

超音波反射波の位相情報に基づくPCグラウト充填評価手法の検討

(株)エッチアンドビーシステム 正会員 博士(工学) ○木下 尚宜
(株)エッチアンドビーシステム 石久保 宏平
(株)日本ピーエス 正会員 修士(工学) 角田 貴也
(株)日本ピーエス 正会員 博士(工学) 天谷 公彦

Abstract : In this study, a non-destructive evaluation of the filling status of PC grout was conducted with an ultrasonic device that does not require a contact medium. The multiple received waves from a linear array of sensors with different paths were reconstructed by the Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT), and the phase angle of the PC duct reflected wave was obtained from the reconstructed waveform. Specimens with different parameters were examined to investigate the influencing factors on the phase angle of the PC duct reflected wave. The applicability of the PC grout filling evaluation method by phase angle was also verified on an existing PC box girder bridge with PC bars.

Key words : NDT , PC grout , Ultrasonic testing , Phase angle

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)橋においては、PC鋼材を保護するPCグラウトの充填状況の調査は、維持管理上必要不可欠とされている¹⁾。PCグラウト充填状況の調査手法の一つに、接触媒質を必要とせず、S波を発するDry Point Contact (DPC) 探触子を用いた超音波装置を使用し、開口合成法(Synthetic Aperture Focus Technique: SAFT)を用いて再構成した波形より、シースかぶり相当時刻からの反射波(以降、シース反射波とする)強度を用いてPCグラウト充填状況を評価する手法がある²⁾。シース反射波強度はシースかぶりや径の影響を受けるため、PCグラウト充填評価にあたり版厚反射波といった他の指標が必要となる²⁾が、シース多段配置など版厚反射波の取得が困難な状況が考えられ、適用が制限される。

他の指標を用いない手法として、シース反射波の位相によるPCグラウト充填評価³⁾が挙げられる。音響インピーダンスの高い媒質から低い媒質への界面で弾性波が反射する際、反射波の位相が反転する。すなわち、シース内が空洞の場合はシース反射波の位相が反転し、充填されていると位相は反転しない。ここで、充填シースにおけるシース反射波はシースとの界面やPC鋼材との界面で生じた反射波などが重なり合ったものと考えられる。シース内におけるPC鋼材の位置は、緊張されているため測定位置により様々であり、シース材質も鋼製やPE(ポリエチレン)製と異なる場合もある。実構造物での計測を想定すると、これらはシース反射波の位相に影響を及ぼす可能性が考えられる。

そこで、本研究ではシース反射波の位相に与える影響に着目し、PC鋼材の位置やシース材質を変えた供試体を用いた検討を行った。その後、同手法の実構造物への適用性についても検討した。

2. 計測方法および計測機器の特徴

2. 1 計測方法

本研究で用いた超音波装置を写真-1に示す。装置には1列3個(1CH)、全8CHで計24個のDPC探触子が配置されている。図-1に示すようにリニアアレイ方式でCHごとに発信および受信探触子を切り替えて



写真-1 超音波装置外観

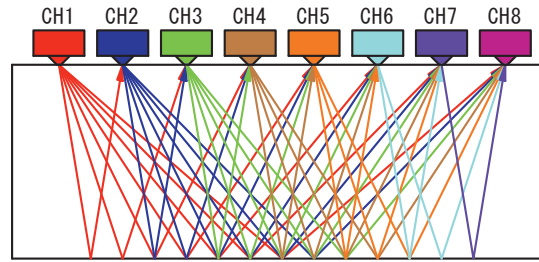


図-1 受信波経路イメージ図

計測することで、一度の計測で28通りの異なる経路の受信波が得られる。計測は、PCケーブルに直交する向きで装置をコンクリート面に押し当てデータを取得し、ケーブル長手方向に30mm間隔で1m程度の区間にわたり行われた。

2. 2 入力波

S波は、波の進行方向に対して垂直な変位を持ち、変位の方法からSH波とSV波の2種類に分類される。DPC探触子でS波を入力する場合、起振方向によりコンクリート内に入射される波（発信波）が変化する。図-1に示す計測において、DPC探触子の先端を紙面内水平方向に起振した場合をSV波入力、紙面に垂直方向に起振した場合をSH波入力とし、それぞれの発信波の伝播状況を、類似機器の測定結果ではあるが図-2に示す⁴⁾。SV波入力の場合はS波とP波が生じるが、SH波入力の場合はS波のみ生じる。これより、S波のDPC探触子においては一般にSH波を用い、発信波の指向角は概ね180度となる。

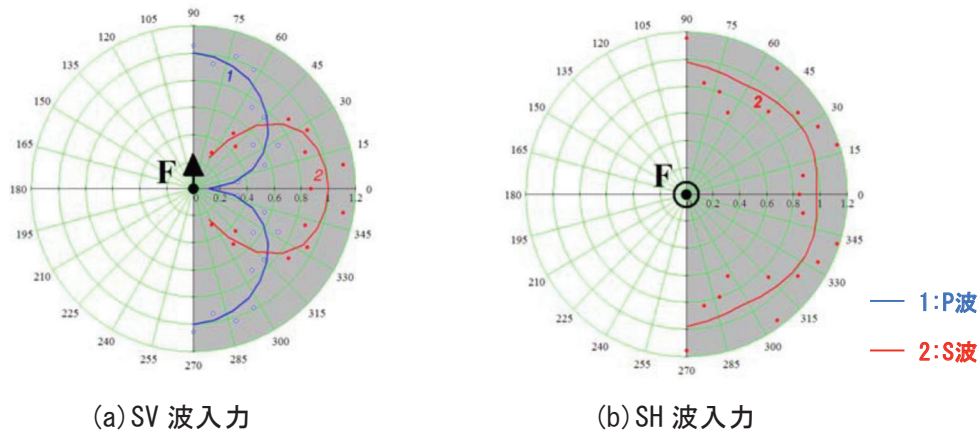


図-2 DPC探触子の発信波の指向性⁴⁾

3. 受信波の解析方法

3. 1 SAFTによる再構成

SAFTは複数の経路で測定して得られた時間領域の反射波を、Time of Flight (TOF) の原理に基づいて深さ位置で収束するよう重ね合わせる。したがって、再構成の結果で反射強度が小さい部分は反射源が存在しないことを表し、反射強度が密に重なり大きくなった部分が反射源を表す。

SAFTによる再構成後においても、受信波と同様に正負のある時間領域の波形が得られる。画像化の際に反射源の位置および深さの識別を容易にするため、時間領域波形を絶対値として表される包絡線に置き換えた。包絡線 ($S_e(t)$) は、式(1)に示すように実部として時間領域波形を、虚部としてヒルベルト変換より時間領域波形の位相を90度遅延させたデータより求めた³⁾。

$$S_e(t) = \sqrt{S(t)^2 + H(S(t))^2} \quad (1)$$

ここに、 $S(t)$: 時間領域波形、 H : ヒルベルト変換

包絡線および時間領域波形の概要を図-3に、断面方向のSAFT再構成画像例を図-4に示す。

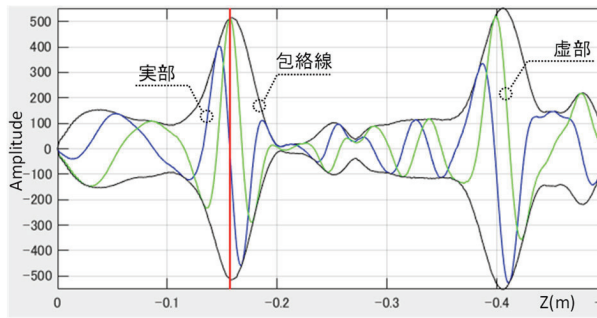


図-3 包絡線と時間領域波形の概要

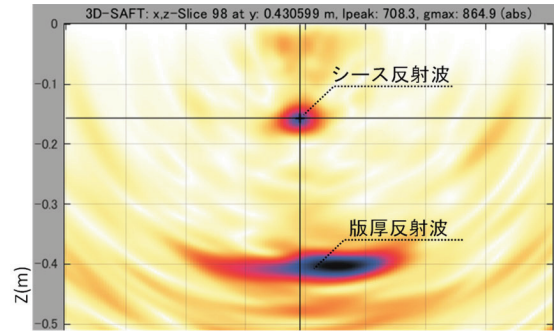


図-4 SAFT 再構成画像（断面方向）例

3. 2 FT-SAFTによる位相解析

シース反射波の位相はFT-SAFT³⁾（フーリエ変換に基づいたSAFT）により求めた。FT-SAFTは、SAFT再構成で得られた包絡線の極大値 t_0 において、時間領域波形より反射波の中心周波数 f_0 における1周期相当時刻のスペクトル成分の位相角をフーリエ変換より求め、位相角をカラー画像として表す手法である。位相角は周期的な波における任意の位置を角度で表すものである。位相角の表し方を図-5に示す。

位相角は、Cスキャン（またはCスコープ）と呼ばれる計測面と平行に任意の深さでスライスしたSAFT再構成画像に、角度に応じた画像として追記した。本稿において位相角は、濃灰色：-45度～45度，薄灰色：45度～135度，灰色：-45度～-135度，黒色：±（135度～180度）の4分割で表記した。図-6に位相角のカラーパターンを示す。なお、包絡線の極大値の中でも一定の強度に満たないものは、グレースケールで表される。

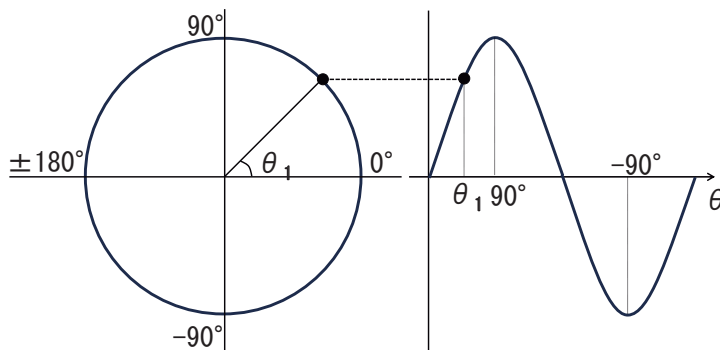


図-5 位相角の表し方模式図

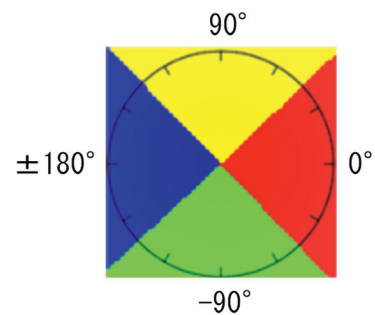


図-6 位相角カラーパターン

4. 供試体を用いたシース反射波の位相角に関する検討

4. 1 シース内のPC鋼材位置による影響

(1) 供試体概要

PC鋼材位置がシース反射波の位相角に与える影響の検討に用いた供試体形状および寸法を図-7に示す。供試体は、内径65mm板厚0.32mmの鋼製シース、PC鋼より線12S12.7を用い、無筋とした。部材断面上下中央に5本のシースを配置し、そのうち2本はPC鋼材を挿入せず、1本は未充填、もう1本はPCグラウト充填（No.0）とした。残りの3本はシース内のPC鋼材位置を変えてPCグラウトを充填した。PC鋼材の配置は、中央配置（No.1），上縁配置（No.2），測定面配置（No.3）の3種類とした。なお、PC鋼材の位置を固定するために、コンクリート打込み前にシースに穴をあけ結束線を通してシースとPC鋼材を緊結した。供試体に用いたコンクリートは設計基準強度50N/mm²（14日強度60.0N/mm²），水セメント比36.0%，PCグラウトは超低粘性型のプレミックス材とした。

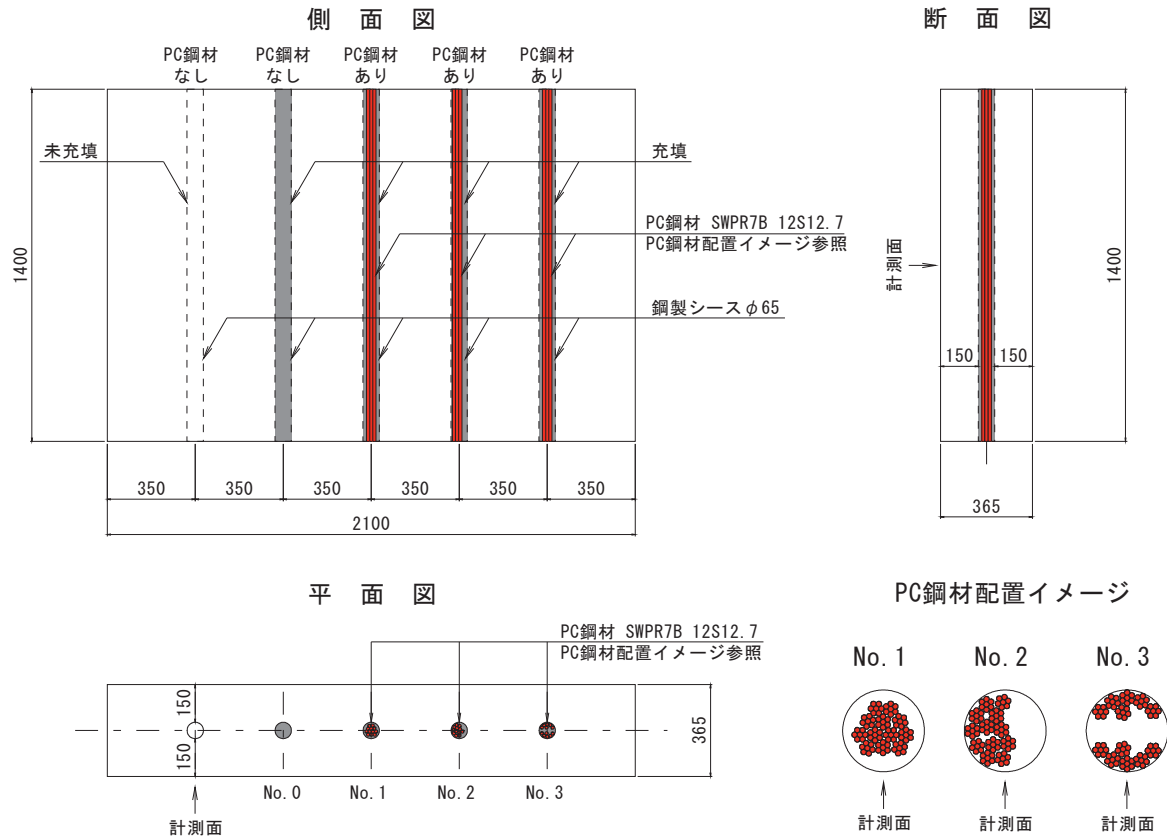


図-7 PC 鋼材位置変化供試体概要

(2) 測定結果

PCグラウトが硬化した後、計測を実施した。計測で得られた受信波に対してFT-SAFTを実行し、シースかぶり相当でスライスしたCスキャン画像（以降、位相解析結果とする）を図-8に示す。

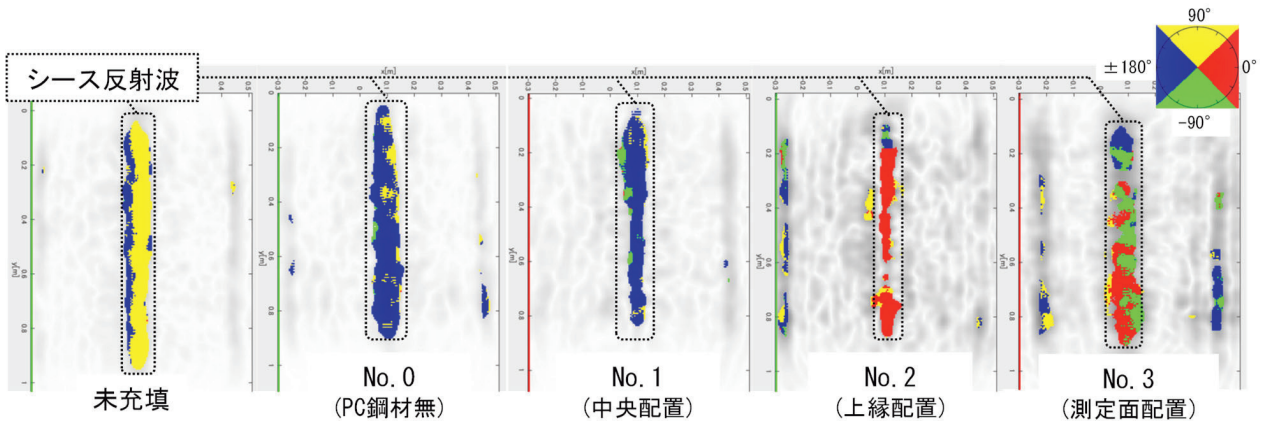


図-8 PC 鋼材位置変化供試体 位相解析結果

未充填のシースでは、シース反射波の位相角は90度方向が卓越した。未充填シース反射波の位相角が位相の反転に伴い90度になったとすると、充填シース反射波の位相角は-90度になると想定される。しかし、充填シース反射波の位相角は、PC鋼材無および中央配置のものは±180度方向が卓越し、上縁配置のものは0度方向が卓越し、測定面配置のものは-90度～0度方向が卓越するなど、PC鋼材の配置によりシース反射波の位相角が大きく変化した。

ここで、発信波の周波数を55kHz、コンクリートのS波弾性波速度を2600m/sとすると、1波長は47mmとなる。SAFTによる再構成の解像度は波長に依存するため、充填シースにおけるシース内のPC鋼材の

配置状況を正確に画像化することはできず、シース反射波にPC鋼材反射波が含まれた状態で画像化される。そのため、シースとPC鋼材が近接している場合は、シース界面で生じた反射波とPC鋼材反射波との位相差が少ないため、シース反射波の位相角に想定される -90° 方向がみられるが、シースとPC鋼材の位置が離れると、シース界面で生じた反射波とPC鋼材反射波との位相ずれが起こり、位相差に応じてシース反射波の位相角が 0° 度または $\pm 180^\circ$ 度方向に変化したと推測する。また、鋼製シースは板厚が 0.32mm と薄いため反射波の強度は弱く、シース反射波はシース内PC鋼材からの反射波の影響を大きく受けると考えられる。

4. 2 シース材質による影響

(1) 供試体概要

PEシースを有する供試体を用いて、シース材質がシース反射波の位相角に与える影響を検討した。供試体は、寸法 $1500 \times 880 \times 230\text{mm}$ 、D10鉄筋を 250mm 間隔で配置した鉄筋コンクリート製とし、内径 70mm 板厚 2.5mm のPEシース、およびPC鋼より線12S12.7を有する。供試体断面中央に未充填シースと、PCグラウトで充填されたシース（PC鋼材中央配置）が配置されている。

(2) 測定結果

充填シースと未充填シースの位相解析結果を図-9に示す。

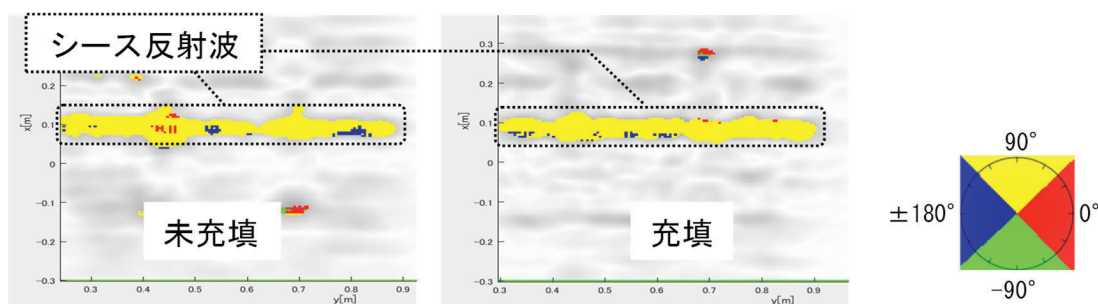


図-9 PE シース供試体 位相解析結果

充填、未充填ともにシース反射波の位相は 90° 成分が卓越し、グラウトの有無による差異はみられなかった。鋼製シースと異なる結果となった原因として、PEシースに用いられる高密度ポリエチレンの一般的なS波音響インピーダンスが $1.0 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ と、コンクリートの一般的なS波音響インピーダンスの $6.6 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ より小さいことが挙げられる。さらに、シース板厚が 2.5mm と鋼製シースの 0.32mm と比べて厚いため、シース反射波において、PEシース界面で生じた位相の反転した反射波の強度が大きく支配的となったと推測する。

5. 実構造物への適用性に関する検討

5. 1 対象橋梁

実構造物への適用性を検討するため、PC4径間連続箱桁橋で計測を行った。測定対象は、図-10に示すウェブに二段水平方向に配置されている主ケーブル（鋼製シース内径 38mm 、PC鋼棒直径 32mm ）のコンクリート表面側とし、シースかぶりが 150mm 程度、事前の削孔調査でグラウト状況が既知のものとした。

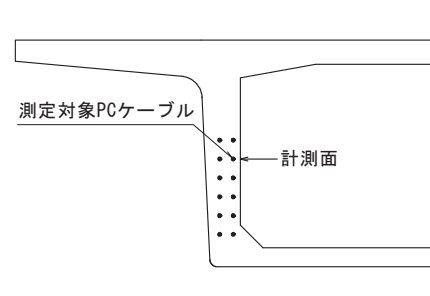


図-10 実構造物計測位置（断面）図

5. 2 測定結果

充填および未充填シースの位相解析結果を図-11に示す。未充填シースのシース反射波の位相角は $90^\circ \sim 180^\circ$ 度、充填シースは 0° 成分が卓越し、図-8に示す供試体のシース反射波位相角と概ね合致し

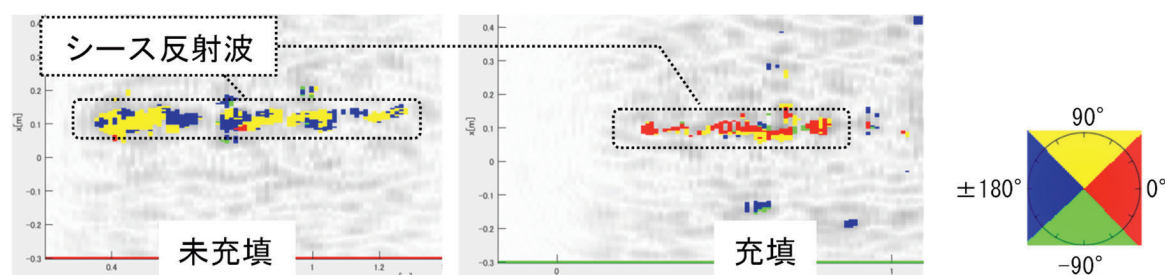


図-11 PC 鋼棒を有する実構造物 位相解析結果

た。これより、版厚反射波の取得が困難な実構造物においても、シース反射波の位相によるPCグラウト充填評価法の有用性が示唆された。しかし、位相解析結果におけるシース反射波の位相角は、供試体と比べてグレースケール表記の部分が多く不明瞭であった。この原因として、供試体と比べてシース内径が38mmと細いことや、配力筋が125mmピッチと密に配置されていることが挙げられる。

供試体レベルでは図-8, 9に示すように位相解析結果が明瞭で、PCグラウトの充填状況を容易に評価できたが、実構造物では図-11に示すようにシース反射波の位相角が明瞭でないため、配筋やシースかぶりなどの測定条件によって、位相解析結果のみでは判断に迷う状況が想定される。そのため、本手法の実構造物への適用を考慮した場合、例えば位相角の平均値といった何らかの評価基準の確立が望まれる。今回は限られたデータ数での検討であったが、今後は実構造物での計測データを収集し、それらを統計的に検討するなどして、本手法の改良や、適用範囲の見極めを行いたい。

6. まとめ

本研究では供試体を用いてシース反射波の位相角に影響を与える要因を実験的に検討し、その後、PC鋼棒を有する実構造物への適用性について検討した。本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に列挙する。

- (1) 充填シースにおいて、シース内のPC鋼材位置に応じてシース反射波の位相角が大きく変化した。
- (2) 充填シース反射波の位相角において、シースとPC鋼材が近接している場合に未充填時との位相角の差が顕著となった。
- (3) PEシース反射波の位相角は、PCグラウトの有無に関わらず概ね90度付近が卓越した。そのため、PEシースにおいてはシース反射波の位相角によるPCグラウト充填評価は困難である。
- (4) PC鋼棒を有する実構造物においてもPCグラウトの有無でシース反射波の位相角に有意な差異がみられ、シース反射波の位相によるPCグラウト充填評価の有用性が示唆された。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC鋼材の調査および補修・補強指針, pp. 1-6, 2016
- 2) 小椋紀彦, サグラジャン アルトゥル, 塩谷智基, 福田泰樹：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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 1, pp. 1867-1872, 2024. 6
- 3) Mayer, K., et al. : Characterization of Ultrasonic and Radar Reflector Types in Concrete by Phase Evaluation of the Signal and the Reconstructed Image, ECNDT 9th European Conference on NDT, 2006. 9
- 4) Samokrutov, A., et al. : Development of acoustic methods and production of modern digital devices and technologies for ultrasonic non-destructive testing, Ultragarsas Journal 61, pp. 12-21, 2006. 4