

論文 ポーラスコンクリートの超音波伝播速度に及ぼす接触媒質の影響に関する実験的研究

エルドンオチル^{*1}・畑中 重光^{*2}・三島 直生^{*3}

要旨：本報では、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度の測定において、シリコンシートを接触媒質として用いる場合に生じる超音波発・受振子の押付け力の影響による測定結果のバラツキの改善方法として、シリコンシートと水を用いる方法を提案し、この方法の実用性に関する実験的検討を行った。その結果、シリコンシートと水を用いることで押付け力によるバラツキは改善できること、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係は、接触媒質として適用される媒質の種類の影響を受けるが、y切片のみが異なる二次関数により概ね近似することが可能であることなどが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、空隙率、超音波伝播速度、シリコンシート、非破壊検査

1. はじめに

近年、ポーラスコンクリート（以下、POCと略記）は、その中の連続した空隙により、透水性能、吸水性能、水質浄化性能、緑化性能および昆虫・動物生息性能など多くの性能を持ち、生物共生型 POC および環境負荷低減型 POC として注目されている^{1),2)}。空隙率は POC の各性能を決定づける最も重要な性質の1つである。このため、POC の性能を発揮するためには設計通りの空隙率が得られていることが不可欠となる。POC は、せき板による壁効果および実施工における締固め程度などの影響を受け、各部の空隙率が調合設計によるものと異なる可能性が大きい。したがって、施工された POC 各部の空隙率のバラツキを直接評価する品質管理が非常に重要である。

POC の内部を非破壊で評価する方法として超音波法が提案されており、既往の研究^{3)~6)}において、POC 内を伝播する超音波の速度と空隙率の間には相関があると報告されている。筆者らは、超音波伝播速度の測定時に、接触媒質としてグリスより作業性および再利用性のよいシリコンシートの使用も有効なことを報告している⁷⁾。しかし、**図-1(a)**に示すように、シリコンシートを適用する際に、シリコンシートと試験体およびシリコンシートと発・受振子の間の空気層の存在により密着度が得にくく、発・受振子を押し付ける力（以下、押付け力と略記）の影響を大きく受ける⁸⁾。

そこで本研究では、上記の問題を改善する方法として、**図-1(b)**に示すように、シリコンシートと水を接触媒質として用いることにより、シリコンシートと試験体およびシリコンシートと超音波発・受振子の間の空隙層を埋めることができ、密着度が得られ、より安定した

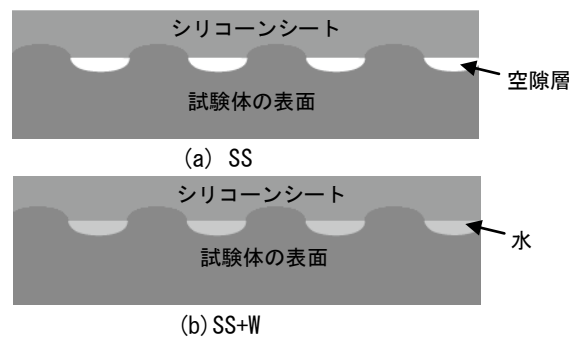


図-1 超音波伝播速度測定時のシリコンシートと試験体の表面の接触状態のイメージ

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率(%)*	15, 25, 35
試験体の含水状態	気乾, 湿潤
接触媒質	水, グリス, シリコンシート(乾燥, +水)
押付け力(N)	30, 60, 90

[注] *：設計空隙率は POC のみの要因である

測定ができると考え、この方法の実用性に関する検討を行うことを目的とした。

2. 実験方法

2.1 実験の要因と水準

表-1 に、実験の要因と水準を示す。本実験では、POC

*1 三重大学大学院システム工学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 三重大学大学院建築学専攻 教授・工博 (正会員)

*3 三重大学大学院建築学専攻 准教授・博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調合表

試験体種類	設計 VR (%)	単位質量(kg/m ³)				HAE/C	AF/C
		W	C	S	G		
POC	15	118.5	474	—	1554	0.03	—
	25	74.5	298	—	1554	0.03	—
	35	30.5	122	—	1554	0.03	—
普通コンクリート	—	160	320	826	997	0.012	0.000015

[注]VR: 空隙率, HAE/C: セメント質量に対する高性能 AE 減水剤添加率,
AF/C: セメントに対する消泡剤添加率

の空隙率, 試験体の含水状態, 接触媒質の種類および押付け力を取り上げた。試験体の含水状態は, 湿潤状態と気乾状態の2水準とした。湿潤状態は超音波伝播速度の測定試験までに1週間水中養生して湿潤となった試験体を実験室に移動し, 2時間ほど水を切った試験体を用いた。気乾状態の場合は, 湿潤状態の超音波測定が終わった後, 実験室に常温で24時間乾燥させた試験体を用いた。試験体と超音波の発・受振子の間に設置する接触媒質には, グリスとシリコンシートと水の3種類とし, シリコンシートの場合は, 乾燥(以下, SSと略記)および+水(以下, SS+Wと略記)の2種類とした。ここで, SSとはシリコンシートをそのまま用い, SS+Wとはシリコンシートを超音波伝播速度の測定前に浸水してから用いたものである。シリコンシートは既往の研究⁷⁾により最適と考えられる硬度8°, 厚さ1mm, φ50mmのものを用いた。また, 押付ける力は, 30N, 60N, 90Nとした。

2.2 使用材料および調合

POCの使用材料として, 粗骨材には, 6号砕石(13~5mm)を用い, また, セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。セメントペーストの流動性を調節するために, 高性能AE減水剤を用いた。

表-2に, コンクリートの調合表を示す。本実験では, POCは粗骨材をセメントペーストで結合することとし, 細骨材は使用していない。セメントペーストの水セメント比は0.25で一定とした。

2.3 試験体の作製方法

本実験では, 実験要因以外の影響を減らすために, すべての試験体の接触面は研磨することとした。本実験に用いた試験体の例を写真-1に示す。

POC試験体には, 透水試験用に作製された円柱試験体(φ100×500mm)の打込み面から20~220mmの部分で切断し, 両端面を平滑になるまで研磨した円柱試験体(φ100×200mm)を用いた。

POCの練混ぜは, セメントと水および混和剤をミキサで60秒間練混ぜた後に, 粗骨材を投入して高速で120



(a) POC (φ 100 × 200 mm)



(b) 普通コンクリート (φ 100 × 200 mm)



(c) 岩石 (φ 50 × 100 mm)



(d) セメントペースト (φ 50 × 100 mm)

写真-1 試験体の例

秒間練り混ぜた。その後, 円柱型枠 (φ100×500 mm) に



図-2 超音波伝播速度試験の概要



写真-2 超音波伝播速度の測定の様子

所定量の試料を入れ、付き棒とコテを使用して締め固めた。

POCの試験体とは別に、超音波伝播速度試験用に岩石から採取されたコア試験体(φ50×100 mm) (以下、岩石試験体)、型枠に打ち込まれて作製されたセメントペースト試験体(φ50×100 mm, W/C=0.25)およびコンクリート(φ100×200 mm, W/C=0.5, s/a=0.46)試験体も用いた。

2.4 試験方法

(1) 空隙率試験

POCの試験体に対する空隙率試験は、日本コンクリート工学会によるPOCの空隙率試験方法(案)²⁾の質量法を準拠し、全空隙率を測定した。

(2) 超音波伝播速度試験

超音波伝播速度試験の概要を図-2に示す。超音波発・受振子(直径50mm, 周波数50kHz)を円柱供試体の両接触面の中央に当て、対面法により伝播時間を試験体ごとに5回測定した。式(1)により、超音波伝播速度を算出した。

$$V = L / T \quad (1)$$

ここに、V: 超音波伝播速度(m/s), L: 振動子間隔(m),
T: 伝播時間(s)

写真-2に、POCの超音波伝播速度の測定の様子を示し、写真-3に、試験機の発・受振子と試験体の接触面に用いた接触媒質の例を示す。超音波伝播速度試験では、グリスSSおよびSS+Wを接触媒質として用いた。ここでSS+Wを用いた測定は、浸水したシリコンシートを水から出してすぐ試験体の両端面に付け、発・受振子を密着させて測定を行った。SS+Wを用いた場合の水の量は、0.3g程度とした。写真-3(c)には、本実験に用いたSS+Wを水平に置いた時の様子を示す。また、発・受振子の押付け力の大きさは、押しバネの長さの変化量により管理した。ここで、弾性係数が2.57 N/mmの押しバネを用い、押付け力が30N, 60N, 90Nの場合に対し、押付け変位をそれぞれ12.8mm, 20.9mm, 31.6mmとした。

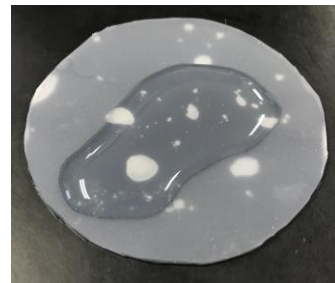
写真-4に、水中の超音波伝播速度の測定の様子を示



(a) グリス



(b) SS



(c) SS+W (0.3g 水)

写真-3 超音波伝播速度試験に用いた各媒質の例



写真-4 水中の超音波伝播速度の測定の様子

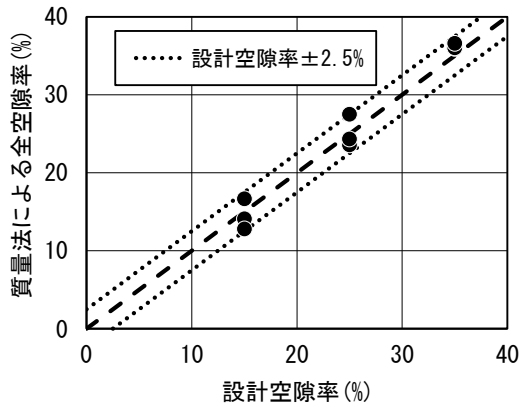


図-3 質量法による全空隙率と設計空隙率の比較

す。水中の超音波伝播速度の測定は、超音波発・受振子と試験体の接触面には、水を接触媒質として用いた場合とした方法である。試験体を水中に入れて、日本コンクリート工学会による POC の空隙率試験方法 (案)²⁾ の容積法を参考として、試験体の中の気泡を十分に抜き出し、試験体の空隙中の水の動きが安定した後に超音波の測定を行った。これは、試験体の空隙中での水の動きにより超音波伝播速度の結果に及ぼす影響を避けるためである。

3. 実験結果とその考察

3.1 空隙率試験

図-3 には、質量法による全空隙率と設計空隙率の比較を示す。図によれば、質量法による全空隙率は、設計空隙率よりほぼ±2.5%以内に納まっており、ほぼ設計空隙率を満足すると言える。

3.2 超音波伝播速度試験

(1) 試験体の含水状態の影響

図-4 には、超音波伝播速度における各材料の含水状態の影響を3本の試験の平均値により示す。各材料の超音波伝播速度は、岩石、コンクリート、セメントペーストおよび POC の順番で小さくなっている。また、含水状態の影響については、各材料において気乾状態の方が湿潤状態より少し小さくなっている。これは、湿潤状態から気乾状態に変わる時、コンクリート中で水であった孔が空隙となることによって、超音波伝播速度は低下すると考えられる。しかし、今回の実験には湿潤状態の試験体を実験室に置いて 24 時間乾燥させた状態を気乾状態とし、含水率として正確に把握していないため、今後は含水率を要因とした検討も必要であると考えられる。また、以下に説明する押付け力の影響は、気乾状態の結果により示す。

(2) 超音波伝播速度と押付け力の関係

図-5 には、超音波伝播速度と発・受振子の押付け力の関係を測定結果の平均値により示す。押付け力の影響について、水中測定の場合は、測定時に押付け力をほぼ

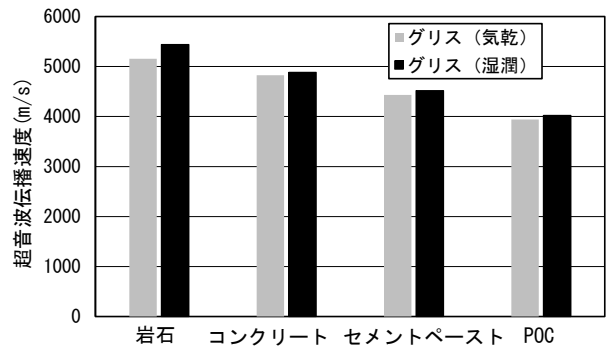
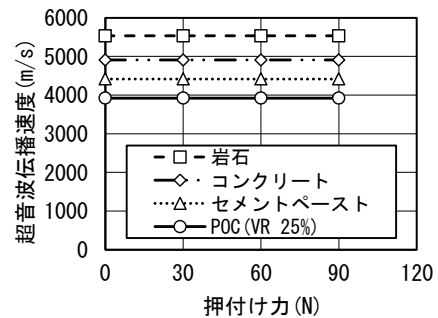
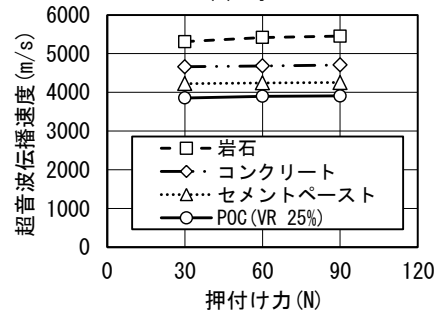


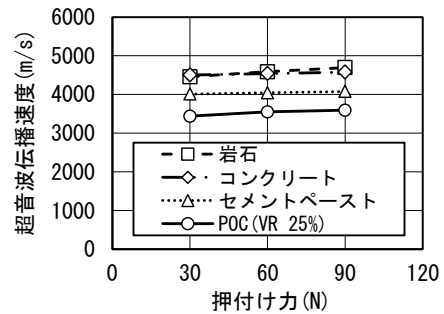
図-4 超音波伝播速度に及ぼす含水状態の影響



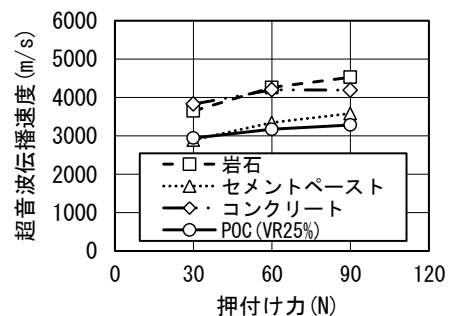
(a) 水



(b) グリス



(c) SS+W



(d) SS

図-5 超音波伝播速度と押付け力の関係

必要としないことが確認されたため超音波伝播速度を一定値として取り扱えた。その他の実験結果によれば、グリスを接触媒質として用いた場合は明確にも変化がない。また、SSを用いた場合は、押付け力が大きくなるほど大きくなっているが、SS+Wを用いた場合は、グリスと同様に押付け力の影響はほぼ見られていない。この理由としては、SSの場合は、試験体との接触面に空隙層（試験体表面の微細な空隙により発生する）の存在で密着度が押付け力により変化しやすいことと、SS+Wを用いた場合は、試験体との接触面の空気層が水で埋められることで、安定した密着度が得られたことなどが考えられる。また、測定後には試験体の表面に水が十分に残ったことが確認されており、本実験に用いた水の量は微細な空隙を埋めるには十分な量であったと言える。

(3) 超音波伝播速度の変動係数と押付け力の関係

図-6には、超音波伝播速度の変動係数と押付け力の関係を示す。超音波伝播速度の変動係数は、試験体ごとの5個データの変動係数である。図によれば、超音波伝播速度の変動係数は、水、グリスおよびSS+Wの場合は、押付け力が30Nからほぼ0.01以下になっており、押付け力による明解な影響が見られないと言える。また、SSの場合は、押付け力が大きくなると変動係数が小さくなる傾向が見られており、押付け力が60Nから変動係数が0.02以下になっている。この理由として、水とグリスは変形抵抗力の小さい媒質であるため、小さい押付け力の場合でも密着度を得ることができ、より安定した結果が得られたと考えられる。SSの場合は、試験体との接触面に空隙層が存在するため、押付け力により接触面積が変動し、超音波伝播速度のバラツキが他と比べて大きく生じるが、SS+Wを用いることにより、空隙層を水で埋めることができ、押付け力が小さい場合でも十分な接触面積をえることができたと考えられる。

以上の結果から、作業性を考慮すれば、SSの場合に押付け力が60N以上必要であること、グリスおよびSS+Wを用いた場合は30Nでも測定できること、および水を用いた場合に押付け力をほとんど必要としないことなどが分かった。

(4) POCの超音波伝播速度と空隙率の関係

図-7には、POCの超音波伝播速度と質量法による全空隙率の関係を示す。なお、各データ点は湿潤状態、押付け力が60Nで測定した時の15個データの平均値である。ここで、空隙率0%における超音波伝播速度には、普通コンクリートの超音波伝播速度がプロットしてある。図によれば、超音波伝播速度は、水、グリス、SS+WおよびSSの順番で小さくなっている。この理由としては、超音波伝播速度試験では、接触媒質の接触面積が小さくなった場合は受信波の振幅値が小さくなり、受振波の立

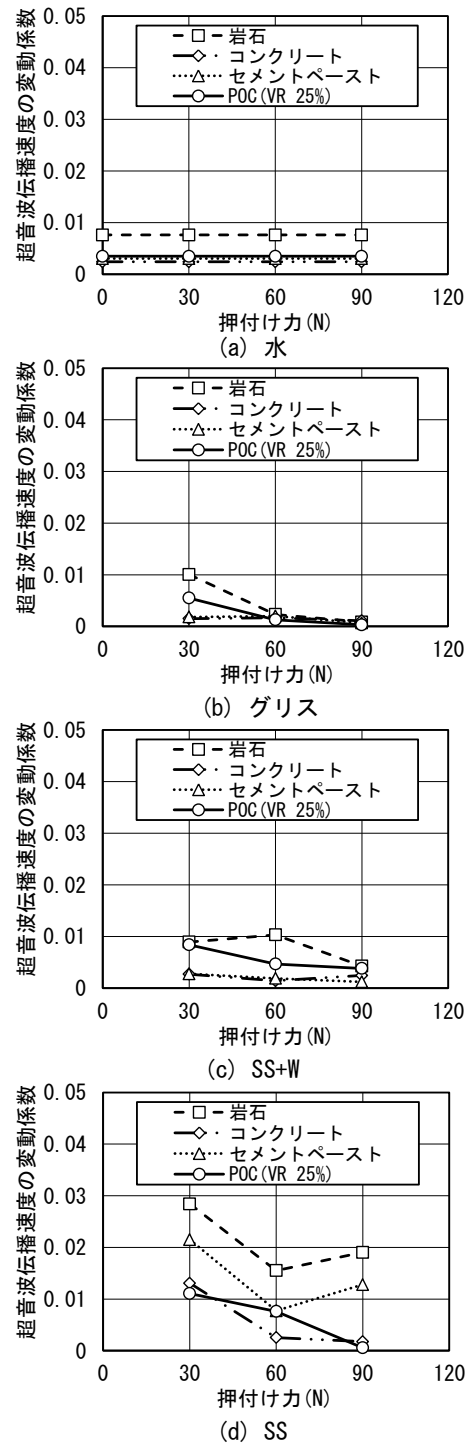


図-6 超音波伝播速度の変動係数と押付け力の関係

上り時間の遅れが生じて超音波伝播速度が小さく測定されることが知られている⁹⁾。本実験では、各接触媒質の試験体との接触面での微細な空隙を埋める程度を考えると、接触面積は水、グリス、SS+WおよびSSの順番で小さくなるため、超音波伝播速度が小さくなることが考えられる。

また同図には、POCの超音波伝播速度(y)-空隙率(x)関係の近似式を示す。近似式は、y切片(y_0)を頂点とした二次関数で設定し、POCのデータのみで最小二乗近似を

行い導出した。なお、同式に示す係数の-1.4 はグリスを用いた場合のデータにより決定した。また、 y_0 および決定係数 R^2 は、係数の-1.4 を一定とし、各媒質（水、グリ、SS+W または SS）のデータによりそれぞれ決定した。図によれば、上述した各媒質を用いた場合は、POC の超音波伝播速度は、空隙率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られており、空隙率と超音波伝播速度の関係は各媒質において切片の値のみ異なる同様な二次関数により近似できた。POC の超音波伝播速度と空隙率の関係は二次関数による近似できることは、石黒らの実験研究⁵⁾からも得られている。

以上の結果に加えて、各接触媒質を用いた超音波伝播速度の測定ごとに要したおおよその時間は、水中、SS+W、SS およびグリスの順番で、それぞれ 13sec, 18sec, 26sec および 32sec となった。また、水中の場合は測定前に水槽の準備が必要であること、グリスの場合は測定後の試験体の洗浄が必要であることなど、作業性および測定精度などを考慮すれば、本研究の範囲では、接触媒質として SS+W を用いる方法が最適であると考えられる。

6. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) POC の超音波伝播速度は、試験体の湿潤状態の方が気乾状態より少し大きい、空隙率と超音波伝播速度の関係にはほとんど影響しないと考えられる。
- 2) POC の超音波伝播速度は、シリコーンシートを用いた場合に押付け力の影響を大きく受けるが、シリコーンシートと水を用いることで押付け力の影響は改善できる。
- 3) POC の超音波伝播速度と空隙率の関係は、接触媒質として使用される媒質の種類の影響を受けるが、 y 切片のみが異なる二次関数により概ね近似することが可能である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、曹偉君（三重大学大学院研究生）の助力を得た。本研究費の一部は平成 28 年度科学研究費基盤研究 B（研究代表者：畑中重光）によった。ここに付記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，343pp., 2015.6
- 2) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリート

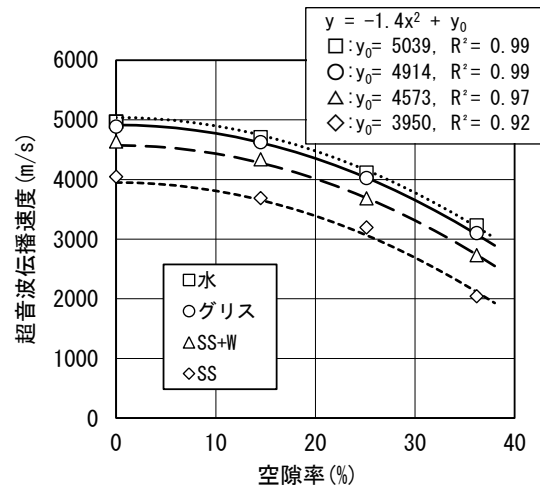


図-7 POC の超音波伝播速度と質量法による全空隙率の関係

の設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，231pp., 2003.5

- 3) 鎌田敏郎，国枝稔，島崎磐，六郷恵哲：超音波によるポーラスコンクリートの内部組成の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.733-738, 1998
- 4) 吉田知弘，音野琢也，北野嘉乙，国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲，超音波によるポーラスコンクリートの空隙評価に関する基本的検討，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.339-340, 2004.9
- 5) 石黒 覚，伊藤果穂，工藤舞子：石黒 覚，伊藤果穂，工藤舞子：ポーラスコンクリート供試体の超音波伝播速度，第 5 回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム「非破壊検査が担うコンクリート構造物の調査・点検技術の高度化・効率化」，pp.111-114, 2015.8
- 6) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：超音波によるポーラスコンクリートの空隙率および曲げ強度の推定に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.1725-1730, 2016
- 7) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの超音波伝播速度測定に対するシリコーンシートの適用性について基本的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016.8
- 8) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの超音波伝播速度測定へのシリコーンシートの適用性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2017.8
- 9) 平田隆祥，魚本健人：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定精度の向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1, pp.355-360, 2000.7