

SIBIEを用いたコンクリートの欠陥画像の同定

渡海雅信¹・大津政康²

¹大学院学生 熊本大学 大学院自然科学研究科博士前期過程 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

²工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

The impact-echo method recently draws a remarkable attention for nondestructive evaluation of defects in concrete structures. Extracting resonance frequencies responsible for the locations of reflectors, the technique has been marginally successful for practical applications. This is because there exist still unresolved problems. Thus, a new procedure is developed: stack imaging of spectral amplitudes based on the impact-echo (SIBIE). This procedure is applied to a prestressed concrete (PC) beam to classify a grouted duct and an ungrouted. It is confirmed that the location and the presence of the ungrouted duct can be visually identified.

Key Words : Impact-echo method, Resonance frequency, SIBIE

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¹⁾がある。インパクトエコー法は、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(SIBIE)という画像処理手法を開発した。²⁾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有効性を検証するために、実際にプレストレストコンクリート(PC)供試体に埋設されたシース管のグラウト充填度評価を実験的に検討した。更に、P波の速度の変化に対するイメージング結果の精度も検討した。

2. 欠陥検出の原理

(1) インパクトエコー法

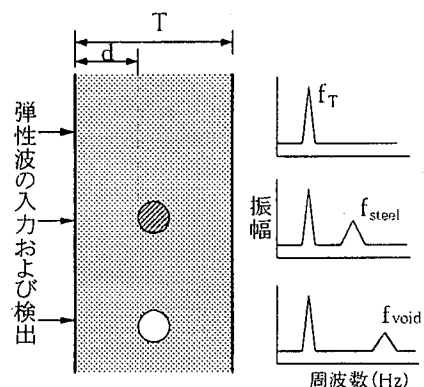
インパクトエコー法の概念によれば、PCグラウト

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³⁾、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。

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

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

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



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

表-1 コンクリートの配合表

最大 粒径 (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (cc)	スランプ 値 (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G			
20	50	172	344	830	1021	104	5.7	5.4

次に、波動現象と欠陥位置までの深さについて考察する。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。これについては寸法と波長の寸法パラメータとして、

$$\alpha = fL/v = L/\lambda \quad (4)$$

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。また、 λ : 波長となっている。波動の攪乱は、このパラメータを用いれば、 $\alpha \geq 1$ のときにひび割れ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、 v を C_p 、ひび割れ深さ r に置き換えると、 $\alpha = 1$ の場合に

$$f'_{void} = C_p / d \quad (5)$$

となる。したがって、ひび割れ深さによる反射の影響のスペクトルピークが発生する周波数として式(5)が導かれることになる。ここで式(3)と式(5)の差異は、スペクトルピークに弾性波の反射による影響が、1 波長で現れるか 2 波長で現れるかに過ぎず、式(5)は高周波数帯のピーク周波数の存在を示唆している。

(2) スペクトルイメージングの原理

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、供試体断面での弾性波の反射位置を画像化するためにスペクトルイメージング: SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)という画像処理法を考案した。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をモデル化したものを図-2に示す。次に、分割されが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、弾性波は入力点から要素中心そして出力点といった伝播経路を通るが、その最短伝播経路を R とすると式(6)のように表される。

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

解析中に伝わる 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、モデル化する差異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 2 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 は次式のようになる。

$$\Delta x = \frac{1}{2} C_p \Delta t \quad (8)$$

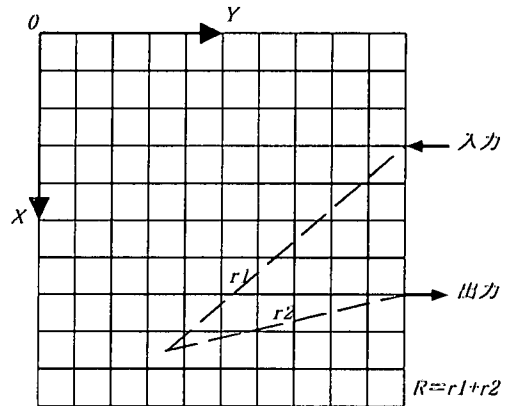


図-2 供試体断面のイメージングモデル

3. 実験概要

(1) 供試体

PC グラウトの充填度を検討するために、図-3 のような 250×250×750mm のプレストレストコンクリート供試体を作成した。供試体断面中央には $\phi 30$ mm のシース管を設置し、B 種 1 号 PC 鋼棒 ($\phi 11$ mm) 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 28 日材齢の圧縮強度は 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 波の伝播速度は 4500m/s 程度であった。

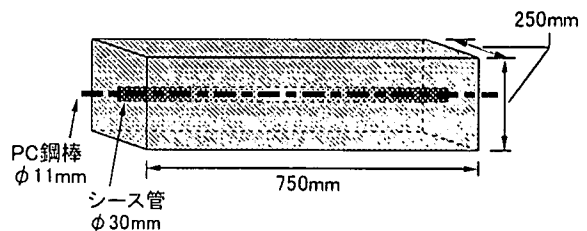


図-3 供試体図

表-2 コンクリートの力学的特性

引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
3.03	37.9	28.72	0.22

(2) コンクリート供試体の持つP波速の測定試験

インパクトエコー法を用いる際、最も重要とされているパラメータのP波の速度測定試験を行った。

50mmの厚さのコンクリート供試体を用い透過法によって測定した。供試体上部で探触子により発振させ、供試体下部で探触子により受振させた。その伝達時間の計測を行い弾性波の波速を求めた。計測地点は供試体中心だけでなく、まんべんなく供試体の表面全体とした。また、結果は計測回数(20回)の平均値とした。実験概要は図-4に示す。

これらより、P波の波速は4500m/sとなった。

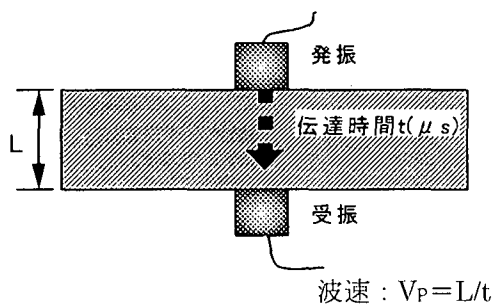


図-4 測定方法

(3) インパクト試験

プレストレスト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、アルミ飛翔体を衝突させるインパクト試験を行った。

アルミ飛翔体は図-5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飛翔体の先端の距離を一定にして発射させた。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を図-6に示す。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。

インパクト試験では、入力する衝撃の持つ上限周波数が内部欠陥によって生じると考えられる共振周波数まで含むことが重要である。そこで供試体に入力される周波数の上限を50×250×250mmのコンクリート供試体にアルミ飛翔体によるインパクト入力を行い確認した。実験は図-7のような状態で行い、インパクト入力により発生した波形を計測及び解析した周波数スペクトルの解析結果を図-8に示す。

プレストレストコンクリート供試体の寸法によるピーク周波数 f_T は、 $T=0.25m$ 、弾性波の波速 $C_P=4500m/s$ であるので、式(1)より f_T は8700Hz付近に

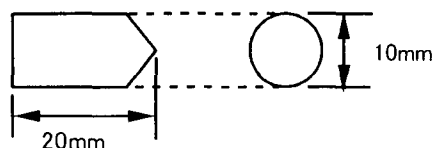


図-5 インパクト試験に用いたアルミ飛翔体

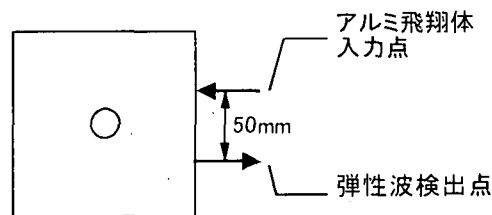


図-6 インパクト入力点及び弾性波検出点

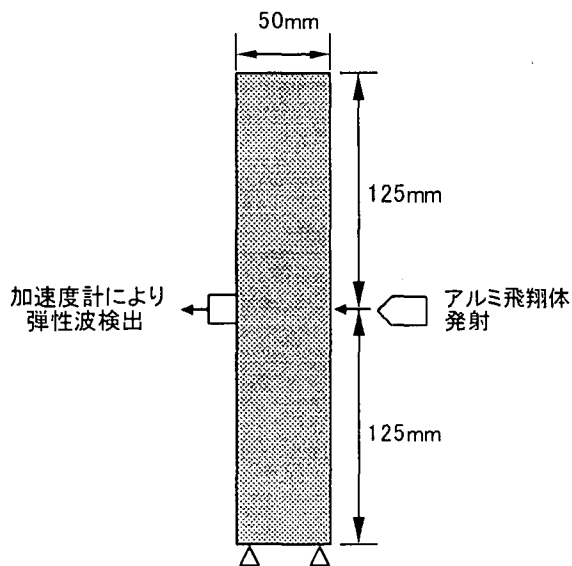


図-7 インパクト入力の上限周波数を確認試験

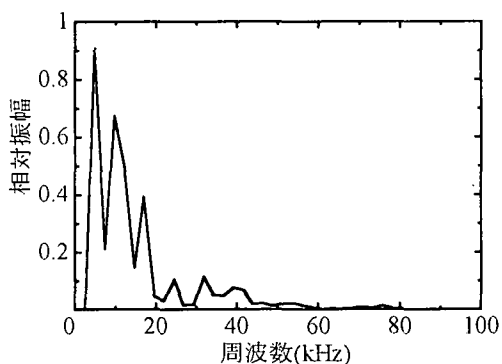


図-8 アルミ飛翔体の持つ周波数成分

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} はシース管までのかぶり深さ $d=0.11\text{m}$ であるので式(3)より 20000Hz 付近に、同様に f'_{void} は式(5)より 40900Hz 付近に現れると考えられる。

図-8によると、アルミ飛翔体による衝撃の入力は、 40kHz 付近までの入力成分を有してお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。

4. 解析手法

(1) 境界要素法 (BEM) ⁴⁾

境界要素法は微分方程式で与えられる場の支配方程式と境界条件を積分方程式に変換し、有限要素法と同様な離散化手法を境界のみに適用し、これを解く手法である。境界要素法の特徴は、境界だけを要素に分割して計算するので、対象とする問題の次元を一次元下げて取り扱うことができるから、領域全体を離散化の対象とする有限要素法などのほかの手法に比べ、入力データ量や計算時間を大幅に減少できることである。

(2) 解析条件

2次元動的BEM解析で任意の周波数 f での定常場の積分方程式を解くことにより境界上の変位を決定した。今回の解析においては周波数 f を連続的に変化させて解析することにより、供試体における周波数スペクトルの再現を試み、それよりスペクトルイメージングを行った。

また、弾性波の波速 C_p を変化させることによりイメージング画像がどのように変化するのかを検討した。

BEM 解析においては均質体としての力学特性が必要である。そこで密度は 2470kg/m^3 とシヤアソン比と弾性係数は表-2の値とした。また、弾性波の波速とサンプリングタイムは実験値と同様とした。

5. 結果及び考察

(1) スペクトルイメージング (SIBIE) の結果

アルミ飛翔体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。それぞれの波形を、計測波形よりFFT処理した周波数スペクトルを図-9、図-10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-9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-10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にピーク周波数 f_{void} は 20000Hz 、 f'_{void} は 40900Hz 付近に現れると予想されている。図-10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は、矢印で示

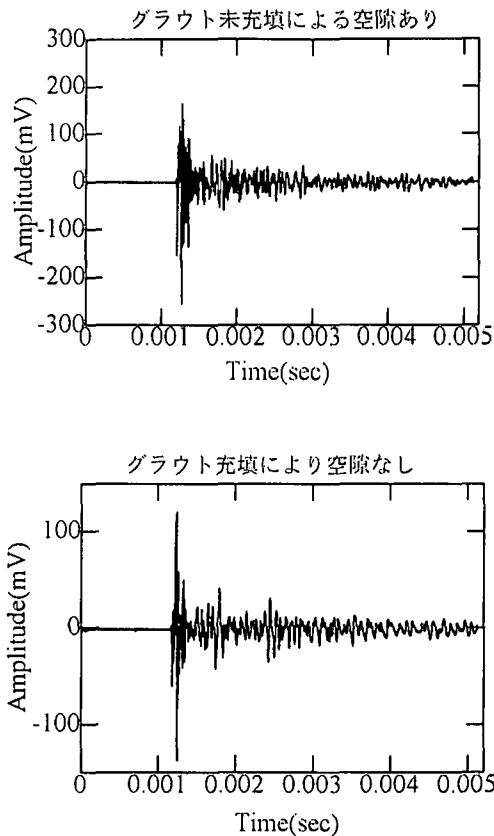


図-9 計測波形

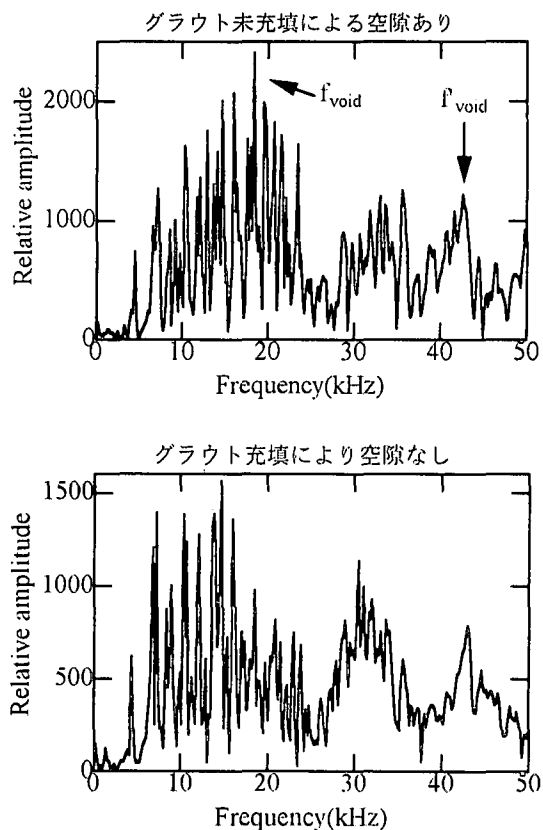


図-10 周波数スペクトル

す 19000Hz・41000Hz 付近には $f_{\text{void}} \cdot f_{\text{void}}$ によると考えられるピーク周波数が見られる。しかし、 f_{void} と考えられるピーク周波数は他のピーク周波数と混雑しているために明瞭に検出されているとは言い難い。また、シース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 41000Hz 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、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-2 に示すイメージングモデルと図-10 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 C_p は 4500m/s、波形計測時のサンプリングタイム Δt は 5 μ 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边の長さ Δx は式(8)より 11mm 程度と決定される。結果の見方として断面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。

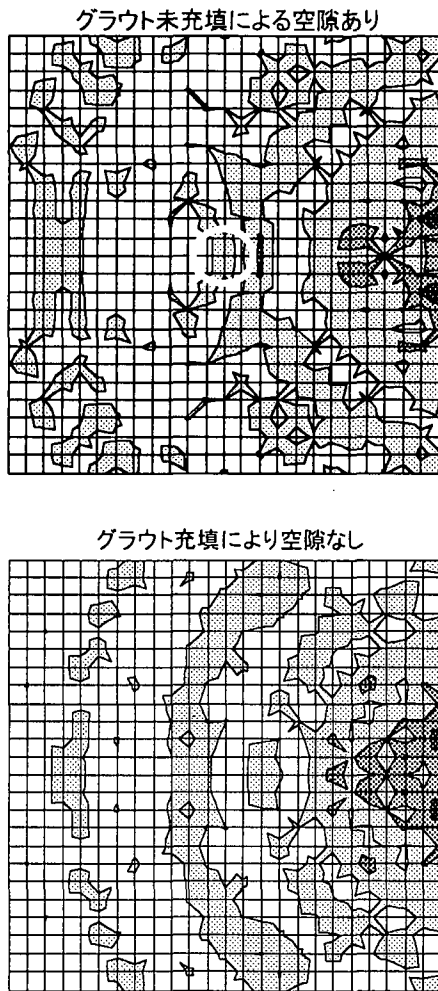


図-11 Δx 10mm のイメージングモデルを用いたイメージング結果

そこで、 Δx を 10mm としたモデルを用いてスペクトルイメージングを行った。その結果を図-11 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は、断面中央に埋設されたシース管の縁部での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(SIBIE)により視覚的に検出できる可能性が示された。

(2) 弾性波速の変化によるイメージング結果の変化

ここでは、BEM 解析で得られた周波数スペクトルを基にスペクトルイメージングを行った。また、弾性波の波速 C_p を変化させることによりイメージング画像がどのように変化するかを検討した。

BEM 解析で得られた周波数スペクトルを図-12 に示す。弾性波の波速 C_p は 4500m/s である。

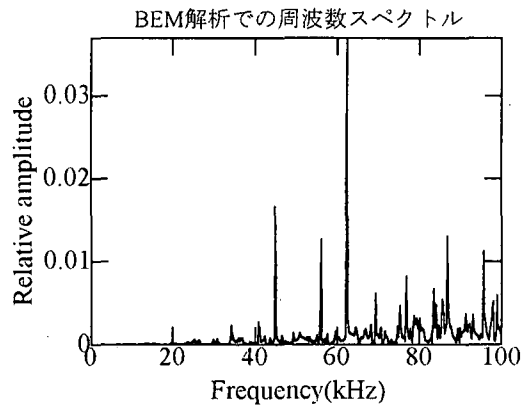


図-12 BEM 解析での周波数スペクトル

弾性波の波速: 4500m/s

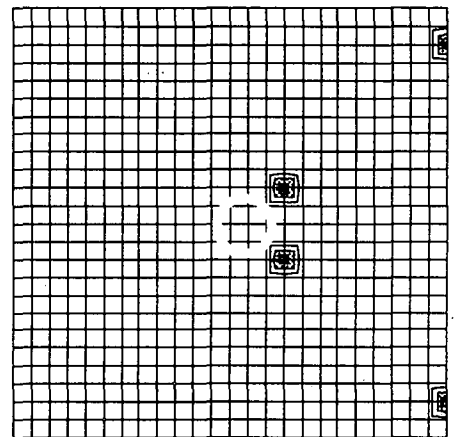
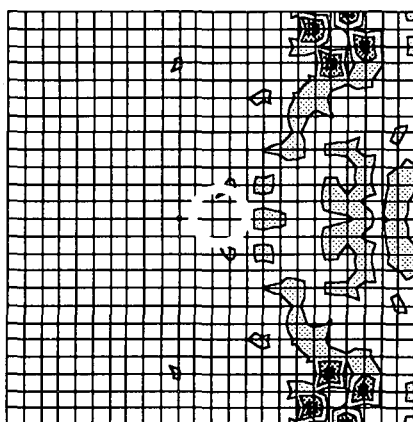


図-12 BEM 解析での周波数スペクトルを用いたイメージング結果

次に、図-2 に示すイメージングモデルと図-12 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。イメージング処理を行う際、弾性波の波速 C_p は 100m/s 刻みで 4400m/s ~ 4600m/s の範囲で変化させた。また、イメージングモデルで分割した正方形要素の一边の長さ Δx は式(8)より C_p が 4400m/s では 10.5mm、4600m/s では 11.5mm となったので Δx は一律 10mm とした。これらの条件より得られたイメージング結果で $C_p = 4500\text{m/s}$ のものを図-13 に、それ以外のものを図-14 に示す。

弾性波の波速を4400m/sに変更



弾性波の波速を4600m/sに変更

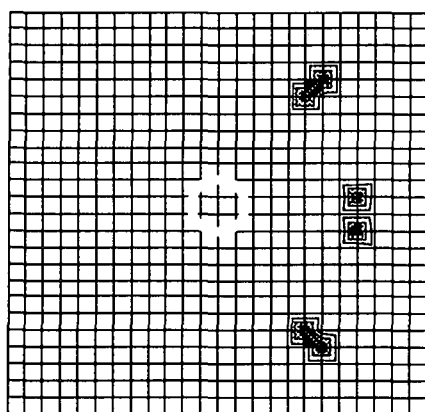


図-14 イメージング処理の際に弾性波の波速を変化させた結果

図-13 より弾性波の波速を実験値と同様の 4500m/s を用いてイメージング処理を行った結果は、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。図-11 のグラウト未充填による空隙ありの結果と比較すると、BEM 解析での結果のほうが各要素での反射の影響が見られない。これは、実験では弾性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-14 よりイメージング処理の際に弾性波

の波速を変化させた結果は、弾性波の波速を 4400m/s にするとシース管の縁部では多少だが反射の影響が見られる。しかし、図-13 の結果と比較すると明らかに判別が困難になっている。また、弾性波の波速を 4600m/s にするとシース管の縁部での反射は見られなかった。これらの結果の原因として、弾性波の波速を変化させることにより、式(7)の値が変わり反射による共振周波数の振幅値の合計が大幅に変化していることが挙げられる。

以上の結果より、スペクトルイメージングを行う際、何らかの要因でコンクリート供試体の持つ弾性波の波速が実際の値より $\pm 100\text{m/s}$ 以上変化してしまうとイメージング結果に大きな影響を与えることが分かった。よって、弾性波の波速を測定する際、より慎重に行うことが絶対条件となってくる。

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・解析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。
- (3)実験で用いたコンクリート供試体に基づき BEM 解析を行い、弾性波の波速の変化によるイメージング画像への影響を調べた結果、BEM 解析によって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確認できた。しかし、イメージング処理の際、実際の弾性波の波速からずれた波速を用いてしまうと反射の影響を確認するのは困難であることが分かった。

参考文献

- 1) Sansalone, M.J. and Streett, W.B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 2) 渡辺健、渡海雅信、小坂浩二、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報告書、Vol.22、No.1、pp.391-396、2000
- 3) M.Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J. Materials Concrete Structures and Pavement, JCSF, 544/V-32, pp277-280, 1992
- 4) 神谷紀生、大西和榮：境界要素法による計算力学、森北出版株式会社、1985