

特集報文：道路構造物の点検への取組み

橋梁における非破壊検査技術の性能評価

小原 誠・玉越隆史・間渕利明

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に整備してきた道路構造物の多くが老朽化の時期を迎えている。道路橋においても、高度成長期頃より急速にその数を増やしてきており、これらが毎年確実に高齢化していく。国土交通白書2014によれば10年後には供用後50年以上になる道路橋の比率が約18%から約43%に達すると推計されている。

このような道路構造物の高齢化の進展とそれと連動するように増えつつある劣化や深刻な損傷の顕在化なども踏まえ、平成26年には道路法の一部改正が行われ、関連の省令等により全国で約70万橋ある2m以上の全て道路橋について1回/5年の近接目視を基本とする定期点検が義務づけられた。

道路橋の定期点検では、全ての部位を知識と経験を有する技術者が近接して目視により確認する方法が現時点では信頼性と経済性を高い次元で両立できることから基本となっている。しかし、道路橋の場合、地中部や部材内部などの構造的に外観目視が困難な部位も多く、このような目視困難箇所においても健全性に影響する様々な異常が生じている。また、コンクリートの塩害などのように、進行すると最終的には外観に異常が現れる劣化現象や損傷においても、異常が部材内部にとどまっている段階で早期に異常の発生や進展を検知することができれば、深刻化させる前に予防的措置が行えるなど、安価で確実に延命化が行えるものもある。

このような背景から、近年、外観目視では検知困難な部材内部の異常の検出を目的とした様々な非破壊検査技術が開発され、道路橋の点検や調査の際に活用される例も多くみられる。

一方、実橋で点検や調査に非破壊検査を用いる場合には、実際に壊して内部を見られないため、最終的な正解との照合が行えないことが通常であり、検査技術の信頼性や精度が点検や調査の品質に大きく影響を与えることがある。そのため、導入する技術

が当該現場の条件で、どの程度の検出精度が期待できるのか、あるいは様々な現地の条件がどのように検査精度や結果の信頼性に影響するのかについては、これを予め正確に把握して検査結果の評価に正しく反映しなければならない。

しかし、これまでのところ道路橋の検査への適用性の観点から、様々な原理や仕様の非破壊検査技術の性能を評価できる統一的手法は確立していない。そこで国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では国立研究開発法人土木研究所や検査技術を有する民間企業等と共同研究を行い、非破壊検査技術の性能評価方法について研究を進めてきた。本稿では、これらの研究の内、主に道路橋のプレストレストコンクリート部材の内部損傷の検知を目的とした非破壊検査技術に対する性能評価方法について検討した結果について紹介する。

2. 非破壊検査技術の性能評価方法の検討

2.1 検討方針

性能評価方法の検討にあたって、できるだけ多くの非破壊検査技術を公平に選定するため、本研究では非破壊検査技術を有する共同研究者を公募し、最終的に産学18者（13グループ）の非破壊検査技術開発者と国総研の共同研究として実施した。表-1に性能検証方法の検討に用いた非破壊検査原理を示す。

表-1 検証対象とした非破壊検査原理

検査原理	振動	電磁波	音波	X線	打音	弾性波	赤外線	空圧	超音波
原理概要	共振周波数の低下から損傷を判断	反射したマイクロ波の時間を距離に換算し、損傷等の位置を特定	音圧の減衰率から損傷を判断	透過したX線の強度の温度差をフィルム画像で確認し損傷を判断	振幅値比(最小音圧÷最大衝撃力)からコンクリート厚さ、損傷を判断	内部損傷を反射又は透過した弾性波を計測し、損傷を判断	赤外線カメラで熱画像にし、表面の温度差から損傷を判断	圧縮空気の反圧力の時間変化と流量から損傷を判断	超音波の反射波の強度から損傷を判断
対象損傷等	空洞、うき、ひび割れ	空洞、うき、ひび割れ、グラウト充填不足、鋼材位置	空洞、うき、ひび割れ	空洞、グラウト充填不足、鋼材の健全性	空洞、うき	空洞、うき、ひび割れ、グラウト充填不足、残存プレストレス	空洞、うき	グラウト充填不足	空洞

このように道路橋のコンクリート部材内部の異常検知に活用が期待出来る非破壊検査技術には原理や計測結果の処理アルゴリズムが異なる多くの種類のものがあり、今後も新技術の開発が見込まれる。そのため性能評価方法には、原理等の違いによらず普遍的に適用可能であることが求められる。そのた

め、本研究では、検査技術の原理や機器等の固有の条件に左右されないように、予め用意する供試体において検出対象となる様々な異常や検査環境を模擬し、これに対する検査結果から性能を評価する方法を開発することとした。

本研究では、検査対象を主に道路橋のプレストレストコンクリート部材としたことから、対象となる検査項目は表-2に示すとおり、部材に求められる性能に支障を及ぼす可能性のある損傷とした。

表-2 非破壊検査の性能評価のための検査項目

検査項目	検査内容
1) 鋼材配置・寸法	①PC鋼線の位置 ②PC鋼線(より線)の径 ③PC鋼線(より線)の本数 ④PC鋼線(素線)の径 ⑤PC鋼線(素線)の本数 ⑥鉄筋の位置 ⑦鉄筋の径
2) 鋼材の健全性	①PC鋼線の位置 ②PC鋼線の腐食状況 ③PC鋼線の断面欠損率 ④鉄筋の位置 ⑤鉄筋の腐食状況 ⑥鉄筋の断面欠損率
3) グラウト充填状態	①グラウト未充填(空洞)の位置 ②グラウト未充填(空洞)の寸法(縦、横、奥行き)
4) プレストレス量	①プレストレス量の位置 ②プレストレス量
5) 桁内部やPC鋼材定着部付近におけるコンクリートの充填不良	①コンクリート充填不良(空洞)の位置 ②コンクリート充填不良(空洞)の寸法(縦、横、奥行き)
6) コンクリートのうき、はくり、ひびわれ分布と深さ	①うき・はくりの位置 ②うき・はくりの寸法(縦、横、奥行き) ③ひびわれの延長 ④ひびわれの最大幅の位置 ⑤ひびわれの最大幅 ⑥ひびわれの最大深さの位置 ⑦ひびわれの最大深さ

2.2 事前評価項目

非破壊検査技術のほとんどは、様々なセンサー等で取得した計測データを様々なアルゴリズムのプログラムソフトで処理して異常の有無や変状の内容などの評価結果を出力するものである。しかしその処理過程が適正なものであるかどうかを検査時に確認することは極めて困難であり、ブラックボックスとなるデータ処理段階を経て実際と乖離した不適切な評価結果が誤って出力されてもそれを認識できないままとなる危険性も危惧される。

そのため、性能検証方法の必須要件として、以下の2つを求めた。

(1) 当該技術の原理や検査条件、キャリブレーションの方法、処理アルゴリズムが適正であることがある程度確認出来るための処理フローや評価結果の導出プロセスなどの情報を事前に明確にすること。

(2) (1)との関連性において、適用しようとする検査対象や性能評価の一環として実査する供試体に対する適用性や期待される検査精度、障害となる条件などの予測を事前に示すこと。

公募技術を中心に、非破壊検査技術の実態調査を踏まえて得られた、本研究で提案する主な事前評価項目を表-3に示す。

表-3 非破壊検査技術の事前評価項目

評価項目	詳細
計測原理	入力値、計測する応答、計測応答の処理方法、計測可能な損傷、計測精度
計測条件	計測機器寸法、環境条件の制約、計測姿勢、計測に必要な空間、計測面の平坦性、測定面の数(送受信機の有無)、計測位置特定のためのけがきの必要性、計測にあたっての許認可事項
計測前のキャリブレーションの必要性	キャリブレーションの方法、キャリブレーション所要時間、計測値の感度調整方法
計測手順	計測作業項目、計測手順、作業時間
計測値の出力	現地での計測結果の出力方法、現地での検査結果の表示の可否、計測位置の特定方法、計測当日に提出可能な計測結果及び検査結果
検査結果の報告	検査結果の作成期間、検査結果の報告方法、現地計測値と後日提出の検査結果の同一性の証明方法
実施体制	人員体制

2.3 予備情報の有無による検査能力

実際の道路橋のコンクリート部材内部の異常検知を行う場合、外観に異常の有無を推測出来るような徴候がないだけでなく、設計図書や完成図などが失われ、配筋状況なども明らかでないことも多い。このような情報量の相違が検査能力に及ぼす影響を明らかにするために、様々な損傷を内包した大型の模擬供試体を用いて対象損傷種別と損傷深さが同条件で配置箇所が異なる損傷を対象に予備情報(図面、外観調査結果)の有無による損傷の検知性能の検証を行った。

図面や外観調査結果の予備情報がある場合、鉄筋やPC鋼材の位置が特定でき、表面の損傷状態から内部損傷の推定がある程度可能となるため予備情報がない場合と比較して損傷の検知性能が高くなると予想した。しかし、表-4の検査結果のとおり、各検査原理において予備情報が有ることにより必ずしも損傷の検知が可能にはならず、検査原理や検査技術により影響が異なることが分かった。

表-4 予備情報有無による損傷の検知結果(模擬供試体)

対象損傷種別	検査対象損傷	検査原理	予備情報の有無	損傷の検知結果
空洞 □50mm	損傷A	電磁波①	無し	○
	損傷B		有り	×
	損傷A	電磁波②	無し	×
	損傷B		有り	○
グラウト 充填不足	損傷A	超音波	無し	○
	損傷B		有り	×
	損傷C	打音	無し	×
	損傷D		有り	○
	損傷C	電磁波①	無し	○
	損傷D		有り	×
	損傷C	電磁波②	無し	○
	損傷D		有り	×
	損傷C	電磁波③	無し	×
	損傷D		有り	○
損傷E	超音波	無し	○	
損傷F		有り	×	

※検査技術で「電磁波①～③」は異なる技術を示す

この影響が異なる要因として検査対象損傷以外の他の損傷の存在や検査対象の供試体の部材厚さ等が影響していることが考えられる。よって、様々な種別の損傷が複数入っている模擬供試体のような大型の供試体で検証を行うと、機器の基本的な特性の把握が困難であることが分かった。このため、検査

対象損傷の種別を1つにし、損傷パラメータ（損傷種別、損傷規模、損傷位置）や配筋が単純で検査性能に影響を及ぼす要因が少ない小型の要素試験体により基本的な性能の確認を行うことが合理的と考えた。

2.4 供試体の違いによる損傷検出能力

模擬供試体は人為的に再現した豆板等の異常箇所以外はコンクリートに劣化が生じていないため経年により表面が劣化した既設橋の部材と同じ性状にはできない。また人工的に模擬した空洞やひびわれなどの様々な内部損傷は非破壊検査技術の原理や検査能力との関係において実際の部材に生じるものは条件が異なっている可能性が高い。

そこで、模擬損傷を内包させた桁供試体（写真-1）と実橋から切り出した桁部材（写真-2）の両方に同じ条件で検査を行い、内部損傷の検知性能について比較した。図-1～2に結果の例を示す。

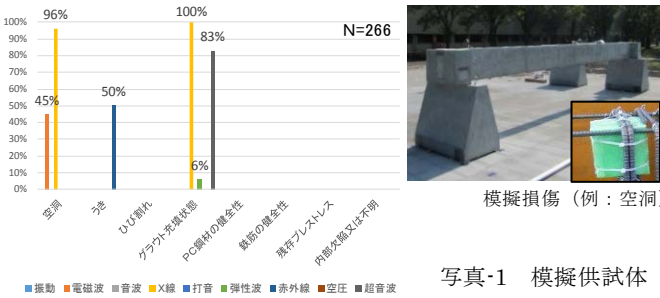


写真-1 模擬供試体

図-1 内部損傷の検知正答率(模擬供試体)

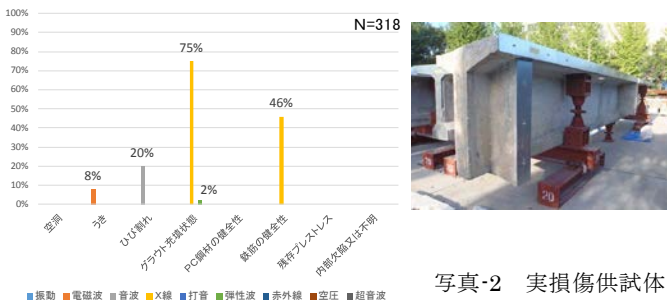


写真-2 実損傷供試体

図-2 内部損傷の検知正答率(実損傷供試体)

検査対象としての条件の異同は単純ではないが、実損傷供試体と模擬供試体で内部損傷の検知正答率に大きな差があることがわかる。特に模擬供試体と比べて条件が複雑な実損傷供試体では各損傷の正答率が大きく低下しており、模擬供試体に対する結果のみで検査能力を評価すると、実際の損傷部材に対する能力を過大評価する危険性があるといえる。このことから、性能検証方法には、模擬供試体と実部材から採取した損傷供試体など条件が大きく異なる供試体に対する検査結果の違いが把握できる工夫が求められる。

2.5 位置特定精度の検証

点検等において内部損傷の位置は補修有無の判断や補修計画立案のための重要な情報であり、各検査原理の位置特定精度や取得可能な位置情報（X，Y，Z）を把握することを目的に検証を実施した。なお、位置特定精度は図-3のとおり非破壊検査の推定損傷位置について座標（X，Y，Z）で整理し、CAD図面（3D）で実際に配置した模擬損傷の座標と重ね合わせて検証している。

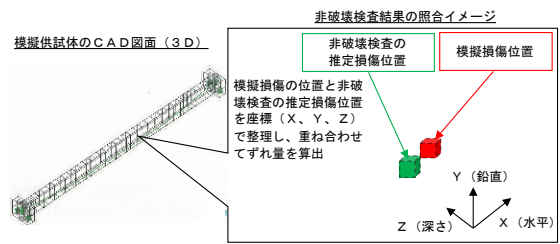


図-3 位置ずれの照合方法（模擬供試体）

表-5～7に模擬供試体の内部損傷の位置特定精度について整理した例を示す。各検査原理で位置ずれの量や取得可能な位置情報の傾向が異なることが分かる。

そのため、性能評価方法には損傷検知の有無のみならず各検査原理の位置特定精度や取得可能な位置情報について実際に近い検査条件において明らかにすることも不可欠であると考えられる。

表-5 模擬供試体の損傷位置（X）誤差

検査原理	X誤差範囲(mm) 水平								
	空洞			うき			グラウト充填不足		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
電磁波	400	19	0						
X線	-180	4	0				671	132	-40
弾性波							-1380	-237	0
赤外線				27	82	0			

表-6 模擬供試体の損傷位置（Y）誤差

検査原理	Y誤差範囲(mm) 鉛直								
	空洞			うき			グラウト充填不足		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
電磁波	-390	-3	0						
X線	-100	-27	0				-118	-8	6
弾性波							-140	-13	6
赤外線				50	25	0			
超音波							-94	-21	2

表-7 模擬供試体の損傷位置（Z）誤差

検査原理	Z誤差範囲(mm) 深さ					
	空洞			グラウト充填不足		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
電磁波	-240	13	0			
X線	-175	-125	-100			
弾性波				-20	-2	0
超音波				100	24	-5

3. 非破壊検査技術の評価方法の提案

公募した様々な非破壊検査技術を用いた実証実験の結果、非破壊検査技術の検査性能は、予備情報の有無、損傷パラメータ、検査条件など極めて多くの要因に左右される。さらに候補となる非破壊検査

技術には多くの原理や仕様のものであり、原理や仕様を踏まえた評価方法では汎用性がなく、異なる原理や仕様のもので適用性の相対評価も困難となることは確実である。

以上の点を踏まえ、これまで得られた結果を反映した以下の手順に従って行われる一連の検証結果を総合的に評価することで、多くの非破壊検査技術に対して実際の道路橋の点検や調査において期待出来る検査性能を推定できるものと考えられる。図-4に非破壊検査技術の性能評価方法(案)を示す。

(1)基本性能の把握 (Step1)

各検査技術の対象とする損傷、精度、検査条件等を自己申告してもらい、申告通りの基本性能が発揮されるか検査対象損傷の種別を

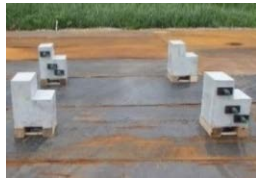


写真-3 要素試験体

1つにし、損傷パラメータや配筋が単純で検査性能に影響を及ぼす要因が少ない小型の要素試験体(写真-3)を用いて検査対象の損傷と検査範囲を限定して確認する。

(2)適用性能の把握 (Step2)

要素試験体で基本性能が認められる検査技術について対象としている損傷以外の損傷も含む大型の模擬供試体を用いて要素試験体と損傷種別、損傷規模、損傷深さの条件を同じにした損傷を含む範囲で検査を行う。これにより、損傷が複数になった場合や計測姿勢等の検査条件が変化しても対象とする損傷に対して検査性能を発揮できるかどうか確認する。また、図面や外観調査結果の予備情報の有無や検査時間が検査性能へ及ぼす影響についても確認する。

(3)供試体レベルでの検査精度等の把握 (Step3)

供試体レベルで実橋を想定して予備情報なしで模擬供試体と実損傷供試体の検査を行い、検査性能の違いを確認する。

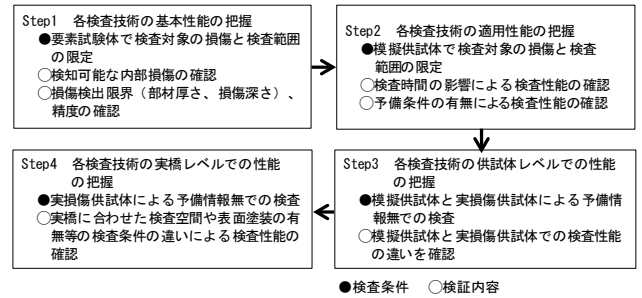


図-4 非破壊検査技術の性能評価方法(案)

(4)実橋レベルでの検査精度等の把握 (Step4)

実損傷供試体を用いて検査空間や表面塗装の有無等の条件を実橋に合わせた検査を行い、これらの検査条件の違いが検査性能へ及ぼす要因を確認する。

4. まとめ

模擬供試体や実損傷供試体を用いて非破壊検査技術の性能評価を行った結果、内部損傷の検知正答率や位置ずれの誤差が各検査原理で大きく異なっていた。その要因は損傷パラメータや検査条件などの様々な要因が影響しているものと考えられる。このため、要素試験体を用いて基本性能を把握したうえで実供試体を用いて段階的に実橋レベルへ近づけていき、性能に影響を及ぼす要因について確認していく段階的な評価方法(案)を提案した。

今後はこれらの供試体に加えて実際に想定される様々な損傷パターンを補足した供試体を充実させることにより、実用的で体系的な評価方法(案)について検証を進めていく予定である。

謝 辞

検証にあたり、非破壊検査の計測やデータの提供にご協力頂いた共同研究者の皆様にはここに記して感謝申し上げます。また、この性能評価方法が今後の非破壊検査技術の更なる発展と新しい技術開発の一助になることを願い本報文とする。

小原 誠



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部 構造・基礎研究室 研究官
Makoto OBARA

玉越隆史



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長
Takashi MTAMAKOSHI

間瀬利明



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部 構造・基礎研究室長
Toshiaki MABUCHI