社会インフラストラクチャーの予防保全と非破壊検査技術*

Preventive Maintenance of Social Infrastructure and Non-destructive Testing

山形 豊** 木村嘉富*** 須長秀行**

Yutaka YAMAGATA, Yoshitomi KIMURA and Hideyuki SUNAGA

Key words

social infrastructure, preventive maintenance, non-destructive testing, structural simulation, neutron imaging

1. 高齢化する社会資本

道路橋等の社会資本は、私たちの日々の生活を支えるとともに、産業活動の基盤となっている。これら社会資本は、戦後の高度経済成長とともに着実に整備されてきたが、今後、高齢化が急速に進行していく。平成 21 年度国土交通白書¹⁾に建設後 50 年以上経過する社会資本の割合が示されている。図 1 に示すように、2009 年度と 2019 年度を比較すると、例えば、道路橋では約 8% が約 25% へ、水門等河川管理施設は約 11% が約 25% へ、港湾岸壁では約 5% が約 19% へと急増する。

高齢化というと人の高齢化が思い浮かぶ。日本人の高齢化率に着目してみると、高度経済成長期にあった 1960 年当時の高齢化率は約 6% で、それから 50 年経た 2010 年は 23% に達した。社会資本と比較すると、人口で 50 年の間に進行した高齢化が、社会資本の場合、今後の 10 年間で急速に進行してしまう。また、20 年後では、人口の場合約 32% であるが、社会資本では約 50%、つまり半数の構造物が、建設後 50 年経過したものになってしまう。こうした急速な高齢化にいかに対処していくかが、今後の日本の大きな課題である。

高齢化の急速な進行による課題の一つとして、維持管理費、更新費の急増があげられる。平成 23 年 2 月に国土審

議会政策部会長期展望委員会より「国土の長期展望」中間とりまとめが公表された²⁾。そこでは、将来的な国土の重要課題について検討するため、2050 年までの国土の姿が定量的に描き出されている。現在ある国土基盤ストックについて、耐用年数を迎えた構造物を同一機能で更新すると仮定した場合、維持管理・更新費は今後とも急増し、図 2 に示されるように 2030 年ごろには現在と比べ約 2 倍になると予想している。紙面の制約上、図は省略するが、国・都道府県・市町村の事業主体別での比較も行っており、特に市町村事業での増加が大きく、また、都道府県別では人口が少ない県において 1 人当たりの維持管理・更新費の増

図 1 進行する橋梁の高齢化

図 2 維持管理・更新費の将来見通し²⁾

*原稿受付 平成 23 年 11 月 7 日

** (独) 理化学研究所超精密加工技術開発チーム/
ものづくり高度計測技術開発チーム (埼玉県和
光市広沢 2-1)

*** (独) 土木研究所構造物メンテナンス研究センタ
ー (茨城県つくば市南原 1-6)

山形 豊

1993 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工
学専攻修了。博士 (工学)。専門分野は超精密

加工、微細加工、中性子イメージング。

木村嘉富

1987 年長岡技術科学大学建設工学専攻修了。修士 (工学)。専門分野は道路
橋、コンクリート、検査技術。

須長秀行

1982 年早稲田大学理工研究科修士課程修了。博士 (工学)。専門分野は塑性
加工、CAD/CAE。

図3 ミネアポリスの落橋事故

図4 直轄国道における橋梁の破断事例

加が顕著となっている。

わが国の財政状況は、長期的に見ると少子高齢化社会の到来から税収は減少するとともに、高齢者の増加による医療・介護・年金のための費用増加による社会保障負担費の増大が見込まれる。そのため、橋梁などの社会資本に投じられる予算も厳しいものになることが予測される。図2では、社会資本関係予算総額の将来推計は示されていないが、仮に現在の予算規模が確保されたとしても、新設改良はもちろん、現在ある社会資本を同一機能で更新することすらできなくなってしまうことが読み取れる。

高齢化によるもう一つの課題として、重大な事故や致命的な損傷等が発生するリスクが飛躍的に高まることがあげられる。2007年8月に米国のミネソタ州の鋼トラス橋が供用中に突然崩落（図3）し、多数の死傷者を出す重大事故が発生している³⁾。比較的充実した点検が行われていた米国でのこの惨事は、補修補強の遅れが致命的な事態を招くことを示唆している。日本国内でも、2006年には鋼桁橋に疲労を原因とする長さ1mを超える亀裂の発生が確認され、また、2007年にはトラス橋の部材が破断する（図4）³⁾など、幸いに落橋には到らなかったものの通行止めせざるを得ない重篤な損傷事例が報告されている。

米国では、こうした問題が日本よりも早期に発生している。「荒廃するアメリカ」といわれた80年代、全米ではスクールバスで通学する学童50万人が重量規制のため橋を渡れずに迂回路を通り、5000人から1万人の学童は、橋

図5 予防保全対策を考慮したライフサイクルコストの低減⁴⁾

の手前でいったんバスを降り、歩いて橋を渡っていたことが報告されている。日本でも身近な橋が使えなくなる同様な事態が起これ、交通機能が確保できない最悪な状況が予想される。また、地方公共団体が管理する道路橋のうち、老朽化や損傷などにより通行止めや重量制限などの規制が講じられている橋は、平成22年4月時点で1766橋にも上っている。

今後急速に進行する社会資本の高齢化により、以上のように、増大する維持管理・更新費と重大な損傷発生リスクの高まりが懸念される。これに対応するために、損傷等が発生した後に対処するという「事後的管理」から、事前に点検し、異常が確認または予測された場合、致命的欠陥が発現する前に速やかに措置するという「予防保全的管理」への転換が進められている（図5）⁴⁾。こうした方針は、大震災後も大きな変化はなく、適切な予防保全的管理により地震等の天災による被害も最小限に抑えることが可能であると考えられている。

これまでの橋梁等の掛け替えの実績を分析すると、現状の橋梁等の機能を維持しつつ新たな橋梁を構築するには、仮橋の設置や前後用地の取得なども含め新設時の約2.7倍以上の事業費が必要となるとの報告もある⁵⁾。高齢化する橋梁をすべて更新するのではなく、高齢化する橋梁を老化させない手段を講ずることにより対処していくべきである。国道の橋で現在使われているもっとも古い橋は、1888年に建設された国道34号線の湯野田橋、また東京の日本橋は、1911年建設で全国第3位の長寿命橋である。すなわち、早期に橋梁等の損傷状況を診断し手当をする（予防保全）することで橋梁等の社会インフラの長寿命化を図ることが可能となる。これにより、更新が必要な社会インフラの量を減らすことが可能となり、さらには総合的な維持管理費を低減することが可能となる。

図6 日本国内における主な橋梁の構造とその構成方法

2. 橋梁の種類と構造および劣化発生事例

橋梁の構造は、交通量やスパンなどのさまざまな要因に適合するため、さまざまな構造が用いられている。比較的小型の橋梁には、床版橋が、中規模の橋梁には、桁橋やトラス橋が用いられている。また、比較的大型の構造には斜張橋や吊橋が用いられている。橋梁の数のみから見ると、桁橋が最も多く用いられている。一方で、こうした橋梁の部材の構造からみると、鉄鋼材料を主に使用した鋼橋、鉄筋コンクリートを主に使用したRC（Reinforced Concrete）橋、プレストレストコンクリートを用いたPC（Prestressed Concrete）橋が主なものである。現在の橋数の割合でみると、PC橋が約39%で最も多く、次いで鋼橋が39%でほぼ同数となっている。RC橋は18%と比較的少ない。その他には、木製橋などが含まれる（図6参照）。

鋼橋は比較的古くから使用されている形式で、現在でも引き続き建設されている。PC橋は1955年ごろより使用され始めた比較的新しい技術であり、コンクリート部材に鋼鉄製ワイヤー等を用いて与圧（プレストレス）を与えることにより、圧縮に強く引っ張りに弱いというコンクリートの弱点を克服し、長尺の梁を安定して構築できるようにしたものである。RC橋は、鉄筋で補強したコンクリートにより橋梁を構築するもので、コンクリートが苦手とする引っ張り応力を鉄筋により補強するものであるが、橋梁の重量が増加しやすいため、採用事例は小規模な橋に限定される。

RC橋においては、コンクリートを補強する鉄筋が橋の強度を維持する上で非常に重要である。通常は、コンクリ

ートにより鉄筋が保護されており腐食が発生することは少ないが、さまざまな理由により腐食が発生すると問題となる。こうした腐食の原因としては、クラックによる水分の侵入、アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れ、海水や凍結防止剤による塩分の浸透などがあげられる。PC橋梁においては、コンクリートに圧縮応力を与えるPC鋼材が極めて重要な役割を担っている。このためPC鋼材の腐食は、PC橋梁に時として致命的な影響を与える。PC鋼材は通常は、その外側にシースと呼ばれる管が埋設されており、腐食を防止するためにグラウトと呼ばれるコンクリート（骨材を含まない）を注入し密閉されている。グラウトの充填不良や施工後の亀裂により水分が侵入した場合には、PC鋼材が腐食する場合があります。重大な問題と考えられる。鋼橋は、もっとも古くから用いられており、腐食や亀裂などの劣化事例も多く発生している。しかし、多くの場合は、外観の目視検査が有効に利用できると考えられる。一方で、鋼橋と床板などのコンクリートを組み合わせた構造の場合は、目視検査が不可能な場合が多く、非破壊検査の新たな手法が求められる。これ以外にも、近年軽量化等のために用いられるようになってきた合成床板と呼ばれる構造は、コンクリートと鋼材を複雑に組み合わせた構造をしており、検査技術を確立しておく必要がある。

3. 非破壊検査技術の現状

こうした橋梁等の大型構造物の健全性を確認するためには、何らかの非破壊的手段により検査を行う必要がある。小径のコアリングやサンプル採取によりコンクリートの状態を診断する手法（微破壊検査）も多く利用されているが、すべての状況で適応が可能なわけではない。こうした非破壊検査にもっとも多く利用されているのが、目視による外観検査である。亀裂、さび、腐食の状況などを近接目視によって検査を行うが、橋梁点検車等を利用できない状況では足場を組む必要があり、また、塗装されている鋼橋などでは塗装を剥離しないと点検が困難な状況も多く、必ずしもすべての劣化状況を診断できるわけではない。目視検査を補う方法として、超音波による検査、インパクトエコー法、電磁誘導による方法などが利用されているが、検査可能なコンクリート等の深さや解像度の点において必ずしも十分な性能が得られているとはいえない。特に、前述のPC橋梁のシース鋼材の検査に関しては、50 cm以上のコンクリートの内部に埋設された鋼材の状態を検査しなければならず、有効な手法がほとんどないのが現状である。

こうした状況下で、コンクリートの深部を2次元的に観察できる手法としては、放射線を用いた非破壊検査手法がある。PC橋梁が供用開始されたころ、欧州ではシース鋼材の破断による落橋事故が発生し、シース鋼材を検査する非破壊検査技術として高エネルギーX線による透過観察手法が多く検討された⁶⁾。数MeVの高エネルギーX線を小型電子線線形加速器により発生させ、これを用いて数十

cm 以上の橋梁の透過観察を行っており、シース鋼材の比較的鮮明な画像を得ることに成功している。しかしながら、当時は高エネルギー X 線の検出にフィルムを用いていたため撮影時間が非常に長かったことや、有効な放射線遮蔽が準備されず、かなり広大な範囲において人員を退避させないと安全な検査ができなかったため、郊外での一部の検査にしか使用されなかったと報告されている⁷⁾。

4. 新しい非破壊検査技術とシミュレーションによる予測

こうした状況に鑑み、著者らの研究グループでは、中性子線を用いた大型構造物の非破壊検査手法とこれらの検査データを基にした計算機による構造力学シミュレーションにより、橋梁等の損傷状況を把握し、さらにその安全性、寿命等を予測する手法について検討を行っている。中性子は電荷をもたない粒子であり、多くの物質に対する透過率が非常に高いという性質を有している。その一方で、水素に対する反応断面積が大きく、水や油といった軽元素の可視化に優れている。このため、コンクリート内部の鋼材とその周辺に存在する水分の可視化、コンクリートと鋼材が組み合わせられた合成床板の透過観察などに大きな力を発揮すると考えられる。さらに、X 線は主に物質中では電子と相互作用するため、遮蔽を行うには電子の多い物質、すなわち重い元素を利用することが効率的である。このため、多くの場合は鉛などの重金属が遮蔽に利用される。一方、中性子は水素との反応断面積が非常に大きく、またホウ素やカドミウム、ガドリニウムといった特定の元素に対する吸収断面積が極めて大きいことから、ホウ素化ポリエチレンなどの比較的軽い材料により効果的に遮蔽することが可能である。こうした点を考慮すると、中性子線は前記のような高エネルギー X 線による大型構造物の非破壊検査に伴う問題を解決できる可能性がある。図 7 は、モンテカルロ法による粒子・重イオン輸送計算コード (PHITS⁸⁾) により 3 MeV の中性子線を用いて 50 cm 厚さのコンクリート内の鋼材シースの透過観察をシミュレーションした結果である。飛行時間分析法 (TOF 法) により散乱された中性子線と透過した中性子線を分離することにより鮮明なイメージを得ることができる可能性が示唆されている。また、中性子線を遮蔽するためにホウ素化ポリエチレン板を用いてその背面の放射線線量を推定したところ、厚さ約 70 cm で $1 \mu\text{Sv/h}$ 程度まで低下させられることが示された。同様の計算を 3 MeV の高エネルギー X 線で行った場合、厚さ約 30 cm の鉛が必要となるが、これらの重さを比較すると前者が約 0.9 t なのに対して後者は、約 3 t となり、放射線遮蔽を大幅に軽量化できる可能性が示唆された。これらのことから、中性子線を用いた橋梁等の非破壊検査手法は、高エネルギー X 線に対して一定の利点を有すると考えられる。これらの結果を基に、著者らのグループでは、小型陽子加速器を搭載した可搬型中性子線の計画を検討している。これは、4 MeV を超えない加

図 7 PC 橋梁のシース鋼材の中性子線による透過観察シミュレーション

図 8 可搬型中性子線の想定図

図 9 橋梁全体のモデリングと構造力学シミュレーション

速器であれば、必要な許可を得れば移動して利用可能であることが、放射線障害等防止法第 10 条および関連規定により記載されており、可搬型中性子線の実現可能性が考えられるためである。図 8 にその想定図を示す。

また、こういった新しい非破壊検査手法により得られた情報は、そのままでは橋梁等の予防保全に役立てることが困難である場合が多い。そのため、こうした情報を橋梁等の構造モデルに反映させ、部分的な損傷による橋梁全体の強度への影響がどの程度になるかを定量的に予測し、補修の程度とその必要性についての的確に判断する必要がある。こうした予測を実現するために、理研で開発されてきた VCAD システム⁹⁾を用いた「現物」にもとづくシミュレーション技術を活用し、レーザー計測装置等により得られた構造情報や図面の情報と組み合わせることで、構造力学的

なシミュレーションを実施することを検討している（図9）¹⁰⁾。

5. ま と め

橋梁などの社会インフラストラクチャーの維持管理は、今後の日本の社会基盤を維持する上で極めて重要な課題であると考えられる。こうした大規模な課題は、問題が顕在化してから対策を行っても短期間に解決できるものではなく、長期的な視野に立って十分な準備を進める必要がある。橋梁等の予防保全に必要な非破壊検査技術として、著者らのグループは中性子線による非破壊検査とこれにより得られたデータを用いた計算機によるシミュレーション技術を検討しているが、これだけが唯一の解決手段ではない可能性もある。しかしながら、こうした革新的な技術開発を進め、実用的に非破壊検査に利用可能となるまでには、多くの時間を必要とする。そのため、早期に目標を定めて技術開発を進めてゆく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 平成 21 年度国土交通白書, (2010).
- 2) 「国土の長期展望」中間とりまとめ, 国土審議会政策部会長期展望委員会「国土の長期展望」中間とりまとめ 2011 年 2 月.
- 3) 深澤淳志: 高齢化する我が国の橋梁の長寿命化に向けて, 橋梁と基礎, **42**, 8 (2008) 9-16.
- 4) 平成 22 年度国土交通白書, (2011).
- 5) 東京都橋梁長寿命化検討委員会答申「橋梁の戦略的予防保全型管理に向けて」2008 年 4 月.
- 6) X. Derobert et al.: Comparison of NDT Techniques on a Post-tensioned Beam before Its Autopsy, NDT & E International, **35** (2002) 541-548.
- 7) Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures, Training Course Series No.17, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2002).
- 8) <http://phits.jaea.go.jp/indexj.html>
- 9) VCAD システム研究 2010～VCAD システムの未来～(独)理化学研究所, ISBN978-4-9904431-2-2 (2010).
- 10) 中性子による橋の透視への挑戦, 理化学研究所/土木研究所 合同シンポジウム, (2010).