

# PC 道路橋における非破壊検査の活用

## — 高速道路橋における実施事例 —

青木 圭一\*

NEXCO では、従来からの検査（川上管理）に加えて種々の非破壊検査を要領化し、いわゆる川下管理を導入するなど、積極的に検査技術の精度向上や検査の省力化を試みている。本稿では、コンクリート構造物や PC 構造物への非破壊検査として、反発硬度法によるコンクリート強度検査、電磁波、電磁誘導法、超音波法による鉄筋かぶり検査、マルチパスアレイレーダ法や広帯域超音波法による PC グラウト充填検査、漏洩磁束法（MFL 工法）による PC 鋼材破断検査を運用または開発を行っている。これら非破壊検査技術の概要および精度、適用状況などについて紹介するとともに、今後の非破壊検査適用の課題について紹介する。

キーワード：反発硬度法、かぶり測定、マルチパスアレイレーダ法、広帯域超音波法、漏洩磁束法

### 1. はじめに

NEXCO が管理する高速道路の橋梁は、平成 23 年度末で約 18 000 橋（上下線・構造形式ごとにカウント）、連数では 30 000 連を超え、上下線別の橋梁延長では 2 700 km を超えるまでに至っている。橋梁の平均年齢は 30 歳に達しようとしており、高齢化すなわち老朽化が今後の大きな懸念材料となりつつある。

NEXCO では、本年 1 月に発表された「高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会（委員長：藤野東京大学特任教授（当時）」の報告書<sup>1)</sup>にあるように、橋梁の大規模更新・大規模修繕を実施していくこととしており、劣化・損傷している橋梁に対して、大規模更新として RC 橋の架替え約 200 橋、RC 床版の取替え約 2 000 橋、予防保全として約 10 000 橋において高性能床版防水を施工し、今後の維持管理の効率化を図ることとしている。

一方で、橋梁の健全性を把握するうえで、目視による点検では把握しきれない損傷や欠陥も存在するため、大規模更新・修繕を実施したとしても、重大な事象が今後において発症しないとはいえない。このため、橋梁の健全性把握のための調査、すなわち、非破壊検査が今後の維持管理において重要なポイントとなると考えている。

本稿では、NEXCO におけるコンクリート構造物や PC

構造物における非破壊検査の適用状況、今後望まれる非破壊検査、非破壊検査の維持管理への適用について述べる。

### 2. 新設橋への非破壊検査の適用状況

NEXCO（旧 JH を含む）における非破壊検査の適用は新しいことではなく、各現場の判断で適用されてきた。たとえば、橋梁拡幅工事における既設コンクリート構造物における鉄筋位置の調査、コンクリートのひび割れ深さの調査、ジャンカなどの調査などで非破壊検査が適用されてきた。しかし、基準・要領として整備されたのは比較的新しく、平成 12 年のコンクリート施工管理要領<sup>2)</sup>において、コンクリート構造物へ反発硬度法によるコンクリートの強度管理、RC レーダによるかぶり測定が規定されたのが最初である。

また、PC グラウト充填状況においても、施工管理のみではなく非破壊検査による適用を図っているところである。

以下、コンクリート構造物、PC 構造物へのコンクリート強度とかぶり測定への非破壊検査、PC グラウト充填状況の非破壊検査の適用について述べる。

#### 2.1 コンクリート強度とかぶり

コンクリート構造物の品質検査では、試験体によるコンクリート圧縮強度測定およびコンクリート打設前の配筋・型枠検査時に鉄筋かぶりの検査が従来から実施されている。これらは、いわゆる川上管理と呼ばれるものであり、施工プロセスを検査することで、完成したコンクリート構造物が適切か否かを確認する検査方法である。この方法では、コンクリートの締固めや養生が適切に実施されたか、かぶりが最終的に適切に確保されているかの 100 % の保証はできない。従来からの検査方法は、施工が確実に、丁寧に行われることを大前提として、かつ、施工会社側および監督者側が適切に施工状況をも検査してこそ成り立つ検査方法であった。

しかし、人手不足や経験の浅い技術者が監督することなどから適切な施工状況の検査が困難となることが危惧さ



\* Keiichi AOKI

(株) 高速道路総合技術研究所  
道路研究部 橋梁研究室長

れ、また、維持管理の時代へと突入することから、負の遺産を残さない方策を確立する必要がある、そこで、導入されたのが、いわゆる川下管理手法である反発硬度法による実構造物の圧縮強度測定およびRCレーダによるかぶり測定である。

反発硬度法によるコンクリートの強度や密実性の検査では、従来から用いられているシュミットハンマーなどを用いて強度推定を行う（写真 - 1）。強度推定には建築学会などから強度推定式が提唱されているが、実強度と必ずしも相関が一定でない。このため、強度推定を行って検査するのではなく、不良検出という観点から、規準供試体と実構造物の反発度を比較し、実構造物が規準供試体の85%未満であれば不合格とする方法を採用している。

これは、全面的な川下管理ではなく、川上管理を行いつつ川下管理による抑止効果を期待したもので、データ収集を行い非破壊検査の精度向上を図る予定である。このため、現段階での非破壊検査の頻度は、おおむね橋梁延長10mに対して3箇所の測定頻度としている。



写真 - 1 反発硬度法による検査状況

また、鉄筋のかぶり検査においても、配筋検査や型枠検査である川上管理を主体とし、電磁誘導法や電磁波法、超音波法によるいわゆる川下管理（写真 - 2）を併用する方法を採用している。



写真 - 2 電磁波法によるかぶり検査状況

実構造物への非破壊検査の適用性確認試験において、非破壊検査による計測値と実構造物をはつりにとって調査したかぶり値の関係は、その測定機器によりばらつきがあるのが実態である（図 - 1）。このため、現状の非破壊検査測定機械では、測定値が実かぶりと同などの値ではなく、ある基準値を設定する必要があるのが現状である。NEXCOでは、最小かぶり値に施工誤差（+10mm）を考慮したものを設計値としており、これも加味し非破壊検査による閾値としては、最小かぶりの80%未満を不合格とする検査基準としている。また、かぶり測定の非破壊検査の適用頻度は、コンクリート強度のものと同程度で、橋梁延長10mに対して、おおむね3か所程度であり、全面的な展開ではなく、抑止効果を期待した程度の検査となっている。今後、同時に測定機器の精度向上も望まれる課題である。

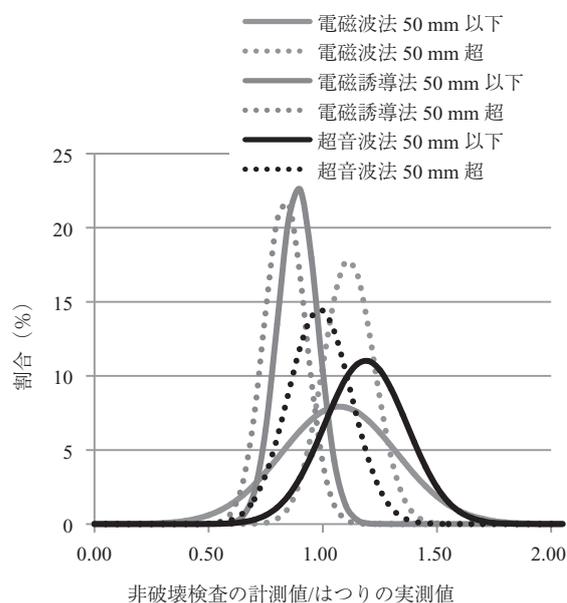


図 - 1 非破壊検査機器の違いによる誤差

## 2.2 PC グラウトの充填度測定

1985年の英国 Ynas-Y-gwas 橋の落橋などを起因としたPCグラウト充填不足に関する課題において、平成11年当時、旧日本道路公団では、PCグラウトを用いる内ケーブル工法を禁止とし、外ケーブル工法の採用、またはプレグラウトPC鋼材を用いることとした。これと同時に、PCグラウトの充填状況を施工完了後に確認できる方法の検討に着手し、平成16年に非破壊検査を適用したPCグラウト充填検査を導入した。その方法は、電磁波による方法（マルチパスアレイレーダ）と超音波による方法（広帯域超音波）の2種類である。

### 2.2.1 マルチパスアレイレーダ

#### (1) 概要

マルチパスアレイレーダ（以下、MPAレーダと称す）は、非破壊検査手法の一つである電磁波法の原理を応用した技術である。

電磁波法とは、地中などに送信された電波が周囲の雰囲気

気と電気的特性の異なる物質の境界で反射波を生じる性質を利用して調査を行うものである(図-2)。具体的には、アンテナ部から対象物に向かって数ns(×10<sup>-9</sup>sec)ごとに波長の短いパルス(モノサイクルパルス)を送信すると、対象物内の異物の境界面で反射され、アンテナに戻ってくる。この反射波を受信し、アンテナ位置・時間・反射波の分布の関係からシース内の空洞を求めるものである。

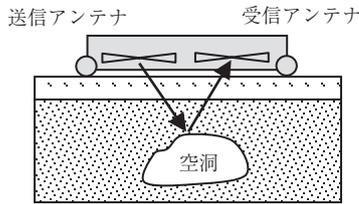


図-2 レーダ探査の原理

電磁波法では、1対の送受信アンテナを用いる方法が一般的であるが、このMPAレーダでは送受信アンテナを多極化したアレイアンテナを採用、さらに1つのアンテナから発信された電波を複数のアンテナで受信可能なマルチパス(多経路)方式により、多くの情報を正確に得ることが可能になり、一度に多くの情報を多角的に取得することで図-3に示すように、データの3次元表示が可能で、これによりコンクリート内部状況を直感的にイメージできる結果を得ることが可能である。

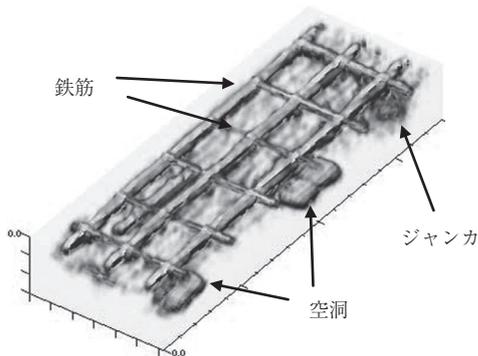


図-3 3次元表示例

また、従来のX線による画像撮影などと異なり、計測結果が数分の解析で表示できるため、現場でのPCグラウト充填の検査を可能とするものである。なお、鉄や水などは電磁波を吸収しやすく、その境界面で全反射し、それ以下の情報が得られない特性をもつ。よって、シース管が鋼製の場合や、計測対象物の直上に水の層や鉄板などがある場合、コンクリート内に金属繊維が混入されている場合などは適用できない。以上より、本検査手法を用いた内ケーブルグラウト検査の適用対象は、ポリエチレン製シースを用いた構造物に限定され、検査面および内ケーブル直上に鉄などの電磁波に影響する障害物が存在しないことが条件となる。

(2) 検証と機器の仕様

用いるMPAレーダの主な仕様は、最大周波数約5GHz

の電磁波を発信できる送信・受信それぞれ16素子(計32素子)のアレイアンテナにより構成され、最大探査深度は約20cm、計測ピッチは1cm、探査幅は50cm/回である(写真-3)。

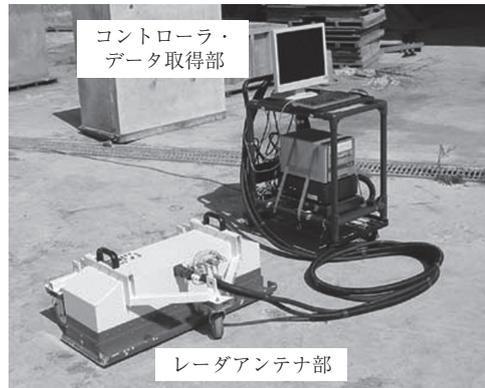


写真-3 レーダ装置

本機器を導入するにあたって、供試体および実橋において、その適用性、PCグラウト充填検査の評価を行っている。

供試体実験においては、版厚350mmの鉄筋コンクリートにポリエチレン製シースφ93mmを配置し、使用PC鋼材は12φ15.2、グラウト充填率をそれぞれ0%から100%まで変化させて行っている。その検証結果の一部を図-4に示す。計測結果は、3次元の立体映像として再現され、任意の角度からの視点で画像表現できる。本検査では、図-4に示すように3次元立体画像を平面図(上面からの透視画像)と側面図(断面方向からの透視画像)として表現し、側面図からグラウト充填の様子(空隙の有無)を確認することとした。

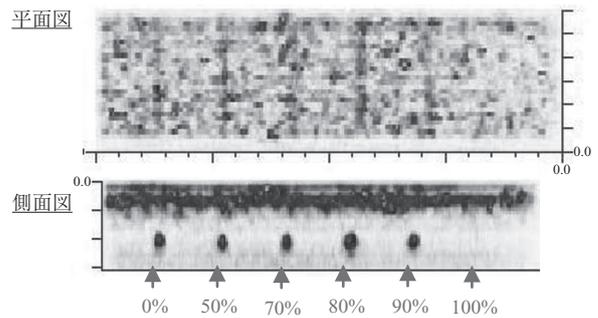


図-4 検査結果の例

計測の結果、充填率0%~90%以下についてケーブル内の空隙からの反射が確認できる。ただし、充填率90%を超える場合については、反射レベルが弱く、判別が不可能であった。このため、画像による検査の実用レベルは、充填率90%程度までが限界と思われる。充填率の定量的な把握については、現状では確認できるデータ取得までには至っていない。

実橋での検証は、平成15年当時施工中であった新東名高速道路朝比奈川橋(PC上部工)上り線工事で行った。

朝比奈川橋は橋長 655.0 m, 有効幅員 16.5 m の PC 7 径間連続ラーメン箱桁橋であり, 内外ケーブルを併用構造で, 内ケーブルは上床版内のみ配置されている。この上床版内に配置されている内ケーブルにおいて, PC グラウト充填前と後において, マルチパスアレイレーダにより検証を実施している (図 - 5)。

実橋においては, PC グラウト充填前と充填後の測定を実施して, 充填の非破壊検査の適用を確認したが, 図 - 5 に示すとおり, 明確に判断可能である。

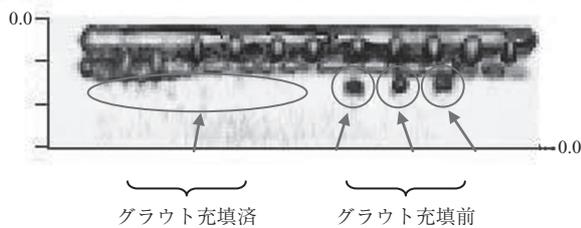


図 - 5 実橋での測定結果

### 2.2.2 広帯域超音波法

#### (1) 概要

広帯域超音波法は, コンクリート上面に探触子を配置し, シースからの反射波を利用して PC ケーブル内のグラウト検査を行う方法である。空のシースは充填シースに比べ, 反射波の強度が大きくなる性質を利用する。この方法は受信波中の低周波成分の強度が相対的に大きくなり, 高周波帯域に比べ鉄筋の影響を受けにくく, 鉄筋の影響を少なくすることができ, より明確に充填状況の確認ができるものである。

写真 - 4 に広帯域超音波法による測定状況を, 写真 - 5 に広帯域超音波法の使用機器を示す。発信器, 受信器には  $\phi 76$  の大型プローブを用いている。



写真 - 4 広帯域超音波法による測定状況

#### (2) 検証

広帯域超音波法の検証は, 前述のマルチパスアレイレーダ法と同様の, 新東名高速道路朝比奈川橋 (PC 上部工) 上り線の上床版内に配置されている内ケーブルにおいて実



写真 - 5 広帯域超音波法の測定器機

施している。写真 - 6 に内ケーブルの状況を, 写真 - 7 に完成写真を示す。



写真 - 6 上床版内の内ケーブル配置状況

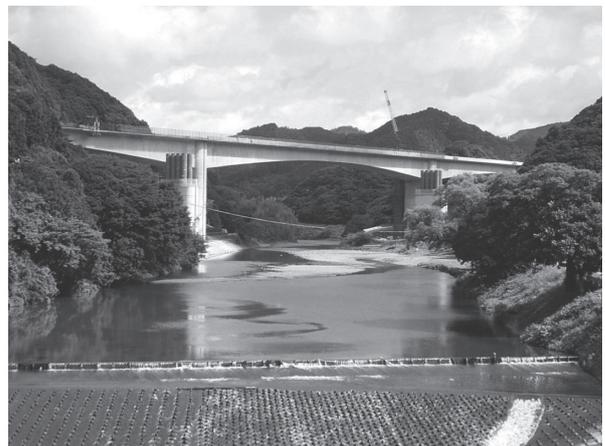


写真 - 7 完成した朝比奈川橋 (上り線)

検証は, PC グラウトの施工を実施した箇所と, 未だ実施していない箇所の比較によって実施しており, また, 充填している箇所は, PC グラウトセンサー (MS センサー, 振動デバイス) によって充填が確認されている。

その結果の例を, 図 - 6 に示すが, 充填前の空隙の場合, 反射波が強く受信しており, 明確に充填前と後を判断できている。

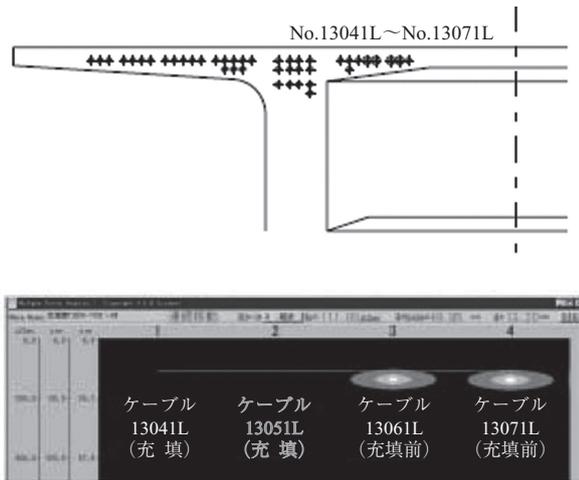


図 - 6 広帯域超音波法による測定結果の例

### 2.2.3 PC グラウト充填検査の導入

以上、述べてきたとおり、充填度を定量的には把握できないものの、充填の有無は確実に検査できる精度を確認した。そこで、旧日本道路公団では、PC グラウトを内ケーブルへ適用再開するとともに、平成 16 年から非破壊検査を導入した。

PC グラウトの非破壊検査は、PC ケーブル延長に 10 m 単位の測点を設け、その全測点の 30 % において本非破壊検査を適用することとしており、比較的少ない箇所である。これは、センサーによる PC グラウト充填確認を義務づけていること、PC グラウト充填作業において監督員が立ち会うなどの規準も併用していること、PC ケーブルは原則として床版内の直線配置としていることなどから、非破壊検査の検査箇所数を減らしているものである。

### 2.3 新設橋への非破壊検査の導入のまとめ

これまで述べてきたとおり、NEXCO ではコンクリートの強度、かぶり、PC グラウト充填において、非破壊検査を導入している。これらは、すべて施工プロセス検査を実施したうえで、非破壊検査を追加して実施しているものであり、検査の省力化を図ることを目的としてはおらず、抑止効果や検査の精度向上を期待したものとなっている。今後、非破壊検査の精度が向上されれば、施工プロセスの省略も期待できる場所であるが、残念ながら、その域には達していないのが現状である。

## 3. 既設橋への非破壊検査の適用

### 3.1 コンクリート構造物への適用

既設コンクリート構造物への非破壊検査の基準化は、未だされていないのが現状であるが、維持管理を行う現場では、さまざまな損傷や劣化が生じており、必要の都度、種々の非破壊検査機器が適用されている。たとえば、赤外線カメラによるコンクリートの浮きなどの発見、補修・補強工事の際に RC レーダによる鉄筋位置の確認、PC グラウトの充填調査へ X 線や広帯域超音波法の適用、鉄筋破断の有無の確認などが実施されているが、機器の仕様や頻度などを定量的に定めた基準までは至っていない。

以下、各現場で多用されている非破壊検査法について述べる。

### 3.2 赤外線カメラ

赤外線カメラは、物体の放射エネルギーの差を検知して損傷などを発見するものである。ある温度の物体は、絶対温度の 4 乗に比例するエネルギーを放射しており、この放射エネルギーを温度に換算するカメラを用いることで、物体の温度を測定するものである。昼夜の温度差によって、空洞やひび割れがあるコンクリートでは、その箇所温度差が生じるため、これを赤外線カメラによって捉えようとするものである。

写真 - 8 は、浮きを調査した事例であるが、浮き部分（赤い部分）が周囲と温度差を生じているところを捉えた画像であり、損傷や劣化部を視覚的に捉えることが可能であり、判断が容易なことが特徴である。



写真 - 8 コンクリートの浮きの調査事例

コンクリート表面では、コンクリート自体の放射熱以外にも、太陽光の反射熱（写真 - 9）があるため、これが大きな誤差の要因となるとともに、損傷部と健全部で温度差が生じないと損傷部を捉えることができない。このため、測定する時期や時間によっては、損傷部を捉えることがで



写真 - 9 太陽光の直射による影響の状況

きず、誤差が生じてしまうのが現状である。

本方法では、点検（とくにコンクリート片はく落が想定される箇所の検出）の効率化が期待できるものであるが、上述した理由により誤差の影響が大きく、本方法のみでの検査を行うまでには至っていないのが現状であり、本方法により怪しい箇所を想定し、その周囲を入念にたたき点検する方法を採用しているのが現状である。

### 3.3 PC 構造物への適用

NEXCO では、PC 構造物の健全性把握を重大課題として捉えており、PC グラウトの充填状況や PC 鋼材破断検知の非破壊検査技術の開発・基準化を急いでいる。PC グラウトの充填非破壊検査は、前述している広帯域超音波法であるため、ここでは詳細は省略する。以下、規準化には至っていないが、実用化の目途の立った PC 鋼材破断検査技術について述べる。

### 3.4 PC 鋼材破断の非破壊検査

#### (1) 概 要

本技術は、ベルリン工科大学 Prof. Bernd HILLEMEIER 氏へ訪問したのを契機に研究を進めた技術である。ドイツにおいても PC グラウト充填不足が社会的な課題としてあり、写真 - 10, 11, 12 に示す体育館の屋根の崩落などがあり、PC 鋼材破断検査技術が求められていた。



写真 - 10 ドイツでの PC 鋼材破断（崩落時の状況）



写真 - 11 ドイツでの PC 鋼材破断（補修後の状況）

そこで、研究開発されたのは、Magnetic Flux Leakage Method (以下、MFL 工法) である。

原理は単純であり、磁化した物体で一連となっている場合は、端部のみで S 極・N 極が生じるが、途中で分離している場合は、分離箇所でも S 極・N 極が生じる (図 - 7)。



写真 - 12 崩落した PC 構造の PC 鋼材破断状況 (BAM 保管)

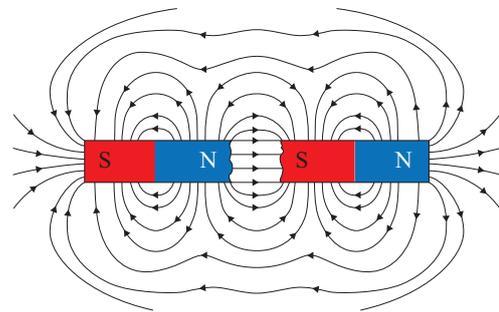


図 - 7 分離箇所での磁場の状況

PC 鋼材を磁化させた場合も同様で、PC 鋼材に破断または傷があると同様の磁場の乱れが生じる (図 - 8) ため、磁場の乱れを検知することで、破断または傷を検知するものである。

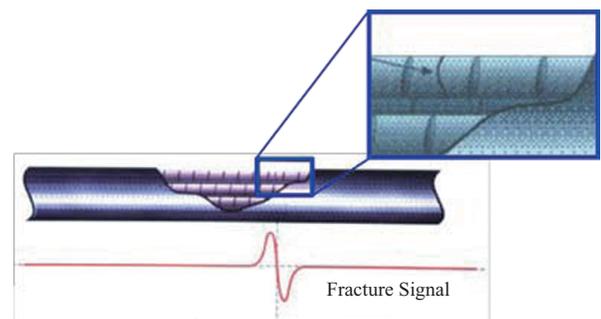


図 - 8 破断や損傷部位での磁場の乱れの状況

ベルリン工科大学では、これまで研究・開発を続け、現在、写真 - 13 に示す磁場発生装置 (電磁石)、写真 - 14 に示すセンサー部を用いて床版上部から PC 鋼材破断を検知する装置を独自に作成し、ドイツのみならず北米でも計測を行っている (写真 - 15)。

図 - 9 に MFL 工法を用い、床版上面から計測し、画像処理した事例を示すが、黒く変色した箇所が PC 鋼材が破断している箇所を示す。

このように、測定や結果が比較的容易で、また、視覚的



写真 - 13 MFL 装置の磁場発生装置

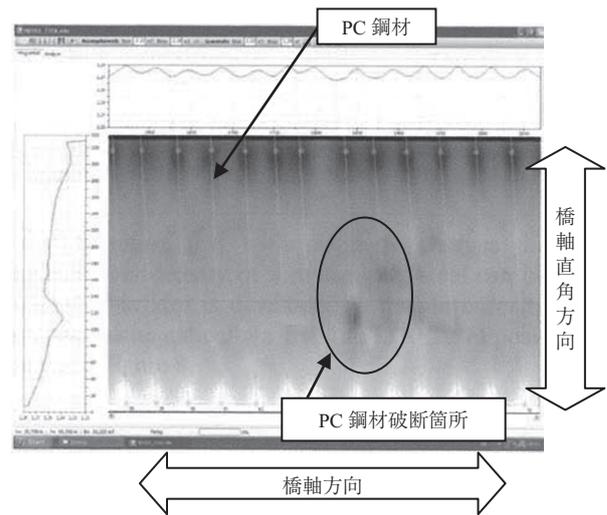


図 - 9 計測結果を画像処理した事例

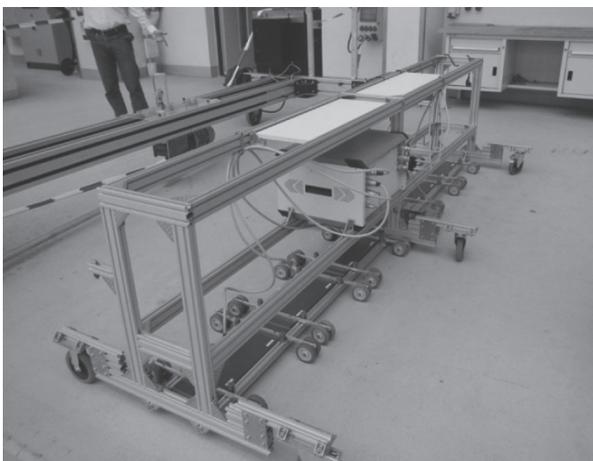


写真 - 14 MFL 装置のセンサー部

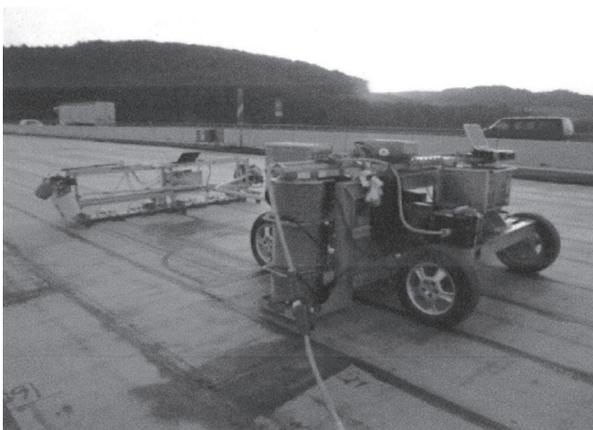


写真 - 15 実橋での測定状況

にも認識しやすい形で OUTPUT されることから、PC 鋼材の破断検知には有効な技術と思われる。

## (2) 検 証

本方法は、前述したとおり鋼材が磁性体であることを利用し、コンクリート表面から磁石により内部の鋼材を着磁し、着磁後に測定した磁束密度分布波形（磁束密度 - 鋼材

軸方向位置）から、鋼材の破断箇所付近に発生する漏洩磁束の有無を判定するものである。鋼材が健全である場合、鋼材の着磁範囲のほぼ両端がそれぞれ S 極・N 極となるため、図 - 10 に示すように測定範囲でほぼ一定の勾配をもつ磁束密度波形が得られる。一方、鋼材が破断している場合は、図 - 11 に示すように破断箇所前後の位置で N 極・S 極の連続した凹凸を持つ波形（S 字波形）が得られるため、鋼材の劣化状況を直接的に評価可能な非破壊検査技術

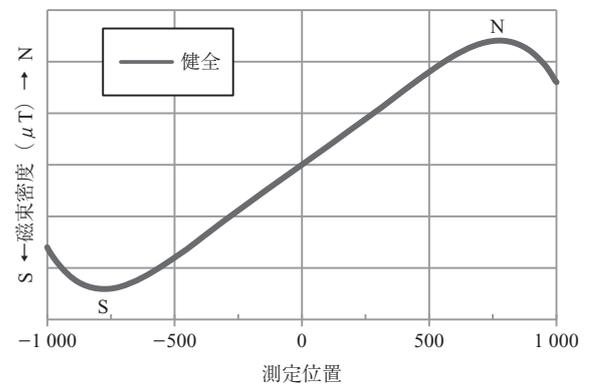


図 - 10 健全な PC 鋼材の場合の磁束密度

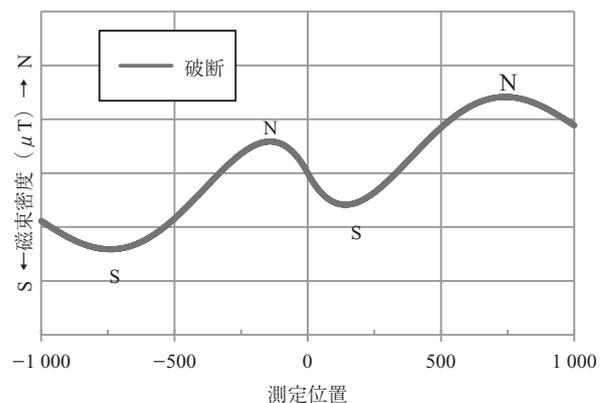


図 - 11 破断している場合の PC 鋼材の磁束密度

である。

本方法を検証するため、図 - 12 に示す供試体を作成し、そこへ健全な PC 鋼棒、写真 - 16 に示すシースおよび PC 鋼棒を破断させたものを配置し、磁束密度を調査した結果を図 - 13 に示す。健全な PC 鋼材では、磁束密度が比較的一定勾配であるのに対して、破断している場合は、破断箇所で磁束密度が大きく変化しており、明確に破断を捉えられることを示している。なお、多少の凹凸は帯鉄筋にも着磁し、この影響が出ているものである。

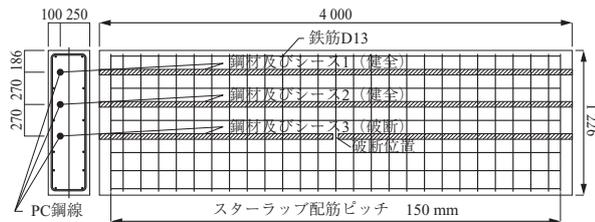


図 - 12 MFL 工法検証のための供試体

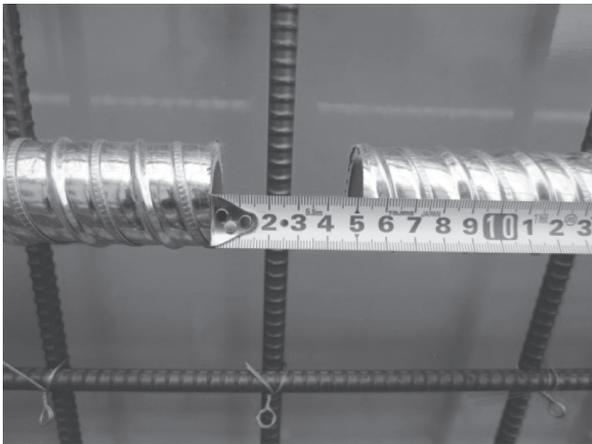


写真 - 16 破断箇所

また、実際に塩害により PC 鋼材が破断している PC 橋においても適用の検証を実施し、破断の有無を確認できており、MFL 工法の有用性を確認している。

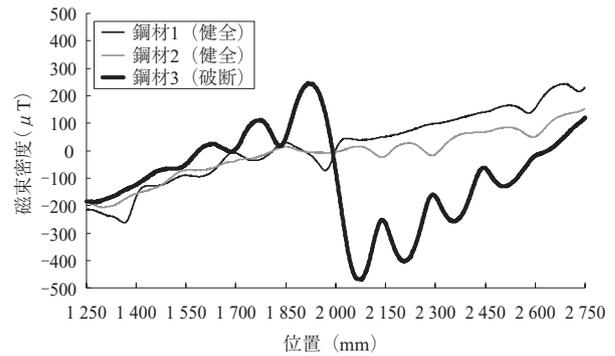


図 - 13 MFL 工法の検証結果

### (3) まとめ

本方法は、PC 構造物、とくに PC 鋼材の破断の詳細調査において画期的な非破壊検査手法である。今後、その適用方法などをまとめたマニュアルなどを整備し、適用を広げていく予定である。

## 4. おわりに

現在、NEXCO において適用または開発中の非破壊検査手法について述べてきたが、非破壊検査は、その定量的な精度においては、従来の検査手法や破壊検査に比べて、未だ確立に至っていないのが現状である。欧米では、一つの非破壊検査に頼ることなく、複数の非破壊検査を適用して総合的な判定を下すシステムを確立しているところもあり、それぞれの非破壊検査手法の長所を生かした検査システムの構築が必要であると同時に、それぞれの非破壊検査手法の精度向上が望まれるところである。

今後、NEXCO では、これらの非破壊検査の精度向上や非破壊検査を組合せた総合的な非破壊検査システムの構築を図っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，2014.1.22
- 2) 日本道路公団：コンクリート施工管理要領，2000.4

【2014年9月29日受付】