

報告 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

内田 昌勝^{*1}・加藤 佳孝^{*2}・恒国 光義^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨：各種非破壊試験方法の PC グラウトの充填検査への適用性を検証するため、グラウト充填率およびシースの種類を変化させたモデル試験体を作製し、ブラインド試験により X 線法、レーダ法および超音波法による試験を実施した。その結果、手法により適用可能なシースの種類および測定不能な部位などの制限はあるものの、適切な手法を選択することにより、グラウトの充填の有無を判定できることがわかった。

キーワード：非破壊検査, X 線, レーダ, 超音波, プレストレストコンクリート, グラウト

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下 PC と略す）は、我が国で建設されてから 50 年近くになり、既存構造物の中には長期に供用されたものが増えている。一方で、作用荷重の増大や有害物質の侵入など構造物が置かれている環境条件は、厳しさが増す傾向にある¹⁾。

PC 構造を健全な状態に維持するには、緊張材が良好な状態に保たれていることが重要である。特に、ポストテンション方式の場合には、シースを介して緊張材をコンクリート中に設置し、緊張後にグラウトを注入しコンクリートと一体化させる構造であるため、グラウトの充填が不十分であると、構造物の劣化を引き起こす原因となってしまう。

本報告では、PC グラウトの充填状況を非破壊試験方法により効率良く判定するため、X 線法、レーダ法および超音波法（トモグラフィ法）を用いて、シースの材質および PC グラウトの充填率を変化させたモデル試験体のブラインド試験を実施し、各手法の適用範囲を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

モデル試験体は、ポストテンション方式の T

桁の下フランジとウェブをモデル化したもので、長さは 3000mm、高さは 900mm である。図-1 に、試験体の側面図および PC ダクトの配置を示す。図中の No.1~6 は、シースの番号を示し、PC グラウトの充填状況の検討は、No.3~6 の 4 本のシースを対象に行った。計測位置は、図中の a~d の 4 箇所とした。

シースには公称径が 45mm の鋼製およびポリエチレン製を用い、緊張材には PC 鋼より線 1S21.8 を用いた。図-2 に A 面側からみたモデル試験体を示す。

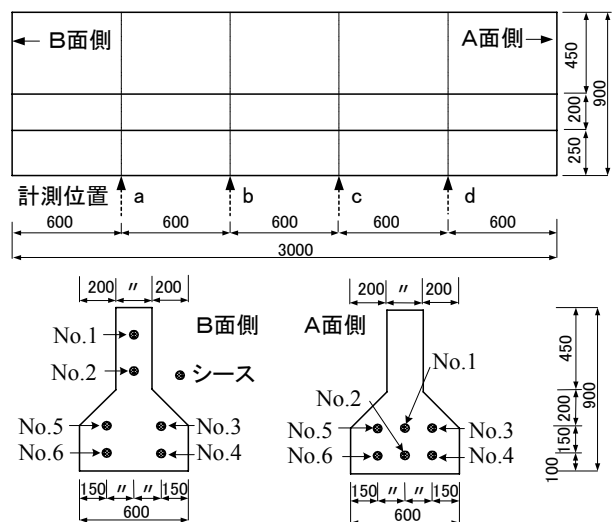


図-1 試験体側面図および計測位置

*1 (株) 太平洋コンサルタント コンクリートコンサルタント事業部 博士 (工学) (正会員)

*2 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)

*3 東電設計 (株) 技術開発本部 構造・耐震技術部 工修 (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)

2.2 X線法の測定方法

X線法は、物体の一方の側からX線を照射し、その対面に配置されたX線フィルム、電子センサなどのX線検出媒体により透過したX線の強さ（線量）を捉えて画像化し、物体内部の状態を目視によって確認する方法である。

X線の撮影方法を図-3に示す。撮影は、工業用スクリーンタイプのX線フィルムを使用し、携帯型の250kVタイプのX装置を用いて行った。露出条件は、管電圧250kV、管電流5mA、露出時間10分、焦点・フィルム間距離900mmである。なお、前方散乱および後方散乱線を低減するために、グリッド板（1:16直交型）および鉛遮蔽板（厚さ2mm）を使用した。

2.3 レーダ法の測定方法

レーダ法は、3次元画像化レーダ（以下MPAレーダと略す）を用いて測定を行った。MPAレーダの基本的な原理は、従来型のレーダ装置と同様であるが、アンテナ素子を複数個（16組）アレイ状に配置し、各アンテナ間の送受信経路を全て時系列データとして取得し、それらのデータを解析することにより、コンクリート内部の明瞭な3次元映像化を可能としている。今回は、その3次元映像から得られる情報により、シース内のグラウト充填状況を判断した。

測定には、最高周波数が5GHz（中心周波数2.5GHz）のMPAレーダを使用し、図-4に示すようにシース3および5はそれぞれのテーパ部分をシース4および6はフランジ底面を矢印のように移動して測定した。

2.4 超音波法の測定方法（トモグラフィ法）

超音波のトモグラフィ法は、PC桁断面の超音波伝播速度を等間隔で密に測定し、測定結果をトモグラフィ解析し、PC桁内部の伝播速度の分布を求め、シース内グラウト充填状況を評価した。超音波測定装置の発信パルスは高圧のパルス電圧(1kV)とし、超音波探触子は28kHzを使用し透過力を高めた。また、受信波は増幅度の高いアンプ(60dB以上)で受信し、0.1 μ s分解能のデジタル時間表示のものを使用した。



図-2 モデル試験体全景

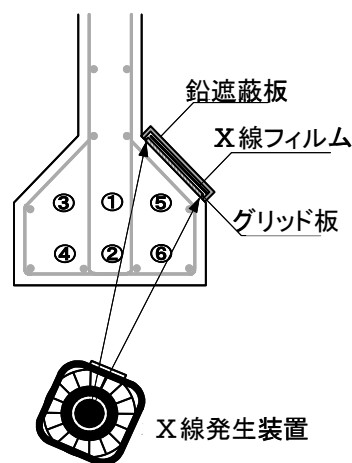


図-3 X線の撮影方法



シース3の測定状況



シース4および6の測定状況

図-4 レーダ測定方法

試験体断面は図-5のとおり座標を設け伝播速度およびトモグラフィ処理はこの座標を基に計算処理をおこなっている。座標は X 軸, Y 軸ともに 20mm 間隔とした。なお, 伝播速度のトモグラフィ処理は, X 方向のデータと Y 方向のデータを合成して評価した。

3. 実験結果

3.1 シースおよびグラウトの充填状況の確認

モデル試験体のシースの種類およびグラウトの充填状況を調べるため, 試験体を各計測点 (a~d) で鉄筋を避けた位置で, ワイヤソーを用いて切断した。図-6に一例として計測位置 d における切断面を示す。この結果, どの切断面においても, シース No.1, 2 はグラウトが未充填, No.3, 4 はグラウトが完全充填, 5, 6 はグラウトがケーブル断面の半分まで充填されているのが確認された。また, シース No.1, 3, 5 は鋼製シース (S) で, No.2, 4, 6 はポリエチレンシース (P) であった。

3.2 X線法

今回の撮影条件は, 図-3に示したように X線透過厚さによる濃度変化が大きく, 確認できる範囲は狭い。そのため, 撮影配置条件によっては, シース像の幅全体について確認することはできず, 充填状況の判断は, シースの上下いずれか半分の領域で行わざるを得ない箇所もあった。代表的なシース内グラウトの充填及び未充填の透過写真のエンボス処理画像を図-7に示す。画像上, 未充填部はその周囲に比べ, 凹凸が大きく現れている。

透過写真より判定したシースの種類およびグラウトの充填状況を撮影位置別に表-1に示す。携帯型 X線装置 (300 kV 以下の装置) を使用した X線透過撮影法は, 厚さ 40 cm 程度²⁾までの躯体に対して適用可能であり, 厚さがその範囲であれば, 桁ウェブの撮影は容易であり, 充填状態をある程度定量的に把握することも可能である。しかし, 構造的に重要と考えられるフランジ部は, 躯体厚が大きく変化する部位であり,

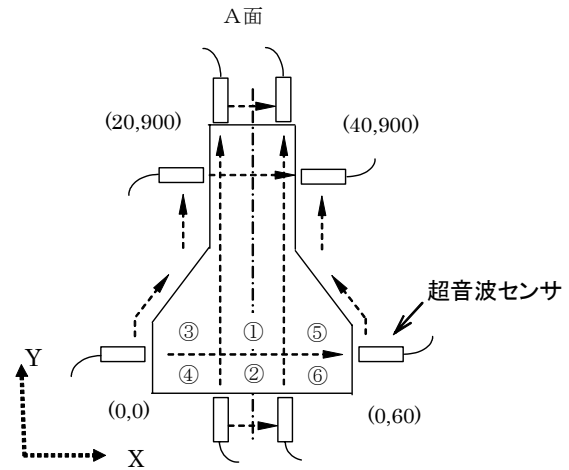


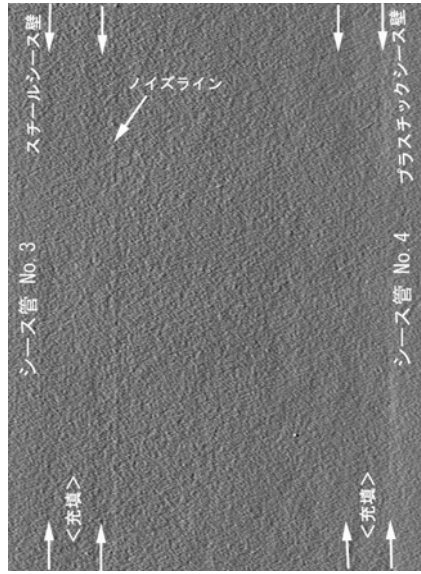
図-5 超音波トモグラフィの測定状況



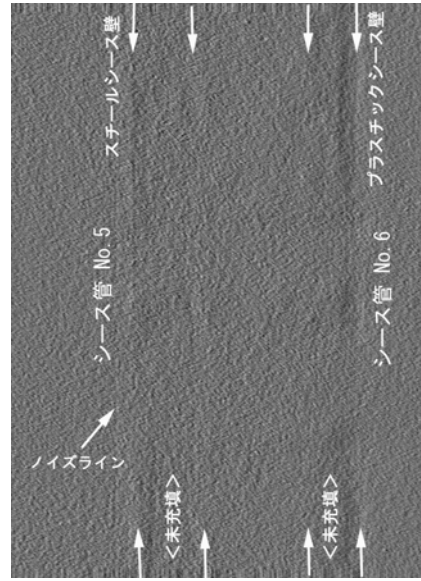
図-6 モデル試験体切断面 (測定位置 d)

撮影限界厚さとなる部位でもあることから, X線撮影の条件は厳しいものとなる。そのため, グラウトが半分まで充填されていたシースを未充填と判定することとなった。なお, 撮影結果から, No.3 および 5 は鋼製シース (S), No.4 および 6 はポリエチレン製シース (P) であることを特定することができ, グラウトの充填状況はシースの材質に関わらず評価できことが確認できた。

今回の一連の調査から, 厚さが変化する部位の撮影では, 確認できる範囲が極端に狭くなることから, 撮影配置は十分慎重に行う必要があること, また, 撮影限界厚さの条件での撮影が必要であり, 露出時間が長くなることから, 散



充填部の画像



未充填部の画像

図-7 透過写真のエンボス処理画像

乱線の低減措置が重要であることがあらためて確認された。イメージングプレートは X 線フィルムに比べて広いダイナミックレンジをもち³⁾、1 回の撮影で確認できる範囲を広げることが期待できるが、1 日数枚しか撮影できないほど、撮影時間が大幅に長くなることなどの問題がある。現実には複数の緊張材が近接して配置されることが多く、X 線撮影ではケーブルとの重なり部分がブラインドとなって、上下の僅かな範囲の状況から推定せざるをえないことに留意する必要がある。

3.3 レーダ法

3 次元化映像の例として、下フランジ底面で計測した映像を図-8 に示す。各映像から、鉄筋（主鉄筋、配力筋）およびシースが判定可能である。立体、平面映像より、シース No.6 での反射強度は、No.4 に比べて強くなっていることが分かる。シース No.2 は、ウェブ内を軸方向に高さを変えて配置されており、その配置深さは B 端側から A 端側に行くほど深くなっているため、レーダの探査能力から B 端側のフランジ部に存在する箇所のみ検知されている。

グラウトの充填状況の判定は、3 次元の全体解析映像から計測位置 (a~d) を中心に前後 100mm の合計 200mm 長の画像を切り出し、シース軸方

向からの透視画像を作成することにより、シー

表-1 X 線撮影による充填率判定結果 (%)

シース No.	測定位置				シースの状態	
	a	b	c	d	充填率	材質
3	×	○	○	○	100	S
4	▲	○	○	○	100	P
5	●	●	●	●	50	S
6	●	●	●	●	50	P

○完全充填 ●未充填 ▲充填不良
×判定不可 S 鋼製 P ポリエチレン製

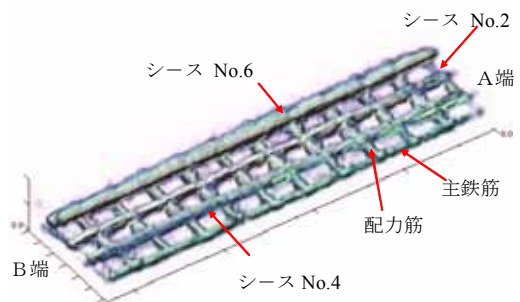


図-8 3次元画像例

向からの透視画像を作成することにより、シースからの反射を強調させ、グラウト充填の有無の判定は、シース部の画像強度（面積および色強度）により行った（図-9）。

シース No.6 は、側面映像が濃く、かつ断面映像の面積が大きいため、シース部での反射強度

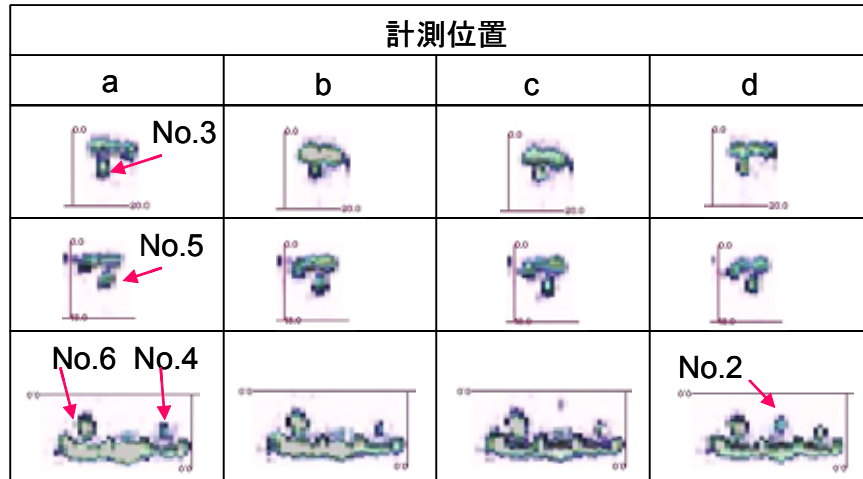


図-9 MA レーダによる断面透視図

および反射面積が大きいと考えられる。これは、主にシース内の空気層からの反射と考えられるため、グラウトが充填不良であると判断した。No.4は、側面映像が薄く、かつ断面映像の面積が小さいため、シース部での反射強度および反射面積が小さいと考えられる。これは、シースと内部のPC鋼線からの反射と考えられるため、グラウトは完全に充填されていると判断した。

シース No.3 および5については、上記の2ケースの中間程度の反射強度であったが、計測面の面積が小さく（下フランジテーパ部）、アンテナの性能が十分発揮できる状況ではなかったことも考慮に入れると、シース6の状況に近いと考えられる。よって、グラウトは充填不良であると判断した。

判定結果をまとめて表-2に示す。シースがポリエチレン製（P）の場合、シース No.4は、判定結果が実際値と一致している。No.6も、空隙の有無の判定では計測値と設計値が一致していると言えるが、設計値は“グラウト充填度50%”となっており、シースの上半分が未充填で下半分が充填された状態となっているものと推測される。

一方、シースが鋼製（S）の場合、シース表面で電波が全反射してしまうため、シース内部の情報を得ることが出来ない。よって、シースが鋼製の場合、グラウトの充填度を判定すること

表-2 レーダ法による充填率判定結果(%)

シース No.	測定位置				シースの状態	
	a	b	c	d	充填率	材質
3	▲	▲	▲	▲	100	S
4	○	○	○	○	100	P
5	▲	▲	▲	▲	50	S
6	▲	▲	▲	▲	50	P

○完全充填 ▲充填不良

は原理上不可能となる。

3.3 超音波トモグラフィ法

超音波の透過速度より、トモグラフィ処理したモデル試験体内部の速度分布を解析した結果を図-10に示す。測定位置aでは各シースに明確な速度差が認められないが、測定位置b~dではシース No.5,6で速度が低くなる傾向が認められる。速度分布より判定したグラウトの充填率の判定結果を表-3に示す。今回は、図-10の結果から、シース付近で速度分布に有意な差が認められた。ここでは、3860m/s以下のものを充填不良と判定し、それ以外を完全充填と判定した。

今回の判定結果と実際のシースの状態より、超音波トモグラフィ法によって、シース内の空隙を速度分布より評価できることが分かったが、ポリエチレン製（P）シースと鋼製シース（S）の差は認められなかった。また、今回の解析結

果は、縦と横方向の交点の平均を取るため、シーす以外の要素で伝播時間が遅くなると、影響でゴーストが現れ判定が困難になった。

今後、鉄筋などPC桁内部の状況が明確になり、その要素分を考慮し差し引く方法を検討することにより、さらに精度は向上すると考えられる。

4. まとめ

PCグラウトの充填率およびシーすの材質が異なるモデル試験体を用い、非破壊試験によるブラインド試験を実施した結果、グラウトの充填率を判定することは難しかったものの、X線法では、PCシーすの材質によらず、グラウトの充填不良を検出することができ、レーダ法では、プラスチックシーすであれば、グラウトの充填不良を検出することができた。また、超音波トモグラフィ法を用いることで、グラウトの充填不良箇所を検出することができた。

今回の研究により、検査手法により適用することが難しい条件はあるものの、調査する部位、シーすの種類、配筋状況などの条件に応じて、適切な手法を選定することにより、非破壊検査技術を用いてPCグラウトの充填率を評価することは難しいが、充填不良箇所を特定することは可能と考えられる。

一方で、実際のPC部材は、端部で部材厚が大きく、断面が変化している箇所では判断が難しいケースもあることから、手法の組合せによる精度向上や削孔試験との組合せなどによって、検査精度の向上が望まれる。また、多点計測やデータ解析技術の向上により、定量的な評価が可能とも考えられるので、さらなる技術開発による検査精度の向上に期待したい。

謝辞：本報告は、「コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会報告書（PCグラウト充填検査技術編）：東京大学生産技術研究所」（平成16年3月）の成果の一部を取りまとめたもので

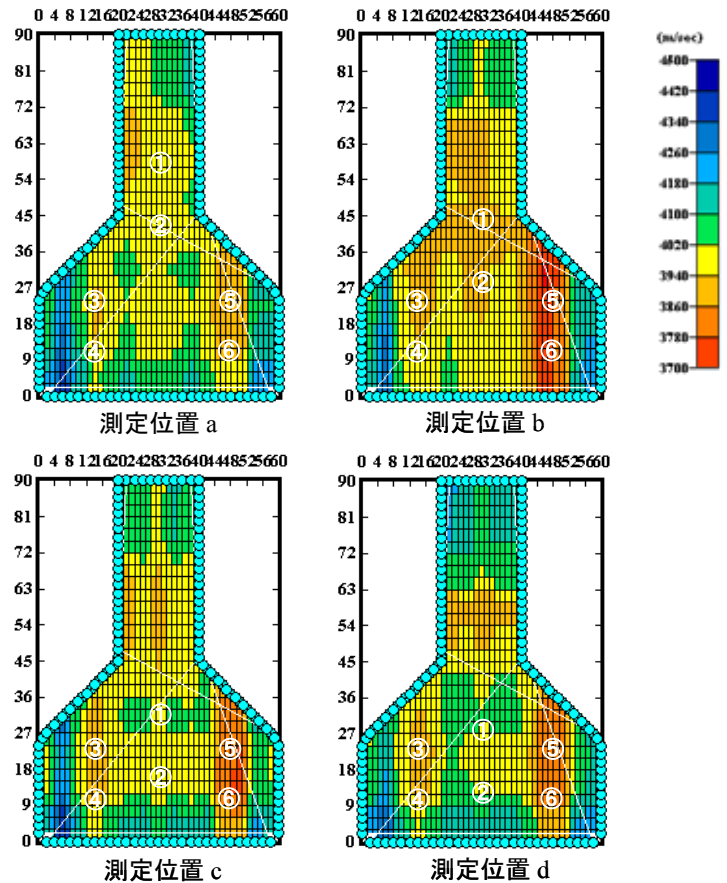


図-10 トモグラフィ解析結果

表-3 超音波法による充填率判定結果 (%)

シーす No.	測定位置				シーすの状態	
	a	b	c	d	充填率	材質
3	○	○	○	○	100	S
4	○	○	○	○	100	P
5	○	▲	▲	▲	50	S
6	○	▲	▲	▲	50	P

○完全充填 ▲充填不良

あり、関係各位の協力を御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林和夫：PC 構造物の補修・補強，コンクリート工学，Vol.37，No.2，pp.3-9，1999.2
- 2) 魚本健人，加藤 潔，広野 進：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990
- 3) 福岡孝義：イメージングプレートを用いたデジタルラジオグラフィ，非破壊検査，Vol.45，No.10，pp.720-724，1996.10