

委員会報告 微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法 調査研究委員会

二羽 淳一郎*1・安田 登*2・堤 知明*3・田村 雅紀*4・齊藤 成彦*5・
鎌田 敏郎*6・岩波 光保*7・濱崎 仁*8・岡本 享久*9・横沢 和夫*10

要旨：本研究委員会は、「これまで種々提案されている微破壊試験，非破壊試験をどのようにコンクリート構造物の健全性評価，劣化予測に活用し，LCC 最小化を実現していくか」を目的として，①健全性に関する取り組み推移検討WG，②微／非破壊試験技術の現状と課題整理 WG，③補修・補強の現状と課題整理 WG，④微／非破壊試験の活用方策に関する WG を設けて活動を行った。これら WG の活動の結果，現状の維持管理の動向と課題，微／非破壊試験の技術レベル等を明らかにするとともに，より高精度の劣化予測や合理的な補修実施時期・補修方法の選定を実現するための微／非破壊試験の活用法を提案した。

キーワード：微破壊試験，非破壊試験，維持管理，ライフサイクルコスト，予防保全

1. はじめに

我が国では，高度経済成長期に整備された社会基盤を支える構造物が，かつてない高経年化時代を迎えようとしている。一方で建設投資の抑制が続く，維持管理のための投資も増加が見込めない。このような社会情勢では，従来の視点にとらわれない維持管理方法を構築する必要がある。すなわち，建設当時に想定した耐用年数を超えて利用し続けるとともに，増加する保全費用を抑制するための維持管理方策が求められている。コンクリート構造物も例外ではない。今後，高経年コンクリート構造物を安全・快適に使用し，ライフサイクルコスト (LCC) 最小化を実現するためには，試験技術，健全性診断技術，劣化予測技術，補修・補強技術の高度化が不可欠である。これまでも，これら技術に関する研究開発が活発に行われてきたが，現時点では健全度や劣化予測について明確に答えられる状況に至っていない。

構造物の現状の健全性を適切に評価したり，劣化予測を精度良く行うためには，入力データとなるコンクリート強度，劣化因子の浸透深さ，鉄筋の腐食状況等を精度良く把握するための試験技術の活用が不可欠である。

近年，試験技術の進歩はめざましく，非破壊試験だけでなく小径コアやドリル削孔等の微破壊試験が実用化され，部材レベルでの劣化データを精度良く把握できるようになってきた。しかしながら，現状では「試験＝劣化データの収集」の段階に留まっており，目標である「健全性診

断」，「劣化予測」および「LCC 最小化」にこれらの成果

表-1 委員会構成

委員長：二羽 淳一郎 (東京工業大学大学院)
副委員長：安田 登 (エンジニア)
幹事長：堤 知明 (東京電力)
【WG1：健全性に関する取り組み推移検討WG】
◎田村 雅紀 (工学院大学) ○齊藤 成彦 (山梨大学)
浅野 研一 (八洋コンサルタント) 岡本 享久 (立命館大学)
下村 匠 (長岡技術科学大学) 横沢 和夫 (フジコンサルタント)
【WG2：微／非破壊試験技術の現状と課題整理 WG】
◎鎌田 敏郎 (大阪大学大学院) ○湯浅 昇 (日本大学)
小川 彰一 (太平洋セメント) 小林 幸一 (セメント協会)
森濱 和正 (土木研究所)
吉田 夏樹 (日本建築総合試験所)
【WG3：補修・補強の現状と課題整理 WG】
◎岩波 光保 (港湾空港技術研究所)
○濱崎 仁 (建築研究所)
谷村 幸裕 (鉄道総合技術研究所)
松林 卓 (前田建設工業) 横沢 和夫 (前掲)
【WG4：微／非破壊試験の活用方策に関する WG】
◎安田 登 (前掲) ○岡本 享久 (前掲)
田村 雅紀 (前掲) 鎌田 敏郎 (前掲)
岩波 光保 (前掲) 堤 知明 (前掲)
横沢 和夫 (前掲) ◎WG 主査 ○WG 副主査

*1 東京工業大学大学院 工博 (正会員)

*3 東京電力 (株) 博士 (工学) (正会員)

*5 山梨大学 博士 (工学) (正会員)

*7 (独) 港湾空港技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*9 立命館大学 工博 (正会員)

*2 (株) エンジニア 博士 (工学) (正会員)

*4 工学院大学 博士 (工学) (正会員)

*6 大阪大学大学院 博士 (工学) (正会員)

*8 (独) 建築研究所 博士 (工学) (正会員)

*10 (株) フジコンサルタント 工博 (正会員)

が十分に生かされているとは言い難い。

公益社団法人日本コンクリート工学会では、「これまでに種々提案されている微破壊試験、非破壊試験をどのように健全性診断、劣化予測に活用し、LCC 最小化を実現していくか」をテーマに、平成 22～23 年度にかけて JCI-TC101A「微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法調査研究委員会」を発足させ 2 年間に亘る精力的な活動を行った。委員会の構成を表-1 に示す。

コンクリート構造物の健全性診断や劣化予測を適切に行うためには、微破壊試験、非破壊試験のそれぞれの特徴を生かすことが重要である。すなわち、微破壊試験は小径コアやドリル削孔のように適用箇所の制約が少ない中でコア強度や中性化深さなどの劣化因子の浸透深さの分析等に適しているのに対し、非破壊試験は鉄筋かぶりや内部欠陥探査などの構造物の施工状態を把握するのに適している。健全性診断や劣化予測はこれらの試験から得られた情報を上手く組み合わせるべきである。このような観点から、本委員会では微破壊試験に特化するのではなく、非破壊試験の活用についても検討対象とした。

ここで、微破壊試験と非破壊試験の違いであるが、本委員会では以下のように定義している。

- 微破壊試験：コンクリート構造物にわずかな損傷を与えてコンクリート品質や劣化因子浸透深さ等を調査する試験。小径コア法やドリル削孔法がこれに当たる。
- 非破壊試験：コンクリート構造物に損傷を与えることなく、コンクリートの品質や鉄筋の状態等を調査する試験。

本委員会の WG 構成は以下のとおりである。WG1（健全性に関する取り組み推移検討 WG、田村主査）は主に、今までの耐久性評価はどこに主眼が置かれ、何が課題として残っているかを明らかにすることを目的に活動を行い、(1) コンクリート構造物の長寿命化とストックマネジメント、(2) コンクリート構造物の微破壊試験を用いた健全性評価、(3) 施設管理者の健全性評価マニュアルの分析を行った。WG 2（微／非破壊試験技術の現状と課題整理 WG、鎌田主査）は微／非破壊試験の実績を調査し、現状のレベルと今後の方向性や課題を整理することを目的に活動を行い、(1) 学協会における微／非破壊試験活動に関する成果（知見）の整理、相互の関係や役割分析、(2) 微／非破壊試験技術の完成度、活用状況、健全性評価に対する活用の展望を示した。合わせて実施した微／非破壊試験に関するアンケートの集約、分析を行った。WG 3（補修・補強の現状と課題整理 WG、岩波主査）は実構造物の補修・補強事例を調査分析し、現状のコンクリート構造物の健全性診断における課題を提示した。WG 4（微／非破壊試験の活用方策に関する WG、安田主査）は WG 1～3 の活動

成果を踏まえ、今後増加する高経年構造物を効率的に維持管理していくための微／非破壊試験の活用方法を提案した。

以下、各 WG 活動の成果概要を示す。

2. 健全性に関する取り組み推移検討（WG1）の活動

2.1 我が国におけるコンクリート構造物の長寿命化傾向

ここでは、WG 1 で取り組んできた内容の内、主に我が国のコンクリート構造物の長寿命化傾向と維持管理が従来の事後保全から予防保全へ移行しつつあることを示す。

我が国には、コンクリート構造物も含め膨大な社会資本ストックが蓄積されている。特に 1955 年～1975 年の高度経済成長期に、集中的に整備されたストックが更新時期を迎えている。高度経済成長が継続されていけば迷わず新設更新であるが、近年の厳しい国の財政や環境保全の観点等により新設更新は難しい状況となっている。したがって、現存するストックを設計時の想定よりも長く利用せざるを得なくなっている。そのためには、経済と生活を支える社会基盤をしっかりと維持管理することが重要となってくる。図-1 に一例として土木事業に対する建設投資額と GDP に対する比率の推移を示す。ここ数年対 GDP 比が 5% 程度で推移している¹⁾。GDP を成長させる最大の要因である人口や企業の設備投資の減少が顕在化していることから、将来的に急激に増加してくると予想される維持管理費の確保が厳しくなることも懸念されている。

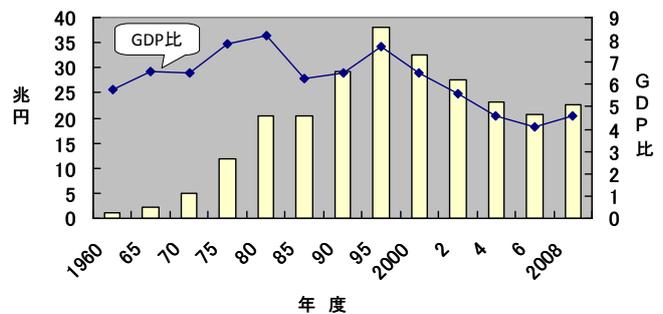


図-1 土木系建設投資額の推移¹⁾

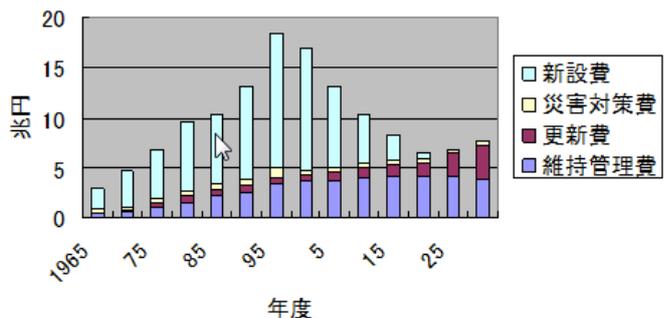


図-2 維持管理・更新投資の見通し²⁾

図-2 は 2005 年度以降の投資可能総額の伸びが、国が管

理主体の社会資本について-3%、地方公共団体が管理主体の社会資本について-5%と仮定して、維持管理・更新費を推計したものである²⁾。同図に示すように、早ければ2023年頃には維持管理・更新するための投資可能総額が不足することが平成17年度の国土交通白書に報告されている。なお本試算では、構造物の耐用年数は60年程度を用いており、耐用年数を超えた構造物は同一の機能で新設更新するものと仮定している。

この試算結果は、社会基盤を、想定した耐用年数を超えて利用し続ける必要があることを示しており、100年を超えて利用することも現実となってきている。しかし、社会基盤の安全性確保は、国の経済活動や国民生活の安全に直結していることを絶えず念頭に置かなければならない。

2.2 事後保全から予防保全へ

これまで土木構造物の維持管理は、「劣化が進行し安全性確保に問題が生じたら対策する」事後保全の考え方が主流であった。近年、ライフサイクルコストの最小化と構造物の長寿命化を目的として「劣化が進行する前に対策する」予防保全の導入が求められている。土木構造物の予防保全には明確な定義が確立されているわけではなく、その考え方は施設管理者により多岐にわたる。

表-2は、道路橋梁の規準類の変遷とその背景について示したものである。21世紀に入り、フローからストックの時代に突入したとの認識が強まっている傾向が見られる。

2.3 予防保全と微破壊試験

現時点の維持管理はかなり劣化が進んだ状態での対策が主流となっているため、部分的破壊試験であるコアによる調査を用いるケースが多いものと考えられる。コアによる調査は、例えば塩害であれば、コアから強度、中性化、塩分浸透量、鋼材腐食の状況など多くの項目を得ることができるのに対し、非破壊試験では1試験1項目のケースが多いのが現状である。しかし、長寿命化するために予防保全の実施が増えてくると、現状のコア調査では、部分的とはいえず健全な部分を傷めることになり、極端な場合補修の不具合からそこを起点に劣化してくるケースも考えられる。

そこで、今後、活用の増加が期待されるのが、コア調査と非破壊試験の間に位置すると考えられる微破壊検査である。微破壊試験には、コア径25mm程度の小径コア法、削孔径10~20mmのドリル削孔法などがある。他の検査と比較して、これら微破壊試験法が使われ始めてから、日が浅いため「何に」「どの程度」使われているのかはあまり認識されていない。現時点では、ドリル法ではまとまったデータが少ないため、ソフトコアリング協会のデータに基づいて以下に示した(図-3)³⁾。

図に見られるように、微破壊試験(小径コア)の使用件

表-2 道路橋梁に関する基準類の変遷と背景

年	基準類制定と背景	災害・事故	維持管理の必要性が希薄
1950年～1969年	<ul style="list-style-type: none"> ◆1952年「道路法」第42条第2項で「道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、政令で定める」とされた。 ◆1962年「道路技術基準 維持修繕編」と補足として「直轄維持修繕要領」および「道路の維持修繕等管理要領」が未制定の政令に変わり通達された。 ◆1966年日本道路協会から維持修繕の統一的な技術指導書として、「道路維持修繕要綱」が刊行される。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆1967年米国シルバー橋(吊り橋)の落橋事故 	
1970年～1999年	<ul style="list-style-type: none"> ◆1970年道路法第30条「道路の構造の技術基準」を定めた道路構造令(政令)が制定された。しかし、維持管理に関する政令は未制定である。 ◆1978年道路構造令の制定を受けて「道路維持修繕要綱改訂版」が刊行された。 ◆1988年橋梁に関して「橋梁点検(案)」が土木研究所資料として刊行。初めて、点検箇所と損傷度判定法が示された。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆1984年コンクリートクライシスが社会的問題となる ◆1995年阪神・淡路大震災 	
2000年～	<ul style="list-style-type: none"> ◆2003年国土交通省「道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会による提言」(岡村委員長)。アセットマネジメントの導入や人材育成等7つの提言。 ◆2004年国土交通省防災課長通達「橋梁定期点検要領(案)」策定。点検の頻度、点検の体制、損傷程度の評価、補修等の必要性を示した。 ◆2004年国土交通省防災課長通達「橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領(案)」策定。橋梁に係わる各種点検やその記録の一元管理。 ◆2008年国土交通省「道路予防保全に向けた提言」(田崎委員長)で早期発見・早期対策により国民の安全安心とネットワークの信頼性を確保するとともに、LCC最小化と構造物の長寿命化を実現するための5つの方策を提言。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆2004年新潟県中越地震 ◆2006年カナダ・セントリオールでデラコンコルド(コンクリート床版橋)崩落事故 ◆木曾川大橋(トラス橋)、本荘大橋(トラス橋)斜材が腐食により破断しているのを点検で確認 ◆2007年ミネソタでトラス橋が落橋し、車50台が落下する事故 ◆2011年東日本大震災 	

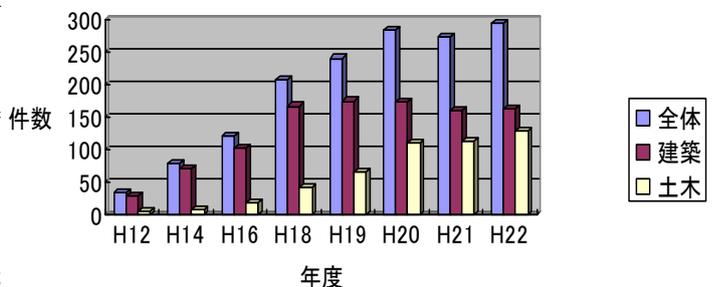


図-3 小径コアの使用件数³⁾

数は、年々増加してきているが未だその数は多くはない。

予防保全は、潜伏期において鉄筋に錆が発生した状態、進展期の鉄筋の腐食による割裂ひび割れがコンクリート内部に発生した状態での措置であり、外部から見ると損傷が生じているような状態には見受けられない。予防保全は、このような状況下での実施となるため発見が遅れることが多く、国民からも無駄な事業との批判を受ける可能性もある。

この様な状況に対して、小径コアやドリル削孔粉といった微破壊試験手法を活用すれば、適切な時期に予防保全を実施することが可能になると考えられる。

3. コンクリート構造物の健全性診断技術に関する現状と今後の展望(WG2)の活動

3.1 健全性診断技術の活用実態

(1) コンクリート診断士調査報告書 A (2009) の分析

微／非破壊試験法が、実際の構造物診断でどのように利用されているのか、その現状を把握することを目的として、2009 年度コンクリート診断士調査報告書 A を対象に分析を試みた。ここでは、調査報告書 A のうち、シンポジウムなどへの参加報告を除いた全ての報告書について、調査にどのような試験方法が用いられ、何を評価対象として診断が実施されたのかを確認し、その報告数をカウントした。なお、選定した試験方法と評価対象ならびにカウントを行う際のルールは本委員会報告書を参照して頂きたい。

2009 年度コンクリート診断士報告書 A の報告数は合計 735 件であり、そのうち 619 件が構造物の診断に関する内容で、残りの 116 件がシンポジウムなどへの参加報告であった。よって、分析の対象は 619 件である。

構造物の診断に関する報告について、調査対象構造物区分の件数を図-4 に示す。建築と土木の分類では、土木構造物が 75%以上を占めている。道路構造物を調査対象とした報告が最も多く、全報告の 45%(280 件)を占めている。次いで、建築物、鉄道構造物、河川構造物の報告が多かった。

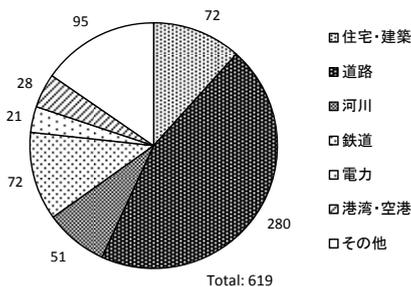


図-4 2009 年度コンクリート診断士報告書 A における各調査対象構造物の割合

(2) 評価対象別の集計結果

コンクリート構造物の診断に利用されている試験方法および評価対象をカウントした結果を評価対象別に整理し、表-3 および図-5 に示す。集計結果から、以下のことが分かった。

- (a) 全体的な評価対象として、ひび割れ、中性化深さ、物性・強度推定、鉄筋腐食が多い。
- (b) 従来法（破壊試験および目視観察）が用いられる場合が多いが、評価対象によっては、微／非破壊試験方法が利用されている。
- (c) 微／非破壊試験方法の評価対象は、内部欠陥・はく離、物性・強度推定、鉄筋位置・かぶり厚、中性化深さ試験、塩分試験が多い。

全体的には、従来法（破壊試験および目視観察）が行われ

表-3 評価対象の報告件数順位

順位	全体	件数	微／非破壊試験	件数
1	ひび割れ	413	内部欠陥・はく離	125
2	中性化深さ	230	物性・強度推定	79
3	物性・強度推定	218	鉄筋位置・かぶり厚	54
4	鉄筋腐食	188	中性化深さ試験	51
5	内部欠陥・はく離	132	塩分試験	35
6	鉄筋位置・かぶり厚	115	ひび割れ	28
7	塩分試験	114	鉄筋腐食	14
8	ASR診断	107	部材の厚さ	4
9	凍害診断	41	凍害診断	
10	化学的劣化診断	15	グラウトの充填性	3

ることが多いが、評価対象によっては、微／非破壊試験が利用されている。表-3 に示したように、評価対象として、全体的な評価対象と、微／非破壊試験の評価対象は一致していないことが分かった。すなわちコンクリート構造物

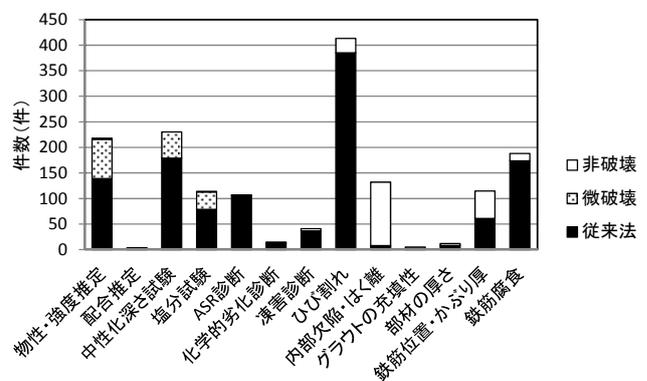


図-5 評価対象別の集計結果

の診断においてニーズが高い評価対象に対して、現状では、思ったほど微／非破壊試験の利用は進んでいないとも読み取れる（図-5）。

(3) JCI website におけるアンケートの分析結果

ここでは、平成 23 年 11 月～12 月の間、JCI の website 上で行った「コンクリートの微破壊試験・非破壊試験の活用方法に関するアンケート」を分析した結果について示す。

なお、アンケート結果の詳細は本委員会報告書を参照頂きたい。

分析の結果、小径コア、ドリル削孔粉などの微破壊試験を構造物の健全性診断の場面で用いたことのある方は約 7 割程度あり、未だ十分とは言えないが、比較的高い割合で微破壊試験が活用されていることがわかった。これに対して非破壊試験の適用については、約 9 割であり、微破壊試験よりも活用割合は高くなっていった。

微／非破壊試験を使うに至った理由については、仕様書等における記載、施主／管理者からの具体的指示はそれぞれ十数パーセントずつであり、まだまだ構造物管理者側への微／非破壊試験の浸透状況は十分とは言えない状況で

あることが推察された。

今回のアンケート対象者からの回答では、微／非破壊試験の結果に対する満足度としては、半数以上が満足（大変満足＋やや満足）という結果であり、種々の課題を残しつつも、全体的には構造物診断では、微／非破壊試験技術はそれなりの評価を持って受け入れられ活用されていると解釈することができた。今後は、さらに当該技術に関する研究開発を推進し、ユーザーの満足を高める努力が必要である。

微／非破壊試験の結果に満足と答えた方々からのその理由についての回答の中では、定量的（客観的）情報が得られるから、あるいは、目視や従来の他の方法では得られない情報が得られるからといったものが多数を占めていたが、維持管理における診断の場面において、さらにプラスアルファの情報を与えるものとの評価は決して多いとは言えず、これらの観点からのより一層の研究開発が必要となるものと思われる。

他方、微／非破壊試験の結果に対する不満足の原因は「当初期待した情報や精度が得られなかった」とのことであったが、これは、計測で十分なパフォーマンスが発揮できなかったケース（試験技術者の技量等の不足によるものなど）もあり得ようが、当初の期待そのものが過大であったり、微／非破壊試験技術に対する理解が不十分であったことによる勘違いなども含まれているものと思われる。

最後に、回答者から寄せられた自由意見として、特筆すべきものをいくつか紹介しておく。

【取り組みに関するもの】

- (a) 精度に関するこれまでの知見や実際の調査事例（失敗も含む）の情報が公開されるのがよい。
- (b) 様々な装置・方法が開発されているが、使えるものかどうか判断するのに、結局、論文・技術報告等を参照して判断するしかないが、ある指標が測定できたとされていても、信頼性に欠けていたり、トレーサビリティが満足できると思えないものがあまりに多すぎる。このあたりが改善されるとよい。
- (c) 発注者側における調査・試験方法における知識・経験が少ないことから、調査機器による使用条件等が把握されておらず、条件的に無理なことを要求され、できないことを技術不足と認識されることも多い。また、業者もまだ試験・調査方法の精度、条件等を理解せず、営業しているケースが多数見られる。
- (d) 各試験方法について文章だけでなく、動画を使用して紹介して欲しい。例えばドリル法では適切なドリルの掘削速さ、ろ紙の回転速さ等が動画を見ることで確認ができる。

【規準等に関するもの】

- (a) コンクリート構造物は不均質であるため、試験位置の

設定が重要である。試験位置の設定に関する規準類の整理をお願いしたい。

- (b) 非破壊試験は一つの方法で、全ての欠陥を測定することは困難であるため、住み分けを明確にできる資料が欲しい。
- (c) 判定基準があいまいであったりして、発注者に納得してもらえない場合があるので、何とかしてほしい。

【技術革新に関するもの】

- (a) なるべくブラックボックス的な部分をなくして、誰でも精度が検証できるような技術が求められていると思う。
- (b) 安易に結果が表示される機器は、本来測定できない条件であっても何らかの数値が出てしまい、誤診を誘発する。エラーと表示される正直な機器になるとよい。
- (c) 単体の試験機が高価すぎる。安価でそれなりのモニタリングができる装置開発を学会等で行うことはできないのか？また、コンクリートばかりに執着してはいけない。地盤や水との関わりも大きいから、それらの関係者との共同作業とするのが良い。

以上のとおり、いずれの意見も示唆的で、今後の微／非破壊試験技術の研究開発、周辺のしくみ作り等に際して非常に有意義なものばかりである。これらの意見が次のアクションに生かせるよう期待したい。

3.2 健全性診断技術の今後の展望

(1) 健全性診断における微破壊試験の有用性

微破壊試験の位置づけを明確するために、破壊試験、微破壊試験、非破壊試験の比較を表-4に示す。3者の大きな違いとしては、破壊試験は表-4のa～fのように、構造物に損傷を与える、同一位置で繰返し試験ができない、試験が大変であるなどの短所がある。しかしながら、g～jのように、これまでの多くの実績から試験法が確立している点は長所といえよう。一方、非破壊試験は、破壊試験とは異なり、構造物に損傷を与えない、そのため試験できる箇所の制約が少なく同じ位置での繰返し試験が可能であるなどの長所がある反面、試験方法が確立しているものが少ないなどの短所がある。他方、微破壊試験は、破壊試験と非破壊試験の中間的な位置づけとなっているが、損傷範囲が小さいため適用箇所の制約が少ないなど非破壊試験に近い長所もあり、広義の非破壊試験ともいうことができる。ただし微破壊試験は、構造物に損傷を与えるために同一箇所での試験の繰返しはできないなどの制約もある。後述するとおり、微破壊試験は、破壊試験と同じ試験項目への適用が期待され、今後、破壊試験の代替としての役割を担っていくものと考えられる。

上記については、以下の通り、試験項目ごとに検討することにより詳細が明確になる。表-4の下3行に、検査・点検にとって重要な試験項目である劣化因子の浸入（中性

化深さ、塩化物イオン量)、コンクリート強度、配筋探査・かぶり厚さについて比較した結果を示す。劣化因子の浸入については、現段階では、適用できる非破壊試験はなく、破壊または微破壊試験を実施せざるを得ない。強度については3者が共存していることがわかる。配筋探査

表-4 破壊/微破壊/非破壊試験の比較(概念/試験法によって異なる)

記号	項目	破壊試験	微破壊試験	非破壊試験
a	構造物への損傷	x	△	○
b	適用箇所(高密度配筋など)	x	○	○
c	同一位置での繰り返し測定(経年変化の測定)	x	x	○
d	測定一箇所当たりの経済性	x	△	○
e	構造物全体の状況把握	x	△	○
f	試験の簡便性	x	△	○
g	将来予測	○	△	x
h	測定のばらつき	○	△	x
i	熟練度の影響	○	△	△
j	試験法の確立(規格)	○	△	△
k	劣化因子の浸入把握	○	○	x
l	強度	○	○	△
m	配筋探査・かぶり厚さ	x	x	○

○優れる、△課題有り、×課題多い

かぶり厚さについては、面的な測定を考えた場合、破壊・微破壊試験の適用はほぼ不可能であり、非破壊試験を実施するしかない。

(2) 微破壊試験をより一層活用するために(コンクリートの分析技術の活用)

コンクリートの表面が変色して脆弱化している、ひび割れが生じて白色の物質がしみ出している、コンクリート表面にポップアウトが生じているなどコンクリートに化学的な変状が見られる場合、コンクリート中の中性化深さや塩化物含有量が知りたい、練混ぜ時のおおよその配合条件が知りたいなど、コンクリートの化学組成や原材料の構成比率を詳しく調査したい場合には、化学分析が有用となる。コンクリートの化学分析において、粗骨材の最大寸法の3~4倍以上の直径を持つコア(標準的には直径100mmのコア)を分析対象とする場合は、骨材やセメントの構成比率が現実のコンクリートに近くなるため、試験結果の信頼性は比較的高く、規格試験などでは好まれる。

一方、小径コアやドリル削孔粉などの微破壊で採取した試料は、分析に不向きかと言えば、そうではない。実際の試験に必要な試料量は、大抵の場合、数グラム程度であり、微破壊で採取した試料量で十分に試験が行える。また、標準的なコアに比べて、コア採取時の作業効率、低コストなどの多くの面でメリットがある。さらには、診断の目的によっては、小さい試料から得られた試験結果で十分な情報が得られることや、近年では、分析技術や研究の進歩にともない、小さい試料でも良好な試験結果を得る方法も提案されている。

表-5は多様化する塩化物含有量の分析手法について

破壊試験、微破壊試験、非破壊試験方法に分けて整理したものである。

塩化物含有量の試験方法について、標準的な直径100mm、長さ200mm程度のコンクリートコアを試験に用いる場合が圧倒的に多いと考えられるが、近年では、小径コアや非破壊試験方法が提案されて多様化している。これらを並べて見渡してみると、各手法において長所と短所があり、必ずしも標準コアを用いることが最良の選択ではないことは明らかである。目的に応じて方法を選択することが望ましいと考えられる。

表-5 塩化物含有量の試験方法の長所および短所

種別	試験方法	長所・短所	
破壊	コ ク リ ー コ ア	JIS A 1154(硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン試験法)(2003~) JCI-SC-4(硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法)(1987~) JCI-SC-5(硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法)(1987~) JSCE-G-573(実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分析の測定方法(案))	【長所】 ・試験規格がある ・浸透状況が把握できる ・圧縮、中性化(JIS法)、と併用可 【短所】 ・採取箇所を入念に計画しなければならぬ ・採取後に補修が必要 ・現場で測定できない ・多くの費用と時間が必要
	微 破 壊	小 径 コ ア 、 ド リ ル 削 孔 粉	JIS A 1154(ドリル削孔粉)、JCI-SC-5、ポータブル蛍光X線分析
非 破 壊	ポータブル蛍光X線分析	【長所】 ・現場で測定でき、補修が不要 ・短時間で広範囲の測定が可能 ・同一部位で経時変化が測定可 【短所】 ・規格がない ・測定部位に限られる(蛍光X線の場合、表面のみ) ・内部への浸透状況を把握できない ・低濃度の定量精度が低い	

3.3 WG2活動のまとめ

前節(3.1 健全性診断技術の活用実態)で述べたように、JCIのwebsite上で行ったアンケートの範囲内では、何らかの微/非破壊試験を健全性診断に用いた経験のある方の割合は比較的高く(微破壊試験:約7割、非破壊試験:約9割)、その関心の高さが示された一方で、コンクリート診断士調査報告書の詳細分析を行った結果によれば、内容的に見て必ずしも十分な有効活用が行われているとは言いがたい側面も明らかとなった。

今後、健全性診断において微/非破壊試験が、より一層有効に役割を果たしていく上で必要と思われる要件についてまとめた結果と、今後の展望を以下に示す。

具体的には、まず、“微/非破壊試験は、健全性診断において如何なる観点から有効なツールとなり得るのか?”という問いに答える形で、評価の対象として、中性化深さ、塩化物イオン量、強度、配筋状況・かぶり深さを対象とし、それぞれの評価において破壊試験・微破壊試験・非破壊試験が果たす役割やそれぞれの長所および短所等について比較した結果をまとめた。その結果より、微破壊試験は、従来の破壊試験の代替として十分適用可能な方法であり、

さらに損傷が小さいことから適用箇所の制限がほとんどなく、構造物の全体状態の把握にも適用可能であるなどの長所を生かせる可能性が大であり、今後の健全性診断への活用が期待されるものであることが明らかとなった。

また、ここでは紙面の関係上省略したが、微／非破壊試験のさらなる認知度向上のためには、今後、それぞれの手法の規格・規準の整備が不可欠との観点から、規格・規準の現状を網羅的にまとめることで、今、何が不足していて今後どのようなアクションを取るべきかを考える上で有用な情報も提供した。

続いて、微破壊試験をより一層活用するための具体的な方策として、コンクリート中の塩化物含有量の分析、アルカリシリカ反応の診断などに小径コアやドリル削孔粉などを用いる方法が如何に有益でメリットが期待できるのかといった観点から、最新の知見も踏まえて記述した。

微／非破壊試験の信頼性に及ぼす測定の不確かさに対する理解と認識を深めることで、微／非破壊試験の健全性診断における役割が今後ますます高まるものと思われる。

4. コンクリート構造物の補修・補強の現状調査と課題整理 (WG3) の活動

4.1 収集した事例の全体的な傾向

本 WG では、微／非破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法の確立に資するため、港湾、電力、鉄道、道路構造物などに対して実施された補修・補強事例を文献等から調査し、維持管理上の課題を整理した。具体的には、健全性評価、劣化予測に関する課題、補修・補強を行った判断根拠、どの劣化段階で補修・補強を行ったか、ならびに、微／非破壊試験の活用状況などを中心に分析を行った。また、建築分野においては、建物の資産価値の維持・向上を目指して、土木構造物と比較して劣化進展が軽微な段階から詳細な調査および健全性診断が行われ、その結果を基に予防保全的な対策が施されている。そこで、建築分野における微／非破壊試験の活用状況についても重点的に調査した。ここでは、土木分野における補修・補強事例の分析結果について示す。事例は、コンクリート構造物に対する最近の補修・補強事例を主に技術雑誌の記事から収集した。特に、比較的微／非破壊試験の活用が進んでおらず予防保全の取り組みが遅れていると思われる土木構造物を対象に、補修・補強事例の収集を行った。

技術雑誌で取り上げられている事例を中心としたため、比較的規模の大きい補修・補強、あるいは工法・材料に特徴のある事例が収集されており、これらが我が国における補修・補強の一般的な傾向を表しているとは言えないことに注意が必要である。

図-6 は収集した各事例の供用開始から補修・補強が行われるまでの経過年数を示したものである。なお、調査し

た文献の中には、以前に補修を行った後に再劣化した経緯があるものも含まれるが、あくまでも文献の中で取り上げられた補修・補強事例に着目した経過年数を示している。

同図によれば、各事例における供用開始からの経過年数は、30～35年が最も多く、次いで35年以上が多かった。これらを合わせた範囲、すなわち30年以上の経過年数である事例は全体の約4割を占めた。

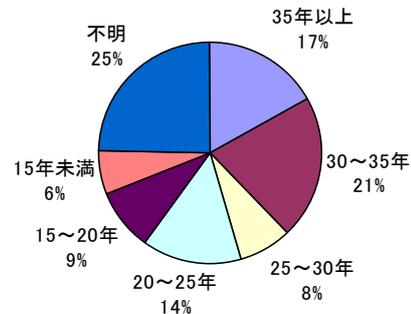


図-6 補修・補強までの経過年数

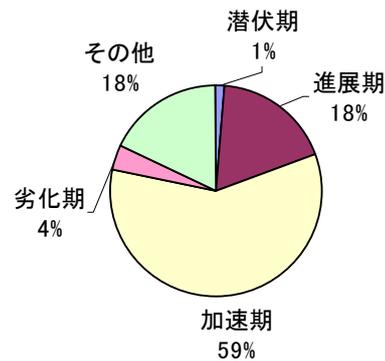


図-7 劣化の程度

図-7は、補修・補強が行われた時点での劣化の程度を示したものである。なお、程度の判断は土木学会 2007年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠して判断した。これによると、全体の約6割は加速期に補修・補強を実施していた。

4.2 補修・補強事例の詳細分析

ここでは、収集した事例のうち、微／非破壊試験を活用していればライフサイクルコスト (LCC) の削減が可能であったと思われる事例、同様に、微／非破壊試験を活用していれば再劣化を防止できたと思われる事例などを抽出し、それぞれについて詳細な分析を加えることで、微／非破壊試験の有効性、健全性診断の問題点を浮き彫りにすることとした。ただし、本検討における微／非破壊試験が活用された場合のケーススタディについては、いわば架空の事例検討であり、それぞれの事例で実施された調査・診断や補修・補強の適切さや妥当性を評価しているものではなく、あくまでも微／非破壊試験の有効性を検証することを

目的としていることを付記しておく。

詳細分析を行った事例は、表-6に示す6事例である。

表-6 詳細分析を行った事例一覧

	文献名
詳細分析事例1	塩害を受けた高架橋の調査と補修工法の検討
詳細分析事例2	RC高架橋床版下面における鉄筋腐食の抑制対策
詳細分析事例3	青森県日本海沿岸において著しい塩害を受けたコンクリート橋の劣化調査
詳細分析事例4	沖縄自動車道・億首川橋におけるRC床版リニューアル工事(上)
詳細分析事例5	塩害を受けたPC単純Tげた橋の断面修復-北陸自動車道 大慶寺川橋-
詳細分析事例6	劣化リスクの定量的な評価に基づく土木設備の補修時期および補修方法の最適化

検討事例の一例を以下に示す。

【詳細分析事例】：青森県日本海沿岸において著しい塩害を受けたコンクリート橋の劣化調査⁴⁾

(a) 概要

1976年に供用を開始した幅11.1m、6主桁からなる橋長33mのポストテンション型T桁橋である。2003年の点検により、山側外桁下フランジの損傷が激しく、一部かぶりが剥落し、内部のシースおよび鋼材が腐食により破損しているのが確認された。変状の原因は、日本海からの飛来塩分による塩害と推察された。

プレストレストコンクリート(PC)橋であり、鋼材の腐食が確認されており、安全性に問題があるとの判断から、解体撤去し更新することが決定されていた。

(b) 補修履歴

表-7に、本構造物のこれまでの補修履歴を示す。

表-7 補修履歴

年	認められた変状	補修・補強工法
1976	供用開始	
1992	ひび割れの発生、かぶりの浮き、一部はく離・剥落(推測)	表面被覆および一部断面修復
2003	山側桁下フランジの損傷、一部かぶりが剥落し、内部のシースおよび鋼材が腐食により破損	解体撤去、更新

(c) 1992年の劣化状況

日本海からの飛来塩分や凍結防止剤により、供用開始後16年で最初の補修が実施されている。表面被覆が施されていることから劣化因子の侵入を防ぐことと、一部断面の修復がなされていることから、記述はないもののかぶりの一部が剥落していたものと推察される。

PC構造物であることから、ひび割れの発生も少なく外観上の損傷も少なかったものと思われ、潜伏期～進展期と判断したのであろう。そこで、これ以上劣化因子が侵入することを防ぐために表面被覆と一部損傷した箇所は断面

修復を選定したと考えられる。

部分的に剥落が生じていたり、その後の劣化進行の速さを考慮すると、1992年の段階で一部が加速期前期～加速期後期に入っていたものと推定される。

(d) 微破壊試験の活用

図-6から10年を超えたあたりから補修・補強を行うケースが増加していることがわかる。したがって、供用後5年以内に点検をすることが有用であるといえる。しかし、潜伏期～進展期の間は外観上の変状がみられないため、コンクリート内部で生じている変状が見逃されるケースがほとんどである。そこで今回のケースであれば、ドリル削孔粉や小径コアを用いた微破壊試験を活用していれば、27年で解体する事態は避けられたのではないであろうか。

(e) LCCについて

実際の措置は、27年で解体・撤去した上で新たに架け替えた。LCCの比較として、PC鋼材周辺での塩化物イオン濃度が1.2kg/m³を超えないように10年ごとに有機系の表面被覆を実施し、塩化物イオン濃度が高くなった時は、電気化学的脱塩により塩化物イオン濃度を下げるものとしてLCCを計算した。LCC計算にあたっての仮定を表-8に示す。

図-8にLCCの比較を示す。実際の措置は、供用開始から90年で、維持管理費も含めて約190,000千円程度となるのに対し、比較した工法では同一の期間に電気化学的補修も含めて140,000千円程度となる。LCCを比較すると約25%程度安くなる。ただし、実際の措置の場合は、解体・撤去費、交通を切り回す費用、数字に表れない渋滞で発生する流通損失費用などを含むとすればLCCの差はより大きなものになる。

表-8 LCC計算にあたっての仮定

<p>【実際の措置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆初期建設費:PC上部工を2,500千円/mとして、 2,500千円/m×33m=82,500千円 ◆掛け替え費:PC上部工を3,000千円/m(塩害対策)として 3,000千円/m×33m=99,000千円 ◆維持管理費:建設費の5%とする。但し補修費費用は含まない。 <p>【比較した工法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆表面被覆費:表面被覆工を8,000円/m²として、 8,000円/m²×3m×33m×6本=5,000千円、 82,500千円+5,000千円/回×8回=122,500千円 ◆電気化学的防食費:施工面積が少ないため防食の維持管理費を含めておおよそ20,000千円と仮定

(f) 事例検討のまとめ

建設後27年で塩害劣化により撤去・更新が行われた橋

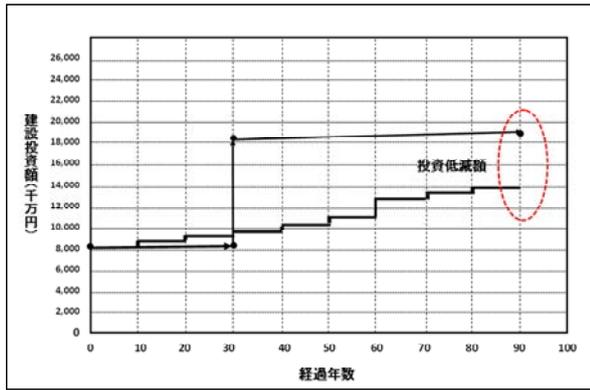


図-8 LCCの比較

梁の事例について、劣化の兆候が現れた段階で、微／非破壊試験などを活用した詳細調査を実施して予防保全的に対策を講じておけば、架替えをすることなく LCC を大幅に低減できた可能性を確認した。

4.3 WG3 活動のまとめ

最近の技術雑誌に掲載された記事から、主に土木分野におけるコンクリート構造物の補修・補強に関する事例収集を行った結果、次のことが明らかとなった。

- (a) コンクリート構造物の劣化過程のうち、加速期以降で補修・補強しているものが多く、劣化が相当程度に達するまで、補修・補強は行わない場合が多い。
- (b) 目視調査およびコア採取と比べ、微／非破壊試験の実施件数は少ない。その結果、コア採取による局所的なデータと目視調査に基づいて構造物全体の健全性が判断される場合が多い。
- (c) コンクリート構造物全体にわたる劣化状況が詳細に把握されることなく補修・補強方法が決定されている場合が多い。

一方で、建築分野では、美観等が問題となることから予防保全が定着し、微／非破壊試験が既に有効に活用されている実態が浮き彫りになった。建築基準法、住宅の品質の確保の促進に関する法律（品確法）、特定住宅瑕疵担保責任の履行の確保等に関する法律（瑕疵担保履行法）などの法律に基づいて定期的な建築物の点検が義務づけられていることが、微／非破壊試験を含む詳細な点検の実施のための動機付けとなっている面もある。また、UR（独立行政法人都市再生機構）では、通常の維持管理として実施する巡回点検業務に加え、耐震診断時や空屋改修などにあわせて建物診断業務を行い、建物カルテを作成し躯体改修の要否などの判定を行い、予防保全に基づく補修・補強の実施ならびに補修費用の効率的配分を目指している。

5. 微／非破壊試験の活用方策に関する提案(WG4) 活動

WG1～3において、コンクリート構造物の長寿命化傾向と予防保全への動き、維持管理の実態、健全性診断にお

ける微／非破壊試験法の活用実態等を明らかにしてきた。その結果、微／非破壊試験に対する期待は大きいものの未だ十分に活用されているとは言い難い実態が明らかとなった。

しかし、今後微破壊試験を活用して、例えば、定期的なコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定すれば、塩化物イオンが浸透していく状況が把握でき、浸透予測と対策の必要時期が判断できるものと考えられる。進展期に至る前にその兆候を把握すれば、予防保全に基づく対策が実施できると考えられる。この場合、表面被覆等の比較的低コストの補修方法で対応可能となるものと考えられ、LCC の低減を図ることができ、かつ、構造物の劣化を防止することができ、長期間健全な状態で構造物を使用できることが期待される。

また、予防保全的な維持管理の実施段階では、無駄の少ない適切な対策を講じるために、構造物の劣化の程度および進行状況をより詳細に把握することが今後ますます重要になると思われる。コアを採取した限られた点の情報ではなく、構造物内における塩化物イオン濃度などの空間的な分布を把握することが今後求められる。これを実現するためには、構造物を破壊せずに調査する、あるいは破壊を僅かな範囲に抑えて調査することが必要であり、微／非破壊試験のさらなる活用が望まれる。

微／非破壊試験の簡便さを生かし、構造物を全体的に調査することで劣化因子の空間的な分布を把握するとともに、定期的に調査を行うことによって塩化物イオンなどの劣化因子の浸透状況を経時的に把握することで、より精度の高い劣化予測、ならびにより合理的な補修実施時期・補修方法の選定が可能になるものと考えられる。

特に土木分野では、これまで、最も劣化が進行している部分だけで対象部材の劣化程度を判定してきた。部分的に劣化した構造物の位置的な劣化分布を考慮した劣化予測や劣化が顕在化していないものの評価において微破壊試験が有効である。また、潜伏期～進展期のように、変状が見えていない段階で補修・補強を実施する場合、外観上健全な構造物に手を加えることになるため、補修・補強を行うこと自体に抵抗を感じるケースがある。このような場合にも微／非破壊試験は有効である可能性が高い。

建築分野においても、微破壊試験が有効に活用されている事例も多くみられたが、いくつかの事例ではコア抜き調査の代替としての微破壊試験の実施が認められていなかった。今後は、劣化診断システムや耐震診断システムの中で、これまで以上に微破壊試験が活用できるようにしていく取組みを推進していく必要がある。

コンクリート構造物の健全度診断を的確に行っていく上では微／非破壊試験をいかに活用していくかが重要であり、その成否がコンクリート構造物の予防保全、ひいて

は、ライフサイクルコスト削減の鍵を握っている。

WG4 では上記のような議論を経ながら、微／非破壊試験の長所を生かした具体的な活用法について検討を加えた。その結果、以下に示すような方法を提案した。活用のポイントは、微／非破壊試験の簡便さを生かして、

- ・ 構造物を全体的に調査することで、劣化因子の空間的分布を把握する。
- ・ 定期的に調査を行うことによって劣化因子の浸透の進行状況を把握する。
- ・ 得られたデータを用いて将来予測を行う。

ことである。これにより精度の良い劣化予測、補修実施時期、方法の選定が可能となるものとともに、補修による構造物の延命効果を把握するためにも有効であると思われる。

より具体的には、

- (a) 新設構造物の場合は、設計通りの仕様（コンクリート強度、配筋、かぶりなど）となっているかを非破壊試験により確認する。
- (b) 既設構造物の場合は微破壊試験を活用して、劣化因子（塩化物イオンや中性化深さ）浸透やコンクリート表面の劣化深さなどを、ドリル法や小径コアなどにより測定し、得られた値をこれからの維持管理の初期値とする。また、設計時の劣化予測と比較する。設計時に劣化予測が行われていなければ、この調査で得られた値に基づいて劣化予測を行う。ここでのポイントは、調査箇所を構造物全体が網羅できるように設定することである。
- (c) 予測値と実測値が異なった場合は、予測に用いたパラメータを修正し再予測を行う。
- (d) (a)～(c)を定期的に繰り返す。
- (e) (d)の結果、塩化物イオン濃度が鉄筋の発錆限界濃度に達したり、中性化深さやコンクリート表面の劣化深さが鉄筋位置に達したと判断された場合は、コンクリート表面で一部はつり調査を行って腐食状況を把握するとともに、自然電位法、分極抵抗法を用いて腐食の広がり、進行速度を評価する。
- (f) 調査結果補修が必要と判断されたら、補修を行う。
- (g) 補修後の劣化因子の浸透深さ、コンクリート表面の

劣化深さを微破壊試験により継続調査する。

このように、(a)～(g)の手順の中で微／非破壊試験を活用することによって、進展期に至る前に劣化の兆候を掴み、適切な対処を行えば予防保全が実施できるものと思われる。このことが構造物の長寿命化につながり、結果的にLCC最適化にも貢献できるものと思われる。

6. おわりに

微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法調査研究委員会の2年間にわたる活動成果の概要を示した。今後コンクリート構造物の長寿命化時代の維持管理は、劣化が顕在化する前に措置することが重要であり、進展期に至る前にその兆候を把握すれば、予防保全に基づく対策が実施でき、LCCの低減を図ることや、長期間健全な状態で構造物を使用できることが期待できる。このためには、比較的簡単に多くのデータを採取できる微／非破壊試験を積極的に活用することにより、構造物内の劣化の分布状況や経時変化を的確に評価し、適切な時期と適切な範囲を特定して、無駄の少ない補修・補強対策を講じなければならない。

現在実用化あるいは提案されている各種の微／非破壊試験をさらに活用することにより、コンクリート構造物のあるべき姿が実現されていくことを期待するとともに、その有用性がさらに認められることにより、微／非破壊試験方法がさらに進化したものになることにも期待したい。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成18年度 国土交通白書Ⅱ部第1章コラム・事例
- 2) 国土交通省：平成17年度 国土交通白書第1部第3章コラム・事例
- 3) 一般社団法人ソフトコアリング協会：内部資料
- 4) 岩城一郎、鶴田浩章、上原子晶久、荒木昭俊、相馬基、鈴木基行：青森県日本海沿岸において著しい塩害を受けたコンクリート橋の劣化調査、橋梁と基礎、2007, Vol. 41, No. 10, pp. 33-37