

論文 衝撃弾性波法による PC グラウトの充填評価

中野将士*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、いわゆる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。本研究では、PC鋼材に発生する弾性波の挙動と検出波の関係性を明らかにすることにより、グラウト充填状況が検出弾性波に及ぼす影響について実験的検討を行なった。その結果、欠陥部PC鋼棒は欠陥部長さ特有の周波数特性を示していることがわかった。また、コンクリート中を伝播する弾性波が検出波に与える影響が大きいことや、検出波の高周波数成分がグラウトの充填によって減衰するため、検出波の周波数特性からグラウトの充填評価が可能であることが判明した。
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について取り上げた。PCグラウトの充填不足が生じた場合には、PC鋼材が腐食して破断するおそれがある。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での破断事故が報告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。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。

本研究は、衝撃によってPC鋼材に発生する弾性波の挙動はグラウト充填状況に影響されるとの観点から、衝撃弾性波法によるグラウト充填評価方法について検討を行ったものである。

2. 実験概要

表-1 示方配合

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

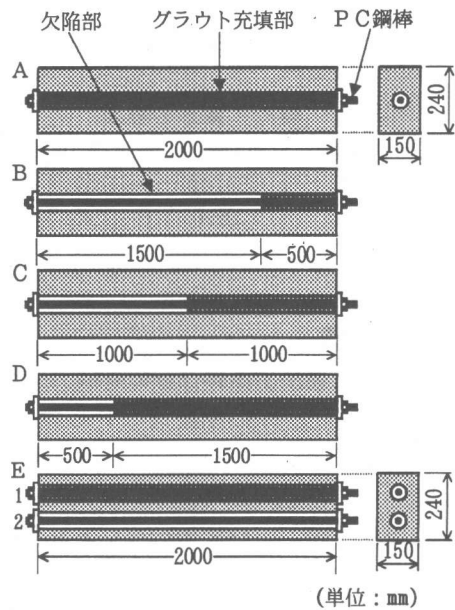


図-1 供試体図

* 1 京都府 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)

本実験では、シース(φ28mm)によるダクトを設けた供試体(表-1 参照)を打設し、B 種 1 号 P C 鋼棒(φ9.2mm, φ13mm)を引張強度より緊張力 590N/mm² とし断面中央に配置した、図-1 に示すようなグラウト充填部をもつ供試体を作製した。

打撃は図-2 に示す方法で行ない、3 種類の鋼球(表-2 参照)を用い、打撃速度を 1, 2, 3m/s とした。供試体に生じる弾性波は超音波センサー (f=300kHz) および AE センサー (f=140kHz), P C 鋼棒の弾性波はひずみゲージ(長さ 1mm) を用いて検出した。ただしひずみゲージで検出された波形の振幅値は応力度に変換した。

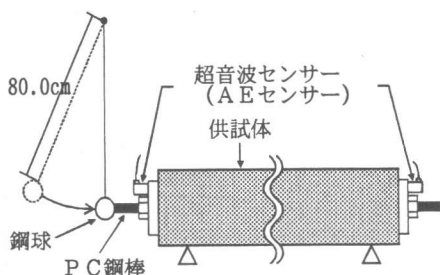


図-2 打撃および測定方法

表-2 鋼球の種類

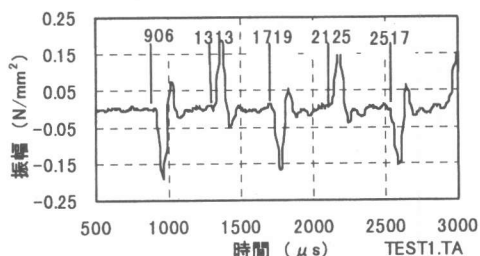
鋼球	質量 (g)	直径 (mm)
A	542.0	50.6
B	16.0	15.8
C	3.2	9.4

3. 実験結果

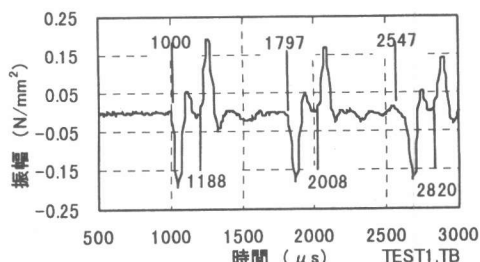
3.1 鋼材に発生する弾性波の挙動

図-3 は、供試体に配置前の P C 鋼棒(φ 13mm)を両端自由で支持し、端部を鋼球 B で打撃(3m/s)した時に、端部から 50cm および中央部に添付したひずみゲージより得られた検出波の波頭部分である。図-3(a), (b)の波形の立ち上がり時間差より P C 鋼棒を伝播する弾性波速度を約 5300m/s とした時の P C 鋼棒終端での反射波が明確に検出されており、波形の減衰も緩やかである。一方、図

-4(a), (b)は前述の P C 鋼棒をコンクリート供試体に挿入して 148N/mm² の緊張力を導入したとき得られた検出波の波頭部である。

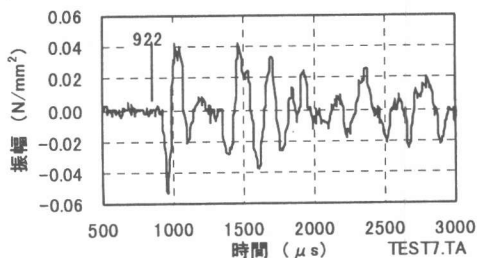


(a) P C 鋼棒中央部

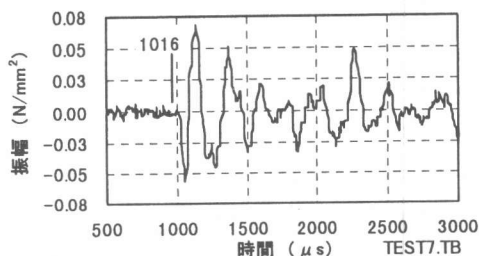


(b) P C 鋼棒端部 50cm

図-3 供試体配置前の検出波形



(a) P C 鋼棒中央部



(b) P C 鋼棒端部 50cm

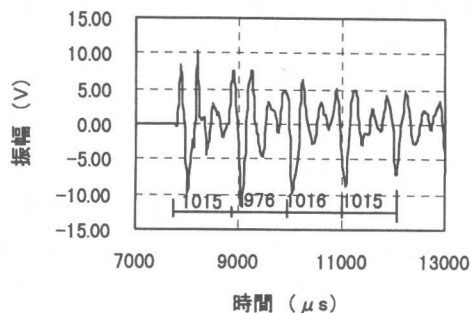
図-4 緊張力導入後の検出波形

波形の立ち上がり時間差は供試体に配置前と変化していないが、P C鋼棒終端での反射波以外の成分が多く含まれ、鋼棒終端での反射波の検出が困難になる。これは、緊張力導入後の検出波の振幅が約 1/3 程度に減衰していることから、入力波の衝撃力の多くは定着部を介して供試体コンクリート中に伝播しているためであると考えられる。

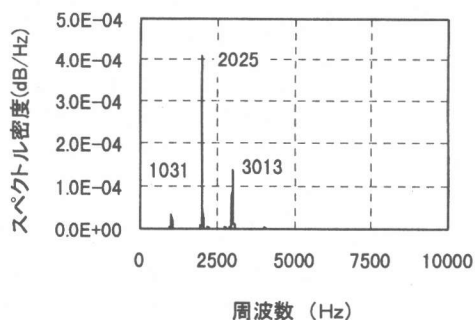
3.2 鋼棒を伝わる弾性波と検出波の関係

(1) グラウトが部分的に未充填の供試体

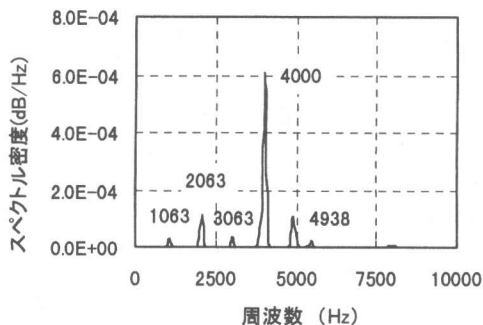
図-5 はグラウトが部分的に未充填の供試体 C のグラウト充填側から P C鋼棒端部を鋼球 A で打撃(3m/s)した時の検出波の波頭部分および衝撃弾性波のスペクトルである。図-5(a)の波形に約 1000 μ s 周期の波が生じている。これは、供試体コンクリートの平均弾性波伝播速度 4000m/s で、長さ 2m の供試体を往復する伝播時間にほぼ一致しており、検出波は供試体を伝播する弾性波に大きく影響されていることがわかる。検出波の周期約 1000 μ s は、スペクトルの卓越周波数約 1000Hz に対応しており、図-5(b)のスペクトルに約 1000Hz 間隔の卓越周波数が出現している。一方、図-5(c)に示すグラウト欠陥部（以下欠陥部と略記）ひずみゲージでのスペクトルは、1000~3000Hz の卓越周波数の他に、4000 Hz 以上の卓越周波数が出現している。これは、欠陥部 P C鋼棒を往復する弾性波の影響によるもので、欠陥部長さに対応した周波数特性を示している。過去に行った同種の実験（P C鋼棒 ϕ 17mm）では^{2),3)}、定着部センサーからの出力波に欠陥部 P C鋼棒に発生する弾性波が影響していたが、本実験では図-5(d)の出力側センサーでの検出波スペクトルに現れていない。これは、P C鋼棒の断面積が小さくなり、鋼棒を伝播する弾性波が少なくなったためであると考えられる。



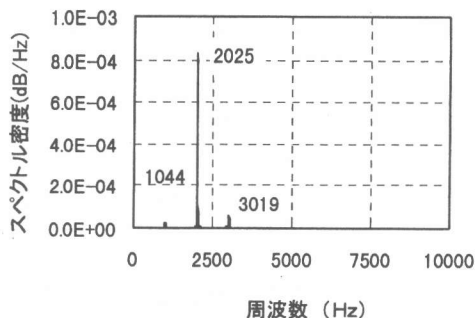
(a) 打撃部センサーの出力波形



(b) 打撃部センサーの出力波形スペクトル



(c) P C鋼棒の弾性波スペクトル（欠陥部）

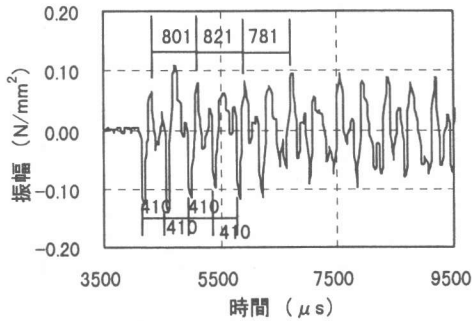


(d) 打撃部と反対側センサーのスペクトル

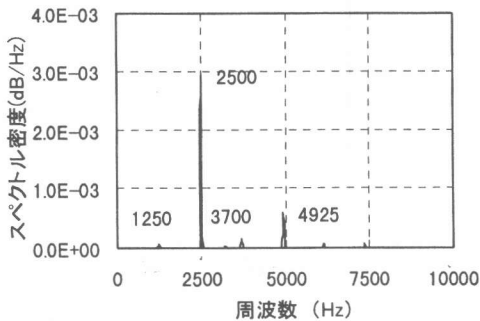
図-5 供試体 C に発生する弾性波及びスペクトル

(2) グラウトが完全に未充填の供試体

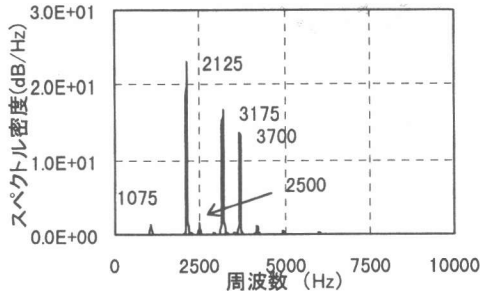
供試体 E-2 の PC 鋼棒端部を鋼球 A で打撃 (3m/s) したときの、ひずみゲージおよび定着部センサーでの検出波とスペクトルを図-6 に示す。図-6(a)のひずみゲージでの検出波形には約 400 μ s 周期の波が生じている。これは、長さ 2.2m の PC 鋼棒を伝播する弾性波を、鋼棒中央部で検出したときの伝播時間に一致しており、図-6(b)に示すスペクトルの卓越周波数 2500Hz に対応している。



(a) PC 鋼棒の弾性波 (欠陥部)



(b) PC 鋼棒の弾性波スペクトル (欠陥部)

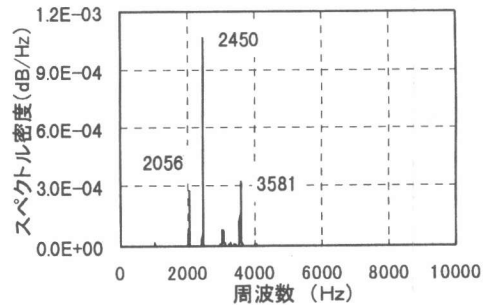


(c) 定着部センサー出力スペクトル (欠陥部)

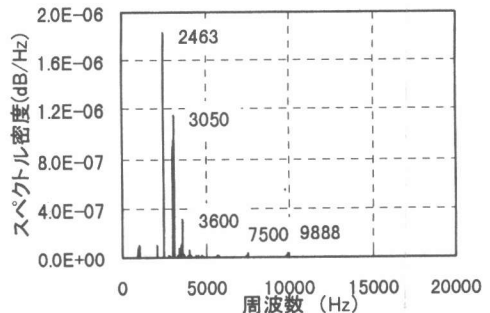
図-6 供試体 E-2 に発生する弾性波
及びスペクトル

一方、図-6(c)の定着部センサーからの出力波のスペクトルは図-5(d)とは異なり、卓越周波数約 1000,2000,3000Hz の他に、図-6(b)に生じている卓越周波数 2500,3700Hz が出現している。これは、グラウト欠陥部の PC 鋼棒に発生する弾性波の挙動であり、グラウトが完全に未充填の場合、欠陥部 PC 鋼棒は供試体コンクリートを往復する弾性波の影響とグラウト材の付着による弾性波の減衰の影響を受けないためであると考えられる。

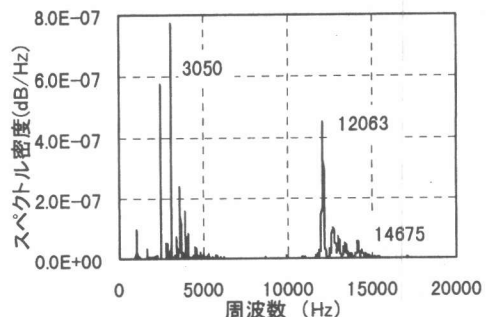
3.3 鋼球の差異による影響



(a) 鋼球 A



(b) 鋼球 B



(c) 鋼球 C

図-7 鋼球の差異による周波数特性

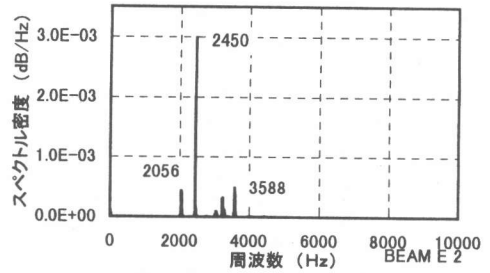
図-7は、グラウト供試体 D を 1m/s で 3 種類の鋼球を用いて打撃した時、打撃側と反対面のセンサーから検出した波形のスペクトルである。スペクトルは、打撃に用いた鋼球の直径(表-2 参照)によって大きく異なっている。すなわち、鋼球が小さくなると高周波数成分があらわれている。打撃によって供試体に生じる弾性波の形状は、衝撃の接触時間に影響されることから、各鋼球による接触時間 T_c を計算した⁴⁾。

弾性波は 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周波数を表-3 に示す。

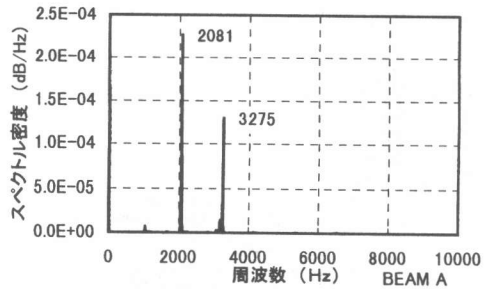
鋼球	接触時間 T_c (μ s)	上限周波数 (kHz)
A	152	3.3
B	48	10.4
C	28	17.9

表-3 の周波数は弾性波の上限周波数と考えられるが、これは打撃によって得られた出力波スペクトルの周波数特性(図-7 参照)とほぼ一致している。このことから、鋼球の大きさが弾性波の周波数特性に大きく影響すると考えられる。図-8(a), (b)および図-9(a), (b)に供試体 E-2(グラウト未充填)および供試体 A(グラウト全充填)を、それぞれ、鋼球 A および C で打撃(1m/s)したときの検出波のスペクトルを示す。打撃方法にかかわらずグラウトの充填によって各卓越周波数のスペクトル密度が小さくなるとともに、特に鋼球 C で打撃した場合には高周波数成分が大きく減衰していることがわかる。これらの状況は、実構造物(全幅員 10.75m, PC 鋼棒長さ 10.66m, ハンマー打撃)での検出弾性波のスペクトル(図-10)に、より顕著に認められる。すなわち、8~12kHz の高周波数成分はほぼ消滅し、卓越周波数特性は 4kHz 以下となっている。実構造物で高周波数成分が消滅しているのは、弾性波の伝播距離がほぼ 10.5m

と供試体と比べて大きいと思われる。これより、高周波数成分の減衰特性に着目する

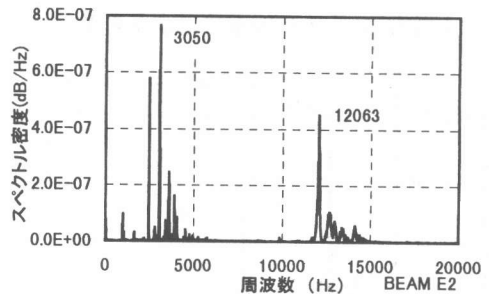


(a) グラウト未充填

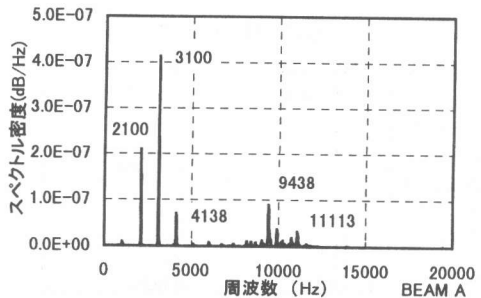


(b) グラウト全充填

図-8 鋼球 A による検出波スペクトル



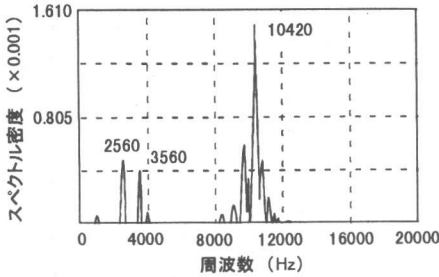
(a) グラウト未充填



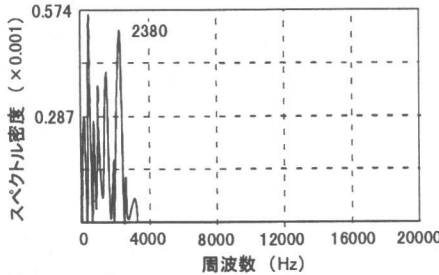
(b) グラウト全充填

図-9 鋼球 C による検出波スペクトル

とグラウト充填状況を評価できると考えられる。



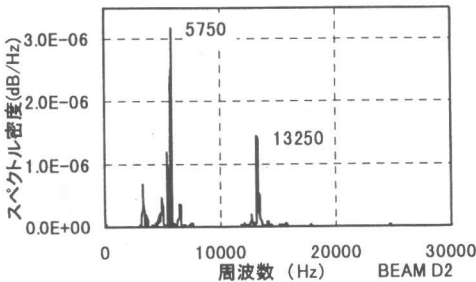
(a) グラウト未充填



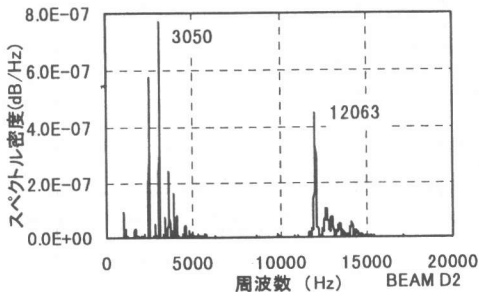
(b) グラウト全充填

図-10 実構造物での検出波スペクトル

3.4 測定システムの差異による影響



(a) AE センサー



(b) 超音波センサー

図-11 センサーによる周波数特性

図-11(a), (b)は、AE センサーと超音波センサーを用いて供試体 D を鋼球 B(1m/s)で打撃したときの検出波スペクトルである。スペクトルは、使用センサーによって異なり、AE センサーを用いた方が卓越周波数が高くなる傾向が得られた。今後、測定システムの影響を検討する必要がある。

4. 結論

- (1) 欠陥部 P C 鋼材に発生する弾性波の挙動は、欠陥部長さ特有の周波数特性を示している。
- (2) グラウトが完全に未充填（供試体コンクリートを伝播する弾性波の影響が少ない）の場合、欠陥部 P C 鋼材に発生する弾性波の挙動を定着部センサーで検出することができる。
- (3) グラウト充填による検出波の高周波数成分の減衰に着目すると、グラウト充填状況を評価できると考えられる。
- (4) 測定システムによってセンサーからの出力(波形、スペクトル)は異なり、定性的な評価は可能であるが、定量的な評価には一定のシステムで行う必要がある。

参考文献

- 1) 望月秀次, 本間淳史, 上東泰: P C 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) 中野将士, 今井伸明, 藤原規雄, 尼崎省二: 弾性波法による P C 構造物のグラウト充填評価に関する基礎的研究, 関西支部年次学術講演概要, pp V-51-1-V-51-2, 1997
- 3) 中野将士, 藤原規雄, 尼崎省二: 弾性波法による P C グラウト状況の非破壊検査, 第 51 回セメント技術大会講演要旨, pp92-93, 1997
- 4) 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