

# 論文 SIBIE を用いた PC グラウトの充填評価の画像処理手法に関する検討

藤垣 博敏<sup>\*1</sup>・渡辺 健<sup>\*2</sup>・橋本 親典<sup>\*3</sup>・大津 政康<sup>\*4</sup>

**要旨** : PC 構造物におけるグラウトの充填評価を非破壊試験にて行う研究は様々である。その中のひとつに、インパクトエコー法を利用した画像処理手法 SIBIE がある。この方法は、既往の研究によって有効性が示されているが、空隙以外の影響により、空隙が明確でない場合もあり、より明確に取り出すためにはさらに検討が必要である。本研究では、周波数スペクトルを2乗することで特徴的なピーク周波数を取り出すことを提案し、実験と解析の両面から試みた。その結果、空隙の影響をより明確に取り出せる可能性があることが判った。

**キーワード** : インパクトエコー法, SIBIE, PC グラウト, 境界要素法

## 1. はじめに

現在、環境問題への関心の高まりや、日本経済の変化、既存構造物の劣化などにより、コンクリート構造物の維持管理が重要視されてきている。近年ポストテンション方式の PC 構造物において、グラウトの充填不良により構造物が劣化しているという事態が生じており、国内外では実際にグラウト不良が原因と思われる PC 鋼材の腐食や、道路橋での破断事故が報告されている<sup>1)</sup>。

そこで劣化状況を把握し、補修・補強工事を適切に行うために、検査・評価技術の発達が強く望まれている。現在では、対象物を広範囲に損傷を与えることなく調査できる非破壊検査が注目されている。その一つにインパクトエコー法<sup>2)</sup>が挙げられ、インパクトエコー法によって得られた周波数スペクトルを利用したスペクトルイメージング SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)を用いたグラウト充填評価に関する研究が提案されている<sup>3)</sup>。

SIBIE によるグラウトの充填評価は、既往の研究によって有効性が示されている<sup>3)</sup>が、空隙以外の影響が問題となっており、より明確に空隙を

検出するためにはさらに検討が必要である。本研究ではシース管を埋設したコンクリート供試体について実験および境界要素法(BEM)解析の双方より、グラウトの充填評価を行い、新しい処理手法を提案する。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本実験では、図-1に示すような 600×600×200mm のコンクリート供試体を作成し、グラウトの充填不良によるシース管内の空隙検出を行うために、グラウトが全く空の金属製のシース管を埋設したものを作製した。そして未充填での評価終了後にグラウトの注入を行った。ここで、コンクリートの配合表を表-1に、28 日水中養生後の力学特性を表-2に示す。

インパクトエコー法および SIBIE による空隙検出には、コンクリート供試体中を伝播する P 波の伝播速度  $C_p$  が必要であることから、予備実験として、超音波を利用した透過法を用いて測定したところ、伝播速度  $C_p$  は 4111m/s であった。

### 2.2 インパクト試験

コンクリート供試体に高周波数の外力を入力

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士 (工学) (正会員)

\*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*4 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 工博 (正会員)

表－1 コンクリート配合表

| 組骨材の<br>最大寸法<br>(mm) | スランプ<br>(cm) | 水セメン<br>ト比<br>(%) | 空気量<br>(%) | 細骨材率<br>(%) | 単体量 (kg/m <sup>3</sup> ) |                  |                 |                 |                 |
|----------------------|--------------|-------------------|------------|-------------|--------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                      |              |                   |            |             | 水<br><i>W</i>            | セメント<br><i>C</i> | 細骨材<br><i>S</i> | 粗骨材<br><i>G</i> | 混和剤<br><i>A</i> |
| 25                   | 8            | 53                | 4.5        | 43          | 146                      | 276              | 728             | 1076            | 4.83            |

するために、鋼球を自由落下させることによりインパクト試験を行った。一般に、鋼球落下により生じる衝撃力の上限周波数は、鋼球とコンクリートの接触時間によって決まり、接触時間は鋼球の直径に大きく依存するとされている。Sansalone<sup>2)</sup>らによれば、接触時間  $t_c(\text{sec})$  は鋼球の直径を  $D(\text{m})$  とすると、もっとも簡潔な式として式(1)のように表される。

$$t_c = 0.0043D \quad (1)$$

また、式 (1) より衝撃力による上限周波数  $f_c$  は式 (2) より決定される。

$$f_c = 1.25/t_c \quad (2)$$

インパクト試験では、衝撃力による上限周波数  $f_c$  が内部欠陥によって生じると考えられる共振周波数より高いことが重要である。今回使用した鋼球は、直径が 5.5mm および 9.5mm のものであり、式 (1)、(2) より上限周波数はそれぞれ  $f_c = 52.9\text{kHz}$  および  $30.6\text{kHz}$  となる。

ここで、インパクトエコー法の原理によると内部欠陥によって生じる共振周波数  $f_{\text{void}}(\text{Hz})$  およびそれよりさらに高周波数帯によって検出す

表－2 コンクリートの力学的特性

| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|------------------------------|-------------------------------|-------|
| 29                           | 23.6                          | 0.2   |

る  $f_{\text{void}}(\text{Hz})$  は、コンクリート中を伝播する P 波の波速を  $C_p(\text{m/s})$ 、コンクリート表面から空隙までの深さを  $d(\text{m})$  とすると次式のように表される。

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

$$f_{\text{void}}^* = 0.96C_p/d \quad (4)$$

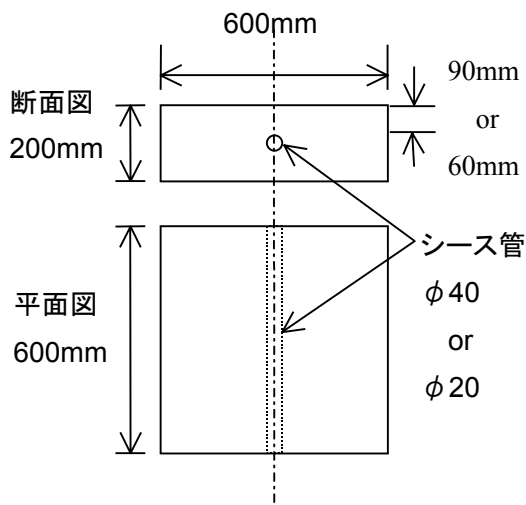
また同様に、板厚によるピーク周波数  $f_t$  並びに鉄筋によるピーク周波数  $f_{\text{steel}}$  は次式により示される。

$$f_t = 0.96C_p/2T \quad (5)$$

$$f_{\text{steel}} = C_p/4d \quad (6)$$

ただし、 $T$  は部材の厚さを示しており、式中に見られる係数 0.96 は P 波測定 of 補正係数である。上式より、深さ 90mm の  $f_{\text{void}}$  は 22.8kHz となり、両鋼球とも十分にその上限周波数を含んでいる。 $f_{\text{void}}^*$  は、45.6kHz となり、直径 5.5mm の鋼球であれば含んでいる。しかし今回の実験では、周波数の計測は 0～40kHz で行い、 $f_{\text{void}}^*$  は基本的には考慮していない。 $f_t$  は、10.3kHz となる。

本実験でのインパクト試験は、供試体を支点間隔およそ 400mm の両端支持した状態で行い、空隙上部またはグラウト充填部の断面上部において計測を行った。計測波は加速度計を用いて検出し、加速度計と鋼球落下点の距離は 10mm とした。その後、検出した弾性波の波形を FFT 処理することにより必要な周波数スペクトルを得た。本計測における計測条件としては、基本周波数  $\Delta f = 50\text{Hz}$ 、サンプリング数  $N = 800$  である。



図－1 コンクリート供試体

### 3. スペクトルイメージングの原理

内部欠陥の有無および位置をインパクト試験

によって得られた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、周波数スペクトルの測定値を用いて、検査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、断面を画像化することにより評価するスペクトルイメージング手法 SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) が開発されている<sup>3)</sup>。

解析手順としては、始めに検査対象の断面を正方形要素に分割し、モデル化する。今回使用した断面のイメージングモデルを図-2に示す。断面のイメージングモデルとしては、供試体および実際に埋設している空隙の寸法を考慮し、200×200mmの断面をモデル化し、正方形要素を5×5mmとした。次に、分割された各要素の交点を仮想点として、そこからの弾性波の反射による共振周波数を求める。その際、供試体内部に弾性波の反射源となる境界面が存在するならば、そこからの反射波の一部が供試体表面のセンサによって検出される。そこで解析において弾性波は、入力点→各要素点の交点→出力点という伝播経路を通ると仮定し、各要素での最短伝播経路をRとすると式(7)のように表される。

$$R=r_1+r_2 \quad (7)$$

ここで、式(3)および式(4)中のdをR/2として、理論的な反射による共振周波数に一致する実測した周波数スペクトルを検出し、その振幅値を合計することでイメージングを行い、各要素点からの反射の影響を検出する。

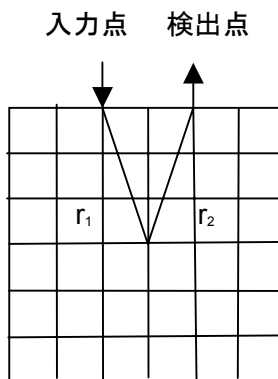


図-2 供試体断面のイメージングモデル

#### 4. BEM 解析

供試体における周波数スペクトルの再現を境界要素法 (BEM) 解析により行った。得られた周波数スペクトルのデータを用いて画像処理を行った。BEM 解析に用いた供試体断面のモデルを図-3に示す。境界の節点間隔は10mmとした。グラウト充填部は、健全部として扱った。BEM 解析を行う際、ポアソン比と弾性係数は表-2の値を使用し、密度は2400kg/m<sup>3</sup>を使用した。

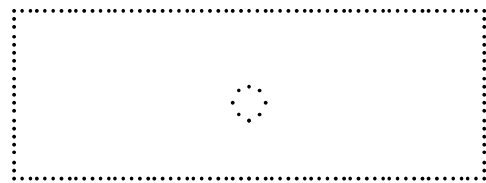


図-3 BEM 解析モデル

#### 5. 結果および考察

##### 5.1 SIBIE による断面画像処理

図-4に BEM 解析から得られた周波数スペクトルを、図-5は直径5.5mmの鋼球でインパクト試験を行って得られた周波数スペクトルを示す。この周波数スペクトルから、画像処理を行った。その結果を図-6、図-7に示す。図中の○はシース管を示し、矢印はインパクト試験における入力点および検出点を示す。

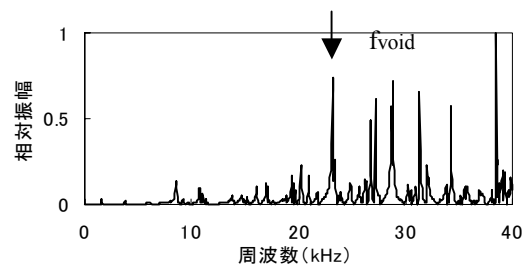


図-4 BEM 解析によるスペクトル図

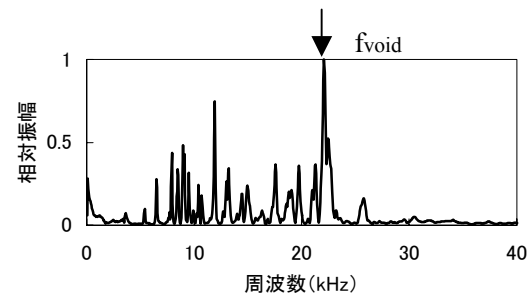


図-5 インパクト試験によるスペクトル図

図-6では、シース管の影響が明瞭に現れているが、図-7では、シース管の空隙からの反射以外の影響を含んでいることがわかる。これより、実験結果をそのまま画像処理を行うと空隙以外の影響を含み、空隙の検出が困難となる可能性がある。

### 5.2 周波数スペクトルの処理を行った SIBIE

空隙を明確にするため、周波数スペクトルの振幅を2乗した後に SIBIE を適用する方法を試みる。2乗することでスペクトルピークが相対的に大きくなり、小さい値はより小さくなるため、空隙以外の比較的小さな影響を減少できると思われる。一般的にフーリエ級数の式は

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \quad (8)$$

のように表す。通常のスペクトルの振幅値は式(8)中の  $a_n, b_n$  より  $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  で表される。本処理では、振幅値を  $a_n^2 + b_n^2$  として扱うことになる。2乗した後に得られた周波数スペクトルを、図

-8および図-9に示す。

周波数スペクトルを2乗することで、空隙以外の影響を減らすことができたと思われる。これは、空隙の影響に比べその他の影響が小さいため減らすことができたと思われる。この周波数スペクトルからイメージング処理を行った。それを図-10および図-11に示す。図-6、図-7と比較すると、イメージング画像からも、空隙以外の影響を減らせたことが確認できた。これより、周波数スペクトルを2乗することで、より明確に空隙の検出による充填評価が可能になった。

### 5.3 グラウトを充填

次に、グラウトを充填した供試体による実験を行った。その実験による周波数スペクトルを図-12および図-13に示す。グラウトの充填により、 $f_{\text{void}}$ が消えているのがわかる。これらの周波数スペクトルを画像処理したものを図-14および図-15に示す。図中の破線で示し

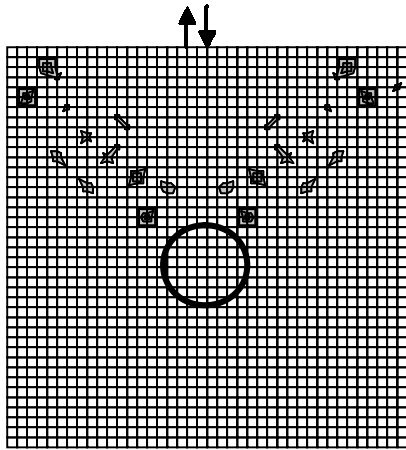


図-6 解析によるイメージング (未充填)

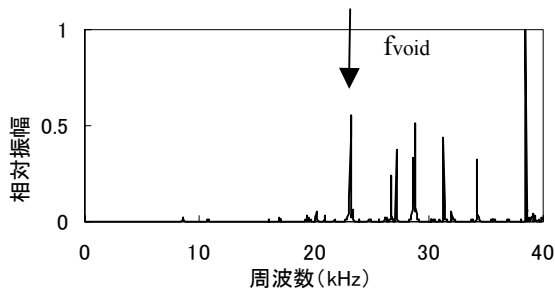


図-8 解析によるスペクトル図

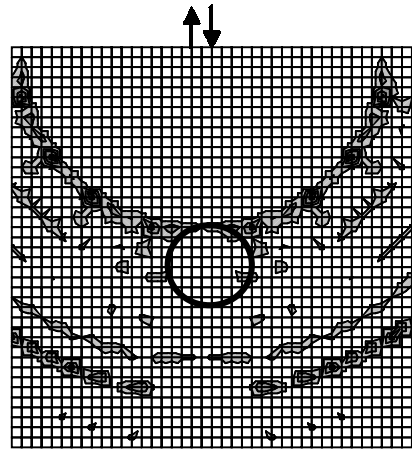


図-7 実験によるイメージング (未充填)

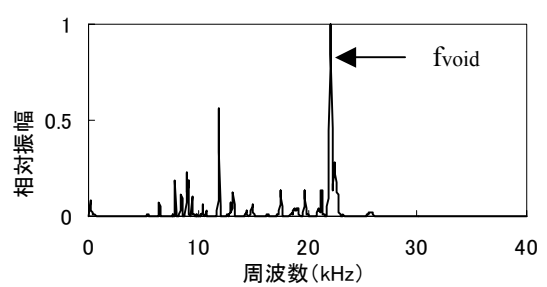


図-9 実験によるスペクトル図

た○は、シース管の位置を示している。

これらの結果から、グラウトの充填によりシース管内が満たされたことがわかる。図-15に見られるシース管下部の影響は図-7でも同様の位置に見られるため、底面以外の境界面からの反射の影響と考えられる。

シース管にグラウトを充填した供試体による実験結果も、周波数スペクトルを2乗することで、充填評価をより行いやすくなった。以上の結果から、インパクト試験によって得られた周波数スペクトルを2乗するデータ処理が、SIBIEによるグラウトの充填評価に有効であることが明らかになった。

## 6. シース管径や埋設深さの違いによる影響

次に、シース管径がφ20mmで埋設深さを60mmとした供試体による実験を行った。グラウト未充填断面のイメージング画像を図-16に、グラウト充填後のイメージング画像を図-17に

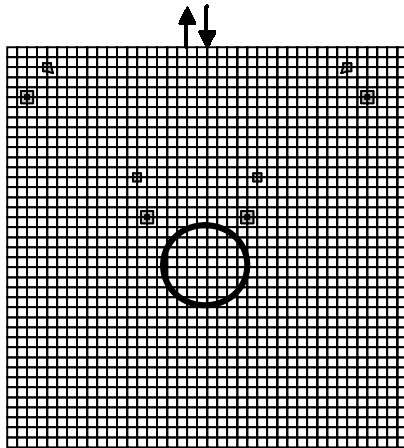


図-10 解析によるイメージング（未充填）

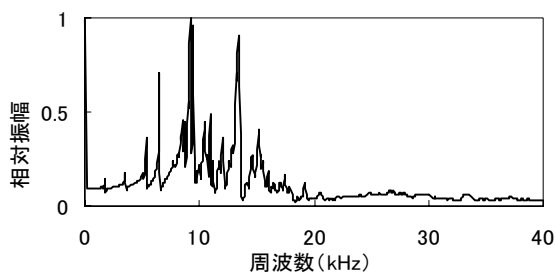


図-12 未処理の周波数スペクトル

示す。

これらの結果からもインパクト試験で得られた周波数スペクトルを2乗するデータ処理が、SIBIEによるグラウトの充填評価に有効であることが明らかとなった。

なお、この供試体においては、空隙位置が浅くなることにより、 $f_{\text{void}}$ が30.6kHzと高周波数となり、その周波数を含む入力を行っているが、計測した高周波数帯は、計測が不安定であった。これは、高い周波数帯が減衰しやすいことと、鋼球によるインパクトの入力では、高い周波数帯域の入力が不安定であることが原因だと考えられる。ここでは、高周波数帯まで計測できているスペクトルデータを使用した。

## 7. 結論

PCグラウトの充填評価の画像処理手法について、インパクト試験とBEM解析によって検討した。その結果以下のような結果が得られた。

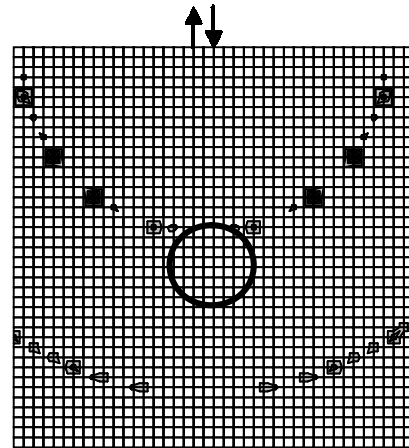


図-11 実験によるイメージング（未充填）

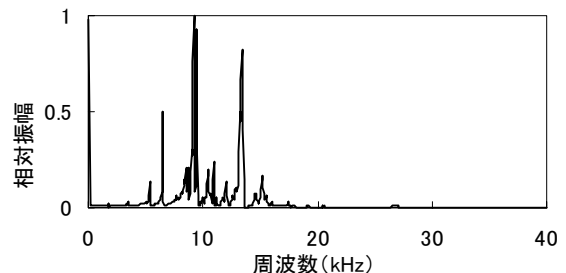


図-13 2乗した周波数スペクトル

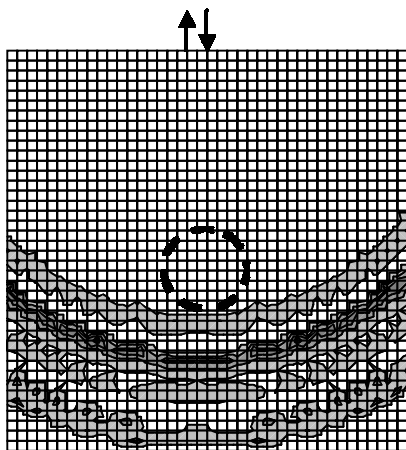


図-14 未処理のイメージング（充填状態）

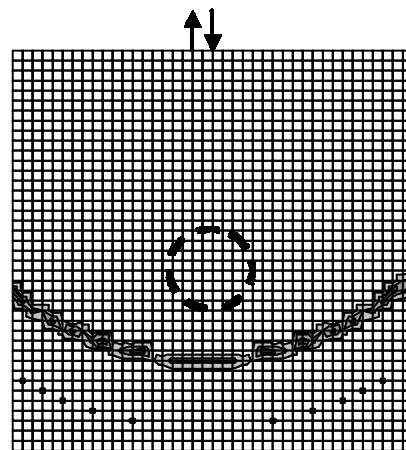


図-15 処理後のイメージング（充填状態）

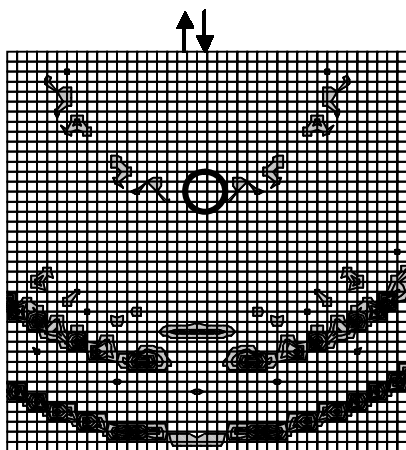


図-16 グラウト未充填のイメージング

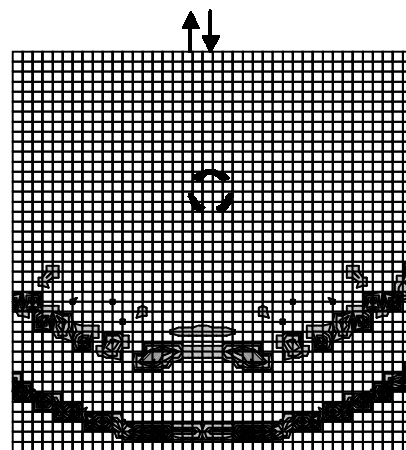


図-17 グラウト充填後のイメージング

- (1)インパクト試験によって得られた周波数スペクトルを2乗することで空隙以外の相対的に小さな影響を減少させることができる。
- (2)グラウトを充填した場合でも、周波数スペクトルを2乗することで、評価がしやすくなる。
- (3)供試体における周波数スペクトルの再現をBEM解析により行った結果からも実験結果を確認できた。
- (4)シース管径や埋設深さの違う供試体による実験結果からも、周波数スペクトルを2乗するデータ処理が、SIBIEによるグラウトの充填評価に有効であることが確認できた。

健全部の周波数スペクトルを利用した処理方

法も検討したが、今回は検査対象断面のデータのみで効果が得られた周波数スペクトルを2乗する処理について、検討を行った。

#### 参考文献

- 1)望月秀次, 本間淳史, 上東泰: PC 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)Sansalone, M.J. and Streett, W.B. :Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca,N.Y.,1997
- 3)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集, Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000