

## 非破壊検査・モニタリング技術の開発 —これまでの取組みと今後の方向性—

木村嘉富\*

### 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員会より、「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公表された。そこでは道路構造物の適切な維持管理のためには、メンテナンスサイクルを構築すべきとし、必要な技術として非破壊検査技術、劣化傾向の把握や予測技術、変状等のモニタリング技術、補修補強技術等を示している。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の必要性を示している。

これに先立つ3月21日に国土交通省から示された「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」においても、新技術の開発・導入として、非破壊検査等による点検・診断技術やモニタリング技術を示し、現場での試行的な導入やインフラでの実証を推進するとされている。

構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)では、道路橋の保全に不可欠となるこれら非破壊検査技術やモニタリング技術の開発を進めるため、個別技術についての民間企業等との共同研究の他、研究機関との連携協定等により研究開発に取り組んできた。また、新しい活動として、「メンテナンス技術交流会」や「非破壊検査技術開発のための撤去部材の提供」も開始している。本報文ではこれらの取組みの中から幾つか紹介する。

### 2. CAESARにおける非破壊検査技術の開発

道路橋の保全のための非破壊検査技術の開発についてこれまでも本誌で適宜紹介してきた<sup>1),2)</sup>。例えば、鋼橋における疲労亀裂の検出技術として、鋼床版デッキプレートを対象とした超音波探傷法による技術<sup>3)</sup>を開発し、既に幾つかの実橋橋梁で用いている。コンクリート橋の耐力評価のためには内部の鉄筋やPC鋼材の配置や腐食状況を把握する必要がある。X線透過法でこれらの情報を得ることができ

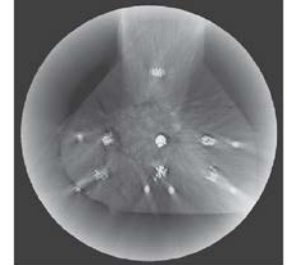


写真-1 高出力X線によるPC桁の撮影

図-1 可搬型中性子イメージング装置  
(理化学研究所提供)

るが、現在橋梁調査で一般的に用いられている装置では部材厚さ20cmが実用上限界である。このため、東京大学等と連携し高出力X線源による検査技術の開発に取り組んでいる<sup>2)</sup>。

写真-1は光子発生技術研究所で開発された装置により撮影した結果である。載荷試験を行ったポステンPC桁の下フランジ部を切り出し、ターンテーブルに載せて撮影した。0.5度ずつ回転させて撮影した720枚の画像より、CT技術で断面を構成したものである。厚さは40cmもあるが、撮影時間は1枚当たり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、限られた回転角度でどの程度の情報が得られるのか等の課題はあるが、実用化されればコンクリート構造物の診断が飛躍的に高度化される。

構造物を透過観察する技術として、X線と同様放射線の一種である中性子線を用いる手法がある。中性子線を利用した検査技術については、理化学研究所と協力協定を締結し、取り組んでいる<sup>1)</sup>。開発イメージを図-1に示す。現在、可搬可能な小型中性子源システムが理化学研究所内に整備され、橋梁部



写真-2 臨床研究用撤去部材保管施設



(a) 主桁側面 (b) コアのひび割れ状況  
写真-3 軸方向ひび割れが生じたPC橋

表-1 ひび割れ深さ調査結果

調査位置		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
ひび割れ深さ (mm)	iTECS法	30	30	30	40	50	50
	広帯域超音波法	47	38	56	42	62	60
	コア削孔	52	43 ↑	49 ↑	58	47 ↑	52

側面に幅1mmを超えるひび割れが全長にわたって生じていた。このため、(b)のようにコアによるひび割れ状況調査や荷重車による載荷試験を実施した。これらの調査に際し、技術交流会の会員に対して調査機会を提供した。ひび割れ深さ<sup>\*</sup>については、衝撃弾性波法であるiTECS法と広帯域超音波法の2種類の方法により測定された。これらの手法は、鋼球を打撃したときの衝撃波や探触子から発生した超音波がコンクリート中を伝達する際、ひび割れを回折するときの波形によりその深さを算出する方法である。

測定されたひび割れ深さを、コア削孔調査と併せ、表-1に示す。コア削孔調査においては、その幾つかはひび割れが途中で直径25mmの孔の範囲を外れている。その場合は表中の深さの数値の下に↑を付している。確認できた開口ひび割れの深さは52~58mmであり、非破壊検査により概ねその深さを捉えているといえる。なお、これは一つの測定結果であり、多様な状態での調査データを蓄積し、適用範囲や計測上の留意事項をまとめていく必要がある。

写真-4に示す撤去PC桁の載荷試験の際にも計測機会を提供した。レーザーを用いた変位計測、ひび割れ検知センサ、振動計測、全視野ひずみ計測が実施されている。これらの内、全視野ひずみ計測<sup>5)</sup>について紹介する。この手法は、載荷試験の際にカメラにより撮影したデジタル画像を処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることが出来る解析手法である。カメラを2台設置してステレオ撮影することで3次元計測も可能である。載荷試験中に得られた最大ひずみ分布図の

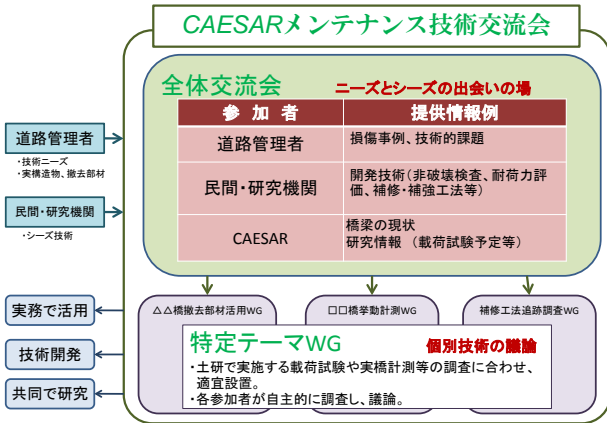


図-2 CAESARメンテナンス技術交流会

材等の撮影が可能となった。なお、理化学研究所とは、中性子線のみならずテラヘルツ光も含めた多様な光量子技術の活用へと、協力協定範囲を拡大している。

### 3. 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

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-2）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で、ご覧頂きたい<sup>4)</sup>。

#### (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-2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。

写真-3(a)に示すPCプレテン中空床版橋で、主桁

<sup>\*</sup>土木用語解説：非破壊検査技術によるひび割れ深さ調査



写真-4 撤去桁の荷重試験

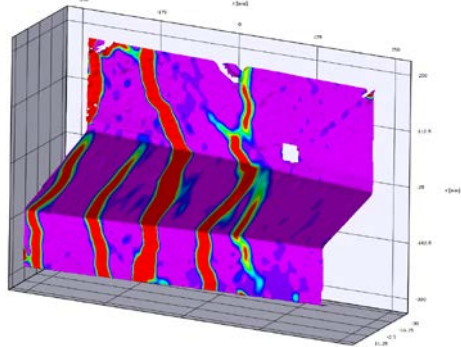


図-3 全視野ひずみ計測結果<sup>5)</sup>

一例を図-3に示す。荷重試験によりひび割れが発生した箇所でのひずみの集中が確認されている。通常の荷重試験で使用するひずみゲージでは測定点のみのデータしか得ることが出来ないが、この手法を用いることにより、三次元的な挙動を捉えることが可能となっている。荷重試験時の計測のみならず、実構造物での利用も期待される。

上記も含め、技術交流会の概要やこれまでの活動については平成24年度のCAESAR講演会で紹介している<sup>6)</sup>。

#### 4. モニタリング技術

##### (1)モニタリングの位置づけと課題

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既に実施している。これに加えて、変状の発生を検知するモニタリング技術が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。

土木研究所では大規模地震による橋の損傷を検知・判定できる技術として橋梁地震被災度判定シス

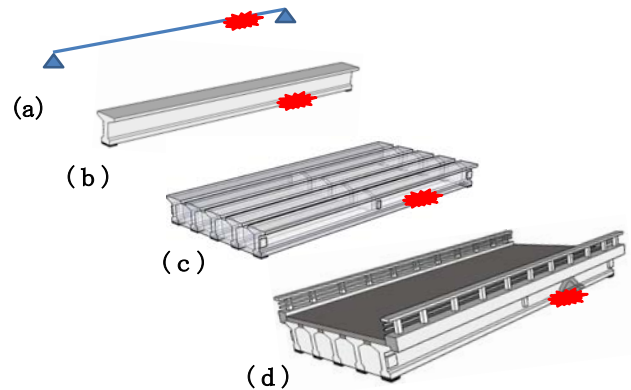


図-4 橋梁における損傷の影響



写真-5 普代水門管理橋

テムを開発している<sup>7)</sup>。橋脚の応答の周期が損傷によって変化する特性を利用して、橋脚天端に設置した加速度センサにより被災度を判定するものである。

このような部材の振動特性の変化から変状を検知する手法を、コンクリート橋に適用するには課題が多いと考える。図-4にイメージ図を示す。(a)の様に境界条件が明確な棒部材であれば、損傷による剛性の変化が振動特性の変化となって表れる。しかしながら、(b)のコンクリート桁の一部が損傷した場合には、曲げ剛性の変化が生じた段階で初めて検知が可能となり、また、橋梁では(c)の様に複数の主桁を横桁で格子状に連結し、(d)その上に床版や舗装、さらには地覆や高欄が設置されているため、局所的な損傷では振動特性の変化として表れにくいと想定される。

##### (2)力学的損傷を受けたPC橋での計測

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-5)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300mmの残留たわみが生じて、写真-6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80mmの残留たわみが生じていた。

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-5に示す。健全時の解析結果に対



(a) 地覆部の圧壊 (b) 主桁に多数の曲げひび割れ  
写真-6 第3径間の損傷状況

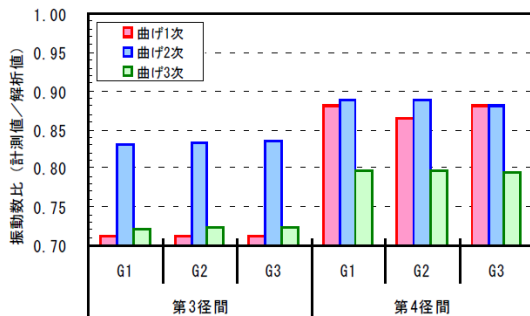


図-5 健全時の解析値に対する固有振動数の比

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、全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であれば、振動特性により耐荷性能の低下を検知しうることが確認された。

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、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-6に示す。図中に載荷試験の荷重-変位関係と共に、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。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、例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。

## 5. おわりに

道路橋のメンテナンスサイクルを効率的、効果的に実施していくためには検査・計測技術の高度化が不可欠である。そのためには他分野の技術も含めて幅広く情報を収集し、適用可能性を確認していく

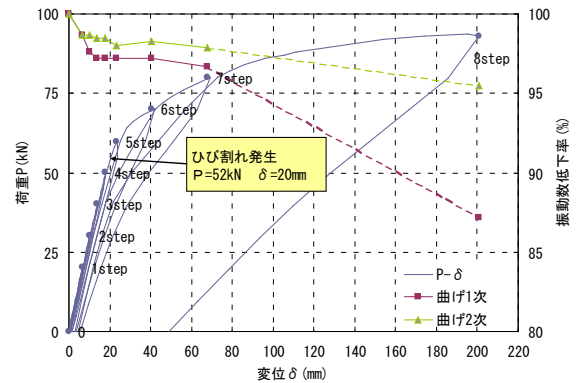


図-6 PC桁載荷試験中の振動数の変化

のが望ましい。ここで、検査・計測技術の開発に際しては、シーズ側が先行するという指摘もあり、道路橋管理の実務においてどのように位置づけるのか、得られた情報に基づきどのように診断するのか、どのような措置を講ずるかといった、ニーズ側との合致が不可欠である。CAESARがその役割を果たしたい。

## 参考文献

- 1) 木村嘉富、村越潤、高橋実：既設構造物管理高度化のための非破壊検査技術開発における異分野との連携、土木技術資料、第53巻、第1号、pp.8～11、2011。
- 2) 桑原徹郎、木村嘉富、村越潤、星隈順一：道路橋の長寿命化に向けた非破壊検査技術の開発、土木技術資料、第55巻、第1号、pp.32～35、2013。
- 3) 村越潤、木村嘉富、高橋実：鋼床版デッキプレート進展亀裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)、土木研究所資料第4138号、2009.3。
- 4) 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>
- 5) 出水亨他：光学的全視野計測法によるコンクリート部材のひび割れ発生・進展過程の可視化と定量的評価、第4回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム、2012.8。
- 6) 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、2012.8。  
[http://www.pwri.go.jp/caesar/lecture/pdf05/lecture\\_006.pdf](http://www.pwri.go.jp/caesar/lecture/pdf05/lecture_006.pdf)
- 7) 堺淳一、運上茂樹：インテリジェントセンサを用いた橋梁地震被災度判定手法の開発に関する研究、土木研究所報告、第213号、2009。

木村嘉富\*



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 上席研究員  
Yoshitomi KIMURA