

橋梁に対する 非破壊検査技術等の開発

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(CAESAR)
上席研究員 石田雅博

1

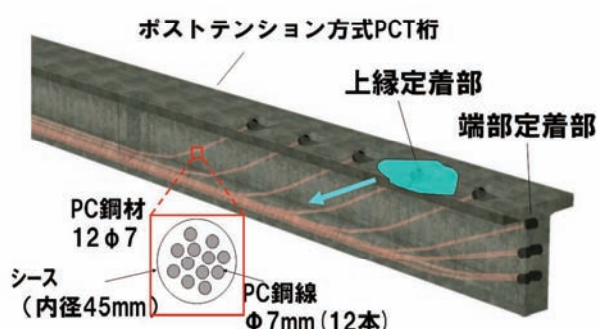
現状の課題

グラウト充填不足

橋梁	佐野橋	能生大橋	はくい 羽咋川海浜橋	T橋
充填 状況 一例	 未充填 (ウェブ)	 充填不足 (ウェブ)	 未充填 (ウェブ)	 未充填
充填不足 調査箇所	$\frac{16}{342}$ (4.7%)	$\frac{2}{64}$ (3.1%)	$\frac{8}{145}$ (5.5%)	$\frac{0}{16}$ (0%)
未充填 調査箇所	$\frac{4}{342}$ (1.2%)	$\frac{0}{64}$ (0%)	$\frac{1}{145}$ (0.7%)	$\frac{1}{16}$ (6.3%)

PCT桁橋のPC鋼材配置の概念図

(概ね1980年代以前)



塩分を含んだ水の侵入
によるPC鋼材の腐食・破断

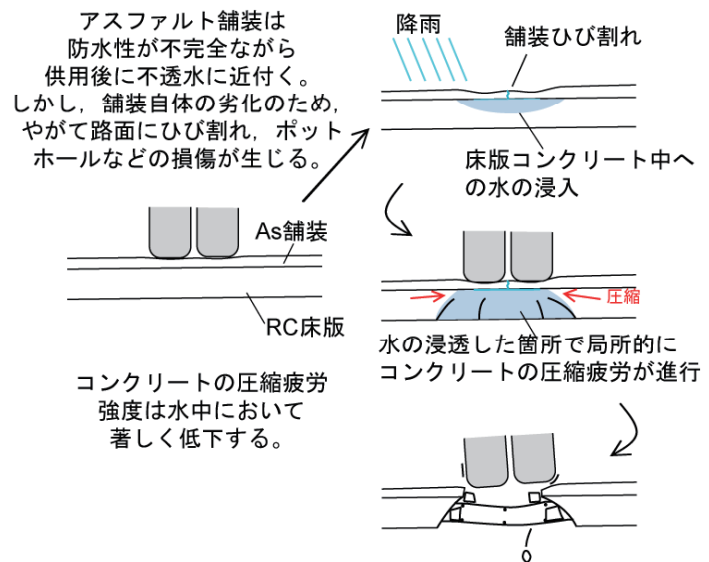


PC鋼棒の突出

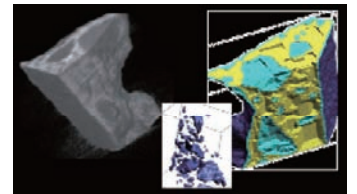
2

現状の課題

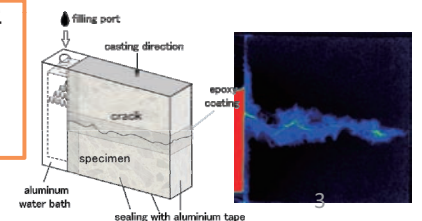
R C床版の疲労



- 中性子による
- ・床版内部の可視化
 - ・水の動きの可視化



- 土砂化の進行状況の確認
- 耐力評価



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

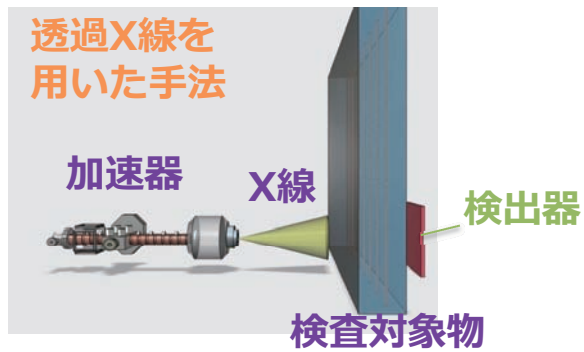
異分野融合による イノベティブメンテナンス技術の開発

研究責任者：土木研究所

研究実施機関：土木研究所，東京大学，理化学研究所

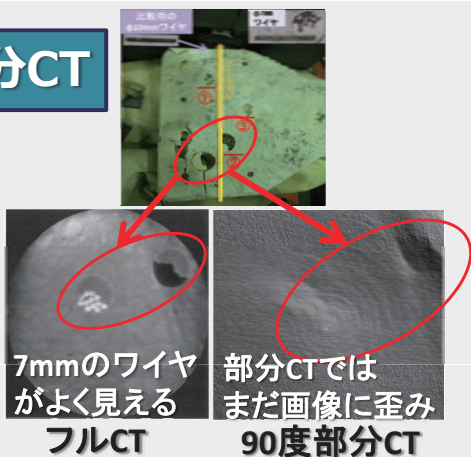
協力機関：NEXCO東日本

高出力X線

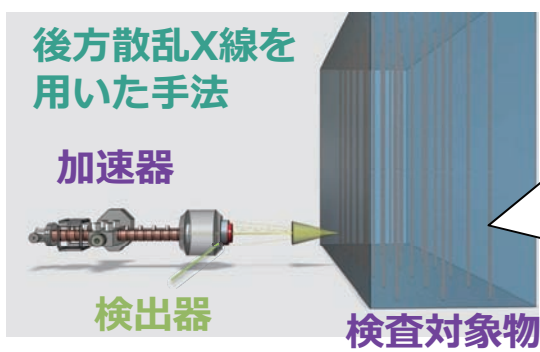


透過X線
(対象物を透過したX線)

部分CT

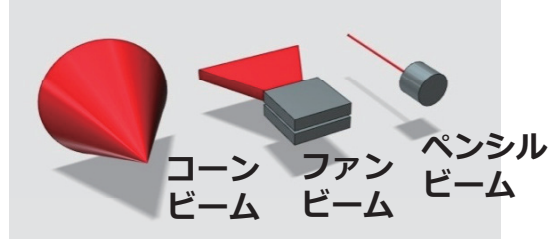


後方散乱



後方散乱X線
(対象物にあたって返ってきたX線)

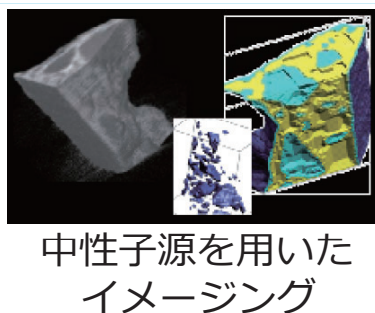
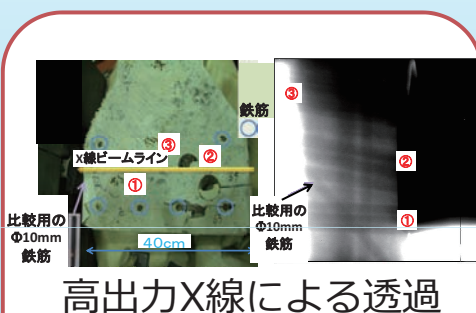
目的に合わせたコリメータ開発



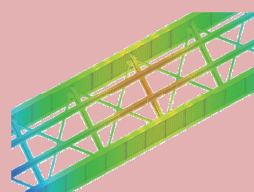
- ・ マグネトロンと電子銃を改良し加速器の出力安定化・高出力化
- ・ 部分角度CT再構成技術の構築

5

非破壊試験技術による コンクリート内部の可視化



載荷試験



数値解析モデル

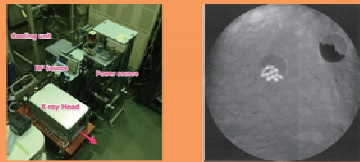


解体調査

6

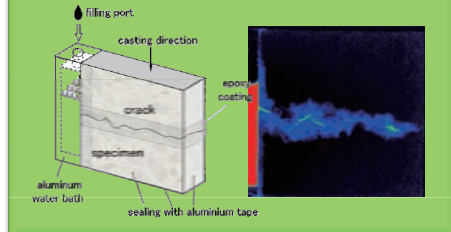
PC橋梁のグラウト不良や鋼材腐食に伴う耐荷力低下の危険性を判断できるシステムを開発する

可搬型高出力X線
(950keV, 3.95MeV)



東京大学

小型中性子源

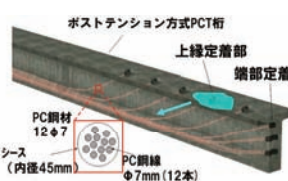


(国研) 理化学研究所

鋼材・空隙
の可視化



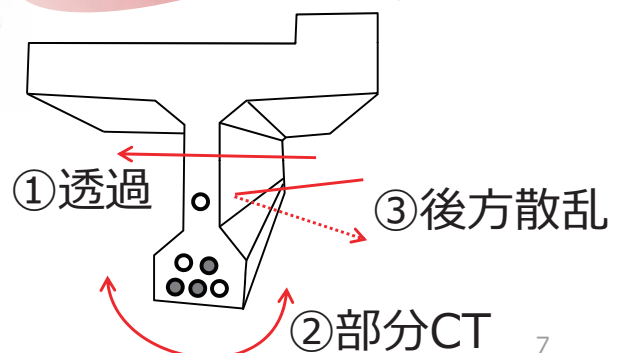
(国研) 土木研究所



水の可視化

残存耐力の評価

解析・
実証



研究開発テーマ全体としての中間目標・最終目標

<中間目標>

(X線装置)

RC桁橋において撮影を数回実施し、現場撮影のためのキャリブレーションを終了させるとともに、可搬型部分CTX線装置を完成させる

(中性子線)

シース内滞留水の存在・土砂化個所など検出可能な項目を実測により検証

(耐荷力評価)

ケーブル破断等の損傷を生じたPC桁の耐力評価

<最終目標>

(X線)

PC桁内グラウト未充填個所および鋼材の腐食量・破断が1mm程度の精度で短時間に検出できる可搬型高出力X線装置の開発

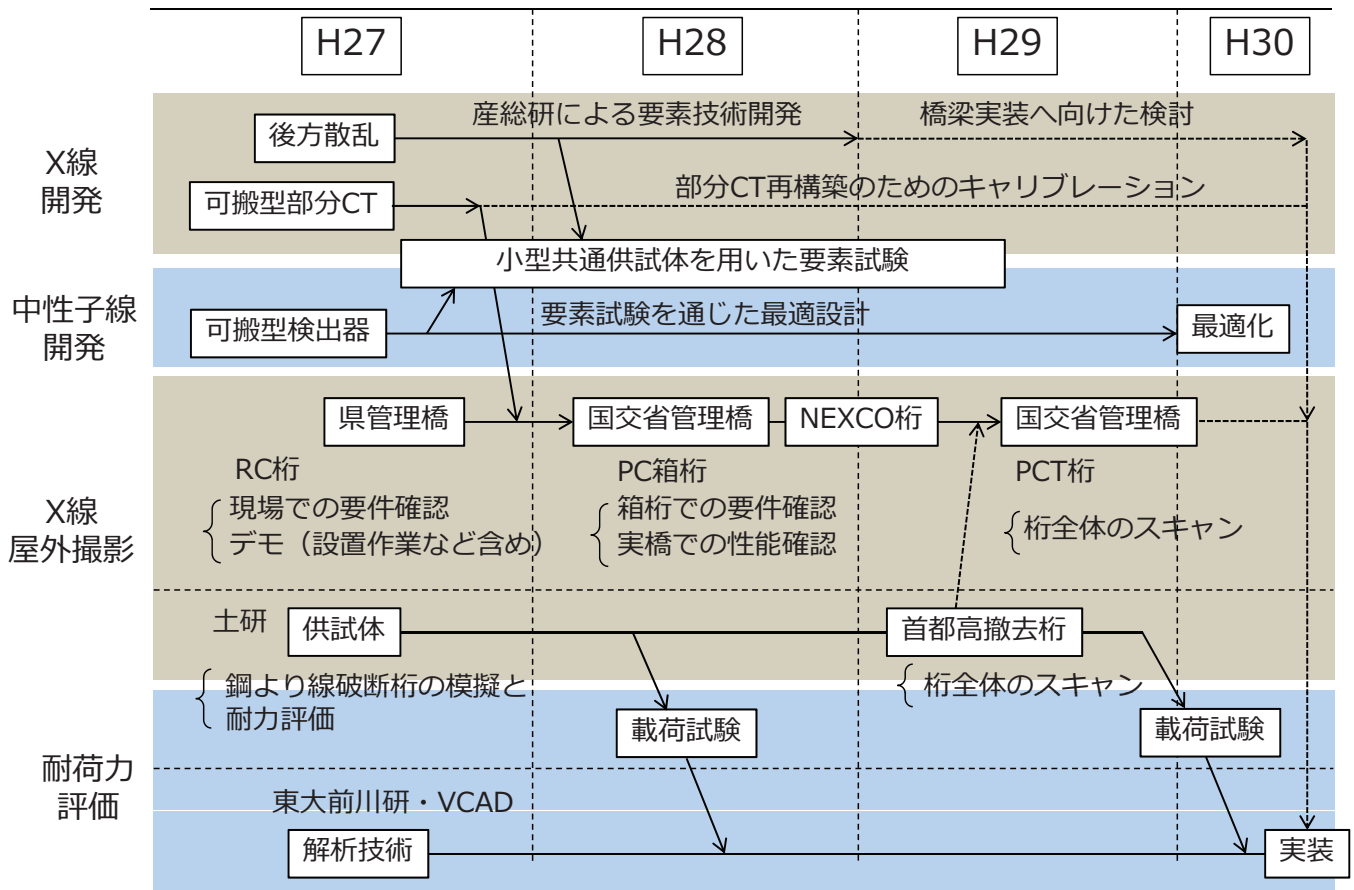
(中性子)

シース内滞留水の存在や土砂化個所、ひび割れに伴う水みちの確認などが短時間に行える可搬型中性子線装置の開発

(耐荷力評価)

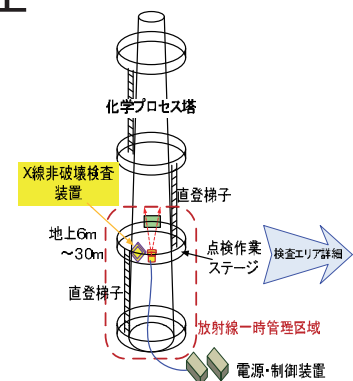
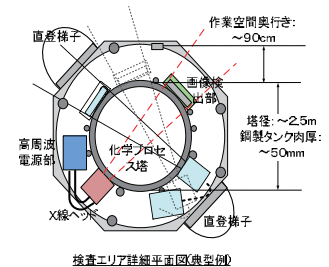
可視化情報からPC桁の残存耐力を評価できるシステムの構築

全体開発スケジュール



950keVシステムの法順守

- 放射線障害防止法に該当しない
- 電離放射線障害防止規則に準じて、局所遮蔽設定、1.3mSv/3 monthsの管理区域の設定と管理
- 新規製作の場合、製作地の労働基準局に申請
- 試験実施地では申請不要
- 廃棄時は手続きなし



3.95MeVシステムの法順守

- 新規製作の場合、放射線障害防止法に基づき、原子力規制庁に申請
- 電離放射線障害防止規則に準じて、局所遮蔽設定、1.3mSv/3 monthsの管理区域の設定と管理
- 放射線障害防止法の平成17年度変更によって、橋梁に限って**4MeV**以下までその場検査が可能となった
- **原子力規制庁に使用場所変更届出し、確認を得る。**
- 外部試験毎に原子力規制庁に、使用場所変更請出。実験室での運転モードと同じもののみ許可。
- 廃棄時は手続きあり
- **平成27年1月29日 土木研究所にてPC橋切り出し 試料に対して日本で初めて実施。**

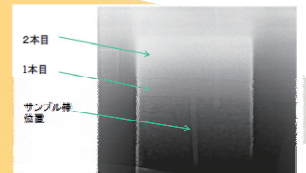
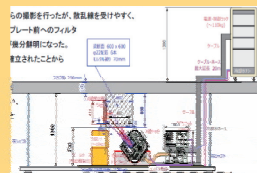
東京大学950keV X線源のその場透視検査実績 (平成25-27年度, 9回)



Test



Generator and Linac and bridge



化学工場栈橋鉄筋コンクリート



Linac on the frame



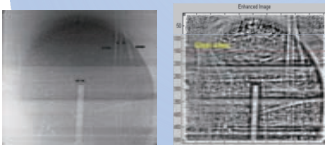
FPD on the frame



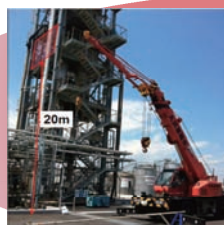
950keV機



内部液面の動画像取得

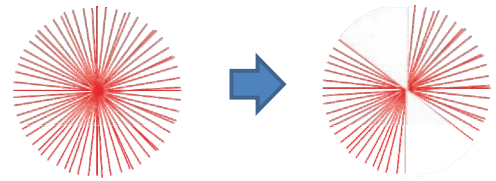
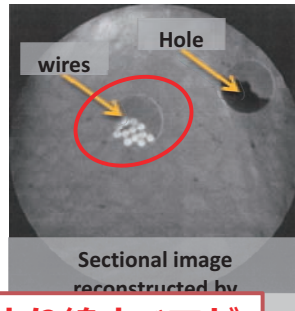
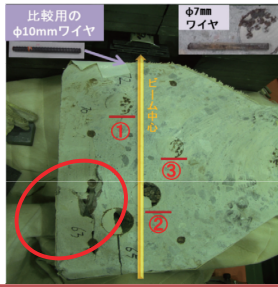


土木研究所内撤去桁



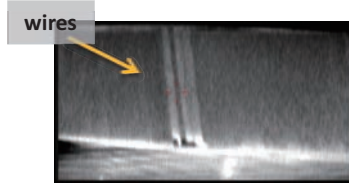
化学工場反応塔内部構造

東京大学3.95MeV X線源と 実験室内P C橋切り出し試料の3次元C T結果

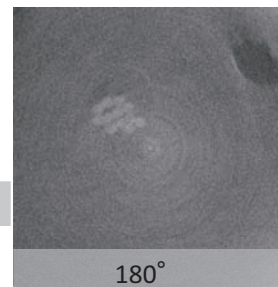


シース中の外径7mm鋼より線すべてが
1mm程度の精度で可視化

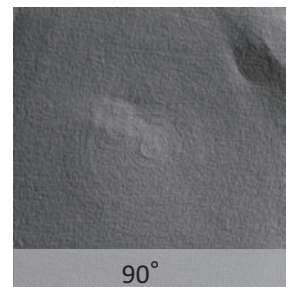
スキャン角度が限定されると画像
が歪む（現在補正手法開発中）



Lateral view



180°



90°

ROI reconstruction with
limited angle range

13

Source	3.95MeV
Detector	Perkin Elmer FPD
Pixel number	2048 × 2048
Pitch	200um

2015/1/29日本初の3.95MeV電子ライナックX線源 その場試験に成功



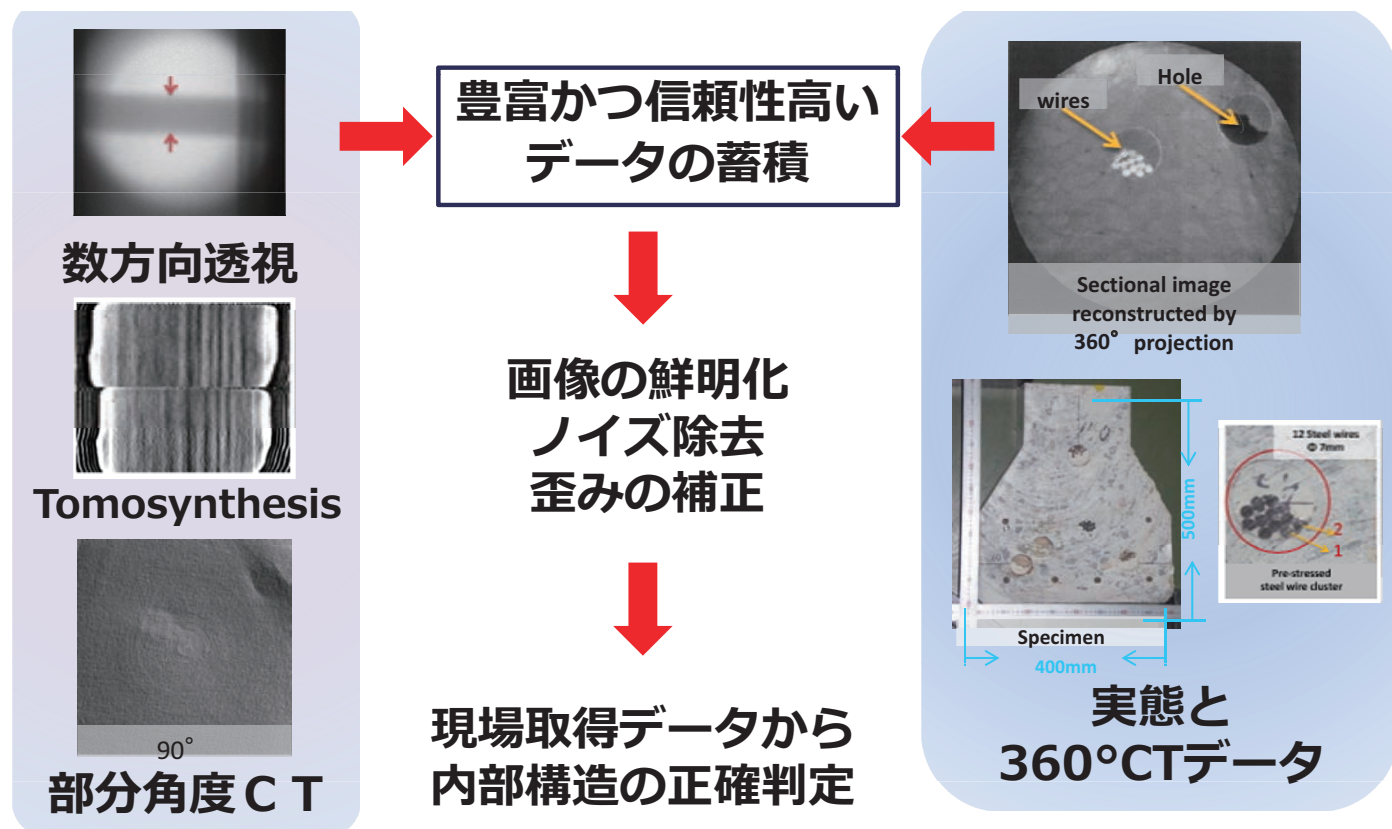
フラットパネルX線カメラ(1s)



イメージングプレート(30s)

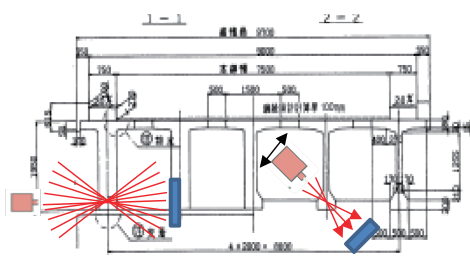


現場取得画像と実験室データ校正データベースによる断面内部構造の判定



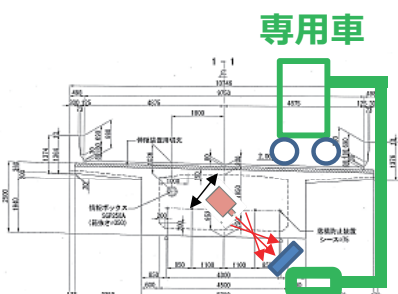
T桁橋・箱型桁橋・床板桁のその場X線検査の方策案

H27 T桁橋 (県管理)



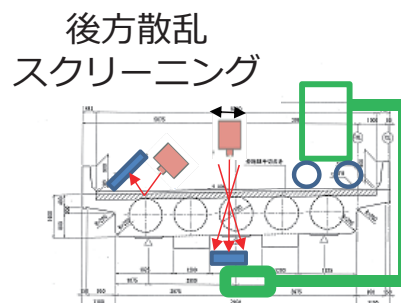
部分角度CT/ 数方向透視/
Tomosynthesis Tomosynthesis

H27 箱型桁橋 (県管理)



数方向透視/
Tomosynthesis

H28 中空床板桁橋 (NEXCO東日本)



数方向透視/
Tomosynthesis



足場



950 keV / 3.95 MeV X線源

X線カメラ/イメージングプレート

耐荷力評価法の検討

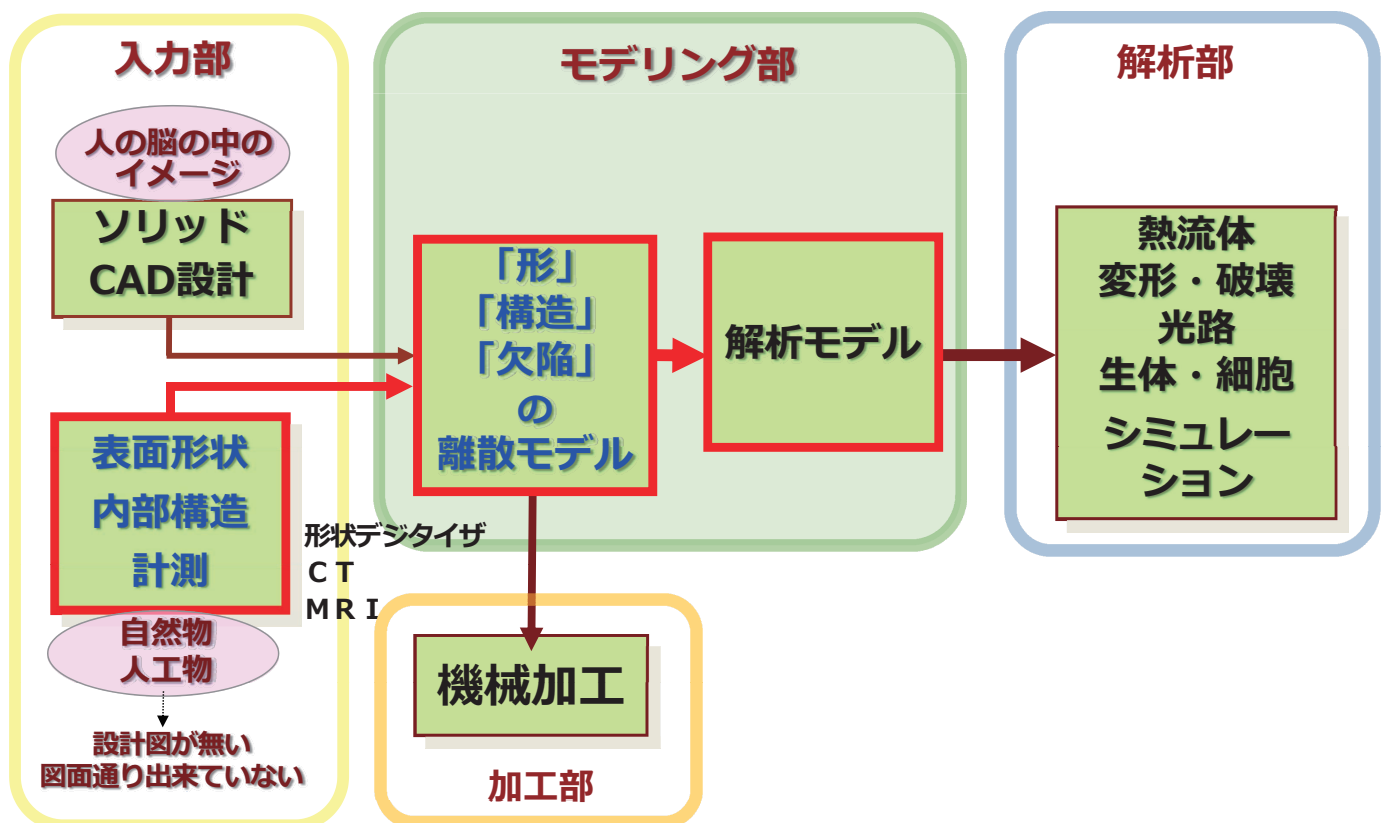
- PCケーブルが腐食・破断した桁の耐力評価
 - 事例収集（過去のデータ・資料整理）
 - 解析手法の整理
 - 解析におけるプレストレス損失区間の設定
 - 箱桁を想定

➡ 載荷試験による検証



17

VCADシステムの構成



18

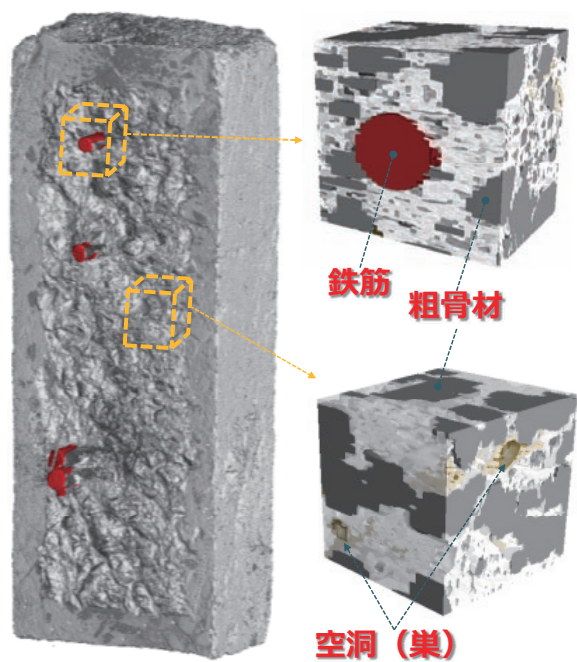
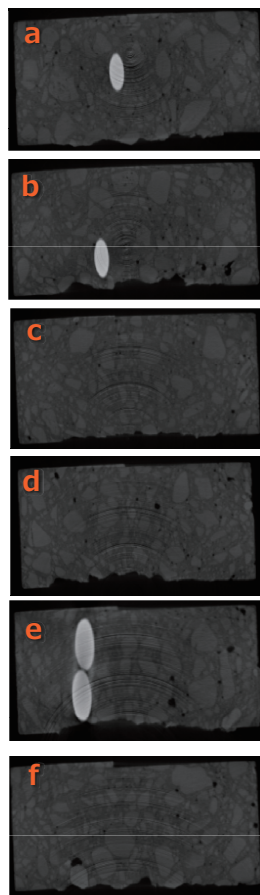
X線CT測定概要

(木造住宅基礎部材)



CT測定パラメータ

測定ピッチ：1mmピッチ × 測定枚数：
520枚
測定時間： 38時間

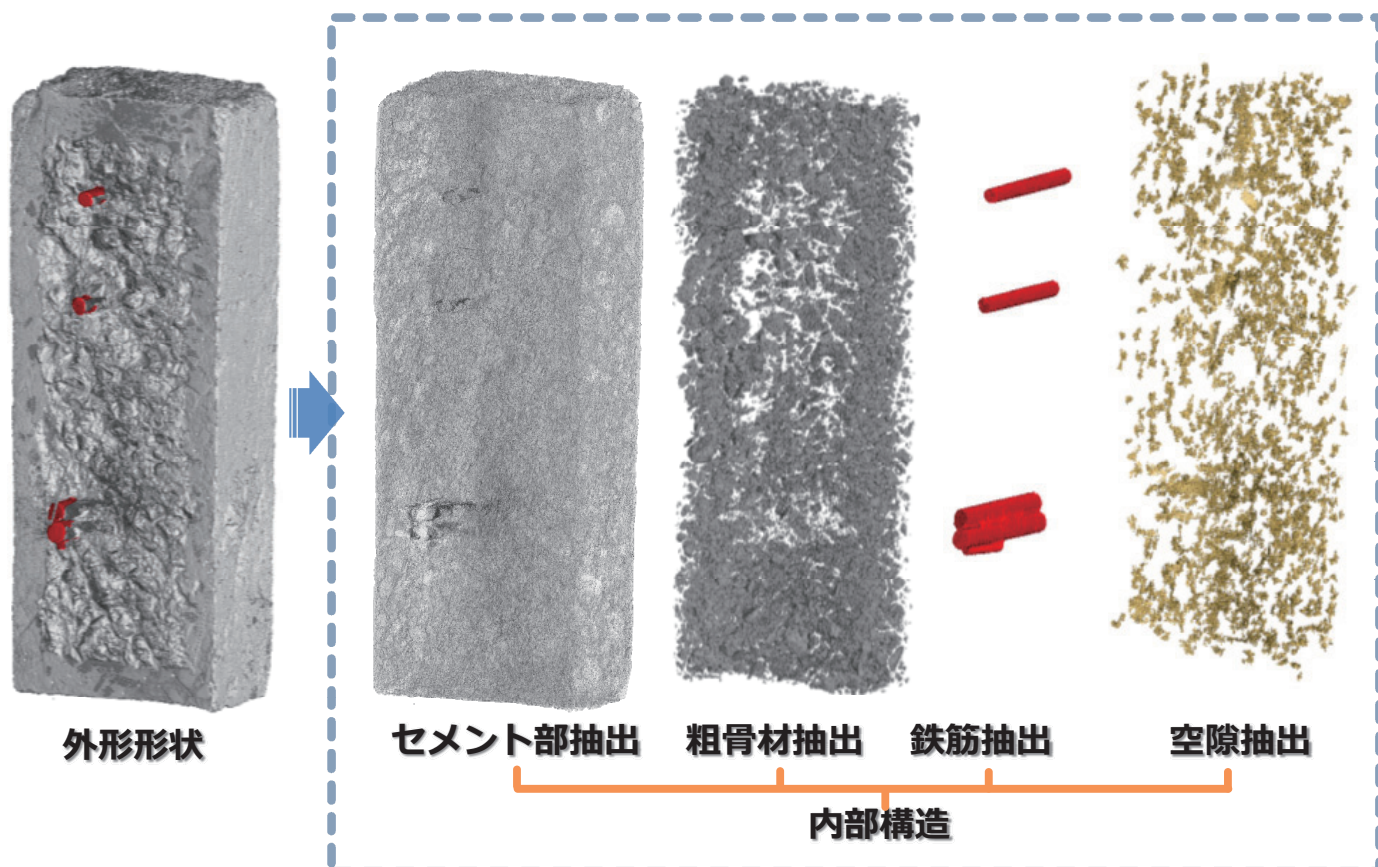


X線CT画像データ

19

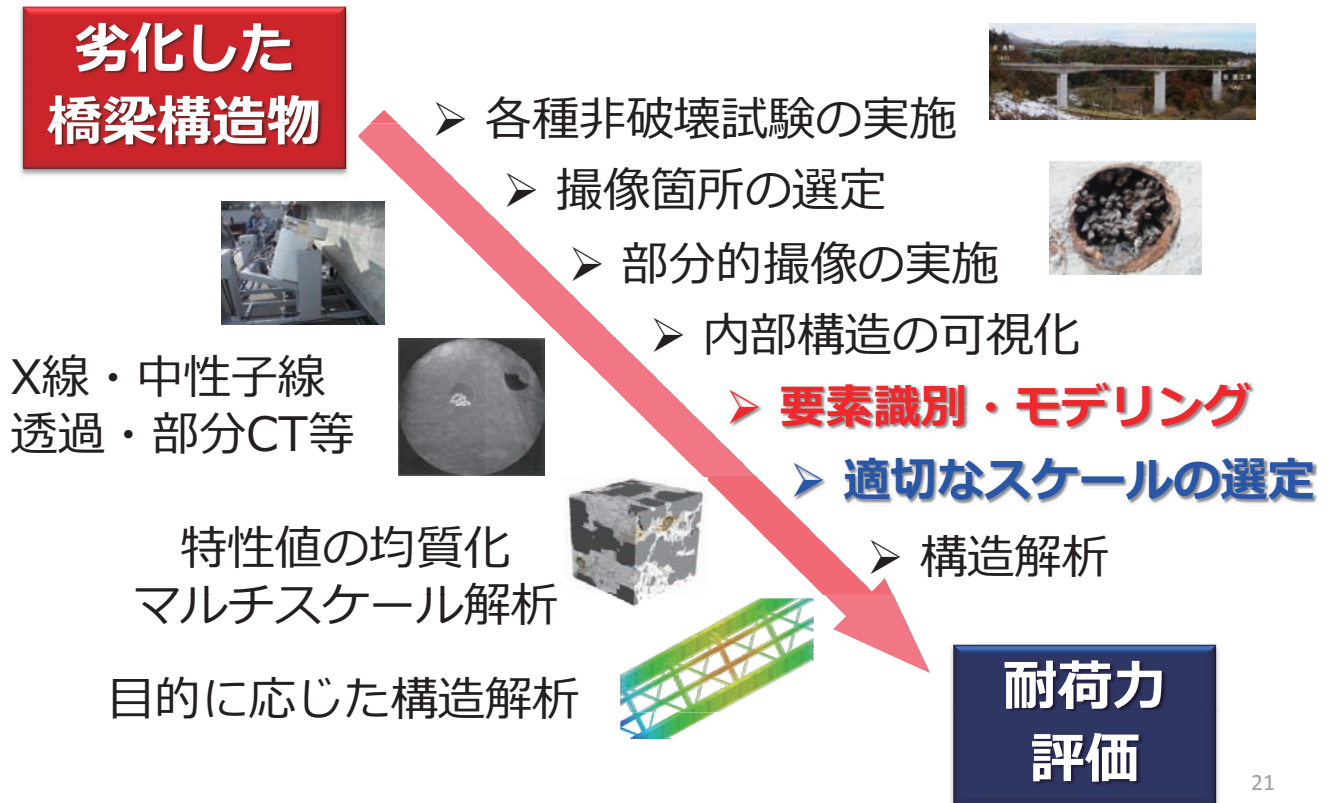
X線CT測定結果

(木造住宅基礎部材)



20

橋梁におけるVCADを用いた 耐荷力評価のイメージ

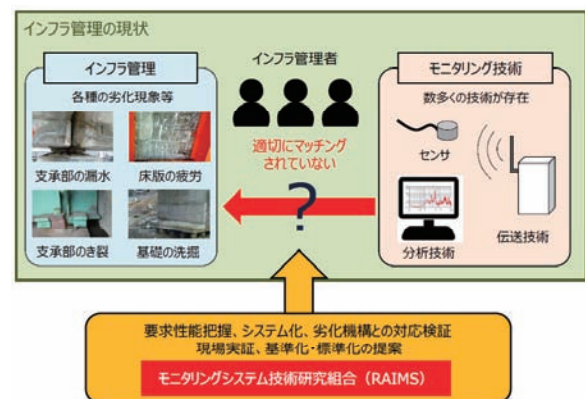


21

モニタリングシステム技術研究組合(RAIMS)

組合員

(独)土木研究所、西日本高速道路株式会社、東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、鹿島建設(株)、前田建設工業(株)、国際航業(株)、日本工営(株)、沖電気工業(株)、日本電気(株)、(株)日立製作所、富士通(株)、(株)共和電業、能美防災(株)



組合設立の目的

損傷・劣化の状態監視を社会インフラの維持管理業務へ活用するため、センサや通信・データ解析技術等を活用したモニタリングシステムの社会インフラ分野への実用化導入を図ることを目的とする。

実用化の方向性

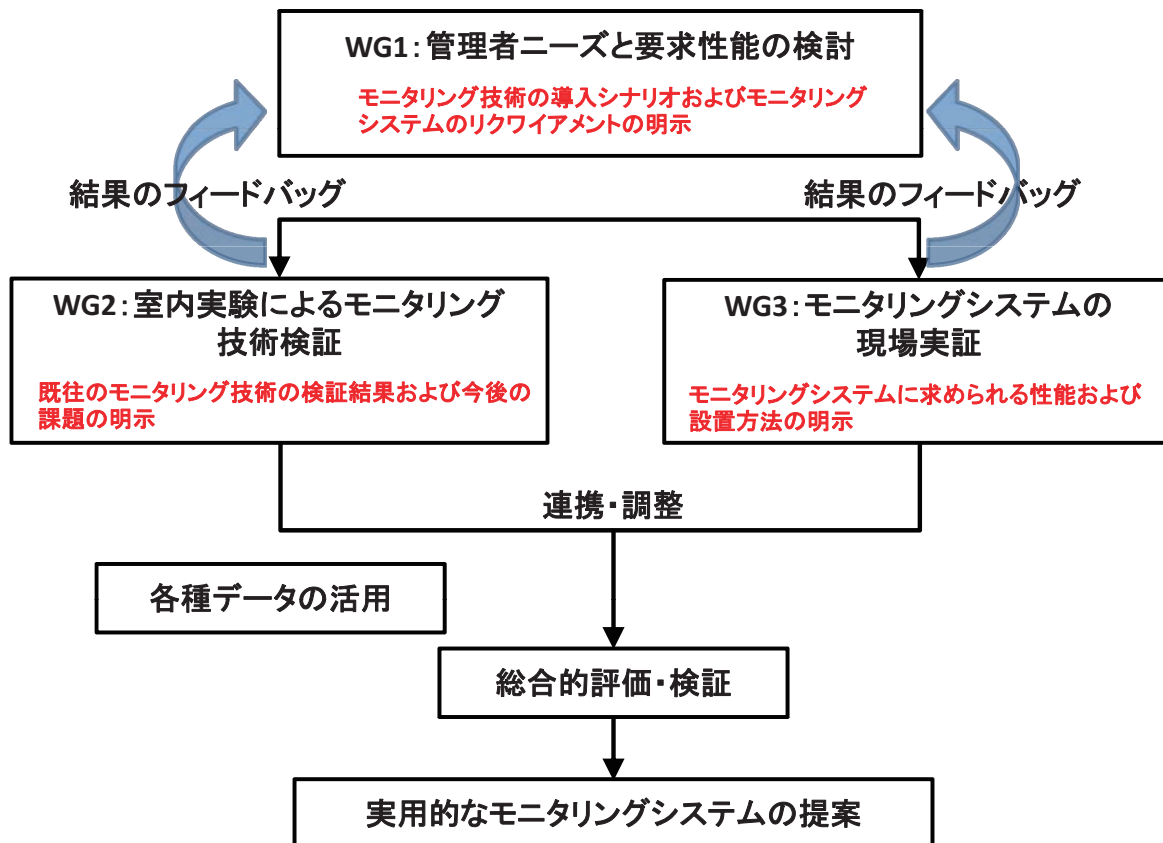
モニタリング技術の要求性能を明確化するとともに、モニタリングシステムの基準化・標準化(案)を作成し、現場実証等を通じて橋梁等の維持管理業務での適用を推進する。

役員(設立時)

理事長: 依田照彦(早稲田大学)
 理事: 石川雄章(東京大学)
 理事: 魚本健人((独)土木研究所)
 理事: 受川 裕(日本電気(株))
 理事: 角田直行(西日本高速道路(株))
 理事: 川添卓司(東日本高速道路(株))
 理事: 西郷英敏(沖電気工業(株))
 理事: 高田悦久(鹿島建設(株))
 理事: 廣瀬 輝(中日本高速道路(株))
 理事: 山川朝生(日本工営(株))
 監事: 橋爪毅(能美防災(株))

22

平成26年10月14日認可

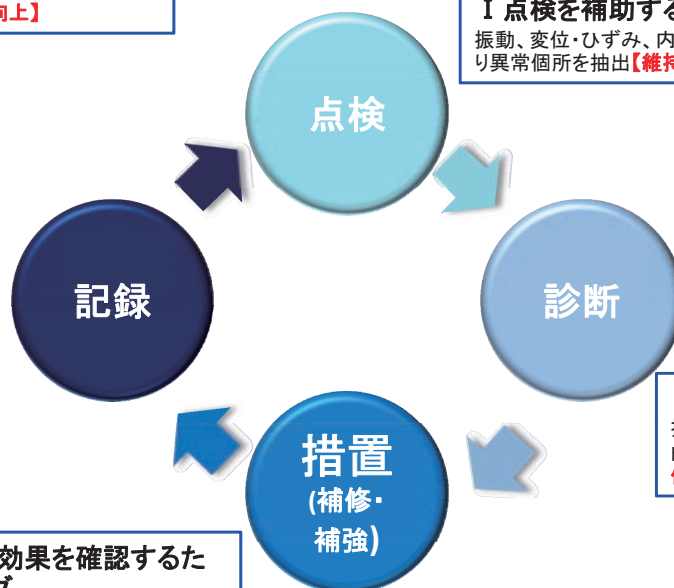


1. 管理者ニーズと要求性能の検討

維持管理サイクルにおけるモニタリングの役割

IV 緊急時の対応を補助するモニタリング
地震等の災害発生時における迅速な変状把握
【効率化・合理化・安全性の向上】

I 点検を補助するモニタリング
振動、変位・ひずみ、内部応力の変化等客観的な手法により異常箇所を抽出【維持管理コストの縮減】



II 診断を補助するモニタリング
振動、変位・ひずみ、内部応力の変化等客観的な手法により健全性を評価【点検・診断の信頼性向上】

III 補修・補強の効果を確認するためのモニタリング
振動、変位・ひずみ、内部応力の変化等客観的な手法により対策の効果や地震時の応答などを評価【安全性の評価】

1. 管理者ニーズと要求性能の検討

維持管理ニーズの整理

維持管理 の目的		点検時		診断時 【③】	補修・補強後 【④】	緊急時 【⑤】
		日常点検 【①】	定期点検 【②】			
高度化	の難近 確認接 【a】要目 部視が 位困	【a-①】 重要箇所は巡回時に異常を見逃さないようにしたい。	【a-②】 目視による把握が困難な事象を定量的に把握したい。	【a-③】 目視による把握が困難な事象の進行を把握したい。		【a-⑤】 目視による把握が困難な事象を定量的に把握したい。
	情報え近 のれ接 確認可目 【b】用視 では 捉	【b-①】 変状に対する環境要因の作用状況を把握したい。	【b-②】 経年的な劣化等の状況を把握したい。	【b-③】 損傷の進行等の状況を把握したい。		【b-④】 補修・補強の効果及び手法の妥当性を把握したい。
効率化	現状作業の効率化・合理化 (現行の水準を維持しつつ) 【c】	【c-①】 十分に巡回できない場合でも最小限の確認をしたい。	【c-②-1】 高所作業車、船舶等を利用することなく安価に状況を把握したい。	【c-③-1】 損傷の進行等を効率的に確認したい。		【c-⑤-1】 高所作業車、船舶等を利用することなく安価に状況を把握したい。
			【c-②-2】 広い・長い・多い施設の点検作業時間を短縮したい。	【c-③-2】 規制等の措置を講ずる必要性を明確化したい。		【c-⑤-2】 広い・長い・多い施設の点検作業時間を短縮したい。
						【c-⑤-3】 異常の可能性が高い個所を効率的に抽出したい。

25

1. 管理者ニーズと要求性能の検討

モニタリングニーズの抽出結果イメージ

	役割	モニタリングニーズ
劣化の進展を監視したい	適切な対処を支援	劣化現象の経過の把握 (ひび割れ、変位等) b-① or b-②
対策が必要か判断したい	予防保全(長寿命化)を支援	劣化要因の経過の把握 (塩分濃度、漏水等) c-②-1
通行止めすべきか判断したい	リスク回避	限界状態に至る可能性 有無の判断 (落橋危険性等) c-⑤-3

26

2. 室内実験によるモニタリング技術検証

2.1 Sub-WG1 計測機器の性能評価

各種センサー等の評価基準を作成するために、現状における計測機器の精度、感度、耐久性、長期安定性などについて既存資料を収集し、整理分析する。

2.2 Sub-WG2 床版に関するモニタリング技術の検証

輪荷重疲労試験により模型床版に生じるひび割れのモニタリングを行い、実現象と各種モニタリングデータの相関について把握するとともに、各技術の適用性の確認と課題抽出を行う。

2.3 Sub-WG3 塩害に関するモニタリング技術の検証

センサーを配置したコンクリート桁の模型試験(塩分浸透試験, 電食試験, 耐荷力試験)ならびにFEM解析等により, 劣化現象と各種モニタリングデータの相関を把握し, 各モニタリング技術の適用性の確認を行う。

2.4 Sub-WG4 構造物全体系の中でクリティカルとなる部分を検知する方法の検討

各種構造形式に応じてその弱点を整理し、構造物の性能を表す代表的な特性値をモニタリングすることで構造物の性能限界を検知する手法を開発し、その適用性を確認する。

27

2.1 Sub-WG1 計測機器の性能評価

◆ 目的

センサーなどの計測機器について、**現状における精度、感度、耐久性、長期安定性などを確認**し、将来的にはこれらに要求する性能を示すとともに、**評価基準を作成**する。



計測機器調査、資料収集

現状技術の把握のための調査・資料収集を行う



精度・感度・耐久性・長期安定性の評価

使用目的に応じ精度・感度・耐久性・長期安定性などの確認試験を行う



要求性能の提示・評価基準作成

使用目的に応じて必要となる精度・耐久性を確保するための評価基準を作成する

【精度確認のための試験例】



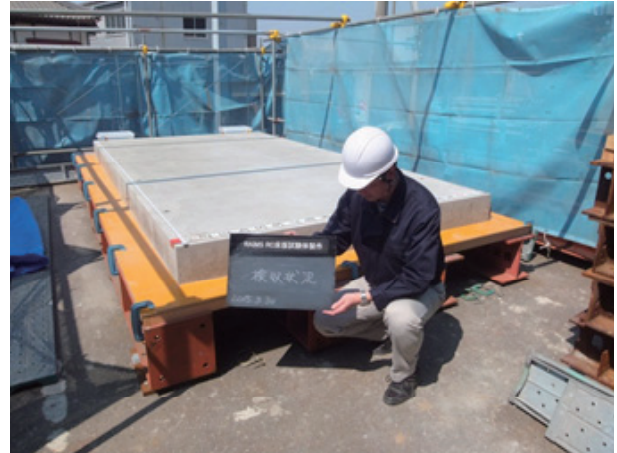
【耐久性確認のための試験例】



28

2.2 Sub-WG2 床版に関するモニタリング技術の検証

RC床版供試体の作製状況 2,200 × 4,000 × 190 (mm)



29

2.3 Sub-WG3 塩害に関するモニタリング技術の検証

RCはり供試体の作製状況 1,800 × 200 × 300 (mm)



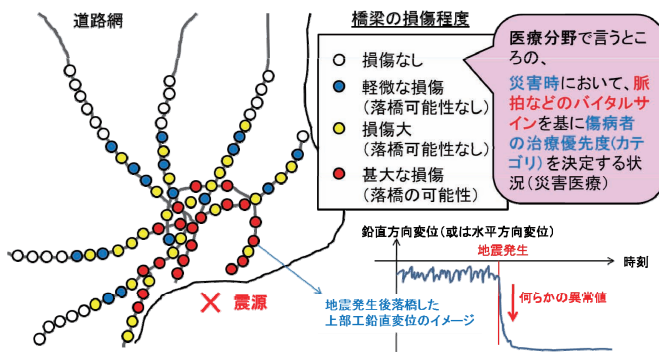
30

2.4 Sub-WG4 構造物全体系の中でクリティカルとなる部分を検知する方法の検討

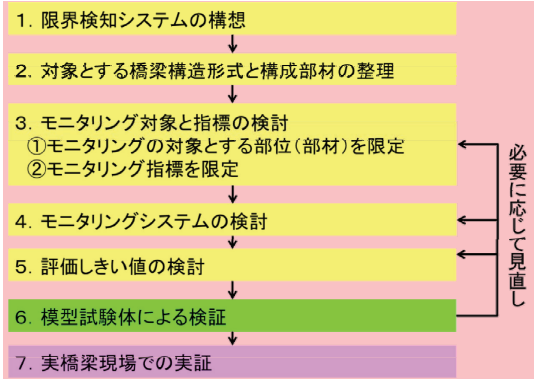
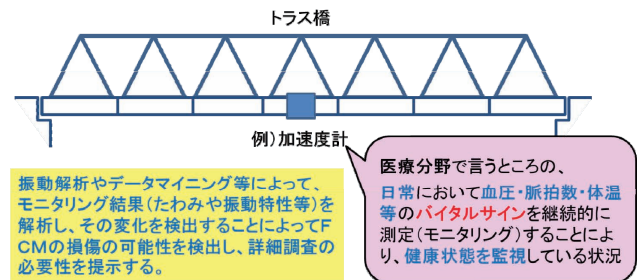
◆ 目的

各種構造形式に応じてその弱点を整理し、構造物の性能を表す代表的な特性値をモニタリングすることで構造物の性能限界を検知する手法を開発し、その適用性を確認する。

【限界検知A 異常時点検支援システム】



【限界検知B 劣化程度把握診断システム】



31

3.3 伝送技術の現場実証計画の作成

伝送技術の現場実証イメージ1(ローカル伝送試験)

◆ 目的

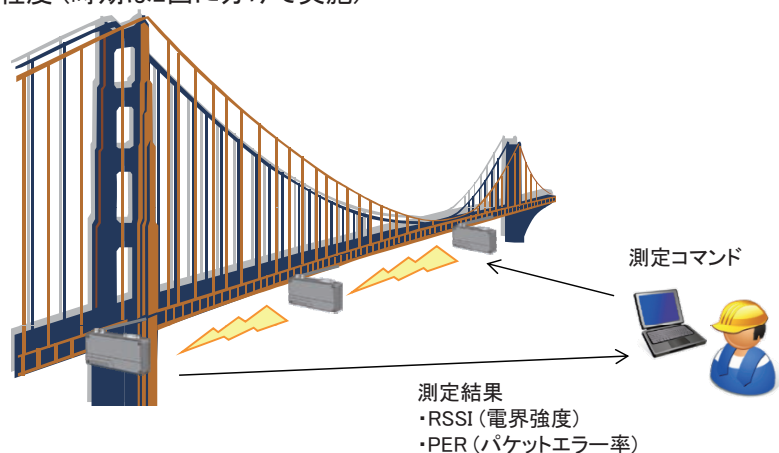
実際の橋梁での電波伝搬測定を行い、橋梁構造物による伝搬損失の影響を調査し、将来の無線機の置局設計に役立てる。

■ 実施内容

- 製品版の無線機を用いて、橋梁構造物での電波伝搬測定を実施
- 複数の無線機を橋梁の様々な場所に設置し、電界強度やパケット受信率などを測定

■ 測定項目案

- 床版の表裏の透過性、橋桁の影響、鉄橋/PC橋との差異、基地局への到達性 etc
- 橋梁種類:4種類程度(時期は2回に分けて実施)



32

3.3 伝送技術の現場実証計画の作成

伝送技術の現場実証イメージ2(路－車間伝送試験)

◆ 目的

様々なフィールド条件下で設置された送信機と走行車両内にある受信機でデータ通信を行い、路-車間通信(巡回型データ回収方式)における通信条件、課題を明らかにする

◆ 実験内容

一定量のパケットを送信し、受信されたデータ量(成功率)等で、通信精度(品質)を評価する。
評価軸は以下の通りとする。

① 信頼性

送信機付近通過時に、データ(1週間分相当のセンシングデータ量)受信ができること、
またその際のパケット落ち(データの取りこぼしの有無)を確認

② 電波強度特性(RSSI)

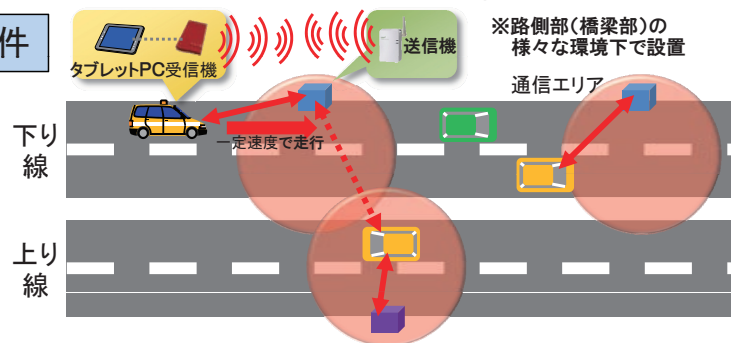
パケット受信時の無線の電波強度を測定し、通信可能エリアを推定

③ 設置(環境)条件

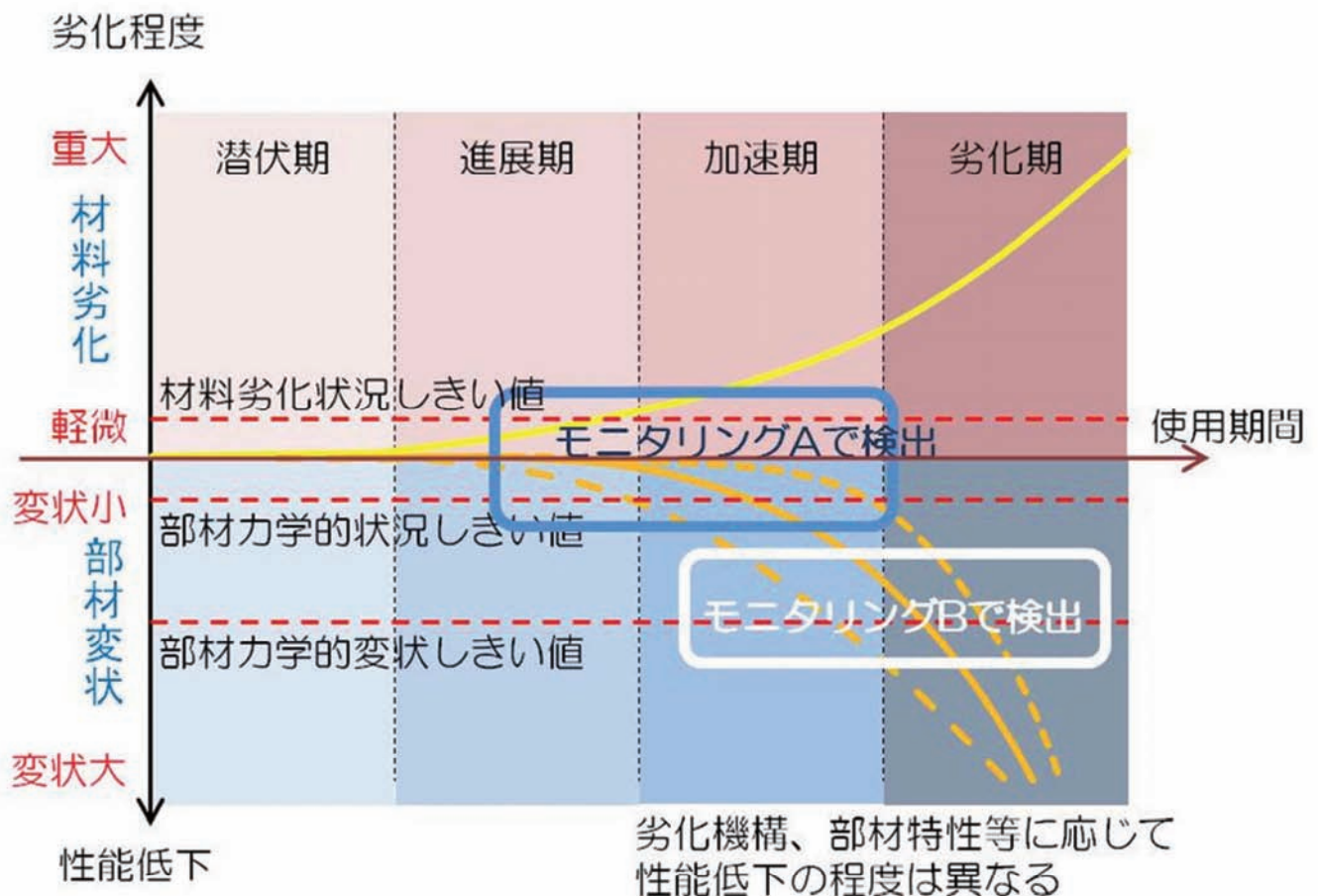
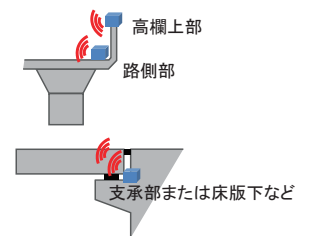
走行車線や送信機設置環境(路側、高欄上部、床版下、構造仕様等)の違いによる①、②の評価

◆ 実験(設置環境)条件

(A) 走行条件による違い

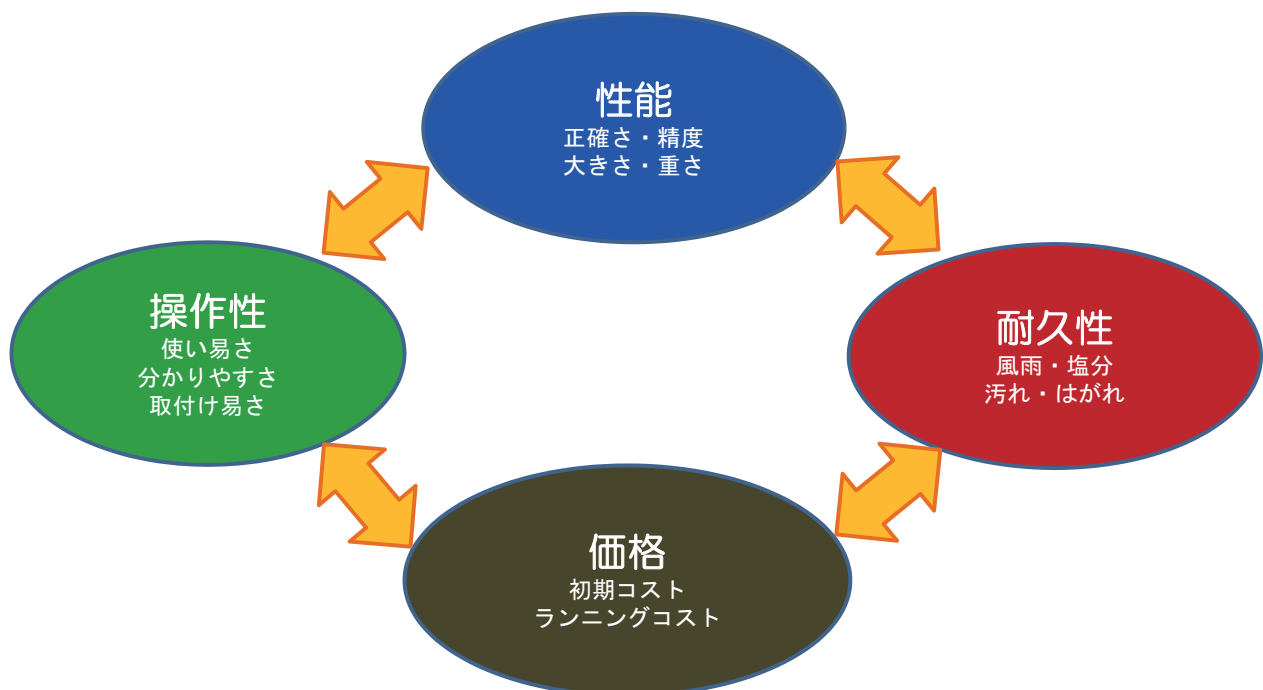


(B) 設置条件による違い





モニタリング・システムの要求性能



『性能』だけでなく全体のバランスが重要