

非破壊調査技術を用いた PC グラウト充てん度の評価

真鍋英規*1・葛目和宏*2・鎌田敏郎*3・木村嘉富*4

概要 PC ケーブルにグラウト未充てん部分が存在すると水・塩分等の侵入により、PC 鋼材が腐食し最終的に破断に至ることがある。PC 鋼材破断時の衝撃によりコンクリート片が落下し重大な第三者災害を引き起こす可能性があるばかりでなく、部材の耐荷性能の低下にも繋がる。PC グラウトの充てん度の把握は PC 構造物の維持管理を行う上で最重要項目の一つである。PC グラウトの調査は PC 構造物を傷つけない非破壊調査技術の適用が望ましく、近年各機関で開発が行われ実橋梁における調査が実施されている。本稿では、弾性波法によるコンクリートの非破壊調査技術のうち、PC 床版横締めにも適用する衝撃弾性波法およびポストテンション方式の内ケーブルに適用できるインパクトエコー法を中心に技術報告を行う。

キーワード：PC グラウト、非破壊調査、衝撃弾性波法、インパクトエコー法、X 線透過法

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC と略す）構造物は適切に設計、施工、維持管理された場合きわめて耐久性に富む構造形式であり、長生橋¹⁾や第一大戸川橋梁²⁾に代表される調査や研究により、その優れた耐久性が確認されている。PC 構造物は、水セメント比が小さい密実な高強度コンクリートにプレストレスを導入しているため、鉄筋コンクリート（以下、RC と略す）構造物と比較すると外部からの劣化因子の侵入に対し高い抵抗性を有している。また一般的に、供用荷重作用時にひび割れを発生させない設計手法を用いており、仮に一時的な過大荷重によりひび割れが生じたとしても除荷すればひび割れが閉じるという特性を有している。さらに、ひび割れが発生しない条件下では、変動荷重による鋼材応力変動は少なく疲労破壊に対しても問題とはならない。

しかし、PC 構造物は本来耐久性に優れているにもかかわらず、なかには早期劣化が生じている事例もある。劣化の原因は様々であるが、RC 構造と同様に塩害やアルカリ骨材反応などの他に、PC 構造物特有の劣化現象として、PC 定着部の損傷・劣化、ポストテンション方式のグラウト不良に伴う鋼材腐食が挙げられる。

PC ケーブルのシース内にグラウト未充てん部分が存在すると、その部分へ雨水や海水あるいは凍結防止剤を含んだ水の侵入により、PC 鋼材が腐食し最終的に破断に至ることがある。グラウト不良が原因で PC 鋼材が腐食し破断する場合は、その破断時の衝撃エネルギーによりコンクリートがはく落する事例も報告されている。

写真-1 にグラウト充てん不良に伴う横締め PC 鋼棒破断事例、写真-2 に主ケーブル PC 鋼材の破断事例を示す。このようなケースでは、橋梁の架橋位置によっては重大な第三者災害を引き起こす可能性があるばかりでなく、部材の耐荷性能の低下にも繋がる。特にポストテンション方式のセグメント桁や外ケーブル構造では、主ケーブル PC 鋼材が破断することにより、急激に耐荷性能が低下し落橋に至った事例が国内外で報告されている^{3),4)}。

PC グラウトの充てん度の把握は PC 構造物の維持管理を行う上で最重要課題の一つであると認識されており、各機関でグラウト充てん度調査に関する研究が行わ



写真-1 横締め PC 鋼材の破断事例



写真-2 主ケーブル PC 鋼材の破断事例

*1 まなべ・ひでき／(株)国際建設技術研究所 構造設計部 部長（正会員）

*2 くずめ・かずひろ／(株)国際建設技術研究所 代表取締役社長（正会員）

*3 かまだ・としろう／大阪大学大学院 教授（正会員）

*4 きむら・よしとみ／(株)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員

れている。コンクリート内部にPCケーブルが配置されている内ケーブル方式のグラウト充てん度の調査は、PC構造物を傷つけることのない非破壊技術を用いることが望ましい。グラウト充てん状態が不明のまま安易にコンクリートを削孔することは、部材を傷つけるだけでなくPC鋼材自体に損傷を与える可能性がある。

本稿では、弾性波法によるコンクリートの非破壊調査技術のうち、PC床版横締めに適用する衝撃弾性波法、ポストテンション方式の内ケーブルに適用できるインパクトエコー法およびX線透過法を中心に技術報告を行う。

2. PCグラウト充てん度の評価方法

2.1 PCグラウト非破壊調査手法の概要

ポストテンション方式の内ケーブルを対象としたPCグラウト充てん度の調査方法および対策工検討に関するフローを図-1に示す。

PC構造物において、グラウト不良に起因していると考えられる外観変状で典型的なものは、PCケーブルに沿ったひび割れである。これは、グラウトが充てんされていないシース内に侵入した水分が凍結膨張・融解を繰り返すことにより、シースに沿ったひび割れを生じるものであり、遊離石灰を伴う場合が多い⁵⁾。写真-3にポストテンション方式PCT桁のウェブにおけるPCケーブルに沿ったひび割れ発生事例を示す。写真-4はプレテンション方式T桁橋の間詰め床版部下面における横締めPCケーブルに沿ったひび割れの事例である。このような外観変状が認められた場合、グラウト充てん度の調査を行う必要がある。一般的に、コンクリートとPC鋼材を傷つけることなく実施できる非破壊調査は次の3工法がある。

- ① 衝撃弾性波法
- ② インパクトエコー法
- ③ X線透過法

衝撃弾性波法は、主に床版や横桁に配置された横締め

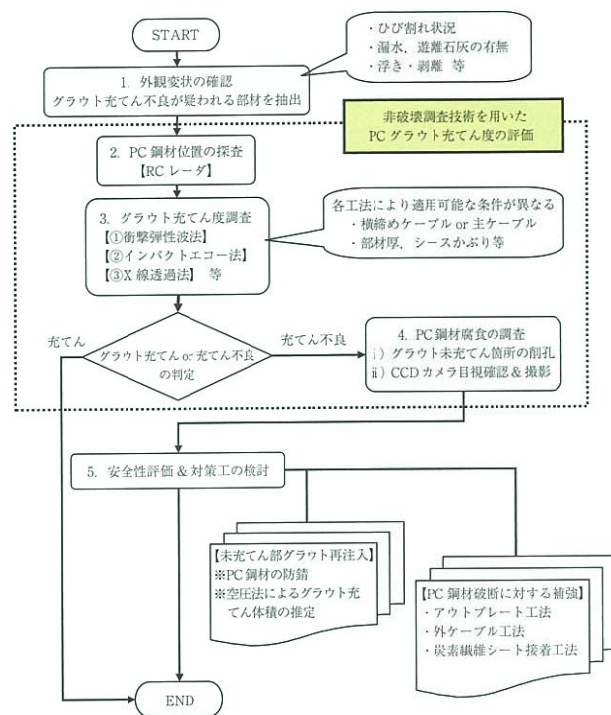


図-1 PCグラウト充てん度調査方法および対策工検討に関するフロー

PCケーブルに対して適用されるものであり、ケーブル全体のグラウトの充てん度の判定に用いる。一方、インパクトエコー法は部分的なグラウトの充てん度を判断するものであり、主桁ウェブや床版に配置されたPCケーブルに対して測定ポイントにおける判定に用いる。X線透過法も同様に撮影した部分のグラウト充てん度を判定するものである。したがって各工法の適用にあたっては、適用可能な条件が異なるため、事前に十分な検討が必要となる。

各種非破壊調査によりグラウト不良が疑われるPCケーブルは、シース内のPC鋼材の腐食状態を把握する必要がある。現在のところ非破壊調査手法としては確立された方法はなく、シース表面までのコンクリートに対

Evaluation of the Filling of PC Grout using Nondestructive Inspection Techniques

By H. Manabe, K. Kuzume, T. Kamada and Y. Kimura

Concrete Journal, Vol.49, No.6, pp.18~24, Jun. 2011

Synopsis When voids are left ungrouted, steel tendons in prestressing cables tend to be corroded by the water, salt or other matters penetrating into the cables, ultimately being fractured. Fracture of steels results in a reduced load bearing performance of the members as well as may cause a danger of accident to a third party as concrete debris falls at the impact of fracture. Accurate evaluation of the filling of PC grout is therefore extremely important for the maintenance of prestressed concrete structures. Nondestructive inspection techniques are preferable for the PC grout evaluation due to no damage to the structures being inspected. Various methods have been developed in many fields and applied to investigations on existing bridges in recent years. This is a technical report on nondestructive inspection techniques for concrete based on elastic-wave methods, with a specific focus placed on impact elastic-wave method for transverse prestressing cables of concrete slabs and impact-echo method which is applicable to internal cables in the post-tensioning system.

Keywords : PC grout, nondestructive inspection, impact elastic-wave method, impact-echo method, X-ray radiography method

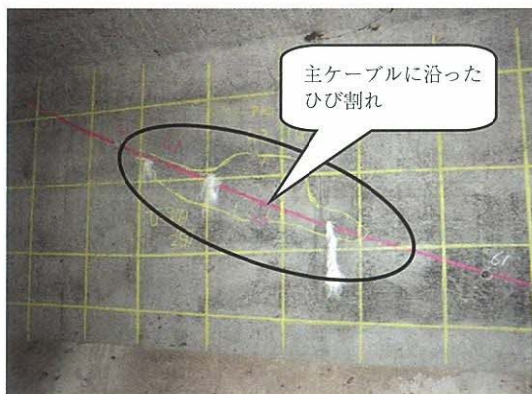


写真-3 PCT 桁ウェブに発生したひび割れ



写真-5 CCD カメラによる撮影状況



写真-4 間詰め床版下面に発生したひび割れ



写真-6 グラウトが十分に充てんされている状況



写真-7 グラウト充てんが不十分でPC 鋼材が腐食している状況

し慎重にドリル等で削孔を行い、シースを除去した後、直接目視確認を行うとともに CCD カメラを挿入し撮影・記録を行う手法が一般的である。また、削孔に用いるドリルは鋼材を感知すると駆動を制御できるドリルコントローラ等を用いることが望ましい。写真-5に CCD カメラによる撮影状況、また、CCD カメラによる撮影事例として写真-6にグラウトが十分に充てんされている状況、写真-7にグラウト充てんが不十分で PC 鋼材が腐食している状況をそれぞれ示す。

2.2 衝撃弾性波法

(1) 概要

衝撃弾性波法は弾性波の種類であり、コンクリート部材に鋼球やハンマー等で衝撃波を発生させ、コンクリート中を伝播した弾性波を対象物に接触させた AE センサ等で受信する方法である。衝撃弾性波法は、利用する弾性波の種類、伝播特性、測定形態などによって様々な計測手法がある⁶⁾。衝撃弾性波法が PC グラウト充てん度の調査へ適用されたのは 1990 年代の半ばからであり、当時は打音振動法と呼ばれていた⁷⁾。衝撃弾性波の入力方法や測定結果の評価方法について検討・改良を加え、現在に至っている。

(2) 測定方法

衝撃弾性波法の測定は PC 鋼材の定着部付近のコンクリート表面をハンマーやバネポインターなどで打撃して

衝撃弾性波を入力し、その近傍の入力信号と伝播した弾性波を反対側の定着部付近で出力信号として AE センサを用いて受信する方法である。横締めケーブルの 1 本の全長に対するグラウト充てんの確認に利用されるものであり、グラウト充てん状況によって伝播特性が変化することを利用した非破壊検査手法である。写真-8に測定状況、図-2に測定概要を示す。

(3) 評価方法

衝撃弾性波法では、PC 鋼材を伝播する弾性波の伝播エネルギーの減衰程度と伝播速度を測定することで、グラウトの充てん度を評価することができる。

グラウトが充てんされている場合は、グラウトの拘束によって PC 鋼材を伝播するエネルギーが減衰するため、出力波の振幅が小さくなる。一方、グラウトが充てんさ



写真-8 衝撃弾性波法の測定状況

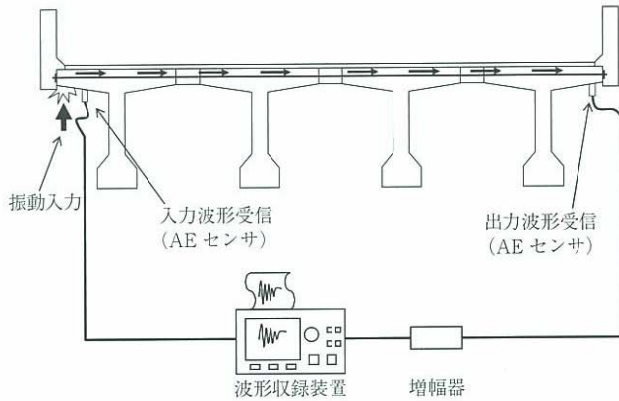


図-2 衝撃弾性波法の測定概要

れていない場合は、PC 鋼材を拘束するものがないため、伝播エネルギーの減衰が少なくなり、出力波の振幅が減少する程度も少なくなる。

また、PC 鋼材を伝播する弾性波伝播速度は、グラウトが充てんされているものの方が充てんされていないものより遅くなる。グラウトが充てんされていない場合は、主に PC 鋼材中を弾性波が伝播するため、伝播速度は速くなる。一方、グラウトが十分充てんされている場合は、硬化したグラウトと PC 鋼材の複合媒体中を弾性波が伝播するため、伝播速度は遅くなる。

測定データの評価は、伝播速度式 (1) と、入力最大振幅と出力最大振幅の比である入出力比式 (2) によって行うことを基本としている。

$$V = L/t_0 \quad (1)$$

ここに、 V : 伝播速度 (m/sec)

L : 測点間距離 (m)

t_0 : 入力波到達時間 (μsec)

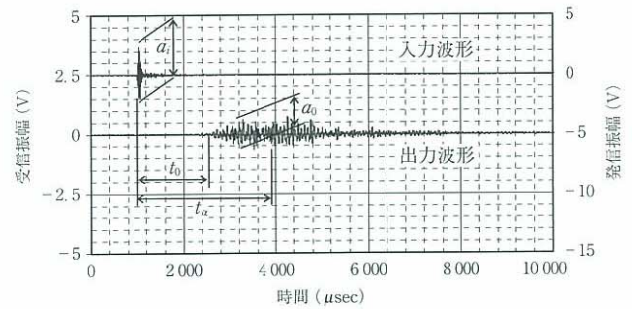
$$S = a_0/a_i \quad (2)$$

ここに、 S : 入出力比 ($\times 10^{-2}$)

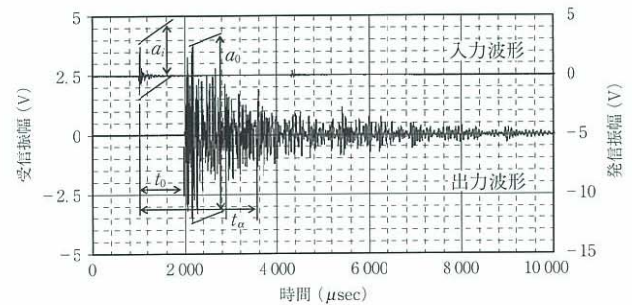
a_0 : 出力信号の最大振幅 (mV)

a_i : 入力信号の最大振幅 (mV)

出力側からの弾性波には縦波と横波の 2 種類が含まれており、入出力比を正確に把握するためには、先に出力側に到達する縦波のみを着目する必要がある。そこで、横波が到達する時間 t_a 式 (3) を算出し、 t_a 秒未満の範囲で出力側の最大振幅を設定する必要がある。



(a) グラウトが充てんされている場合



(b) グラウトの充てんが不十分な場合

a_i : 入力波形最大振幅 t_0 : 入力波形到達時間
 a_0 : 出力波形最大振幅 t_a : 横波到達時間

図-3 衝撃弾性波法の測定波形の例

$$t_a = L/V_s \quad (\mu\text{sec}) \quad (3)$$

ここに、 L : 測点間距離 (m)

V_s : 横波伝播速度 (2500 m/s)

図-3 に測定波形の例を示す。図中の (a) で示すグラウトが充てんされている場合は、出力波形の振幅が小さく波形の立ち上がりは遅い。一方、図中の (b) で示すグラウトの充てんが不十分な場合は、出力波形の振幅が大きく波形の立ち上がりは速い。

入出力比と伝播速度とグラウト充てん度との関係のイメージを図-4 に示す。グラウトの充てん度が低い場合は、入出力比が大きく伝播速度が速い傾向を示す。一方、グラウトの充てん度が高い場合は、入出力比が小さく伝播速度が遅い傾向を示す。これらの現象から、グラウト充てん度は入出力比と伝播速度に対して閾値を設定して評価できる。閾値は、対象となる PC 鋼材や定着具の種類、長さを考慮した既往の実績を基に、測定結果でグレーゾーンと評価されるケーブルについて数本を選定し、こ

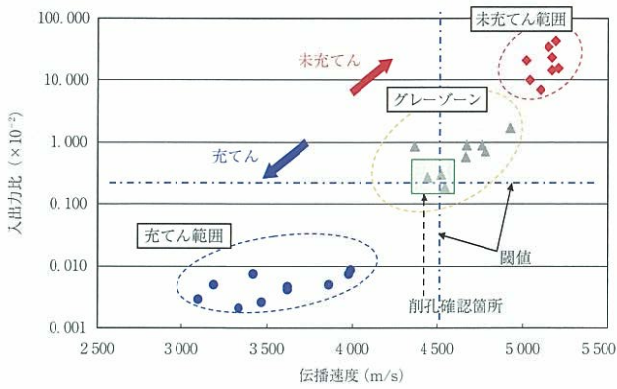


図-4 衝撃弾性波法 入出力比, 伝播速度, グラウト充てん度の関係

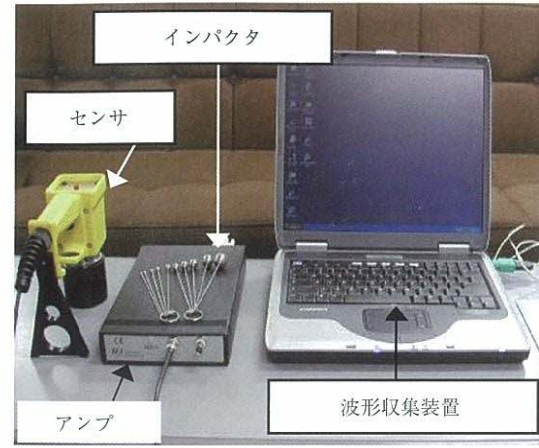


写真-9 インパクトエコー法の測定装置

れらを削孔・目視確認することにより設定する。

2.3 インパクトエコー法⁸⁾

(1) 概要

コンクリート表面に打撃などにより弾性波が入力された場合, 弾性波の縦波成分は, コンクリート内部の欠陥あるいは異なる材料の境界面において反射を起こしコンクリート表面と欠陥あるいは異なる材料の境界面との間に往復する定常な波が生じる (縦波共振現象)。インパクトエコー法は, この現象を利用して入力点付近で計測された波形の周波数スペクトルのピーク位置からコンクリートの内部状況を推定する方法である⁹⁾。PC グラウト充てん度を調査する場合は, PC 鋼材が配置されている部分のコンクリート表面に弾性波を入力し, 反射波をセンサで受信することにより, PC ケーブル内部に生じた空隙の有無からグラウトの充てん, 未充てんが判断できる。インパクトエコー法はPC ケーブルの部分的なグラウト充てん状況を確認できる手法であり, 横締めケーブルおよび主ケーブルに適用可能である。

(2) 測定方法

インパクトエコー法の測定には鋼球 (インパクト), 受信子, 信号増幅アンプ, およびデータの記録と信号の解析のためのパソコンを使用する (写真-9)。弾性波の入力には, 鋼球直径の異なるインパクトを用いる。

インパクトエコー法によるグラウト充てん状況の調査は, まず設計図書を基に電磁波レーダ法によりシース位置を確認し, シース直上のコンクリート表面に小型の鋼球を用いて打撃により弾性波を入力する。弾性波の受信は, 入力点付近に設置した広帯域変位測定型 AE センサにより行う。受信された信号はアンプで増幅した後, 波形収集システムにおいて高速フーリエ変換 (FFT) を施して周波数スペクトルを算出する。

(3) 評価方法

インパクトエコー法によるグラウト充てん状況の評価方法を以下に示す。図-5に健全なコンクリートと内部に空隙 (グラウト未充てん部分) を含むコンクリートの周波数応答特性の比較を示す。グラウトが充てんされて

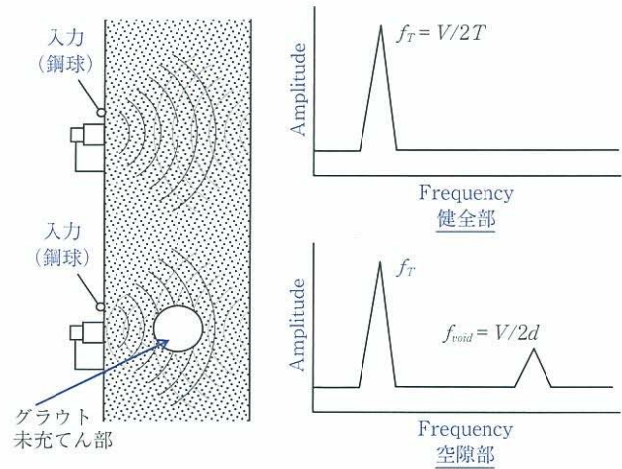


図-5 周波数応答特性の比較

いる健全なコンクリートの場合, 得られた周波数スペクトルはコンクリートの版厚によるピーク周波数 f_T が出現する。これに対して, グラウトが未充てんの場合, コンクリート版厚によるピーク周波数の他に, シース内部の空隙からの反射によるピーク周波数 f_{void} が出現する。これらのピーク周波数はコンクリートの縦波伝播速度を V とすると, 健全部 f_T は式 (4), 空隙部 (グラウト未充てん部分) f_{void} は式 (5) で表される。

$$f_T = V/2T \quad (4)$$

$$f_{void} = V/2d \quad (5)$$

ここに, V : 縦波伝播速度 (m/s)

T : 部材の厚さ (m)

d : シースまでのかぶり厚 (m)

インパクトエコー法による計測では, RC レーダー等であらかじめシース位置を確認しているため, そのシース位置付近に第二のピークが認められた場合はグラウト未充てんによる空隙が存在すると判定できる。判定・評価に考慮する主な項目は,

- ・表面波の影響の有無 (かぶり/シース径 比率より)
- ・版厚からの周波数帯の最大ピーク値 (A) の有無
- ・シース位置付近の周波数帯のピーク値 (B) の有無



図-6 インパクトエコー法グラウト充てん度判定事例

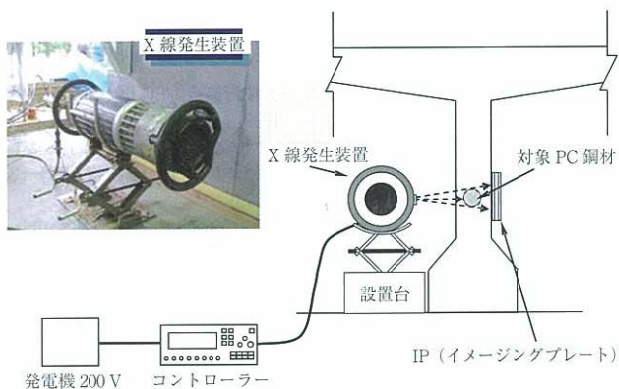


図-7 X線透過法撮影概要

・最大ピーク値 (A) とシース位置ピーク値 (B) の比率等である。評価は人為的な誤差を排除するため波形解析ソフトを用いて行うことができる。図-6 に波形解析ソフトによる判定事例を示す。図中上側はシース位置付近に明確なピーク値 (B) が見られ、その比率 (B)/(A) が30%を超えるため未充てんと判定した事例である。一方、図中の下側はシース位置付近に明確なピーク値が見られないため充てんと判定した事例である。

2.4 X線透過法

(1) 概要

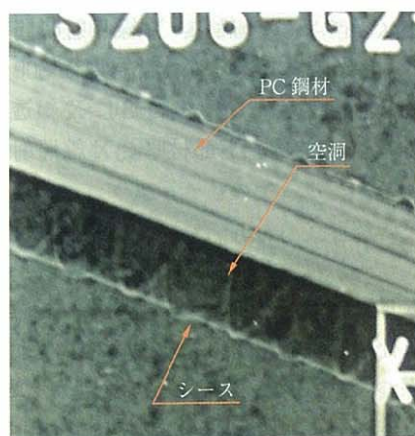
我々が定期的に健康診断で受診する胸部のレントゲン撮影と同様に、X線を利用してコンクリートの内部を観察する方法がX線透過法である。放射線に含まれるX線は、波長が1 Å前後(おおむね $n \times 10^2 \text{ Å} \sim 10^{-2} \text{ Å}$ の範囲)の電磁波であり、そのX線の線量を捉えてコンクリート内部の状況を可視化(画像化)するものである。

(2) 測定方法

X線透過法による撮影は、PC構造物のグラウト調査対象箇所的一方の側からX線発生装置によりX線を透過させ、その反対側に配置されたX線フィルム等のX線検出媒体に定着させ画像化するが、撮影媒体としては、



(a) シース内にグラウトが充てんされている場合



(b) シース内にグラウトが未充てんの場合

写真-10 X線透過法による撮影事例

X線フィルム、イメージングプレート (I.P.)、フラットパネルセンサ等が一般的に使用される。撮影された透過画面からグラウト充てん状況を判定する。

図-7 にポストテンション方式PCT桁におけるX線透過法による撮影概要を示す。

(3) 評価方法

X線は、物質を透過する性質およびフィルムなどの感光材料に当たった時に感光させる性質がある。感光材料に当たるX線量が強いほど濃度(感光材料の黒化度)が増す。感光材料に到達するX線の強さは透過する試験体の厚さ、材質に大きく影響され、鉄鋼材料はX線を透過しにくく、空洞等の気体はX線を透過しやすい。したがって、コンクリート内の鋼材(鉄筋、PC鋼材)は周囲に比べて白く写り、グラウト未充てん部分の空隙は黒く写る。この撮影された画像のコントラストの違いによってグラウト充てん状況を識別することができる¹⁰⁾。写真-10にX線透過法により撮影した事例から判るように、シース内にグラウトが充てんされている場合(a)とシース内にグラウトが未充てんの場合(b)の違いが明確である。

X線透過法は、部材を挟み込んで撮影することが基本となる。撮影可能なコンクリート部材厚は500 mm以下とされているが、コンクリート部材厚によりX線照射

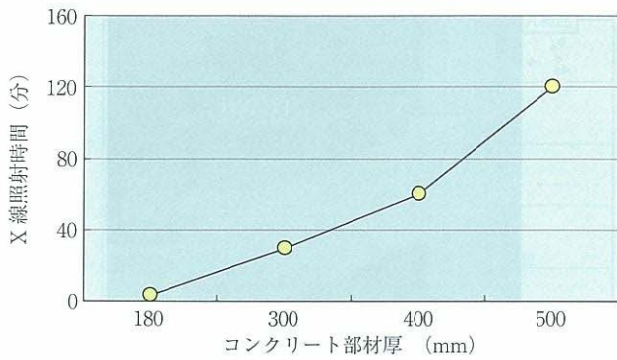


図-8 コンクリート部材厚とX線照射時間の関係

時間は大きく異なる。一般に、X線照射時間は部材厚200mmでは5分未満であるが、部材厚が500mmのものでは120分程度必要となる。図-8にX線透過法における一般的なコンクリート部材厚とX線照射時間の関係を示す。

3. おわりに

プレストレストコンクリート構造物は、橋梁を代表とする主要な社会基盤構造物に多く用いられており、健全な社会を保つためには、適切な維持管理が必要である。

これまで述べたように、PC構造物の生命線であるPC鋼材の健全性を維持するためには、グラウト充填度を調査しPC鋼材の腐食状態を把握した上で対策を講じる必要がある。決してPC鋼材が破断に至るようなことがあってはならない。

PC構造物の詳細調査においては、安易にコンクリートを破壊する削孔、はつり、コア採取等を伴う手法はできる限り避けるべきであり、非破壊調査手法を基本とすることが望ましい。PCグラウトの非破壊調査技術は

種々の手法が提案されているが、それぞれの手法に特徴があり、調査精度や適用範囲も異なるため適用には十分な検討が必要である。PC鋼材の腐食に関しては現在のところ目視調査が基本となっているため非破壊調査技術の確立が急務である。併せて、補修技術としてPC鋼材の腐食の進行を抑える防錆材料の開発も待たれるところである。

最後に、本技術報告がPC構造物の維持管理の参考・一助になれば幸甚である。

参考文献

- 1) 西垣義彦・小門前亮一・奥田由法・鳥居和之：日本最初のPC橋－長生橋の耐久性調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.607～612，2002
- 2) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ80，2008.4
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全－PC橋の予防保全に向けて－，2010.3
- 4) 道路橋予防保全に向けた有識者会議（第1回）参考資料：国土交通省 HP：www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/1pdf/3.pdf，2009.10
- 5) プレストレスト・コンクリート技術協会：PC橋の耐久性向上のための設計・施工マニュアル，1999
- 6) 土木学会：弾性波によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ61，2005.8
- 7) Kazuo Kobayashi, Toyooki Miyagawa, Yoshihiro Hattz, Kazuhiro Kuzume：NDT OF GROUTING IN TRANSVERSE PRESTRESSING STEEL IN T-BEAM BRIDGE, Sixth International Conference on Structural Faults and Repair 3rd July 1995, Volume 1, pp.73-80, 1995.7
- 8) Sansalone, M. and Streett, W. B.: Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-254, 1997
- 9) 鎌田敏郎・内田慎哉・大西弘志・葛目和宏・真鍋英規・藤原規雄・玉越隆史：叩けばわかる！^① 道路橋鉄筋コンクリート床版の疲労による水平ひび割れの検出，検査技術，2009.4
- 10) 内田昌勝・加藤佳孝・恒国光義・魚本健人：各種非破壊試験方法のPCグラウト充填検査への適用性の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1795～1800，2005

《図書案内》

コンクリート技術の要点'10

〔本文〕

第1章 総説・第2章 コンクリート用材料・第3章 コンクリートの性質・第4章 コンクリートの耐久性・第5章 コンクリートの配(調)合設計・第6章 コンクリートの製造・品質管理および検査・第7章 コンクリートの施工・第8章 コンクリート製品・第9章 コンクリート構造の設計

〔資料編〕

第1章 新材料・第2章 耐久性・第3章 配(調)合設計について・第4章 特殊なコンクリート・第5章 構造の設計

〔付録〕 練習問題

B5判・495ページ(2010年刊行)／定価8400円(税込)、会員特価7560円(税込)／送料400円

●申込先：公益社団法人 日本コンクリート工学会「書籍販売」係

〒102-0083 東京都千代田区麴町1-7 相互半蔵門ビル12階／電話(03)3263-1573