

## 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

木村嘉富\* 村越 潤\*\* 高橋 実\*\*\*

### 1. はじめに

高度経済成長期に整備された我が国の社会資本が今後一斉に高齢化を迎える中、維持管理費・更新費の増大や深刻な劣化損傷の多発が懸念される。このため、損傷が比較的軽微な段階から計画的に対策を施す予防保全型管理への転換や、重篤損傷発見時の適切な措置判断による安全確保が必要となり、そのための技術開発が求められている。

既設構造物の状態を把握するための検査技術は維持管理の基本となる技術であるが、現在土木分野で用いられている非破壊検査技術では、得られる情報に限界がある。一方、例えば医療分野における検査技術のように他分野での技術開発はめざましいものがあり、CAESARでは他分野も含めて多様な機関と連携しながら研究を進めているところである。本稿では、道路橋管理の高度化・効率化を図るための非破壊検査技術の開発に関し、中長期の研究開発を視野に、他分野と連携して進めている事例として、独立行政法人理化学研究所(RIKEN)との連携による中性子を利用した構造物内部の構造を可視化する技術について紹介する。また、独立行政法人土木研究所では、現在、独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)と包括的な研究協力・連携協定を締結しているが、情報交換を進めている各種技術のうち応力発光体を利用した構造物の表面ひずみを可視化する技術について紹介する。

### 2. 中性子を利用した内部構造の可視化技術

#### 2.1 内部構造可視化の必要性和技術の現状

構造物に損傷が見つかった場合、損傷による構造物の性能への影響を評価し、適切な措置を決定する必要がある。写真-1は、塩害により損傷した鉄筋コンクリート床版橋の下面の状況であるが、鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剥離してい

る。このような損傷に対して、橋として必要な安全性を有しているのかを診断するために、部材としての耐荷力を評価しなければならない。鉄筋コンクリート部材の耐荷力評価のためには、コンクリート強度、鉄筋径・強度や配置状況といった建設段階の情報に加え、コンクリートのひび割れ位置や深さ、鉄筋の腐食状況を把握する必要がある。

鉄筋の状況を調査する方法としては、例えば電磁レーダ法があり、最近では三次元的に把握できる装置も開発されている。しかしながら、この手法はコンクリート中に送信された電磁波が電気的特性の異なる鉄筋で反射波を生じる性質を利用して探査する手法であり、その測定原理のために、配筋ピッチが密な場合や複数段配置の場合には測定に限界がある。また、プレストレストコンクリート橋の場合には、金属製シースで反射するためその内側のPC鋼材の状況を把握することは困難である。

反射法ではこのような限界があるのに対し、透過法により明瞭な透過画像を得ることが出来れば、コンピュータトモグラフィ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。透過法として用いている方法としてX線透過法があり、鉄筋の位置や直径、コンクリート中のひび割れ、シース内のグラウトの充てん状況まで得られるとされているが、コンクリート部材への適用限界厚さは、現状では30~40cm程度といわれている。



写真-1 塩害により損傷した橋梁

## 2.2 中性子線による透視技術

### (1) 中性子線

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。X線は原子内の電子との相互作用を生じるため原子番号が大きくなるにしたがって透過しにくくなるが、中性子線は電荷を持たず原子核との相互作用であるために透過性は原子核毎に異なっている。例えばX線が透過しにくい鉄を透過することができる一方、水素原子は透過しにくいことから、従来にはない検査技術につながる可能性がある。

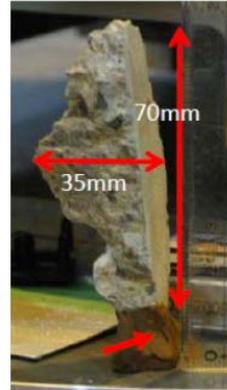
図-1に中性子ラジオグラフィの例を示す<sup>1)</sup>。供試体として長さ70mm、最大厚さ35mmのコンクリート片を用い、180度回転させて0.6度毎に撮影した300枚の画像を、コンピュータトモグラフィ技術を用いて三次元画像として解析されたものである。ここでは、透過結果より骨材とセメント分とに分離し解析することにより、コンクリートの内部構造まで描き出している。この他、水で大きく減衰するという特徴を利用し、コンクリートひび割れ部における水分移動を可視化した事例もある<sup>2)</sup>。

### (2) 道路橋透視の可能性

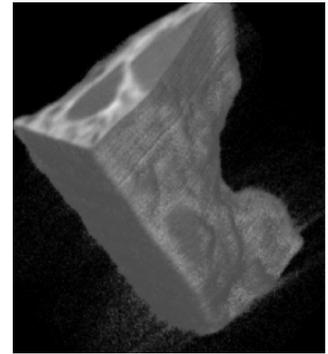
前項のような特性を有している中性子ラジオグラフィの原理を応用すると、橋梁を構成する部材について、X線では透過不可能な厚い部材での透視や、構成する材料分析、水や塩化物の浸透状況の把握など、多様なデータを取得できる可能性がある。しかしながら、現在国内で稼働している装置は、移動不可能な大型の装置が日本原子力研究開発機構や大強度陽子加速器施設(J-PARC)等数カ所に設置されているだけである。道路橋等の構造物検査に用いるためには、新たに小型で可搬型の装置開発が必要となる。

このため独立行政法人理化学研究所(RIKEN)では、小型中性子イメージングシステムについて、道路橋等の大型構造物のための可搬型検査装置、並びに、ものづくり分野での計測に使える据え置き型の装置の開発を対象とした検討委員会を設け、必要性、実現可能性、開発の妥当性等について検討している<sup>3)</sup>。筆者の一人も大型構造物応用分科会の主査として協力している。

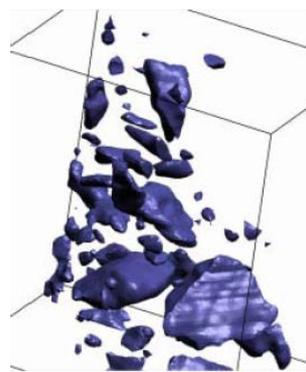
委員会での検討の結果、トレーラー搭載により移動可能な重量・寸法等の制約下で、道路橋等の



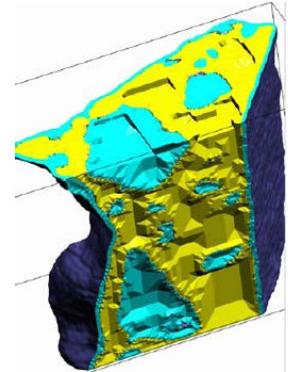
a) コンクリート供試体



b) 表面画像



c) 骨材



d) 骨材・セメント

図-1 中性子ラジオグラフィ例<sup>1)</sup>

大型構造物に対しても透過観察できる装置開発の可能性を確認した。ただし、実用化に向けた課題として、可搬型の中性子源の開発とともに、検出器や得られたデータの画像処理・解析手法の開発、関係法規の適合性等も提示されている。

### (3) 独立行政法人理化学研究所(RIKEN)との連携協力協定

上記委員会での検討結果を受け、昨年5月27日にCAESARは独立行政法人理化学研究所社会知創成事業イノベーション推進センター(RIKEN Innovation Center)と、小型中性子イメージングシステムの研究に関する連携協力協定を締結した。橋梁など大型構造物の内部を非破壊で検査・解析

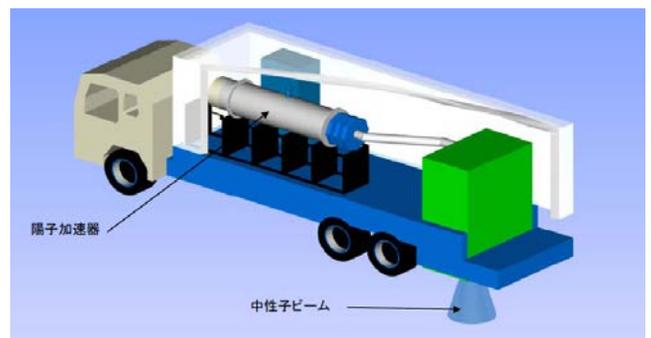


図-2 可搬型中性子イメージング装置<sup>3)</sup>

することを旨し、小型中性子イメージングシステムの研究推進や研究者の研究交流、施設・設備などの相互利用を行っていくこととしている。

実用的なシステム開発に際しては、両機関が有する技術のみでなく、幅広い機関における中性子ラジオグラフィに関する要素技術等を融合する必要がある。このため、活動のキックオフとしての合同シンポジウム「中性子による橋の透視への挑戦」を昨年6月30日に開催した。シンポジウムでは、構造物管理の立場からの非破壊検査へのニーズ提示の後、前記委員会の検討結果に基づいて提案した目指す検査装置(図-2)等を紹介している。シンポジウムの内容については、予稿集のみでなく講演内容の動画も含めてインターネットで公開しているため、CAESARのホームページ<sup>4)</sup>をご覧頂きたい。

中性子ラジオグラフィ技術については(1)で紹介した計測事例があるものの、実際の道路橋のような複雑な構造や劣化部材に対しては情報が不足している。このため、橋梁撤去に併せて切り出した損傷部材を用いた測定により、道路橋への適用性や得られる情報の種類、精度などについてのデータを取得していく予定である。

### 3. 応力発光体を利用したひずみの可視化技術

#### 3.1 構造物のひずみ可視化の維持管理への応用

写真-2は、鋼橋における溶接部から疲労き裂が発生した事例を示している。鋼部材のき裂は、通常、き裂発生に伴う塗膜のひび割れとして検出されるまで目視点検での発見は難しく、また、塗膜割れ後も進展初期では点検時に見逃す可能性や、単なる塗膜割れと識別困難な場合がある。さらに、溶接内部の未溶着部や溶接欠陥から発生するき裂に関しては、き裂が表面に進展する、もしくは間接的な変状が現れるまでは発見は困難である。このような疲労き裂が発生する部位について、予めひずみの情報が把握できれば、疲労損傷への対策検討に有用な情報が取得できる可能性がある。

また、損傷発見後においても、損傷原因、進展性状、対策方法等を検討する上で、き裂周辺の応力状態の計測が重要な判断材料の一つとして必要となることが多い。現在、実挙動の把握にはひずみ計測が一般的に用いられているが、センサの特性上、き裂発生部位やその周辺の複雑な応力状態



写真-2 道路橋鋼床版に発生した疲労き裂の例

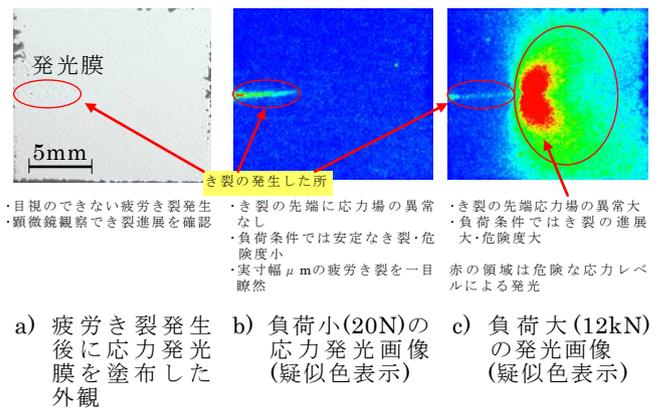


図-3 構造体に隠れたき裂と応力集中程度の検出例<sup>5)</sup>  
(独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)提供)

を把握するといった面的な計測には不向きな点がある。

#### 3.2 応力発光体による可視化技術

他分野の新技术として、力が作用すると発光する物質(以下、応力発光体)を利用することにより、目に見えない構造物表面のひずみを可視化する技術が独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)において開発されている<sup>5)</sup>。

応力発光体の材料は、粉末状のセラミックス微粒子であり、ある程度の速度を持った弾性変形領域の微小な変形により繰り返し強い発光を示す。これを含有する塗料を被検査物の表面に塗布することにより、塗布した範囲に生じる応力集中の状況を可視化することができる。具体的には、それぞれの微粒子が被検査物表面に生じる力学的信号を光信号に直接変換するセンサの役割を果たし、この発光強度の経時変化性状から被検査物に発生したひずみの状態を推定するというものである。図-3は、金属板に塗布した応力発光体による目視できないき裂とき裂先端のひずみの集中度合いの可視化の例を示したものである。このように応力発光体はき裂の検



図-4 コンクリート橋ウェブに塗布したシートによるひび割れ箇所の発光の様子<sup>6)</sup>  
(独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)提供)

出や応力性状の面的な情報の計測に適している。また、この技術はコンクリート構造物においても、活荷重等による変動応力に伴う目視困難なひび割れの開閉口の面的な可視化も可能であり、実橋での計測事例も報告されている(図-4)<sup>6)</sup>。

このような可視化技術としては、既に超音波探傷法、赤外線法<sup>7)</sup>等、各種の非破壊検査技術の研究開発が進められているが、応力発光体についても、橋梁の維持管理における適用を探るための研究開発が期待される。

#### 4. おわりに

構造物の検査技術は、対象とする構造物及び事象によりその規模や計測すべき項目、必要とされる精度等の要求性能が異なることから、これまではその管理者を中心に個別に開発が行われてきた。しかしながら、その基礎技術には共有できる部分があり、萌芽的技術も含め幅広い技術、先行分野からの技術を融合させることが効率的である。このため、CAESARでは従来の枠にとらわれることなく、多様な機関と連携し、技術開発を行っていくこととしている。

なお、検査技術の開発に際しては、実構造物での適用性確認が不可欠となるが、道路橋のような大型構造物を民間企業や研究機関で準備することは困難である。このため、CAESARでは管理者と連携し、実構造物を利用した検査技術適用性確認の場を提供しているのをご利用頂きたい。

#### 参考文献

- 1) Shin-ya Morita et al. : Neutron radiography for the structural simulation using VCAD system, ICANS XIX meeting, 2010.3
- 2) 東京理科大学理工学部建築学科兼松研究室ホームページ：  
<http://www.rs.noda.tus.ac.jp/manabu/nr/nr.html>
- 3) 独立行政法理化学研究所：小型中性子イメージングシステム検討委員会報告書、2010.1.
- 4) 独立行政法人土木研究所CAESARホームページ：  
<http://www.pwri.go.jp/caesar/index-j.html>
- 5) 徐超男：応力発光体を用いたセンシング「見えない」危険を可視化する技術一、セラミックス、44、No.3、2009.
- 6) 篠川俊夫、徐超男他：応力発光体を用いた実橋梁ひずみ計測実験、土木学会第65回年次学術講演会、VI-157、2010.9.
- 7) 例えば、阪上隆英：疲労き裂の検出技術、土木学会第11回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、2008.8.

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

村越 潤\*\*



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  
Jun MURAKOSHI

高橋 実\*\*\*



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 主任研究員  
Minoru TAKAHASHI