

論文 衝撃弾性波法による PC グラウト充填評価に関する研究

斎藤宏行*1・尼崎省二*2

要旨: PC グラウトの充填状況を確認するための非破壊検査法については、様々な手法が開発または検討されているが、スペクトル解析を併用した衝撃弾性波法が有効と考えられている。本研究では、前報に示したスペクトルの重心(以下スペクトル重心)、弾性波速度の変化に着目しながら PC 梁供試体を用い、グラウト充填評価に関する検討を行った。その結果、この2つの評価方法を併用することがグラウト充填評価に有効であることが分かった。また、PC 鋼棒径の変化や、打撃方法(打撃速度、使用鋼球の大きさ)の違いが評価方法に及ぼす影響についても検討を行った。

キーワード: PC 構造物, グラウト充填評価, 衝撃弾性波法, スペクトル解析

1. はじめに

本研究では PC 構造物特有の課題である PC 鋼材の腐食対策としての PC グラウトの充填評価方法について取り上げた。PC グラウトの充填不良は、PC 鋼材の腐食破断を生じるおそれがある。実際に近年、国内外においてグラウト不良が原因と思われる道路橋における PC 鋼棒の破断事故が報告¹⁾されており、PC グラウトに関する技術の再検証と同時に、現在供用されている PC 橋のグラウト充填状況を点検し、グラウト不良が生じている箇所については適切な対策を講じることが急務となっている。著者らは過去にスペクトル解析を併用した衝撃弾性波法を用い、PC グラウトの充填評価に関する研究を行ってきたが、適切なグラウト充填評価は困難であった。

本研究は、PC 構造物への適用を目的に、PC 梁供試体のグラウト充填状況や PC 鋼棒径の変化が PC 鋼棒から検出した弾性波の波形およびスペクトル重心²⁾に及ぼす影響を検討したものであり、グラウト充填状況や PC 鋼棒径の変化に応じたスペクトル重心の変化を確認できた。また、打撃方法の違いが測定結果に及ぼす影響についてもあわせて検討を行った。

2. 実験概要

本実験では、シース(φ28mm, φ70mm)によりダクトを設けた梁供試体(表-1 参照)を打設し、PC 鋼棒 B 種 1 号 (φ9.2 mm, φ17mm, φ26mm) を緊張力約 600N/mm² で断面中央に配置した。供試体は図-1 に示すグラウト(表-2 参照)充填率の異なるもの及び図-2 に示す PC 鋼棒径およびグラウト充填率の異なるものを作製した。衝撃弾性波は打撃を一定とするため図-3 に示すように振り子を用い、2 種類の鋼球(表-3 参照)を使用し、打撃速度 0.5, 1, 2, 3m/s で PC 鋼棒端部に入力した。供試体に生じる弾性波は PC 鋼棒端部および定着

表-1 コンクリートの配合例

W/C (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
45	5±1	179	398	729	972

表-2 グラウト材の配合

W/C(%)	単位量(kg/m ³)		
	W	C	混和剤
45	578	1284	128.4

表-3 鋼球の種類

鋼球	質量(g)	直径 (mm)
A	542.0	50.6
B	16.0	15.8

*1 栃木県 工修 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

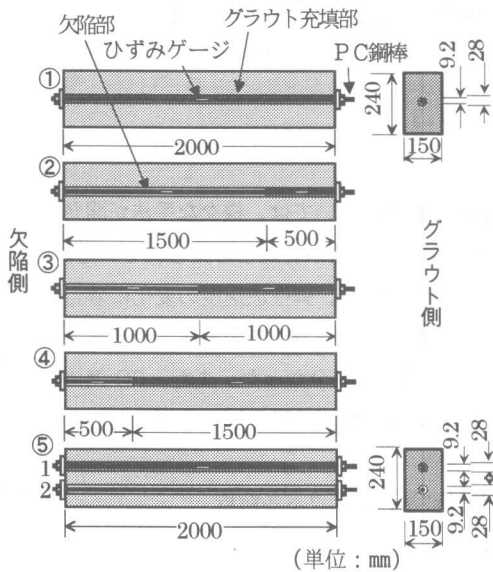


図-1 グラウト充填率の異なる供試体

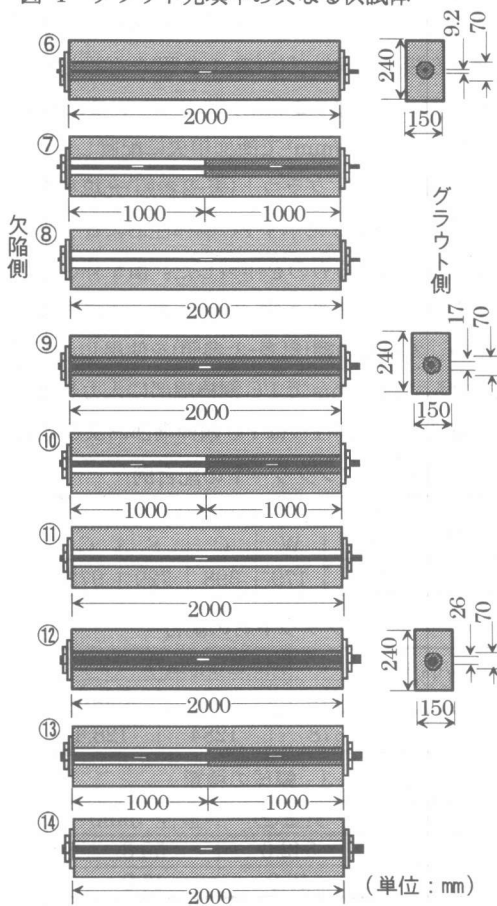


図-2 グラウト充填率および鋼棒径の異なる供試体

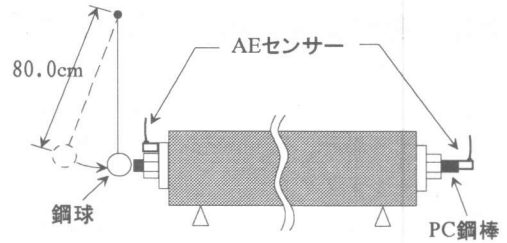


図-3 打撃および測定方法

部に設置した AE センサー($f=140\text{kHz}$)を用いて検出した。以後、供試体においてグラウト充填側をグラウト側、反対側を欠陥側と称する(図-1、図-2 参照)。

3. 実験結果

3.1 打撃方法がスペクトル重心に及ぼす影響

打撃方法の違いがスペクトル重心に及ぼす影響を検討するために、PC 鋼棒($\phi 26\text{mm}$)を用いた実験を行った。図-4(a), (b)は、鋼球 B で PC 鋼棒端部を打撃した時に、打撃と反対側 PC 鋼棒端部で得られた弾性波の波頭部で、打撃速度は 3m/s および 0.5m/s である。PC 鋼棒と鋼球の接触時間を、波頭部の立上りから振幅値が 0V になるまでの時間(図-4 参照)とすると、接触時間は打撃速度が速いときの方が短くなっている。図-4(a), (b)より得られる接触時間 $39, 57\mu\text{s}$ は式(1)で算出した接触時間³⁾ $36, 53\mu\text{s}$ とほぼ一致しており、式より打撃速度すなわち落下高さ H が発生周波数に及ぼす影響が大きいことがわかる。

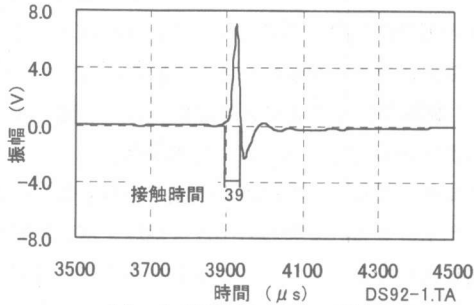
$$\left. \begin{aligned} T_c &= 5.97 \{ \rho (\delta_p + \delta_s) \}^{0.4} R / H^{0.1} \\ \delta_p &= (1 - \nu_p^2) / (\pi E_p) \\ \delta_s &= (1 - \nu_s^2) / (\pi E_s) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 ρ : 鋼球の密度 (kg/cm^3), R : 鋼球の半径 (m), H : 落下高さ (m), ν_p , E_p : 落下面のポアソン比と弾性係数 (Pa), ν_s , E_s : 鋼球のポアソン比と弾性係数 (Pa) である。

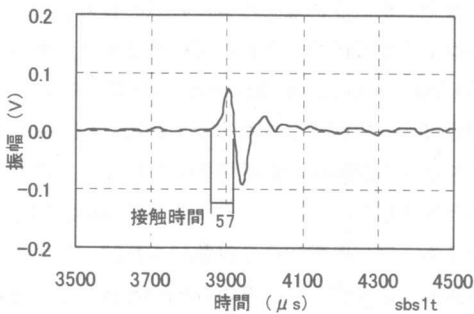
弾性波は接触時間(T_c)の2倍の周期を有する正弦波であると仮定して求めた上限周波数と接触時間の関係を表-4 に示す。

また、図-5 は PC 鋼棒($\phi 26\text{mm}$)を用いて同様の測定を行ったときの弾性波のスペクトル重心(最大解析周波数: 50kHz)と打撃速度の関係を

表したものである。打撃速度が速くなるにともないスペクトル重心が高くなっており、打撃速度の



(a) 打撃速度 3m/s, 鋼球 B



(b) 打撃速度 0.5m/s, 鋼球 B

図-4 打撃速度が異なる場合の波頭部(φ26mm P C鋼棒)

表-4 打撃速度と上限周波数の関係

打撃速度 (m/s)	接触時間 T_c (μ s)	上限周波数 (kHz)
0.5	53	9.5
1	45	1.1
2	39	1.3
3	36	1.4

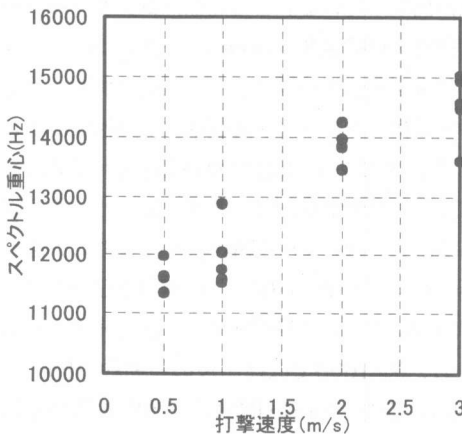


図-5 打撃速度とスペクトル重心の関係

違いがスペクトル重心に与える影響が大きいことがわかる。したがって、スペクトル重心を用いた評価においては、打撃速度を一定にすることが重要であると考えられる。

図-4(b)および図-6は打撃速度 0.5m/s でそれぞれ鋼球 B および A を使用し、PC 鋼棒(φ26mm)を打撃した時の波頭部である。鋼球と PC 鋼棒の接触時間は、鋼球 A の方が鋼球 B のときよりも長くなっており、式(1)から鋼球の半径 R が小さい方が PC 鋼棒に高い周波数を有する弾性波を入力できることがわかる。鋼球 A, B を用いて行った同様の測定では、スペクトル重心(5 回測定の平均値) 3140Hz, 11440Hz が得られ、小さい鋼球を用いた方がスペクトル重心は大きくなることがわかる。

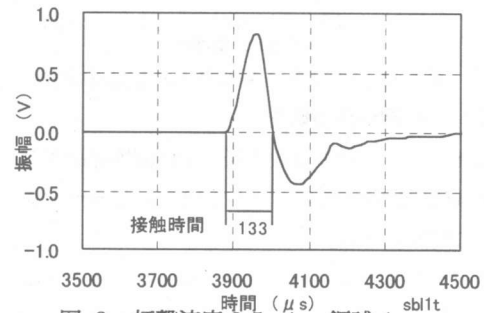


図-6 打撃速度 0.5m/s, 鋼球 A の波頭部(φ26mm P C鋼棒)

3.2 スペクトル重心によるグラウト充填評価

(1) グラウト充填率の影響

図-7 は、グラウト充填率の異なる梁供試体(図-1)において鋼球 A を用いて打撃速度 1.5m/s で欠陥側 PC 鋼棒端部を打撃した時に、グラウト側 PC 鋼棒端部で得られた弾性波のスペクトル重心(最大解析周波数: 20kHz)とグラウト充填率の関係を表したものである。

PC 鋼棒が細く常にその中心を打撃できないため、スペクトル重心のばらつきは大きいですが、スペクトル重心はグラウト充填率の増加にともない低下する傾向にある。これは、PC 鋼棒に発生している高周波数成分がグラウト部の影響によって減衰する⁴⁾ためである。PC 構造物においても以上のような要因は考えられるためスペクトル重心を用

いたグラウト充填評価は可能であると考えられる。なお、グラウト部による高周波数成分の減衰によってスペクトル重心は変化していることから、欠陥部の位置に関係なくグラウト充填評価できる可能性は大きいと考えられる。

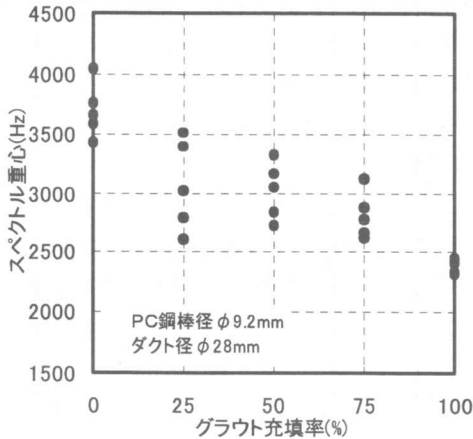


図-7 グラウト充填率とスペクトル重心の関係
(2) PC 鋼棒径の影響

図-8 は、グラウト充填率及び PC 鋼棒径の異なる供試体(図-2)でのスペクトル重心とグラウト充填率の関係である。

図-7 と同様にスペクトル重心は、グラウト充填率の増加にともない低下している。しかし、PC 鋼棒が太くなるにしたがいスペクトル重心の変化する割合が小さくなってきており、φ26mm PC 鋼棒ではほとんどスペクトル重心の変化を確認で

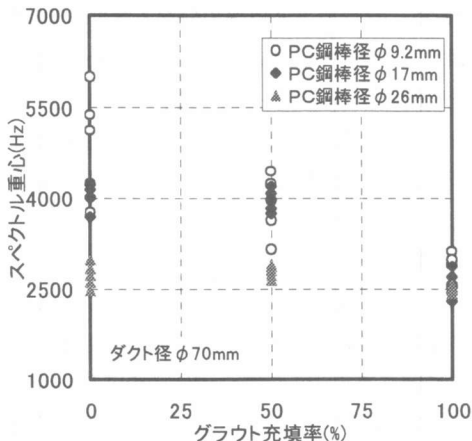


図-8 PC 鋼棒径の異なる供試体における
スペクトル重心とグラウト充填率の関係

きない。これは、PC 鋼棒が太くなるほど、同一の打撃によって PC 鋼棒に生じる応力は相対的に小さくなるため、PC 鋼棒に発生する高周波数成分の影響が検出されにくくなり、スペクトル重心の変化が小さくなったと考えられる。したがって、PC 鋼棒が太くなるにともない、打撃を強くする必要があると考えられる。この場合、同じ打撃エネルギーであっても高周波数成分を有する弾性波を発生させる。すなわち小さな鋼球を使い打撃速度を速くすることが、スペクトル重心により評価をする場合有効であると考えられる。

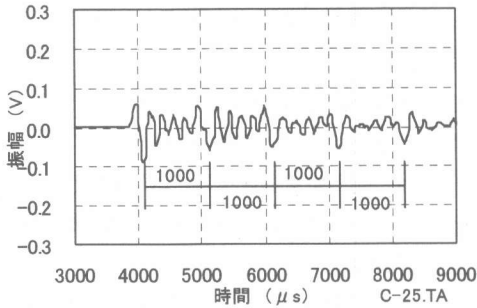
また、データのばらつきは打撃の良否によりスペクトル密度の分布状況が変化するためであり、φ17mm、φ26mm 鋼棒のデータがφ9.2mmの場合に比べてばらつきが少ないのは、PC 鋼棒が太くなると鋼棒中心の打撃が容易になるためであると考えられる。したがって、PC 鋼棒が細くなっても、常にその中心を打撃できれば、スペクトル重心によるグラウト充填評価が可能になると考えられる。

(3) ダクト径の影響

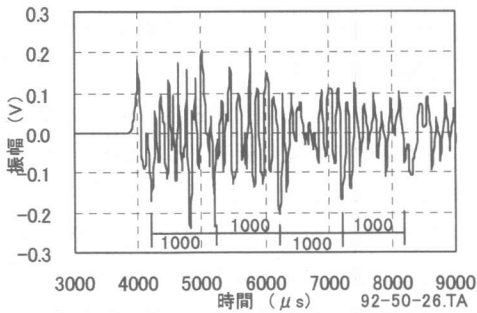
図-9 および図-10 は、ダクトの径のみが異なる供試体③、⑦(ダクト径φ28mm、φ70mm)において鋼球 A を用いて打撃速度 1.5m/s で欠陥側 PC 鋼棒端部を打撃した時に、グラウト側 PC 鋼棒端部で得られた弾性波の波頭部およびスペクトルの代表例であり、図中に示す周期あるいは周波数には再現性が認められている。図-9(a)には 1000μs 周期が出現している。この周期はコンクリートの平均弾性波伝播速度 4400m/s で、長さ 2m の供試体を往復する伝播時間にほぼ一致しており、検出波が供試体コンクリートを伝播する弾性波に大きく影響されていることがわかる。図-9(b)にも 1000μs 周期が出現しているが、(a)と比べ不明確である。これは、(b)の振幅値が(a)よりも大きくなっていることから、(b)で PC 鋼棒を伝播している弾性波がより多く検出されたためと考えられる。

一方、図-10(a)では検出波の周期約 1000μs に対応する約 1000Hz 間隔の卓越周波数が主に出現しているのに対して、図-10(b)では約

1000Hz 間隔以外の卓越周波数(2575Hz, 7850

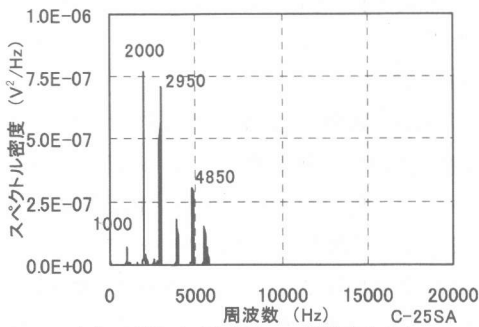


(a) ダクト径φ28mm (供試体③)

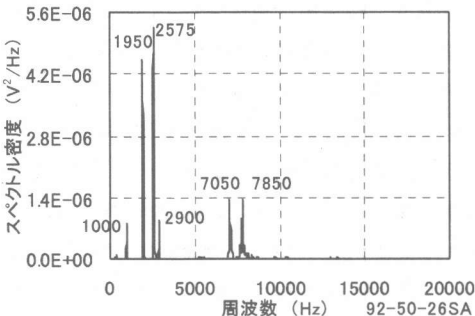


(b) ダクト径φ70mm (供試体⑦)

図-9 ダクト径の異なる場合の波頭部



(a) ダクト径φ28mm (供試体③)



(b) ダクト径φ70mm (供試体⑦)

図-10 ダクト径の異なる場合のスペクト

Hz など)も出現している。したがって、ダクト径の大きい方が PC 鋼棒を伝播する弾性波の影響は検出されやすいと考えられる。

図-11 に、ダクト径のみが異なる供試体におけるスペクトル重心とグラウト充填率の関係を示す。ダクト径φ28mm に比べダクト径φ70mm では、スペクトル重心の変化する割合が大きくなっている。これは、ダクト径φ70mm において、PC 鋼棒を伝播している弾性波の影響がより検出されたためであると考えられる。したがって、PC 構造物においてスペクトル重心を用いた評価を行う場合には、ダクト径の大きい方がグラウト充填評価は有効となる可能性がある。

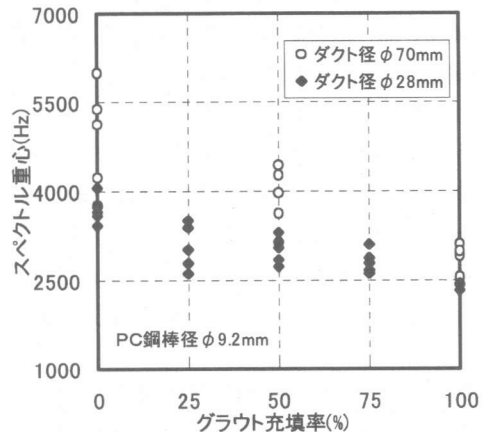


図-11 ダクト径の異なる供試体における
スペクトル重心とグラウト充填率の関係

3.3 弾性波速度によるグラウト充填評価

図-1および図-2に示す梁供試体の欠陥側PC鋼棒端部を鋼球Aで打撃したときに打撃点近傍の定着部およびグラウト側 PC 鋼棒端部に設置した AE センサーから得られた波形の立上り時間差から求めた、供試体を伝播する弾性波速度を表-5および表-6に示す。表-5でグラウト充填率の増加にともなって伝播速度が遅くなる傾向がみられる。これは、グラウト材の影響によって PC 鋼棒を伝播する弾性波速度が遅くなったためである⁵⁾。また、供試体①, ③, ④では 4400m/s と同じ弾性波速度を示している。これは、PC 鋼棒を伝わる弾性波速度がグラウト材の影響によって遅くなった

ために、供試体コンクリート中を伝播した弾性波（実測値 4400m/s）が検出されたためと考えられる。この傾向は表-6 に示す PC 鋼棒径 $\phi 9.2\text{mm}$ (供試体⑥, ⑦, ⑧) にも生じている。一方、PC 鋼棒径 $\phi 17$, $\phi 26\text{mm}$ (供試体⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭) では、グラウト充填率 50% 以上でも弾性波速度の違いを確認できた。これは、PC 鋼棒が太くなるとともに、グラウト材の影響による弾性波速度の低下が少なくなったためであると考えられる⁵⁾。供試体⑩, ⑪, ⑬, ⑭のグラウト充填率と弾性波速度の関係から、グラウト充填部の PC 鋼棒を伝播する弾性波速度は約 4200m/s と算出される。本実験においては、この値を用いるとグラウト充填率 90% 以下までは弾性波速度によるグラウト充填評価できる可能性がある。したがって、鋼棒が太い場合は弾性波速度によるグラウト充填評価が有効であると考えられる。しかしながら、PC 構造物での測定では、PC 鋼棒の径、グラウトの弾性波速度およびダクト径等によって弾性波速度の低下する割合が異なることがあり、弾性波速度よりグラウト充填率を評価することは困難と思われる。したがって、コンクリート部よりも速い伝播

速度が得られた PC 鋼棒にはグラウト欠陥部が存在する可能性があるため、スペクトル重心による評価を併用することが有効と考えられる。

4. 結論

本実験で得られた結果は以下のようである。

- (1) グラウト充填率の増加にともない、スペクトル重心は低下する。ただし、PC 鋼棒が太くなり、ダクト径小さくなるにともない低下する割合は減少する。
- (2) スペクトル重心による評価を行う場合、小さな鋼球により強く打撃する。すなわち強くて高周波数成分を有する弾性波を入力することが有効と考えられる。
- (3) PC 鋼棒を伝わる弾性波速度はグラウト充填率の増加にともない低下する。ただし、PC 鋼棒が細くなると評価は困難となる。
- (4) 本実験では、鋼棒が細い場合はスペクトル重心による評価が有効であり、鋼棒が太くなるほど、弾性波速度による評価が有効であった。したがって 2 つの方法の併用が有効となる可能性が大きいと考えられる。

参考文献

- 1) 望月秀次, 本間淳史, 上東泰: PC グラウトの施工技術の現状と非破壊検査による点検, コンクリート工学, Vol.34, No.6, pp.4-13, 1996
- 2) 岩波光保, 大即信明: コンクリート中における弾性波伝播特性に関する基礎的研究, セメントコンクリート論文集, NO.52, pp.598-602, 1998
- 3) 白鳥雅也, 松貝勇, 岡村雄樹: 軽い衝撃を受けるコンクリート部材の応答解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, pp679-684, 1992
- 4) 中野将士, 尼崎省二: 衝撃弾性波法による PC グラウトの充填評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.287-292, 1998
- 5) H.W.Chung: Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.30, No.102, pp.19-25, 1978.3

表-5 グラウト充填率と弾性波速度の関係

供試体名	鋼棒径 (mm)	グラウト充填率 (%)	伝播速度 (m/s)
⑤-2	9.2	0	5200
②	9.2	25	4700
③	9.2	50	4400
④	9.2	75	4400
①	9.2	100	4400

表-6 鋼棒径の違いと弾性波速度の関係

供試体名	鋼棒径 (mm)	グラウト充填率 (%)	伝播速度 (m/s)
⑧	9.2	0	5200
⑦	9.2	50	4300
⑥	9.2	100	4300
⑪	17	0	5200
⑩	17	50	4700
⑨	17	100	4300
⑭	26	0	5200
⑬	26	50	4700
⑫	26	100	4300