

橋梁維持管理へのモニタリング技術適用に向けた取り組み

廣江 亜紀子*1・石田 雅博*2・本間 淳史*3

最先端のセンサーなどのシーズと管理者のニーズを合致させることで効率的で効果的なモニタリングシステムを構築し、ガイドラインとして提案することを目的に、モニタリングシステム技術研究組合が設立され、模擬供試体を利用した室内実験や実際の橋梁における現場実証実験を通して、モニタリング技術の適用性の検証を進めている。

本稿では、モニタリングシステム技術研究組合の概要と取り組んでいる研究の紹介を行う。

キーワード：維持管理，モニタリング，橋梁

1. はじめに

1.1 RAIMSの概要

高度成長期以降に整備されたわが国の社会インフラは、老朽化が進んでおり、適切な維持管理手法の導入によって長寿命化や維持管理・更新のトータルコストの縮減・平準化を図ることが喫緊の課題といえる。一方で、構造物の損傷・劣化のセンサーによる計測技術や、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などには多種多様なものが開発されている。しかし、これらをインフラの維持管理の現場に活用するための具体的な方法や考え方などが整理されていないため、どのような構造・部位にどのような技術を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のが現状である。この現状を解決するため、国立研究開発法人土木研究所と道路管理者である中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)、東日本高速道路(株)、補修・補強技術に精通した総合建設会社である鹿島建設(株)、前田建設工業(株)、劣化メカニズムや診断解析に精通したコンサルタントの国際航業(株)、日本工営(株)、最先端のセンサーや通信技術、データ分析評価システムの開発者である電気通信分野として沖電気工業(株)、(株)共和電業、日本電気(株)、能美防災(株)、(株)日立製作所、富士通(株)、以上の14者がモニタリングシステム技術研究組合(RAIMS)を設立した。

RAIMSでは、センサーや通信・データ解析技術などを組み合わせ、効率的で、合理的なモニタリングシステムを構築し、損傷・劣化の状態監視を社会インフラの維持管理業務へ導入するためのガイドラインを提案することを目的としている(図-1)。

1.2 RAIMSの研究

RAIMSでは、点検から補修・補強に至るまでの維持管理サイクルを高度化・効率化するため、実際のインフラ管

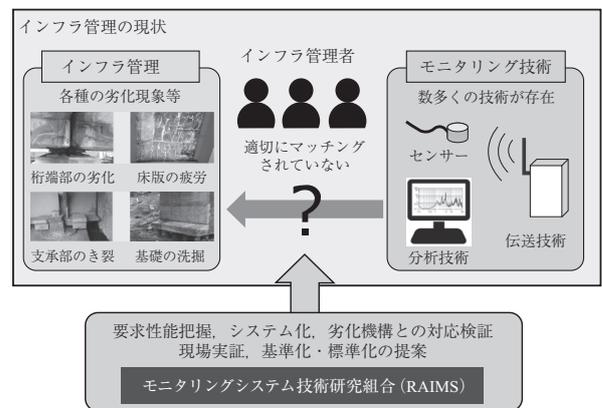


図-1 RAIMSの概念図

理者のニーズを踏まえ、実験や解析ならびに現場実証に基づいた最先端のモニタリングシステムを現地に導入するための基準化・標準化の提案に向けた研究を進めている。研究開発のフローを図-2に示す。さまざまなモニタリング技術について管理者のニーズと要求性能の検討を行い、供試体や撤去術を活用した室内実験・解析などによるモニタリング技術の適用性の評価、適用性の確認がなされた技

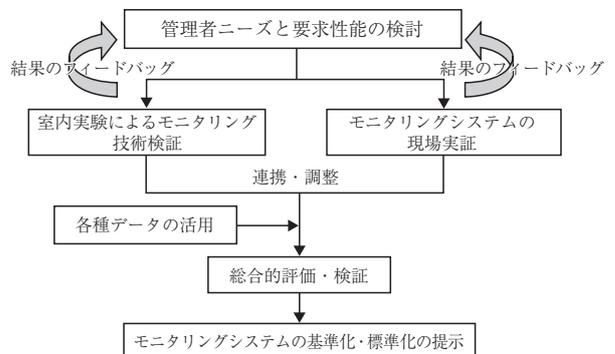


図-2 研究の流れ

*1 Akiko HIROE：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 研究員

*2 Masahiro ISHIDA：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 上席研究員

*3 Atsushi HOMMA：東日本高速道路(株) 建設・技術本部 技術・環境部 構造技術課 課長

術を用いた実際の道路橋の現場での実証試験をもとに、総合的にモニタリング技術の評価を行い、最終的には実用的なモニタリング技術の活用方法の提案として、ガイドラインにまとめていく。

以降では、RAIMSにおける研究のなかで行っているRC床版、RC桁ならびに塩害による劣化損傷を対象とした室内実験や現場実証実験を紹介する。

2. 床版のモニタリング実験

2.1 室内実験

表 - 1 に示す技術について、床版の損傷をモニタリングするにあたってセンサーの性能を確認するため、床版を模擬した供試体を用いた輪荷重走行試験を行い（写真 - 1）、その劣化過程を各種のモニタリング技術を用いて計測した。供試体下面へのセンサーの設置状況を写真 - 2 に示す。

表 - 1 輪荷重走行試験に適用したモニタリング技術

分類	振動	ひび割れ	その他	導入技術	備考
センサー設置型	○			固有振動数分析技術	電池駆動無線加速度センサー
	○			低周波加速度特徴解析	3軸加速度センサー
	○			振動可視化分析	高感度加速度センサー
		○		ひずみ分布計測システム	光ファイバセンサー
			○	アコースティックエミッション法	AEセンサー
遠望測定型	○	○		画像センシング	デジタルカメラ画像解析からひび割れ幅の計測
			○	ひび割れ撮影、画像解析システム	デジタルカメラ画像解析からひび割れ進展の記録



写真 - 1 輪荷重走行試験



写真 - 2 供試体下面のセンサー設置状況

この実験では、採用したモニタリング技術によって、床版の劣化過程（床版のひび割れをもとに判断した損傷度の変化）と計測値の相関を確認することができた^{1, 2, 3, 4)}。

2.2 現場実証実験

2.1の室内試験結果を受け、室内実験で用いたモニタリング技術を、実橋に適用する際の施工上の課題の把握や、温度変化や日照などが計測値に与える影響の確認を行った。福島県内および東京都内の高速道路の橋梁2橋を対象に現場実証実験を行っており、季節変動の確認のため、これらの試験は1年程度継続的に計測することとしている。実橋の床版下面へのセンサー設置状況を写真 - 3 に示す。



写真 - 3 実橋の床版下面のセンサー設置状況

本実験における現時点までの計測結果では、振動の計測には常時微動や荷重変動などのノイズの影響が含まれるものもあるが、分析の工夫で影響を緩和させられる可能性のあることが確認できている。また、カメラによるひび割れの計測では、幅0.1mmまでのひび割れを判読でき、常時微動や日照変動などのノイズの影響は問題なかった。たわみについて本実験での変動は非常に小さく、たわみを健全性の評価に用いるのは、たわみがより大きくなる劣化段階が適していると考えられる。

3. RC桁のモニタリング実験

地方公共団体が管理する橋梁においては、RCT桁橋やRC床版橋の割合が多く、支間長としては10~20m程度のものがもっとも多い。そこで、地方公共団体の劣化したRCT桁橋（支間長6m）を対象としてモニタリング技術の現場実証実験を実施した。現場実証実験の対象橋梁を写真 - 4 に示す。昭和2年に竣工されたRCT桁橋であり、コンクリートの剥落や鉄筋露出が確認され、平成28年9月に架替えにより撤去された。実験は、平成28年3月から、撤去直前までの期間に行った。

実験では橋桁に直接設置して測定する「センサー設置型」と、橋梁の遠望から画像を取得し、画像解析により変位や振動特性を算出する「遠望型」の2種類を適用した。センサー設置型は変位計と加速度センサーによる技術を、遠望型は画像センシングとサンプリングモアレ法を適用した。

適用技術の一覧を表 - 2 に示す。



写真 - 4 対象橋梁の外観



写真 - 7 加振試験 (通行止め後)

表 - 2 RCT 桁の現場実証実験に適用したモニタリング技術

計測対象	導入技術	
	技術名	センサー・機器名
たわみ	変位計測	変位計
		リング式たわみ計
		レーザーたわみ計
	画像センシング	動画撮影カメラ
	サンプリングモアレ	サンプリングモアレ
振動	加速度計測	サーボ型加速度計
	固有振動数計測	固有振動数計
	固有振動数分析技術	無線加速度センサー
	低周波加速度特徴解析	加速度・傾斜センサー
	振動可視化分析	加速度センサー



写真 - 5 車両走行試験



写真 - 6 静的載荷 (通行止め後)

現象の再現性や季節変動、耐久性などの検討を行うため、3 か月ごとに計 3 回の車両走行試験 (写真 - 5) を行った。また、撤去工事ともなう橋梁の通行止めののちに、鉄筋の腐食破断を模擬して主鉄筋を切断し、静的載荷 (写真 - 6) と加振試験 (写真 - 7) を実施した。

RCT 桁橋における現場実証実験においても、温度変化や日照などが計測値に与える影響の確認を目的としており、たわみ・振動のモニタリングとともに、今回の実証の範囲内においては、気温や走行車両の位置、車両走行速度が計測値に及ぼす影響は小さく、実環境下における適用の可能性を確認することができた。たわみのモニタリングにおいては、車両重量とたわみの間に線形相関がある状況をモニタリングデータとして得ることができたことから、コンクリート桁橋の劣化を評価する技術としての可能性を確認することができた。

本橋梁は、外観としては劣化が進んでいる橋梁であったが、構造的には健全であったため、主鉄筋を切断して載荷試験を行ったものの、耐力が低下した状況におけるモニタリング技術の実証には至らなかった。

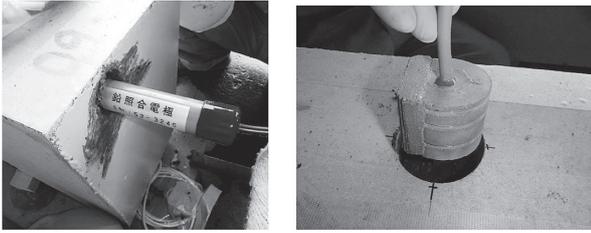
4. 塩害のモニタリング実験

4.1 室内実験

塩害劣化過程をモニタリングするために、6 種のセンサーを埋め込んだコンクリート桁の模擬供試体を用いた電食試験および塩分浸透試験を実施した。埋め込まれたセンサーによる計測とその結果の整理・分析、実際の鉄筋腐食状況との比較などにより、各モニタリング技術の適用性や課題の抽出を行った。使用したセンサー一覧を表 - 3 に示す。表 - 3 のセンサーの一部を写真 - 8 に示す。

表 - 3 塩害のモニタリング実験 (室内) に適用したモニタリング技術

指標	モニタリング技術 (センサー)
抵抗 (模擬鉄筋の破断)	① RFID 腐食環境検知システム
腐食電流, 電位, 抵抗など (模擬鉄筋の腐食)	② アノード・ラダー・システム ③ エクспанション・リング・システム
鉄筋位置の自然電位, 分極抵抗, 液抵抗	④ GBRC 腐食試験法 (埋設型ミニセンサー) ⑤ 鉛照合電極 PbM - 5 型
電位, 抵抗 (模擬鉄筋の腐食)	⑥ 腐食センサー CS4, 5



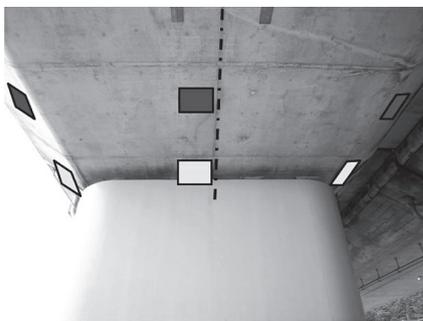
(a) 鉛照合電極 (b) 腐食センサー

写真 - 8 塩害モニタリング実験に用いたセンサー

この室内実験からは、鉄筋の腐食可能性について、電位を指標とする計測が安定していることが分かっており、電位の計測により、進展期相当の早期の鉄筋腐食の進行を捉えることが可能であると考えられた。抵抗を指標とする計測でも、本実験で用いたセンサーにより腐食の有無については捉えることが可能であった。

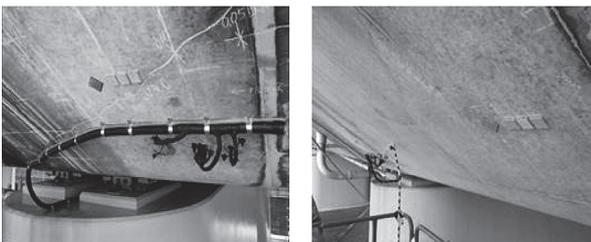
4.2 現場実証実験

室内試験で検証した結果をもとに、塩害環境下にある高速道路の高架橋を対象として塩分浸透や腐食を検知するセンサーを上部工に埋め込んでモニタリングを行い、実環境下でのノイズなどの影響を確認した。センサーは写真 - 9 に示す位置に設置した。現場実証実験においては、室内実験で用いたセンサーのうち、あと施工が可能な④ GBRC 腐食試験法（埋設型ミニセンサー）、⑤ 鉛照合電極 PbM - 5 型、⑥ 腐食センサー CS4、5 の 3 種類と、コンクリート表面の塩分付着状況を把握するためのワッペン試験片と薄板小型モルタルを採用した（写真 - 10）。



□ : 桁端部
(センサー, ワッペン, 薄板モルタル設置)
■ : 桁端から約 5m 離れた位置
(ワッペン, 薄板モルタル設置)

写真 - 9 センサー設置位置



(a) ミニセンサー・腐食センサー・照合電極 (b) ワッペン, 薄板小型モルタル

写真 - 10 センサー設置状況

塩害センサーを設置後、各センサーの測定値の安定性（自然状態におけるノイズの有無）について、ケーブルにテスターを接続した状態で数時間静置し、測定値の変化を確認した。その結果、自然状態において、測定値に変化を及ぼすノイズは存在しないことを確認し、あわせてスマートフォンなどの電磁波によるノイズの影響の確認も行ったが、測定値に影響はなかった。

5. おわりに

本稿では、RAIMS が橋梁維持管理へのモニタリング技術適用に向けて実施している研究活動を紹介した。実験で設置したセンサーのなかには、現在も現場でモニタリングを継続しているものもある。また、RAIMS では、センシングに関する実験のほかにも、センサーで取得したデータを収集する手法に関する実験や、集めたデータの蓄積・分析に関する検討を行っている。今後、これらの実験や検討の成果を踏まえて、現場でモニタリングシステムを導入しやすくするためのガイドラインを作成する予定である。

なお、本稿で紹介した実験は内閣府の「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) 遠藤義英, 皆川翔輝, 山本康弘, 山岸貴俊: 輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術開発の検討 (その 2) 低周波 3 軸加速度センサによる RC 床版の疲労損傷解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016
- 2) 葛西茂, 木下翔平, 小原孝之, 新井崇裕: 輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術開発の検討 (その 3) 実験モード解析法による疲労損傷評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016
- 3) 今井道男, 新井崇裕, 岩井稔, 古市耕輔: 輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術開発の検討 (その 4) 光ファイバーセンサによるひび割れ検知, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016
- 4) 新井崇裕, 岩井稔, 古市耕輔, 湯山茂徳, 李正旺: 輪荷重走行試験による RC 床版の疲労劣化に関するモニタリング技術開発の検討 (その 5) アコースティックエミッション法による疲労損傷の評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016
- 5) 高地透, 中野雅章, 米田大樹, 小原孝之: コンクリートの塩害モニタリングに資する鉄筋腐食促進試験, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016
- 6) 末崎将司, 松山公年, 米田大樹, 小原孝之: コンクリートの塩害モニタリングに資する鉄筋腐食促進試験, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016
- 7) 石田雅博, 山口岳思, 松尾健二, 廣江亜紀子: モニタリング技術の活用による橋梁維持管理の高度化・効率化, 土木技術資料第 59 巻, pp.18 ~ 21, 2017

【2017 年 8 月 1 日受付】