

土木学会平成29年度全国大会
研究討論会 研-02 資料

鋼橋の維持管理の効率化・確実化に向けて —モニタリング技術の利活用—

座長	長山 智則	東京大学
話題提供者	長山 智則	東京大学
	宮下 剛	長岡技術科学大学
	松田 浩	長崎大学
	本間 淳史	東日本高速道路(株)
	伊藤 裕一	東海旅客鉄道(株)

日時	平成29年9月11日(月) 13:00~15:00
場所	九州大学伊都キャンパス
教室	センター2号館 2403

鋼構造委員会

趣旨説明

鋼構造委員会幹事会

重要な社会資本である橋梁の、効率的かつ確実な維持管理が求められる中、構造物のモニタリング技術に対する期待は大きく高まっている。しかし、構造物の状態をセンサ等により計測・伝送する技術については様々な知見が蓄積されてきているものの、計測されたデータと構造物の劣化・損傷・修繕等の維持管理の現場で必要とされる情報との関連性の解明については技術開発の途上であり、発展途上であると考えられる。本討論会では、鋼橋のモニタリングの最新技術、それらを利活用する上での課題、ならびにそれらを利用した計測の事例を紹介するとともに、今後、モニタリング技術を利活用していくうえで開発が望まれる項目とその展望について議論する。

座長・パネリストは、以下に示す方々をお願いした。

座長：

長山智則 氏（東京大学）

＜鋼構造委員会 鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリングに関する調査研究小委員会 委員長＞

パネリスト：

長山智則 氏（東京大学）／既往のモニタリング利活用事例の整理と今後の展開に向けて

宮下 剛 氏（長岡技術科学大学）／鋼橋の維持管理の効率化・確実化に向けて

松田 浩 氏（長崎大学）／SIP 地域実装での橋梁のアセットマネジメントに関する取組み

本間淳史 氏（東日本高速道路(株)）／道路橋の維持管理におけるモニタリング技術の活用

伊藤裕一 氏（東海旅客鉄道(株)）／東海道新幹線鋼橋の維持管理におけるモニタリングの活用

本討論会では、議論を集中するため、主要な鋼構造物である道路橋、鉄道橋を取り上げ、それぞれの分野でのモニタリング技術の現状と課題、ならびに実際の構造物の維持管理への展開についての話題を幅広く話題提供していただくこととした。本討論会において、鋼橋のモニタリング技術に関する現状と課題、ならびに将来展望に関して有意義な議論が交わされ、モニタリング技術の進むべき方向が示されることを期待するものである。

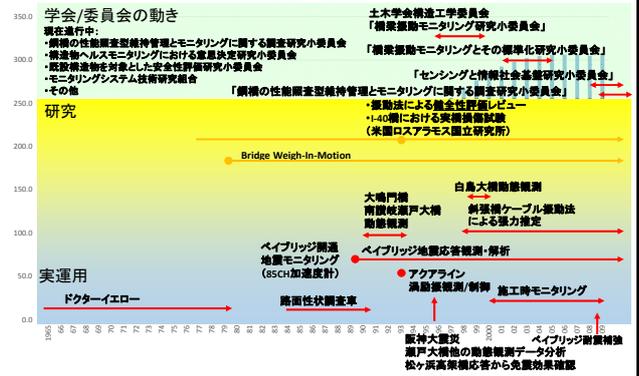
鋼橋の維持管理の効率化・確実化に向けて —モニタリング技術の利活用—

既往のモニタリング利活用事例の整理と 今後の展開に向けて

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
准教授 長山智則

インフラストックの増加とモニタリング

8部門社会資本ストック (単位:兆円) 国土交通白書2014を元に作成
(道路・港湾・空港・公共住宅・下水道・都市公園・治水・海岸)



The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリングの種類

1) 移動車両からの起動・路面評価	Dr. Yellow, East-I, 路面性状測定車
2) 耐震・耐風設計橋梁の設計検証	長大橋動態観測、地震応答モニタリング
3) 詳細調査	ケーブル振動調査、大振幅振動調査、環境振動、騒音調査
4) 施工中モニタリング・経過観察	妙高大橋、垂井高架橋
5) Bridge Weigh-In-Motion	ゲートブリッジ他、LRFRにおける荷重評価も。
6) 構造劣化の評価	洗掘評価、振動法によるケーブル張力評価 (災害後対応も含む)

The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリング事例1) 移動車両から軌道・路面の状態監視

軌道狂いの状態監視
ドクターイエロー 10日に1度全線走行
✓ 270km/hで走行, 0.1mm以下の精度
✓ 走行安全性, 乗り心地, 床下騒音レベル
✓ 設定値を超える→補修指示, 補修箇所の仕上がり度合い判定が施工会社の支払いに反映

精密な計測 + 頻繁な計測
営業列車軌道監視システム
✓ 監視の高密度化, ほぼ毎日複数回。
✓ LCX方式で中央指令現業事務所リアルタイム送信
✓ 動揺測定に加え, 高低狂いの計測。

10日毎のドクターイエローでは把握困難な軌道狂い進みを営業列車で監視
路面性状測定車
✓ 高速走行
✓ 縦断形状、ひび割れ率、轍ぼれを評価。

The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリング事例2) 耐震・耐風設計橋梁の設計検証

地震・風の作用が支配的な設計が多い。
地震: 長大橋の多くに強震計が設置, 免震橋でもその効果確認のため強震観測実施
風: 風と応答の関係には未知な部分も多い, モニタリングデータの蓄積→橋梁空力弾性学的发展
モデルは検証されない限り信頼度が低い, モニタリングは有力な検証方法

免震橋のモニタリング
✓ 地盤と橋脚に地震計設置, 免震橋では桁にも設置, 免震効果確認
✓ サイドブロックにより, 桁と橋脚の動きの一体化が見つかった事例 (温根沼大橋)

長大橋のモニタリング
横浜ベイブリッジ:
1989以来, 85成分の地震・応答計測
✓ 桁リングが固着して端橋脚に大きな曲げモーメントが発生する恐れが見つかり, 補強実施

長大橋一般について
地震時の非線形応答や, 地盤と上部構造との相互作用, 連結部の性能, 動的解析モデルによる地震応答の再現性の理解を深化, 地震時に加速度計動作不良も。

耐風設計検証のためのモニタリング
✓ 明石海峡大橋等, 長大橋で動態観測実施, 耐風設計の検証

The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリング事例3) 詳細調査

斜張橋におけるケーブル振動やひび割れの実態調査, 原因究明

ケーブル振動モニタリング クラック幅モニタリング

詳細調査の例
- 風によるケーブル振動, 部材振動
- 鉄道桁の大振幅振動, アオリ調査
- 環境振動・低周波振動調査

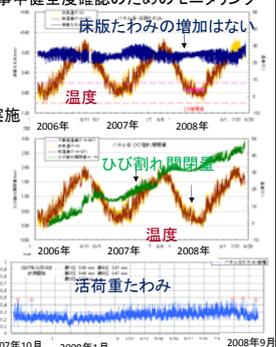
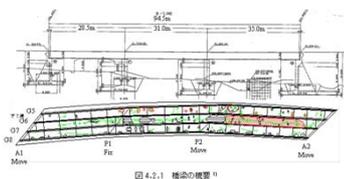
The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリング事例4)：施工中モニタリング、診断・経過観察

構造工学シリーズ24「センシング情報社会基盤」より

変状・劣化した鋼橋のRC床版のモニタリングと補強工事施工管理マネジメントへの応用事例

- ✓ リニューアル工事実施まで2年間と1年間の工事中健全度確認のためのモニタリング
- ✓ 床版たわみ、ひび割れ開閉量、温度
- ✓ 緊急メールシステム構築
- ✓ 静的たわみ増加はなし→耐荷性低下なし
- ✓ ひび割れ幅増→剥落を予知し事前撤去
- ✓ 活荷重たわみ変化なし→耐荷性低下なし
- ✓ 成果：健全性評価しながら、工事を無事故で実施



The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

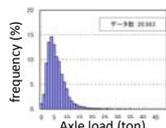
モニタリング事例5)：Bridge Weigh-In-Motion

交通荷重の評価

1: 道路埋設型



2: 橋梁の応答を利用したWIM



Load Ratingなどの運用が始まると、簡易に交通荷重を評価するニーズも生じると考えられる

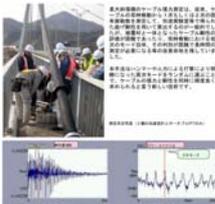
The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリング事例6)：構造劣化の評価

鋼橋技術研究会「最新センシング技術の適用に関する研究報告書」より

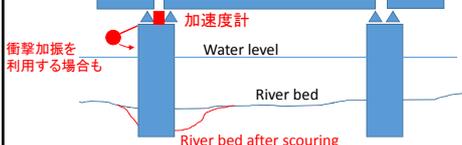
ケーブル張力低下の評価

振動法を利用したケーブル張力評価
吊橋ハンガーケーブルや斜張橋斜材



洗掘評価

振動や傾斜角をモニタリングすることで洗掘評価



斜面モニタリング、地震後の評価、

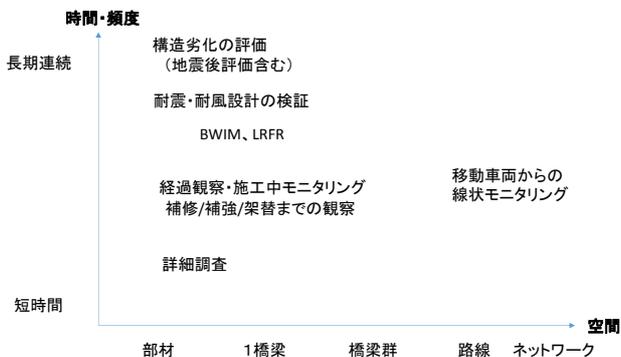
The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

モニタリングの分類

1) 移動車両からの起動・路面評価	Dr. Yellow, East-I, 路面性状測定車
2) 耐震・耐風設計橋梁の設計検証	長大橋動態観測、地震応答モニタリング
3) 詳細調査	ケーブル振動調査、大振幅振動調査、環境振動、騒音調査
4) 施工中モニタリング・経過観察	妙高大橋、垂井高架橋
5) Bridge Weigh-In-Motion	ゲートブリッジ他。LRFRにおける荷重評価も
6) 構造劣化の評価	洗掘評価、振動法によるケーブル張力評価 (災害後対応も含む)

The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

既存モニタリングニーズ



The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

既存モニタリングニーズ



The University of Tokyo Bridge&Structure Laboratory

長岡技術科学大学
Niigata University of Technology

平成29年度 土木学会全国大会/ 鋼構造委員会研究討論会

鋼橋の維持管理の効率化・確実化に向けて —モニタリング技術の利活用—

長岡技術科学大学
環境社会基盤工学専攻
宮下 剛

2017年9月11日, 九州大学

全国橋梁の通行規制等橋梁数の推移

(15m以上)

年次	合計	市区町村	都道府県・政令市	国
H20.4.1	801	715	~50	~36
H21.4.1	~950	~850	~50	~50
H22.4.1	~1100	~1000	~50	~50
H23.4.1	~1200	~1100	~50	~50
H24.4.1	~1300	~1200	~50	~50
H25.4.1	1381	1222	~50	~109

- 橋梁の高齢化に伴い、通行規制等が必要な橋梁数が増加傾向にある。
- 国土の強靱化に向けては、既設橋梁の耐力評価を効果的かつ効率的に行うことが求められる。

AASHTO Load Rating

- Load Ratingでは、橋梁の現時点での状態にもとづいて、活荷重に対する耐荷力を評価する。
- 評価は、Rating Factor (RF) によって行う。

$$RF = \frac{C - DL}{LL}$$

C: 部材耐力
DL: 死荷重効果 (死荷重による断面力or応力)
LL: 活荷重効果 (活荷重による断面力or応力)

- RF ≥ 1で基準とする活荷重に対して安全である。
- RF < 1で基準とする活荷重に対して安全とは言えず、補強、閉鎖、荷重制限を実施する必要がある。

新設設計法LRFD (Load Resistance Factor Design) に対応付けたシステムティックな処理が可能

Rating Factor

- 安全性評価 (荷重評価)

$$RF = (C - DL) / LL$$

γ : 荷重係数
 DC: 構造本体による死荷重効果
 DW: 舗装など附属物の死荷重効果
 L: 活荷重効果 (衝撃なし), IM: 衝撃係数

C : 部材強度 ($= \Phi_c \Phi_s \Phi_n R_n$)
 Φ_c : 状態係数
 Φ_s : 構造システム係数
 Φ_n : 抵抗係数
 R_n : 公称部材強度

DL : 死荷重効果 ($= \gamma_{DC} DC + \gamma_{DW} DW$)
 LL : 活荷重効果 ($= \gamma_L L(1 + IM)$)

- 部分係数の一例: 状態係数

Structural condition of member	Superstructure condition rating	Condition factor Φ_c
Good or Satisfactory	6 or higher	1.00
Fair	5	0.95
Poor	4 or lower	0.85

信頼性指標と活荷重係数

	Inventory Level (設計時レベル)	Operating Level (供用時レベル)
目標信頼性指標 β	3.5	2.5
活荷重係数 γ_L	1.75	1.35

- ASSHTOでは、2年に1回の定期検査と同時にLoad Ratingが義務付けられている。
- 2年から5年程度のスパンで荷重のばらつきを考えれば良く、活荷重自体の変遷を考慮する必要はない。
- 許容できる最低限の目標信頼性指標として2.5を設定して、活荷重係数を1.35としている。

宮下剛, 石井博典, 藤野隆三, 庄司朋宏, 関根樹: レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響, 土木学会論文集A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.4.

レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響

新幹線鋼箱桁橋 背景

- 変状の概要**
垂直補剛材下端部の主桁ウェブ溶接部においてき裂が発生
- 変状の対策**
補強材を高力ボルトで取付ける
同一の構造を有する部位全て
- 対策の効果**
不具合の報告なし
- 変状の原因**
杉本 (1997)
列車走行に伴う高次の局部振動
発生メカニズムは明らかではない

補強

新幹線鋼箱桁橋 計測結果

■ ひずみ

■ 加速度

主桁下フランジ
列車速度: 258.0 km/h

新幹線鋼箱桁橋 データ分析

■ 列車速度と加速度の関係

⇒ 共振曲線

供用から76年が経過した 鋼ゲルバートラス橋の 現地载荷試験と短期間モニタリング

宮下 隆, 岩崎英治, 長井正昭, Train Duet Khanh: 供用から76年が経過した鋼ゲルバートラス橋の現地载荷試験と短期間モニタリング, 構造工学論文集A, Vol.61, pp.439-450, 2019.3.

対象橋梁

80th
Choshi Bridge Anniversary

落橋防止構造

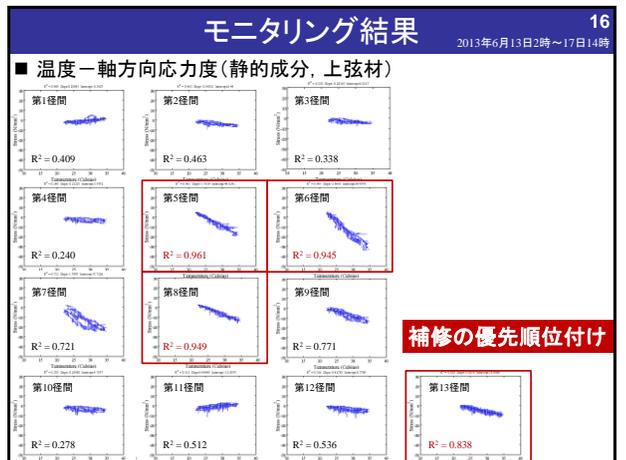
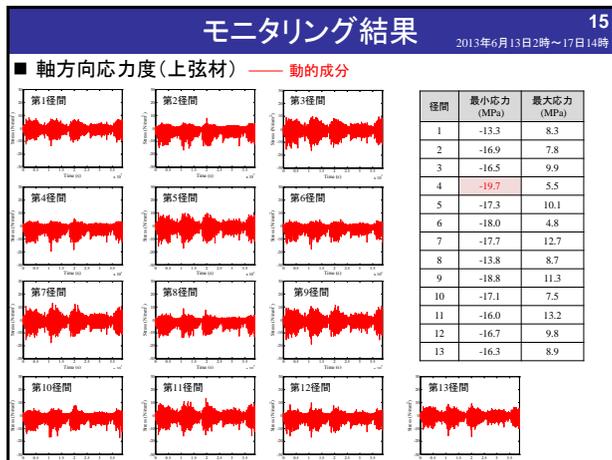
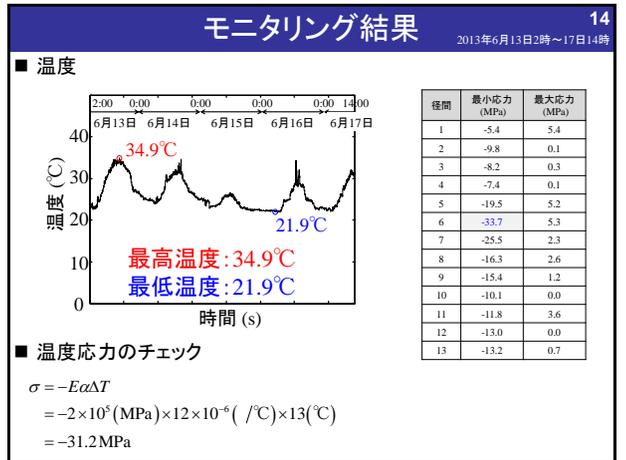
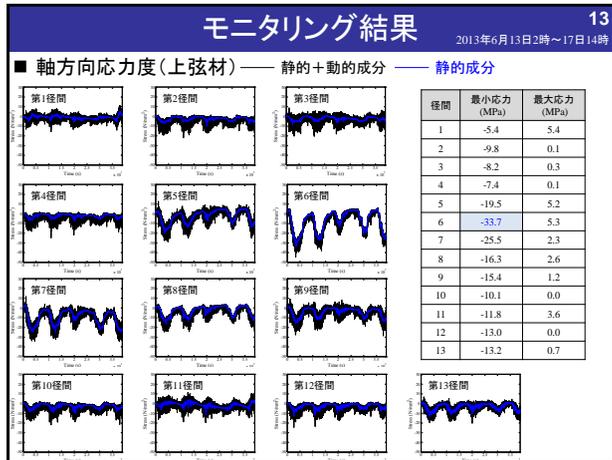
支承部 (可動)

吊径間

長生橋
 供用開始: 1937年
 路線名: 一般国道351号
 橋長: 850.8m (67.5+11@65.0+67.5m)
 構造形式: 下路式鋼ゲルバートラス

計測システム

上弦材のひずみ:	4点/断面 × 1点/径間 × 13径間
斜材のひずみ:	4点/断面 × 2点/径間 × 6径間
径間中央のたわみ, 加速度(車道):	1点/径間 × 13径間
加速度(歩道):	1点/径間 × 3径間
温度:	1点
合計130点	



平成29年度土木学会全国大会
鋼構造委員会研究討論会

鋼橋の維持管理の効率化・確実化に向けて
一モニタリング技術の利活用一

SIP地域実装での橋梁の アセットマネジメントに関する取組み

長崎大学工学研究科
構造工学コース
インフラ長寿命化センター
松田浩

次世代インフラ技術と防災強化の教育研究拠点の形成



(1) 外観劣化情報取得のための3次元維持管理システムの開発

研究開発の目標

①3Dレーザースキャナを用いた橋梁点検手法の開発
・ UAV → ステレオ写真解析
・ 3Dレーザースキャナ → 3D計測
→ 欠陥の空間上の位置特定や定量化手法を開発

②ギガピクセル画像撮影システム
・ 100m遠望から検査対象面を連続的に撮影
・ オール画像による外観劣化情報を取得
計測できない箇所 → 無人飛行体 (UAV)

③コンクリートひび割れ判別図画化システム
・ ギガピクセル画像 → オール画像
・ UAV画像ステレオ解析 → オール画像
→ 0.2mmひび割れ幅ひび割れ判別図画化システム

研究開発の目標

①3Dレーザースキャナを用いた橋梁点検手法の開発
・ UAV → ステレオ写真解析
・ 3Dレーザースキャナ → 3D計測
→ 欠陥の空間上の位置特定や定量化手法を開発

②ギガピクセル画像撮影システム
・ 100m遠望から検査対象面を連続的に撮影
・ オール画像による外観劣化情報を取得
計測できない箇所 → 無人飛行体 (UAV)

③コンクリートひび割れ判別図画化システム
・ ギガピクセル画像 → オール画像
・ UAV画像ステレオ解析 → オール画像
→ 0.2mmひび割れ幅ひび割れ判別図画化システム

1 インフラ長寿命化センター

工学部重点研究センター構想

- ①リアルタイム情報処理技術開発
- ②ナノダイナミクス研究
- ③医療用機器開発
- ④インフラ長寿命化研究



構想

ミッション



道路などのインフラ構造物の寿命化に
関する研究を行うとともに、自治体へ
の技術支援、協働活動ならびに学生の教育支援
を行う。

(平成18年11月センター設立教授会承認)

趣旨

“ヒト”“モノ”“場所”“命”もな
いハイテクなインフラセンターであるが、こ
れを有効活用し、外部資金等を獲得し
て、実質的な工学部センターとして機
能させたい。

社会貢献



2 道守養成講座



(2) 中小スパン橋梁のリスク評価に基づくモニタリング

実計測 (たわみ、振動)

解析的手法
設計図
3D計測
実測
LDV
振動計測
比較
FEM解析
データ分析

構造同定法
構造解析モデル
(リフトモデル)

振動モード図
1st mode
2nd mode

振動モードデータ

実位計

H20~24年度 文部科学省科学技術戦略推進費 (地域再生人材創出拠点の形成)

「観光ナガサキを支える“道守”養成ユニット」

科学技術を活用した地域再生に資するため、地域の大学等が地元自治体等と連携し、
地域の社会ニーズに即した人材創出拠点の整備を図る。

地域における科学技術システム及び
我が国の人材創出システムの改善を推進

文部科学省「成長分野等における中核的専門人材養成等の戦略的推進」事業
(5次大学コンソーシアム)

H20-21年度 国土交通省建設技術研究助成

「光学的非接触全視野計測法によるコンクリート
構造物のマルチスケール診断法の開発」

H26-27年度 国土交通省建設技術研究助成

光学的計測法を用いた効率的・低コストな
新しい橋梁点検手法の開発

3 光学的計測法を用いた新しい橋梁点検手法

光学的計測法を用いた効率的・低コストな
新しい橋梁点検手法の開発

(1) 外観劣化情報取得のための
3次元維持管理システムの開発

- ①3Dレーザースキャナを用いた橋梁点検手法の開発
- ②ギガピクセル画像撮影システム
- ③コンクリートひび割れ判別図画化システム

現場フィールド試験

(2) デジタル画像解析による
a) 橋梁たわみ計測法/
b) 鋼材き裂計測法の開発

- ④デジタルカメラを用いたデジタル画像解析による橋梁のたわみ計測法の開発
- ⑤熱源を用いた鋼材の疲労き裂検知法の開発

現場フィールド試験

橋梁維持管理における遠隔測定法と3D維持管理システムの開発

島原鉄道 (水無川橋) の3D計測 + 3DFEM解析 + 実振動計測

水無川橋点検データ

モデル	要素	要素	2次元
1	鋼材	R-P	R-P
2	コンクリート	R-P	R-P
3	コンクリート	R-P	R-P
4	コンクリート	R-P	R-P

振動モードデータ

モード	振動モード	振動モード	振動モード
1	水平変位1次	2.238	2.247
2	水平変位2次	100%	3.804
3	鉛直変位1次	103%	5.747
4	鉛直変位2次	98%	6.654

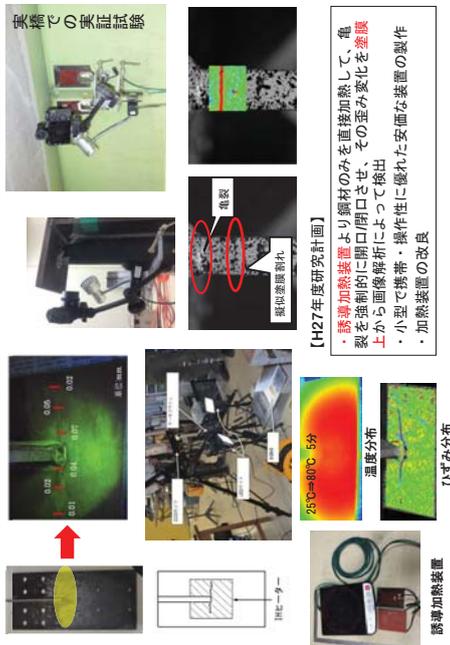
水無川橋点検データ

振動モードデータ

3D計測データ

3DFEM解析

実振動計測



実橋での実証試験

温度分布

ひずみ分布

誘導加熱装置

【H27年度研究計画】

- 誘導加熱装置より鋼材のみを直接加熱して、電裂を強制的に開口閉口させ、その定常変化を差顕上から画像解析によって検出
- 小型で携帯・操作性に優れた安価な装置の製作
- 加熱装置の改良

Helmut Wenzel

- 現在の点検は過剰であって、99%は無駄である
- 費用を削減し、一方、本当に問題がある箇所を発見する必要がある

ヨーロッパでは、この領域の研究が活発に進められている

1976年から40年の努力と継続的な研究投資を経て、漸く橋梁マネジメントの合理的な枠組みに近づいてきた

点検：き裂や損傷を探す → 情報の一元管理

リスクに基づく点検と意思決定 RBI: Risk Based Inspection

アセットマネジメントの目的

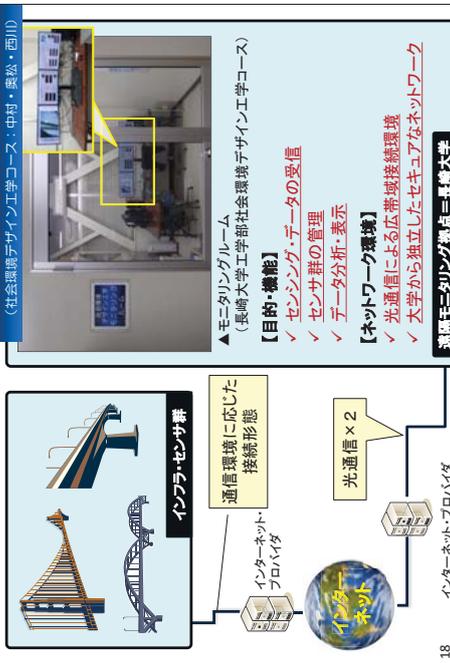
資産を守る → 投資継続し、ある水準に保つ/信頼性の高い診断法確立

ヨーロッパ：20~30年前の手法は信頼性が低い

- 近接目標の詳細点検さえ、何が本当に起こっているのか教えてくれない
- 損傷や腐食はわかるが、リスクや安全性を教えてくれない

共通データベースの重要性 ⇔ 類似を調査 → 着目点かわかる

(社会環境デザイン工学コース：中村・屋外・西川)



インフラ・センサ群

通信環境に応じた接続形態

インターネット・プロバイダ

インターネット・プロバイダ

インターネット・プロバイダ

遠隔モニタリング拠点＝長崎大学

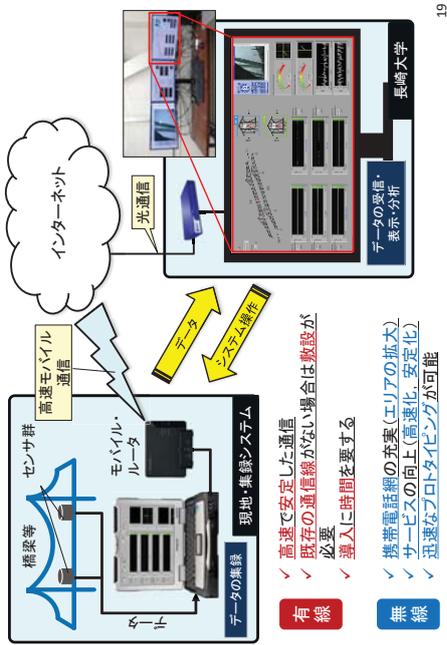
▲モニタリングルーム (長崎大学工学部社会環境デザイン工学コース)

【目的・機能】

- センサ群の管理
- データ分析・表示

【ネットワーク環境】

- 光通信による広帯域接続環境
- 大学から独立したセキュアなネットワーク



インターネット

センサ群

高速モバイル通信

モバイル・ルータ

現地・集線システム

データの集録

データの送信・表示・分析

光通信

データ

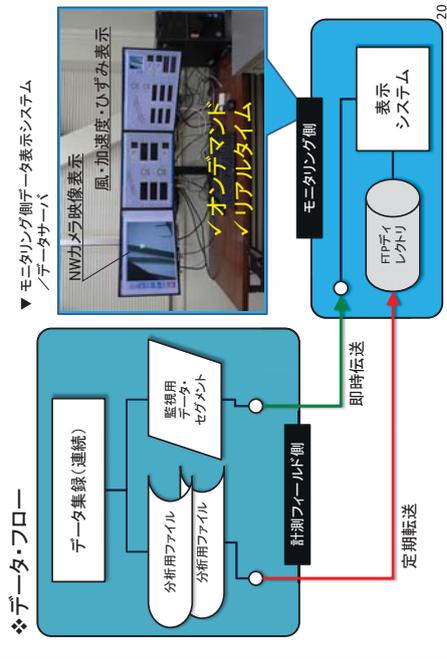
システム構築

有線

- 高速で安定した通信
- 既存の通信線がない場合は敷設が必要
- 導入に時間を要する

無線

- 携帯電話網の弁寒(エリアの拡大)
- サービスの向上(高速度化、安定化)
- 迅速なプロトタイプ化が可能



データ集録(連続)

分析用ファイル

格納用ファイル

計測ファイル

即時伝送

定期伝送

モニタリング側

表示システム

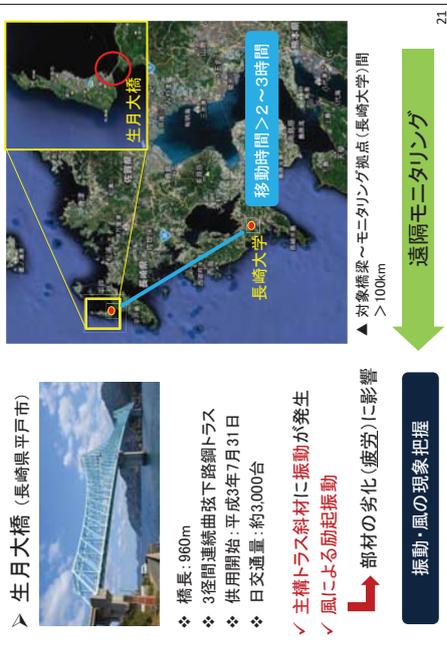
▼モニタリング側データ表示システム / ノードサーバ

NWカメラ映像表示

風、加速度、ひずみ表示

オンデマンド

リアルタイム



生月大橋 (長崎県平戸市)

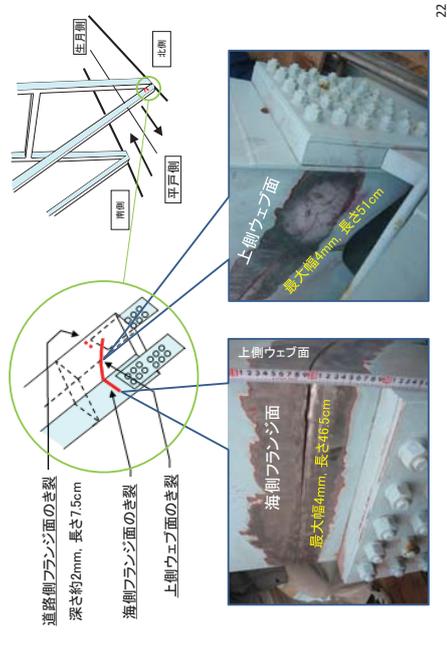
- 橋長: 960m
- 3空間連続曲弦下路鋼トラス
- 供用開始: 平成3年7月31日
- 日交通量: 約3,000台

移動時間 > 2~3時間

▲対象橋梁～モニタリング拠点(長崎大学)間 > 100km

振動・風の現象把握

振動・風の現象把握



道路側フランジ面のき裂

深さ約2mm, 長さ7.5cm

海側フランジ面のき裂

上側ウェブ面のき裂

圧縮

引張

平戸側

上側ウェブ面

最大幅約4mm, 長さ16.5cm

海側フランジ面

最大幅約4mm, 長さ16.5cm

風による励起振動に起因する主構トラス部材の劣化

遠隔地

遠隔モニタリング

振動・風の現象把握

計測・モニタリング対象

- 風による励起振動に起因する主構トラス部材の劣化
- 遠隔地

遠隔計測システム

- 携帯電話通信網の活用
- 2系統のデータ通信
- 監視用データの即時伝送 ⇒ オンデマンド、リアルタイムな監視
- 分析用データの定期転送 ⇒ データ収集の効率化

現象の把握

- 部材振動と風
- 概ね橋軸直角方向の強風(約20m/s以上)と低速風(7~9m/s)で励起振動が発生
- 応力状態の分析、疲労損傷度評価
- 強風時の部材振動が関与したものと考えられる

◆特殊橋梁の定義：最大支間長が200m以上の特殊構造形式で迂回路の確保が困難な橋梁

◆特定橋梁の定義：

- 油上側に位置する橋長50m以上で離島を架橋する橋梁や、海岸で迂回路の確保が困難な橋梁
- 橋長100m以上、支間長が50mで構造形式が特殊な橋梁
- その他(著しく橋長の長い橋梁や外ケーブルの採用など特殊な橋梁)



生月大橋

頭ヶ島大橋

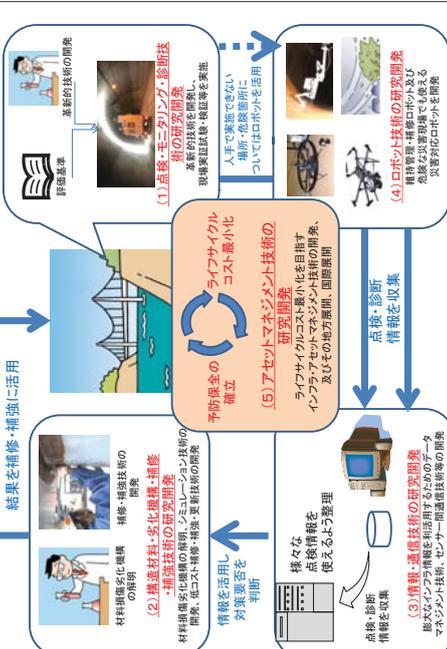
伊王島大橋

萬間橋

真島大橋

律島大橋

5 SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術



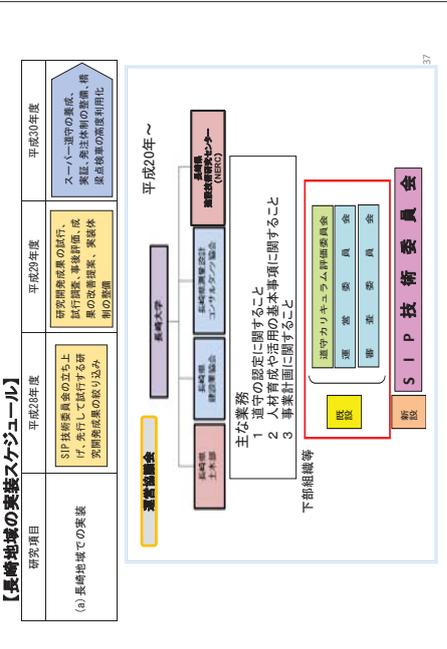
今後の計画：社会実装に向けて



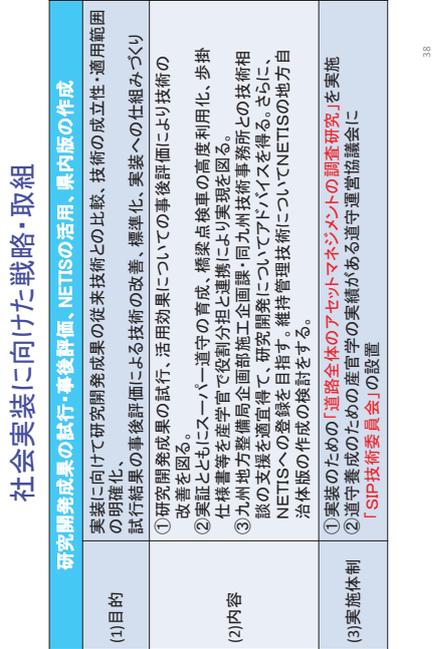
新技術の導入を進めるには？

- ▶ 開発者と利用者の情報交換(ニーズ把握)
 - ⇒ 説明会、フィールド試験、講演会...
- ▶ 新技術による的確な評価結果の活用方法の確立
 - ⇒ 後の補修補強、設計施工等への活用(ストーリー)
- ▶ 既存手法の代替にこだわらず、特徴を生かした新しい利用方法を考える。
 - ⇒ モニタリング、スリーピング(アイデア)
- ▶ 技術を組合せたり、全体を対象とした新しい観点
- ▶ 新技術導入の意義と方法を関係者で明確化し共有
- ▶ 新技術導入の活動と産官学の連携
 - ⇒ SIP技術実装プロジェクト
- ▶ 地域で使いたくなる新技術の評価推奨機関の設置

長崎地域の実装体制



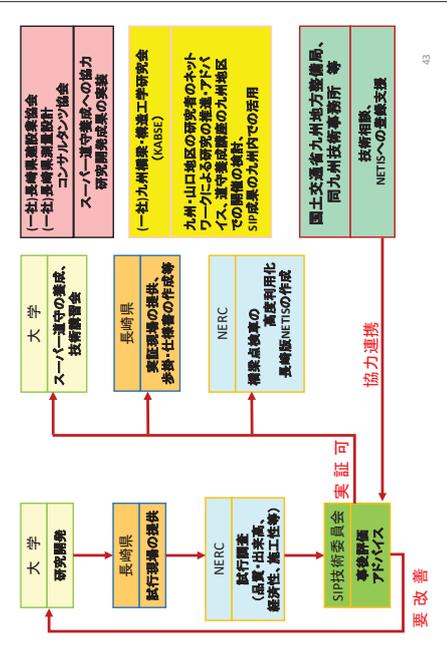
研究開発成果の社会実装の見込み



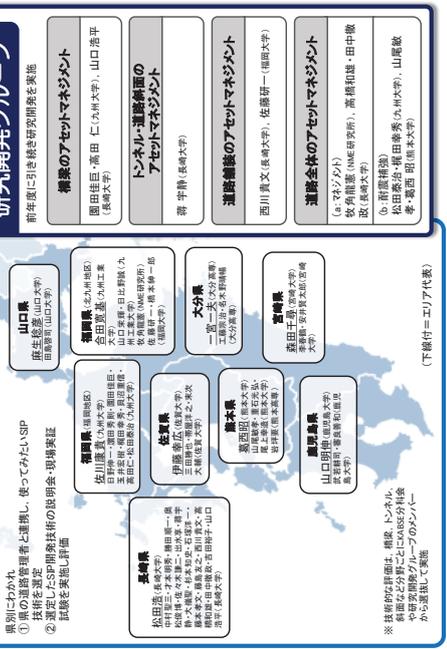
「道守」活用部会の活用の方向性

項目	インフラ長寿命化センター 公共サービス(安全、快適、負担の軽減)の向上	公共機関 公共インフラの適正な維持管理システムの構築	建設業 地域建設業の仕事の量質の確保
方向性	「道守」活用によるインフラの維持管理システムの向上	「道守」活用によるインフラの維持管理システムの向上	「道守」活用によるインフラの維持管理システムの向上
検討事項	「道守」活用によるインフラの維持管理システムの向上	「道守」活用によるインフラの維持管理システムの向上	「道守」活用によるインフラの維持管理システムの向上

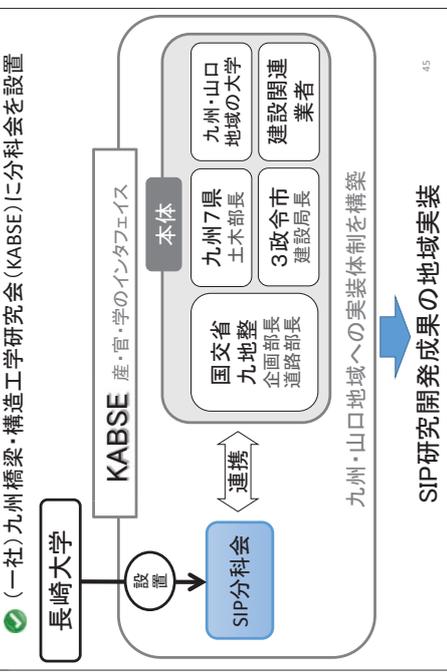
連携内容、認証、標準化、出口戦略



実装支援グループ



九州・山口地域における実装体制の構築



道路橋の維持管理におけるモニタリング技術の活用

東日本高速道路 本間淳史

1. はじめに

道路構造物の維持管理において、センサや ICT を活用したモニタリングシステムを現場に導入することの期待は大きい。しかしながら、モニタリングシステムを構成するセンサによる計測技術や、計測データを収集・伝送する通信技術、データを分析評価する技術には多種多様なものが存在しており、さらに ICT の進展により日々新しい技術が開発されているものの、これらを現場活用するための明確な指針が存在していない。このためモニタリング技術のニーズはあるが、どの技術をどのような部位や劣化機構に適用すべきかをインフラ管理者が判断できずに、本格的な現場導入に至っていないという実態がある。

このような背景のもと、国立研究開発法人土木研究所と NEXCO 東日本・中日本・西日本の高速道路 3 会社が発起人となって、センサや通信技術に精通したメーカー、ならびに道路構造物の設計・施工を専門とするゼネコンやコンサルタントとともに、2014 年 10 月に「モニタリングシステム技術研究組合¹⁾ (以下、RAIMS: Research Association for Infrastructure Monitoring System)」を設立して、モニタリングシステムを現地に導入するための基準化・標準化に向けた研究を進めている(図-1)。また RAIMS として、国土交通省からの委託研究を受けて、内閣府の進める戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)²⁾ に参画しており、研究の基本部分はこの中で実施している。

RAIMS の当面の研究期間は平成 30 年度までを想定しており、主な研究内容を整理すると以下となる。

- 道路管理者のニーズを整理して、モニタリングシステムの要求性能を明確にする。
- 室内試験や高度解析技術を用いた検討により、構造物の劣化機構を踏まえてモニタリング技術の適用性を検証する。
- センサによる計測技術、計測データを収集する通信技術、収集したデータを分析評価する技術を組合せ、モニタリングシステムの現場実証を行う。
- モニタリングシステムの基準化・標準化を提案するとともに、維持管理レベルに応じたシステムを作成する。

以下に、RAIMS の研究内容について、鋼橋の RC 床版を中心に紹介する。

2. 維持管理サイクルへのモニタリングの適用

道路構造物の維持管理サイクルは、一般的に『点検⇒診断⇒措置(補修・補強)⇒記録』という流れであり、このサイクルの中に管理者のニーズに合致したモニタリング技術を組み込み運用することで、維持管理業務の高度化およ

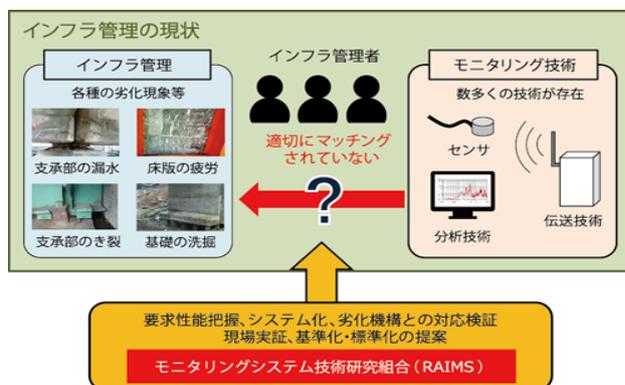


図-1 RAIMS の研究課題と目的

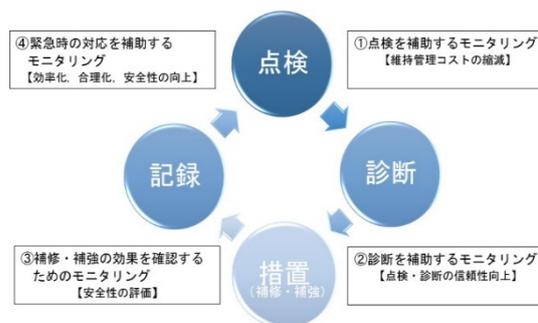


図-2 維持管理サイクルとモニタリングの役割

び効率化を図ることが RAIMS の研究テーマである。維持管理サイクルとモニタリングの役割を組み合わせると図-2 で表される。

国土交通省における「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会」では、現状の維持管理における管理者ニーズを以下のように具体化している³⁾。

- 異常発生直後（地震等の災害発生時含む）に通知してほしい（遠隔地から把握したい）。
- 地域特性や通行状況等により異常（塩害・劣化損傷等）が発生しやすい箇所を知りたい。
- 定期的な外観目視では把握できないコンクリート材や鋼材の劣化損傷の進行状況を見たい。
- 補修・補強の長期的な効果、塩害対策の浸食抑制効果、表面保護/被覆等による損傷進展の抑制効果等を知りたい。
- 荷重制限の橋梁における安全性を監視したい。

これらのニーズが意図する具体的な主なモニタリング対象については、インフラ構造物の管理者として、特に橋梁に関してはこれまでの劣化損傷事例などから容易に想定が可能である。ここで、図-2 で示した各モニタリングの役割を

表-1 管理者ニーズからのモニタリング対象

管理者ニーズ	主なモニタリングの対象
① 点検を補助するモニタリング	
異常（変状）が発生しやすい箇所の把握	・桁端部の変状 ・支承部の変状 など
外観目視の難しい損傷状況の把握	・鋼床版のウリ内側の疲労損傷 ・橋脚基礎の洗掘 ・トラス橋等の格点腐食状況 など
② 診断を補助するモニタリング	
劣化損傷の進行状況の把握	・床版のひび割れ ・コンクリート桁橋の塩分浸透 ・鋼材等の腐食状況 ・斜張橋や吊橋等のケーブル張力 など
荷重制限の橋梁の監視	・床版のたわみ ・通行車両重量 など
③ 補修・補強の効果を確認するモニタリング	
補修・補強の長期的な効果の確認	・鋼板接着補強した床版の耐力 ・断面修復後のマクロセル腐食 など
予防保全的対策の抑制効果の確認	・表面被覆したコンクリート桁の塩分浸透 ・鋼桁の鋼部材防食 など
④ 緊急時の対応を補助するモニタリング	
災害や突発的変状の通知及び把握	・地震後の損傷（コンクリートはくり、鉄筋降伏）など

組合せると、概ね表-1のように整理することができる。

したがって、モニタリング技術の導入に関しては、これらのモニタリング対象について、どのような方法でセンシングしていくことが合理的であるか、あるいはそれらの計測を可能とする技術が存在するのか、もしくは既存技術の改良が必要となるのかなど、それぞれについて具現化していくことが研究課題となる。

3. RC床版に関するモニタリング技術の検証

RC床版は、直接交通荷重を支持することによる疲労損傷や、凍結防止剤の散布による塩害など、過酷な環境にある構造部材である。したがって、モニタリング技術を活用して健全度や損傷状況を把握することは、維持管理の効率化や高度化を図る上で有効と考え、先行して取り上げた研究課題である。

現時点でRC床版に適用可能と考えられるモニタリング技術を目的に応じて整理すると図-3のようにイメージされる。これらの技術を検証するために、RC床版模型を用いた輪荷重走行試験により変状の検知性能を確認した（写真-1）。試験に使用したRC床版は昭和39年の道路橋示方書に基づく幅2.2m×長さ4.0m×厚さ19cmの供試体である。載荷荷重は、15,000移動往復毎に89kNから段階的に値を大きくした（89, 100, 110kN）。その結果、累積走行回数45,167回（載荷荷重110kN）の時に床版の抜落ちによって試験が終了した。本実験で使用したモニタリング技術の一覧を表-2、その設置状況を写真-2に示す。

加速度センサや画像の計測から床版の剛性の推定、画像や光ファイバのひび割れ計測からひずみ量の推定、AEセンサによるAEエネルギーの計測から内部損傷の把握などを行うことで床版の損傷との関係を分析した。実験結果の具体は、文献4)などに公表しているのでそれらを参照されたいが、ここでは一例として、複数の加速度センサを用いた振動センシング（振動可視化分析）を紹介する。床版の劣化進行に伴い揺れ方が変化して、それにより動特性（各振動モードの共振周波数と減衰比）が変化することに着目

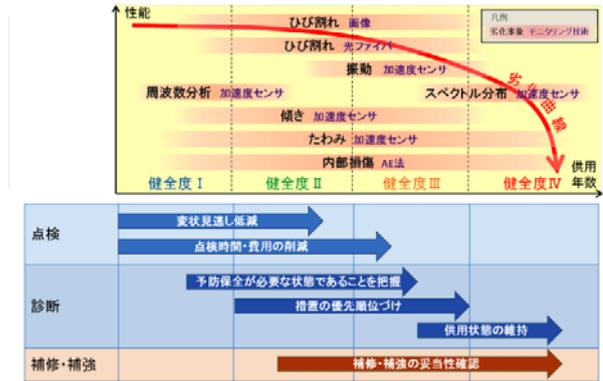


図-3 RC床版のモニタリング技術適用イメージ



写真-1 輪荷重走行試験の状況



写真-2 床版下面のセンサ設置状況

表-2 輪荷重走行試験に採用したモニタリング技術

振動	ひび割れ	その他	モニタリング技術	備考
○			固有振動数分析技術	電池駆動無線加速度センサ
○			低周波加速度特徴解析	3軸加速度センサ
○			振動可視化分析	高感度加速度センサ
	○		ひずみ分布計測	光ファイバセンサ
		○	A E法	A Eセンサ
○	○		画像センシング	ひび割れ幅の計測
	○		画像撮影及び解析	ひび割れ進展の記録

したものである。図-4を見ると、走行回数が増えるほど各振動モードの共振周波数は低下しており、また高次モードほど共振周波数の変化は顕著であることが分かった。輪荷重試験ではインパクトハンマ加振加速度応答法を用いて、各振動モードの共振周波数の変化を確認したが、実橋では振動センサから動特性を抽出する。RC床版の劣化損傷の進行による振動特性の変化は、その他のモニタリング技術においても確認できており、固有振動数分析技術などは床版の抜落ち直前に顕著な変化をとらえていることなどから、

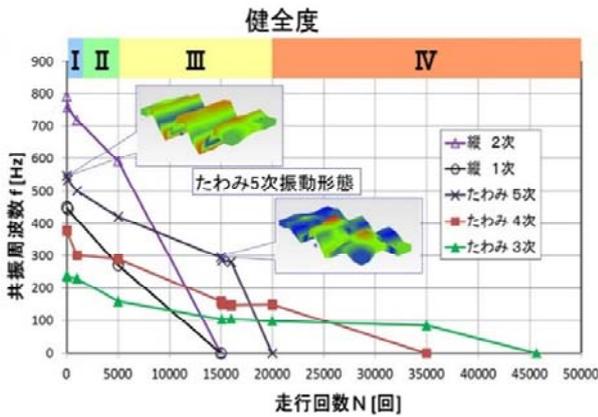


図-4 床版劣化の進行と共振周波数の変化

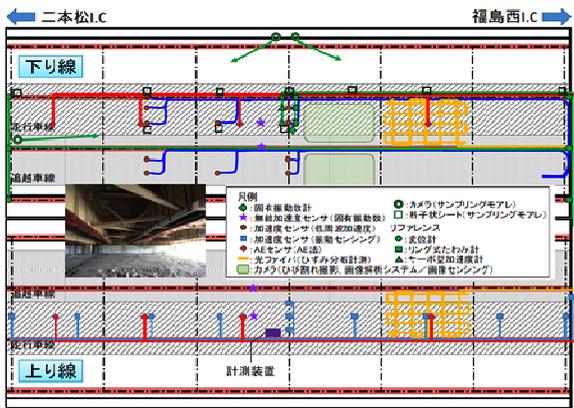


図-5 大森川橋 RC 床版のセンサ配置状況

各センサと分析手法の組み合わせによって健全度評価に有効であることが期待できる。

4. モニタリング技術の現場実証

輪荷重試験で基本性能を確認したセンサ等を用いて、平成 28 年から供用中の高速道路の RC 床版において現場実証試験を実施している。実際の現場におけるノイズの影響や作業性、環境条件による耐久性の確認などが目的である。現在、東北道大森川橋（福島市）と中央道城山川第二橋（八王子市）においてモニタリングを実施している。図-5 に大森川橋の RC 床版におけるセンサ配置図を示す

また、現場実証試験においては、各種センサ等による計測だけでなく、計測データの収集に必要な無線方式の通信性能評価（伝送試験）もあわせて実施している。対象とした技術は、床版や桁など広範囲に設置されたセンサのデータをマルチホップ無線で集め、ゲートウェイを介して遠隔の収集サーバへ送信する「定点収集型」、およびパトロール車などが車両速度 80km/h で走行しながらセンサデータを無線で収集する「巡回収集型」（図-6）の 2 種類の技術であり、通信可能範囲や設置条件などを検証中である。

5. おわりに

モニタリングデータを維持管理で活用するためには、センサにより得られたデータの評価・判定の基準が重要である。例えば、損傷程度（a～e）あるいは健全性（I～IV）

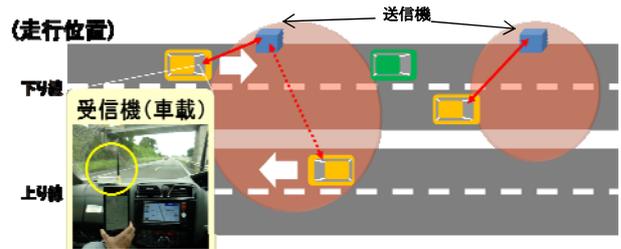


図-6 伝送技術の検証イメージ（巡回収集型）

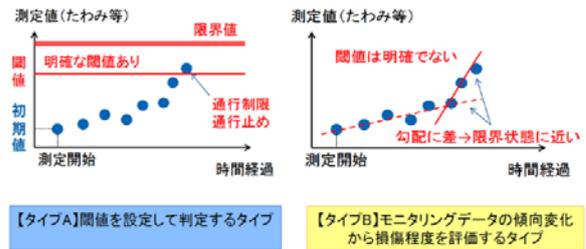


図-7 モニタリングデータの評価・判定

との対比ができることが望ましい。また、劣化損傷の進行を監視する場合には供用制限の管理基準となる閾値の設定が必要となる。一方、基準値は設定しないが、通常の計測値に比べて異常を示した場合に点検強化や調査を実施するケースも考えられる（図-7）。RAIMS では、実験や解析を活用して、これらの基準値のあり方について整理していく予定である。

RAIMS の研究目的は、モニタリング機器の開発というよりも、モニタリング技術の活用とその普及である。それぞれのインフラ管理者が、限られた技術者と予算の中においても、モニタリング技術をうまく活用することで維持管理を効率的かつ合理的に行い、永久構造物としてその健全性をいつまでも維持していくことを期待している。

（補 足）

本研究には、内閣府の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業研究の内容を含む。

参考文献

- 1) モニタリングシステム技術研究組合：
<http://www.raims.or.jp/>
- 2) 国土交通省：報道発表資料，社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発に係る公募について，2014.9.8.
- 3) 国土交通省：社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第 2 回），資料 3，モニタリング技術に対するニーズについて，2013.12.17.
- 4) 古市他：輪荷重走行試験による RC の疲労劣化試験に関するモニタリング技術の検討(その 1)～(その 5)，土木学会第 71 回年次学術講演会概要集，pp.71～80，2016.9.

東海道新幹線鋼橋の維持管理におけるモニタリングの活用

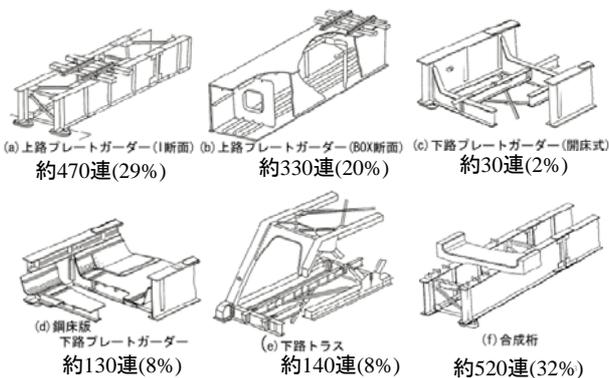
東海旅客鉄道(株) 技術開発部
伊藤 裕一

名称	東海旅客鉄道株式会社(JR東海) Central Japan Railway Company
本社所在地	本社 名古屋市中村区名駅一丁目1番4号 JRセントラルタワーズ 本社(東京) 東京都港区港南二丁目1番85号JR東海品川ビルA棟
主な数値	資本金 1,120億円 営業収益 1兆3,579億円 従業員数 18,164名 営業キロ 1,970.8キロ 駅数 405駅 車両数 4,836両

JR東海とは？



東海道新幹線の鋼橋



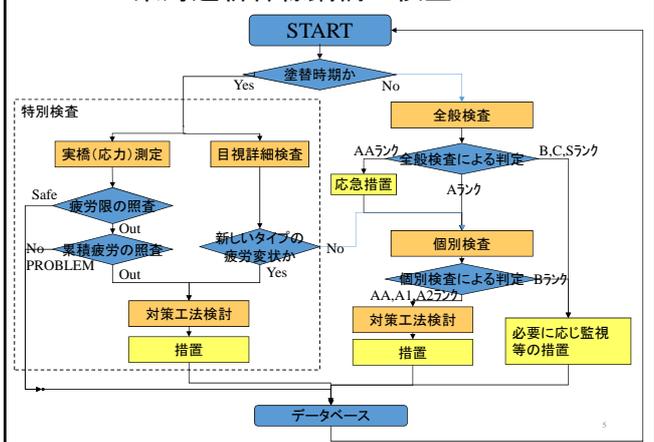
東海道新幹線鋼橋の特徴

- 溶接構造
 - リベット桁より疲労に弱い
- 電車荷重で設計
 - 設計と実際の列車荷重がほぼ等しい
 - 繰り返し回数が多い
- 初期の溶接ディテール
 - 線区としては国鉄で初めて全面的に溶接を採用



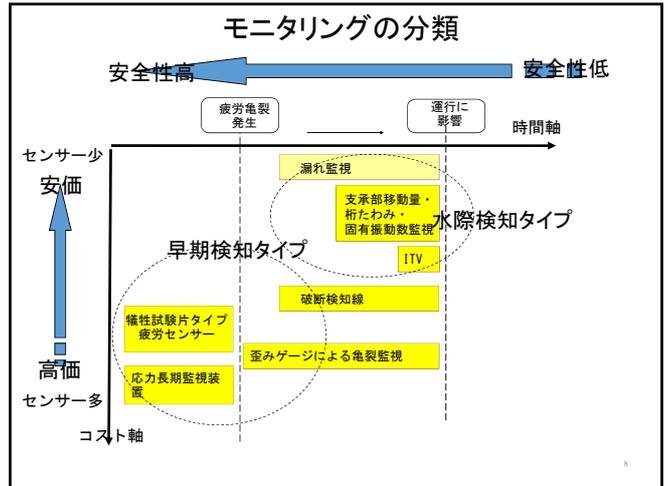
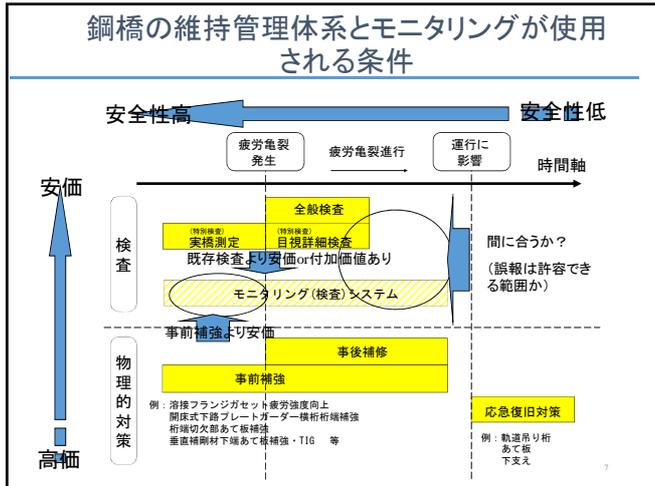
(疲労設計はなされているものの)
在来線の鋼橋等と比較して、疲労損傷が出やすい

東海道新幹線鋼橋の検査フロー



目視詳細検査実施状況





これまでに開発(に参加)した各種モニタリング

(例1) 縦桁間たわみ差検知 (水際検知タイプ)

10

これまでに開発(に参加)した各種モニタリング

(例2) 犠牲試験片の亀裂進展監視 (早期検知タイプ)

10

これまでに開発した各種モニタリング

(例3) 破断位置検出可能な破断検知線 (早期検知タイプ)

- 鋼橋表面の疲労亀裂の発生・進展が想定される場所を跨ぐ位置に、極細の電線を、2本並行して一筆書きで接着
- 疲労亀裂が発生し、電線を通過すると、電線が疲労破断
- TDR(Time Domain Reflectometry)法により電線破断までの距離を測定
- 電線破断までの距離と電線敷設図を対比し構造物亀裂発生箇所を特定

開発した検知テープ(塗膜上に接着し、良好な亀裂検知性能が得られる)

11

実橋試験施工

検知線貼付位置と亀裂予想箇所

トラス縦桁

貼付した検知線

Mobile Ark (電話機)

Eメール自動通報装置

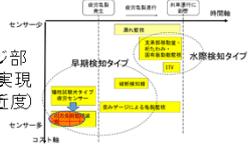
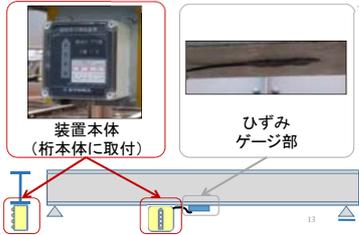
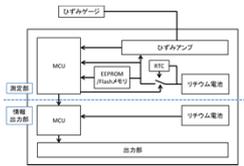
断線検知器

12

これまでに開発した各種モニタリング (例4) 鋼橋応力監視装置(早期検知タイプ)

【特徴】設置コストも含み、安価に長期監視

- 屋外での長期耐久性を持つひずみゲージ部
- 内蔵電池で長期稼働(塗装周期以上)を実現
- 疲労損傷の発生可能性(疲労限への接近度)をLED発光パターン等で出力



- 1週間毎に20分間起動し、その間通過する列車により鋼橋に発生する応力を測定・評価

まとめ

鋼橋の維持管理においては、鋼橋の状況(路線の重要性、劣化状況、利用できる維持管理手段)を踏まえ、想定される損傷毎に、適切な維持管理手段を組み合わせる必要がある。

東海道新幹線鋼橋の疲労を対象とした例では、維持管理の**主軸は、事前補強と、目視検査**で損傷を検出し行う**事後補修**。**モニタリング**は、これらを一歩代替できる可能性はあるが、**信頼性・コストが課題**(事前補強に比べ信頼性に劣り、検査+事後補修に比べ高価)。そのため、現状では東海道新幹線鋼橋へのモニタリング導入は一部に留まる。

モニタリングタイプ毎の課題

- 水際検知タイプ
 - たわみ差検知等 ⇒ 信頼性(検知時の安全性)
- 早期検知タイプ
 - 破断検知線等 ⇒ 信頼性(対事前補強)・コスト(対事後補修)