

PC 鋼材および PC グラウトの非破壊検査手法

廣瀬 誠*1・山田 雅彦*2・木下 尚宜*3

PC 構造物の適切な維持管理のうえで、PC 鋼材がグラウトで守られ、健全に機能しているかどうかを知ることはきわめて重要である。なかには、グラウト充填不足や PC 鋼材の腐食・破断が認められた事例もあり、今後さらに経年化が進んでいく状況を踏まえれば、新しい非破壊検査技術の構築と普及は急務である。本稿では、PC 鋼材および PC グラウトの非破壊検査手法である、漏洩磁束法、SIBIE 法、広帯域超音波法による調査概要を報告する。

キーワード：非破壊検査、漏洩磁束法、SIBIE 法、広帯域超音波法

1. はじめに

既設の PC 構造物においては、グラウトの充填不足、未充填や PC 鋼材の腐食、破断が散見され（写真 - 1）、かねてからその劣化を非破壊で検知する技術の確立が求められている。PC 鋼材は PC 構造物のいわば“命”であり、この PC 鋼材の破断を早期に発見し、策を講じることが、既存のインフラの安全維持と長期供用にとって重要となることはいうまでもない。

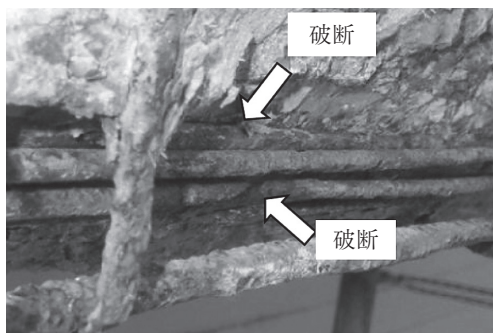


写真 - 1 PC 鋼線の破断

しかし、コンクリート内部の PC 鋼材の腐食、破断の有無や程度を、コンクリート外観の変状によって把握するこ

とは困難であり、構造物に与える影響を考慮すると、高精度な非破壊検査技術による PC 鋼材の破断などの検出技術の現場への普及が強く望まれる。

そこで、筆者らは、「PC 鋼材非破壊検査協会¹⁾」（2015年7月設立）において、PC 構造物の鋼材劣化度の検査に関する技術の普及および技術水準の維持、向上のための教育および指導を行っている。

具体的には、同協会設立以来、「漏洩磁束法（Magnetic Flux Leakage Method：以下、MFL）による PC 鋼材の破断調査」の技術講習会（座学と実習）を本年まで毎年開催し、MFL 講習会のクラスも「基礎編」、「実施編」、「現場編」の3段階を整備した。また、協会会員限定ではあるものの、「MFL による PC 鋼材破断非破壊調査マニュアル」を作成し今後の円滑な運用を目指している。

昨年からは、グラウト充填非破壊調査に関する技術講習会（座学とデモ）として、「広帯域超音波法（以下、WUT）」、インパクトエコー法の1種である「SIBIE 法」、本年には「コア応力解放法」による PC 構造物の残存プレストレス推定の技術の講習会も開催した。今後、これらについても、マニュアル（協会会員限定）を順次作成する計画である。

本稿では、同協会でも取り扱っている上記技術の内、

- ・ MFL による PC 鋼材破断非破壊調査
- ・ SIBIE 法による PC グラウト充填非破壊調査



*1 Makoto HIROSE

INREM 合同会社
PC 鋼材非破壊検査協会
技術部会員



*2 Masahiko YAMADA

(株) 富士ビー・エス
PC 鋼材非破壊検査協会
技術部会員



*3 Takanori KINOSHITA

(株) エッチアンドピースシステム
技術部長 PC 鋼材非破壊
検査協会 技術部会員

・WUTによるPCグラウト充填非破壊調査について、技術の概要を紹介する。

2. MFLによるPC鋼材破断非破壊調査

2.1 MFLの原理

PC鋼材が強磁性体であることを利用し、図-1のようにコンクリート表面から永久磁石を内蔵した専用の磁石ユニットで内部のPC鋼材を磁化させる。その際、コンクリート表面から測定した磁束密度の分布波形(図-2、磁束密度-PC鋼材長手方向位置)から、PC鋼材破断箇所付近に発生する磁場の乱れを考察することで、PC鋼材の健全性を診断する。シースが鋼製で健全であっても、内部のPC鋼材の診断が可能である。

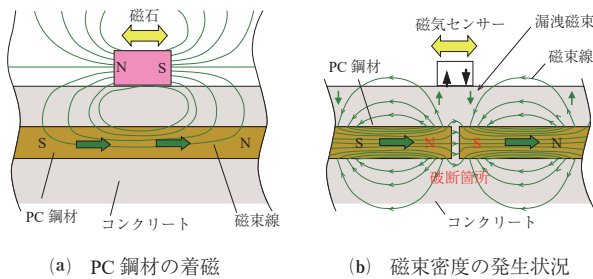


図-1 MFLの原理

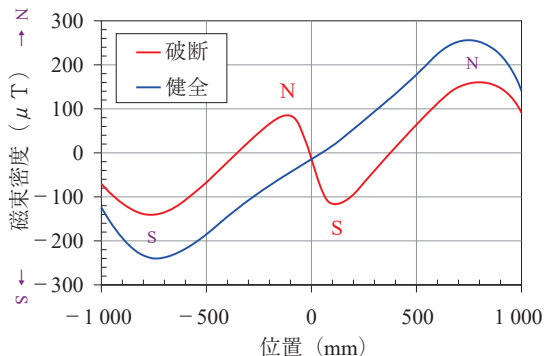


図-2 MFLによる計測結果の一例

2.2 検査機器

検査機器は、検査するPC鋼材をPC鋼材長手方向に磁化するための永久磁石を内蔵した磁石ユニットと、コンクリート表面におけるコンクリート面に垂直な方向成分の磁束密度を測定する磁気計測ユニットの2つで構成される。これらの機器の外観を写真-2に示す。

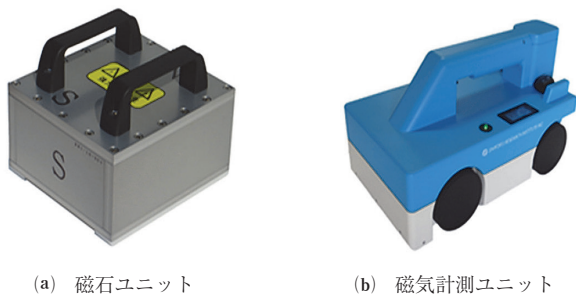


写真-2 PC鋼材破断調査機器

磁石ユニットは永久磁石が内蔵されており、底面から150mm離れた位置における磁石磁化方向成分の磁束密度は約7mT(参考:地球の地磁気約50μT)である。磁気計測ユニットは、移動距離とコンクリート表面(PC鋼材)に垂直な磁束密度成分とを測定、記録でき、磁束密度分布をリアルタイムで表示できる。磁束密度測定範囲は、-450μT~+450μT程度である。なお、検査機器は、PCT桁、箱桁、床版など調査対象物によって適切なタイプを使用することができる。また、効率よく作業を進めるための各種治具も用意されている。

2.3 現地調査事例^{2),3)}

MFLによるPC鋼材破断非破壊調査は、

- ・PCポストテンションT桁橋、
- ・PCポストテンション箱桁橋、
- ・PC単純プレテンションI桁橋(JIS桁)

の各主ケーブル、

- ・PC連続合成桁1次床版ケーブル

といった橋梁のほか、

- ・PCタンク

やそのほかのPC構造物についても実績がある。

ここでは、PCポストテンション箱桁におけるウェブの着磁状況、磁束密度計測状況を写真-3、写真-4に、T桁橋の桁中央下フランジ部下面側の着磁状況および計測結果を写真-5および図-3に示す。



写真-3 箱桁橋ウェブの着磁状況



写真-4 箱桁橋ウェブの磁束密度計測状況



写真 - 5 PCT 桁橋桁中央下フランジ部下面側の着磁状況

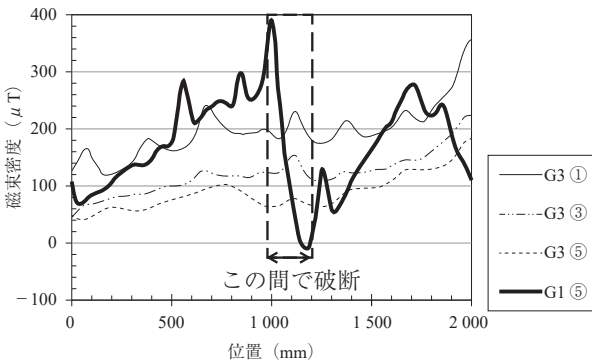


図 - 3 PCT 桁橋桁中央下フランジ部下面側の計測結果

図 - 3 の計測結果は、G1 ⑤ ケーブルが 1100 mm 付近で破断している計測結果である。

2.4 具体的な調査手順と診断

調査したい範囲において、あらかじめ PC 鋼材探査などにより PC 鋼材配置を把握し、必要なラインをけがしておく (写真 - 3, 4 内の白線)。また、検査機器の磁石ユニットを動かすライン、磁気計測ユニットで磁束密度を計測するラインも必要に応じて出しておく (写真 - 3, 4 内のピンク線)。

そのうえで、磁石ユニットを動かして着磁を行い、そののち、磁気計測ユニットで磁束密度を計測するが、これらにもいくつかの技法があり、その詳細は前記講習会で指導している。

そのほか、現場の情報として、調査対象外の磁性体やセパレータの位置などもメモしておく、のちのデータ解析、考察に役に立つ。

現場から持ち帰ったデータ (csv) は、excel で処理できる。csv データを波形化し、知見や基礎知識を要するが、破断、腐食箇所の特徴である“S 字波形”の有無を診る。S 字波形の疑われる箇所において、そのほかの情報と包括的に照合することにより、包括的な診断を下す。

3. SIBIE 法による PC グラウト充填非破壊調査

3.1 SIBIE 法の概要

SIBIE 法⁴⁾とは Stack Imaging of spectral amplitudes Based

on Impact Echo の頭文字を取った略称であり、インパクトエコー法により得られる結果 (周波数スペクトル) を画像化し、画像をもとに PC グラウトの充填度を評価する手法である。

調査は、写真 - 6 に示す衝撃入力装置とセンサー、写真 - 7 に示す波記録装置を使用して実施する。

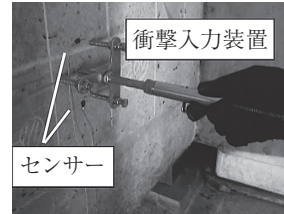


写真 - 6 衝撃入力装置とセンサー

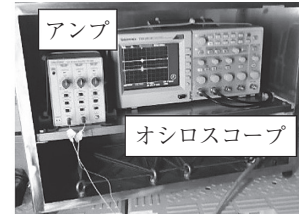


写真 - 7 波形記録装置

3.2 SIBIE 法の原理

衝撃入力装置を用いてコンクリート表面に衝撃を加えることで弾性波を入力し、コンクリート中を伝播する弾性波の波形を波形記録装置により計測する。計測した波形データをパソコン内の解析用ソフトに読み込み、FFT 解析、SIBIE 解析により解析対象の反射が強い領域をコンター図化する。得られたコンター図を用いて、グラウトの充填評価を行う。図 - 4 に SIBIE 法の概要図を示す。コンター図中の黒丸はシースの位置を示しており、色の濃淡により弾性波の反射の強さを表している。結果の評価方法は、シース位置で反射の強い色の濃い領域が現れた場合、グラウト未充填と判定する。衝撃入力した面と反対の側面の左側に色の濃い領域が現れた場合はグラウト充填と判定する。

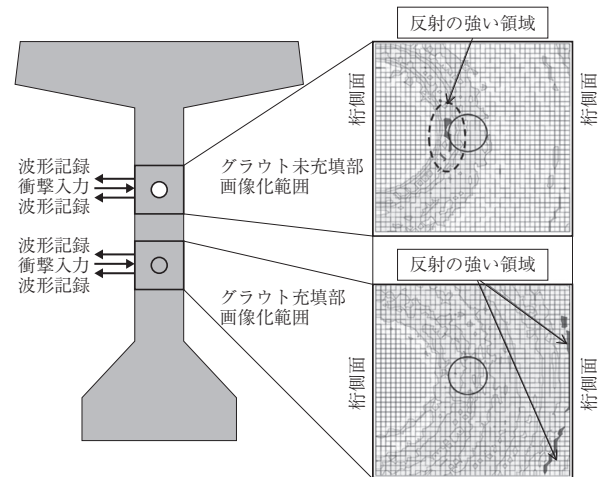


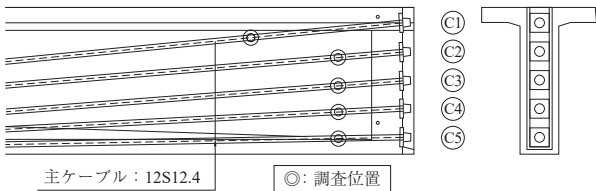
図 - 4 SIBIE 法の概要図

3.3 SIBIE 法の調査実績

SIBIE 法の PC グラウト充填調査はこれまで PC ポストテンション T 桁橋の主ケーブルや横締めケーブル、PC ポストテンション箱桁橋の主ケーブル、架設ケーブルや横締めケーブルなどに適用した実績がある。なお、そのほかのポストテンション方式の PC 構造物にも適用が可能である。

3.4 SIBIE 法の調査事例

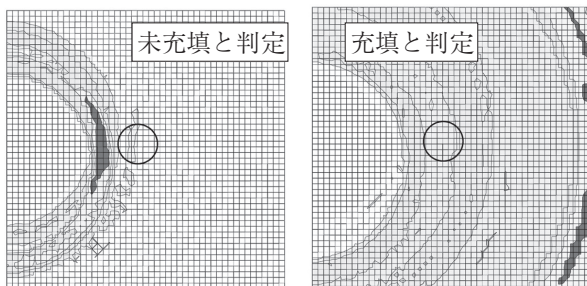
橋梁架橋後、約 25 年が経過した 3 径間 PC ポストテンション T 桁橋の主ケーブルのグラウト充填調査に SIBIE 法を適用した事例⁵⁾を紹介する。グラウトの充填調査位置は、1 桁あたり図 - 5 に示す 5 ヶ所の位置で実施した。



側面図 断面図

図 - 5 調査点

図 - 6 にグラウト再注入を実施した C2 ケーブルの調査結果を示す。図 - 6(a) の再注入前の結果では、シース位置において、色の濃い領域が現れていることから、シース内の PC グラウトは未充填と判定した。そのうち、削孔して CCD カメラによる調査 (写真 - 8) を行った結果、グラウトは実際に未充填であることが明らかとなったため、グラウトの再注入を実施した。再注入したグラウトが硬化したのちに、再度 SIBIE 法により確認を行った。図 - 6(b) に示す再注入後の調査結果では、シース付近に反射は現れず、入力面と反対の面に反射が表れたことから、シース内のグラウト充填状態は充填と判定した。



(a) 再注入前 (b) 再注入後

図 - 6 SIBIE 法による調査結果 (C2 ケーブル)

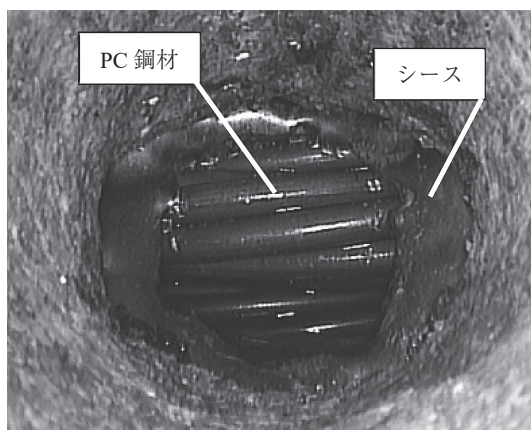


写真 - 8 削孔結果

4. WUT による PC グラウト充填非破壊調査

4.1 WUT の概要

WUT とは Wide-range Ultrasonic Testing の略称で、5 ~ 2 000 kHz の幅広い帯域の超音波を発信し得られた受信波の中から SN 比の良い帯域の成分波を抽出して解析する手法である。測定機器の外観を写真 - 9 に示す。

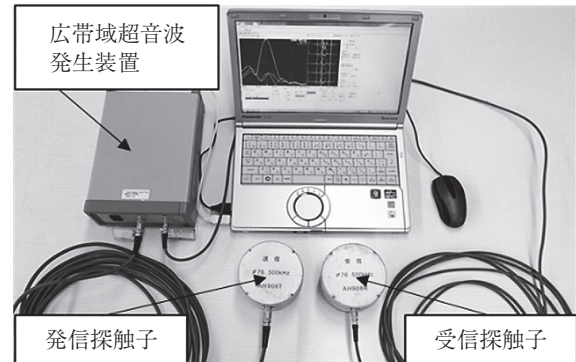
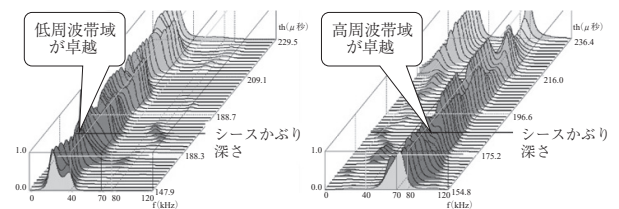


写真 - 9 広帯域超音波測定機器

PC グラウト充填調査における広帯域超音波法は、得られた受信波に含まれるシース反射波のスペクトルに着目する。シース内に空洞が生じていればシース反射波に高周波成分が多く含まれ、シース内が PC グラウトで充填されていればシース反射波に低周波成分が多く含まれる。これより、受信波中のシース反射波起生時刻近傍を短時間フーリエ変換し、得られたスペクトルにより PC グラウトの有無を判定する。解析結果例を図 - 7 に示す。



充填判定の例 充填不良判定の例

図 - 7 WUT の解析結果例

4.2 WUT の課題

WUT の課題⁶⁾として、以下の 3 点があげられていた。

- ① PC グラウト充填率の検知
- ② 削孔調査の省略
- ③ 探触子のドライ化

現在、②と③については検討がなされており、これらの検討結果を以下に示す。

4.3 削孔調査の省略

(1) 削孔調査の概要

調査対象となる PC 構造物は建設時期に幅があり、コンクリートの配合や強度などは一様ではないため、構造物ごとに得られる測定データの周波数特性は異なってくる。これより、WUT では解析の際に用いる周波数フィルタや未充填と判定する周波数の閾値 (以下、閾値) を構造物ごと

に適宜設定している。現状では、この閾値を設定するため、一部の測点で削孔調査を実施している。

削孔調査は、局所的ではあるが破壊を伴うため、できる限り実施しないほうが望ましい。そこで、削孔調査を実施せずに非破壊で構造物ごとの閾値を捉える検討を行った。

(2) 透過波を用いた検討

WUTによるPCグラウト充填調査の際、箱桁では隔壁、T桁では支間中央付近の主桁において探触子を対向させて弾性波速度を計測(写真-10)している。この時に得られる透過波は、測定データの周波数特性と関連があると思われるため、この透過波を用いて閾値との関連を検討した。

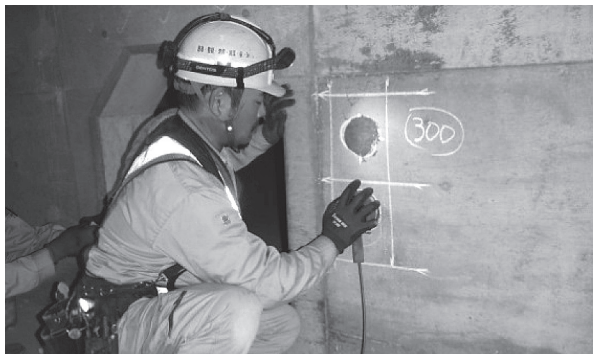


写真-10 透過波測定状況

図-8に異なる既設構造物において厚さ300mmの隔壁で測定した透過波をFFT解析した結果例を示す。

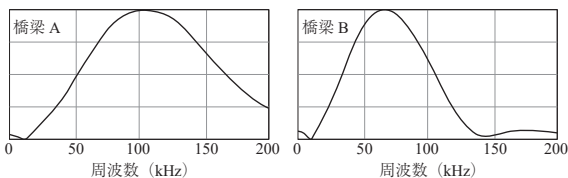


図-8 透過法FFT解析結果例

図-8より橋梁Aでは200kHz程度の帯域でもスペクトルが確認できるのに対して、橋梁Bでは140kHz以上の帯域が減衰している。このように、構造物により透過波から得られるスペクトルの分布に差異があることがわかる。

この透過波のピーク周波数やスペクトル面積と、閾値との関連を調べたところ、両者に関連があることを示唆する結果が得られた。これより、透過波から自動的に閾値を判定するプログラムを試作した。現在このプログラムは試験運用を行っている段階だが、今後さらにデータを蓄積して検討を進めることで精度を向上させ、現場での適用を目指している。

4.4 探触子のドライ化

(1) 探触子のドライ化の概要

現状、WUTで用いる探触子は、計測の際に接触媒質を用いて探知対象面と探触子を密着させる必要がある。そのため、現場での作業は接触媒質の塗布だけではなく、探査面のケレンや測定後の清掃が必要となってくる。これらの工程は、測定作業の3倍以上の時間を要するため、作業の

効率化といった観点から接触媒質を用いない探触子の使用が望まれていた。そこで、探触子のドライ化を検討した。

写真-11に示すドライ探触子と超音波検査機器を用いて検討を行ったところ、得られる受信波の周波数特性がWUTと異なっていたため新たな探査手法(ドライ超音波法)の確立を目指して検討した結果を以下に示す。



超音波探査機

ドライ超音波探触子

写真-11 ドライ超音波探査機外観

(2) ドライ超音波法の原理

ドライ超音波法では、コンクリート-シース間で生じる共振波(以下、共振波)の有無に着目する。すなわち、シース内に空洞が生じている場合は共振波が確認できるが、シース内がPCグラウトで充填されている場合は共振波は確認できない。ドライ超音波をコンクリート表面に押し当て弾性波を送・受信(写真-12)したのち、受信波をウェーブレット変換してコンター図を作成する。



写真-12 ドライ超音波測定状況

図-9、10に測定結果例を示す。コンター図に共振波相当の周波数(共振周波数)において連続した時刻でピークが確認できれば“空洞”と、複数の周波数帯域でピークが確認された場合は“充填”と判定する。

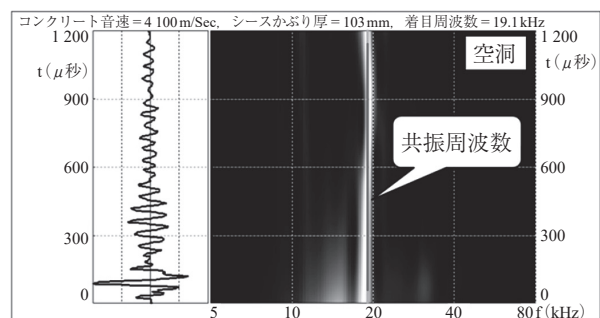


図-9 空洞時ドライ超音波解析結果例

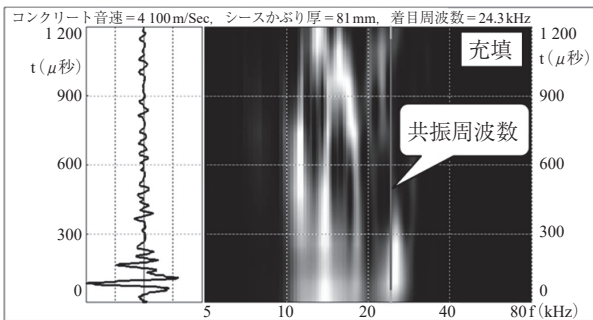


図 - 10 充填時ドライ超音波解析結果例

(3) ドライ超音波法の調査実績および適用範囲

ドライ超音波のPCグラウト充填調査は、PCポストテンション箱桁橋の主ケーブルやPCポストテンションT桁橋主ケーブルおよび床版横締めケーブルについての実績がある。PC鋼材は鋼より線、鋼線や鋼棒に対応している。また、探査可能深度は現状では150mm程度までである。

(4) ドライ超音波法の調査手順

電磁波レーダを用いて測定対象範囲の鉄筋位置およびシースの位置とかぶり深さを測定する。そのうち、鉄筋を避けた位置のシース直上において探触子を押し当てデータを取得する。このデータは測定器の内部メモリに蓄積され、解析の際にはMicroUSBケーブルを介してノートパソコンに転送され、専用ソフトでウェブレット変換されてコンター図となる。

解析を測定現場で実施し、その場で判定を下すことが可能である。ただし、構造物により受信波に混入するノイズ量が異なるため、一部測点を削孔調査して判定基準を見極めることで測定精度を向上させる運用法もある。

(5) ドライ超音波法とWUTの使い分け

ドライ超音波は資機材が軽量で計測も簡便であるといった特徴があるが、探査可能なシースかぶり深さに制限がある。一方、WUTは適用範囲は広いが計測に時間がかかる。これらの特徴をいかすために、PCグラウトの1次調査はドライ超音波法、PCグラウトの不良が多数確認されて詳細調査を行う場合はWUT、もしくは両手法の併用といった運用方法が考えられる。

5. おわりに

経済性や環境負荷軽減などの観点から構造物の延命化は必至であり、今後さらに経年化が進んでいく構造物に対して適切な維持管理が必要である。そのためには構造物に対する非破壊検査技術による状態把握は欠かせない。

本稿では、PC鋼材破断およびPCグラウト充填の非破壊検査手法であるMFL、SIBIE法、WUTの概要を示し、実橋での調査事例について紹介した。

これらの手法は現状では、構造物に対して、線または点データが主体であるが、線データから面データに、点データから線データへとデータの次元を大きくすることで、同様の設計、施工条件に対する比較評価が可能となり、検査精度の向上が期待できると考えている。

今後は、これら非破壊検査技術の普及と調査結果のデータベース化および分析、学習による診断精度向上など、改良に向けた検討も必要と考えられる。

参考文献

- 1) PC鋼材非破壊検査協会 HP, URL: <http://www.hihakai.jp/>
- 2) 廣瀬 誠・青木圭一・宮川豊章：“漏洩磁束法によるポストテンション実橋におけるPC鋼材破断調査”，プレストレストコンクリート工学会 第23回シンポジウム論文集, pp.467-470, 2014.
- 3) 廣瀬 誠・木村美紀・萩原直樹・豊田雄介：“ポストテン橋およびプレテン橋における漏洩磁束法によるPC鋼材非破壊調査”，プレストレストコンクリート工学会 第25回シンポジウム論文集, pp.269-271, 2016.
- 4) Ohtsu Masayasu and Takeshi Watanabe：“Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection”, NDT & E international, Vol.35, No.3, pp.189-196, 2002.
- 5) 長岡 覚, 山田雅彦, 大野雅幸, 大津政康：“既設橋のPCグラウト充填調査－SIBIE法の実橋への適用－”, プレストレストコンクリート工学会 第26回シンポジウム論文集, pp.635-638, 2017.
- 6) 濱岡弘二・青木圭一・原 幹夫・木下尚宜：“広帯域超音波を用いたPCグラウトの充填調査”, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.6, pp35-40, 2014.

【2018年8月30日受付】



新刊案内

コンクリート構造診断技術 コンクリート構造診断技術講習テキスト

2019年1月

定 価 7,500円/送料300円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会