

SIBIE法によるPCグラウト充填検査法の改良

(株)富士ピー・エス

熊本大学大学院

熊本大学

(株)富士ピー・エス

正会員

博(工)

工博

博(工)

博(工)

○山田 雅彦

大津 政康

友田 祐一

徳光 卓

Abstract : An application of the impact-echo method is examined as a nondestructive evaluation technique that detects the inner defect of an existing concrete structure. Because it is difficult to detect the inner defect from peak frequencies in the frequency spectra, practical and firm results have not been achieved. There, a new procedure is developed as Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact-Echo (SIBIE). By the procedure, defects in concrete structures are identified visually. In this study, the SIBIE procedure is applied to identify grouted or ungrouted post-tensioning ducts. The improvement of the procedure is studied to show the grout unfilled part and the filled part of PC grout more clearly.

Key words : Elasticwave, Impact-Echo, PC grout, SIBIE

1. はじめに

PCグラウトの充填評価としては、弾性波を利用した手法が多く試みられている。弾性波を利用したPCグラウトの充填評価手法としてインパクトエコー法¹⁾、また高周波で振幅の大きな弾性波を入力して反射波の信号を画像化するスペクトルイメージング法であるSIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) 法²⁾が知られている。

インパクトエコー法は部材の形状や大きさによって内部の弾性波の反射状況が複雑になり、周波数分布にはそれらに起因するさまざまなピークが出現する 경우가多く、グラウトの充填不良に起因するピークを同定することが難しいといった問題がある²⁾。この問題を解決する手法として、対象となる内部断面を画像化するSIBIE法が開発・提案されている。

本論文では、PCグラウト未充填部検出の評価技術としてのSIBIE法の確立および信頼性の向上を目的とし、これまでSIBIE法で実績の少ないグラウト充填シース、未充填シースを有した大型の供試体に対しPCグラウトの充填調査を行った。その際、グラウト充填シース、未充填シースを精度良く判定するためにSIBIE法の改良を行い、それぞれのシースについてPCグラウト充填度の評価を行った。

2. 欠陥検出の原理

2.1 インパクトエコー法の原理

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。

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

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

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³⁾。式(3)において f : 周波数, L : 部材代表長さ, v : 弾性波の波速, λ : 波長である。波動の攪乱は、このパラメータを用いれば、 $\alpha=1$ 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 T および 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。

2.2 SIBIE 法の原理

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、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。その最短伝播経長を R とすると式(6)のように表される。

$$R = r1 + r2 \quad (6)$$

ここで $r1$: 往路長, $r2$: 復路長である。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、

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

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)で求められる共振周波数の振幅値を合計することにより要素からの反射の影響を数値化する。この計算を各要素で行い数値（以降では要素値という）の大小により 5 段階に評価し、図化したものが計測対象断面の 2 次元画像となる。

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。衝撃入力点からセル中心を通過し、検出点という経路を与える正方形要素を最小単位としたとき、その 1 辺の長さ Δx は次式で与えられる。

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

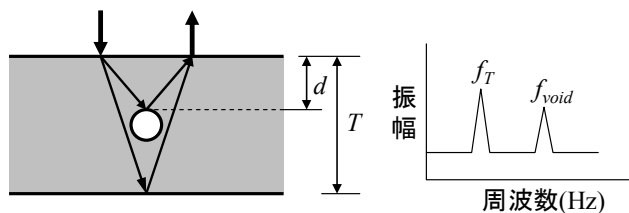


図-1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

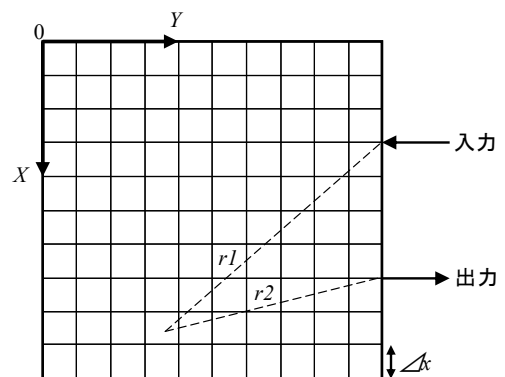


図-2 SIBIE 解析イメージングモデル

2.3 SIBIE法の改良点

SIBIE解析を行う際、足し合わせる周波数に上限・下限を設定すると解析結果からノイズを除去することができることが報告されている⁴⁾。このとき下限値は調査対象とする構造物の厚さに対応する共振周波数より決定され、上限値は内部欠陥が予想される深さに対応する共振周波数により決定される。この作業に加え、今回はSIBIE解析時において供試体全体の各要素値を、測定面の反対面である深さ470mm-480mmの位置における各要素値の平均で除し、正規化を行った。

3. 実験概要

3.1 実験供試体

供試体はコンクリート材齢 56 日、グラウト材齢 42 日以降に実験を行った。供試体内部にはグラウト充填されたシースと未充填のシースがそれぞれ 2 本ずつ埋設されており、シース内にはそれぞれ $\phi 32\text{mm}$ PC 鋼棒が配置されている。また供試体中には A 面では 125mm 間隔で、B 面では 250mm 間隔で鉄筋が配置されている。供試体の条件を表-1 に、供試体の概要を図-3 に示す。

表-1 供試体条件

供試体概要		A面	B面
	高さ (mm)	2000	
	幅 (mm)	2500	
	厚さ (mm)	475	
	コンクリート強度 (N/mm^2)	40	
	PC鋼棒径 (mm)	32	
	シース径 (mm)	38	
	PC鋼棒ピッチ (mm)	@500	
	PC鋼棒配置本数	4本	
	グラウト充填条件	充填2本, 未充填2本	
	鉄筋	SD295 D16, D19	
	シースまでのかぶり (mm)	256	181
	鉄筋ピッチ (mm)	@125	@250

3.2 インパクト入力試験

インパクト入力試験は、写真-1 に示す直径 8mm、長

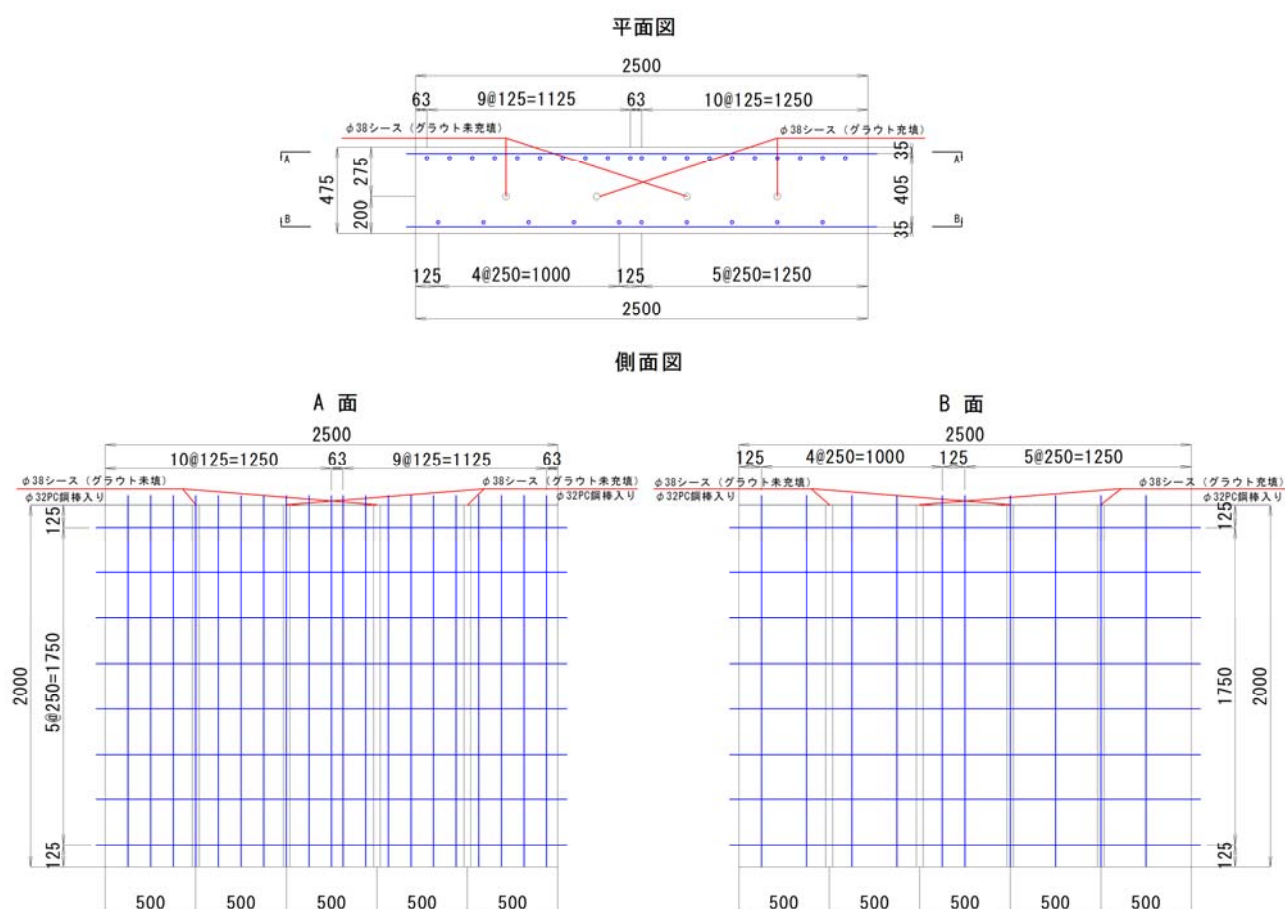


図-3 供試体概要図 (mm)

さ 17mm のアルミ飛翔体を使用した。空気圧 0.05 MPa でアルミ飛翔体を発射し、衝撃を入力した。その左右 50mm の位置に、使用帯域が 40kHz までの加速度計 NP-3210(小野測器製) を、衝撃入力点から 50mm の位置に 2 ヶ所設置した。波形記録装置一式を写真-2 に、衝撃入力点の位置を図-4 中の×印および矢印に示す。波形の計測は、検出した弾性波の波形をオシロスコープ TDS2014（ソニーテクトロニクス製）に記録し、それを高速フーリエ変換(FFT)処理することにより周波数スペクトルを求めた。波形を記録する際のサンプリングタイムを $4\mu\text{s}$ とし、サンプリング数を 2048 とした。

インパクトエコー法および SIBIE 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²⁾。各供試体の板厚部、シースにより出現するピーク周波数は式(7)、(8)より衝撃入力点 1、2 では 20kHz 以内に、衝撃入力点 3、4 では 25kHz 以内に出現すると考えられる。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シース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⁵⁾。



写真-1 アルミ飛翔体



写真-2 波形記録装置

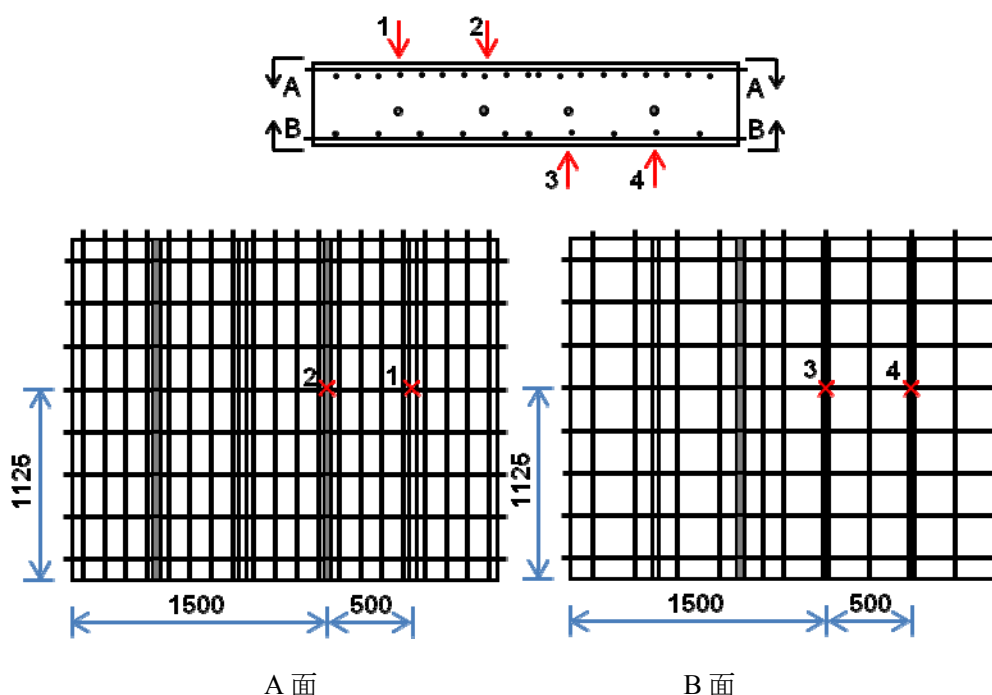
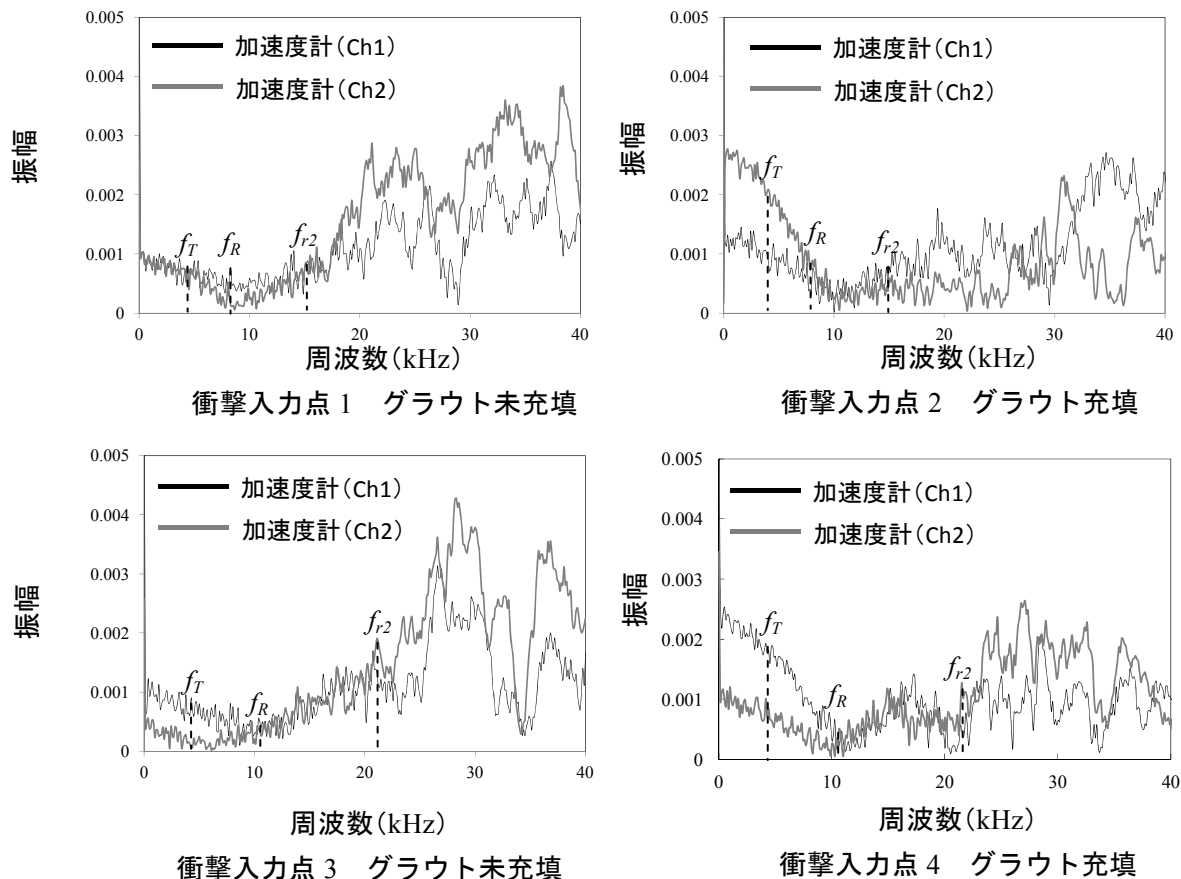


図-4 衝撃入力点概要 (mm)

4. 実験結果

4.1 インパクトエコー法により得られた周波数スペクトル

インパクト試験により得られた波形を FFT 処理した周波数スペクトルを図-5 に示す。図-5 において、空隙による共振周波数 f_R 、 f_{r2} および供試体底部による共振周波数 f_T をそれぞれ点線で示している。周波数スペクトルのみからでは f_T 、 f_R 、 f_{r2} と考えられるピーク周波数周辺には様々なピーク周波数が表れており、明瞭に検出されているとは認められない。



図－5 周波数スペクトル

グラウト未充填時とグラウト充填時の周波数スペクトルを比較すると、今回の実験においてはシーす管の埋設位置からの反射による共振周波数 f_{void} , f'_{void} 周辺では振幅値にあまり差は認められないが、供試体底面からの反射による共振周波数 f_T の値には大きく違いがあることが確認された。

4.2 SIBIE 解析結果

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から得られた相対振幅値を重ね合わせて SIBIE 解析を行った。その際スペクトル上では鉄筋の影響を排除するため、足し合わせる周波数の上限を 25kHz、下限を 4kHz に設定した。イメージングモデルは 150mm×500mm で、メッシュ分割幅 Δx は 10mm とした。SIBIE 解析により得られる画像は、各要素の相対振幅値を基に 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。図の下向きの矢印が衝撃入力点を、上向きの矢印が加速度計を設置した位置を示している。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－6 に示す。それぞれの断面でシーす位置は未充填なら白丸で、充填ならば灰丸で示している。SIBIE 解析結果を比較すると、グラウトが未充填の場合では、シーす管からの反射が強く、グラウトが充填されている場合では、供試体底部からの反射が強くなることが確認された。またどの計測結果からも鉄筋の影響は認められない。

各計測点のシーす管における要素値を比較しても、グラウトが未充填の場合では、シーす管の設置位置の要素値は 1 以上となった。グラウトが充填されている場合では、シーす管の設置位置の要素値は 1 より小さい値となった。つまり各要素を底面要素値により正規化することで、解析対象断面内の相対的評価のみならず、他の解析結果と数値的に比較ができることが可能である。

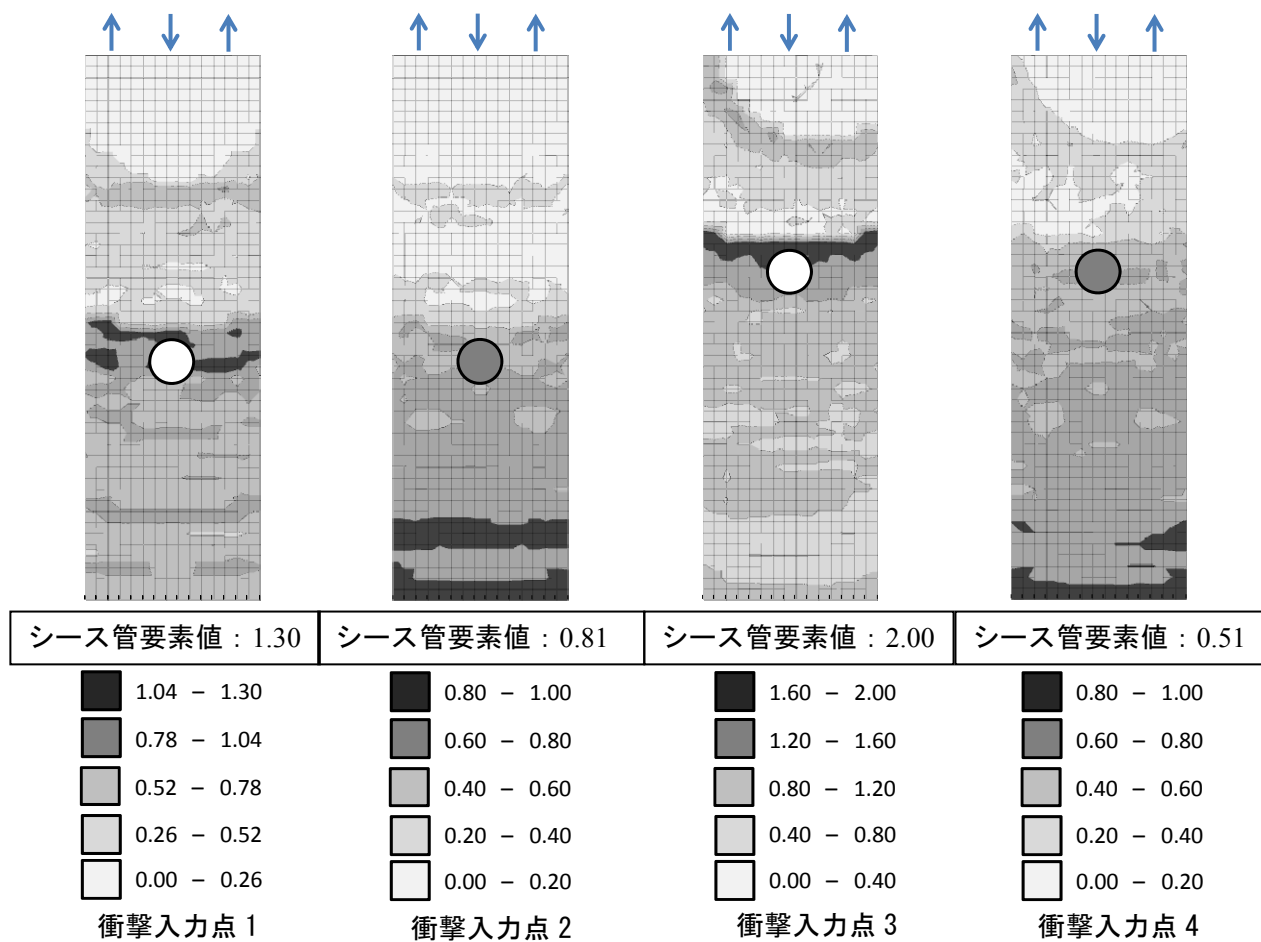


図-6 SIBIE 解析結果

5. まとめ

本論文では、グラウト充填シース、未充填シースを有した供試体を対象として、要素の正規化を行い改良したSIBIE解析によるグラウト充填度の評価の性能の向上について考察した。以下に結論を示す。

- (1) インパクトエコー法の結果においては、周波数スペクトルのピーク周波数のみでは判別は困難であった。SIBIE法を用いることでシース管内部のグラウト充填度の評価を視覚的に行うことが可能であることが確認された。
- (2) SIBIE解析を行う際、要素の正規化を行うことで、シースがグラウトで充填されているか、未充填の状態であるかを、数値で評価可能であることが明らかとなった。

【参考文献】

- 1) Mary J. Sansalone & William B. Streett : Impact-echo, Ithaca, N.Y., Bullbrier Press, 1997.
- 2) Ohtsu Masayasu and Takeshi Watanabe : Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT & E international, Vol.35, No.3, pp.189-196, 2002.
- 3) Ohtsu M. : High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J.Materials Concrete Structures and Pavement, JCSE, No.544, V-32, pp.277-29, 1992
- 4) 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
- 5) 園田崇博, 山田雅彦, 大津政康 : インパクトエコー法における衝撃入力の定量的評価法の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11 pp.247-254, 2011.10