報告　非破壊検査手法による既設 RC 桁・床版の劣化調査

加藤　潔[*1]・堤　洋一[*2]・加藤　佳孝[*3]・魚本　健人[*4]

要旨：コンクリート構造物の劣化診断における非破壊検査手法の適用性，また検査結果の精度検証や評価方法を考察することを目的として，疲労損傷を受けた既設 RC 構造道路橋の桁・床版の劣化調査を行った。本調査では，各種の非破壊検査手法を適用し，劣化診断に必要と考えられるかぶりコンクリートの浮き，ひび割れ性状，床版の厚さ，配筋状態，車両走行時の桁のひずみ・固有振動数などのデータを採取し，各手法の劣化診断に対する適用性及びデータの信頼性を評価した。

キーワード：劣化調査，非破壊検査，RC 構造道路高架橋，桁，床版，疲労損傷

1. はじめに

今後，我が国において，これまで蓄積されてきた莫大な社会資本ストックの維持管理が避けられない課題となるのは明白であり，いかに効率よく維持管理してゆくかが要点となる。そのような背景から，近年，劣化診断に非破壊検査（以下，NDT）を適用しようとする動きが高まり，各方面において，研究開発が行われるようになってはきているが，個々の NDT 手法も含めて，まだ，劣化調査方法として十分システム化されていないように思われる。

このような現状を踏まえ，疲労損傷を受けた RC 構造道路高架橋の桁及び床版について NDT を実施し，劣化度又は健全度を評価するために必要とされる各種データをどのような NDT 手法で提供できるかについて，適用性，信頼性の面から評価した。

2. 維持管理における劣化診断の考え方

構造物の維持管理についての基本的な考え方は，2001 年制定の土木学会コンクリート標準示方書・維持管理編に以下のように示されている。

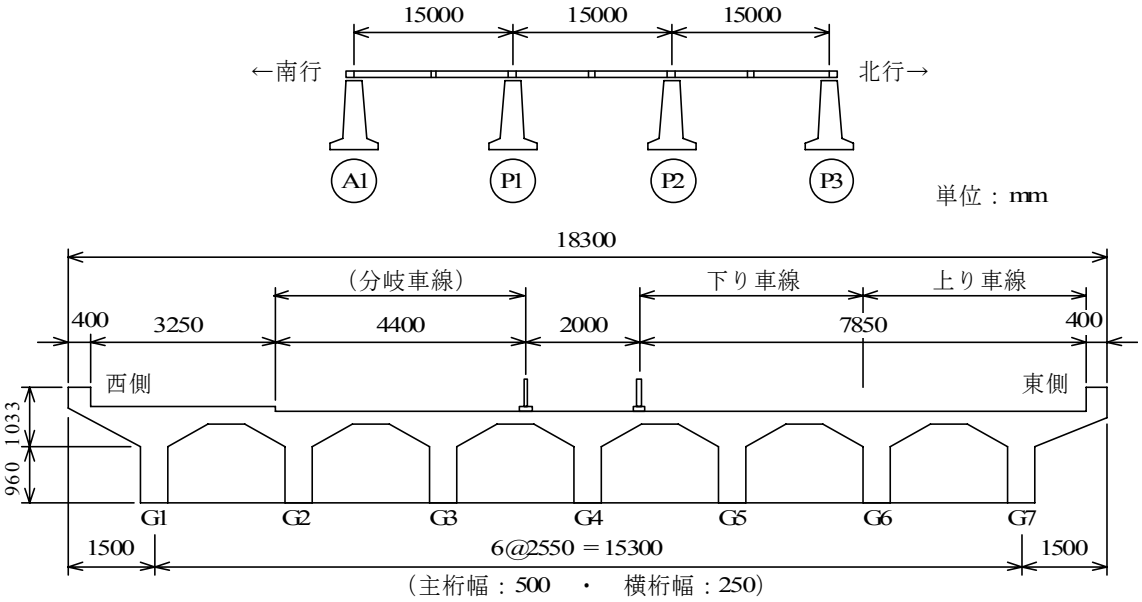
(a) 対象構造物に要求される性能を明確にする。

(b) 維持管理区分を定め，供用期間中を通じて構造物の要求性能が許容範囲内に維持できるように，初期点検，劣化予測，点検，評価及び判定，対策，記録を行う。

この考えにもとづいて構造物の維持管理を行ってゆく場合，構造物の環境・供用条件などを考慮した上で，要求される性能を明らかにし，維持管理区分を決定し，点検結果や劣化予測の結果を踏まえた体系的な維持管理が求められる。このような体系的な維持管理において必要となる劣化予測，評価及び判定，対策のために劣化診断が位置付けられる。

維持管理の体系に位置付けられる劣化診断の役目は，「劣化の原因」，「構造物の性能レベル」，「将来の劣化の進行予想」及び「補修・補強の要否及びその時期」に関する情報を適格に提供することである。これらの調査を的確，かつ効率よく行うためには，調査の初期の段階で劣化機構[1)]と劣化過程[2)]の段階を把握することが望ましい。

*1 日本X線検査（株）　常務取締役　技術開発部部長　(正会員)
*2 （財）道路保全技術センター　道路保全技術研究所　研究企画部　主任研究員　(正会員)
*3 東京大学　生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター　講師　博士（工学）　(正会員)
*4 東京大学　生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター　教授　工博（正会員）



図－1　調査対象道路橋概略図

3. 高架橋の桁・床版の劣化調査の概要

調査の対象となった高架橋の諸元は次のとおりである。また，概略図を**図－1** に示す。現在の交通量は 8 時から 20 時の 12 時間で約 24,000 台（うち，大型車 12%）である。

構 造 形 式：RC 構造 3 径間連続桁橋

橋長・幅員：45m・18.3m

準拠基準類：コンクリート標準示方書（S42）

　　鉄筋コンクリート道路橋示方書（S39）

架　設　年：昭和 45 年

3.1 劣化機構と劣化過程

環境及び外観調査などから判断して，劣化機構としては交通荷重の増加に伴う「疲労による劣化」に分類された。外観上，交通荷重に起因すると考えられるひび割れが床版及び主桁に発生している状態（**図－2**）であり，劣化過程[2)]としては「潜伏期」から「進展期」に移る段階にあると判断された。潜伏期後半にある構造物の維持管理または劣化診断に必要とされる情報[1)]をまとめると**表－1** のとおりである。

3.2 NDT 手法の適用

本調査では，**表－1** を参考に，調査場所の環境などを考慮し，NDT 手法を選択して適用した。すなわち，構造物諸元を確認するための構造調査，健全性を確認・追跡するための定期点検，及び劣化進行予測に必要なイベントの発生を検知するためのモニタリングに分け，それぞれに適した NDT 手法を選択した。

図－2　床版裏面のひび割れ

ただし，コンクリート強度については既存のデータを利用することとし，調査対象からはずした。各 NDT 手法の適用部位を**図－3** に示す。

4. 構造調査を目的とした NDT の結果

4.1 衝撃弾性波法

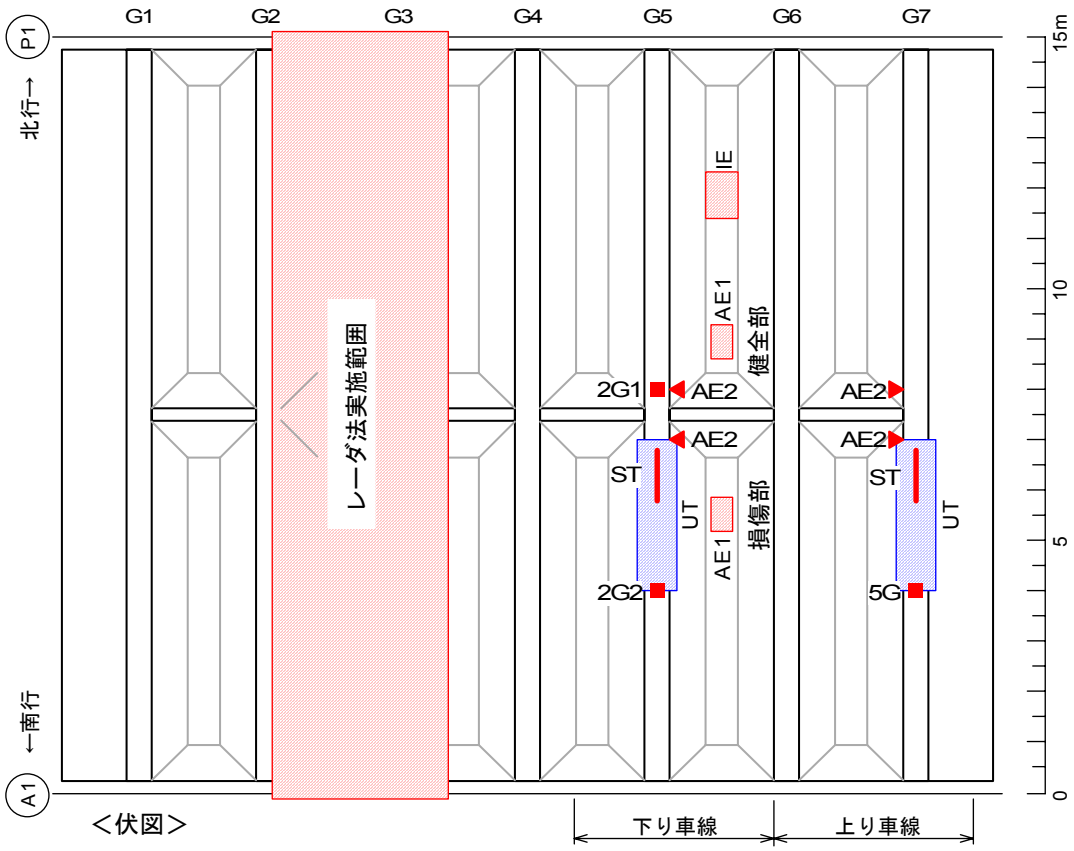
(1) 検査諸元

(a) 検 査 目 的：床版厚さの測定

(b) 検 査 手 法：インパクトエコー法

表－1　潜伏期後半の疲労損傷状態にある桁・床版の劣化診断に必要とされる情報 [1)]

診断内容	評価項目	情報（調査項目）
現状認識 （劣化の有無）	構造物諸元	建設年
		床版厚・桁寸法
		配筋
		材料規格（配合）
	健全性	コンクリート強度
		豆板・浮きの有無・範囲・深さ
		鉄筋のかぶり・間隔
		ひび割れのパターン・幅・深さ・本数・密度
		漏水・遊離石灰の有無
		たわみ・ひび割れ開閉量
劣化予測 （疲労寿命）	劣化進行予測	鋼材の発生応力
		荷重頻度（交通量・車両重量）
		類似構造物の劣化事例
		S-N 線図にもとづく線形累積損傷率の評価



IE ：インパクトエコー法　　AE1 ：AE法（AE1システム）
UT ：超音波法　　AE2 ：AE法（AE2システム）
2G1, 2G2, 5G ：加速度計測　　ST ：光ファイバー法

図－3　各非破壊検査手法の適用部位

(c) 使 用 装 置：Impact-Echo システム

(2) 測定結果

60×90cm の範囲を 10cm 間隔で 70 点の舛目交差部を計測し，53 点において有効なデータ得られた。そのうち，47 点で 196～208mm の範囲の値が得られたことから，現状の躯体厚さを約 200mm と判断し、設計値の 180mm の厚さは確保されていることを確認した。

4.2 レーダ法

(1) 検査諸元

(a) 検査目的：床版の配筋状態の把握

(b) 検査手法：地中レーダ法

(c) 使用装置：1.5GHz マルチパスアレイレーダ

(2) 探査結果

舗装面から，橋軸方向に約 70cm 間隔で 5 本走査し，約 3.5m の幅で 1 スパン（16m）の範囲の床版の配筋状態を探査した。画像合成した全体図と配筋設計図を比較し，ほぼ図面どおり施工されていることを確認した。

5. 定期点検を目的とした NDT 結果

5.1 赤外線法

(1) 検査諸元

(a) 検査目的：浮き・はく離の検出

(b) 検査手法：赤外線カメラ・パッシブ法

(c) 検査装置：FLIR 社製 SC-3000・日本アビオニクス社製ネオサーモ TVS-700
測定波長 8～14μm
温度分解能 0.02～0.05℃

(2) 検査結果

測定時の気象条件は以下の通りである。

(a) 天候：晴時々曇り

(b) 気温：15.1～21.8℃，日較差 6.7℃

測定は，浮き部と健全部に温度差が最も生じる 14 時～15 時の時間帯で行った。局部的な浮きが検出されたが，大きな浮き及びはく落の恐れがある浮きは認められなかった。通常，浮き部は周囲の健全部より温度が高くなるが，今回調査は，強制加熱を行わないパッシブ法で，温度上昇のピークに達する時間帯に行ったため，桁下部表面と床版裏面とでは熱の供給源が異なり，床版裏面は路面から伝わった熱によって支配され，浮き部が熱を遮断して相対的に周囲より低温部として観察された個所もあった。

5.2 デジタルカメラ法

(1) 検査諸元

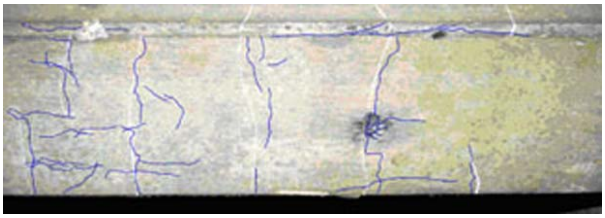
(a) 検査目的：ひび割れ幅・分布の把握

(b) 検査手法：カメラ撮影・画像解析

(c) 撮影装置：ニコン社製 D100

(2) 検査結果

桁及び床版下面について撮影を行った。撮影された画像は，専用の画像処理ソフトによって，レンズ歪み，幾何学的補正及び濃淡補正を行い，ひび割れの分布図を作成した（**図－4**）。ひび割れ幅は，ほとんどが 0.25mm 以下であった。



図－4　桁下面のひび割れ分布（解析画像）

5.3 超音波法

(1) 検査諸元

(a) 検査目的：ひび割れ深さの測定

(b) 検査手法：縦波・直角回折波法

(c) 検査装置：東横エルメス社製 ESI／P-10
使用周波数 28kHz，200kHz

(2) 検査結果

桁側面のほとんどのひび割れは鉄筋のかぶりを超え，一部は桁幅（500mm）の半分以上と測定された。下面ひび割れは 100mm 前後と側面にくらべて浅く測定されたが，主筋やエフロレッセンスの影響を受け，ひび割れ先端部が捉えられていない可能性がある。

5.4 加速度計測

(1) 検査諸元

(a) 検査目的：主桁の固有振動数の算出

(b) 検査手法：加速度計による加速度計測・

高速フーリエ変換（FFT）による固有振動数の算出

(c) 使用加速度計：東京測器社製
AFR-20A・容量 20m/sec^2（2.04G）
応答周波数 80Hz
AFR-50A・容量 50m/sec2（5.1G）
応答周波数 130Hz

(2) 検査結果

計測は 20 トン及び 38 トン試験車両を上下車線で 30～50km/h の定速走行させて行った。算出された固有振動数は，走行車線の違いによる多少のばらつきはあったが，全体として理論値（8.93Hz）の約 90%の値となっており，ひび割れなどによって桁の劣化が進んでいるとみられる。なお，理論値fは次式によって求めた。

$$f = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \times \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

ここで，L：桁長さ＝15m
E：弾性係数＝2.4×10^{10}kN/mm^2
I：断面二次モーメント＝0.186mm^4
ρ：コンクリートの密度＝2450kg/m^3
A：桁断面積＝1.133m^2

6. モニタリングを目的とした NDT 結果

6.1 AE 法

検査の目的及び手法が異なる 2 種類のシステム（AE1 システム・AE2 システム）を適用した。

(1) 検査諸元

(a) 検査目的：ひび割れの発生・進展・位置の検出（AE1 システム），地震などの急激な外力に伴う劣化損傷の検出（AE2 システム）

(b) 検査手法：複数センサー群による AE ヒット数・AE エネルギー数の定量化（AE1 システム），単独のセンサーによる AE カウント数の推移の観察（AE2 システム）

(c) 検査装置：PAC 社製 DiSP 8ch AE 計測システム・AE センサーPAC R3I（30kHz 共振型）（AE1 システム），ジャスト社製スマート AE センサーをベースとしたシステム（AE2 システム）

(2) 検査結果

通常の供用中のもとで，20 トン及び 38 トンの試験車を 30～50km/h の範囲の種々の速度で上下線を定速走行，停止，発進させて測定を行った。

AE1 システムによる測定では，健全部に比べ，損傷部の方が 10 倍以上のヒット数，エネルギー数が得られ，健全部と損傷部に明らかな違いが認められた。

AE2 システムによる測定では，G7 桁に貼り付けた 2 本のセンサーが 20 トン車及び 38 トン車の走行による AE をカウントし，38 トン車の方が，カウント数が多いことが確認された。

6.2 光ファイバー法

(1) 検査諸元

(a) 検査目的：主桁のひずみ測定

(b) 検査手法：光ストランドセンサーによる動ひずみ測定

(c) 使用システム：OSMOS
計測感度・精度：±0.004mm・±0.02mm

(2) 検査結果

測定は 38 トン試験車両を上下車線で 30～50km/h の定速走行させて行った。車線ごとの試験車走行時にそれぞれの車線下の主桁に明瞭なひずみが検知された。それぞれのひずみは，下り車線下の G5 主桁では 70～80 マイクロストレイン，上り車線下の G7 主桁では約 110 マイクロストレインであった。なお，走行速度ごとの有意差は認められなかった。

7. 考察

7.1 構造調査

今回，構造調査として，床版の厚さ，配筋状態及びコンクリート強度に関する情報が得られた。今回調査の対象となった道路高架橋は，事前の外観的な調査などで，劣化機構としては通行車両に起因する疲労損傷あることが明らかになっていたことから，現時点では，構造に関する情報としては十分であると考える。

7.2 定期点検

浮き・はく離の検査は第三者被害を未然に防ぐのが主目的であり，赤外線法による検出のみではなく，複数の手法を組み合わせるなどして，はく落の危険性を判断または予知できるシステムの構築が望まれる。

デジタルカメラ法による調査結果から，ひび割れの開口幅のほとんどが 0.25mm 以下であることが確認された。一方，超音波法による深さ測定では，主桁側面のひび割れのほとんどが鉄筋のかぶりを超える深さまで達しているとの結果となり，開口幅に対する深さの割合が大きいとの見解もあり，いずれの手法も気象条件の異なる時期での再測定，または他の手法による検証が必要と考える。また，ひび割れが鉄筋まで達しているとすれば，自然電位法による鉄筋腐食調査の適用も考慮する必要がある。

主桁の固有振動数の理論値に対する実測値の比率が，補修の目安とされている 0.7 [3] までは至っていないものの，全体として 0.9 を下回る結果となったが，今回，基準とした理論値は，桁長さを 1 スパンの 15m として算出しているので，実際の 3 径間連続桁（15m×3 径間）による理論値にもとづく検証もさらに必要と考える。

7.3 モニタリング

AE 法は，コンクリートの構造物の検査手法としてはこれからの技術であるが，健全部と損傷部とに明らかな有異差が認められたことから，AE カウント数，AE ヒット数，AE エネルギー数またはその推移に着目することで，今後，診断の一手法として適用可能と考える。また，単独センサーによるカウント数にのみ注目した計測においても，活荷重の差が識別され，地震，事故等による瞬時的な損傷のイベントの検知も可能であることが確認された。ただし，一般的な検査手法として認知されるには，データベース及び統一的な評価基準の構築が必要と思われる。

光ファイバー法によるひずみ測定は，活荷重に対する応答が速く，また，安定した測定結果が得られることが確認された。今回はひずみ量の測定を目的として適用されたが，応用として，継続的な測定データを分析することによって，劣化の検知や交通量・車両重量の把握にも適用できる手法である。

8. まとめ

本調査は継続され，診断のためのデータ整理はこれからであるが，現時点で得られた知見をまとめると以下の通りである。

(1) NDT 手法を適切に適用するため，また，目的に対応したデータを効率よく得るために，調査を開始するにあたり，劣化機構及び劣化過程の段階を見極め，データの内容とその精度を明確にすることが重要である。

(2) 浮き・はく離の調査，ひび割れ深さ及び開口幅の測定などは，データの信頼性を高めるために気象条件を考慮した測定方法または解析方法を検討する必要がある。

(3) AE 法及び光ファイバー法とも長期的な遠隔地でのモニタリングが可能であり，継続的に採取されたデータを分析することで劣化調査に関わる幅広い情報が得られる。

(4) 構造調査，定期点検及びモニタリングを有機的に機能させることによって劣化調査の信頼性向上，効率化が期待される。

謝辞

本報告は，「コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会」（(財) 生産技術研究奨励会）に参加されている委員の皆様によって計測されたデータをまとめたものであることを付記する。

参考文献

1) 魚本健人監修：コンクリート構造物の検査・診断，理工図書，2003
2) 土木学会：コンクリート標準示方書・維持管理編
3) 中村 豊，富田健司，西永雅行：常時微動による橋梁振動特性の推定，鉄道総合技術論文誌，Vol.7，No.12，pp57-64，1993.12