

撤去 PC 橋梁を用いた臨床研究 — 維持管理技術の開発 —

木村 嘉富*

今後急速に高齢化する道路橋を適切に維持管理していくためには、維持管理技術の高度化が不可欠である。土木研究所構造物メンテナンス研究センターでは、維持管理技術の開発を行っていくために、撤去橋梁部材等を用いた研究を「臨床研究」と称して行っている。損傷が生じた PC 桁の診断技術を確立するために、撤去 PC 桁の荷重試験を実施した。鋼材腐食が生じた桁では、主として PC 鋼材の断面減少により曲げ耐力、せん断耐力の低下を説明できることを確認するとともに、コンクリートのひび割れによる耐力・剛性への影響について、ひび割れパターンごとに調査している。このような鋼材腐食やコンクリート内のひび割れ状況を調査するための非破壊検査技術について、土木分野以外の多様な機関とも連携して開発している。このほか、劣化予測手法高度化のための実橋梁での塩分付着状況調査や道路橋の管理におけるモニタリングの在り方等についても撤去桁や実橋梁での調査を通じて取り組んでいる。

キーワード：撤去橋梁、荷重試験、鋼材腐食、ひび割れ、非破壊検査、モニタリング

1. はじめに

平成 25 年 6 月 5 日、社会資本整備審議会道路分科会道路メンテナンス技術小委委員会において、「道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて」と題した中間とりまとめが行われている¹⁾。そこでは道路構造物の適切な維持管理のためには、図 - 1 に示すメンテナンスサイクルを構築すべきとし、必要な技術として、「現状の点検等の信頼性の向上や負担軽減を図るための非破壊検査技術等の開発や現存する技術の掘り起こし、構造物の劣化傾向の把握や予測、長期的耐久性に関する研究、ICT を活用した点検・調査結果の効率的な整理・保存あるいは変状等のモニタリ

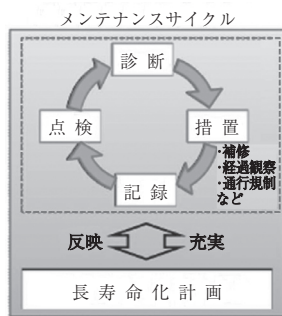


図 - 1 道路のメンテナンスサイクル¹⁾

ング技術、さらには補修材料や補修補強技術」を示している。また、これらの技術開発を、国が中心となって土木研究所等の研究機関との連携や産学との協働によって取り組んで行くことが必要であるとしている。

土木研究所構造物メンテナンス研究センター (CAESAR) では、平成 20 年の設立以降、道路橋の保全に必要なこれらの技術開発を進めている。ここで、実際の橋の状態は、設計時の構造、施工状況のほか、供用後の荷重状態や周辺環境、管理状況によって大きく異なってくる。このため、劣化構造物の維持管理に関する実用的な技術開発に際しては、模型実験によるメカニズムの解明だけでなく、実際に劣化損傷した構造物での研究が不可欠となる。このような研究を「臨床研究」と称し、撤去部材の荷重試験や解体調査、実橋梁での計測等、さまざまな取組を行っている (図 - 2)²⁾。ここでは、これらの取組の中から PC 橋の維持管理技術に関わる開発状況を報告する。



図 - 2 CAESAR の臨床研究事例²⁾



* Yoshitomi KIMURA

独立行政法人 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

2. 損傷による PC 桁の耐荷性能への影響

2.1 鋼材腐食による影響

PC 桁において塩害等により PC 鋼材が腐食・破断した

場合、曲げ耐力やせん断耐力の低下が懸念される。このような損傷が生じた PC 桁の耐荷性能の評価法を確立するため、人工的に鋼材腐食を生じさせた供試体についての載荷試験³⁾や、実際に鋼材腐食が生じた撤去桁の載荷試験を行っている。

写真 - 1 は、塩害により架け替えられることとなったポステン PCT 桁橋の事例である。写真中の G1 桁を土木研究所に運搬し、載荷試験を実施した。詳細は文献 4) をご覧いただきたい。この桁は、終点側では PC 鋼材の破断が確認されるなど著しく損傷している一方、起点側では比較的軽微と、その損傷状態が大きく異なっていた。このため、両端部付近を対象とした載荷試験を実施した。その結果、残存プレストレスは外観の損傷程度に応じて異なっていること、せん断ひび割れ発生荷重については計算値と実験値とに乖離があること、最大荷重はプレストレス減少率相当に PC 鋼材の断面減少が進行していたと仮定した場合の曲げ耐力の計算結果と一致したことなどを確認した。さらにこの桁において定着部を切断した後に載荷試験を行い、PC 鋼材が破断した断面から離れた位置での耐荷力の評価法についても提案している。



写真 - 1 相見川海浜橋

2.2 コンクリートのひび割れによる影響

既設の PC 橋においては、鋼材は健全であるものの、コンクリート自体にひび割れが生じているものが認められる。

原因は ASR や凍害等いくつか考えられるものの、結果としてのひび割れは、その発生部位・形態により表 - 1 に分類できる。撤去橋梁等においてこれらのひび割れが認められた桁の載荷試験を行い、コンクリートのひび割れが耐荷力等へ及ぼす影響を調査している。

(1) 下フランジ下面におけるひび割れ

写真 - 2 は単純 PC プレテンション床版橋において、桁下面に橋軸方向の多数のひび割れが認められた事例である。橋梁諸元を表 - 2 に、橋梁一般図を図 - 3 に示す。プレテンション方式の PC 桁では、プレストレスは鋼材とコンクリートの付着により導入されている。このような桁でコンクリートに橋軸方向のひび割れが生じた場合、表 - 1 下段に示すように、鋼材の腐食や付着切れによる剛性・耐荷力の低下が懸念される。

この橋梁が河川改修に伴う架替えにより撤去されることとなったため、ひび割れ性状の違いによる耐荷力への影響

表 - 1 コンクリートのひび割れの影響

概要図	ひび割れによる懸念事項
<p>上フランジ</p>	<p>コンクリートの強度低下?</p>
<p>ウェブ</p>	<p>重ね梁的な挙動?</p>
<p>下フランジ</p>	<p>鋼材腐食・付着切れ?</p>



写真 - 2 中川橋側道橋

表 - 2 橋梁諸元

橋梁名	中川橋側道橋
路線名	国道 8 号 (富山県)
橋梁形式	単純 PC プレテン床版橋 (3 連)
橋長 (桁長)	33.54 m (9.97 + 9.97 + 13.5 m)
竣工年	昭和 52 年 (竣工後 33 年経過)
適用基準	JIS A5319-1963 (竣工図面より)
撤去理由	河川改修に伴い平成 23 年 1 月撤去

を確認することを目的として、写真 - 3 に示す第 1 径間より桁下面にひび割れの少ない G6 桁とひび割れの多い G3 桁を切り出し載荷試験を実施した⁵⁾。載荷試験前の桁中央付近の桁下面のひび割れ状況を写真 - 4 に示す。ひび割れ密度は G6 桁で 6.5m² と、G3 桁で 25.3m² であった。

JIS に示された載荷試験方法を参考に、支間 9 m で 2 点支持 2 点曲げ載荷試験を行った。その結果、図 - 4 に示すとおり、両桁において剛性やひび割れ発生荷重、曲げ破壊荷重に大きな違いは認められず、JIS で保証するこれらの荷重に対して 2 割程度大きな値となっていた。

載荷試験終了後に桁を切断して調査したところ、写真 - 5 に示すとおり、ひび割れが多く発生していた G3 桁においてもひび割れ深さ、ならびに中性化深さは PC 鋼材位置に達していなかった。また、腐食による断面欠損も認められなかったため、本ケースにおいてはひび割れによる耐荷力の低下に至らなかったと考えられる。

○ 特集 / 調査報告 ○

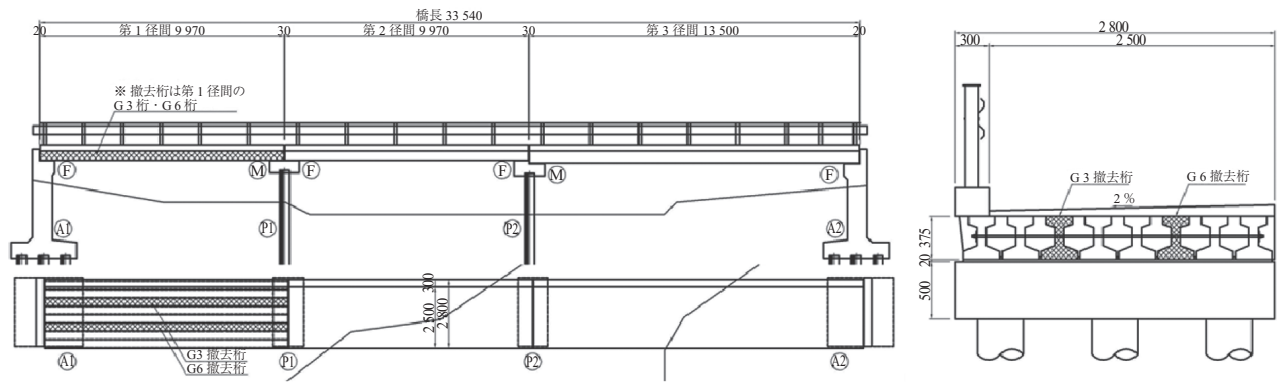


図 - 3 橋梁一般図 (撤去桁位置)

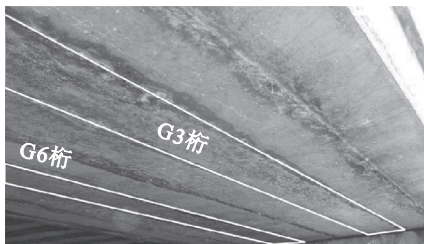


写真 - 3 桁下面の状況

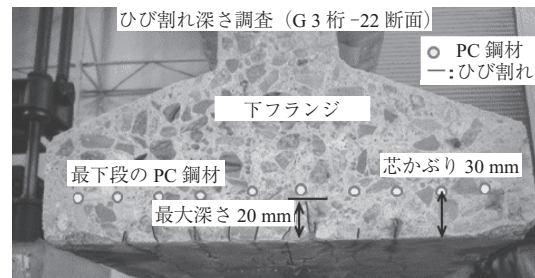


写真 - 5 桁切断面の状況

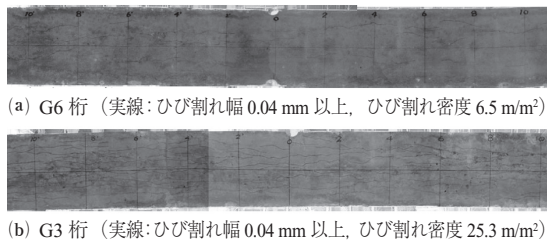


写真 - 4 桁中央部下面のひび割れ状況



写真 - 6 主桁ウェブのひび割れ

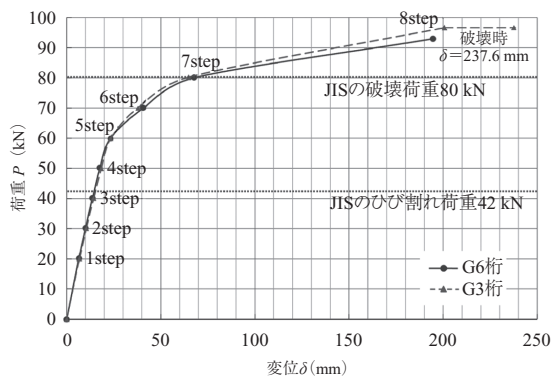


図 - 4 荷重試験結果 (荷重 - 変位)

ただし、中性化深さはひび割れの少ないG6桁に比してG3桁では大きくなっており長期的には鋼材腐食が懸念されること、さらには、今後ひび割れが進行した場合には付着切れによる耐荷力の低下が生じかねないことから、このようなひび割れが生じた桁では、管理上の配慮が必要である。

(2) ウェブにおけるひび割れ

写真 - 6 は、PC プレテン中空床版橋において、主桁の

下面のみならずウェブにおいても橋軸方向ひび割れが認められた事例である。ひび割れは桁全長にわたっており、幅 2 mm 以上のものもあった。ウェブに発生したひび割れが表 - 1 の中段に示すように部材全体を貫通していた場合、荷重に対してひび割れ部でずれ変形が生じることにより重ね梁状態となり、剛性や耐力が低下する懸念がある。

本橋においては、ひび割れ部よりコアを採取しその深さを調査したところ部材を貫通するまでには至っておらず (写真 - 7)、せん断補強筋の破断も認められなかった。



写真 - 7 コアのひび割れ状況

このため、荷重車による静的載荷試験により橋の挙動を確認するとともに、ひび割れの進展を抑制する防水対策を実施したうえで供用を継続している。詳細については文献6)をご覧ください。

なお、本橋の場合は供用を継続するため載荷荷重の範囲でしか挙動を確認できていない。今後、このようなひび割れによる耐力力への影響について、模型供試体の載荷試験も含め、検討していく予定である。

3. 診断のための非破壊検査技術の開発

3.1 CAESAR での非破壊検査技術の開発

損傷が認められたPC橋の健全性の診断のためには、前述のように、コンクリート内のひび割れ状況や、PC鋼材の配置、腐食状況を把握する必要がある。非破壊検査技術の一つであるX線透過法ではこれらの情報を得ることができ、また、コンピュータモグラフィ（CT）技術を用いることにより複雑な内部構造を可視化できる可能性がある。

現在橋梁調査で用いているX線源はその出力が300 keVまでであり、適用限界厚さは30～40 cm程度といわれている。一方、X線の利用を規定している放射線障害防止法においては、橋梁にかぎって屋外で4 MeVまでの加速器の使用が認められており、東京大学等と連携して高出力X線源によるコンクリート橋検査技術の開発に取り組んでいる。

X線源として、上坂ら⁷⁾が開発した可搬型3.95 MeVを用いた。全体像を写真-8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、X線源等を200 kg以下に抑えている。

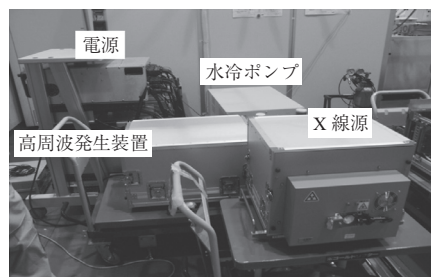


写真-8 3.95 MeV ライナック全体像

開発装置の基本性能を確認するため、撤去橋梁より切り出したプレストレストコンクリート桁の下フランジ部（写真-9）を撮影した。この部材の寸法は40 cmであり、従来の装置では撮影時間に1時間程度を有していたが、わずか1秒で写真-10の画像を得ている。この桁はポストテンション方式による桁であり、一つのシース内に直径7 mmのPC鋼線が12本配置されている。写真-10は1方向からの撮影であるため、各シース内のPC鋼線は、3本しか確認できていない。また、撮影中心から離れたシース③では、本数までは確認できない。

写真-11は上記とは異なるX線発生装置（光子発生技

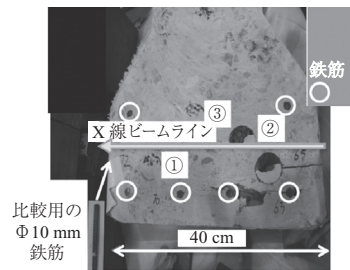


写真-9 撮影対象（PC桁下フランジ部）

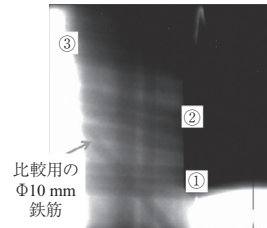
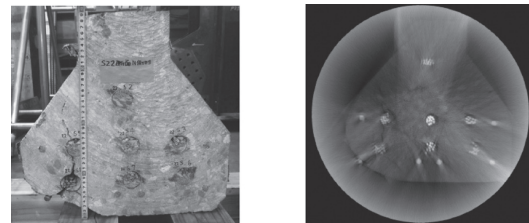


写真-10 X線撮影画像（撮影時間1秒）



(a) 撮影対象部材 (b) CT画像
写真-11 高出力X線によるPC桁の撮影

術研究所で開発)により撮影した結果である。2.1で紹介したポストテンPC桁の下フランジ部を切り出し、ターンテーブル上で0.5度ずつ回転させて720枚撮影し、CT技術で断面を構成したものである。厚さは40 cmもあるが、撮影時間は1枚あたり2.5秒、全体でも30分である。写真よりシース内のPC鋼材の各素線の配置状況やコンクリートのひび割れも確認できている。

なお、実橋においては、装置をどのように回転させて撮影するのか、かぎられた回転角度でどの程度の情報が得られるのかなどの課題はあるが、PC橋の診断高度化には不可欠な技術であり、取り組んでいるところである。

3.2 他機関での技術開発支援

CAESARでは関係機関と連携して自ら技術開発を行うほか、民間企業や他の研究機関での技術開発を支援する活動を始めている。

(1) 臨床研究用撤去部材の提供

非破壊検査技術の開発に際しては、実構造物レベルでの適用性の確認が不可欠であるが、これを開発者が独自に準備するのは困難である。このため、CAESARが保有している臨床研究用撤去部材（写真-12）を性能検証のために提供している。具体的な部材や調査実施上の留意事項はCAESARのウェブサイトに掲載しているの、ご覧ください⁸⁾。

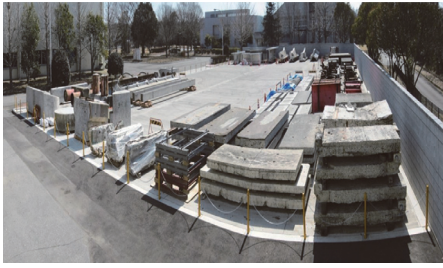


写真 - 12 臨床研究用撤去部材保管施設

(2) CAESAR メンテナンス技術交流会

平成 23 年 8 月に、施設管理者と産業界・学界の技術者・研究者が会する場として、図 - 5 に示す CAESAR メンテナンス技術交流会を設立した。この技術交流会は関係者が意見交換を行うだけでなく、CAESAR が実施する実橋梁での調査や撤去部材の載荷試験の機会を利用できるところに特徴がある。

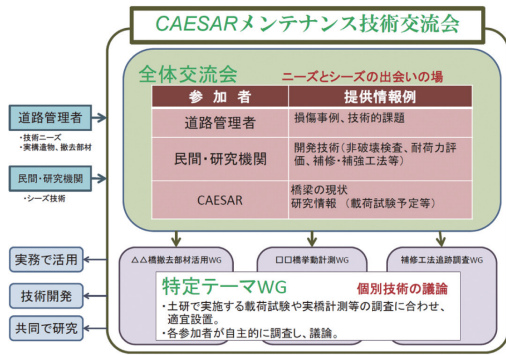


図 - 5 CAESAR メンテナンス技術交流会

非破壊試験に関しては、2.2(2)で紹介した PC 橋におけるひび割れ深さの調査やポステン PCT 桁におけるグラウト充填状況調査を実施していただいている。これも含め、技術交流会の概要やこれまでの活動については、ウェブサイト等^{9, 10)}で紹介している。

4. 劣化の進行予測手法

塩害においては、損傷が軽微な段階で対策を行うのが効果的である。そのためには劣化の進行を適切に予測する必要があるが、塩害の劣化進行についてはその予測手法が提案されているものの、実構造物でのデータが不足しているのが現状である。このため、沖縄県、沖縄県建設技術センターと「沖縄県離島架橋 100 年耐久性検証プロジェクト」を立ち上げ、塩害に関するデータを取得している¹¹⁾。

図 - 6 はその一例である。同じ橋梁であっても位置により表面付着塩分量が大きく異なっており、コンクリート中の塩分調査においては、その箇所を選定が重要であるといえる。このようなデータの蓄積により劣化予測手法の高度化を進めているところである。

5. モニタリング技術

道路橋の管理においては定期的な目視による点検を行う

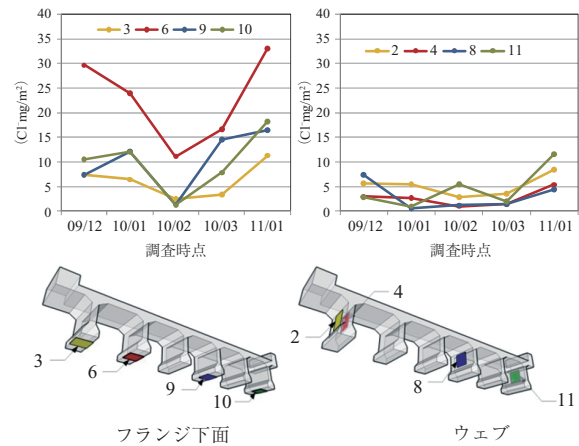


図 - 6 表面付着塩分量

ことを基本としている。これを補完する技術として、ICT を活用した変状モニタリング技術への期待が高まっている。道路橋におけるモニタリングは、重大な損傷が認められた場合に、必要な対策を実施した後、損傷の進行を検知するという目的のためにすでに実施されている。これに加えて、変状の発生を検知するモニタリング技術について各分野から提案されている。地震や洪水時の損傷を早期に検知する、あるいは、現在の目視による定期点検を補完、あるいは、代替するというものである。

部材の損傷を検知する手法として、振動特性の変化により着目する方法がある。この手法の有効性を確認するため損傷橋梁等で計測を行っている。

(1) 被災橋梁での振動計測¹²⁾

東日本大震災で発生した津波によって甚大な損傷を受けた普代水門管理橋(写真 - 13)を対象に、振動特性を計測した。4 径間のうち、左岸側の 2 径間が落橋した。落橋を免れた第 3 径間では最大 300 mm の残留たわみが生じ、写真 - 14 に示す様に地覆部の圧壊や多数の曲げひび割れが発生していた。第 4 径間においても 80 mm の残留たわみが生じていた。



写真 - 13 普代水門管理橋

この橋梁において、各主桁上に重錘を落下させ、8 等分点に設置した加速度計により振動数を計測した。その結果を図 - 7 に示す。健全時の解析結果に対して、第 3 径間では曲げ 1 次や 3 次で 30 % 程度、第 4 径間では曲げ 3 次で 20 % 程度低下していた。損傷状況写真が示すとおり、すべての主桁がコンクリート部材としての終局状態に達する程度の損傷が生じており、このような重篤な損傷であれ



(a) 地覆部が圧壊 (b) 主桁に多数の曲げひび割れ
写真 - 14 第3径間の損傷状況

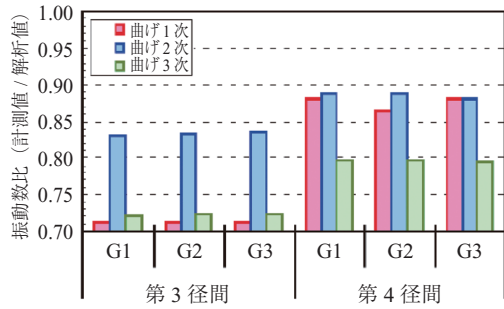


図 - 7 健全時の解析値に対する固有振動数の比

ば振動特性の変化により検知しうることが確認された。

(2) 撤去桁載荷試験での振動計測

コンクリート部材の損傷の進行による振動特性の変化を把握するため、2.2(1)で紹介した撤去PC桁の載荷試験の際に振動特性を計測した。載荷試験の各載荷ステップの除荷後にハンマー打撃により加振し、卓越振動数を測定した。

結果を図 - 8 に示す。図中に載荷試験の荷重 - 変位関係とともに、載荷前に対する振動数の低下率を示している。図より、曲げひび割れ発生前の段階で振動数の若干の低下が認められた。曲げひび割れ発生による振動数の変化は認められなかったが、部材が大きく変形した最終載荷時では、曲げ1次で約13%、曲げ2次で約5%の振動数の低下となった。

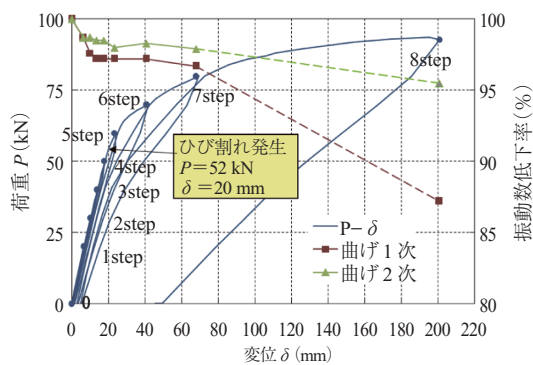


図 - 8 PC桁載荷試験中の振動数の変化

ここで示したのは力学的損傷を受けた場合の測定事例であり、振動特性の変化に着目したモニタリングの可能性を検討するためには、たとえば塩害のように内部鋼材が腐食・破断した場合の変化などについても計測が必要である。

6. おわりに

わが国の道路橋の4割を占めるプレストレストコンクリート橋は、本来耐久性に優れた橋梁構造である。高度経済成長期に建設されたこれらの橋梁が一斉に高齢化を迎えるなか、戦略的な維持管理、すなわちシナリオを明確にした維持管理が不可欠となる。すでに各管理者において長寿命化修繕計画が策定され、それに基づいて管理されつつあるが、より実効性のあるものとするためには、点検、診断、措置、記録といったメンテナンスサイクルの各段階での技術の高度化が不可欠である。CAESARでは臨床研究に基づき戦略的なメンテナンスのための技術開発を進めているところである。このような知見は既設橋の管理のみならず、新設橋へも反映させるべきであり、機会を捉えて提供してまいりたい。

PC橋の臨床研究の一部については、プレストレスト・コンクリート建設業協会との協力協定に基づき実施しており、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 国土交通省：道路メンテナンス技術の中間とりまとめについて、http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000357.html, 2013
- 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター：CAESARの臨床研究事例、<http://www.pwri.go.jp/caesar/profile/pdf/rinsyou.pdf>, 2013
- 花井拓他：コンクリート道路橋の維持管理技術の向上に向けて - 腐食PCはりのせん断耐力評価 -, 土木技術資料 Vol.54, No.1, pp.46-51, 2012
- 松沢政和, 木村嘉富, 本間英貴, 花井拓：塩害を受けたポストテンションPCT桁の臨床研究 - PC鋼材の付着特性に着目した載荷試験 -, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.3, 2013
- 青柳聖, 木村嘉富, 和田圭仙, 花井拓：軸方向ひび割れが生じたプレストレストコンクリート撤去橋の載荷試験, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2013, pp.349-352
- 玉越隆史, 柴田稔, 木村嘉富, 和田圭仙：アルカリ骨材反応が生じたPC橋の調査, 診断と対応事例, 土木技術資料 Vol.55, No.7, pp.55-56, 2013
- Mitsuru Uesaka et.al: "950 keV, 3.95 MeV, 6 MeV X-band Linacs for Nondestructive Evaluation and Medicine", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, NIMA53737, S0168900211014586, 10.1016/j.nima. 2011
- 非破壊検査技術開発のための撤去橋梁部材の提供について：<http://www.pwri.go.jp/caesar/profile/04-05-01.html>
- CAESARメンテナンス技術交流会：<http://www.pwri.go.jp/caesar/event/kouryukai.html>
- 木村嘉富：CAESARメンテナンス技術交流会活動, 第6回CAESAR講演会, 2012
http://www.pwri.go.jp/caesar/lecture/pdf05/lecture_006.pdf
- 花井拓, 仲嶺智, 砂川勇二, 木村嘉富, 田中良樹：離島架橋を塩害から守る, 土木技術資料, 第53巻, 第2号, pp.36~39, 2011
- 松沢政和, 木村嘉富, 本間英貴, 花井拓：津波により甚大な損傷を受けたPC橋の振動計測, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2013, pp.211-214

【2013年10月30日受付】