研究報告

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

森島　弘吉 *1・阿部　浩幸 *2・青木　圭一 *3・原　幹夫 *4

1. はじめに

わが国には，現在15万橋ともいわれる道路橋が整備されている。とくに，1970年代から1980年代に多くが建設されており，今後2030年を過ぎる頃には，建設された大多数の橋梁が50年以上経過したことになる（図-1)。これに伴い，維持管理または架替えに要する費用が今後さらに増大することになり，今後建設する橋梁は維持管理に要する費用を最小限とする対策が必要となる。

PC橋においては，グラウト不良に伴うPC鋼材の損傷が確認され，架替えや落橋に至った事例が英国（図-2）やベルギー（図-3）等で報告されている。グラウト不良の主な原因と考えられるのは，ブリーディング等に起因する空隙の発生等の技術的課題，シース内への異物の侵入やシースの潰れ等による閉管，グラウト施工忘れ等の人為的課題である。しかし，最大の課題は，上記のような課題がありながら，これを直接的に確認する手段がこれまでなかったことであり，より確実な耐久性を保証するためには，施工されたグラウトが充填されていることを保証するシステムが必要であろう。

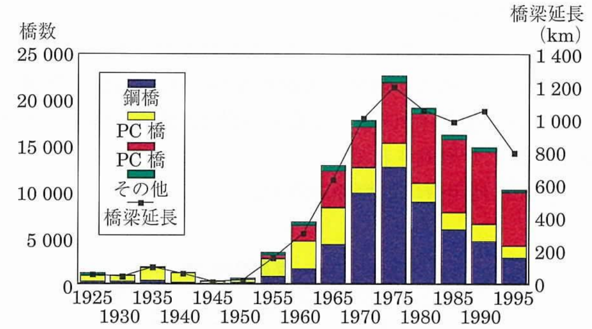


図-1　道路橋の架設時期の推移

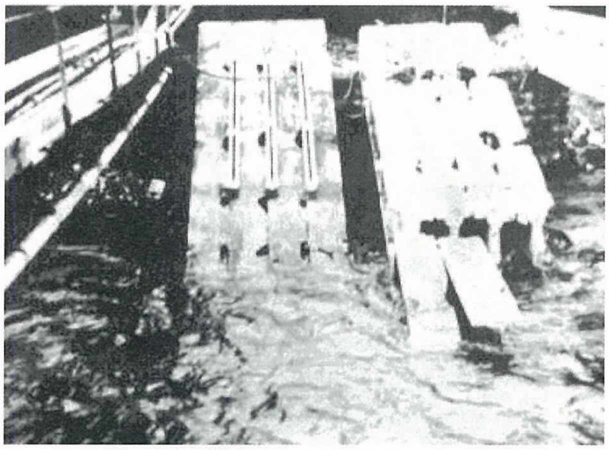


図-2　英国での事例（Ynys-Y-gwas 橋）

図-3　ベルギーでの事例
（写真提供　John Darby，以後有希夫，細野宏巳）

そこで，本報告では，グラウトの充填性を保証するシステムの一つとして，電磁波を利用したグラウトの充填性検査方法（マルチパスアレイレーダー法）について，その検証を実施したので報告するものである。

2. マルチパスアレイレーダの原理と特徴

2.1 マルチパスアレイレーダの原理

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（レーダ）法」の原理を応用した技術である。

「電磁波法」とは，地中に送信された電波が周囲の雰囲気と電気的特性の異なる物質の境界（たとえば，埋設物や空洞）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-4)。具体的には，アンテナ部から対象物に向かって数ナノセカント（$\times 10^{-9}$ sec）毎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異物の位置を求める。

電磁波法では，1対の送受信アンテナを用いる方法が一

*1 *Hiroyoshi MORISHIMA*：三井造船㈱ メカトロセンターエンジニアリング部
*2 *Hiroyuki ABE*：オリエンタル建設㈱ 技術研究所
*3 *Keiichi AOKI*：日本道路公団 静岡建設局
*4 *Mikio HARA*：日本ピーエス 技術品質管理部

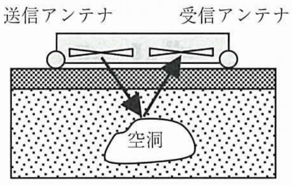


図 - 4　レーダ探査の原理

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）方式の開発により，従来型に比べより多くの情報を正確に得ることが可能になった。

2.2　MPA レーダの特徴

従来型レーダは，1 対の送受信アンテナのため線計測となり，1 回の計測で得られる情報が限られていた。また，電波の指向性が低く拡散することから熟練した技術者による判定が求められたほか，鉄筋などがある場合はそれ以深の探査が難しいなどの課題があった。

MPA レーダでは，送信と受信エレメントを多極化したアレイアンテナを採用し，1 回の計測で複数測線データを得ることが可能となっている（図 - 5）。

また，1 つのエレメントから発信した電波を数極のエレメントで受信できるマルチパス方式の開発により，面的な調査が可能となったほか，鉄筋以深の情報を得られる等，鉄筋の影響を従来方式に比べて大きく低減することに成功した。さらに，一点のデータを多角的に収集することで，精度（S / N）の向上が図れ，傾斜した面（約 40 度）からの反射も捉えることも可能となり，内部損傷の形状や位置などより詳細な情報が得られるようになった（図 - 6）[1), 2)]。

以上のように，一度に多くの情報を多角的に取得することで，図 - 7 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。

また，従来の X 線による画像撮影等と異なり，計測結果が数分の解析で表示できるため，現場でのグラウト充填の検査を可能とするものである。

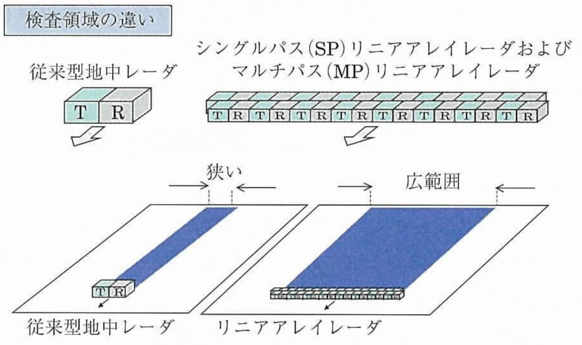


図 - 5　MPA レーダの特徴（1）

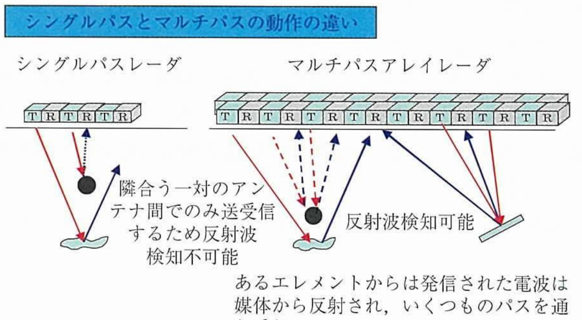


図 - 6　MPA レーダの特徴（2）

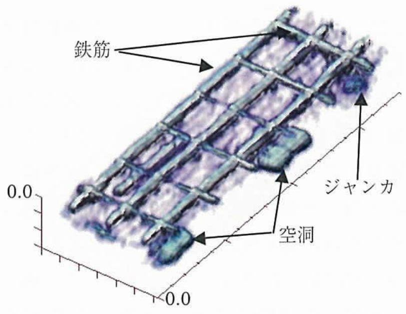


図 - 7　3 次元表示例

3.　使用機器と検査方法

3.1　使用機器

今回使用した MPA レーダの主な仕様を表 - 1 に示す。レーダアンテナ部は，最大周波数約 5 GHz 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る。

図 - 8 に使用機器の概観を示す。

表 - 1　レーダ装置仕様

	3 次元映像化装置：MPA レーダ
タ イ プ	5 GHz 版
素 子 数	32 素子（送受信　各 16 素子）
探 査 深 度	最大約 20 cm （コンクリート状況による）
計測ピッチ	約 1 cm
探　査　幅	約 50 cm ／回

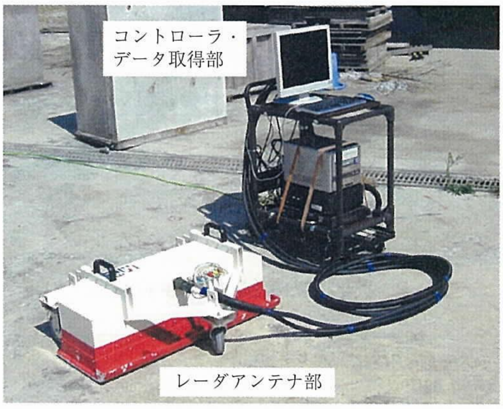


図 - 8　レーダ装置

3.2 検査方法

電磁波レーダ法を内ケーブルのグラウトの充填性検査に適用する。「電気的特性（比誘電率）の異なる物質の境界面で反射する」電磁波の特性を利用し，内ケーブルのグラウト充填不足により生じる「空隙」からの反射（シース管表面の反射＋シース管内グラウト面の反射）を捉え，グラウト充填不足箇所の特定，充填度合を把握することを試みた（図 - 9 参照）。

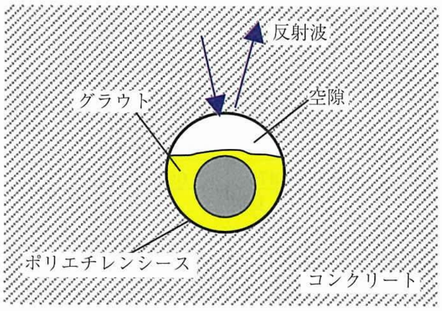


図 - 9　検査の原理

計測は，計測対象のシース管に対して MPA レーダを直角方向（実際の橋梁では橋軸直角方向）に走査させ，グラウト充填不足によるシース内の空隙からの反射を捉えることで，グラウト充填不足を判別する。

データは，幅方向約 2 cm の間隔でデータ取得が可能となるように配列された送受信各 16 素子のアレイアンテナを用い，計測方向約 1 cm ごとに取得する。

なお，本レーダ装置（最大発信周波数 5 GHz，FMCW 方式）による最大探査深度は，約 20 cm である。（ただし，コンクリートの状況による。）

MPA レーダを使用することで，これまで検知が難しかった鉄筋背後の情報，すなわち鉄筋以深に配置されている内ケーブルの空隙などが探査可能となる。

なお，電磁波には鉄・水などに吸収されやすく，その境界面で全反射し，それ以深の情報が得られない特性がある。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ファイバーが混入されている場合などは，本検査手法の適用範囲外である。

以上より，本検査手法を用いた内ケーブルのグラウト検査の適用対象は，ポリエチレン製シース管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。

なお，MPA レーダの基本的な原理は電磁波レーダ法であり，鉄筋の影響は無視できず，配筋ピッチによっては鉄筋面以深のデータ取得が困難になる。本検査装置で検査可能な鉄筋ピッチは，鉄筋の純間隔が 100 mm 以上である。

4. 供試体による計測実験

4.1 実験の目的と概要

今回対象とする電磁波レーダ法を用いた計測機器（マルチパスアレイレーダ）の計測精度および計測可能範囲の確認を目的に供試体による実験を行った。

実験は，計測対象として床版内に配置される主方向 PC 鋼材に限定し行うこととした。これまでの建設された PC 橋の実績より，使用 PC 鋼材として 12S15.2 mm，そして，PC 鋼材の配置はウェブ部分を除く床版部分でコンクリート表面から 200 mm が一般的な深さである。このことから，供試体として，コンクリート版厚を 350 mm とし，PC 鋼材 12S15.2 mm を上縁から 200 mm および 150 mm に配置する計画とした。また，鉄筋配置は，過密な部分において間隔が 125 mm であることから，供試体の間隔として 125 mm および 150 mm を採用した。このような条件のもと，シース内に充填されたグラウトの充填・未充填の判明が可能かどうか，さらに，未充填の場合に充填割合を判断できるかどうかを確認するため，供試体による計測実験を行った。

4.2 供試体

実験パラメータとして上側鉄筋配置間隔，グラウト充填率および配置位置とし，4 体の供試体を製作した。供試体のパラメータを表 - 2 に示す。図 - 10 に各供試体の形状，配置鉄筋，シース配置位置およびグラウト充填率を示す。

表 - 2　供試体パラメータ

	鉄筋間隔 (mm)	グラウト充填率 (%)	配置深さ (mm)
供試体 1	ctc 125	0 ～ 80	200
供試体 2		85 ～ 100	
供試体 3	ctc 150	0 ～ 90	150, 200
供試体 4	－	0 ～ 100	200

供試体 1 は，鉄筋 D16 を 125mm 間隔で縦横両方向に配置し，シース配置は上面より 200mm の深さがシース中心となるように設置した。シースは 4 本配置し，グラウト充填率をそれぞれ 0 %，50 %，75 %，80 %とした。供試体 2 は，グラウト充填率を 85 %，90 %，95 %，100 %とし，その他の条件は供試体 1 と同様とした。供試体 3 は，鉄筋配置および鋼材配置位置の影響の確認を目的に，鉄筋配置間隔を 150 mm とし，グラウト充填率を 0 %，50 %，90 %のシースを配置深さ 200 mm および 150 mm に設置した。供試体 4 は，鉄筋の影響の確認を目的に，無筋コンクリートに 0 %，50 %，70 %，80 %，90 %，100 %の 6 本のシースを配置深さ 200 mm に設置した。

シースは，ポリエチレン製 ϕ 93 mm のものを使用し，各シース内に PC より線 12S15.2 を挿入した。供試体に使用したコンクリートは，計測時の圧縮強度が 71.6 N/mm² であった。グラウトは，シース全長において均等な充填率を確保するため表 - 3 に示す配合の超低粘性型のものを採用した。計測時の圧縮強度は 63.9 N/mm² であった。

表 - 3　グラウト配合

水セメント比 (%)	混和剤添加率 (%)	単位量 (kg / m³)		
		水	セメント	混和剤
40	20	557	1 392	27.8

（注）・使用セメント；早強ポルトランドセメント
・使用混和剤；超低粘性型

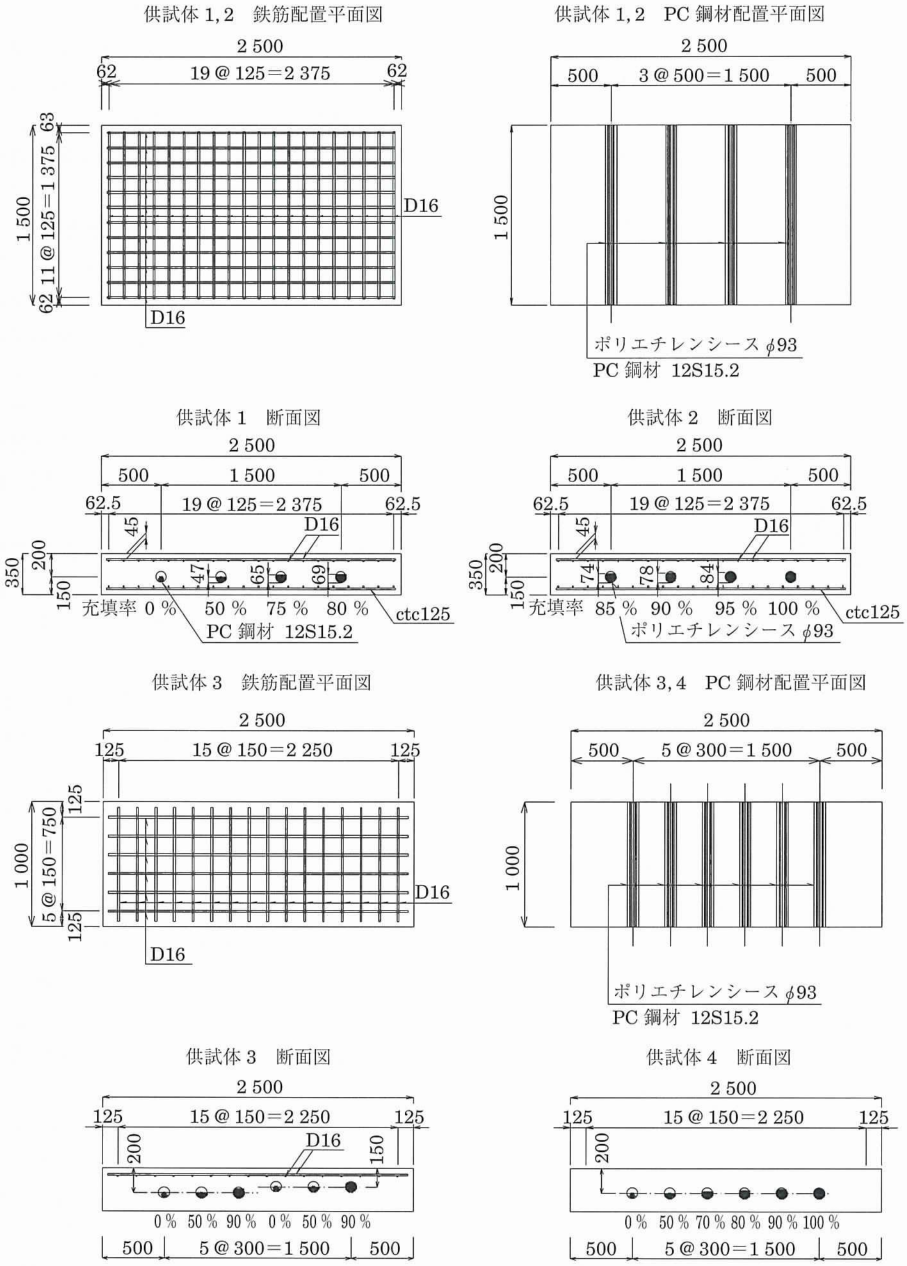


図 - 10　供試体形状およびグラウト充填状況

供試体の製作は，まず PC 鋼材を挿入したシースを水平にセットし，所定の充填率となるようシース上部に切り欠きを 3 箇所設け，グラウトがシース全長にわたって平坦となるように振動を与えながらグラウト注入を行った。グラウト硬化後，所定の位置に設置し，コンクリートを打設した。

4.3 計 測 結 果

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 - 11 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，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。

（1）グラウト充填率の影響

グラウト充填率を変化させた供試体 1・2 を用いて，充填率の違いによる影響を確認し，検査限界を把握すること

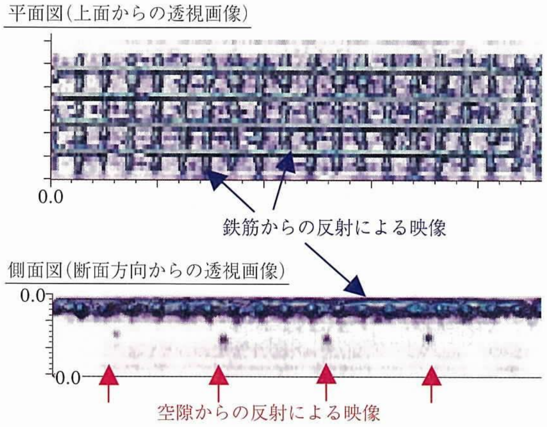
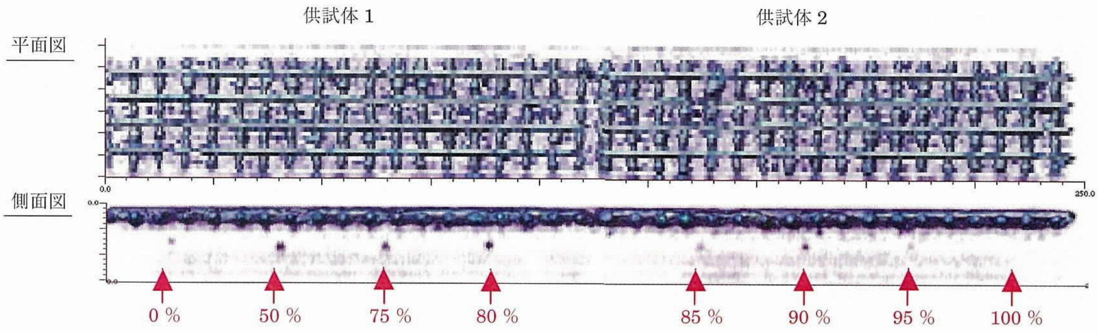


図 - 11　計測結果例



※ 供試体 1・供試体 2 を連続計測

図 - 12　グラウト充填率の影響確認（供試体 1 ・ 2）

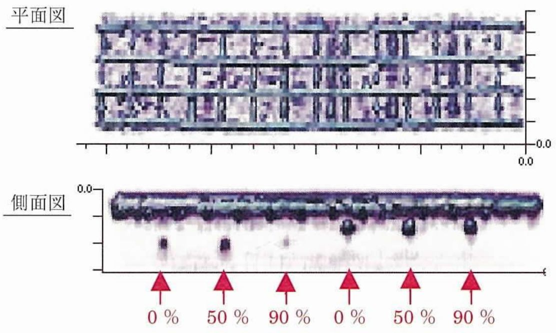


図 - 13　ケーブル配置深さ影響確認（供試体 3）

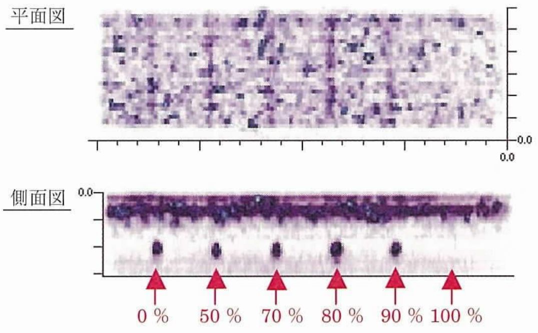


図 - 14　鉄筋影響確認（供試体 4）

を試みた。計測結果を図 - 12 に示す。

（2）ケーブル配置深さの影響

グラウト充填率 0 %，50 %，90 %のシースを深さ 200 mm および 150 mm に設置した供試体 3 を用いて，ケーブル配置位置の影響を確認することとした。その計測結果を図 - 13 に示す。

（3）鉄筋の影響

供試体 1 ・ 2（鉄筋間隔 125 mm），供試体 3（間隔 150 mm），供試体 4（無筋）の計測結果を比較し，鉄筋の有無および間隔の影響を確認することとした。いずれも，設置深さ 200 mm のケーブルを対象とする。計測結果を図 - 14 に示す。

4.4 考　　察

（1）グラウト充填率の影響

計測の結果，充填率 0 %～ 95 %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 95 %については，反射レベルが弱く，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。

なお，もっとも空隙の割合が大きい充填率 0 %のケーブルからの反射が弱くなっているが，これは，シース内にグラウトの水平面が存在しないことから，ケーブル曲面からの反射が支配的で反射波が捉え難く，他のケーブルに比べ反射が低下していることが考えられる。

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。

ケーブル内鋼線の反射については，充填率 100 %のケーブルで内部からの反射は確認できないことから，シース内の鋼線からの反射は，ほとんど無い，あるいは，無視できるレベルであることがわかる。

（2）ケーブル配置深さの影響

シース設置深さの違いによって，その影響が顕著に表れている。設置深さが浅い程，画像から充填不足箇所の特定は容易になる一方で，充填率による差がほとんど無くなる傾向にある。

（3）鉄筋の影響

供試体 1，供試体 3 の充填率 0 %ケーブルの計測結果では，鉄筋の影響が顕著に現れていることが確認できる。これは，鉄筋間隔が広くなったことで，ケーブル曲面からの反射を捉える割合が向上したことによるものと考えられる。他の充填率のケーブルも同様で，鉄筋間隔を大きくすることで，より多くの反射を捉えることができ，空隙の画像が明確となる傾向にある。この傾向は，供試体 4（無筋）の計測結果からも明らかに確認できる。

ここで，供試体 4（無筋）の充填率 100 %ケーブルからの反射もみられないことから，前述と同様に鋼線からの反射は，ほとんど無い，あるいは，無視できるレベルであることがいえる。

（4）充填率 0 %の反射低下の一要因

MPA レーダによる計測では，電磁波の特性を利用し，内ケーブルのグラウト充填不足により生じる「空隙」からの反射（シース表面の反射＋シース内グラウト面の反射）を捉えることで，グラウト充填不足箇所の特定，充填度合を確認している。

よって，計測データはその反射面積により，充填率の違いが差となって映像化される。図 - 15 にグラウトの充填率

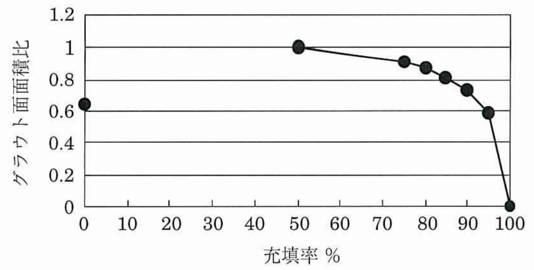


図 - 15　グラウト面の面積と充填率の関係

と空隙によって生じるグラウト上面の面積比（充填率 50 % を 1 とした場合）の関係を示す。ここで，グラウトの充填されていない充填率 0 % については，装置の性能から，シース表面における傾斜 40 度の接線範囲内からの反射のみを捉えるものと想定した。

この結果，充填率 0 % は充填率 90 % ～ 95 % の反射面積に相当することがわかる。よって，反射面積に着目した場合，映像化される反射の度合いは，90 ～ 95 % に近い状態になると考えられる。

本検討結果は，反射面積のみに注目した場合であり，コンクリート材齢・鉄筋の影響・設置深さ等から生じる反射強度の差によっても結果は変わってくる。しかしながら，空隙比率のもっとも大きい充填率 0 % の反射が低下する要因の一つに，反射面積の差が少なからず影響していることが推測できる。

5.　実構造物の計測

5.1　対象構造物とケーブル配置

内ケーブルのグラウトの充填性検査は，第二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 径間連続ラーメン橋であり，内外ケーブルを併用している。表 - 4 に朝比奈川橋の橋梁概要を示す。

表 - 4　朝比奈川橋の橋梁概要

橋　長	655.000 m	桁　長	654.600 m
道路規格	第 1 種 1 級 A 規格	荷　重	B 活荷重
有効幅員	16.500 m	斜　角	90° 00′ 00″
形　式	PC 7 径間連続ラーメン橋		
支　間	88.5 ＋ 150.0 ＋ 88.0 ＋ 76.5 ＋ 90.0 ＋ 90.0 ＋ 70.0 m		

充填性検査は P 1 橋脚ケーブル No.13011 ～ 13081（床版内ケーブル）を対象とし，検査位置は P 1 橋脚 12 BL（P 2 側）とした（図 - 16 参照）。充填検査は 2 回行い，平成 15 年 9 月 10 日にグラウト充填後の検査を，同年 9 月 16 日にはグラウトの充填中の検査を行った[3)]。図 - 17 および図 - 18 に充填検査位置を，表 - 5 に対象ケーブルの一覧を示す。

朝比奈川橋で実施した，MPA レーダ法によるグラウトの充填性検査状況を図 - 19 に示す。

5.2　充填性検査結果

(1)　充填後の検査結果

グラウト充填後の検査の計測結果を図 - 20 および図 - 21 に示す。結果ではグラウト充填前は空隙があるため電磁波の反射が大きな影として画像で表示されるが，充填後グラ

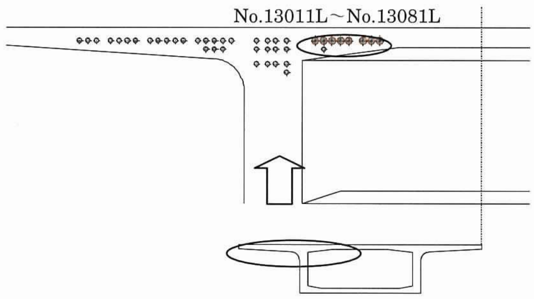


図 - 17　MPA レーダ検査位置図
（ケーブル no.13011L ～ no.13081L）

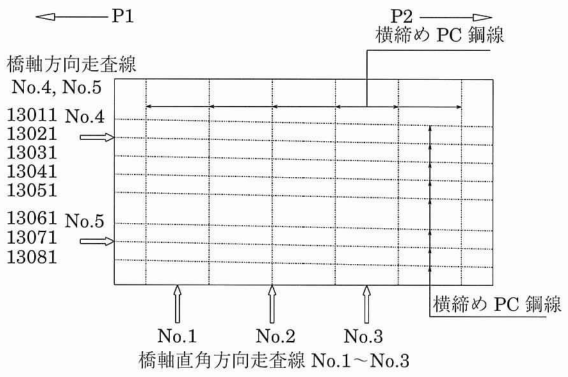


図 - 18　走査線位置図

表 - 5　検査対象ケーブル一覧

探査位置	対象ケーブル	探査日時
P 1 橋脚 12 BL	ケーブル No.13011 L	平成 15 年 9 月 10 日（水）
P 1 橋脚 12 BL	ケーブル No.13011 L ～ 13081 L（13061 L）	平成 15 年 9 月 16 日（火）

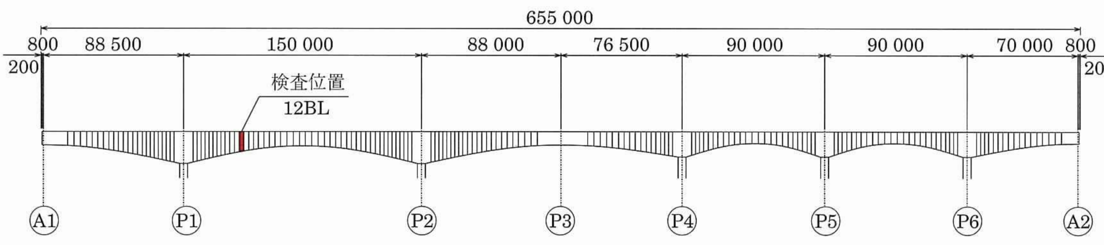
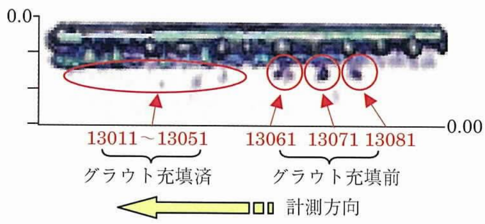
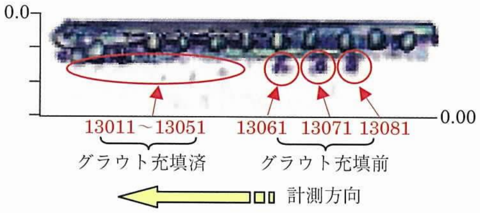


図 - 16　充填検査位置図

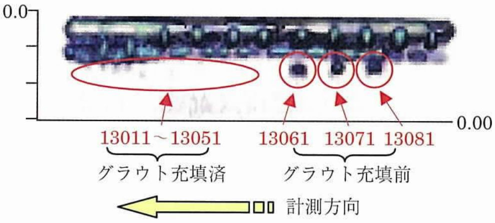
図 - 19　朝比奈川橋での探査状況



(a)　走査線 No.1

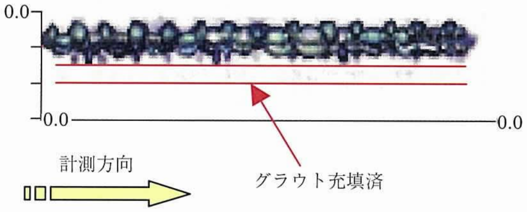


(b)　走査線 No.2

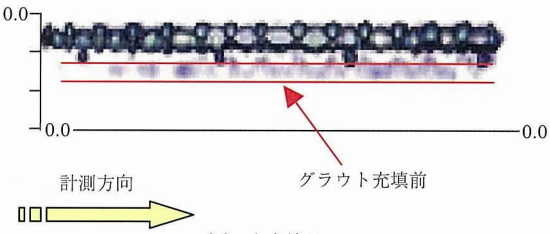


(c)　走査線 No.3

図 - 20　ケーブル横断方向の検査結果



(a)　走査線 No.4



(b)　走査線 No.5

図 - 21　ケーブル方向の検査結果

ウトが硬化したケーブルには空隙がなく，反射が小さくなり画像表示は小さく（淡く）表示され，充填されていることが確認できる。

また，ケーブル方向に計測を行った場合も同様な結果ではあるが，ケーブル横断方向の結果に比較して画像の鮮明度は低い状態であった。

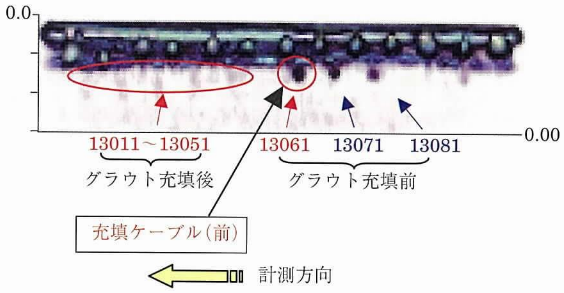
ケーブル方向の検査結果とケーブル横断方向の検査結果を比較した場合，明らかにケーブル横断方向の検査結果の方が判定しやすいことから，充填の判定はケーブル横断方向での検査が適していると考えられる。

（2）充填作業中の検査結果

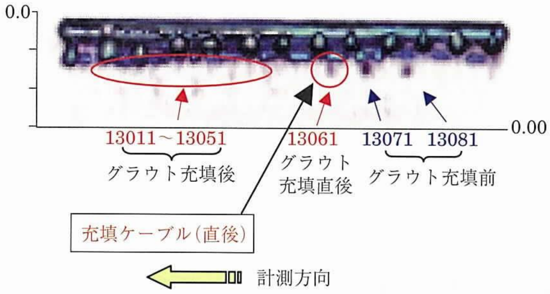
グラウト充填作業中の検査結果を図 - 22 に示す。

検査はグラウト注入作業を前後して行った。そのため注入されたグラウトは未硬化であり，硬化したものに比べ薄い表示となった。

グラウト硬化後の検査結果に比べ，若干あいまいな部分はあるが，これらの結果から，グラウト作業中の判定も可能であると判断できる。



(a)　グラウト注入前



(b)　グラウト注入後

図 - 22　グラウト充填作業時の検査結果

6. まとめ

表 - 6 に，MPA レーダによるグラウトの充填性検査の結果総括表を示す。

これまでの検査試験の結果から，レーダの特性・性能による課題（0 %の反射低下・鉄筋影響・充填率の定量的な把握困難）は残るものの，0 ～ 90 %程度までの充填率であれば，その空隙の存在を確認できることがわかった。さらに実際の橋梁における検査データを蓄積することで，その確度向上を目指す。

また，今後の課題として精度の向上があげられる。検査データの蓄積とあわせ，グラウトの充填性検査に特化した

表 - 6　グラウト検査試験結果まとめ

項　目	結果	備　考
検知可能充填率	0 % ～ 90 %	・充填率 90 % を超えると，反射データが不安定で，明確に確認できない可能性がある ・ 0 % の反射が弱い
充填率の定量的な把握	困難	・現状では，充填率を定量的に特定できるまでの結果は得られていない
鉄筋の影響	有	・鉄筋の有無で反射レベルが変わるものの未充填／充填の違いは確認可能
シース設置深さの影響	有	・設置深さによって反射レベルの違いはあるものの，未充填／充填の違いは確認可能
グラウト未硬化の影響	有	・硬化前のためグラウト内の水分に反応し，100 % 充填であっても微弱な反射を捉える

装置仕様の最適化，さらには他の検査手法との融合等，多角的・総合的な視点からの検討が望まれる。

最後に，本検査手法の検討にあたり，ご尽力いただいた関係者の方々に心より感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

1）小原，木村，江澤，森島，土井，森：コンクリート床版検査用 3 次元映像化レーダの開発，(社)電子情報通信学会技報（TECHNICAL REPORT OF IEICE）
2）小原治之：マルチパスアレイレーダ探査システム，検査技術，Vol.9，No.12，2004 年 12 月
3）原幹夫，本間純史，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，プレストレスコンクリート第 13 回シンポジウム論文集

【2005 年 3 月 14 日受付】

刊行物案内

プレストレストコンクリート技士試験講習会資料

平成16年度 PC 技士試験講習会

資料のほか，過去 3 年間の試験問題，正解及び解説が掲載されています。

（平成 16 年 6 月）

頒布価格 ： 3 500 円（送料を含む）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会