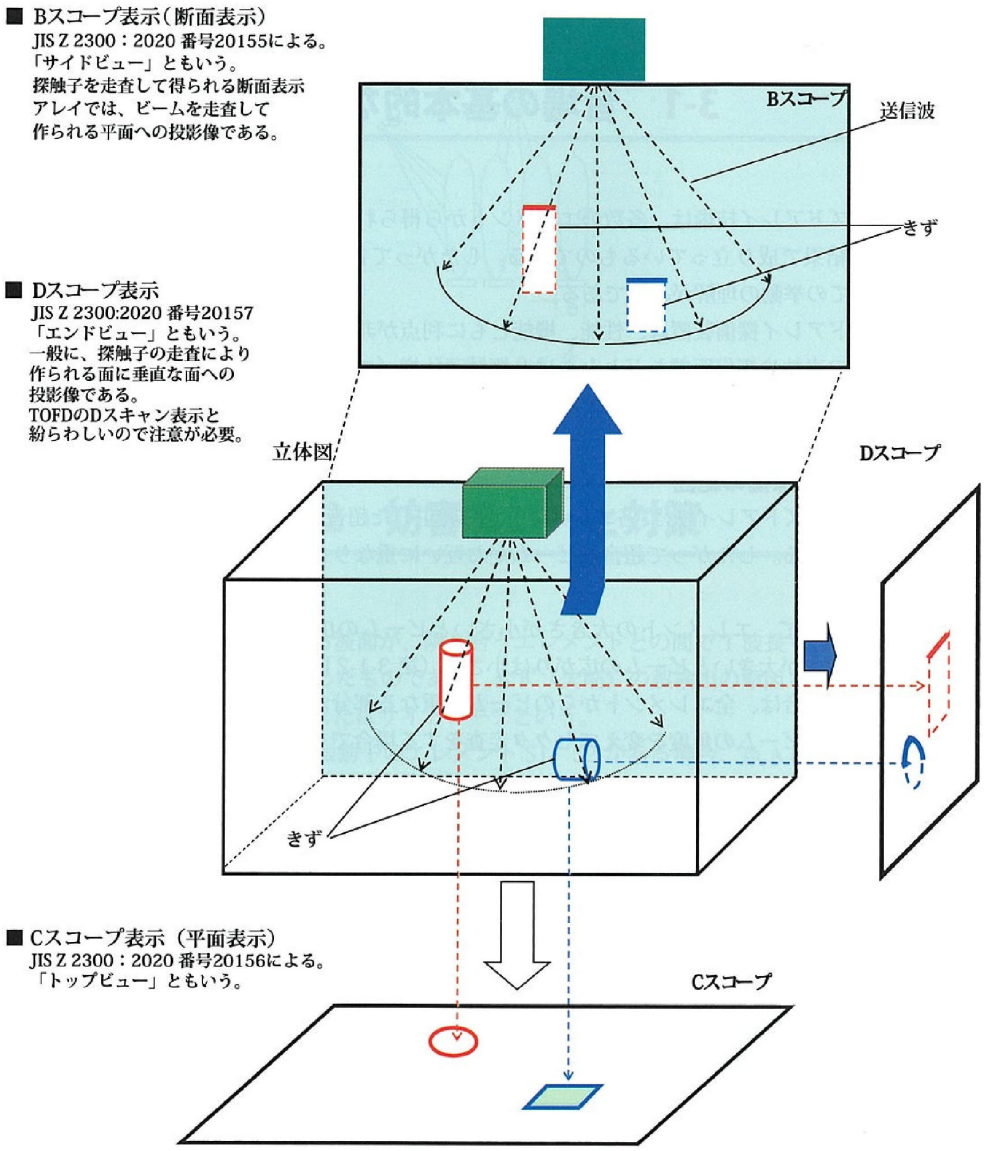


図-6.7.5　フェーズドアレイ探傷結果の表示

（4）ピン計測の仕組み

PAUT によるピン計測の仕組みを**図-6.7.6** に示す。ピンの端面に探触子を押し当て，ピン内部に超音波を伝搬させる。段付き形状，きず，底面から反射して受信されたエコーの強さと分布範囲を元に，ピンの内部状態を推定することでピンの損傷を検知する。

なお，探触子を押し当てるだけでは探傷できる領域が限られるため，探触子を 360° 回転させることでピン全体の損傷を検知する。

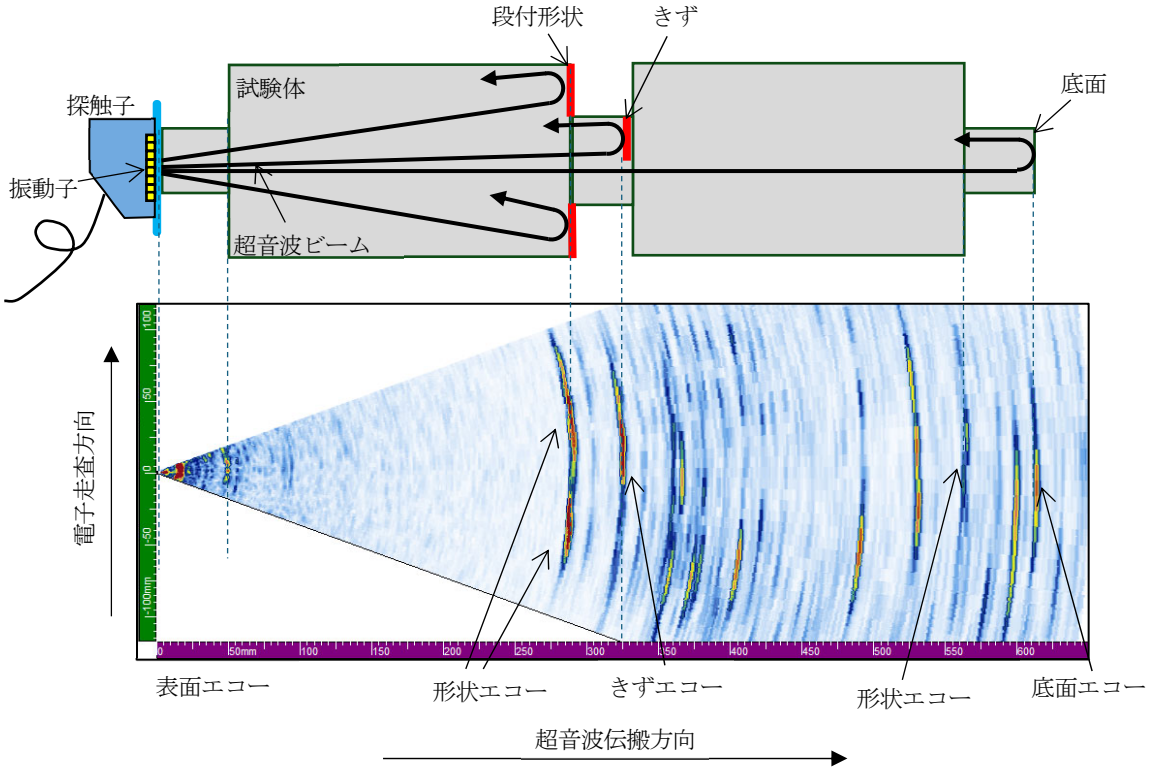


図-6.7.6　PAUT によるピン計測の原理図

1）目視検査及び外観の確認

ピンが大きく損傷している場合，支承の隙間から異常を検知できる場合がある。そのため，先ずは隙間からき裂の有無を目視にて確認する。次に，ピンのねじ径及びピンの全長を計測する。これは PAUT で受信した信号を判断するために，探触子の位置情報とピンの形状情報との照し合せが必要となるためである。本試行ではピンの形状情報として標準設計図からピンの段付き部までの距離とピン径を得て，形状エコーの特定と妨害エコーの推測を行った。

2）破断の有無確認

PAUT を用いてピン全長に対応する位置で「底面エコー」が受信されるか確認する。

破断なく「底面エコー」を受信するイメージと，破断により超音波が遮られて「底面エコー」を受信できないイメージを図-6.7.7 に示す。

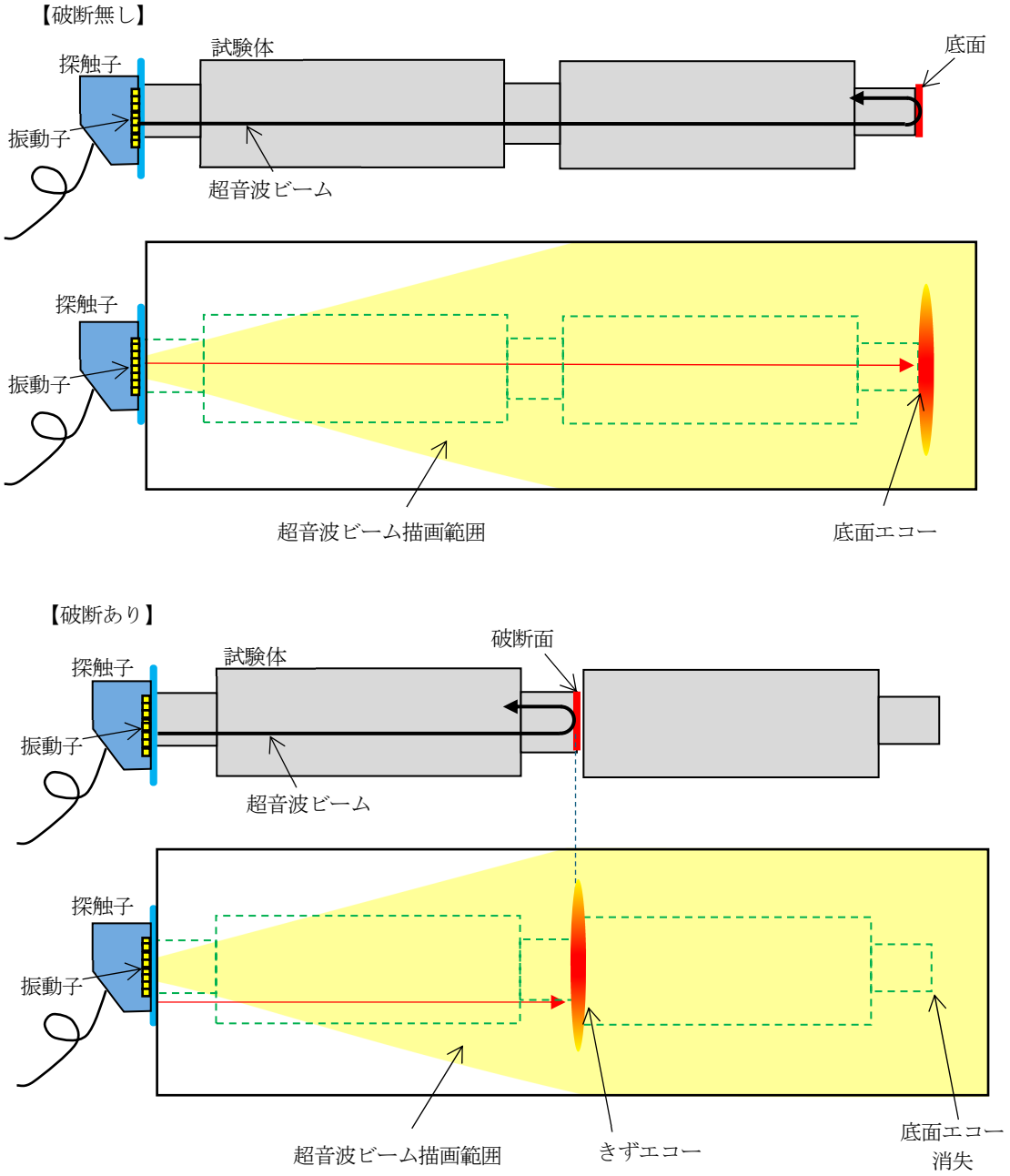


図-6.7.7　ピン破断有無による PAUT 結果の差異イメージ

3）き裂有無／損傷度合の確認

PAUT で「きずエコー」が受信されるか確認して，受信された場合はその分布寸法を測定する。「きずエコー」を受信するイメージを**図-6.7.8** に示す。なお，本試行ではピンの段付き形状からの反射エコーと識別するために，ピン両端から調査を実施した。

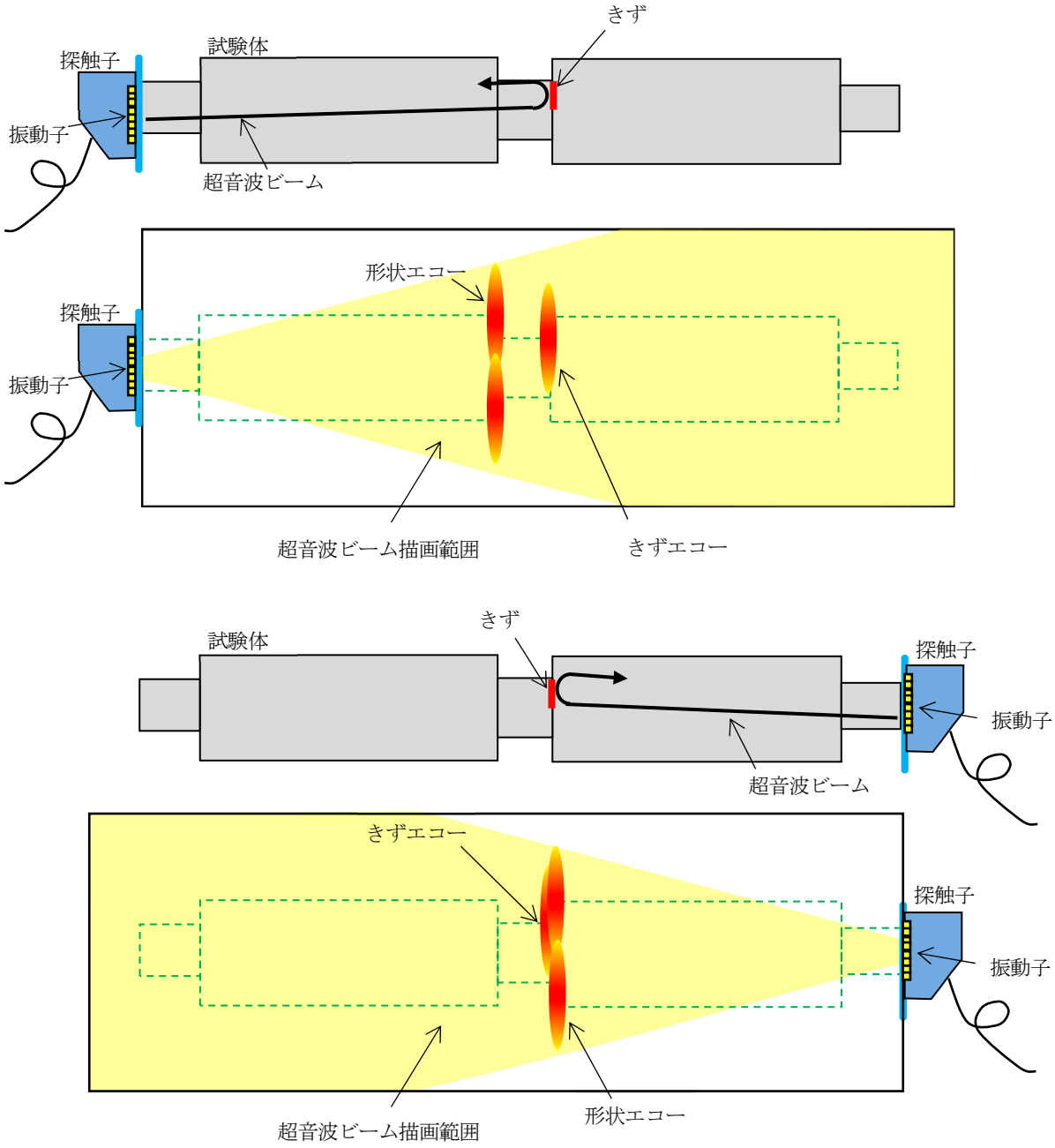


図-6.7.8　探傷面による PAUT 結果の差異イメージ

（5）本項の検討で使用した機器

1）フェーズドアレイ探傷器（PAUT 探傷器）

本項の検討で使用した PAUT 探傷器の仕様を**表-6.7.1** に示す。

表-6.7.1　本項の検討で使用した PAUT 探傷器の仕様

外観	仕様	
	機器名称	TOPAZ64
	重量	9.1kg
	本体サイズ	13.2×26.0×32.6 cm
	連続使用時間	10 時間 (ホットスワップ対応)
	チャンネル数	最大 64/128PR
	画面	12.0 インチ　1024×768
	周波数帯域	0.5～18MHz
	振幅解像度	16bit
	最大印可電圧(50Ω)	150Vpp (バイポーラ)
	フォーカルロー	最大 512
	防水・防塵性能	IP65

2）フェーズドアレイ探触子（PAUT 探触子）

本項の検討で使用した PAUT 探触子の仕様を**表-6.7.2** に示す。

表-6.7.2　本項の検討で使用した PAUT 探触子の仕様

外観	仕様	
	機器名称	5L32-A31
	本体サイズ	30×28×25 mm
	周波数	5.0MHz
	エレメント数	32 素子
	ピッチ	0.60mm
	開口幅	19.2mm
	エレベーション	10.0mm
	最大印可電圧(50Ω)	150Vpp (バイポーラ)
	フォーカルロー	最大 512
	防水・防塵性能	IP65

3）使用条件

本項で使用した機器の使用条件を**表-6.7.3** に，動作環境を**表-6.7.4** にそれぞれ示す。

表-6.7.3 本項で使用した機器の使用条件

項　　目	条　　件
機器の構成	スキャナ本体及び解析ソフト
使用ソフト	Eddyfi 社の装置搭載ソフト：UltraVision Touch 及び，専用解析ソフト：UltraVision
必要最小人員	1 人
資格の必要性	必要 JIS Z 2305-2013 による超音波探傷試験レベル 2 以上

表-6.7.4 動作環境

項　　目	条　　件
耐久性	屋内及び屋外用
動作温度	-10℃～45℃
相対湿度	80%以下（結露なきこと）
防塵/防水	IP66

4）使用方法と留意点

本項で使用した機器は，密閉型の頑丈なアルミニウムケースに入った，ポータブル型の PAUT 探傷器である。人が現場に持ち込み，探触子を手に持ち走査しながらデータ収録を行う方法が標準として想定されている。データの収録中は常に複数の振動素子の処理を実施しており，機器には熱が発生する。冬季は背面搭載された 2 基の冷却ファンにより外気温を用いてアルミニウムケースを冷却できるが，夏季は外気温がそのまま回るだけなので，長時間の連続使用は熱暴走の危険があるため，都度の冷却時間を設ける等の運用上での対策が必要となる。

6.7.2　技術の精度評価

（1）精度評価の方針

本技術は，計測結果から超音波の反射信号の分布位置を推定し，鋼材内部の損傷状況を検知する技術である。ただし，損傷の有無や程度の評価は，資格保有者による定性的な判断に依存する。また，反射分布の特性は計測対象の寸法形状にも依存する。そのため，5 章に示す技術の分類のうち，定性的な計測データを取得する技術となり，一般化された精度評価方法を適用することが困難である。

したがって，本技術の精度評価では，支承部で用いられるピン部材の損傷検知を題材とし，損傷の程度が既知であるピン部材と健全なピン部材の反射分布の特性を比較し，**図-6.7.9** に示す手順フローにより本技術の損傷検知能力を評価する。また，損傷の程度をレベル分けすることで，資格保有者による定性的な判断のばらつきを低減させる方針とする。



図-6.7.9　精度評価手順フロー

(2) 有限要素法による性能検証

1) 「底面エコー」の確認

PAUT のピン破断検知能力の評価は，健全なピンと破断したピンの２つのモデルを使用してシミュレーションを実施することにより行った。

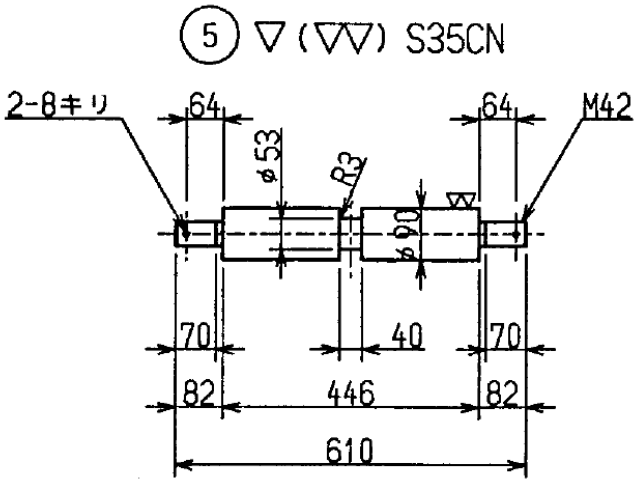


図-6.7.10　シミュレーションモデルの元図面

図-6.7.10 にシミュレーションに用いたモデルの元図面（材質 : S35CN）を記す。本検討ではピン左端面から探触子を当てて，反対面（底面）からの反射信号を受信できるかについて検証した。健全なピンを模擬したモデルのシミュレーション結果を**図-6.7.11** に示す。シミュレーションの結果，底面に対応する位置で「底面エコー」を確認できた。**図-6.7.12** に破断したピンを模擬したモデルをシュミレーションした結果を示す。健全なピンのシミュレーション結果と異なり，底面に対応する位置に「底面エコー」が無いことが確認できた。これらの結果から，PAUT によりピン破断を検知できることが確認できた。なお，底面エコー検出の判断を妨げる妨害エコーについては，**表-6.7.3** に示される資格保有者により適切に判別し，除外している。

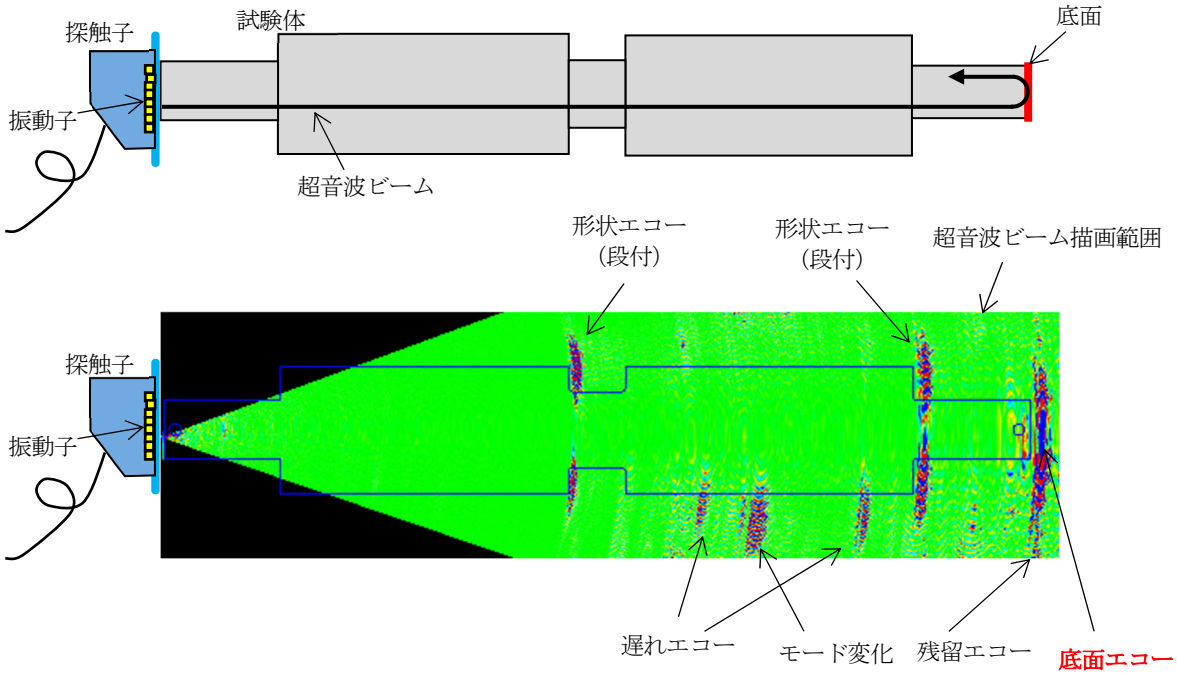


図-6.7.11　健全なピンの PAUT シミュレーション結果

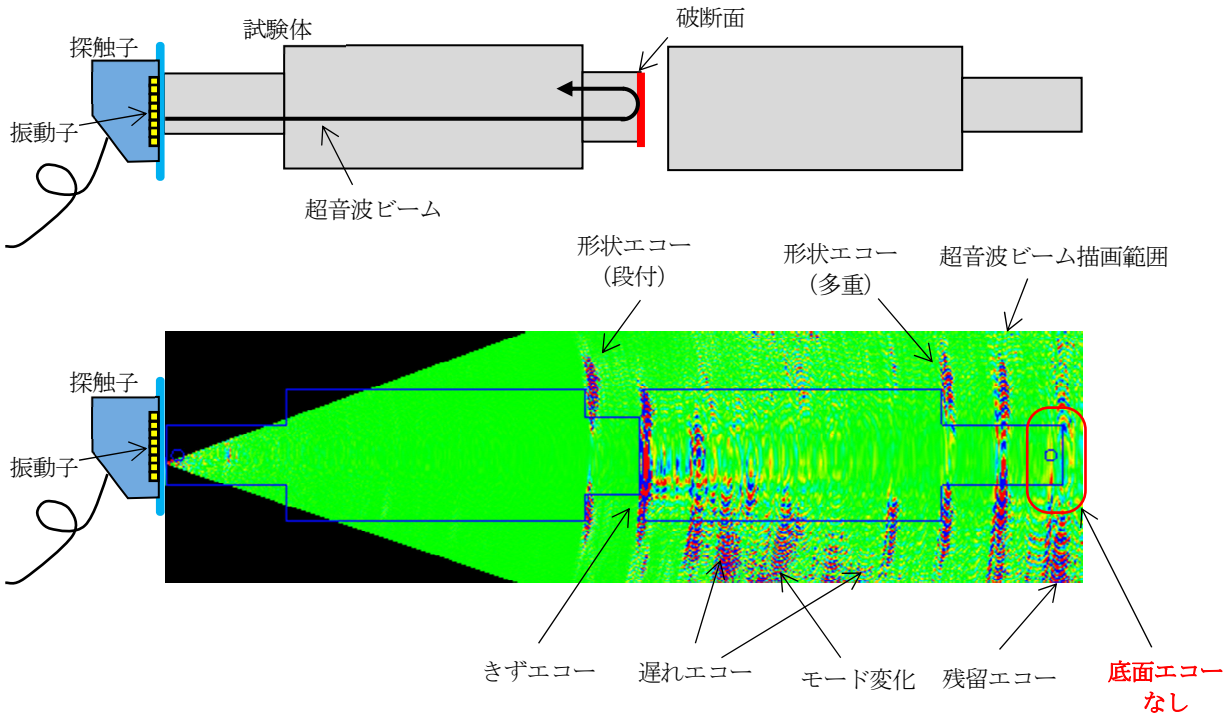


図-6.7.12　破断したピンの PAUT シミュレーション結果

2) 「きずエコー」の確認

PAUT のピンに生じたき裂検知能力の評価は，50%まできず裂進展したピンのモデルを使用した。有限要素法は，ピン左端面から探触子を当てた場合とピン右端面から探触子を当てた場合の 2 パターンについて行た。左側から探傷した結果を**図-6.7.13** に示し，右側から探傷した結果を**図-6.7.14** に示す。

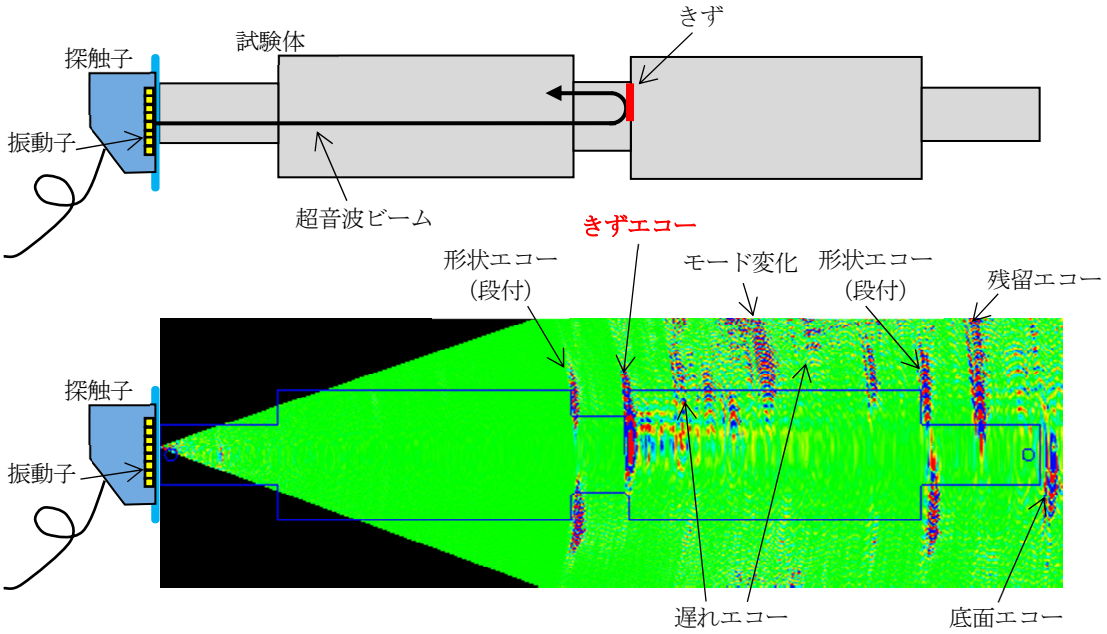


図-6.7.13　きず有りピンの PAUT シミュレーション結果（左側）

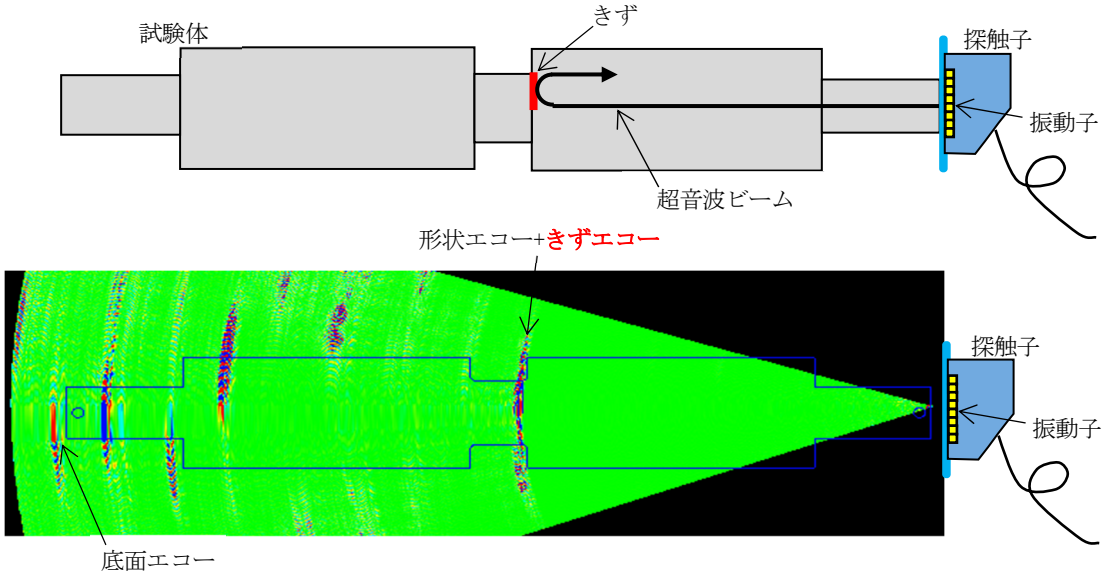


図-6.7.14　きず有りピンの PAUT シミュレーション結果（右側）

左側から探傷した結果は，きずにより反射した「きずエコー」を識別できるが，右側から探傷した結果では，ピンの形状により反射した「形状エコー（段付）」が重り識別が困難であった。このため，ピンに生じたき裂を PAUT で検知できるが，それにはピン両側からの探傷試験が必要となる。

（3）モックアップ試験体による性能検証

モックアップ試験体を用いて，シミュレーション結果が適切であったか性能検証方法の評価を行う。本項ではモックアップ試験体を用いて，シミュレーション結果が適切であったか性能検証方法の評価を行う。

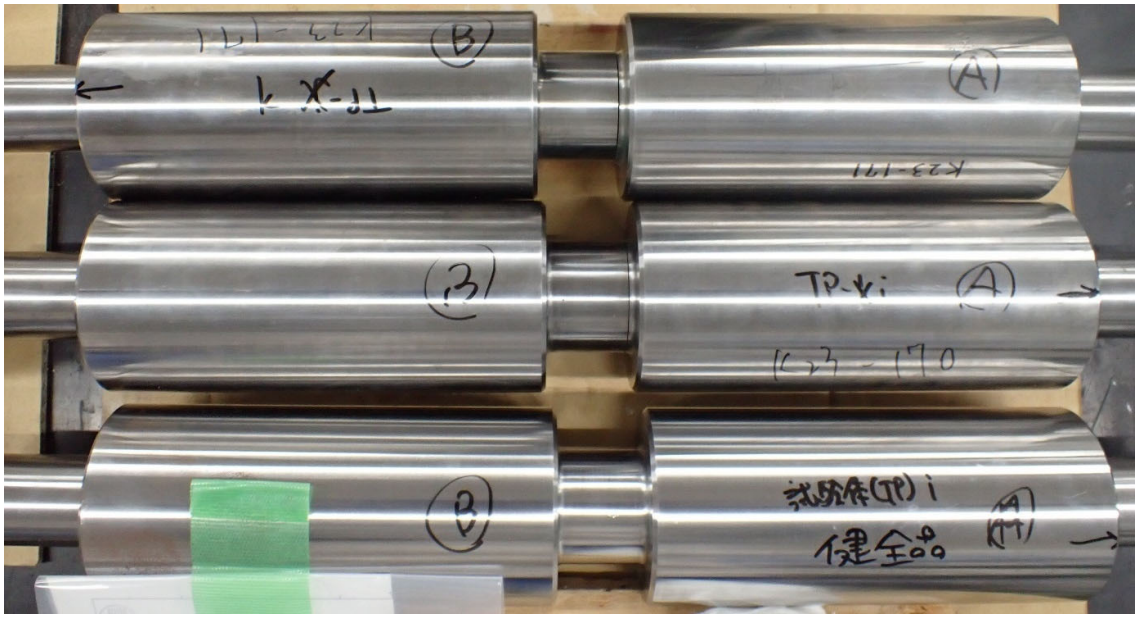


写真-6.7.1　モックアップ試験体

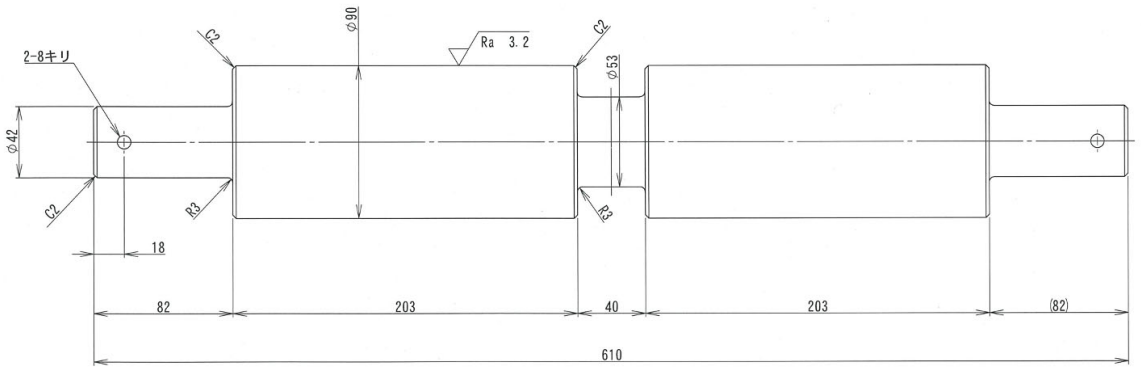


図-6.7.15　モックアップ試験体の寸法（材質：S45C）

1）健全なピンのシミュレーション結果検証

図-6.7.16 に健全なピンのシミュレーション結果とモックアップ試験体を探傷した結果を示す。

健全なピンを解析モデルとしたシミュレーション結果で観測された「形状エコー（段付き）」および「底面エコー」が，健全なピンを模擬したモックアップ試験体に対して PAUT を実施した結果でも現れることを確認した。

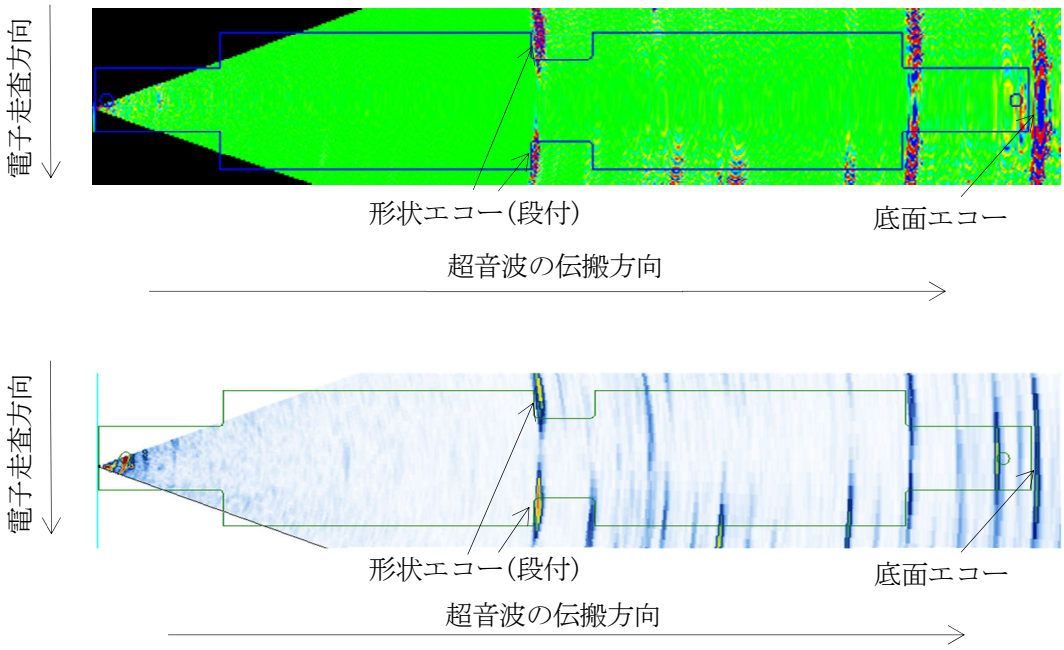


図-6.7.16　健全なピンのシミュレーション結果（上）とモックアップ試験体探傷結果（下）

2）50%まできず裂進展したピンのシミュレーション結果検証

図-6.7.17 にき裂を含むピンのシミュレーション結果とモックアップ試験体を探傷した結果を示す。

き裂を付与した損傷ピンを解析モデルとしたシミュレーション結果で観測された「きずエコー」および「形状エコー（段付き）」および「底面エコー」が，50%き裂が生じた損傷ピンを模擬したモックアップ試験体に対して PAUT を実施した結果でも現れることを確認した。

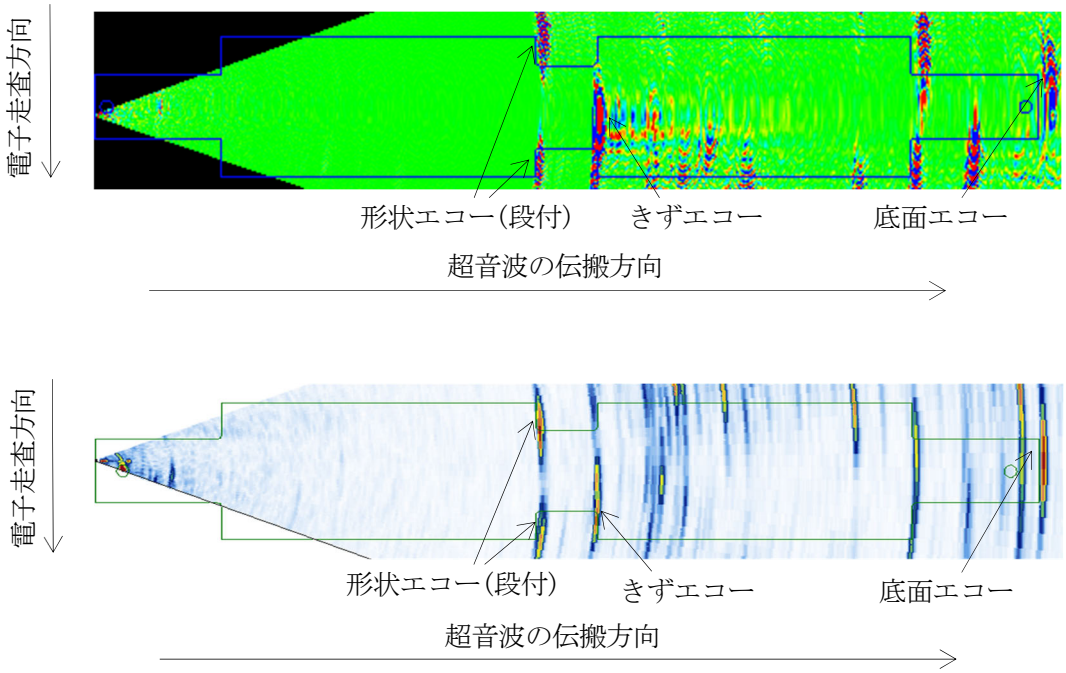


図-6.7.17　50%き裂ピンのシミュレーション結果（上）とモックアップ試験体探傷結果（下）

3）破断したピンのシミュレーション結果検証

図-6.7.18 に破断したピンのシミュレーション結果とモックアップ試験体を探傷した結果を示す。

破断した損傷ピンを解析モデルとしたシミュレーション結果で観測された「きずエコー」および「形状エコー（段付き）」が，破断したピンを模擬したモックアップ試験体に対して PAUT を実施した結果でも現れることを確認した。

また，シミュレーション結果と同様にモックアップ試験体の PAUT 結果においても，「底面エコー」が現れないことを確認した。

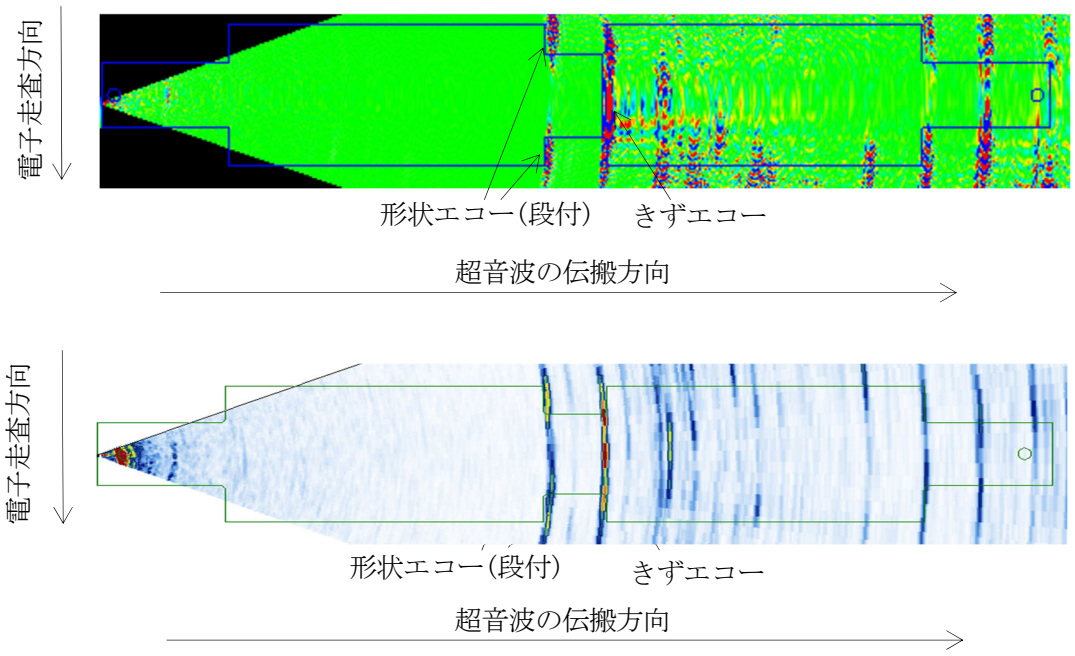


図-6.7.18　破断ピンのシミュレーション結果（上）とモックアップ試験体探傷結果（下）

4）PAUT の精度評価

有限要素法によるシミュレーション結果，モックアップ試験体の PAUT 結果共に「形状エコー」が表れていた。ピンの探傷では「形状エコー」の影響を受けて，「きずエコー」の定量的な評価は困難であることが分かった。よって，「底面エコー」の有無，「きずエコー」の有無を確認することでピンの状態を定性的な評価で行うことにした。評価レベルを**表-6.7.5** に示す。

表-6.7.5　評価レベル

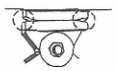
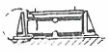
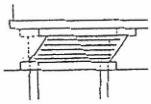
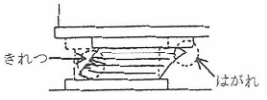
評価レベル	きずエコー	底面エコー	状態
○	なし	あり	健全
△	あり	あり	き裂の存在が疑われる状態
×	あり	なし	破断が疑われる状態

6.7.3　震後点検で想定される活用方法

(1) 鋼製支承の損傷

表-6.7.6 に示す震災後の支承部の損傷判定の表からわかる通り，支承部の大部分は外観からその異常を判定できる。 しかし，地震によって構造物内部に隠れた損傷が生じる可能性があると共に，**表-6.7.6** の赤枠に示すピンの切断は上沓，下沓に隠れているため外観目視では損傷を確認することが困難である。また，その他部材においても高強度な材料を用いている場合，靭性が小さく発生したクラックや微細な損傷は外観目視では見落とされ易い。

表-6.7.6　支承部の損傷判定 [1)]

	C：小被害	B：中被害	A：大被害
上沓・下沓の鋳物部	 上沓の変形　下沓の変形・破断	上沓のわれ	
セットボルト	 セットボルトの緩み	 セットボルトの破断	 セットボルトの破断やソールプレート，ボス部の被害
ローラー	 ローラーの抜け出し	 ローラーの抜け出し	
ピンおよびピンキャップ	 ピンキャップの抜け出し	 ピンの切断	
上沓ストッパー	 上沓ストッパーのきれつ	 上沓ストッパーの破断	
サイドブロック	 サイドブロックの変形　下沓ストッパーきれつ	 サイドブロック止めボルトの破断　上沓ストッパーの破断	
アンカーボルト	 アンカーボルトの抜け出し（1cm 以下）	 アンカーボルトの抜け出し（1cm 以上）	 アンカーボルトの破断
沓座モルタルおよび沓座コンクリート	 沓座モルタルのきれつ　沓座コンクリートのきれつ	 沓座モルタルの破壊　沓座コンクリートの破壊	 沓座コンクリート破壊
ゴム支承	 ゴム支承本体の移動	 ゴム支承本体のきれつ・破断	

(2) PAUT を用いた事例

工場内検査により実施された過去事例を下記する。

1) ボルト部（セットボルト，アンカーボルト）

外観による異常が確認できないボルト内部のき裂の有無を調べる。



写真-6.7.2　ボルト部外観

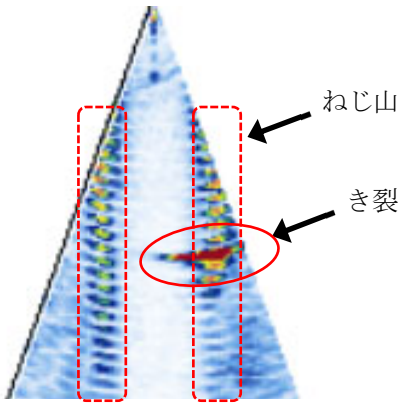


図-6.7.19　ボルト部検査結果

2) 溶接部

従来の超音波探傷試験でエコーの検出ができるが，有害なきずの判断が困難である。断面情報が表示される PAUT では，視認性および解析性に優れる。

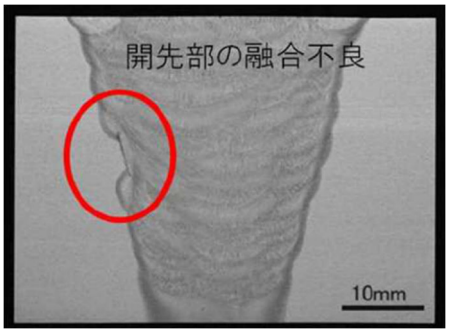


写真-6.7.3　断面マクロ組織観察

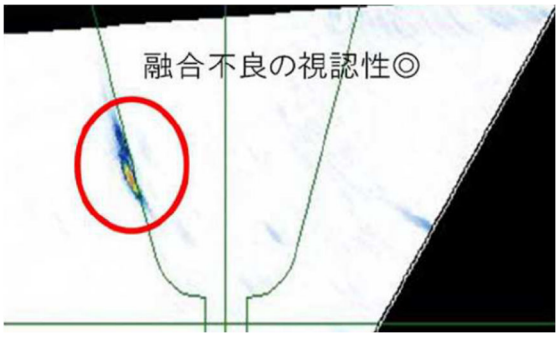


図-6.7.20　溶接部検査結果

3) ローラー部

既往の検査では，健全なローラーの事例しか無く，損傷ありの検査結果は無い。以下に示す図はイメージと健全なローラーの検査結果を示す。

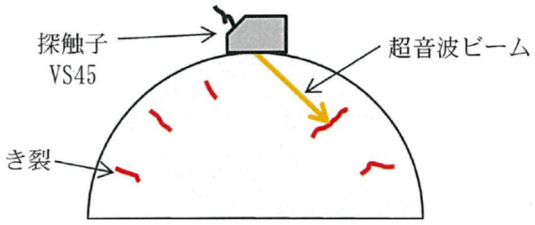


図-6.7.21　調査イメージ図

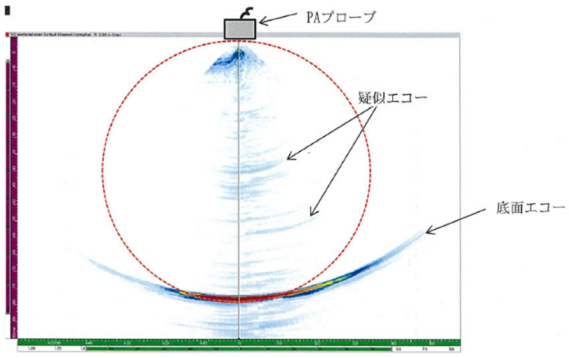


図-6.7.22　検査結果（垂直セクタスキャン）

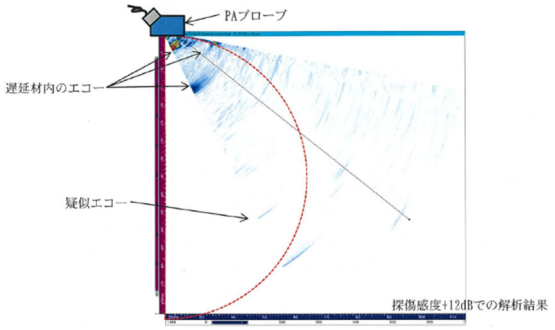


図-6.7.23　検査結果（斜角セクタスキャン）

4）鋼部材

主桁下フランジのソールプレート溶接部は，局部応力の繰返しによる疲労き裂が発生する可能性がある。き裂を放置していると，下フランジ貫通さらにはウェブに進展した事例も報告されている。このようなき裂は外観目視で確認出来る場合もあるが，内部き裂の検査には超音波探傷試験の内，断面情報が表示される PAUT を用いた検査が視認性および解析性に優れる。

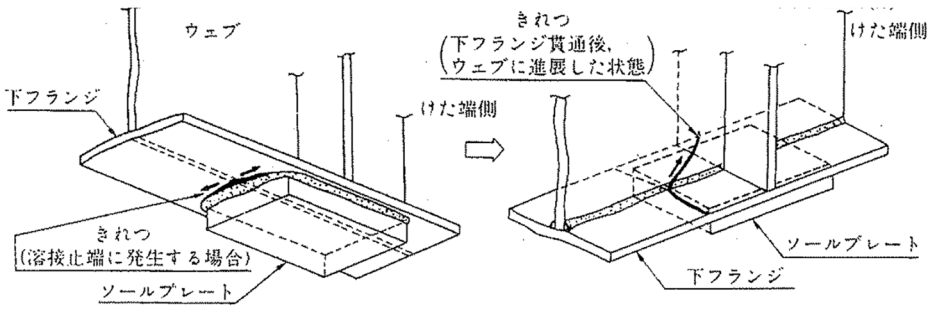


図-6.7.24　主桁下フランジのソールプレート溶接部の損傷イメージ図

(3) 想定される活用方法

原則として，橋台・橋脚上にアクセスして，桁端部，支承部（落橋防止構造を含む），橋台及び橋脚本体については，近接による詳細調査を行う。このとき，破断の疑いのある支承のボルト及びピンについては，PAUT により破断の有無を確認し，その健全性を確認した上で暫定的な供用を行うことが理想である。

次項からの検討事例では，土木研究所に保管されている被災したピン支承（ピンが破断している）を用いて，ピンの損傷および破断に着目した実験を行い，PAUT の活用方法を検証する。

尚，ローラー部の内部損傷などは，急激な路面段差などを発生させる可能性を含んだ重要な部材であるため，震後点検は無論のこと，維持管理においても検証できる方法である。よって，本研究に関わらずその活用方法の検証は進めていく。

6.7.4　検討事例１：被災したピンを用いた計測検討

（1）調査対象及び調査目的

1）調査対象

PAUT の対象として用いた被災した実機支承を**写真**-6.7.4 及び**写真**-6.7.5 に示す。被災したピンはくびれ部で破断している。



写真-6.7.4　被災した実機支承



写真-6.7.5　被災により破断したピン

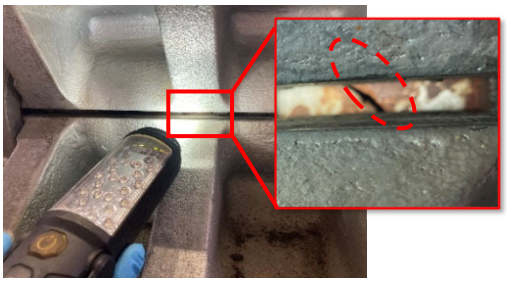
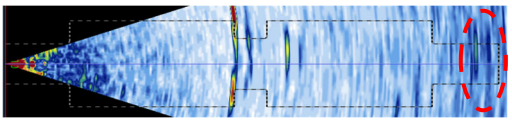
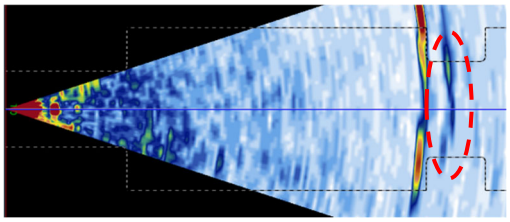
2）調査目的

被災によりピンくびれ部から破断したピンをピン端部から PAUT で探傷し，その損傷状態を確認できるかを調査した。

(2) 計測方法および処理手順

表-6.7.7 に計測の処理手順を示す。

表-6.7.7 処理手順

No.	処理内容	写真
1	全長計測 支承ピンの全長を計測する。	
2	目視観察 上下沓の隙間からピンの状態を目視観察（ファイバースコープなど）する。	
3	「底面エコー」確認 PAUT を用いて，全長に注目して「底面エコー」の有無を確認する。	
4	「きずエコー」確認 PAUT を用いて，段付き部に注目して探傷する。	
5	上記③④を反対面から実施する。	—

(3) 計測結果の精度評価

1) 全長計測

被災によりピンくびれ部から破断したピンの全長を測定した結果，580mm であった。

2) 目視観察

被災により損傷した支承を隙間から目視観察した結果，ピンくびれ部のき裂を視認できることが確認できた。

3) 「底面エコー」の確認

被災により損傷したピンを端面から PAUT を実施した結果を**図-6.7.25** に示す。左右共に，「底面エコー」は見られなかった。

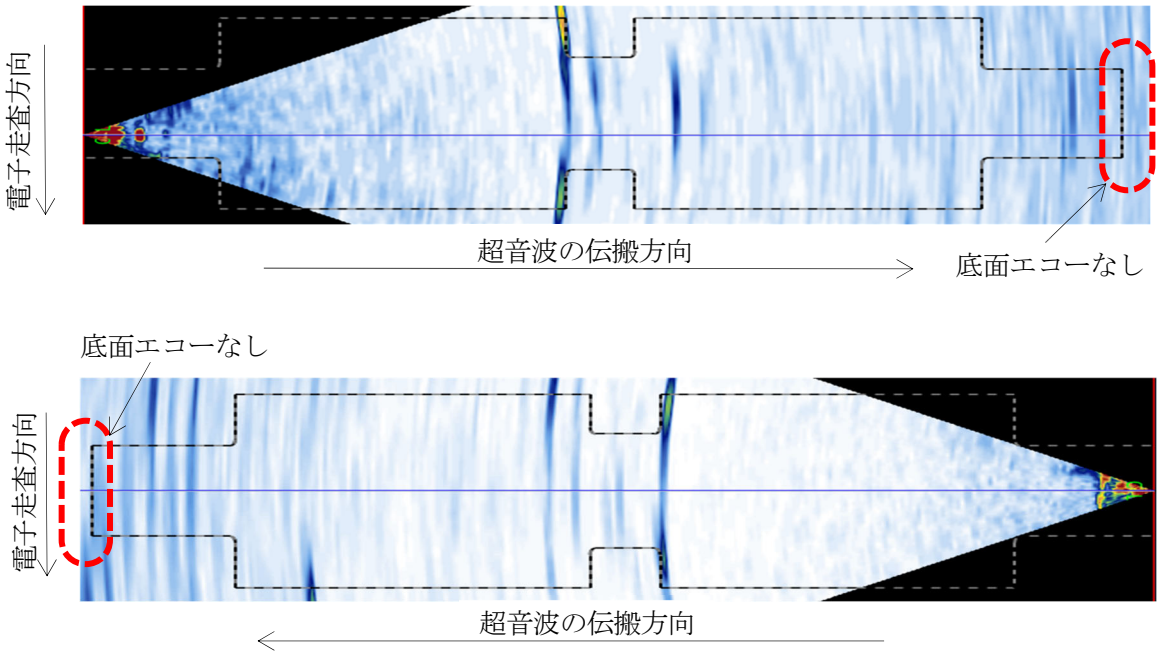


図-6.7.25　被災したピンに対する PAUT 結果

4) 「きずエコー」の確認

被災により損傷したピンを端面から PAUT を実施して，ピンくびれ部を観察した結果を**図-6.9.26** に示す。左右共に，ピンくびれ部に「きずエコー」が見られた。

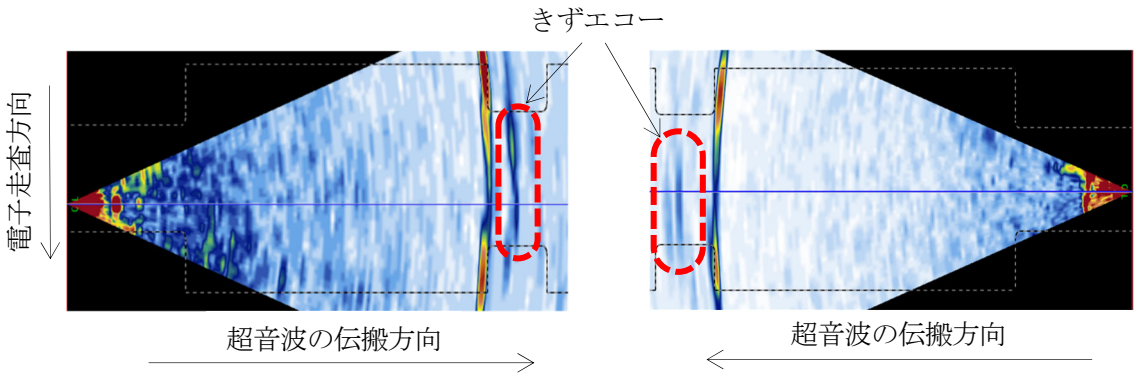


図-6.7.26　被災したピンに対する PAUT 結果

5）被災により損傷したピンの精度評価

表-6.7.5 により，ピンの損傷状態を判定したところ，「×」となり，完全破断が疑われる状態と適切に判断できることが確認できた。



写真-6.7.6　被災したピンの破断面

6.7.5　検討事例 2：載荷試験により変状したピンを用いた計測検討

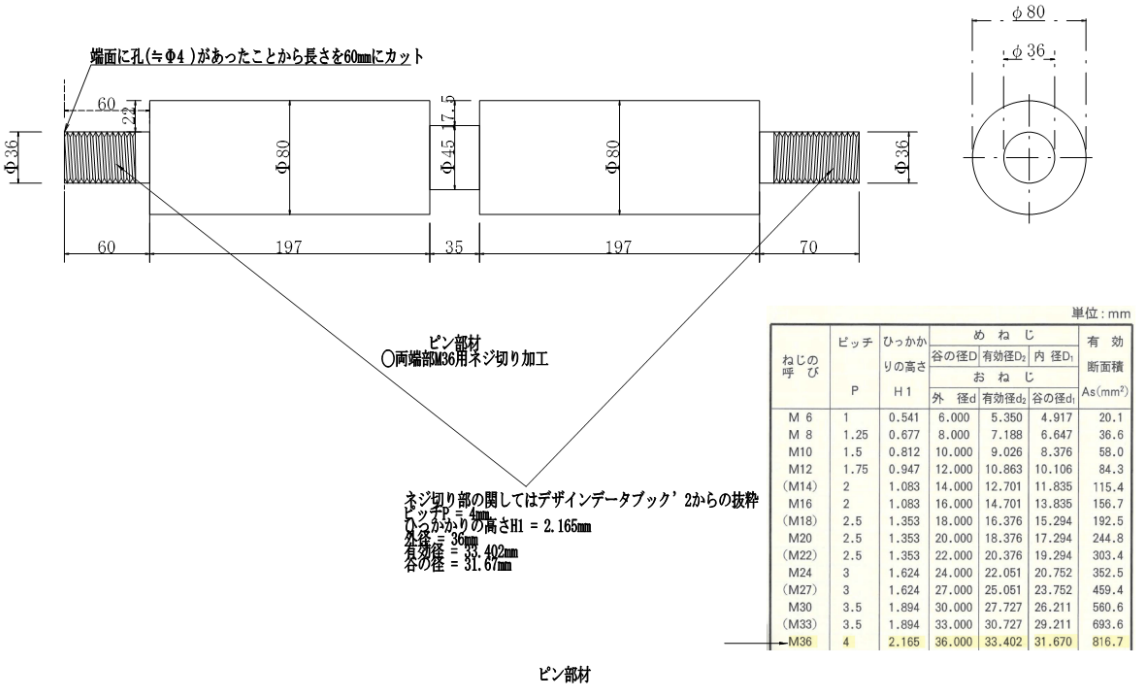
（1）調査対象及び調査目的

1）調査対象

PAUT を実施した載荷試験対象ピンの図面と載荷試験状況を**写真-6.7.7** 及び**図-6.7.27** に示す。



写真-6.7.7　載荷試験状況



単位：mm

ねじの呼び	ピッチ P	ひっかかりの高さ H1	めねじ 谷の径D	めねじ 有効径D_2	めねじ 内径D_1	有効断面積	おねじ 外径d	おねじ 有効径d_2	おねじ 谷の径d_1	As(mm^2)
M 6	1	0.541	6.000	5.350	4.917	20.1				
M 8	1.25	0.677	8.000	7.188	6.647	36.6				
M10	1.5	0.812	10.000	9.026	8.376	58.0				
M12	1.75	0.947	12.000	10.863	10.106	84.3				
(M14)	2	1.083	14.000	12.701	11.835	115.4				
M16	2	1.083	16.000	14.701	13.835	156.7				
(M18)	2.5	1.353	18.000	16.376	15.294	192.5				
M20	2.5	1.353	20.000	18.376	17.294	244.8				
(M22)	2.5	1.353	22.000	20.376	19.294	303.4				
M24	3	1.624	24.000	22.051	20.752	352.5				
(M27)	3	1.624	27.000	25.051	23.752	459.4				
M30	3.5	1.894	30.000	27.727	26.211	560.6				
(M33)	3.5	1.894	33.000	30.727	29.211	693.6				
M36	4	2.165	36.000	33.402	31.670	816.7				

図-6.7.27　載荷試験に使用したピン（材質：S35C）

2）調査目的

載荷試験により変状したピンの損傷状態（ピンの伸びおよびき裂の有無）を PAUT で確認できるか調査した。

（2）計測方法及び処理手順

1）計測方法

載荷試験対象のピンは図面が明かで，且つ載荷試験状況観測用のセンサとカメラが設置されていたため，ピンの全長計測と目視観察は省略した。

計測は，**図-6.7.28** ピンに示すピン下部の鉛直変位量（CV3～4）の平均値から，ピン上部の鉛直変位量（CV1～2）の平均値を差し引くことにより算出したピンの鉛直方向の伸び量（＝くびれ部の伸び量）を CV’とし，載荷前，降伏点付近（載荷荷重：412kN），CV’=0.45mm，CV’=1.5mm の時点で載荷を止め，安全のために除荷状態で PAUT を実施した。PAUT は探触子をピン端面に押し当てピン半径方向に電子走査を行い，探触子を手動でピン周方向に回転走査して，データを採取した。

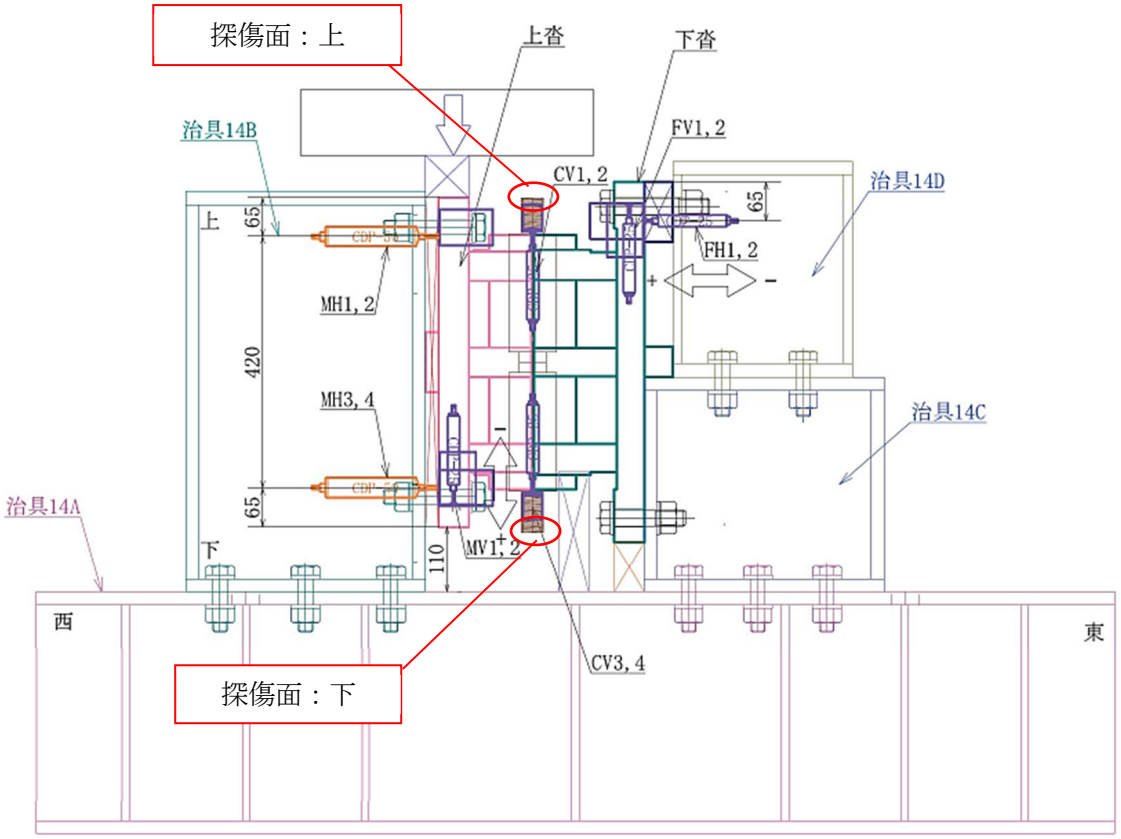


図-6.7.28　載荷試験対象に対する探触子アプローチ面

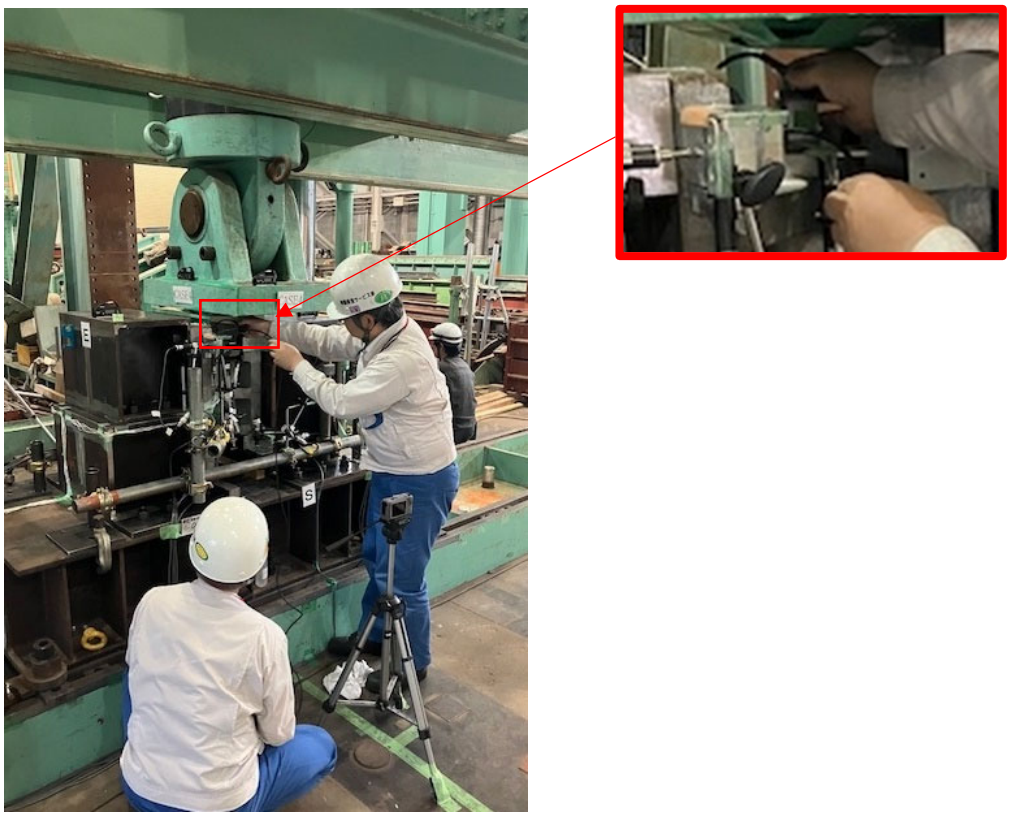


写真-6.7.8　フェーズドアレイ探傷試験状況

2）処理手順

フェーズドアレイ法を含めて，超音波探傷試験ではピン健全部の音響インピーダンスときずの音響インピーダンスとの違いによって，きずから反射して受信された「きずエコー」の他に，「残留エコー」，「形状エコー」，「遅れエコー」などの探傷の妨害となるエコーが発生する。そのため，ピン端面に媒質を塗布して，探触子を押し当てて超音波ビームの照射範囲が適切であるか確認した。その後，**図-6.7.29** に示すようにエコーを確認し，超音波がピン内部に正常に伝搬していることを確認した。

次に，探触子を手動でピン周方向に回転走査して，エコーの位置が探触子の回転に応じて消失・移動するかについて確認した。**図-6.7.30** に探触子を回転することによる「きずエコー」が表れる位置の変化イメージを示す。

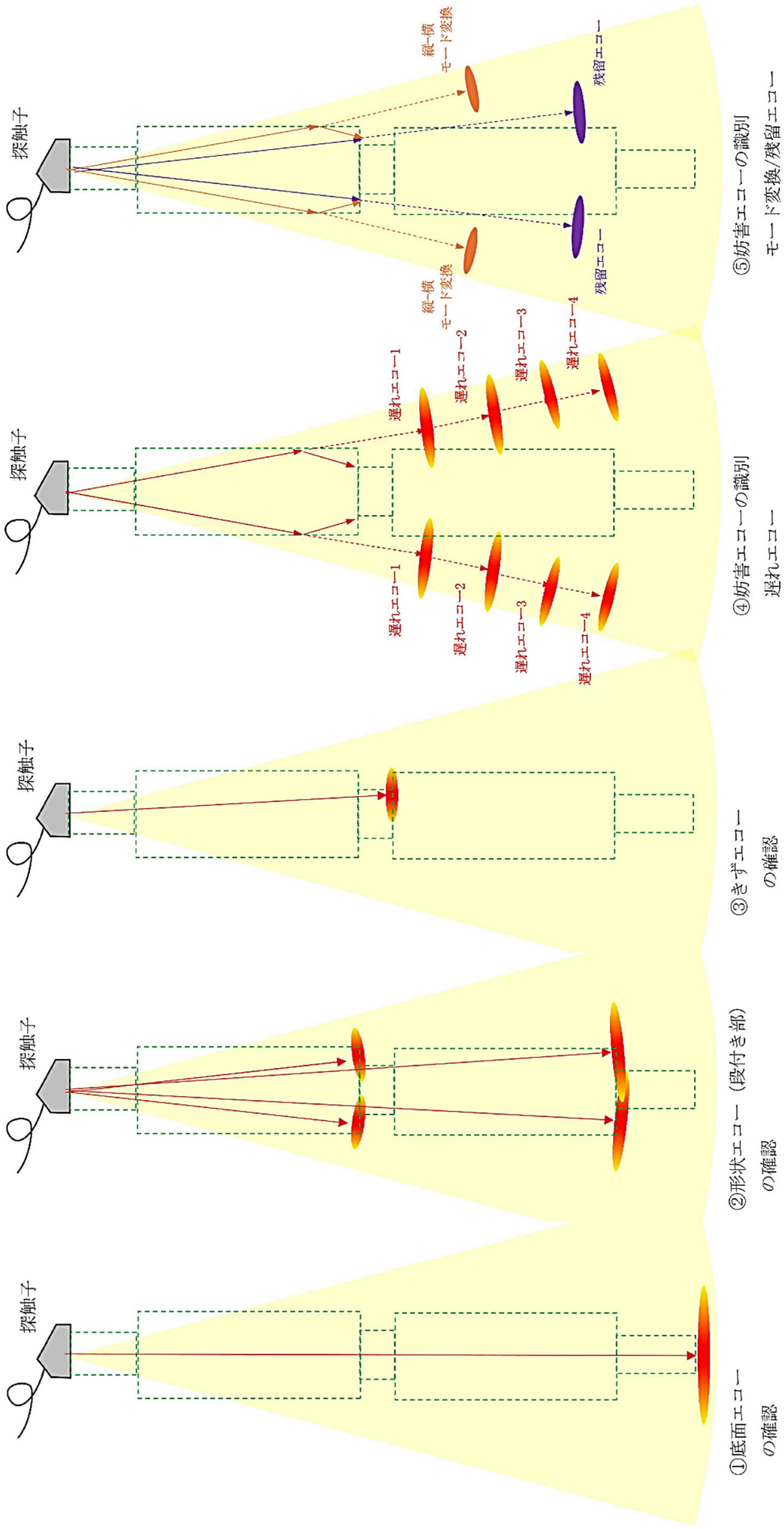


図-6.7.29　ピンに対する PAUT におけるエコー発生位置と確認手順

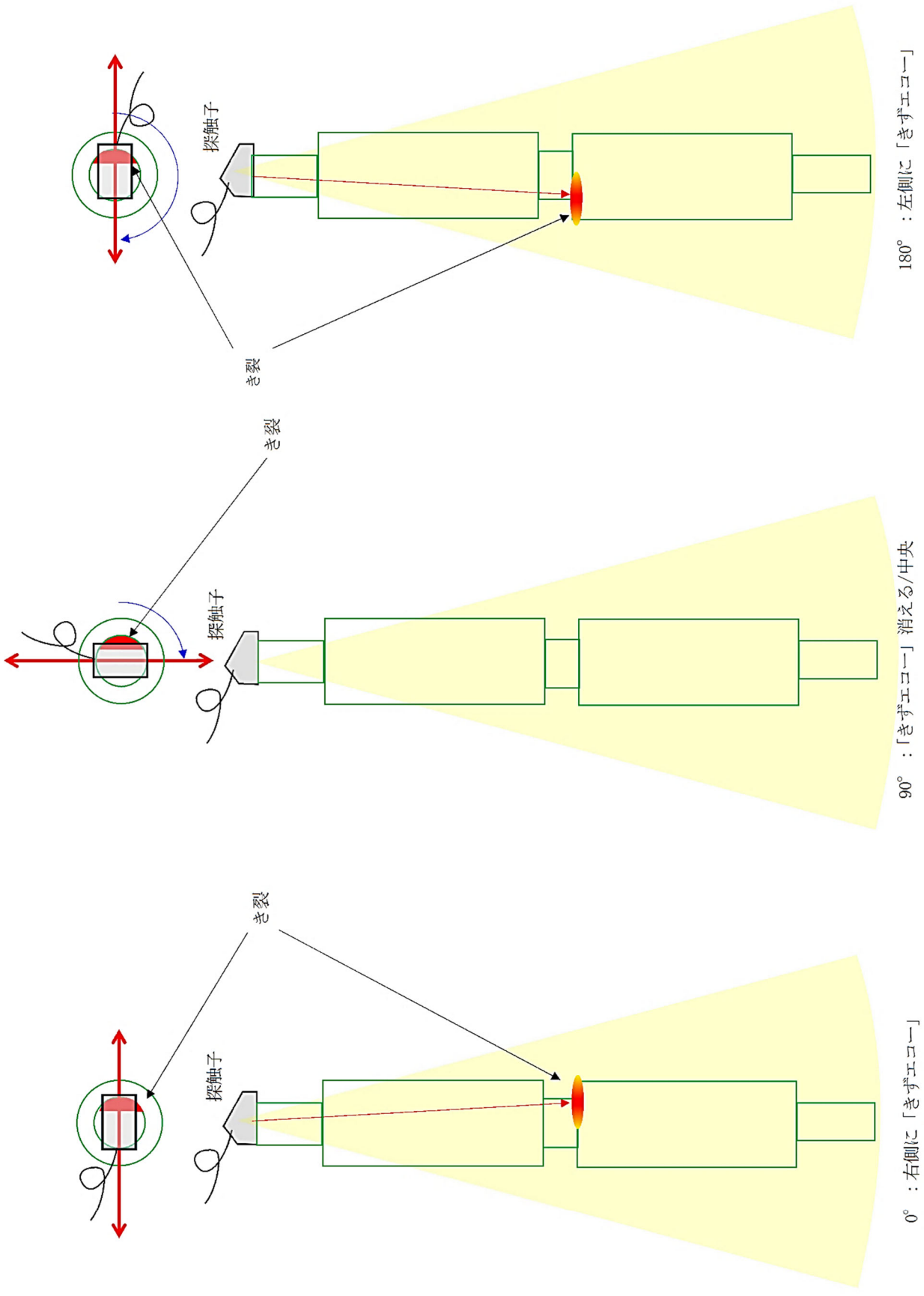


図-6.7.30　探触子を回転することによる「きずエコー」の消失・移動の確認

（3）計測結果の精度評価

1）計測結果

載荷荷重と CV’（くびれ部の伸び量）の関係を**図-6.7.31** に示す。また，各載荷ケースの除荷後の PAUT による試験結果を**表-6.7.8**～**表-6.7.14** に示す。

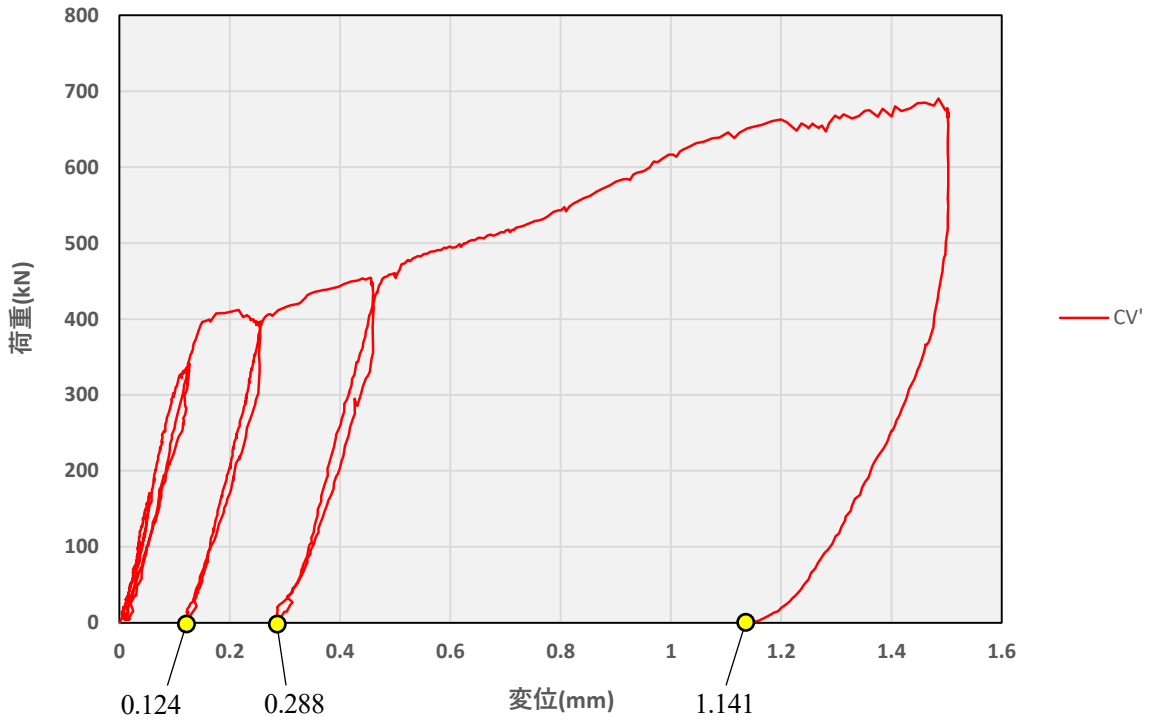


図-6.7.31　くびれ部の伸び量

表-6.7.8　フェーズドアレイ探傷試験結果（探傷面上側，周方向角度：W+130°）

探傷面上側，周方向角度：W+130°試験結果

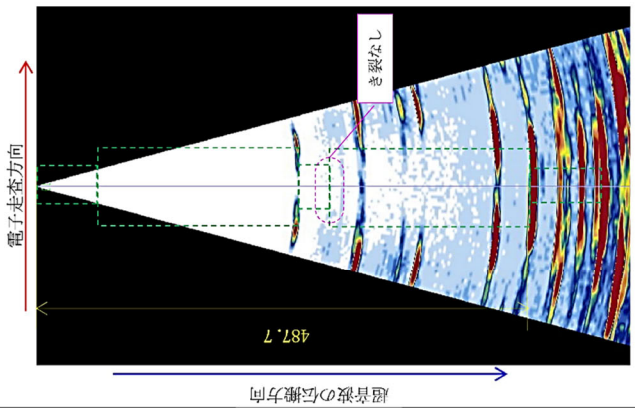
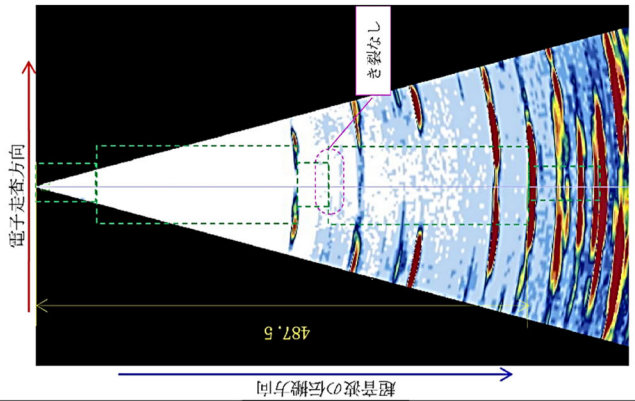
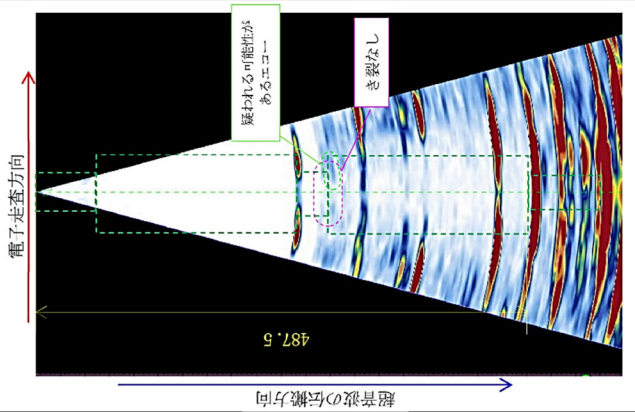
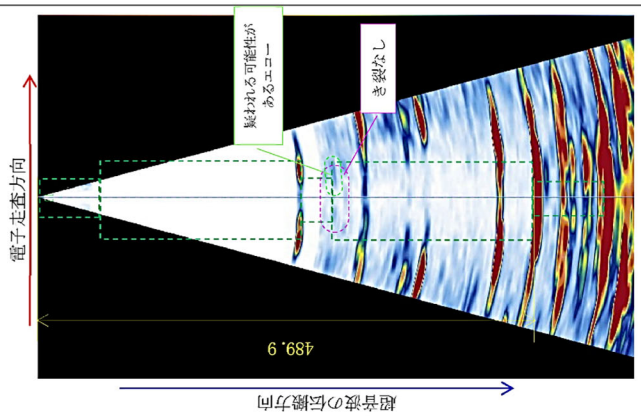
項目				
載荷荷重	0.00kN	412.26kN	454.62kN	690.72kN
状態	試験前	降伏点付近	降伏後	降伏後
CV’	0.000	0.216	0.450	1.500
CV’（除荷後）	0.000	0.124	0.288	1.141
探触子の向き				
探傷結果画像				

表-6.7.9　フェーズドアレイ探傷試験結果（探傷面上側，周方向角度：W+220°）

探傷面上側，周方向角度：W+220°試験結果

項目	0.00kN	412.26kN	454.62kN	690.72kN
載荷荷重				
状態	試験前	降伏点付近	降伏後	降伏後
CV’	0.000	0.216	0.450	1.500
CV’（除荷後）	0.000	0.124	0.288	1.141
探触子の向き				
探傷結果画像				

表-6.7.10　フェーズドアレイ探傷試験結果（探傷面上側，周方向角度：W+310°）

探傷面上側，周方向角度：W+310° 試験結果

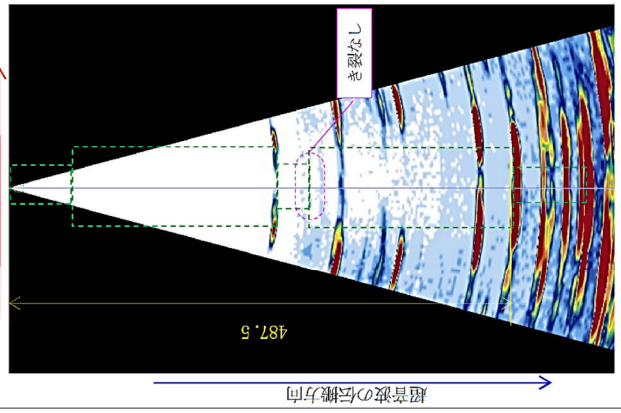
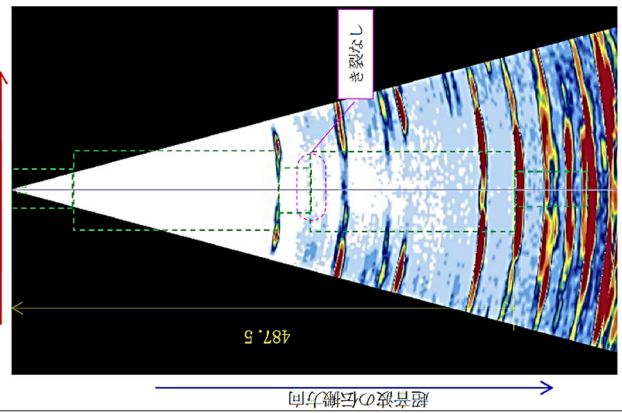
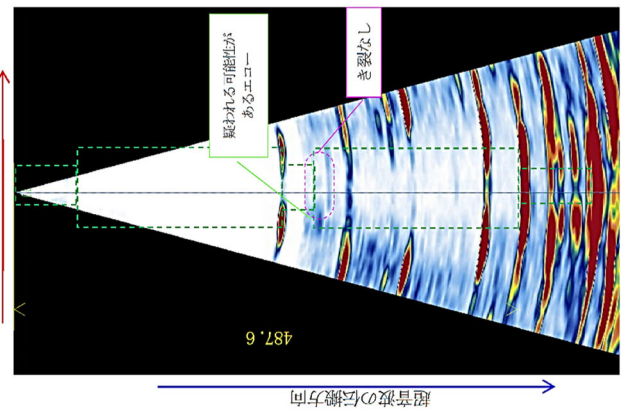
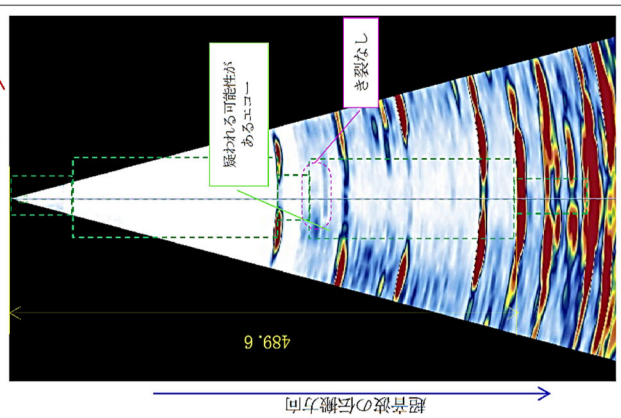
項目	0.00kN	412.26kN	454.62kN	690.72kN
載荷荷重				
状態	試験前	降伏点付近	降伏後	降伏後
CV’	0.000	0.216	0.450	1.500
CV’（除荷後）	0.000	0.124	0.288	1.141
探触子の向き				
探傷結果画像				

表-6.7.11　載荷荷重：690.72kN 時の探触子周方向角度位置によるフェーズドアレイ探傷試験結果
（探傷面上側，周方向角度：W+130°，+220°，+310°）

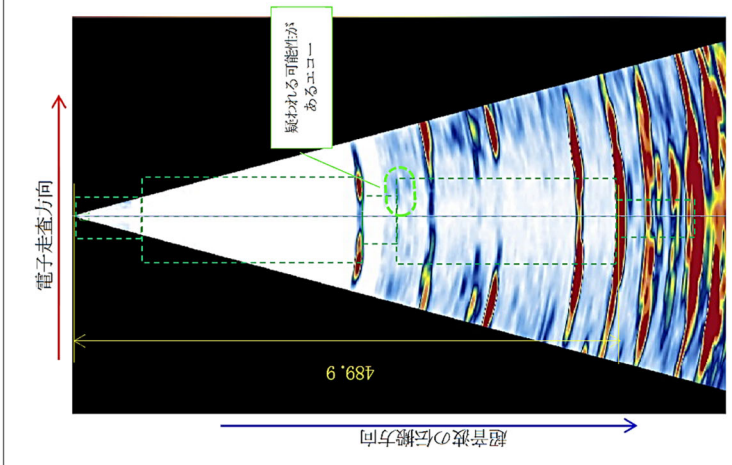
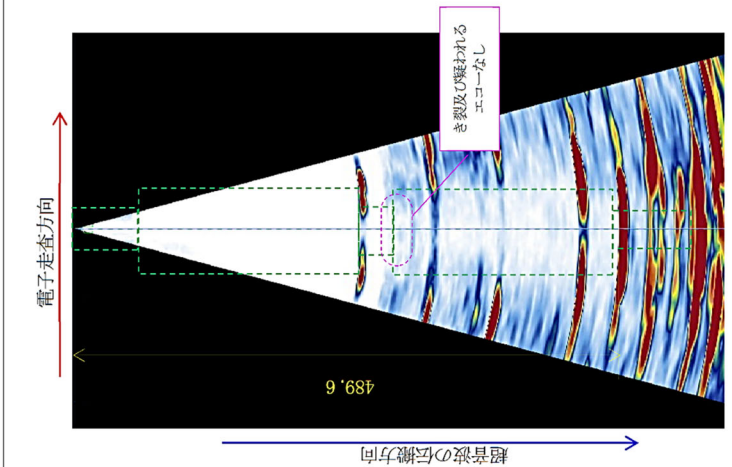
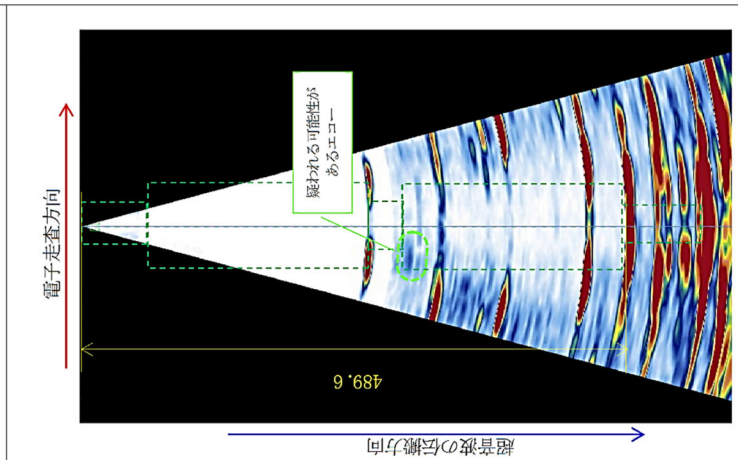
項目	W+130°	W+220°	W+310°
載荷荷重	690.72kN	690.72kN	690.72kN
状態	降伏後	降伏後	降伏後
CV’	1.500	1.500	1.500
CV’（除荷後）	1.141	1.141	1.141
探触子の向き	4	4	4
探傷結果画像			

表-6.7.12　フェーズドアレイ探傷試験結果（探傷面下側，周方向角度：W+130°）

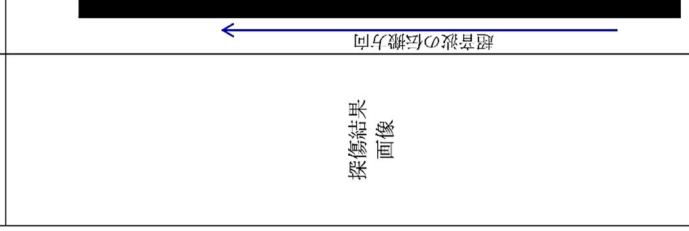
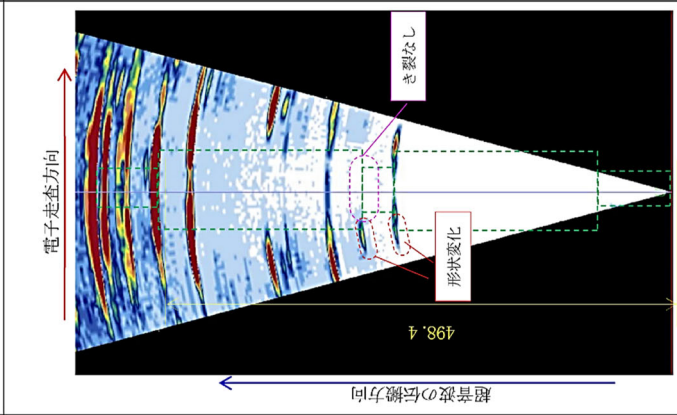
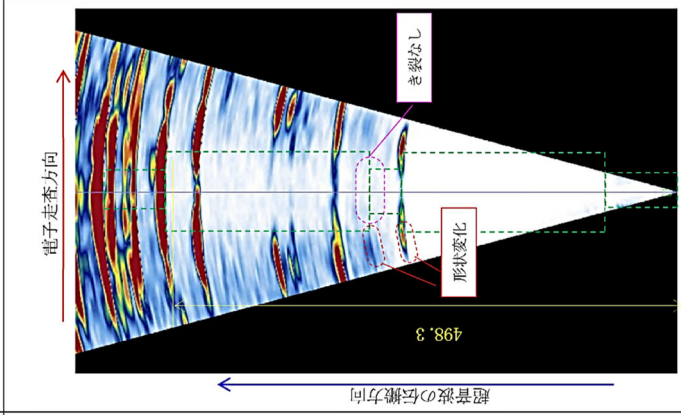
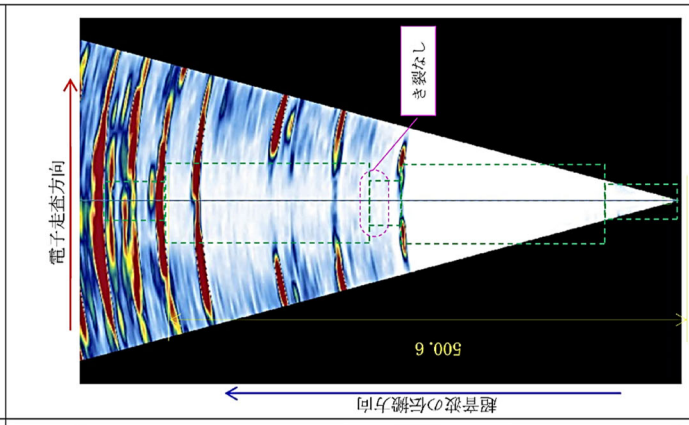
項目					
載荷荷重	0.00kN	412.26kN	454.62kN	690.72kN	
状態	試験前	降伏点付近	降伏後	降伏後	
CV’	0.000	0.216	0.450	1.500	
CV’（除荷後）	0.000	0.124	0.288	1.141	
探触子の向き					
探傷結果 画像					

表-6.7.13　フェーズドアレイ探傷試験結果（探傷面下側，周方向角度：W+220°）

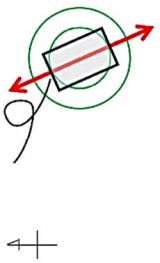
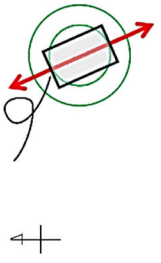
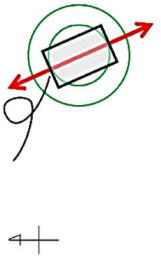
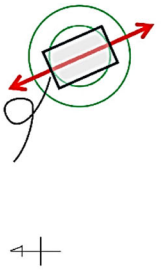
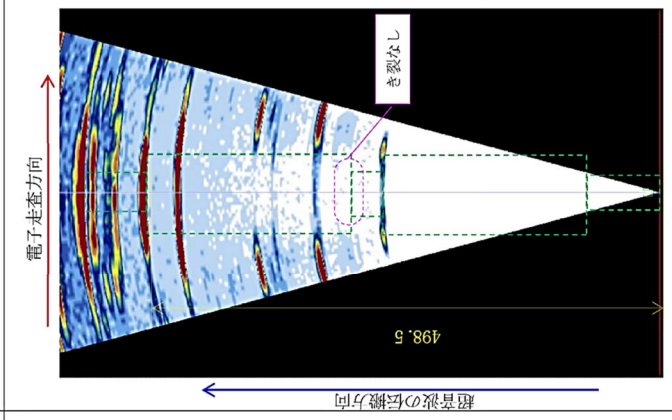
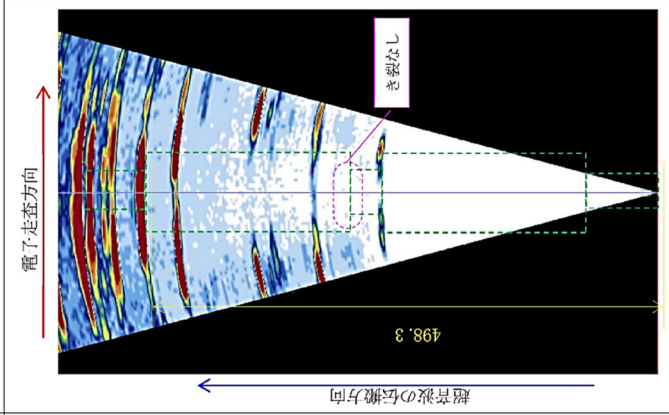
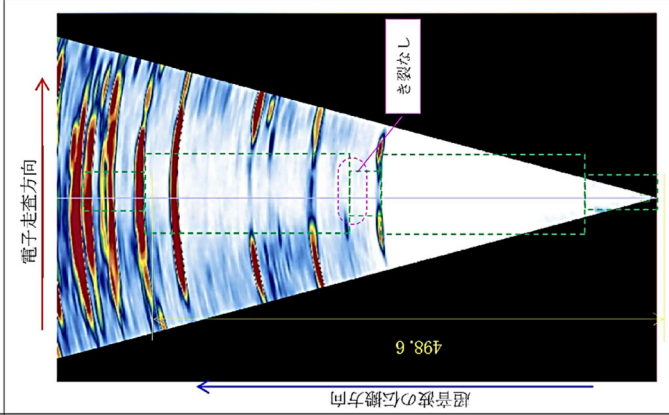
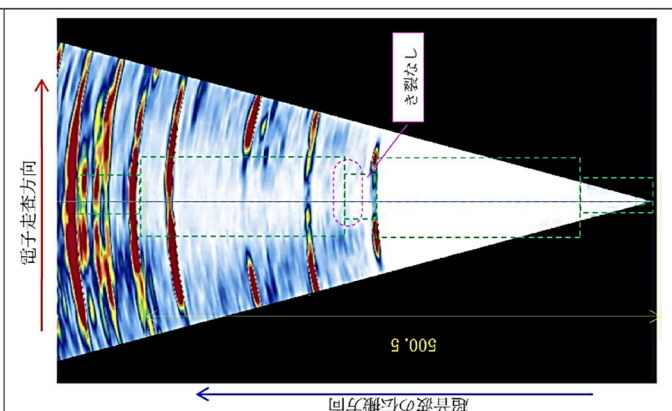
項目					
載荷荷重	0.00kN	412.26kN	454.62kN	690.72kN	
状態	試験前	降伏点付近	降伏後	降伏後	
CV’	0.000	0.216	0.450	1.500	
CV’（除荷後）	0.000	0.124	0.288	1.141	
探触子の向き					
探傷結果画像					

表-6.9.14　フェーズドアレイ探傷試験結果（探傷面下側，周方向角度：W+310°）

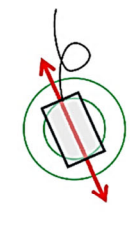
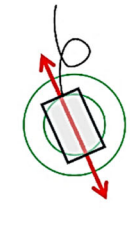
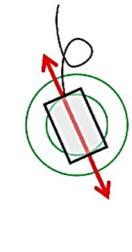
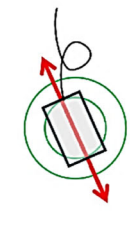
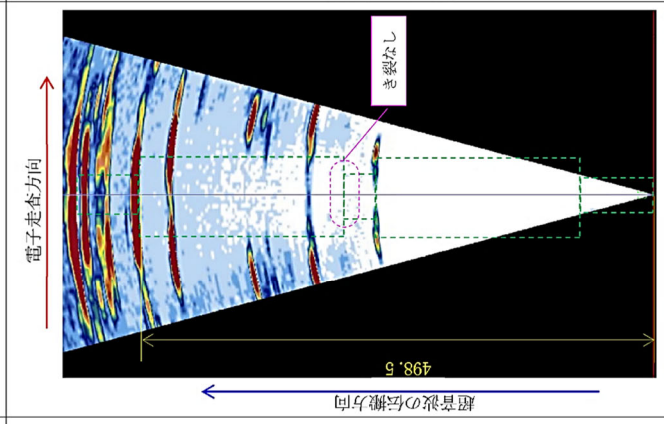
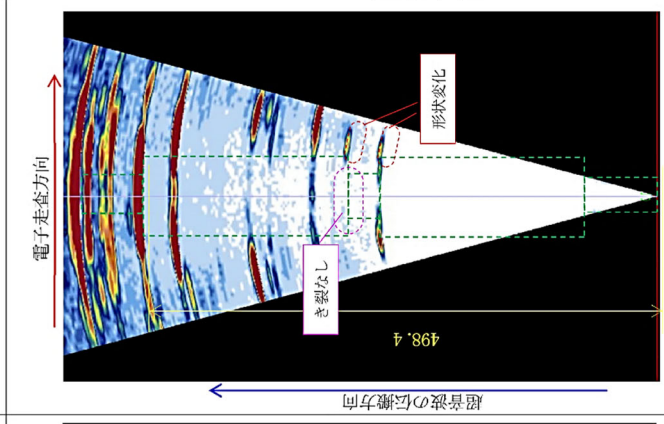
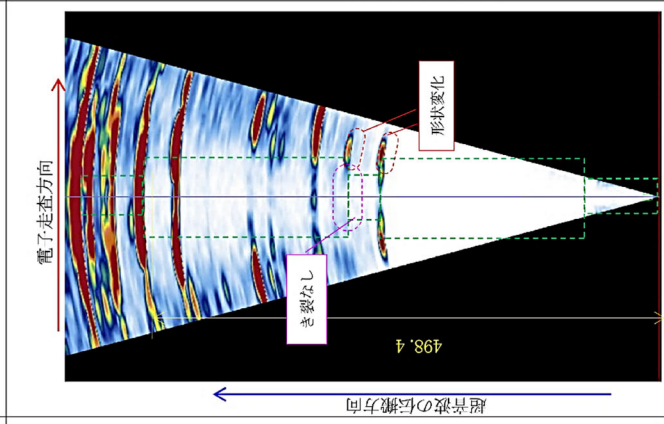
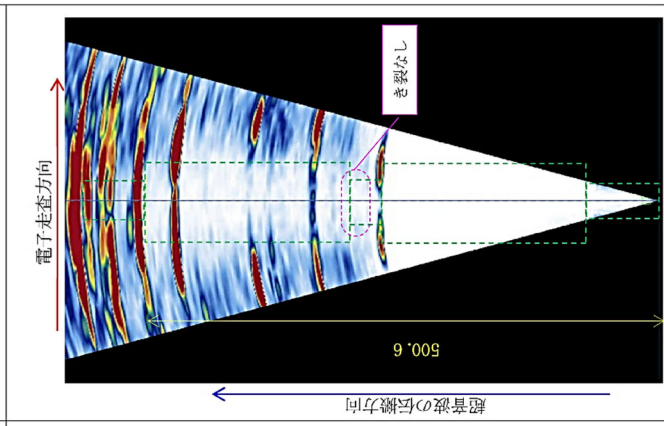
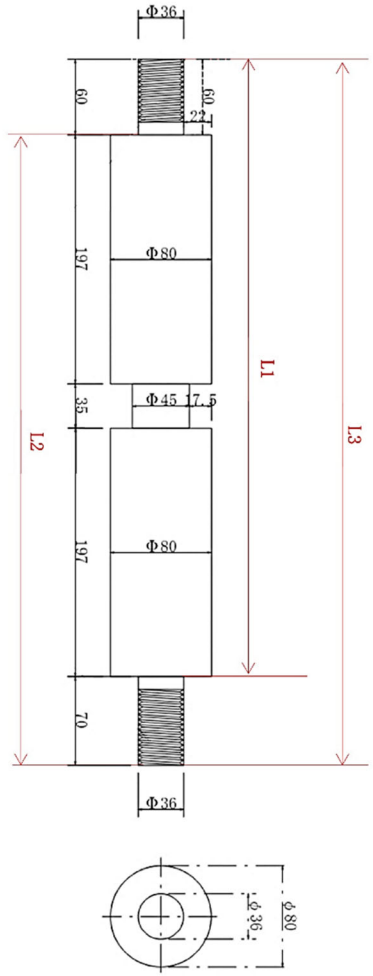
項目	探傷面上側，周方向角度：W+310° 試験結果			
載荷荷重	0.00kN	412.26kN	454.62kN	690.72kN
状態	試験前	降伏点付近	降伏後	降伏後
CV’	0.000	0.216	0.450	1.500
CV’（除荷後）	0.000	0.124	0.288	1.141
探触子の向き				
探傷結果 画像				

表-6.7.15　フェーズドアレイ探傷試験結果　長さ一覧表

	角度位置	L1	L2	L3	⊿L1	⊿L2	⊿L3	イメージ図
図面値	—	489.0	499.0	559.0	—	—	—	
載荷前	130°	487.7	498.4	559.1	±0.0	±0.0	±0.0	
	220°	487.5	498.5	559.1	±0.0	±0.0	±0.0	
	310°	487.5	498.5	559.1	±0.0	±0.0	±0.0	
降伏点付近 CV’：0.124 (除荷後)	130°	487.5	498.4	559.1	−0.2	±0.0	±0.0	
	220°	487.5	498.3	559.0	±0.0	−0.2	−0.1	
	310°	487.5	498.4	559.0	±0.0	−0.1	−0.1	
降伏後 CV’：0.288 (除荷後)	130°	487.5	498.3	559.1	−0.2	−0.1	±0.0	
	220°	487.5	498.6	559.0	±0.0	+0.1	−0.1	
	310°	487.6	498.4	559.1	−0.1	±0.0	±0.0	
降伏後 CV’：1.141 (除荷後)	130°	489.9	500.6	559.1	+2.2	+2.2	±0.0	
	220°	489.6	500.5	559.1	+2.1	+2.0	±0.0	
	310°	489.6	500.6	559.1	+2.1	+2.1	±0.0	

2）載荷試験後の確認

載荷試験後の支承分解結果を**写真-6.7.9～写真-6.7.12** に示す。目視確認の結果，き裂は見当たらなかった。

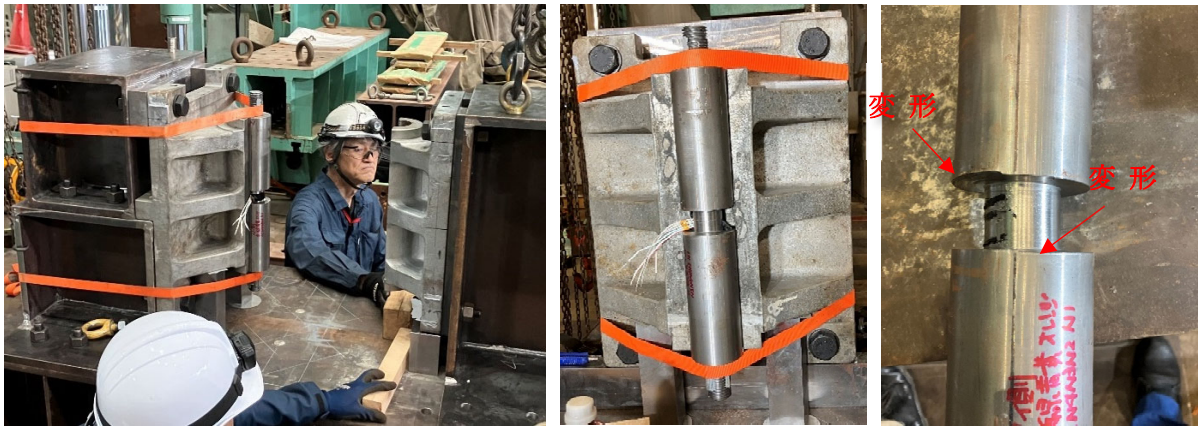


写真-6.7.9　載荷試験後の支承分解状況



写真-6.7.10　支承分解後のピン表面 1



写真-6.7.11　支承分解後のピン表面 2



写真-6.7.12　支承分解後のピン表面 3

3）載荷試験結果の検証

ｉ）ピンの伸び変化

①PAUT による全長測定では，ピンの伸び変化を確認できなかった。

②載荷による形状変化により，「ピン形状エコー」の検出位置に変化が確認された。

載荷試験前～降伏点付近：-0.2～+0.1 ➡ 載荷試験後：+2.0～+2.2mm

③除荷後 CV’：0.124mm／0.288mm の僅かな伸びは，PAUT で確認できなかった。

④実験後，ピンのくびれ部に曲げ変形が確認できた。これは，**図-6.7.28** に示す各センサーの内，水平変位を示す上沓側の上部（MH1，MH2）と下部（MH3，MH4），下沓の上部（FH1，FH2）の計測結果より，**図-6.7.34** に示すような荷重状態からジグのたわみが生じ，上沓が傾いたと考えられる。

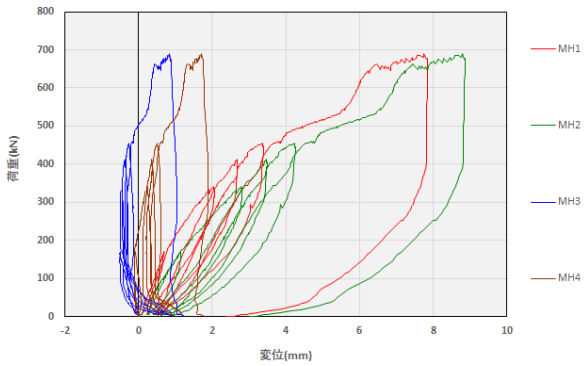


図-6.7.32　上沓側水平変位

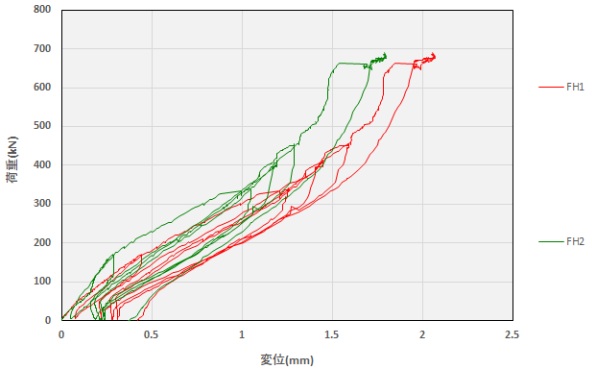


図-6.7.33　下沓側水平変位

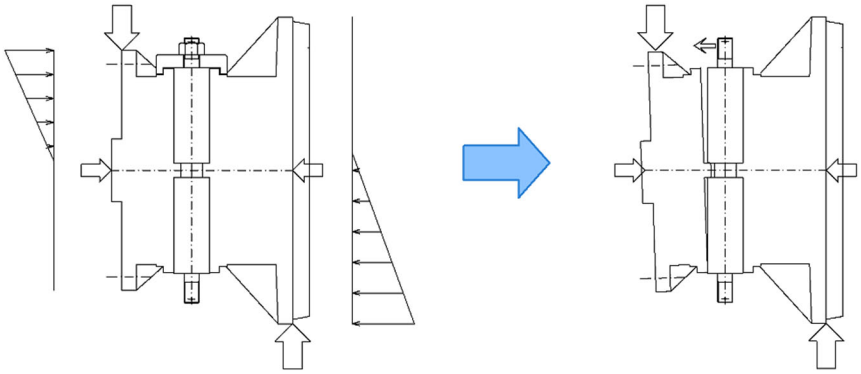


図-6.7.34　上沓の傾き

ⅱ）き裂から破断に至る過程

①き裂と思われる「きずエコー」は確認できなかった。

②支承分解後，目視でピン表面にき裂は確認できなかった。

※PAUT でピン周方向に不連続となる微弱なインディケーションを観測した。

ピンくびれ部の内部組織に損傷が生じている可能性があると思われる。

4）載荷試験結果の精度評価

載荷試験を実施したピンに対して PAUT によるエコー確認結果を**表-6.7.16** に示す。試験終了後，目視でピン表面にき裂は確認できなかったことから，適切に判定できたと考える。

表-6.7.16　フェーズドアレイ探傷試験結果　エコー確認結果一覧表

調査タイミング	きずエコー	底面エコー	状態
載荷前	なし	あり	試験前／健全
降伏点付近 CV’：0.124　（除荷後）	なし	あり	試験中／き裂なし※
降伏後 CV’：0.288　（除荷後）	なし	あり	試験中／き裂なし※
降伏後 CV’：1.141　（除荷後）	なし	あり	試験中／き裂なし※

※PAUT の結果，きずエコーなし，底面エコーありであったため，き裂なしと判断した。

載荷試験を実施したピンを PAUT により評価した結果を**表-6.7.17** に示す。

表-6.7.17　フェーズドアレイ探傷試験結果　エコー確認結果一覧表

調査タイミング	評価レベル
載荷前	○
降伏点付近 CV’：0.124　（除荷後）	○
降伏後 CV’：0.288　（除荷後）	○
降伏後 CV’：1.141　（除荷後）	○

6.7.6　フェーズドアレイ探傷試験試行結果のまとめ

今回の試行結果では，降伏相当変位が生じたピンについてはわからなかったが，破断の有り無しのピンを読み取った際の底面エコーの有無から，破断の有無については読み取れる可能性があることがわかった。また，きず・底面エコーの有無によって本技術による計測結果から，**表-6.7.18** に示す○，△，×の評価レベルによる判定を用いて，計測対象の損傷レベルを分類する方法を提案することができた。

表-6.7.18　評価レベル

評価レベル	きずエコー	底面エコー	状態
○	なし	あり	健全
△	あり	あり	き裂の存在が疑われる状態
×	あり	なし	破断が疑われる状態

以下、エコーについてのまとめを示す。

1）健全なピンのエコー

健全なピンでは窪み部に「きずエコー」は無く，「底面エコー」が観測されることを確認した。

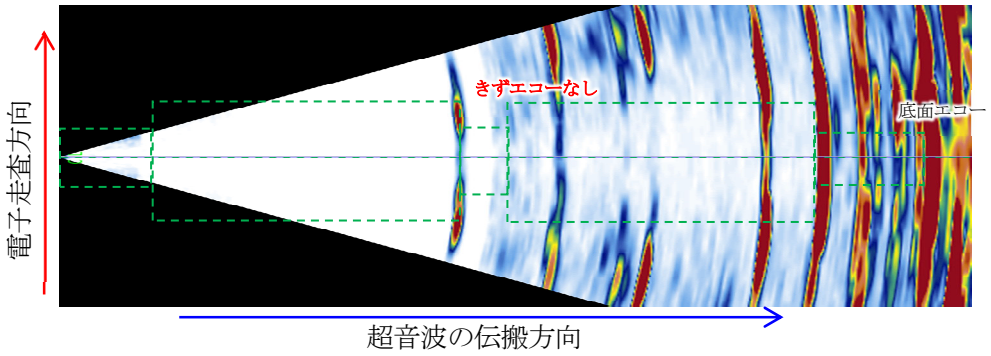


図-6.7.35　健全ピンの検査結果例

2）切断ピンのエコー

被災により切断したピンではくぼみ部に「きずエコー」が観測されると共に，「底面エコー」が消失することを確認した。

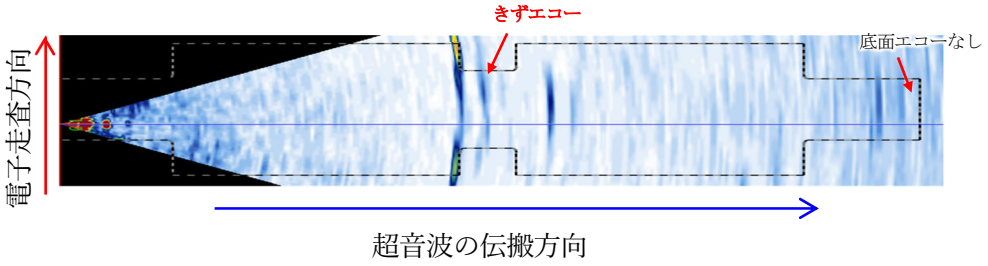


図-6.7.36　切断ピンの検査結果例

3）妨害エコー

被災したピンと載荷試験時のピンに対して，PAUT を実施した結果，判断を妨げる「妨害エコー」が多数現れたため，探傷データの評価はピンに関する PAUT の非破壊検査要領に精通し，探傷装置の専門知識を有する超音波探傷試験の資格者が必要となる。

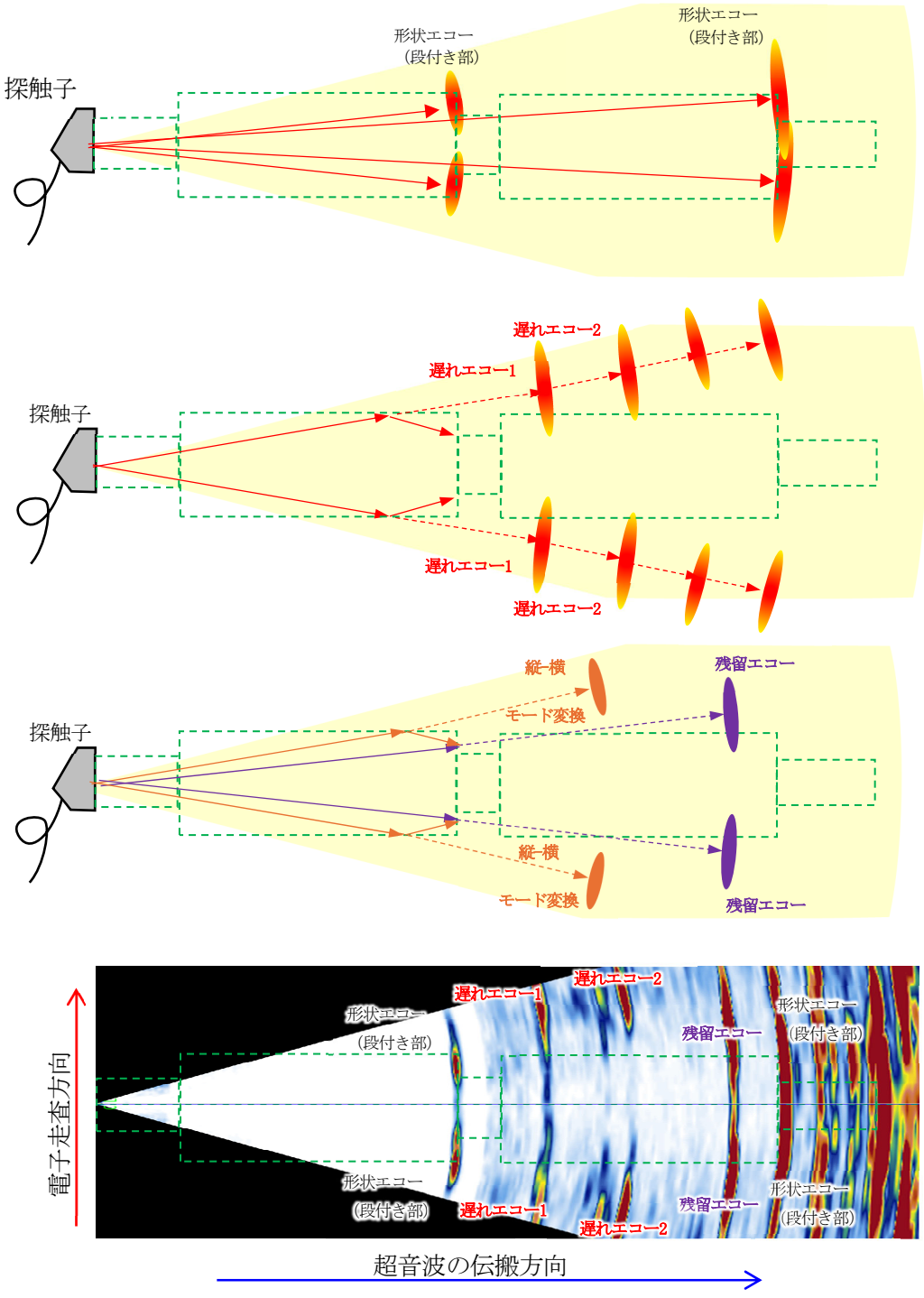


図-6.7.37　妨害エコーの観測例

参考文献

6.7.1) 一般社団法人日本非破壊検査協会 : 非破壊試験技術総論, 一般社団法人日本非破壊検査協会, pp.15, 平成 16 年 8 月.

6.7.2) 一般財団法人日本規格協会 : JIS Z 2300:2020, 朝日 弘, pp.70, 2024 年 7 月.

6.7.3) 日本工業出版 : 月刊「検査技術」特別企画 2024　超音波フェーズドアレイ技術　基礎編　最新版, 日本工業出版, pp.15−19, 2024 年 8 月.

6.7.4) 日本道路協会 : 道路震災対策便覧（震災復旧編）, 丸善, pp.109−110, 平成 14 年 4 月.

6．8　衛星 SAR による橋の異常変位検知技術

本節では，衛星 SAR（Synthetic Aperture Radar）による橋の異常変位検知技術を地震後の橋の調査に試行した結果について報告する。

6.8.1　技術の概要及び計測の仕組み

(1) 技術の概要

衛星 SAR は，地上高度 700km 程度の低軌道を周回する人工衛星からマイクロ波を地上に照射しその反射波を画像化することによって，地表面の変化や変位を観測する技術である。マイクロ波は雲を透過するため，衛星 SAR は昼夜問わず観測が可能であるが，SAR 画像は光学画像ほど明瞭な画像ではないため判読に高度な分析技術を必要とする。これまで衛星 SAR の観測対象は地盤・火山活動・氷山など地球スケールの自然環境であったが，人工構造物では反射波を得やすいという特徴を生かして構造物を対象とする分析への応用が研究されている。地震を含む災害事象の状況把握に使われる衛星データの分析手法は下記のとおりである。**表-6.8.1** に概要をまとめて示す。

（1）事象後の SAR 画像の振幅情報を画像化して分析

（2）事象前後の SAR 画像の振幅情報を画像化し，事象前後の変化を分析

（3）事象前後の SAR 画像の振幅・位相で計算されたコヒーレンスをもとに，事象前後の変化を分析

（4）事象前後の SAR 画像の位相で計算された変位をもとに，事象前後の変化を分析

表-6.8.1　SAR 衛星データを使った分析手法の分類

分類	手法	メリット	デメリット
（1）事象後の SAR 画像の振幅情報を画像化して分析	画像判読	即応的な分析が可能。事象後の高分解能な SAR 画像で分析可能。	1 画素 1m 未満の高分解能な SAR 画像は撮影範囲が数 km 四方に限られる。
（2）事象前後の SAR 画像の振幅情報を画像化し，事象前後の変化を分析	ピクセルオフセットトラッキング法	即応的な分析が可能。衛星軌道が多少異なっても適用可能。1m を超える大きな沈下や隆起を分析可能。	数十 cm 未満の沈下や隆起を分析不可。
（3）事象前後の SAR 画像の振幅および位相で計算されたコヒーレンスをもとに，事象前後の変化を分析	コヒーレンス変化検知	簡便に事象前後の変化有無を分析可能。	事象前後で同じ衛星軌道で観測した SAR 画像が必要。
（4）事象前後の SAR 画像の位相で計算された変位をもとに，事象前後の変化を分析	干渉 SAR 時系列解析による変化検知	観測波長のオーダーの沈下や隆起を検知可能。	事象前後で同じ衛星軌道で観測した SAR 画像が必要。

（1）（2）は事象発生後に速やかに衛星観測が行われれば 24 時間以内の即応的な分析が可能である。（3）（4）は事象発生後 24 時間以内の分析は難しいものの，一般的には，衛星観測スケジュールに応じて分析が行われる。本節では，地震後に橋梁で生じる段差や支承ズレなど cm オーダーの損傷を分析できる可能性がある技術として（4）に注目して検討を行うが，その前に近年特に注目されている（1）について概要を説明しておく。

（1）に関しては，近年，複数の小型衛星を統合利用することで観測頻度の向上が著しい。光学衛星に関しては，衛星の数と分解能において米国が先行している。例えば，分解能 0.5m クラスにおいては，Planet 社は 22 機，Maxar 社は 4 機を保有し，さらに追加が計画されている。合成開口レーダー(SAR)衛星に関しては，分解能 0.5m クラスにおいて，フィンランド ICEYE 社は 34 機，米国 Capella 社は 12 機の小型衛星をそれぞれ保有し先行している。一方，日本でも QPS 社や Synspective 社が分解能 0.5m クラスの小型 SAR 衛星を運用開始している状況である [6.8.1)]。

天候や時間帯に左右されない観測を可能とする SAR 衛星は，以前から災害時の状況把握への活用が期待されていた。分解能 0.5m クラスの SAR 画像になると，土砂災害などを画像として判読可能になる。そうした衛星が複数利用可能となることで，災害時の状況把握能力が飛躍的に向上する。従来の光学衛星では困難であった夜間や荒天時の観測が可能となり，24 時間体制での監視が実現している。海外では，小型 SAR 衛星で取得されたデータが地震・ハリケーン・洪水・山火事などの被害状況把握に既に活用されている。例えば，2023 年 8 月に米ハワイ州マウイ島ラハイナで起きた山火事，2024 年 9 月にポーランドと中央ヨーロッパで発生した暴風雨「Boris（ボリス）」などの被害把握や救助支援に小型 SAR 衛星の画像が活用された [6.8.2)]。日本でも，小型 SAR 衛星の画像を使って，擬似的な道路被災事象や令和 6 年能登半島地震の実際の被災状況を対象として，その判読可能性を評価するなどの活動が行われている [6.8.3),6.8.4)]。今後，さらに数を増した衛星コンステレーションの構築により，観測頻度は飛躍的に向上し，数時間単位での状況更新が可能になると見込まれており [6.8.5)]，被害の進展を時系列で把握することが可能になると考えられる。

(2) 計測の仕組み

干渉 SAR 時系列解析においては，同じ衛星軌道から同じ地域を複数時期にわたって観測し，SAR 画像の対応する画素間の位相差分を算出することで，各観測の間で生じる地表と衛星の間の距離の変化を算出することができる[6.8.6)-6.8.8)]。この原理を**図-6.8.1** に示す。この距離の変化は衛星 SAR の電波照射方向における変位であり，衛星視線方向変位と呼ばれる。位相差分の計算には安定した反射波が得られる画素を使う。位相差による距離の変化は位相周回成分 $2\pi N$ を含む可能性があるものの，時間的に緩やかな距離の変化は $-\pi \sim +\pi$ [rad]の範囲で表され，地表が衛星から遠ざかると正の値を，近づくと負の値をそれぞれとる。位相差ϕ [rad]は，マイクロ波の波長λ [mm]を使って変位$d = \lambda\phi/4\pi$ [mm]へ変換できる。波長λは，31mm（X バンド），56mm（C バンド），24cm（L バンド）など衛星によって異なる値をとる。X バンド衛星は，他に比べて波長が短いため，都市部や構造物の微小な変位の分析に適すが，植生や降雨の影響を受けやすい。C バンド衛星は，他に比べて広範囲の観測を高頻度で実施すること重視していることが特徴で，自然災害のモニタリングや都市部の定期観測に適しているといわれている。L バンド衛星は，他に比べて波長が長いため， 植生によって電波がさえぎられにくく，郊外地域の地表面の観測に適している。

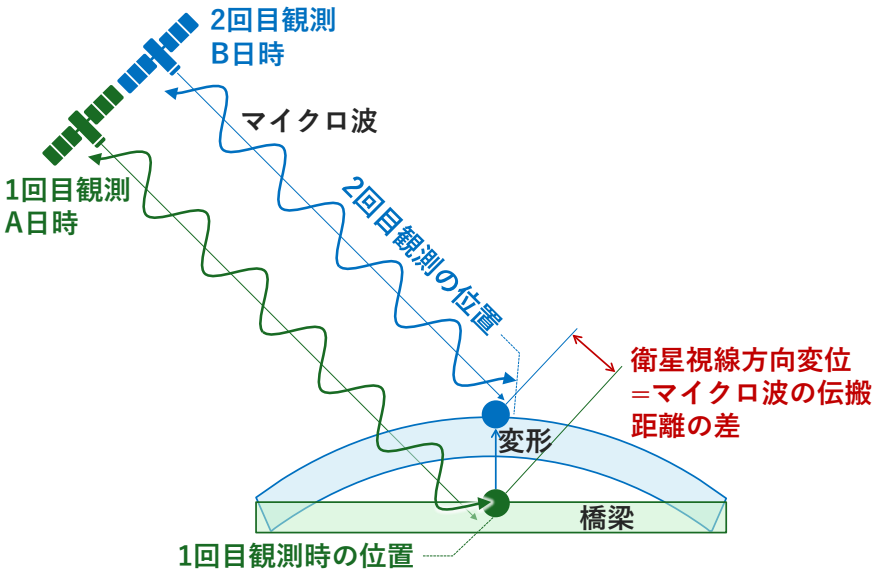


図-6.8.1　SAR 衛星による変位計測の原理

本節では，複数回の観測において安定した反射が得られる観測点に注目して解析を行う Persistent Scatterer Interferometry (PSI) 手法を用いる[6.8.9]。PSI 手法において，基準の観測$m0$に対する観測mの反射点pにおける基準点に対する位相差分は次式で表される。

$$\varphi^{m}_{\mathrm{diff}}(p) = \varphi^{m}_{\mathrm{disp}}(p) + \varphi^{m}_{\mathrm{topo}}(p) + \varphi^{m}_{\mathrm{noise}}(p) \qquad (6.8.1)$$

$\varphi^{m}_{\mathrm{disp}}(p)$　反射点pの変位に対応する位相成分

$\varphi^{m}_{\mathrm{topo}}(p)$　反射点pと基準点の高低差に対応する位相成分

$\varphi^{m}_{\mathrm{noise}}(p)$　雑音成分，電離層・大気・天候などの影響による位相バラツキも含む

$\varphi^{m}_{\mathrm{disp}}(p)$が求めたい変位に対応する位相成分である。時間軸において変位ゼロとする基準は基準観測$m0$であり，空間軸での基準は同一観測内の基準点である。$\varphi^{m}_{\mathrm{topo}}(p)$は反射点$p$と基準点の高低差に対応する位相成分であり，観測$m0$と観測$m$の衛星軌道情報と数値標高データをもとに計算可能である。$\varphi^{m}_{\mathrm{noise}}(p)$は電離層・大気・天候などの影響による位相バラツキを含むが，同一観測内の空間的な影響については解析地域を 1km 平方未満の狭い領域に限定することで影響を低減することができる[6.8.10]。

本報告においては，観測点の変位は不規則には発生せず，時間と温度に比例するものとして分析を行う。この仮定は地盤や構造物に対して有効な仮定である。この仮定のもとでは，雑音成分$\varphi^{m}_{\mathrm{noise}}(p)$を最小化するような，与えられた位相差分データに良くあてはまる時間と温度の比例係数を求めることによって，モデル化された変位に相当する位相成分$\varphi^{m}_{\mathrm{disp}}(p)$が得られる。

（3）本研究で使用した機器

衛星データ

世界において利用可能な衛星がいくつかあるなかで, 本研究は無償でデータ利用できる Sentinel-1 衛星（C バンド）に注目する。Sentinel-1 は欧州宇宙機関が管理する衛星であり，世界の陸地や氷山を対象に 12 日間隔で定期観測する。観測に使われるマイクロ波の波長は 56mm である。標準的な観測モードは（Interferometric Wide swath），観測幅 250km，地上分解能 5m×20m，である。2014 年 4 月に Sentinel-1A が，2016 年 4 月に Sentinel-1B が打ち上げられ，2 機の衛星で運用されていた。2021 年 12 月に故障により Sentinel-1B が観測終了した。現在は，Sentinel-1A だけで運用されているが，2024 年 12 月 5 日に Sentinel-1C が打ち上げられ衛星軌道に入り 2025 年には観測データの提供が開始され，2025 年には Sentinel-1D が打ち上げられる予定である。

衛星データの利活用を促進するために, Sentinel-1 が世界中で観測したデータは無償公開されている[6.8.11)]。どの衛星においても災害発生時の観測データは無償公開されることが多いが，平常のデータも無償公開される点は研究開発や低コストが求められる応用にとって非常に貴重である。Sentinel-1 衛星データを使うことで，広域で定期的な観測データが得られる。

分析ソフトウェア

SAR 衛星データを使った干渉 SAR 時系列解析を行うためのソフトウェアがいくつかある。下記にいくつかを紹介する。本報告では，下記で紹介する SNAP を使用して，多数の衛星データの干渉処理を行い，その結果から分析対象の橋梁の領域データを抽出する。そして，その後の処理には独自ソフトウェアを使って分析を行う。

SARscape（商用ソフトウェア）

SARscape は，sarmap 社（スイス）によって開発された，合成開口レーダー（SAR）データの高度なハンドリングや解析が行える商用ソフトウェアである[6.8.12)]。このソフトウェアは，さまざまな衛星データに対応するとともに，干渉 SAR 時系列解析だけでなく，ピクセルオフセットトラッキング法やコヒーレンス変化検知など，さまざまな分析機能を提供する。

SNAP（オープンソースソフトウェア）

SNAP は，欧州宇宙機関（European Space Agency）が開発提供しているオープンソースな衛星データの解析ソフトウェアである[6.8.13)]。Sentinel-1 だけでなく，TerraSAR-X や COSMO-SkyMed などの衛星データも扱うことができる。

6. 8. 2　技術の精度評価

（1）精度評価の方針

1)　コーナーリフレクタを使った評価

はじめに，望ましい計測状態における評価対象技術の計測値の標準偏差を評価する。干渉 SAR 時系列解析では，コーナーリフレクタという金属製の反射板を使って計測すると，その反射板からは雑音が少ない良好な反射波が得られ，望ましい計測値が得られるという特徴がある[6.8.14)-6.8.16)]。そこで，コーナーリフレクタを使用する場合の計測値の標準偏差を調べる。

2)　GNSS スタティック測位との比較評価

つづいて，GNSS スタティック測位で得られる計測データと評価対象技術の計測データを比較する。地震後の調査とは無関係な時期と場所で計測されたものではあるが，GNSS スタティック測位により計測されたデータと評価対象技術（干渉 SAR 時系列解析）で計測されたデータを比較することで，干渉 SAR 時系列解析の計測精度を評価する。対象の橋は有ヒンジ PC 橋である。対象となる有ヒンジ PC 橋において，GNSS スタティック測位によって，桁中央や桁端部の変位が計測されている。その計測データと評価対象技術による計測データを比較する。GNSS スタティック測位の計測結果については，有ヒンジ PC 橋において管理者が取得したデータを提供頂いて使用する。なお，GNSS スタティック測位に使用された受信機，ソフトウェア，計測の実施者について，詳細は不明である。

上記いずれの評価においても，欧州宇宙機関の Sentinel-1 衛星データ（観測は 12 日毎，南行軌道）を使用する。

（2）計測精度に影響を及ぼす要因

1)　干渉 SAR 時系列解析

干渉 SAR 時系列解析はふたつの時期の SAR 画像の位相差分を算出することで変位を得る手法であるため，その位相に変化を与える変位以外のものが誤差要因となる。主な誤差要因は，(a) 地表の植生の変化，(b) 大気や地表の水分による位相変化，(c) 電離圏擾乱に伴う位相変化，である。橋梁だけを対象にして干渉 SAR 時系列解析を行う場合には，(a) と (b) が問題となり，(c) は問題になりにくい。(a) は，衛星の電波が森や街路樹などの植生に邪魔されるケースでは橋梁の観測が困難で，これは避けることができない。(b) についても避けることはできないが，安定的に反射波を得られる観測点を選択することである程度は影響を低減できる。(c) については，ひとつの橋梁における (c) の影響は同じと見なせるため，橋梁における観測点どうしの位相差を使うことで (c) の影響を回避することができる。干渉 SAR 時系列解析において計測精度に影響を及ぼす要因を下記に示す。

大気の影響

大気中の水蒸気や温度変化により，電波の伝播速度が変化し，位相誤差が生じる。この位相誤差が，そのまま分析結果に表れる可能性がある。大気中の水蒸気や温度変化は地域ごとに異なるため，広域を対象にして干渉 SAR 時系列解析を行う場合には大気の影響による位相誤差は避けられない。しかしながら，大気中の水蒸気や温度変化が同じと見なせる狭域を対象として干渉 SAR 時系列解析を行う場合においては，大気の影響による空間的な位相誤差は小さいため無視することができる。

電離層の影響

他に比べて観測波長が 23cm と長い L バンドの電波は電離層の擾乱に敏感であり，電離層の影響を受けて位相誤差が発生する。電離層の影響についても，広域を対象とする干渉 SAR 時系列解析においては計測精度に影響を与える要因となる。しかしながら，電離層の影響が同程度と見なせる狭域を対象として干渉 SAR 時系列解析を行う場合においては，電離層の影響は狭域内で同程度になるため，計測精度に与える影響は小さくなる。

地表の水分の影響

地表土壌の水分が多いほど土壌の誘電率が高くなり地表におけるマイクロ波の反射強度は大きくなる。マイクロ波の反射強度は地表の粗さにも影響を受ける。適度な粗さがあることで衛星の方向へ戻る成分が観測される。こうした性質は SAR 衛星で土壌水分の変化を推定するために使われることもある[6.8.17),6.8.18)]。一方，粗さも波も無い水面ではマイクロ波は衛星の方向へ戻らず別の方向へ鏡面反射してしまう。そのため，水面では強い反射波が得られず SAR 画像では暗く黒く見えることになる。

地表面の変化

植生の成長や建物の建設など，地表面の物理的変化が反射特性を変化させ，計測精度に影響を与える。一般的には，SAR 衛星の電波は人工構造物のコーナー部分で強く反射して SAR 衛星へ届く。コーナー部の他には，粗い地表面（コンクリートやアスファルトなどの表面）で電波が散乱して，その一部が SAR 衛星方向へ戻る。樹木や草などの植生が密集している地域では，電波が植生によって吸収または散乱されるため，地表面からの反射波が弱くなる。波が無い水面では，電波が鏡面反射して，SAR 衛星へ戻る成分が無い。

気象条件

雨や雪などの気象条件は計測精度に影響を与える。激しい降雨は電波を散乱させるため，反射波の強度が低下し，計測精度が低下する。積雪は SAR 信号の反射特性を変化させ，位相誤差を引き起こす。特に積雪の厚さや密度が変動することで，地表の微小な変動を正確に捉えることが困難になる。激しい降雨や積雪時のデータを使わない，などの対策が考えられる。SAR 衛星の画像で降雨や積雪を人間が判読できるわけではないが，C バンド（5GHz 帯）や X バンド（9GHz 帯）など気象レーダ[6.8.19)]と同じ周波数帯の電波を SAR 衛星も使用するため気象の影響がある。

観測条件の変動

衛星の軌道や観測角度の変動が計測精度に影響を及ぼす。衛星軌道と観測角度に関して選別を行い，分析に使用する衛星データを厳選することで，計測精度への影響を低減できる。

干渉 SAR 時系列解析を行うにあたっては，これらの要因を考慮し，適切にデータを選択すること誤差要因を低減させることが重要である。具体的には，激しい降雨や積雪の際の観測データを基準データには使わないことが重要である。

2) GNSS スタティック測位

GNSS スタティック測位は，地上に固定的に設置された複数の受信機を使って 60～120 分程度にわたって GNSS 衛星からの信号を受信し，複数の受信機の間の距離と方向（基線ベクトル）を求めることで位置を計測する方法である。この手法は，測量や地殻変動の観測などミリメートル単位の精度が求められる非リアルタイムな用途に適している。GNSS スタティック計測における誤差要因は，基線長（基準点と計測点間の距離），気象条件，マルチパス（建物などの地物による反射波）である。一般的には，10km 未満に受信機を設置する場合は基線長も気象条件も大きな誤差要因にはならない。アンテナ設置に注意すれば，マルチパスについても大きな誤差要因となることはない。その他に瞬時的な雑音の影響を受けると考えられる。瞬時的な雑音の影響を低減するために，カルマンフィルタによる平滑化でトレンド値を抽出するという処理を行った結果の値を用いる。

(3) コーナーリフレクタを使った評価

コーナーリフレクタという金属製の反射板を使用して干渉 SAR 時系列解析を行う場合に得られる計測値の標準偏差を評価する。ここでは，前述の位相差分$\varphi^m_{\mathrm{diff}}(p)$に含まれる雑音成分$\varphi^m_{\mathrm{noise}}(p)$の標準偏差を評価する。

コーナーリフレクタ

富士山 御殿場 新五合目には人工衛星の校正・検証を目的として JAXA により人工衛星用コーナーリフレクタが整備されている[6.8.20)]。このコーナーリフレクタは，１辺が３メートルの直角二等辺三角形のステンレス反射板を組み合わせて作成されたものである。本報告ではこのコーナーリフレクタを使って評価を行う。コーナーリフレクタの位置を**図-6.8.2** に示す。

評価方法

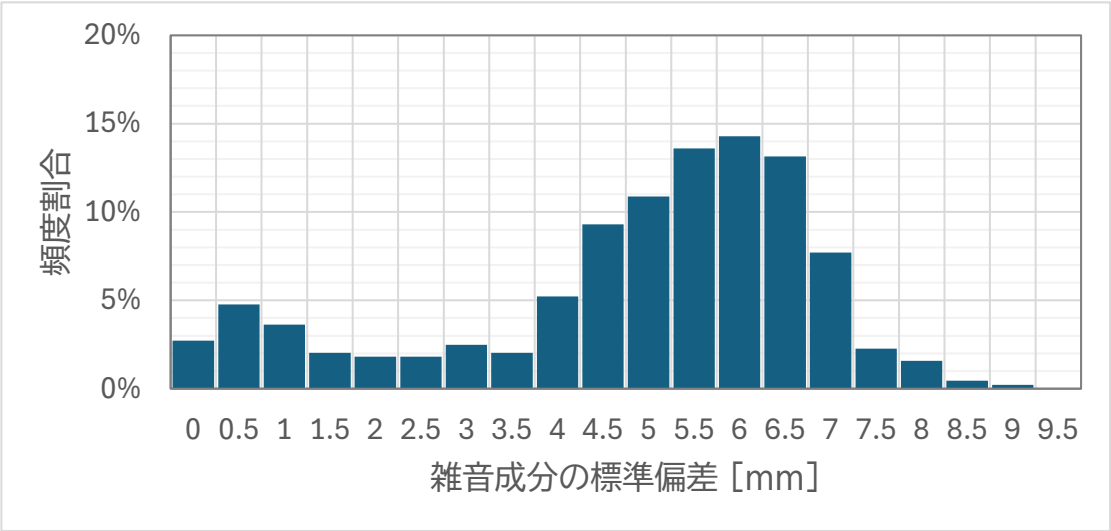
コーナーリフレクタを基準点として位相差分$\varphi^m_{\mathrm{diff}}(p)$を計算し，各観測点の雑音成分$\varphi^m_{\mathrm{noise}}(p)$の標準偏差を算出する（基準点 0)。比較のため，リフレクタではない観測点を基準点とするケースについても同様に数値を算出する(基準点 1)。**図-6.8.2** に比較のために使用する基準点 1 の位置を示す。基準点 1 は御殿場 新五合目 第 3 駐車場の入り口付近のアスファルト上の観測点である。第 3 駐車場に車や雪が無い時期の衛星データを使用する。本評価で使用する衛星データは下記のとおりである。

衛星データ　欧州宇宙機関 Sentinel-1 南行軌道，衛星視線方位 279.7 度，入射角 43.4 度
期間　2023 年 4 月 1 日～2024 年 11 月 21 日（冬季と開山期間を除く），観測数 29 回
観測時刻　AM　5 時 43 分，　観測波長 56mm



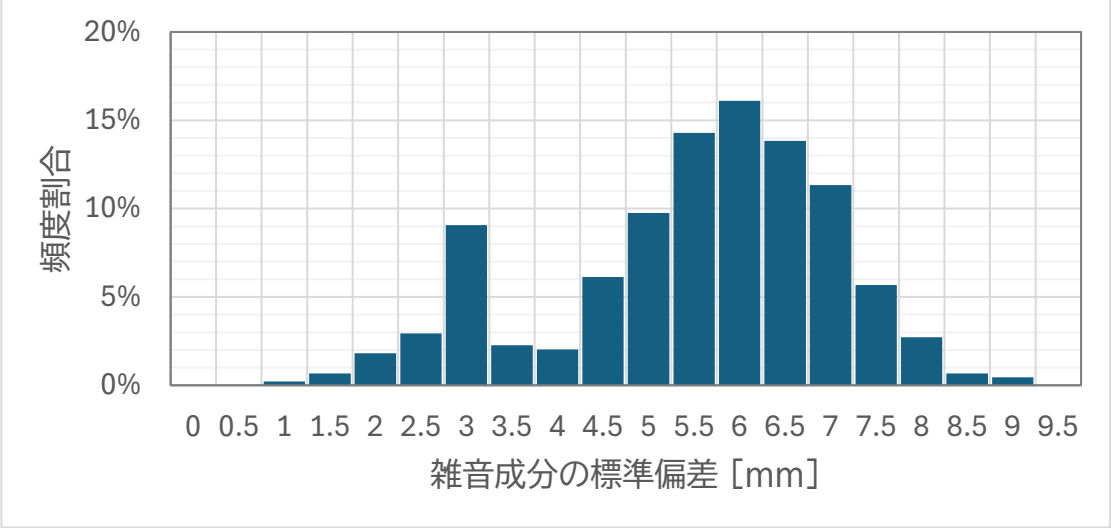
図-6.8.2　富士山 御殿場 新五合目　コーナーリフレクタ

位相差分の雑音成分の標準偏差を**図-6.8.3** に示す。同図は，第 3 駐車場で得られた観測点の雑音成分の標準偏差の頻度分布を表す。同図によると，コーナーリフレクタを基準点にする方が，非リフレクタ観測点を基準点にする場合に比べて，雑音成分の標準偏差 5.5mm 以下の観測点数が多い。標準偏差 5.5mm という数字は，衛星データの観測波長 56mm の 1 割から来ており，評価の目安として設定している。この結果から，コーナーリフレクタを使うことによって雑音成分が所定の条件を満たす観測点をより多く得られることがわかる。



標準偏差が 5.5mm 以下の観測点数　206　全体の 47%

(a)　コーナーリフレクタを基準点として差分位相を計算した場合



標準偏差が 5.5mm 以下の観測点数　154　全体の 35%

(b)　非リフレクタ観測点を基準点として差分位相を計算した場合

図-6.8.3　雑音成分の標準偏差

(4) GNSS スタティック測位との比較評価

干渉 SAR 時系列解析によって得られた計測データを GNSS スタティック測位で得られる計測データと比較評価する。ここでは，前述の位相差分$\varphi_{\mathrm{diff}}^{m}(p)$から抽出された位相成分$\varphi_{\mathrm{disp}}^{m}(p)$を変位に換算し，GNSS スタティック測位で得られるトレンド値と比較する。比較評価の計測対象は有ヒンジ PC 橋である。精度評価の対象橋梁の諸元と側面図を**表-6.8.2** および**図-6.8.4** に示す。

1) GNSS スタティック測位による橋梁の変位計測

GNSS スタティック測位の計測点は**図-6.8.5** に示すとおり。南北に 8 台の GNSS 受信機で計測が行われた。計測頻度は 1 時間に 1 回である。各受信機で記録されたデータはカルマンフィルタによる平滑化でトレンド値が算出され，それを計測結果として使用する。

表-6.8.2 精度評価の対象橋梁の諸元

橋種	プレストレストコンクリート道路橋
構造形式	3 径間有ヒンジラーメン橋（ドゥルックバンド形式）
橋長	220 m
支間構成	40 m ＋ 140 m ＋ 40 m
幅員	0.75 m （歩道部：両側） ＋ 6.50 m（車道部）

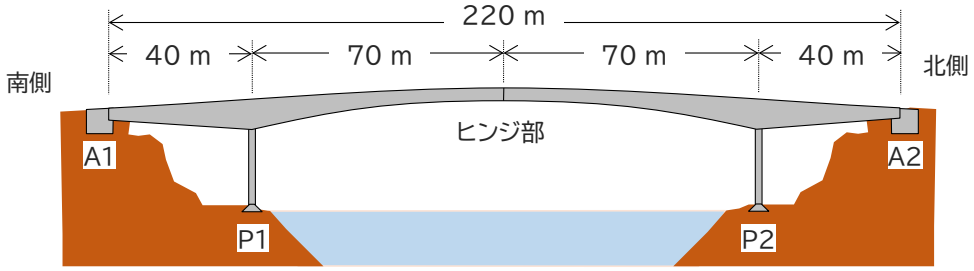


図-6.8.4 対象橋梁の側面図

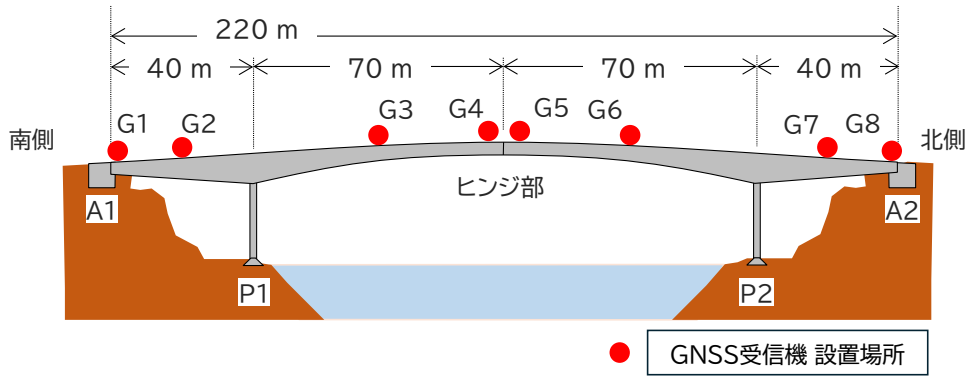


図-6.8.5 GNSS スタティック測位による橋梁の変位計測の計測点

2) 干渉 SAR 時系列解析による橋梁の変位計測

GNSS スタティック測位との比較評価においては，時間および温度という因子を使って SAR 衛星で観測される橋梁の変位をモデル化して分析する[6.8.21)]。冒頭で説明したように，地盤や構造物の変位を分析する際にこのモデル化が適用可能である。1 年以上の長期にわたる多数の観測データを使って季節変化を統計的に分析することで，雑音の影響や，不規則に加わる交通荷重による変位の影響を低減し，熱膨張収縮などによって発生する橋梁の変位を分析することが可能となる。前述の観測m計測点pの位相差分から得られる位相成分$\varphi_{\mathrm{disp}}^{m}(p)$を時間と温度に比例する項の和で表す。

1. 熱膨張収縮による変位の項： 温度 1℃あたり変位kと基準となる観測に対する温度差の積
2. 時間に比例して増減する垂れ下がりや反りを表す変位の項： 時間比例して単調増加あるいは減少する単位時間当たり変位vと基準観測時刻からの経過時間の積

このモデル化においてk，vが未知数であり，求めたいものである。これらは，雑音成分を最小化することによって得られる。上記の成分は位相情報なので，雑音成分を複素数として表現しその和を最大化するように未知数k，vを求める。温度 1℃あたり変位kを求める際には，橋梁の温度情報を使用するべきであるが，通常は得にくいため，橋梁の最寄りの気象台の気温で代用する。衛星の観測時刻に合わせた気温を使うことが望ましい。求めたk，vと雑音成分を使って位相情報を再構成し，位相から変位に換算することで，変位$d = \lambda\phi/4\pi$を得る。

精度評価において使用する SAR 衛星データの諸元を**表-6.8.3** に示す。変位をモデル化する際に使用する温度情報については，衛星の観測時刻が早朝であること，日が昇る前の早朝 4 時から 5 時にかけて最低気温が計測されること，橋梁の部材温度は気温に比べて遅れがあること，をふまえて衛星観測日の最低気温を変位モデル化に使用する。

SAR 衛星で計測される変位と橋梁で発生する変位の幾何的関係を説明する。SAR 衛星を使って計測される変位は，対象物で発生している変位を SAR 衛星の視線方向に投影したものである。それを衛星視線方向変位（Line-of-Sight; LoS 変位）と呼ぶ。**図-6.8.6** に SAR 衛星と LoS 変位の関係を示す。橋梁において，鉛直成分d_z，橋軸成分d_x，なる変位が発生しているとき，それを SAR 衛星から観測して得られる LoS 変位d_{LoS}は下記式であらわされる。θは SAR 衛星の観測電波の入射角である。ψは SAR 衛星の視線方向（観測電波の照射方向）と橋梁が成す相対角度である。

$$d_{\mathrm{LoS}} = d_z \cdot \cos\theta + d_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi \qquad (6.8.2)$$

表-6.8.3 衛星データの諸元

衛星	欧州宇宙機関（ESA） Sentinel-1A
衛星軌道	南行軌道（北→南）
入射角	33.09 度
波長	56 mm（C バンド）
地上分解能	5×20 m
観測時刻	午前 6 時頃（日本標準時）
観測データ	2020 年 12 月～2022 年 2 月に対象の橋梁を含む地域を観測した合計 36 シーンを使用

本研究で使用する SAR 衛星と対象橋梁の相対角度を図-6.8.7 に示す。本研究で使用する SAR 衛星と対象橋梁の組み合わせの場合には，相対角度ψは 87.9 度であり，$\cos\psi = 0.0375$となって，式(6.8.2)の第 2 項がほぼゼロになり，橋梁の変位の橋軸成分は LoS 変位にはほとんど含まれず，鉛直成分のみが LoS 変位として観測される。そこで，本精度評価においては式(1)第 2 項を無視し，式(6.8.2)第 1 項だけで LoS 変位を鉛直変位へ換算する。

橋梁の変位計測の比較評価

GNSS スタティック測位と SAR 衛星計測による対象橋梁の鉛直変位を比較する。SAR 衛星計測の観測時刻である午前 6 時頃に合わせて，GNSS スタティック測位の午前 5 時から 6 時のデータで計測された値を比較する。SAR 衛星で計測された LoS 変位を前ページ式(1)により鉛直変位成分へ換算する。

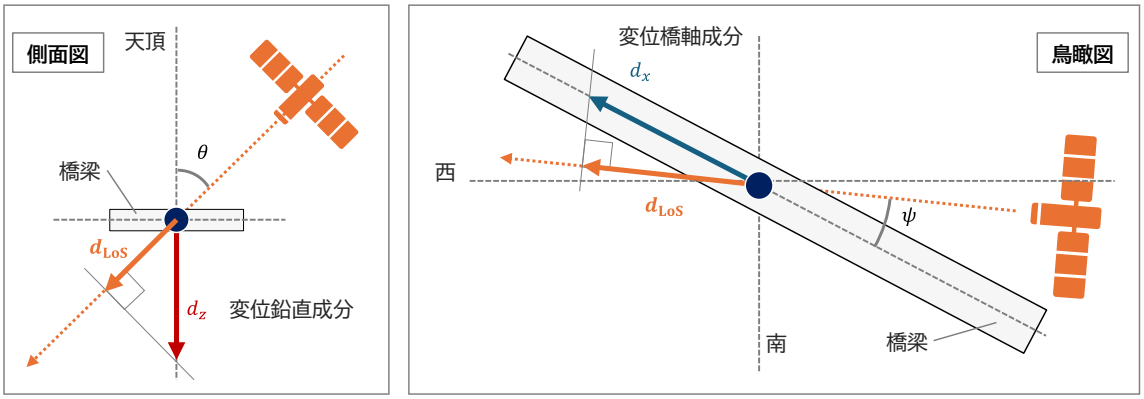


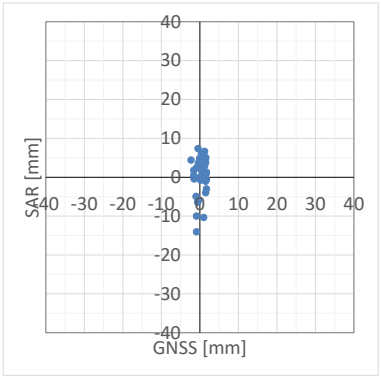
図-6.8.6　SAR 衛星で観測される視線方向変位と橋梁の変位の関係



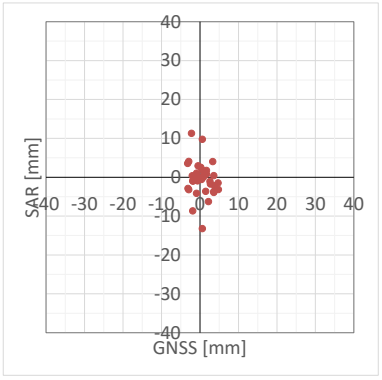
図-6.8.7　本研究で使用する SAR 衛星と対象橋梁の相対角度

（SAR 衛星　視線方向入射角 30.9 度、対象橋梁との相対角度 87.9 度）

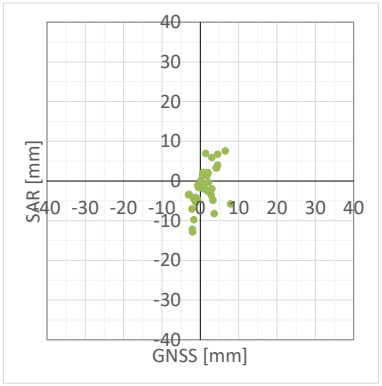
GNSS 計測点 8 点の比較評価の結果を**図-6. 8. 8** に示す。横軸に GNSS，縦軸に SAR，それぞれの計測値をプロットし，両者の線形関係を仮定して決定係数を併せて示す。一般的には，決定係数が 0.5 以上である場合に相関があるとみなされる。計測点 G1，G2，G3，において GNSS の計測値は±5mm 以下で，これに対応する SAR の計測値は±10mm の範囲でばらついており，その結果として両者の相関は小さくなり，決定係数も小さくなっている。一方，G4～G8 においては，GNSS の計測値が小さな値であっても，それに相関する値を SAR 計測値がとっており，相関係数は G1～G3 よりも G4～G8 のほうが大きくなっている。この理由は，G1～G3 よりも G4～G8 で SAR 衛星にとって良い計測条件が得られていたから，と考えられる。



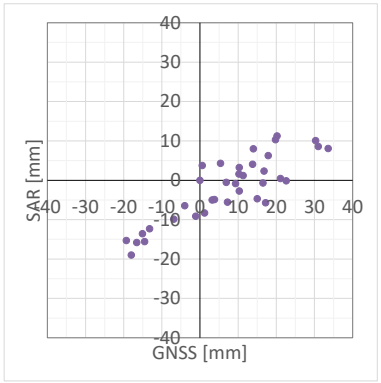
(a) G1　決定係数=0.0294



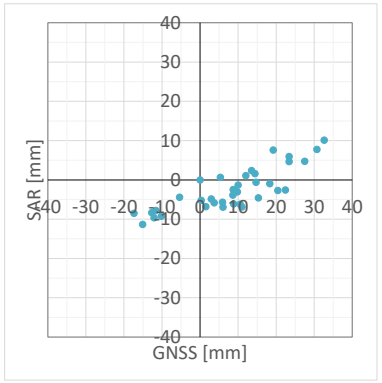
(b) G2　決定係数=0.0307



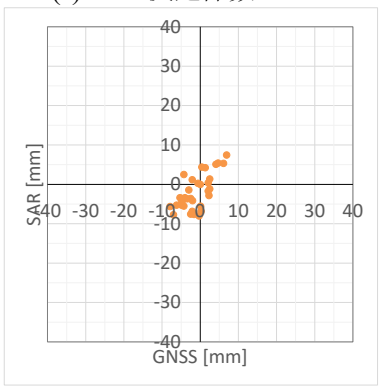
(c) G3　決定係数=0.270



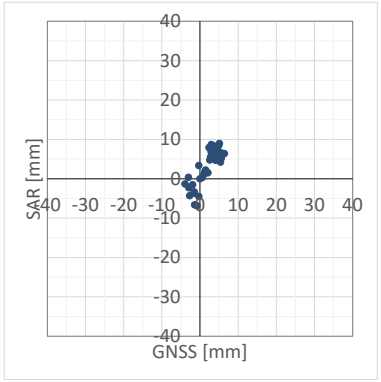
(d) G4　決定係数=0.747



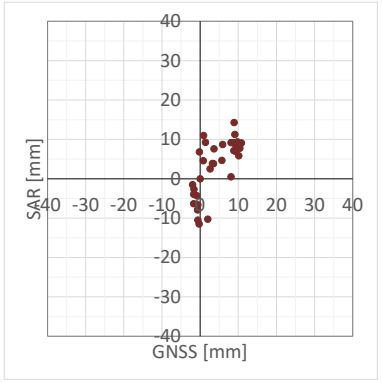
(e) G5　決定係数=0.681



(f) G6　決定係数=0.463



(g) G7　決定係数=0.699



(h) G8　決定係数=0.510

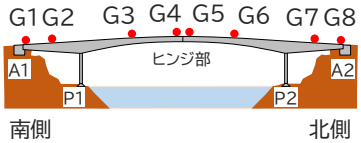


図-6. 8. 8　GNSS スタティック測位と SAR 衛星計測による対象橋梁の鉛直変位の比較
（横軸：GNSS スタティック測位の値[mm]，縦軸：SAR 衛星計測の値[mm]）

各計測点における GNSS スタティック測位の標準偏差と SAR 衛星計測の決定係数の関係を**図-6.8.9** および**表-6.8.4** に示す。**図-6.8.8**，**図-6.8.9**，**表-6.8.4** から下記のことが読み取れる。

（1） GNSS スタティック測位の標準偏差が 1mm 程度であっても，SAR 衛星計測の計測値の標準偏差は 5mm 程度ある。つまり，計測点の電波反射状態によるが，SAR 衛星計測では 5mm 程度の雑音成分がある。

（2） GNSS スタティック測位の標準偏差が 5mm を超える観測点では，SAR 衛星計測との決定係数が 0.5 を超える。つまり，5mm を超える変位が発生しているならば SAR 衛星計測で計測できる可能性がある。

（3） 決定係数が 0.5 を超えるケースであっても，SAR 衛星計測の標準偏差は GNSS スタティック測位の標準偏差よりも小さい。つまり，SAR 衛星計測は GNSS スタティック測位よりも小さい計測値を与える可能性がある。

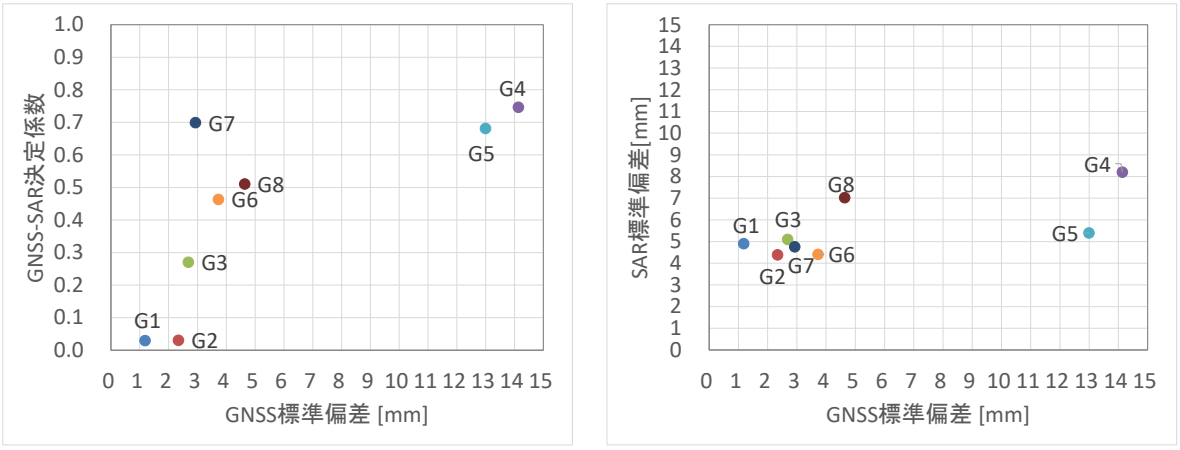
以上の比較評価の結果から，本手法による SAR 衛星計測の精度については下記のことが言える。

・計測値は標準偏差 5mm 程度の雑音成分を含む。

・5mm よりも大きな変位が発生していれば計測できる可能性が高い。

・5mm よりも小さな変位は雑音に埋もれてしまう可能性が高い。

・計測される変位は GNSS スタティック測位で計測される数値よりも小さくなる可能性がある。



(a) 計測点における GNSS スタティック測位の標準偏差と SAR 計測の決定係数の関係

(b) 計測点における GNSS スタティック測位と SAR 衛星計測の標準偏差の関係

図-6.8.9 GNSS スタティック測位の標準偏差と SAR 衛星計測の決定係数の関係

表-6.8.4 GNSS スタティック測位と SAR 衛星計測の平均・標準偏差・決定係数

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
GNSS 標準偏差[mm]	1.180	2.336	2.681	14.134	12.991	3.724	2.926	4.635
SAR 標準偏差[mm]	4.901	4.384	5.098	8.204	5.397	4.409	4.759	7.027
GNSS-SAR 決定係数	0.029	0.031	0.270	0.747	0.681	0.463	0.699	0.510

6.8.3　震後点検で想定される活用方法

本技術は人工衛星で定期的に観測したデータを多数使用して橋等の計測対象を分析する技術である。したがって，発災直後に被災地上空に配備できる人工衛星数等を鑑みると，現在の条件では本技術は即応的な情報提供は困難であり，情報提供のタイミングは発災から 2 週間から 1 か月程度の時間が経過してからとなる。今後，人工衛星数が増加すると情報提供のタイミングが早くなる可能性もある。

一方，震後点検では即応的な情報提供が最も求められるところであるが，ある程度の時間が経過してからであっても用途はあると考える。例えば，震度 5 強に満たない地震であっても老朽化し，PC の緊張力の抜けによりたわみが生じている橋の点検，道路橋やそれ以外の構造物の路面の沈下等の検出等の用途である。下部構造や上下部接続部の沈下等の位置の異常を把握できる可能性もある。震度 5 強以上の地震に対して緊急点検が行われることは既に説明されているが，そのような用途において，人工衛星の活用が有効となる可能性もある。

人工衛星を活用した橋梁の点検には，以下のようなメリットがある。

遠隔データ収集：人工衛星は広範囲の地表を遠隔から観測することができる。地震後には道路網の途絶等も想定されるが，現地へ赴くことなくデータを収集できる。

高精度な観測：人工衛星は橋梁の微細な変位を検出することができる。これまでの筆者の分析事例から代表的な損傷と変位の例を下記に示す。いずれの例も変位の数値は数ミリから 10m 程度と小さい。衛星観測の 1 回の計測値は雑音を多く含むが，多数の観測による統計的な分析によって雑音を低減して数ミリの変位を検出できる。

分析可能な損傷と変位の例としては以下が挙げられる。

・吊材破断による桁の垂れ下がり [6.8.21)]

・桁端部を固定した PC 鋼棒の破断によって生じる桁端部の浮き上がりや桁中央の垂れ下がり [6.8.22)]

・非常に緩やかに進行する橋台の沈下

・斜張橋のケーブルの緊張力低下にともなう桁の垂れ下がり

コストの削減：震度 5 強以上の地震に対する緊急点検では多くの人員と時間をかけて全ての橋を点検する。全てを点検することはコストの点で現実的ではない。一方，人工衛星を活用して地震前後での差異を確認すれば，人が点検すべき橋を絞り込むことが可能になり，点検コストの効率化が図れる。

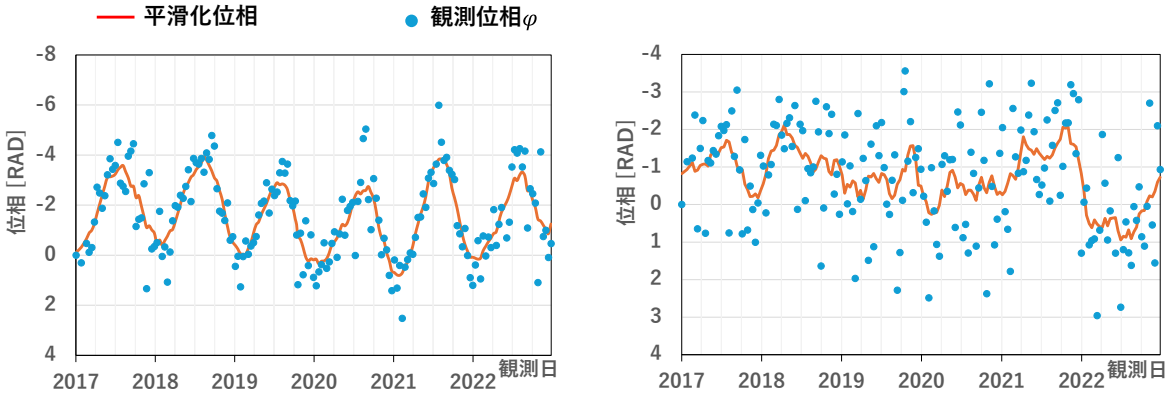
6.8.4　能登半島地震調査における試行例

令和 6 年 能登半島地震において，現地で路面と橋面の段差など損傷が確認された橋について，評価対象技術で変化を検知できるかどうか評価した結果について説明する。この評価結果は論文として既に発表したものであり，詳細についてはそちらを参照して欲しい[6.8.23)]。この比較においては，欧州宇宙機関の Sentineil-1 衛星データ（観測は 12 日毎，南行軌道）を地震前 45 回観測・地震後 3 回観測ほど使用して橋の変位を分析し，地震前後で変位の違いが大きい箇所を抽出するという方法で，地震後に損傷があった橋梁を検知し，現地確認結果と比較する。本研究においては変位による変化検知について検討する。平常時の橋の変位がとりうる範囲からの外れの程度によって変化があったか否かを判定するというアプローチを試す。まず橋の変位を分析する手順を説明し，つづいて変化検知について説明する。

（1）変位分析

精度評価のセクションで説明した変位分析手法を用いる。観測m計測点pの位相差分から得られる位相成分$\varphi^{m}_{\mathrm{disp}}(p)$は対象橋梁の変位に相当する成分をもち，これと雑音成分$\varphi^{m}_{\mathrm{noise}}(p)$の和を平滑化して用いる。平滑化された位相成分と平滑化前の位相成分の間の平均二乗誤差が所定の値未満であるという条件を満たす計測点を安定計測点と見なして選定し，後段の分析に使用する。

安定計測点および非安定計測点の例を図-6.8.10 に示す。同図(a)は安定計測点として選択されたものであり，平滑化前後の差が小さい。一方，同図(b)は平滑化前後の差が大きい。平滑化後の位相成分において，観測日tと$t+1$の間で絶対値πを超える位相変化が発生する場合には位相アンラップを施す。地震によって突発的に段差や変位が発生すると，それが位相変化として観測されるが，そうした位相変化に対して適切な位相アンラップは困難である。ここでの位相アンラップは衛星の観測範囲内の位相変化を仮定したものである。位相アンラップ後の平滑化位相成分を変位へ換算して LoS 変位を得る。



(a)　安定計測点の例，平滑化前後の差が小　　(b)　非安定計測点の例、平滑化前後の差が大

図-6.8.10　複素移動平均処理による安定計測点の選択

（2）変化検知

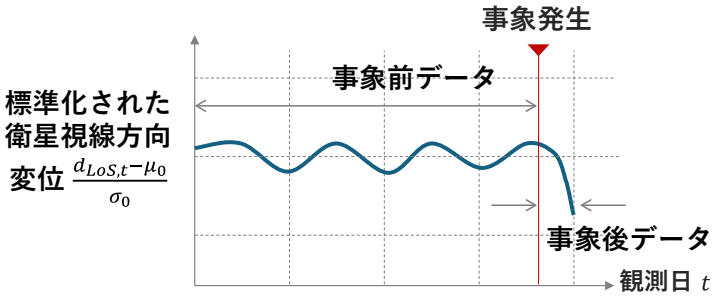
LsS 変位を使った変化検知の考え方を図-6.8.11 に示す。本研究では，地震という既知事象に注目し，その前後の LoS 変位の違いを数値化し，違いが大きければ変化アリと見なす。事象によって突発的に発生する変位は衛星で観測可能な値を超えると考えられるが，そのような場合でも事象前後で LoS 変位に平常時との違いが発生するはずで，その違いを数値化して変化検知に使う。違いを数値化するためにマハラノビス距離を用いる。図-6.8.11 に示すように，事象前後の LoS 変位を使ったマハラノビス距離により事象前後の LoS 変位の違い指標aを定義する。この指標は，事象発生前の LoS 変位の平均と標準偏差によって標準化された LoS 変位を使って算出される。標準化された LoS 変位は単位無しの値となる。前述したとおり，本研究における LoS 変位は平滑化位相から計算されたるものである。事象直後の 1 回のデータでは適切な平滑化はできないため，事象後の複数の観測データを使う。違い指標aは，事象前後の LoS 変位に違いが無ければ小さい値を，違いがあれば大きな値をもつ。

本試行においては，2024 年 1 月 1 日前後の対象地域の SAR 衛星データを使って，各安定反射点の LoS 変位の数値からμ_0とσ_0を算出する。使用する衛星データは下記のとおりである。

事象前データ：　2022 年 7 月～2023 年 12 月　観測時刻 AM05:51，合計 45 回

事象後データ：　2024 年 1 月 7,19,31 日　観測時刻 AM05:5，合計 3 回

変化有りと見なすaの閾値については以降で考察する。



衛星視線方向変位　**平滑化位相** $f_{avg}(\varphi)$

$$d_{LoS,t} = \frac{f_{avg}(\varphi)}{4\pi}\lambda$$

波長 λ

事象前後の衛星視線方向変位の違い指標 a

$$a = \sum_{t=T_{after}} \left(\frac{d_{LoS,t} - \mu_0}{\sigma_0}\right)^2$$

事象前の$d_{LoS,t}$**の平均値** μ_0

事象前の$d_{LoS,t}$**の標準偏差** σ_0

事象発生後の複数の観測日 T_{after}

図-6.8.11　LoS 変位による変化検知の考え方

（事象前後の LoS 変位の違い指標aが大きいほど LoS 変位の違いが大きいとみなす）

(3) 変化検知の閾値

令和 6 年能登半島地震を対象事象として，能登・金沢内灘地域の橋長 50m 以上の橋を中心に選定した 275 橋について前述の変化検知手法を適用する。この 275 橋は，地震によって甚大な被害が発生し現地で筆者らが目視確認したもの[6.8.23)-6.8.25)]，他で報告されているもの[6.8.26)]，未確認のものを含む。275 橋の事象前後の LoS 変位の違い指標aについて累積相対度数を**図-6.8.12** に示す。同図によると，違い指標aが 36 以上になると累積相対度数が 95%を超える。これを目安として，違い指標をグループ分けする。グループ分けの累積相対度数と違い指標の対応関係は，0-80%（a=0～13.6），80-90%（a=13.6～22.9），90-95%（a=22.9～36.1），95%超（a=36.1～）である。違い指標aの累積度数が 80%を境に時系列の LoS 変位が事象前後で変化する傾向を確認できた。これは LoS 変位が有意に変化しているいうことである。そこで，累積相対度数が 80%以上，つまり違い指標aが 13.6 以上を変化アリと見なす。

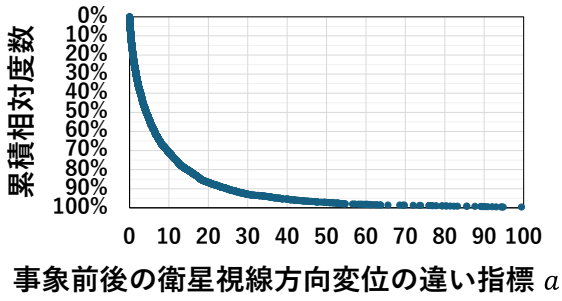


図-6.8.12　275 橋梁に対する事象前後の LoS 変位の違い指標aの累積相対度数

(4) 変化検知の試行結果

令和 6 年 1 月 1 日に発生した令和 6 年 能登半島地震において道路面と橋面に段差発生が確認された橋梁について，評価対象技術による変化検知を試行した。段差が確認された橋梁に対して変化検知を適用し，安定反射点における LoS 変位の違い指標a を計算し，各橋梁における LoS 変位の違い指標aの最大値が所定の値を超える場合に変化アリと見なして検知をカウントする。閾値は違い指標aの累積度数が 80%以上となるa>=13.6 である。その結果を**表-6.8.5** に示す。地震によって発生した段差を現地で確認した橋梁の総数は 78 橋で，評価対象技術で変化検知できた割合は 58%であった。そのうち 50m 以上の 35 橋に注目すると，変化検知できた割合は 66%であった。図-6.8.13 に検知結果の分布

表-6.8.5　震後に段差が発生した橋梁に対する変化検知の試行結果

	総数	変化検知数	安定計測点なし	検知割合
段差確認橋梁	78	45	11	58%
そのうち 橋長 50m 以上	35	23	3	66%
そのうち 安定計測点あり	67	43	0	64%

を示す。

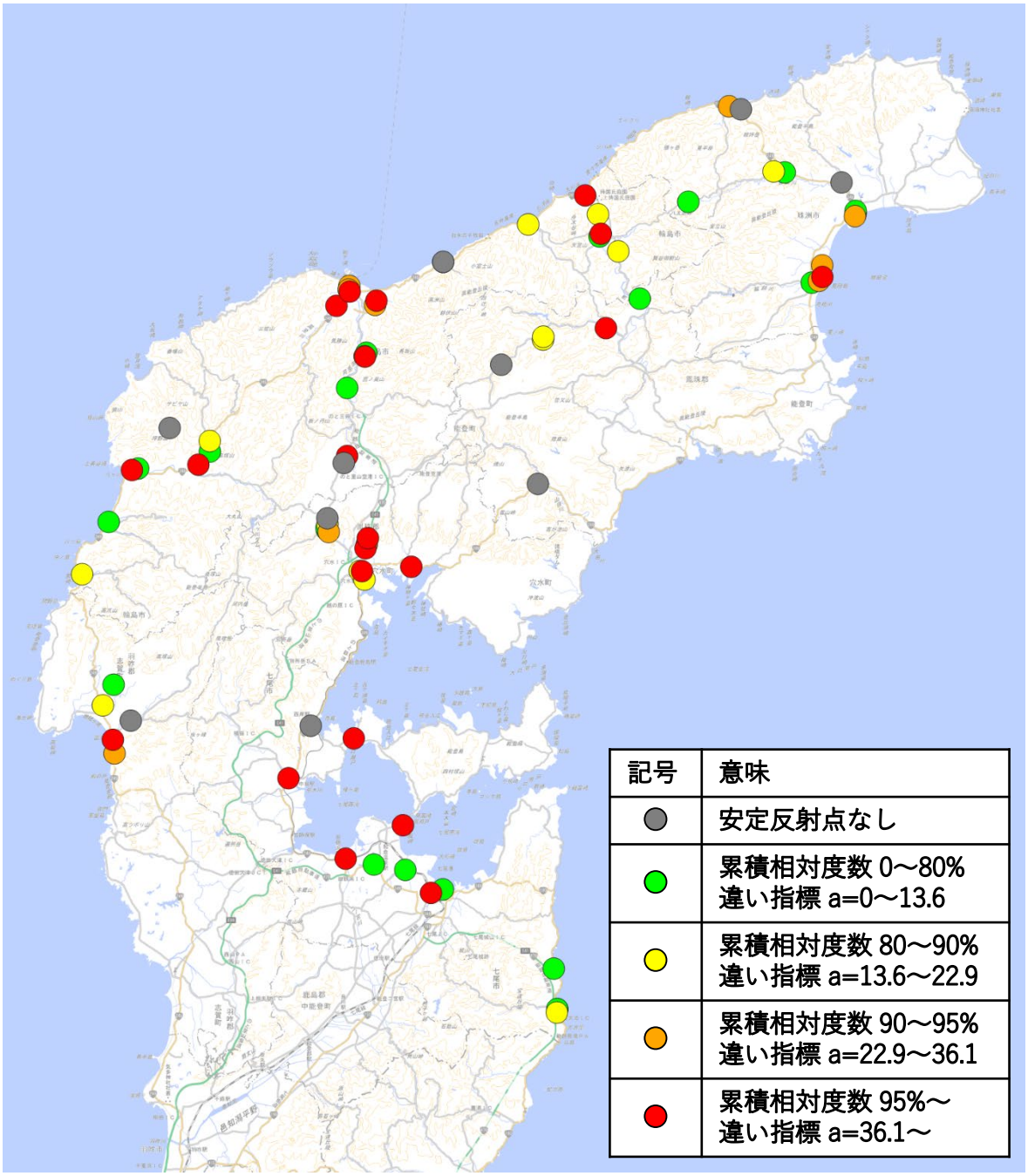


図-6.8.13　段差確認橋梁と変換検知結果の分布

参考文献

6.8.1) 吉田邦伸, 国土技術政策総合研究所, インフラ分野における衛星活用リモセン技術の社会実装に向けた検討状況, 令和６年度 気候変動適応の研究会　研究発表会・分科会, 2024 年 12 月 17 日, https://adaptation-platform.nies.go.jp/archive/conference/2024/1217/pdf/c/s03-nilim.pdf.

6.8.2) Uchubiz 取材記事, 世界最大級の SAR 衛星コンステを運用-フィンランド「ICEYE」創業者が語った成功のカギ, https://uchubiz.com/article/new56828/.

6.8.3) 国土技術政策総合研究所, 衛星 SAR 画像を活用した道路被災状況把握の適用性に関する検討, 国総研レポート, 2024 年 4 月 1 日, https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/2024report/ar2024hp024.pdf.

6.8.4) 内閣府宇宙開発戦略推進事務局 第３回衛星リモートセンシングデータ利用タスクフォース大臣会合（R6.3）資料 1-3 20, https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/rs/dai3/siryou1_3_1.pdf.

6.8.5) 内閣府宇宙開発戦略推進事務局,「衛星リモートセンシングデータ」実装加速への方向性について 17 ページ, 2024 年 3 月 26 日, https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/rs/dai3/siryou2_1.pdf.

6.8.6) 石塚師也, 変位測量情報高度化のための衛星 SAR 時系列解析の活用に関する研究, 日本建設情報総合センター研究助成事業 報告書, 2020 年 12 月, https://www.jacic.or.jp/josei/R02/REP2019-02.pdf.（最終閲覧日：2025 年 3 月 23 日）

6.8.7) 小林知勝, 森下遊, 山田晋也：干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発, 国土地理院時報, No 130, 2018.

6.8.8) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法」報告書, 2011 年 10 月 7 日, https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/main_eisei/.（最終閲覧日：2024 年 6 月 17 日）

6.8.9) Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 39, 1, pp.8-20, 2001.

6.8.10) Wu, S., Zhang, B., Ding, X., Shahzad, N., Zhang, L. and Lu, Z.: A hybrid method for MT-InSAR phase unwrapping for deformation monitoring in urban areas, Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf., 112, 2022.

6.8.11) European Space Agency (ESA), Copernicus Data Space Ecosystem, an open ecosystem that provides free instant access to a wide range of data and services from the Copernicus Sentinel missions, https://dataspace.coernicus.eu/ .（最終閲覧日：2025 年 2 月 23 日）

6.8.12) SARscape, 合成開口レーダー（SAR）データの高度なハンドリングや解析が行えるソフトウェア, https://nv5geospatialsoftware.co.jp/Software-Technology/SARscape .（最終閲覧日:2025 年 2 月 23 日）

6.8.13) European Space Agency (ESA), Sentinel Application Platform (SNAP), https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/.（最終閲覧日：2025 年 2 月 23 日）

6.8.14) 伊藤陽介, 山本学, 合成開口レーダ用反射板の設計･製作と性能評価, 鳴門教育大学研究紀要, 第23巻, 2008.

6.8.15) 佐藤渉, 本田謙一, 引地慶多, 佐藤匠, 川野健一, 永谷英基, 合成開口レーダのリフレクターによる

位相安定性の検討,土木学会全国大会 第 76 回年次学術講演会, CS9-33, 2021.

6.8.16) 小堀俊秀, 鍛冶尚寛, 井上晃輔, 櫻井寿之, 佐藤匠, 本田謙一, 田口智大, 佐藤渉, X バンド SAR 衛星によるロックフィルダム及び貯水池周辺斜面の安全管理 その 3, ― X バンド用リフレクターの適用性検討 ―, 土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, CS9-80, 2024.

6.8.17) 会田健太郎, 小池俊雄, 開發一郎, ALOS/PALSAR を用いた土壌水分推定アルゴリズムの高頻度適用研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, I_589-I_594, 2014.

6.8.18) 篠原健吾, 福本昌人, Sentine-1 衛星データと表層土壌水分量の関係, 2022 年度 農業農村工学会全国大会,講演要旨集, p. 515-516, 2022 年 8 月 30 日.

6.8.19) 深見和彦, レーダ雨量計の仕組みと運用, 令和 4 年度河川情報取扱技術研修 資料, 2022 年, https://www.river.or.jp/kougi2022_6.pdf, アクセス確認 2025 年 3 月 23 日.

6.8.20) 岳南建設株式会社, ホームページ, 人工衛星用コーナーリフレクター完成披露式, 2018 年 11 月 21 日, https://www.gakunan1919.co.jp/news/news-20181121.html. （最終閲覧日：2025 年 2 月 23 日）

6.8.21) 木下 耕介, 久村 孝寛, 山口 裕貴, 田中 大地, 衛星 SAR 画像を活用した橋梁の異常変位検知~和歌山県六十谷水管橋を事例として~, AI・データサイエンス論文集, 2022, 3 巻, J2 号, p. 586-593, 2022. https://doi.org/10.11532/jsceiii.3.J2_586.

6.8.22) 木下 耕介, 矢野 友貴宏, 久村 孝寛, 宮本 崇, 全 邦釘, 有ヒンジ PC 橋を対象とする時系列 InSAR 橋梁変位解析と構造シミュレーションとの比較分析, AI・データサイエンス論文集, 2024, 5 巻, 3 号, p. 730-739, https://doi.org/10.11532/jsceiii.5.3_730 .

6.8.23) 久村孝寛, 木下耕介, 矢野友貴宏, 人工衛星による橋梁の異常検知に関する検討 令和６年能登半島地震を事例として, AI・データサイエンス論文集, 2024, 5 巻, 3 号, p. 857-865, https://doi.org/10.11532/jsceiii.5.3_857 .

6.8.24) 小林巧, 吉谷薫, 大住道生, 道路橋の震後点検における UAV や自撮り棒の活用方法に関する実践的研究, AI・データサイエンス論文集, 2024, 5 巻, 3 号, p. 272-285, 公開日 2024/11/22, Online ISSN 2435-9262, https://doi.org/10.11532/jsceiii.5.3_272.

6.8.25) 吉谷薫, 小林巧, 大住道生, 震後点検における点群計測による鋼アーチ橋のゆがみ調査, AI・データサイエンス論文集, 2024, 5 巻, 3 号, p. 678-687, 公開日 2024/11/22, Online ISSN 2435-9262, https://doi.org/10.11532/jsceiii.5.3_678.

6.8.26) 土木学会 地震工学委員会 地震被害調査小委員会： 2024 年 1 月 1 日 石川県能登地方で発生した地震（令和 6 年能登半島地震）, https://committees.jsce.or.jp/eec205/node/52. （最終閲覧日：2024 年 6 月 29 日）

6．9　生成 AI（LLM）を用いた診断補助

6.9.1　技術の概要

（1）技術の概要

大規模言語モデル（Large Language Model，以下，LLM と呼ぶ。）は，大量のテキストデータを基に深層学習技術を用いて訓練された自然言語処理の手法である。数十億から数千億以上のパラメータを持つモデルが一般的であり，人間のように文章を理解し，文脈を考慮した高品質なテキストを自動生成できる。主にトランスフォーマー構造が広く採用され，大規模な計算資源を活用して高度な推論や要約，質問応答，言語翻訳など多様なタスクに対応可能という特徴がある。近年はファインチューニングや RAG，指示調整技術（プロンプトエンジニアリング等を含む）の進展により，多くの分野への適応が進んでいる。チャットボットや検索エンジン，文章生成ツールなどにも用いられ，人間との自然な対話も可能であり，その応用は多岐にわたる。

（2）本項の検討で使用したモデル

本項では，検討対象の生成 AI（OpenAI 社 ChatGPT の GPT-4，GPT-4o，o1）として，市販されている中で現時点の最も代表的なものを選出した。

6.9.2　技術の能力評価方針

（1）背景及び能力評価の方針 [6.9.1)]

近年の人工知能の飛躍的な進化は，単なる人間の代替手段として語られる域を超え，社会の多様な領域において従来人間が担ってきた役割の再定義を促す要因になりつつある。たとえば，医療分野では人間と AI が協働で診断を行う一方で，治療方針の最終決定は医師の専門知識と倫理的判断に基づくべきであるとの役割分担が提案されている [6.9.2)-6.9.4)]。これは人間と AI が協働する新たな枠組みの構築を示唆するものであり，他の専門分野にも広がり得る。

一方，インフラ分野に目を向けると，橋梁の定期点検や震後点検では，特に後者では構造安全性に直結する判断が必要となる。このように高度な専門知識と論理的思考を要する判断に対して，近年の LLM をはじめとする生成 AI の導入が検討され始めており，技術者不足等の社会的課題を解決する手段として有望であるが，技術的には課題も多い。LLM に関する研究は多くあるが，道路橋点検等の専門領域に適用するための能力評価方法に関する研究はまだ数が少ない。

特に措置方針の決定に資する技術的判断では，誤判断が甚大な影響を及ぼすおそれがあり，判断や所見等の妥当性や信頼性を正確に評価する必要がある。しかし，多くの場合は西洋企業等が主導して製作した基盤モデルを使用するため，それに対して施せる管理策は限られるという制約がある [6.9.5)]。LLM は今後も進化し続けるが，それをどのように評価し，利用するかが喫緊の課題である。

本研究では，LLM 利用時の品質評価の観点 [6.9.5)]で，特に道路橋点検という専門領域への適用を念頭

に置き，1) モデル自体に依存する所見文の品質（以下，モデル品質と呼ぶ。）と，2) モデル及びプロンプトに依存する所見文の品質（以下，モデル+プロンプトによる品質と呼ぶ。）の 2 段階の評価方法を体系的に構築することを研究の目的とする。

（2）生成文に影響を及ぼす要因

LLM の生成文に影響を及ぼす主要な要因は，1) モデルアーキテクチャ（自己注意機構，層の深さ，隠れ層のサイズ等），2) モデルサイズ，3) トレーニングデータの質と量，4) アライメントやチューニング，5) 入力プロンプト，6) 自己回帰生成やサンプリングのランダム性等，7) RAG 等の外部知識等，多岐にわたる。本項では既存のモデルや今後開発されるモデルを念頭に置き，現状最も代表的な LLM（GPT-4，GPT-4o，o1）を対象に，モデルの能力や生成文のゆらぎ等を可能な限り定量的に評価する検討方針とする。

（3）体系的な能力評価方法の検討

a) LLM の品質評価に関する先行研究

LLM の品質評価の観点は，たとえば ISO/IEC 25010:2011[6.9.6)]では，有効性，効率性，満足性，リスク回避性，利用状況網羅性が挙げられ，ISP/IEC 25019:2023[6.9.7)]では，便益，安全，社会受容性等が挙げられている。また，生成 AI 品質マネジメントガイドライン[6.95)]では，要求満足性，信頼性，インタラクション性，セキュリティ，安全性，プライバシー，公平性，性能効率性，移植性，保守性と非常に多岐にわたる観点で議論が進められている。

これらすべてを包括した品質評価方法の構築は困難であるため，本章では道路橋点検における所見文の品質そのものに議論を絞る。ここでの所見文とは，定期点検や震後点検の様式に記入する所見文ではなく，その前段の思考過程における形式知表現全般を指す。この思考過程における形式知表現が妥当であれば，それを要約して，様式に落とし込む作業は今の LLM には容易である。なお，本研究では所見文の品質のみを取り上げるが，前述の多くの観点が不要ということではなく，道路橋点検という専門タスクに関係なく LLM に求められるものである。

LLM が生成した土木用語を含む文章の評価を試みた先行研究は存在[6.9.8), 6.9.9)]するが，筆者らが調べた範囲では国内外で専門タスクへの LLM 適用に向けて評価方法の体系化を目指した文献等は無い。また，異なる観点での LLM の安全性テストには Harm Bench[6.9.10)]等がよく用いられるが，この質問項目の妥当性や網羅性は不明である。

既存の LLM の評価方法は，1) 定性的な QA を行い，専門家が妥当性を評価する，2) 汎用ベンチマーク（MMLU[6.9.11)]，BIG-Bench[6.9.12)]等）のみで評価する，3) 定性的な QA を行い，その回答の妥当性を汎用ベンチマークで評価する等が多い。しかし，これらは 1) 専門性の高いタスクへの LLM の適用性を体系的に評価できず，2) 医療分野で少し開発されている[6.9.13)]が，専門領域のタスク向けのベンチマークがほぼなく，3) 所見文等の回答文を評価する観点が明らかにされていないという課題がある。

b) 本章で検討する評価方法の体系

図-6.9.1 に従来の評価方法と本研究で検討する評価方法の体系の比較を示す。前述の課題を解決するために，所見文を構造的かつ多角的に，また，それをできるだけ定量的・客観的に評価を行う一連の体系である。

具体的な手順として，非構造化質問による，道路橋の定期点検及び震後点検における熟練技術者の所見と LLM が生成した回答を比較し，文章の類似度指標（Bag of Words[6.9.14), 6.9.15)]（以下，BoW と呼ぶ。），Term Frequency-Inverse Document Frequency[6.9.16), 6.9.17)]（以下，TF-IDF と呼ぶ。），Jaccard 係数[6.9.18), 6.9.19)]，Sentence-BERT[6.9.20), 6.9.21)]（以下，SBERT と呼ぶ。），依存構造木[6.9.22), 6.9.23)]）を多角的に適用することで，1) モデル品質を定量的かつ客観的に評価する。さらに，2) モデル+プロンプトによる品質を評価するため，質問文に情報（プロンプト）を追加し半構造化質問とすることで，定性的かつ主観的な評価を行う。さらに，LLM as a Judge[6.9.24)]も併用することで，1)及び 2)の品質の評価を客観的に裏付ける。 LLM の利用時評価に際して，1) モデル品質と，2) モデル+プロンプトによる品質の 2 段階で評価する方針は，既存のガイドライン[6.9.5)]等の方針とも整合する。

（4）能力評価方法

3 章の橋梁診断員に対して半構造化インタビューを行った方法と同様に，生成 AI に対しても半構造化インタビューを実施した。生成 AI の能力評価で橋梁診断員の所見文を比較対象とするのは，後述の SBERT や依存構造木によるスコアが，その評価に使用したモデルや計算方法に依存するためである。スコアに絶対的な基準が無いため，技術者との相対比較を行う必要がある。なお，生成 AI に対しては橋梁診断員に実施した半構造化インタビューの質問と同じ画像とテキストを ChatGPT のチャットに入力した。以下，橋梁診断員に対しては調査対象者と呼び，生成 AI に対しては商用モデルの名前で呼ぶ。

a) 調査対象者

3 章に記載した通り，調査対象者は合計 14 名であり，実務経験の無い 2 名を除き，その多くが日常の定期点検業務で道路橋の点検・診断に携わる。定期点検の経験では，30 年間で約 5,000 橋の点検・診断を経験している調査対象者もいるが，多くは 15 年以下で数百～千橋の経験を持つ。一方，震後点検の経験を持つ調査対象者は 5 名に留まり，多くは数十～百橋の経験橋梁数である。

b) 半構造化インタビュー（焦点インタビュー）

半構造化インタビューにはいくつか種類があるが，本研究では「焦点インタビュー」[6.9.25)]を用いる。方法の詳細は **3 章**による。入力した画像も **3 章**と同じである。

c) 回答の分析方法

調査対象者の回答の整文とけばとり文を代表回答として，AI の回答文と比較する。比較する手法は，単語レベルの類似性を 1) BoW，2) TF-IDF，3) Jaccard 係数の 3 種類の方法，文章レベルの類似性を 4) SBERT，単語の係り受けによる構文の類似性を 5) 依存構造木で分析する。BoW，TF-IDF，Jaccard 係

数，SBERT，依存構造木の各手法を組み合わせることで，表層的な単語の類似度から文脈・論理的な関連性まで多角的に評価できると考えた。

BoW はテキストから単語を取り出し，それぞれの単語が何回出現するかを数え上げ，この出現回数を要素とするベクトルを構築し，2 つのテキスト間の類似度を比較する方法である。類似度の比較にはコサイン類似度を用いた。この方法にはテキスト内の単語の出現順序や文脈は考慮されない欠点があり，また，テキストの長さの影響を受けやすい特徴がある。

TF-IDF は，以下の式(6.9.1)～(6.9.3)に基づいて計算し，2 つのテキスト内の各単語に重要度を割り当てることで，単語の出現頻度だけでなく，その単語の希少性も考慮に入れた重みづけを行うものである。類似度の計算にはコサイン類似度を用いる。この方法でもテキスト内の単語の出現順序や文脈は考慮されない。

$$TFIDF(t,d) = TF(t,d) \cdot IDF(t) \tag{6.9.1}$$

$$TF(t,d) = \frac{n_{ij}}{\sum n_j} \tag{6.9.2}$$

$$IDF(t) = log\frac{N}{df(t)} \tag{6.9.3}$$

tは特定の単語を指し，dは対象となるテキストを指す。n_{ij}はテキストiにおける単語jの出現回数，Nは全体の文書数（今回は 2 つのテキスト），$df(t)$は単語tが出現する文書の数である。TFは，文書iでの単語jの出現回数を全文書に現れる単語jの総数で除している。この方法では単語の意味的な関係が考慮されないため，同じ意味の単語でも別のベクトルで扱われる場合がある。

Jaccard 係数は，単語に分割し以下の式(6.9.4)に基づいて計算することで，2 つのテキストをそれぞれ単語の集合と見なし，それらの集合間の類似度を計算する方法である。この方法では単語の出現頻度が考慮されず，また，文脈等も無視される。

$$Jaccard(A,B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \tag{6.9.4}$$

SBERT は文章の類似性を評価できる方法である。従来の BERT と比べ計算速度が速く，また，SBERT はディープラーニングにより文脈情報を学習しており，文全体の意味やニュアンス，単語間の関係性を考慮したベクトルを生成でき，これにより，単語の順序や文脈を反映した類似度を算出できる。類似度はコサイン類似度で評価する。分析には python を用い，SBERT には Sentence-transformers ライブラリを使用した。

依存構造木は，文中の単語どうしの係り受けを一本の木のように接続したものであり，それにより文の骨格が把握できる。句構造より簡潔で語順変動に強く，多言語横断的な比較が容易である特徴を有する。解析には，日本語の Universal Depend-encies に準拠した解析器である GiNZA[6.9.26)]を用いた。また，2 つの文の構文類似度には木編集距離[6.9.27)]を用いた。

また，BoW，TF-IDF，Jaccard 係数には，特に BoW がテキストの長さの影響を受けやすいため，けばとり文（詳細は**3 章**に記載）を用いて分析した他，**表-3. 4. 2** の質問文で用いられた単語の類似性の

影響があるため，分析時にはそれを除いた。SBERT 及び依存構造木についてははけばとり文と整文の両方を用いて分析した。

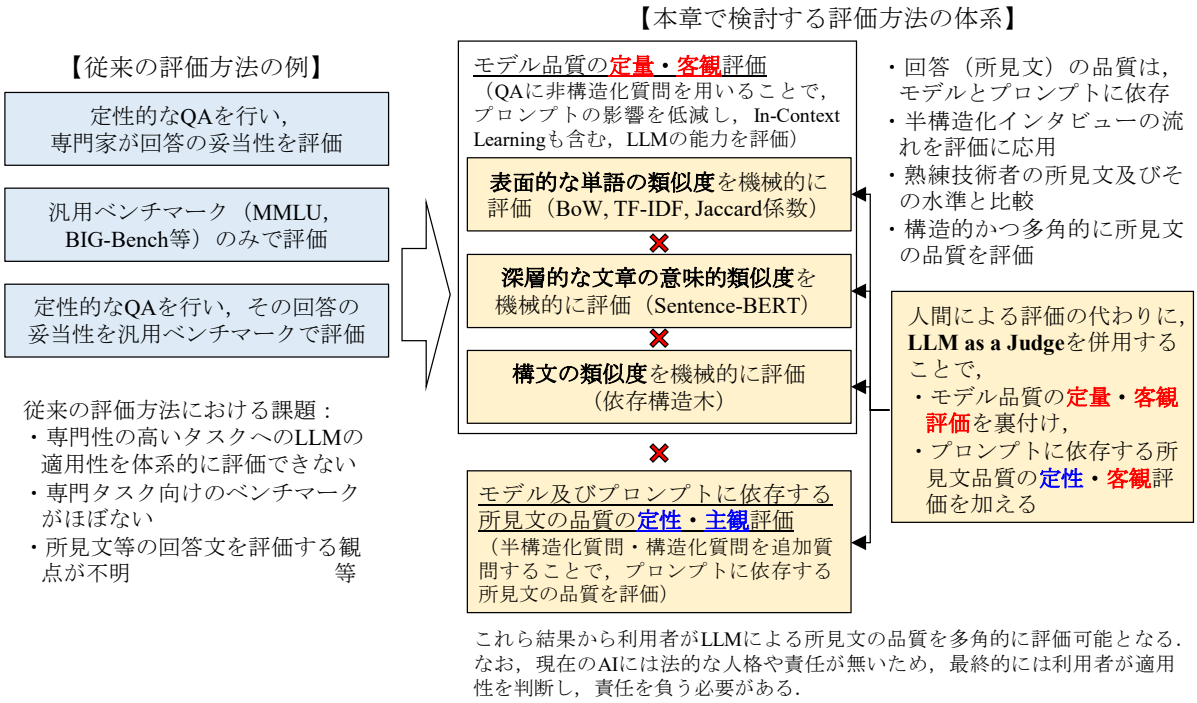


図-6.9.1　従来の評価方法と本章で検討する評価方法の体系の比較

6.9.3　生成 AI の生成文の例

LLM は確率的な生成 AI であるため，同じ質問に対する回答が毎回変化するが，複数回の入力に対し，文章の趣旨が大きく変わらないことを確認した上で本項では 1 例を挙げる。なお，回答の一貫性については後述の 6.9.5 で検討している。また，生成 AI に対する半構造化インタビューの結果は，非常に長文の回答であり，また，誰でも画像とテキストを入力すれば容易に再現できるため，**写真-3.4.3** の事例のみ示し，他は省略する。 なお，GPT-4 は 2023 年 3 月 15 日に公開されたモデル，GPT-4o は 2024 年 5 月 13 日に公開されたモデル，o1 は 2024 年 12 月 5 日に OpenAI 社より正式に公開されたモデルである。調査日は 2025 年 1 月 6 日である。

図-6.9.2 に ChatGPT-4 の回答，**図-6.9.3** に ChatGPT-4o の回答，**図-6.9.4** に o1 の回答をそれぞれ示す。まず，モデルの進化に伴い，文章量が増加していることがわかる。また，文章を一つ一つ確認すれば，モデルの進化に伴い文法の間違いが減り，単語の専門性が向上している。また，GPT-4 では的を得ない回答が目立つが，GPT-4o では「欄干の損傷」「コンクリート片」等の画像で確認できる内容を徐々に専門用語に近い単語で述べる他，写真にない「支承部分の異常」に言及するなど，事実から推論が部分的にできている。ただし，措置方針（文中の次のステップ）含め，回答は未熟である。

しかし，**図-6.9.4** の o1 では回答が大きく変化する。「伸縮装置」「高欄」等のより専門的な単語に置き換わる他，「専門的な点検（支持や下部工を含む詳細調査）が急務と考えられます。 特に地震後であることから、表面に見える損傷だけでなく、支持のズレや内部ひび割れの有無も入念に評価し、必要に応じて補修・補強や高速道路などの対策が急務と判断されます。」と，的確な措置方針に関する技術的判断を下している。ただし，「路面自体は比較的きれいに見えるが、写真左奥から中央付近にかけて、舗装表面に不自然なつなぎや亀裂の取り付けを確認する必要がある。」等の曖昧で間違いを含む発言もある。

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. この写真から、以下の点が道路橋の被害に関連して観察されます：

レールガードの損傷- 写真のガードは損傷しており、部分的に破損している箇所があります。これは、地震の影響で発生した可能性が高いです。

アスファルトの亀裂と隆起-表面には明確な亀裂があり、特定の部分でアスファルトが隆起しています。これも地震によるものと考えられ、構造的な強度への影響を示唆しています。

隣接する構造物- 画像の見方には、別の構造の一部も映っていて、その状態もチェックする必要があります。重要です。

周囲の地形- 橋が周囲の地形とどのように関連しているか、特に斜面やその他の自然の特徴が構造にどのような影響を与えるかを与える予測を評価する必要があります。に入れていいです。

これらの損傷は、橋の安全性と機能的に直接的な互換性があるため、詳細な構造の評価に必要に応じた修復が推奨されます。

図-6.9.2　写真-3.4.3 に対する GPT-4 の回答の例

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. この写真を見て、地震後の道路橋点検の視点から注目したい点を挙げます。

欄干の損傷：橋の手すり部分が破損しており、一部が完全に脱落している。

路面の亀裂・変形：橋面にコンクリート片が散乱しており、路面に亀裂や変形の可能性がある。

支承部分の異常：写真から見る限りフィールド干の支柱が本来あるべき位置からずれている可能性がある。支持部や構造全体の健全な問題がないか精査が必要。

排水溝やジョイント部の確認不足：道路に排水口が見えるが付近の損傷により排水機能が低下している可能性があります。また、ジョイント部も確認が必要です。

落下物の影響：地震の影響でコンクリート片やその他の破片が残った痕跡がある。下部構造や橋桁に直接的な被害が及んでいる可能性があるため確認が必要。

視覚的な地盤の確認：写真の背景に見える周辺地形に特段の変化（地盤沈下や隆起）は見られないように見えるが、詳細な地盤調査が推奨される。

次のステップとして行うべきこと:

1. 橋全体の詳細な点検（欄干、支持部、橋桁、橋脚など）。
2. ジョイント部や排水設備の機能点検。
3. 地盤の安定性の再確認。
4. 写真から確認できない部分（内部構造や支持部の向こう）の非破壊検査。
5. 安全性の観点から、車両の違反審査を検討。

この現場の状況は重大な危険性を伴う可能性があるため、当然の対応が必要です。

図-6.9.3　写真-3.4.3 に対する GPT-4o の回答の例

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. 5 秒の間、道路橋点検の観察事項について考えた

以下は、写真を見て専門家として気づいた点を、最低限具体的に列挙したものです。 実際には現場での詳細な点検や追加情報（他の角度の写真、図面、聞き取りなど）を総合して判断する必要がありますが、写真から読み取れる限りの情報をまとめます。

1. 伸縮装置（ジョイント）付近の損傷や変状

o 橋台側と橋側をつなぐ伸縮装置付近に、コンクリート片と思われる破片が複数落ちている。

o 伸縮装置の金属部材やゴムなど確認できるが、写真では明らかでない部分もあり、部材のずれや断断の様子を詳しく調べる必要がある。

o 破片が落ちているということは、衝撃や揺れによってコンクリート部や取付部が損傷した可能性があります。

2. 高欄（こうらん）・転落防止柵の状態

o 高欄（縁石上のコンクリート壁）上部の金属フェンス支柱が一部錆びているように見える。 地震動や経年劣化によって腐食が進行している可能性がある。

o フェンスの取り付け部（ベースプレートやボルト付近）にも、ずれや損傷がないか要確認。

o 写真右側の円筒状の保護柵のような部材は、外側に大きくせり出している。取り付け部にがたつきや隙間がないか確認が必要。

3. コンクリートのひび割れ・欠損

o 高欄天端やコーナー部分に剥離や欠損が生じており、コンクリート表面の破片が落ちているように見えます。

o 地震の揺れでコンクリートが浮きや剥離落を起こした可能性がある。錆び汁の存在や、鉄筋露出の存在を確認する必要がある。

4. 橋面舗装・路面の変状

o 路面自体は比較的きれいに見えるが、写真左奥から中央付近にかけて、舗装表面に不自然なつなぎや亀裂の取り付けを確認する必要がある。

o 伸縮装置周辺で段差が生じていないか、ファルアスト部に割れや捲れがないかどうかも要チェック。

5. 橋桁・支持部への影響の可能性

o 写真からは支持部（橋桁を支える部分）の状態が直接は確認できない。

o 地震動によって支持がずれたり破損したりしている場合、伸縮装置近辺に大きな影響が現れる可能性があるため、支持部およびその近辺のコンクリートにも注意して点検する必要がある。

6. 取付部材の研磨や固定状態

o フェンス支柱やその取付部の錆び、ナットの緩み、ボルトの破断などの写真からははっきり確認できないが、腐食の進行度や固定状態を現場で入念にチェックする必要がある。

o 雨水・湿気・融雪剤等の影響が考えられるため、定期的な補修や塗装、部材交換の履歴を見ているかも確認すべき。

7. 安全対策上の留意点

o 高欄天端などからのコンクリート剥落は、下部や走行車両・歩行者への空中物となる可能性があるため、即時対応が必要です。

o 転落防止柵が地震により緩んでいる場合は、二次災害防止のために臨時的な補強や立入規制を検討する必要がある。

8. 周辺地形・支間・下部工への影響

o 写真右下には斜面や天井らしきものが見えるが、地震による地盤変状態（地滑りや斜面崩壊など）が橋脚や橋台に及んでいないか確認する必要がある。

o 橋梁下方（下部工）の状態が写真からはわからないため、橋脚や基礎に亀裂や沈下が入念に調査する必要がある。

総合すると、この写真だけでも

·伸縮装置付近の部材破片・コンクリート欠損

·高欄やフェンス柱の腐食・取付部の損傷の可能性

·コンクリート剥離による危険性

などが確認できるため、専門的な点検（支持や下部工を含む詳細調査）が急務と考えられます。 特に地震後であることから、表面に見える損傷だけでなく、支持のズレや内部ひび割れの有無も入念に評価し、必要に応じて補修・補強や高速道路などの対策が急務と判断されます。

図-6.9.4　写真-3.4.3 に対する o1 の回答の例

6.9.4　モデル品質の評価

(1)　単語の類似性

3 章で調査した調査対象者の論理的な回答の整文とけばとり文を代表回答として，AI の回答文と比較した結果を以下に示す。

図-6.9.5 に BoW コサイン類似度の計算結果，**図-6.9.6** に TF-IDF コサイン類似度の計算結果，**図-6.9.7** に Jaccard 係数の計算結果をそれぞれ示す。これらは，論理的な解答のけばとり文と比較し，単語の類似度を数値化したものである。モデルの名前が記載されている図は代表回答と ChatGPT の回答を，「調査対象者」と記載された図は，代表回答とその他の回答を比較した結果である。なお，「調査対象者」については，定期点検の点検・診断経験を有する 12 名の回答を用いているが，震後点検については未経験である調査対象者が多いため，全体の平均値と震後点検の経験者のみの平均値で分類した。

図を比較すると，GPT-4，GPT-4o，o1 で 3 つの類似度指標で代表回答に対する単語の類似度に大きな差がない。BoW は単語の出現頻度に基づく表面的な類似度を示し，TF-IDF は頻出単語と希少な単語を考慮した重みづけが行われており，より重要な単語に焦点を当てた類似度が示される。Jaccard 係数は出現頻度が無視され単語の共通性が評価される。これら分析方法の特徴に基づけば，汎用なモデル（GPT-4，GPT-4o，o1）の回答は，出現した単語の頻度や共通性が代表回答と異なるといえる。ただし，ファインチューニング等で LLM が専門用語に関する知識を獲得すれば改善される可能性がある。

図-6.9.2～図-6.9.4 の文章ではそれぞれのモデルによる回答の違いがわかりやすいが，上記の通り，使用された単語との比較ではモデル差が確認されなかった。また，**写真-3.4.5** に対する調査対象者の回答は他の回答と比べ平均値が低い結果である。この傾向は 3 つの指標で共通する。標準偏差も大きいため個人差が大きいと言える。

(2)　文章の類似性

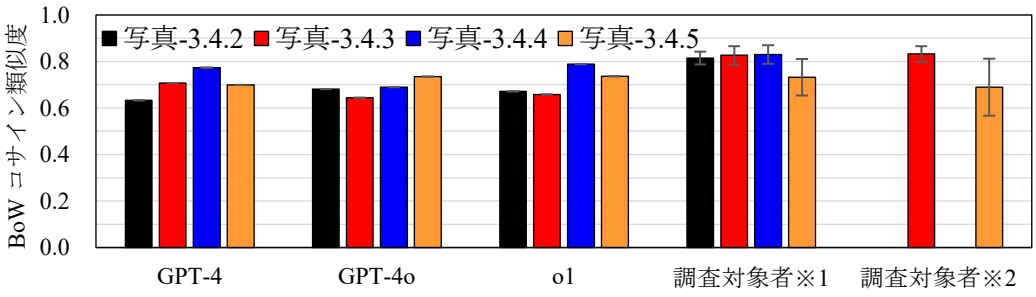
図-6.9.8 及び図-6.9.9 に代表回答と SBERT による他の調査対象者の回答の意味的類似度を示す。これら図より，調査対象者の Q4 に対する意味的類似度が低い傾向があるが，各種 LLM の回答の意味的類似度は比較的良好であることがわかる。

また，特にけばとり文（図-6.9.9）で顕著であるが，モデルの進化に伴い徐々に類似度が高くなり，類似度のばらつきが小さくなる傾向がある。

(3)　構文の類似性

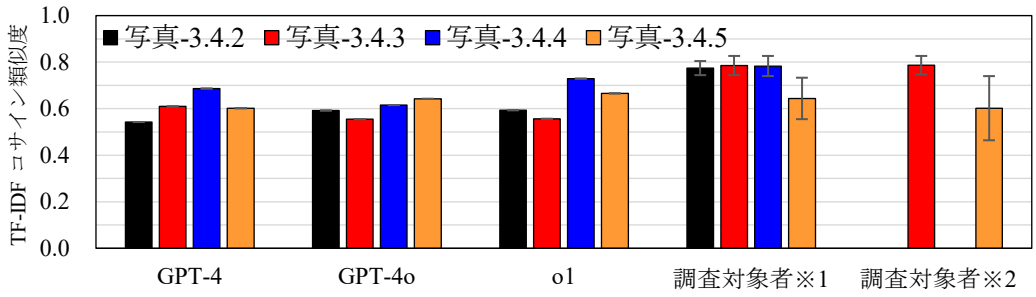
図-6.9.10 及び図-6.9.11 に代表回答と依存構造木による他の調査対象者の回答の構文類似度を示す。これら図より，調査対象者であっても類似度がおおよそ 0.4 程度であり，低い傾向があるが，各種 LLM の回答の構文類似度も 0.3～0.4 の範囲にあり，数値としては大差がない。また，Q2 で顕著に，

類似度が低い傾向がある。なお，構文類似度については，モデルの進化に伴い徐々に類似度が高くなる傾向は認められない。



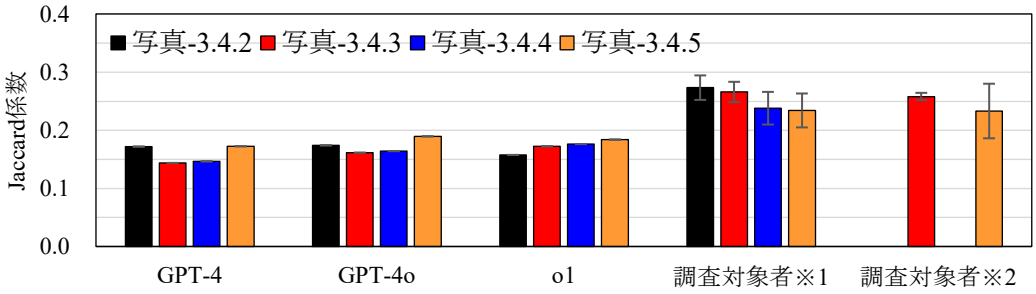
※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の BoW+コサイン類似度の平均と標準偏差である．
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の BoW+コサイン類似度の平均と標準偏差である．

図-6.9.5　BoW コサイン類似度の計算結果



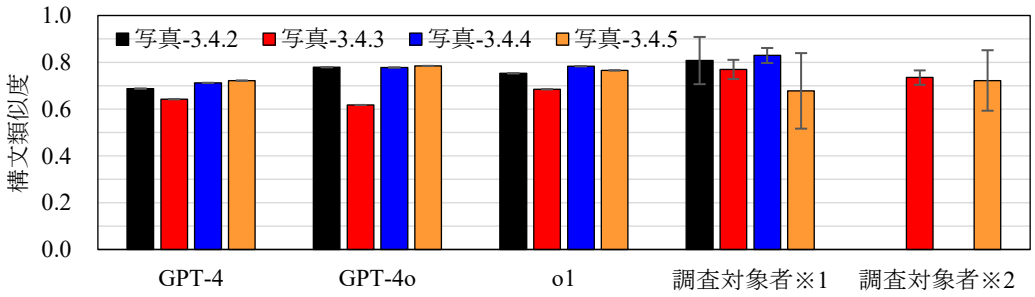
※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の TF-IDF+コサイン類似度の平均と標準偏差である．
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の TF-IDF+コサイン類似度の平均と標準偏差である．

図-6.9.6　TF-IDF コサイン類似度の計算結果



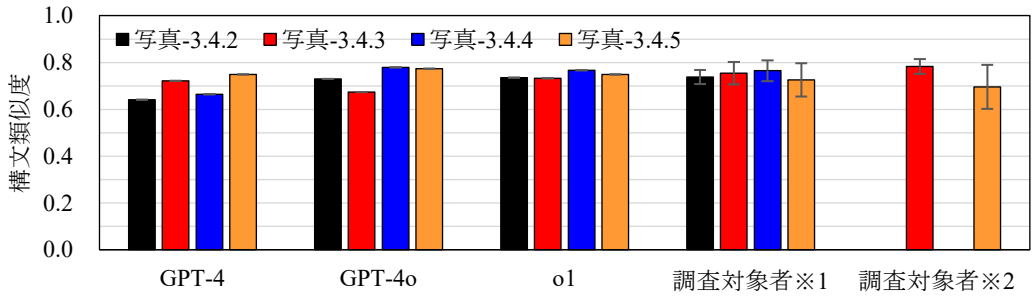
※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の Jaccard 係数の平均と標準偏差である．
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の Jaccard 係数の平均と標準偏差である．

図-6.9.7　Jaccard 係数の計算結果



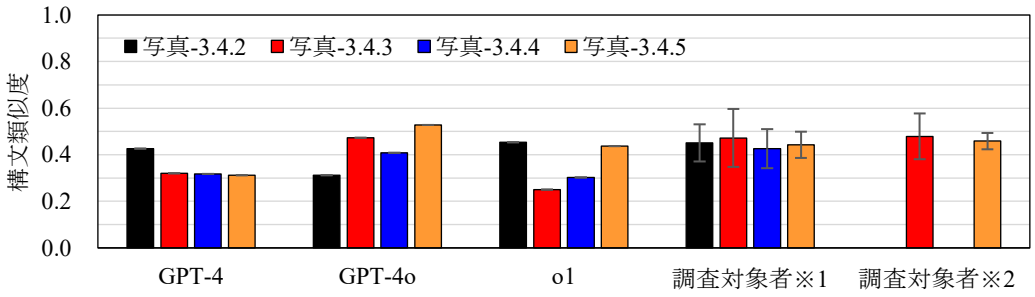
※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の SBERT による意味的類似度の平均と標準偏差である.
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の意味的類似度の平均と標準偏差である.

図-6.9.8　SBERT による意味的類似度（整文）



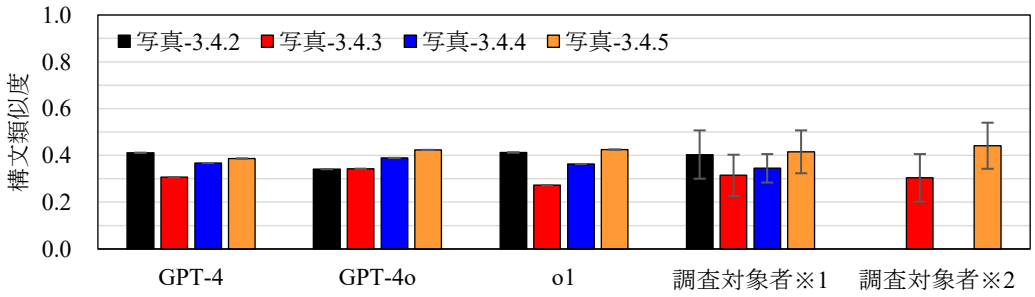
※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の SBERT による意味的類似度の平均と標準偏差である.
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の意味的類似度の平均と標準偏差である.

図-6.9.9　SBERT による意味的類似度（けばとり文）



※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の依存構造木による構文類似度の平均と標準偏差である.
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の構文類似度の平均と標準偏差である.

図-6.9.10　依存構造木による構文類似度（整文）



※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の依存構造木による構文類似度の平均と標準偏差である.
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答の構文類似度の平均と標準偏差である.

図-6.9.11　依存構造木による構文類似度（けばとり文）

6.9.5　モデル+プロンプト品質に関する調査

本節では，特に以下の 4 つの課題に対して追加の検証を行い，専門領域における生成 AI 活用の可能性と課題をモデルの思考に内在する不確実性の観点から考察する。なお，以下に挙げる 4 つの課題は今回想定したものであり，全てを提示できた訳ではない。これら 4 つの課題の検証で十分ではないが，少なくともそれらを題材に評価方法を模索することで，標準的な評価方法の提示に向けた一定の視座が得られると考える。そのため，今後も引き続き，要件提示とその検証を繰り返すことで検証項目を増やす取り組みが重要であると考える。このプロセスを繰り返すことで，誰もが納得して生成 AI を利用できる状況にいずれ至ると考える。

なお，プロンプトに依存して LLM の振る舞いが大きく変化するため，「モデル及びプロンプトに依存する所見文の品質の定性・主観評価」の項目を今後，拡充することが本評価手法の課題である。

(1)　4 つの課題とその検証方法

今回設定した課題は以下の 4 つである。以下で検討した，4 つの課題に対する質問を**表-6.9.1** に示す。今回は非構造化質問の構造化の程度を高め，情報を追加することで検証する方法を検討する。今回は方法の検討であるが,その際に検討する以下の項目の網羅性や妥当性は今後の課題である。なお,用いた写真は**写真-3.4.3** である。以下の検討では，この写真を代表的に扱う。

a)　プロンプト依存性

LLM に対しては，プロンプトの与え方によって回答が変化することが知られているが，**図-6.9.2**～**図-6.9.4** の LLM の回答が非構造化質問への回答であるがゆえに,プロンプト依存性が把握できない。そこで熟練の技術者との比較を念頭に置き，LLM に仮説演繹法の内，特に仮説法に則った回答を生成させ，より熟練の技術者の回答に近づく可能性について検討した。具体的には仮説法や根拠と論拠の説明を質問文に追加し，半構造化質問とした。（**表-6.9.1** Qv1）前述の通り，1) モデル品質と，2) モデル+プロンプトによる品質の 2 段階で評価することが重要と考える。

b)　パターンマッチングと論理的思考

図-6.9.8 及び**図-6.9.9** では仮説演繹法に基づいて回答している熟練の技術者の回答との文脈の類似性を SBERT で評価し高い類似度を得たが，調査対象者及び LLM の両方に言えることであるが，構文類似度は低いこともあり，生成 AI が熟練技術者と同様の論理的思考力を取得したか否かには疑問が残る。たとえば，所謂「推論モデル」と呼ばれ市販されている生成 AI が論理的思考力を取得したのではなく，学習したパターンにマッチングする回答を生成している可能性もあるため，それを検証するために，逆問題や反事実的な質問を準備した。そうすることで，矛盾を整合的に処理し，矛盾を無視するのではなく,明確な根拠付けや論拠付けを行い,回答を再構成できるかを検証できると考えた。

手順としては，逆問題や反事実的となるように文章を追加し，半構造化質問に変更した。（**表-6.9.1** Qv2，Qv3）

c) バイアスやヒューリスティックの影響

一般に言われるように生成 AI に特有のデータバイアスや認知バイアス等の偏りが回答に混在する可能性がある。そこでそれを検証する方法の一例として，バイアス等を誘発しやすい質問の例を入力し，回答の変化を確認した。なお，バイアスやヒューリスティックには様々な種類があるため，今回の検討ではその一部を取り扱う。あくまで方法を示すことが本研究の目的である。なお，この質問も手順としては情報を追加し，半構造化質問に変更した。（**表-6.9.1** Qv4）

d) 回答の安定性・一貫性

プロンプト依存性に類似しているが，本研究で入力した**表-3.4.2** の Q1 を標準質問の言葉選び等が，回答に影響を及ぼした可能性もある。そこで，ほぼ同じ意味であるが表現を変えた質問を準備し回答の変化を確認した。この質問については半構造質問に変更しつつ，単語を同じ意味の別の単語に入れ替える等の処理を行った。なお，ここでは質問文に筆者の認識の枠組みが反映されることをできるだけ防ぐために，OpenAI 社の o1 に意味が類似した質問文を 3 つ生成させた。（**表-6.9.1** Qv5，Qv6，Qv7）

(2) 評価結果

今回は OpenAI の o1 を対象に検証を行った。得られた回答は**図-6.9.12**～**図-6.9.18** である。なお，生成された文章量が多く，本文中に全て掲載できないため，筆者の判断でポイントとなる箇所を抜粋している。なお，抜粋箇所が客観的に妥当であるかは議論の余地があるが，前述の通り，本研究の目的はあくまでも評価方法の体系化であり，評価結果を示すことではない点に留意頂きたい。

a) プロンプト依存性の検証例

まず，**図-6.9.12** のプロンプト依存性に関する検証事例であるが，LLM は質問文にある根拠と論拠の意味を理解し，回答を生成している。ただし，仮説法を指定したことで，支承部の損傷への言及が無くなり，**図-6.9.4** の回答と比較し内容が劣化した。前述の通り，**写真-3.4.3** では橋面の変状の画像という限られた情報から写真にない変状を推論することが重要であった。また，地震動の影響に関する言及も無くなった点は重要である。モデルに設定されている標準的な答え方や考え方により，より深い推論が可能となっており，熟練の技術者に近づけた仮説法に則った場合では推論が浅くなったとも捉えることができる。

また，このことから逆に，限られた検証であるものの，今回検討対象とした LLM の中心となる思考様式は仮説演繹法ではない可能性が示唆された。人間も仮説演繹法だけではなく，類推，パターン

マッチング，ヒューリスティック等の様々な思考様式を組合せているが，少なくとも今回検討対象とした市販の LLM の思考様式は仮説演繹法のみでは説明できない。

b) パターンマッチングと論理的思考に関する検証例

次に，熟練技術者と同様の論理的思考ではなくパターンマッチングにより回答を生成している可能性を評価する。**図-6.9.13** と**図-6.9.14** に逆問題や反事実的な質問を準備し，矛盾を整合的に処理し，矛盾を無視するのではなく，明確な根拠付けや論拠付けを行って回答を再構成できるかを検証した結果を示す。

図-6.9.13 の生成文では人間であれば明らかに間違いであり，論理的に矛盾しているとわかる「コンクリート片のような物体は，実は工事の残置物」「実際の橋に損傷は見当たらない」「伸縮装置が錆びている部分は，ただの錆びではなく大きく断面欠損している可能性」というプロンプトに対して，それを疑うことなく信用し考察に含めている。その上でパターンマッチング的に，工事の残置物等の嘘の情報に基づいて，それが有するリスク等に言及している。一方，**図-6.9.14** では質問の誤情報を否定しつつも，考察に含めている。

以上から，少なくとも人間技術者が持つ論理的思考を全て獲得している訳ではなく，嘘の情報と写真からわかる事実を相互に関連させながら，結論を導く挙動が確認された。

c) バイアスやヒューリスティックの影響の検証例

図-6.9.15 にバイアスやヒューリスティックの影響を検証した例を示す。前述の通り，バイアスやヒューリスティックには様々な種類があるため，これはあくまで検証の一部であり，特に過去の経験的（反）事実を想定したプロンプト等に影響を受けるか否かを評価している。

この事例では，明らかに間違いである「地震後の調査では「大きな問題なし」という結果も報告されている」というプロンプトに対し，それを明確に否定した上で軽微な損傷では無く，追加調査が必要で，更には点検周期の見直しも提案している。**図-6.9.13** とは反応が異なる。

これらから，質問者が入力したプロンプトを信用することを基本として調整されている可能性がある一方，質問者が入力した情報に根拠がない場合は否定していることから，質問文が妥当かを LLM 内部で検証していることがこの事例からもわかる。また，今回の事例では反事実を根拠づけし補強するような確証バイアスや，経験的ヒューリスティックの類は確認されなかった。今後は他の質問項目を増やし，丁寧な検証が必要とされる。

d) 回答の安定性・一貫性の検証例

図-6.9.16～**図-6.9.18** にほぼ同じ意味であるが表現を変えた質問を準備し，回答の変化を確認した事例を示す。この 3 つの回答を比較すると，Qv6 のみが支承部の変状に言及しているが，支承の固着

を疑う根拠は無いため，パターンマッチング的に回答している可能性が疑われる。その他，高欄，伸縮装置，（地覆）コンクリートについては 3 つの回答に共通して出力されている。

このことから，画像にある情報は一貫して言語化されており，一方，画像になく高度な知識に基づく推論が必要な事項（支承部の変状）については，一貫した言語化ができていない特徴が明らかとなった。

表-6.9.1　LLM の回答の検証用の質問項目の例

Q v1.	道路橋の専門家として答えてください．**また，仮説法に基づき以下の質問に答えてください．その際に特に根拠と論拠から結論を導くことを意識してください．ここでは根拠を写真にある事実，論拠を写真には無いが知識等に基づき推測できることとします．以下が質問です．**あなたは今，点検をするために橋の現場に着きました．　この写真で気づいたことを全て述べてください．
Q v2.	道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．**ただし，写真に写っているコンクリート片のような物体は，実は工事の残置物であり，実際の橋に損傷は見当たらないという報告を事前に受けています．一方で，伸縮装置が錆びている部分は，ただの錆びではなく大きく断面欠損している可能性があります．**
Q v3.	道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．**また，写真には損傷がないように見えますが，事前情報として「前回点検時に橋面に亀裂が確認されていた」との報告があります．**
Q v4.	道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．**なお，過去 10 回の点検では 9 回が「軽微な損傷あり」と評価されており，1 回は「要補修」とされています．しかし，地震後の調査では「大きな問題なし」という結果も報告されています．これらの結果を踏まえたうえで，今回の点検結果をどのように判断しますか？**
Q v5.	道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て**箇条書きで述べてください．さらに，その理由と補修案がある場合は示してください．**
Q v6.	**橋梁調査のスペシャリスト**として回答してください．**現地での点検写真を確認し，主だった損傷や劣化部位があれば列挙し，どのように対策すべきかを論理的に説明してください．**
Q v7.	道路橋の専門家として答えてください．あなたは**点検のために現地に**到着しました．**写真から，特に構造安全性に影響を与える可能性がある箇所を優先的に指摘し，調査方法や修繕方法の選択肢を具体的に示してください．**

Q. 道路橋の専門家として答えてください．**また，仮説法に基づき以下の質問に答えてください．その際に特に根拠と論拠から結論を導くことを意識してください．ここでは根拠を写真にある事実，論拠を写真には無いが知識等に基づき推測できることとします．以下が質問です．**あなたは今，点検をするために橋の現場に着きました． この写真で気づいたことを全て述べてください．

A. 以下では，「写真に写っている事実（根拠）」と「そこから推測できること（論拠）」を分けて整理し，最終的な気づきを述べます。専門家として現場点検に臨んだ際に注目すべきポイントを網羅的に挙げる形で回答します。

1. 写真から確認できる事実（**根拠**）

1-1. コンクリート製と思われる橋梁の高欄部（または防護壁）の一部が剥落し，破片が橋面上に落ちている。（補足説明を略），1-2. 高欄に取り付けられた金属製の手すり・柵にずれや変形が見られる。（補足説明を略），1-3. 高欄上面と橋面（または縁石部分）の間に隙間や段差が生じているように見える。（補足説明を略），1-4. 写真中央付近に橋梁の伸縮装置と思われる目地が見える。（補足説明を略），1-5. 人（写っている職員らしき人物）の足元と比較すると，コンクリート片がかなり大きめのサイズである。（補足説明を略），1-6. 橋の下方に広い谷や農地のような場所が見える。（補足説明を略）

2. 写真から推測できること（**論拠**）

2-1.痕や外力の痕跡の可能性。（補足説明を略），2-2. 伸縮装置付近の劣化や水侵入によるコンクリートの劣化。（補足説明を略），2-3. 橋の設計上の動き(伸縮や揺れ)との取り合い不良。（補足説明を略），2-4. 高欄の施工不良または経年劣化による強度低下。（補足説明を略），2-5. 安全性・落下防止機能の低下。（補足説明を略）

3. 上記を踏まえた主な「気づき」のまとめ

3-1. 高欄コンクリートの大規模な剥落が確認されるため，非常に危険な状態。（補足説明を略），3-2. 手すり・防護柵の構造的安全性の低下（補足説明を略），3-3. 衝撃・外力を受けた形跡または伸縮装置近傍の劣化が主原因となっている可能性（補足説明を略），3-4. 橋全体にわたる劣化点検の必要性（補足説明を略），3-5. 早急な応急処置と恒久対策（補足説明を略）。応急処置として，高欄からの落下物防止や破損箇所への立入禁止措置を講ずる。原因究明を行いつつ，可能であれば高欄の部分補修または取替えを含む恒久対策の検討が必要。

4. 結論

写真からは，高欄（防護壁）の**コンクリート剥落および手すり部の損傷という重大な変状が生じており，通行の安全を脅かしかねない状態にあると推察**される。原因としては，車両衝突や施工不良，経年劣化や伸縮装置付近への水・塩分侵入等が考えられる。いずれにしても，安全確保と原因調査のための緊急点検と応急措置が必要である。以上が，写真をもとに「現場点検に来た橋梁技術者が気づくであろう点」を根拠（写真で確認できる事実）と論拠（知識や類似事例からの推測）に基づき整理した内容です。

図-6.9.12　Qv1 に対する o1 の回答の抜粋（写真-3.4.3 の例）

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．**ただし，写真に写っているコンクリート片のような物体は，実は工事の残置物であり，実際の橋に損傷は見当たらないという報告を事前に受けています．一方で，伸縮装置が錆びている部分は，ただの錆びではなく大きく断面欠損している可能性があります．**

A. 写真から読み取れる事項として、まず大前提としてコンクリート片のように見えるものは実際には工事の残置物であり、橋本体に由来する損傷ではないという事前情報を踏まえます。その上で、以下の点に着目できます。

1. 路面上の“コンクリート片”

写真に写っている破片は橋のコンクリート部材が剥落したものではなく、工事の残置物と報告を受けている。したがって本来の橋梁損傷とは関係ないものの、路面に落ちている事実自体は安全面で好ましくなく、交通上の障害や二次被害のリスクになりうる。

点検時には、橋梁由来かどうかを最終確認するとともに、不要物として撤去される必要がある。

2. 伸縮装置（ジョイント）の腐食

写真中央付近の伸縮装置が明らかに錆びている様子が確認できる。**事前情報では「ただの錆びではなく大きく断面欠損している可能性がある」とのことなので、伸縮装置の金属部材が局部的に腐食進行している可能性を考慮する必要がある。**

腐食が進行すると、ジョイントの機能(伸縮性能や荷重伝達、車両に対する段差の抑制等)に悪影響が出る。大きな断面欠損がある場合は緊急補修や部材交換の要否について検討が必要。（以下略）

図-6.9.13　Qv2 に対する o1 の回答の抜粋（写真-3.4.3 の例）

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．**また，写真には損傷がないように見えますが，事前情報として「前回点検時に橋面に亀裂が確認されていた」との報告があります．**

A. 専門家として写真を拝見したうえで，以下の点に気づきましたので列挙します。（中略）

3. 路面上の破片・舗装面の状態

路上にあるコンクリート片と思われる破片が，どの部分から落ちてきたかを特定することが重要です。端部のコンクリートからの落下であれば，周辺部にクラックや浮きが存在するかもしれません。

舗装表面そのものには目立った亀裂やわだち掘れは見当たりませんが，過去点検で「橋面に亀裂が確認されていた」とのことですので，舗装下（床版上面）の状態も含めて慎重に再確認する必要があります。（以下略）

図-6.9.14　Qv3 に対する o1 の回答の抜粋（写真-3.4.3 の例）

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て述べてください．**なお，過去 10 回の点検では 9 回が「軽微な損傷あり」と評価されており，1 回は「要補修」とされています．しかし，地震後の調査では「大きな問題なし」という結果も報告されています．これらの結果を踏まえたうえで，今回の点検結果をどのように判断しますか？**

A. 写真から読み取れる主な点として、以下のような状況が推察できます（専門家の目線で気づく事項を列挙します）。

1. 欄干（高欄）・防護柵付近の損傷（補足説明を略），2. コンクリートの欠損・剥落（補足説明を略），3. 伸縮装置（ジョイント）付近の不具合の可能性（補足説明を略），4. 手摺（あるいは防護柵）とコンクリート部の付着不良・腐食・位置ズレ（補足説明を略），5. 支承部（ピン・ローラー）の点検が必要（補足説明を略）

過去の点検結果との比較および今回の総合判断

・過去 10 回の点検で 9 回が「軽微な損傷あり」、1 回が「要補修」

過去においても小規模な損傷や劣化が継続的に報告されており、一度は「要補修」の評価が下されていることから、欄干や伸縮装置付近など繰り返し負荷のかかる部分に何らかの恒常的な不具合が続いていた可能性があります。

・地震後の特例調査では「大きな問題なし」

これは主桁や橋脚など橋梁の主要構造部に地震による致命的な損傷がなかったことを示唆します。**しかし、欄干や伸縮装置周りなど付帯構造物については調査範囲や評価レベルによって見落としや評価の分かれが生じることもあります。**

今回の写真を見る限り、局部的ではあるもののコンクリートの欠損や剥落が「軽微」とは言い難い程度に進行しているようにも見えます。（中略）

今回の点検結果としての判断（中略）万一大きなコンクリート片が剥落した場合、走行車両や下方に人がいる場合には重大事故につながるおそれ（中略）**念のため支承部や桁端部の変形・ひび割れ・腐食状況を詳細に点検し、必要に応じて追加調査（非破壊検査等）を行うべき。**（中略）過去に「軽微な損傷」が継続して報告されてきた上で、今回明確な欠損が認められるのであれば、**今後の点検周期（通常は 5 年など）を短縮化する、もしくは重点的な定期観測を実施することも検討されるべき。**（以下略）

図-6.9.15　Qv4 に対する o1 の回答の抜粋（**写真-3.4.3** の例）

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは今，点検を行うために橋の現場に着きました．この写真で気づいたことを全て**箇条書きで述べてください．さらに，その理由と補修案がある場合は示してください．**

A. （前略）＜まとめ＞

写真からは、高欄コンクリート・手摺が大きく損傷しており、安全性・耐久性の観点で早急な補修が必要と判断されます。まずは破損範囲や鉄筋の健全度を詳細に調べ、適切な断面修復とフェンス復旧を実施することが最優先です。加えて、損傷原因に応じた再発防止策（衝突防止・排水改良・伸縮装置点検）を総合的に検討し、橋全体の長期耐久性と安全性を確保することが望まれます。

図-6.9.16　Qv5 に対する o1 の回答の抜粋（**写真-3.4.3** の例）

Q. **橋梁調査のスペシャリスト**として回答してください．**現地での点検写真を確認し，主だった損傷や劣化部位があれば列挙し，どのように対策すべきかを論理的に説明してください．**

A. （前略）まとめ

・主たる損傷・劣化

高欄基部コンクリートの剥落・破損，伸縮装置周辺のコンクリート損傷，手すりやガードレール支柱のずれ・定着不良，**支承部の固着や変形の可能性（要点検）**

・対策の方向性

断面補修（コンクリートの不良部分除去・再生），支柱固定・交換（高欄やガードレールの安全性確保），伸縮装置の点検・補修（必要に応じて交換），支承の作動確認と必要な補修，排水機能の回復・予防保全（表面保護や塗装）

上記を総合的に実施することで、第三者被害を防ぎつつ、橋梁の安全性と耐久性を向上させることが可能です。特に高欄の剥落と伸縮装置周辺の損傷は事故につながりやすいため、早急に点検・補修を実施し、定期的な維持管理計画に盛り込むことが望ましいと考えられます。

図-6.9.17　Qv6 に対する o1 の回答の抜粋（**写真-3.4.3** の例）

Q. 道路橋の専門家として答えてください．あなたは**点検のために現地に**到着しました．**写真から，特に構造安全性に影響を与える可能性がある箇所を優先的に指摘し，調査方法や修繕方法の選択肢を具体的に示してください．**

A. （前略）5. まとめ

写真からは，「欄干基部コンクリートの剥落」「伸縮装置近傍の破損」「欄干・防護柵の固定不良」の可能性が強く示唆されます。これらは，通行車両・歩行者の保護機能の低下や，橋梁の変位不良による主桁への影響を及ぼす重大なリスクをはらんでいます。よって，早急な仮設対策・詳細点検ののち，欄干・伸縮装置の補修や支承の可動確認など，段階的な修繕・補強工事を計画することが望ましいと考えます。

図-6.9.18　Qv7 に対する o1 の回答の抜粋（**写真-3.4.3** の例）

6. 9. 6　LLM as a Judge による裏付け

本章では，図−6. 9. 1 の「LLM as a Judge を併用することで，モデル品質の定量・客観評価を裏付け，プロンプトに依存する所見文の品質の定性・客観評価を加える」ことを目指す。LLM as a Judge[6.9.24)]（以下，LaaJ と呼ぶ。）とは，LLM を人間評価者の代わり又は補助として用い，所見文等の品質を定義済みの評価基準に照らして採点させる評価手法である。従来の機械的な指標（BoW, SBERT 等）に対し，LaaJ は自然言語により評価基準を提示できる柔軟性があり，複合的な観点（語彙・意味・構文等）の同時評価が可能という利点を有する。一方，LLM モデルの好みやバイアスに依存した評価，プロンプトによる評価の変化等の課題がある。

この課題から，LLM による評価の妥当性を裏付ける必要があるが，少なくとも BoW や SBERT 等の機械的な指標よりも人間に近い評価が下せるということで注目されている。そのため，BoW や SBERT と対応させるというよりも，これら機械的指標の評価を裏付ける，別の評価方法として LaaJ を用いる方針とする。

(1)　モデル品質の定量・客観評価の裏付け

a) 評価方法

モデル品質を BoW，IF-IDF，Jaccard 係数，SBERT，依存構造木で定量的に評価したが，これら観点を定量的かつ客観的な評価で裏付けるために，図−6. 9. 19 の構造化プロンプトを用いて，LaaJ を実施した。

代表回答とその他の回答の語彙類似度・意味類似度・構文類似度を 0〜10 のスコアに基づき評価した。評価対象の回答の組（けばとり文，整文）の入力と，出力を JSON 形式で厳格化し，思考過程の出力を禁止し，統制した。評価者には Google 社の Gemini 2.5 Flash，Anthropic 社の Claude Sonner 4，xAI 社の Grok 3 の 3 つの LLM を用いた。多様なモデルを評価者に用い，また，OpenAI 社のモデルを除くことで，特定のバイアス等に評価結果が依存する可能性をできるだけ排除した。評価した日は 2025 年 7 月 25 日である。これら LLM には長期記憶を持たない設定としたうえで，質問毎にチャットを切り替え，また，BoW や SBERT スコアを見せずに評価を実施した。

なお，図−6. 9. 19 の構造化プロンプトは，評価結果の妥当性を考慮し，試行錯誤的に作成している。なぜならば，LLM は入力するプロンプトによりその回答が大きく変化するためである。作成した構造化プロンプトを入力し，評価を得て，その評価結果の妥当性を，評価者間の評価の一致度の観点で Krippendorff's α[6.9.28)]，評価スコアを連続量として扱う前提のもと，評価結果の再現性の観点を Intraclass Correlation Coefficient（ICC）[6.9.29)]で評価した。以下，単独の評価者を用いた場合の再現性を ICC(2,1)，複数の評価者を用いた場合を ICC(2,k)と表記する。

図−6. 9. 20〜図−6. 9. 22 に最終的なスコアの頻度分布を示す。これらは調査対象者の回答に対するスコアのみを示しており，左側の軸がけばとり文のスコア，右側の反転した軸が整文のスコアである。評価者としての Gemini は低めのスコアを付け，Claude は中〜高のスコアを付け，Grok は平均的で幅

広いスコアを付ける傾向があった。また，試行錯誤の段階では，構造化プロンプト（図-6. 9. 19）を短くするとClaudeのスコアが乱れ，指示文を詳細に長文化するとClaudeのスコアが安定し，Grokのスコアが乱れる傾向が確認された。Geminiは一貫して低いスコアで評価し続けた。これらは人間の評価者でも見られるものである。

表-6. 9. 2に評価者としてのLLMの妥当性評価結果を示す。この結果には，調査対象者とLLMの両方の回答に対する評価が含まれる。語彙・意味・構文の全ての観点で，けばとり文の方が評価者間の一致度も，スコアの再現性でも評価が良い。けばとり文のKrippendorff's αでは，0.2～0.4のやや低い，0.4～0.6の中程度の一致が多く，特にQ2とQ3で評価者間の評価が中程度一致する傾向があり，Q4の評価は割れた。

また，ICCは0.5以下が低く，0.5～0.75が中程度，0.75～0.9が良好とされるが，特に構文に対する評価者間の評価の再現性が良好である。語彙や意味の類似度に対する評価の再現性は，構文類似度よりも劣るがICC(2,k)はおおよそ0.5以上である。また，ICCでもQ4の評価が低い傾向があった。

以上のLLMの評価者としての評価に基づき，けばとり文のスコアについて以下で考察を行う。

b) 評価結果

図-6. 9. 23～図-6. 9. 25にLaaJによる評価結果を示す．語彙類似度（図-6. 9. 23）は，BoW，IF-IDF，Jaccard係数の結果と整合しており，調査対象者と比べてLLMのスコアが低い傾向がある。意味類似度（図-6. 9. 24）はSBERTと評価が異なり，質問間で評価が割れた。質問によっては意味類似度が高い回答がある。構文類似度（図-6. 9. 25）は調査対象者と比べてLLMのスコアが低い傾向がある。図-6. 9. 10を確認すると整文の構文類似度スコアが良く，図-6. 9. 25はけばとり文のみの結果であることを考慮すると，おおよそ妥当と言える。

(2) モデル+プロンプトによる品質の定性・客観評価

モデル+プロンプトによる品質の定性的かつ客観評価では，Gemini 2.5 Flash，Claude Sonnet 4，Grok 3の3つのLLMに図-6. 9. 26の構造化プロンプトを入力し，図-6. 9. 27の回答を得た。内容はおおよそ妥当であり，評価できている。

ここまでの一連の検討により，図-6. 9. 1で体系化した評価方法が再現できるものであることを示した。

今回の検討では，市販されており，かつ，現時点で代表的なOpenAI社のLLMを題材に，論理的推論が重要となる道路橋の措置方針に関する技術的判断への適用性を評価する方法を検討した。

LLMの進化の速度に対して，評価技術や評価方法等の進化や整備が追い付いていないが，今後は本研究で示した多角的な検証方法を更に深化させることで，生成AIを安心・安全に社会に組み込むような仕組みを構築していきたいと考える。

あなたは公正な評価者（LLM as a Judge）です.
以下の 2 文を，3 指標（lexical / semantic / syntactic）で 0〜10（整数）採点してください.

評価指標
lexical_similarity（語彙類似度）
単語の重なりや語彙表現の近さ.
semantic_similarity（意味類似度）
2 文が伝える意味・事実関係・含意の一致度.
syntactic_similarity（構文類似度）
係り受け・語順・品詞構成・句/節構造の近さ.

厳守ルール
・ 以下のスコアの定義に照らし，与えられた 2 文だけを根拠に採点してください.
・ 0〜10 の全域を使用してください．理由なくスコアを偏らさないでください.
・ 出力は指定の JSON のみ．思考過程は出力しないでください.

スコア定義（全指標共通の目安）
0: 完全に異なる
2: 一部だけ共通
5: 半分程度一致
8: ほぼ一致（細部が異なる）
10: ほぼ同一（言い換え・語順入替レベル）

【入力】
```
{
  "sentence_a": "",
  "sentence_b": ""
}
```

【出力（JSON のみ）】
```
{
  "lexical_similarity": 0,
  "semantic_similarity": 0,
  "syntactic_similarity": 0
}
```

図-6.9.19 入力した構造化プロンプト（語彙・意味・構文）

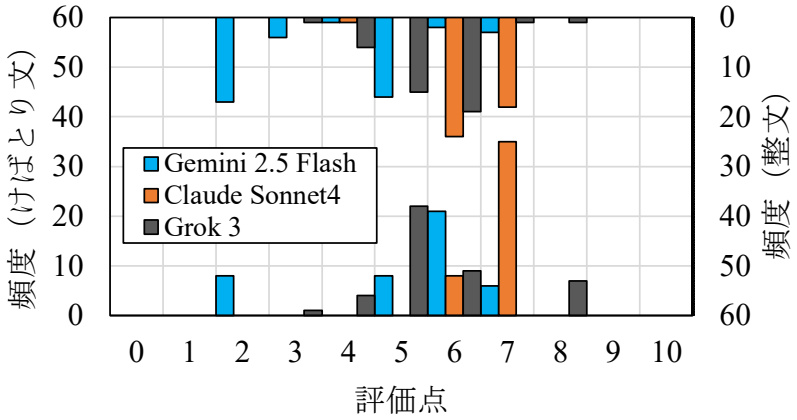


図-6.9.20　語彙類似度に関する最終的なスコアの頻度分布

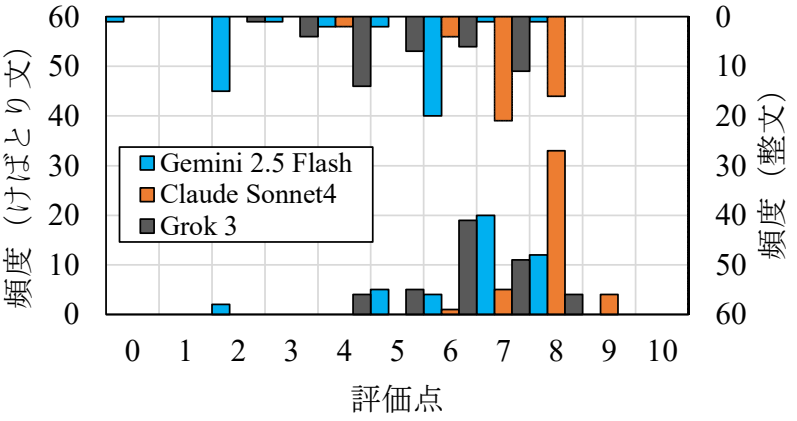


図-6.9.21　意味類似度に関する最終的なスコアの頻度分布

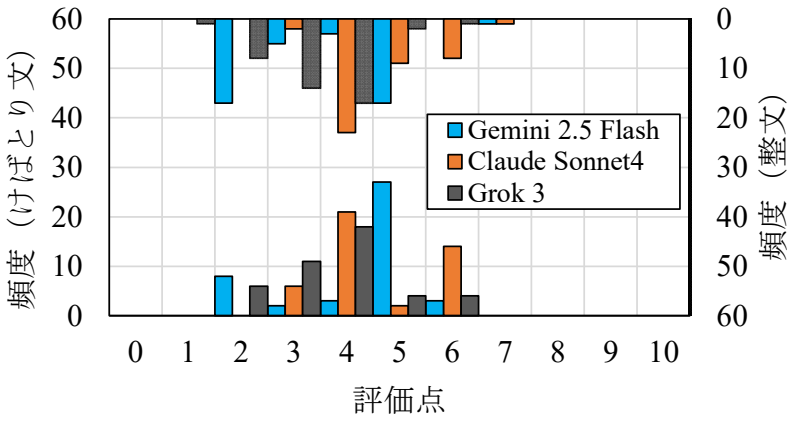
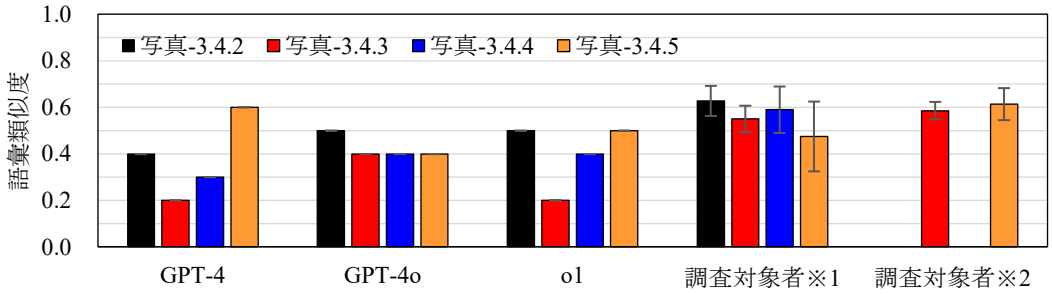


図-6.9.22　構文類似度に関する最終的なスコアの頻度分布

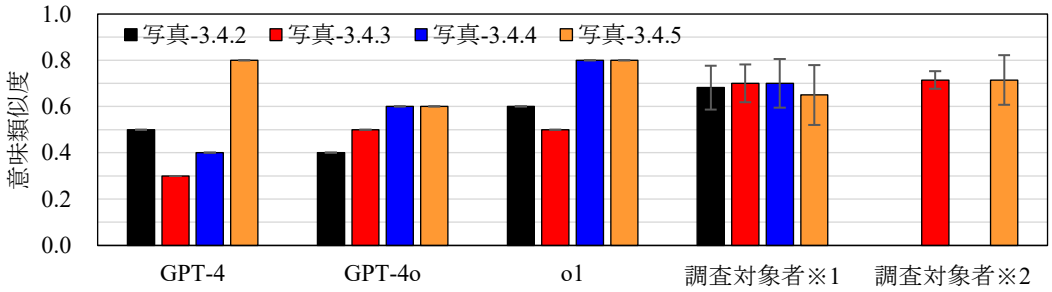
表-6.9.2　評価者としての LLM の妥当性評価結果

		けばとり文					整文				
		全て	Q1	Q2	Q3	Q4	全て	Q1	Q2	Q3	Q4
Krippendorff's α	語彙	0.24	0.14	0.44	0.41	0.04	0.06	0.02	0.21	0.05	-0.04
	意味	0.21	0.16	0.17	0.40	0.12	0.02	-0.02	0.06	-0.17	-0.01
	構文	0.51	0.60	0.55	0.51	0.27	0.39	0.33	0.53	0.40	0.03
ICC(2,1)	語彙	0.32	0.26	0.51	0.47	0.14	0.23	0.23	0.33	0.23	0.13
	意味	0.29	0.25	0.29	0.45	0.21	0.18	0.17	0.22	0.02	0.14
	構文	0.52	0.61	0.59	0.53	0.29	0.44	0.41	0.56	0.45	0.08
ICC(2,k)	語彙	0.58	0.51	0.76	0.73	0.34	0.47	0.48	0.60	0.47	0.32
	意味	0.55	0.50	0.55	0.71	0.44	0.40	0.39	0.46	0.07	0.33
	構文	0.77	0.82	0.81	0.77	0.55	0.70	0.67	0.79	0.71	0.21



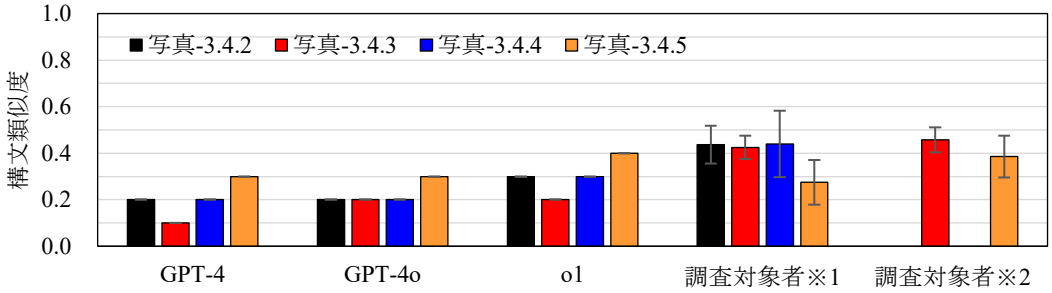
※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の BoW+コサイン類似度の平均と標準偏差である．
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答のスコアの中央値の平均と標準偏差である．

図-6.9.23　LaaJ による語彙類似度の評価結果



※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の TF-IDF+コサイン類似度の平均と標準偏差である．
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答のスコアの中央値の平均と標準偏差である．

図-6.9.24　LaaJ による意味類似度の評価結果



※1　全ての調査対象者の回答と代表回答の Jaccard 係数の平均と標準偏差である．
※2　震後点検経験者の回答のみを抽出し，その回答と代表回答のスコアの中央値の平均と標準偏差である．

図-6.9.25　LaaJ による構文類似度の評価結果

あなたは公正な評価者（LLM as a Judge）です．以下の 7 つの回答文に対して，以下の観点で日本語 100 文字程度の評価文を生成してください．
これらは道路橋の損傷画像と共に質問を行ったものです．

Qv1.：プロンプト依存性により回答の品質が変化する観点．
評価では，非構造化質問を入力した場合（Qv0-A）と仮説演繹的な思考を促すプロンプトを入力した場合（Qv1-A）の回答の違いについて，見解を述べてください．Qv0 とは，非構造化質問です．
Qv2.Qv3.：LLM の思考回路に関する観点．
LLM が単なるパターンマッチングにより回答しているのか，論理的思考を経て回答しているのかが明らかではありません．評価では，嘘の情報を含む逆問題や反事実的な質問（Qv2，Qv3）を入力した場合の回答（Qv2-A，Qv3-A）について，上記観点で見解を述べてください．論理的に考えているのであれば，画像にはない嘘（工事の残置物，前回点検時に橋面に亀裂）を見抜けるはずです．
Qv4.：バイアスやヒューリスティックの観点．
LLM に特有のデータバイアスや認知バイアス等の偏りが回答に混在する可能性があり，それを検証するためにバイアス等を誘発しやすい質問（Qv4）の例を入力しました．評価では，回答（Qv4-A）に何らかのバイアスが認められるか，見解を述べてください．バイアス等が認められない場合は，その理由を述べてください．
Qv5. Qv6. Qv7.：回答の安定性・一貫性の観点．
ほぼ同じ内容の質問（Qv5，Qv6，Qv7）に対する回答（Qv5-A，Qv6-A，Qv7-A）の安定性・一貫性の観点で評価を行い，見解を述べてください．

厳守ルール
- 見解は日本語で 100 文字程度としてください．
- 出力は指定の JSON のみ．思考過程は出力しないでください．

【入力 1：質問文】
{ "Qv0": "", "Qv1": "", ….}
【入力 2：回答文】
{ "Qv0": "", "Qv1": "", ….}
【出力（JSON のみ）】
{ "プロンプト依存性により回答の品質が変化する観点": "",
" LLM の思考回路に関する観点": "",
"バイアスやヒューリスティックの観点": "",
"回答の安定性・一貫性の観点": "",}

図-6.9.26 入力した構造化プロンプト（回答文の定性的評価）

"プロンプト依存性により回答の品質が変化する観点": "Qv0-A は網羅的だが冗長で、Qv1-A は仮説演繹を促すプロンプトにより、根拠と論拠に基づき論理的に損傷を特定し、補修案まで提示しており、プロンプトの有効性を示唆しています。",
" LLM の思考回路に関する観点": "Qv2-A と Qv3-A は、嘘の情報に対して一部引きずられつつも、伸縮装置の錆や過去の亀裂など、真実の情報を見抜いて言及しており、単なるパターンマッチング以上の論理的思考が垣間見えます。",
"バイアスやヒューリスティックの観点": "Qv4-A は過去の点検結果というバイアス情報に影響されつつも、写真の現状から「軽微とは言えない」と指摘し、追加調査や点検周期の見直しを提言しており、バイアスを乗り越えようとする姿勢が見られます。",
"回答の安定性・一貫性の観点": "Qv5-A、Qv6-A、Qv7-A はほぼ同じ内容の質問に対し、いずれも高欄や伸縮装置の損傷を主要な点として挙げ、補修の必要性を指摘しており、回答の一貫性が高いと言えます。"

(a) Gemini 2.5 Flash

"プロンプト依存性により回答の品質が変化する観点": "Qv1 の仮説演繹的プロンプトにより、Qv0 と比較して回答が根拠と論拠を明確に分離し、より論理的で構造化された分析が可能となった。専門用語の使用頻度も増加し、技術的精度が向上している。",
"LLM の思考回路に関する観点": "Qv2 では工事残置物の虚偽情報を適切に受け入れ分析しているが、Qv3 では存在しない橋面亀裂を前提とした推測を展開している。パターンマッチングと論理的思考の境界が曖昧で、与えられた情報への批判的検証が不十分。",
"バイアスやヒューリスティックの観点": "Qv4 では過去の点検履歴「9 回軽微、1 回要補修」という情報に引きずられ、現状の損傷を過去の傾向と関連付けて解釈する代表性ヒューリスティックが認められる。客観的な現状分析よりも過去データに依存した判断傾向がある。",
"回答の安定性・一貫性の観点": "Qv5、Qv6、Qv7 の回答は高欄損傷と伸縮装置問題を共通して指摘しており、核心的な技術判断は一貫している。ただし表現や構成、具体的な補修提案の詳細度に差があり、完全な安定性は保たれていない。"

(b) Claude Sonnet 4

"プロンプト依存性により回答の品質が変化する観点": "Qv0-A は観察に基づく記述が主で詳細だが、Qv1-A は仮説演繹的アプローチにより根拠と論拠を明確に分け、構造化された論理的回答を提示。プロンプトの明示的な指示が回答の論理性を高め、結論の導出がより体系的になった。",
"LLM の思考回路に関する観点": "Qv2-A は工事残置物の嘘情報を見抜き、伸縮装置の断面欠損を論理的に検討。Qv3-A は事前情報の亀裂を考慮しつつ、写真にない損傷を慎重に扱う。両者ともパターンマッチングを超え、論理的推論に基づく回答を示している。",
"バイアスやヒューリスティックの観点": "Qv4-A は過去点検結果や地震後調査に影響されず、写真の損傷を客観的に評価。軽微な損傷の繰り返しや地震後の報告に過度に依存せず、現在の観察を優先しバイアスは認められない。論理的判断が維持されている。",
"回答の安定性・一貫性の観点": "Qv5-A, Qv6-A, Qv7-A は高欄の剥落、伸縮装置の損傷、補修の必要性を一貫して指摘。記述の詳細度や表現は異なるが、構造安全性への影響と補修案の方向性は安定しており、質問の差異に応じた一貫性が保たれている。"

(c) Grok 3

図-6.9.27 LaaJ による評価結果

参考文献

6.9.1) 小林巧，森伸一郎，羽鳥剛史，中畑和之，大住道生，大黒屋信英：道路橋点検の技術的判断への生成 AI の活用に向けた評価方法に関する研究，土木学会論文集，No. ●，2025.（査読中）

6.9.2) Asan, O., Bayrak, A. E., Choudhury, A.: Artifical Intelligence and Human Trust in Healthcare: Focus on Clinicians, *JOURNAL OF MEDICAL INTERNET RESEARCH*, vol. 22, 2020.

6.9.3) Asan, O. and Unver, M. B.: Role of Trust in AI-Driven Healthcare System: Discussion from the Perspective of Patient Safety, *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care*, 2022.

6.9.4) Jermutus, E., Kneale, D., Thomas, J. and Michie, S.: Influences on User Trust in Healthcare Artificial Intelligence: A Systematic Review, *Wellcome Open Research*, 2022.

6.9.5) 国立研究開発法人産業技術総合研究所：生成 AI 品質マネジメントガイドライン，第一版，2025.

6.9.6) ISO/IEC 25010:2011: Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evalu-ation (SQuaRE) — System and software quality models, ISO, 2011.

6.9.7) ISO/IEC 25019:2023: Systems and software engineering — SQuaRE — Guidance for specifying quality-in-use re-quirements, ISO, 2023.

6.9.8) 緒方陸，大久保順一，藤井純一郎，天方匡純：土木分野における LLM を用いた言語モデル評価手法の提案，言語処理学会，第 30 回年次大会，発表論文集，2024.

6.9.9) 緒方陸，大久保順一，藤井純一郎，天方匡純：土木分野における LLM を用いた言語モデル評価手法の提案，言語処理学会，第 30 回年次大会，発表論文集，2024.

6.9.10) Mantas, M., Long, P., Xuwang, Y., Andy, Z., Norman, M., Elham, S., Nathaniel, L., Steven, B., Bo, L., David, F. and Dan, H.: HarmBench: A Standardized Evaluation Framework for Automated Red Teaming and Robust Refusal, *CoRR,* arXiv:2402.04249, 2024.

6.9.11) Hendrycks, D., Burns, C., Basart, S. Zou, A., Mazeika, M., Song, D. and Steinhardt, J.: Measuring Massive Multitask Language Understanding, arXiv:2009.03300, 2020.

6.9.12) Srivastava, A., et al.: Beyond the Imitation Game: Quanti-fying and extrapolating the capabilities of language models, arXiv:2206.04615, 2022.

6.9.13) Jin, Q., Dhingra, B., Liu, Z., Cohen, W.-W., Lu, X.: Pub-MedQA: A Dataset for Biomedical Research Question Answering. arXiv:1909.06146, 2019.

6.9.14) Salton, G., Wong, A. and Yang, C. S.: AVector Space Model for Automatic Indexing, Communications of the ACM, Vol.18, No. 11, 1975.

6.9.15) Dongyang, Y., Keping, L., Shuang, G. and Liu, Y.: Network-Based Bag-of-Words Model for Text Classification, *IEEE Access*, 2020.

6.9.16) Manning, C. D., Raghavan, P. and Schütze, H.: Introduction to Information Retrieval, 2008.

6.9.17) Atharva, M. and Aditya, C.: Enhancing Plagiarism Detection in Marathi with a Weghted Ensemble of TF-IDF and BERT Embeddings for Low-Resource Language Processing, *CoRR*, arViv:2501.05260, 2025.

6.9.18) Jaccard, P.: Etude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et du Jura, Bulletin de la Soci' et' e Vaudoise des Sciences Naturelles, 1901.

6.9.19) Abhaya, K, P., Hrushikesha, M. and Rajendra, P, L. : EDT BERT: Event Detection and Tracking in Twitter using Graph Clustering and Pre-trained Language Model, *5th International Conference on Innovative Data Communication Technologies and Application (ICIDCA 2024)*, 2024.

6.9.20) Reimers, N. and Gurevych, I.: Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks, *Proceeding of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*, 2019.

6.9.21) Pia, B., Noir, N., Theodor, S. and Peter, K: Deep Learning in Natural Language Processing for Analysis of Document Similarity, *TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH*, 2021.

6.9.22) Kübler, S., McDonald, R. and Nivre, J: Dependency Pars-ing, *Morgan & Claypool,* 2009.

6.9.23) Kong, L., Schneider, N., Swayamdipta, S., Bhatia, A., Dy-er, C. and Smith, N. A.: A Dependency Parser for Tweets, *EMNLP* 2014, 2014.

6.9.24) Zheng, L., Chiang, W.-L., Sheng, Y., Zhuang, S., Wu, Z., Zhuang, Y., Lin, Z., Li, Z., Li, D., Xing, E.-P., Zhang, H., Gonzalez, J.-E. and Stoica, I: Judging LLM-as-a-Judge with MT-Bench and Chatbot Arena. arXiv:2306.05685, 2023.

6.9.25) ウヴェ・フリック（著），小田博志（監訳）：新版 質的研究入門，<人間の科学>のための方法論，春秋社，2011.

6.9.26) Megagon Labs. :GiNZA: A Japanese NLP Library using spaCy, GitHub. https://github.com/megagonlabs/ginza

6.9.27) Zhang, K. and Shasha, D.: Simple Fast Algorithms for the Editing Distance Between Trees and Related Problems, SIAM J. Computing, 18(6), pp.1245–1262, 1989.

6.9.28) Hayes, A.-F. and Krippendorff, K.: Answering the Call for a Standard Reliability Measure for Coding Data, Commu-nication Methods and Measures, 2007.

6.9.29) Shrout, P. E. and Fleiss, J. L.: Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *American Psychological Asso-ciation*, 1979.

6. 10　震後点検で使用する調査結果記入様式（案）と作成自動化ソフトウェア

6.10.1　震後点検の概要と課題

(1) 震後点検の位置付け

道路震災対策便覧（震災復旧編）令和4年度改訂版（日本道路協会）[6.10.1)]によれば，大規模地震発生から本復旧までの時系列的な流れは**図-6.10.1**のとおりとされている。**図-6.10.1**に示すフローのうち赤枠で囲んだ範囲における２種類の調査を本稿では主に対象としている。

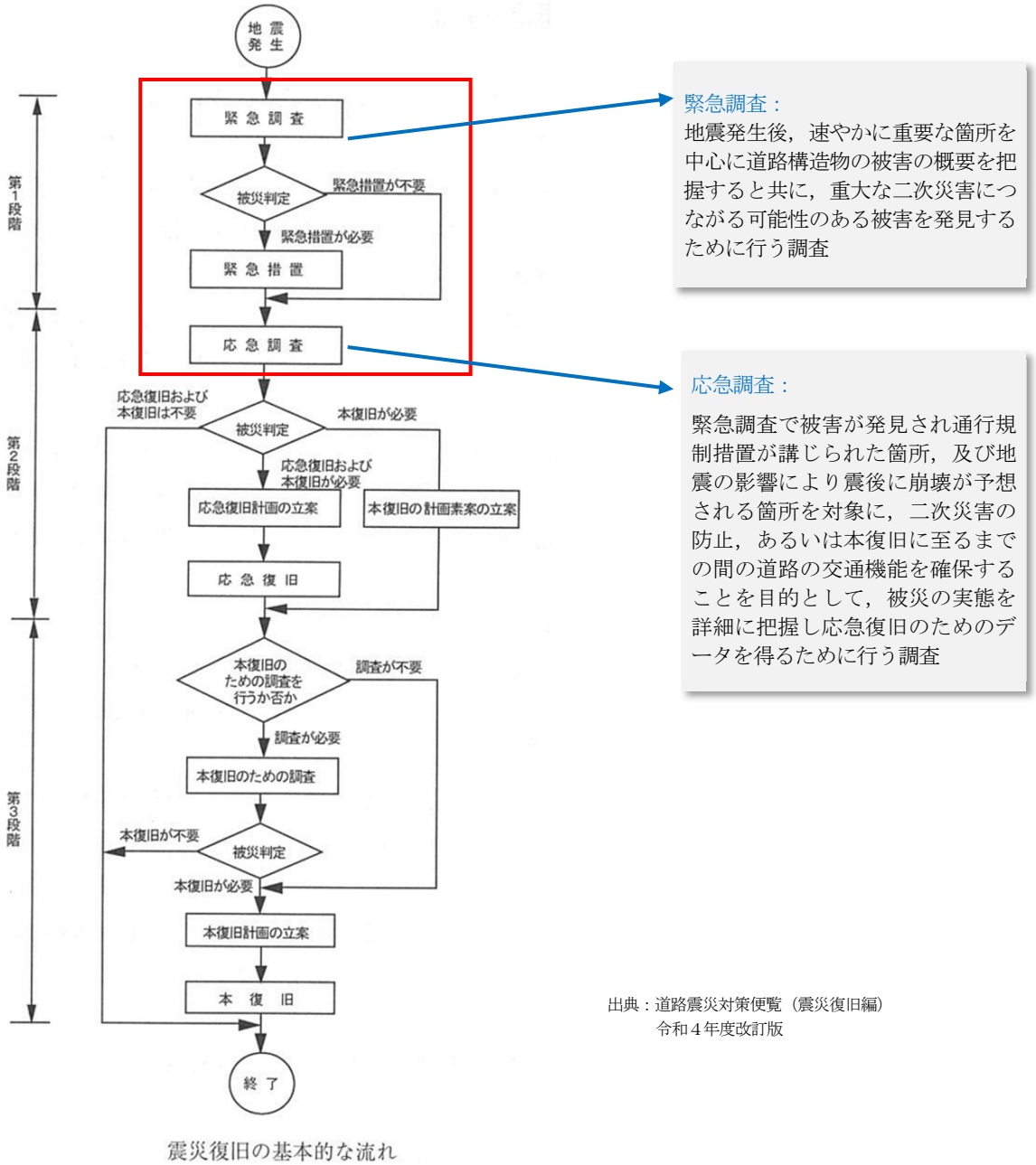


図-6.10.1　震災復旧の基本的な流れ

(2) 震後点検の実施例

過去に発生した大規模地震時に一般財団法人橋梁調査会（以下「JBEC」という。）が緊急・応急調査等に参加した主な事例を**表-6.10.1**に示す。

表-6.10.1 震後点検の実施例（JBECが参加した事例）

地震名・発生日	調査日・橋梁数	体制（編成）	調査方法
新潟県中越地震 2004(H16).10.23	緊急調査 （H16.10.28・29） 13橋	28日：2班（3人/班） 29日：4班（3人/班）	目視（検査路・梯子）
新潟県中越地震 2004(H16).10.23	応急調査 （H16.11.23，12.18･21） 3橋	6名	目視及び測量
東北地方太平洋沖地震 2011(H23).03.11	応急調査 震後約2ヶ月 9日間 (H23.05.10～13，16～20） 115橋	4班体制(2名/班)： 延べ48人工	目視(検査路・徒歩)
熊本地震 2016(H28).04.16	緊急調査 （H28.04.20） 2橋（46径間）	5班体制（2人/班） 延べ10人工	目視(リフト車) 打音調査など
北海道胆振東部地震 2018(H30).09.06	緊急調査 （H30.09.12.13） 2橋		目視（徒歩）
福島県沖地震 2021(R03).02.13	緊急調査　（R03.02.15～17，22） 123橋＋ 横断歩道橋 17橋	4班体制（2名/班） 延べ30人工	目視：徒歩・梯子等
福島県沖地震 2022(R04).03.16	緊急調査(R04.03.18～23) 361橋(含む，市管理3橋)	4班体制(2名/班) 延べ40人工	目視：徒歩・梯子等

(3) 震後点検の作業内容

(2)で示した震後点検の経験に基づき，発災後にどのような検討が必要となるか，実際の作業の流れに沿い整理した。一般に「道路橋定期点検」[6.10.2)~6.10.3)]では，対象とする橋梁に関する事前調査，点検計画の立案，必要な重機・機材等の手配など，現地に向かうまでに十分な作業時間を取ることができる。しかし，震後点検（緊急調査や応急調査等）[6.10.1),6.10.4)]は定期点検とは異なり，地震発生後ただちに準備を開始することが一般的であり，可能な限り短時間で対象とする橋梁の選定，その諸元等の調査，調査チームの編成，調査方法に応じた使用機材・携行品の準備などを実施することが求められる。震後点検は一般に次のような手順で行う。

1）事前準備（調査計画）

震後点検の迅速かつ効率的な実施のため，緊急調査等の事前準備として以下の作業を行う。

- 招集・編成。（緊急調査と応急調査に共通する事項。以下「緊急・応急共通」という。）
- 調査地域及び調査対象橋梁の絞り込み。（主に緊急調査に必要な事項。以下「緊急」という。）
- 調査対象橋梁のリストの作成。（緊急）
- 調査対象橋梁の過去の既往点検結果，補修履歴の収集。（緊急）
- 応急調査橋梁の緊急調査調書。（応急調査に必要な事項。以下「応急」という。）
- 調査対象橋梁の諸元が記載された調査調書様式の作成。（緊急・応急共通）
- 調査地域の道路の被災状況や規制状況に関する情報収集。（緊急）

- 規制状況を加味した調査ルートの決定と調査順番等の計画。（アクセスが不可となる調査対象橋梁の洗い出しも行う）（緊急）
- 道路通行規制等で調査が不可となる橋梁の代替調査計画の検討。（緊急）
- 飲料水や食料の現地調達の可否，使用可能な公衆トイレ等の位置確認と，それに応じた食料品や飲料，消耗品などの調達。（緊急・応急共通）

2）事前準備（調査機材の検討･準備）

震後点検では調査用の資機材が十分に整う環境にない場合が多く，現在は，一般的に調査は近接目視や遠望目視による調査が主体である。ただし，物理的に接近不可能な部位を調査するためには近接目視に代わる点検支援技術[6.10.5)]の準備も重要となる。また橋梁各部位へのアクセス可能性などを橋梁写真等で確認の上，現地に携行する資機材等の調達・準備を行う。

- 調査用備品（例えば，点検支援用の機器類，梯子，脚立，ロープ，縄梯子，ワイヤーカッター，懐中電灯，バッテリー・充電器，ヘルメットライトなど）の調達（緊急・応急共通）
- 緊急調査で報告された橋梁の損傷について，更に詳細な調査を行うための機材の準備（応急）

3）現地調査

定期点検と異なり，橋梁全体の細部に至るまでの全ての部位･部材を確認する時間的余裕がない状況で，以下の点に留意しつつ調査作業を行う。

- 余震等による損傷進展のリスクが続く中で点検者の安全性を確保する（緊急・応急共通）
- 限られた時間内に橋の構造安全性や走行安全性を判断する（緊急・応急共通）

4）調査後の作業（内業）

現地調査後には，以下の事後作業を極力短時間で行う必要がある。

- 調査結果，メモ，写真等の資料を整理し，保存し，電子ファイル化する。（緊急・応急共通）
- 補修・補強の必要性に関する判断，補修･補強内容や費用の概算見積りなど（緊急・応急共通）
- 応急復旧が必要な橋の復旧作業に向けた必要な作業（例えば，応急普及計画の立案，概算工事費等の見積りなど）（応急）

大規模地震発生後の限られた時間でこれら作業を行う必要があるため，支援技術による代替などを行い，作業の効率化が望まれる。なお，応急調査では，緊急調査で準備した資料等が流用できることから一部作業を省略できる。一方，応急調査では損傷のより詳細な調査が必要となることから，携行機材等については損傷の状況に応じて追加の機材準備等の検討及び携行が必要になる場合がある。

(4) 震後点検における課題とその解決策の例

震後点検における作業内容や課題，及び課題解決策の一例を**表-6.10.2**に示す。事前準備，現地調査，内業といった一連の作業の中で，その一部を占める表内の灰色着色欄の項目を改善する調書作成作業を自動化するソフトウェアのプロトタイプを開発した。その概要は**6.10.3**で解説する。

表-6.10.2 震後点検の準備作業における留意点・課題・解決策の例

作業内容		課題	解決方針の例	具体的な解決策の例
事前準備	・調査計画	・調査ルートの決定，交通規制状況の把握等に時間を要する。(緊急)	・被災状況がわかる地図等の整備等	・所謂「通れるマップ」や「道路復旧見える化マップ」，各種地図ソフトを活用する。
		・調査橋梁のリスト作成，既往の点検記録収集，調査調書様式の作成に時間を要する。(緊急)	・調査橋梁リスト・調査調書様式，過去の点検調書等の作成を迅速化・省力化する等	・道路橋DB[6.10.6]を利用し対象橋梁リスト，橋梁の諸元入り調査調書様式，橋梁位置図等の電子ファイル作成を自動化する。
	・調査機材の検討，準備	・調査対象橋梁の立地条件（点検用足場等の有無など）の検討と使用調査機材の選定，準備に時間を要する。(緊急)	・定期点検調書の写真確認を効率化。現地の状況は現場に行かなければわからないため，はしごやUAV等，臨機応変に対応できる準備を行う等	・道路橋DB[6.10.6]のデータを利用し調査対象橋梁の最新の定期点検調書（外観写真入り）の電子ファイル作成を自動化し，作業を効率化する。
現地調査	・点検，診断，措置，記録	・近接目視箇所が限られる。その状況の中で短時間での状態把握が必要となる。(緊急・応急共通)	・足場がない条件で点検ができるように各種点検支援技術[6.10.5]を活用する等	・効率的に調査作業を進めるための支援技術（UAV，各種カメラ等）を使用し調査を効率化する ・調査結果の調書作成をタブレット端末等の使用により効率化する。
		・調査メモの作成に時間を要する。(緊急・応急共通)	・調査メモの作成を迅速化・効率化する等	
		・余震が続く状況で調査するため，点検員の安全確保に課題がある。(緊急・応急共通)	・危険個所は機械で代替する等	
		・構造安全性や走行安全性を短時間で判断できる技能と知識を有する熟練技術者の確保が必要である。(緊急・応急共通)	・措置の必要性に関する技術的な判断を補助するAI等の活用による効率化等	・走行・構造安全性の判断を支援するAIの開発・導入を図る等。
		・既往損傷の有無・進展等がわかる定期点検調書と現状の比較が必要となる。(緊急) ・調査漏れ，調査資料の紛失・誤用・混同などを避けるための情報管理が必要となる。(緊急・応急共通)	・橋梁位置図（位置座標付きの資料），橋梁写真や諸元データなどを電子化して現場に携行する，また調査データの共有化等	・道路橋DB[6.10.6]データを利用し調査対象橋梁の橋梁位置図（座標付き資料）・過去の定期点検調書（諸元・外観写真入り）の電子ファイル作成を自動化し，作業を効率化する。
内業	・現場メモ，写真整理と調書の清書	・現場写真や点検記録の整理・清書・保存等に時間を要する。(緊急・応急共通)	・タブレット等による調書の現場作成，写真の貼り付け等	・タブレット端末等により現場入力することで，内業を効率化する。

※橋梁DB：「全国道路施設点検データベース(道路橋)」国土交通省
※本節では，表内の灰色着色欄の項目を改善するソフトウェアのプロトタイプを紹介

6.10.2　調査調書様式（案）

(1) 調査調書様式（案）作成の目的

橋の部位全てに対して近接目視点検等を行い，状態の把握・健全性の診断の区分を定める定期点検[6.10.2)~6.10.3)]と比べ，震後点検[6.10.1),6.10.4)]では，震後の限られた時間内で被災橋梁の構造安全性・走行安全性をチェックし，交通規制等の措置の必要性等に関する技術的な判断が求められる。そのため震後点検では，調査作業の効率化が課題である。

また，定期点検と震後点検では，作用が異なることに起因し，発生する損傷が異なることから，震後点検に最適化された調査調書の様式があることが望ましい。加えて，様式が整備されることで，調書作成を自動化するソフトウェアの開発が可能となる。

以上を企図して，調査調書の様式（案）の作成とソフトウェアの開発を行った。

(2) 調査調書様式（案）の記載事項

調査調書の様式（案）は，限られた時間で効率的に橋の構造安全性や走行安全性をできるだけ正確かつ安全側に推定するための記録ができることを目的とし，特に地震動による損傷に特化した調査項目を選定し，それを効率的に記録できるように考えた。

様式の検討にあたっては，地震後特有の損傷や構造安全性に及ぼす影響の観点から，調査で着目すべき点，限られた時間内で調査を行わなければならない点等を重視した。その上で，既往の調査実績や経験者の知見などを参考に，記録項目を限定しつつも，震後点検後の記録として最低限必要となる事項が網羅されるよう様式（案）を検討した。

なお，現場作業の効率化のために調査すべき項目を極力省略しており，震後点検結果に基づく状態の把握については，定期点検とは必ずしも同じ水準でないことに留意が必要である。

また，震後の緊急時には調査対象地域全体における被災状況調査が必要であり、それらを基に調査ルートの決定や調査橋梁のスクリーニング等を行うことも考えられる。このため、様式には新たに広域調査（UAVやヘリコプター、あるいは衛星SAR画像解析等による広域の被災状況調査）を様式として加え、地域全体の被災状況を把握できるよう配慮することとした。

様式（案）は，広域調査結果、緊急調査用及び応急調査用の３種類を作成するものとし，それぞれ次に示すとおり調査種別に応じて記載事項を定めた。

- 広域被災調査調書(案)：現地調査に先立ち対象地域全体の被災状況を収集
- 緊急調査調書(案)：通行可否の判断や応急調査の必要性の判断に資する情報を収集.
- 応急調査調書(案)：緊急調査の結果を照査しつつ診断や構造性能の評価に資する情報を収集.

以上の目的に応じ，具体的な記載事項について検討した結果を**表-6.10.3**に示す。なお、広域被災調査調書(案)については被災の有無，橋梁名，路線名及び橋梁位置図を一覧表示した簡易の様式とし，

被害の概要を一覧するのに適した様式としたため、他の調査調書(案)のような橋梁ごとの詳細情報を記録する様式とは異なっている。

記載項目は，橋梁DB（「全国道路施設点検データベース（道路橋)」国土交通省）[6.10.6]より取得し得る情報については自動的に様式に入力済みにされる。また，損傷に関連する全ての項目についてプルダウンメニューから調査担当者が選択することが可能である。それ以外の若干の項目は調査担当者が自由記入（電子ファイルへの入力）する必要はあるが，それを考慮しても，この調書による入力作業は大きく効率化されると考える。

表-6.10.3　調査調書の主な記載項目

No	項目	様式（案）の記載箇所		記載項目	記載内容	データソース
		緊急調査	応急調査			
1	担当	調書(その1)	調書(その1)	調査日時	調査した日時	自由記入
2		調書(その1)	調書(その1)	調査会社名・氏名	調査した者の所属・氏名	〃
3	橋梁諸元	調書(その1)	調書(その1)	施設ID	橋の固有ID（橋の座標，緯度＋軽度の合成値)	道路橋DB
4		調書(その1)	調書(その1)	橋梁名	橋の名前	〃
5		—	調書(その1)	橋梁管理番号	橋固有の管理番号（直轄の橋のみ)	自由記入
6		—	調書(その1)	距離標　自	橋の始点KP	道路橋DB
7		—	調書(その1)	距離標　至	橋の終点KP（直轄の橋のみ)	自由記入
8		調書(その1)	調書(その1)	所在地	○○県○○市○○町○○番地，など橋の住所	〃
9		調書(その1)	調書(その1)	道路管理者	○○県，○○市，など橋の管理者名	道路橋DB
10		調書(その1)	調書(その1)	管理事務所	○○県○○事務所，など橋の管理事務所名	〃
11		—	調書(その1)	出張所	橋の管理出張所名（直轄の橋のみ)	自由記入
12		調書(その1)	調書(その1)	路線名	県道○○号線，などの路線名	道路橋DB
13		調書(その1)	調書(その1)	橋長	橋長(m)	〃
14		調書(その1)	調書(その1)	幅員	幅員(m)	〃
15		調書(その1)	調書(その1)	径間数	橋の径間数	〃
16		—	調書(その1)	径間番号	径間の番号表示（直轄の橋のみ)	自由記入
17		調書(その1)	調書(その1)	上部構造形式	I桁(非合成)など，上部構造の形式	道路橋DB
16		調書(その1)	調書(その1)	下部構造形式	重力式橋台など，下部構造の形式	〃
17		調書(その1)	調書(その1)	基礎形式	直接基礎など，基礎の形式	〃
18		調書(その1)	調書(その1)	路下状況	緊急輸送路：１次，＋橋梁下の管理者　など	〃
19		調書(その1)	調書(その1)	占用物件	占用している物件の名前	〃
20		調書(その1)	調書(その1)	適用設計基準	S55道示など，橋が適用した設計基準	〃
21		調書(その1)	調書(その1)	橋の重要度	A種の橋，など	〃
22		調書(その1)	調書(その1)	架設年次	橋梁の架設完了年度	〃
23		調書(その1)	調書(その1)	直近点検年度	直近に実施した定期点検の年度	〃
24		—	調書(その1)	直近補修年	直近の補修年度	自由記入
25		調書(その1)	調書(その1)	健全度診断区分	直近の点検結果による健全度の診断の区分	道路橋DB
26		調書(その1)	調書(その1)	代替路の有無	代替路が存在するか	〃
27		調書(その1)	調書(その1)	緊急輸送道路	緊急輸送道路の指定	〃
28		調書(その1)	調書(その1)	形態	橋の種類（跨道橋，跨線橋，河川橋，その他)	プルダウン選択
29		調書(その1)	調書(その1)	上部構造検査路	上部構造用の検査路の有無　など	自由記入
30		調書(その1)	調書(その1)	下部構造検査路	下部構造用の検査路の有無　など	〃
31	調査結果	調書(その1)	—	緊急措置の提案	通行規制等の提案（通行止め，速度規制など)	プルダウン選択
32		調書(その1)	—	措置の提案理由	通行規制等の提案理由	自由記入
33		調書(その1)	調書(その1)	耐荷力に関する被災度	耐荷力に及ぼす影響度合い	プルダウン選択
34		調書(その1)	調書(その1)	走行性に関する被災度	走行性に及ぼす影響度合い	〃
35		調書(その1)	—	応急調査の要否	応急調査にてより詳細な調査の必要性	〃
36		—	調書(その1)	詳細調査の要否	より詳細な調査の必要性	〃

は橋梁DBより自動的に入力される項目
はExcelSheetのプルダウンメニューから選択して入力する項目

(3) 点検支援技術の使用に関する記載事項

震後点検についても点検支援技術の積極的活用が望まれる。例えば，標準的には，接近困難な部位等の調査では，調査担当者が点検支援技術を使用しても近接目視（若しくは部位に応じて遠望目視）と同等のレベルで状態の把握が可能と判断した場合に，調査の効率化・迅速化のために点検支援技術[6.10.5)]を使用することができる。この場合，時間がない中での作業であることを重視し，調査調書には少なくとも以下の事項について最低限，記録しておく必要があると考えた。

- どの支援技術を使用したか　⇒　技術名，点検支援技術性能カタログ（国土交通省）[6.10.5)]における技術の番号など
- どの部分の調査に使用したか　⇒　使用箇所，計測部位
- 計測精度に影響する環境条件　⇒　使用時の環境条件（気温，風速，照度など）

点検支援技術の代表的な例と，震後点検で使用する際に調書への記載が必要な計測精度に影響する使用環境条件について整理したものを**表-6.10.4**に示す。

表-6.10.4　支援技術[6.10.5)]による代表的な計測物理量と損傷・計測精度に影響する環境条件

技術の分類	代表的な計測方式	計測する損傷など	計測精度に影響する環境条件
画像計測技術	・静止画 ・動画 ・赤外線画像	・ひびわれ ・漏水･遊離石灰 ・剥離・鉄筋露出　など	・天候 ・風速（UAV） ・照度　など
非破壊検査技術	・磁束 ・赤外線画像 ・振動/音波/超音波/レーザー/電磁波/中性子	・腐食/破断/亀裂/ゆるみ・脱落/変形･欠損/うき/剥離・鉄筋露出/漏水･滞水 ・舗装異常/土砂化 ・3D 座標（陸上・水中） ・塩化イオン濃度	・天候 ・気温・湿度 ・風速 ・照度 ・水温　など
計測･モニタリング技術	・静止画/動画 ・変位/振動数/加速度 ・ひずみ/変位/傾斜角 ・磁束 ・光/超音波/レーザー	・腐食/破断/亀裂/変形･欠損/ゆるみ・脱落/支承部の機能障害/遊間の異常／沈下･移動･傾斜/洗掘 ・変位量/加速度/傾斜角/振動数/ケーブル張力 ・3D 座標（陸上・水中）	・天候 ・気温・湿度 ・風速 ・照度 ・水温・水深　など

(4) 様式（案）

以上の記載事項の検討の結果，調査調書のひな形として作成した様式（案）を**図-6.10.2～8**に示す。

広域被災調査(様式－０)

※ 橋梁名をクリックすると当該橋梁の緊急調査調書がExcelファイルで開きます。

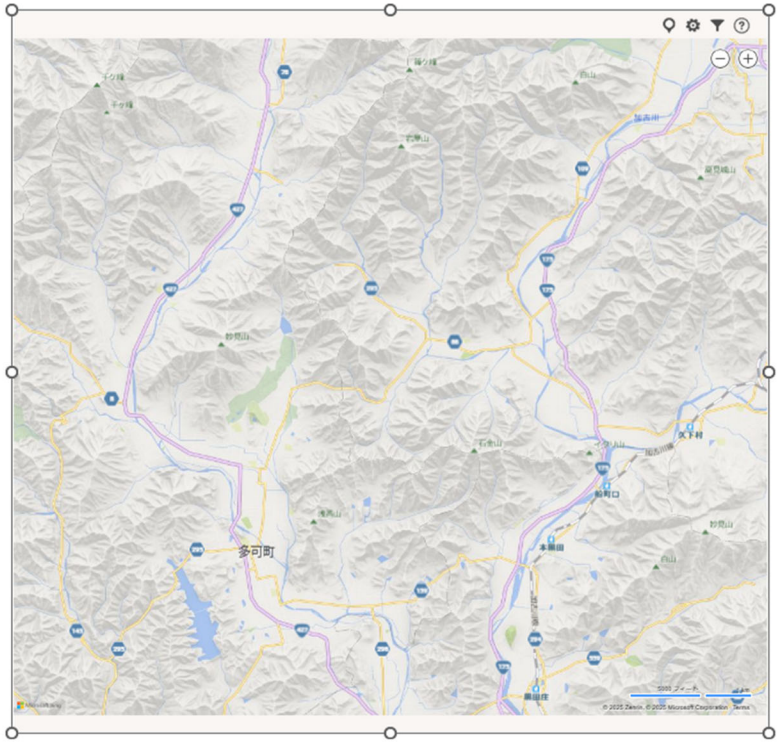
調査対象範囲地名 自：

至：

No	施設ID（緯度，経度）（記載は任意）	橋梁名	橋長	路線名	道路管理者	現場状況	対応措置の案	情報取得時刻（年/月/日 hh:mm）	取得者	点検手法

広域被災調査橋梁 位置図

※1 左表の「緯度経度」+「座標値」を範囲選択して右の🌍ボタンをクリックすると当該座標位置にマーカーが表示されます
※2 Bing地図の仕様によりマップに表示されるマーカーは左表No欄の1～100橋までとなります



特定の橋梁の位置図を表示するには、左表の「施設ID」欄のうち特定したい橋梁の値を下欄にコピペし、
マウスで下欄全体を範囲選択の上、図内右上にある「🌍ボタン」をクリックする

施設ID（緯度，経度）

図-6.10.2 広域被災調査調書（様式－０）

緊急調査　調書（その１）　※ 施設IDのクリックで橋梁位置をGoogleMap表示します（マクロ対応機種のみ動作可能）　※ 印刷範囲外のセル位置の変更を行うと橋梁情報が正しく読み込みできません。 ※ 青色セルの位置を変更すると橋梁情報が正しく読み込みできません。　参考：　道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案）Ver1.0　（平成24年2月）東北地方整備局道路部　国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室

施設ＩＤ		調査日時		調査会社名・氏名		道路管理者		事務所		※ 青色セル内の情報は道路橋DB(xRoad)によるデータです。					
橋梁名		フリガナ		路線名		所在地		橋長(m)		幅員(m)		径間数		代替路の有無	
上部構造形式		下部構造形式		基礎形式		形態		路下状況						緊急輸送路	
適用設計基準		橋の重要度		直近点検年		直近の健全度診断区分		架設年次				占用物件			
緊急措置の提案		措置の提案理由													
上部構造検査路		下部構造検査路													

写真①	写真②
写真 できるだけ全景が入るよう側面から撮影した写真を添付する。	写真 できるだけ路面の異常がわかるような角度から撮影した写真を添付する。
写真③	写真④
写真 代表的な損傷写真を添付する。	写真 代表的な損傷写真を添付する。
写真⑤	写真⑥
写真 代表的な損傷写真を添付する。	写真 代表的な損傷写真を添付する。
写真⑦	写真⑧
写真 代表的な損傷写真を添付する。	写真 代表的な損傷写真を添付する。

構成要素			部位・部材	異常の有無	現象				備考(損傷位置や変状箇等を任意記入)	点検手法	
	全体	0-1	路面・側面								
路上	路面	1-1	照明施設・落下防止柵・高欄								
		1-2	伸縮装置								
		1-3	橋台背面土・踏み掛版								
		1-4	任意記入								
上部構造	主桁等	2-1	主　桁								
		2-2	横桁・対傾構・補剛材								
		2-3	任意記入								
上下部接続部	支承部	3-1	支　承								
		3-2	アンカーボルト								
		3-3	沓座モルタル								
			台座コンクリート								
		3-4	任意記入								
		3-5	任意記入								
		3-6	任意記入								
下部構造	橋脚・橋台・基礎等	4-1	橋脚（柱部）								
			橋脚（梁部）								
			橋脚（隅角部）								
		4-2	橋台（胸・竪・翼壁）								
		4-3	基礎								
		4-4	任意記入								
		4-5	任意記入								
その他	フェールセーフ	5-1	落橋防止構造								
			横変位拘束構造								
	周辺地盤など	6-1	基礎周辺地盤								
			橋台周辺護岸								
		6-2	任意記入								
	その他	7-1	配水施設								
		7-2	添架物								
		7-3	任意記入								

被災度などの所見		
耐荷力に関する被災度		特記事項：
走行性に関する被災度		特記事項：
応急調査の要否		特記事項：

その他特記事項があれば記載（所見、上記着目箇所以外の損傷状況、詳細調査の必要性、震災以外の損傷の有無など）

①所見：
②上記着目箇所以外の損傷：
③詳細調査の必要性：
④震災以外の損傷の有無：
⑤その他：

図-6.10.3　緊急調査調書（その1）損傷記録

緊急調査　調書（その２）

使用した点検支援技術の使用条件　記録表

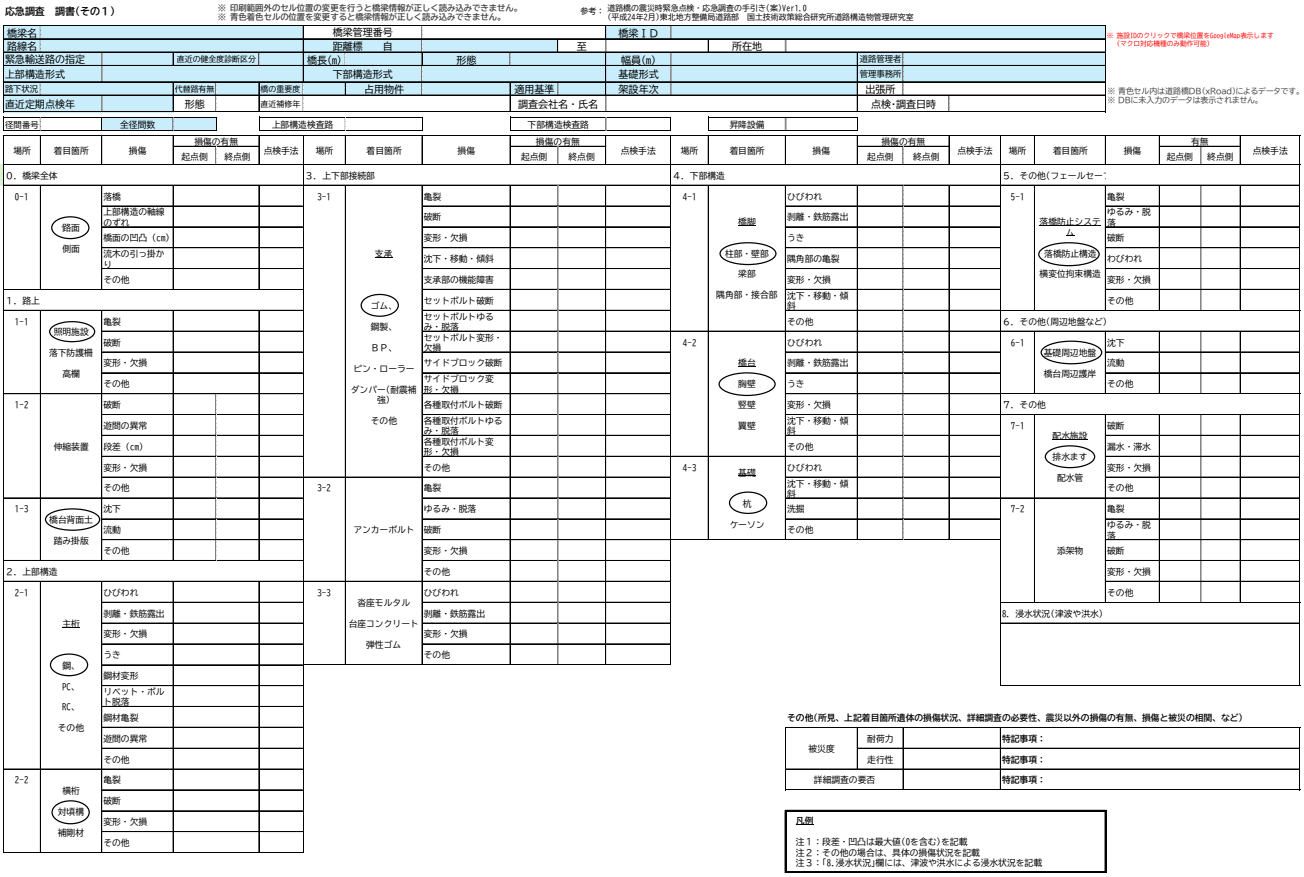
点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

図-6.10.4　緊急調査調書（その2）点検支援技術使用状況


応急調査　調書(その１)

※ 印刷範囲外のセル位置の変更を行うと橋梁情報が正しく読み込みできません。
※ 青色着色セルの位置を変更すると橋梁情報が正しく読み込みできません。

参考：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)Ver1.0
（平成24年2月）東北地方整備局道路部　国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室

橋梁名 | 橋梁管理番号 | 橋梁ＩＤ
路線名 | 距離標　自 | 至 | 所在地
緊急輸送路の指定 | 直近の健全度診断区分 | 橋長(m) | 形態 | 幅員(m) | 道路管理者
上部構造形式 | 下部構造形式 | 基礎形式 | 管理事務所
路下状況 | 代替路有無 | 橋の重要度 | 占用物件 | 適用基準 | 架設年次 | 出張所
直近定期点検年 | 形態 | 直近補修年 | 調査会社名・氏名 | 点検・調査日時
径間番号 | 全径間数 | 上部構造検査路 | 下部構造検査路 | 昇降設備

※ 施設IDのクリックで橋梁位置をGoogleMap表示します（マクロ対応機種のみ動作可能）
※ 青色セル内は道路橋DB(xRoad)によるデータです。
※ DBに未入力のデータは表示されません。

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
0．橋梁全体					
0-1	路面	落橋			
		上部構造の軸線のずれ			
		橋面の凹凸（cm）			
		流木の引っ掛かり			
	側面	その他			
1．路上					
1-1	照明施設	亀裂			
	落下防護柵	破断			
	高欄	変形・欠損			
		その他			
1-2		破断			
		遊間の異常			
	伸縮装置	段差（cm）			
		変形・欠損			
		その他			
1-3	橋台背面土	沈下			
		流動			
	踏み掛版	その他			
2．上部構造					
2-1		ひびわれ			
	主桁	剥離・鉄筋露出			
		変形・欠損			
		うき			
	鋼、	鋼材変形			
	PC、	リベット・ボルト脱落			
	RC、	鋼材亀裂			
	その他	遊間の異常			
		その他			
2-2	横桁	亀裂			
	対傾構	破断			
	補剛材	変形・欠損			
		その他			

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
3．上下部接続部					
3-1		亀裂			
		破断			
	支承	変形・欠損			
		沈下・移動・傾斜			
		支承部の機能障害			
	ゴム、	セットボルト破断			
	鋼製、	セットボルトゆるみ・脱落			
	BP、	セットボルト変形・欠損			
	ピン・ローラー	サイドブロック破断			
	ダンパー(耐震補強)	サイドブロック変形・欠損			
	その他	各種取付ボルト破断			
		各種取付ボルトゆるみ・脱落			
		各種取付ボルト変形・欠損			
		その他			
3-2		亀裂			
		ゆるみ・脱落			
	アンカーボルト	破断			
		変形・欠損			
		その他			
3-3		ひびわれ			
	沓座モルタル	剥離・鉄筋露出			
	台座コンクリート	変形・欠損			
	弾性ゴム	その他			

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
4．下部構造					
4-1		ひびわれ			
	橋脚	剥離・鉄筋露出			
		うき			
	柱部・壁部	隅角部の亀裂			
	梁部	変形・欠損			
	隅角部・接合部	沈下・移動・傾斜			
		その他			
4-2		ひびわれ			
	橋台	剥離・鉄筋露出			
	胸壁	うき			
	竪壁	変形・欠損			
	翼壁	沈下・移動・傾斜			
		その他			
4-3	基礎	ひびわれ			
		沈下・移動・傾斜			
	杭	洗掘			
	ケーソン	その他			

場所	着目箇所	損傷	有無 起点側	有無 終点側	点検手法
5．その他(フェールセー					
5-1		亀裂			
	落橋防止システム	ゆるみ・脱落			
	落橋防止構造	破断			
	横変位拘束構造	わびわれ			
		変形・欠損			
		その他			
6．その他(周辺地盤など)					
6-1		沈下			
	基礎周辺地盤	流動			
	橋台周辺護岸	その他			
7．その他					
7-1	配水施設	破断			
	排水ます	漏水・滞水			
	配水管	変形・欠損			
		その他			
7-2		亀裂			
		ゆるみ・脱落			
	添架物	破断			
		変形・欠損			
		その他			
8．浸水状況(津波や洪水)					

その他(所見、上記着目箇所遺体の損傷状況、詳細調査の必要性、震災以外の損傷の有無、損傷と被災の相関、など)

被災度	耐荷力	特記事項：
	走行性	特記事項：
詳細調査の要否		特記事項：

凡例

注１：段差・凹凸は最大値(0を含む)を記載
注２：その他の場合は、具体の損傷状況を記載
注３：「8.浸水状況」欄には、津波や洪水による浸水状況を記載

図-6.10.5　応急調査調書（その1）損傷記録


応急調査　調書(その２)

損傷図

橋梁名 | 路線名 | 径間番号

図-6.10.6　応急調査調書（その2）損傷図

応急調査　調書(その３)

損傷写真

橋梁名		路線名		径間番号	

	写真番号		写真番号
	部材位置		部材位置
	メモ		メモ
	写真番号		写真番号
	部材位置		部材位置
	メモ		メモ
	写真番号		写真番号
	部材位置		部材位置
	メモ		メモ

注1：正面(起点側から)、正面(終点側から)、側面の３枚は、必須とする。　２：緊急点検においては、時間的余裕がなければ、側面は割愛してもよい。　３：メモ欄には、損傷状況と所見をできるだけ詳しく記載すること。

図-6.10.7　応急調査調書（その3）損傷写真

応急調査　調書(その4)

使用した点検支援技術の使用条件　記録表

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

図-6.10.8　応急調査調書（その4）点検支援技術使用状況

6.10.3　調査調書作成ソフトウェアの開発

(1) 開発の目的

震後点検の事前準備で現場携行する調査資料を作成する際に，調査対象橋梁数が多い場合，調査橋梁のリスト・位置図の作成，対象の各橋梁の基本諸元のまとめ，過去の損傷・補修履歴とその内容等，情報収集等に書類作成に時間を要する。そこで，これらの作業を可能な限り自動化し，震後点検を効率化する目的でソフトウェアを開発した。

表-6.10.5　震後点検で必要となる資料と自動化の方針

震後点検の準備	自動化の方針
調査対象橋梁リストの作成	・調査対象とする全橋梁リストのExcelSheet を作成 （調査橋梁の位置図のExcelSheet作成を含む）
個々の橋梁諸元データが記入された調査調書（現場記入用の様式）	・調査対象の各橋梁の諸元データを記載済みの震後点検用の「調査調書様式（案）」のExcelSheet を作成
調査橋梁の既往の点検調書	・調査対象の各橋梁の最新の定期点検結果調書のExcelSheet を 作成

(2) 動作原理

本ソフトウェアは，国土交通省が提供する「全国道路施設点検データベース（道路橋）」[6.10.6)]（以下「xRoad道路橋DB」という。）を利用し，震後点検における「調査調書様式（案）」の作成を補助するものである。プログラムは**図-6.10.9**の流れで動作する。言語はVBAを用いた。

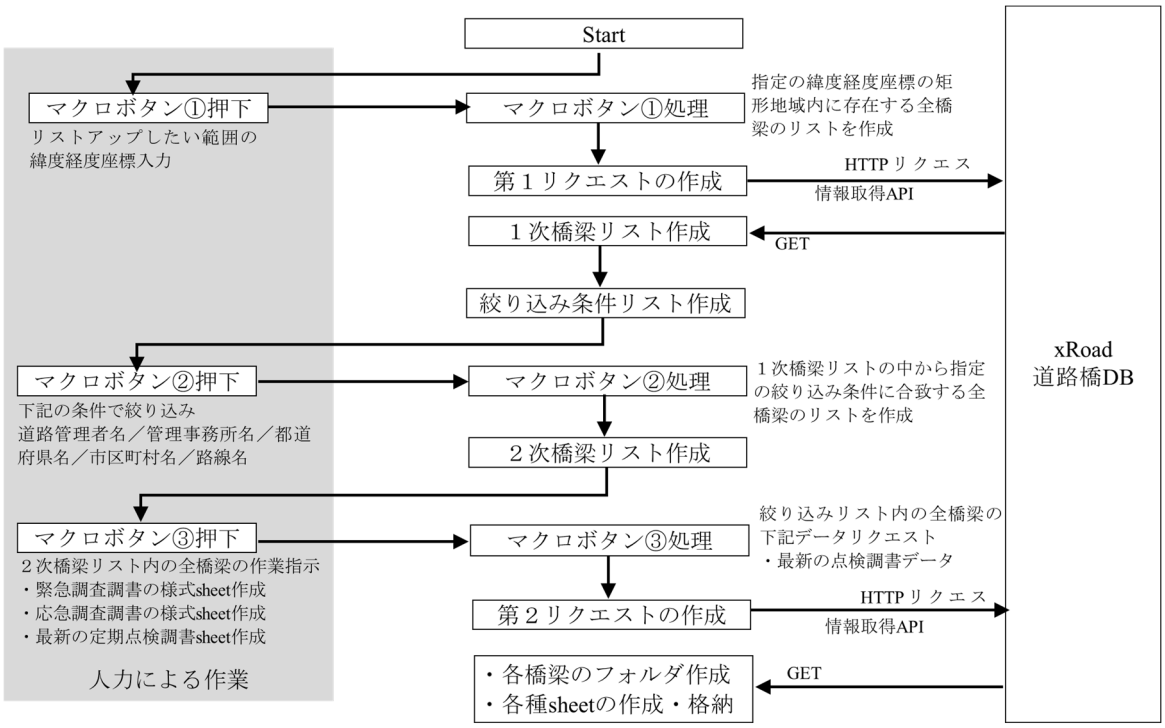


図-6.10.9　調査調書の様式作成の自動化の流れ

xRoad道路橋DBは，約73万橋ある全国の道路橋（市町村管理の橋梁までを含めた全ての橋梁）のデータを一元管理するデータベースシステムであり，基礎DB分のデータは誰でも無料で利用できる。ただし，サービス内容により有料サービスもある。本ソフトウェアは有料サービスである公開用API（77条調査データ編）を利用しているため，xRoad道路橋DBの有料サービス契約を行っている組織のPCでのみ動作する。基本データの公開内容と有料サービス内容について，利用規約より抜粋して以下に示す。

表-6.10.6　データの無料・有料別閲覧・取得内容

＜有料/無料の別＞

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td>閲覧・取得</td></tr>
<tr><td>①基礎 DB 分※1</td><td rowspan="2">77条調査データ</td><td>無料</td></tr>
<tr><td>②上記以外※2</td><td rowspan="2">有料</td></tr>
<tr><td colspan="2">③77条調査以外の詳細なデータ※3</td></tr>
</table>

※1 基礎 DB 分の閲覧内容

施設名称	フリガナ	路線名	管理者区分	管理者名	管理事務所名	都道府県	市町村
位置(緯度)	位置(経度)	架設年度	橋　長	幅　員	点検実施年度	判定区分	措置状況

※2 基礎 DB 分以外，※3 77 条調査以外の詳細なデータの主の閲覧内容

上記以外の「諸元情報」：橋梁形式，橋梁種別，径間数，構造形式，緊急輸送道路種別，路下状況等	
跨線橋に関する「老朽化対策情報」	規制内容や規制原因等に関する「通行規制情報」
適用基準書や橋の重要度等に関する「耐震補強情報」	跨道橋下の管理者等に関する「高速跨道橋情報」

xRoad道路橋DBの公開用APIは，施設データ簡易参照用のAPI-1とAPI-2，高度参照用API，及び第77条点検表記録様式ファイル取得APIの４種類が用意されており，それぞれ取得できるデータの種類とリクエスト方法が異なる。本ソフトウェアは，API-2及び第77条点検表記録様式ファイル取得APIを介して，DB内のデータについてHTTPリクエストを行い，橋梁諸元及び最新の定期点検結果を取得する。

(3)　ソフトウェアの活用による作業時間の短縮と試行事例

本ソフトウェアによる効果を評価するため，対象橋梁数10橋及び100橋での作業時間を計測した結果，人力による作業と比較して，1橋当たり最大で約8分30秒の作業所要時間の短縮が図れ，従来の人力作業の1/20程度の所要時間で済むことを確認した。所要時間の比較結果を**表-6.10.7**に示す。

表-6.10.7　事前準備作業の所要時間の概略比較

作業項目	人力作業※			ソフトウェア作業		
	10橋	100橋	1橋当たり	10橋	100橋	1橋当たり
･調査橋梁リスト・諸元データsheet作成	20分	200分	2分	2分	2分	0.2～0.02分
･最新の定期点検調書作成	20分	200分	2分	3分	22分	0.3～0.22分
･緊急調査調書の空白様式sheet作成	25分	250分	2.5分			
･応急調査調書の空白様式sheet作成	25分	250分	2.5分			
合計作業時間	90分	900分	9分	5分	24分	0.5～0.24分

※人力作業の実際の数値は1橋当たりの理想状態でのおおよその所要時間を橋梁数で乗じたものとした。

任意地域を対象に試行を実施し，以下の成果が得られた。

- 対象橋梁数：1次橋梁リストで219橋，2次橋梁リストで218橋を抽出。
- 作業時間：2次橋梁リストから調査調書作成までの全工程を51分で完了。1橋当たりの作業時間は平均0.22～0.3分であり，技術性能評価と同様の効率化を確認した。
- アウトプット：橋梁ごとの諸元データ入りの緊急調査調書，応急調査調書，最新定期点検調書が自動作成され，橋梁ごとに自動作成されたフォルダへ一括保存された。

以上の結果から，震後点検作業の迅速化と高度化に資するツールとしての有用性を確認した。

(4) 震後点検で想定される活用方法と今後の展望

本ソフトウェアで作成される震後点検用の各種ExcelSheetの活用だけでも震後点検の調査時間の短縮化･効率化を図ることができるが，これら各種電子ファイルをさらに効率的するための今後の課題を示す。

- データサーバの設置・データ共有：情報の一元化により，現場とオフィス間で効率的なデータ連携を可能とする。
- モバイル端末との併用：タブレット端末等を使用し，現場入力によるリアルタイムな調書作成と写真整理を実現させる。

これにより，調査後の内業時間を大幅に短縮できる。以上の活用イメージを図-6.10.10に示す。

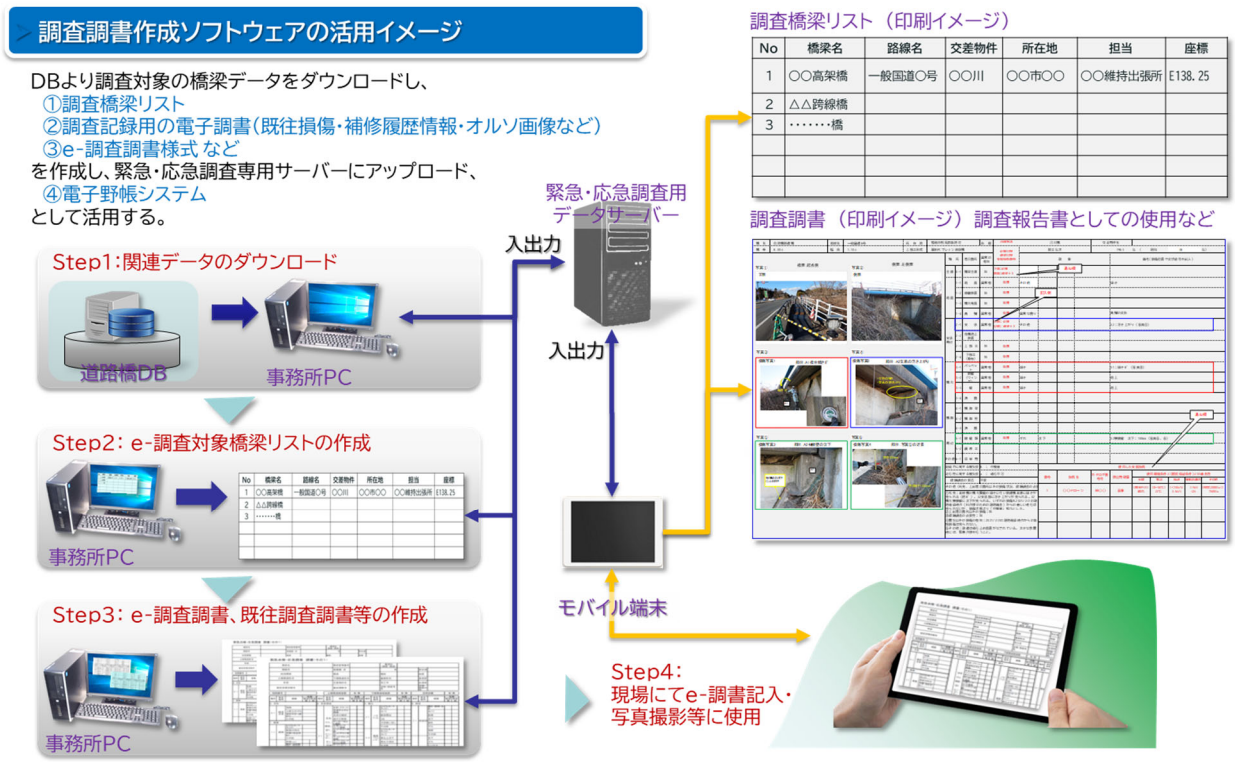


図-6.10.10　本ソフトウェアの活用イメージ

本ソフトウェアにより作成される調査調書様式を使用して震後点検の迅速化・効率化の一助となることが期待される。なお，本ソフトウェアはあくまでもプロトタイプ（β版）であり，不具合などの検証が万全であるとは言いがたい。今後，実運用を通じてソフトウェアの利便性向上を図り，震後点検作業のさらなる効率化と高度化に向けた検討が必要である。

現時点での本ソフトウェアにおける課題と今後の展望の一例は以下のとおり。

●既往点検調書の出力履歴

課題：現行のソフトウェアでは最新の定期点検調書のみが出力されるため，過去の履歴等を参照することができない。

展望：xRoad道路橋DBの改善・改良を含め，検討が必要。

●現場環境での適応性の向上

課題：震後点検の事前準備作業の効率化を図ると共に，現場での入力作業を省力化するため，入力項目を極力ドロップダウンリスト化した。しかし，実際の使用にあたって個々のケースに応じてリストの不足も想定される。

展望：試行結果を踏まえて，適時，ソフトウェアを改良していく。

●継続的な技術更新とメンテナンス

課題：技術の進化に伴い，ソフトウェアの定期的な更新やメンテナンスが必要である。

展望：定期的なアップデートと，ユーザーのサポート体制の検討が必要。

●調査調書へのAI技術の導入

課題：現行のソフトウェアは極力ドロップダウンリストによる選択入力方式を採用するなど，それなりの迅速化・省力化を実現しているが，まだ省力化の余地がある。

展望： AIなどによる損傷状態の把握・診断の支援，橋梁CIM等と損傷写真・その他データとのコラボレーション等に関する技術開発が必要。

参考文献

6.10.1）公益社団法人日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編）令和４年度改訂版

6.10.2）国土交通省道路局：道路橋定期点検要領 令和６年７月

6.10.3）国土交通省道路局国道･技術課：橋梁定期点検要領 令和６年３月

6.10.4）東北地方整備局道路部，国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)Ver1.0 平成２４年２月

6.10.5）国土交通省道路局：点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）令和６年４月

6.10.6）一般財団法人橋梁調査会：全国道路施設点検データベース（道路橋）公開用 API 仕様書77条調査データ編 令和６年８月

6. 11　本共同研究で扱ったデジタル技術の震後点検における適用タイミングの例

最後に，本共同研究で扱った様々なデジタル技術が震後点検のどのタイミングで活用可能か，現状の各技術の能力に照らして適用範囲を推測し図-2.3.1 に書き込んだものを図-6.11.1 に示す。様々なデジタル技術があるが，大別すると，1) 人間が行うよりも一般に広範囲／低精度のデータを収集する技術群，2) 人間程度の範囲／精度で作業を補助する技術群，3) 人間が行うよりも一般に狭い範囲／高精度のデータを収集する技術群があり，それぞれ適用範囲は異なる。

大規模地震発生後には一刻も早く，かつ，確実な措置を取ることが社会的に要請される。これらデジタル技術を活用しつつ，その社会的要請に対応することが望まれる。

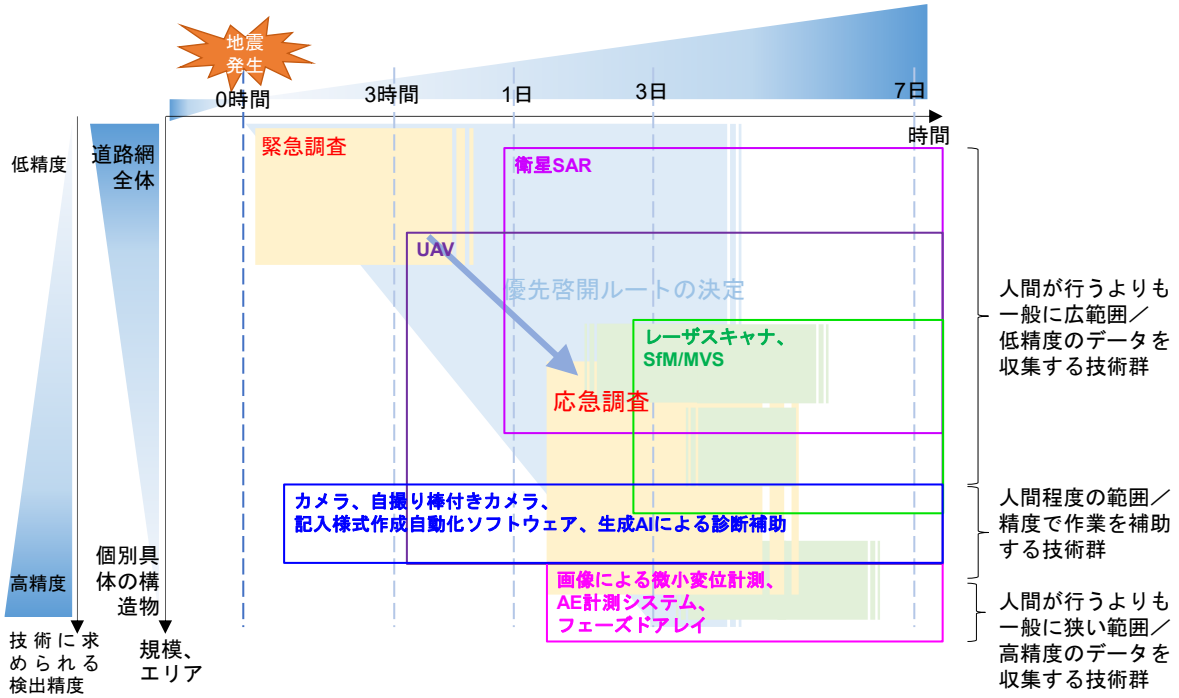


図-6.11.1　本共同研究で扱ったデジタル技術の震後点検における適用タイミングの例

謝辞

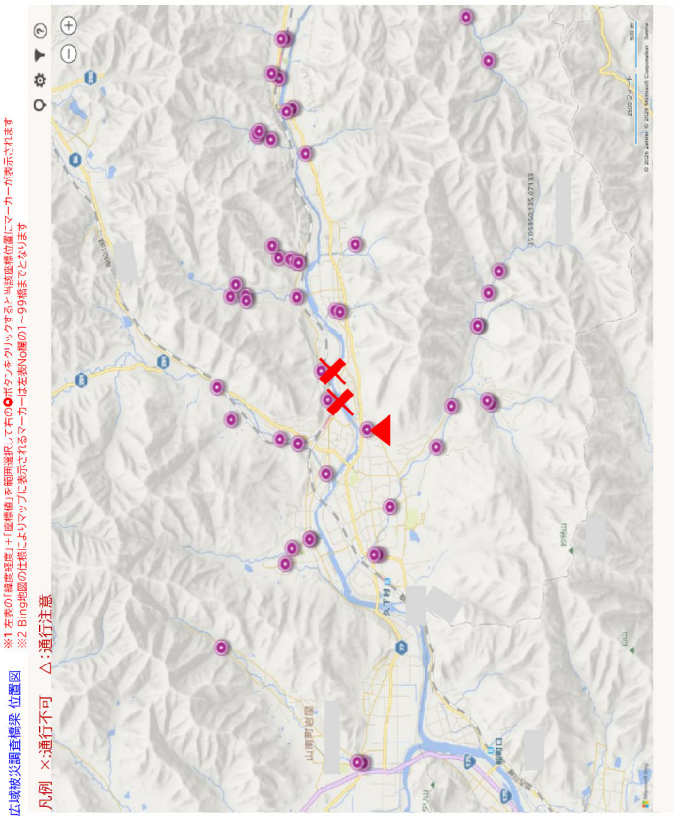
本研究の遂行にあたり，令和 6 年能登半島地震の復旧で大変な中，北陸地方整備局や石川県等に調査の許可を頂きました。記して深甚なる謝意を示します。

付録

付録１　震後点検調書様式（案）

広域被災調査　（様式－０）

記入例



広域被災調査（様式－０）…記入例

No	施設ID（緯度、経度）	橋梁名		橋長	路線名		道路管理者		損傷程度		コメント		点検手法
1	0.000.0.00	○○橋		5.6	国道○○号		○○県○○局		○				UAV
2	0.000.0.00	○○橋		6.2	国道○○号		○○県○○局		○				UAV
3	0.000.0.00	○○橋		3	国道○○号		○○県○○局		○				UAV
4	0.000.0.00	○○橋		13.3	国道○○号		○○県○○局		△		段差10cm程度	UAV	
5	0.000.0.00	○○橋		12.8	国道○○号		○○県○○局		×		落橋	UAV	
6	0.000.0.00	○○橋		18	国道○○号		○○県○○局		×		落橋	UAV	
7	0.000.0.00	○○橋		4.5	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
8	0.000.0.00	○○橋		9.6	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
9	0.000.0.00	○○橋		2.2	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
10	0.000.0.00	○○橋		13.6	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
11	0.000.0.00	○○橋		15.5	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
12	0.000.0.00	○○橋		30.1	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
13	0.000.0.00	○○橋		8.7	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
14	0.000.0.00	○○橋		2.6	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
15	0.000.0.00	○○橋		5.5	国道○○号		○○県○○局		○				ヘリコプター
16	0.000.0.00	○○橋		5.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
17	0.000.0.00	○○橋		6.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
18	0.000.0.00	○○橋		4.8	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
19	0.000.0.00	○○橋		4.5	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
20	0.000.0.00	○○橋		7.3	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
21	0.000.0.00	○○橋		4.3	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
22	0.000.0.00	○○橋		9.5	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
23	0.000.0.00	○○橋		26.2	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
24	0.000.0.00	○○橋		2.6	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
25	0.000.0.00	○○橋		2.3	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
26	0.000.0.00	○○橋		21.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
27	0.000.0.00	○○橋		6.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
28	0.000.0.00	○○橋		11.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
29	0.000.0.00	○○橋		2.1	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
30	0.000.0.00	○○橋		17.8	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
31	0.000.0.00	○○橋		3.8	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
32	0.000.0.00	○○橋		33.8	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
33	0.000.0.00	○○橋		2.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
34	0.000.0.00	○○橋		8.2	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
35	0.000.0.00	○○橋		11.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
36	0.000.0.00	○○橋		14.6	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
37	0.000.0.00	○○橋		3.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
38	0.000.0.00	○○橋		20.4	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
39	0.000.0.00	○○橋		10.5	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
40	0.000.0.00	○○橋		7.7	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
41	0.000.0.00	○○橋		12.5	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
42	0.000.0.00	○○橋		5.3	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
43	0.000.0.00	○○橋		15.9	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
44	0.000.0.00	○○橋		1.9	国道○○号		○○県○○局		○				衛星SAR
45	0.000.0.00	○○橋		9.7	国道○○号		○○県○○局		○				目視情報
46	0.000.0.00	○○橋		5.9	国道○○号		○○県○○局		○				目視情報
47	0.000.0.00	○○橋		2.1	国道○○号		○○県○○局		○				目視情報
48	0.000.0.00	○○橋											
49	0.000.0.00	○○橋											
50	0.000.0.00	○○橋											
51	0.000.0.00	○○橋											
52	0.000.0.00	○○橋											
53	0.000.0.00	○○橋											

記入例

緊急調査　調書（その１）　※ 施設IDのクリックで橋梁位置をGoogle Map表示します（マクロ対応機種のみ動作可能）

※ 印刷範囲外のセル位置の変更を行うと橋梁情報が正しく読み込みできません。
※ 青色セルの位置を変更すると橋梁情報が正しく読み込みできません。

参考：　道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)Ver1.0　（平成24年2月）東北地方整備局道路部　国土技術政策総合研究所河川研究部道路構造物管理研究室

施設ＩＤ	○○,○○	調査日時	○○○○	調査会社名・氏名	○○○○	道路管理者	○○地方整備局	事務所	○○国道事務所	※ 青色セル内の情報は道路橋DB(xRoad)によるデータです。					
橋梁名	○○高架橋（上）	フリガナ	（○○ｺｳｶｶｷｮｳ）	路線名	国道○号	所在地	○○○○	橋長(m)	371.3	幅員(m)	9.54	径間数	14	代替路の有無	有り
上部構造形式	ポステン中空床版	下部構造形式	壁式橋脚（ＲＣ）	基礎形式	場所打ちぐい	形態	こ道橋	路下状況	緊急輸送路：指定無し，道路橋下管理者：都道府県			緊急輸送路		一次	
適用設計基準	S55道示	橋の重要度	B種の橋	直近点検年	2019	直近の健全度診断区分	Ⅱ	架設年次	1994年　（平成6年）	占用物件	無し				
緊急措置の提案	通行禁止	措置の提案理由	段差が大きく早急な補修が必要と考える。												

上部構造検査路	無し	下部構造検査路	無し

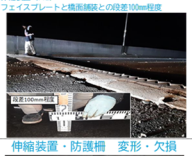
写真①　側面（第12～14径間）：終点右側



写真②　橋面（第13径間）：起点側（応急復旧）



写真③　伸縮装置（P12）　フェイスプレートと橋面舗装との段差100mm程度



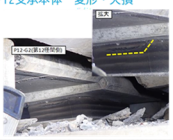
写真④　伸縮装置（P12）　フェイスプレートフィンガー部の段差20mm



写真⑤　伸縮装置・防護柵　変形・欠損



写真⑥　P12支承本体　変形・欠損



写真⑦

写真

代表的な損傷写真を添付する。

写真⑧

写真

代表的な損傷写真を添付する。

構成要素			部位・部材	異常の有無	現象				備考(損傷位置や変状領等を任意記入)	点検手法	
	全体	0-1	路面・側面	異常有	路面の凹凸				写真③段差100mm（P12橋脚上）	近接目視	
路上	路面	1-1	照明施設・落下防止柵・高欄	異常有	変形・欠損				写真④段差20mm（P12橋脚上）	近接目視	
		1-2	伸縮装置	異常有	段差					近接目視	
		1-3	橋台背面土・踏み掛版	異常無						近接目視	
		1-4	任意記入								
上部構造	主桁等	2-1	主　桁	異常無						近接目視	
		2-2	横桁・対傾構・補剛材	対象物なし							
		2-3	任意記入								
上下部接続部	支承部	3-1	支　承	異常有	その他				写真⑥ひびわれ（P12-G2支承）	カメラ画像	
		3-2	アンカーボルト	対象物なし							
		3-3	沓座モルタル	対象物なし							
			台座コンクリート	異常無						カメラ画像	
		3-4	任意記入								
		3-5	任意記入								
		3-6	任意記入								
下部構造	橋脚・橋台・基礎等	4-1	橋脚（柱部）	異常無						近接目視	
			橋脚（梁部）	異常無						近接目視	
			橋脚（隅角部）	対象物なし							
		4-2	橋台（胸・竪・翼壁）	未確認							
		4-3	基礎	未確認							
		4-4	任意記入								
		4-5	任意記入								
その他	フェールセーフ	5-1	落橋防止構造	異常無						カメラ画像	
			横変位拘束構造	対象物なし							
	周辺地盤など	6-1	基礎周辺地盤	未確認							
			橋台周辺護岸	対象物なし							
		6-2	任意記入								
	その他	7-1	配水施設	未確認							
		7-2	添架物	未確認							
		7-3	任意記入								

被災度などの所見		
耐荷力に関する被災度	B　：　中被害	特記事項：
走行性に関する被災度	b　：　通行注意	特記事項：
応急調査の要否	要	特記事項：

その他特記事項があれば記載（所見、上記着目箇所以外の損傷状況、詳細調査の必要性、震災以外の損傷の有無など）

①所見：P12橋脚上の伸縮装置及び路面の段差は、2/13の地震により伸縮装置のフェイスプレートが接触したことにより生じたものである。段差が大きく早急な補修が必要と考える。
②上記着目箇所以外の損傷：なし（P12橋脚上）。
③詳細調査の必要性：なし。
④震災以外の損傷の有無：第三者被害が懸念される主桁のうき、剥離等が見られる(R1年度定期点検結果)。
⑤その他：大きな余震時には、遊間（桁間、伸縮装置フィンガー）や支承損傷（被覆ゴムのクラック）の追跡調査を行うこと。

図-1　緊急調査調書（その1）損傷記録

緊急調査　調書（その２）

記入例

使用した点検支援技術の使用条件　記録表

点検手法	カメラ画像	使用技術の名称	○○○○			カタログ番号	○○○○				
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件	天候	風速(m/s)	温度(℃)	照度(lx)		ＩＳＯ値	撮影焦点距離(mm)	撮影距離(m)		
		雨、雪、夜間以外	11m/s未満	-5～40℃	100lux以上		200	200mm	2m以下		
支承部・落橋防止構造	調査時の実測値	晴れ	1.4m	10℃	16000lux		200	200mm	2m		
	適合性チェック	○	○	○	○		○	○	○		

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号					
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件										
	調査時の実測値										
	適合性チェック										

図-2　緊急調査調書（その2）点検支援技術使用状況

記入例

応急調査　調書（その１）

※ 印刷範囲外のセル位置の変更を行うと橋梁情報が正しく読み込みできません。
※ 青色着色セルの位置を変更すると橋梁情報が正しく読み込みできません。

参考：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)Ver1.0
（平成24年2月）東北地方整備局道路部　国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室

橋梁名	○○高架橋（上）			橋梁管理番号	○○○○		橋梁ＩＤ	○○,○○			
路線名	国道○号			距離標　自	2.597	至		所在地	○○○○		
緊急輸送路の指定	一次	直近の健全度診断区分	Ⅱ	橋長(m)	371.3	形態		幅員(m)	9.54	道路管理者	○○地方整備局
上部構造形式	ポステン中空床版			下部構造形式	壁式橋脚（ＲＣ）			基礎形式		管理事務所	○○国道事務所
路下状況	市街地(民家・商店等)、道路(国道・県道等)、鉄道、河川、その他	代替路有無	有り	橋の重要度	B種の橋	占用物件	無し	適用基準	S55道示	架設年次	1994　（平成 6年）
直近定期点検年	2019	形態	ご道橋	直近補修年	○○○○			調査会社名・氏名	○○○○	出張所	○○○○
										点検・調査日時	○○○○
径間番号	13	全径間数	14	上部構造検査路	無し			下部構造検査路	無し	昇降設備	無し

※ 施設IDのクリックで橋梁位置をGoogleMap表示します（マクロ対応機種のみ動作可能）

※ 青色セル内は道路橋DB(xRoad)によるデータです。
※ DBに未入力のデータは表示されません。

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
0．橋梁全体					
0-1	路面 側面	落橋	無し		遠望目視
		上部構造の軸線のずれ	無し		遠望目視
		橋面の凹凸（cm）	有り100mm		近接目視
		流木の引っ掛かり	当該部材なし		
		その他			
1．路上					
1-1	照明施設 落下防護柵 高欄	亀裂	無し		近接目視
		破断	無し		近接目視
		変形・欠損	有り		近接目視
		その他			
1-2	伸縮装置	破断	無し	無し	近接目視
		遊間の異常	無し	無し	近接目視
		段差（cm）	無し	有り20mm	近接目視
		変形・欠損	無し	無し	近接目視
		その他			
1-3	橋台背面土 踏み掛版	沈下	無し	無し	近接目視
		流動	無し	無し	近接目視
		その他			
2．上部構造					
2-1	主桁 鋼、 PC、 RC、 その他	ひびわれ	無し		近接目視
		剥離・鉄筋露出	無し		近接目視
		変形・欠損	無し		近接目視
		うき	無し		近接目視
		鋼材変形	無し		近接目視
		リベット・ボルト脱落	無し		近接目視
		鋼材亀裂	当該部材なし		
		遊間の異常	無し		近接目視
		その他			
2-2	横桁 対傾構 補剛材	亀裂	当該部材なし		
		破断	当該部材なし		
		変形・欠損	当該部材なし		
		その他			

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
3．上下部接続部					
3-1	支承 ゴム、 鋼製、 ＢＰ、 ピン・ローラー ダンパー(耐震補強) その他	亀裂	無し	無し	カメラ画像
		破断	無し	無し	カメラ画像
		変形・欠損	無し	有り	カメラ画像
		沈下・移動・傾斜	無し	無し	カメラ画像
		支承部の機能障害	無し	無し	カメラ画像
		セットボルト破断	当該部材なし	当該部材なし	
		セットボルトゆるみ・脱落	当該部材なし	当該部材なし	
		セットボルト変形・欠損	当該部材なし	当該部材なし	
		サイドブロック破断	当該部材なし	当該部材なし	
		サイドブロック変形・欠損	当該部材なし	当該部材なし	
		各種取付ボルト破断	当該部材なし	当該部材なし	
		各種取付ボルトゆるみ・脱落	当該部材なし	当該部材なし	
		各種取付ボルト変形・欠損	当該部材なし	当該部材なし	
		その他	当該部材なし	当該部材なし	
3-2	アンカーボルト	亀裂	当該部材なし	当該部材なし	
		ゆるみ・脱落	当該部材なし	当該部材なし	
		破断	当該部材なし	当該部材なし	
		変形・欠損	当該部材なし	当該部材なし	
		その他			
3-3	沓座モルタル 沓座コンクリート 弾性ゴム	ひびわれ	無し	有り	カメラ画像
		剥離・鉄筋露出	無し	無し	カメラ画像
		変形・欠損	無し	無し	カメラ画像
		その他			

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
4．下部構造					
4-1	橋脚 柱部・壁部 梁部 隅角部・接合部	ひびわれ	無し	無し	近接目視
		剥離・鉄筋露出	無し	無し	近接目視
		うき	無し	無し	近接目視
		隅角部の亀裂	無し	無し	近接目視
		変形・欠損	無し	無し	近接目視
		沈下・移動・傾斜	無し	無し	近接目視
		その他			
4-2	橋台 胸壁 竪壁 翼壁	ひびわれ	未確認	未確認	
		剥離・鉄筋露出	未確認	未確認	
		うき	未確認	未確認	
		変形・欠損	未確認	未確認	
		沈下・移動・傾斜	未確認	未確認	
		その他			
4-3	基礎 杭 ケーソン	ひびわれ	未確認	未確認	
		沈下・移動・傾斜	未確認	未確認	
		洗掘	未確認	未確認	
		その他			

場所	着目箇所	損傷	有無 起点側	有無 終点側	点検手法
5．その他(フェールセー					
5-1	落橋防止システム 落橋防止構造 横変位拘束構造	亀裂	無し	無し	カメラ画像
		ゆるみ・脱落	無し	無し	カメラ画像
		破断	無し	無し	カメラ画像
		わびわれ	無し	無し	カメラ画像
		変形・欠損	無し	無し	カメラ画像
		その他			
6．その他(周辺地盤など)					
6-1	基礎周辺地盤 橋台周辺護岸	沈下	無し	無し	近接目視
		流動	無し	無し	近接目視
		その他			
7．その他					
7-1	配水施設 排水ます 配水管	破断	未確認	未確認	
		漏水・滞水	未確認	未確認	
		変形・欠損	未確認	未確認	
		その他			
7-2	添架物	亀裂	未確認	未確認	
		ゆるみ・脱落	未確認	未確認	
		破断	未確認	未確認	
		変形・欠損	未確認	未確認	
		その他			
8．浸水状況(津波や洪水)					

その他(所見、上記着目箇所直体の損傷状況、詳細調査の必要性、震災以外の損傷の有無、損傷と被災の相関、など)

被災度	耐荷力	B　：中被害	特記事項：
	走行性	b　：通行注意	特記事項：
詳細調査の要否		不要	特記事項：

凡例

注１：段差・凹凸は最大値(0を含む)を記載
注２：その他の場合は、具体の損傷状況を記載
注３：「8.浸水状況」欄には、津波や洪水による浸水状況を記載

図-3　応急調査調書（その1）損傷記録

記入例

応急調査　調書（その２）

損傷図

橋梁名	○○高架橋（上）	路線名	国道○号	径間番号	13

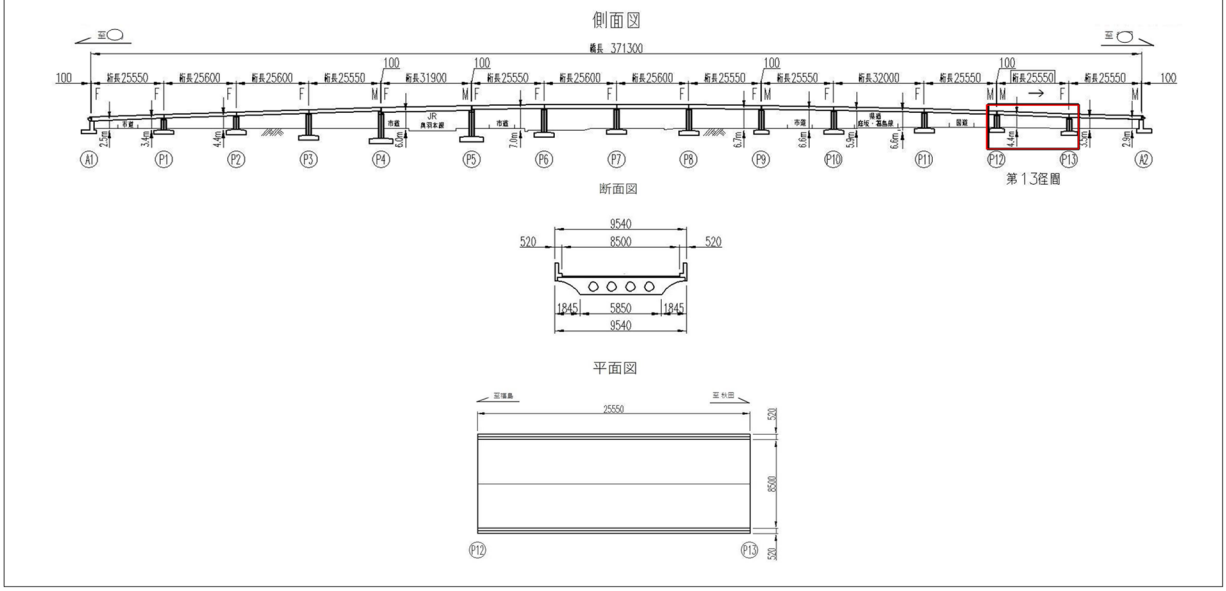


図-4　応急調査調書（その2）損傷図

応急調査　調書(その３)

記入例

損傷写真

橋梁名	○○高架橋（上）	路線名	国道○号	径間番号	13



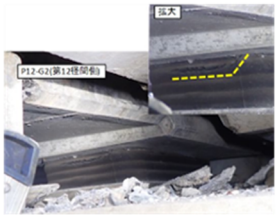
写真番号	1
部材位置	正面（起点側から）
メモ	・P12上の伸縮装置に関してフェイスプレートと橋面舗装に約100mmの段差がある。【走行性：b 通行注意】 ・応急復旧として、舗装すり付け済み。



写真番号	4
部材位置	P12上　G1支承
メモ	・支承上部に斜め方向ひびわれがある。【耐荷力：B 中被害】



写真番号	2
部材位置	正面（終点側から）
メモ	



写真番号	5
部材位置	P12上　G2支承
メモ	・支承本体にひびわれがある。【耐荷力：B 中被害】



写真番号	3
部材位置	側面（起点左側から）
メモ	

写真番号	
部材位置	
メモ	

注１：正面(起点側から)、正面(終点側から)、側面の３枚は、必須とする。　２：緊急点検においては、時間的余裕がなければ、側面は割愛してもよい。　３：メモ欄には、損傷状況と所見をできるだけ詳しく記載すること。

図-5　応急調査調書（その3）損傷写真

応急調査　調書(その4)

記入例

使用した点検支援技術の使用条件　記録表

点検手法	カメラ画像	使用した技術名称	○○○○		カタログ番号	○○○○						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件	天候	風速(m/s)		温度(℃)	照度(lx)	ＩＳＯ値	撮影焦点距離(mm)	撮影距離(m)			
		雨、雪、夜間以外	11m/s未満		-5～40℃	100lux以上	200	200mm	2m以下			
支承部・落橋防止構造	調査時の実測値	晴れ	1.4m		10℃	16000lux	200	200mm	2m			
	適合性チェック	○	○		○	○	○	○	○			

点検手法		使用した技術名称			カタログ番号							
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用した技術名称			カタログ番号							
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用した技術名称			カタログ番号							
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用した技術名称			カタログ番号							
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

図-6　応急調査調書（その4）点検支援技術使用状況

記入例

様式1

橋梁名・所在地・管理者名等

橋梁名	路線名	所在地	起点側	緯度 経度	○° ○′ ○″ ○° ○′ ○″	橋梁ID ○○.○○
○○高架橋（上） （フリガナ）○○コウカキョウノボリ	一般国道○号 新道	○○○○				
管理者名	定期点検実施年月日	路下条件	代替路の有無	自専道or一般道	緊急輸送道路	占用物件（名称）
○○地方整備局○○国道事務所○○国道維持出張所	2019.4.23	○○本線,県道○○線	有	一般道	一次	

部材単位の診断（各部材毎に最も厳しい健全性の診断結果を記入）						定期点検者	
定期点検時に記録					応急措置後に記録		
部材名		判定区分 （Ⅰ～Ⅳ）	変状の種類 （Ⅱ以上の場合に記載）	備考（写真番号、位置等が分かるように記載）	応急措置後の判定区分	応急措置内容	応急措置及び判定実施年月日
上部構造	主桁	Ⅱ	その他（うき）	写真1，主桁01			
	横桁	Ⅰ					
	床版	Ⅰ					
下部構造		Ⅱ	その他（剥離・鉄筋露出）	写真4，胸壁01			
支承部		Ⅰ					
その他		Ⅱ	その他（ゆるみ・脱落）	写真6，防護柵0101			

道路橋毎の健全性の診断（判定区分Ⅰ～Ⅳ）

定期点検時に記録	
（判定区分）	（所見等）
Ⅱ	主桁の端部において、ひびわれを伴うき及び鉄筋露出があり、予防保全の観点から補修等が必要。

全景写真（起点側、終点側を記載すること）

架設年次	橋長	幅員
1994年	371m	9.54m

橋梁形式

4径間連続PCポステン床版橋(中空),単純PCポステンT桁橋,4径間連続PCポステン床版橋(中空),3径間連続PCポステン床版橋(中空),2径間連続PCポステン床版橋(中空)

場所打杭基礎(深礎杭基礎を含む)15基

逆T式橋台2基,壁式橋脚(RC)13基

起点



終点

※架設年次が不明の場合は「不明」と記入する。

図-7　最新の定期点検調書（様式１）

記入例

様式2

状況写真（損傷状況）
○部材単位の判定区分がⅡ、Ⅲ又はⅣの場合には、直接関連する不具合の写真を記載のこと。
○写真は、不具合の程度が分かるように添付すること。

上部構造（ 主桁 ）【判定区分： Ⅱ 】	上部構造（ 横桁 ）【判定区分： Ⅰ 】
写真1，主桁，部材番号01，要素番号0101，径間4-0，その他（うき） 	
上部構造（ 床版 ）【判定区分： Ⅰ 】	下部構造【判定区分： Ⅱ 】
	写真4，胸壁，部材番号01，要素番号0101，径間1-0，その他（剥離・鉄筋露出） 

図-8　最新の定期点検調書（様式２）

記入例

様式2

状況写真（損傷状況）
○部材単位の判定区分がⅡ、Ⅲ又はⅣの場合には、直接関連する不具合の写真を記載のこと。
○写真は、不具合の程度が分かるように添付すること。

支承部【判定区分：　Ⅰ　】	その他【判定区分：　Ⅱ　】
	写真6，防護柵，部材番号，要素番号0101，径間1-0，その他（ゆるみ・脱落）
【判定区分：　　】	【判定区分：　　】

図-9　最新の定期点検調書（様式２）

広域被災調査（様式－０）

広域被災調査(様式－０)

※ 橋梁名をクリックすると当該橋梁の緊急調査調書がExcelファイルで開きます。

No	施設ID （緯度，経度） （記載は任意）	橋梁名	橋長	路線名	道路管理者	現場状況	対応措置の案	情報取得時刻 （年/月/日 hh:mm）	取得者	点検手法

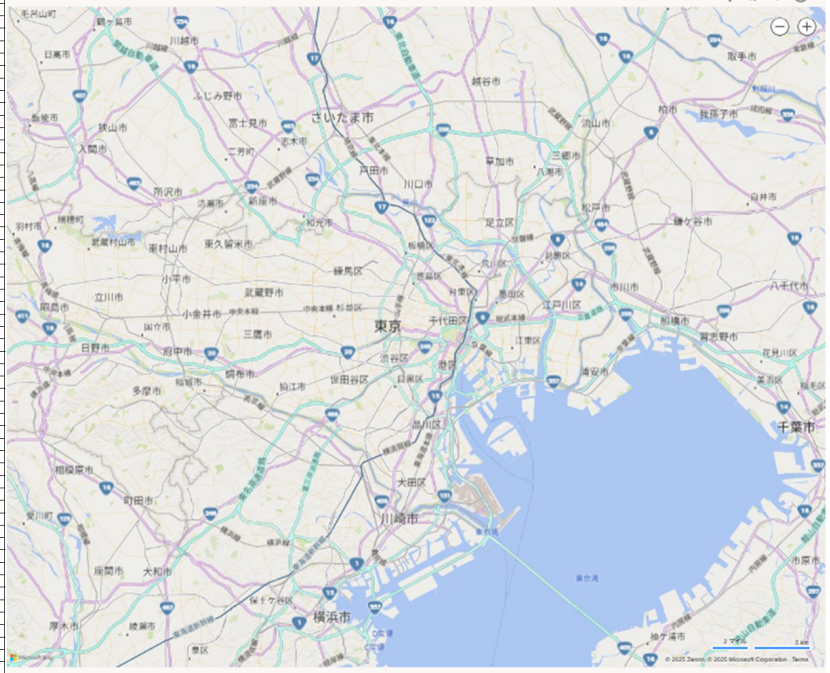
調査対象範囲地名

自：

至：

広域被災調査橋梁 位置図

※1 左表の「緯度経度」+「座標値」を範囲選択して右の❶ボタンをクリックすると当該座標位置にマーカーが表示されます
※2 Bing地図の仕様によりマップに表示されるマーカーは左表No欄の1～100橋までとなります



特定の橋梁の位置図を表示するには、左表の「施設ID」欄のうち特定したい橋梁の値を下欄にコピペし、
マウスで下欄全体を範囲選択の上、図内右上にある「❶ボタン」をクリックする

施設ID（緯度,経度）

緊急調査　調書（その１）

※ 施設IDのクリックで橋梁位置をGoogleMap表示します（マクロ対応機種のみ動作可能）

※ 印刷範囲外のセル位置の変更を行うと橋梁情報が正しく読み込みできません。
※ 青色セルの位置を変更すると橋梁情報が正しく読み込みできません。

参考：　道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案）Ver1.0　（平成24年2月）東北地方整備局道路部　国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室

施設ＩＤ		調査日時		調査会社名・氏名		道路管理者		事務所		※ 青色セル内の情報は道路橋DB(xRoad)によるデータです。			
橋梁名		フリガナ		路線名		所在地		橋長(m)		幅員(m)		径間数	代替路の有無
上部構造形式		下部構造形式		基礎形式		形態		路下状況					緊急輸送路
適用設計基準		橋の重要度		直近点検年		直近の健全度診断区分		架設年次				占用物件	
緊急措置の提案		措置の提案理由											

上部構造検査路		下部構造検査路	
写真①	写真 できるだけ全景が入るよう側面から撮影した写真を添付する。	写真②	写真 できるだけ路面の異常がわかるような角度から撮影した写真を添付する。
写真③	写真 代表的な損傷写真を添付する。	写真④	写真 代表的な損傷写真を添付する。
写真⑤	写真 代表的な損傷写真を添付する。	写真⑥	写真 代表的な損傷写真を添付する。
写真⑦	写真 代表的な損傷写真を添付する。	写真⑧	写真 代表的な損傷写真を添付する。

構成要素			部位・部材	異常の有無	現象				備考(損傷位置や変状値等を任意記入)	点検手法	
全体		0-1	路面・側面								
路上	路面	1-1	照明施設・落下防止柵・高欄								
		1-2	伸縮装置								
		1-3	橋台背面土・踏み掛版								
		1-4	任意記入								
上部構造	主桁等	2-1	主　　桁								
		2-2	横桁・対傾構・補剛材								
		2-3	任意記入								
上下部接続部	支承部	3-1	支　　承								
		3-2	アンカーボルト								
		3-3	沓座モルタル								
			台座コンクリート								
		3-4	任意記入								
		3-5	任意記入								
		3-6	任意記入								
下部構造	橋脚・橋台・基礎等	4-1	橋脚（柱部）								
			橋脚（梁部）								
			橋脚（隅角部）								
		4-2	橋台（胸・竪・翼壁）								
		4-3	基礎								
		4-4	任意記入								
		4-5	任意記入								
その他	フェールセーフ	5-1	落橋防止構造								
			横変位拘束構造								
	周辺地盤など	6-1	基礎周辺地盤								
			橋台周辺護岸								
		6-2	任意記入								
	その他	7-1	配水施設								
		7-2	添架物								
		7-3	任意記入								

被災度などの所見			その他特記事項があれば記載（所見、上記着目箇所以外の損傷状況、詳細調査の必要性、震災以外の損傷の有無など）
耐荷力に関する被災度		特記事項：	①所見： ②上記着目箇所以外の損傷： ③詳細調査の必要性： ④震災以外の損傷の有無： ⑤その他：
走行性に関する被災度		特記事項：	
応急調査の要否		特記事項：	

緊急調査　調書（その２）

使用した点検支援技術の使用条件　記録表

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

点検手法		使用技術の名称				カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の(精度保証)使用環境条件											
	調査時の実測値											
	適合性チェック											

応急調査　調書(その１)

※ 印刷範囲外のセル位置の変更を行うと橋梁情報が正しく読み込みできません。
※ 青色着色セルの位置を変更すると橋梁情報が正しく読み込みできません。

参考：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)Ver1.0
（平成24年2月)東北地方整備局道路部　国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室

橋梁名		橋梁管理番号			施設ＩＤ				
路線名		距離標　自		至		所在地			
緊急輸送路の指定		直近の健全度診断区分		橋長(m)		形態		幅員(m)		道路管理者	
上部構造形式				下部構造形式				基礎形式		管理事務所	
路下状況		代替路有無		橋の重要度		占用物件		適用基準		架設年次		出張所	
直近定期点検年		形態		直近補修年				調査会社名・氏名				点検・調査日時	

※ 施設IDのクリックで橋梁位置をGoogleMap表示します
（マクロ対応機種のみ動作可能）

※ 青色セル内は道路橋DB(xRoad)によるデータです。
※ DBに未入力のデータは表示されません。

径間番号		全径間数		上部構造検査路		下部構造検査路		昇降設備	

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
0．橋梁全体					
0-1	路面 側面	落橋			
		上部構造の軸線のずれ			
		橋面の凹凸（cm）			
		流木の引っ掛かり			
		その他			
1．路上					
1-1	照明施設 落下防護柵 高欄	亀裂			
		破断			
		変形・欠損			
		その他			
1-2	伸縮装置	破断			
		遊間の異常			
		段差（cm）			
		変形・欠損			
		その他			
1-3	橋台背面土 踏み掛版	沈下			
		流動			
		その他			
2．上部構造					
2-1	主桁 鋼、 PC、 RC、 その他	ひびわれ			
		剥離・鉄筋露出			
		変形・欠損			
		うき			
		鋼材変形			
		リベット・ボルト脱落			
		鋼材亀裂			
		遊間の異常			
		その他			
2-2	横桁 対傾構 補剛材	亀裂			
		破断			
		変形・欠損			
		その他			

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
3．上下部接続部					
3-1	支承 ゴム、 鋼製、 ＢＰ、 ピン・ローラー ダンパー(耐震補強) その他	亀裂			
		破断			
		変形・欠損			
		沈下・移動・傾斜			
		支承部の機能障害			
		セットボルト破断			
		セットボルトゆるみ・脱落			
		セットボルト変形・欠損			
		サイドブロック破断			
		サイドブロック変形・欠損			
		各種取付ボルト破断			
		各種取付ボルトゆるみ・脱落			
		各種取付ボルト変形・欠損			
		その他			
3-2	アンカーボルト	亀裂			
		ゆるみ・脱落			
		破断			
		変形・欠損			
		その他			
3-3	畜座モルタル 台座コンクリート 弾性ゴム	ひびわれ			
		剥離・鉄筋露出			
		変形・欠損			
		その他			

場所	着目箇所	損傷	損傷の有無 起点側	損傷の有無 終点側	点検手法
4．下部構造					
4-1	橋脚 柱部・壁部 梁部 隅角部・接合部	ひびわれ			
		剥離・鉄筋露出			
		うき			
		隅角部の亀裂			
		変形・欠損			
		沈下・移動・傾斜			
		その他			
4-2	橋台 胸壁 竪壁 翼壁	ひびわれ			
		剥離・鉄筋露出			
		うき			
		変形・欠損			
		沈下・移動・傾斜			
		その他			
4-3	基礎 杭 ケーソン	ひびわれ			
		沈下・移動・傾斜			
		洗掘			
		その他			

場所	着目箇所	損傷	有無 起点側	有無 終点側	点検手法
5．その他(フェールセーフ					
5-1	落橋防止システム 落橋防止構造 横変位拘束構造	亀裂			
		ゆるみ・脱落			
		破断			
		わびわれ			
		変形・欠損			
		その他			
6．その他(周辺地盤など)					
6-1	基礎周辺地盤 橋台周辺護岸	沈下			
		流動			
		その他			
7．その他					
7-1	配水施設 排水ます 配水管	破断			
		漏水・滞水			
		変形・欠損			
		その他			
7-2	添架物	亀裂			
		ゆるみ・脱落			
		破断			
		変形・欠損			
		その他			
8．浸水状況(津波や洪水)					

その他(所見。上記着目箇所遺体の損傷状況、詳細調査の必要性、震災以外の損傷の有無、損傷と被災の相関、など)

被災度	耐荷力	**特記事項：**
	走行性	**特記事項：**
詳細調査の要否		**特記事項：**

凡例

注１：段差・凹凸は最大値(0を含む)を記載
注２：その他の場合は、具体の損傷状況を記載
注３：「8.浸水状況」欄には、津波や洪水による浸水状況を記載

応急調査　調書(その２)

損傷図					
橋梁名		路線名		径間番号	

応急調査　調書（その３）

損傷写真						
橋梁名		路線名		径間番号		
				写真番号		写真番号
				部材位置		部材位置
				メモ		メモ
				写真番号		写真番号
				部材位置		部材位置
				メモ		メモ
				写真番号		写真番号
				部材位置		部材位置
				メモ		メモ

注１：正面（起点側から）、正面（終点側から）、側面の３枚は、必須とする。　２：緊急点検においては、時間的余裕がなければ、側面は割愛してもよい。　３：メモ欄には、損傷状況と所見をできるだけ詳しく記載すること。

応急調査　調書（その4）

使用した点検支援技術の使用条件　記録表

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

点検手法		使用した技術名称		カタログ番号						
支援技術により計測した部位・項目：	開発者推奨の（精度保証）使用環境条件									
	調査時の実測値									
	適合性チェック									

様式1

橋梁名・所在地・管理者名等

橋梁名	路線名	所在地	起点側	緯度 経度		橋梁ID

管理者名	定期点検実施年月日	路下条件	代替路の有無	自専道or一般道	緊急輸送道路	占用物件（名称）

部材単位の診断（各部材毎に最も厳しい健全性の診断結果を記入）　定期点検者

定期点検時に記録					応急措置後に記録		
部材名		判定区分（Ⅰ～Ⅳ）	変状の種類（Ⅱ以上の場合に記載）	備考（写真番号、位置等が分かるように記載）	応急措置後の判定区分	応急措置内容	応急措置及び判定実施年月日
上部構造	主桁						
	横桁						
	床版						
下部構造							
支承部							
その他							

道路橋毎の健全性の診断（判定区分Ⅰ～Ⅳ）

定期点検時に記録	
（判定区分）	（所見等）

全景写真（起点側、終点側を記載すること）

架設年次	橋長	幅員

橋梁形式

※架設年次が不明の場合は「不明」と記入する。

様式2

状況写真（損傷状況）

○部材単位の判定区分がⅡ、Ⅲ又はⅣの場合には、直接関連する不具合の写真を記載のこと。

○写真は、不具合の程度が分かるように添付すること。

上部構造（　）【判定区分：　　】	上部構造（　）【判定区分：　　】
下部構造（　）【判定区分：　　】	下部構造（　）【判定区分：　　】

付録2　支承部の地震時損傷を再現する載荷実験　設計計算書

1．CASE1：セットボルト01

1.1　概要

・実験対象　　：セットボルト_4本（呼び径：M20　強度区分：4.6）
・治具の鋼材　：SS400（想定）
・安全率　　：載荷対象の部材強度はJIS記載値の2.0倍として計算
　　治具の強度は基準値の0.5倍として計算
・参考図書　　：ゴム支承の鋼部材の設計標準（案）（㈱日本支承協会，ゴム支承協会，H16.4）
　　道路橋示方書・同解説（㈳日本道路協会，H29.11）

1.2　材料諸元

表-1.1　取付ボルトの諸元

ボルト呼び径	谷径 (mm)	本数	谷径断面積 (mm^2/本)	強度区分	せん断強さ (N/mm^2)
M20	17.294	4	234.9	4.8	231

※せん断強さは引張強度の1/√3倍として算出

表-1.2　六角ボルトの特性値（N/mm^2）

応力の種類	JISB1051による強度区分		
	4.8	8.8	10.9
引張・圧縮降伏	320	660	940
せん断降伏	185	380	540
引張強度	400	830	1040
支圧	240	660	940

表-1.3　取付治具の特性値（N/mm2）

応力の種類	鋼材の板厚（mm）	鋼種
		SS400
引張降伏 圧縮降伏	t≦40	235
	40≦t＜75	215
	75≦t＜100	
引張強度	—	400～510
せん断降伏	t≦40	135
	40≦t＜75	125
	75≦t＜100	
支圧強度	t≦40	235
	40≦t＜75	215
	75≦t＜100	

表-1.4　ナットの保証荷重値（N/mm2）

JISB1052による強度区分			5	8	10
ナットの強度区分			4.8	8.8	10.9
保証荷重値	M20	N	154400	225400	259700
		N/mm^2	657	960	1106

1.3　設計計算

（1）載荷基準値の算出

$$F' = \tau_y \times m \times A_s$$
$$= 185 \times 4 \times 234.9$$
$$= 173826 \ N$$
$$\fallingdotseq 180 \ kN$$

ここに，F'　：載荷基準値
　　τ_y　：ボルトのせん断降伏強度（N/mm^2）
　　m　：ボルトの本数
　　A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）

（2）破断時の想定荷重の算出

$$F = \tau_u \times m \times A_s \times f_1$$
$$= 231 \times 4 \times 234.9 \times 2$$
$$= 434095 \ (N)$$
$$\leqq 440 \ (kN)$$

ここに，F　：破断時の想定荷重
τ_u　：ボルトのせん断強さ（N/mm^2）
m　：ボルトの本数
A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）
f_1　：載荷対象の耐荷力に乗じる安全率（2.0）

（3）治具の耐荷力の照査

1)　ボルト孔側面の支圧応力度

$$ab = \frac{F}{b \times L \times m} = \frac{440000}{11\pi \times 55 \times 4} = 57.9 \ (N/mm2)$$

$$aba = \tau_u \times f_2 = 235 \times 0.5 = 117 \geqq 57.9 \quad \cdots \text{OK} \quad (\text{安全率：} 2.03)$$

ここに，ab　：ボルト孔側面に作用する支圧応力度（N/mm2）
aba　：安全率を考慮した治具の支圧強度（N/mm2）
F　：破断時の想定荷重（N）
b　：孔の半円の弧の長さ（mm）
L　：ボルトの首下長さ（mm）
m　：ボルトの本数
τ_a　：ボルトの支圧強度（N/mm^2）
f_2　：治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）

2）ボルトの必要ねじ込み長の照査

ⅰ）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$$LB_1 = f \times (dB - k2 \times p) / 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$$
$$= 2 \times (20 - 1.08253 \times 2.5) / 3 \times 400 / 231 + 2 \times 2.5$$
$$= 25.0 \ mm$$

ⅱ）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$$LB_2 = 2 \times f \times (dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB) \times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$$
$$= 2 \times 2 \times (20 - 1.08253 \times 2.5)^2 / (7 \times 20) \times 400 / 135 + 2$$
$$= 30.3 \ mm \qquad \times 2.5$$

ここに，f　：安全率　2.0
dB　：ボルトの外径（呼び径）　20
p　：ネジ山のピッチ　2.5
k2　：雌ねじの7内径決定のための定数　1.08253

σ_u	： ボルトの最大引張応力度	400	
τ_u	： ボルトの許容せん断応力度	231	
τ_{Nu}	： 雌ねじ部材の許容せん断応力度	135	

iii）必要ねじ込み長の下限値

LB' ＝ 0.8 × dB ＝ 16 mm

iv）必要ねじ込み長

LB ≧ LB1及びLB2 ≧ LB' ∴ LB ＝ 30.3 mm

＝ 35.0 mm ※5㎜切り上げ

3）治具の応力度照査 ※SS400を想定

ｉ）軸方向圧縮力を受ける部材（治具全体の照査）

ブラケット幅に含まれるリブは、載荷装置底径（φ2= 210 mm）を有効幅と考えると2本有効とみなせる。

ベースプレートの有効断面は、補剛材取付け部から両側それぞれBase板厚の12倍までとする。

2 × 12 × t_2 × 0.1 ＋ 10

＝ 2 × 12 × 22.0 × 0.1 ＋ 10 ＝ 62.8 cm ＜ 100.00 cm ∴ 62.8 cm

ここに、

t_1	： リブの板厚	16	mm
t_2	： ベースプレート厚	22	mm
b_1	： リブの板厚の自由突出幅	128	mm
φ_2	： 載荷装置底径	210	mm
σ_{yk}	： 鋼材の降伏強度	235	N/mm^2
E	： 鋼材のヤング係数	200000	N/mm^2

			A (cm^2)	y (cm)	Ay (cm^3)	Ay^2 (cm^4)	I_0 (cm^4)
1 -Base	628 *	22	138.16	13.90	1920.42	26694	56
2 -RIB	128 *	16	40.96	6.40	262.14	1678	559
	ΣA＝		179.1		2182.6	28372	615

＞ 1.7 * 40.96 ＝ 69.6 cm^2

断面の図心位置 e ＝ ΣAy / ΣA ＝ 12.2 cm

断面二次モーメント I ＝ ΣI_0 ＋ ΣAy^2 － ΣAe^2 ＝ 2330 cm^4

有効断面積 Ac ＝ 69.6 cm^2

有効座屈長 l ＝ 51.3 * 1.0 ＝ 51.3 cm

断面二次半径 r ＝ $\sqrt{I / Ac}$ ＝ 5.8 cm

細長比 l/r ＝ 51.3 / 5.8 ＝ 8.8

細長比パラメータ $1/\pi\times(\sigma_{yk}/E)^{0.5}\times l/r$ ＝ 0.10

ρcrg ＝ 1.00 （λ＜0.2）

ρcrl ＝ 1.00

$\sigma_{cud} = \xi_1 \times \xi_2 \times \Phi_u \times \rho_{crg} \times \rho_{crl} \times \sigma_{yk}$

＝ 0.9 × 1.0 × 0.85 × 1.00 × 1.00 × 235

179.8 N/mm^2

ξ_1	ξ_2	Φ_u
0.9	1.0	0.85

N ＝ F/ΣA ＝ 440000 / 17910 ＝ 24.6 N/mm^2

Na ＝ 179.8 N/mm^2 ≧ 24.6 N/mm^2 ・・・ OK （ 安全率： 7.31 ）

2．CASE2：セットボルト02

2.1　概要

・実験対象　　：セットボルト_4本（呼び径：M20　強度区分：4.6）
・治具の鋼材　：SS400（想定）
・安全率　　：載荷対象の部材強度はJIS記載値の2.0倍として計算
　　治具の強度は基準値の0.5倍として計算
・参考図書　　：ゴム支承の鋼部材の設計標準（案）（㈱日本支承協会，ゴム支承協会，H16.4）
　　道路橋示方書・同解説（㈳日本道路協会，H29.11）

2.2　材料諸元

表-2.1　取付ボルトの諸元

ボルト呼び径	谷径 (mm)	本数	谷径断面積 (mm^2/本)	強度区分	せん断強さ (N/mm^2)
M20	17.294	4	234.9	4.8	231
M30	26.211	3	539.6	10.9	601

※せん断強さは引張強度の1/√3倍として算出

表-2.2　六角ボルトの特性値（N/mm^2）

応力の種類	JISB1051による強度区分		
	4.8	8.8	10.9
引張・圧縮降伏	320	660	940
せん断降伏	185	380	540
引張強度	400	830	1040
支圧	240	660	940

表-2.3　取付治具の特性値（N/mm2）

応力の種類	鋼材の板厚（mm）	鋼種
		SS400
引張降伏 圧縮降伏	t≦40	235
	40≦t＜75	215
	75≦t＜100	
引張強度	—	400～510
せん断降伏	t≦40	135
	40≦t＜75	125
	75≦t＜100	
支圧強度	t≦40	235
	40≦t＜75	215
	75≦t＜100	

表-2.4　ナットの保証荷重値（N/mm2）

JISB1052による強度区分			5	8	10
ナットの強度区分			4.8	8.8	10.9
保証荷重値	M20	N	154400	225400	259700
		N/mm^2	657	960	1106
	M30	N	353400	516100	594700
		N/mm^2	655	956	1102

2.3　設計計算

（1）載荷基準値の算出

載荷荷重

F' ＝　220　kN
θ ＝　36　°
R' ＝　F'sinθ　＝　129.4　(kN)
H' ＝　F'cosθ　＝　178.0　(kN)

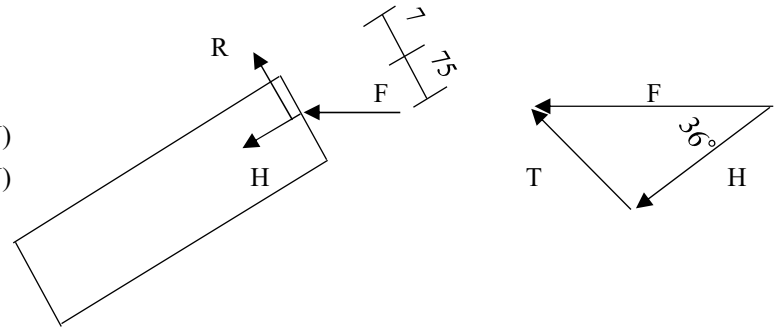


図-2.1　概要図

ｉ）斜面に沿った方向におけるボルトの降伏荷重

$H' = \tau_y \times m \times A_s$

$= 178 \times 4 \times 234.9$

$= 167249 \ N$

$\fallingdotseq 170 \ kN$

$F' = H' / \cos\theta$

$= 170 / \cos 36°$

$= 210.1316$

$\fallingdotseq 220 \ kN$

ⅱ）斜面に垂直な方向におけるボルトの降伏荷重

$R' = \sigma_y \times m \times A_s$

$= 320 \times 4 \times 234.9$

$= 300672 \ N$

$\fallingdotseq 310 \ kN$

$F' = R' / \sin\theta$

$= 310 / \sin 36°$

$= 289.2213$

$\fallingdotseq 290 \ kN$

$\therefore F' = 220 \ kN$

ここに，　F'　：載荷基準値

H'　：ボルトのせん断降伏時の斜面に沿った方向への荷重値(kN)

R'　：ボルトの引張降伏時の斜面に垂直な方向への荷重値(kN)

τ_y　：ボルトのせん断降伏強度（N/mm^2）

σ_y　：ボルトの引張降伏強度（N/mm^2）

m　：ボルトの本数

A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）

（2）破断時の想定荷重の算出

1）ボルトのせん断応力度

$F_H = \tau_u \times m \times A_s \times f_1$

$= 231 \times 4 \times 234.9 \times 2$

$= 434100 \ N$

$F = F_H / \cos\theta$

$= 434100 / \cos 36°$

$= 536600 \ N$

$\fallingdotseq 540 \ kN$　　・・・破断時の想定荷重

このとき

$F_R = F \times \sin\theta$

$= 540 \times \sin 36°$

$= 318 \ kN$

2）ボルトの引張応力度

・引張方向の成分

σ_R ＝ F_R /(m × A_s) × 1000

＝ 318 /(4 × 234.9)× 1000

＝ 338.4 N/mm^2

・せん断方向の成分

断面計算より

中立軸： 71.5 mm

σ_H ＝ 150.8 N/mm^2

σ_t ＝ σ_R ＋ σ_H

＝ 338.4 ＋ 150.8

＝ 489.2 N/mm^2

σ_u × f_1 ＝ 400.0 × 2

＝ 800.0 N/mm^2

489.2 N/mm^2 ≦ 800.0 N/mm^2 (許容値以下： 62.00%)

∴ ボルトのせん断破壊が先に生じるため

F ＝ 540 kN

ここに， F ： 破断時の想定荷重

F_H ： 破断時の想定荷重の斜面に沿った方向への成分

τ_u ： ボルトのせん断強さ（N/mm^2）

m ： ボルトの本数

A_s ： ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）

f_1 ： 載荷対象の耐荷力に乗じる安全率（2.0）

F_R ： 破断時の想定荷重の斜面に垂直な方向への成分

σ_R ： F_Rの斜面に垂直な方向の成分

σ_H ： F_Rの斜面に沿った方向の成分

σ_t ： σ_R ＋ σ_H

σ_u ： ボルトの引張応力度（N/mm^2）

（3）治具の耐荷力の照査

1）ボルト側面の支圧応力度

ab ＝ F_H /(b × e)

＝ 434100 /(57 × 109)

＝ 69.9 N/mm^2

aba ＝ τ_a × f_2 ＝ 235 × 0.5 ＝ 117.5 N/mm^2 ≧ 69.9 N/mm^2

(安全率： 1.69)

ここに， ab ： ボルト孔側面に作用する支圧応力度（N/mm2）

aba ： 安全率を考慮した治具の支圧強度（N/mm2）

τ_a ： ボルトの支圧強度（N/mm^2）

f_2 ： 治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）

b,e ： ボルト1本あたりの支圧面積の諸元

2）ボルトの必要ねじ込み長の照査

ⅰ）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times (dB - k2 \times p) / 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$

$= 2 \times (20 - 1.08253 \times 2.5) / 3 \times 400 / 231 + 2 \times 2.5$

$= 25.0$ mm

ⅱ）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times (dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB) \times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$

$= 2 \times 2 \times (20 - 1.08253 \times 2.5)^2 / (7 \times 20) \times 400 / 125 + 2 \times 2.5$

$= 32.3$ mm

ここに，

f	：	安全率	2.0
dB	：	ボルトの外径（呼び径）	20
p	：	ネジ山のピッチ	2.5
k2	：	雌ねじの7内径決定のための定数	1.08253
σ_u	：	ボルトの最大引張応力度	400
τ_u	：	ボルトの許容せん断応力度	231
τ_{Nu}	：	雌ねじ部材の許容せん断応力度	125

ⅲ）必要ねじ込み長の下限値

$LB' = 0.8 \times dB = 16$ mm

ⅳ）必要ねじ込み長

$LB \geqq$ LB1及びLB2 $\geqq LB'$ ∴ $LB = 32.3$ mm

$= 35.0$ mm ※5㎜切り上げ

3）取付ボルトの応力度照査（ジャッキ補助治具_M30）

ⅰ）ボルトのせん断応力度

$\tau = F_R / (m' \times A_s') \times 1000$

$= 318 / (3 \times 539.6) \times 1000$

$= 196.4$ N/mm^2

$\tau_{ua} = \tau_u \times f_2 = 601 \times 0.5 = 300.5$ N/mm^2 $\geqq$ 196.4 N/mm^2

(安全率： 1.54)

ⅱ）ボルト側面の支圧応力度

$ab = F_R / (b \times e) \times 1000$

$= 318 / (60 \times 165) \times 1000$

$= 32.1$ N/mm^2

$aba = \tau_a \times f_2 = 215 \times 0.5 = 107.5$ N/mm^2 $\geqq$ 32.1 N/mm^2

(安全率： 3.35)

ここに，

F_R	：	破断時の想定荷重の斜面に垂直な方向への成分
m'	：	ボルトの本数
A_s'	：	ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）
τ_{ua}	：	安全率を考慮したボルトのせん断強さ（N/mm2）
f_2	：	治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）
ab	：	ボルト孔側面に作用する支圧応力度（N/mm2）
b,e	：	ボルト1本あたりの支圧面積の諸元
aba	：	安全率を考慮した治具の支圧強度（N/mm2）

iii）ボルトの必要ねじ込み長の照査

a）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times (dB - k2 \times p) / 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$

$= 1.05 \times (30 - 1.08253 \times 3.5) / 3 \times 940 / 540 + 2 \times 3.5$

$= 23.0$ mm

b）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times (dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB) \times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$

$= 2 \times 1.05 \times (30 - 1.08253 \times 3.5)^2 / (7 \times 30) \times 940 / 125 + 2 \times 3.5$

$= 58.7$ mm

ここに，

f	：	安全率	1.05　※安全余裕はボルト耐力で考慮
dB	：	ボルトの外径（呼び径）	30
p	：	ネジ山のピッチ	3.5
k2	：	雌ねじの7内径決定のための定数	1.08253
σ_u	：	ボルトの最大引張応力度	940
τ_u	：	ボルトの許容せん断応力度	540
τ_{Nu}	：	雌ねじ部材の許容せん断応力度	125

c）必要ねじ込み長の下限値

$LB' = 0.8 \times dB = 24$ mm

d）必要ねじ込み長

$LB \geqq LB1$及び$LB2 \geqq LB'$　　$\therefore LB = 58.7$ mm

$= 60.0$ mm　※5㎜切り上げ

4）治具の応力度照査　※SS400を想定

ｉ）軸方向圧縮力を受ける部材（治具全体の照査）

※CASE1と同部材を使用し、治具に対する水平方向の作用力がCASE1以下であるため省略

・想定荷重

CASE1：　440　kN　＜　CASE2：　540　kN

ⅱ）曲げモーメントを受ける部材（治具全体の照査)

a）圧縮縁より1列目のボルト位置での治具の全断面に対して照査

l_1　：　作用力の鉛直成分における作用位置から照査位置までのアーム長　（　475.0　mm)

l_2　：　作用力の水平成分における作用位置から照査位置までのアーム長　（　75.0　mm)

作用力の鉛直成分による曲げモーメント

$M_R = F_R \times l_1 = 318 \times 0.475 = 151.05$ kN・m

作用力の水平成分による曲げモーメント

M_H ＝ F_H × l_2 ＝ 434 × 0.075 ＝ 32.55 kN・m

			A (cm^2)	y (cm)	Ay (cm^3)	Ay^2 (cm^4)	I_0 (cm^4)
4 -PL	150 *	16	96.00	15.80	1516.80	23965	20
1 -Base	1000 *	22	220.00	1.10	242.00	266	89
8 -RIB	128 *	16	163.84	8.60	1409.02	12118	2237
		ΣA＝	479.8		3167.8	36349	2346

＞ 1.7 * 163.84 ＝ 278.5 cm^2

断面の図心位置 e ＝ ΣAy / ΣA ＝ 6.6 cm

断面二次モーメント I ＝ ΣI_0 ＋ ΣAy^2 － ΣAe^2 ＝ 17795 cm^4

中立軸との距離 l_1 ＝ 84.0 mm

断面係数 Z ＝ I / l_1 ＝ 17795.0 × 10^4 / 84.0 ＝ 2118452 mm^3

降伏強度の特性値 σ_{yk} ＝ 235 N/mm^2

曲げ引張応力度 σ_{tud} ＝ ＝ ξ_1 × ξ_2 × Φ_{ut} × σ_{yk} ＝ 179.8 N/mm^2

ξ_1	ξ_2	Φ_{ut}
0.9	1.0	0.85

曲げ応力

σ ＝(M_R ＋ M_H)/ Z ＝(151050000 ＋ 32550000)/ 2118452 ＝ 86.7 N/mm^2

σtud × f_2 ＝ 179.8 × 0.5 ＝ 89.9 N/mm^2 ≧ 86.7 N/mm^2

(安全率： 1.04)

b）圧縮縁より2列目のボルト位置での治具の全断面に対して照査

l_1 ： 作用力の鉛直成分における作用位置から照査位置までのアーム長 (275.0 mm)

l_2 ： 作用力の水平成分における作用位置から照査位置までのアーム長 (75.0 mm)

作用力の鉛直成分による曲げモーメント

M_R ＝ F_R × l_1 ＝ 318 × 0.275 ＝ 87.45 kN・m

作用力の水平成分による曲げモーメント

M_H ＝ F_H × l_2 ＝ 434 × 0.075 ＝ 32.55 kN・m

			A (cm^2)	y (cm)	Ay (cm^3)	Ay^2 (cm^4)	I_0 (cm^4)
4 -PL	100 *	16	64.00	15.80	1011.20	15977	14
1 -Base	1000 *	22	220.00	1.10	242.00	266	89
8 -RIB	128 *	16	163.84	8.60	1409.02	12118	2237
		ΣA＝	447.8		2662.2	28361	2340

＞ 1.7 * 163.84 ＝ 278.5 cm^2

断面の図心位置 e ＝ ΣAy / ΣA ＝ 5.9 cm

断面二次モーメント I ＝ ΣI_0 ＋ ΣAy^2 － ΣAe^2 ＝ 15113 cm^4

中立軸との距離 l_1 ＝ 84.0 mm

断面係数 Z ＝ I / l_1 ＝ 15113.0 × 10^4 / 84.0 ＝ 1799167 mm^3

降伏強度の特性値 σ_{yk} ＝ 235 N/mm^2

曲げ引張応力度 σ_{tud} ＝ ＝ ξ_1 × ξ_2 × Φ_{ut} × σ_{yk} ＝ 179.8 N/mm^2

ξ_1	ξ_2	Φ_{ut}
0.9	1.0	0.85

曲げ応力

σ =(M_R ＋ M_H)/ Z =(87450000 ＋ 32550000)/ 1799167 ＝ 66.7 N/mm^2

$\sigma tud \times f_2$ ＝ 179.8 × 0.5 ＝ 89.9 N/mm^2 ≧ 66.7 N/mm^2

(安全率： 1.35)

3. CASE3：上沓ストッパー

3.1 概要

・実験対象　：　上沓ストッパー
・治具の鋼材　：　SS400（想定）
・安全率　：　載荷対象の部材強度はJIS記載値の2.0倍として計算
　治具の強度は基準値の0.5倍として計算
・参考図書　：　ゴム支承の鋼部材の設計標準（案）（㈱日本支承協会，ゴム支承協会，H16.4）
　道路橋示方書・同解説（㈳日本道路協会，H29.11）

3.2 材料諸元

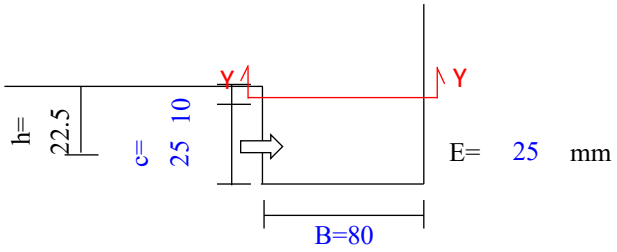


図-3.1　概要図

表-3.1　取付ボルトの諸元

ボルト呼び径	谷径 (mm)	本数	谷径断面積 (mm^2/本)	強度区分	せん断強さ (N/mm^2)
M20	17.294	6	234.9	10.9	601

※せん断強さは引張強度の1/√3倍として算出

表-3.2　六角ボルトの特性値（N/mm^2）

応力の種類	JISB1051による強度区分		
	4.8	8.8	10.9
引張・圧縮降伏	320	660	940
せん断降伏	185	380	540
引張強度	400	830	1040
支圧	240	660	940

表-3.3　取付治具の特性値（N/mm2）

応力の種類	鋼材の板厚 (mm)	鋼種	
		SS400	SM570
引張降伏 圧縮降伏	t≦40	235	450
	40≦t＜75	215	430
	75≦t＜100		420
引張強度	—	400～510	520～720
せん断降伏	t≦40	135	260
	40≦t＜75	125	250
	75≦t＜100		240
支圧強度	t≦40	235	450
	40≦t＜75	215	430
	75≦t＜100		420

表-3.4　ナットの保証荷重値（N/mm2）

JISB1052による強度区分			5	8	10
ナットの強度区分			4.8	8.8	10.9
保証荷重値	M20	N	154400	225400	259700
		N/mm^2	657	960	1106

3.3 設計計算

（1）載荷基準値の算出

Ec面（接触面）の支圧応力度

$F' = \tau_a \times E \times c$

$= 235 \times 25 \times 25 = 146875\ N \fallingdotseq 150\ kN$

ここに，　F'　：載荷基準値
　　τ_a　：ストッパー部の支圧強度（N/mm^2）
　　E,c　：ストッパー部の支圧面積諸元

（2）破断時の想定荷重の算出

(a) Ec面（接触面）の支圧応力度

$F = \tau_a \times E \times c \times f_1$

$= 235 \times 25 \times 25 \times 2$

$= 293750$ N

$\fallingdotseq 300$ kN

(b) Y-Y断面の曲げ応力度

$$F = \frac{\sigma_u \times (B^2 \times E)}{6 \times h}$$

$$= \frac{510 \times (6400 \times 25)}{6 \times 22.5}$$

$= 604444.4444$ N

$\fallingdotseq 610$ kN

(c) Y-Y断面のせん断応力度

$F = \tau_u \times (B \times E)$

$= 294 \times (80 \times 25)$

$= 588000$ N

$\fallingdotseq 590$ kN

$\therefore F = 300$ kN

ここに，
- F ： 破断時の想定荷重
- τ_a ： ストッパー部の支圧強度（N/mm^2）
- E,c ： ストッパー部の支圧面積諸元
- f_1 ： 載荷対象の耐荷力に乗じる安全率（2.0）
- σ_u ： ストッパー部の引張応力度（N/mm^2）
- B,E ： ストッパー部のせん断方向寸法諸元

（3）治具の耐荷力の照査

1）取付ボルトの応力度照査（雌ネジ部：台座）

ⅰ）ボルトのせん断応力度

$\tau = F / (m \times A_s) \times 1000$

$= 300 / (6 \times 234.9) \times 1000$

$= 212.9$ N/mm^2

$\tau_{ua} = \tau_u \times f_2 = 601 \times 0.5 = 300.5$ N/mm^2 ≧ 212.9 N/mm^2

（ 安全率： 1.42 ）

ⅱ）ボルト側面の支圧応力度

$ab = F / (b \times e) \times 1000$

$= 300 / (103 \times 163) \times 1000$

$= 17.9$ N/mm^2

$aba = \tau_a \times f_2 = 235 \times 0.5 = 117.5$ N/mm^2 ≧ 17.9 N/mm^2

（ 安全率： 6.57 ）

ここに,　F　：破断時の想定荷重
m　：ボルトの本数
A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）
τ_{ua}　：安全率を考慮したボルトのせん断強さ（N/mm2）
f_2　：治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）
ab　：ボルト孔側面に作用する支圧応力度（N/mm2）
b,e　：ボルト1本あたりの支圧面積の諸元
aba　：安全率を考慮した治具の支圧強度（N/mm2）

iii）ボルトの必要ねじ込み長の照査

a）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times (dB - k2 \times p)/3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$
$= 1.05 \times (20 - 1.08253 \times 2.5)/3 \times 940 / 540 + 2 \times 2.5$
$= 15.5$ mm

b）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times (dB - k2 \times p)^2/(7 \times dB) \times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$
$= 2 \times 1.05 \times (20 - 1.08253 \times 2.5)^2/(7 \times 20) \times 940 / 250 + 2 \times 2.5$
$= 21.9$ mm

ここに,

f	：安全率	1.05	※安全余裕はボルト耐力で考慮
dB	：ボルトの外径（呼び径）	20	
p	：ネジ山のピッチ	2.5	
k2	：雌ねじの7内径決定のための定数	1.08253	
σ_u	：ボルトの最大引張応力度	940	
τ_u	：ボルトの許容せん断応力度	540	
τ_{Nu}	：雌ねじ部材の許容せん断応力度	250	

c）必要ねじ込み長の下限値

LB' = 0.8 × dB = 16 mm

d）必要ねじ込み長

LB ≧ LB1及びLB2 ≧ LB'　∴ LB = 21.9 mm
= 25.0 mm　※5㎜切り上げ

4. CASE4：ピン

4.1 概要

・実験対象　　：ピン
・治具の鋼材　：S35CN（新規作成）
・安全率　　：載荷対象の部材強度はJIS記載値の2.0倍として計算
　　治具の強度は基準値の0.5倍として計算
・参考図書　　：ゴム支承の鋼部材の設計標準（案）（㈱日本支承協会，ゴム支承協会，H16.4）
　　道路橋示方書・同解説（㈳日本道路協会，H29.11）

4.2 材料諸元

表-4.1　取付ボルトの諸元

ボルト呼び径	谷径 (mm)	本数	谷径断面積 (mm^2/本)	強度区分	せん断強さ (N/mm^2)
M24	21.835	4	374.5	10.9	601
M27	23.752	4	443.1	10.9	601

※せん断強さは引張強度の1/√3倍として算出

表-4.2　六角ボルトの特性値（N/mm^2）

応力の種類	JISB1051による強度区分		
	4.8	8.8	10.9
引張・圧縮降伏	320	660	940
せん断降伏	185	380	540
引張強度	400	830	1040
支圧	240	660	940

表-4.3　取付治具の特性値（N/mm2）

応力の種類	鋼材の板厚 (mm)	鋼種	
		SS400	S35CN
引張降伏 圧縮降伏	t≦40	235	305
	40≦t＜75	215	
	75≦t＜100		
引張強度	—	400～510	510
せん断降伏	t≦40	135	175
	40≦t＜75	125	
	75≦t＜100		
支圧強度	t≦40	235	305
	40≦t＜75	215	
	75≦t＜100		

表-4.4　ナットの保証荷重値（N/mm2）

JISB1052による強度区分			5	8	10
ナットの強度区分			4.8	8.8	10.9
保証荷重値	M24	N	222400	324800	374200
		N/mm^2	594	867	999
	M27	N	289200	422300	486500
		N/mm^2	653	953	1098

4.3 設計計算

（1）載荷基準値の算出

ピンのくびれ部の降伏

$F' = \sigma_t \times A$

$= 305 \times 1590$

$= 485081.5$ N

$\fallingdotseq 490$ kN

ここに，　F'　：載荷基準値

σ_t　：ピンの引張降伏強度（N/mm^2）

A　：くびれ部の断面積（mm^2）

（2）破断時の想定荷重の算出

ピンの破断

$F = \sigma_u \times A \times f_1$

$= 510 \times 1590 \times 2$

$= 1622240$ N

$\fallingdotseq 1700$ kN

ここに，　F　：破断時の想定荷重

σ_u　：ピンの引張強度（N/mm^2）

A　：くびれ部の断面積（mm^2）

f_1　：載荷対象の耐荷力に乗じる安全率（2.0）

（3）治具の耐荷力の照査

1）取付ボルトの応力度照査（雌ネジ部：台座）

ｉ）ボルトのせん断応力度　※下沓下側の支持部材で荷重を支持するため、参考値とする。

$\tau = F /(m \times A_s) \times 1000$

$= 1700 /(4 \times 374.5)\times 1000$

$= 1134.8$ N/mm^2

$\tau_{ua} = \tau_u \times f_2 = 601 \times 0.5 = 300.5$ N/mm^2　　≦　##### N/mm^2

（ 安全率：　0.27　）

ここに，　F　：破断時の想定荷重

m　：ボルトの本数

A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）

τ_{ua}　：安全率を考慮したボルトのせん断強さ（N/mm2）

f_2　：治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）

ⅱ）ボルトの必要ねじ込み長の照査

a）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times(dB - k2 \times p)/ 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$

$= 1.05 \times(24 - 1.08253 \times 3)/ 3 \times 940 / 540 + 2 \times 3$

$= 18.6$ mm

b）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times(dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB)\times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$

$= 2 \times 1.05 \times(24 - 1.08253 \times 3)^2 / (7 \times 24)\times 940 / 577 + 2$

$= 14.8$ mm　　× 3

ここに，　f　：安全率　　1.05　※安全余裕はボルト耐力で考慮

dB　：ボルトの外径（呼び径）　　24

p　：ネジ山のピッチ　　3.0

k2　：雌ねじの7内径決定のための定数　　1.08253

σ_u　：ボルトの最大引張応力度　　940

τ_u　：ボルトの許容せん断応力度　　540

τ_{Nu}　：雌ねじ部材の許容せん断応力度　　577

c）必要ねじ込み長の下限値

LB' = 0.8 × dB = 19.2 mm

d）必要ねじ込み長

LB ≧ LB1及びLB2 ≧ LB' ∴ LB = 19.2 mm

= 20.0 mm ※5㎜切り上げ

3）治具の応力度照査 ※SS400を想定

ⅰ）軸方向圧縮力を受ける部材（下沓支持用プレートの照査）

σ_{yk} : 鋼材の降伏強度の特性値 (= 215 N/mm^2)

E : ヤング係数 (= 200000 N/mm^2)

		A (cm^2)	y (cm)	Ay (cm^3)	Ay^2 (cm^4)	I_0 (cm^4)
2 -Base	50 * 800	800.00	2.50	2000.00	5000	1667
	ΣA=	800.00		2000.00	5000	1667

< 1.7 * 800.00 = 1360.00 cm^2

断面の図心位置 e = ΣAy / ΣA = 2.50 cm

断面二次モーメント I = ΣI_0 + ΣAy^2 − ΣAe^2 = 1667 cm^4

有効断面積 Ac = 800.00 cm^2

有効座屈長 l = 10.00 * 1.0 = 10.00 cm

断面二次半径 r = $\sqrt{\ }$ I / Ac = 1.44 cm

細長比 l/r = 10.00 / 1.44 = 6.94

細長比パラメータ $1/\pi\times(\sigma_{yk}/E)^{0.5}\times l/r$ = 0.07

ρcrg = 1.00 (λ＜0.2)

ρcrl = 1.00

ξ_1	ξ_2	Φ_u
0.9	1.0	0.85

σ_{cud} = ξ_1 × ξ_2 × Φ_u × ρ_{crg} × ρ_{crl} × σ_{yk}

= 0.9 × 1.0 × 0.85 × 1.00 × 1.00 × 215

164.475 N/mm^2

N = F/(ΣA) = 1700000 /(80000 × 1)/ 1 = 21.3 N/mm^2

Na = 164 N/mm^2 ≧ 21.3 N/mm^2 (安全率： 7.70)

ⅱ）軸方向圧縮力を受ける部材（台座全体の照査）

台座の有効断面は、台座の上フランジ厚を考慮した下沓支持用プレート幅とする。

下沓支持用プレートは、下沓の上下2カ所設置し、下沓を支持する計画とする。

						A (cm^2)	y (cm)	Ay (cm^3)	Ay^2 (cm^4)	I_0 (cm^4)
4	-RIB	642	*	12		308.16	0.00	0.00	0	37
8	web	40	*	13		41.60	2.60	108.16	281	6
8	web	40	*	13		41.60	-2.60	-108.16	281	6
4	-RIB	40	*	20		32.00	2.60	83.20	216	43
4	-RIB	40	*	20		32.00	-2.60	-83.20	216	43
			ΣA＝			455.36		0.00	994	135
				>	1.7 *	32.00	＝	54.40	cm^2	

断面の図心位置　e ＝ ΣAy / ΣA ＝ 0.00 cm

断面二次モーメント　I ＝ ΣI_0 ＋ ΣAy^2 － ΣAe^2 ＝ 1129 cm^4

有効断面積　Ac ＝ 54.40 cm^2

有効座屈長　l ＝ 35.80 * 1.0 ＝ 35.80 cm

断面二次半径　r ＝ $\sqrt{\ }$ I / Ac ＝ 4.56 cm

細長比　l/r ＝ 35.80 / 4.56 ＝ 7.85

細長比パラメータ　$1/\pi\times(\sigma_{yk}/E)^{0.5}\times l/r$ ＝ #VALUE!

ρcrg ＝ 1.00 （λ＜0.2）

ρcrl ＝ 1.00

ξ_1	ξ_2	Φ_u
0.9	1.0	0.85

σ_{cud} ＝ ξ_1 × ξ_2 × Φ_u × ρ_{crg} × ρ_{crl} × σ_{yk}

＝ 0.9 × 1.0 × 0.85 × 1.00 × 1.00 × 215

164.5 N/mm^2

N ＝ F/ΣA ＝ 1700000 / 45536 ＝ 37.3 N/mm^2

Na ＝ 164.5 N/mm^2 ≧ 37.3 N/mm^2 （ 安全率： 4.42 ）

iii）下沓が回転し下沓と台座を固定するボルトの上側に引張が発生した場合

下沓は剛な部材であると仮定し、下沓下側の支材を回転中心とする。

ピンくびれ部に下向きにかかる荷重 ： 1700 kN

回転中心からピンくびれ部載荷点までの距離 ： 113.5 mm

回転中心から下沓上側の固定ボルトまでの距離 ： 562 mm

下沓上側の固定ボルトに生じる引張力

F’ ＝ (1700 × 113.5)/ 562 ＝ 343 kN

σ ＝ F'/(m・As) ＝ 343000 /(2 × 443.1)= 387.0 N/mm^2

σ_a ＝ 940 × 0.5 ＝ 470 N/mm^2 ≧ 387.0 N/mm^2

（ 安全率： 1.22 ）

ここに、 m ： ボルトの本数 ＝ 2 本

A_s ： ボルト1本のねじ谷径部の断面積（mm^2） ＝ 443.1 mm^2

σ ： ボルトに生じる引張応力度（N/mm^2）

σ_a ： 安全余裕を考慮したボルトの引張強さの制限値（N/mm^2）

ⅳ）ボルトの必要ねじ込み長の照査

a）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times (dB - k2 \times p) / 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$

$= 1.05 \times (27 - 1.08253 \times 3) / 3 \times 940 / 540 + 2 \times 3$

$= 20.5$ mm

b）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times (dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB) \times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$

$= 2 \times 1.05 \times (27 - 1.08253 \times 3)^2 / (7 \times 27) \times 940 / 634 + 2 \times 3$

$= 15.3$ mm

ここに，

f	：	安全率	1.05　※安全余裕はボルト耐力で考慮
dB	：	ボルトの外径（呼び径）	27
p	：	ネジ山のピッチ	3.0
k2	：	雌ねじの7内径決定のための定数	1.08253
σ_u	：	ボルトの最大引張応力度	940
τ_u	：	ボルトの許容せん断応力度	540
τ_{Nu}	：	雌ねじ部材の許容せん断応力度	634

c）必要ねじ込み長の下限値

$LB' = 0.8 \times dB = 21.6$ mm

d）必要ねじ込み長

$LB \geqq LB1$及び$LB2 \geqq LB'$　　$\therefore LB = 21.6$ mm

$= 25.0$ mm　※5㎜切り上げ

ⅴ）下沓の回転により下沓側台座ボルトに発生するせん断力の照査

下沓上側の固定ボルトに生じる引張力

$F' = (1700 \times 113.5) / 562 = 343$ kN

$\tau = F'/(m \cdot As) = 343000 / (4 \times 374.5) = 229.0$ N/mm^2

$\tau_a = 540 \times 0.5 = 270$ N/mm^2 $\geqq 229.0$ N/mm^2

（ 安全率： 1.18 ）

ここに、

m	：	ボルトの本数	＝ 4 本
A_s	：	ボルト1本のねじ谷径部の断面積（mm^2）	＝ 374.5 mm^2
τ	：	ボルトに生じるせん断応力度（N/mm^2）	
τ_a	：	安全余裕を考慮したボルトのせん断強さの制限値（N/mm^2）	

5. CASE5：ゴム支承用サイドブロック取付ボルト

5.1 概要

・実験対象　：ゴム支承用サイドブロック取付ボルト
・治具の鋼材　：―
・安全率　：載荷対象の部材強度はJIS記載値の2.0倍として計算
　治具の強度は基準値の0.5倍として計算
・参考図書　：ゴム支承の鋼部材の設計標準（案）（㈱日本支承協会，ゴム支承協会，H16.4）
　道路橋示方書・同解説（㈳日本道路協会，H29.11）

5.2 材料諸元

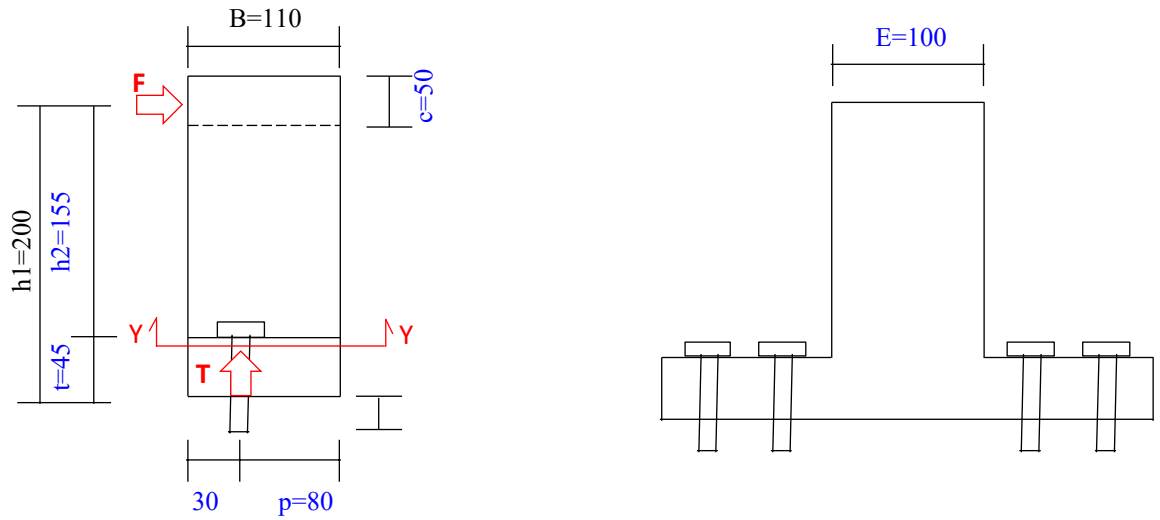


図-5.1　概要図

表-5.1　取付ボルトの諸元

ボルト呼び径	谷径 (mm)	本数	谷径断面積 (mm^2/本)	強度区分	せん断強さ (N/mm^2)
M20	17.294	4	234.9	4.8	231

※せん断強さは引張強度の1/√3倍として算出

表-5.2　六角ボルトの特性値（N/mm^2）

応力の種類	JISB1051による強度区分		
	4.8	8.8	10.9
引張・圧縮降伏	320	660	940
せん断降伏	185	380	540
引張強度	400	830	1040
支圧	240	660	940

表-5.3　取付治具の特性値（N/mm2）

応力の種類	鋼材の板厚 (mm)	鋼種	
		SS400	SM570
引張降伏 圧縮降伏	t≦40	235	450
	40≦t＜75	215	430
	75≦t＜100		420
引張強度	―	400～510	520～720
せん断降伏	t≦40	135	260
	40≦t＜75	125	250
	75≦t＜100		240
支圧強度	t≦40	235	450
	40≦t＜75	215	430
	75≦t＜100		420

表-5.4　ナットの保証荷重値（N/mm2）

JISB1052による強度区分			5	8	10
ナットの強度区分			4.8	8.8	10.9
保証荷重値	M20	N	154400	225400	259700
		N/mm^2	657	960	1106

5.3　設計計算

（1）載荷基準値の算出

$T' = \sigma_y \times m \times A_s$
$= 320 \times 4 \times 234.9$
$= 300672$

$F' = T' \times p / h_1$
$= 300672 \times 80 / 200$
$= 120268.8$ N
$\fallingdotseq 130$ kN

ここに，　F'　：載荷基準値
T'　：載荷時のボルトの引張方向への荷重
σ_y　：ボルトの引張降伏強度（N/mm^2）
m　：ボルトの本数
A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）

（2）破断時の想定荷重の算出

ボルトの破断

$T = \sigma_u \times m \times A_s$
$= 400 \times 4 \times 234.9$
$= 375840$

$F = T \times p / h_1 \times f_1$
$= 375840 \times 80 / 200 \times 2$
$= 300672$ N
$\fallingdotseq 310$ kN

ここに，　F　：破断時の想定荷重
T　：載荷時のボルトの引張方向への荷重
σ_u　：ボルトの引張強度（N/mm^2）
m　：ボルトの本数
A_s　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）
f_1　：載荷対象の耐荷力に乗じる安全率（2.0）
p,h1　：ボルト位置の諸元

（3）治具の耐荷力の照査

ｉ）ボルト側面の支圧応力度

$ab = F /(b \times e) \times 1000$
$= 310 /(70 \times 109) \times 1000$
$= 40.6$ N/mm^2

$aba = \tau_a \times f_2 = 215 \times 0.5 = 107.5$ N/mm^2　≧　40.6 N/mm^2
（ 安全率：　2.65　）

ここに,　F　：破断時の想定荷重
τ_a　：治具の支圧強度（N/mm2）
f_2　：治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）
ab　：ボルト孔側面に作用する支圧応力度（N/mm2）
b,e　：ボルト1本あたりの支圧面積の諸元
aba　：安全率を考慮した治具の支圧強度（N/mm2）

ii）ボルトの必要ねじ込み長の照査

a）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times (dB - k2 \times p) / 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$
$= 2.00 \times (20 - 1.08253 \times 2.5) / 3 \times 400 / 231 + 2 \times 2.5$
$= 25.0$ mm

b）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times (dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB) \times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$
$= 2 \times 2.00 \times (20 - 1.08253 \times 2.5)^2 / (7 \times 20) \times 400 / 250 + 2$
$= 18.7$ mm　× 2.5

ここに,
f	：	安全率	2.0
dB	：	ボルトの外径（呼び径）	20
p	：	ネジ山のピッチ	2.5
k2	：	雌ねじの7内径決定のための定数	1.08253
σ_u	：	ボルトの最大引張応力度	400
τ_u	：	ボルトの許容せん断応力度	231
τ_{Nu}	：	雌ねじ部材の許容せん断応力度	250

c）必要ねじ込み長の下限値

$LB' = 0.8 \times dB = 16$ mm

d）必要ねじ込み長

LB ≧ LB1及びLB2 ≧ LB'　∴ LB = 25.0 mm
= 25.0 mm　※5㎜切り上げ

iii）サイドブロック本体の応力度照査

(a) Ec面（接触面）の支圧応力度

$ab = F / (b \times e) \times 1000$
$= 310 / (100 \times 50) \times 1000$
$= 62$ N/mm^2
$aba = \tau_a \times f_2 = 215 \times 0.5 = 107.5$ N/mm^2　≧ 62.0 N/mm^2
(安全率： 1.74)

(b) せん断応力度

$\tau = F /(B \times E) \times 1000$

$= 310 /(110 \times 100) \times 1000$

$= 28.2 \ N/mm^2$

$\tau_{ua} = \tau_u \times f_2 = 125 \times 0.5 = 62.5 \ N/mm^2 \quad \geqq \quad 28.2 \ N/mm^2$

(安全率： 2.22)

ここに,

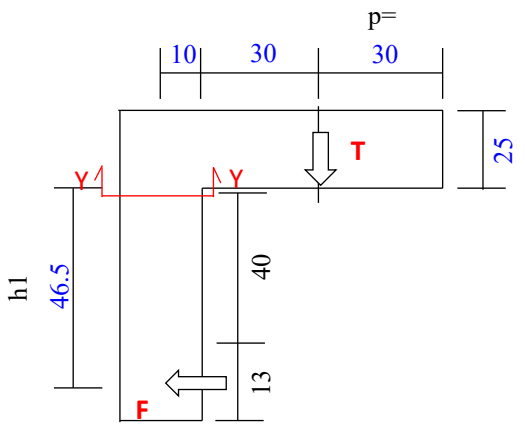
F	：	破断時の想定荷重
τ_a	：	治具の支圧強度（N/mm2）
f_2	：	治具の耐荷力に乗じる安全率（0.5）
ab	：	サイドブロック側面に作用する支圧応力度（N/mm2）
b,e	：	支圧面積の諸元
aba	：	安全率を考慮したサイドブロックの支圧強度（N/mm2）
B,E	：	せん断力に抵抗する面積の諸元
τ_u	：	サイドブロックのせん断強度（N/mm2）
τ_{ua}	：	安全率を考慮したサイドブロックの支圧強度（N/mm2）

6. CASE5：ゴム支承用サイドブロック取付ボルト

6.1 概要

・実験対象　：ゴム支承用サイドブロック取付ボルト
・治具の鋼材　：―
・安全率　：載荷対象の部材強度はJIS記載値の2.0倍として計算
　治具の強度は基準値の0.5倍として計算
・参考図書　：ゴム支承の鋼部材の設計標準（案）（㈱日本支承協会，ゴム支承協会，H16.4）
　道路橋示方書・同解説（㈳日本道路協会，H29.11）

6.2 材料諸元



E=　140　mm

図-6.1　概要図

表-5.1　取付ボルトの諸元

ボルト呼び径	谷径 (mm)	本数	谷径断面積 (mm^2/本)	強度区分	せん断強さ (N/mm^2)
M20	17.294	2	234.9	4.8	231

※せん断強さは引張強度の1/√3倍として算出

表-5.2　六角ボルトの特性値（N/mm^2）

応力の種類	JISB1051による強度区分		
	4.8	8.8	10.9
引張・圧縮降伏	320	660	940
せん断降伏	185	380	540
引張強度	400	830	1040
支圧	240	660	940

表-5.3　取付治具の特性値（N/mm2）

応力の種類	鋼材の板厚（mm）	鋼種
		SS400
引張降伏 圧縮降伏	t≦40	235
	40≦t＜75	215
	75≦t＜100	
引張強度	―	400～510
せん断降伏	t≦40	135
	40≦t＜75	125
	75≦t＜100	
支圧強度	t≦40	235
	40≦t＜75	215
	75≦t＜100	

表-5.4　ナットの保証荷重値（N/mm2）

JISB1052による強度区分			5	8	10
ナットの強度区分			4.8	8.8	10.9
保証荷重値	M20	N	154400	225400	259700
		N/mm^2	657	960	1106

5.3 設計計算

（1）載荷基準値の算出

$F' = \tau_y \times m \times A_s$
$= 185 \times 2 \times 234.9$
$= 86913$
≒　100　kN　※荷重値が低いため100kNと設定

ここに，　F'　　：載荷基準値
　　τ_y　　：ボルトのせん断降伏強度（N/mm^2）
　　m　　：ボルトの本数
　　A_s　　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）

（2）破断時の想定荷重の算出

$F' = \tau_y \times m \times A_s \times f_1$
$= 231 \times 2 \times 234.9 \times 2$
$= 217047.6$
$\fallingdotseq 220$ kN

ここに，　F　　：破断時の想定荷重
　　τ_y　　：ボルトのせん断強さ（N/mm^2）
　　m　　：ボルトの本数
　　A_s　　：ボルトの谷径部の断面積（mm^2/本）
　　f_1　　：載荷対象の耐荷力に乗じる安全率（2.0）

（3）治具の耐荷力の照査

ｉ）ボルトの必要ねじ込み長の照査

a）雄ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_1 = f \times(dB - k2 \times p)/ 3 \times \sigma_u / \tau_u + 2 \times p$
$= \#\# \times(20 - 1.08253 \times 2.5)/ 3 \times 400 / 231 + 2 \times 2.5$
$= 25.0$ mm

b）雌ねじの必要ねじ込み深さ

$LB_2 = 2 \times f \times(dB - k2 \times p)^2 / (7 \times dB)\times \sigma_u \times \tau_{Nu} + 2 \times p$
$= 2 \times \#\# \times(20 - 1.08253 \times 2.5)^2 / (7 \times 20)\times 400 / 380 + 2$
$= 14.0$ mm　　$\times 2.5$

ここに，　f　　：安全率　　2.0
　　dB　　：ボルトの外径（呼び径）　　20
　　p　　：ネジ山のピッチ　　2.5
　　k2　　：雌ねじの7内径決定のための定数　　1.08253
　　σ_u　　：ボルトの最大引張応力度　　400
　　τ_u　　：ボルトの許容せん断応力度　　231
　　τ_{Nu}　　：雌ねじ部材の許容せん断応力度　　380

c）必要ねじ込み長の下限値

$LB' = 0.8 \times dB = 16$ mm

d）必要ねじ込み長

$LB \geqq$ LB1及びLB2 $\geqq LB'$　　$\therefore$ LB $= 25.0$ mm
$= 25.0$ mm　※5㎜切り上げ

付録 3　熟練技術者へのインタビュー調査結果（けばとり，整文）

［写真 1 枚目］

Q1.この写真で気づいたことを全て述べてください。



橋梁形式：支間長40m、コンクリートT桁橋、パッド型ゴム支承

［一人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. まずコンクリート橋、RC 橋か PC 橋か、ちょっとはっきりとしませんけれども、下面側のウェブに亀裂が多数見られるということと、下面にも橋軸方向の亀裂が何カ所か見られます。これについて、考えられる理由というのは、もし RC 橋だとすれば、何らかの理由で塩分、もしくは水分が桁内部に侵入して鉄筋が腐食し、かつ、膨張しているということでこのようなひび割れが起きている可能性があるという風に考えられます。

その他、一部分ですけれどもコンクリート表面に塗装をしているような跡が見られます。塗装そのものの目的というものははっきりとしませんけれども、部分的なものであすから、何かひび割れ、もしくは、剥落を抑えるために、施工された可能性もありますけれども、このような中途半端なものですと、全体的な防食機能としては不十分なのかなという気はしています。概略以上です。

Q. この写真では、どのような性能の低下が疑われますか？耐荷性能、耐久性能、その他性能、、

A. 耐荷性能、表面的には現れておりませんけれども、先ほど申し上げましたように、内部鉄筋の腐食による断面積の減少がたぶん起きているだろうと。ただし、ここでは錆び汁そのものははっきりとは見られ

ない。その程度からすると、軽微な状況なのかもしれないと思います。

Q. なるほど。耐荷性能の低下も疑った理由も述べて頂きました。水が入って、鉄筋にも入ったけれども

A. はい。

Q. 錆び汁自身はそれほど出ていないから、断面はそれほどでもないと、

A. 断面減少と言いますか、断面性能としては断面減少が限られており、それほど多くのものではないと考えます。

Q. ありがとうございます。それではもし、そういう疑いを今の現場で持たれたとき、緊急時にはどのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 緊急時、桁下の状況がはっきりとはわかりませんので、対策が本当に必要なのかということもありますけれども、例えば、この下側のコンクリートが一部剥落した場合ですと、もしこの下に道路とか、第三者被害を起こすようなのが無ければ、すぐに何かをしなければいけないということは無いと思います。ただ、その状況に応じては、断面性能が急激に低下するっていうことも考えられますので、その場合には根本的な補修が必要になると思います。

Q. ありがとうございます。結局のお話ですと性能低下を判断した根拠も述べて頂きましたし、その原因も述べて頂きました。更にそういう今仰ったような、仮説を立てたわけですけれども、そういう仮説を立てた根拠、考え方をもう一度お聞かせ願えますか。

A. はい。仮説というか第三者被害とかを話させていただいたんですが、

Q. はい。

A. 橋梁の診断も点検もそうだと思うのですが、全体的にそのものが置かれた環境、例えば代替路があるのかとか、それから気象条件ですとか、そういうものがどういうものであるかということを事前に知っておいて、橋梁の点検、診断にかかるということが基本的には必要ということかなという風に思いまして、下にそういう条件があればということで申し上げました。

Q. そうですね。非常に丁寧に変状が起きたことの仮説、あるいは、緊急時の措置の考え方、詳しく述べて頂きました。じゃあ、最後にお聞きします。今、仰った回答結果の正しさについてどれぐらい自信があるのか、10 点満点で言うと何点くらいの自信がおありでしょうか。

A. 私の元々専門がどちらかというとメタルなので、まぁ 10 点の内、6-7 点出ればよいところかなという風に思います。

［一人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. RC 橋か PC 橋かは判断ができない。コンクリートの桁下面とウェブ側面に何か所かひび割れがある。もし、RC 橋であれば、何らかの理由で塩分もしくは水分が桁内部に侵入し鉄筋が膨張する**ので**、それによってひび割れが生じた**可能性がある**。その他、コンクリート表面の一部で塗装された跡がある。部分的な塗装である**ならば**、ひび割れや剥落を抑えるために施工された**可能性がある**。ただし、このような中途半端な塗装では、全体的な防食機能としては不十分であると**考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. コンクリート表面では見えないが、内部鉄筋の腐食による鋼材の断面減少が生じている**可能性がある**。

しかし、鋼材の断面減少が疑われる場合**であっても**、さび汁が出ていない**ならば**、耐荷力に及ぼす影響は軽微である**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 桁下の状況がわからないため、緊急的な対策が本当に必要かどうかはわからない。コンクリート片が一部剥落する**可能性があるので**、第三者被害を起こす**可能性がある**場合には、対策を取る必要がある。ただし、コンクリートの桁下面とウェブ側面に何か所かひび割れがある**ため**、状況によっては耐荷力が急激に低下する**可能性がある**。**ゆえに**、その可能性が想定される場合には根本的な補修が必要である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［二人目　けばとり文］

Q. あなたは点検をするためにこの現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 遠目からみて、伸縮からの漏水があるんですかね、桁端部。あと、主桁、横桁もそうですね。補修跡が見える。さらに損傷が主桁の下フランジ、下面、側面、それからウェブ、それから横桁の下面に大きなひび割れが見えますね。剥落しそうなくらいの状態がわかりますね。床版の方は錆び汁が見えるのかわかりませんが、茶色のところですね。遊離石灰は出ていないので、ひび割れも、、

Q. 床版の茶色い錆び汁、。

A. そうですね、錆び汁。橋台のパラペットの茶色は何なんですかね。隣の橋の梁の漏水も気になるのですが。この黒いのは何ですかね。何か補強しているんですかね。

Q. 支柱が黒くなっていますね。

A. あと、奥の床版の下面が黒くなっていますね。全体的に下面がかなりひび割れが入っていますね。

Q. 下面というのは桁下面でしょうか？

A. 桁下面です。主桁、横桁。桁下が湿潤状態というのはあるんですかね。そこからの漏水は見えない。かぶりの薄さが懸念されます。支承のところはあんまり

Q. お気づきになったのは大体、これくらいでしょうか。この橋にはどのような性能低下が耐荷性能とか、耐久性能とか、その他性能とかが疑われますか。

A. そうですね、基本的に主桁にしても、横桁にしても、下フランジ側のひび割れで、なので、鉄筋自体が断面欠損がなければ、引張に対してはまだ持つのかなということですが、コンクリートの付着が気になるところなので、耐荷性能は低くなっている気がします。で、橋全体的に損傷が広がっているので、面的な広がり、要は上部構造としての耐荷性能は劣ってきているのかなと思います。桁 1 本 1 本でもそうですが、橋全体として支えられるかということでは、桁の損傷が多い。横桁の分配作用も懸念されますね。

Q. なるほど、主桁の損傷のみならず、今仰ったいろんなところの損傷がひどくて、特に性能低下、全体の耐荷性能の低下を疑った理由は何でしょうか。

A. 要は、1 本 1 本の、、これは何本の桁かな、8 本くらいあるんですかね。この中で 1 本であればそんなに懸念が無いように思うのですが、全体的に主桁が損傷しているので、上部構造の全体的な荷重の分配を

考えると、それぞれの分配に対して、支える、1 本主桁あたりのものが弱くなっているのではないかと思います。

Q. わかりました。耐荷性能、全体の低下を疑ったわけですけれども、これはどのような措置を取るのが望ましいでしょうか。

A. 単純に考えちゃうと、コンクリートのひび割れのところをはつって、、はつるのも必要なのですが、斫る前にこれ、場所がどこなのかな、海なのかな。川なのかな。もし海だとすれば、塩化物の含有量の試験をした方が良いと思います。

Q. まずは調査をするということですね。

A. はい。その上で、対策をするとすれば、調査結果を見ないと何とも言えないのですが

Q. そうですね。

A. 下フランジ側、主桁でも、横桁でも、どういった補強が必要かですが、まず、全体的な耐荷力を解析なりで調べてみたいという気はします。断面力が持つのか、もたないのか。

Q. そうすると、今のお話は細かな工法というよりも、先ずは調査が必要ということ、

A. そうですね。

Q. 調査の結果、どういう対策が必要であるかを検討するということでしょうか。

A. そうですね。その後に方法を決めていきたいと思います。

Q. 今度はそういう性能の低下を判断された、根拠となる考え方、経験だとか常識とか、どういうことを

A. 基本的には経験だと思います。

Q. 何年くらいされておりますでしょうか。

A. 診断業務としては 6 年、

Q. なるほど。そういう 6 年である意味、見てきた範疇にあるということでしょうか。

A. そうですね。

Q. そういう変状すべてがどういう原因で生じているのかということを述べて頂けないでしょうか。

A. 先ほどの湿潤状態であるということと、表面がどうなっているのかを知りたいのですが、漏水の跡が無いのが不思議だなぁと。そうすれば、床版の錆び汁もあるので、水道がどうなっているのか。補修痕も見えるので、かなり前から対策はしているのですね。

Q. わかりました。では、そういった仮説を立てられたのは今までのご経験ということで。最後に、今の回答結果につきまして、ご自身の正しさの自信について、10 点満点で言うと何点でしょうか。

A. 何点かなぁ。というのはもうちょっと幅広に見たいというものがある。上面とか、できれば叩いて落ちるかどうかまで見てみたい。鉄筋がどういう状態かというところまで。これくらいであれば何カ所か叩いてもすぐに落ちる状態ではないと思いますが。

［二人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 伸縮部周辺や桁端部に漏水の**可能性がある**。主桁と横桁に補修痕がある。主桁の下フランジ・下面・側面・ウェブと横桁の下面にひび割れがある。剥落する**可能性がある**。かぶりが薄い**可能性がある**。床版にはさび汁と推測される茶色のしみがあるが、遊離石灰は生じていない。奥側の床版下面が黒くなって

いる。橋台前の支柱や支承部の状態はよくわからない。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 主桁や横桁の下フランジにひび割れが生じている**ため**、鉄筋自体に断面欠損がない**のであれば**、引張側の断面内の応力に対して抵抗できるが、鉄筋周りの付着力が低下している**可能性があるので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。また、主桁単体の損傷だけではなく、上部構造全体の桁に損傷が広がっている**ため**、上部構造全体の支持や横桁の荷重分配の能力が低下している**可能性があり**、上部構造としての耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 桁のひび割れが生じている箇所をはつる必要もあるが、海の近くであることを仮定すれば、塩化物の含有量の試験を行う必要がある。その後、耐荷力の解析を行い耐荷力が不足する**のであれば**、補強を行う必要があると**考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. わからない。

［三人目　けばとり文］

Q. あなたは点検をするためにこの橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 対象となるのは左側の RCT 桁であり、右側は関係ないのでしょうか。

Q. 気付いたことを全て述べてください。

A. 左側の T 桁橋で、写真だとよくわからないのが、主桁が通っていて、端横桁は主桁より下にきているので、どういう主桁の支持になっているのか。この写真からはわからない。まず、全体の構造がどうなっているのか、それを明らかにしなければ、この橋自体を点検できない。それがわかっている前提で行くと、下側ウェブの下側に近い位置の水平位置にひび割れが主桁横桁に入っているのと、下フランジの横側にもひび割れが入っている。あと、表面が全体的に色がグレーが薄いのと濃いものの 2 通りあるが、表面被覆されている形跡がある。あと、表面的に言えば横桁に G 何とかという文字が書かれているので、過去に何らかの調査が行われたことがわかる。後は、写真だとわからないのが、主桁と横桁の取り合い部が完全に直角で、ハンチが無い構造であるが、接続部がどうなっているのかとか、一番気になるのが、端部の構造がどうなっているのかということが気になります。

Q. 端部の構造とは？

A. これが主桁だと思うが、普通は主桁に支承がのっかっているが、ここには横桁がある。端部横桁が下まで来ているので、端部横桁でこの部分を受けているのかなと。そもそも構造がよくわからない。

Q. 仰る通りですね。主桁がそれよりも大きな端部横桁にあり、その下にはまったく支承が無い、横には繋がっているから、一体どうなのか、全体がわからないということですね。

A. そうですね。輪荷重を床版で受けてから下部構造に伝達される、その伝達経路がわからない。

Q. 力の伝達経路ですね。構造力学的な見方をされているということですね。

A. はい。

Q. ありがとうございました。そのようなことを確認されたわけですけれども、そうすると、この写真で今ご判断されたことだけから、可能性として、この橋にはどのような性能低下が疑われますでしょうか。耐荷性能、耐久性能、いろんな意味で。

A. 耐荷性能でいけば、橋軸方向、水平方向にひび割れが入っているので、架橋環境としては海沿いや沿岸部っぽい気がします。塩害。どちらにせよ、橋軸方向にひび割れが入っているので、鉄筋腐食先行型のひび割れが、可能性として考えられます。塩害であれば、腐食ひび割れや、腐食膨張ひび割れが生じていることは、鉄筋の腐食、まぁ断面減少が進んでおりますので、耐荷性能的には落ちていると考えられます。

Q. 大きくは今のお話ですと、鉄筋コンクリートとして、鉄筋錆が入って、そのために耐荷性能がということですね。

A. はい。

Q. わかりました。今のような根拠なんですけれども、（訪問者）

耐荷性能の低下を疑われたとのことですが、これは普通時のことなので、ここではどのような措置を講じることが望ましいでしょうか。

A. 塩害による鉄筋の腐食膨張で間違いなければ、この状況ですぐに措置というよりは、細かい状況がわからないので、先ずは塩害であるかを確認、塩分量を測るなり、鋼材の腐食状況を測るなり

Q. 調査ということでしょうか。詳細調査

A. はい。まずは調査かなと。橋軸方向、橋直方向に曲げひび割れが入っていないので、特に耐荷性能が低下しているものの緊急性までは無いので、まずは調査をした上で、現状の耐荷性能を見たうえで、補修なり、補強なりの対策を考えるのだと思います。

Q. そうですね。今のような、具体的な措置の考え方、あるいは、性能低下の考え方をお示しになったのですが、その根拠となる考え方、と言いますか何を基にそのようにお考えになったのでしょうか。経験とか常識とか

A. 先ほどのお話の通り、なんとなく海沿いの環境にありそうなということ、鉄筋に沿ったひび割れということで、まず塩害と考えました。そのうえで塩害であれば当然、腐食を伴うので耐荷性能が不足していると。ただし、原因によってかなり、その状況が変わってきますから、鉄筋腐食型のひび割れでなければ状況が変わってくると思います。まずはひび割れから可能性の高い損傷原因、環境条件の推定からですかね。

Q. わかりました。だから今のは、ご経験と維持管理でいうところの教科書的な原則に従ってということですね。

A. はい。

Q. 最後になるのですが、今の回答結果の正しさについて、どれぐらいの自信をお持ちですか。10 点満点で言うとどれくらい。

A. 塩害、ひび割れの性状からすると、ここまで幅の広いとなると、腐食かアル骨ですが、この写真を一枚パッと見ただけですと、大体 4 割くらいの正解率。

Q. そういう意味ですね。

A. 通常、点検は何段階かあって、要はこのひび割れがいつから発生したかとか、アル骨であれば 10 年前から発生しているでしょうし、塩害であれば新たに発生する。

Q. わかりました。この質問はですね、仰る通り本当に沢山の情報を見ないと最終的な答えにはたどり着かないのですが、この写真だけを見て、いかに情報を引き出し、そしてそれに対するメカニズムを考え、という、1 枚から得られるものとしては

A. 8 点くらいです。

［三人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 端横桁が主桁よりも下側にある**ため**、主桁の支持条件がわからない。それを明らかにしなければ点検ができない。なぜならば、輪荷重を床版で受けてから下部構造に荷重が伝達できる荷重の経路がわからないと考えるからである。

それが明らかになっていると仮定した上で、主桁と横桁のウェブ下側に水平ひび割れが生じている。下フランジ横側にひび割れが生じている。桁の表面の色が薄いグレーと濃いグレーの 2 色ある**ため**、表面被覆されている**可能性がある**。横桁に「G〇」という文字がある**ため**、過去に何らかの調査が行われた**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 主桁に橋軸方向のひび割れ、横桁に橋軸直角方向のひび割れが生じている**ため**、架橋環境は海沿いで塩害の影響を受けている**可能性がある**。主桁の橋軸方向のひび割れが生じている**ため**、鉄筋腐食先行型のひび割れである**可能性がある**。塩害であると仮定すると、鋼材の腐食に伴う膨張、およびそれによるひび割れが生じている**可能性があるので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 主桁や横桁に曲げひび割れが生じていない。**ゆえに**、緊急的な措置を講じる必要性はないと**考える**。まずは調査を行い、塩分量や鋼材の腐食状況を確認する必要があると**考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験と教科書的な知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［四人目　けばとり文］

Q. あなたは点検をするためにこの橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. かなりひどいなという感じで、主桁の方は、下フランジというか下端側のひび割れ、剥離という状態で。横桁、中間横桁だと思うのですけれども、同じように下のところの剥離に近いようなひび割れ、叩いてみないと何とも言えないですが、剥離しているような。で、原因としては内部の鉄筋の腐食が原因だと思われます。架橋位置がどういうところかわからないですけれども、この状態からすると塩害の影響があるのではないかと思われます。対策としては、早急に断面復旧等をやる必要があるとは思うんですが、

塩分が入っている状況だと、断面復旧をしたところでどの程度の効果があるのか、ちょっと、わからないところなので、塩分測定するまでもないのかな、補修方法については少し検討が必要かなと、経過観察というか、モニタリングのレベルかもしれないとは思います。はい、そんなところですかね。

Q. 損傷という意味ではひび割れ、進行した剥離がありました。その結果、この橋にはどのような性能低下が疑われるでしょうか。

A. 耐荷力の低下が考えられるかなぁと思われます。もちろん、耐震性等も含めて全て低下していると思います。

Q. その低下を疑った理由は何でしょうか。

A. コンクリートの下の引張側の剥離ということで、鉄筋あるいは PC 鋼棒、これ PC だと思われるんですけど、これ PC ですかね？コンクリート橋だと思われる

Q. RC ですね。

A. そうですね、RC ですね。まぁ、鉄筋の方もかなり傷んでいるだろうということで、耐荷力の低下を疑いました。

Q. わかりました。そのような判断をした、根拠となる考え方は何でしょうか。経験、常識、知識、

A. 判断の根拠

Q. はい。そういう仮説を立てられた根拠、考え方

A. コンクリートの断面ですから、鉄筋とコンクリートが一体性を持って、必要な断面を保持しないとだめだと思うのですけれども

Q. それはいわゆる、鉄筋コンクリートとしての教科書にかかれたような、そういう非常に基本的な

A. そうですね。

Q. そういうことを論拠としてお考えになったという理解ですね。

A. そうですね。

Q. わかりました。じゃあ、こういう原因は既に述べて頂いておりますけれども、何が原因で生じているかを改めて確認させてください。

A. 状況からたぶん塩害が疑わしいかなと。周辺状況をみればわかる話ですが、塩害が疑わしいかなと。

Q. わかりました。そういう風な塩分、塩害ということで仮説を立てられたわけですけれども、その仮説を立てられた根拠は何でしょうか。

A. この損傷の状況が通常の乾燥収縮とか施工不良で生じるような損傷では無いのかなと。塩害による損傷

Q. それは維持管理上の教科書に載っていることなのか、あるいは、自分のご経験

A. そうですね、経験と知識ですね。

Q. わかりました。ありがとうございます。最後に今この写真を見た上での、このようなご判断、回答結果の正しさに対する自信ですね、10 点満点でいったらどれぐらいの自信がありますでしょうか。

A. 8 割、9 割はあっているかなと

Q. 8-9 点、ありがとうございます。

［四人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁の下端にひび割れと剥離が生じている。横桁の下端にひび割れと剝離が生じている。それら変状が生じている**ため**、内部鉄筋に腐食が生じている**可能性がある**。架橋位置がわからないが、ひび割れの入り方が塩害特有のものである**ため**、塩害の影響がある**可能性がある**。
早急に断面復旧を行う必要がある**と考える**。しかし、塩分が入っている場合は断面復旧の効果がわからない**と考える**。塩分計測をするまでもない**と考える**が、補修方法については検討が必要だ**と考える**。モニタリングを行うべき状態の**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。

Q. その低下を疑った理由は何か。

A. コンクリート桁の引張側の剥離が生じている**ため**、引張側鉄筋がかなり傷んでいる**可能性があるので**、耐荷力の低下がある**と考えた**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 教科書に書いてあるような知識である。

Q. 何が原因で生じているかを改めて確認させてください。

A. 状況からたぶん塩害が疑わしい**と考える**。

Q. その仮説を立てられた根拠は何か。

A. この損傷の状況が通常の乾燥収縮とか施工不良で生じるような損傷では無いと考えられるので、塩害による損傷だ**と考える**。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［五人目　けばとり文］

Q. この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. まずはひび割れの入り方ですね、これって具体の話もですか？

Q. えぇ。

A. 気になるのはやはり水平方向のひび割れが多数出ていること。フランジの真下のひび割れは、出るのはいくつか事例が報告されていますけれども、特徴的なのはかぶりコンクリート、補強されたところが、また再劣化しているように見える形に。水平方向のひび割れですね。かぶりの下側から全部落ちてくる、こういうのが特徴的だと思います。

Q. そうですね。

A. この橋、海岸に近い河川だと思うのですが、そう言うところにある橋で、塩害の影響を受けているのだろうなというところが気になるところです。

Q. はい。

A. 位置関係が良くわからないのですが、黒い脚なのかなと

Q. 黒い支柱、脚

A. 支柱なんですかね。これの目的がよくわからないなということですね。あとは、橋脚、たぶん石張りな

んでしょうけども、近接していないのでよくわからないですが、護岸が石組みだと不安があるなというところです。そういったところでしょうか。

Q. わかりました。大きなものはひび割れが多数

A. そうですね。

Q. この見つけられたことから、この橋にはどういう性能低下が疑われるでしょうか？

A. RC の橋だと思うのですけれども、下側の引張側の腐食、実は補強されているけども、断面が失われていて耐荷力が低下している可能性があるのかなぁと、心配します。

Q. わかりました。その耐荷力の耐荷性能の低下を疑った理由は何でしょうか？

A. 理由はこのひび割れの大きさですね、再劣化をしていて、再劣化しているコンクリートがそんなに古くは無いと思うのですが、再劣化してから、直してから比較的早いうちに再劣化しているのかなと印象を受けます

Q. 直してからっていうのは塗装、、

A. 色が違っているので

Q. はい。

A. オリジナルのコンクリートに張り付けて、こて塗か何かで仕上げているのでしょうけども、早いうちからひび割れが入ってきているということは、中の鉄筋が膨張している。膨張しているんで、腐食の懸念があるんで、引張側の鉄筋の不足に繋がっているのかなぁというのが心配です。

Q. どういう措置を取ることがここでは望ましいでしょうか。

A. 措置ですか。措置に関してはこれでしたら、もう鉄筋が危ういのであれば、鋼板をまくというのが非常に難しいと思いますので、大胆なことが出来るのであれば桁を入れてあげる、もしくは、補修を数回繰り返して、かつ、下側の鉄筋の程度を観察しながら、いよいよダメな時に架け替えを考えるべきだと思います。

Q. ありがとうございました。今のような性能低下を判断したような根拠となるようなものは何なんでしょうか。知識、経験、

A. ひび割れを見た感じでは早期の内に再劣化が起きているので、

Q. 教科書、あるいはご経験

A. どちらかというと経験

Q. 経験ですか、ありがとうございました。認識した変状全ては何が原因で起きていますでしょうか？

A. やっぱり、塩害の影響が大きいと考えております。

Q. わかりました。海に近く、塩害と。

A. はい。

Q. わかりました。そうするとこれもまた繰り返しになりますが、以上のような仮説を立てられたわけですけれども、そのような仮説を立てられた根拠はなんでしょうか

A. 類似の事例を、そんなに数は多くは無いですが、類似の事例からですね。

Q. 類似の事例で得た、知識

A. そうですね。

Q. 最後にこの写真を見て仮説、解説、いろいろと回答いただきましたが、正しさに関するご自身の自信ですね。10 点満点で何点くらいありますでしょうか？

A. 難しいですね、5-6 割でしょうか。

［五人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. フランジ下に水平方向のひび割れが多数生じている。下面側のかぶりの下側が全部落ちている**ため**、補強されたところが再劣化している**可能性がある**。海岸に近い河川である**可能性があり**、塩害の影響を受けている**可能性がある**。黒い支柱の目的がわからないが、おそらく石張りである**ので**、それが心配だ**と考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. RC の橋である**と考える**。梁の引張側の腐食が生じている**のであれば**、鋼材の断面が失われている**ので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. 耐荷力の低下を疑った理由は何か？

A. 理由はこのひび割れの大きさである。塗装の色が違っている**ため**、再劣化をしている**可能性がある**が、再劣化しているコンクリートがそんなに古くは無い**可能性があり**、直してから比較的早いうちに再劣化している**可能性がある**。そうである**のであれば**、中の鉄筋が膨張している**可能性があるので**、引張側の鉄筋断面の不足に繋がっている**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 引張側の鉄筋断面が不足している**のであれば**、鋼板を巻く、あるいは、大胆なことができる場合には桁を追加する**と考える**。もしくは、鉄筋の程度をモニタリングしながら補修を数回繰り返し、いよいよだめになった際に架け替えを行う**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 6 点である。

［六人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. PC 鋼材の腐食が懸念、腐食、破断が懸念されます。この下がどういう状況かわからないですが、恐らくコンクリートが落ちてくるくらいの、貫通したひび割れがあると思うのです、下の状況ですね。第三者に影響が無いか、というところが気になります。PC でこれだけコンクリートが劣化していれば、橋の耐荷力って言うところも気にはなるので、全体的な部分をしっかりと見ていきたいなというところかな。気づいた所は、気づいた所はこんくらいですかね。

Q. 気付かれたところと、背景の所は今仰っていただきましたが。結局、変状として見つかったのは、ひび割れということでよろしいでしょうか。

A. はい。

Q. ひび割れの部位と言いますか、部材は

A. 主桁、横桁ですね。

Q. わかりました。そうすると主桁、横桁の PC 桁にひび割れと、コンクリートにひび割れと。それを見つけて、どう思いましたか？

A. 緊張している方向に沿った下面のひび割れがあるので、その耐荷力の低下が懸念されるというところと、ひび割れ自体が大きいので、剥落による直下の第三者への影響が気になります。恐らく、このひび割れの原因が PC 鋼材の腐食や破断と言うことが懸念されるので、その中の状況についても確認して、補修と言うか、確認したいというところが考えられるところです。

Q. わかりました。性能低下という意味からすると、耐荷力の低下が疑われると

A. はい。

Q. それは先ほどおっしゃいましたように。大きなひび割れで、それは PC 鋼材の腐食がかなり進んでいるだろうと

A. はい。

Q. 今のような疑いを持たれたわけですけれども、第三者のことも仰いましたが

A. 緊急時は叩き落としが必要ですかね。

Q. わかりました。一通りいろいろとお答えいただきましたが、お答えいただいた見立てについて、その根拠となる考え方は何でしょうか、知識、常識、経験、そのたぐいのもので言うと

A. そうですね、何を元に、

Q. その全て、いろんなことがあると思いますが

A. これまでの経験ですかね。正直長くは無いが、点検の経験、本で、、

Q. なるほど、経験と知識ですかね。

A. はい。

Q. わかりました。で、その変状の全てはどういう原因で生じているか、もう一度仰っていただけないでしょうか？

A. PC 鋼材の腐食だったり、破断だったり、というところで、

Q. そうですね。腐食、破断の原因ということでは

A. グラウトの注入不足ですとか、上面からの水がそのグラウトの中に入っているところとか、剥落防止してるのか。しているのであれば、その橋面からの水が剥落対策の上面に溜まることで、下の方から順番に腐食している、そういうイメージ

Q. なるほどね。そういう仮説を立てられた根拠は何でしょうか。知識、経験、いろんなことが

A. そうですね、見た目の色が、桁の色が、一般的なコンクリートと違うところと、色自体が同じ桁でも高さで色味が違う箇所があるので

Q. なるほど

A. 何か貼られているのか

Q. ということは、そういう細かいことがなかなか本にかかれていないので、そういう意味ではご経験ということが

A. はい。

Q. そうですね。今までのお話で、回答の正しさに関して自信で言うと 10 点満点で

A. 3 点ぐらいですかね

Q. そうですか

A. もうちょっと回りが見えると、

［六人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. コンクリート片が落ちるくらいの主桁と横桁の貫通したひび割れが生じている**ため**、PC 鋼材の腐食が生じている**可能性がある**。コンクリート片が落下する**のであれば**、第三者被害が生じる**可能性がある**。また、緊張している方向にひび割れが生じている**ため**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 叩き落としを行う必要がある。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験と知識である。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. グラウトの注入不足や上面からの水の侵入、剥落防止をしているのであれば橋面からの水が剥落対策の上面にたまる**ので**、下から順番に腐食している**可能性がある**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 3 点である。

［七人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁の下フランジに橋軸方向のひび割れ、主桁に関して申しますと、向かって左側の桁は、下フランジとあと、水平ですから、ウェブですかね。ウェブの下側の方に橋軸方向のひび割れが見られます。端部ではなく中間横げたのはりのウェブの下端部に、水平方向ですから、橋軸直角方向にひび割れが見られます。他はひび割れですかね、特にひび割れ幅が大きいひび割れが見られます。という感じですか。他に特に目立った変状はない。主桁と横桁だけですかね。

Q. 質問は変状は何ですか？と聞いている訳では無く、この写真で気づいたことを全て述べてください？というものです。

A. 他にですか。これはメインが本線があって、左側が桁の PC の I 桁橋のようなコンクリート橋だと思うのですが、拡幅構造になっている。そういう拡幅構造、上の橋面がわからないので何とも言えませんが、拡幅構造になっている。よくわからないのですが、縦方向の黒くなっているのが良くわからないのですが、補強されているのかもしれませんが、ここが橋台で、ここがアバットだと思うのですが、石積みレンガの上に見えます。そうですね。

Q. わかりました。変状としては先ほど仰ったように、主桁と中間横桁にそれぞれの軸方向下端にひび割れが出てきたというわけですが、それについてどのように思いましたでしょうか？

A. この写真から推定しますと、環境が海がたぶん、塩害環境地域ではないかと、それでたぶん、このひび割れは恐らくですけれども、その塩害による、ひび割れがパッと見た感じ、数 mm では無く何 cm のオーダー、ひび割れですので、塩害によるひび割れではないかと推定されます。

Q. わかりました。どのような性能低下がこの橋には疑われるでしょうか？

A. ひび割れから錆汁らしきものが見えないのですけれども、私が思うに主桁と横桁にこれくらいの大きいひび割れが出ておりますので、主桁と横桁には耐荷力の低下が見られます。

Q. これはちなみに、どういう構造と言う風にご覧になっていますか？

A. コンクリート桁ですけれども、支間長が 40m ですのでポステン、下フランジが袴をはいていないものですけれども、ポストテンション方式の桁。RC では無いと思います。

Q. 40m もあるからポステン PC ということですね。

A. RC の T 桁ではないと思います。

Q.今の様に塩害がひどくってということで、疑いを持たれたわけですけれども、耐荷性能、性能低下といういみでは、どのような性能低下でしょうか？

A. 旧の H31 要領ですと、健全性 III 相当。つまり、5 年以内に直ぐに補修をするべき、耐荷力が低下している状態と推測されますので、III 相当、5 年以内にやるべき

Q. なるほど。耐荷力が低下しているということですね。耐荷力が低下していると疑った理由は塩害だからということですね。

A. はい。

Q. ありがとうございました。どういう根拠を元に、そういうようなお考えになられたのでしょうか？経験だとか知識しか

A. 経験とか、知識はほとんどないのですが

Q. とすると常識ですか？

A. 常識では無いですが、どういう根拠を元に？あの一、ひび割れが異常に広い、幅広く、塩害環境で、こういうような写真を見た時に特に疑われるのは塩害地域で特にひび割れ幅が大きい。

Q. 知識なのか、ご経験なのか。

A. どちらかというと、前に北陸支部にお手伝いに行ったときに、こういう橋を 1-2 回見たことがありますし、よくこういう写真ではひび割れ幅が大きい塩害地域に特有の

Q. いろいろと学習された知識が大きいですかね。

A. そうですね。

Q. 知識が大半で、ご経験が少し

A. 若干ですかね。

Q. 仮説を立てられたのも経験、知識ということで。今までの回答に対して、どれくらい正しいのか、ご自身の自信のほどを 10 点満点で

A. 私は塩害だと思いますので 6-7 割は確かだと思う

Q.　6 点か 7 点かどっちだと思いますか？

A. 7 点で

［七人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁の下フランジとウェブに橋軸方向のひび割れが生じている。中間横桁のウェブの下端部に橋軸直角方向のひび割れが生じている。左側が PCI 桁の拡幅構造である。右側は下フランジが袴をはいていないが、支間長が 40 m である**ため**、ポストテンション方式の桁である**と考える**。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 数 mm ではなく、数 cm のひび割れ幅が生じている**ため**、塩害によるひび割れが生じている**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. ひび割れから錆汁が見えないが、主桁と横桁に大きいひび割れが出ている**ため**、主桁と横桁の耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。5 年以内には補修をするべきである**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 学習した知識である。以前、塩害を受けたこのような橋を見た経験もある。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［八人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁下面に橋軸方向のひび割れと、中間横桁に軸方向、横方向ですね、下下面にひび割れが入っている状況。河川を跨ぐ橋梁ということで、鉄筋腐食によるコンクリートの浮きが生じている状況と思います。主桁自体は曲げひび割れ、鉛直ひび割れが入っていないので、耐荷力上は低下していない状況。このひび割れは下面なので、塩害ないし中性化によって鋼材が腐食膨張している状況と思われます。床版自体は特に問題がなくて、桁と床版と横桁全部が被覆材で覆われていますので、塩害ないし中性化で補修補強した状況で損傷が生じていると思われます。実際の浮き自体は補修しているので、断面修復材の再劣化が生じている可能性もあって、という状況かと思われます。

Q. 確認ですけれども、変状としては主桁下面及び横桁の下面における軸方向のひび割れということでよろしいでしょうか。

A. はい。

Q. 仰っている中で、被覆材で覆われているということで。

A. 覆われているので、一度何か補修されているという状況

Q. わかりました。耐荷力の低下は特に懸念されないと。

A. そうですね。今の段階ではないと

Q. それ以外の性能低下は？

A. 耐久性能の低下としては、やはりひび割れ幅は広いので、河川上と言うことで湿気が良く入るというと

ころと。T 桁ですと巻き込んでよく入る。塩害だと入ってくるので、更に広がってくるのかなと。補修はすべき段階かなと。T 桁と書いてあって RC か PC かわからないですが、それによって少し変わってくる。支間長は 40m。PC ですと、PC 鋼材位置まではまだいっていない状態かなと。周りの軸方向鉄筋だけのひび割れかなと思います。

Q. わかりました。既に耐久性低下の理由もひび割れ幅が大きいとお答えになっておりますので、今のような認識で、緊急時もしくは現在において、取るべき措置としてはどのような措置が望ましいでしょうか。

A. 緊急措置としては通行止め等はまだいらない段階かと思われます。5 年後云々ですと、このコンクリート、河川、下の供用されていれば第三者の措置でこれが落ちてくる可能性があるので叩き落としするか、その辺の対策は必要かなと思います。

Q. 第三者被害の防止措置

A. はい

Q. ありがとうございます。ずいぶんメカニズムから何からお答えいただきましたが、今のお答えに至るまでの根拠となる。つまり、経験とか知識とか、学習とか勘とかいろんな

A. 根拠としては PC 桁の塩害補修工事を何度かやったことがあるので、劣化メカニズムとどういう状況で生じているかはわかっております。PC 橋の設計もしたことがあるので、かぶり値に対して鋼材の配置も分かっているので、それから判断しています。

Q. わかりました。今のことをまとめると設計および維持管理工事の経験をお持ちで、かつ、まぁそれに必要な知識と言うことですね。今の回答の正しさについて、その自信を 10 点満点で言うと何点ぐらい？

A. 8 点ぐらいかな

［八人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 支間長 40m の PC 橋で、主桁下面に橋軸方向のひび割れ、中間横桁に軸方向と下面にひび割れが生じている。コンクリートの浮きが生じている。下面にひび割れが生じている**ため**、塩害もしくは中性化により鋼材が腐食膨張している**可能性がある**。床版は問題が生じていない。主桁と横桁と床版の全てが被覆材で覆われている**ため**、塩害もしくは中性化で補強補修した**可能性がある**。コンクリートの浮きが生じている箇所も補修している**ため**、断面修復材の再劣化が生じている**可能性がある**。主桁に曲げひび割れが生じていない**ため**、耐荷力は低下していない**可能性がある**。PC 鋼材位置は健全で周りの軸方向鉄筋のみが腐食している**可能性がある**。

Q. それ以外の性能の低下は疑われるか？

A. 塩害である場合、T 型断面は飛来塩分を巻き込みやすく、河川上は湿潤であり、ひび割れ幅が大きい**ため**、耐久性が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 緊急措置としての通行止め等は必要ない段階である**と考える**。ただし、コンクリートの浮きが生じている**ため**、第三者被害の防止措置の観点で叩き落とし等の対策を取る必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 設計および維持管理の経験と、それに必要な知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［九人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これは PC の T 桁で塩害によって、再劣化した状態だと思います。下が河川なのか、海に近い。これを再劣化ですね。内部の鉄筋が腐食し、膨張し、ひび割れが生じて、部分的にも剥離が生じて、

Q. まず観察できることをお聞かせいただきたいのですが、まだひび割れとしかお答えいただいていない

A. 錆汁はまだ出ていない状態ですけれども、ひび割れ幅が大きいところをみると、内部の鉄筋が鋼材が腐食膨張している。そして表面に明らかに表面被覆している。塩害か何かで塗っていて劣化したんじゃないかと思います。

Q. それではこの今までの、写真に対する気付かれたことなんですけれども、それによって性能の低下が疑われるとすればどのような性能低下でしょうか。

A. 性能の低下ですね。主桁の耐力が落ちるということと、横桁の下に鉄筋が腐食している。たぶん横桁の荷重分配の力を伝達する性能はまだあると思います。ちょっと気になるのは右側の方はあまりひび割れ、劣化が見られないのですが、左側の方ですね、後で架けたものだと思うのでこっち側のホロー桁を拡幅している。本来は末端の桁がやられている。左から G1 とすると、G1 が最も損傷が激しいと思います。現地を見てみないとわからないですが

Q. 端っこにあるからということですか。

A. これの間で水とか入ってきたり、塩分がたまったりするのではと思います。こちら側の方が塩害の影響が出ているのではと思いますが。

Q. ご経験がおありでしょうから、今までのお話でひび割れが生じて内部鉄筋が膨張してというお話であるんですが、ひび割れが出ている箇所や部位や、内部の鉄筋というお話もあるんですが、もう少し細かくお話いただけないでしょうか。

A. 上から入ってきたか、下からという意味ですか？

Q. いいえ。この桁の下端の方に軸方向のひび割れが入っているですけれども、単にひび割れとしか仰っていないので、どういう読みを、判断の根拠をされているのか読めなかったものですから。

A. こちら方向に向こう方向のひび割れ、これでしたらグラウト不良が原因の場合もあれば、下側の ASR で出る可能性もあるんですけれども、これ、横げたにも同じようにひび割れが出ていて、外側の鉄筋、断面修復していますよね。真ん中あたりの修復の色が違いますよね。曲げ耐力が落ちている、ただし、縦方向にひび割れが出ていない。そういう意味では耐力的にはそんなに落ちていないかなと思います。

Q. 縦方向のひび割れが無いからということですね。

A. 橋軸直角方向にひび割れが出ていないので、耐力的にはあるんかなと思うのですが

Q. この橋に性能低下があるとすればどういう性能低下があるでしょうか。

A. 性能低下ですね

Q. 主桁の耐力が落ちるとおっしゃられたのですが、縦方向にひび割れが出ていないので曲げ耐力があると、

A. 有効断面が無くなっていますからね、ひび割れの下が。そうすると変位も当然大きくなりますし、あまりよろしくないですね。これ自体が剥落してしまいますし、ひび割れより下側のところが。そうすると

Q. 耐久性

A. 耐久性も落ちるでしょうね

Q. わかりました。ありがとうございます。今この橋に関してはどのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 一応これ過去に補修しているので、たぶん原因が特定されればいいんですけれども、再劣化していますので、塩害ということだけに話をするともうこれは中の鉄筋がさびていますし、横断面が要は平面保持が成り立っていないですよね。下の方は。ですので、修復するにはやっぱり、塩害だったらどうしようもないですね。プレストレスが落ちている症状が出ていれば外ケーブルで縛るしかないと思いますがそこまでは行っていないと思います。

Q. そのような見立てをされたわけですけれども、根拠となるようなものは何でしょうか。経験、知識、

A. 実際のものを見ていないので、支間が 40m ということでたぶんこれは RC じゃないと考えて、当然 PC と。なおかつですが製作した年代を考えないといけないのですが、あとは架橋した環境ですね。その環境と、損傷の状態が塩害特有のその、特化したような症状だと判断したんですね。

Q. 広く考えるとご経験を根拠として

A. していますね

Q. わかりました。今のこの回答結果に対してどれぐらい正しいのか、正しさに対する自信、10 点満点でいうと何点くらい

A. 7 点くらいですかね。

［九人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. PC の T 桁で塩害による再劣化が生じている**と考える**。ひび割れと部分的な剥離が生じて**おり**、内部鉄筋の腐食と膨張が生じている**可能性がある**。さび汁が出ていないが、コンクリートのひび割れ幅が大きい**ため**、内部の鋼材が腐食膨張している**可能性がある**。表面被覆している**ため**、塩害が生じている可**能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 主桁の耐荷力が落ちている**と考える**。横桁の下側の鉄筋が腐食している場合**であっても**、横桁の荷重分配をする能力はある**と考える**。拡幅しているが、拡幅部から水が浸入する**可能性があるので**、G1 の腐食が最も厳しい**と考える**。

Q. 判断の根拠を交えて、もう少し詳しく教えてください。

A. 橋軸方向のひび割れが生じている**ため**、グラウト不良や ASR が生じている**可能性がある**。ただし、横桁にも同様のひび割れが発生しており、桁の真ん中付近の色が異なる**ため**、断面修復している**可能性があるのであれば**、曲げに対する耐荷力が低下している**可能性がある**。しかし、縦方向にひび割れが出ていない**ため**、耐荷力は低下していない**可能性がある**。有効断面が無くなっている**可能性があるので**、変位が大きくなる**可能性がある**。剥落や耐久性の低下も生じる**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 過去に補修をしているが、再劣化が生じている**可能性がある**。塩害であれば中の鉄筋が腐食している**可能性があるので**、断面の下側の鋼材の腐食とコンクリートの剥離により平面保持が成立していない**可能性がある**。プレストレスが落ちている**のであれば**、外ケーブルで縛るしか方法が無い**と考える**が、そこまでは損傷が進行していない**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［十人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁と横桁の下フランジ側に部材軸方向に顕著なひび割れが出ていると。ほぼほぼすべての部材に。あと一部の部材が既に補修が行われている状況かと思います。おそらく河川上かどっかにかかっている橋梁かと思います。桁端部に既に、漏水が起こっている。漏水痕がある。橋脚ですかね。この辺、壁かな。補修しているのかな、何か補強しているのかな。おそらく河川に架かっている橋かなと思います。あと、床版のあたりに何か錆汁のようなものがついているようですので、床版からも漏水、あるいは床版内部の腐食も進行していることが予想されます。

Q. ありがとうございました。これを見てどう思いましたか？

A. 非常に危険な状態かなと思います。既に補修しているところの再劣化も起きている状況ですので、診断としてあれですが、早急に措置が必要な状況だと思います。C2 判定。今ちょっと変わりましたですけれども、もう少し上の E 判定でも良いのかなと思います。

Q. どのような性能低下が疑われますでしょうか。

A. 主桁の耐荷力がこれは間違いない。耐荷性能が落ちている、ほぼ間違いないかなと思われます。耐久性についても水の侵入が明らかですので、対して耐久性の方にも低下の影響が見られると。

Q. わかりました。そういうあの性能低下を疑った理由は、既に述べておりますが何でしょうか。

A. 主桁の下フランジ側にひび割れが出ているということですので、内部鉄筋、あるいは内部の PC 鋼材が腐食している状況ですので、これは間違いなく耐力低下が生じている。横桁も同様に内部に水が入って腐食が進行していると思います。

Q. そのような疑いを持たれたわけですけれども、どういう措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. これはちょっと難しいですが、これは交通規制を張りながら、一部ひび割れが出ているところをはぎ取って、内部の状態を確認するということが重要かなと。内部の状態を確認すると。水の侵入がどこから行われているかの調査も必要に思います。あとはその状況に応じてって感じになりますけれども、腐食が進行しているのであれば何らかの防食を施して、コンクリート断面の修復をするとか、あるいは明確な耐力低下が確認されるのであれば、これは最後の手段ですが更新を視野にいれたような対策が必要と。

Q. わかりました。お答えいただいた見立てについて、その根拠となるものは何でしょうか。経験とか知識

とか、あるいはこれまでの学習だとか。

A. 類似ケース、過去の事例で沿岸地区とかで類似の損傷が発生しているようなケース、内部の状況、腐食がもう進行している状況があります。

Q. それはご経験ということで

A. はい。

Q. ありがとうございました。今のご回答の結果の正しさに関してどれぐらいの自信をお持ちですか？10 点満点で。

A. 8 点ぐらい

［十人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. ほぼ全ての主桁と横桁の下フランジに部材軸方向のひび割れが生じている。一部の部材に補修が行われる**可能性がある**。河川に架かっている橋である。桁端部に漏水痕がある。床版にさび汁がある**ため**、床版からの漏水や床版内部の腐食が進行している**可能性がある**。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 非常に危険な状態である**と考える**。既に補修している箇所の再劣化も起きている**可能性がある**。早急に措置が必要な状態だ**と考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 主桁の耐荷力がほぼ間違いなく低下している**と考える**。水が侵入している**ので**、耐久性の低下が生じている**可能性がある**。

Q. そのような性能の低下を疑った理由は何か？

A. 主桁と横桁の下フランジ側にひび割れが生じている**ため**、水が浸入し、内部鉄筋、あるいは内部の PC 鋼材が腐食している**可能性があるので**、間違いなく耐荷力の低下が生じている**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 交通規制を行いながら、はつり調査と水の侵入経路を把握するための調査を行う必要がある**と考える**。腐食が進行している**のであれば**、防食を行いコンクリート断面の修復を行う必要がある**と考える**。耐荷力の低下が生じている**のであれば**、更新を視野に入れた対策が必要である**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 類似ケースや過去の事例に関する経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［十一人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. コンクリートの T 桁でおそらく RC でしょうね。桁下端部にかなりのひび割れ幅の大きいひび割れというよりも、はくりに近い状態ですが、状況を見るにいかにも塩害という状況に見受けられます。桁を見ると、表面被覆をした後が、表面被覆されていますかね。過去に予防保全的な措置をされているのかな

と思いますので、下はおそらくは河川ではなく海ということで、塩害を受けた橋梁ではないかと思います。既に内部の鉄筋がかなり腐食膨張してこういった状況に至っている状況ですので、下端部の塩分量はまぁ、測ってなくとも 2kg-3kg、かなりの量が入っていて、特に下の方、桁の下の方の鉄筋の腐食膨張でこういった形で、かなりの幅のひび割れ、ボロボロ落ちてくるでしょうけども、そういったものが見られる状況になっております。損傷の範囲も端まで見られないですが、左から 1 本目、2 本目は橋軸方向に入っています。横桁に見られますが、左側を G1 とすると、G1-G2、G3-G4 の間は全長に渡ってひび割れが見られる状況ですね。かなり広範囲に損傷が拡大しているような状況かと思います。気づいたこと全てですので、もうちょっと言いますと状況と言いますと、まずは詳細調査をした上で塩分量を測って、はつり調査をして鉄筋の状態を確認すると、それからコンクリートの塩分量と内部の鉄筋の状況が分かったうえで、措置の方針を決めるということになりますが、ある程度塩分が入ってしまったものに関しては、なかなか抜本的な補修工法も無いので、基本的になんて言うんですかね、架け換えも視野に入れつつ検討を進めるべきだと思います。このレベルまでいくとそういうレベルかと思います。我々としては架け換えも提案しつつ、発注者さんと道路管理者さんと打合せという形になるかと思います。その辺がまぁ、あの、架け換えとか交通量的に論外だということであれば、断面修復をするなりして、電気防食なり、あんまり最近やられないですが、脱塩という工法を提案していく形になっていくと思います。

Q. わかりました。一通りどんどんお考えになりましたが、想像できるんですが一応ご質問いたします。トータルとして捉えられて、性能の低下の観点ではどういう性能低下が疑われますか。

A. こちらについては RC で最下縁の鉄筋がかなり腐食膨張している。母材がかなり減少して、断面減少していることになりますので、耐荷力低下が生じている状態と言い切ってよいと思います。その辺の程度によっては、ある程度はつり調査をしてみないとわからない。本当にもうちょっと細かくやるのであれば、例えばダンプを通す等の載荷試験を提案しても良いと思います。

Q. わかりました。既にお答えになっておられますが、もう一度念のため確認で聞きます。耐荷性能の低下を疑った理由として最も大きなものは何でしょうか。

A. ひび割れの入り方が最下縁の鉄筋の腐食膨張。これがやはり、RC 構造物での耐荷力の、一番大きいんじゃないか。圧縮側のコンクリートと引張側の鉄筋、この 2 つで RC 構造物が出来ますので、引張側の方が断面減少しているということで、そう判断いたしました。

Q. 今までのそのお見立てに関して根拠となるものは何でしょうか。経験や学習の結果とか、あるいは、知識とか

A. 今ぱっと見で、経験ですね。やはりこの手の構造物でこういう桁の下縁側に橋軸方向のひび割れとも呼べないものが入っているものは、たいてい塩害。

Q. わかりました。今お答えになった回答結果の正しさについて、自信を 10 点満点で

A. 8 点ぐらいですかね。

［十一人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. コンクリートの RCT 桁である。桁下端部にひび割れ幅が大きい、剥離に近いひび割れが生じているた

め、塩害である**可能性がある**。桁が表面被覆されている**ため**、下は河川ではなく海である**可能性がある**。剥離に近いひび割れが生じている**ため**、下端部の塩分量は測らなくとも 2-3kg 入っている**可能性があり**、それにより鉄筋が腐食膨張している**可能性がある**。複数の主桁と横桁にひび割れが生じている**ため**、広範囲に損傷が拡大している**と考えるので**、はつり調査と塩分量の計測を行い措置方針を決める必要がある**と考える**。ある程度塩分が入っている**のであれば**、抜本的な補修工法も無い**ので**、架け替えも視野に入れた検討を行う必要がある**と考える**。交通量があり架け替えができない**のであれば**、断面修復や電気防食や脱塩等の工法を提案する**と考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. RC の再下縁の鉄筋が腐食膨張している**可能性があるので**、断面減少が生じている**可能性があり**、圧縮側のコンクリートと引張側の鉄筋の断面のつり合いが成立しない状態である**可能性があるので**、耐荷力が不足している**可能性がある**。詳細にははつり調査を行わないとわからない**と考える**。ダンプを通す等の載荷試験を提案してもよい**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［十二人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁とか横桁にひび割れっというのか、かなり幅の広いですね、結構剥離しそうな状態の損傷が見られます。原因として考えられる点としては、中の鉄筋が腐食膨張したことで、ひび割れが拡大してこのような損傷に至ったのかなと。その腐食に至った要因としては塩害地域にある橋なのかなということがちょっと考えられます。あとは補修しているところもあるんですが、そこらへんが、一緒にこう、かなり延長のある状態でひび割れが入っている状態です。これは塩害、塩化物イオン、昔から塩害があって、塩分が除去しきれていないことも原因としてあるのかなと。というなところです。気づいた点はそのような所です。

Q. わかりました。どう思いましたか。このひび割れを見て

A. かなり深刻な状態にあるなということで、橋のその耐荷性能という部分でも、影響のありそうな損傷だという印象を受けました。

Q. 耐荷性能の影響があるということで、具体的には耐荷性能の低下が認められますか？

A. はい。その主桁の下フランジあたりに向かって大きなひび割れが入っていまして、もう下フランジ周辺の断面は損なわれているような状態にほぼ近いと言ってもいいぐらいな状態なので、耐荷性能の低下の、えー、影響は何かしらあるのかなあると思います。

Q. 何かしら

A. これは詳細調査をしてみないと何とも言えない。

Q. 耐荷性能の低下を疑った理由は何でしょうか？

A. そのかなりひび割れというか、剥離に近い状態で、しかも主桁や横げたの広範囲にわたって、損傷が生じているというような状況からも、状況から判断しております。

Q. わかりました。耐荷性能の低下の疑いがあるということで、どのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 鉄筋も腐食しているでしょうし、その脆弱部がどれぐらい出ているかわからないのですが、影響を受けている範囲を補修してもですね、おそらくまた、これだけ損傷が広がっているということは、また再劣化して同じような状態になるのかなということからも、補強、外ケーブルだとか、そういったもので補強対策をするということも視野に、当然その脆弱部の断面修復成の補修はしますが、塩分もその影響、鉄筋が腐食しているところの発錆限界を超えるような塩分量も、塩分量が超える所は除塩もしてですね、断面修復をして、外ケーブルとか補強方法も織り交ぜて対策をする必要がある。

Q. 緊急時というよりは、次の点検までにすべきということでしょうか？

A. これだけ大きな損傷なので、詳細調査が、追跡調査なりで、こういった損傷のまた再劣化、確認しながら、橋を共用させるのが望ましいのかなと思います。

Q. 再劣化というのは 2 回仰っていますが、再劣化に関しては、再劣化という言葉が突然でてきたが、それはなぜでしょうか？

A. 中の塩分が取り切れていないようなところだとか、塩害、断面修復の不十分なところから劣化因子が浸入することからも、推測しています。

Q. 補修履歴があるということですね。わかりました。今までお答えいただいたのですけれども、それの根拠となるものは何でしょうか？経験なのか、あるいは、事例の学習なのか、知識なのか

A. 直接はこういった現場は見てはいないんですけれども、他の橋梁診断員が行った現場で、こういった事例がありまして、それを参考に、それが会社の中でも情報共有しているので、事例の学習ということですね。

Q. ありがとうございました。お答えいただいた結果に関してどれぐらいか正しいか、自信のほどを 10 点満点で教えてください。

A. 4 点ぐらいですね

［十二人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁と横桁にかなり幅が広く、剥離しそうなひび割れが生じている**ため**、中の鉄筋が腐食膨張した**可能性があるので**、塩害の影響がある**可能性がある**。補修している箇所もあるが、かなり延長のあるひび割れが生じている**ため**、塩化物イオンが除去しきれていない**可能性がある**。

Q. この変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. かなり深刻な状態であり、橋の耐荷力に影響がありそうな損傷だという印象である。

Q. 耐荷力の低下を疑った理由は何か？

A. 主桁の下フランジに大きなひび割れが入っている**ため**、下フランジ周辺の断面が損なわれている**ので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 鉄筋の腐食が疑われる損傷が広範囲に広がっている**ので**、補修しても再劣化する**可能性があるので**、塩分除去と断面修復と外ケーブル補強を織り交ぜて対策を講じる必要がある**と考える**。これだけ大きな損傷である**ため**、詳細調査や追跡調査を行い再劣化を確認しながら橋を供用する必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 4 点である。

［写真 2 枚目］

Q2.この写真で気づいたことを全て述べてください。



橋梁形式：橋長 400m、鋼 4 径間連続鈑桁及び鋼 4 径間連続トラス橋
ピンローラー支承

［一人目　けばとり文］

Q. この写真で気づいたことを述べてください。

A. 壁高欄の橋軸直角方向に、はっきりとしたことは言えませんが、10cm 程度のずれが生じていると、それと同時に伸縮装置のところのフィンガープレートの遊間がかなり大きく開いておると、同時にこれも同じく、橋軸直角方向にすれが生じていると。かつ、このコンクリート片が路面上に見られますけれども、これが何かはっきりとはわかりませんが、壁高欄内側の一部のコンクリート片が接触等により落下したものと考えられます。これからすると、上部工が橋軸方向、もしくは下部工が橋軸直角方向に移動したことが原因でないかと。移動するということは当然、路面の変状もありますけれども、桁を支えている支承等にかなり大きな損傷が見られるという風には考えます。以上です。

Q. 今写真でお気づきになったことを述べられましたし、それから、いろんな損傷のことも仰っていただきました、改めて確認なんですけれども、性能低下という意味ではどういう風な、

A. 性能低下ということになりますと、上部工の桁そのものの損傷はそれほど大きくは無いと思います。一番の性能低下を起こしているのは、下側の注釈にも書いてありますピンローラー支承という支承の種類を用いていれば、たぶんピンローラーが破壊している可能性が十分にあると思います。もう一つは、伸縮装置のところですが、先ほど申し上げました橋軸直角方向のずれの他に、はっきりとはわかりませんが上下方向の段差も起きていると。この段差、橋体側、どちらが橋体であるかははっきりとしませんけ

れども、例えば手前が橋体だとすればピンローラー支承の破壊によって、上部工が一段、下がってしまう、そうしますと、この状態で自動車を走行させることは非常に危険だと思いますので、道路管理者に連絡して、措置が必要になると思います。

Q. なるほど、今既に緊急時の措置として仰っていただきました。軸方向、軸直角方向等々のことを全て仰っていただいたのですが、すべては何が原因で生じているのか、改めて確認させていただきます。

A. 原因、一番考えられるのは、やはり地震の影響が大きいかなという風には思います。それと下部構造の変状だとすれば、支持地盤に何か問題があったかという風なところが考えられます。

Q. つまり元々は地震動の影響、

A. 地震動の影響で橋軸直角方向の外力が加わっているのではないか、ということが一番の疑われることであります。

Q. 先ほどの下部工の変状があるかもしれないということでしたが、その時にはどのような

A. 下部工、地盤のことが何もわからないのであれですが、部分的には円弧すべりとか、基礎の種類がわかりませんので、何とも申し上げられませんが、支えている地盤そのものの変状も場合によってはあり得ると思います。

Q. わかりました。仮説も一通りのことを述べて頂きましたので、これも最後にお聞きしますが、今の回答結果の正しさ、何点満点でしょうか。

A. 7-8 点くらいかなと思いますけれども。

Q. ありがとうございます。

［一人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 壁高欄に約 10cm の橋軸直角方向のずれが生じている。伸縮装置のフィンガープレートの遊間が橋軸方向に大きく開いていると同時に橋軸直角方向にずれが生じている。コンクリート片が路上にある。壁高欄のコンクリートの一部が接触した**ので**、コンクリート片が落下した**可能性がある**。伸縮装置部の移動が生じている**ため**、上部構造を支持する支承部に大きな変状が生じている**可能性がある**。また、地盤の変状が生じている**可能性もある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 上部構造の耐荷力の低下はほぼない**可能性がある**。最も可能性が高いのは、ピン・ローラー支承が破壊している**可能性があるので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。伸縮装置部に水平面内のずれが生じている他に、上下方向の段差も生じている**ため**、手前が橋体だと仮定しピンローラー支承が破壊した**のであれば**、上部構造の橋面が下がる**ので**、車両の重量を支持する能力が低下し、耐荷力が低下している**可能性がある**。**ゆえに**、その可能性が想定される場合には自動車を走行させることは危険だと考えられる**ので**、道路管理者への連絡や措置が必要になる**可能性がある**。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 地震動の影響で橋軸直角方向の外力が加わっている**可能性がある**。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［二人目　けばとり文］

Q. 次の事例ですが、同じく、この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋が水平方向、橋軸直角方向に移動しているんですかね。通りが少しずれている気がしますね。添架菅かな、壁高欄がずれているのか、通っていないですね。もう一つは壁高欄コンクリート片が路面側に落ちている。それが不思議ですね。もう一つは伸縮が、上下に段差ができていますね。橋軸方向の段差なのか、上下の段差なのか。伸縮が

Q. そういう、写真見たときに二つの見方があるということで良いでしょうか。橋軸方向と上下の

A. そうですね。舗装が打ち換えたばっかりですね。地震かなんかですか。これ。ピンローラーね、

Q. なぜこうなったかということまでお考えになっているのですね。

A. はい。

Q. フィンガープレートの軸方向、あるいは上下方向のずれ・段差、そしてあとは壁高欄と添架菅の通りが通っていなくて横方向にずれている、それからコンクリートが落ちている、そのコンクリート片はどこのものだろうか。ということで、あの大きく言えば 3 つの変状を確認されたのですね。

A. そうですね。

Q. 3 つの見つけられたことから、この橋にはどのような性能低下、耐荷性能、耐久性能、その他性能が疑われるでしょうか。

A. 伸縮装置のところで言うと、走行性が悪くなっているのではいか。上下方向の段差であれば走行安全性をちょっと危惧するところがある気がしますね。落橋がすぐさまに起こるような状況ではないと思うので、ピンローラーを見たいのですが、これではわからないので、

Q. 可能性としては、ピンローラーにどういう、、

A. そうですね、落橋防止が、

Q. ピンローラーが損傷しているという疑いがあるということですね？

A. そうですね。

Q. そういう耐荷性能や走行性能については理由も述べて頂きましたが、そういう疑いを述べて頂いたわけですが、地震時でないかとご指摘頂きましたので、そうすると、地震後の緊急時にはどういう措置を取るのが望ましいでしょうか。

A. まず走行できるかどうか、この橋が供用できるかどうかを調べたい。さっきの段差がどれだけ生じているのか。あと落橋防止、支承部ですね、支承部の段差が生じやすくなっているかということを調べたいですね。

Q. 調べるのが一番？

A. そうですね。

Q. 調べる前にすることは？

A. 調べる前にすること？調べる前にすることですか。橋梁診断で現地に行っているという立場からすると、

Q. そうそう、現地に点検するために現地につきました。

A. 道路管理者には通報しないといけないですね。地形が気になるんだけど関係ないのかな。普通の地形の

段差だけですかね。気になるな。

Q. 私もそう思います。そこも気になるということですね。

A. はい。

Q. これが仮に熊本地震、阿蘇の陥没地形もありましたし。

A. そうですね。

Q. こういう見つけた損傷、すべては何が原因で生じているでしょうか。

A. 地震ですかね。

Q. わかりました。地震じゃないかという、こういうことが起きた、そういう考え方、そのような仮説は、何が根拠として立てられたでしょうか。

A. この橋の通りが通っていない、段差ができている、あと、この地形の変状から地震だろうなということを推定しました。

Q. わかりました。その根拠はよくわかりましたので、そういうような判断をしたわけですけれども、それは何に基づくものなのか、そういう考え方は何に基づくものなのか。ご経験だとか、常識とか、事例だとか

A. 経験もあるんですけど、全体的に見たときにどう考えるのかということですかね。これが経験かはわからないのですが、

Q. 全体を把握するために、いろいろな所を総合的にということですかね

A. そうですね。これが経験なのかな

Q. 要するに、論理的に考えてみて、何かつじつまがあうものを探しているということでしょうか

A. そうですね。この構造物本体の動きや、周りの地形の状態だとか、から推定して、橋面が綺麗すぎるんですね。

Q. 回答されたわけですけれども、その回答結果の正しさの自信について、何点くらいありましたでしょうか。

A. 8 割、9 割はあってんじゃないかな。

[二人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 上部構造が橋軸直角方向に移動し、通りがずれている。添架管や壁高欄がずれている。壁高欄のコンクリート片が路面に落ちている。伸縮装置が橋軸方向、あるいは上下に段差が生じている。地震による損傷の**可能性がある**。地形が変化している。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 伸縮装置に段差がある**ため**、走行性が低下している**可能性がある**。段差が上下方向である**のであれば**、走行安全性が低下している**可能性がある**。この写真の様子から、ピン・ローラー支承が損傷している**可能性がある**が、落橋がすぐさまに起こるような状況ではない**と考える**。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 上部構造の通りがずれており、伸縮装置に段差が生じており、地形が変化している**ため**、地震が原因である**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 道路管理者に通報を行った後に、詳細調査を行う必要がある。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験や論理的な思考である。つじつまがあうものを探している。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［三人目　けばとり文］

Q. 同じく点検をするためにこの橋の現場に来ました。気づいたことを全て述べてください。

A. まずは伸縮装置、遊間が異常に開き腐食している。路面にコンクリートの塊が落ちている。先端側が橋梁で、写真からは角度があって、この位置がこれですよね？そうすると、上部構造自体が向かって右側に動いている状況があるのと、向こうが上部構造ですね？

Q. これだけからではわかりにくいですよね。いずれにせよ、ここでもって、橋と橋ではない部分が切れている。

A. 軸線がずれている。

Q. 今の大きく分けて 3 つ気づかれたわけですけれども、そうするとそれからこの橋にはどういう性能低下が疑われるでしょうか。

A. はい。写真ではわからないのですが、下側にピンローラー支承、トラス橋とあって、この直下にピンローラー支承があって、これだけ支承の遊間が開いていれば、上沓と下沓がずれている可能性がある。写真だとよくわからないが、なんとなく手前側が橋梁側だとすると下がっているように見える。おそらく、ピンローラー支承から逸脱しかけている。なので、荷重伝達機能の性能については低下している。

Q. 最初は奥が橋だとおっしゃっていましたが、落ちていることから手前が橋だということですね。

A. はい。

Q. わかりました。そうすると、この損傷ですけれども、何が原因で生じたのでしょうか。

A. この状況ですと、地震の影響があるのかなと思います。

Q. 耐荷性能の低下を疑ったのは、地震によるものではないか、ということですね？

A. はい。

Q. その疑いをもたれて、地震直後という緊急時ですけれども、どのような措置を取るのが望ましいのか、順を追って仰ってください。

A. まず、ピンローラー支承が逸脱する可能性があるので、まずそこで段差防止、あの一支承側の段差防止をして、その上でこの状態だと伸縮装置の遊間を詰めることができないので、地震後の応急であれば、とりあえず何らかの形で隙間を埋めて、通れるようにすると、まずはこれ以上下がらない形での措置。

Q. なるほどね。わかりました。もちろん、点検者として行きましたので、先ず真っ先にするのは、今のお考えもそうなんですけれども、それ以前に、緊急措置として点検者がすべきことはありますか？

A. 緊急措置？

Q. 緊急対応

A. 対応というのはどういう、

Q. 道路管理者への連絡とか、ごく当然

A. そうですね。現場に行ってこういう状況が起こることがまずないですから、大体こういうのって、道路管理者が点検してくれって言われるので、

Q. ありがとうございます。そういう仮説を立てられたわけですけれども、そのような仮説を立てた基になる考え方はなんでしょうか。

A. 伸縮装置の遊間が異常に広いことと、段差もありますよと、コンクリート片が落ちているので、もし地震が発生した直後であれば、何かしらの外力なり作用があったのかなと。通常はじわじわと損傷が進行してなったにしてはなんか、周辺状況がかなり荒れているなと。

Q. わかりました。最後に今までお話になられた結果について、正しさへの自信ということで、また 10 点満点で

A. 9 割以上

Q. 9 から 10 ということで、はい、ありがとうございます。

[三人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 伸縮装置の遊間が異常に開いている。伸縮装置が腐食している。路面にコンクリートの塊が落ちている。上部構造自体が右側に動いている。上部構造の軸線がずれている。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 写真からはわからないが、橋面より下側がトラス橋とピン・ローラー支承ということなので、伸縮装置部の遊間の開きがある**ため**、ピン・ローラー支承の上沓と下沓がずれている**可能性がある**。ピン・ローラー支承が逸脱しかけている**可能性がある**。そのような状態**なのであれば**、支承部の荷重伝達機能を担う部材の耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 地震の影響だ**と考える**。

Q. そもし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. まずは道路管理者に連絡する必要がある**と考える**。その上でピン・ローラー支承が逸脱する**可能性があるので**、支承部の段差防止を行う必要がある**と考える**。その上で、地震後の応急措置としては、伸縮装置部の隙間を埋めて通行できるようにする必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 損傷からの推測である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

[四人目　けばとり文]

Q. 点検をするためにこの橋に来ました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 伸縮装置、地覆の通り、壁高欄の通りがかなり橋直方向の上部工の変位、ずれが見られると

Q. 橋軸方向？

A. 橋直方向

Q. 橋直ね。

A. 橋直方向のずれが見られると。ピンローラー沓なので、沓の破壊なのか、あるいは下部構造そのものがずれてしまっているのか、ということは下を覗いて見てみないとわからない。路面なんかは目立った損傷は無いので、橋全体の通り、壁高欄の通りを見ても、そんなにおかしな段差や軸のずれは無いので、上部工自体は、ちょっとしたアールはあるのですが、軸線が著しくずれたり、路面がおかしくなっていることは無いので、上部工そのものが座屈等を起こしている状況ではないのかなと思われます。

Q. わかりました。そのような観察結果から性能低下を疑うとすればどのような性能低下でしょうか。

A. まずは路面の走行性というところで、先ずは伸縮装置ですが、壁高欄の段差を見ても上下方向の段差は無さそうなのですが、この遊間の広さは使用性には問題があるだろうなと。それと、トラス構造なので、やっぱり横から見るというか構造体を見ないと何とも言えないのですが、この写真で見る限りでは上部構造はそれほどの影響があるようには見えないので復旧というんですかね、当然細かく見ないといけないんですが、これが例えば地震後の緊急点検であれば、路面の連続性だけ保てれば、緊急車両が通る等のレベルは大丈夫ではないかという風な気がします。

Q. 地震、

A. 原因は地震です。

Q. 原因は地震ですね、わかりました。そういう地震後の、あのこういう損傷をご覧になって、緊急時の措置そしては、既に述べられておりますけれども、どのような措置がありますでしょうか。

A. もちろん全体を、当然これ以外の見方をしなければいけないんですけれども、この写真からわかる範囲ですと、先ほど申しました通り、緊急車両が通れる程度のものは、路面の連続性、伸縮装置の、さえクリアできれば大丈夫かなと思います。

Q. はい、わかりました。そういう性能低下を判断されたわけですけれども、その根拠となる考え方、根拠となるもの、考え方と言いますか、経験とか知識とか

A. 知識ですかね。

Q. 知識。

A. はい。

Q. 経験というよりは知識だと。ありがとうございます。じゃあ、最後に今までのお話で回答結果の正しさについて、10 点満点でお答えください。

A. すいません、この写真だけでの判断

Q. この写真だけです。

A. 80%は大丈夫かなと。

［四人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 伸縮装置のずれと地覆の通りと壁高欄の通りが橋軸直角方向にずれている。ピン・ローラー支承ということなので、沓の破壊や下部構造の移動が生じている**可能性がある**。橋面に目立った損傷がなく、橋面

の通りも路面の軸線がずれたりはしていない**ため**、上部構造そのものに座屈等が生じている可能性は低い**と考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 伸縮装置や壁高欄に上下方向の段差がないが、伸縮装置の遊間が広がっている**ため**、使用性に問題がある**可能性がある**。上部構造も写真を見る限りでは損傷が認められない**ため**、路面の連続性が確保される**のであれば**、地震後の緊急車両の走行は可能である**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［五人目　けばとり文］

Q. 点検するために現場につきました。**この写真で気づいたことを全て述べてください。**

A. 気づいたこと、橋軸方向のずれですね、横に振れてるというか、そういった表現なんですかね。

Q. 直角方向ですね。

A. はい。伸縮装置の櫛歯の離れ方が異常に広がっているので、向こう側が橋だと思うのですけれども、手前側が土工部、土工部で異常があるのかなということを懸念。ですよね、

Q. 橋軸方向にひらきが大きいですね。

A. そうですね。櫛歯離れていますから。

Q. 気づかれたものは、今の所伸縮装置、、

A. そうですね。あとは、高欄でずれ、目違い、直角方向のずれ、通りがずれていますから

Q. 直角方向のみ

A. この距離感がわからないので、伸縮装置から見ると、かなり開いているということが見える。

Q. わかりました。この損傷でどういう性能低下が疑われますでしょうか

A. 手前側の橋台ですかね、それが沈下したのかなという疑いを持ちます。実際であればもう少し

Q. 手前が橋台で沈下。沈下したというのは何を根拠に

A. 橋の位置、橋がこうずれるというよりも、今段差があるようにも見えるので、こっちが下がっているのかなというイメージです。

Q. 段差も確認されたと

A. はい。沈下の向きがよくわからないですね。沈んでいるのかなという印象を受けるのが、橋側の方が高く見えるので、写真では、若干、

Q. わりました。今までのお話だと、性能低下については、耐荷性能は

A. 耐荷性能は橋台に対して、耐荷性能の問題が出るのかなと。

Q. 手前側ですね。

A. そうですね

Q. わかりました。この元々これは何が原因でこのようになったとお考えでしょうか

A. 地震ですかね。

Q. 地震の影響と。

A. 手前の地盤が緩いのかなと。

Q. なるほど。地震後ということで、地震後の緊急時にどのよな措置を取ることが望ましいとお考えでしょうか。

A. 地震時であれば、緊急に車が通せるかがまず問題になると思いますので、

Q. はい。

A. 路面の段差が解消するような措置がまず必要かなと、その前に安全確保は当然なので、入れるならば、下に入ってみて、山が崩れているのか、躯体が損傷を受けているのかと

Q. 下に入ってみると。わかりました。ありがとうございます。そういうようなことをお考えになったわけですけれども、根拠となるものは何でしょうか。知識、経験、常識

A. 経験ですね。

Q. わかりました。最後に今までのご回答に対してどれぐらいの自信で正しいと思いますか。10 点満点で答えると

A. 先ほどよりは高いのかなと。6-7 割ですかね。

Q. 6-7、わかりました。ありがとうございます。

［五人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋軸直角方向のずれが生じている。伸縮装置の櫛歯が橋軸方向に異常に広がっている。高欄でずれ、目違いが生じている。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 伸縮装置部の段差が生じており、手前が下がっている**ため**、橋台の沈下が生じている**可能性があり**、橋台の耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 地震である**と考える**。

Q. もしそのような疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 橋台の耐荷力が低下している**可能性があるので**、調査で下に入り、山が崩れていないかや躯体が損傷していないかを確認し、安全性を確認する必要がある**と考える**。その上で、地震時は緊急車両を通せるかが問題になる**ので**、路面の段差を解消する措置が必要だ**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［六人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 欄干の通りがズレているので、直角方向に動いている感じがします。伸縮装置のフィンガーも結構開いているので、結構開いているので、軸方向にも動いているので、大きい地震でもあったのかなという感じです。それに伴って、これは地覆ですかね、欄干、高欄のコンクリートが、外力で剥離している。欠損しているというような感じですか。伸縮装置がさびているが、これは地震とは関係なく、耐久性の問題ですかね。

Q. わかりました。ということで、通りのずれ、伸縮装置の開き、地覆コンクリートの破壊という 3 つの変状を確認されましたが、それを見つけてどうおもいましたか？

A. 上部構造でこれだけ動いているので下が気になります。特に支承で、下部工に関しては移動とか傾斜、沈下、これが。橋台あたりなので背面の土圧の関係とか

Q. この写真からはこの橋にはどういう性能の低下が見込まれるでしょうか？

A. 耐荷力ですね。

Q. その性能低下の疑った理由は何でしょうか？

A. もうすでに動いているので、軸方向も直角方向も、元々の配置から全体的にずれているはずなので、応力集中しても傾斜にしても

Q. 応力集中は何の応力集中でしょうか？どこの部位の

A. 基礎部分ですかね。あとは下部工の基部

Q. 下部工の基礎部分の応力集中で破損が生じている可能性がある

A. 破損によって応力が集中する可能性が基礎にはあるかなと。で、地震の外力であるのであれば、下部工基部に関しては、既に力がいったん加わっているので、それに対して、現状どうなるか、というところですね。応力が気になるのは、その例えばフーチングが一部欠損して、応力と言うよりは安定性が損なわれていることと、地震の下部工の基部というのは、モーメントが大きかったりするので、そのあたり、段差が出来ていないか、それが上の通りに影響を及ぼしている可能性もあるので

Q. それが耐荷力の低下につながっているということですね

A. はい。

Q. そういう疑いを持たれたわけですが、緊急時の場合、地震時ではないかということでしたが、そういう緊急時としては、どういう措置を取ることが望ましいとお考えでしょうか。

A. 緊急時。

Q. 今例えば地震の直後ということで、そうおっしゃった場合ですけれども

A. 下部工にも影響がある可能性もありそうなので、倒壊だと桁の落下の心配が無いかというところの確認ですね。倒壊になると通行制限になると思いますが、桁の落下はそのフェールセーフが効いていれば桁が落ちることが無いと思うので、落橋防止の確認。地震のもろもろということであれば、支承の遊間も、車を通すにはちょっと心配なのですが

Q. 措置としては

A. コンパネということになりますかね。

Q. コンパネを敷くということ

A. はい

Q. お答えいただいたことについて、根拠となるものは一体何でしょうか。知識、経験、常識、勘

A. そうですね。この写真だけで見ると勘と言うか、いうか、今まで見てきた経験ですかね

Q. 勘と経験ですね。この原因は先ほど地震とお答えになりましたが、それでよろしいでしょうか。

A. 下部工の移動、傾斜、もしくは地震。コンクリートが剥離しているので、大きい力がかかって、ガチャってぶつかっているので、地震

Q. 最後に今までお話になった回答結果の自信について 10 点満点で

A. さっきよりは、5 点くらい

Q. さっきよりはいいと

[六人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 欄干の通りがずれている**ため**、橋軸直角方向に動いている**可能性がある**。伸縮装置のフィンガーも開いている**ため**、軸方向にも動いている**可能性があるので**、大きい地震が発生した**可能性がある**。欄干、高欄のコンクリートが剥離している**可能性がある**。伸縮装置がさびている。さびは地震とは関係がない**ので**、耐久性の問題である**可能性がある**。

Q. これら変状を見つけてどう思うか？

A. 上部構造が動いている**ため**、支承の損傷や下部工の移動・傾斜・沈下、橋台であれば背面土の損傷がある**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 上部構造が橋軸方向や橋軸直角方向に元々に配置から動いている**ため**、基礎部分や基部に応力が集中し安定性が損なわれている**可能性があるので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。また、上部構造が動いている**ため**、桁が落下する**可能性があるので**、フェールセーフである落橋防止が効いているかを確認する必要がある**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 落橋防止を含めた支承部周辺の状態を確認した上で、落橋防止が効いている**のであれば**、コンパネを敷いて交通開放を行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 勘と経験である。

Q. この原因について、地震と答えたがそれでよいか。

A. 下部工の移動と傾斜が生じている**可能性があり**、コンクリートが剥離している**ので**、地震の影響を**考えた**。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A.　5 点である。

[七人目　けばとり文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋軸直角方向の、線で言うと、防護柵が手前、これ A1 か A2 かわからないですが、伸縮装置を境にし

てずれている。

Q. 防護柵の通りがですね

A. 通りですね。ずれているということと、伸縮装置が、こう写真で見る限り、奥側と手前側で下手したら段差がある。伸縮装置の段差ですね。大したところでは無いですが、今の、最初に述べました防護柵の側にてんがかんがついているのですが、地震か原因がわかりませんが、ずれによって、外れているというか、逸脱していますね。わからないのですが、舗装の路肩のところに、たぶん防護柵がひょっとしたら接触した関係で、ぶつかって、挙動がちょっとわからないですが、地震ん影響かわからないですが、防護柵の剥落

Q. 防護柵のコンクリートの破片ということですね

A. はい。この地形がわからないですが、地震によってよくこう

Q. 陥没地形、段差ですか？

A. それはちょっとわからないですが、

Q. 見えるのは陥没？段差？

A. 段差。川には見えないので。それぐらいですかね。

Q. 今 5 つほど変状を確認されたわけですけれども、どのように思いましたか？

A. 一番衝撃だったことなのは、手前に見えている伸縮装置が橋面側、版桁側に、下の構造が鈑桁かトラスかわからないですが、段差がすごいので、これだと基本的には車は通れないので通行止めとかして、下のピンローラー支承なんですかね。下の支承の状態が気になりますかね。伸縮装置の段差によって、どれくらい下に桁についているピンローラー支承がどれくらい傷んでいるのか。

Q. ピンローラー支承の損傷ですね。

A. 有るんでは無いかと。下側のモルタルが壊れているかもしれないし、下の沓座が壊れているかもしれないし。桁端部の伸縮でこれだけ段差があるということは、たぶん、支承が破壊している、欠損している可能性が大きいのではないか。

Q. わかりました。ありがとうございます。結果としてどのような性能低下がこの橋に懸念されますでしょうか。

A. まずだから、この伸縮装置の状態ですと通行止めしないと、普通の車が通れないと思いますので。先ほど言った H31 要領で言いますと、IV 相当になってしまうのかなと思います。だから、早急に通行止めをして、伸縮装置とか下のローラー支承とかを早急に補修するべきだと思います。

Q. 耐荷性能、走行性能、どちらでしょうか。

A. まずはこの写真から見ると走行性能です。

Q. 走行性能ですね。さっきの話で支承が

A. おそらく支承も壊れているのではと推定されます。

Q. ということは耐荷性能の低下ということですね。

A. そうですね。

Q. 今までそういう被害を見たてられたわけですけれども、その根拠となるのは、知識、経験、どういうものでしょうか？

A. 地震のものを点検とか診断はした経験が無いので、いろんな写真ですとか、文献とか

Q. 知識と学習ですね

A. ですね。

Q. もうすでにお答えになられていますけれども、何が原因というのは地震と

A. はい。他に考えられるというのは

Q. それらも今までの学習された結果ということですね。

A. 常時ではこういうことは無いので、恐らく地震でずれたり、伸縮の段差が出来たのではないかと思います。

Q. この回答結果の正しさに関する自信について１０点満点で

A. 7 点くらいで

［七人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 伸縮装置部を境に防護柵の通りがずれている。伸縮装置部に段差が生じている。添架管がずれて逸脱しているため、また、衝突の影響で防護柵のコンクリートの破片が生じた**可能性があり**、地震の影響と**考える**。周辺の地形に段差が生じている。

Q. 変状を 5 つを見つけ、あなたはどう思うか？

A. 伸縮装置に段差が生じている**ため**、走行性能が低下している**可能性がある**。**ゆえに**、通行止めを行う必要がある**と考える**。また、伸縮装置に段差が生じている**ため**、ピン・ローラー支承の破壊やモルタルの破壊が生じている**可能性があるので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 地震後の点検や診断を行った経験は無い**ため**、写真や文献等の学習による知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［八人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 舗装にコンクリート片があるので、防護柵の剥落があったのかということと、足元の伸縮装置が開いているので、これだけ開いていると衝突ないし遊間異常が生じている状況と思います。添加管ですね、こちらも破断、ラインが違うので。防護柵が水平方向に移動している状況かと思います。防護柵と添架管が水平方向に移動している状況かと思います。地震による伸縮と防護柵がこれだけ移動しているので、地震によって生じた損傷かと思います。

Q. 伸縮装置が開いているという表現でしたがそれでよろしいでしょうか。

A. はい。

Q. 今 4 つほどご指摘いただきましたが、その結果からこの橋にはどういう性能低下が懸念されるでしょうか。

A. 水平方向に移動しているので、ピンローラー支承ですと、橋軸方向の移動のため、サイドブロックの破

損プラス支承本体自体が横方向にずれている可能性がある。トラス構造ですので、トラスの斜材ないし主構が変形している可能性がある。上から見た感じ。伸縮装置の高さがあまり変わっていないように見えるので、ローラーの脱落には至っていないのかなという感じです。伸縮装置のプレートですね、この写真からは表面が同じくらいにみえるので、これが段差があればローラーの脱落も考えられます。

Q. これは伸縮装置の方は開いているご発言がありますが、これは軸方向の

A. ですね。

Q. 横方向は？

A. ちょっとずれていますね。互い違いになっているので。

Q. 性能低下という意味では、先ほどはサイドブロックの破損、支承のずれ、斜材があるかもしれないというご指摘で、それは性能低下という意味では、どういう意味でしょうか。

A. 支承だけでいえば耐荷性、支承自体の機能は無いのですが、上部工の耐荷性能までは低下していないかと思います。ただ、トラスの斜材までは座屈等、局部変形しているようですと、上部構造の耐荷性能の低下が懸念されます。損傷部位によります。

Q. 支承だけですと耐荷性能の低下まではいかないという理解ですね。

A. はい。

Q. 措置としては緊急時に取るべき措置としては何かあればどういうことか

A. 緊急対応で道路を通すのであれば、伸縮装置に鉄板ないし段差調整をして通す。通す前には一応下を見た方が良い。検査路があるので、そこで一度見てこれば判断ができるのかなと。段差解消と、斜材が悪ければ、すぐに解放とは言えない。

Q. 下を点検するということですね。今までの見立てで頂いたわけですけれども、その根拠となるものは

A. これは地震の過去の事例とかを見てですかね。

Q. 地震の過去事例の、学習の知識ということですね。わかりました。ありがとうございます。今までの回答について、結果の正しさについてどれぐらいの自信をお持ちかということを 10 点満点で

A. 9 点

［八人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 舗装にコンクリート片がある**ため**、防護柵の剥落が生じた**可能性がある**。伸縮装置の開きが生じている他、伸縮装置のプレートが互い違いになっているため、水平方向にもずれている。添架管の破断及びラインのずれが生じている。防護柵と添架管のずれがある**ため**、それらが水平方向に移動している**可能性がある**。伸縮装置と防護柵の状態から地震による損傷である**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 水平方向に移動している**ので**、ピンローラー支承のサイドブロックの損傷や支承本体の横方向のずれが生じている**可能性がある**。また、トラス構造の斜材や主構が変形している**可能性がある**。伸縮装置の高さがあまり変わっていない**ため**、ローラーの脱落には至っていない**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 支承に損傷が生じている状態**であっても**、橋としての耐荷力の低下には至っていない**と考える**。ただし、

トラスの斜材が座屈等をしている**のであれば**、耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 緊急対応で道路を通す**のであれば**、伸縮装置に鉄板を敷いたり、段差の調整を行う必要がある**と考える**。通す前には下を見た方が良い**と考える**。斜材に損傷がある場合は、すぐには交通開放ができない**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 過去の地震の事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［九人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. まず、軸線がずれていますね。壁高欄の軸線がずれているということと。これは手前のアバットですねここは。検査路があるのでアバットだと思います。それで、これは橋軸直角方向に地震とかなんかで動いたと判断します。で、その判断基準がその軸線がずれているのと、添加物用のパイプが切れていますね。切れた方向がどうも、これはちょっと、下部が動いたのか径間側が動いたかはわからないのですが、何かしらの変位が相対的に出ている。それと縁石が飛んでいますので、径間側、もしかしたら径間側が動いているのかな。あと、伸縮装置が遊間が異常になっていますね。地震か何かかなという気がしますね。

Q. 遊間異常は水平方向のずれという意味でしょうか。

A. これからは水平方向のずれは見えないですが、明らかに軸線がずれているのでなっていると思います。橋軸直角方向にもずれていると思います。下部工ももしかしたら動いているかもしれないですね。

Q. 上下は？

A. 上下もありますね。

Q. 以上、大きくは壁高欄と添架管のずれ、、

A. それとピンローラー支承と書いてあるので、もしかしたら支承がいかれている可能性もありますね。

Q. 今のようなご判断で、この橋に性能低下があるとするとどういう性能低下があるでしょうか。

A. 走行性の低下しているんじゃないか。

Q. 耐荷性能は？

A. 耐荷性能については見ないとわからないですが、ピンローラー支承はいかれているかもしれない。支承としての耐力。トラスなので下をよく見ないとわからないですが、これ手前で鈑桁、連続鈑桁および、なので真ん中がトラスで、端部は板桁なんですね。

Q. わかりました。この写真だけなので。走行性と耐荷性能についてはピンローラー支承がもし、破損しているとすると性能低下していると。これに対してどのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 供用させるためには段差になんちゅうんですか、緊急的な段差を処理した方が良いと思います。走行性を確保して、まずはそれだけですね。それで調査を行うということですね。

Q. わかりました。今までのそのお話の根拠としては何でしょうか。経験、知識、学習

A. 経験ですね。

Q. 分かりました。原因は全て地震ということをおっしゃいましたがそれでよろしいですね。

A. これ伸縮装置がずいぶん錆びていますね。これはいつ取った写真かですね。

Q. だいぶ時間が経ってから損傷がということですね。

A. はい。

Q. さびが気になるということですね。

A. これ実際の橋なんですかね。

Q. はい。

A. 本当に直後に行ったんだじゃなく、何日か経っている

Q. それはなぜですか？

A. この状態からすると。これ左側からは見えない。どうでしょう

Q. 今まで根拠等と、で最後に今の回答結果に関して正しさに対する自信、何点満点で

A. さっきと比べちょっと疑問に思うことが多いですね。6 点

［九人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 壁高欄の軸線がずれている。検査路がある**ため**、手前がアバットである**可能性がある**。壁高欄の軸線のずれと添架物用のパイプの切断が生じている**ため**、上部構造と下部構造の相対変位が生じた**可能性がある**。縁石が飛んでいる**ため**、径間側が動いた**可能性がある**。伸縮装置の遊間異常もある**ため**、地震による損傷が生じている**可能性がある**。伸縮装置は橋軸直角方向と上下方向がずれている**ため**、下部工の移動やピン・ローラー支承の破壊が生じている**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 走行性の低下が生じている**可能性がある**。ピン・ローラー支承が破壊している**のであれば**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 緊急的には段差を解消し、走行性を確保する必要がある**と考える**。その後、詳細な調査を行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. さっきと比べ疑問に思うことが多いため、6 点である。

［十人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 路肩のところにコンクリート片ですかね。これは何の一部かちょっとわかりませんが、地覆の一部がはがれているのかなというのが見られるのと、あとは伸縮装置の腐食が非常に進行している状況で、これ

はフィンガーが段差になっているのか、あるいは遊間が広がっているのか、写真からは見にくいのですが、ちょっと広がっている状況が見られます。通りが下部工の部分と橋梁本体の部分、地覆と言うよりは壁高欄ですかね、壁高欄の通りを見ると目違いが起こっている状況です。その一部が剥がれ落ちて、コンクリートが路面に落ちている状況だと思います。地震か何かの影響ですかね、あたってしまってるというような状況で、下部工と橋梁の上部工がズレてしまっている状況だと思います。遊間の異常、広がっていると思われます。顕著なところはそんな感じで、あとは検査路がちょっと白さびが出ているな。あとは標識かわかりませんが、そちらの方腐食が進行している。

Q. 今見つけられた変状に対してどのように思いましたか。

A. 通りがズレている所は、恐らく何か大きな力が作用していると思われますので、地震か何かが起こっているんだろうと思います。下部工と上部工がズレている、支承ですね、ピンローラーになっていますが、そちらの方に何らかのずれ、、縦方向もそうですが何かずれが生じていることが推定されます。あるいは、下部工自体が動いている状況かなと思います。アバットですね、アバットかどうかわからないですね。橋脚か橋台のどちらかがズレている。

Q. その結果、性能低下が疑われるでしょうか？

A. 使用性ということでしたら、遊間が広がっているので、走行性が疑われるので使用性が落ちている可能性がありますが、何か鉄板かを敷けば緊急車両は通せると思います。高さ方向もズレているので、支承の損傷が見えないですが、支承が荷重を支えられる状態であれば、耐荷性能自体、緊急時の使用性ということでは、大きな低下が無い可能性はあります。ただし、恒久的措置は最終的に必要だと思いますが、緊急的に緊急車両が通る等については支障が無い可能性があります。ちょっとわかりません。

Q. わかりました。今のような疑いを持たれたわけですけれども、どういう措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. まずはおそらく何か地震かなと思われますので、おそらく下に、支承の状態がちょっと気になりますので、そちらの状態を確認して、支承にずれがある場合は、それに代わる仮受を実施する必要があると。あとは支承本体や周りの台座コンクリートとかのそういったところの損傷があるかを確認、必要であれば仮受材で受けるというような形。そういう大きな損傷が無ければそういったあたりは必要ないかもしれません。支持条件、支承の確認、あとは下部工の傾きやずれが大きくなっていないかの確認。まぁ、下部工自体の損傷、傾きとか、大きなひび割れが発生していないかの確認。あとは上部工については、割れているとかは無いと思いますので、支承か橋台あたりの状態の確認が重要かなと思います。

Q. 今のお考えになった根拠となったものは何でしょうか。

A. 過去の地震が起こったあとの調査結果とか、

Q. 過去事例の学習

A. そうですね。

Q. わかりました。今のご回答の正しさに対する自信、10 点満点で

A. 8 点ぐらいで

［十人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 路肩にコンクリート片がある。伸縮装置に腐食が生じている。伸縮装置に段差が生じており、遊間の広がりがある。壁高欄の通りに目違いがあるため、壁高欄の一部が剥がれ落ちてコンクリート片が路肩にある可能性があるので、地震の影響がある可能性がある。コンクリート片が路肩にあるため、壁高欄が衝突しているので、上部構造と下部構造の位置にずれが生じている可能性がある。検査路に白さびが生じており、標識に腐食が生じている。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 壁高欄の通りがずれているため、地震等の何らかの大きな力が作用した可能性がある。上部構造と下部構造の位置が水平方向と高さ方向にずれているため、ピン・ローラー支承にずれが生じている可能性がある。もしくは、下部構造が動いている可能性がある。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 遊間が広がっているため、使用性が低下している可能性がある。高さ方向もずれているため、支承が荷重を支えられる状態なのであれば、緊急時には鉄板を敷いて緊急車両を通すことが可能であると考える。恒久的な措置は別途必要であると考える。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 地震の影響があると考えるので、支承の状態を確認し、支承にずれや台座コンクリート等の損傷があるのであれば、仮受を実施する必要があると考える。それに加え、下部構造の傾きやずれの確認を行う必要があると考える。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 過去事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［十一人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 見るからに橋軸方向に軸線がズレていることと、左下に伸縮装置があって、それが開いてちゃってていう状態です。路面に何かコンクリート片、結構大きなものですね。そういったものが落ちていて、恐らく路面にあるもので壁高欄の一部だと思いますが、恐らくは地震を受けて、橋軸直角方向に移動してしまったと、でここはその下、橋軸直角方向に移動するからには、支承が、例えばサイドブロック等が付いていますが、全然それが見えないですが、恐らくそれが破断するなり、機能をしなくなって、地震後にこういった状態になったのかと思います。で、よく見えないですが、おそらく段差もついているのかなと思います。橋側の方が高いように見えるので、下の状況を見てみないと何とも言えないのですが、かなり支承回りですとか、後付けした耐震補強した落橋防止、いわゆるフェールセーフが変に作動して、何か、上部工の方が高くなっているように見えます。そういった状況で、基本的には地震の直後に地震後の異常時点検ですかね。そこでとられた写真なんだろうと思います。性能としては緊急車両を通す云々という話をするのは下を見てみないと何とも言えないので、性能とか耐荷力とか、緊急車両を通せるかの判断はやはり、下を見てからかと思います。

Q. 下を見てから判断するのは本当にその通りですが、この状況から判断して、緊急的になさることは何か無いでしょうか？

A. この状況でということですと、下を見るのは置いといてということであれば、まずは伸縮部の段差もありますし、開いていますので、鉄板を敷いてアスファルトですり付ける等を行って、ここまで行っている段階でおそらくは車が走っちゃっていると思うので、一般車両等は最低限通せると。緊急であればそういう形で通すことはできると思います。

Q. そうですね、わかりました。性能低下が起きているとすればどういう性能低下が疑われますか

A. 一番は上下部接続部、いわゆる支承かと思います。

Q. 支承部の損傷

A. 支承部の損傷ですね。支承部に求められる機能として鉛直荷重と水平荷重を下部構造に伝えるということ、上部構造の変位を吸収する、おそらく両方ともかなり低下している。おそらく後半の変位追従は機能していない。かろうじてか、かろうじてかわからないですが、今の状態では鉛直荷重は支持できているとはいえる。水平荷重は既に動いていることから橋軸直角方向はサイドブロックが破断するなどして、水平荷重の支持能力、支持機能というのは喪失しているような状態だと思います。

Q. 水平荷重の伝達機能が失っていて、でも、鉛直荷重に関しての伝達機能はまだあると、総合的には耐荷性能というのはどうでしょうか。

A. 著しく低下した状態と言っていいと思いますが、そういう意味では必要最小限の、災害直後の緊急車両を通す機能はあると推定されます。

Q. わかりました。ありがとうございます。理由は既に仰っているので、わかりました。そういう今のお答えになるような根拠となるものは何でしょうか。知識、経験、過去事例の学習、書籍本での知識とか

A. 今の判断はおそらくは学習と、下の状況を過去に見た地震時の損傷を思い浮かべながら

Q. 事例の学習の結果ですね。わかりました。

A. もう一つは、学習と共に、要領とかああゆうの、示方書もそうですけれども、あういう機能の話をしましたけれども、鉛直荷重や水平荷重を支持できるとか、そういったものが基本になっています。

Q. 知識ですね。わかりました。今までのお答えに対する正しさについて、自信は何点くらい

A. 7 点くらい

［十一人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋軸方向の軸線がずれている。伸縮装置が開いている。路面にコンクリート片が落ちている**ため**、路面にあるものである**ので**、壁高欄の一部である**可能性がある**。これら変状から地震の影響がある可能性がある**ので**、地震を受けて上部構造が橋軸直角方向に移動した**可能性があるので**、支承のサイドブロックが破断するなどの損傷が生じている**可能性がある**。また、伸縮装置に段差が生じている**ため**、支承や落橋防止が変に作動した**可能性があるため**、耐荷力が不足している**可能性がある**。**ゆえに**、下を見た後に緊急車両を通すか否かの判断を下す必要がある**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 緊急時に下を見ることができない**のであれば**、点検の段階で既に車が通っていると考える**ので**、伸縮部

の段差と開き</u>に対して鉄板を敷いてアスファルトですり付ける等を行い暫定的に交通開放を行うことも可能である**と考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 支承部には鉛直荷重と水平荷重を下部構造に伝え、上部構造の変位を吸収する機能が求められているが、この損傷状況から支承部に損傷が生じている**可能性があるのであれば**、支承部の水平方向の荷重を支持する耐荷力が喪失している**可能性がある**。鉛直方向の荷重に対する耐荷力は低下しつつも残存している**可能性がある**。**ゆえに**、緊急車両を通す能力はある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 事例の学習の結果と要領や道路橋示方書の知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［十二人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. まずあの、壁高欄を橋軸方向に見なすと、そこの伸縮装置を境に、径間が向かって右方向にずっている状態と、伸縮装置に着目すると 10cm くらい段差が生じている状態と、これは何か剥離が壁高欄か何かを、何か衝撃で、剥落している状況ですね。あとはちょっと、検査路も腐食が結構、壁高欄につながるところが腐食しているなというところが気になりました。

Q. わかりました。それらを見てどう思いましたか。

A. 特に気になったのが壁高欄のずれと伸縮装置の段差の所ですが、何らかの大きな力が加わって生じたのかなというようなところで、恐らくこの下の上部構造と橋台など、橋台橋脚をつなぐ支承のあたりも何らかの異常が起きているのかなと推測できます。おっきな地震でこのような状態になったのかなというような、原因の一つとして考えられます。

Q. ずれていて支承にも損傷がある可能性ということを言及されましたが、そういう今見つけられたことから、この橋には性能の低下が何か認められますか？

A. 橋としての耐荷性能と、段差がありますので第三者被害、第三者的な部分の懸念が見られます。

Q. はい。第三者的なということはもう少し具体的に言うと

A. 橋を車を走る

Q. 走行安全性ですね？

A. はい、走行安全性です。

Q. 耐荷性能の低下と、走行安全性の低下が認められているということで、走行安全性は段差がということで理由を仰っていますが、耐荷性能の低下が認められる、疑いを持たれる理由はなぜですか？

A. 何らかの外力によるずれなのかによって、上部工だの、下の主桁だとか、上部構造の部位をですね、何らかの地震による、個々の写真では見えないのですけれども、何か外力によって変形だとか、損傷が発生している可能性が考えられると。断定ではないですが、しっかりと確認する必要があると思います。

Q. わかりました。今のような疑いを持たれたわけですけれども、そうするとここでは地震のということで、

緊急時、異常時にどのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 支承等からですね、上部構造がずれ動いているようなことも考えられますので、桁下を見ての判断となるんですけれども、桁も動いているような状態となれば支承の前に借受けのサンドル等を設置して、その支承の今、機能が低下しているところを補う緊急措置が必要だと思います。応急的に伸縮の所に段差が生じておりますので、そこはすり付けをしてですね、緊急車両が通行する必要性がありますので、そういうすり付け等の措置を行って、交通開放に向けて応急措置をする必要があると思います。

Q. 今お答えいただきましたが、その根拠となるものは何でしょうか。経験、あるいは過去事例の学習、あるいは、教科書等に書いてある知識

A. こういう事例は経験しておりませんので、いろいろな教科書的なお話だとか、講演会だとかで、こういう地震等の災害のこういう事例が紹介されたものがありますので、そういうのから学習。

Q. わかりました。今までお答えになられた回答結果に関して、正しいということに関して、どれぐらいの自信で正しいと思われますか。10 点満点で

A. さっきと同じですべてが言えていないので 4 点で

［十二人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 伸縮装置を境に壁高欄が向かって右方向にずっている。伸縮装置に 10 cm くらいの段差が生じている。壁高欄の一部である**可能性がある**、コンクリート片が剥落している。検査路と壁高欄の接続箇所が腐食している。

Q. これら変状を見つけ、どう思うか？

A. 壁高欄のずれと伸縮装置の段差が生じている**ので**、地震の影響がある**可能性があり**、支承に異常が起きている**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 橋としての耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。段差がある**ため**、走行安全性が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 上部構造がずれ動いている**ので**、支承部の調査を行う必要がある**と考える**。桁も動いている状態な**のであれば**、支承の前に仮受のサンドルを設置し、支承の低下した機能を補う緊急措置が必要である**と考える**。伸縮装置に段差が生じている**ため**、交通開放に向けた応急的なすりつけを行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 教科書的な知識や過去事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 4 点である。

［写真 3 枚目］

Q3.この写真で気づいたことを全て述べてください。



橋梁形式：支間長30m、鋼鈑桁橋、BPA支承

［一人目　けばとり文］

Q. この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 桁形状を見るに、版桁の桁端部だと思います。基本的には下フランジあるいはウェブの部分的な所に腐食、腐食による断面の減少が部分的に見られます。それと同時にその下を支えている支承についても、若干、変状が見られますけれども、支承に関しては白い色のようなものになっておりますので、もしかするとこれは溶融亜鉛メッキの支承ではないかと想像します。

一番の問題が何かと言うと、主桁の下フランジおよびウェブの腐食による断面減少だと思います。原因としましてはこの直上にある伸縮装置の漏水、もしくは、支間中央部からの水道ができて、桁端部に水が流れ込んできているという状況が原因かなと思います。

何が一番問題かと言いますと、この先ほど申し上げましたけれども、断面減少によって、この主桁の耐荷性能が十分に満足するものであるかを確認する必要があると。で、桁端部ですので曲げモーメントはほとんどございませんから、どちらかというと支点上の補剛材を含めた鉛直力に対する耐荷力であれば、ウェブの下縁のところの断面積ですとか、支点上の補剛材の一番下のところの支点上の反力を支える断面積が確保されているのかどうか。それによって、それが少なくなると、部分的な座屈を起こす可能性もありますので、その辺を調べる必要があるかと思います。

Q. そういった疑いをもたれて、緊急時にはどのような措置がという点でもう一度緊急的なの

A. もし、その断面減少が大幅なものであるとすれば、桁が崩壊するということはこれくらいでは無いと思いますけれども、支点上の断面が耐荷力として不足するということになりますと、それを補うような構造、つまり、この前面のところに例えばそこそこ断面が満足するものであれば、仮のサンドルっていうか支え材をいれ、急激な段差が起きることを防ぐとか、が必要になるのかなと思います。

Q. それは通す場合ということでしょうか。

A. 通す場合ですね。

Q. 一番最初にはここは別の

A. 部分的に何を使っても構いませんから、断面の減少がどの程度になっているか、それを少し測ってみて、緊急措置、つまり交通止めですとか、部分的な車線減少対策が必要かどうか、まず確認するということが必要だと思います。それで、その後に道路管理者と協議をして、最終的に通行止めにするかどうかは道路管理者が決定することですので、我々ではありませんけれども、それをアドバイスというか、診断者としての意見を述べた方が良いかなとは思います。

Q. そうですね。今までのお話で気付いた損傷、あるいは、考えられる性能低下、何をすべきか、そして、変状の原因が何か、これら全て既にお答えになっているのですが、このように立てた仮説、仮説を立てたような根拠となるようなものと言いますと、例えば、

A. このような状況の橋梁、10 年間くらい診断をやってますと、何十橋と見ていますし、場合によってはもっとひどい状況のものも見ておりますので、それが一つのデータになるのかなと。それと後、自分自身は元々、まぁ鋼橋製作メーカーに勤めておりまして、メタルの橋の設計を二十数年間やってきたことと、その後、工場の製作管理を 10 年間ほどやっておりますので、そのあたりの経験を踏まえて申し上げております。

Q. 設計、製作、その後の 10 年間にわたる実際の維持管理での、そういった経験と知識を基に、そういった仮説を導かれたということですね。

A. はい。それと緊急に何かをしなければならないのか、ということまで想像して、ものを申しております。

Q. ありがとうございます。またこれも毎回なんですが、最後に回答の結果に対する正しさへの自信

A. 専門の内容ですので 8-9 点には行っているのかなと思います。

Q. ありがとうございます。

[一人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 鈑桁の桁端部である。主桁の下フランジやウェブの部分的な腐食や断面減少がある。支承は白い色である**ため**，溶融亜鉛メッキ**の可能性がある**。主桁の下フランジやウェブの部分的な腐食や断面減少が生じている**ため**、伸縮装置部の漏水により桁端部に水が流れている**可能性がある**。断面減少がある**ならば**、主桁の耐荷力が不足する**可能性がある**。桁端部には曲げモーメントがかからない**ので**、鉛直補剛材を含めた支点の鉛直方向の耐荷力を確認する必要がある**と考える**。そのためには、ウェブの下縁の断面積や鉛直補剛材の一番下の断面積が確保されているかを確認する必要がある**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 交通開放を行う場合に、断面減少が大きなものである**のであれば**、桁が崩壊することは無いと**考える**が、

支点上の耐荷力が不足する**可能性がある**。**ゆえに**、サンドルによる待受けを行い、急激な段差が起きることを防ぐ必要がある**可能性がある**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 設計、製作、その後の 10 年間にわたる実際の維持管理での、そういった経験と知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［二人目　けばとり文］

Q. これも全く同じで、点検をするために橋の現場につきました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. I 桁で支承は BP 沓、固定か可動かわからないですが BP 沓。気になるのが、ここに部材がついていて、これが何なのか。ここに部材が付いていることは無いので、何かしらの補修跡かなと。主桁に着目すると、下フランジウェブ、支点上補剛材の相当の腐食、腐食が進行した状況で、おそらくこの状態でハンマーで叩くと、垂直補剛材の下端部が破断するかなと。切れてしまうかなと。というくらいの損傷で、支点上補剛材、写真ではよくわからないのですけれども、スカーラップがついていそうな状態で、かなり水もたまりやすいと思うので、通常の構造よりもかなり腐食が進みやすいかなと。下フランジは層状に腐食が進んでいるので、相当に腐食しているだろうと。

Q. 層状ということで、そこまで言われたのですね。

A. はい。

Q. わかりました。そのようなことを話されたわけですけれども、少しお触れになっていましたけれども、結果的にこの写真からは、この橋にはどういう性能低下ていうのが疑われているでしょうか。

A. 主桁自体が腐食しているのと、特に支点部、支点部周辺の支点上補剛材とか下フランジが腐食しているので、支点反力を支持する機能

Q. 耐荷性能ですね。

A. はい。それが低下していると。そういう状況にあります。

Q. はい。どのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. あの基本損傷からすれば、一か所ケレンをかけてみたうえで、板厚減少が大きければ、当て板補強になりますけれども、あとは支承がかなり腐食を伴っている形になりますので、措置を行う前の詳細調査として、支承の機能の低下が疑われているのと、主桁もかなり板厚が薄くなっているということで、疲労耐久性の低下しているので、ソールプレート部の亀裂が発生していないとは言えないので、それがもし発生していた場合には、支承取り換えと併せた上での補強。支承撤去した上での当て板補強を併せて行うと。損傷範囲が主桁だけですと主桁の当て板だけで結構ですけれども、主桁の亀裂とか支承の機能が影響していた場合には、支承取り換えとセットで。あとは損傷の原因が伸縮装置の漏水であれば、併せて伸縮装置の交換を行うのかなと。

Q. そういう今の見立てなんですけれども、それは根拠となる考え方、はどういうものなんでしょうか。知識、経験

A. 経験もあるのと、最悪のケースを考えて、例えば、交通量が異常に少ないとか、比較的新しい年代であればそれは考えませんけれども、一番最悪の状況として、昭和 30 年代後半から 40 年代にかけて架設された橋梁で交通量が多い場合は、そこまで考えないといけないかなと。

Q. なるほどね。

A. 橋梁諸元等を推定した上での一番悪い状況。

Q. 勉強になります。では、今の回答結果の正しさを 10 点満点で言うと

A. 損傷状況と原因だけにすれば、8 割、9 割は

Q. はい。ありがとうございます。

［二人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁は I 桁で支承は BP 沓である。固定か可動かはわからない。主桁の下フランジウェブと支点上補剛材で腐食が進行している。写真からはわかりにくいが、スカーラップがない**ため**、水が溜まりやすい**可能性がある**。下フランジに層状の腐食がある**ため**、腐食は相当進んでいる**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 主桁自体が腐食しており、支点部周辺の支点上補剛材や下フランジが腐食している**ため**、支点反力を支持する機能が低下し、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 詳細調査を行い、ケレンをかけて板厚減少が大きい**のであれば**、当て板補強を行う必要がある。支承がかなりの腐食を伴っている状態である**ため**、支承機能の確認を行う必要がある。主桁の腐食が生じている**ため**、主桁の板厚がかなり薄くなっている**可能性があり**、疲労耐久性が低下している**可能性がある**。ソールプレートの亀裂が発生している**可能性もある**。そのような状態**なのであれば**、支承取り換えと主桁の補強が必要**と考える**。主桁の損傷のみ**であれば**、当て板補強のみで良い**と考える**。原因が伸縮装置部の漏水な**のであれば**、伸縮装置の交換が必要と考える。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験や架橋年代の橋梁の特徴に関する知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［三人目　けばとり文］

Q. 点検をするために現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 下フランジからウェブの立ち上がりの所の腐食がかなり著しいので、これもこの外観だけでなくて、表層の錆びを落として、どれくらいの減厚があるかを確認する必要があると思います。沓の方は表面的な腐食、変色があるんですが、沓はそれほどダメージは無いと思います。原因は桁端からの漏水だと思います。表面、錆びていないところを見てもだいぶ、塗膜が劣化しているので、

Q. それは主桁のことですか。

A. はい。主桁の塗膜が劣化しているので、かなり傷んでいる

Q. 塗膜ということは、どのような塗膜か想定して

A. 普通の塗装系。メッキではないと思います。

Q. 今の損傷状況をご指摘されましたけれども、全体としてこの橋にはどのような損傷低下が疑われるでしょうか。

A. 腐食の程度をもう少し具体的に調べる必要があるんですけども、これぐらいのものでしたら、著しい耐荷力の低下は無いと思います。支点上の話なので、支点上の剛性、橋としての機能とか、低下していることは間違いない。板厚等を調べて、措置が必要かどうかを判断する必要がある。塗装、防食機能の回復、それから原因となっている水漏れは直さないといけないと思います。

Q. はい。今まで措置のことまで言及されておりますが、そういった全体として根拠となる考え方、性能低下を判断する根拠となる考え方というものは何でしょうか。知識、経験、

A. 知識、経験というのもあれですが、まぁ、知識

Q. 知識ですね、ありがとうございます。最後になりましたが、写真を見た回答結果の正しさについて、自信がどれくらいあるか 10 点満点でお答えください。

A. これは 9 割くらい大丈夫だと思う。

Q. 9 点、ありがとうございます。

［三人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 下フランジやウェブの立ち上がりの所の腐食が著しい**ため**、表層のさびを落とし減厚の程度を確認する必要がある**と考える**。省に表面的な腐食や変色があるが、損傷はない**可能性がある**。腐食の原因は桁端からの漏水である**と考える**。主桁の塗装が劣化している。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 腐食の程度をもう少し具体的に調べる必要があるが、これぐらいの変状である**ならば**、主桁の耐荷力の低下は無い**と考える**。支点上の剛性や橋としての機能が低下していることは間違いない**と考える**。
板厚等を調査し、措置が必要かどうかを判断する必要がある**と考える**。防食機能の回復、伸縮装置部の水漏れは補修する必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［四人目　けばとり文］

Q. はい、お願いいたします。

A. 腐食が一番目立ちます。

Q. これは何でしょうか？物は？

A. 主桁の腐食です。どうしても腐食環境があんまりよろしくない位置に出ている腐食というのが、これは教科書からも経験からも言える内容です。

Q. はい。腐食環境が良くないというのはどういう意味でしょうか？

A. 桁端部でどうしても、土砂とか水の滞留、あと、湿気がこもるという、これは経験でも教科書でも

Q. そうですね、桁端部ゆえの理由、他は？

A. 支承が動いているかが気になります。

Q. 支承の動き？

A. 固着してしまっていないかと言うことですね、

Q. 固着ね

A. 古いタイプの支承ですから、金属沓がゆえに腐食も心配だし、土砂で動かなくなることも心配だし。腐食がこれくらい進んでいると、ここに穴が開く。破断なり、亀裂なりという損傷に進行していく、もしくは、断面厚、もしくはこの錆をどけたら既に穴が開いているかもしれないし

Q. 主桁ですね、わかりました。この場合は結果的にどういう性能低下が疑われるでしょうか？

A. これはもう、車が通った場合にこの部分が用を成していないので、主桁が座屈するおそれがあります。といったところだと思います。

Q. 耐荷性能？

A. 耐荷性能ですね。

Q. わかりました。そういう耐荷性能の低下を疑った理由は何でしょうか？

A. 耐荷性能を疑った理由？

Q. すでにお答えいただいていると思いますが、錆をとったら

A. かもしれない

Q. つまり、断面減少が著しく進んでいるかもしれない

A. はい

Q. そういう意味ですね？わかりました。そのような判断をした根拠となるものは、知識、経験、常識

A. 全てです。

Q. わかりました。何が原因でということはさっき仰った、桁端部が故の環境ということですね？

A. そう考えます

Q. はい、この写真を見た今のご判断について、正しさの自信を 10 点満点で

A. 8-9 点は

Q. 8-9 点、ありがとうございます。

［四人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁に腐食が生じている。桁端部である**ため**、土砂や水の滞留が生じやすく、湿気がこもりやすい**ので**、腐食が生じている。主桁の腐食が進んでいる**ため**、断面厚の減少、亀裂、破断が生じている**可能性がある**。古いタイプの支承で金属製である**ため**、腐食や土砂の堆積により固着が生じている**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. さびを取った場合には断面減少が著しく進んでいる**可能性があるので**、主桁が座屈する**可能性があるので**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 全てである。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［五人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 桁端部の腐食ですね。ここが錆びているので、主桁の腐食、鋼材、横桁の腐食ですかね。ここに水が来ているので、支承もよろしくないのかな。あんまり錆びているようには見えないですけれども。伸縮装置から水が来ているのであれば、支承も。可動だと思うので、移動機能が低下するような錆が出ていれば、ちょっとそれも心配かなと

Q. これは移動を妨げるさびは出ていない？

A. そう思います。桁の腐食もおっきい減厚、ケレンしてみないとわからないですが、穴が開いているようにも思えず、板厚が減っているようにもあんまり思えないので

Q. 桁のどの部分でしょうか？

A. 下フランジとウェブ

Q. 下フランジとウェブが錆びているが穴は空いていないであろうと。わかりました。今大きくその主桁、補剛材のさび、支承についてのさびはあまりないということで確認されたわけですけれども、それらを見つけてどのように思いましたか？

A. 割とよくある程度のさびなので、上の状況とか、水がどうなっている、水の経路とか、量とか、その辺によってもかわると思いますが。これだけを見ている範囲ではあんまり。

Q. そうですね。この写真からはどんな性能低下が見込まれるでしょうか

A. 耐荷性能は大きくは低下がしていないと考えています。耐久ですね。鋼橋に関しては示方書では耐久性はあくまで耐荷性能を満たすための、

Q. 必要条件

A. そのようなイメージですが、鋼橋の腐食に関しては、腐食により結構架け替えられる事例が多いので、腐食に関しては結構しっかりとみていく必要が、ただ現状ではそれほど

Q. わかりました。耐久性能の、疑った理由を念のためお聞きしますが

A. 腐食

Q. そうですね。この場合には、何か措置を取ることが望ましいでしょうか？

A. 耐荷性能が低下していないという前提で、防食機能の回復ですね。上から水が来ているのであれば、まずは遮水、再塗装で、これも劣化因子の遮断になりますかね

Q. 防食機能の回復が必要ということですが、行ってみれば緊急時の措置という意味では特に何もないという理解で良いですね？

A. はい

Q. 今お答えいただいたことについてですが、根拠となる考え方、知識、経験、常識

A. そうですね。そのあたり

Q. 経験、知識ですね、わかりました。見つけた変状全てということで、先ほどらい何度も仰っていますが、水の影響ということで。その根拠はもう一度お聞きしますが、原因は水ということなんですけれども、その水っていうのが上から来ているという

A. 下の状況も分からないので、下が河であれば結露した水も可能性としてはあると思うのですが

Q. そういう仮説を立てられた根拠は何でしょうか？

A. 桁端部自体は風通しが悪いので、仮にしたが水路みたいな所であれば、水蒸気が上がってきてということはありえるかなと

Q. ご経験を元に

A. そうですね

Q. わかりました。同じく最後になりましたが自信について 10 点満点で

A. これも 5 点くらいですかね。

［五人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 桁端部に腐食がある。主桁や鋼材や横桁に腐食がある**ため**、水が桁端部に来ている**可能性がある**。桁端部に水が来ている**可能性があるのであれば**、支承もよくない可能性があるが、支承はさびていない。伸縮装置から水が来ている**のであれば**、可動支承の移動機能が低下するようなさびが生じている**可能性がある**。下フランジとウェブが腐食している**ため**、ケレンをしてみる必要があるが、見立てでは減肉は生じていない**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 支承がさびておらず、下フランジとウェブの減肉が生じていない**と考えるので**、耐荷力は低下していない**と考える**。ただし、腐食が生じている**ため**、道路橋示方書での耐久性能の定義は耐荷性能の前提である**ため**、耐久性の低下が生じている**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 耐荷力が低下していない**と考えた**上で、防食機能の回復が必要である**と考える**。上から水が来ている**のであれば**、遮水と再塗装が必要である**と考える**。

Q. 防食機能の回復が必要ということであるが、緊急時の措置の必要性はないという理解で良いか？

A. そうである。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験と知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 5 点である。

［六人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁のウェブですか、ウェブと垂直補剛材にまぁ、下フランジも含めた、こちらたぶん端横桁だと思い

ますが、腐食防食機能の劣化。たぶんパラペットに見えます。腐食・防食機能の劣化ですかね。欠損はしていないし、破断もたぶん無さそうですね。支点上ですので、普通の BP 沓なのかな。支承は桁端部ですので、著しくはないですが腐食と防食機能が劣化していますね。大体点検では腐食機能と防食機能がセットであるので。色が古いやつなんですかね。塗装が。板桁、BP・A 支承となっていますね。

Q. わかりました。ありがとうございます。どういう風に思われたかということなんですけれども、

A. 腐食と防食機能の劣化の原因については桁端部でありますし、伸縮装置からの漏水、土砂が堆積していますので、土砂による湿潤環境。この辺の腐食はおそらく伸縮装置からの漏水。経年劣化プラス伸縮装置からの漏水が原因でこのような腐食に至っているのではと思います。

Q. わかりました。ここに関しては性能低下という意味ではどうでしょうか。

A. 桁端部でありますから、垂直補剛材や下フランジに欠損までは見られませんので、腐食がまぁ、桁端部で著しいから、伸縮装置からの漏水を止めるのと、予防保全の観点から桁端部だけでもよいかもですが、桁端部の再塗装が必要、支承も含めてですけれども必要では無いか。H31 要領で言いますと、健全性の診断は II で良い。予防保全の観点から、まぁ、補修をした方が良いかと思います。

Q. 耐久性と

A. そうですね、耐久性の観点から低下と。耐荷力は欠損とかしていないので、主桁の垂直補剛材や下フランジとか、叩いたら多少は減肉しているかもしているかもしれないですが、予防保全の観点で良いと思います。

Q. これも根拠をお聞きしたいのですが、ご経験、知識

A. 大体 7 ぐらいで学習した、結構こういう鈑桁で桁端部が腐食した例は現場でもよく、時々見られるので

Q. 学習 7 で経験 3 という具合ですかね。

A. そうですね。

Q. ありがとうございます。一通り原因も仰っていますので、回答の正しさについて、10 点満点で

A. これも 7 でいいです。

［六人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁のウェブと垂直補剛材と下フランジと端横桁に腐食と防食機能の劣化が生じている。それらは欠損はしていない**ため**、破断は生じていない**と考える**。支承の塗装の色が古いものでわからないが、著しくは無いが腐食と防食機能の劣化が生じている**可能性がある**。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 桁端部に腐食と防食機能の劣化が生じている**ため**、伸縮装置からの漏水が生じている**可能性がある**。土砂が堆積している**ため**、湿潤環境である**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 主桁の垂直補剛材や下フランジに腐食が生じているが、減肉や欠損が生じていない**ので**、耐荷力は低下していない**可能性がある**。桁端部の腐食が著しい**ため**、耐久性が低下している**可能性がある**。**ゆえに**、桁端部の再塗装や伸縮装置部の止水を行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 学習が 7 割、経験が 3 割である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［七人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 先ずは主桁桁端部に腐食があることと、桁端からの水が回ってきたのか、また、排水管からの水なのか、水が来ているのかなと。ただし、支承はそんなに腐食は進行していないので、主桁を下フランジやウェブを伝ってきている水かと思います。基本的には腐食、漏水等の原因かと思われます。横桁はちょっとしか見えないのでわかりませんが、腐食で支承ももしかしたら固着しているかもしれないので、主桁の亀裂が無いか、この腐食の層状さびのところは取って確認する必要があるのかなと。あとは垂直補剛材下端ですかね、写真が荒いですが、き裂っぽく見えるので、その辺を支承周りをちょっと悪さしている可能性が。支承の回転拘束を低下させて、主桁への影響が出てきている状況かなと思います。

Q. 先ほどの主桁、桁端の腐食というご指摘でしたが、腐食の程度としては

A. d ないし e かなと。層状さびを取ってみて板厚を取ってみないと判断ができない。

Q. わかりました。今までの見立ての結果、性能低下があるとすればどのような低下でしょうか。

A. 性能低下があるとすれば、耐荷性能自体はまだ支圧面積分の断面がたぶん、残っていれば特に鉛直荷重は問題ないかと思います。亀裂が入ってきているようだと一気になるので、調査が必要かなと思います。耐久性は水が来ているようですと、進行性ですのでさらに悪くなると思います。

Q. 耐久性の低下、わかりました。耐久性の低下を疑った理由は何でしょうか。

A. 腐食がひどいのと、下フランジとウェブ下端ですね、こちら支点、支圧面積あたりのところもだいぶ腐食しているので、垂直補剛材、その辺が悪く、腐食で板厚が減少すると耐荷性能が低下するのでその辺で判断しています。

Q. これに対してはどのような措置を取るべきでしょうか。

A. まず腐食片を取ってみて、関連する亀裂等が無いかということと、あとは支承の機能が特に異常が無ければ再塗装でも良い。き裂とか板厚減少が厳しいようでしたら当て板補強で部材断面力を挙げる、元に戻すような措置が必要だと思います。

Q. 一番初めに仰った、腐食片を取ってみての意味をもう少し教えてください。

A. 腐食片があると、層状さびがあると実際の板厚がわからないので、まずとってみて設計断面、設計板厚部分を、実際の残っている板厚部分を見てみないと、ちゃんと耐荷力上持つかわからないので

Q. 残留板厚を測るということですね、よくわかりました。お答えになったような見立てに関して、根拠になるのは何でしょうか。経験、知識

A. 経験、知識、学習ですね。

Q. わかりました。回答結果に関する正しさの自信を 10 点満点で

A. 8 かな

［七人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁桁端部に腐食が生じている**ため**、桁端や排水管から水が来ている**可能性がある**。支承は腐食していない**ため**、下フランジやウェブに水が伝っている**可能性がある**。支承が固着している**可能性があるため**、層状さびを取って主桁の亀裂が無いか確認する必要がある**と考える**。垂直補剛材に亀裂があるように見える**ため**、支承の回転が拘束されて主桁に影響が出ている**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 支圧がかかる断面積が残っているので**あれば**、鉛直荷重は支持できる状態である**と考える**。亀裂がある**のであれば**、鉛直荷重が支持できない**可能性がある**。腐食が生じており、下フランジとウェブの腐食が進行している**ため**、耐久性が低下している**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 亀裂等が無く、支承の機能に異常が無い**のであれば**、再塗装で良い**と考える**。き裂や板厚減少が生じている**のであれば**、当て板補強を行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験、知識、学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［八人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これ端部で腐食している。鋼材が腐食している。写真自体がぜんぜんよくわからないですが、防食機能の劣化と腐食と、あとは支承がもしかしたらいかれているかもしれない。

Q. 支承に異常があるというのはどういうことでしょうか。

A. 手前の遊間が大きすぎますね。もしかしたら時期がどの時期かもわからにですが、季節によるんですが、冬でしたらある程度妥当。夏場、だと、、逆か。冬なら縮む、これだけ遊間が残っているのはあんまり。この腐食のでき方からすると、これ何か溜まって、水が溜まってですね、腐食した感じですね。これがあと対候性じゃあないな、普通の。架橋環境。こういうので多いのはたぶん、跨線橋とかに多いので。今はきっちりと見ているんでしょうけど、ちょっと見落としが多いんですよね。夜間に規制をかけてやっちゃうので、そういう意味ではちょっと架橋環境が気になりますし。あとは塩分をまいているとか、そういう感じの所、塩カル撒いているとか、そういう地域か、山間部かというのが気になります。

Q. わかりました。今まで述べておられたことを元にして、この橋にはどういう性能低下が疑われるでしょうか。

A. 逆面を見ないといけないのですが、見た範囲ではたぶん、耐力はまだあると思います。

Q. その他の性能低下はありますでしょうか。

A. 滅多にないのですが進行がすすんでいる場合はき裂か何かが発生する場合があるなら、もしき裂があるなら、その程度によりますけれども耐力の低下は、そのまま何もしなければ、き裂が進行する可能性があるので、そのあたりどっちかを判断すれば、それを見た上で判断する必要がある。

Q. わかりました。今までのこのお見立てしていただきましたが、根拠となるものは何でしょうか。経験、知識、学習

A. 経験ですね。

Q. 経験。特に大きな腐食じゃないとか、あるいは水が溜まって腐食したという話もありましたが、いろんな仮説を立てられたのも経験ということで。

A. そうですね。例えば、土砂詰まりの可能性がありますから、伸縮装置から水が入ってきた。

Q. わかりました。回答結果に対する自信はどれくらいでしょうか

A. 8 ぐらいですかね。

［八人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 端部の鋼材が腐食している。季節の温度変化の影響もあるが、支承の遊間が広い状態である。端部の腐食がある**ため**、水や土砂がたまる腐食環境である**可能性があるので**、伸縮装置から水が浸入している**可能性がある**。塩分をまいているか、地域は山間部か等の情報はこのしゃしんからはわからない。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 桁の逆面を見ないといけないが、見た範囲では耐荷力を有している**と考える**。めったにないが、もし亀裂が生じている**のであれば**、耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［九人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 桁端部になると思います。鋼部材ですけれども、特に下フランジとウェブの下端、あとは横げた端横げたにかなり著しい腐食が進行している状況があります。叩いてみないとわかりませんが、ウェブのあたり、これは断面欠損が起こっている状況にも見えます。支承の写真が見にくいんですが、下のモルタル、無収縮モルタルですか、高さ調整のコンクリート部材がちょっと、無くなっているようにも見えますので、非常に耐荷性能は落ちていると。あと、支点上補剛材も併せて腐食が進行している状況ですので、支点上の耐荷性能も非常に低下しているということが言えると思います。この辺りはコンクリート部材が埋まっているのかなと思います。

Q. わかりました。性能低下という意味ではそうすると、どのような

A. 耐荷性能も低下しているとほぼ確実かなと思われます。あと、耐久性、腐食もかなり進行していると、耐久性については低下していると判断できます。

Q. わかりました。低下を疑った、耐荷性能、耐久性能の低下を疑った理由を改めてお聞きします。

A. 腐食が非常に進行していまして、おそらく断面減少、減肉が起こっている状況だと思いますので、明確に耐荷力は落ちていると言えます。

Q. わかりました。そういう場合、どのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. まずここの腐食の状況ですね。まず確認して、あきらかな減肉が起こっているのであれば断面補強ですね、鋼材を充てるとか、当然、錆を除去してということになりますが、断面を鋼板などで補強してやると、いうような対応になろうかと思います。桁の本体もそうですし、補剛材も補強してやるということが対応として必要だと

Q. これは緊急的な対応という意味ですか、それとも長いスパンでの

A. これはちょっと腐食の状況によります。かなり減肉が進んでいるようですと、緊急的な措置が必要だと思います。

Q. あくまで断面不足状況の確認をもって、緊急か、あるいは時間をかけての判断にわかれると

A. そうですね。

Q. わかりました。今のような見立ての根拠、経験とか知識、学習、

A. 経験とか過去の学習とか、そういったところからの判断になります。

Q. わかりました。ありがとうございます。主にこれらの変状の原因というのは何でしょうか。

A. 恐らくですけれども、桁端部になりますので、上にあります伸縮装置、本来は水が垂れてきてはいけないのですが、元々、垂れてくることを許容している構造かもしれませんが、橋面からの水の止水、水が垂れてきて、それがここに溜まりながら腐食が進行したと推定されます。

Q. ありがとうございます。この、回答結果の正しさに対する自信、10 点満点で

A. 8 点ぐらいでお願いいたします。

［九人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 桁端部の鋼部材の下フランジとウェブの下端及び端横桁に腐食が生じている。叩いてみないとわからないが、ウェブに断面欠損が生じている**可能性がある**。支承下のモルタルが無くなっている**ため**、耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。支点上補剛材の腐食が進行している**ため**、断面減少が生じている**可能性があるので**、支点上の耐荷力の低下が生じている**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 耐荷力の低下がほぼ確実に生じている**可能性がある**。腐食が進行している**ため**、耐久性の低下が生じている**可能性がある**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 腐食の状況を確認し、断面減少が生じている**のであれば**、さびを除去し鋼板を充てて補強する必要がある**と考える**。断面減少の程度に応じて緊急措置か時間をかけての措置かの判断が分かれる**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験や学習である。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 桁端部に腐食が生じている**ため**、伸縮装置の漏水の影響だ**と考える**。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［十人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 版桁の桁端部の著しい腐食で、既にかなり腐食が進行している状況です。叩いていないですが恐らくは板厚減少がかなり進行している状況かと思います。原因はおそらくは桁端部ですので、伸縮装置からの漏水が一般的かと思います。かなり腐食も著しいので、もしかしたら凍結防止剤散布エリアの影響もあるのかもしれません。見立てと言いますか現状で支点上はそれこそ、今仕事でこういう文章を書いていたのですが、荷重集中点で座屈耐力が低下した状態で、垂直縫合材やウェブにまぁ、恐らくは減肉があるということですので、座屈耐力が低下した状態と言えるのかなと思います。さらに原因が排除されていなければ、この先、例えば次回点検を考えたときに、局部座屈とかもちょっと考えられるのかなと思います。支承は思ったよりもそんなにひどくは、腐食で動いていないとか、あんまり動いていないのかもしれませんが、著しくは無いですね。基本的には考察としては主桁で、とそういう感じになると思います。

Q. メカニズムも答えになりましたけども、性能低下としてはどのような性能低下が疑われますか。

A. 基本的に支点上の座屈耐力が低下ということですので、主桁の荷重支持伝達機能というもの、つまりは上部構造にかかる荷重が支承を介して下部構造に伝わる、そういう機能が低下している状態かと思います。致命的な状態に即座に至るかといわれると、そこまではいかないと思います。それは腐食の状態で判断できると思います。

Q. 耐荷性能は荷重支持伝達機能は低下しているけども、耐荷性能そのものはそれほど落ちていないということですね。

A. そうですね。

Q. わかりました。どのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 状況をちゃんと把握しないといけないので、ちゃんと叩いて板厚減少等をちゃんと測ってが第一歩です。その次に措置が必要という判断になりますので、原因排除はおそらく伸縮装置の漏水。水を止めた上で、耐荷力照査の上で当て板補強、再塗装が必要ではないかと考えます。

Q. わかりました。それから、はい、今までのお答えの根拠は経験、事例学習、知識

A. こういう損傷に関しては経験と学習の両方だと思います。こういった損傷は実際に見たことがありますので。いろいろな文献でもよく出てくるので。

Q. それじゃあ、得点ですけれども自信について

A. 9 点ぐらいでしょうか。

［十人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 鈑桁の桁端部の著しい腐食が生じている。叩いていないが、板厚減少が進行している。桁端部である**ため**、伸縮装置からの漏水が原因である**可能性がある**。腐食が著しい**ため**、凍結防止剤散布エリアである**可能性がある**。支点上は荷重集中点である**ので**、局部座屈が生じる**可能性がある**。支承の腐食はほぼ生じていない。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 上部構造にかかる荷重を下部構造に伝達する能力が低下している**可能性がある**。腐食の状態を確認する必要があるが、致命的な状態ではない**と考える**。荷重伝達機能の低下はあるが、耐荷力そのものはそれほど低下していない**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 腐食部の板厚減少量を測った上で措置の必要性を判断する必要がある**と考える**。原因を排除するために伸縮装置の漏水を止水する必要がある**と考える**。その上で耐荷力の照査を行い、当て板補強と再塗装を行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験と学習の両方である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

［十一人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. まず気づいた点では主桁のウェブの下面、下の方とか、下フランジにかなり腐食が進行している状態が見受けられます。で、えーっと、ちょっと一部断面減少を伴っているのかなぁという腐食の状態です。あとは支承をちょっと、腐食したような感じを。支承回りの沓座面がちょっと黒ずんでいるので、水か何かが堆積している形跡があるのかなという点が気になりました。

Q. 今見つけになられて、まずはどう思いましたか。

A. このおそらく場所が橋台、桁端部の場所なのかなと思います。沓座面が濡れている状態から、伸縮装置なりからの漏水がこう、続いてですね、このような腐食損傷に至ったのかなという風な感じがします。

Q. わかりました。どのような性能低下が危惧されるでしょうか。

A. 腐食の状態もですね、今、写真ではちょっと表面的な部分しか見られないのですが、塗膜もあったり、腐食しているところをハンマーで叩いて、仮に破断なり亀裂なりが生じていればですね、支承が置かれている、支点部にもありますので、その上からの荷重も、荷重集中点となる場所ですので、耐荷性能にですね、影響があるのではないかなと。とにかく腐食の状態をしっかり確認する必要があるのかなと思います。

Q. 今、耐荷性能の低下があるということですけれども、今の話からすると断面減少の状況によると、だからハンマーで叩いて判断するということですね。

A. はい。

Q. わかりました。とりあえず急いで何か緊急的に措置をすることは必要ですか？

A. まずはハンマーで叩いてですね、仮にその主桁のまぁ、支点上のこの垂直補剛材だとか、あとその隣にある、特にウェブの下がかなり腐食しているので、そこが破断していれば緊急措置が必要かなと思います。特にウェブの所の破断ですね。

Q. 今までいて頂いた見立てについて、えーっと、根拠はどのようなものでしょうか。経験、あるいは事例の学習、知識というもので言いますと

A. こちらも事例の学習になります。

Q. わかりました。この回答結果の正しさについて、どれぐらいの自信があるか 10 点満点で。

A. 5 点ぐらい

［十一人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 主桁のウェブの下面や下フランジに腐食が進行している。腐食の状態から断面減少が生じている**可能性がある**。支承も腐食している**可能性がある**。支承周りの沓座面が黒ずんでいる**ため**、水か何かが堆積している**可能性がある**。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 橋台の桁端部の沓座面が濡れている**ため**、伸縮装置からの漏水が生じている**ので**、このような腐食損傷に至った**可能性がある**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 腐食部をハンマーで叩き確認する必要があるが、仮に破断や亀裂が生じている**のであれば**、支承部は荷重集中点である**ので**、耐荷力の低下が生じている**可能性があるので**、その場合は緊急措置が必要である**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。。

A. 5 点である。

［写真 4 枚目］



［一人目　けばとり文］

A. 橋脚

Q. そうですね。これも写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚の基部が部分的に破壊している。ひび割れとしては、一つはコンクリートの断面が破壊していると、それから鉄筋も部分的には孕んできていると、それからひび割れそのものが 45 度方向に、入っておりますので、かなり大きな外力が加わった結果、こういった結果になったのだろうと。原因としましては地震が一番よく考え、ほぼ地震だろうという風に想定されます。それ以外の外力、何かが衝突したということであれば、これだけの断面積、直径はわかりませんけれども、このような破壊形状となる場合は、まず無かろうという風に思います。このような風になった時に何をしなければいけないかということでは、まず上部構造に、路面に車両を走行していた場合、危険な状況となることも考えられますので、まず、道路管理者に連絡して、この部分の自動車走行を緊急停止していただくということが必要だと思います。

Q. そうですね。よくわかりました。今のご説明の中で、もう一つだけお聞かせ願いたいのですが、性能の低下という意味からすると、、

A. 鉛直力については多少の耐荷力はまだ残存しているのかと思いますけれども、水平力に対しての耐荷力はほとんど無いという状況にまで陥っているという風に判断することから、先ほど申し上げました通行

止めの措置が必要であるという風に思っております。

Q. 鉛直、水平、両方ともの力に対する耐荷性能、それの低下が疑われている訳ですけれども、その耐荷性能の低下を疑った主な理由は何でしょうか。

A. 基本的には円柱のコンクリートが破壊している。部分的な引張サイドの破壊しているということと、コンクリート断面がかなり 45 度方向に大きなき裂が入っておりますので、有効断面が無いということだと思っております。

Q. わかりました。緊急的な措置も言われましたし、これも今、耐荷性能の低下を疑った理由を述べて頂きましたが、その判断した根拠となる考え方について、

A. 根拠となる考え方、？

Q. そうですね。例えば、あの鉄筋が膨らんでいる、45 度斜めに入っている、引張側のコンクリートが落ちているということを仰ったと思うのですが

A. 原因としましては直角方向の地震動による水平力が原因かなと思います。

Q. わかりました。最後に結果の正しさについて 10 点満点で何点でしょうか。

A. せいぜい 7-8 点ですかね。

Q. ありがとうございます。

[一人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚の基部に部分的な破壊が生じている。コンクリートの断面が破壊し、鉄筋も部分的にはらんでいる。ひび割れが斜め 45 度方向に入っている。それら変状の原因は地震の**可能性がある**。橋脚の引張サイドのコンクリートが破壊し、45 度方向の斜めひび割れが生じている**ならば**、有効断面がない**可能性がある**。これら変状から、鉛直方向の耐荷力はまだ残存している**可能性がある**。しかし、水平方向の耐荷力がほぼない状態である**可能性があるので**、車両を走行させることは危険である**可能性がある**。**ゆえに**、道路管理者に連絡を行い、通行止めの措置を判断頂いた方が良い**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

[二人目　けばとり文]

A. せん断

Q. せん断、見るなり。

A. 基部ですね。

Q. 橋脚基部、はい。

A. 帯鉄筋足りないですね。細いですね。主鉄筋も細い、軸方向鉄筋も細いんですが。これは、力が、、これどんな橋なのかな。A1 側、A2 側

Q. A1 側、A2 側ということは 1 本橋脚ということですね。

A. えぇ。方向がこうなんですかね。橋に対して斜めの方向にかかっているのですかね。A1 側、A2 側がよくわからない。この写真に対して水平方向が橋軸なんですかね。

Q. この写真はたぶん、左奥が A1、

A. ななめですか。なるほど、であれば橋軸方向にちからがかかったんですかね、

Q. メカニズムにご興味が移っていると思うのですが、気付いた点、つまり、観察した点としては何でしょう、さっきは橋脚がせん断座屈が、帯鉄筋が細い、

A. えぇ。力の方向ですね。

Q. 今の観察なんですけれども、橋にはどのような性能低下が生じているでしょうか。

A. 下部工の支持力ですよね。

Q. 耐荷性能ですね？

A. はい、耐荷性能ですね。こんくらいだったら、、

Q. 下部工の耐荷性能の低下を疑った理由は何でしょうか。

A. 軸方向鉄筋が座屈してしまっている。それが大きいですね。

Q. 軸方向が座屈している。このようになったのは、何が原因なのか。

A. 地震でしょうね。

Q. それでもし、下部構造の耐荷性能の低下を疑われた時にですけど

A. はい

Q. しかもこれ、地震時ではないかと

A. はい

Q. 地震直後にこれを見たとすると、緊急時にはどのような措置を取るのが望ましいでしょうか。どうお考えでしょうか。

A. 上の上部構造の段差がどれくらいかによるのですが、ベントで支えた方が良いんじゃないかなと思います。上部構造を支えると、その上で橋脚の復旧をどうするかですね。打ち換えるか、構築し直すのかですかね。

Q. 短期的、長期的

A. 短期的にはそうでしょうね。

Q. 今まさに現場につきました、緊急時です、その時に措置を取るとすれば

A. 道路管理者には報告しないといけないですね。

Q. わかりました。そういう仮説を述べられましたが、その仮説を立てられました根拠は何でしょうか。

A. これも今までの震災による損傷をいくつかみてきたんですが、その中での判断ですかね。

Q. 実例だけでなく

A. 現場を見たり、文献を見たり

Q. わかりました。現場と文献ですね。

A. はい。

Q. 最後にまた同じなんですが、今のご回答結果の正しさ、適切さについて

A. 8 割くらいですかね。

Q. ありがとうございます。

［二人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚の基部にせん断破壊が生じている。帯鉄筋が不足している。軸方向鉄筋が細い。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 軸方向鉄筋が座屈している**ため**、下部構造の支持力が不足している**可能性があり**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 地震である。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. まず、道路管理者に連絡する必要がある。上部構造の橋面に段差が生じている**可能性もある**が、下部構造の鉛直方向の支持力が不足している**可能性がある**。**ゆえに**ベントで上部構造を支持するのが良い。その上で橋脚は打ち換えるか、再構築を行う必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 現場での経験や文献による知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［三人目　けばとり文］

Q. これもお願いします。

A. これはまず橋脚ですかね。

Q. はい。

A. A1 側、A2 側ということで中間橋脚で、損傷としては橋脚のほぼ真ん中付近のコンクリートが大きく剥落して、鉄筋が見えていると、周囲にコンクリート片が落ちているのは、おそらくここが剥離したものが落ちているのでしょう。橋脚が置かれている状況としては、水中部ではなく、陸上部、河川敷にある橋脚かなという状況ですね。

Q. コンクリートの剥落と鉄筋が曲がっているということですね。

A. はい。

Q. わかりました。この写真から性能低下を疑うとすればどのようなものでしょうか。

A. 明らかに片面が剥落していて、草なのかよくわからないのですけれども、ひび割れがばーと入っているように思うので、せん断の破壊に近い状況で、性能はすごく低下していると。

Q. 耐荷性能ですね。

A. はい。

Q. わかりました。これはどういう理由でこのような状態になったのでしょうか。

A. 基本的にこのようなせん断破壊するものは地震によるもの、外力。それ以外は考えにくいですね。

Q. この緊急時ということで、これはどのような措置を取るのが望ましいでしょうか。

A. 橋脚自体は措置のしようがない

Q. 耐荷性能が落ちているからでしょうか。

A. そうですね。どの程度の緊急か、どの程度のスパンを考えるかによりますが、少なくとも補強。これをそのまま生かそうとすれば、せん断補強が必要になります。

Q. とりあえず通行は止める？

A. はい。通行は止めます。

Q. 今のような仮説を立てられた根拠となる考え方は何でしょうか。

A. 損傷の状況からして、かなりの水平方向の力を受けたのかなと。

Q. ご経験や知識で言うと

A. 一般的な教科書的なものもありますし、経験も含めて

Q. 教科書的な知識と経験ですね。

A. はい。

Q. はい、わかりました。この回答結果の正しさについて、10 点満点で

A. 9 点

Q. ありがとうございました。

[三人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 中間橋脚のほぼ真ん中付近のコンクリートが大きく剥落している。橋脚の鉄筋が見えている。橋脚の周囲にコンクリート片が落ちている。橋脚が置かれている状況としては、水中部ではなく、陸上部、河川敷**と考える**。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 橋脚の片面が剥落しており、せん断ひび割れが入っているため、せん断破壊に近い状況である。耐荷性能がかなり低下している**可能性がある**。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 地震である。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 橋脚自体は措置のしようがないほど耐荷性能が低下している。**ゆえに**、通行止めが必要**と考える**。長期的にはこの橋脚をそのまま用いる場合はせん断補強が必要**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 教科書的な知識や経験である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 9 点である。

[四人目　けばとり文]

Q. この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これも地震の影響だと思うんですけど。

Q. 地震。これは何でしょうか。

A. 橋脚の基部ですね。の地震時の破壊だと思います。

Q. 写真から気づかれる観察結果として。

A. 斜め方向にひび割れも入っているのと、鉄筋、表層のコンクリートがかなり剥離してむき出しになって、鉄筋が変形しているような状況。耐荷力としても低下していると言わざるを得ない状況だと思います。

Q. はい、既に耐荷力の性能を疑っておりますけれども、その耐荷力の性能を疑った理由を改めてお願いいたします。

A. 鉄筋もむき出しになっていて、変形している、斜めひび割れがほぼ柱全体に渡って、表層のコンクリートが大きな範囲で剥落しているためです。

Q. 地震だということで、これも全てお答えになっているので、今のお答えの正しさについて、何点でしょうか。

A. 100 点でいいんじゃないですかね。

[四人目　整文]

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 地震の影響である**と考える**。橋脚の基部に斜め方向のひび割れが生じており、表層のコンクリートが剥離し、鉄筋がむき出しになり、鉄筋が変形している**ため**、耐荷力が低下している**可能性がある**。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 10 点である。

[五人目　けばとり文]

Q. この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 若干のはらみ出しをするくらいの水平力を受けた

Q. 何のはらみ出しでしょうか？

A. 軸方向鉄筋のはらみ出し

Q. 軸方向鉄筋のはらみ出し

A. それプラス、それによってかぶりコンクリートの剥落も起きていますし、大きめの水平力を受けたんだなぁという印象です。

Q. 大きい水平力の原因は？

A. 地震だと思います。

Q. はい。

A. これいつ頃のかわかりませんが、線支承ですと結構古いタイプの橋かと思うのですが、なので年式はあまり新しくない橋で、耐震補強はされていると思うのですが、それがやられているという印象ですね。あと気になるのが曲げひび割れなのか、曲げせん断なのか気になるところで、ひび割れ性状が

Q. よくご覧になって結構ですけれども

A. 曲げだとやはり、水平方向のひび割れ、こっち側にもいるのかなというのが無いので、これは一気に行っているのかなと。曲げ起点かもしれないですが、せん断破壊に行ったのかなと

Q. せん断破壊ですね。

A. 曲げせん断ですね。

Q. 厳密にはということですね。わかりました。曲げせん断破壊であるがゆえに、ということで性能低下は

A. 耐荷性能ですね

Q. 緊急時に、さっき地震時にと仰いましたし、

A. はい

Q. こういう地震時にどのような措置を取ることが必要でしょうか？

A. 資材があるのであれば耐力の低下が怖いので、そのわきにベントを立てたりとか。

Q. わかりました。そういう判断をした根拠となる考え方は？経験、知識、

A. 考え方は、経験と知識ですね。

Q. 全部、駆動しているのですね、わかりました。同じく、最後回答結果の正しさに対する自信、10 点満点で

A. これも 8 割くらい

Q. 8 割、わかりました。

［五人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 軸方向鉄筋のはらみ出しが生じている。かぶりコンクリートが剥落している。線支承であると記載があるため、古いタイプの橋梁であるが、耐震補強はされていると考える。片面に曲げひび割れが生じているため、曲げ起点の曲げせん断破壊である可能性がある。

Q. あなたの見つけた変状全ては何が原因で生じているか？

A. 地震であると考える。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 曲げせん断破壊が生じているので、耐荷力が低下している可能性がある。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 資材がある場合には耐力の低下が生じている可能性があるので、ベントを立てると考える。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験と知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［六人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 地震のせん断曲げですかね。

Q. 部位は

A. 橋脚の基部かな

Q. 橋脚基部のせん断曲げ破壊

A. せん断ですね。鉄筋も曲がっているので、これは早急に措置が必要だと思います。

Q. 鉄筋が曲がっているのはどの部分？その鉄筋の曲げ。

A. おそらく、その基部と脚柱の傾きが変わっているので、どれぐらいの高さがあるかわかりませんが、上にも必ずその分のずれが、高ければ高いほどおっきいずれがいっているはず。基部に向けて、まだ広がりそうなひびが入っているので、ここが落ちるともっと安定が落ちる。

Q. 一番最初は曲げ破壊というようなメカニズムをお答えになりましたが、観察してわかるものとしては、言葉で言うと

A. どちらかというと全体を

Q. 見たものとして、言葉として表して頂きたいのですが。言葉として表されたのは鉄筋の曲げと、ひび割れの広がり具合だけですが

A. コンクリートが剥落していますね。橋脚の通りがずれている

Q. わかりました。まずはどういう風に思いましたでしょうか？

A. 耐荷力が低下していると思います。

Q. 耐荷力の低下の理由、原因は何ですかね

A. 地震による曲げ、曲げの破壊ですかね。

Q. 地震力に寄るので耐荷力が低下した

A. 地震力によりこれだけ欠損しているので、これだけ使い続けるのは心配

Q. そのような疑いを持たれたわけですが、どういう措置を取ることが望ましいでしょうか

A. 通行制限が最悪必要かなと思います。

Q. 通行制限

A. はい

Q. わかりました。根拠となる考え方、根拠となるものは何でしょうか。知識、経験、常識、教科書

A. そうですね。経験、知識、

Q. 経験、知識ですね

A. わかりました。

Q. 今までの回答の正しさについては 10 点満点で

A. 上の慣性力でこうなっていると思うので、5 点くらい

Q. わかりました。

［六人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 地震による橋脚基部のせん断曲げ破壊である**と考える**。鉄筋の曲がり、コンクリートの剥離、橋脚が傾いている。まだ広がりそうなひび割れが生じている**ため**、このひび割れが進行した**のであれば**、更に安定性が低下する**可能性がある**。基部と橋脚の傾きが変わっている**ため**、上側（上部構造や支承部）にずれが生じている**可能性がある**。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 耐荷力が低下している**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 通行制限が必要だ**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験と知識である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 5 点である。

［七人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これは橋脚か。円柱ですよね。鉄筋がもうはらんできちゃっていますね。鉄筋のはらみと、コンクリートの剥離、鉄筋露出というんですかね。あとはここに斜め方向のひび割れが見られます。地震でこういうのを見た経験があるので

Q. 円柱で仰いましたがどの部位になるのでしょうか。

A. 柱部が円柱、橋脚です。

Q. 鉄筋のはらみ、コンクリートの剥離、斜めひび割れと見つけられたわけですけれども、どうおもいましたか？

A. 耐荷力が低下しています。H31 要領で言いますと、健全性 III と推定されます。早急に 5 年以内に、たぶん鉄筋が曲がってしまっているので降伏しているし 5 年以内に直してあげた方がよろしいかと思います。

Q. わかりました。今の耐荷力の低下が疑われるということですね。どの程度の疑いでしょうか。5 年以内に補修すれば良いということですか。

A. はい。

Q. 措置としてはどのような措置を行えばよいでしょうか。

A. 措置は健全性は III 相当ですから、IV ではなく III。III なので 5 年以内に

Q. そうですね。今までのお答えの根拠になるのは

A. 学習ですかね。

Q. わかりました。原因としてはこの変状の

A. 地震ですかね。地震の水平力の影響だと思います。

Q. 地震による水平力。この仮説を立てられたのは、元になるのは

A. 学習

Q. わかりました。最後になりましたが自信のほどを

A. 7 ぐらいです。

［七人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚の鉄筋のはらみ、コンクリートの剥離、鉄筋露出、斜め方向のひび割れが生じている。このような変状は地震後に見た経験がある。

Q. これら変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 耐荷力が低下している**可能性がある**。鉄筋がはらんでいる**ので**、5 年以内に直す必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 7 点である。

［八人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これは橋脚のピアーですかね。ピアーの基部側の方に軸方向鉄筋のはらみ出しと、周囲のコンクリートの剥離が見えて、そこから下方向にせん断ひび割れが入っている状況で、地震によって生じた損傷かと思います。で、あとは、周囲の状況、地面ですね。地面は特に陥没とか液状化が無いので、支持杭自体には損傷が無いという判断ですかね。

Q. わかりました。この写真からこの橋にはどのような性能低下が疑われますか？

A. 下部工自体の次、地震が来た時ですね。地震時水平耐力自体は低下した状況と思われるので、補強は必要かなと、改修ですね。

Q. 耐荷性能ですね。

A. 耐荷性能です。あとはこれだけ揺れているので、上部構造の方、支承周りにどれだけ影響が出ているかを見る必要がありますね。

Q. そういう疑いを持たれたわけですが、その理由はなんでしょうか。

A. これだけの構造物ですので、外力によって生じる損傷としかないかなと思います。外力ですと、これだと地震。

Q. 地震による被害なので今言ったような耐荷性能の低下まで行くだろうと。

A. はい。

Q. そのような懸念に対してどういう措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 基部なので上の走行性自体が横方向とかずれていないかということを確認して、支承部ですね。特に問題がなければ上は解放してよいのかなと思います。折を見てせん断ひび割れの範囲ですね、これがどこまでいっているか、ちょっと地面を見てその損傷の影響範囲を確認して、補修範囲を決める必要があるのかなと、

Q. わかりました。今までのお答えの根拠というのは

A. 根拠は文献と学習ですかね。

Q. 文献による学習ということですね。わかりました。回答結果の正しさについて自信を 10 点満点で

A. 8 で

［八人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. ピアーの基部に軸方向鉄筋のはらみ出しと周囲のコンクリートの剥離が生じている。せん断ひび割れが

入っているため、地震による損傷が生じている可能性がある。橋脚周辺の地盤に陥没や液状化が生じていないため、支持杭には損傷が無い可能性がある。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 地震時水平耐力が低下しているので、水平方向の作用に対する耐荷力が低下している可能性がある。ゆえに、補強や改修が必要であると考える。また、大きな変位が生じた痕跡があるため、上部構造や支承部の状態を確認する必要があると考える。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 基部が損傷しているため、上部構造や支承部で横ずれが生じている可能性がある。ゆえに、走行性が不足している可能性がある。それらの変状が無いのであれば、交通開放を行うことができると考える。また、せん断ひび割れが生じているため、そのひび割れの影響範囲を確認した上で補修を行う必要があると考える。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 である。

［九人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これは基部の圧壊ですね。

Q. 何の基部ですかね。

A. 橋脚のですね。柱部の基部、

Q. 橋脚基部での圧壊ということで、そのメカニズムということで損傷形態を述べていますが観察できることとしては何があるでしょうか。

A. コンクリートの剥離と、鉄筋が降伏しています。それとどこのところに出ているかですね。ひび割れ形態とか、そういうことから判断しています。

Q. この橋にはどういう性能低下が疑われますでしょうか？

A. これは地震に対しては、耐力が無くなっている。

Q. 地震に対する耐力と言うのは、水平力に対する耐力という意味でしょうか。

A. 水平力と鉛直

Q. つまり耐荷性能ですね。

A. はい。

Q. わかりました。その地震に対する耐力が無くなっている、鉛直に対する耐力が無くなっているとご判断された理由は何でしょうか。

A. 座屈を起こして、圧壊している。軸鉄筋が座屈。コンクリートは圧壊している。曲げせん断ひび割れが出ています。

Q. わかりました。あの今のお見立ての根拠は何でしょうか。

A. これは経験と言うよりは、学習ですね。

Q. いわゆる地震の被害例を沢山見られたという意味ですね。

A. わかりました。

Q. この回答結果の正しさに対する自信、10 点満点で

A. これはあまりある方じゃないですね。損傷が出ているので、、5-6 ですかね

Q. 6 点、わかりました。ありがとうございます。

［九人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚の基部に圧壊が生じている。コンクリートの剥離と鉄筋の降伏が生じている。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 地震に対しての、水平方向と鉛直方向の耐荷力が無くなっている**と考える**。

Q. そのように判断された理由は何か？

A. 軸鉄筋が座屈し、コンクリートが圧壊し、曲げせん断ひび割れが生じている**ため**である。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 経験ではなく、地震の被害事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 6 点である。

［十人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. これについては、コンクリートが

Q. まず部位としては

A. これは橋脚だと思いますが、橋脚基部に近いところで、むしろ曲げ変形、コンクリートが剥離を伴っている状況です。おそらく一部は圧壊かもしれませんが、もしかしたらせん断破壊を起こしているかなと、このひび割れの入り方によってはせん断破壊を起こしているかもしれない。非常に状態としては危ない状態かと思われます。一部鉄筋がはらみ出しをしているところと、先ほど申しましたが、コンクリートの一部が剥落、剥離と言うよりは圧壊して、部分的にはがれてしまっている状況かなと思います。こんなところですかね。上はちょっとわかりませんが、P7 と書いてあるので橋脚ですね。ちょっと、そういう破壊を起こしていると

Q. 今の損傷状態を見つけてどう思いましたか

A. はい。耐荷性能が落ちていると思われますので、これは早急に対応が必要な、措置が必要な事案だと思います。まぁ、断面補修とかそういったところ、周りに何か補強材を充てるとか、鋼板で巻くとか、そういった対応が必要だと思います。

Q. 耐荷性能が落ちているということで、その疑った理由はなんでしょうか。

A. 軸方向鉄筋が明らかにはらみ出していて、明らかに座屈が起きているので、こちらは耐荷性能が落ちていると判断できると思います。あとはコンクリートも剥離し、落ちているので断面も欠損しているので、

所定の性能からは低下している状況は判断できると思われます。

Q. わかりました。そういうようなご判断で、措置としてはどういう措置が望ましいでしょうか。先ほど、長期的な意味で、時間的なものは別として断面修復して鉄板を張るとか、それはお話されたわけですけれども、緊急時の措置、と長期的な措置

A. そうですね。こういう状態でどの程度の耐荷性能があるかどうか、照査みたいなものは必要かなと思われます。もし足りない場合はこの前後に仮受の支点を設けるとかですね。橋脚がちょっと持たないという状況であれば、前後に仮受のベントと立ててやる必要がある。これがどの程度耐力が落ちているかはわからない。

Q. 調べてからということですね。

A. そうですね。

Q. わかりました。では緊急という意味では、調べる前にやるべき措置はどうでしょうか。

A. どういう対応になるんですかね。何かこう、埋めてやるような何か、断面修復するとか、モルタルで埋めるとかそういう対応になるんでしょうか。ちょっとそれぐらいしか、断面修復みたいなものを緊急的に行うのか、思い浮かばないです。

Q. 今のお考えになるのはどういうものが根拠になるんでしょうか。

A. あんまりコンクリートの経験が無いのですけども、おそらくそういう風な補強事例とかというのを過去に見たことがあるので、経験とか学習とか

Q. 過去事例の学習と言うことで、回答結果の正しさについて自信を 10 点満点で

A. 5 点ぐらいにしといてください。

［十人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚基部で曲げ変形によるコンクリートの剥離と圧壊が生じている。ひび割れの入り方によってはせん断破壊を起こしている**可能性がある**。鉄筋のはらみ出しが生じている。

Q. このような変状を見つけ、あなたはどう思うか？

A. 耐荷力が低下している**と考える**。早急に対応が必要な事案だ**と考える**。断面補修や補強が必要だ**と考える**。

Q. 耐荷力の低下を疑った理由は何か？

A. 軸方向鉄筋がはらみ出しており、座屈が生じている**ため**、耐荷力が低下している**と考える**。コンクリートの剥離により断面も欠損している**ため**、所定の性能からは低下している**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 耐荷力の照査が必要である**と考える**。耐荷力が不足する**のであれば**、橋脚の前後に仮受の支点を設ける必要がある**と考える**。

Q. 緊急という意味では、調査の前にやるべき措置はあるか？

A. 断面修復を緊急的に行うことのみを思いついた。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. コンクリートの経験が無い**ため**、過去事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 5 点である。

［十一人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚の基部に見られる剥離、著しい剥離ですね、軸筋もはらんでいる状況で、これは地震の影響で橋脚基部に座屈が生じたものと推測できます。その根拠として鉄筋がはらんでいて、かぶりコンクリートが剥離していることから、地震の座屈と判断します。軸筋がはらんでいる、変形しているということですから、断面欠損もありますが、橋脚としての耐荷力や機能は著しく低下しているので、とりあえず通行止め、まず通行止めという状況かと思います。規模ですと、地震直後の異常時点検ですぐに発見できるものと思うので、専門家を呼んでどう対策するかという話になると思いますが、これをどう対策するかはちょっと

Q. ということで、そうですね、今のお答えの根拠は何でしょうか。

A. 学習かと思います。

Q. 学習ですよね、経験がある人は少ないので。事例の学習と

A. はい。

Q. わかりました。回答結果の正しさについて、自信を点数で

A. これはどうでしょう 8 点くらい

［十一人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. 橋脚基部に剥離、軸筋のはらみが生じている**ため**、地震の影響で橋脚基部に座屈が生じた**可能性がある**。軸筋のはらみや変形、コンクリートの断面欠損が生じている**ため**、通行止めを行い、専門家を呼ぶ必要がある**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 事例の学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 8 点である。

［十二人目　けばとり文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. こちらはですね、結構そのまぁ、恐らく橋脚の、P7 と書いてあるので橋脚ですね。橋脚の下部が破壊されて、鉄筋が露出するような大規模な剥離。で、鉄筋もちょっと曲がっているような状況も見えます。原因としては、外からの大きな力か、地震か、地震動によるものが大きいのかなと思います。

Q. わかりました。コンクリートの剥落と鉄筋が曲がっているということで、それ以外に何か述べることはありますか？

A. なんかずれ動いて、ひび割れの感じからもせん断破壊っちゅうか、そのような系の壊れ方をしていると

思います。

Q. わかりました。この橋にはどのような性能低下が疑われますか。

A. 上部工からの荷重を下の方に、地盤等に伝える橋脚としての荷重伝達というんですかね、そういった機能が断面が一部失われているので、低下していると判断いたします。

Q. 荷重伝達機能の低下ということですね。結果としては耐荷性能には、耐荷性能の低下には、疑われますか？

A. そうですね。深さ方向のある、大規模な剥離と中の鉄筋も曲がっているような状態なので、耐荷性能の影響が生じているんではないかなと推測します。

Q. わかりました。こういうものに対しては、どのような措置を取ることが望ましいでしょうか。

A. 脆弱部範囲をはつり除去しまして、鉄筋を組み直して、断面修復。場合によっては柱のまわりをもうちょっと巻き立て補強するような対策が必要になるのかなと。

Q. わかりました。

A. ちょっと自信がありません。

Q. わかりました。根拠、今までの見立ての根拠は何でしょうか

A. これも事例学習によるものが多いですね。

Q. わかりました。結果の正しさについて、自信が

A. 3 点ぐらいですね。

［十二人目　整文］

Q. あなたは今、点検を行うために橋の現場に着きました。この写真で気づいたことを全て述べてください。

A. P7 と書いてあるため橋脚である。橋脚の下部が破壊し、鉄筋が露出するような大規模な剥離が生じており、鉄筋も曲がっている**ため**、地震動による損傷が生じている**可能性がある**。せん断ひび割れも生じている。

Q. この写真から、この橋にはどのような性能（耐荷力・耐久性・その他の性能）の低下が疑われるか？

A. 橋脚の断面が一部失われており、深さ方向のある大規模な剥離と中の鉄筋も曲がっている**ため**、上部工からの荷重を下の地盤等に伝える橋脚としての耐荷力、荷重伝達機能が低下している**と考える**。

Q. もし疑いを持った時、（緊急時には）どのような措置を取ることが望ましいか？

A. 脆弱部範囲をはつり除去し、鉄筋を組み直し、断面修復を行い、場合によっては橋脚を巻き立て補強する対策が必要である**と考える**。

Q. 答えた見立てについて、それの根拠となる考え方は何か。（知識、経験、常識、学習等）

A. 事例学習である。

Q. 最後に、今の回答結果の正しさの自信について、10 点満点で教えてください。

A. 3 点である。

共同研究報告書
Cooperative Research Report of　PWRI
No.611 August 2025

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