

## 論文 SIBIE による PC グラウト未充填部の検出性能の検討

山田 雅彦<sup>\*1</sup>・渡海 雅信<sup>\*2</sup>・中居 陽子<sup>\*3</sup>・大津 政康<sup>\*4</sup>

**要旨**：インパクトエコー法とは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 1 つである。衝撃力を入力し、検出波の周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥の深さを決定する。しかし、周波数スペクトル上には多くのピークが存在しており、欠陥の同定が困難である場合も多い。そこで調査断面において弾性波の反射の影響を画像化し欠陥部を評価する SIBIE 法を研究中である。本論では非破壊検査手法としての SIBIE の確立および信頼性向上のため、グラウト充填したシース管と未充填シース管との検出性能の比較を行い、検討した結果を報告する。

**キーワード**：弾性波、周波数スペクトル、インパクトエコー法、SIBIE

## 1. はじめに

コンクリート構造物の 1 つとしてプレストレストコンクリート(PC)があるが、グラウトの充填不良は PC 鋼材の損傷を始めとして、構造物の性能低下の大きな一因となる。充填度を確認する方法として、様々な非破壊検査手法が提案されているが、確固たる成果を得ていない。

そこで現在、コンクリート構造物における非破壊検査手法の 1 つであるインパクトエコー法<sup>1)</sup>により得られる周波数スペクトルを用い、調査断面において弾性波の反射の影響を画像化し、欠陥部を評価する SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)<sup>2)</sup>を開発している。

本研究では PC グラウト未充填部検出の評価技術としての SIBIE の確立および信頼性の向上を目的とし、グラウト未充填部、充填部を有するそれぞれの供試体について実験を行い、検出性能の検証を行った。

## 2. グラウト未充填部検出の原理

## 2.1 インパクトエコー法

インパクトエコー法は、弾性的な衝撃力により入力された弾性波を変位型センサで検出記録し FFT 処理により周波数スペクトルを求める。こうして得られた周波数スペクトル上には図-1 に示すように供試体底部の反射による共振周波数  $f_T$ 、内部欠陥反射による共振周波数  $f_{void}$  でスペクトルピークが出現する。供試体中を伝わる P 波の伝播速度を  $C_p$ 、供試体の板厚を  $T$ 、内部欠陥までの距離を  $d$  とすると、出現するピーク周波数は図-1 に示す値を用いることにより、式(1)、式(2)のように表される。

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

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

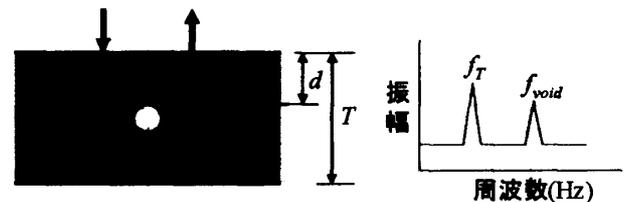


図-1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

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パラメータとして、

$$\alpha = fL / v = L / \lambda \quad (3)$$

が導かれている<sup>3)</sup>。式(3)において  $f$ ：周波数、 $L$ ：部材代表長さ、 $v$ ：弾性波の波速、 $\lambda$ ：波長である。波動の攪乱は、このパラメータを用いれば、 $\alpha \geq 1$  のときに空隙の反射や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  $C_p$ 、 $L$  を板厚  $T$  および埋設深さ  $d$  に置き換えると、 $\alpha=1$  の場合に

$$f'_T = C_p / T \quad (4)$$

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

となる。つまり、板厚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(4)、グラウト未充填部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。ここで、式(1)と式(4)および式(2)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 1/2 波長で現れるか 1 波長で現れるかに過ぎず式(4)、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。

\*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員)

\*2 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻 (正会員)

\*3 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (非会員)

\*4 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

2.2 SIBIE の原理<sup>4)</sup>

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 SIBIE という画像処理法を考案した。手順としては図-2 に示すように解析対象の断面を正方形要素に分割しモデル化する。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から要素中心そして出力点といった伝播経路を通る。その最短伝播経路を  $R$  とすると式(3)のように表される。

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

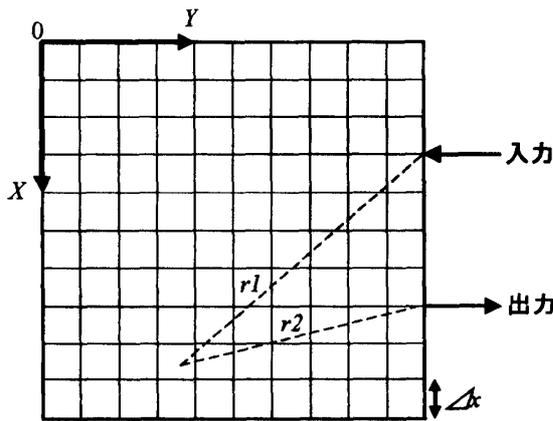


図-2 SIBIE 解析イメージングモデル

解析対象中を伝わる弾性波の波速を  $C_p$  とすると、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。

$$f_R = C_p / R \quad (7)$$

さらに要素からの反射が強調された共振周波数として、

$$f_{r2} = C_p / r_2 \quad (8)$$

が考えられる。実測した周波数スペクトルにおいて、式(7)、式(8)で求められる理論的な反射による共振周波数の相対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。ここで上限を 50kHz、下限は板厚  $T$  による反射である  $f_T = C_p / T$  とした。

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。 $C_p$  と波形計測時のサンプリングタイム  $\Delta t$  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1辺の長さ  $\Delta x$  は次式で与えられる。

$$\Delta x = C_p \Delta t / 2 \quad (9)$$

3. 実験概要

3.1 供試体

PC グラウト未充填部の評価を行うため、図-3 に示すような直方体供試体を作成した。260×400×1000mm の寸法で、φ60mm の鋼製シース管とのφ65mm プラスチック製シース管(材質:ポリエチレン)を埋設した。PC グラウト充填部の評価を行う実験では、図-4 に示すようにシース管の中に斜めに PC グラウトを充填し、その後完全に充填させた。それぞれの供試体の配合と 28 日水中養生後の力学的特性を表-1 に示す。

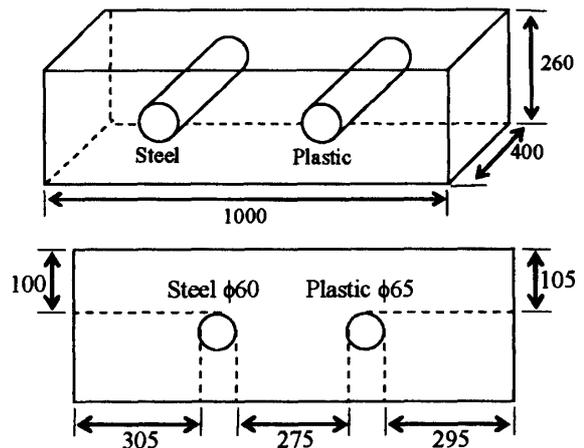


図-3 供試体(mm)

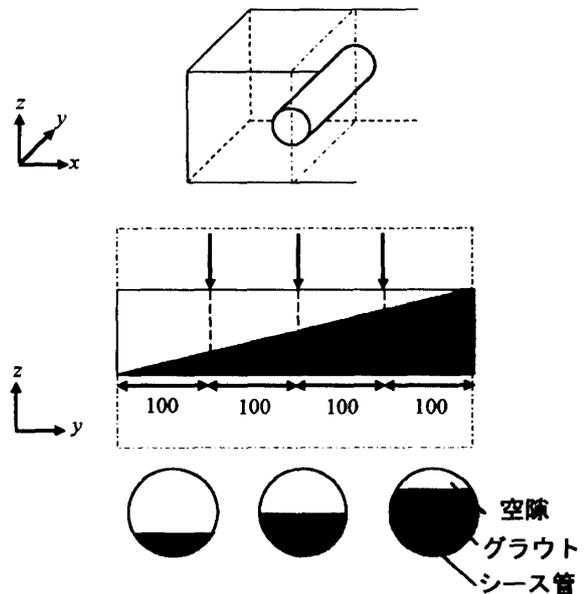


図-4 PC グラウト部分充填部の断面図(mm)

表-1 シース管を埋設した直方体供試体の配合および力学的特性

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				AE 剤 (cc)	スランプ値 (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
		W	C	S	G						
20	55	182	331	743	1159	132	80	4.5	32.5	29.8	0.20

### 3.2 弾性波速度試験

インパクトエコー法を用いる際、弾性波(P波)は重要なパラメータである。そこで表-1の配合により別途作成した100×100×400mmのコンクリート供試体を用い、超音波非破壊試験器で透過法<sup>9)</sup>によりP波の測定を行った。供試体の一端から探触子により発振し、供試体の他端で探触子により受信するまでの伝達時間を測定し弾性波の速度を求めた。実験概要を図-5に示す。測定は20回行い、得られた波速の平均値を弾性波の波速とした。測定したところ4025m/sという結果を得た。

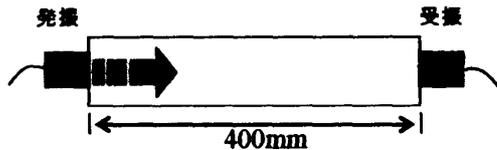


図-5 透過法による弾性波速度試験

### 3.3 インパクト入力試験

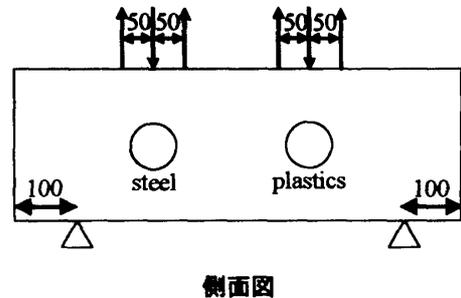
インパクト試験は、高周波数の外力を入力するため、図-6に示すような直径8mm、長さ17mmのアルミ飛翔体を供試体上部表面における埋設されたシース管位置の中心から空気圧約0.05MPaにより衝撃を入力し、その左右の二箇所に加速度計を入力点から50mmの位置に設置して、弾性波の反射波の波形を検出した。試験は供試体を両端単純支持で行った。図-7に示すプラスチック管上部、および鋼管上部、2ヶ所についてインパクト試験を行った。図-7の矢印に示すように、供試体上部表面における埋設されたシース管位置の中心より弾性波を入力し、中心から50mm離れた検出点間隔100mmの2ヶ所を検出点とした1点入力2点検出で行った。

波形の計測は、使用帯域が50kHzまでの加速度計に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し、それをFFT処理することにより周波数スペクトルを求めた。

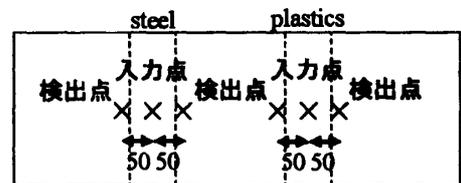
インパクトエコー法では入力する衝撃の持つ上限周波数が、内部欠陥によって生じると考えられる共振周波数を含むことが重要である。各供試体の板厚部、シース管により出現するピーク周波数は、式(1)、式(2)に板厚 $T$ およびシース管までの距離 $d$ を代入することによって40kHz以内に板厚や未充填シース部による共振周波数が出現すると考えられるが、解析する範囲中の弾性波の影響を正確に知るためには、入力周波数はできる限り高周波帯域まであり、かつ、平坦な周波数特性を有するほど良い入力装置であるといえる。今回使用したアルミ飛翔体の衝突試験の上限周波数は、供試体に埋設してある未充填シース管により発生するピーク周波数を十分に含んでいることが確認されている<sup>9)</sup>。



図-6 アルミ飛翔体



側面図



平面図

図-7 計測点および支持点の位置(mm)

## 4. 結果および考察

### 4.1 グラウト未充填部の検出性能の検討

波形を記録する際のサンプリングタイムを4μsecとし、サンプリング数を2048とした。インパクト試験により得られた周波数スペクトルを用いてSIBIE解析で得られた結果を図-8に示す。インパクト試験は図-3に示した供試体で鋼製シース管、プラスチック製シース管について行った。

内部欠陥から明瞭な反射源を検出するために、入力点の左右の加速度計で検出された周波数スペクトルを重ね合わせてSIBIEを行った。イメージングモデルは260mm×300mmの大きさで、メッシュ分割幅 $\Delta x$ は、式(9)より10mmとした。そして、SIBIE画像は、各要素の値を基に5段階に色分けし、色が濃いほど反射の影響が強いことを表している。図中の白丸はグラウト未充填のシース管を示している。また、図上にある矢印はインパクトの位置及び波形を計測する位置を示している。結果の見方としては、5段階中上位2段階が顕著に表れた場合欠陥が検出できたとする。

図-8の結果よりグラウト未充填シース管では管上部および下部で強い反射が確認できた。これらのことより、φ60mmの鋼製シース管においても、また、検出が困難とされているφ65mmのプラスチック製シース管においてもSIBIEを用いることで内部欠陥が検出することができた。

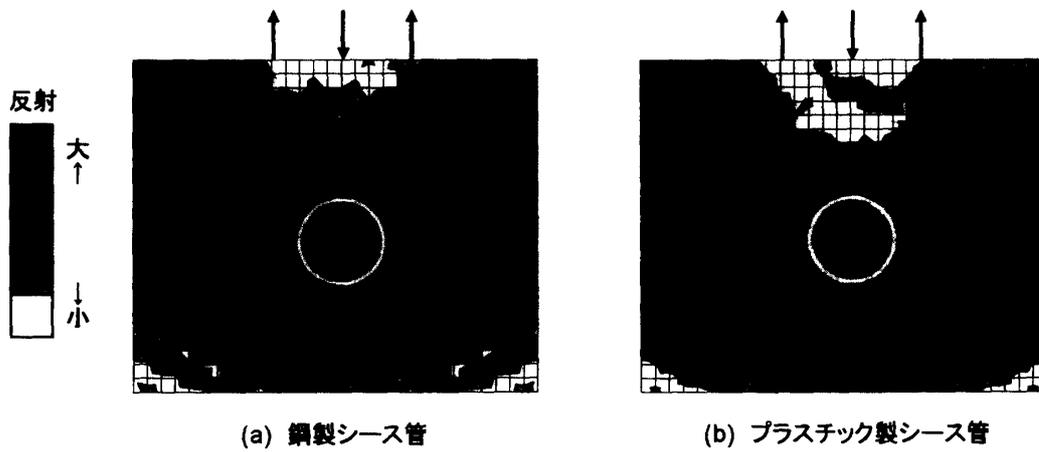


図-8 グラウト未充填部のSIBIEの結果

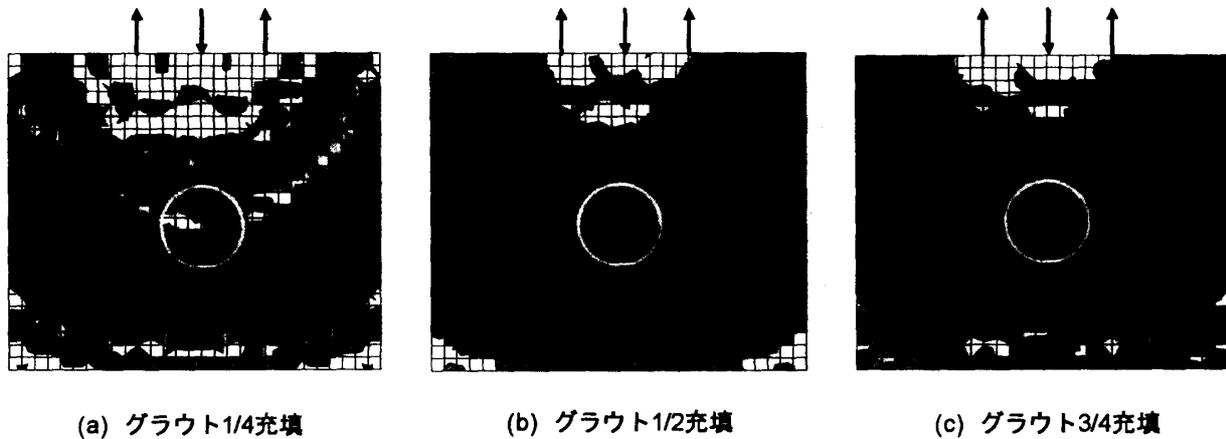


図-9 鋼製シース管におけるグラウト部分充填でのSIBIEの結果

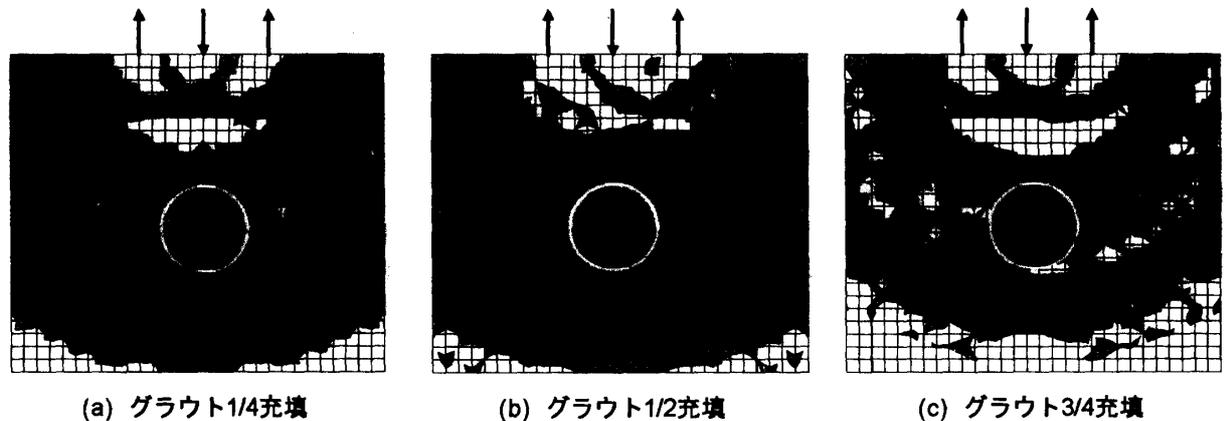


図-10 プラスチック製シース管におけるグラウト部分充填でのSIBIEの結果

#### 4.2 グラウト部分充填部の検出性能の検討

インパクト試験により得られた周波数スペクトルを用いてSIBIE解析で得られた結果を以下に示す。衝撃の入力位置は、PCグラウト部分充填での検出性能を調査することを目的とし、図-4におけるPCグラウトを部分充填した1/4充填、1/2充填、3/4充填した状態の計3か所を入力し、計測を行った。SIBIE解析をし得られた結果を鋼製シース管は図-9、プラスチック製シース管は図-10に示す。図中の白丸はシース管を示し、その中の

黒色は部分充填されたPCグラウトを示している。

鋼製シース管・プラスチック製シース管ともに図-8に示すPCグラウト未充填時のSIBIE結果では見られたシース管下部からの反射は見られなかったが、シース管上部から強い反射が見られた。これは、シース管中の下側にPCグラウトが充填されていて、上側に空隙があるため、上部からの反射が強く、下部からの反射は小さかったものと考えられる。よって、PCグラウト部分充填であってもSIBIEを用いることで検出できるといえる。

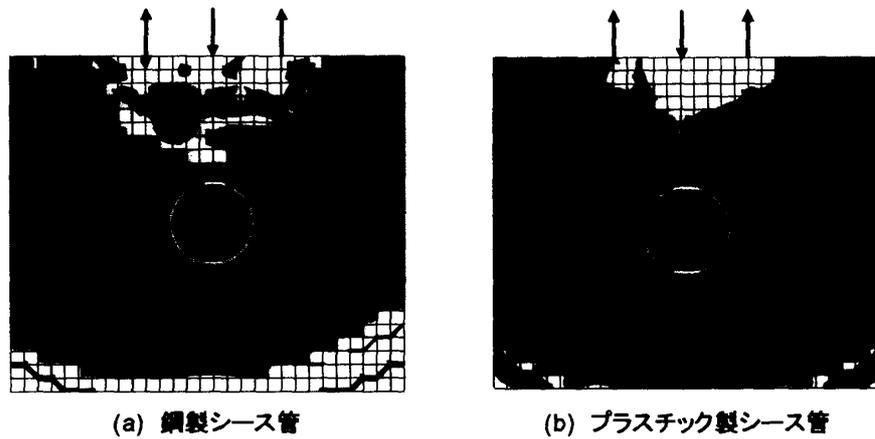


図-11 グラウト完全充填でのSIBIEの結果

#### 4.3 グラウト完全充填部の検出性能の検討

インパクト試験により得られた周波数スペクトルを用いて SIBIE 解析で得られた結果を図-11 に示す。PC グラウトを完全に充填させた場合は、シース管の上部からも下部からも強い反射は見られなかった。この結果は、シース管が埋設されていても完全に充填していればシース管の周りからの反射は非常に小さくなることを意味している。よって、SIBIE を用いることでシース管が未充填であるかもしくは充填であるか評価できることが明らかになった。

#### 5. 結論

本論では、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート構造物のシース管を対象として、SIBIE による PC グラウト未充填部の検出性能について考察した。以下に結論を示す。

- (1) 鋼製シース管・プラスチック製シース管ともに PC グラウト未充填の場合、シース管の上部と下部で強い反射が確認できた。
- (2) 鋼製シース管・プラスチック製シース管ともに PC グラウト部分充填の場合、シース管中の空隙部分の割合に関係なく、シース管の上部で強い反射が確認できた。

(3) 鋼製シース管・プラスチック製シース管ともに PC グラウト充填の場合、シース管の周りに強い反射は認められなかった。

これらの結果より、SIBIE を用いることで PC グラウト充填状況を評価できるといえる。

#### 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) Ohtsu, M.: On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J. Materials Concrete Structures and Pavement, JCSE, No.544/V-32, pp.277-290, 1992
- 4) Ohtsu, M. and Watanabe, T.: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT&E International, Vol.35, pp.189-196, 2002
- 5) 大津政康ほか: コンクリート構造物の非破壊試験法, 養賢堂, pp.111-141, 1994
- 6) 三原真一, N. Ata, 大津政康: SIBIE による PC グラウト未充填部の評価に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1953-1958, 2004

