

SIBIE 法を用いた既設 PC 橋のグラウト充填調査

山口 光俊*1・山田 雅彦*2・梶原 勉*3・大津 政康*4

コンクリート構造物における非破壊調査手法の一つであるインパクトエコー法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（空洞・ひび割れ・浮きなど）を評価する手法として SIBIE（Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo）法の研究が数多くなされてきた。また、筆者らはプレストレストコンクリート（以下、PC という）橋における PC グラウトの充填調査に SIBIE 法を応用するべく、実用化に向けた精度向上の研究を進めてきた。本報告では、SIBIE 法の原理、調査方法について概要を示すとともに、既設 PC 橋のグラウト充填調査を目的とした SIBIE 法の適用事例を紹介する。

キーワード：非破壊調査、SIBIE 法、インパクトエコー法、PC グラウト

1. はじめに

非破壊調査で 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⁾。そのなか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内部欠陥の有無を評価する方法である。この弾性波入力に対して得られる反射波は、内部に配置される鋼材等の表面からも発生するほか、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 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²⁾。

これまで、PC グラウト未充填部検出の評価技術として SIBIE 法の確立および信頼性向上を目的として、試験体を用いた要素実験、新設橋梁を対象とした実構造物によるフ

ールド試験などを行ってきた³⁻⁸⁾。

本報告では、SIBIE 法の原理、調査方法、ならびに PC グラウト充填調査を目的とした既設橋梁への適用事例を紹介する。

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による欠陥検出の原理を図 - 1 に示す。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で検出記録し、FFT 処理により周波数スペクトルを求める。得られた周波数スペクトル上には図 - 1 に示すように衝撃を入力する部材面（以下、入力面という）の裏側にあたる部材面（以下、反対面という）の反射による共振周波数 f_r 、内部欠陥反射による共振周波数 f_{void} の 2 つのスペクトルピークが出現する。調査対象中を伝わる弾性波の伝播速度を 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。

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

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



*1 Mitsutoshi YAMAGUCHI

(株)富士ピー・エス
土木本部 エンジニアリング部
メンテリニューアルグループ



*2 Masahiko YAMADA

(株)富士ピー・エス
関東支店 工務部
工事チーム



*3 Tsutomu KAJIWARA

(株)富士ピー・エス
土木本部 エンジニアリング部
メンテリニューアルグループ



*4 Masayasu OTSU

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻

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。

$$R = r1 + r2 \quad (3)$$

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。

$$f_{R2} = C_p/r2 \quad (5)$$

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。また、上記の作業を行う際、足し合わせる周波数に上限・下限を設定すると精度良く評価を行うことができる。

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 $f'_T = C_p/2T$ としている。また、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は、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。

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

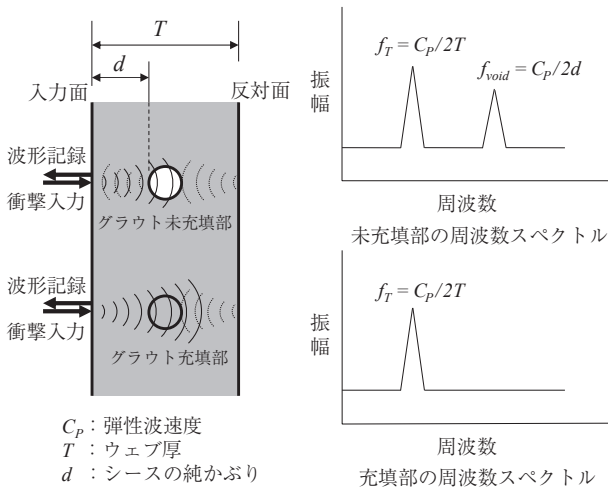


図 - 1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

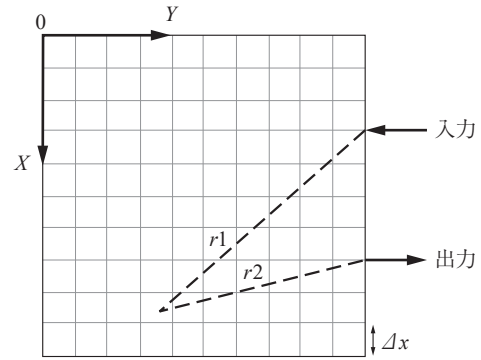


図 - 2 SIBIE 解析イメージングモデル

3. 調査方法

3.1 使用機器

調査に使用した機器の必要性能を表 - 1 に示す。本調査では、オシロスコープに TDS2014C (テクトロにクス社製: 327(W)×158(H)×125(D) mm)、加速度計に NP-3211 (小野測器(株)製)、アンプに PS-1 300 (小野測器(株)製: 92(W)×121(H)×194(D) mm) を使用した。

衝撃入力装置は、研究当初、圧縮空気によりアルミ弾 (飛翔体) を打出す方式としていたが、現場装置の小型化、および幅広い周波数帯域と大きい振幅の衝撃入力を可能とするため、現在ではバネ式でチタン弾を打出す方式に改良している⁷⁾。

波形記録装置 (オシロスコープ)、アンプを写真 - 1、衝撃入力装置を写真 - 2 に示す。

表 - 1 使用機器

使用機器	必要性能
波形記録装置 (オシロスコープ)	<ul style="list-style-type: none"> 周波数帯域: 100 MHz 以上 レコード長: 2 500 以上 サンプルレート: 2.0 GS/s 以上 チャンネル数: 2 ch 以上
センサ (加速度計)	<ul style="list-style-type: none"> 共振周波数: 50 kHz 以上 周波数範囲: 0.3 Hz ~ 20 kHz \pm 3 dB 最大使用加速度: 4 900 m/s²
アンプ	<ul style="list-style-type: none"> 周波数応答特性: 1.0 Hz ~ 30 kHz \pm 3 dB
衝撃入力装置	<ul style="list-style-type: none"> 入力周波数: 30 kHz 以上 入力衝撃力: 20 N 以上

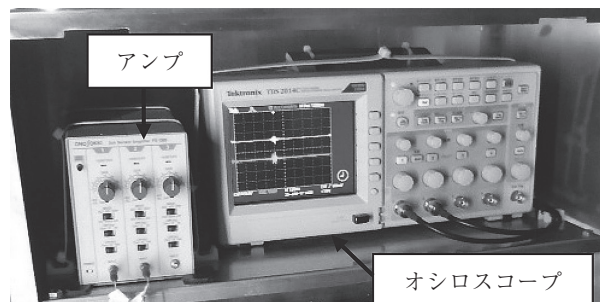


写真 - 1 波形記録装置, アンプ

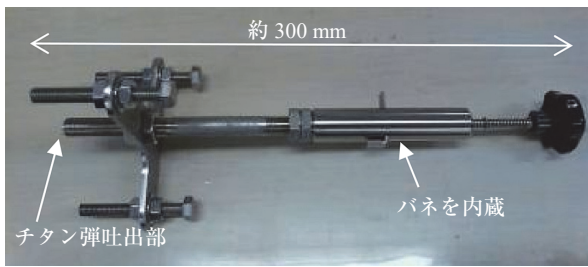


写真 - 2 バネ式の衝撃入力装置

3.2 調査フロー

調査フローを図 - 3 に示す。

(1) 調査計画 (事前検討)

調査対象となる構造物の設計図書等の資料を収集し、調査位置を検討する。グラウト充填調査の場合、充填不足の生じやすい部位（シースの曲げ下げ部、排出側の定着具付近など）に着目する。また、鉄筋は弾性波の電波に影響を及ぼすため、精度向上のために可能なかぎり鉄筋から離れた位置を調査候補位置として選定する。

(2) 調 査

電磁波レーダ法または電磁誘導法により、鉄筋位置とシーソ位置を探査し、調査箇所周辺の罫書きを行う。次に、シーソ上に衝撃入力点を設定し、衝撃入力点を中心にしてシーソと直角方向に2箇所（衝撃入力点から50mmの位置）に加速度計を設置し、波形記録装置に接続する。

調査は、衝撃入力装置を用いて、コンクリート表面に衝撃を加えて弾性波を入力し、内部からの反射波を加速度計により計測する。1調査点あたり、5回の計測を行う。

(3) 解 析

調査において記録した反射波の波形をコンピュータで高速フーリエ変換処理（FFT解析）することで、反射波の周波数スペクトルを求める。波形記録のサンプリングタイムは4μsとし、サンプリング数を2048とする。

弾性波速度 C_p は、対象となるコンクリートによって変動するが、本稿で報告する既設橋では設計基準強度を参考に4500m/sとして算出した。また、コンター図の要素長 $\Delta x \approx 10\text{mm}$ として解析した。

(4) 判 定

PCグラウトの充填調査における判定基準を図 - 4 に示す。コンター図は、調査箇所での断面における弾性波の反射の強さを表している。反射の強い部分は赤い領域で示され、そこに弾性波の反射源が存在していることを示している。グラウトの充填判定は、以下のとおりである。

【コンター図の判定基準】

- ・ 反対面（部材厚さ）位置に反射の強い領域（赤色）が現れた場合、「充填（○）」と判断する。
- ・ シースの前面（シース位置からみて入力面側）に反射の強い領域（赤色）が現れた場合、「未充填（×）」と判断する。
- ・ 反射の強い領域（赤色）が入力面側でない、シース位置付近に現れた場合、「充填不良の可能性あり（▲）」と判断する。

・ シース位置、反対面以外の場所で反射が卓越している場合、その他いずれにもあてはまらない場合（複数個所に反射の強い領域が点在など）は「判定困難（※）」と判断する。

1調査点につき5回の判定結果により評価する。5回の判定結果のうち、過半数（3回以上）の同一判定を、当該調査点での判定結果とする。なお、過半数の同一判定が得られない（再調査も不可）場合には、「判定困難」と評価する。

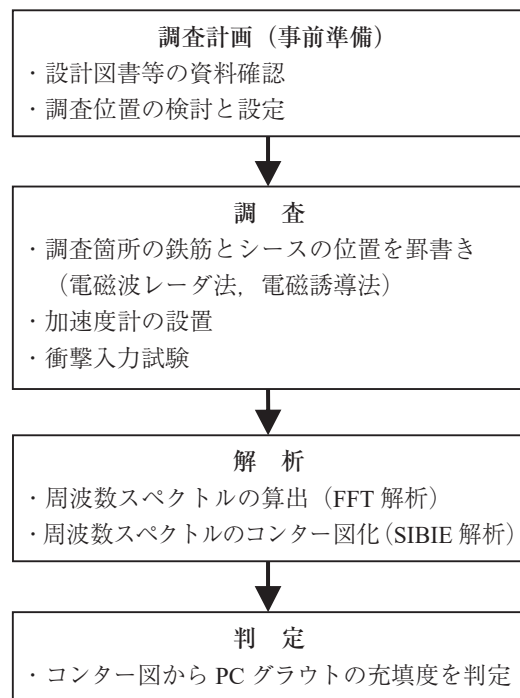


図 - 3 調査フロー

	入力面 反射面	入力面 反射面	入力面 反射面	入力面 反射面
結果				
判定	判定: ○ 充填	判定: × 未充填	判定: ▲ 充填不良の 可能性あり	判定: ※ 判定困難
特徴	シース前面で反射が現れておらず、反射面に反射が現れている場合	シース前面で反射が現れており、反射面に反射が現れていない場合	シース前面ではないが、シース位置で反射が現れており、反射面に反射が現れていない場合	シース位置、反対面以外の場所で反射が卓越している場合 その他いずれにもあてはまらない場合

図 - 4 コンター図の判定基準

4. PC グラウト充填調査

4.1 A 橋

(1) 調査概要

本橋は、1991年に架設された3径間PC単純ポストテンションT桁橋（橋長26.5m+36.6m+36.6m=102.4m、幅員16.8m）である。PC橋の耐久性能の低下を防止するためにはPC鋼材の健全性を保つことが不可欠であり、グラウト未充填箇所の特定制と当該部へのグラウト再注入を実施することを目的として、非破壊による調査が採用された。建設後、約25年での調査であった。

調査では、主桁主ケーブルならびに床版と横桁の横締めケーブルを対象として、インパクトエコー法による調査が基本として実施され、加えて一部の主ケーブルに対してSIBIE法によるグラウト充填調査が実施された⁹⁾。概略構造図を図-5に示す。

(2) 調査位置の選定

調査位置は、ブリーディングによる空隙が生じやすい桁端部付近とした。既存の資料より、主ケーブルの鋼材種別は12S12.4で、A1-P1径間は各桁とも4本（端部定着ケーブル4本）、P1-P2径間、P2-A2径間は各桁とも5本（端部定着ケーブル5本）の配置であった。シース径は不明であったが、建設された年代から直径65mm（鋼製）と想定した。PCグラウト調査の概略位置図を図-6に示す。

調査点の詳細位置を決定するため、鋼材探査により鉄筋、シースの位置を罫書きした（写真-3）。また、鉄筋配置による波形の影響をできるだけ小さくするために、鉄筋間のシース直上を調査位置に選定した。衝撃入力試験の状況を写真-4に示す。

(3) 調査結果

インパクトエコー法およびSIBIE法を適用した調査結果において、充填と判定した箇所、未充填と判定した箇所の

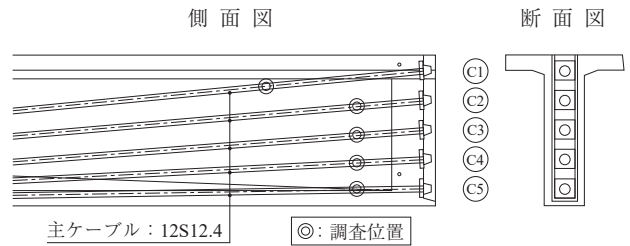


図-6 PC グラウト充填調査の概略位置図

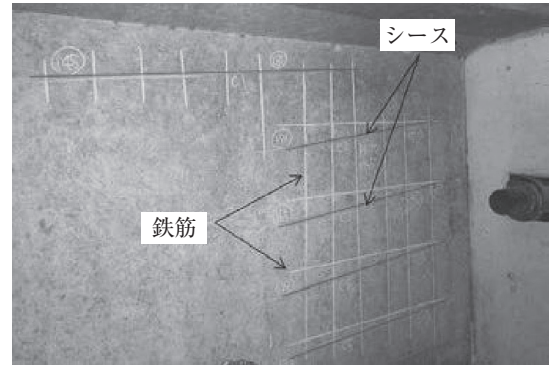


写真-3 鋼材探査による罫書き

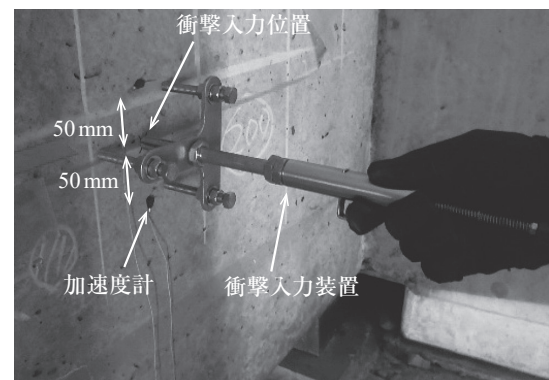


写真-4 衝撃入力状況

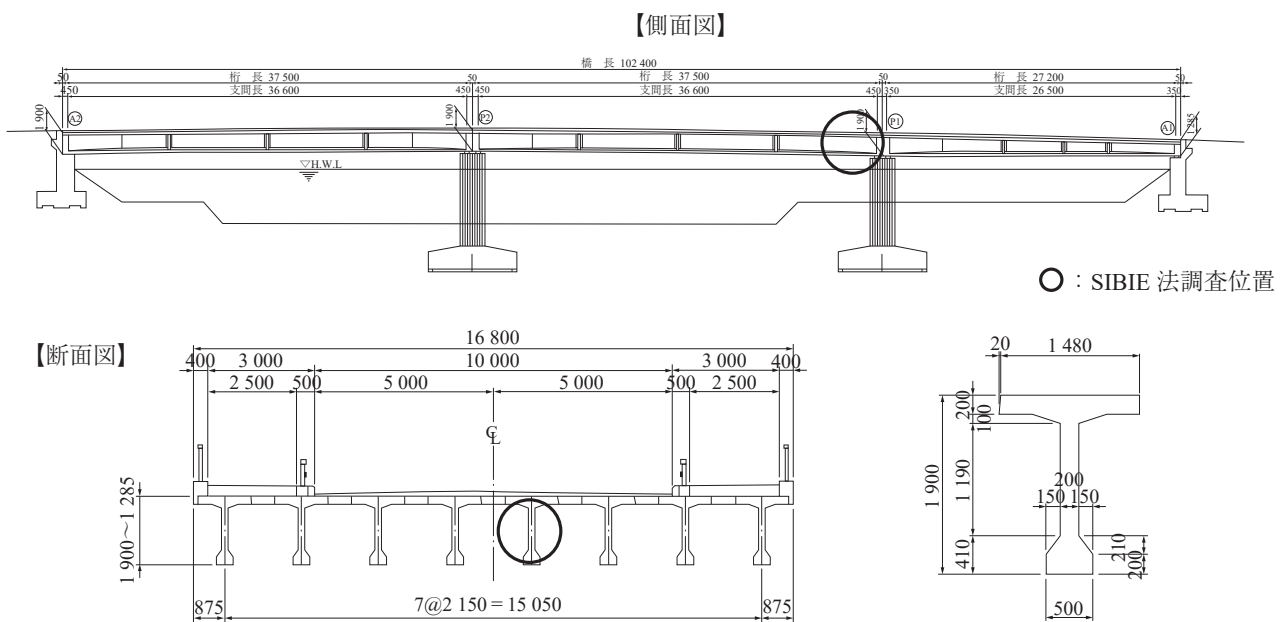


図-5 A橋の概略構造図

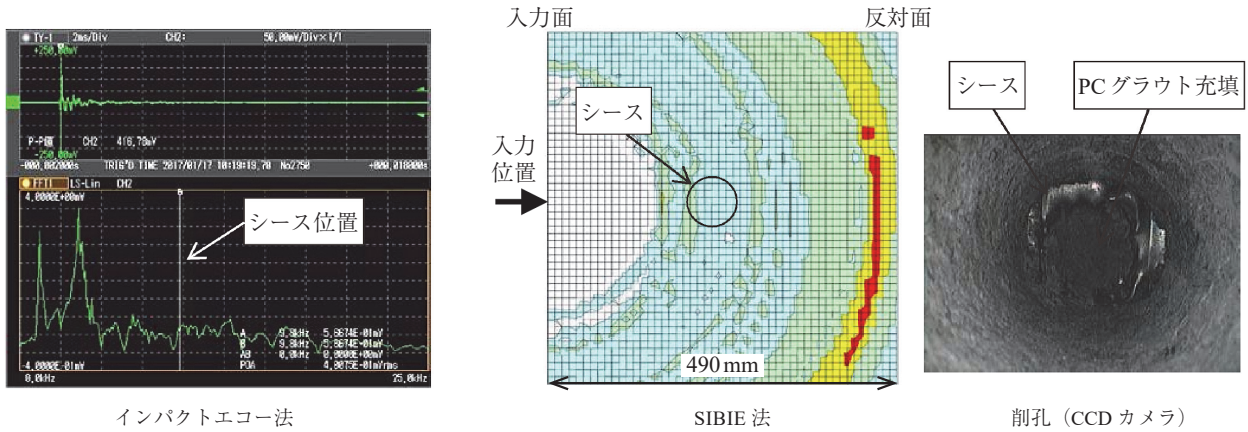


図 - 7 調査結果 (G5 桁 C3 ケーブル)

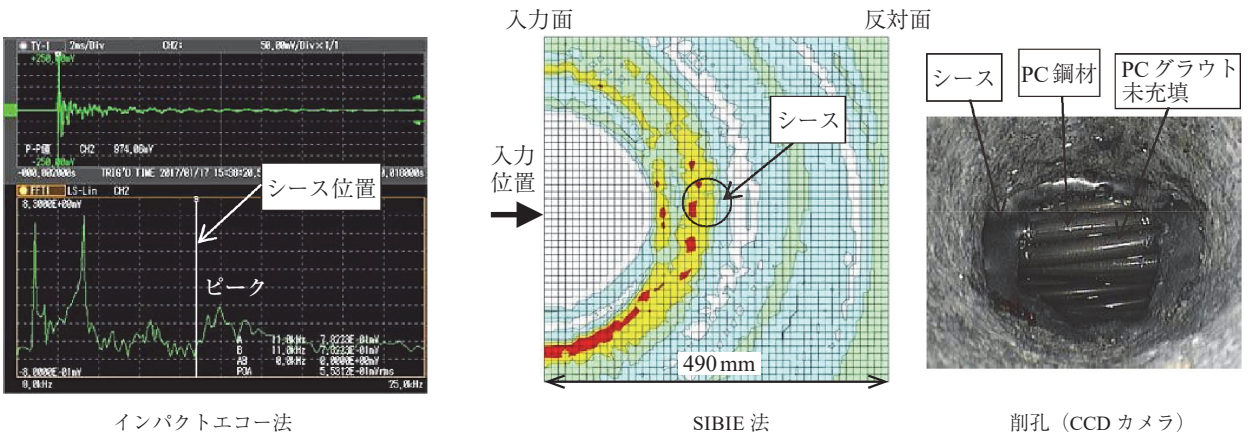


図 - 8 調査結果 (G5 桁 C4 ケーブル)

それぞれについて比較した。また、近接部の微破壊調査 (削孔して CCD カメラで内部を目視確認) を合せて実施し、シース内部の状況との整合を確認した。

充填と判定した箇所 (P1 - P2 径間 G5 桁 C3 ケーブル) の結果を図 - 7 に示す。インパクトエコー法の結果では、図中に示す白線 (シース位置) でスペクトルピークの出現が確認されなかったことから PC グラウトは充填されていると判定された。

SIBIE 法の調査結果において、弾性波の入力位置は図の左側である。入力面からみてシースの前面で反射が見られず、反対面に色の強い領域が現れていることから、シース内の PC グラウトは充填されていると判定した。また、微破壊による削孔調査において目視によりシース内のグラウト充填を確認できた。

未充填と判定した箇所 (P1 - P2 径間 G5 桁 C4 ケーブル) の結果を図 - 8 に示す。インパクトエコー法の結果では、図中に示す白線近傍 (シース位置) でスペクトルピークの出現が確認されたことから、PC グラウトは未充填の可能性ありと判定された。SIBIE 法の調査結果では、入力面からみてシースの前面で色の濃い領域が現れ、反対面に反射がみられないことから、シース内の PC グラウトは未充填であると判定した。また、削孔調査において、目視により PC グラウトが未充填であることを確認した。

(4) グラウト再注入後の追加調査

未充填と判定した箇所 (P1 - P2 径間 G5 桁 C4 ケーブル) については、PC グラウトの再注入を行い、グラウトが硬化した後に、再度、SIBIE 法による充填調査を行った。

グラウト再注入後における充填調査結果を図 - 9 に示す。シースの前面に反射が見られず、反対面に色の強い領域が現れており、再注入した PC グラウトが充填されていることを確認した。

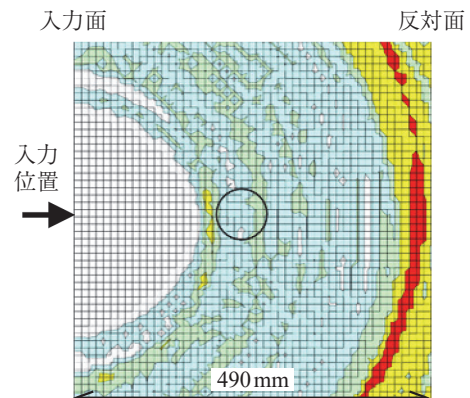


図 - 9 グラウト再注入後の充填調査結果 (G5 桁 C4 ケーブル)

4.2 B 橋

(1) 調査概要

本橋は1973年に架橋されたポストテンション方式単純T桁橋（橋長32.26m，幅員8.33m）である。全景写真を写真 - 5，断面図を図 - 10 に示す。

過年度定期点検（建設後，約44年）において，主桁下面に橋軸方向のひび割れや遊離石灰，浮きなどが確認されたため，グラウト充填調査が実施された。主ケーブルは12φ7mmである。

1次調査として，インパクトエコー法によるグラウト充填調査，および削孔調査（CCDカメラ）によるPC鋼材の健全性の確認が行われ，2次調査として，X線透過法，SIBIE法が採用された。

調査は，変状が多く確認されたG2桁を主として実施された。1次調査はG2桁のA2側を，2次調査はG2桁のA1側を調査した。また，2次調査では端部横桁と中間横桁の横締めケーブル（12φ5mm）のグラウト充填状況の調査（SIBIE法）も合わせて実施した。調査状況を写真 - 6，衝撃入力状況を写真 - 7 に示す。

(2) G2桁における調査結果

G2桁の調査結果を図 - 11 に示す。G2桁のA2側のケーブルに対してインパクトエコー法を実施した結果，C1，C2ケーブルを除く，C3～C11ケーブルで未充填または充填不良の可能性ありと判定された。また，未充填または充填不良と判定された箇所の削孔調査の結果，未充填であることが確認された。

C1～C5ケーブルをX線調査した結果，C1～C4ケーブルで未充填，C5ケーブルで充填不良の可能性ありと判定

された。C6，C8ケーブルに対してSIBIE法を実施した結果，コンター図に示すようにシース位置の前面に反射の強い領域が現れたことからいずれも未充填と判定した。

G2桁の結果を総合すると，シースの曲げ上げ部から定着部にかけて「未充填」または「充填不良の可能性あり」と判定される部分が多く存在していた。また，SIBIE法の調査位置においても，他の調査手法と同様の傾向を示す結果を得た。

(3) その他の部位における調査結果（SIBIE法）

その他の部位（G3・G4桁主ケーブル，A1横桁横締め，中間横桁横締め）においてSIBIE法を実施した結果を図 - 12 に示す。また，一部の結果についてコンター図を示す。

G3桁C2ケーブルは「未充填」，G4桁C2ケーブルは「充填不良の可能性あり」との結果を得た。

A1端部横桁の横締めケーブルについては，⑤の部位で未充填と判定した。また，⑥の部位ではコンター図に見られるように，シース位置での反射波が確認されず，かつ反射波の強い部位がシースよりも浅い部位と深い部位で複数個所に点在したため「判定困難」と判定した。

A1 - A2中間横桁の横締めケーブルについては，⑧のコンター図に見られるように，反射波の強い部分がシース位置付近に現れているものの，シースの入力面側ではなかったため「充填不良の可能性あり」と判定した。

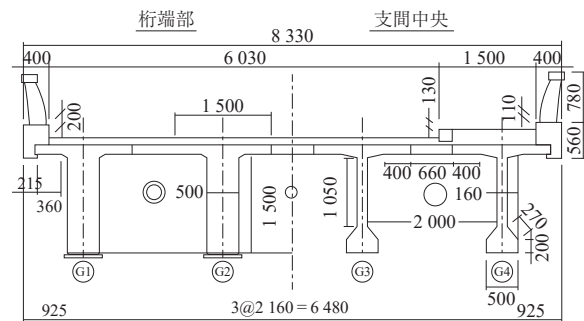


図 - 10 B橋の断面図



写真 - 5 全 景

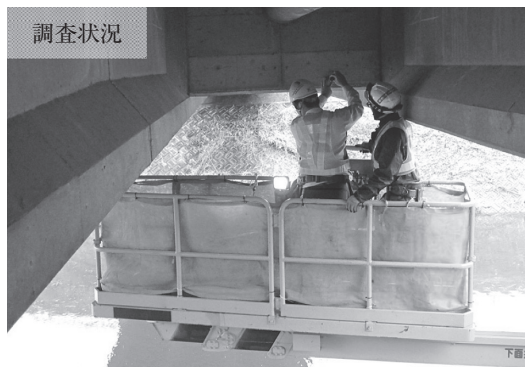


写真 - 6 調査状況

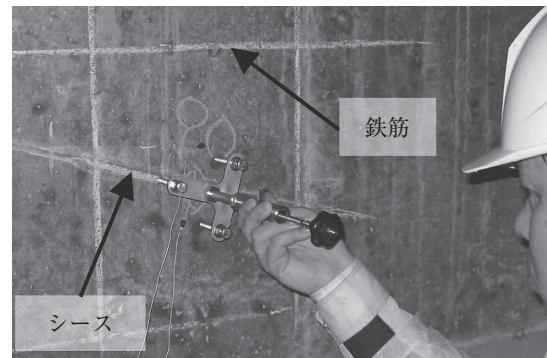
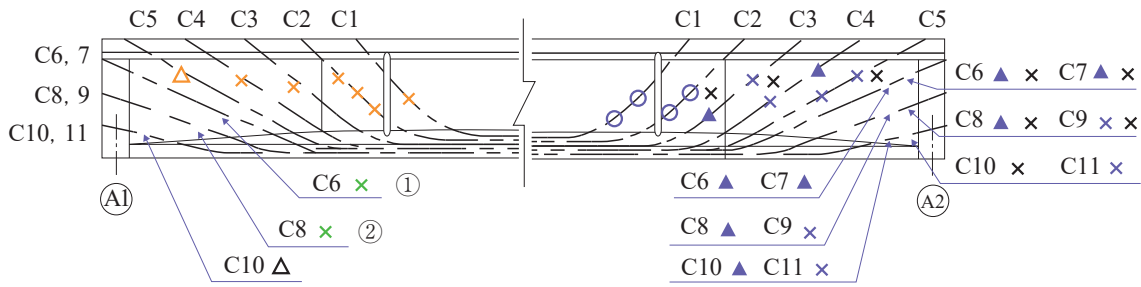
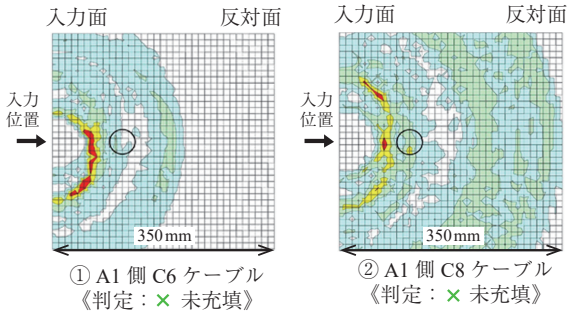


写真 - 7 衝撃入力状況



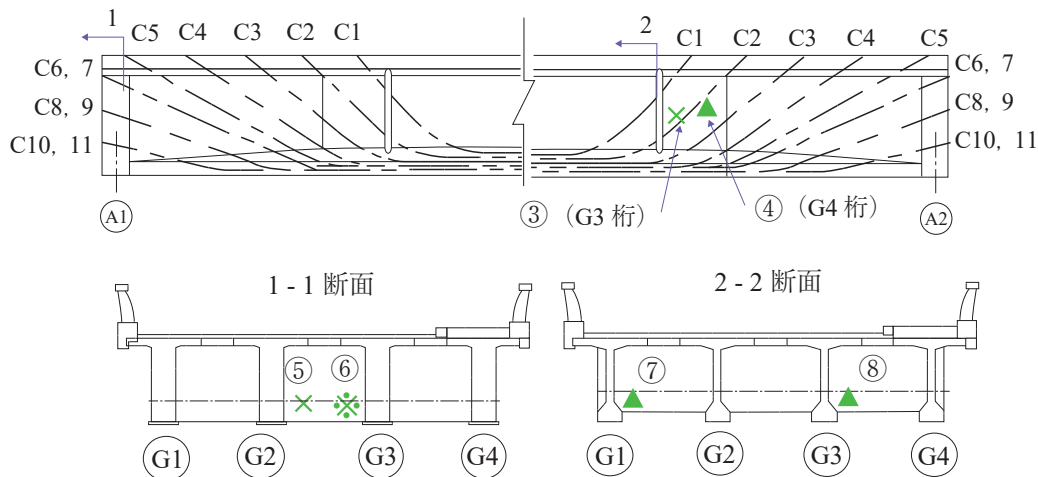
【SIBIE 法による調査結果】



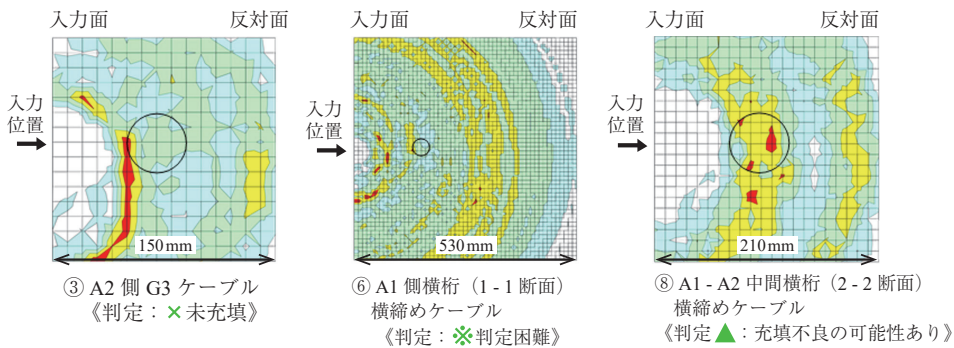
【凡例】

調査時期	調査方法	充填	充填不良の可能性あり		未充填	判定困難
			空隙大	空隙小		
1次調査	削孔調査	○	▲	△	×	
	インパクトエコー法	○	▲		×	※
2次調査	X線調査	○	▲	△	×	
	SIBIE法	○	▲		×	※

図 - 11 G2 桁の調査結果



【SIBIE 法による調査結果】



【凡例】

充填	○
未充填	×
充填不良の可能性あり	▲
判定困難	※

図 - 12 その他の部位の調査結果 (SIBIE 法)

5. おわりに

5.1 PC グラウト充填調査で得られた成果

本報告では、SIBIE法の既設橋梁2橋への適用事例を報告した。

A橋の調査では、同一調査点においてインパクトエコー法、SIBIE法、削孔調査を実施し、判定の比較を行った結果、同一判定を得た。SIBIE法は衝撃弾性波法の一つであり、得られた周波数スペクトルを画像化することによって、インパクトエコー法と同一の判定（評価）ができることを確認できた。

B橋の調査では、変状の多かった桁に対して調査点の異なる部位でインパクトエコー法、削孔調査、SIBIE法、X線調査を実施した。その結果、調査結果を総合すると、シースの曲げ上げ部から定着端部にかけて「未充填」「充填不良の可能性あり」との判定が多い結果となった。B橋は1973年に建設されていることから、PCグラウトに使用した混和剤は、減水剤とアルミニウム粉末を混合した混和剤と考えられる^り。そのため、当時のPCグラウトはブリーディングも生じたものと推察されるが、加えて粘性が低いことからシース内のグラウト充填状況は桁の起終点で対称になると考えられる。A1側におけるSIBIE法の結果は未充填の判定であり、対称となるA2側の同一ケーブルの判定は未充填の可能性あり（インパクトエコー法）または未充填（削孔調査）であった。このことから、同一調査点での比較結果ではないが、間接的にSIBIE法は他の調査結果と同等の判定（評価）ができたものと考えられる。

一連の調査結果より、既設構造物のPCグラウト充填調査（シースの空隙率が比較的大きい主ケーブルを対象）に対して、SIBIE法は非破壊調査の一つとして適用できるものと考えられる。

5.2 今後の課題

SIBIE法の特徴は、調査結果をコンター図化（画像化）する点にあり、視覚的に分かりやすくすることで、点検者の判定（評価）を容易にできる可能性がある。

本文中で紹介した2橋の事例では、SIBIE法の判定が実際の充填状況と比較的高い整合性があることが確認された。しかし、SIBIE法による判定の整合性については今後もさらに検証が必要であり、当面は直接目視できる削孔調査と組み合わせて、調査精度の信頼性を確保する必要がある。

SIBIE法を用いた調査はまだ実績も少ないため、今後、空隙率が小さい場合や、多段配置（衝撃入方面に対してシ

ースが並列、または直列に配置）されている場合などについて、要素実験や実橋での調査実績を蓄積して、精度の向上を図るとともに、適用範囲を確認していきたいと考えている。

また、現状では、現場での計測データの取込みや、データ整理に時間を要している部分があるため、計測機器、解析プログラム等の改良を行い、判定までの迅速化（自動化）ならびに可搬性の向上（本体の小型化）を検討する予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針，pp.19-43, 2016.9
- 2) Otsu Masayasu and Takeshi Watanabe : Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NTD & E international, Vol.35, No.3, pp.189-196, 2002
- 3) 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部検出法の改良，土木学会論文集，E Vol.68, No.2, pp.208-215, 2009.5
- 4) 山田雅彦，渡海雅信，中居陽子，大津政康：SIBIEによるPCグラウト未充填部の検出性能の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.2, pp.691-695, 2008
- 5) 山田雅彦，大久保太郎，大津政康：SIBIEによるPCグラウト未充填部のモデル試験による検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.2047-2052, 2009
- 6) 吉良美咲，山田雅彦，大津政康：並列配置シースのSIBIE法によるPCグラウト未充填評価，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.14, pp.721-728, 2014.10
- 7) 永井勇輔，山田雅彦，大津政康：SIBIE法のPCグラウト未充填評価のための現場仕様入出力装置の改良と適用，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.14, pp.729-736, 2014.10
- 8) 山田雅彦，大津政康，友田祐一，徳光 卓：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，プレストレストコンクリート工学会 第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.365-370, 2015.10
- 9) 長岡 寛，山田雅彦，大野雅幸，大津政康：既設橋のPCグラウト充填調査－SIBIE法の実橋への適用－，プレストレストコンクリート工学会 第26回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.635-638, 2017.10
- 10) 田村誠一，春田健作，片西美佳，山田雅彦：SIBIE法を適用した実橋での充填調査，プレストレストコンクリート工学会 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.605-608, 2018.11

【2018年10月16日受付】