

論文 インパクトエコー法の画像処理に関する研究

渡辺 健^{*1}・渡海 雅信^{*2}・小坂 浩二^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨: コンクリート構造物の内部欠陥を検出する非破壊検査手法のひとつにインパクトエコー法がある。これは、計測した波形の周波数スペクトルのスペクトルピーク位置よりコンクリート構造物の内部欠陥を検出する手法である。しかし、周波数スペクトルのピーク周波数を同定することは容易ではなく、この手法の本質的な欠点となっていた。そこで、周波数スペクトルを利用し、断面画像をビジュアル化し評価する手法の開発を試みた。実際に内部にシース管による空隙を有するプレストレスコンクリート供試体で評価を試みた結果、内部欠陥をビジュアル化し評価することが可能であることが確認された。

キーワード: インパクトエコー法、周波数スペクトル、スペクトルイメージング

1. はじめに

コンクリート構造物の内部欠陥を検出する非破壊検査手法のひとつに、インパクトエコー法がある。インパクトエコー法は、現在トンネルの欠陥調査において広く行われている打音法に類似した手法で、周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥の位置を判断する検査手法である。しかし、理論的には検出可能な内部欠陥の影響によるピーク周波数そのものを、実際の計測により得られた周波数スペクトルのピーク周波数から同定することはかなり困難であった。

そこで、内部欠陥の有無をインパクトエコー法によって得られる周波数スペクトルのピーク周波数のみで判断するのではなく、検査対象である断面のどの位置からの反射が周波数スペクトルに大きく影響しているのかを検討し、その断面画像をビジュアル化することにより評価する手法としてスペクトルイメージングという画像処理手法を開発した。これは、弾性波の伝播および反射経路の距離より求められる周波数と周波数スペクトルの関係のみを利用したもので

ある。

これらのインパクトエコー法の画像処理手法の有効性を検証するために、実際にプレストレスコンクリート(PC)供試体に埋設されたシース管のグラウト充填度を実験的に検討した。

2. インパクトエコー法

インパクトエコー法¹⁾の原理によれば、PCグラウト部で得られる周波数スペクトルでは、板厚によるピーク周波数 f_T 、シース管での反射によるピーク周波数 f_{steel} 、空隙での反射によるピーク周波数 f_{void} が出現すると考えられており、その概要を図-1に示す。これらのピーク周波数は、P波の伝播速度を C_p とすると、それぞれ以下の式(1)、式(2)、式(3)のように表される。ただし、式(1)、式(3)中に見られる係数0.96はP波測定の補正係数とされており、インパクトエコー法の原理と関連するものではない。

$$f_T = 0.96C_p / 2T \quad (1)$$

$$f_{steel} = C_p / 4d \quad (2)$$

$$f_{void} = 0.96C_p / 2d \quad (3)$$

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (正会員)

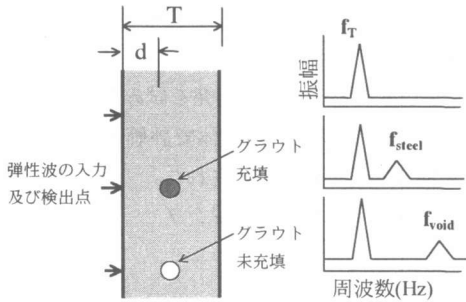
*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻

*4 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

最大 粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)				混和剤 (cc)	スラップ ^o (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
20	50	48	172	344	830	1021	104	5.7	5.4



f_T : 板厚によるピーク周波数
 f_{steel} : シース管によるピーク周波数
 f_{void} : シース管未充填による空隙のピーク周波数

図-1 インパクトエコー法によるグラウト未充填部検出の原理

ここで、波動現象と欠陥位置までの深さとの関係について考察する。波動現象は時間と空間の両者に依存する場合であることより、入力周波数に対する攪乱が確実に生じる条件の重要性が指摘されている²⁾。これについては寸法と波長の寸法パラメータとして、

$$\alpha = f \cdot L / v \quad (4)$$

が導かれている。式(4)において f : 周波数, L : 部材長, v : 弾性波の波速である。このパラメータを用いれば、 $\alpha \geq 1$ の時に内部欠陥の反射の影響による攪乱が顕著に現れるとされる。したがって、 f をグラウト未充填による空隙により得られるピーク周波数 f_{void} , L をシース管の埋設深さ d , v を C_p に置き換えると、 $\alpha=1$ の場合に式(4)は式(5)のように書き換えられる。

$$f_{void} = C_p / d \quad (5)$$

式(3)と式(5)の差異は、スペクトルピークに未充填部による影響が、1 波長で現れるか2 波長で現れるかに過ぎず、式(3)の f_{void} よりさらに高

周波数帯のピーク周波数の存在を式(5)は示唆している。

3. 実験概要

3.1 供試体

PC グラウトの充填度を検討するために、図-2のような250×250×750mmのプレストレスコンクリート供試体を作成した。供試体断面中央にはφ30mmのシース管を設置し、B種1号PC鋼棒(φ11mm)を引張緊張により緊張力155N/mm²で、緊張後にグラウトを充填した。コンクリートの配合を表-1に、28日水中養生後の力学的特性を表-2に示す。グラウトにはグラウト用コロイドセメントをW/C=55%で使用した。その材齢28日の圧縮強度は45.2MPaである。

また、供試体中のP波の伝播速度を計測したところ、P波の伝播速度 C_p は4580m/s程度であった。

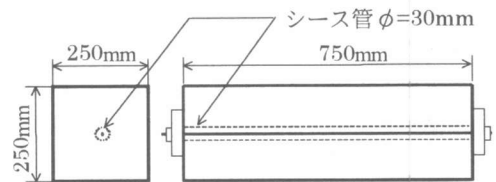


図-2 供試体図

表-2 コンクリートの力学的特性値

引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
3.03	37.94	28.72	0.22

3.2 インパクト試験

プレストレスコンクリート供試体に高周波数の外力を入力するために、アルミ弾を衝突させるインパクト試験を行った。

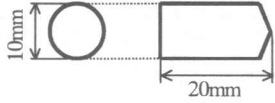


図-3 インパクト試験に用いたアルミ弾

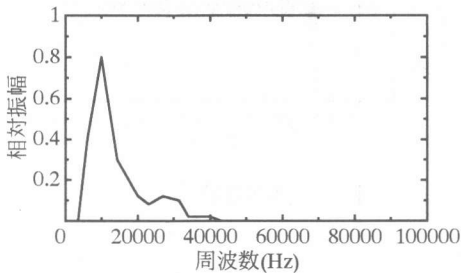


図-4 アルミ弾の持つ周波数成分

アルミ弾は図-3 に示すような直径 10mm、長さ 20mm のものを使用した。これをコンプレッサーの空気圧により、内径 11mm のアルミパイプ内を供試体面とアルミ弾の先端の距離を一定にして発射させた。この際に供試体に入力される周波数の上限は、御影石より作製した丸棒（直径 30mm、長さ 1400mm）供試体にアルミ弾を発射し、計測及び解析した結果、40000Hz 程度であることが確認されている³⁾。その周波数スペクトルの解析結果を図-4 に示す。インパクト試験は両端単純支持した供試体のスパン中央部で行った。その断面に対する計測の様子を図-5 に示す。

この供試体寸法によるピーク周波数 f_T は、 $T=0.25m$ 、弾性波の波速 $C_p=4580m/s$ であるので、式(1)より f_T は 8800Hz 付近に現れると考えられる。また、グラウトの空隙によるピーク周波数 f_{void} はシーすまでのかぶり深さ $d=0.11m$ であるので式(3)より 20000Hz 付近に、同様に f'_{void} は式(5)より 41700Hz 付近に現れると考えられる。

アルミ弾による衝撃の入力は、ここまでの結

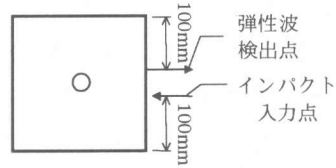


図-5 インパクト入力点及び弾性波検出点

果より入力周波数の上限がほぼ f_T 、 f_{void} 、 f'_{void} まで含んでいることが確認できた。

実験のデータ処理では、加速度計より検出した弾性波の波形をパーソナルコンピュータに記録、FFT 処理することにより周波数スペクトルを求めた。

4. 画像と周波数スペクトル

周波数スペクトルのピーク周波数は、理論的には入力された弾性波が不連続面で反射することにより生じる。そこでスペクトル分布の測定値を基に解析でイメージングを行い、供試体断面での弾性波の反射位置を画像化するスペクトルイメージングという画像処理手法を考案した。

手順としては、まず解析対象の断面を正方形要素に分割しモデル化する。実験に使用したコンクリート供試体断面モデルを図-6 に示す。次に、分割された各要素の中心からの弾性波の反射による共振周波数を求める。その際、弾性波は入力点→要素中心→出力点という伝播経路を通るが、その最短伝播経路を R とすると式(6)のように表される。

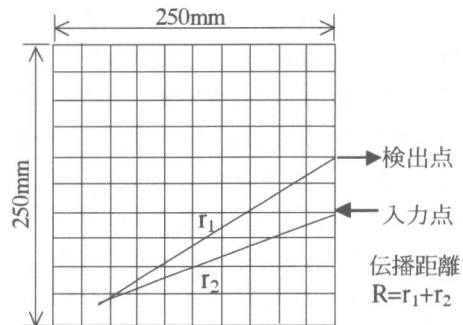


図-6 供試体断面のイメージングモデル

$$R=r_1+r_2 \quad (6)$$

解析対象中を伝わるP波の波速を C_p 、分割された要素の中心で反射することにより生じる共振周波数は、式(7)のように考えられる。

$$\begin{aligned} f_1 &= C_p/(R/2), & f_2 &= C_p/R \\ f_3 &= C_p/2R, & f_4 &= C_p/3R \dots \end{aligned} \quad (7)$$

実測した周波数スペクトルにおいて、式(7)で求められる理論的な反射による共振周波数の振幅値を合計することにより各要素からの反射の影響を検出する。

次に、モデル化する際の分割する正方形要素の大きさの影響について考える。P波の伝播速度 C_p と波形計測時のサンプリングタイム Δt の関係を図-6の経路で考えると、最短経路を与える正方形要素の一辺の長さ Δx は次式のようにになる。

$$\Delta x = 1/2 C_p \Delta t \quad (8)$$

5. 結果及び考察

アルミ弾によるインパクト試験は、供試体にプレストレスを導入する前のシース管にグラウト未充填による空隙がある状態と、プレストレス導入後のグラウト充填によりシース管に空隙がない状態で行った。それぞれの計測波形と、その計測波形をFFT処理した周波数スペクトルを図-7、図-8に示す。計測時のサンプリングタイム Δt は $5\mu\text{sec}$ である。

図-7の波形からでは、シース管のグラウト未充填による空隙の影響による差異はほとんど見られない。図-8に示す周波数スペクトルにおいて、グラウト未充填による空隙のピーク周波数 f_{void} は、 20000Hz 、 f'_{void} は 41700Hz 付近に現れると予想されていた。図-8によれば、シース管にグラウト未充填による空隙がある状態での周波数スペクトルでは、矢印で示す 43000Hz 付近に f'_{void} によると考えられるピーク周波数が見られる。また、 20000Hz 付近には f_{void} と考えられるピーク周波数が存在するものの、他のピーク周波数と混在しているために明瞭に検出されているとは言い難い。しかし、シース

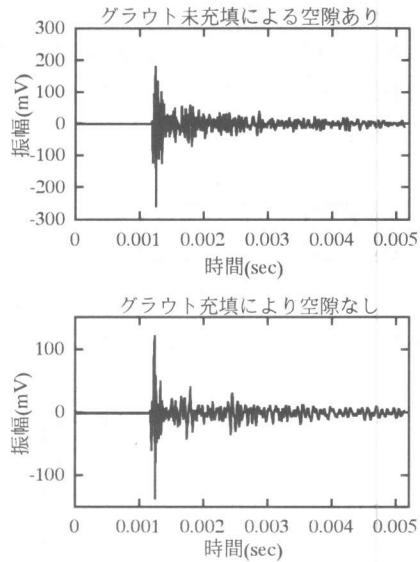


図-7 計測波形

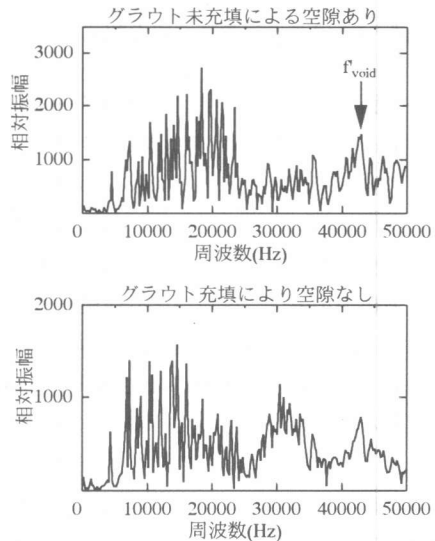


図-8 周波数スペクトル

管がグラウト充填により空隙がない状態での周波数スペクトルでも、 f'_{void} に相当する 43000Hz 付近にピークが見られる。ただし、周波数スペクトルには多くのピークが存在しており、周波数スペクトルのピーク周波数のみから空隙の有無を判断することは容易ではない。これは、計測波形にP波の反射以外の波の成分も混在して

いるためと考えられる。

次に、**図-6** に示すイメージングモデルと**図-8** に示す周波数スペクトルを用いたスペクトルイメージングによる画像処理を行った。P 波の伝播速度速 C_p は 4580m/s、波形計測時のサンプリングタイム Δt は $5\mu\text{sec}$ であり、イメージングモデルで分割した正方形要素の一辺の長さ Δx は式(8)より 11mm 程度と決定される。はじめに Δx を 5mm とした正方形要素で分割したモデルを使用したイメージングの結果を**図-9** に示す。断面の画像は色が濃いほど、その位置での周波数スペクトルの振幅値の和が大きいことを示すようにしており、その要素からの反射の

影響が強くなっていることを意味する。

図-9 より、シース管にグラウト未充填による空隙がある状態の結果とグラウトが充填されて空隙がない状態の結果で多少の差異は見られるが、シース管の縁部に反射の影響は両結果ともに見られなかった。

次に、正方形要素の一辺の長さ Δx を 10mm としたモデルを用いたスペクトルイメージングの結果を**図-10** に示す。シース管にグラウト未充填による空隙がある状態での結果では、断面中央に埋設されたシース管の縁部で色が濃く反射の影響が大きくなっている。また、グラウト充填により空隙がない状態での結果では、グラ

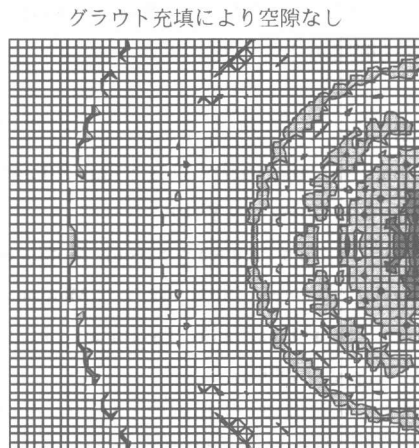
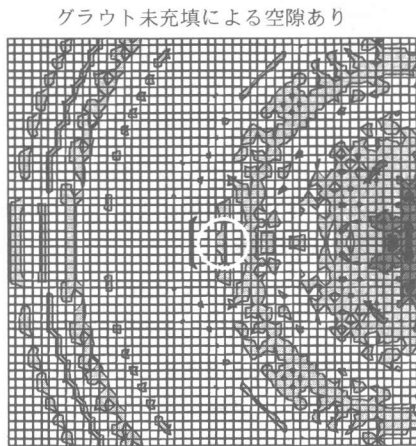


図-9 Δx 5mm のイメージングモデルを用いたイメージング結果

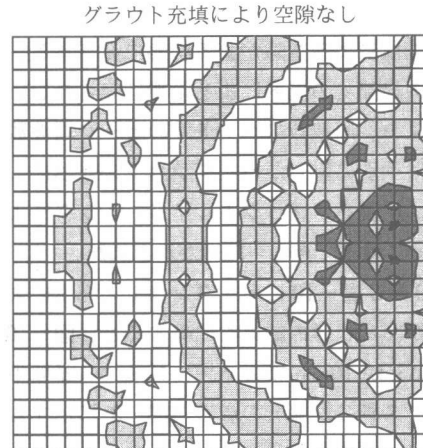
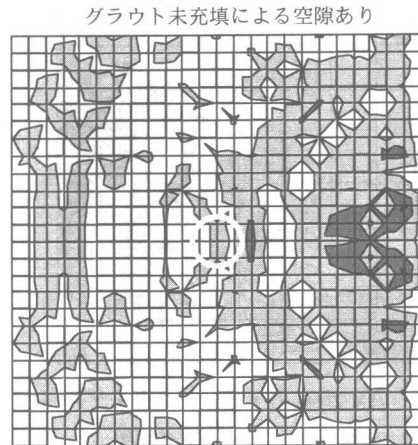
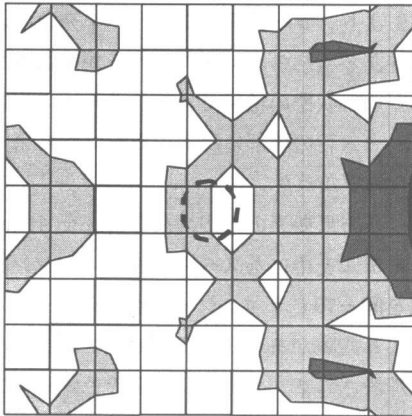


図-10 Δx 10mm のイメージングモデルを用いたイメージング結果

グラウト未充填による空隙あり



グラウト充填により空隙なし

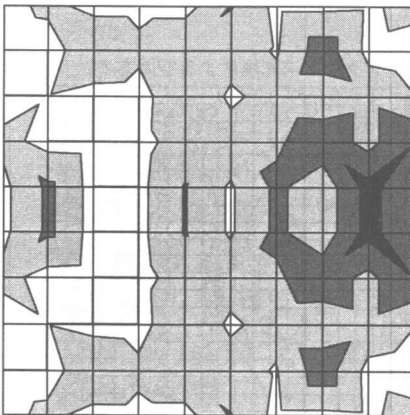


図-11 Δx 25mmのイメージングモデルを用いたイメージング結果

ウト未充填による空隙がある状態で見られるシース管の縁部での反射による影響は見られない。これらより、周波数スペクトルのピーク周波数のみでは判別の難しかったグラウト未充填による空隙の影響を、スペクトルイメージングにより視覚的に検出できる可能性が示された。

図-9及び図-10に示すグラウト未充填による空隙がある状態の結果を比較すると、図-10に示す Δx が10mmでの結果に見られる断面中央のシース管の縁部での影響が図-9に示す Δx が5mmでの結果では見られない。

さらに確認のために、正方形要素の一辺の長さ Δx を25mmとしたモデルを用いたスペクトル

ルイメージングの結果を図-11に示す。図-9と同様にグラウト未充填による空隙がある状態の結果は、グラウトが充填されて空隙がない状態の結果と比較しても明瞭な差異は見られなかった。以上のことより、イメージング処理をする際には、イメージングモデルの正方形要素の一辺の長さが式(8)により決定される Δx に準ずることの重要性が明らかとなった。

結論

インパクトエコー法に関してスペクトルイメージングという画像処理手法を開発し、その有効性を検証するためにコンクリート供試体に埋設されたシース管のグラウト充填度を実験的に検討した結果を以下に示す。

- (1)従来までのインパクトエコー法に基づき、計測波形の周波数スペクトルからシース管のグラウト未充填による空隙を検出することを試みた。しかし、インパクトエコー法で理論的に発生すると考えられる空隙での反射によるピーク周波数を同定することは困難であった。
- (2)スペクトルイメージング処理を行った結果、シース管のグラウト未充填による空隙からの反射の影響を視覚的に表現できることが明らかとなった。その際に、イメージングモデルの正方形要素の一辺の長さはP波の伝播速度と波形計測時のサンプリングタイムとの関係より決定できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Sansalone, M.J. and Streett, W.B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 2) M, Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J. Materials, Concrete Structures and Pavement, JCSE, 544/V-32, pp277-280, 1992
- 3) 白石啓介, 大津政康, 飯田剛史: AEセンサの応答感度較正に関する実験的考察, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第5部, pp576-577, 1998