

論文 インパクトエコー法を用いたプラスチックシース管内部の PC グラウト充てん度評価

野上 茜*¹・渡辺 健*²・橋本 親典*³・大津 政康*⁴

要旨: PC コンクリートにおけるインパクトエコー法を用いた充てん度評価において、プラスチックシース管では、内部空隙の検出が困難であることが指摘されている。そこで本研究では、プラスチック板およびプラスチックシース管を埋設したコンクリート供試体を作製し、プラスチックの厚さおよびグラウトの凝結過程が内部空隙を検出する際の周波数スペクトルにどのように影響するか実験的に検討を行なった。その結果、プラスチックの厚さが薄い場合は充てん度を評価することが可能であるが、厚い場合にはグラウト充てんによる周波数スペクトルの変化が非常に小さく、評価が困難であることが示された。

キーワード: インパクトエコー法, 周波数スペクトル, 非破壊検査, シース管, グラウト

1. はじめに

現在、構造物に損傷を与えずに検査可能である非破壊検査技術に関する研究が盛んに行われている。弾性波を利用した非破壊検査の一つにインパクトエコー法がある。インパクトエコー法は衝撃弾性波法とも呼ばれており、その基本的な原理が簡易であることや弾性波の入力周波数のエネルギーを簡易に変更できることなどにより、構造物の板厚の調査やPCグラウト充てん度など広範囲に適用可能な検査方法として注目を集めている。

インパクトエコー法によるPCグラウトの充てん度評価は、既往の研究によってその有効性が示されている^{1),2)}。しかしプラスチックとスチールでは、計測に与える影響が異なることが知られているが、プラスチックのシース管の内部にグラウトが充てんされたとき、シース管の厚さが計測結果にどのような影響を与えるか、また、グラウトの凝結硬化過程により計測結果がどのように変化するかについては不明な点が多い。そこで本研究では、プラスチックの板を配置した供試体と、シース管を埋設した角柱のコンクリート供試体を作製し、インパクトエコー法による計測を行い、グラウトが充てんされたとき、周波数スペクトルにどのような影響を及ぼすかについて実験を行なった。

2. インパクトエコー法について

2.1 衝撃力による上限周波数について

鋼球を用いた機械的な衝撃力により発生される弾性波の上限周波数は、鋼球とコンクリート表面との接触時間により決定され、接触時間は鋼球の直径に大きく依存するとされている。

Sansalone³⁾によると、鋼球の直径を $D(m)$ とすると、接触時間 T_c (秒) および上限周波数 $f_c(Hz)$ はそれぞれ式(1), (2)より決定される。

$$T_c = 0.0043D \quad (1)$$

$$f_c = \frac{1.25}{T_c} \quad (2)$$

インパクトエコー法では、衝撃力による上限周波数 f_c が、内部欠陥によって生じると考えられる共振周波数まで含むことが重要である。今回使用した鋼球は、直径が 9.5mm のものを用いた。ここで、インパクトエコー法の原理によると内部欠陥によって生じる 1 次モードの共振周波数 $f_{void}(Hz)$ は、コンクリート中を伝播する P 波の波速を C_p (m/s)、コンクリート表面から空隙までの深さを $d(m)$ とすると式(3)のように表される。

$$f_{void} = \frac{C_p}{2d} \quad (3)$$

また同様に、部材の厚さおよび鉄筋のかぶり厚さをそれぞれ T および d とすると、板厚によるピーク周波数 f_T 並びに鉄筋によるピーク周波数 f_{steel} は次式(4), (5)により示される。空隙部の音響インピーダンスはコンクリートよりも小さく、鉄筋の音響インピーダンスが大きいため、算定式の分母の係数が異なる。

$$f_T = \frac{C_p}{2T} \quad (4)$$

$$f_{steel} = \frac{C_p}{4d} \quad (5)$$

式(1), (2)より、鋼球 9.5mm による上限周波数は、30.6kHz となる。また、深さ 150mm の位置にシース管を

*1 (株) 夢真ホールディングス 業務課 修士 (工学) (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス部助教 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス部教授 工博 (正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生科学専攻教授 工博 (正会員)

埋設したときのピーク周波数をまとめたものを表-1 に示す。深さ 150mm の f_{void} は 12.0kHz となる。

3. 実験概要

3.1 配合と実験概要

供試体の配合を、表-2 に示す。次に述べる 3.2 の(1)、(2)の実験において、全て同じ骨材を用い、同配合としている。写真-1 のようにセンサの設置方法は、供試体の中央とし、鋼球打撃はセンサから 10mm 上としている。その後、検出した弾性波の波形を FFT 処理することにより必要な周波数スペクトルを得た。計測条件は、基本周波数 $\Delta f=100\text{Hz}$ 、サンプリング数 $N=800$ である。また周波数スペクトルは 3 つの計測値の平均値であり、0~80kHz 間での最大振幅値を 1 に補正して評価を行なった。図-3 から図-8 に示す周波数スペクトルで最大値が 1 となっていないものは、横軸に示した周波数範囲外に最大値が存在している。

3.2 供試体

(1) プラスチック板を用いた供試体

プラスチックの厚さの影響を検討するために、表-3 に示すような供試体、プラスチック板厚、空隙厚さについて検討を行った。

図-1 に示すように、100×100×150mm と 100×100×200mm の供試体を、空隙幅 10mm を設けて木製型枠で固定した。その際、入力を行なう位置から 150mm の供試体寸法は統一をし、プラスチック板を埋設していないもの（以下 0mm）と 5mm、10mm の 3 種類作製した。プラスチックの材質はポリエチレンである。未充填前に実験を行なった後にグラウトを注入し、注入直後から計測を行った。

弾性波は、コンクリートを伝播しプラスチック板に到達する。プラスチックにより弾性波が、反射や透過をすると仮定すると、プラスチック板を埋設した場合、その

表-1 シース管でのピーク周波数

		深さ 150mm
シース管での ピーク周波数 (kHz)	f_{void}	12.0
	f_r	4.5
	f_{steel}	6.0

波の伝搬挙動はシース管に比べて単純になると考えられる。そこで、周波数スペクトルでの考察を行なう際、プラスチックの影響のみを取り出しやすくなる利点があるため、まずプラスチック板を用いて実験を行なうことにした。

また、空隙幅を 50mm に変えた実験も行った。この空隙部分に、凝結の早いグラウトを注入することによって計測を行った。丸鋼 $\phi 30\text{mm}$ を空隙の中央に配置することによって同様の計測を行った。丸鋼を配置した理由としては、本来鋼材は、インパクトエコー法を用いた試験では、式(5)に示すようにそのピーク周波数は空隙と異なるとされている。本実験では、空隙へのピーク周波数に



写真-1 入力方法

表-3 プラスチック板を埋設した供試体

用いた供試体寸法(mm)	プラスチックの板厚(mm)	空隙幅(mm)
100×100×150	0, 5, 10	10
100×100×200		
100×100×150	5, 10	50 (丸鋼の有無)
100×100×200		

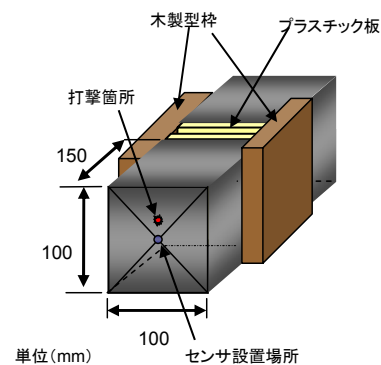


図-1 プラスチック板での実験概要

表-2 配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A E
20	14.5	6.5	51	45	169	333	787	950	0.85248

影響がないことを確認するために、空隙の幅を 50mm にした供試体において検討を行なうことにした。

全ての計測が終了したのちに、グラウトを供試体から取り除き、プラスチック板としっかり付着されていることを確認した。また、供試体の拘束条件としては、各供試体を木製型枠で固定した状態で行った。

(2) 角柱コンクリートにシース管を埋設した供試体

表-4 に示す供試体とシース管の組み合わせで検討を行った。図-2 のように 100×100×400mm の供試体の中にプラスチックシース管とスチールシース管を埋設した。シース管までの距離は、プラスチック板と同様に、鋼球打撃を行う入力位置から 150mm としている。

プラスチックシース管の外径は 57mm、内径は 52mm、スチールシース管の外径は 55mm、内径は 50mm である。このシース管の中に凝結の遅いグラウトを充てんすることにより、実際のシース管において、3.3 で示す 2 種類のグラウトの影響についても検討を行なった。

3.3 グラウト

グラウトは、凝結の早いものと、遅いものの 2 種類用いた。予備試験として、超音波法によりグラウトの凝結硬化過程を計測し、弾性波伝播速度を算出することによって評価を行った。その結果、凝結の早いグラウトは、120 分で凝結が完了することが確認できた。また、凝結の遅いグラウトは、3 日ほどで凝結が完了することが分かった。

4. 結果および考察

4.1 伝播速度の測定

コンクリートの物理特性は、φ100mm×200mm の円柱供試体において、28 日水中養生後、超音波測定器によりコンクリートを通過する時間を計測し、弾性波を算出した。圧縮強度は 34N/mm²、超音波伝播速度は 4021m/s である。

4.2 プラスチック板を用いた実験結果（グラウト幅 10mm）

0mm、5mm、10mm のプラスチック板を用いた実験を行なった。0mm の供試体においての結果を、図-3 に示す。今、未充てん時における空隙部の反射によるピーク周波数を 12kHz 付近に確認することが出来る。そして、120 分と十分時間が経過した後に現れる空隙部より奥の、もう一方の供試体の端部での反射によるピーク周波数を 5kHz 付近に、側面の反射によるピーク周波数を 17kHz 付近にそれぞれ確認することが出来た。

図-4 にプラスチックの厚さによる、充てん状況別の結果を示す。空隙部でのピーク周波数を比較することによって、プラスチックの厚さおよび凝結過程が計測結果にどのような影響を及ぼすかについて検討を行なった。

未充てんと充てん直後を比較すると、ほとんどスペクトルのピークに変化が生じていないことが分かる。充てん直後と 60 分後を比較すると、厚さが 0mm の場合、空隙部のピークが消え、10.4kHz と 14.8kHz に新たなピークが出現していることが分かる。厚さが 5mm の場合、0mm と同様に空隙部でのピークがほぼ消えていることが分かる。次に 60 分後と 120 分後を比較する。5mm のときは、120 分後において、空隙によるピークが消え、11kHz 付近に新たなピークが出現していることが分かる。これは、十分時間が経過し、空隙部のピークがなくなり、空隙部より奥の供試体端部での 2 次ピークが出現したと考えられる。厚さが 0mm の場合、用いたグラウトが、40 分ほどで凝結が完了する超速攻型であるため、変化が見られなかったと考えられる。また、厚さが 10mm の場合、未充てん時から 120 分経過した後も、ピーク周波数に変化がないことが確認できる。この結果より、プラスチック板の厚さが 10mm の場合では、プラスチックからの反

表-4 シース管を埋設した供試体

用いた供試体寸法(mm)	シース管の材質と寸法
100×100×400	プラスチックシース管 外径57mm、内径52mm
	スチールシース管 外径55mm、内径50mm

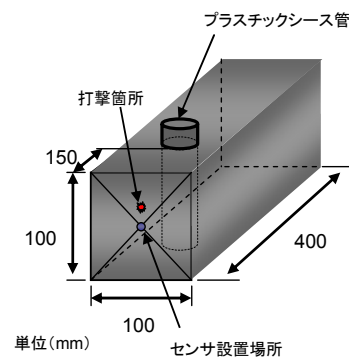


図-2 シース管を埋設した実験概要

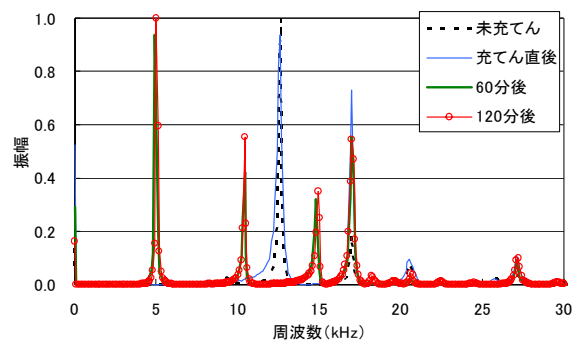


図-3 0mmでの周波数スペクトルの結果

射の影響が大きく、空隙と同様のピークが出現するため、充てん度を評価することが困難であり、計測においてプラスチックの影響を強く受けることが分かった。

プラスチックの厚さが 5mm のときにピーク周波数に変化が見られたのは、おそらく凝結硬化に伴いプラスチックの厚さが測定においてなんらかの影響を与えたためだと考えられる。この結果より、プラスチック板の厚さは、5mm までならピーク周波数の計測において、充てん度の違いを読み取ることが可能であることが分かった。

4.3 プラスチック板を用いた実験結果（グラウト幅 50mm）

厚さが 5mm, 10mm の 2 種類のプラスチック板を用いて実験を行った。また、計測において $\phi 30\text{mm}$ の丸鋼を空隙部の中央に設置し、鋼棒の影響についても検討を行った。その結果を図-5 に示す。

このグラフより、プラスチック板が 5mm の場合において、丸鋼が入っていない供試体と入っている供試体では、その違いがほとんど見られず、経過時間別に見ると、ピーク周波数の位置、振幅の大きさもほぼ同じように減少する結果となることが確認出来た。つまり、丸鋼は空隙を示す周波数スペクトルに影響を及ぼさないことが確認できた。また、グラウトの幅が 50mm の場合には、全ての条件、つまりプラスチックの幅が 5mm と 10mm, そして鋼棒の有無にかかわらず、振幅が凝結の硬化とともに、減少していることが分かる。プラスチック板が 10mm の場合、図-4 と同様にプラスチックからの反射の影響が大きく、空隙と同様のピークが出現するため、充てん度を評価することが困難であり、計測において、プラスチックの影響を強く受けることが分かった。このことより、グラウト充てんの量に関わらず、プラスチックの厚さが厚くなれば、空隙の判別が難しいことが確認された。

4.4 角柱コンクリートにシース管を埋設した供試体での実験結果

予備試験として、スチールのシース管に空気、つまり何も入れていない状態と、プラスチックのシース管に空気と水を入れた実験を行なった。その結果を図-6 に示す。プラスチックのシース管での比較を行なうと、空気の場合と、水が入っている状態においてほぼ同じ位置にピーク周波数を確認することが出来た。また、スチールのシース管においても、同じピーク周波数となっていることが分かる。このことより、空隙の検出が正確に行なえており、また、水の有無が計測に与える影響は比較的小さいことが分かった。

次に凝結が遅いグラウトを使用し、プラスチックとスチールのシース管で充てんを行った結果を図-7 に示す。

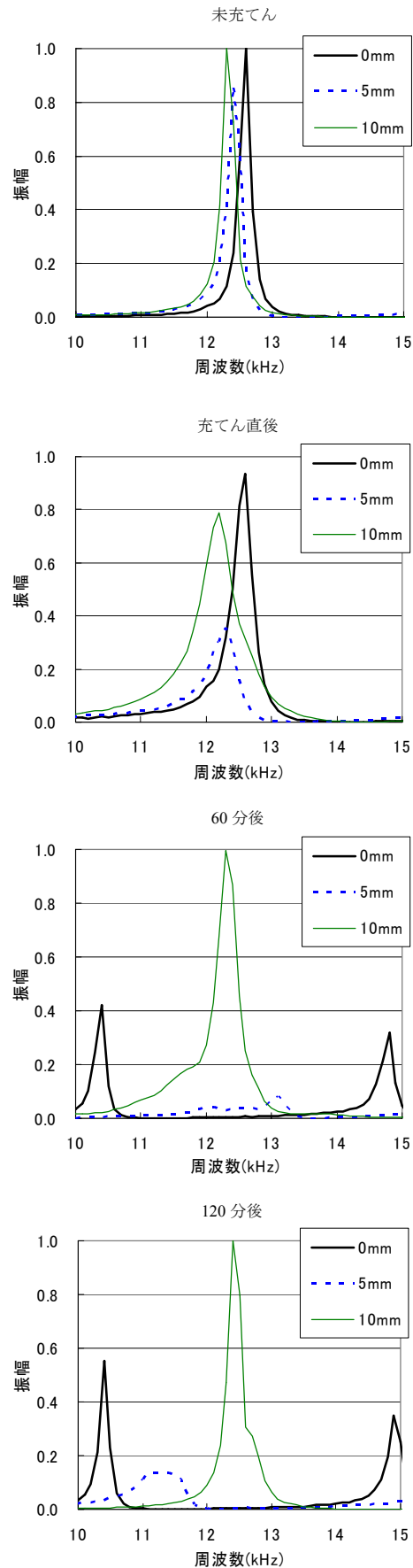


図-4 充てん時間による影響

今、スチールのシース管では、空隙の反射によるピーク周波数が現れる 13kHz 付近の位置において、未充てんから、充てん直後、6 時間と経過するにつれて、振幅が減少し、3 日後の 12kHz 付近に新たなピークを確認することが出来た。これは、十分硬化したために、空隙部より奥の端部の反射による 3 次のピーク周波数であることが考えられる。

次にプラスチックのシース管での結果に着目してみると、スチールのシース管と同様に未充てん後から時間が経過するにつれて、振幅が減少していることが確認で

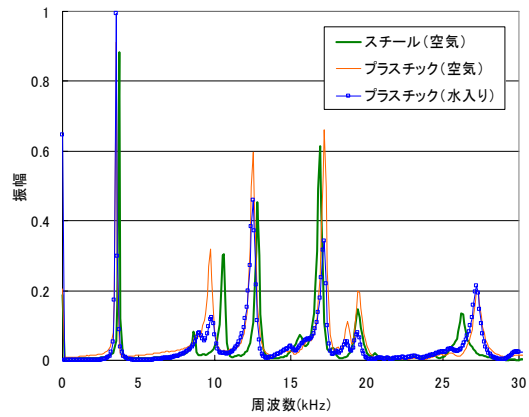


図-6 周波数スペクトル

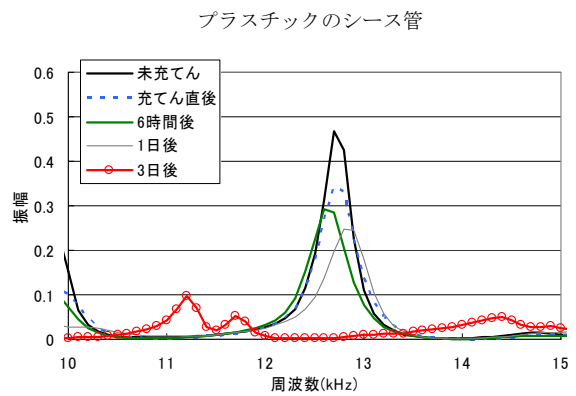
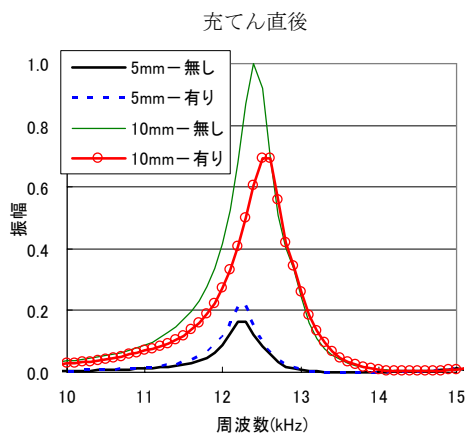
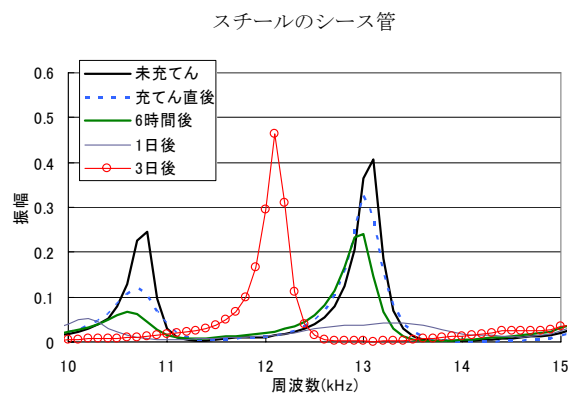
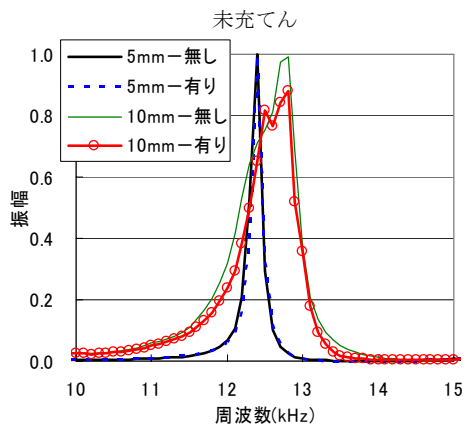


図-7 凝結が遅いグラウトでの結果

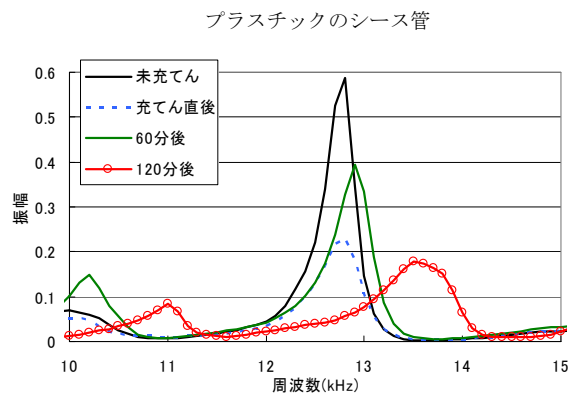
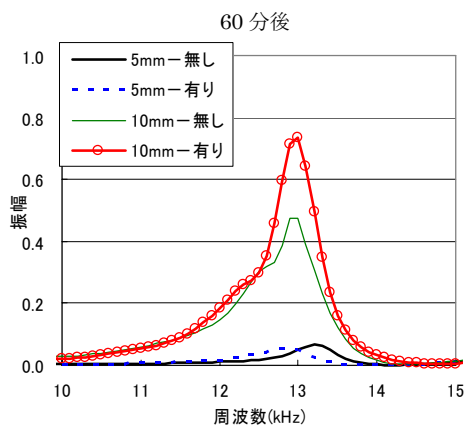


図-8 凝結が早いグラウトでの結果

図-5 鋼棒とプラスチックの厚さの影響

きた。そして、11kHz 付近に新たなピークを確認することも出来た。しかしスチールとプラスチックでは、ピーク位置が若干ずれることが分かった。

また、凝結の早いグラウトを用いて行った実験結果を図-8 に示す。この結果より、凝結の違いによる影響は見られなかった。つまり、グラウトの性能が、計測結果に影響を与えないことが確認出来た。

5. まとめ

本実験では、プラスチック板およびシース管を埋設した角柱のコンクリート供試体を作製し実験を行なった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) プラスチック板を埋設した供試体での実験により、プラスチックが 5mm の場合は、空隙に起因するスペクトルピークはグラウトの凝結に伴い非常に小さくなり、充てんを確認することが出来た。プラスチックが 10mm と厚くなると反射の影響を強く受けるため、空隙位置でのスペクトルピークの減少が見られず、グラウトの充てんを評価することが出来なかった。
- (2) プラスチックの厚さの影響は、グラウトの充てんする幅が 10mm と 50mm でも同様の傾向であった。また、鋼棒の有無が、計測結果に影響を及ぼさないことを確認することが出来た。
- (3) シース管を埋設した供試体において、プラスチックのシース管、スチールのシース管ともに、凝結の硬化が進むにつれて空隙のピークが消え、充てんの評

価が可能であった。

- (4) グラウトの比較において、グラウトの性能が、計測に影響を与えないことが分かった。

参考文献

- 1) 仲居 陽子, 渡海 雅信, Ninel Alver, 大津 政康 : SIBIE による PC グラウト未充填部検出に関する考察, 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, pp.139-144, 2004.
- 2) 渡辺 健, 渡海 雅信, 小坂 浩二, 大津 政康 : インパクトエコー法の画像処理に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000.
- 3) Sansalone, M.J. and Streett, W.B. : Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.