

PC グラウトの充てん確認技術の動向

— 非破壊検査による内ケーブルの PC グラウト充てん検査 —

原 幹夫*1・青木 圭一*2

1. はじめに

PC グラウトの重要性は海外での落橋事故や、国内外の不具合事例などにより、より鮮明となってきている。これらの背景から、PC グラウトをより確実なものとするため、プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC 建協）の委託を受け、プレストレストコンクリート技術協会から性能照査型の「PC グラウトの設計施工指針」（以下、指針）が発刊された。この指針では実物大実験や、過去の充てんが確認されたデータに基づき設計し、性能照査を行うことで確実な PC グラウトが得られるように、現時点での最新の知見が示されている。したがって、今後は指針に従い、各プロセスにおける照査を行うことで、PC グラウトの信頼性はより確かなものとなると思われる。

当然なことであるが、グラウトがダクト内に確実に充てんされ、有害となる残留空気が存在しないことが、PC グラウトの要求性能を満足する最低の条件となる。そのため、指針ではこれら有害となる残留空気の有無をプロセス検査および充てん検査で行うこととしている¹⁾。そして、充てん検査は排出側のグラウトホースにグラウトが充てんされていることを目視で確認する「排気・排出口位置での充てん検査」が適用されている。この方法は従来より行われているものであるが、直接的に確認する確実な方法である。さらに、指針では残留空気に対する検査の合理性を高めるため、非破壊検査による充てん確認の併用を今後の課題として記載している。

本報告では、これら非破壊検査による PC グラウトの充てん確認技術の現状と最近の動向について述べる。

2. 非破壊検査によるグラウト充てん確認

2.1 非破壊検査によるグラウト充てん確認の現状

既設 PC 構造物のメンテナンス技術の一つとして、PC グラウトの充てん確認に関する非破壊検査の研究が数多くなされてきた。一般的に、コンクリート内部のひび割れや空洞などの欠陥の探査には、X 線法、または打音法を含む衝撃弾性波や超音波を用いた弾性波法、および電磁波レーダ法などが適用される²⁾。PC ケーブルのダクト内の残留空気やグラウトの閉塞により生じた未充てん部を空洞ととらえれば、これらの非破壊検査手法で充てんの確認が容易にできそうに思える。しかし、PC ケーブルは鉄筋に囲まれた内部にあり、さらにグラウトはダクトを形成するシースの中であり、探査は困難なものとなる。そのため、PC グラウトの充てん状況を確認するには、より高度な探査技術が要求されることとなる。これまでに、PC グラウトの非破壊検査として以下の手法が試みられてきた。

(1) X 線法³⁾

もっとも古くから行われ、コンクリート内の様子をほぼ実態に近い状態で確認できる唯一の方法であるが、部材を挟む形で X 線撮影を行うため、X 線装置やフィルムを配置するための空間が必要となる。また、放射線防護のための安全管理上の制限により低エネルギーの X 線装置に限定されることから、現状では撮影可能な部材厚も 500 mm 以下に制限されるうえ、かなりの時間も要する。そのため、現状ではグラウトの充てん管理を目的として使用するのではなく、問題の原因究明に適用される場合が多い。

(2) 弾性波法

弾性波を利用したグラウト探査手法には、衝撃弾性波を使用し PC 鋼材に直接打撃を与え PC 鋼材を伝わる伝播速度を評価することでグラウトの充てん状況を判断する手法や、鋼材側面から入力し反射波の周波数応答を解析して判断するインパクト・エコー法 (Impact-echo Method)^{4), 5)}、さらに高周波数で大きな弾性波を入力して反射波の信号を画像化するスペクトル・イメージング手法 (SIBIE)⁶⁾ などがある。いずれも、主に PC 鋼棒を使用した PC ケーブルでの研究報告⁷⁾ がなされているが、対象とする PC 鋼材の種類や解析の精度、および時間の短縮が今後の課題となると思われる。

(3) 中性子法

中性子法は検査する PC 部材を中性子放射線源と検出器で挟み、コンクリートを透過する中性子量を測定する方法で、中性子が透過する際にコンクリート中の水素と衝突し、熱中性子として散乱して減少する原理を用いている。ダク



*1 Mikio HARA

(株)日本ピーエス
技術品質管理部 部長

*2 Keiichi AOKI

中日本高速道路(株)横浜支社
横浜技術事務所 技術指導
第三課 課長

ト内に空隙がある場合には透過量が大きくなることで判定する⁸⁾。この方法は測定時間も1分程度と短く、測定自体は簡単であるが、鉄筋やダクト空隙内の残留水分の影響を受け、判定が困難な場合もある。グラウト再充てんの確認などに有効であるとの報告がある⁹⁾。

これらの非破壊検査手法は、すでに完成したPC構造物を対象として研究されてきたもので、前提としてコンクリート面からのみの探査であることから、探査条件や測定精度に大きな制約がある。PC建協の施工部会や耐久性委員会などでも多くのグラウト充てん確認手法を検討してきたが、未だ決定的な方法が見いだせない状態にあり、これらの手法を新規のPCグラウトの充てん検査に適用するには、計測条件、時間、費用、精度などの点で多くの課題が残されているのが現状と思われる。

2.2 PCグラウト充てん検査に適用できる非破壊検査

新規に設計するPCグラウトの場合、充てん検査に関わるPCケーブルの情報も正確であるし、充てん検査を前提とした設計を行うことも可能となる。最近では、グラウト感知性能の確認されたセンサ等も開発されてきている。また、対象を床版部に限定するものの、コンクリート面からの充てん検査手法も確立されつつある。これらの非破壊検査手法は、今後のPCグラウトの品質保証をより確実なものとする重要なツールになるとと思われる。

以下に、その概要と特徴を述べる。

(1) 目視(映像)確認法

充てん確認でもっとも簡易なものに、目視あるいはファイバースコープとCCDカメラを組み合わせた映像による確認方法がある。目視確認はシースの一部を透明シースに置き換え、コンクリートを切り欠いて露出させて観察する方法である。この場合、観察用の切り欠き部が断面欠損とならないようにすること、また切り欠き部の跡埋めを確実にする必要がある。

ファイバースコープを用いる方法として、観察孔付きのシース(写真-1)を所要の位置に取り付けておき、接続した20mm程度の観察孔からファイバースコープで充てん状況を確認する方法がある。この方法でも観察孔の跡処理を十分に行う必要がある。

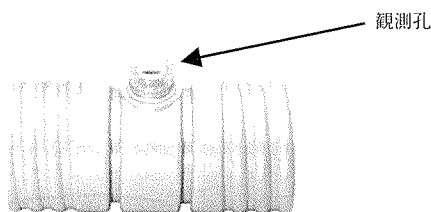


写真-1 観察孔つきシース

これら目視あるいは映像で充てん状況(写真-2)を確認する場合の注意事項としては、いずれの方法も観測面にグラウトが附着した後は、グラウト面の低下などの変動を観測することができなくなる点があげられる。そのため、こ

れらの方法を用いる場合は、注入圧を一定以上に確保しながら注入作業を完了するなど、グラウトに変化が生じないように留意しなければならない。

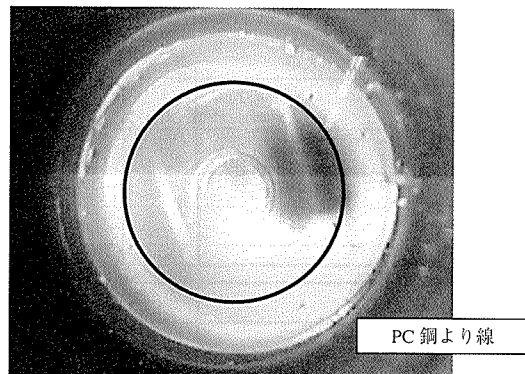
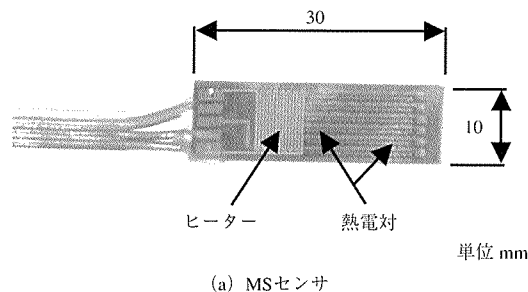


写真-2 シース内部確認画像

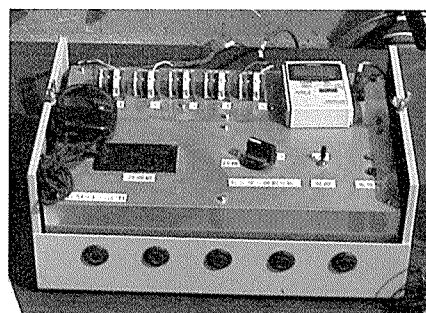
(2) 充てん感知センサ法¹⁰⁾

充てん感知センサ法は、PC構造物の施工時にあらかじめケーブルの所要の位置のシース内側に充てん感知センサを取り付けておき、グラウト注入作業時および注入完了後の検査時に充てん状況を確認する方法である。性能が確認されているセンサとして、現在「MSセンサ」と「振動デバイスセンサ」がある。

MSセンサ(写真-3)は熱電対とヒーターを組み合わせたもので、物質の熱伝導率の違いを利用し、ヒーターから放熱する熱量の変化でグラウトを感知する原理である。



(a) MSセンサ



(b) MSセンサ測定器

写真-3 MSセンサ測定器具

MS センサでグラウトの充てん状況を計測した結果を図-1に示す。グラウトがセンサに接触することにより出力値が大きく下がり 5 mV 以下で推移することで充てんが確認される。

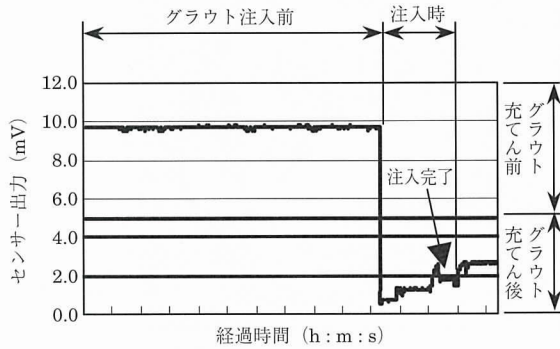
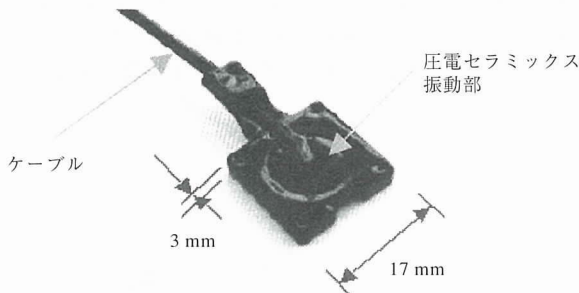
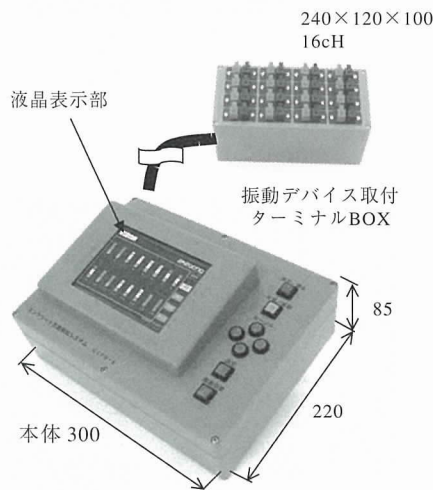


図-1 MS センサによる計測結果

振動デバイスセンサ(写真-4)は圧電セラミックス製の小型振動デバイス(15×15 mm t=3 mm)を可聴域の周波数(3~15 kHz)で振動させその周波数特性により振動デバイスに接しているグラウトを検知する原理である。



(a) 振動デバイスセンサ



(b) 振動デバイスセンサ測定器

写真-4 振動デバイスセンサ測定器具

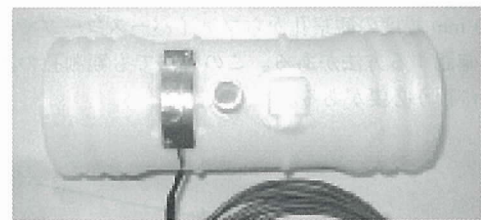
振動デバイスセンサでグラウトの充てん状況を計測した結果を図-2に示す。グラウトがセンサに接触することにより表示が緑色となることで充てんが確認される。

グラウト年月日	測定時間	ケーブル No. 13061L	判定	
2003/9/15	16:42:36		← グラウト注入前日確認	
2003/9/16	12:23:25		← グラウト注入開始	
2003/9/16	12:33:25		判定 ■ : 空気 ■ : 水 ■ : グラウト ■ : 破損	
2003/9/16	12:58:25			
2003/9/16	13:13:25			
2003/9/16	13:38:25			
2003/9/16	13:58:25			
2003/9/16	14:05:37			
2003/9/16	14:07:08			
2003/9/16	14:07:10			← センサー充てん確認
2003/9/16	14:13:26			← グラウト注入中
2003/9/16	14:19:20			
2003/9/16	14:25:26			
2003/9/16	14:31:26			
2003/9/16	14:40:26		← グラウト注入完了	
2003/9/16	14:46:26			
2003/9/16	14:49:26			

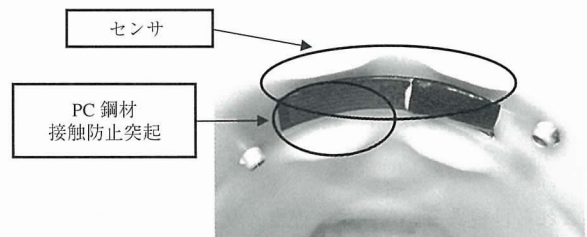
図-2 振動デバイスセンサによる計測結果

いずれのセンサも注入作業中にグラウトの充てん状況の確認ができるとともに、注入時のグラウトの変動およびグラウト硬化後の充てん確認も可能であることが実験で確認されている。

これらのセンサはシースの内面に配置されるため、PC鋼材の挿入時に破損しないよう注意が必要となるが、最近ではそれらに配慮したセンサ付きのシース(写真-5)が開発され、施工性も向上している。



(a) センサ付きシース外観



(b) 内部センサ部

写真-5 センサ付きシースの例

また、最近ではRFID (Radio Frequency Identification) 技術を活用し、センサおよびセンサインターフェース付きRFID タグをコンクリート中に設置することにより、グラウトの充てん状況を外部から無線通信により確認するワイヤレス充てん検知システム (図-3) も開発されている。

このシステムは、リーダー・ライターが電波を介してコンクリート中に埋め込まれたタグと通信し、タグはセンサの情報を取得して電圧値に変換し、リーダー・ライターに電圧値を送り返すことでグラウトの状態を外部に伝達するものであり、センサ部電極間の電気的な抵抗を計測し、電圧値として示すことでグラウト充てん状況を検知している。

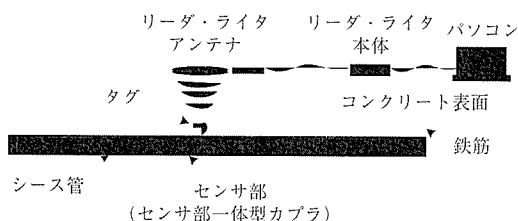
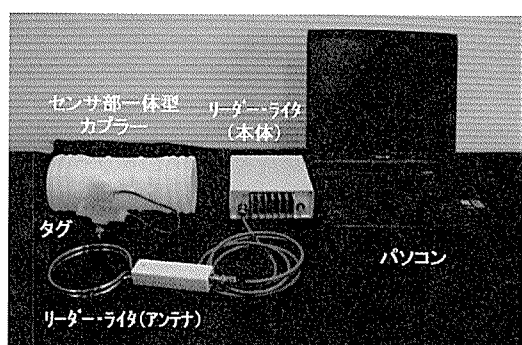


図-3 グラウト充てんシステムの概要

(3) マルチパスアレイレーダ法^{11), 12)}

マルチパスアレイレーダ (以下、MPA) は電磁波レーダ法の原理を応用したもので、従来型のレーダで使われる1対の送受信アンテナに対し、多極化したアレイアンテナを採用し、より多くの情報を正確に得ることを可能としたものである。この開発により、従来、困難であった鉄筋位置を越えてPCケーブルの状況の観測が可能となった。

MPAの概要を図-4に示す。これは、電磁波レーダ法の送信アンテナをアレイ状に複数配置し、送信された電磁波がコンクリート内を通過し、その反射した電磁波を複数の

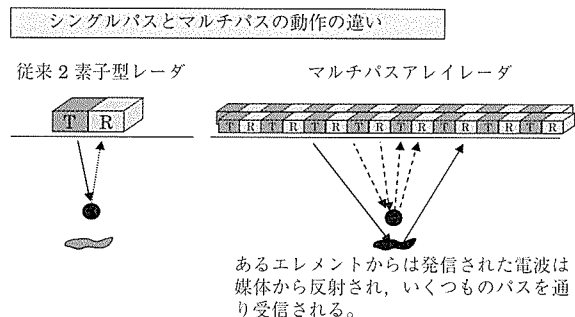


図-4 MPAの概要

アンテナで受信するマルチパス (多経路) 方式としたものである。この受信信号 (反射波) を解析・画像処理し、3次元化画像として出力し、内ケーブルグラウトの充てん状況の検査を行う。

MPAの探査機を写真-6に示す。計測は探査機をシース上を直角に走査させ、取得した反射波データをパソコンで解析・画像処理して行う。写真-7に探査状況を示す。

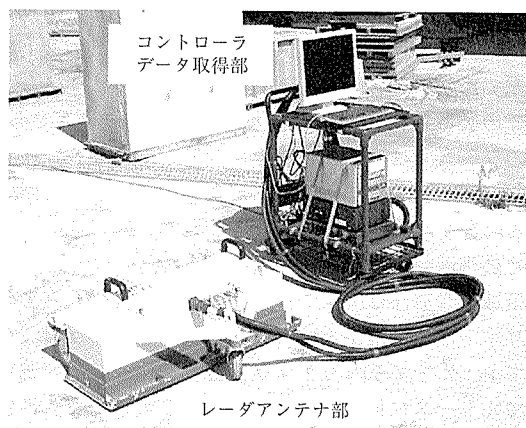


写真-6 MPA探査機

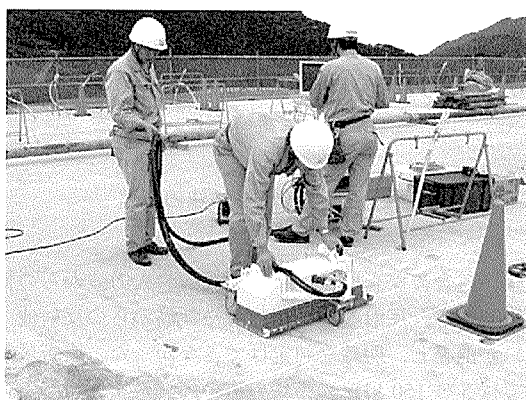


写真-7 MPAによるグラウト探査状況

MPA法を実際の床版ケーブルのグラウト充てん探査に適用した結果を以下に示す。図-5に対象ケーブル位置を、グラウト充てん後の13011～13051ケーブルとグラウト充てん前の13061～13081ケーブルの計測結果を図-6に示す。

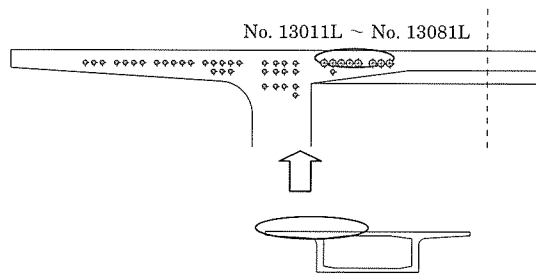


図-5 対象ケーブル位置図

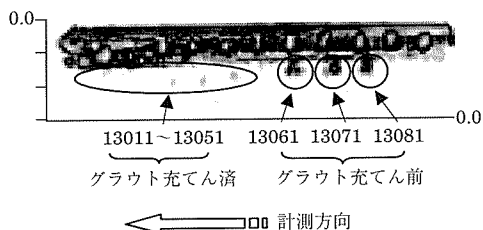


図 - 6 ケーブルの検査結果

MPA 法では検査結果にも示すように、結果は画像上の濃淡で充てん状況を判断する。コンクリートの状況にもよるが、この装置で探査できる最大深度は 20 cm 程度であり、鋼製のシースでは、シース直上に鉄筋がある場合、鉄筋の純間隔が 100 mm 以下の場合、およびコンクリート面にある場合などは本装置の適用範囲外となる。

(4) 広帯域超音波法^{13), 14)}

広帯域超音波法は図 - 7 に示すようにケーブル直上のコンクリート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。空のシースは充てんシースに比べ、反射波の強度が大きくなる性質を利用する。

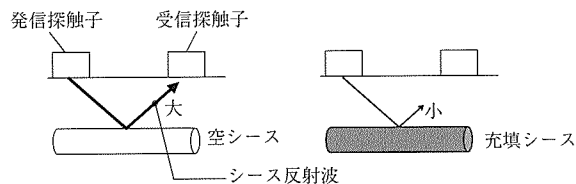


図 - 7 広帯域超音波法の原理

従来の超音波探査機では単一周波数の入力波からの情報を使用した。反射波には粗骨材や鉄筋からの反射波（妨害波）が混在し、明確な判定はできなかった。広帯域超音波法では 5 ~ 150 kHz の帯域の広い周波数を使用し、得られたデータから妨害波をフィルタリングすることで、シースからの情報を読みとる手法を用い判定を可能とする。

広帯域超音波法に用いる装置を写真 - 8 に示す。探査は φ 76 の大型探触子（発信器、受信器）、広帯域超音波測定

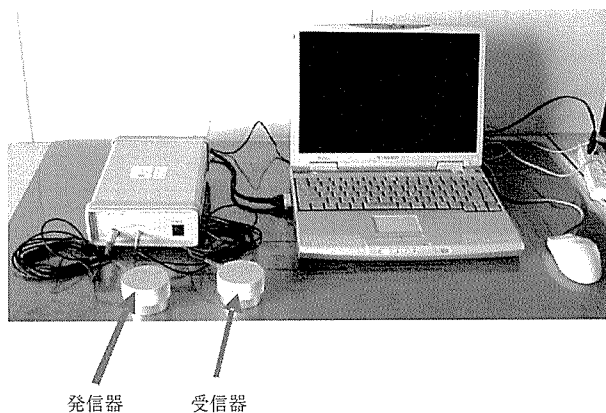


写真 - 8 広帯域超音波探査機

器およびパソコンを用いて行う。写真 - 9 に探査状況を示す。



写真 - 9 広帯域超音波による探査状況

広帯域超音波法を実際の床版ケーブルのグラウト充てん探査に適用した結果を以下に示す。図 - 8 に検査対象ケーブルの位置を、図 - 9 にグラウト充てん検査結果を示す。図中に表示が無い位置はグラウトが充てんされていることを表し、輝度の高い楕円形が表示された場合は充てん前（未充てん）であることが表される。

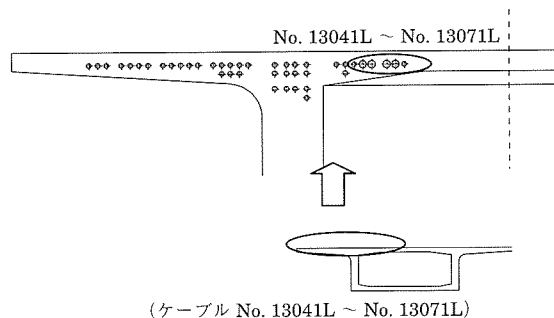


図 - 8 対象ケーブル位置図



図 - 9 グラウト充てん探査結果

広帯域超音波法では、シース内の空隙の有無を直接表現する。この装置で確認されている探査可能深度は 25 cm 程度で、鋼製や PE などシースの材質による影響は受けないが、シース径が 40 mm 以下の小径の場合、判断がしづらいこともある。また、シース直上に鉄筋がある場合、鉄筋の純間隔が 70 mm 以下の場合は適用範囲外となる。

本装置は探触子をシリコングリッドなどの接触媒質を介して、コンクリートに接触させて計測を行う形式のため、構造物の側面からの計測も可能であることや、ケーブルの位置やかぶり厚を比較的正確に計測できるなどの特徴もある。

これらコンクリート表面からグラウト充てんを確認する方法では、いずれも鉄筋の影響を大きく受けるため、PCグラウトの計画に際して、シース直上に鉄筋を配置しないなどの配慮を行うことで、検査精度が確保されるものと考えられる。

3. ま と め

グラウトの充てん検査のための非破壊検査技術は、最近急激に進歩したと言える。しかし、精度の向上、充てん度(有害な残留空気量の判定)の確認や適用範囲の拡大など課題も多く、現時点ではこれらの手法のみでグラウトの充てんを保証しうる状況にはない。

目視(映像)による確認方法やセンサを使用した方法は容易で精度も高く、グラウトの注入忘れなどのヒューマンエラーの防止にも効果はあるが、充てん確認の観点からは長いPCケーブルのある「点」を確認するにすぎない。

一方、コンクリート表面からの充てん探査方法は、床版部に限れば任意の点を対象とできることから、点の連続による「線」でとらえることも可能となるが、時間と費用の点で現実的ではなく、運用方法の検討が必要となる。

したがって、現時点ではPCグラウトの設計を適正に行い、確実なプロセス検査が行われることが重要であり、それを前提として、これら非破壊による充てん検査が成立すると考えられる。

これらの非破壊検査手法はすでに各地で使われ始めている状況にあるが、定着するためには、経済性を含め精度、運用頻度などをさらに検討していかなければならないものと思われる。

参考文献

- 1) 睦好宏史, 手塚正道, 濱田謙, 二井谷教治: PCグラウトの設計施工指針の概要, コンクリート工学, pp.3 ~ 11, Vol.43, No.12,

2005.12

- 2) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術 '05
- 3) 藤井学, 宮川豊章: PCグラウト充填状況の非破壊検査法, 土木学会論文集, 第402号/V-10, pp.15 ~ 25, 1989
- 4) 渡辺健, 大津政康, 友田祐一: PCグラウト充填度評価のインパクト・エコー法に関する波動論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.293 ~ 298, 1998
- 5) 鎌田敏郎: PC構造物のメンテナンスにおける非破壊検査, プレストレストコンクリート, pp.51 ~ 58, Vol.45, No.1, Jan. 2003
- 6) 渡海雅信, 小阪浩二, 大津政康: SIBIEを用いたコンクリート中の欠陥検査法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.499 ~ 504, 2001
- 7) 中澤里, 鎌田敏郎, 北園英明, 横山博司: 衝撃弾性波法を用いた弾性波伝播時間に基づくPCグラウト充填評価, 第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.557 ~ 562, 2000年10月
- 8) 石川晃, 吉岡民夫, 菱沼頌夫: 中性子線によるPCグラウト検査法, 第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.91 ~ 94, 2001年11月
- 9) 鳥取誠一, 吉田幸司, 新田耕司: PCグラウト充填不良に対する補修, プレストレストコンクリート, pp.84 ~ 89, Vol.45, No.2, Mar. 2003
- 10) 正司明夫, 青木圭一, 大城社司, 細野宏巳: センサーによるグラウト充填の確認方法に関する検討, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.49 ~ 52, 2003年10月
- 11) 森島弘吉, 阿部浩幸, 青木圭一, 原幹夫: 電磁波レーダ法による内ケーブルのグラウト充填性検査, プレストレストコンクリート, pp.71 ~ 78, Vol.47, No.3, May. 2005
- 12) 原幹夫, 本間淳史, 青木圭一: 非破壊検査(電磁波レーダ探査法)による内ケーブルPCグラウトの充填調査, 第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.141 ~ 144, 2004年10月
- 13) 原幹夫, 本間淳史, 青木圭一, 廣瀬正行: 広帯域超音波探査法を用いたPCグラウトの充填度測定, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.61 ~ 64, 2003年10月
- 14) 青木圭一, 本間淳史, 原幹夫: 非破壊検査(広帯域超音波探査法)による内ケーブルPCグラウトの充填検査, 第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.137 ~ 140, 2004年10月

【2006年1月5日受付】