

## 論文 PC グラウト充填評価における弾性波パラメータの特性

国枝 泰祐\*1・鎌田 敏郎\*2・浅野 雅則\*3・六郷 恵哲\*4

要旨：本研究は、衝撃弾性波法によりPCグラウトの充填度評価を行う際に用いる弾性波パラメータに関して検討したものである。弾性波パラメータとしては、弾性波伝播速度および周波数分布に加えて、波形特性値として立上り時間を用い、実験的検討を行った。このうち、弾性波伝播速度に関しては、実験に加えて3次元FEM解析による検討も加えた。その結果、グラウト充填度の違いによる各パラメータの変化が明らかとなり、グラウト充填評価における弾性波パラメータの特性を把握することができた。

キーワード：非破壊検査，衝撃弾性波法，グラウト充填評価，FEM 解析，弾性波パラメータ

## 1. はじめに

PC グラウトは、鋼材の腐食による破断やプレストレスの低下を防ぐ重要な役割を担っている。したがって PC 構造物の維持管理を行う場合、グラウトの充填状況を非破壊的に調査・把握することが重要となる。

このグラウト充填評価の方法として、衝撃弾性波法の適用に関する研究が行われている<sup>1)~4)</sup>。衝撃弾性波法を用いた評価方法としては、(1)弾性波を部材断面方向に伝播させる方法 (Impact-Echo Method<sup>1)</sup>)と、(2)弾性波を部材長手方向に伝播させる方法<sup>2)~4)</sup>が考えられる。(1)の方法は、シース真上のコンクリート表面から弾性波を入力してシース内部の状況の評価する手法であるため、局部的調査手法と考えられる。この手法は点的な評価にとどまるもののグラウト未充填箇所の位置標定に利用できる。これに対して(2)は、部材長手方向に対する概略的な評価を行うものである。この方法では、PC鋼材端部において弾性波を入力し、部材内部を伝播した弾性波の特性を用いている。既往の研究では、主に周波数成分等の変化に着目した検討が行われている<sup>2),3)</sup>。しかしながら、グラウト充填度との定量的な関係を明らかにするまで

には至っていない。また、弾性波パラメータとしては、周波数分布以外にも弾性波伝播速度や波形特性等も考えられるが、いずれも未検討事項を残しているのが現状である。

そこで本研究では、弾性波パラメータとして弾性波伝播速度、波形の立上り時間および周波数分布を用いて、これらの指標のグラウト充填評価への適用性および有効性を検討した。実験は、スラブ供試体により行った。また、弾性波伝播速度については、実験に加えて3次元FEM解析も併せて行い、その特徴を解析的に検討した。さらに、PC部材を構成する材料の違いが弾性波伝播速度に与える影響についても検討を加えた。

## 2. 弾性波伝播速度の特性

## 2.1 スラブ供試体概要

本実験では、 $2,000 \times 250 \times 6,000$  [mm]のPCスラブ供試体を用いた。供試体の一例を、写真-1および図-1に示す。スラブ供試体の構成材料としては、表-1に示すように、PC鋼棒+コンジットシース(以下鋼棒シリーズ)およびPCストランド+スパイラルシース(以下ストランドシリーズ)の2種類を用いた。コンクリートの水

\*1 岐阜大学大学院学生 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

\*3 岐阜大学大学院学生 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)

\*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

セメント比は 37% である。また，スラブ供試体におけるグラウト充填度および充填形態のケースとしては，グラウトが PC 鋼材軸方向にわたってシース内部空隙に対する体積割合で 0%，25%，50%，75% および 100% 充填されたケース（表 - 1 および図 - 2 中の(a)），シース全長にわたり下半分に充填されたケース（表 - 1 および図 - 2 中の(b)）以下 h50）およびシース延長において部分的に 30% 充填されたケース（表 - 1 および図 - 2 中の(c)），以下 p30）を設定した。

### 2.2 計測概要

弾性波の入力位置および受振位置を図 - 3 に示す。弾性波の入力には，常に安定した打撃を行うことができるインパクトを用いた（写真 - 2 参照）。入力位置は PC 鋼材端部の中央部分とし，入力方向（図 - 3 参照）の違いが評価パラメータに与える影響を把握するため，グラウト充填側および未充填側からそれぞれ 10 回ずつ打撃した。また，弾性波の受振には 150kHz 共振型 AE センサを用い，伝播時間の計測にはデジタル AE 計測システムを用いた。センサの貼り付け位置は，PC 鋼棒両端部の定着プレート上とした。

### 2.3 解析概要

解析モデルは，スラブ供試体における鋼棒シリーズの実験結果と比較するため，鋼材にグラウト，シースおよびコンクリートを複合させた 3 次元モデル（寸法：250 × 250 × 6000 [mm]，図 - 4 参照）とした。表 - 2 に，解析で用いた構成材料の物性を示す。本解析で用いた構成材料は，すべて弾性体として扱った。グラウト充填形態は，実験の条件と同様のケース（図 - 5 中の(a) および(b)）に加えて，軸方向両端未充填（図 - 5 中の(c)），以下 p50）を加えたケースについて解析を行った。モデルに入力する衝撃荷重は図 - 6 に示す入力波形を用い，鋼材端部の中央に作用する節点荷重として設定した。解析における弾性波伝播速度は，実験における弾性波計測位置と同位置（定着プレート上）における節点において，変位が立上がる時間により計算した値を用いた。



写真 - 1 スラブ供試体全景

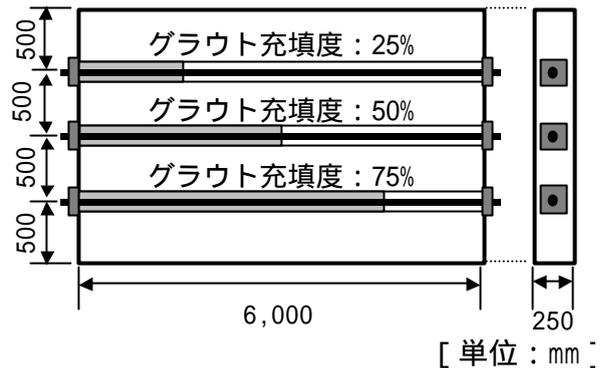
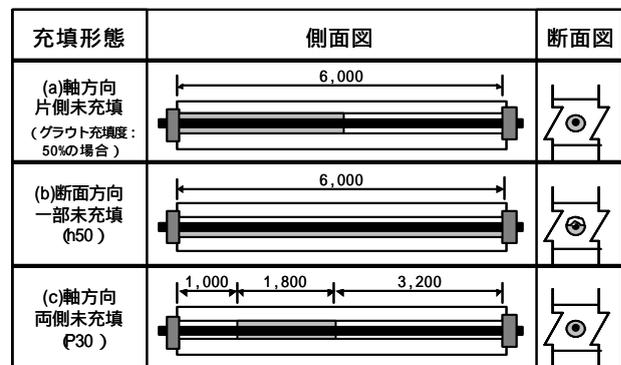


図 - 1 スラブ供試体の一例（平面図）

表 - 1 構成材料およびシリーズ名

		鋼棒シリーズ	ストランドシリーズ
PC 鋼材		PC 鋼棒 ( 23 )	PC ストランド ( 19.3 )
シース		コンジットシース ( 35 )	スパイラルシース ( 32 )
充填形態	グラウト充填度 (%)		
(a) 軸方向片側未充填	0		
	25		-
	50		
	75		-
	100		
(b) 断面方向一部未充填	50		
(c) 軸方向両側未充填	30		



[単位：mm]

図 - 2 グラウト充填形態

## 2.4 実験および解析の結果と考察

### (1) グラウト充填度と弾性波伝播速度の関係

図 - 7 に、鋼棒シリーズにおけるグラウト充填度と弾性波伝播速度の関係を実験および解析についてそれぞれ示す。なお、弾性波伝播速度の実験値は、10 回打撃による平均値である。これによると、解析値の方が若干小さい値を示しているが、実験・解析共にグラウト充填度が増加するに従って弾性波伝播速度が低下する傾向が確認できる。解析結果の傾向については、部材内部の弾性波伝播挙動を解析的に検討した結果<sup>4)</sup>とも一致しており、実験および解析の両面からグラウト充填評価に弾性波伝播速度を用いることの有効性が確認できた。

### (2) 弾性波入力方向の違いが弾性波伝播速度に与える影響

弾性波の入力方向に着目した場合は、実験および解析のいずれの結果においてもグラウト未充填側打撃による弾性波伝播速度(図 - 7 中の および )の方が充填側打撃(図 - 7 中の および )に比べて若干大きな値を示した。これは、未充填側打撃の場合は、入力された弾性波が、まず鋼材単体を伝播した後グラウトの拘束による影響を受けるのに対して、充填側打撃では、弾性波は入力直後にグラウトの影響を受けることによるものと考えられるが、この機構については、さらに詳細に検討する必要がある。しかしながら、入力方向の違いによる速度の差は小さいこと、かつ、入力方向によらずグラウト充填度が増加するに従って弾性波伝播速度が低下する傾向は同じであることから、実用上は入力方向の違いによる影響を考慮する必要はほとんどないものと考えられる。

### (3) グラウト充填形態の違いが弾性波伝播速度に与える影響

図 - 8 は、グラウト充填形態が異なる場合における弾性波伝播速度を示している。まず、実験値に着目すると、グラウト充填度が同じで充填形態の異なるケース(図 - 8 中の 50 と h50 の比較)での弾性波伝播速度は近い値を示してお

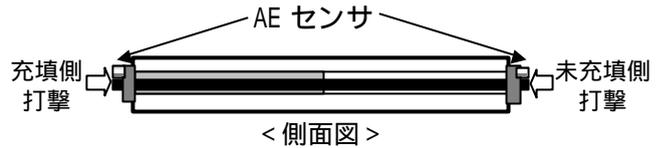


図 - 3 弾性波入力位置および受振位置

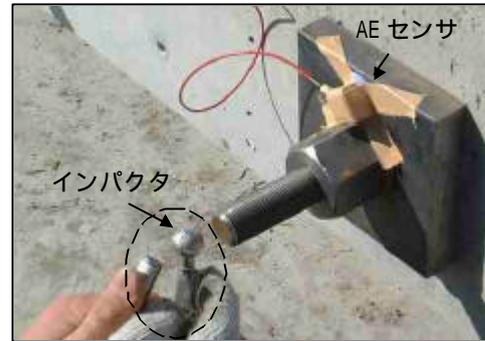


写真 - 2 入力の様子

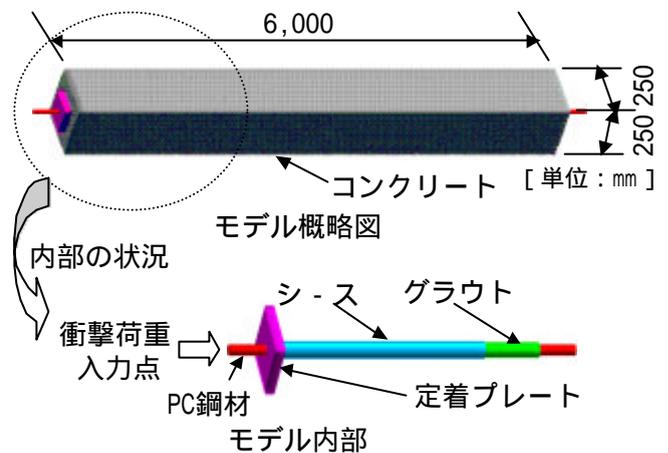


図 - 4 解析モデル

表 - 2 解析条件

構成材料	密度(g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比	弾性係数 (GPa)
コンクリート	2.3	0.2	42
グラウト	1.7	0.15	23
シース	5.6	0.3	119
定着プレート	7.4	0.3	138
PC鋼材	7.9	0.3	203

充填形態	側面図	断面図
(a)軸方向片側未充填 (グラウト充填率: 50%の場合)		
(b)断面方向一部未充填 h50		
(c)軸方向両側未充填 (グラウト充填率 50%) ϕ50		

[単位: mm]

図 - 5 グラウト充填形態

り、充填形態の違いによる弾性波伝播速度の変化は見られない。また、部分充填(図-8中のp30: グラウト充填度30%)の実験値は、片側未充填のグラウト充填度25%(図-7)の実験値と近い値を示している。このことより、本研究の範囲内では実験で得られた弾性波伝播速度は、シー内部におけるグラウトの体積率が同じであれば、充填形態には左右されないものであると考えられる。これに対し、解析結果(図-8中の50 p50 および h50 の比較)に着目すると h50 での値が他の値に比べ小さく実験値とも異なる(図-8中の点線囲部分)結果となった。むしろ h50 の解析値は、グラウト充填度100%の解析値(図-7)に近いと見ることもできる。これは、解析においてはPC鋼材におけるグラウトによる拘束区間の長さの影響が強く表れたためと考えられる。この点については、スラブ供試体の内部状況を確認するなどして詳細な検討を行っていく必要がある。

(4) 構成材料の違いが弾性波伝播速度に与える影響

図-9に、ストランドシリーズにおけるグラウト充填度と弾性波伝播速度の関係を、充填側打撃および未充填側打撃についてそれぞれ示す。これによると、ストランドシリーズにおいてもグラウト充填度が増加するに従って弾性波伝播速度が低下する傾向が確認できる。また、入力方向および充填形態の違いによる弾性波伝播速度の変化は見られない。これは鋼棒シリーズの傾向と一致しており、構成材料の組み合わせに左右されず本手法を用いることの有効性が示された。また、ストランドシリーズにおけるグラウト充填度の増加に伴う弾性波伝播速度の低下の割合は、鋼棒シリーズよりも顕著である。これは、ストランドは鋼棒よりも表面積が大きいため、グラウトにより拘束される面積が相対的に大きくなったためと考えられる。

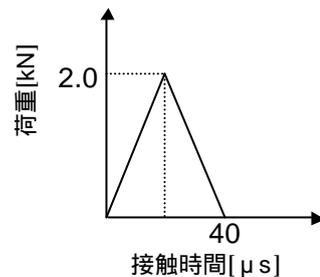


図-6 入力波形

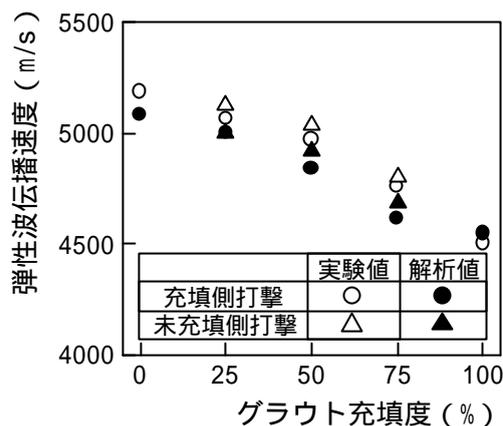


図-7 グラウト充填度 - 弾性波伝播速度 (鋼棒シリーズ)

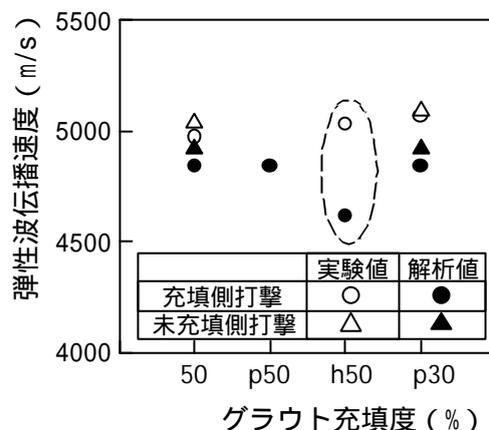


図-8 充填形態 - 弾性波伝播速度 (鋼棒シリーズ)

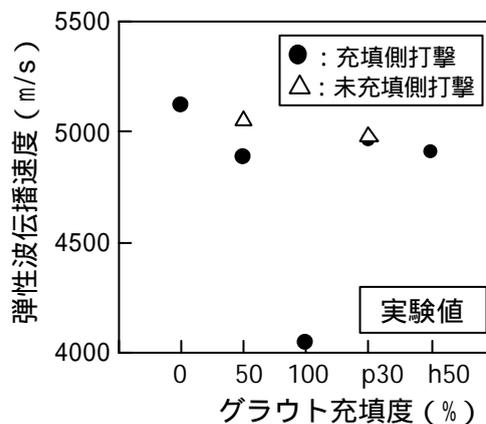


図-9 グラウト充填度 - 弾性波伝播速度 (ストランドシリーズ)

### 3. 立上がり時間および周波数分布の特性

弾性波伝播速度は、構成材料の材質(品質)により影響を受ける指標であるため、その絶対値のみにより一義的にグラウトの有無を判断することは難しい場合もある。このため、グラウトの有無による影響をより明確に反映しやすいと考えられるパラメータを求めることができれば、伝播速度による評価と併用することによって、グラウト充填評価の信頼性は高まるものと考えられる。

そこで本章では、波形の特性値である受振波形の立上がり時間に着目した検討を行った。また、受振波の周波数分布についても併せて考察を行い、立上がり時間が変化する要因について検討を加えた。

#### 3.1 実験概要

供試体には、前述のスラブ供試体を用いた(写真-1および図-1参照)。実験には鋼棒シリーズ(PC鋼棒+コンジットシーす)を用い、グラウト充填形態は軸方向片側未充填(グラウト充填度0%、25%、50%、75%および100%)とした。

弾性波の入力、受振およびその他の計測条件は2.2で述べたとおりである(図-3参照)。立上がり時間は、図-10に示すように、振幅が最初にしきい値を超えてから最大値に至るまでの時間として定義した。なお、打撃は1つのケースについて10回行った。

一方、波形そのものを記録し、その周波数特性を把握するため、別途、加速度計(周波数範囲:0.1~45kHzにおいて平坦な周波数応答特性を有する)を用いた計測も実施した。入力位置はPC鋼材端部(充填側打撃)とした。また、加速度センサの貼付位置は、PC鋼材端部の定着プレート(未充填側)とした。受振された波形はアンプを介し、A/D変換器を通してパソコン上に記録した。その後FFTにより周波数分布を求めた。

#### 3.2 実験結果および考察

図-11に、グラウト充填度と立上がり時間の関係を10回打撃の全ての結果について示す。これによると、グラウト充填度が0~75%の間で

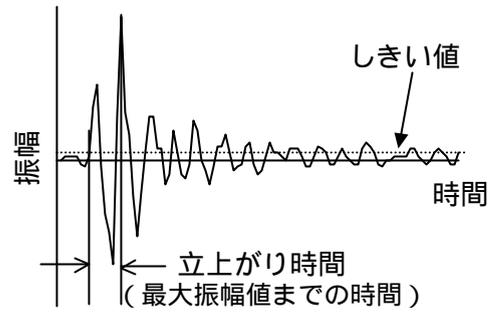


図-10 受振波形の一例

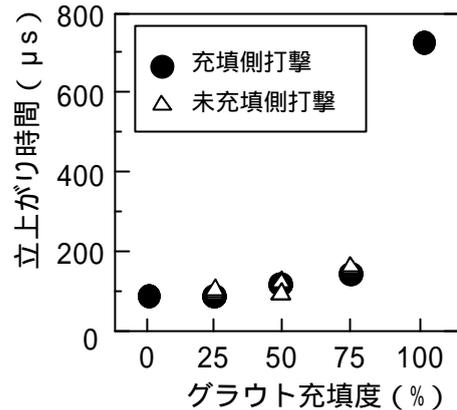


図-11 グラウト充填度 - 立上がり時間

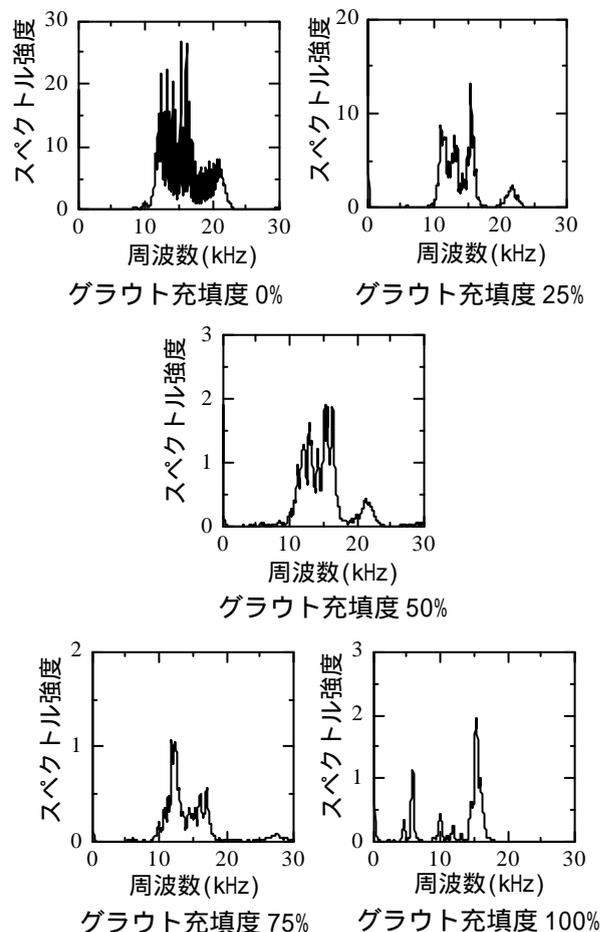


図-12 周波数分布

は、立上がり時間の違いはほとんど見られない。これに対してグラウト充填度 100% の場合のみ非常に大きな値を示している。しかも本実験の範囲内では、10 回打撃における結果の安定性は極めて高いものであった。これは、PC 鋼材の周囲にグラウトが存在した場合、鋼材中を伝播する弾性波がグラウト部分にも分散することにより減衰し、波形が変形したため立上がり時間が大きくなったものと考えられる。これより、弾性波伝播速度はグラウト充填度とともに徐々に変化する特性を有するのに対して、立上がり時間は、完全にグラウトが充填されている場合と、空隙部分が存在する場合の違いを明確に表現できるパラメータであると考えることができる。

次に、各グラウト充填度における周波数分布を図 - 12 に示す。これによれば、グラウト充填度が 0 ~ 50% の間では、グラウト充填度が大きいほどスペクトル強度が相対的に小さくなるものの、いずれの場合においても分布形状は類似しており、12kHz 付近、16kHz 付近および 22kHz 付近にピークが存在していることがわかる。したがって、この範囲において立上り時間の差が生じないのは、グラウトの影響による波形の変形が小さいためと考えられる。また、75% の場合では、16kHz 付近のピークに比べ 12kHz 付近のピークがより卓越した形状となっているものの、ピーク周波数自体は変化していない。これも、グラウト充填度 75% の立上り時間が、50% の場合と大きく違っていない理由と考えられる。

これに対して 100% の場合では、0 ~ 75% の場合には見られなかった 6kHz 付近に明確なピークが存在している。立上がり時間は 100% において飛躍的に大きくなっていることから、受振された波形の周波数成分の変化の影響が大きくあらわれたことによるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 弾性波伝播速度は、グラウト充填度の増加に伴い徐々に小さくなることから、実験およ

び解析結果より明らかとなった。また、弾性波入力方向の違いによる影響はほとんどなかった。

- 2) 本研究の範囲においては、弾性波伝播速度はグラウトが充填されている体積率により左右され、充填形態の違いによる影響は小さいことがわかった。
- 3) 構成材料が異なる場合においても、グラウト充填度と弾性波伝播速度の対応関係は同様の傾向を示した。
- 4) 波形特性値として立上がり時間を用いた場合、弾性波伝播速度と比較して、シーす内の空隙の有無をより明確に評価できる可能性が示された。
- 5) 周波数分布において特徴的な変化が見られる場合は、立上り時間の変動が大きくなることがわかった。

謝辞：実験の実施にあたり、(株)安部工業所の協力を得た。記してここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Barbara J. Jaeger, Mary J. Sansalone and Randall W. Poston: *Detecting Voids Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact-Echo Method*, ACI Structural Journal, Vol.93, No.4, pp.462-473, 1996
- 2) 黒野幸弘, 山田和夫, 中井裕司: 衝撃弾性波法を適用した PC 床板のグラウト充填性評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1175-1180, 1995
- 3) 斎藤宏行, 尼崎省二: 衝撃弾性波法による PC グラウト充填評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1267-1272, 1999
- 4) 国枝泰祐, 鎌田敏郎, 浅野雅則, 六郷恵哲: 弾性波の伝播速度に着目した PC グラウトの充填評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1551-1556, 2002