

## PCグラウト未充填部検出のための弾性波法初動部における考察

首都大学東京大学院	博士 (工学)	○大野 健太郎
首都大学東京大学院		西村 桂一
首都大学東京大学院	博士 (工学)	上野 敦
首都大学東京大学院	正会員 博士 (工学)	宇治 公隆

Abstract : Improper condition on filling of grout in tendon duct induces readily loss of the cross-section area in tendon due to corrosion and then leads to failure of the PC member. Therefore, it is important to detect improper grouting part by applying nondestructive evaluation techniques. In this study, a fundamental study was conducted to evaluate un-grouted tendon duct in PC model specimens by using impact elastic wave method in a laboratory. Prior to the experiment, numerical analysis of the elastic wave velocity tomography (EVT) method was applied in order to consider the applicability of the EVT method. After that, impact elastic wave method was conducted to specimens which have different filling state of tendon duct by grouting material. As a result, amplitude of the first motion in elastic wave is influenced by un-grouted space in the tendon duct. In addition, it is found that the amplitude tomography by using relative first amplitude is suitable to identify un-grouted space.

Key words : Un-grouted tendon duct, Impact elastic wave method, the amplitude of the first motion

### 1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物では、コンクリートとPC鋼材が一体となって外力に抵抗し、一般にRC構造物のコンクリートよりも強度が高く密実なコンクリートが使用されていることから、その耐久性は高いと考えられている。シース内に存在するPC鋼材は、充填されたグラウトにより腐食から保護されるが、シース内にグラウト未充填部が存在する場合、雨水等の侵入によりPC鋼材が腐食し、PC鋼材の破断や突出などを招く恐れがある。そのため、グラウト未充填部検出に関して、削孔による内視鏡カメラによる目視確認のほかに、非破壊試験方法として、X線透過法<sup>1)</sup>、衝撃弾性波法<sup>2)</sup>、電磁パルス法<sup>3)</sup>および漏洩磁束法<sup>4)</sup>などによる検討が実施されている。近年では、衝撃弾性波法による弾性波トモグラフィ法を用いてグラウト充填度を評価する技術<sup>5)</sup>も開発されており、調査断面の可視化技術が向上している。これらの手法の多くは、適用に際し周辺環境への影響懸念による制約や結果を得るまでに多くの時間を要するなど、現場での適用性にはやや課題が残る。ただし、これらの既往の技術を適切に組み合わせることで、現場へ適用可能な技術が構築できると考えられる。

本研究では、現場で簡易判断ができる非破壊試験方法の確立と断面内の簡易な可視化技術の確立を目的として、衝撃弾性波法によるPCグラウト未充填検出の基礎検討を実施した。ここでは、桃木ら<sup>5)</sup>の数値解析結果を参考に、弾性波の伝搬特性に着目した検討を行った。具体的には、グラウト充填率を0、50、100%とした1本の鋼製シースを埋設した供試体を作製し、衝撃弾性波法により弾性波を検出した。その後、評価指標を弾性波速度および弾性波の初動振幅値の振幅比として、グラウト未充填検出の適用性を検討した。その後、グラウト充填率0%とした鋼製シースを2本配置した供試体において同様の検討を行い、現場で簡易にグラウト未充填を判断できるアルゴリズムおよび弾性波トモグラフィ法を用いた簡易な可視化手法について考察を行った。

## 2. 実験概要

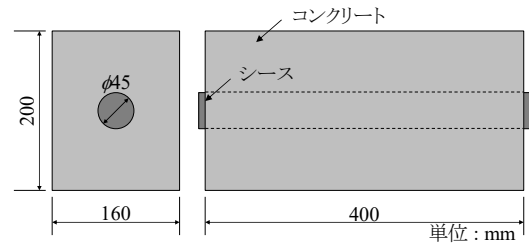
### 2.1 供試体概要

図-1に供試体概要を示す。供試体は、コンクリート中にφ45mmの鋼製シースを1本埋設したケース（1シース）および2本埋設したケース（2シース）とした。なお、1シースの場合のみ、図-2に示すようにシース内のグラウト充填率を0, 50, 100%として供試体を3体作製し、2シースでは2本の鋼製シースともグラウト充填率を0%とした。なお、材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度は35.1N/mm<sup>2</sup>、弾性係数は24.4kN/mm<sup>2</sup>である。

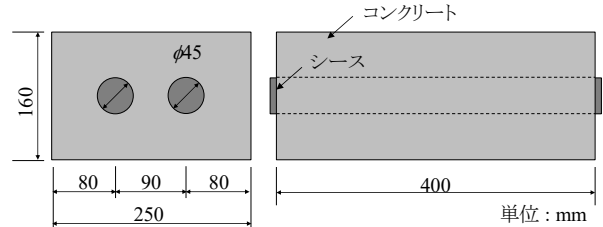
弾性波の励起は、各センサ位置近傍にて、入力エネルギーが一定となるよう図-3に示すように振り子を用いて鋼球をコンクリートに打撃して行った。弾性波の計測は、図-4に示すように、1シースでは供試体側面に25mm間隔で14個、2シースでは30mm間隔で10個のAEセンサを用いて、サンプリング周波数1MHz（計測装置の最大サンプリング周波数）、1波形を4096個の振幅値データとして記録した。使用した鋼球は、φ4.7, 11, 19.7mmであり、AEセンサには60kHz共振型と150kHz共振型の2種類を用いて弾性波を検出した。

### 2.2 弾性波速度トモグラフィ法の解析手法

弾性波速度トモグラフィ法は、計測対象領域を囲むようにセンサを配置し（図-4）、多数かつ多方向の走査線を用いて、有限要素に分割された計測領域内の速度構造を視覚的に把握する手法である。本研究では、図-5に示す解析フローにて弾性波速度トモグラフィ法を実施し、解析での初期モデルの作成には逆投影法を用い、モデルの修正には同時反復法を用いた<sup>6)</sup>。

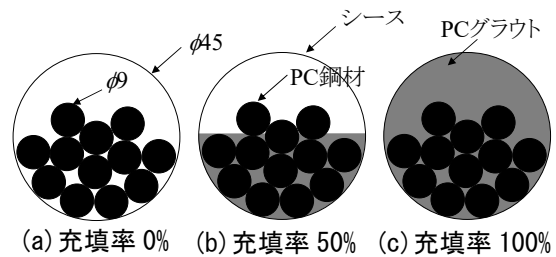


(a) 1 シース



(b) 2 シース

図-1 供試体概要図



(a) 充填率 0% (b) 充填率 50% (c) 充填率 100%

図-2 シース内のグラウト充填率

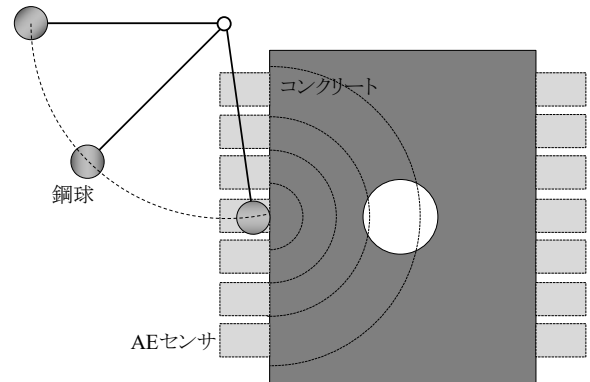
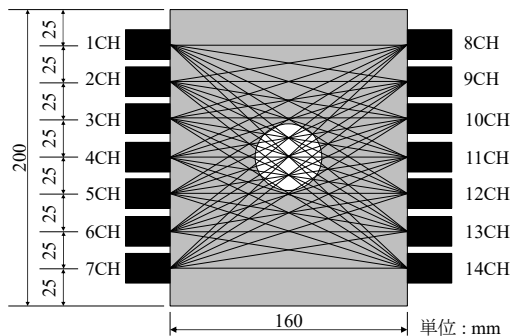
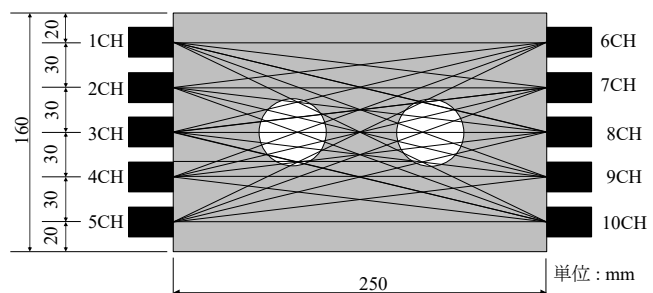


図-3 弾性波入力概要図



(a) 1 シース



(b) 2 シース

図-4 AE センサ配置図

3. 弾性波速度トモグラフィ法による検討

桃木ら<sup>5)</sup>による弾性波速度トモグラフィ法のシミュレーション解析によれば、波動はグラウト未充填部を回折して伝搬するが、その時間遅れは非常に微小であり、それに伴い算出される速度差が小さく、速度トモグラフィ法によるグラウト未充填検出の課題が示されている。

本研究においても、弾性波速度を指標としてグラウト未充填検出の検討を行った。供試体実験に先立ち、図-4(a)の1シーブス供試体を対象として、微小な時間遅れを検出するためにサンプリング周波数を1MHz、100MHzの2種類として数値実験を行った。なお、解析対象範囲は、図-4(a)の弾性波波線経路である160×150mmとした。コンクリート中を伝搬する弾性波速度を4000m/sとし、弾性波は入力点と検出点間距離の最短距離を伝搬するとした。なお、グラウト充填率0%では弾性波はシーブスを迂回、グラウト充填率50%ではシーブス内のグラウト未充填部を迂回、グラウト充填率100%では弾性波はシーブス内を透過すると仮定した。

図-6, 7にサンプリング周波数1MHzと100MHzの数値実験結果を示す。いずれのサンプリング周波数においても、グラウト充填率が低下するにつれ、シーブス位置の弾性波速度が低下していることが視覚的に捉えられ、未充填部が検出されている。サンプリング周波数1MHzに着目すると、供試体側面部の弾性波速度が低く評価されている。これはセンサ間距離が短いために、サンプリング周波数1MHzの時間分解能では、センサ間の時間差を捉えることが困難であったためである。一方、サンプリング周波数100MHzでは、供試体端部においても弾性波速度は4000m/sであり、グラウト充填率100%では当初の設定どおりの弾性波速度が供試体全体で得られている。このことから、本実験供試体では、サンプリング周波数の下限値を100MHz程度確保する必要があると考えられる。

数値実験の結果を受け、供試体実験（サンプリング周波数1MHz）により検証を行った。なお、本実験におけるサンプリング周波数は、測定器の最大値が1MHzであるため、100MHzによる検証は実施でき

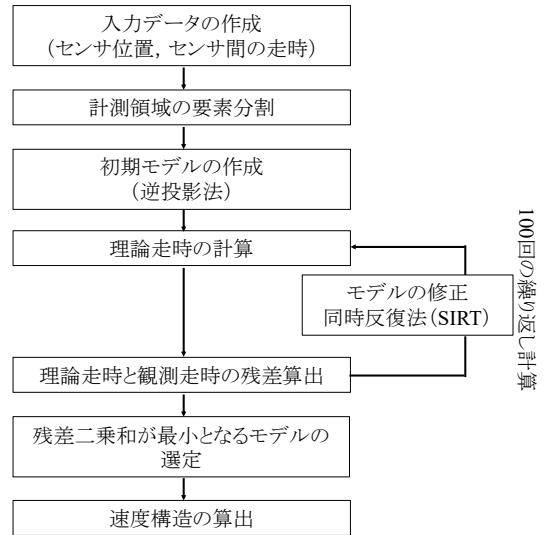


図-5 弾性波速度トモグラフィ法の解析フロー

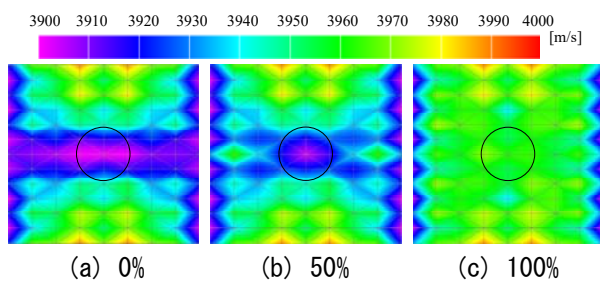


図-6 サンプリング周波数 1MHz の数値実験結果

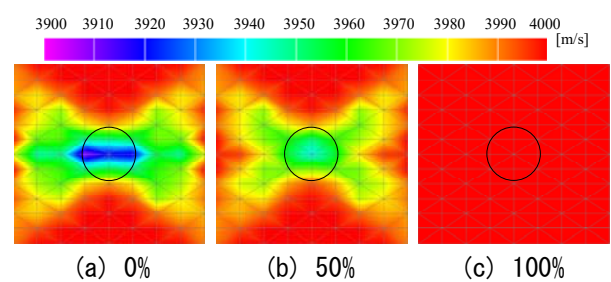


図-7 サンプリング周波数 100MHz の数値実験結果

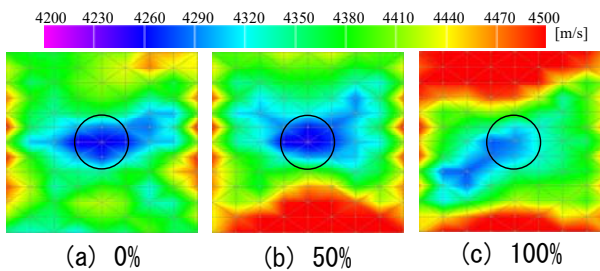


図-8 速度トモグラフィ解析結果  
(φ19.7mm, 60kHz 共振センサ)

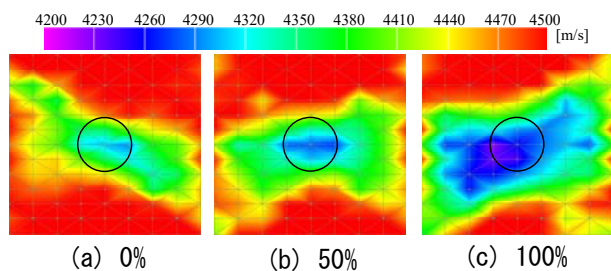


図-9 速度トモグラフィ解析結果  
(φ19.7mm, 150kHz 共振センサ)

ていない。図-8, 9に一例として、弾性波の入力に鋼球径 19.7mmを使用し、60kHzおよび150kHzの共振型AEセンサを用いて弾性波を検出したときの弾性波速度トモグラフィ解析結果を示す。なお、数値実験の結果より、供試体端部において、センサ間隔が短いため弾性波速度が低く評価されることがわかったため、本検討では、供試体端部の弾性波速度を断面内の弾性波速度の最大値 (4500m/s) と仮定して、解析を行った。図より、グラウト充填率100%であってもシーす部分において弾性波速度が低下しており、未充填と判断される結果となった。他の鋼球径においても同様の結果を得ており、本実験供試体の場合、弾性波速度を評価指標としてグラウト未充填評価を行うことは困難であるといえる。

#### 4. 初動振幅値の振幅比による検討

弾性波を利用した物理探査では、波動のもつ情報として弾性波速度と振幅が利用され、振幅は弾性波速度に比べ媒質の性質変化に敏感であるとされる<sup>7)</sup>。これらの特性を利用して、地盤内の減衰特性評価<sup>8)</sup>やコンクリートの健全性評価に関する検討が実施されている<sup>5)</sup>。既往の研究<sup>5)</sup>では、シミュレーションモデルにおいて、上下端は無遠慮として弾性波の反射波による影響は考慮されていない。しかし、実際の計測では、計測領域は有限であり、測定波形には供試体端部からの反射波が含まれるため、測定波形全体を対象とした評価指標は好ましくない。ここで、弾性波の初動振幅値は、弾性波の入力点から検出点間を結ぶ最短経路、あるいは空隙を迂回して到達するため、供試体端部における反射の影響を考慮せずに、計測領域内のグラウト未充填部の影響を直接評価可能である。

本研究では、弾性波入力点の反対の面に位置するセンサで検出された弾性波の初動振幅値に着目し、グラウト未充填評価を試みた。これは、弾性波の入力面にあるセンサとその反対の面にあるセンサでは、センサの感度方向が90度異なり、弾性波入力面では、センサ感度方向と弾性波の伝搬方向が垂直となるため、検出される振幅値が小さくなる。一方、弾性波入力面の反対にあるセンサでは、弾性波の伝搬方向とセンサの感度方向が一致するため、より信頼性の高い結果が得られると考えられる。そこで、弾性波入力位置 (図-10の4CH) に対して対面にあるセンサ (図-10の11CH) で検出した弾性波の初動振幅値を基準として、ほかのセンサでの初動振幅値の割合を以下の式を用いて算出した。

$$\alpha = \frac{A_i}{A_0} \quad (1)$$

ただし、 $\alpha$ : 初動振幅値の振幅比、 $A_0$ : 入力位置の対角にあ

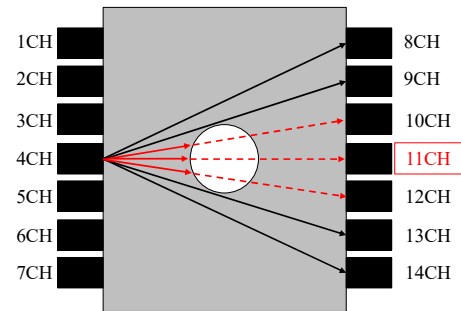
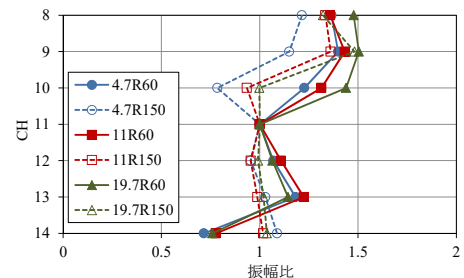
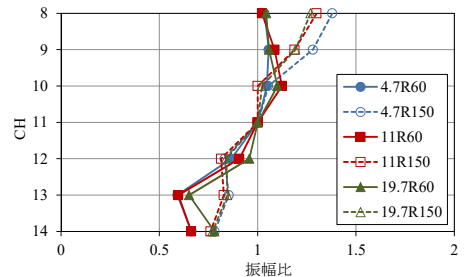


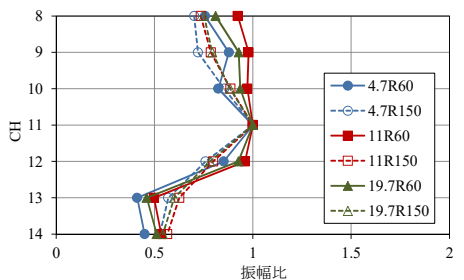
図-10 グラウト未充填時の弾性波の伝搬概要



(a) グラウト充填率 0%



(b) グラウト充填率 50%



(c) グラウト充填率 100%

図-11 1 シース供試体における初動振幅値の振幅比分布

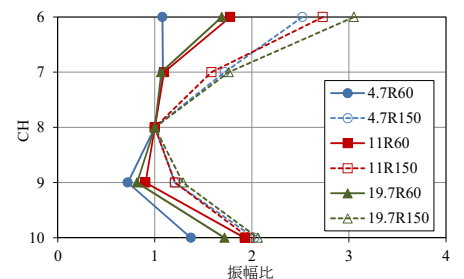


図-12 2 シース供試体における初動振幅値の振幅比分布

るセンサで検出した初動振幅値(volt),  $A_i$ : 入力位置と対角面のセンサで検出した初動振幅値(volt)

図-10に1シース供試体における4CH近傍で弾性波を入力した場合の弾性波の伝搬模式図, 図-11にそのときの初動振幅値の振幅比を示す。なお, 図-11中の凡例は, 「鋼球径-センサの共振周波数」を表しており, 4.7R60では, 弾性波の入力は4.7mmの鋼球, 受信は60kHz共振型センサを意味する。図より, いずれの鋼球径, センサ種類においてもグラウト充填率の増加に伴い, 振幅比が低下傾向を示している。グラウト充填率100%の場合, 入力点から最短経路である11CHがもっとも振幅比が大きく, 11CHから離れるほど振幅比が低下している。これは, 距離減衰による弾性波のエネルギー低下を表しており, 健全な状態である。しかし, グラウト充填率0, 50%では, 11CH以外のセンサにおいて振幅比が1.0を超えるセンサが存在し, 11CHで受信した弾性波が伝搬経路中のグラウト未充填部の影響を受けて減衰し, ほかのセンサよりも振幅値が小さい結果となった。2シース供試体においても, 図-12に示すように1シース供試体と同様の傾向が認められ, グラウト未充填部が存在する場合, 振幅比が1.0を超えるセンサが存在することが確認された。したがって, 弾性波の初動振幅値に着目することで, グラウト未充填部を判断できる可能性が示唆され, 本手法により評価基準を振幅比1.0とすることで現場で簡易にグラウト未充填部を判断できると考えられる。

### 5. 初動振幅値の振幅比トモグラフィ法による断面の可視化

1シース供試体における初動振幅値の振幅比トモグラフィ法を適用した結果を図-13~18に示す。図

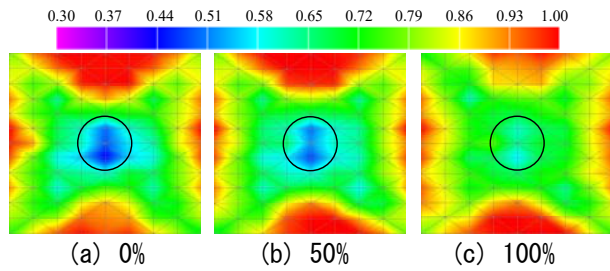


図-13 振幅比トモグラフィ解析結果  
( $\phi$  4.7mm, 60kHz 共振センサ)

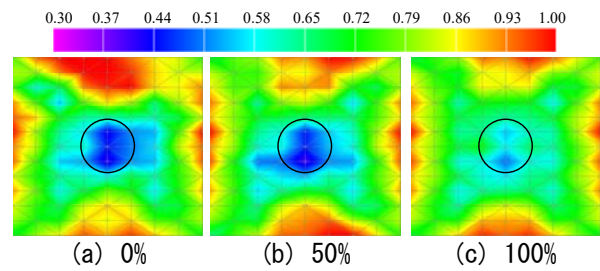


図-14 振幅比トモグラフィ解析結果  
( $\phi$  4.7mm, 150kHz 共振センサ)

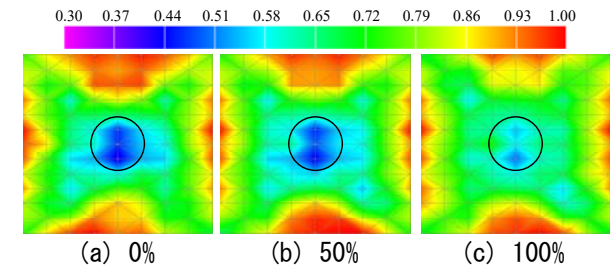


図-15 振幅比トモグラフィ解析結果  
( $\phi$  11mm, 60kHz 共振センサ)

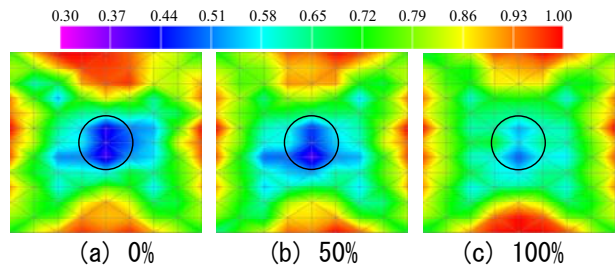


図-16 振幅比トモグラフィ解析結果  
( $\phi$  11mm, 150kHz 共振センサ)

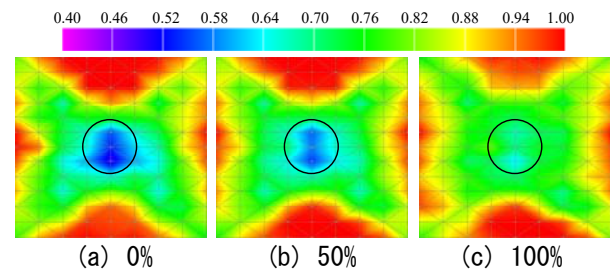


図-17 振幅比トモグラフィ解析結果  
( $\phi$  19.7mm, 60kHz 共振センサ)

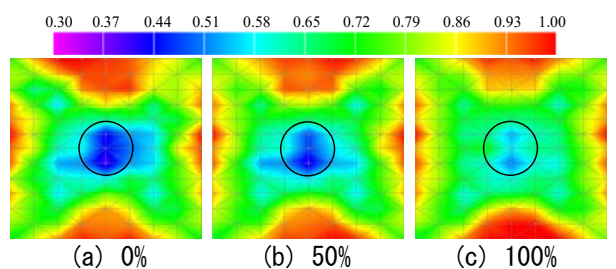


図-18 振幅比トモグラフィ解析結果  
( $\phi$  19.7mm, 150kHz 共振センサ)

より、鋼球径およびセンサの共振周波数によらずグラウト充填率の低下に伴いシース周辺の振幅比が低下していることが確認でき、弾性波速度を指標とした場合 (図-8, 9) よりも信頼性の高い結果が得られた。また、図-19に示す2シース供試体の結果においても、グラウト未充填検出が可能であると示唆された。ここで、本研究のコンター指標では、供試体寸法、鋼球径、センサ種類によって指標の統一を行っておらず、同一条件内 (図番号内) でのグラウト充填率の変化については統一指標とした。これは、各条件間で弾性波の入出力周波数および伝搬状況が異なるため、統一的な指標ではグラウト未充填部を適切に評価できない可能性が懸念されたためである。また、本研究成果を実構造物に適用する場合には、シースのない健全な断面内で、弾性波初動振幅値分布を取得し、これをグラウトの100%充填と仮定することで、グラウト未充填部を検出できると考えられる。

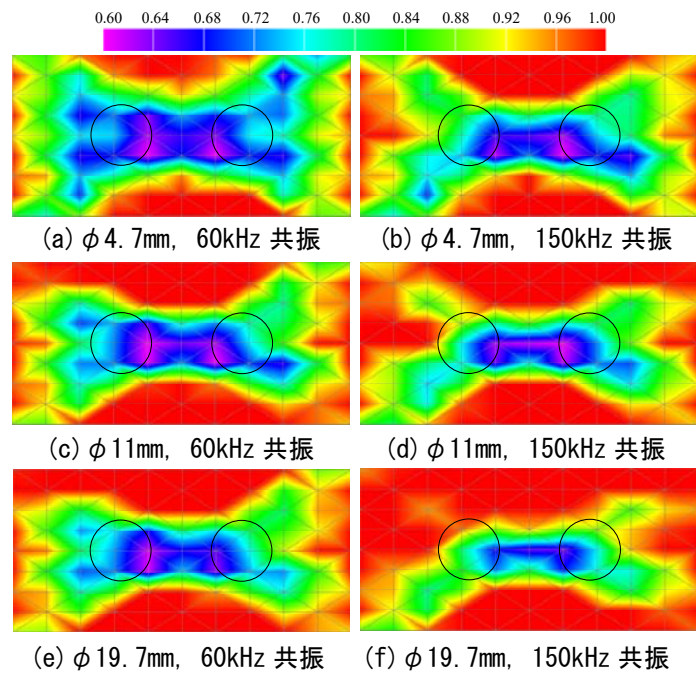


図-19 2シース供試体の振幅比トモグラフィ解析結果

## 6. まとめ

本研究では、PC部材のグラウト未充填部検出に関して、衝撃弾性波法を用いた基礎検討を試みた。本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 弾性波速度を指標としてグラウト未充填部検出を検討した結果、十分なサンプリング周波数が確保できないことから、波動が未充填部を迂回することで生じる到達時間遅れを精度よく検出することができず、弾性波速度によるグラウト未充填検出は困難であった。
- (2) 弾性波の初動振幅値は、シース内のグラウト未充填部の影響を受け、弾性波の伝搬経路上に未充填部が存在することで、完全充填の場合と異なる挙動を示すことが認められ、評価基準を振幅比1.0とすることでグラウト未充填検出が可能となる。
- (3) 初動振幅値を用いた振幅比トモグラフィ法により、供試体断面内のグラウト未充填部が視覚的に評価でき、グラウト未充填部検出の有効な可視化手法であると考えられる。

## 参考文献

- 1) たとえば、竹内祐樹, 中村英佑, 渡辺博志, 木村嘉富: PCグラウトの充填度評価と再注入に関する基礎的研究, プレストレストコンクリート技術協会第18回シンポジウム論文集, pp. 365-370, 2009. 10
- 2) 例えば、鎌田敏郎, 浅野雅則, 川嶋雅道, 内田慎哉, 六郷恵哲: 弾性波によるPCグラウト充填評価手法の実構造物への適用, 土木学会論文集E, Vol. 62, No. 3, pp. 569-586, 2006. 9
- 3) 例えば、鎌田敏郎, 内田慎哉, 角田蛍, 佐藤浩二: 実橋梁PC桁での非破壊試験によるPCグラウト充填評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 4, pp. 238-250, 2012.
- 4) 例えば、廣瀬誠, 青木圭一, 宮川豊章: 漏洩磁束法によるポストテンション実橋におけるPC鋼材破断調査, プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集, pp. 467-470, 2014. 10
- 5) 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, プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集, pp. 461-466, 2014. 10
- 6) 佐々宏一, 芦田讓, 菅野強: 建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版, pp. 117-127, 2007.
- 7) 井上博之, 金子勝比古, 佐々宏一, 伊藤一郎: 岩石の破壊の進展に伴う弾性波の振幅の減衰, 日本鉱業会誌, Vol. 94, No. 1083, pp. 323-328, 1978.
- 8) 渡辺俊樹, 佐々宏一: 弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ, 物理探査, Vol. 45, No. 1, pp. 10-21, 1992.