

# 論文 超音波パルスエコー法を用いたグラウト充填度調査の検討

小椋 紀彦\*1, サグラジャン アルトゥル\*2, 塩谷 智基\*3, 福田 泰樹\*4

**要旨**：PC グラウトの充填状態を評価する手法として、X 線透過法やインパクトエコー法などの非破壊的な調査手法が用いられている。しかしながら、調査手法や解析に高い専門性が必要であり、今後見込まれる多数の PC 橋の維持管理には人材不足の点から問題がある。そのため、より容易で効率的な調査手法が求められている。本研究では、現地で瞬時にトモグラフィ解析が実施できるドライコンタクトセンサアレイを搭載した超音波パルスエコー装置でのグラウト充填度調査の適用方法を検討した。実験結果から、シース位置／版厚での反射強度を比率で評価する手法を用いれば、精度良くグラウト充填度評価ができることが分かった。

**キーワード**：グラウト充填調査, 超音波パルスエコー法, 超音波トモグラフィ, 非破壊評価, PC 橋

## 1. はじめに

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート (PC と略す) 橋では、シース内部にグラウト未充填部分がある場合、雨水や凍結防止剤などの塩分を含んだ水が浸入し、PC 鋼材が腐食することで最終的には破断に至ることがある。PC 鋼材の破断は、コンクリート片の落下や重大な第三者災害の原因となるだけでなく、耐荷性能の低下にもつながる。したがって、予防保全に基づく適切な維持管理を行う上で、グラウトの充填確認は非常に重要であり、シース内のグラウト充填状態を正確に評価することは喫緊の課題となっている。

このような背景から、PC グラウトの充填状態を評価する手法として、従来から X 線透過法や広帯域超音波法、インパクトエコー法などの非破壊的な手法が用いられている<sup>1)~6)</sup>。X 線透過法は高い精度でグラウト充填度を評価できるが、管理区域の設定や対象物の部材厚さの影響を受けるため、適用範囲が限定される。広帯域超音波法やインパクトエコー法も、適用範囲は限定されるものの、限られた条件下ではグラウト充填状況を精度良く検出できる。しかしながら、調査手法や解析に高い専門性が必要であり、今後見込まれる多数の PC 橋の維持管理には人材不足の点から問題がある。そのため、より容易で効率的な調査手法が求められている。本研究では、現地で瞬時にトモグラフィ解析が実施できるドライコンタクトセンサアレイを搭載した超音波パルスエコー装置でのグラウト充填度調査の適用方法を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験装置概要

本研究で用いた超音波トモグラフィ装置を、**図-1**に示す。装置底面に24個 (3行×8列) のドライコンタクトセン



図-1 超音波トモグラフィ装置

サアレイを備えており、このアレイセンサから発信された超音波の横波を利用して、鉄筋や空洞、ひび割れ、躯体端面等の音響インピーダンスの異なる面での反射を捉え、検知した反射波の時間と横波伝搬速度から付属の解析ソフトによって、瞬時に二次元・三次元トモグラフィ画像として、試験装置の画面に表示されるものである。

具体的には、1列目に配置された3個のセンサから同時に超音波横波を発信させ、残りの2~8列目までの全てのセンサで受信を行う。同様に、次は2列目のセンサが発信センサとなり、残り全てが受信センサとなる (**図-2**)。これらの動作が順次8列目まで繰り返され、取得したデータを、超音波イメージング法として広く認知されている、Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFTと略す) のアルゴリズムを用いて、一般にBスキャンと呼ばれる二次元の等高線プロットとして画像表示される。音響インピ

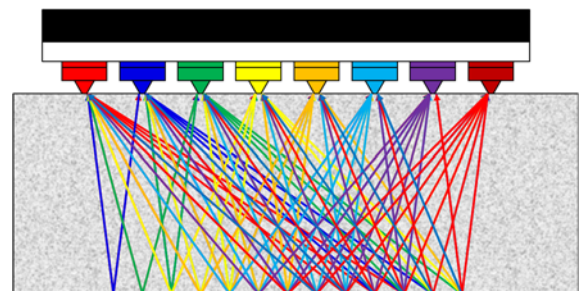


図-2 超音波の送受信経路

\*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 インフラ先端技術産学共同講座 特定助教 (正会員)

\*2 (株) CORE 技術研究所 東京支店 技術部 工博

\*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 インフラ先端技術産学共同講座 特定教授 (正会員)

\*4 西日本高速道路 (株) 技術本部 技術環境部 構造技術課

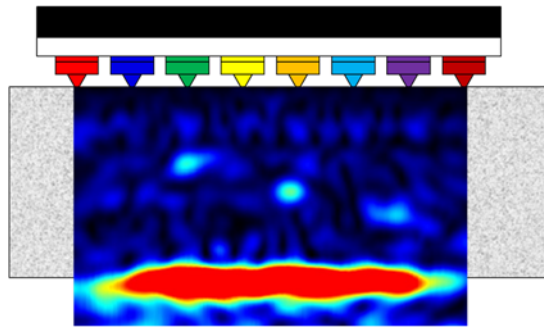


図-3 Bスキャンの結果事例

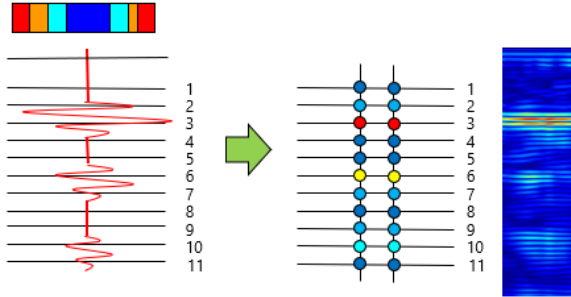


図-4 反射強度と色識別との関係

ーダンスが異なる鉄筋や空洞、ひび割れ等が存在する場合、Bスキャン上のコンター図には反射強度が強い箇所として暖色系の色識別で表される(図-3, 4)。なお、本装置の超音波の使用周波数帯域は20~80kHzの範囲であり、せん断波トランスデューサを使用している。測定分解については0.1  $\mu$ sである。

## 2.2 供試体概要

本研究では、PC桁を模擬した800×1500×400mmの同形状の供試体を2体作製して検討を行った。供試体の側面図、および断面図を図-5に示す。PCシースには、外径 $\phi$ 68mmと $\phi$ 41mmの鋼製スパイラルシースを使用した。これらシース径の異なるPCシース2本を、片側端面の中央に縦に配置し、対面側の端面では高さは一定のまま最小かぶりが50mmとなる位置で斜めに配置した。このことで、両側面でシースまでのかぶりが変化する形状とした。 $\phi$ 68mmのPCシースでは、かぶりが50~282mmまで変化し、 $\phi$ 41mmのPCシースでは、かぶりが64~296mmまで変化することになる。なお、供試体の製作に用いたコンクリートは呼び強度27(試験値35 N/mm<sup>2</sup>)とし、供試体は無筋で作製を行った。

## 2.3 実験方法

計測は図-5の側面図に示す通り、各シース直上で片側面4箇所、両側面で計8箇所の位置にて超音波トモグラフィ装置を接触させ、Aスキャン(深さ方向の振幅値の波形データ)とBスキャンの結果を取得した。実験方法としては、シース内に鋼材を配置した場合と配置しなかった場合の2つの状態に対し、グラウト充填の有無の影響を検討した。表-1に、各供試体の実験内容を示す。供試体No.2については、グラウト未充填での計測を実施後、シース内に鋼材を挿入しグラウト材を充填した(供試体No.2'と表中で記す)。

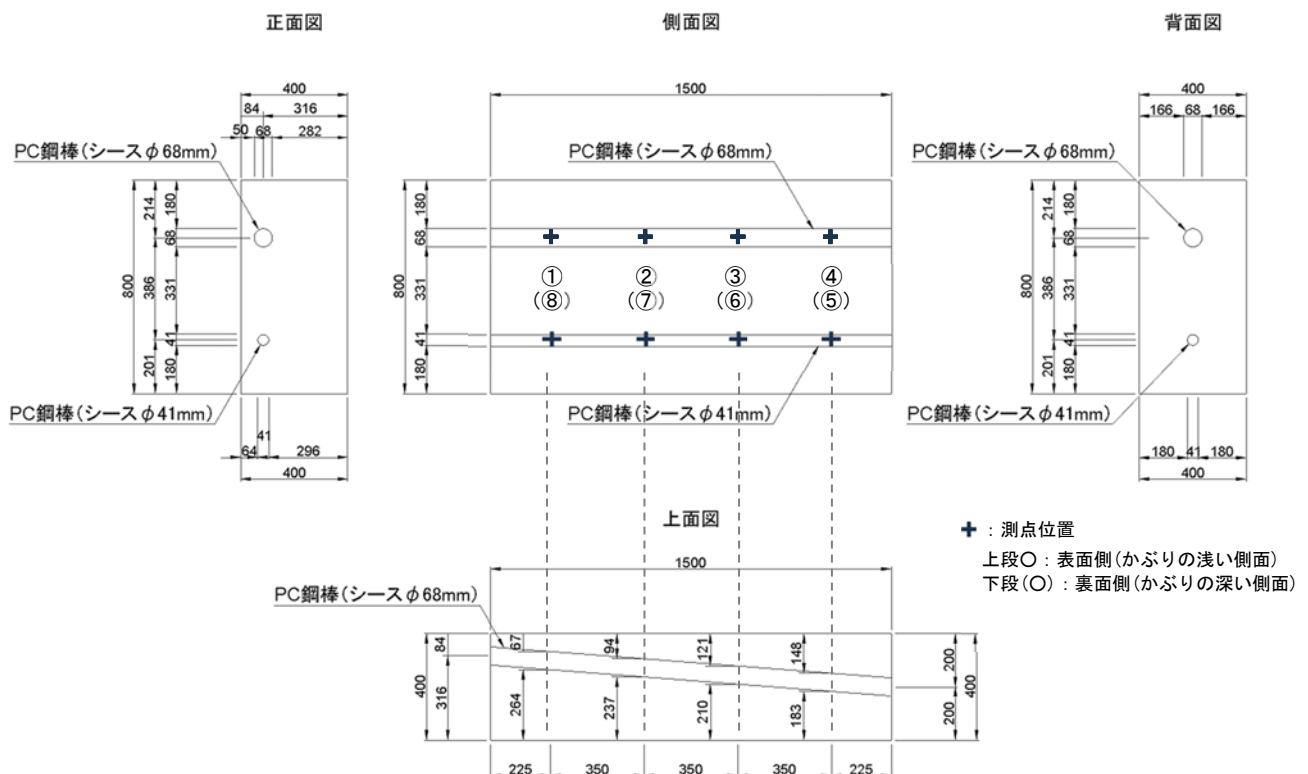


図-5 供試体概要図

表-1 実験内容一覧

供試体 No.	シース径 (mm)	シースかぶり (mm)	グラウト 充填度	備考
1	68	50~282	充填	
	41	64~296	充填	
2	68	50~282	未充填	鋼材無し
	41	64~296	未充填	鋼材無し
2'	68	50~282	充填	鋼材有り
	41	64~296	充填	鋼材有り

### 3. 実験結果

#### 3.1 シース内に鋼材を配置していない状態でのグラウト 充填の有無の検討

実験条件として、使用する超音波装置の設定は、送信周波数は40kHz、送信電圧100Vとした機器の初期値で行った。始めに本供試体のコンクリートの超音波横波伝搬速度を計測するため、シースの影響が生じない供試体の中央付近で計測を行った。供試体No.1の超音波横波伝搬速度は2500m/s、No.2においても同様で2500m/sであった。これらを初期条件として設定し、側面の表面側の各シースの直上で4箇所ずつ、同様に裏面側も4箇所ずつ計測を行った。超音波トモグラフィ装置で出力された結果を、ここでは各シースで3箇所ずつ抽出し結果を図-6に示す。

解析結果より、シース内が未充填の場合、φ68mmおよびφ41mmともシース位置付近で、他の場所よりもコントラストの色識別が暖色系になっており、反射強度が強いことが確認できる。シース径で比較すると、シース径が大きいφ68mmの方が、かぶりが深くなっても反射強度が強

い傾向にある。このことから、空洞容積が大きいほど反射強度が強くなるのが分かる。一方、未充填のφ41mmでは、かぶりが深くなるほど暖色系の色識別が薄くなっていることから、かぶりが深くなれば反射強度は低下すると言える。

一方、シース内がグラウトで充填された場合、シース位置付近で、色識別からも他より反射強度が強い箇所が殆ど認められていない。つまり、シース内をグラウトで充填されたPCシースは、埋設されたコンクリート内では、材料としては音響インピーダンスの違いはあると考えられるものの、シース自体の厚さが非常に薄いため反射源にはならないことを示唆している。

なお、未充填および充填に関わらず、供試体の版厚に相当する位置からも、強い反射が得られているのが確認できる。

#### 3.2 シース内に鋼材を配置した状態でのグラウト 充填の有無の検討

次に実構造物を想定し、シース内に鋼材を配置した状態で計測を行った。今回の実験では、緊張力の影響は考慮しないため、PC鋼材の代わりに、SD390の異形鉄筋を挿入することとし、φ68mmのシース内にはD51を、φ41mmのシース内にはD32の鉄筋を用いることとした。超音波トモグラフィ装置で出力された結果を、3.1と同様に、各シースで3箇所ずつ抽出し結果を図-7に示す。上段の図は、シース内に鋼材のみを配置した状態での計測結果であり、下段の図はシース内に鋼材を配置後、グラウトをシース内に完全充填した状態の計測結果である。

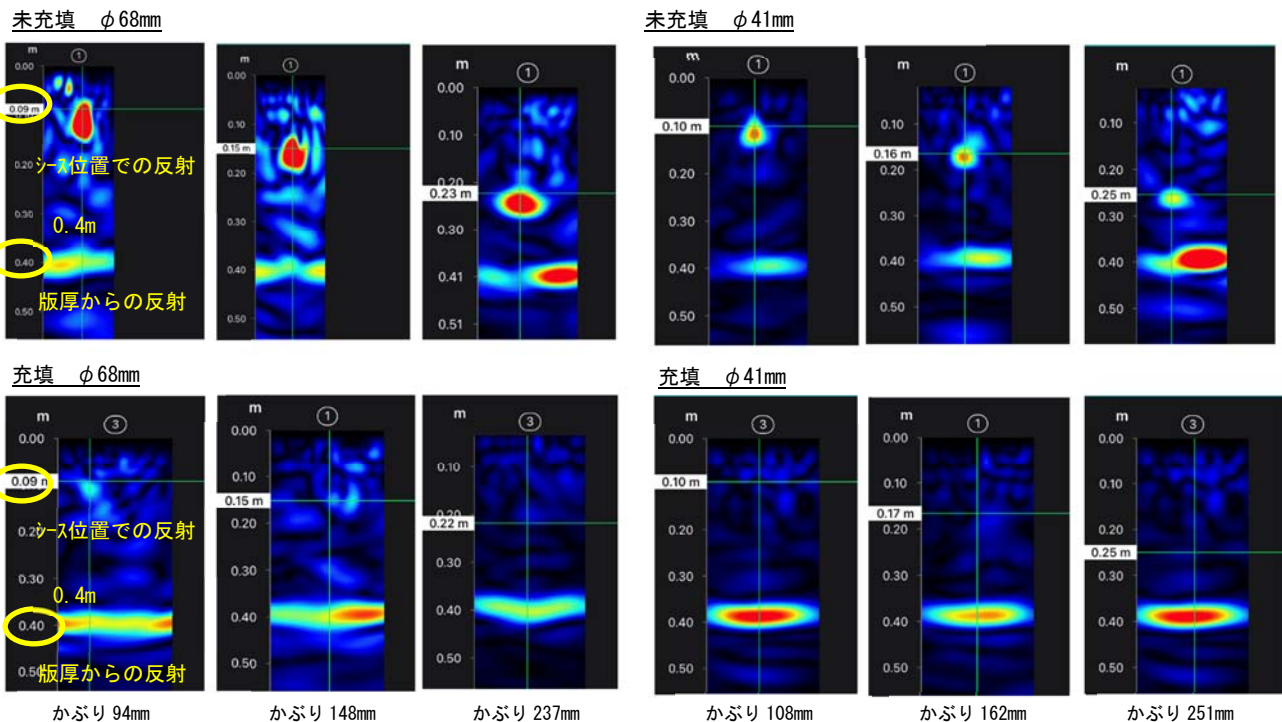
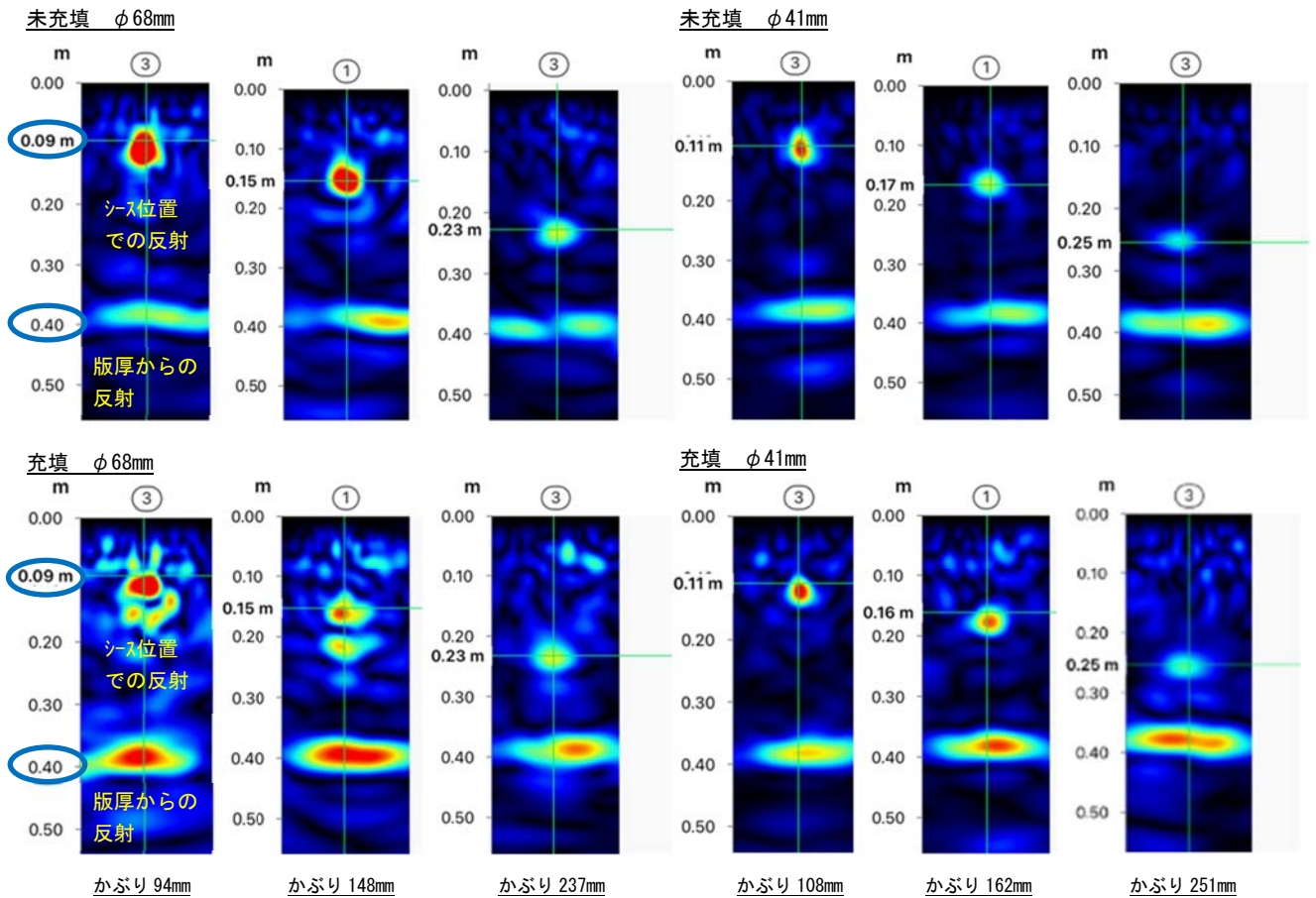


図-6 シース内に鋼材が挿入されていない状態でのグラウト 充填の有無の結果



図ー7 シース内に鋼材が挿入された状態でのグラウト充填の有無の結果

上段の未充填の結果では、φ68mmおよびφ41mmともシース位置付近で、他の場所よりもコンター図の色識別が暖色系になっており、反射強度が強いことが確認できる。この結果図を、図ー6の上段の結果と比較しても、概ね同様の色識別となっており、未充填の場合、シース内に鋼材が挿入されてるかどうかの有無については、影響を及ぼさないと考えられる。

$$R = \frac{(Z_2^2 - Z_1^2)^2}{(Z_2^2 + Z_1^2)^2} \quad (1)$$

R: 反射エネルギー (%) ,  $Z_1$ : コンクリートの音響インピーダンス [ $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ] ,  $Z_2$ : 他材料の音響インピーダンス [ $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ]

ここで上記 (1) 式は、反射エネルギーと音響インピーダンスとの関係式である。一般的な値としてコンクリートの音響インピーダンス  $Z_1$  に  $9.6 [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \times 10^6]$  , 空気の音響インピーダンス  $Z_2$  を  $0.000426 [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \times 10^6]$  として代入すれば、反射エネルギー R は 99% となる。コンクリートと空気の境界があれば全反射することからも、今回の結果は理論的にも合致する。

続いて下段の充填後の結果では、上段の結果と同様にφ68mmおよびφ41mmともシース位置付近で、コンター図の色識別が暖色系になっており、強い反射強度が認めら

れる。シース内に鋼材がある状態、かつグラウトが完全充填された状態では、グラウトと鋼材が一体化されシース内の鋼材から反射が生じていると考えられる。先程の上記 (1) 式に、鋼材の音響インピーダンス  $Z_2$  を  $46.5 [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \times 10^6]$  として代入すると、反射エネルギー R は 43% となる。つまり、コンクリートと鋼材の境界では、空気の場合と比較して半分程度の反射が生じることになり、この反射を検出していることになる。そのため、シース内に鋼材が配置されグラウトが充填されている通常の現場を想定した場合、Bスキャンの結果だけで充填度を評価することは、誤判定を伴う恐れがある。

#### 4. 考察および新たな提案

超音波パルスエコー装置を用いたグラウト充填度調査方法としては、検知した反射波の時間と横波伝搬速度から、解析ソフトによって瞬時に得られるBスキャンの二次元トモグラフィ画像から、色識別のみで反射強度を比較して評価することを想定していた。理論的には (1) 式に示す通り、反射エネルギーは、コンクリート/空気と、コンクリート/鋼材とを比較すると音響インピーダンスの差が半分程度は異なるため、コンクリート/空気の方が、より明瞭にBスキャンの結果に表れると考えら

れるためである。しかしながら、実験結果からBスキャンにおけるシース位置での反射強度、つまり反射弾性波の振幅が大きいことのみでグラウト充填不良の指標とすることは困難であることが明らかとなった。この要因としては、反射弾性波の振幅でコンター図を作成する場合は、最大の振幅値に応じて装置内でゲインが設定され色識別が定まることから、定量的な数値で色区分ができないことが考えられる。

そこで新たな試みとして、版厚からの反射強度を基準とし、シース位置での反射強度とを比率で評価するグラウト充填度の評価方法を考案し検討を行った。

具体的には、図-7の結果に示した充填の場合、版厚からの反射強度とシース位置での反射強度が同程度の暖色系の色識別になっているのに対し、未充填の場合では、シース位置での反射強度が寒色系の色識別になっており、反射強度が低下していることが確認できる。つまり、充填の状況では、シース位置での反射と版厚からの反射強度が同程度に変化していることを示唆している。

図-8に、シース径φ68mmの測点②(かぶり94mm)位置でのグラウト未充填、充填のAスキャンとBスキャンの結果を示す。Aスキャンの結果は、Bスキャン結果の図中に示した鉛直方向の波線位置での表層からの距離と振幅値の関係を示している。

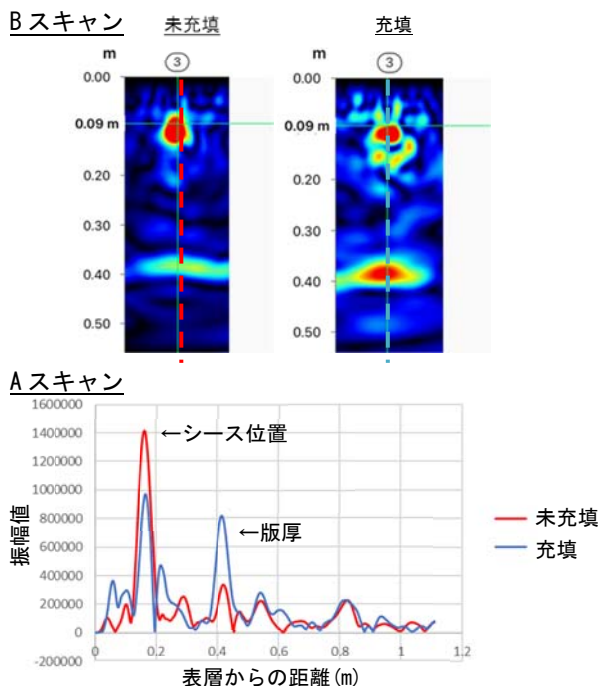


図-8 φ68mm 測点②A, B スキャンデータ

この図から、未充填の時はシース位置で、最も卓越したピークが一つ認められるのに際し、充填時では、シース位置および版厚の位置で同程度の卓越した振幅値が認められるのが分かる。このことから、コンター図の色識

別では、未充填でも充填でも同程度の暖色系の反射強度との色識別ではあったものの、Aスキャンデータから卓越した反射強度のピーク値の特徴を数値で比較できれば、グラウト充填度が適切に評価できる可能性が示唆された。

シース内に鋼材が挿入された状態でのグラウト充填前後でのデータに対し、版厚からの反射強度とシース位置の反射強度とを比率で示した結果を、表-2に示す。

シース位置/版厚での反射強度を、仮に1.5とした場合、この値を超えたものが未充填(充填不良)と評価され、下回ったものが充填と評価できる。

φ68mmの場合、かぶりの異なる8箇所に対して、未充填であるものを8/8箇所未充填、充填後では6/8箇所を充填と評価できた。一方、φ41mmの場合では、未充填のものを3/8箇所未充填、充填後では7/8箇所を充填と評価できた。この結果から、シース径が小さくなるほど、かぶりが深くなるほど、充填度評価の精度が低下する傾向が認められる。

今回の結果をもとに、超音波パルスエコー装置でのグラウト充填度調査の適用範囲を整理すると、φ68mm程度の鋼製シースであれば、かぶり250mm程度、φ41mm程度であれば、かぶり130mm程度までの範囲であれば精度良くグラウト充填度評価が実施できると考えられる。

今後はさらに超音波トモグラフィ装置で取得できるデータを整理し、別のパラメータでのグラウト評価を具備し、マルチパラメータでの評価を検討していくことを予定している。そのため、今後は実橋でのデータを蓄積し検討を継続していきたいと考えている。

## 5. まとめ

- (1) 本研究では、現地で瞬時にトモグラフィ解析が実施できるドライコンタクトセンサアレイを搭載した超音波パルスエコー装置でのグラウト充填度調査の適用方法を検討した。
- (2) シース内に鋼材が配置されグラウトが充填されている通常の現場を想定した場合、Bスキャンの結果だけで充填度を評価することは、誤判定を伴う恐れがある。
- (3) シース位置/版厚での反射強度を比率で評価する手法を用いれば、φ68mm程度の鋼製シースであれば、かぶり250mm程度、φ41mm程度であれば、かぶり130mm程度までの範囲であれば精度良くグラウト充填度評価が実施できると考えられる。
- (4) 今後はさらに超音波トモグラフィ装置で取得できるデータを整理し、別のパラメータでのグラウト評価を具備し、マルチパラメータでの評価を検討していく、実橋での実績を今後蓄積することを予定している。

表-2 シース内に鋼材が挿入された状態でのグラウト充填前後の振幅値およびシース位置/版厚の比率結果一覧

シース径	面	測点	かぶり (mm)	振幅値				比率(シース/版厚)	
				充填前(シース+鉄筋)		充填後(鉄筋有り)		充填前	充填後
				シース位置)	版厚	シース位置	版厚		
φ 68	表面	①	67	1,448,271	536,099	653,968	732,243	2.7	0.9
		②	94	1,769,156	549,975	1,370,673	861,240	3.2	1.6
		③	121	1,413,770	334,971	975,483	813,589	4.2	1.2
		④	148	1,187,745	483,601	844,157	864,540	2.5	1.0
	裏面	⑤	183	934,798	339,065	797,578	439,442	2.8	1.8
		⑥	210	559,574	253,358	601,197	798,530	2.2	0.8
		⑦	237	619,216	354,612	600,019	598,793	1.7	1.0
		⑧	264	753,828	388,248	365,627	439,442	1.9	0.8
φ 41	表面	①	81	1,195,034	786,713	1,186,122	858,166	1.5	1.4
		②	108	962,403	532,888	957,447	660,646	1.8	1.4
		③	135	1,244,126	744,331	1,328,802	789,407	1.7	1.7
		④	162	651,737	488,881	777,555	765,113	1.3	1.0
	裏面	⑤	197	734,390	760,850	878,857	725,113	1.0	1.2
		⑥	224	581,628	729,195	657,687	809,909	0.8	0.8
		⑦	251	425,399	543,425	495,120	753,993	0.8	0.7
		⑧	278	417,947	879,764	423,407	507,270	0.5	0.8

※比率 1.5 以上の数値を灰色で示す

#### 謝辞

本研究は、西日本高速道路株式会社と京都大学インフラ先端技術産学共同講座との共同研究の一部の成果である。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- エルガマル アハマド, 服部晋一, 寺澤広基, 鎌田敏郎: 実構造物の PC グラウト充填評価への適用へ向けた電磁場応答法の精度向上に関する基礎的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 21 巻, pp.219-224, 2021.
- 松井 俊吾, 鈴木 真, 梶野 学, 中村 浩, 宮川 豊章: 広帯域超音波法によるグラウト充填不良検出に関する調査報告, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 21 巻, pp.225-230, 2021.

- 鎌田敏郎, 内田慎哉, 服部晋一: 非破壊検査を用いた PC グラウトの充填度の評価, プレストレスコンクリート, Vol. 56, No. 6, pp. 16-19, 2014.
- 桃木昌平, 塩谷智基, 小林義和: 弾性波トモグラフィ法による PC 構造物の健全性評価に関する研究, 第 23 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, pp. 461-466, 2014.
- 永井勇輔, 山田雅彦, 大津政康: SIBIE 法の PC グラウト未充填評価のための現場仕様入出力装置の改良と適用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 14 巻, pp. 729-736, 2014.
- N.Ogura, H.Nishi, H.Manabe and T.H.Ahn, "Various non-destructive tests for infrastructures in JAPAN", Journal of Ceramic Processing Research. Vol.16, Special.1, pp.132-137 (2015).