

弾性波伝播特性に着目したPCグラウト充填度の確認方法に関する基礎的研究

独立行政法人土木研究所 正会員 ○中村 英佑
 独立行政法人土木研究所 正会員 竹内 祐樹
 独立行政法人土木研究所 正会員 渡辺 博志

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋(以下、PC橋)のグラウトは、部材コンクリートとPC鋼材の一体化を確保し、PC鋼材を腐食から保護する役割を担っているため、シース内に密実に充填する必要がある。シース内にグラウトの未充填部が残されている場合には、雨水等の侵入によりPC鋼材の腐食、さらには破断や突出に繋がる恐れもあり、PC橋の耐荷性能の低下だけでなく第三者被害を引き起こす可能性がある。特にPC橋の横締めで使用されているPC鋼棒は、PC鋼より線に比べて破断時の突出の可能性が高いとされている。このため、既設PC橋を適切に維持管理していくためには、グラウトの充填度を正確に検査し、必要に応じてグラウトを再充填する手法を確立することが不可欠である。

本研究では、既設PC橋の横締めで使用されているPC鋼棒を対象として、グラウトの充填度を確認するための非破壊検査手法の適用方法と精度について検討した。非破壊検査手法としては、従来から検討が行われている衝撃弾性波法^{1), 2), 3), 4)}を採用し、グラウト充填度の異なるPC供試体を用いて精度を検証した。特に、測定者の違いによる弾性波伝播速度のばらつきや入出力波の波形形状、周波数特性に着目して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1に供試体の形状、表-1にコンクリート配合を示す。道路橋示方書⁵⁾のA活荷重の作用するポストテンション方式PC単純T桁橋の横締めで使用されているPC鋼棒を想定し、600mm間隔で3本のPC鋼棒(SBPR930/1080, φ23mm)を配置した。通常のPC橋

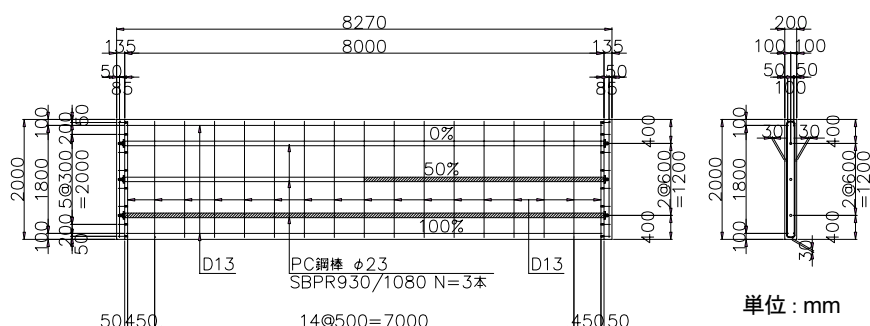


図-1 供試体の形状 (保護コンクリート設置有)

の横締めで使用されているPC鋼棒の定着部は地覆コンクリートで保護されており、この有無が測定結果に与える影響を検討するため、保護コンクリートを設置したものと設置していないものの2体の供試体を製作した。プレストレスは、PC鋼棒の初期引張応力度が780N/mm²となるように導入した。グラウトの充填度は0, 50, 100%の3水準とし、50%のものについてはPC鋼棒の軸方向の片側のみにグラウトを充填した。

2.2 測定方法

図-2に、保護コンクリートを設けた供試体の測定方法の概略を示す。保護コンクリートを設けた供試体では、PC鋼棒直上の保護コンクリート側面を打撃して弾性波を入力し、打撃点近傍に設置したAEセンサーで入力波、もう一方の端部の保護コンクリート側面に設置したAEセンサーで出力波を取得した。保護コンクリートを設けていない供試体では、PC鋼棒を軸方向に直接打撃し、両端部の定着板に設置したAEセンサーで入出力波を取得した。打撃には直径15mmの鋼玉を使用し、AEセンサーは140kHz共振型のものを用いた。

出力波は入力波と比較して伝播距離が長く、減衰して波形の振幅が小さくなると考えられたため、増幅器

を用いて増幅した波形を取得した。増幅率は、AEセンサーを定着板に直接設置して出力波を取得した場合で 20dB（10 倍），保護コンクリート側面に AEセンサーを設置した場合で 40dB（100 倍）とした。保護コンクリートを設置していない供試体では、波形の減衰が小さかったためである。AE センサーもしくは増幅器と波形収録装置は、約 20m の BNC ケーブルを用いて接続した。弾性波の波形は、波形収録装置を用いて測定開始から 120msec 経過時まで 0.01msec ごとに計 12,001 点を記録した。ここでは、入力波の振幅の立ち上がり時に閾値を設け、入力波の振幅が閾値を超える前の 6msec(記録時間の 5%)，超えた後の 114msec(記録時間の 95%)の記録を行った。

2. 3 実験方法

既往研究では、主に弾性波の伝播速度や周波数特性に着目したグラウト充填度の検査方法について検討が行われている^{1), 3), 4)}。本研究では、まず、測定者の違いが弾性波伝播速度のばらつきに与える影響を確認するため、技術者 4 名がそれぞれ 10 回ずつ測定を行った際の弾性波伝播速度を比較した。また、通常は PC 鋼棒の直上で測定を行っているが、ここでは直上ではなく PC 鋼棒の中間で弾性波の入力と取得を行った場合の弾性波伝播速度についても検討を行った。次に、弾性波の周波数特性とグラウト充填度の関係を考察するため、入力波と出力波の立ち上がりから 8192 個(=2¹³ 個、約 80msec)の測定値を用いて FFT 解析を行った。今回の測定では 0.01msec ごとに波形データを取得したため、Nyquist 振動数は 50kHz(=1/2÷0.01)となる⁶⁾。すなわち、0~50kHz の範囲における入出力波の周波数特性を比較した。既往研究の多くでは主に出力波の周波数特性について考察しているが、ここでは入力波の周波数特性との関係も交えて考察を行った。

3. 結果および考察

3. 1 グラウト充填度と弾性波波形

図-3 に、保護コンクリートを設置した供試体での測定結果の一例を示す。グラウト充填度 50%の PC 鋼棒については、充填側と未充填側から打撃した場合の波形も示す。測定開始から 16msec までのマクロな出力波形に着目すると、グラウトが全く充填されていない PC 鋼棒では、グラウトが部分的もしくは完全に充填されている PC 鋼棒に比べて波形の振幅の立ち上がりが急であり、弾性波の到達までに要した時間が短くなった。グラウトの充填されていない PC 鋼棒ではグラウトによる拘束が無く、減衰の影響が小さい状態で弾性波が伝播したためと考えられる。測定開始から 16msec までのマクロな波形の比較では、部分的もしくは完全にグラウトが充填されている PC 鋼棒の出力波の波形形状の違いは比較的小さいように思われた。ところが、立ち上がりから 4~4.5msec までの詳細な波形形状に着目すると、グラウトの充填度が低いほど、同一時間内に計測された波の数が多いことがわかる。すなわち、出力波形をマクロに比較するとグラウトが部分的もしくは完全に充填されている PC 鋼棒を区別することが困難となるが、立ち上がり直後の詳細な波形形状を比較すると、定性的にグラウト充填度の違いを区別することができる可能性がある。グラウト充填度の低い場合にはインピーダンス特性が均質である PC 鋼棒を弾性波が伝播するため高周波成分が減衰しにくいのに対し、グラウト充填度の高い場合には複合材料であるグラウトもしくはコンクリート中を弾性波が伝播するため高周波成分が散乱による減衰を生じやすかったためと考えられる。弾性波の減衰特性に着目してグラウト充填度を推定する際には、高周波成分に注意を払う必要があると考えられる。なお、保護コンクリートを設置していない供試体では上記の特徴がより鮮明に現れる結果となった。保護コンクリートの有無に関わらず、弾性波波形は同様の傾向を示すものが得られると考えられる。

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
49.0	42.5	148	302	785	1072	2.718

最大粗骨材寸法25mm, スランプ10cm, 空気量4.5%, 早強セメント使用, 材齢28日の圧縮強度37.1kg/m²

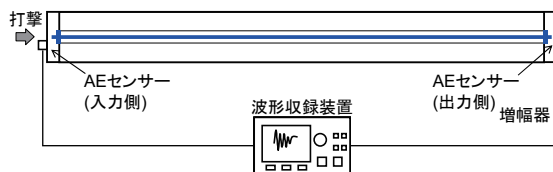


図-2 測定方法の概略

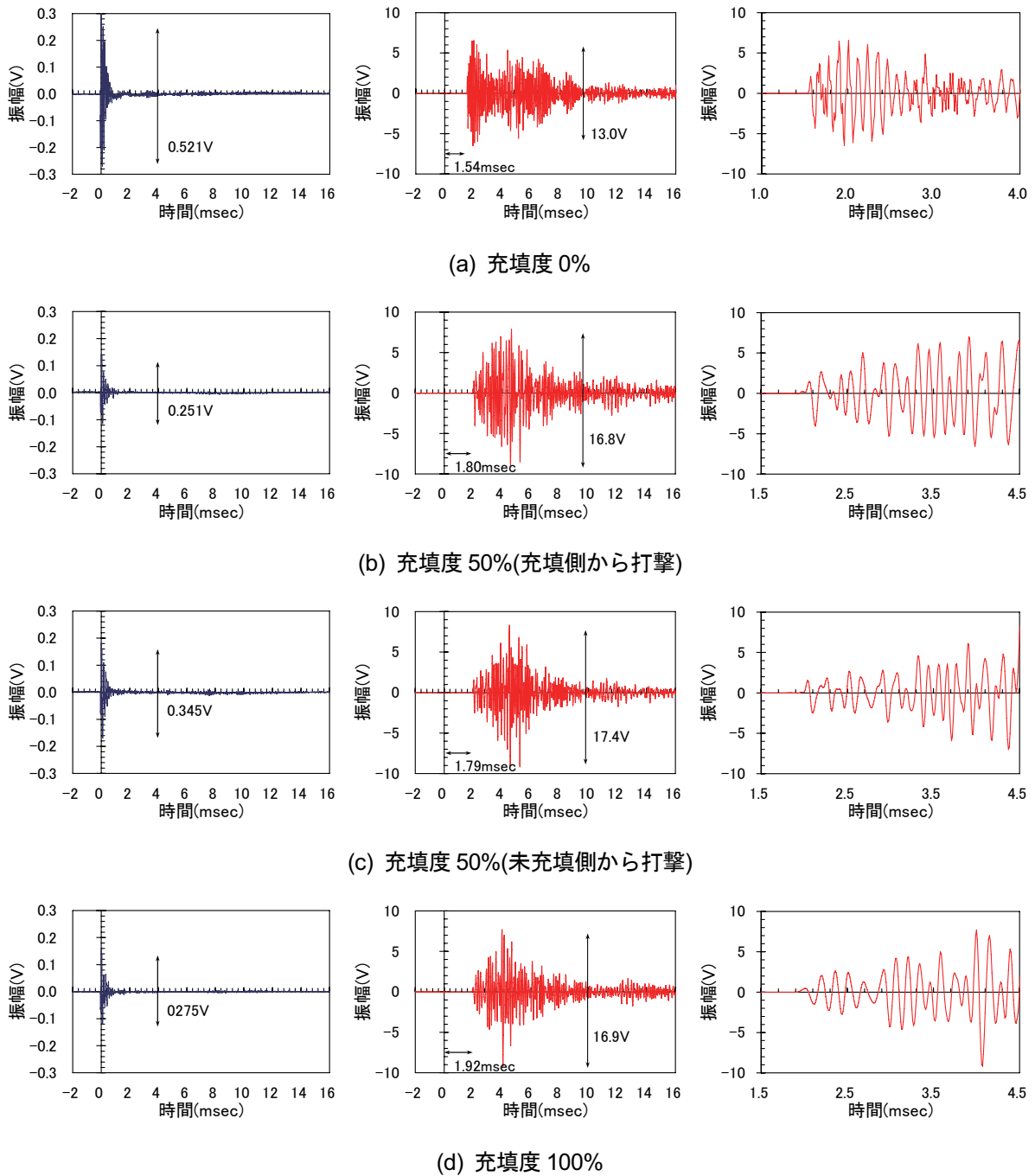


図-3 入出力波の波形(保護コンクリート設置有, 左:入力, 中:出力, 右:出力(拡大図))

3. 2 弾性波伝播速度のばらつき

既に示したように, 弾性波の入力から出力波が検出されるまでの時間はグラウト充填度によって異なっていたが, その差はグラウトが完全に充填された場合と全く充填されていない場合を比較しても 0.4msec 程度であり, 今回のように手動で弾性波を入力した場合には測定者によって結果が大きく異なる可能性もある。そこで, 測定者の違いが弾性波伝播速度のばらつきに与える影響を検証するため, 4 名の測定者(A~D)が各 10 回の測定を行った際の弾性波伝播速度を比較した。弾性波伝播速度は, 伝播距離(PC 鋼棒の長さ, 8m)を伝播時間(入力波の立ち上がりから出力波の立ち上がりまでの時間)で除して求めた。

図-4 に, 測定者 A による 10 回の弾性波伝播速度の測定結果を示す。ここでは, 保護コンクリートを設置

した供試体と設置して
いない供試体で測定を
行い、充填度 50%の PC
鋼棒については充填側
と未充填側から打撃し
た結果を示す。これに
よると、保護コンクリ
ートの有無に関わらず、
グラウトの充填度が低
いほど弾性波伝播速度
が速くなり、複数回の
測定を行った場合のば
らつきは極めて小さく
なった。ただし、充填
度 50%と 100%の伝
播速度の差は比較的なく、
必ずしもグラウトの
充填度と線形関係で
伝播速度の大小が変化

するとは断言できない。グラウトが部分的にでも充
填されていれば、PC 鋼棒を伝わる弾性波が減衰し、
全く充填されていない場合と比べて弾性波の伝播状
態が異なるためと考えられる。また、保護コンクリ
ート設置の有無で比較すると、グラウトの充填度
に関わらず、保護コンクリートを設置した供試体
では設置していない供試体と比較して弾性波伝播
速度が概ね 100~200m/sec の範囲で低下する傾
向にあった。保護コンクリートを設置した供試体
では、保護コンクリート内部を伝播した弾性波を
取得しており、弾性波の伝播に時間を要したため
と考えられる。

図-5 に、測定者 4 名が各 10 回の測定を行った際の弾性波伝播速度の平均値を示す。これによると、測定者間の差は小さく、保護コンクリート設置の有無に関わらず、グラウト充填度が小さいほど弾性波伝播速度が速くなる傾向にあったことが読み取れる。すなわち、測定者が異なるような場合においても、弾性波伝播速度のばらつきは小さいと考えられる。

図-6 に、PC 鋼棒直上と PC 鋼棒の中間で測定を行った場合の弾性波伝播速度を示す。グラウト充填度 0%と 50%の PC 鋼棒の中間で測定を行った場合の弾性波伝播速度は、グラウト充填度 0%の PC 鋼棒の直上で測定を行った場合よりも遅く、グラウト充填度 50%の PC 鋼棒の直上で測定を行った場合よりも速くなった。一方、グラウト充填度 50%と 100%の間で測定を行った場合の弾性波伝播速度は、グラウト充填度 100%の PC 鋼棒の直上で測定を行った場合と同程度となった。このことから、正確な弾性波伝播速度を得るためには、検査対象の PC 鋼棒の直上で測定を実施することが望ましいと考えられる。

3. 3 入出力波の周波数特性

次に、取得した弾性波波形の FFT(高速フーリエ変換)解析を行い、グラウト充填度と弾性波の周波数特性

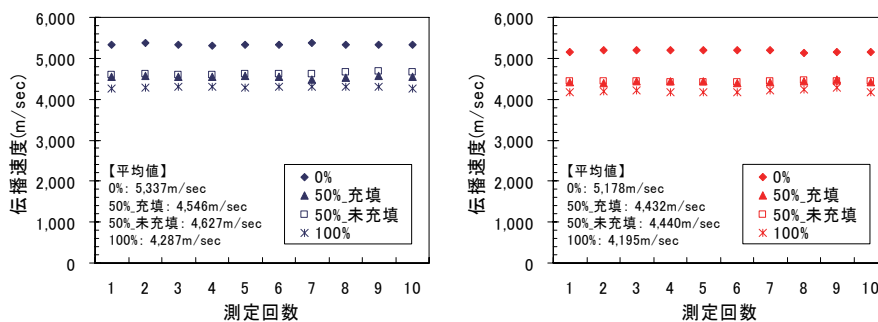


図-4 測定者 A の弾性波伝播速度(左 : 保護コン設置無, 右 : 保護コン設置有)

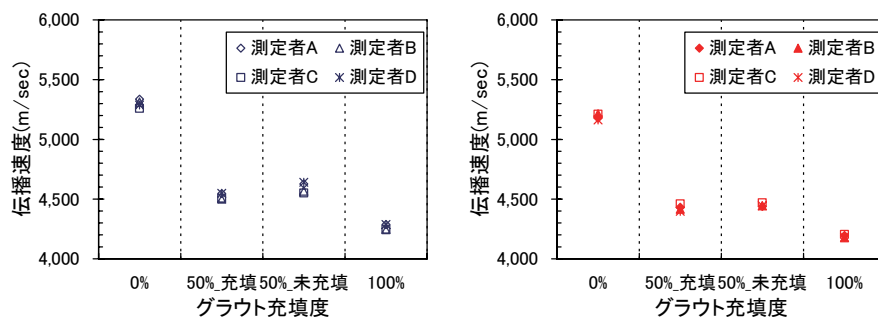


図-5 4 測定者の弾性波伝播速度(左 : 保護コン設置無, 右 : 保護コン設置有)

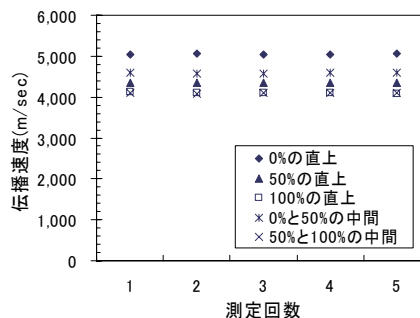


図-6 測定位置と弾性波伝播速度(保護コン設置有)

の関係を比較する。図-7に、図-3で示した弾性波のFFT解析を行った結果を示す。今回の測定では、弾性波の入力を手動で行ったため、入力波の周波数特性には多少のばらつきが見られたが、5~10kHzと25~30kHzの成分が卓越する傾向にあった。一方、出力波に着目すると、部分的あるいは完全にグラウトが充填されている供試体では、5kHz前後と10kHz前後の周波数成分が卓越していたが、グラウトが充填されていない供試体では、これらに加えて15kHz前後と30kHz前後の周波数成分も確認することができる。また、保護コンクリートを設置していない供試体においても同様の結果が得られた。すなわち、今回の実験の範囲では、グラウトが全く充填されていない場合には高い周波数の成分も確認されるが、部分的もしくは完全にグラウトが充填されている場合には5~10kHz程度の低い周波数の成分が卓越する傾向にあると考えられる。

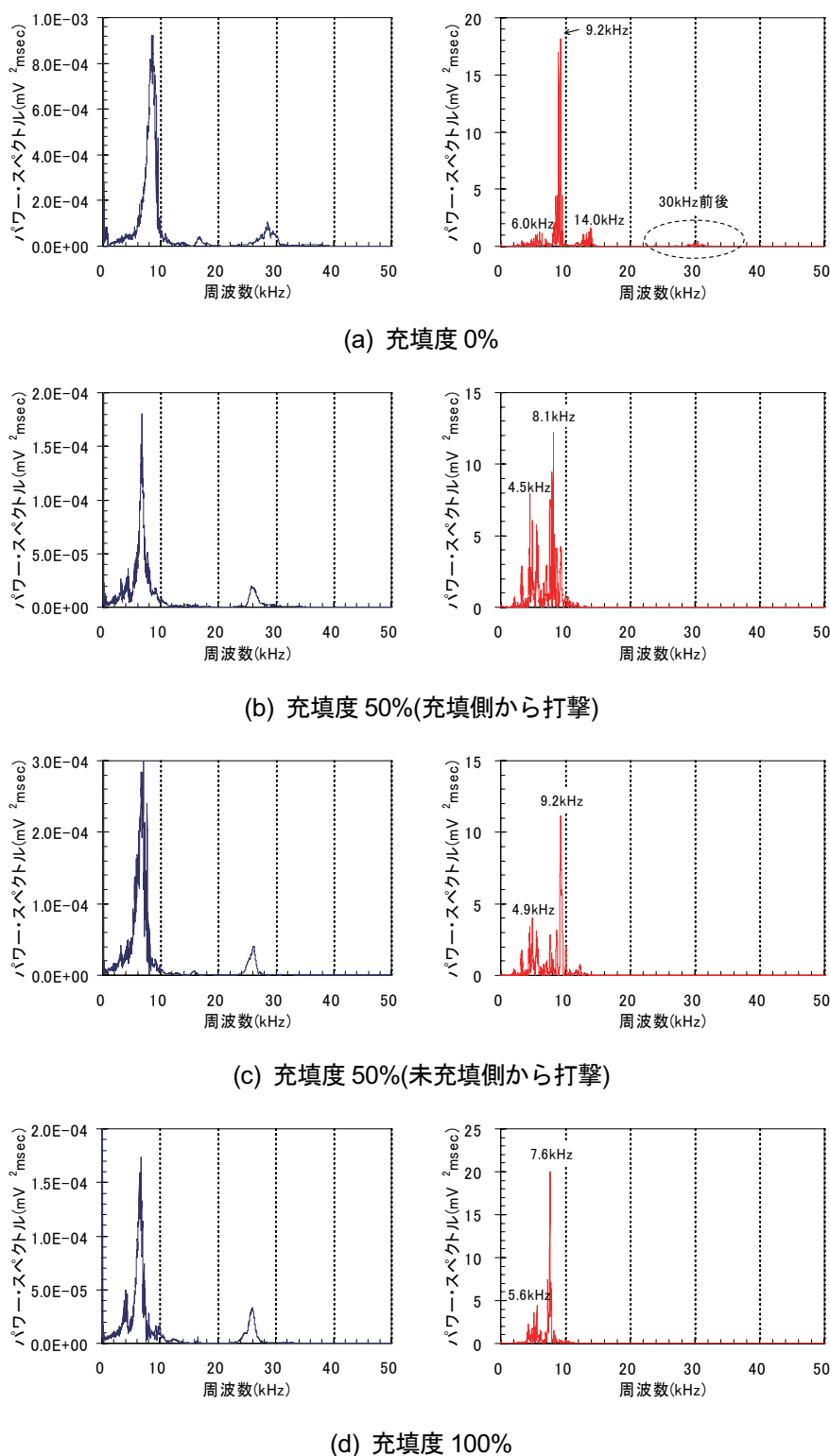


図-7 弾性波の周波数特性(保護コン設置有, 左:入力波, 右:出力波)

図-8に、図-7に示したパワー・スペクトルの振幅比(出力/入力)を示す。グラウトが全く充填されていない供試体では、他の供試体と比較して30kHz前後の振幅比が大きくなった。また、グラウト充填度が低いほど周波数の高い領域の振幅比が大きくなる傾向にあった。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた知見をまとめる。

1) グラウトが全く充填されていない PC 鋼棒は、出力波形の特徴から検出することが可能と考えられる。また、出力波の立ち上がり直後の波形を比較することで、グラウト充填度の違いを定性的に推定できる可能性がある。

2) 保護コンクリート設置の有無や測定者の違いに関わらず、グラウト充填度が低いほど弾性波

伝播速度は速くなった。弾性波伝播速度に着目することで、グラウト充填度を定性的に推定できる可能性がある。また、検査対象とする PC 鋼棒の直上で測定を行うことで、より正確な検査が可能となる。

3) 周波数特性に着目すると、グラウトが全く充填されていない場合には周波数の高い成分と低い成分を確認することができたが、部分的もしくは完全に充填されている場合には周波数の低い成分のみが卓越した。実際の既設 PC 橋では、グラウト充填度が今回用いた供試体と異なる場合や、両端部にグラウトが充填されている場合、雨水等が未充填部に侵入している場合、カップラーを使用している場合など条件が複雑多岐に渡る可能性もある。今後はこれらのグラウト充填度の確認方法についても検討していく予定である。

謝辞

測定方法について(株)国際建設技術研究所の葛目宏氏に助言をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 川嶋雅道, 内田慎哉, 六郷恵哲: 弾性波による PC グラウト充填評価手法の実構造物への適用, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.569-586, 2006
- 2) 葛目宏, 前野裕文, 森下宣明, 塚田卓, 梅原秀哲: 打音振動法による PC グラウト充填度評価について, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.6, pp.393-400, 2006
- 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.373-378, 2000
- 4) 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
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・III コンクリート橋編)・同解説, 2002
- 6) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1976

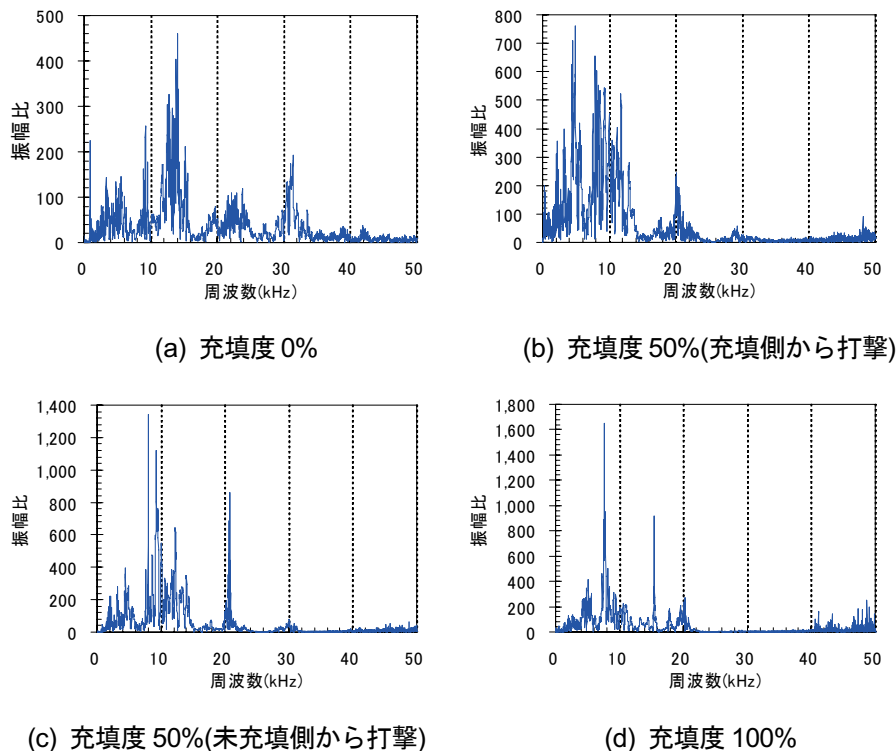


図-8 パワー・スペクトルの振幅比(保護コン設置有)