

論文 PC床板の振動特性に着目したグラウト充填評価に関する基礎的研究

永田 智宏*1・山田 和夫*2・中井 裕司*3・黒野 幸弘*1

要旨：本報では、コンクリート表面で検出された衝撃弾性波の周波数特性に着目したグラウトの充填性評価方法の可能性について実験的および解析的に検討を行った。その結果、コンクリート表面で計測された弾性波にはPC床板の全厚とかぶり厚さに関連する2種類の卓越周波数成分が存在しているが、かぶり厚さに関連する周波数成分の卓越状況によってグラウトの充填性を評価できること、コンクリート表面で検出された弾性波の基本的な卓越周波数間隔以外の卓越周波数成分の出現状況によってグラウトの充填状況および充填/未充填境界位置を評価できること、などが明らかとなった。

キーワード：PC床板、衝撃弾性波法、グラウト充填評価、表面振動、周波数特性

1. はじめに

筆者らは、これまでにPC床板のグラウト充填状況を簡便に評価できる非破壊検査システムの構築を目的とした基礎的研究[1]-[4]として、PC床板モデルを用いて、PC鋼棒中を伝播する衝撃弾性波の伝播・反射特性に及ぼすグラウト未充填長さおよび未充填位置の影響について実験的に検討を行い、PC鋼棒端部で検出した弾性波の周波数応答特性および卓越周波数の出現状況と振動モードとの関係に着目することによって、グラウトの充填状況を正確に評価できる可能性のあることを明らかにするとともに、得られた振動モードはPC床板全体の振動モードを反映した結果であること等の知見を得た。

本報では、これら一連の基礎的研究の延長として、コンクリート表面で検出された弾性波の周波数特性に着目したグラウトの充填性評価の可能性を実験的に検討するとともに、2次元有限要素法を適用した周波数応答解析によって解析的な観点からも検討を行った。

2. 実験および解析方法

2.1 実験の概要

本実験では、既報[1]-[4]と同様に直線配置された長さ5m、緊張力0および706N/mm²のB種2号PC鋼棒が、試験体の端部および中央部に0、0.5、1.0、2.5および5mの区間でグラウト未充填状態に設定されているPC床板（図-1および表-1参照）を用いて、検出衝撃弾性波の周波数特性とグラウト充填状況との関係について調査した。本実験で用いた

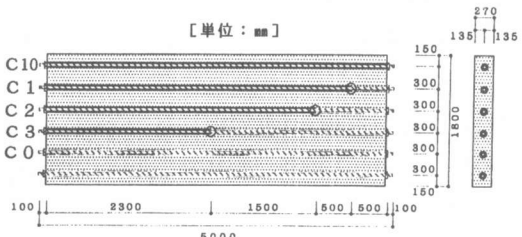


図-1 試験体の形状・寸法

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（正会員）
 *2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）
 *3 住友建設(株)技術研究所主任研究員（正会員）

表-1 実験の概要

記号	グラウト未充填位置	グラウト未充填長さ (m)	緊張力 (N/mm ²)
C0	全体	5.0	706
C1	端部	0.5	706
C2	端部	1.0	706
C3	端部	2.5	706
C10	無し	0	0

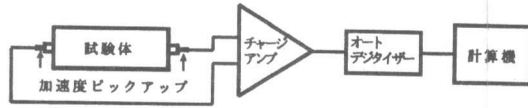


図-2 計測システムのブロックダイアグラム

計測システムのブロックダイアグラムを図-2に示す。計測に際しては、図-3に示すようにPC鋼棒端部に衝撃弾性波を入力し、衝撃弾性波入力点の近傍およびコンクリート表面の数箇所に超小型圧

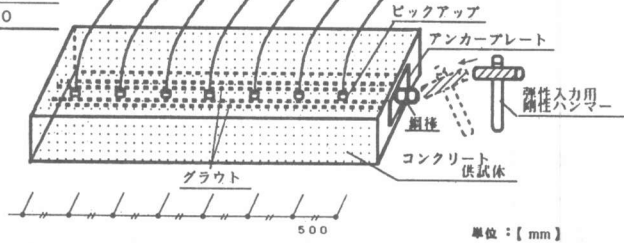


図-3 弾性波の入力・検出位置

電型加速度ピックアップ (PV-91型、保証周波数：1~15,000Hz) を設置して伝播弾性波を検出した。なお、計測は原則として繰返し5回行い、得られた結果のうち代表的なものを考察に使用した。また、本実験では、コンクリート表面で伝播弾性波が検出できるように弾性波の入力エネルギー量を大きくする必要があったため、鋼製ハンマーを用いて衝撃弾性波を入力した。

2.2 解析の概要

本解析では、式(1)に示すような速度比例型の減衰項を有する波動方程式を採用した。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\{\ddot{u}\}$ ：加速度ベクトル、 $\{\dot{u}\}$ ：速度ベクトル、 $\{u\}$ ：変位ベクトル、 $\{f(t)\}$ ：外力ベクトル、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[K]$ ：剛性マトリックス、 $[C]$ ：減衰マトリックス ($=\alpha[M]+\beta[K]$ 、ただし、係数 α および β は、便宜上筆者らが従来から用いている値 ($\alpha=1\times 10^{-7}$ および $\beta=5\times 10^{-4}$) を使用した)。解析に際しては、周波数増分を0.02kHzに設定して上限周波数5kHz (一部30kHz) までの調和外力を所定の節点に入力することによって周波数応答解析を行った。本解析では、前記の実験要因のうち、グラウトの未充填位置 (中央部および端部の2種類)、グラウトの未充填長さ (0、0.5、1.0、2.5 および5mの5種類) を解析要因として取り上げた。本解析で使用した構成材料の各種力学特性 (仮定値) および解析モデルの一例を、それぞれ表-2および図-4に示す。

表-2 各種力学特性

媒体	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	ポアソン比	密度 (g/cm^3)
鋼棒	20.13	0.30	7.80
グラウト	1.90	0.20	1.90
コンクリート	2.10	0.18	2.40
空気	0.00021	0.18	0.001

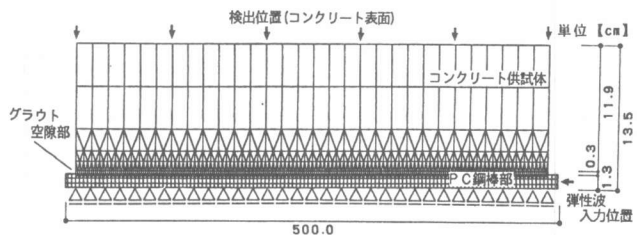


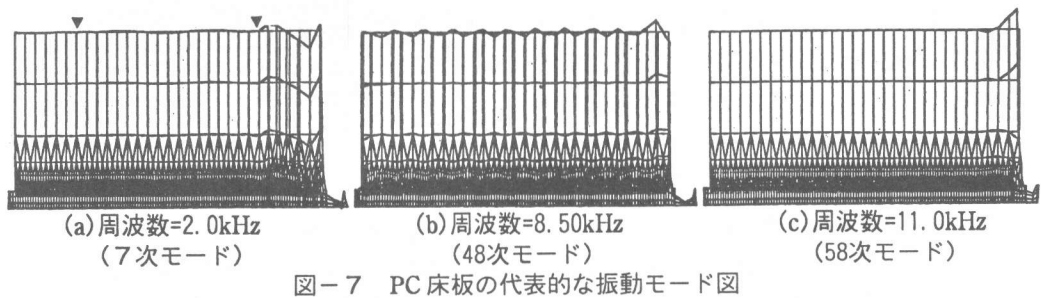
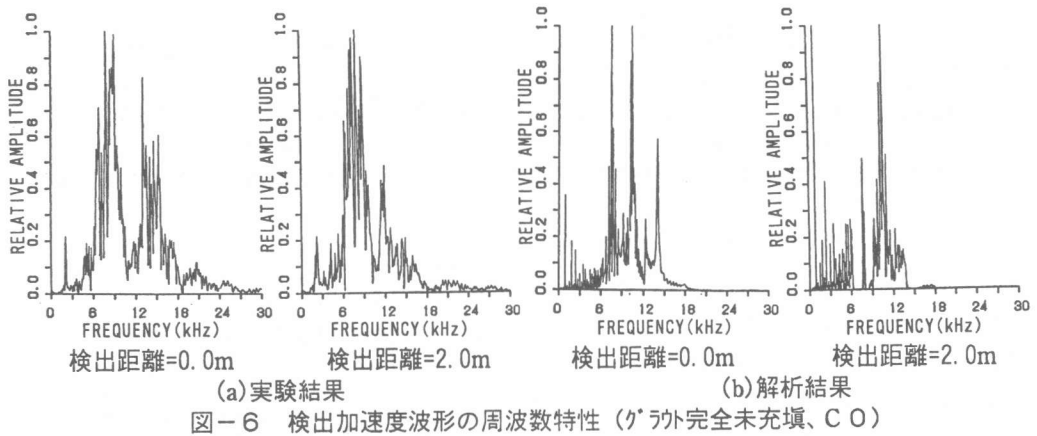
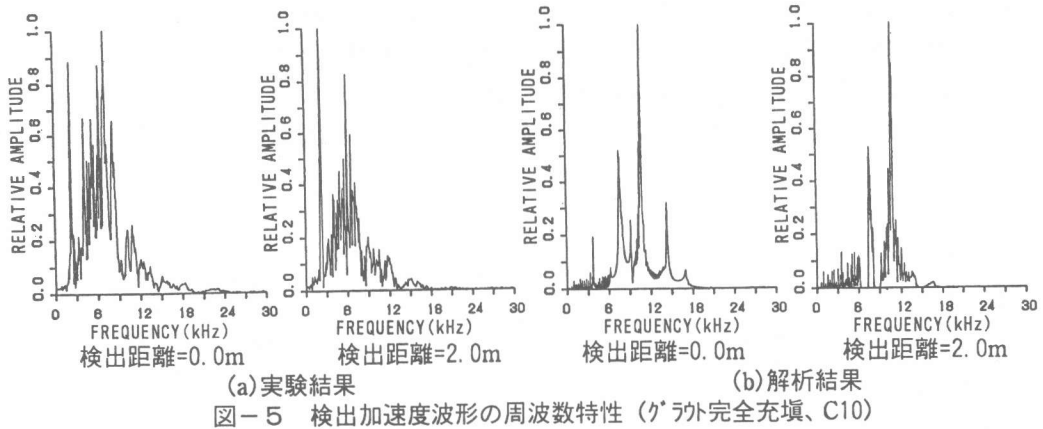
図-4 解析モデルの一例

3. 結果とその考察

3.1 周波数応答特性

図-5および図-6は、それぞれグラウトが完全に充填および未充填である場合のPC床板のコンクリート表面で検出された加速度波形の30kHzまでの範囲における周波数応答特性 (振幅スペクトル) に関する実験結果と解析結果の一例を計測距離別に示したものである。これらの図によ

れば、コンクリート表面のいずれの計測点においても、約2kHz（解析結果では認められない）、7~8kHzおよび11~13kHzで卓越する周波数成分が存在しているのが認められる。図-7(a)~(c)に、これらの周波数領域で観察される代表的なPC床板の振動モードを示す。



(1) 約2kHzの卓越周波数成分：本実験で用いたPC床板は、枕木によって床板両端から1.0mの位置でピン支持されているが、図-7(a)の枕木位置を固定端に設定した場合の振動モード図によれば、この周波数時の振動モードは、床板端部から1.0mの区間における3次の共振モードに相当していることがわかる。

(2) 7~8kHzの卓越周波数成分：この周波数領域で観察される代表的な振動モードは、図-7(b)から明らかなように、PC鋼棒、グラウトおよびコンクリートが一体となった全体的なPC

床板の厚さ方向の振動モードとなっている。この周波数を弾性波の伝播速度4400m/sを用いて距離に換算すると28~31cmとなり、PC床板の厚さ（約27cm）とほぼ一致する。

(3) 11~13kHzの卓越周波数成分：この周波数は、図-7(c)から明らかなように、PC床板のかぶり部コンクリートが厚さ方向に縦振動する結果を反映したものと考えられる。また、グラウトが未充填の場合にはPC鋼棒とかぶりコンクリートとの境界が空気層（自由境界）となっており、かぶりコンクリート部のみの振動をより明確に検出できるため、一般的にPC鋼棒周囲にグラウトが充填されている場合よりも未充填の場合の方が、この周波数成分の卓越傾向が著しくなる傾向を示す。

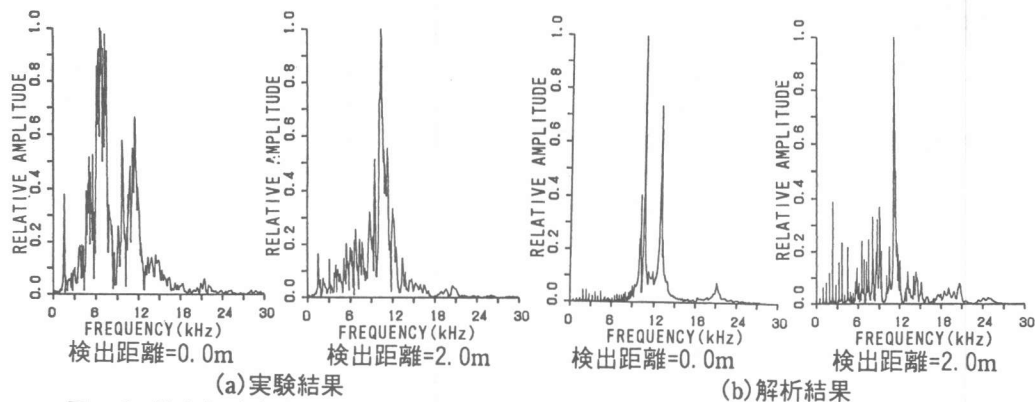


図-8 検出加速度波形の周波数特性(グラウト状況:端部未充填、未充填長さ:2.5m、C3)

図-8は、グラウト未充填区間が床板端部に2.5m存在している試験体の結果（グラウト未充填側のPC鋼棒端部から弾性波を入力）を前掲の図-5および図-6と同様の方法で整理したものである。図から明らかなように、いずれの計測位置の場合もPC床板の全厚（7~8kHz）とかぶり厚さ（11~13kHz）に対応した2種類の卓越周波数成分が認められるが、計測距離が2.0mの場合には、11~13kHzの周波数成分が著しく卓越した特性となっているのがわかる。図

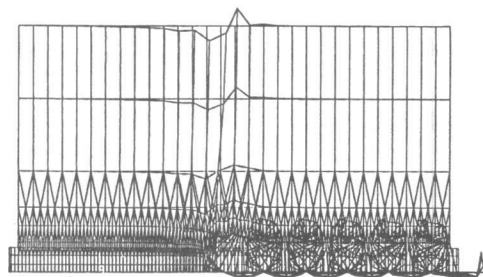


図-9 PC床板の代表的な振動モード図(グラウト状況:端部未充填、未充填長さ:2.5m、周波数:11.0kHz)

9は、この周波数時の代表的な振動モードを示したものであるが、この場合の振動モードは、グラウト未充填/充填境界位置にあるかぶりコンクリートの厚さ方向への局所的な振動モードとなっている。このことは、グラウト未充填/充填境界位置のコンクリート表面で検出された弾性波は、弾性波を他の位置で検出した場合よりも、かぶり厚さに相当する周波数成分がより卓越する傾向にあることを示唆している。

3.2 卓越周波数間隔

図-10および図-11は、それぞれグラウトが完全に充填および未充填である場合の試験体のコンクリート表面で検出された加速度波形の卓越周波数間隔が確認できるように周波数の上限を5kHzとして整理した実験結果および解析結果の一例を計測距離別に示したものである。グラウトが完全に充填されている場合には、図-10に示すように、実験結果および解析結果のいずれの

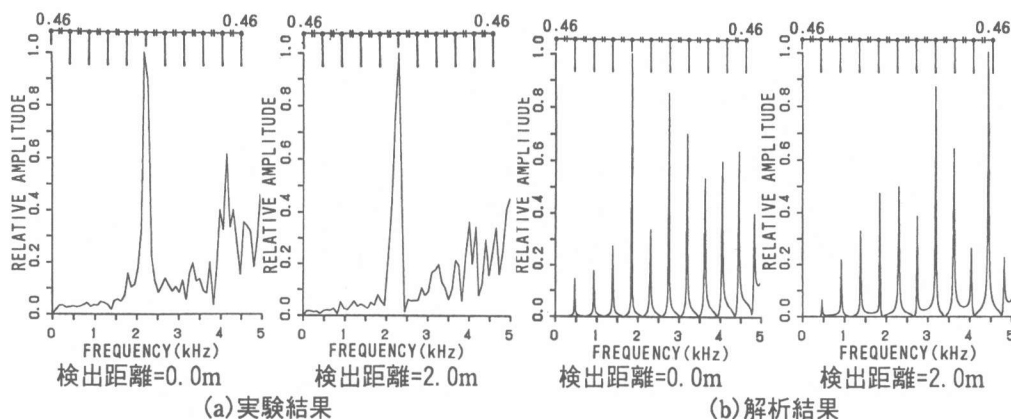


図-10 検出加速度波形の周波数特性 (グラウト完全充填、C10)

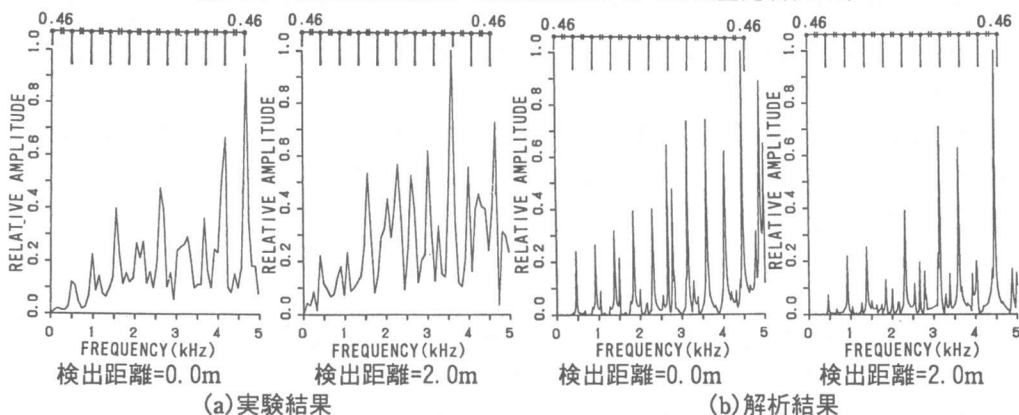


図-11 検出加速度波形の周波数特性 (グラウト完全未充填、C0)

場合もPC鋼棒端部で弾性波を検出した場合の結果[4]と同様に、PC床板全体の振動に起因する約460Hzの規則的な周波数間隔で卓越する周波数成分が認められる。これは、PC鋼棒とグラウトの振動が、PC床板全体の振動を引き起こし、PC鋼棒と床板とがグラウトによって完全に一体化した振動モードを示しているためである。一方、グラウトが完全に未充填の場合(図-11参照)、解析結果ではグラウト充填試験体と比較して基本周波数間隔(約460Hz)以外に、PC鋼棒のみの振動に起因する約500Hz間隔の卓越周波数成分[4]が確認できるが、これは、PC鋼棒とシーす内の空隙部分とがそれぞれ独自の振動モードを示すためと思われる。このことから、PC床板全体の振動に起因する規則的な約460Hz間隔の基本卓越周波数成分以外の周波数成分の卓越状況によって、グラウトの全体的な充填状況を評価できる可能性があるといえる。ただし、実験結果においては、約500Hz間隔の卓越周波数成分が明確には認められていないため、今後この点に関して検討していく必要がある。

図-12は、グラウト未充填区間が床板端部に2.5m存在する試験体のコンクリート表面で検出した加速度波形の周波数応答特性に関する結果を前掲の図-10と同様の方法で整理したものである。図によれば、床板端部のグラウトが未充填の試験体についてもグラウトが完全に充填されている試験体(図-10参照)の場合と同様に、約460Hz間隔で出現する卓越周波数成分が認められるが、これ以外の周波数特性は、検出位置によって異なったものとなっている。また、基本周波数間隔以外の卓越周波数成分に注目してみると、いずれの場合も既報[4]で示した弾性波をPC鋼

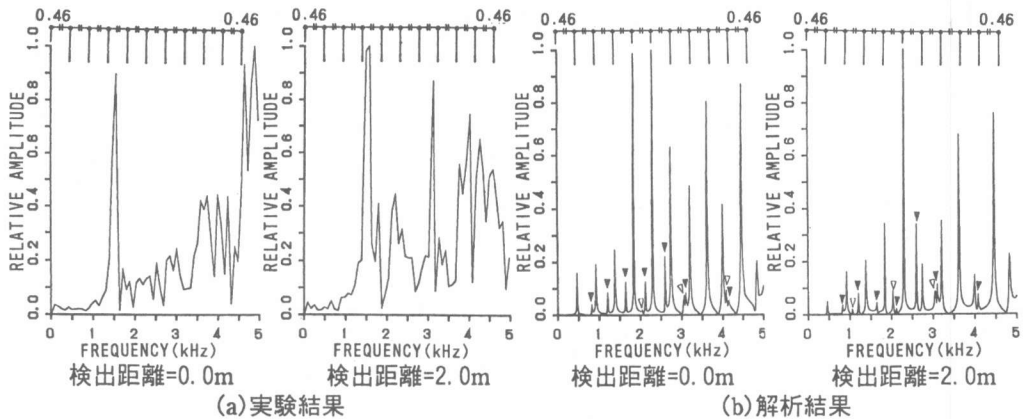


図-12 検出加速度波形の周波数特性(グラウト状況:端部未充填、未充填長さ:2.5m、C3)

棒端部で検出した場合の結果と同様に、未充填長さに対応する約1.0kHzの周波数間隔の卓越周波数成分が認められる。

以上のことから、コンクリート表面で検出した弾性波の周波数特性のうち、卓越周波数の出現間隔に着目することによって、グラウトの充填状況および充填・未充填位置を評価できる可能性のあることがわかる。

4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) コンクリート表面で検出した弾性波には、PC床板の全厚とかぶり厚さに対応する2種類の卓越周波数成分が含まれているが、これらの周波数成分の卓越状況がグラウトの充填状況に応じて変化することに着目することによって、グラウトの充填性を評価できる可能性のあることが解析的に確認できた。
- 2) コンクリート表面で検出した弾性波の周波数特性のうち、規則的な間隔で出現する基本卓越周波数成分以外の周波数成分の卓越状況によって、グラウトの充填状況および充填/未充填境界位置を評価できる可能性のあることが解析的に確認できた。

謝辞

本解析に際してご助力を得た愛知工業大学学部学生の永井孝昭君および原陽子嬢、並びに住友建設(株)技術研究所の松元香保里嬢に対して謝意を表します。

引用文献

- [1]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、1995.6
- [2]山田和夫・黒野幸弘・中井裕司：PC鋼棒中を伝播する弾性波の伝播特性に及ぼす緊張力の影響に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.616-621、1995.12
- [3]黒野幸弘・山田和夫・中井裕司：PC床板のグラウト充填性評価に関する衝撃弾性波法の適用性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.1221-1226、1996.6
- [4]黒野幸弘・山田和夫・中井裕司：PC床板の周波数応答に及ぼすグラウト充填状況に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.880-885、1996.12