

論文 FEM 解析を援用したインパクトエコー法による PC グラウト充填状況の評価

川嶋 雅道^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・古本 吉倫^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：インパクトエコー法では、評価対象の断面形状が板状であることを前提条件として、PC 部材におけるシース内部の空隙に起因するピーク周波数に着目してグラウト充填状況の評価する。しかしながら、上述の前提条件を満たさない場合は、シース深さに対応するピーク周波数のみに着目してグラウト充填状況の評価することは難しいと考えられる。そこで本研究では、正方形に近い断面形状の供試体で、実験により周波数分布を求めると共に、複素応答法による FEM 解析を実施した。その結果、解析により得られた周波数分布は、実験値と良い整合を示すことを明らかにし、それを援用してグラウト充填の有無を判別できる可能性を示した。

キーワード：インパクトエコー法、複素応答法、FEM 解析、周波数分布、フーリエ変換

1. はじめに

PC 部材におけるグラウト未充填箇所を特定する手法の一つとしてインパクトエコー法がある。この手法では、コンクリート表面とシース内部の空隙との間で生じる縦波共振現象を捉えることにより、グラウト未充填と判断している。評価にあたっては、周波数分布における、縦波共振のピーク周波数が用いられる。

Sansalone らの研究¹⁾では、評価対象の断面が板厚に対して平面方向に 2.5 倍の広がりを持つ板状であれば、グラウト未充填の場合、縦波共振による明瞭なピークのみが発現するとしている。しかしながら、断面が上述した条件を満たさない場合、得られる周波数分布には、側面からの反射波等に起因するピークが多く発現し、縦波共振によるピークにのみ着目して評価するのは困難である²⁾。従って、このような場合には、断面の形状や寸法の影響（以降、「形状の影響」とする。）を踏まえた上での評価方法が必要となる。これに対して、渡辺ら³⁾により、対象とする部材断面において要素分割を行い、計測結果

に基づき各要素からの反射波の強さの程度を計算により求め、これを図示することによってグラウト未充填を判断する試みが行われている。

そこで本研究では、形状の影響を大きく受ける断面を有する供試体を用いて、実験により、シース内部のグラウトの有無による周波数分布の特徴の違いを検討した。また、複素応答法による FEM 解析により、モデル断面での周波数分布を求め、実験結果との比較により、その再現性を確認した。さらに、計測および解析結果のそれぞれの周波数分布における特徴を定量的に比較することにより、グラウト充填の有無を判別する手法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-1(a)に示すように、既往の研究¹⁾を参考にし、形状の影響を大きく受ける断面を有するコンクリート角柱供試体を作製した。この供試体では、両端部からの反射の影響を避けるため、供試体長さを 1500mm と十分な長さを持たせた。

*1 岐阜大学大学院学生 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

*3 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 工博

*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

また、PC 部材を模擬するため、供試体断面の中央部に $\phi 85\text{mm}$ のスパイラルシースを埋設した。なお、この供試体においては、グラウト充填前後のデータを取得するため、グラウト未充填において計測した後、グラウトを充填した。なお、グラウトの充填作業では、計測面側のシース内の上部に空隙が生じないように考慮した。一方、比較のため、断面寸法と形状が同一でシースの埋設されていない供試体（以降、「シースなし供試体」とする。）も作製した。従って、供試体のパターンは、グラウト未充填、グラウト充填およびシースなしの 3 種類となる。供試体に用いた同一調合のコンクリートおよびグラウトの圧縮強度は、それぞれ 27.9GPa および 27.8GPa となる。

2.2 弾性波計測方法

弾性波の入力位置は、図-1(b)のように、シース中央部直上のコンクリート表面とした。弾性波入力には、著者らが過去に行った研究成果⁴⁾を参考にし、入力された弾性波の上限周波数が空隙からの反射に起因する縦波共振のピーク周波数を十分上回るよう考慮し、直径 6.0mm の鋼球を用いた。入力される弾性波の上限周波数と鋼球直径との間には、以下の関係がある¹⁾。

$$T_c = 0.0043D, \quad f_{\max} = 1.25/T_c \quad (1)$$

ここで、 T_c ：接触時間 (s)、 D ：鋼球直径 (m)、 $f_{\max}$ ：入力される弾性波の上限周波数 (Hz) である。なお、本研究で用いた直径 6.0mm の鋼球における接触時間および上限周波数を式(1)から計算すると、 $25.8\mu\text{s}$ および 48.4Hz となる。

このように入力された弾性波を、図-1(b)に示すように、入力位置からシース半径方向へ 30mm 離れた位置にて受振した。弾性波の受振には、 $0 \sim 1\text{MHz}$ の間でフラットな応答感度を有するコンニカル型高感度変位センサを用いた。受振された変位波形に対して、高速フーリエ変換を施して周波数分布を算出した。なお、サンプリング時間 $1\mu\text{s}$ 、サンプリング数 2048 個で受振したため、基本周波数は 0.49kHz となる。

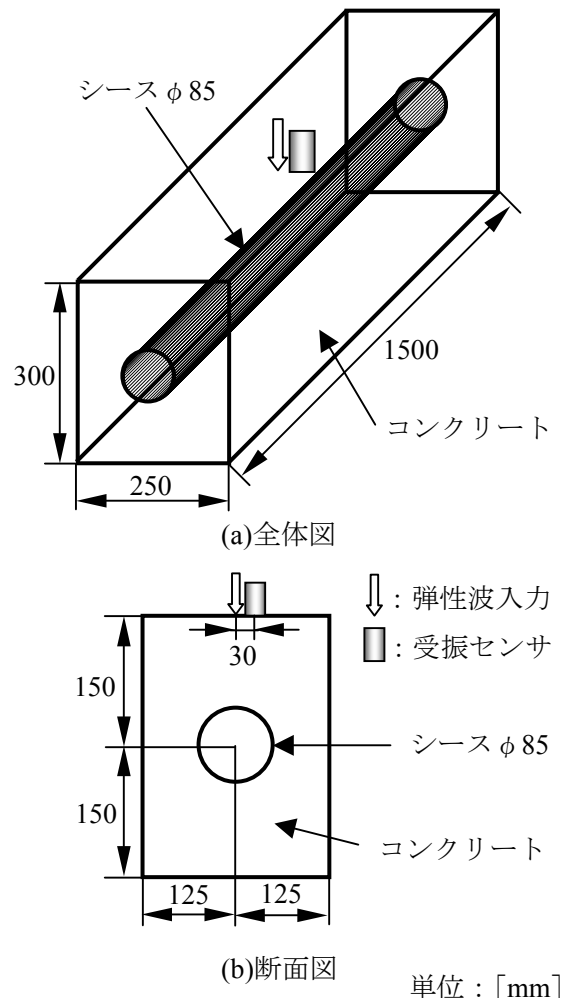


図-1 供試体概要

3. 解析概要

3.1 複素応答法による FEM 解析

インパクトエコー法による周波数分布の解析には、複素応答解析法⁵⁾を用いた。この解析手法では、フーリエ変換を前提として、解析モデルにおける伝達関数（周波数応答）を周波数ごとに独立して求める。この伝達関数に弾性波の入力のフーリエ変換を掛け合わせることで、周波数分布が算出される。すなわち、複素応答解析法では、周波数分布を直接求めるため、間接的に周波数分布を算出する時刻歴応答解析法と比較して、膨大な演算時間を要する必要がなく、十分な解析精度が確保される点が有利である。

3.2 解析モデル

モデルは、断面方向のみの弾性波の伝播挙動に着目して、平面ひずみ要素による 2 次元モデルとした。供試体条件を踏まえて、図-2に示すよ

うに、モデルの断面寸法を250×300mmとした。また、モデルパターンは、グラウト未充填、充填およびシースなしをそれぞれ模擬した3種類とした。これ以降、これら3パターンのモデルをそれぞれ「未充填モデル」、「充填モデル」および「シースなしモデル」と呼ぶ。未充填モデルでは、図-2(a)のように、断面中央部にシース内の空隙に相当する8角形の空間を設けた。一方、この8角形をひとつの要素とみなし、ここにグラウトおよびコンクリートの物性値を設定したものを、それぞれ充填モデルおよびシースなしモデルとした（図-2(b)参照）。なお、平面ひずみ要素には4角形アイソパラメトリック要素を使用し、要素の代表長さを20mmとした。また、本解析に用いたすべての構成材料は等方弾性体として扱い、材料間の接合面は、節点を共有させて一体化した。モデルにおける境界面は、基本的には自由端としモデル隅の4節点のみ固定端とした。

3.3 解析条件

入力および出力は、計測における弾性波の入力および受振位置を想定して、図-2に示すような節点にて行った。入力における外力スペクトルは、既往の研究¹⁾を参考にして、本研究で用いた直径6.0mmの鋼球を考慮して、図-3に示す周波数分布を仮定した。出力結果では、計測条件と同様に基本周波数を0.49kHzと設定した。

4. 周波数分布の特徴のパターンマッチング

本研究では、実験で得られた周波数分布と解析結果とのパターンマッチングを試みた。ここでのパターンマッチング⁶⁾とは、実験での周波数分布の特徴と、解析による周波数分布の特徴との比較を行い、実験での周波数分布が解析でのどの周波数分布に最も近いかを判別する方法である。本研究におけるパターンマッチングでは、ユークリッド距離を活用した。ユークリッド距離とは、2つの周波数分布における特徴に対応した、パターンを表現する空間での2点間の距離である。その値が小さくなるに従い、周波数分

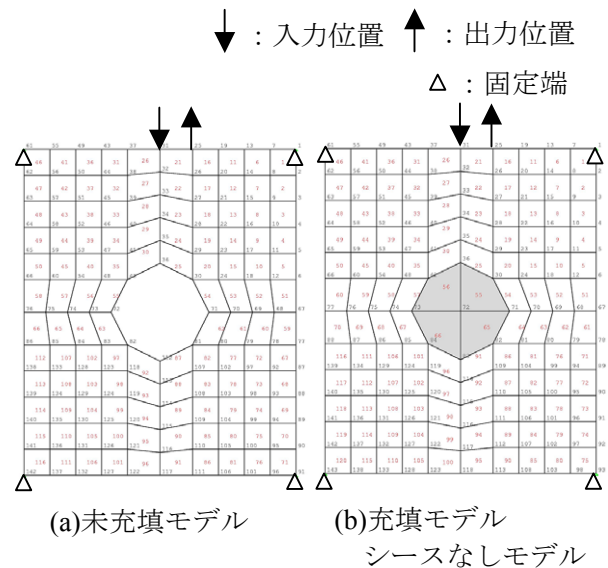


図-2 解析モデル概要

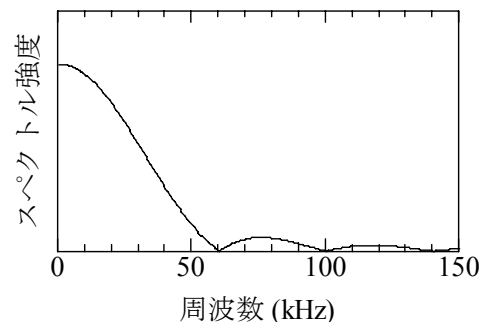


図-3 外力スペクトル

布どうしの類似性が高くなる。なお、ユークリッド距離は、以下の式により算出した。

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - b_i)^2} \quad (2)$$

ここで、D：ユークリッド距離、 a_i および b_i ： i における周波数のスペクトル強度（ $i=1, 2, 3 \sim N$ ）である。

5. 実験結果および考察

5.1 計測された周波数分布の特徴

図-4に、グラウト未充填、グラウト充填およびシースなしの3パターンの供試体条件下において、計測された周波数分布をそれぞれ示す。周波数分布上での1, 2, 3および4は、周波数の低い順に、明瞭に卓越したピークを指す。これらのピーク周波数を、周波数分布の下にそれぞれ記載した。

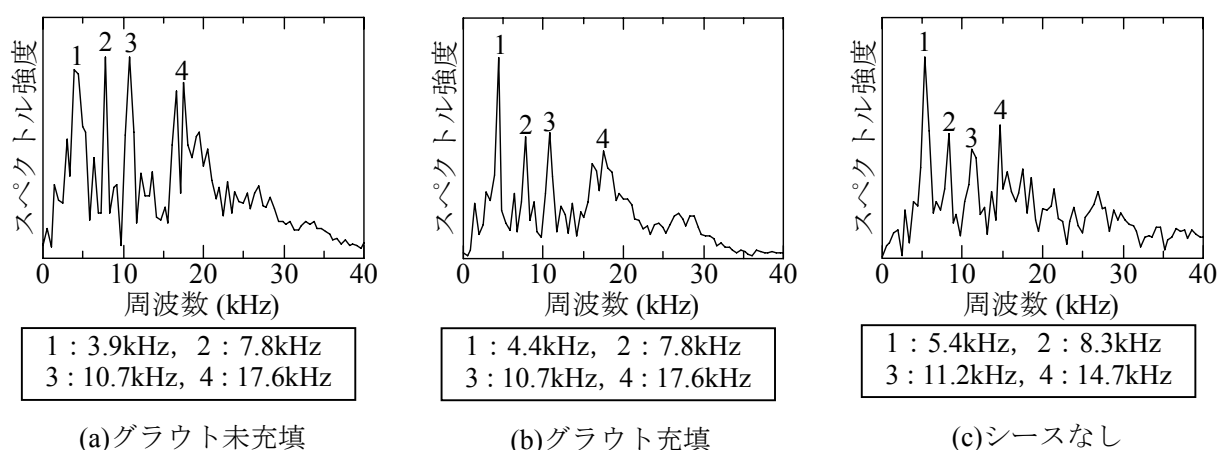


図-4 インパクトエコー法による計測結果

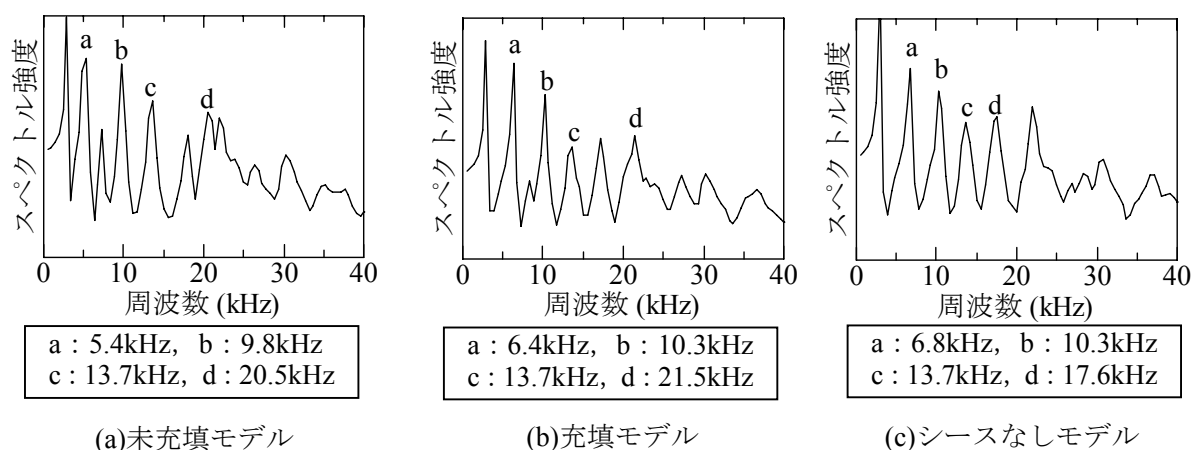
この図によれば、既往の研究²⁾と同様に、全ての周波数分布において形状の影響によるものとみられる多くのピークが発現している。従って、これら周波数分布において空隙に伴うピーク周波数のみに着目してグラウト充填の有無による特徴の違いを確認することは難しい。そこで本研究では、周波数分布全体の形状の特徴を比較して考察した。1, 2, 3 および 4 のピーク周波数に着目すると、おおよそ、シースなしが他の 2 つと異なる値を示している。これは、健全供試体ではシースが配置されていないことが主な理由と考えられる。一方、ピーク周波数がほぼ同じ周波数を示した、グラウト未充填と充填とを比較すると、グラウト充填では、未充填に比べて、ピーク 1 に対するピーク 2, 3 および 4 の相対的なスペクトル強度が小さくなる傾向が見られた。これらは、シース上部で全反射していた弾性波が、グラウトの充填により、ある程度透過するようになったためと考察できる。しかし、その詳細については不明である。

以上のことから、実験による周波数分布では、シースなしシースなしの場合は、シース有の場合とでピーク周波数が異なることや、グラウトの有無により、相対的なスペクトル強度の変化が見られることがわかった。このように、形状の影響を受ける場合においても、断面内部の状況の違いにより、インパクトエコー法による計測結果が異なることが確認された。

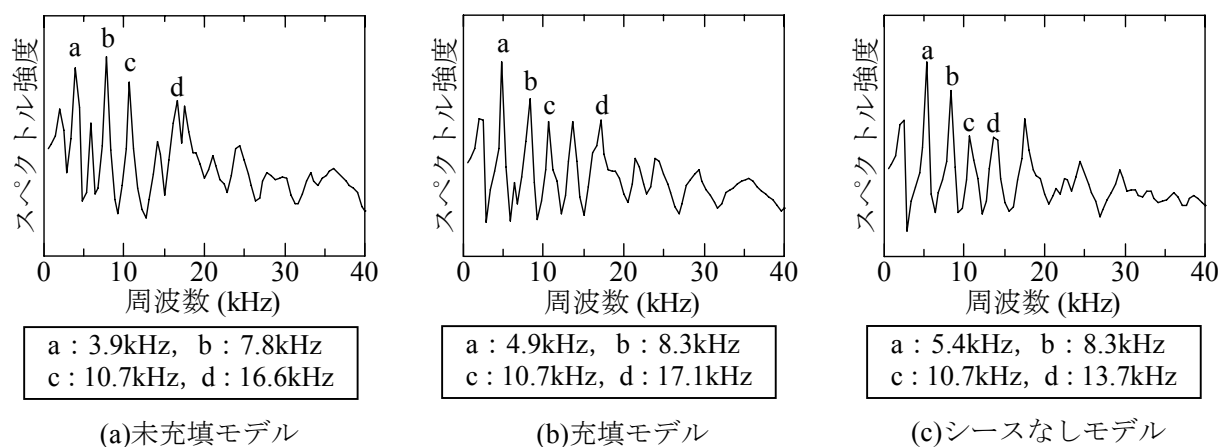
5.2 複素応答法による FEM 解析での周波数分布の再現性に関する検討

解析モデルにおけるコンクリートおよびグラウトの物性値は、著者らの既往の研究⁴⁾においてインパクトエコー法により計測した値を参考にして一般的な値を設定した。このうち、コンクリートは、縦波伝播速度、密度およびポアソン比を、3900m/s, 2.3g/cm³ および 0.2 とそれぞれ設定した。一方、グラウトは、縦波伝播速度、密度およびポアソン比に 3000m/s, 1.9g/cm³ および 0.15 の値を用いた。上述した材料物性値により計算した解析結果を図-5(A)に示す。なお、実験結果と解析結果とのパターンマッチングにより類似性の判定を行うことを前提として、ピーク周波数の整合性を考慮して、便宜的に縦波伝播速度を修正し、再度解析を行った結果も図-5(B)に示す。なお、解析結果の周波数分布上において、計測結果における 1, 2, 3 および 4 のピーク (図-4 参照) に相当すると考えられるピークを、それぞれ a, b, c および d と表記した。また、これらのピークの周波数を図上の周波数分布の下に示した。

図-5(A)によると、a, b, c および d のピーク周波数の相対位置は、計測結果におけるピーク周波数 (1, 2, 3 および 4) の相対な位置関係と良く対応している。さらに、図-5(B)においては、a, b, c および d のピーク周波数が計測でのピーク周波数とかなり近い値となっている。また、



(A)一般的な物性値を用いた場合の解析結果



(B)縦波伝播速度を修正した後の解析結果

図-5 複素応答法による FEM 解析結果

計測結果において見られた、シースなしと他の2つのケースの間でピーク周波数の値が異なる傾向が、解析においても確認できる。一方、計測結果と同様にスペクトル強度に着目すると、充填モデルでは、未充填モデルに比べて、ピーク1に対する2, 3および4のスペクトル強度が相対的に小さくなっている。

以上より、本研究においては、グラウト未充填、充填およびシースなしの異なる供試体での計測により得られた周波数分布の傾向を、FEM解析により良好に評価することができた。このことから、インパクトエコー法における周波数分布の解析において、複素応答法によるFEM解析が有効である可能性が示された。

5.3 FEM解析を援用したグラウト充填状況の評価

5.1節の計測結果より、形状の影響を受ける場

合においても、供試体の内部状況の違いにより、計測される周波数分布の特徴が異なることが確認された。また、この計測結果の特徴を、5.2節より、解析により上手く再現できることが示された。これらの知見より、グラウト充填の場合と未充填の場合とについて事前に解析を行い、その結果と計測による周波数分布の特徴の比較をすれば、形状の影響を受ける場合でもグラウト充填の有無の判断が可能であると考えられる。

そこで本研究では、実験結果と解析結果を比較し、それらの類似性を定量的に評価することを試みた。なお、本研究においては、類似性の判断において、4章に示したパターンマッチングを用いた。このパターンマッチングでは、まず、対象とする断面のモデルにおいて、想定される内部状況のパターン、すなわち、グラウト充填

表－1 パターン認識によるパターンマッチングの結果

標準 入力	複素応答法による解析結果			パターンマッチング 結果
	グラウト未充填	グラウト充填	シースなし	
計測結果(a)	1.22	1.45	1.61	未充填モデル
計測結果(b)	1.46	1.44	1.56	充填モデル
計測結果(c)	1.89	1.53	1.14	シースなしモデル

計測結果(a)：グラウト未充填，計測結果(b)：グラウト充填，計測結果(c)：シースなし

の場合と未充填の場合とについて，あらかじめ解析により周波数分布を求める。この際，パターンマッチングでは，ピーク周波数の整合性を確保することが効果的であるため，解析結果には図－5(B)の結果を採用した。また，パターン認識する周波数範囲は，周波数成分が主体となって発現している 3～20kHz の範囲を対象とした。これらの条件の基で，パターンマッチングを実施した結果を表－1 に示す。この表における数値は，各計測結果と，それぞれのモデルでの周波数分布とのユークリッド距離を示している。この値が小さいほど，それぞれの周波数分布の類似性が高いことを意味する。この結果より，本研究および解析の範囲内では，グラウト充填の有無やシース有無であることを良く判定することができた。

以上より，形状の影響を受ける条件下においても，本研究で示すパターンマッチングにより，グラウト充填評価ができる可能性が示された。このパターンマッチングで用いる解析には，複素応答法による FEM 解析を用いるのが有効であることも明らかとなった。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 複素応答法による FEM 解析の結果は，実験で得られた周波数分布と良好な対応を示した。これにより，本研究で用いた解析手法の有効性が確認された。
- 2) 形状の影響を受ける断面条件下でグラウト充填評価を行う手法として，1) の方法により求めた周波数分布と計測による周波数分

布との類似性を定量的に評価することによって，グラウト充填の有無を判断する方法の可能性が示された。

参考文献

- 1) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-254, 1997
- 2) 渡辺健，大津政康，友田祐一：インパクトエコー法による PC グラウト充てん度評価に関する考察，材料，Vol.48, No.8, pp.870-875, 1999
- 3) 渡辺健，渡海雅信，小阪浩二，大津政康：インパクトエコー法の画像処理に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000
- 4) 川嶋雅道，鎌田敏郎，内藤翔太，六郷恵哲：インパクトエコー法により検出可能なコンクリート中の空隙の大きさと深さについて，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.1693-1698, 2005
- 5) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H.B. : FLUSH a computer program for approximate 3D-analysis of soil structure interaction problem, Proc. of EERC, 30-75, 1975
- 6) たとえば，安居院猛，長尾智晴：画像の処理と認識，昭晃堂，pp.99-114, 2000