

論文 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

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、グラウト充填状況の確認方法の一つであるスペクトル解析を併用した衝撃弾性波法では、経験的で相対的な評価がなされており、理論的検討がなされていないのが現状である。本研究では、衝撃弾性波法による PC グラウトの充填評価に関する基礎的研究として、グラウト充填部の長さや PC 鋼棒径の変化が、PC 鋼棒から検出された弾性波の波形やスペクトルに及ぼす影響を検討した。その結果、グラウト材の長さや鋼棒径に応じたスペクトルの変化が認められた。

キーワード：PC 構造物、グラウト充填評価、衝撃弾性波法、非破壊検査

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、基礎的研究としてグラウト充填部の長さや PC 鋼棒径の変化が PC 鋼棒から検出した弾性波の波形やスペクトルに及ぼす影響を検討したものであり、検討の結果グラウト充填部の長さや PC 鋼棒径の変化に応じたスペクトルの変化を確認できた。

2. 実験概要

本実験では、PC 鋼棒 B 種 1 号 ($\phi 9.2$ mm, $\phi 13$ mm, $\phi 26$ mm) を使用し、図-1①②③④に示すグラウト部分(表-1, 表-2 参照)の長さが異なる供試体、及び図-1⑤⑥⑦に示す PC 鋼棒の径が異なる供試体を作製した。衝撃弾性波は図-2 に示す振り子を用い、質量 3.2g の鋼球で PC 鋼棒端部に発生させた (打撃速度 3m/s)。供試体に生じた弾性波は PC 鋼棒端部及びグラウト部に設置した AE センサー($f=140$ kHz), PC 鋼棒の弾性波はひずみゲージ(長さ 1mm)を用いて検出した。

表-1 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-2 グラウト材の物理的性質

静弾性係数 (GPa)	単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (MPa)	伝播速度 (m/s)
10.8	1830	24.5	3500

* 1 立命館大学大学院 理工学研究科 環境社会工学専攻 (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)

なお、弾性波の伝播速度は超音波法により、鋼棒両端に設置した超音波センサー($f=300\text{kHz}$)によって測定した。

以後、供試体においてグラウト部作製側をグラウト側、PC 鋼棒が露出している側を欠陥側と称する (図-1 参照)。

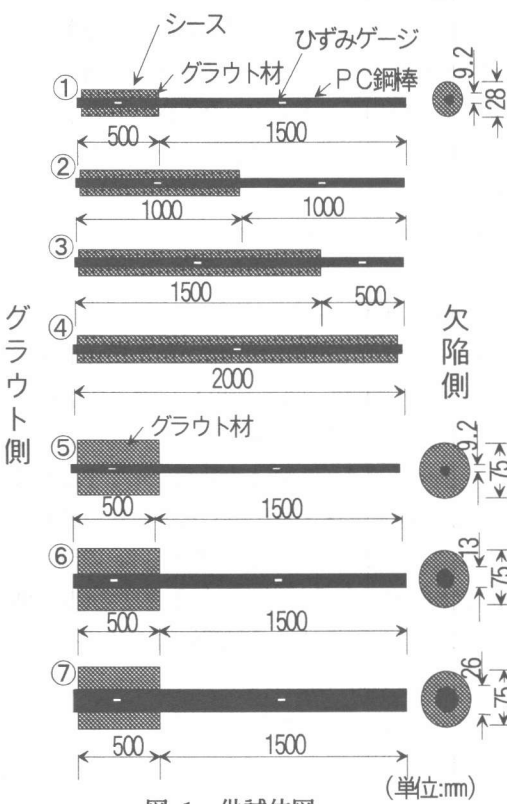


図-1 供試体図

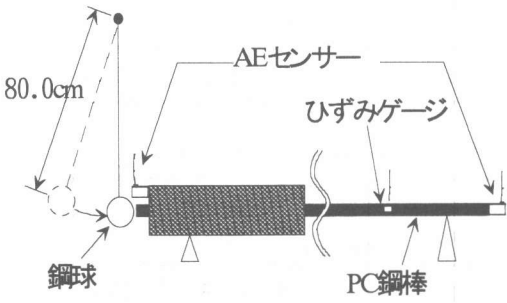


図-2 打撃および測定方法
(グラウト側打撃)

3. 実験結果

3.1 グラウト長さおよびスペクトル特性の関係

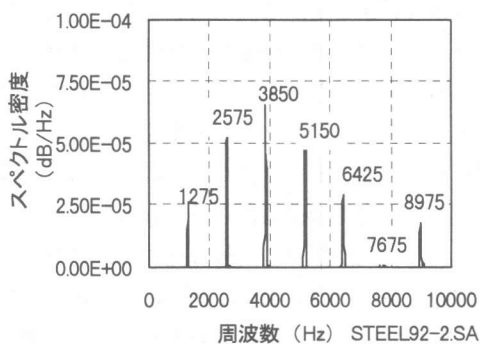
図-3 および図-4 は、PC 鋼棒($\phi 9.2\text{mm}$, 長さ 2000mm) 及び供試体④ (グラウト長さ 2000mm) を両端自由で支持し、欠陥側 PC 鋼棒端部を打撃した時に、グラウト側 PC 鋼棒端部で得られた弾性波のスペクトルおよび波頭部である。図-3(a), (b)において、1 次卓越周波数はそれぞれ 1275 および 800Hz である。また、卓越周波数の間隔はほぼ 1280 および 810Hz であり、供試体④の弾性波スペクトルは、PC 鋼棒で得られた周波数よりも低い周波数が出現している。ただし 1 次卓越周波数と卓越周波数の間隔が多少異なるのは、周波数分解能の影響のためである。

図-4 (a), (b)の弾性波の波頭部には、PC 鋼棒を伝播する弾性波速度を約 5100m/s, 3300m/s とした時の PC 鋼棒終端での反射波が明確に検出されている。この周期 $780\mu\text{s}$ および $1230\mu\text{s}$ は、図-3(a), (b)の 1 次卓越周波数 1275 および 800Hz にほぼ対応している。同様に卓越周波数の間隔約 1280Hz および 810Hz にもほぼ対応している。すなわち、PC 鋼棒を伝播する弾性波速度の見掛けの低下により、低い周波数が卓越すると考えられる。

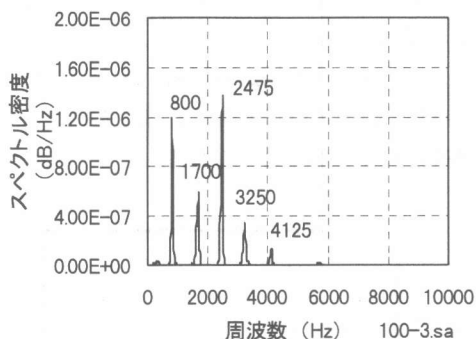
ただし、ここで用いた伝播速度約 5100m/s, 3300m/s は、縦波共振周波数を用いて求めた速度であり、表-3 に示す超音波伝播時間より算出した伝播速度と多少異なる²⁾。

表-3 PC鋼棒およびグラウト長さ
の異なる供試体の伝播速度

供試体名	グラウト 長さ(mm)	鋼棒径 (mm)	伝播速度 (m/s)
PC 鋼棒	0	9.2	5200
供試体①	500	9.2	5000
供試体②	1000	9.2	4600
供試体③	1500	9.2	4300
供試体④	2000	9.2	4100

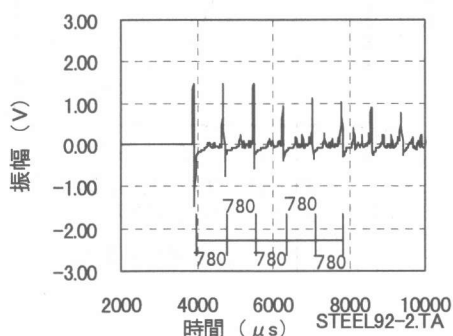


(a) PC 鋼棒(φ9.2mm, 長さ 2000mm)

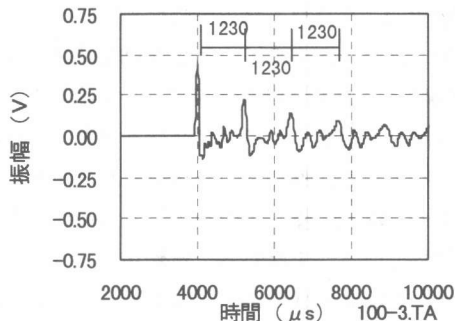


(b) 供試体④(グラウト長さ 2000mm)

図-3 PC 鋼棒と供試体④のスペクトル



(a) PC 鋼棒(φ9.2mm, 長さ 2000mm)



(b) 供試体④(グラウト長さ 2000mm)

図-4 PC 鋼棒と供試体④の波頭部

図-5 は、PC 鋼棒(φ9.2mm) およびグラウト材と PC 鋼棒の直径が一定でグラウトの長さのみが異なる供試体(図-1①②③④)から検出した弾性波スペクトルと供試体長さに対するグラウト長さの比(以下グラウト長さ比)との関係を表したものである。卓越周波数は、グラウト長さ比の増加にともなって低い周波数へ移動している。これはグラウト長さ比の増加にともない PC 鋼棒を伝播する弾性波速度が、低下するためであると考えられる(表-3 参照)。また、この傾向は、高次の卓越周波数になるほど顕著になっているが、これは伝播速度の低下にともない卓越周波数の出現間隔が狭くなっていくためと考えられる。

これより、グラウト長さ比が増加するとともに、検出弾性波は低い周波数が卓越するという特性を示すと考えられる。したがって、PC 構造物においても、グラウト充填率が高くなるとともに、低い卓越周波数が出現するというスペクトル特性が検出できれば、グラウト充填評価につながると考えられる。

図-6 は、図-5 と同様の測定により得られたスペクトルの重心を示したものである。(最大解析周波数: 20kHz) データにばらつきがあるため、それぞれ 10 回ずつ測定した。スペクトルの重心は、グラウト長さ比の増加にともない、低下している。これは、前述したグラウト長さ

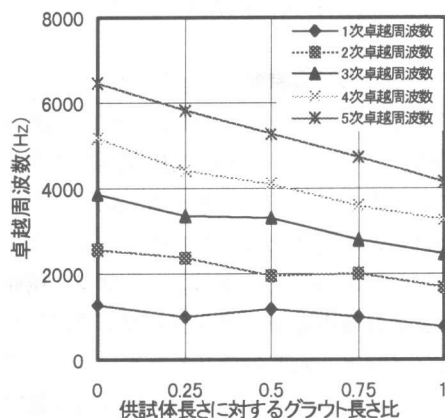


図-5 卓越周波数とグラウト長さ比の関係

比の増加にともない、低い周波数が卓越するという特性に対応している。これより、スペクトルの重心は、グラウト長さ比を評価するのに有効であると考えられる。

また、図-6 においてスペクトルの重心にばらつきが生じている。これは、打撃の良否によってスペクトル密度の分布状況が多少変化するためであり、PC 鋼棒(グラウト長さ比 0)に特に大きなばらつきがあるのは、スペクトル密度の分布におよぼす打撃の影響が大きいためと考えられる。

すなわち、PC 構造物においても、グラウト状況が PC 鋼棒から検出される弾性波に及ぼす影響が検出できれば、スペクトル重心を用いたグラウト充填評価は有効であると考えられる。

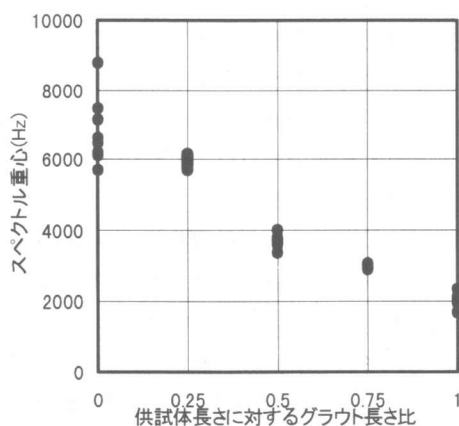


図-6 スペクトル重心とグラウト長さ比の関係

3.2 検出波の減衰特性

図-7 は、グラウト長さの異なる供試体(図-1 ①②③④)のグラウト側 PC 鋼棒端部を打撃した時に得られたスペクトル密度比 S/S_0 とグラウト長さ比との関係を表したものである。ここで、 S および S_0 は、それぞれ、欠陥側 PC 鋼棒端部および打撃点近傍のグラウト部で検出した弾性波スペクトル密度の合計である。ここでスペクトル密度の合計としたのは、1 つの卓越周波数の減衰特性に着目した場合、データのばら

つきが多いからである。また、密度比を用いたのは入力波の変動に関係なく弾性波の減衰について検討を行うためである。グラウト長さ比の増加にともないスペクトル密度比は小さくなっており、グラウト長さ比が 0.5 以上になるとスペクトル密度比の減衰が著しくなる。

これは、欠陥部 PC 鋼棒に発生している高周波数成分がグラウト部 PC 鋼棒には出現していない^{3) 4)}ことから、PC 鋼棒に発生していた高周波成分がグラウト部の影響により減衰したためであると考えられる。

したがって、PC 構造物においてもスペクトル密度比の減衰特性に着目すれば、グラウト充填評価が可能であると考えられる。

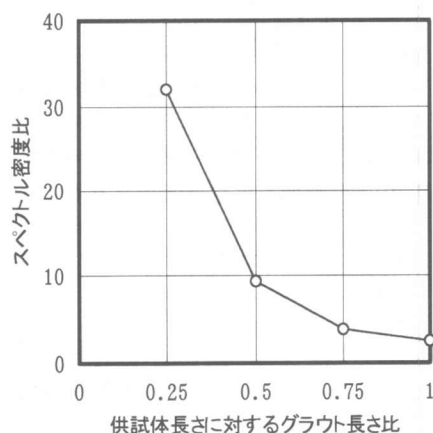


図-7 スペクトル密度比とグラウト長さ比の関係

3.3 鋼棒径とスペクトル特性の関係

図-8 は、グラウト材の直径およびグラウト長さが一定で、鋼棒の径のみが異なる供試体(図-1 ⑤⑥⑦)を両端自由で支持し、欠陥側 PC 鋼棒端部を打撃したときのグラウト側 PC 鋼棒端部で検出した、弾性波のスペクトルである。スペクトルは、鋼棒の径の変化にともない大きく変化している。すなわち、鋼棒が $\phi 26, 13, 9.2\text{mm}$ と細くなるにともない、ほとんどの同次の卓越周波数が低い周波数、例えば 1 次周波数では 1100, 950, 925Hz と移動し

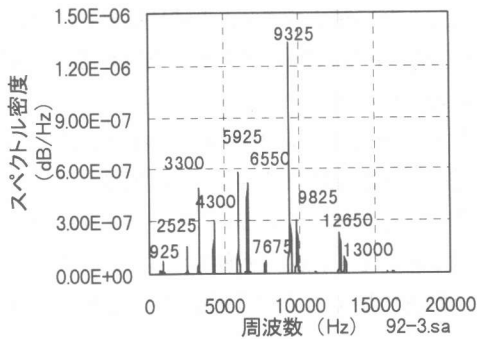
ている。これは、鋼棒が細くなるにつれて、表-4に示すように、伝播速度が遅くなっているためと考えられる。

表-4の弾性波伝播速度は、鋼棒の径が大きいほど速くなっているが、これは鋼棒の径が大きくなるほど、グラウト材の付着による速度低下

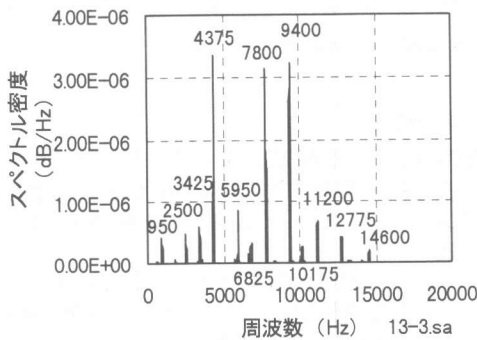
の影響を受けにくい⁵⁾ためであると考えられる。したがって、グラウト材の径が同じ場合、PC鋼棒の径が小さい方がグラウト材の影響を検出しやすくなる。すなわち、PC構造物においてもPC鋼棒の径が小さい方が、グラウト状況を評価できる可能性が高いと考えられる。

表-4 鋼棒径が異なる供試体の伝播速度

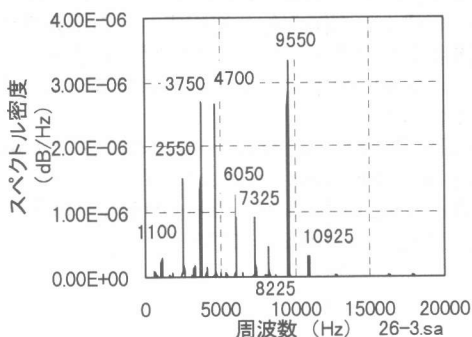
供試体名	グラウト長さ(mm)	鋼棒径(mm)	伝播速度(m/s)
供試体⑤	500	9.2	4700
供試体⑥	500	13	5100
供試体⑦	500	26	5400



(a) PC 鋼棒径 9.2mm



(b) PC 鋼棒径 13mm



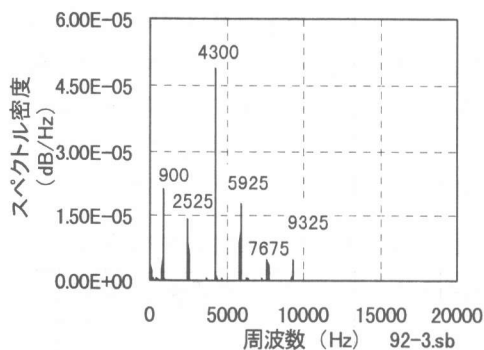
(c) PC 鋼棒径 26mm

図-8 鋼棒径が異なる供試体のスペクトル

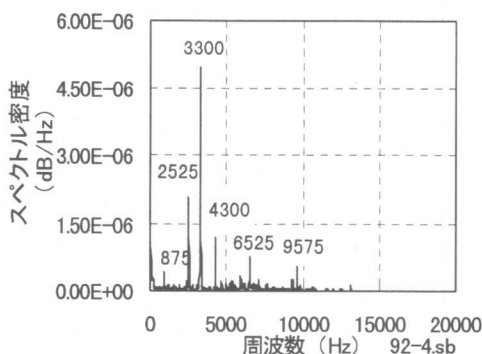
3.4 鋼棒を伝わる弾性波と検出波の関係

図-9は、供試体⑤を、欠陥側PC鋼棒端部を打撃したときに検出した弾性波のスペクトルで、図-9(a), (b), (c)はそれぞれ欠陥側ひずみゲージ、グラウト側ひずみゲージ、およびグラウト側PC鋼棒端部のAEセンサーより得られたものである。図-9(c)に、卓越周波数約925、2525、3300、4300、5925、6550Hzが出現している。このうち図-9(a)の欠陥側ひずみゲージでの検出波スペクトルには約900、2525、4300、5925Hzが明確に卓越しているが約3300、6550Hzが確認できなくなっている。反対に図-9(b)のグラウト側ひずみゲージでの検出波スペクトルには約3300、6525Hzが明確に卓越している。

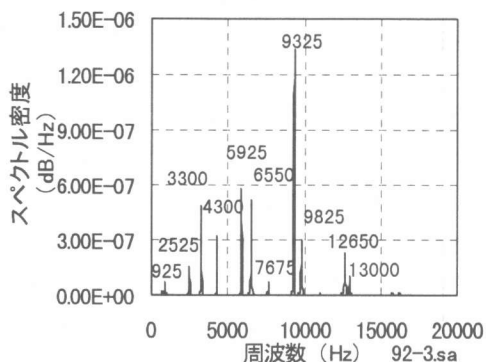
この卓越周波数約3300Hzは、グラウト材を伝播する弾性波速度を約3300m/sとしたとき、長さ500mmのグラウト部を往復する弾性波の周波数にほぼ一致している。したがって、グラウト部のPC鋼棒においてはグラウト長さに対応したスペクトルが検出されており、PC鋼棒端部のセンサーにおいてもこれが検出されていることが分かる。すなわち、PC構造物においてもグラウト長さに応じた卓越周波数を検出できる可能性があると考えられる。



(a) 欠陥側ひずみゲージ



(b) グラウト側ひずみゲージ



(c) グラウト側センサー

図-9 供試体⑤のスペクトル

4. 結論

本研究の結果をまとめると以下のようである。

- (1) PC 鋼棒を伝播する弾性波速度の見掛けの低下は、スペクトルにおいて低い周波数を出現させる。

- (2) グラウト長さ比の増加は、低い周波数を出現させる。この特性に着目すれば、PC 構造物におけるグラウト充填評価につながる。

- (3) スペクトルの重心は、グラウト長さ比の増加にともない低下しており、グラウト充填評価に有効と考えられる。

- (4) スペクトル密度比はグラウト長さ比の増加にともない減少する。この特性に着目すれば、PC 構造物におけるグラウト充填評価が可能と考えられる。

- (5) グラウト径が一定の場合供試体を伝播する見掛け上の弾性波速度は、PC 鋼棒が細くなるにともない遅くなる。したがって PC 構造物においても、細い鋼棒のほうがグラウトの影響を検出できる可能性が高いと考えられる。

- (6) PC 鋼棒端部のセンサーにおいて、グラウト長さに対応したスペクトルを検出することは可能であると考えられる。

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) 魚本健人, 伊藤良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.146-147, 1996
- 3) 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
- 4) 中野将士, 斎藤宏行, 尼崎省二: 衝撃弾性波法による PC グラウトの欠陥探査に関する研究, 第 53 回年次学術講演会講演概要集, V-284, 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, 1978.5