

橋梁の維持管理のための調査・監視技術の開発

中谷昌一・石田雅博・宇佐美 惣・大島義信

1. はじめに

土木研究所構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)では、橋梁の適切な維持管理を進めるため、メンテナンスで必要となる「検査技術」、「予測評価技術」、「補修補強技術」、「管理システム」について研究・開発を実施している。

平成26年度からは、戦略的イノベーション創造プログラム(以下「SIP」という。)が開始され、「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(プログラムディレクター：藤野陽三内閣府政策参与)の課題として筆者らも参画している。

本文では、高出力X線や中性子線を用いたコンクリート内部の可視化技術の開発、およびモニタリング技術の開発について紹介する。

2. 橋梁の維持管理の現状

現在、わが国では高度経済成長期以降に集中的に整備された橋梁やトンネルなどの社会インフラが、今後、急速に高齢化してくる問題に直面している。沿岸部などの立地環境の厳しい場所などでは、一部の橋梁で老朽化による劣化損傷が顕在化している。

ポストテンション方式のPC構造物では、近年グラウトの充填が十分に行われていない事例が確認されており、対策が進められている。シース内にグラウト未充填箇所が存在すると、雨水や塩化物イオン等がシース内に侵入する恐れがあり、図-1に示すようにPC鋼材が腐食、破断し、最終的に落橋という重大事故に繋がる可能性もある。また、古い床版では疲労により劣化し、図-2に示すように上面が土砂化して抜け落ちる事例も生じている。特に橋面から水が侵入すると、床版の劣化は促進される。

土木研究所では、東京大学および理化学研究所とともに、高出力X線や中性子線による橋梁の調査・評価技術について、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)に「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」が採択され、研究を実施している。



図-1 PC鋼材の腐食・破断

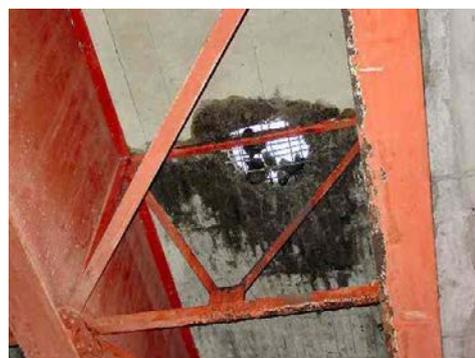


図-2 床版の抜け落ち

また、平成26年にモニタリングシステム技術研究組合(略称：RAIMS)が14機関により設立され、土木研究所も組合員として参加しモニタリング技術の実用化に向けた研究を行っている。

3. 高出力X線等による調査技術の開発

3.1 X線発生装置

これまで橋梁調査で用いているX線源はその出力が300keVまでであり適用限界厚さは30~40cm程度といわれていること、厚い部材の場合は撮像に時間がかかることなど、従来の非破壊検査技術には限界があった。一方で、X線の利用を規定している放射線障害防止法の改正により、屋外で使用する場合、橋梁検査に限って4MeVまでの加速器の使用が認められた。本研究では、現場適用に向けて新たに950keV X線発生装置(以下「950keV機」という。)、および3.95MeV X線発生装置(以下「3.95MeV機」という。)の開発を行った。3.95MeV機の全体像を

図-3に示す。装置は、X線源、高周波発生装置、電源、水冷ポンプから構成されている。高出力の他装置に比べ重量が小さいのが特徴であり、既存の橋梁点検車に搭載可能なように、X線源等を200kg以下に抑えている。また、実橋梁への適用に向けて、X線源および検出器を連続的に移動できる専用のスキャン架台を作成している。

3.95MeV機は法的には放射線発生装置であり、橋梁への照射に限り一時的な使用場所の変更が認められている。しかし、これまで使用された実績はなかった。

本研究では、国内で初めて、3.95MeV機を用いた屋外での撮像実験を土木研究所内の撤去橋梁で実施した。図-4に示すようにX線発生装置を設置し、撤去桁の反対側に検出器を設置して撮影を行った。



図-3 3.95MeV X線発生装置

X線検出器としては、従来のフィルムよりも高感度なイメージングプレート (Imaging Plate : IP) および直接デジタル化できるX線フラットパネル検出器 (Flat Panel Detector : FPD) を用いた。

FPDにより得られたウェブ部の画像を図-5に示す。PC鋼材とスターラップ鉄筋の状況が撮影できた。ウェブ厚170mmに対し、3.95MeV機による画像は1秒程度で取得されており、定格出力3.95MeVの1/6であっても十分な撮像能力があると判断できる。下フランジ部の撮像を図-6に示す。部材厚が400mmにもかかわらず30秒程度で画像を取得することができた。

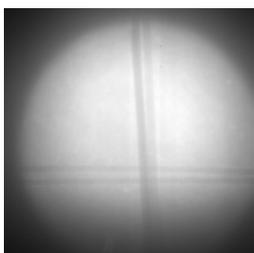


図-5 ウェブの撮影画像



図-6 下フランジの撮影画像

今後、さらに鮮明な画像を得られるように改良するとともに、実際の橋梁での実証試験を行っていく。



図-4 撤去桁の撮影状況

3.2 後方散乱および部分CT

現在、橋梁の調査のためにはX線源と検出器で対象物を挟み込む透過型撮影を実施している。しかし、実際の橋梁では透過型の撮影は困難な場所もある。そこで、物体から跳ね返ってきた後方散乱を検出してコンクリート内部を可視化する研究を実施している。

また、医療の分野ではコンピュータトモグラフィ (CT) による可視化が行われている。橋梁の調査・診断でもCTの活用が考えられるが、実際の橋梁では360°回転させることは不可能である。そこで、90°程度X線源と検出器を回転させて鮮明な画像が得られるように、部分CTの研究を行っている。

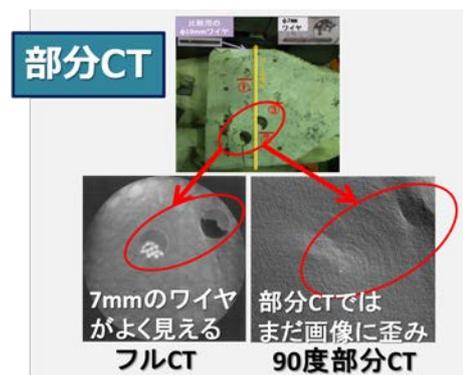


図-7 部分CTによる撮像

3.3 中性子線による調査技術の開発

橋梁の劣化は水の影響が大きい。中性子線はX線と特性が異なり、水のありかがよくわかる。そこで、中性子源を用いてコンクリート内部を調査し、床版内部の可視化や水の侵入の可視化を行うことにより、床版の土砂化の進行の確認、耐荷力の評価を行うこ

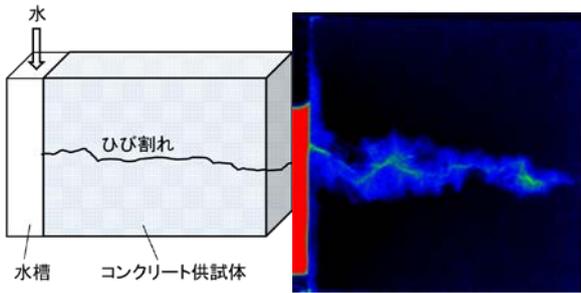


図-8 小型中性子源による水の可視化実験

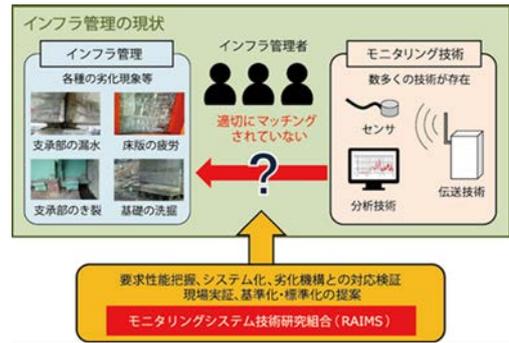


図-9 RAIMSの設立趣旨

とを目的として研究を行っている。

4. モニタリング技術

4.1 モニタリングシステム技術研究組合の概要

構造物の損傷・劣化のセンサによる計測技術や計測データを収集・伝送する通信技術、データを分析評価する技術等には、多種多様なものが存在する。しかし、これらの技術を、インフラの維持管理の現場で活用するための指針となる具体的な方法や考え方等が示されていないため、どのような構造・部位に適用すべきかをインフラ管理者が判断できず、本格的な現場導入に至っていないのが現状である。

こうした現状を鑑み、センサや通信・データ解析技術等を組み合わせて、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に、モニタリングシステム技術研究組合（RAIMS）が設立された（図-9）。

RAIMS は、早稲田大学の依田照彦教授を理事長とし、組合員として、インフラ管理者から土木研究所、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）、東日本高速道路（株）の4機関、補修・補強技術に精通したゼネコン（総合建設会社）分野から鹿島建設（株）、前田建設工業（株）の2社、構造物の劣化メカニズムや診断解析に精通したコンサルタント分野から国際航業（株）、日本工営（株）の2社、最先端のセンサや通信技術、データ分析評価システムの開発者である電気通信分野からは沖電気工業（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）の6社が参画しており、全14機関で構成されている。

各分野に精通した組合員が、専門的検証を行い、他の専門分野との総合調整を行うことで、より高度かつ実用的なモニタリングシステムの提案を図ることができると考えている。

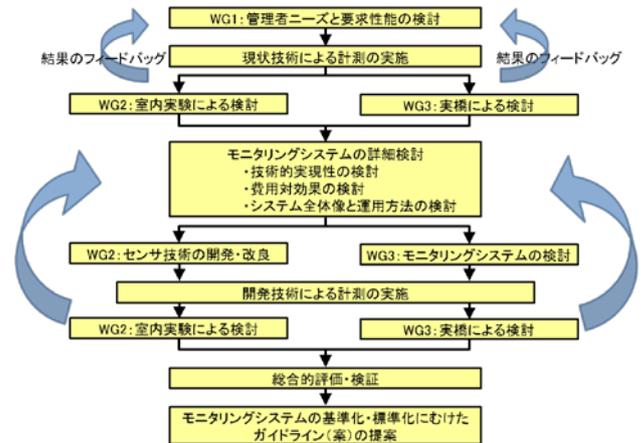


図-10 研究開発の流れ

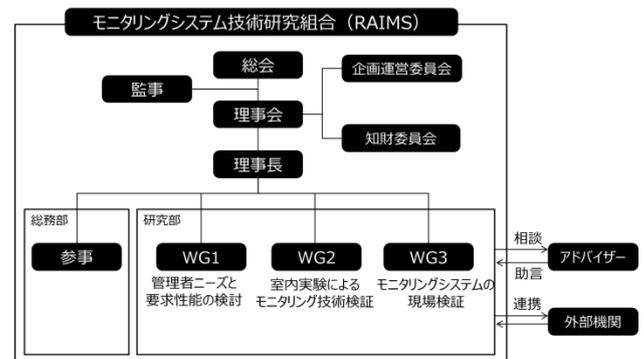


図-11 研究の実施体制

研究開発のフローを図-10に、研究の実施体制を図-11に示す。RAIMS では、研究のプロセスにあわせて三つのワーキンググループ(WG)を組織し、各WG間で連携して研究を実施する。具体的には、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を検討し(WG1)、試験桁等を活用した室内実験・解析などによりモニタリング技術の適用性の評価を行い(WG2)、適用性の確認がなされた技術は実際の高速道路や国道、地方道など現場での実証試験により、その信頼性を評価する(WG3)。WGでは各分野の専門家が総力を結集し、連携してニ-

ズの把握から現場実証までを一貫して行うことで、より完成度が高く、かつ管理水準に応じて国内に広く普及しやすいシステムの構築を目指していく。

4.2 モニタリングの室内実験

平成27年度は、床版の劣化損傷過程に対するモニタリングの室内実験と、塩害に関するモニタリングの室内実験を実施している。

床版のモニタリング室内実験では、床版模型に対して表-1に示すモニタリングの計測を行いながら輪荷重走行実験を実施し、床版が抜け落ちるまでの劣化損傷過程を計測している。

ひび割れの撮影解析では、床版下面のひび割れの進行をとらえることができた(図-12参照)。また、振動センシングでは、床版の損傷に伴い共振特性が変わり、振動特性に変化が生じていることをとらえることができた(図-13参照)。

今後、維持管理での活用場面に応じた適用性の検討に向けて、収集データの分析を行っていく。

5. おわりに

本稿では、SIP研究プログラムの一環として実施している高出力X線等を用いたコンクリート内部の可視化技術とモニタリングシステムの研究開発動向について紹介した。SIPは平成30年までのプログラ

ムであり、実装へ向けて現場で使いやすい技術開発を行っていく。

表-1 床版の室内モニタリング実験

指標	モニタリングシステム
たわみ変化	①小型無線加速度センサ ②3軸加速度、3軸傾斜センサ
動特性変化	③振動センシング
ひび割れ	④光ファイバ ⑤ひび割れ撮影、解析 ⑥画像センシング
内部損傷	⑦AE法

表-2 塩害の室内モニタリング実験

指標	モニタリングシステム
模擬鉄筋の切断(電気抵抗)	①模擬鉄筋型ワイヤレス腐食感知センサ
模擬鉄筋の腐食(腐食電流)	②複数模擬鉄筋型腐食感知センサ(新設用) ③複数模擬鉄筋型腐食感知センサ(後施工型)
鉄筋位置の自然電位、分極抵抗、液抵抗	④埋設型ミニセンサ ⑤照合電極
模擬鉄筋の腐食(電位)	⑥腐食センサ
塩分量	⑦EPMA・電位差滴定法

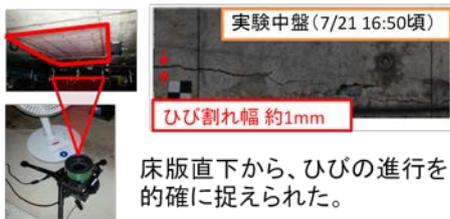


図-12 ひび割れ撮影

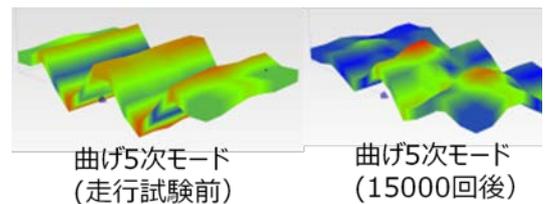


図-13 振動センシング

中谷昌一



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ長、工博
Dr.Syouichi NAKATANI

石田雅博



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
Masahiro ISHIDA

宇佐美 惣



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Osamu USAMI

大島義信



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Yoshinobu OOSHIMA