

報告 非破壊検査手法を用いた既設 PC 桁の調査

勝木 太^{*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方法の適用性，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，塩害を受けた既設 PC 高架橋主桁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，劣化診断に必要とされるかぶりコンクリートの浮き，ひび割れ性状，鉄筋腐食の可能性，PC ダクト内部の充填状況，車両走行時の桁ひずみや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やデータの信頼性を検討した。

キーワード：非破壊検査，劣化診断，維持管理，PC 桁，塩害

1. はじめに

現在，コンクリート構造物の高度な劣化診断を行うために，各種の非破壊検査（以下 NDT と略記）手法が劣化調査に取り入れられるようになってきた。しかしこれら NDT 手法は，検査対象となるコンクリートが複合材料であること，

コンクリート内部には鉄筋などの異種材料が多量に使用されていること，自然環境下で検査しなければならないこと，詳細な情報を広範囲に検査しなければならないことなど，検査精度や作業性を低下させるいくつかの問題を抱えている¹⁾。また一方では，NDT 手法やその結果をどのように劣化診断に適用していくのか，十分にシステム化されていない。そこで，塩害の作用を受けたポストテンション方式の既設 PC 高架橋の主桁について劣化調査を行い，劣化診断を行うために必要とされる各種データをどのような NDT 手法によって，またどの程度の精度で提供できるのか報告する。

2. 調査内容

2.1 既設 PC 桁の概要

図 - 1 に調査を実施したポストテンション方

式の PC 桁の断面緒元を示すが，この桁は海岸沿いに架設されており，建設後約 35 年経過している。なお桁の両端は，単純支持されている。

2.2 調査項目と調査目的

今回実施した各種非破壊検査手法と調査項目を表 - 1 に示す。本調査では，塩害によるコンクリートの浮き・剥離を検出するための赤外線法や打音法，鉄筋腐食の可能性を検出するための自然電位法を実施した。また，ポストテンション方式の PC 桁であることから，PC グラウトの

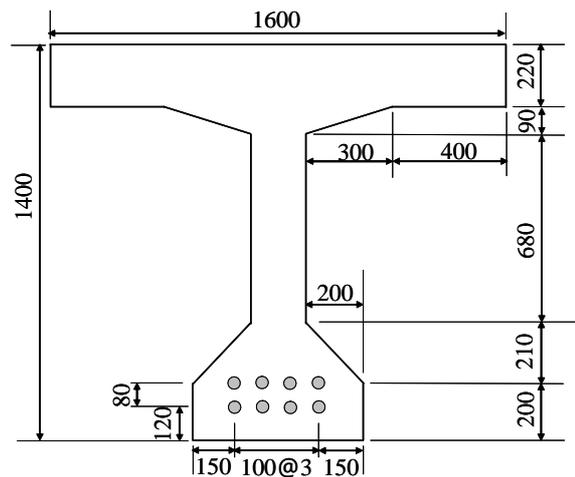


図 - 1 PC 桁支間中央断面の概要（単位：mm）

*1 芝浦工業大学 工学部建設系土木工学科 助教授 博士（工学）（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）

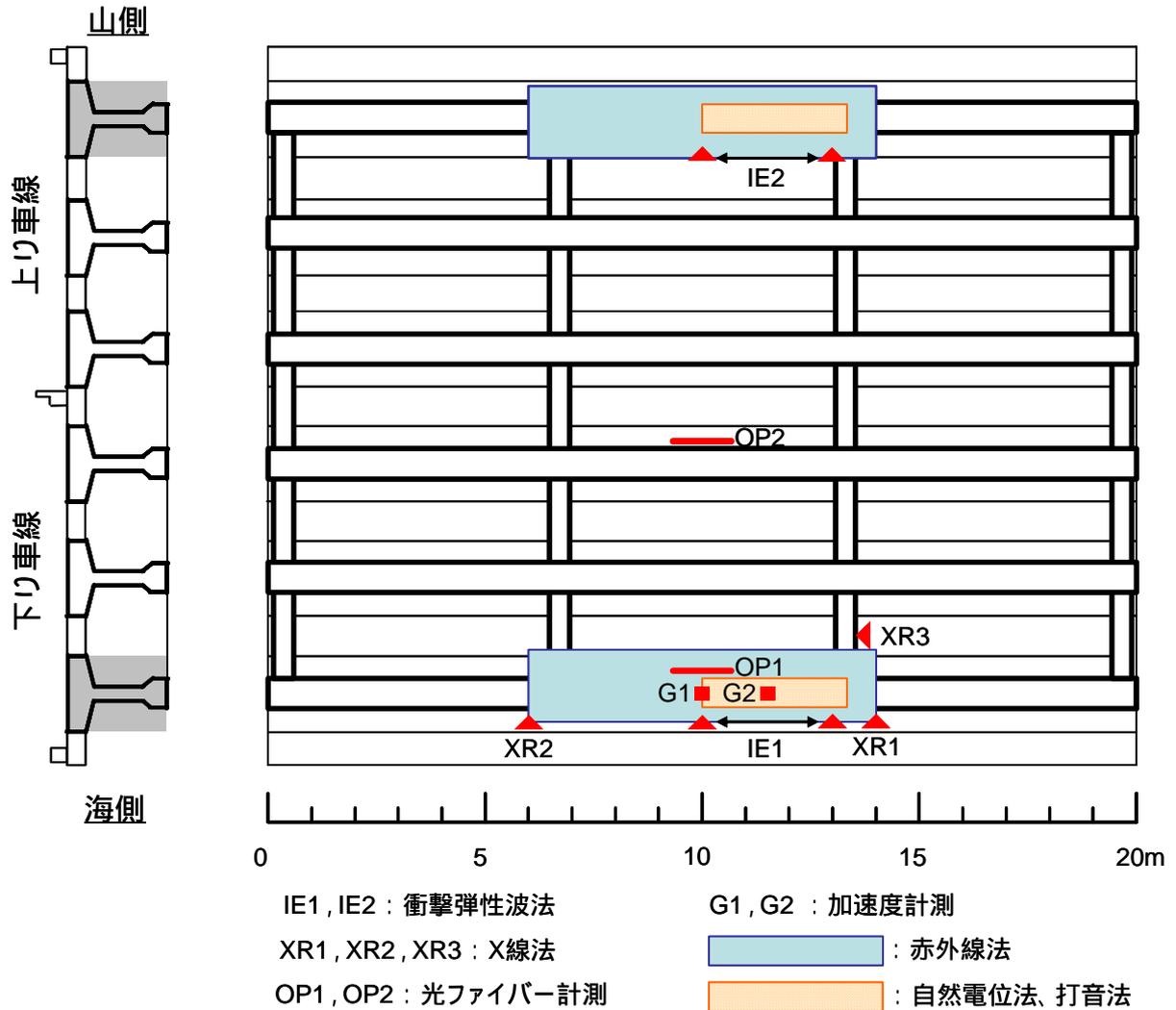


図-2 各種 NDT 手法の調査箇所

充填状況を確認するための X 線法，衝撃弾性波法も実施した。さらに，20tf 試験車走行時の応答加速度，および桁ひずみの計測も実施した。

表 - 1 調査項目

非破壊検査	調査目的
デジタル写真法	ひび割れ本数・幅の検出
赤外線法	かぶりコンクリートの浮き・剥離の検出
打音法	
X 線法	PC グラウトの充填状況の検出
衝撃弾性波法	
自然電位法	鉄筋の腐食可能性の評価
加速度計測	桁の固有振動数の評価
光ファイバー計測	桁ひずみ分布の検出

2.3 調査箇所

調査は損傷度ランク²⁾が異なる 3 つの径間を対象に行い(損傷度 , 損傷度 , 損傷度) , 各々の径間について図 - 2 に示す二本の主桁(海側と山側)を調査した。

3. 使用機器と測定方法

3.1 デジタル写真法

デジタル写真法は，撮影した高精密度デジタル画像を，レンズ歪や幾何学的な補正，および濃淡補正により改善させることで，コンクリート表面のひび割れ部や損傷部を抽出する手法である。使用したデジタルカメラの有効画素数は 6.1 メガピクセルで，画像解析は汎用の画像診断支援ソフトを使用した。

3.2 赤外線法

赤外線法は、赤外線カメラによって画像化されたコンクリート表面の経時的な温度分布の変化を統計的に処理することにより、浮き部に生じる特有な微小温度変化範囲を検出する手法である。使用した赤外線カメラは赤外線検出素子を二次元に配列したセンサーを使用した電子走査式の装置で、温度分解能が 0.02 である。今回の測定は日射を利用して測定を行うパッシブ法を適用したことから、高感度型のものを使用した。測定は、浮き部と健全部に温度差が最も生じる時間帯である温度上昇ピーク時付近（10:30～12:30）で行った。なお測定日の気温日較差は、9.6 であった。

3.3 打音法

今回使用した打音装置は、バネ圧縮打撃方式のハンマーによる打撃によってコンクリート表面に振動を与え、内蔵の速度型磁歪センサーでその振動を計測し、浮きなどの異常を三段階で評価するものである。異常の識別は LED 表示によって行われ、青ランプ点灯は表面から 20cm の範囲には異常が無く、黄ランプ点灯は 10～20cm の範囲に、赤ランプ点灯は 5～15cm の範囲に異常が存在すると判定する。

3.4 自然電位法

自然電位の測定方法は、土木学会規準「コンクリート構造物における自然電位測定方法（JSCE-E601-2000）」に準じた。また、コンクリート表面で測定される鉄筋の自然電位の補正については、腐食防食小委員会で報告されているかぶりコンクリートの含水率と中性化深さによって行う方法を用いた³⁾。なお自然電位の測定は、コンクリート表面を霧吹きで十分に湿潤させた後、回転式鉛照合電極を走査させて、5cm 間隔でデータを取得し、硫酸銅照合電極を基準とした電位に換算した。

3.5 X 線法

現場への持込が比較的容易な低エネルギータイプ（300kV）の X 線発生装置、およびデジタル X 線撮影媒体としてイメージングプレートを用いた X 線透過試験により、主桁・横桁に配置されているシース管の撮影を行った。

用いた X 線透過試験により、主桁・横桁に配置されているシース管の撮影を行った。

3.6 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法による検出対象は、PC ダクト周囲の空洞又は空隙も含めたダクト内及びその周囲の不具合部とした。探査は、まず、不具合部の有無だけを判断するため、桁フランジ下面の桁軸方向中心線上を 50～100 mm ピッチで測定し、次に、不具合部が存在する可能性があるかと判断された箇所について、桁軸直角方向について 25～50 mm ピッチで測定する手順で進める。最終的に、測定データを解析して、不具合部の断面位置を特定する。

3.7 加速度計測

加速度の計測は、20tf の試験車が走行した後（荷重開放後）に得られる桁の自由振動時に、小型低容量（ 20m/s^2 ）の加速度計を用いて行った。加速度計は、支間中央部とその中央部から 4m 離れた桁下面に取り付けた。なお桁の健全性は、計測された加速度を高速フーリエ（FFT）変換することによって得られる桁の固有振動数を用いて評価する。健全性の評価は、健全な桁と損傷した桁からそれぞれ計測される固有振動数を比較することにより行う方法と、もうひとつは設計図から求めた理論上の固有振動数と比較する方法が考えられる。今回の加速度計測においては、損傷度の径間のみでの計測になってしまったので、本報告では、後者の方法によって桁の健全性を評価することにする。

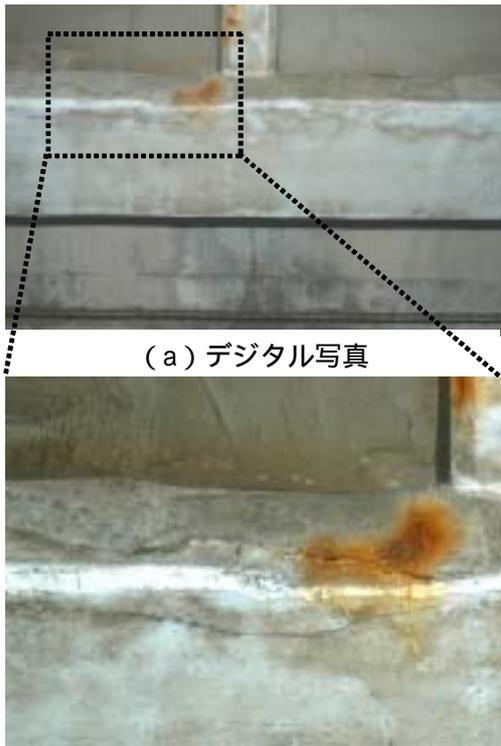
3.8 光ファイバーによるひずみ計測

光ファイバーには、ロングセンサーとして代表的な光学ストランドセンサー（OSMOS）を用い、20tf 試験車走行時に生じる桁断面位置のひずみを計測した。

4. 実験結果と考察

4.1 デジタル写真法によるひび割れ部の検出

図 - 3 に損傷度の径間の海側で撮影されたデジタル写真と拡大写真（濃淡調整後）の一例を示す。デジタル写真では $1.5 \times 2.0\text{m}$ の桁側面部



(a) デジタル写真

(b) 拡大写真 (濃淡調整)

図 - 3 デジタル写真法による画像例

が 2000 × 3000 ピクセルの画素数で撮影されており、1 画素当たり約 0.7mm となる。この拡大写



図 - 4 ひび割れ幅抽出結果画像

真をもとにひび割れ幅を抽出した結果を図 - 4 に示すが、0.25mm 程度までひび割れ幅の検出が可能であることが分かった。

4.2 鉄筋腐食に伴う浮き部の検出

一例として損傷度の異なる各径間の海側桁下面で計測された自然電位と打音法で判定された異常個所の結果を図 - 5 に示す。自然電位は硫酸銅照合電極を基準とし、図中の凡例に示すような 4 段階の電位区分によって分布表示した。また打音法では、測定箇所点灯したランプの色を赤色の、黄色の、青色の でそれぞれ示

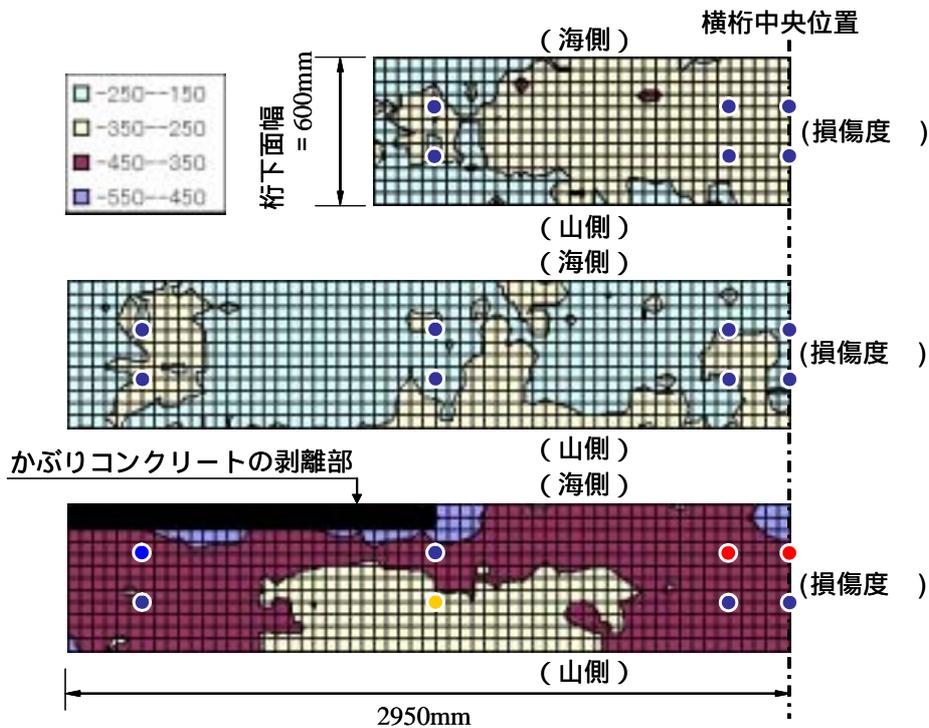


図 - 5 海側桁下面の自然電位分布と打音法による異常個所判定結果

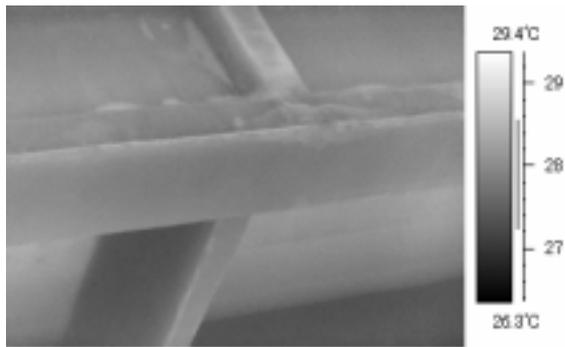


図 - 6 横桁近傍の赤外線画像

した。図より、劣化損傷が表面化している桁（損傷度）の自然電位が最も低い分布になっており、鉄筋腐食の可能性が非常に高いことがわかる。特に -450mV 以下の電位が計測された海側の横桁近傍では、打音検査において赤色のランプが点灯しており、鉄筋腐食による浮き部が存在している可能性が非常に高い。そこで、この近傍で海側から測定した赤外線可視画像を図 - 6 に示すが、打音検査で浮き部の存在を確認した位置、すなわち横桁位置の桁下面（海側）に低温領域が存在しており、赤外線法においても浮き部の存在が確認されている。このように、いくつかの検査手法を重ね合わせることで、より精度よく浮き部の存在や位置（領域）を確認できることがわかる。

4.3 PC ダクト内部のグラウト未充填部の検出

X 線透過試験により撮影された横桁に配置さ

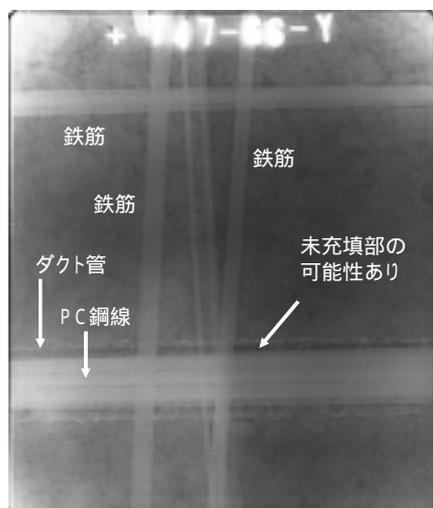


図 - 7 横桁の X 線透過画像

れている PC ダクトの画像を図 - 7 に示す。図より、PC 鋼棒下に相対的に濃い部分が存在しており、グラウト未充填の可能性が高いことが分かる。ただし、鋼材の腐食まではこの画像から判

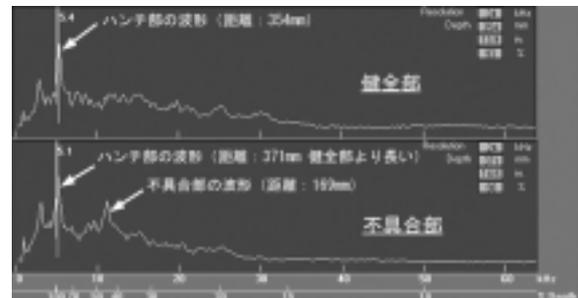


図 - 8 探査画像の一例（健全部と不具合部）

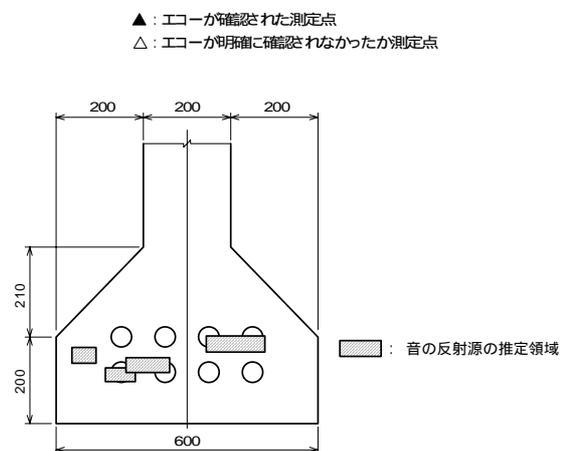
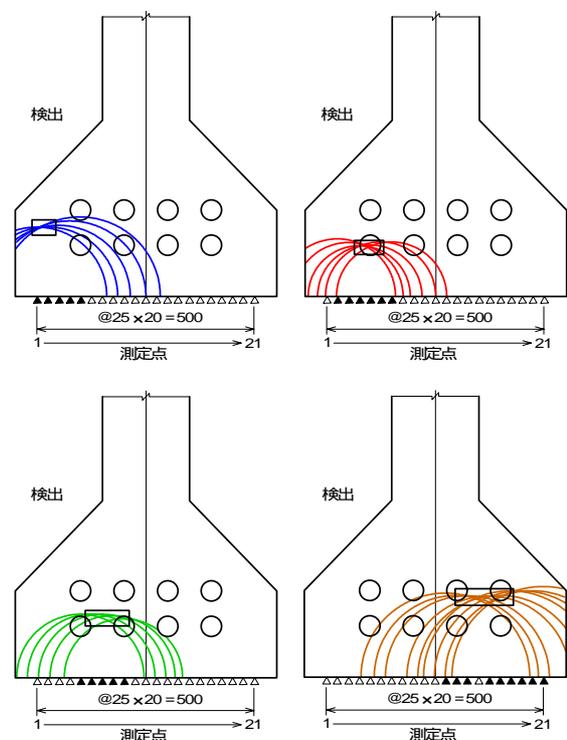


図 - 9 山側主桁の探査結果

断することができない。なお、主桁フランジの海側最縁部に配置されている PC ダクトには、このような未充填部は確認されなかった。

次に衝撃弾性波法において、不具合部はハンチからの反射波の有無と反射波の到達時間の遅れの有無との両方から判断する。図-8 に健全部と不具合部が存在する可能性があるとして判断された箇所の探査画像を示す。両者の探査画像を比較すると、不具合部の画像ではハンチ部手前からの反射波が確認され、またハンチ部からの反射波の遅れが確認されており、不具合部が存在する可能性があることが分かる。そこで、不具合部の可能性がある断面において、桁軸直角方向に 25 mm ピッチで 21 点計測を行い、それらの計測結果を組み合わせ、不具合部の可能性がある音の反射源の特定を行った結果を図-9 に示す。図より多点測定データを組み合わせることによって音の反射源を特定できることが確認された。

4.4 加速度計測による桁の固有振動数

桁の 2 箇所に取付けた加速度計によって計測された加速度を FFT 変換し、波形が最も卓越する位置の固有振動数を比較すると、両者の固有振動数 (f_e) は 7.32Hz と同じであることが確認された。すなわち、今回の計測においては、加速度計設置位置近傍のひび割れや断面欠損の影響を局所的に受けることなく、桁全体の固有振動数を評価できていると判断される。そこで、単純梁部材の理論固有振動数 (f_t) と比較すると、 $f_e/f_t = 1.10$ となり、ほぼ同じ固有振動数となった。今後は、健全な桁の固有振動数と比較し、桁の健全性を再評価する必要がある。

4.5 光ファイバー計測による桁下面のひずみ

試験車走行時に桁下面に発生したひずみは、損傷度 の桁で 34μ 、損傷度 の桁で 39μ 、損傷度 の桁で 33μ であり、今回の測定では損傷度の違いによる発生ひずみに差異が確認されなかった。今後、計測データを利用して桁の振動特性や中立軸位置などに差異が生じていないかさらに確認する必要がある。

5. まとめ

- (1) デジタル写真法は、今回の撮影条件において、デジタル画像から 0.25mm 以上のひび割れ幅を検出でき、劣化度判定や継続的なひび割れ管理に有効であることが分かった。
- (2) 鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの浮きについては、自然電位法、打音法、赤外線法から得られる計測データを組み合わせることによって、広範囲に精度よく検出することができることが確認された。
- (3) グラウト未充填部の検出には、X 線透過画像の濃淡から検出できるが、X 線エネルギーの規制から検査対象となる部材厚にその精度は左右される。また衝撃弾性波法では、多点測定データを組み合わせることにより音の反射源を特定することができた。ただし、反射源がダクト内の未充填部やダクト周りのコンクリートの不具合部なのかは、今後の実証結果を待つ必要がある。なお今回の解析で、得られたデータについて理論的に解明できない点もあり、それらは今後の課題とする。
- (4) 加速度計測や光ファイバー計測により、桁の固有振動数やひずみを検出できることが確認された。これらの手法はモニタリングに適しており、継続的な監視によって劣化の進行を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 魚本健人：非破壊検査に期待するもの、セメント・コンクリート, No.693, pp.1-8, 2004.11
- 2) (独)土木研究所：橋梁点検要領(案), 1998.7
- 3) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, コンクリート技術シリーズ 26, pp.123-126, 1997.12

謝辞

本稿は、「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。