

改良SIBIE法を用いた新設橋梁におけるPCグラウト充填度の評価

(株)富士ピー・エス	正会員	博(工)	○山田	雅彦
熊本大学大学院		工博	大津	政康
熊本大学		博(工)	友田	祐一
(株)富士ピー・エス	正会員	博(工)	徳光	卓

Abstract : The impact-echo method is very well known as a non-destructive testing for concrete structures. In this method, the presence and the locations of defects in concrete are estimated from identifying peak frequencies in the frequency spectra. In practical applications, however, spectra obtained include so many peak frequencies that it is fairly difficult to identify the defects correctly. In order to improve the impact-echo method, Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo (SIBIE) procedure is developed. In this study, the SIBIE procedure is applied to visualize grouted or ungrouted post-tensioning ducts. The improvement of the SIBIE procedure is made to identify the grouted post-tensioning ducts more clearly.

Key words : Impact-Echo, SIBIE, Elasticwave

1. はじめに

非破壊でPCグラウトの充填度を評価する方法には、放射線を利用する方法、弾性波を利用する方法、超音波を利用する方法などが知られている¹⁾。その中でもインパクトエコー法はコンクリート表面から弾性波を入力し、弾性波の伝達状態が変化する空気などと接触する面（不連続面）から反射する弾性波を基に欠陥の有無を評価する方法である²⁾。この弾性波入力の結果として得られる反射波は、対象の表面からも発生し、部材の形状や大きさの影響を受けるため、周波数スペクトルにはこれらの成分が複雑に含まれる。そのためPCグラウトの未充填部を評価するには、複雑な反射波の周波数スペクトルから欠陥部特有の成分を同定することが必要となる。

SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) 法はこの問題を解決することを目的としたインパクトエコー法の解析方法であり、反射波のスペクトル解析を行い、その結果を2次元画像に変換して可視化するものである³⁾。

筆者らは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、欠陥が存在しない箇所の解析結果と測定対象部の解析結果を比較して、その差異からPCグラウト未充填部の存在を割り出す方法（以下、改良SIBIE法と称す）を考案した。本研究では施工中の新設橋を対象として、PCグラウトの施工前後の充填性評価を実施した。その結果、従来法の判定精度が向上できたことを以下に報告する。

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では、弾性的な衝撃力により入力された弾性波をセンサーで検出記録し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に示すように底部の反射による共振周波数 f_r 、内部欠陥部からの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。

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

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

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。その最短伝播経路を R とすると式(3)のように表される。

$$R = r_1 + r_2 \quad (3)$$

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(4)のように考えられる。

$$f_R = C_p / R \quad (4)$$

要素からの反射が強調された共振周波数は式(5)により求められる。

$$f_{r2} = C_p / r_2 \quad (5)$$

実測した周波数スペクトルにおいて、式(4)、式(5)で求められる共振周波数の振幅値の合計を要素からの反射の強さとする。この計算を各要素で行い、数値の大小により 5 段階に分類し、コンター図化することで計測対象断面の 2 次元画像が得られる。上記の作業を行う際、足し合わせる周波数に上限・下限を設定するとする精度良く評価を行うことができる⁴⁾。本稿では、上限は内部欠陥反射による共振周波数である $f_{void} = C_p / 2d$ 、下限は板厚 T の反射による共振周波数である $f_T = C_p / 2T$ 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。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 は計測機のサンプリングタイム Δt により次式で与えられる。

$$\Delta x = C_p \Delta t / 2 \quad (6)$$

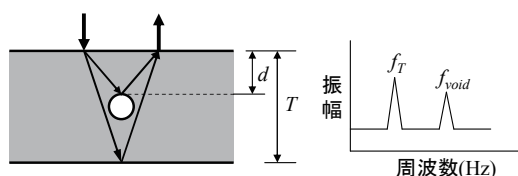


図-1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

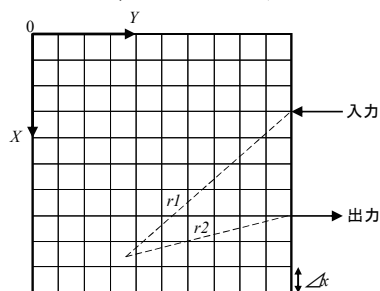


図-2 SIBIE 解析イメージングモデル

2.3 改良SIBIE法の検証方法について

本稿における改良SIBIE法の検証は、グラウト充填前を未充填の状態とみなし、グラウト硬化後を充填の状態とみなして両者を比較する方法により行った。すなわち、シース位置での反射の強さは、グラウト充填前とグラウト硬化後で比較すると、グラウト充填前の方が強いと考えられることを利用した方法である。手順を以下に示す。

グラウト充填前に計測を行い、当該測点でのシース反射位置での振幅値を記録する。次にグラウトを充填し、硬化した後に充填前と同位置で同様な計測を行う。グラウト硬化後の解析結果では、グラウト充填前のシース反射位置での振幅値を最大値としてグラウト充填後のコンター図の描画を行う。得られたコンター図においてシースの反射位置で色の濃い（黒い）領域が現れた場合、シースはグラウト未充填と判定し、現れなかった場合はシースはグラウトで充填されていると判定する。

3. 実験概要

3.1 実験の対象橋梁

グラウトの充填調査を行った橋梁の概要図を図-3 に示す。本橋梁は橋長 90m、支間長 44.2m の PC2 径間連続のラーメン箱桁橋である。グラウトの充填調査はそのうちの P1-A2 径間のウェブに配置されている 2 本のシース (PC 鋼材: 12S12.7, シース径: $\phi 65$) について行った。

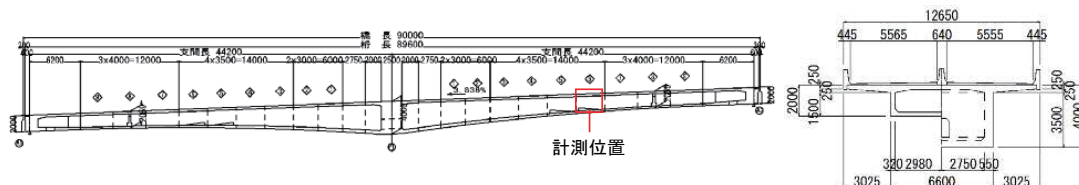


図-3 橋梁の概要図

3.2 試験方法

試験では、写真-1 に示すバネ式の衝撃入力装置により弾性波を入力した射波は入力点から左右 50mm 離れた 2 箇所に設置した使用帯域が 50kHz までの加速度計 (小野測器(株)製 NP-3211) により計測を行った。計測波形は、写真-2 に示すように、加速度計で検出した弾性波の波形をアンプ (小野測器(株)製 PS-1300) で増幅し、オシロスコープ (テクトロニクス社製 TDS2014C) に記録した。反射波の波形データをコンピュータで高速フーリエ変換 (FFT) 処理することにより周波数スペクトルを求めた。波形記録のサンプリングタイムは $4\mu\text{s}$ とし、サンプリング数を 2048 とした。

計測点の概要を図-4 および写真-3 中に示す。なお、試験前には鉄筋探査を実施し、計測点は鉄筋直上を避けて選定した。白くチョーキングしている部分が鉄筋の位置、黒い管状に示した部分がシースの配置位置となる。



写真-1 バネ式の衝撃入力装置

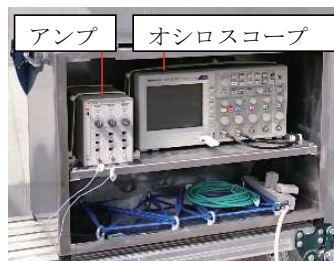


写真-2 波形記録装置一式

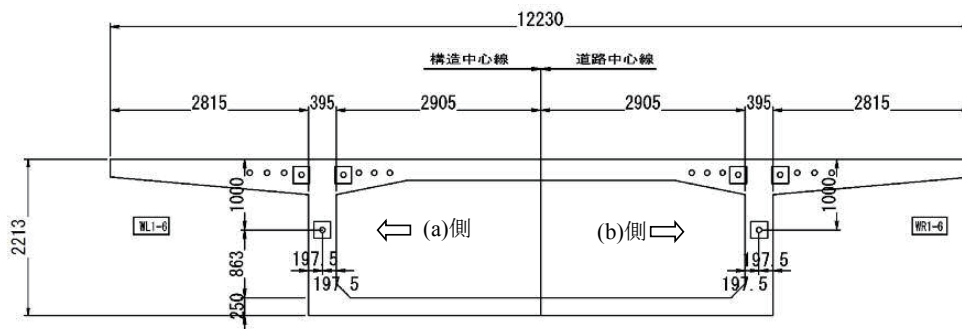


図-4 弾性波入力点の概要図



(a)側

(b)側

写真-3 弾性波入力位置

4. グラウト充填調査結果

4.1 グラウト充填前の結果

グラウト充填前の解析結果を図-5に示す。弾性波は図の右側から入力しており、色の濃い領域が弾性波の反射の強い部分を示している。図中の○の位置はシース位置を示している。解析結果では全ての計測点においてシースの右側の位置で色の濃い（黒い）領域が認められ、空洞部の存在が示唆されている。なお、この段階でシース反射面（シース右側の濃い着色領域）の振幅値を記録する。

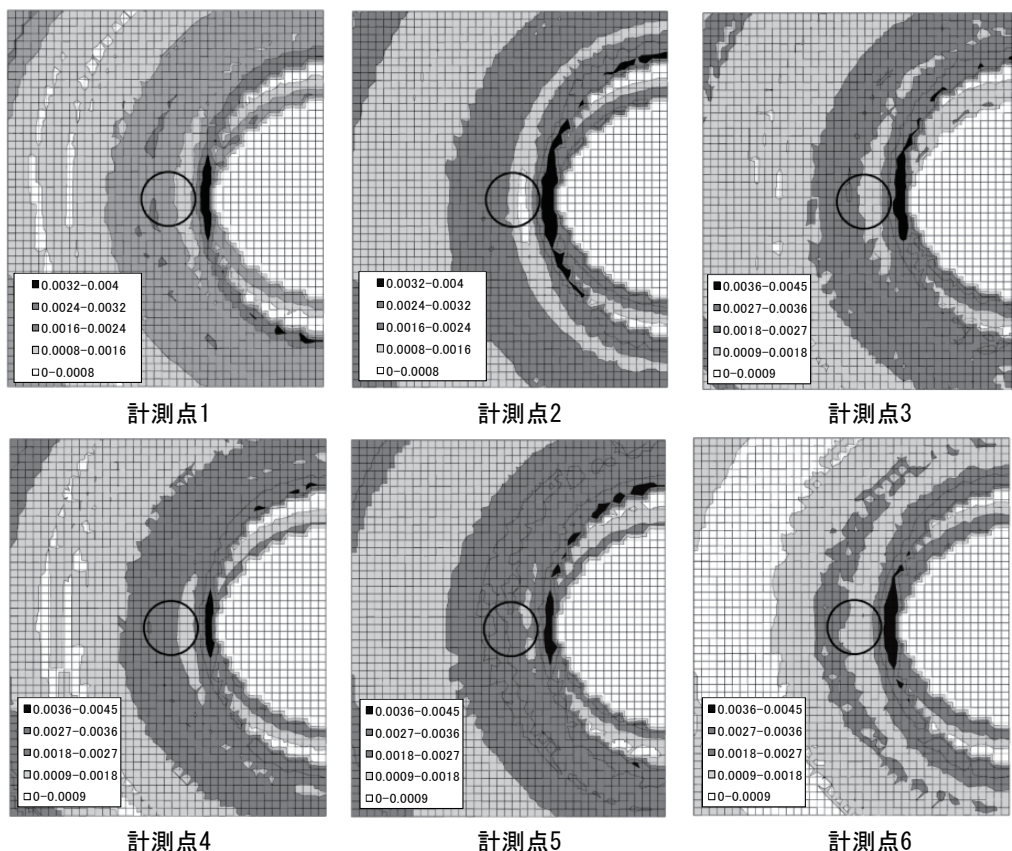


図-5 グラウト充填前のSIBIE結果

4.2 グラウト硬化後の結果

次にグラウトが硬化した後の解析結果を図-6 に示す。図-6 はグラウト硬化後の計測における解析結果を補正せず、そのまま図化したものである。グラウト硬化後の結果では、計測点 1～3 にシースの右側に反射の強い色の濃い領域は現れていないが、計測点 4～6 にはシースの右側に反射の強い色の濃い領域が認められる。補正を行わない場合、従来の考え方では計測点 4～6 は未充填と判定される。

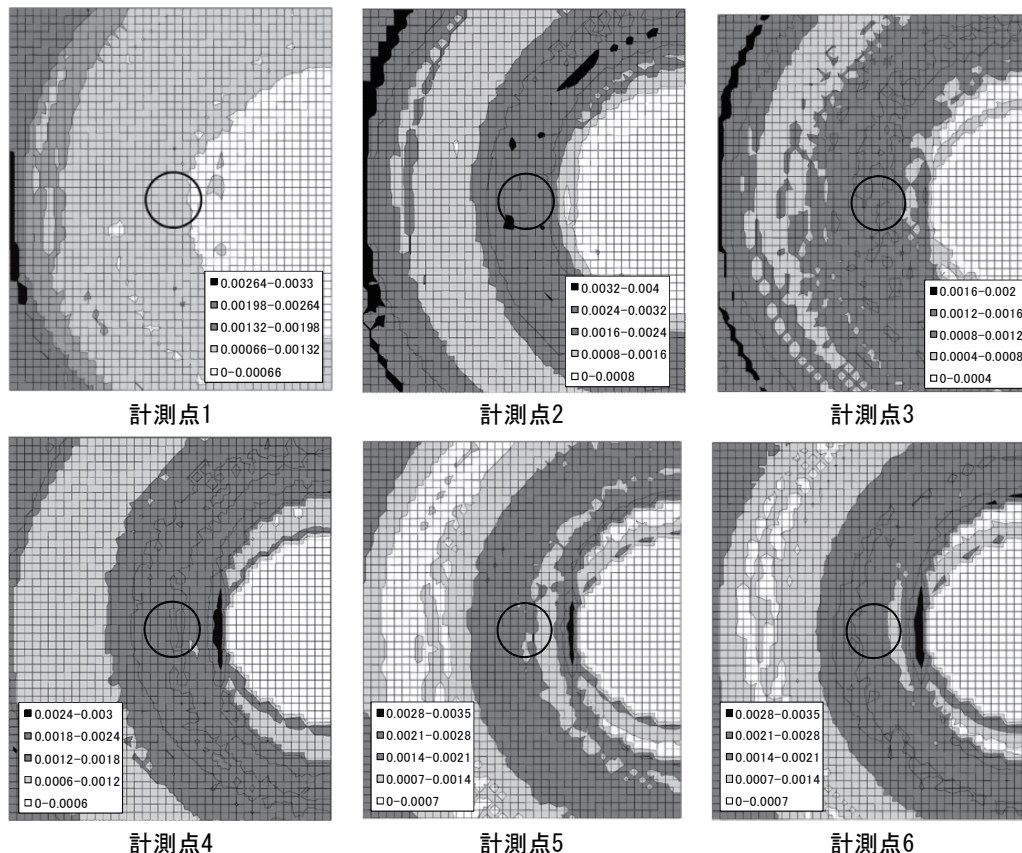


図-6 グラウト硬化後のSIBIE結果

4.3 改良 SIBIE 法による結果

本橋のグラウト施工は「PCグラウトの設計施工指針-改訂版-」に基づいて行われており、品質管理ではMSセンサーを使用しグラウトが充填されていることを確認していることから、グラウトは充填されていたと考えられる。そこで改良SIBIE法により、再評価を試みた。計測点1では最大値を0.0033から0.004（充填前結果のシースからの反射位置での振幅値であり、以下も同様である）、計測点2では0.004から0.004、計測点3では0.002から0.0045、計測点4では0.003から0.0045、計測点5では0.0035から0.0045、計測点6では0.0035から0.0045へと、コンター図の色分けにおける最大値をそれぞれ補正してコンター図を再描画した。図-7に改良SIBIE法の解析結果を示す。再解析したグラウト硬化後の結果では全ての結果において、シースの右側に色の濃い領域が認められず、充填と判定できた。

今回の新設橋におけるグラウト調査では、グラウト充填前の解析結果を基準として、グラウト硬化後の解析結果を測定対象として比較することで、精度良く判定を行うことができた。したがって既設橋においても、コンクリート部が欠陥が存在しない箇所とみなし、シース位置を測定対象部として両者を比較することで、未充填部を精度良く判定できる可能性が示されたと考える。

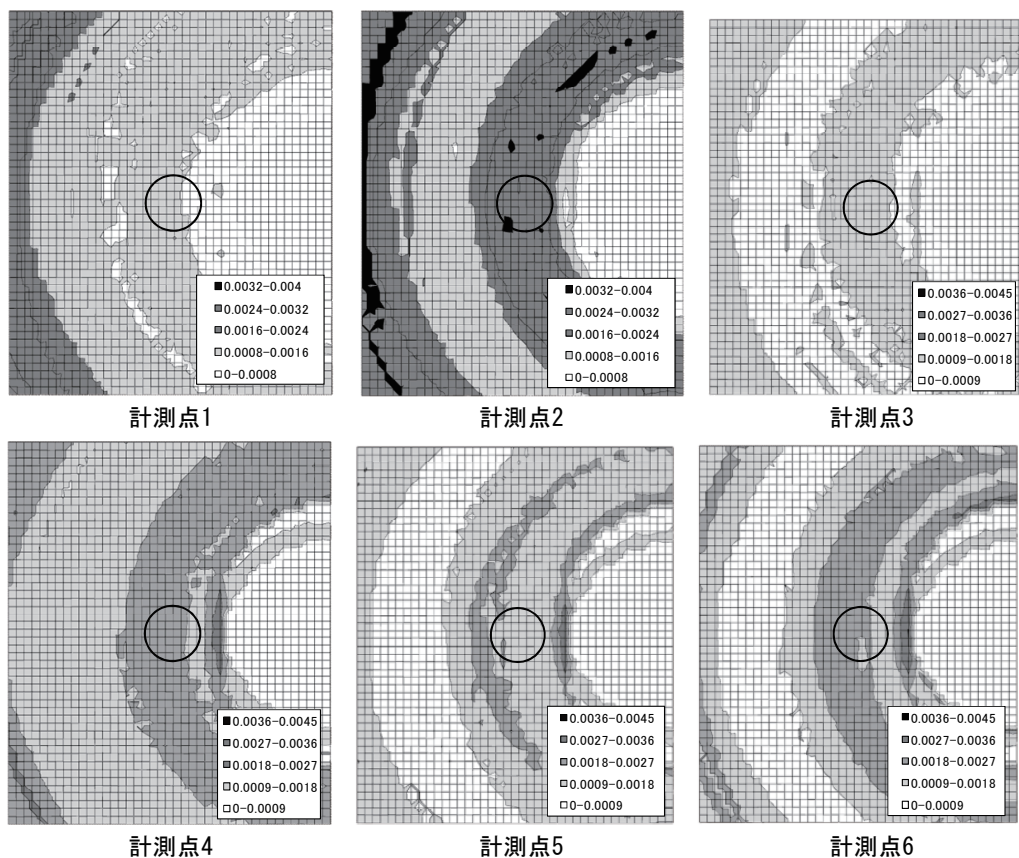


図-7 再解析を行ったグラウト硬化後のSIBIE結果

5. まとめ

本研究では、施工中の橋梁を対象として、グラウト充填前・硬化後でSIBIE法による充填評価を行った。その後、グラウト硬化後を改良SIBIE法により再評価を行ったところ、以下の結果が得られた。

- (1) グラウト充填前では100%の精度で未充填の判定が得られた。
- (2) コンター図の補正を行わない解析結果では、グラウト硬化後の結果においては6回の測定のうち充填と判定されたものは3回、未充填と判定されたものが3回であった。
- (3) 改良SIBIE法による結果では6回の測定のうち6回すべてにおいて充填と判定できた。

今回の実験では、新設橋での改良SIBIE法によるグラウト充填度の評価は有効である可能性が示された。今後は、既設橋への適用を視野に入れて研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) PCグラウト&プレグラウトPC鋼材 施工マニュアル 2013改訂版, (社)プレストレストコンクリート建設業協会, 2013.8.
- 2) Mary J. Sansalone & William B. Streett : Impact-echo, Ithaca, N.Y., Bullbrier Press, 1997.
- 3) 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.
- 4) 大津政康, 中居陽子, 大久保太郎, 松山公年 : 弾性波法によるプレストレストコンクリートの未充填グラウト検出法の改良, 土木学会論文集E, vol65, No2, pp.208-215, 2009.5.