

SIBIE法によるコンクリート中の欠陥評価技術

内田昌勝¹・大津政康²

¹工博 太平洋セメント株式会社 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作二丁目4-2)

²工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪二丁目39-1)

In order to evaluate defects in concrete members, a procedure named Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact-Echo (SIBIE) has been developed. SIBIE is an imaging procedure to display a concrete-section of internal defects by analyzing elastic waves. In this study, the procedure is applied to evaluate a grouted condition of existing Prestressed Concrete (PC) sheaths. The results from SIBIE are in remarkable agreement with those of the bore-hole scope, finding a void at the same location of the sheaths under investigation.

Key Words : NDT, elastic wave, inspection, impact echo, SIBIE, prestressed concrete, sheath, grouted condition, bore-hole scope

1. はじめに

コンクリート表面から機械的な力により弾性波を入力し、コンクリート内部の欠陥を検出する方法としてインパクトエコー法がある。インパクトエコー法は、コンクリート部材厚の検査やコンクリート内部に存在する比較的大きな欠陥の検出には有効な手法である。この手法は、周波数スペクトルのピークから内部空洞の位置を推定する方法であるため、安全でかつ効率的な検査手法のひとつである¹⁾。しかし、実際には様々な境界部からの反射波が検出されるため、応答周波数のみからコンクリート中の小さな欠陥を検出することが困難な場合が多い。

そこで、コンクリート中の小さな欠陥を評価する手法として、インパクトエコー法の欠点を、独自の周波数応答解析と可視化によって改善した SIBIE 法^{2),3)} (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact-Echo) が熊本大学の津らによって新たに開発中である。

プレストレストコンクリート (以下 PC と略す) では、特に、ポストテンション方式の場合には、シース管を介して緊張材をコンクリート中に設置し、緊張後にグラウトを注入しコンクリートと一体化させる構造であるため、グラウトの充填が不十分であると、構造物の劣化を引起す原因となってしまう。そのため、シース管内部の空隙の存否を検出する技術の確立が望まれている。

PC グラウトの充填検査への SIBIE 法の適用性は、既にモデル試験体で確認されているので^{2),3),4)}、本研究では実在する PC 箱桁のシース管のグラウト充填調査を行い、削孔試験により適用性の検証を行っ

た内容について述べる。

2. SIBIE法の原理

(1) PC部材における周波数応答

インパクトエコー法の概念によれば、ポストテンション方式の PC 部材では、桁厚での応答周波数 f_T 、シース管での反射による応答周波数 f_{steel} 、空隙での反射による応答周波数 f_{void} が出現する。これらの概要を図-1に示す。ここで、シース管のかぶりを d 、桁厚を T 、縦波弾性波速度を C_p とすると、これらのピーク周波数はそれぞれ以下の式(1)、式(2)、式(3)のように示される¹⁾。ただし、式(1)および式(3)に見られる係数 0.96 は縦波弾性波速度の測定の補正係数とされており、インパクトエコー法の原理に関連するものではない。

$$f_T = 0.96 \cdot C_p / 2T \quad (1)$$

$$f_{steel} = C_p / 4d \quad (2)$$

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

一方、既報⁵⁾のコンクリート構造物における波動現象と部材寸法に関する解析によって、空隙での顕著に反射することで出現する周波数ピークとして、式(4)に示すような f_{void} の示唆されている。実際に、PC グラウトが充填されていない場合は、式(4)の周波数応答が検出されることが実験および理論解析により明らかになっている⁴⁾。

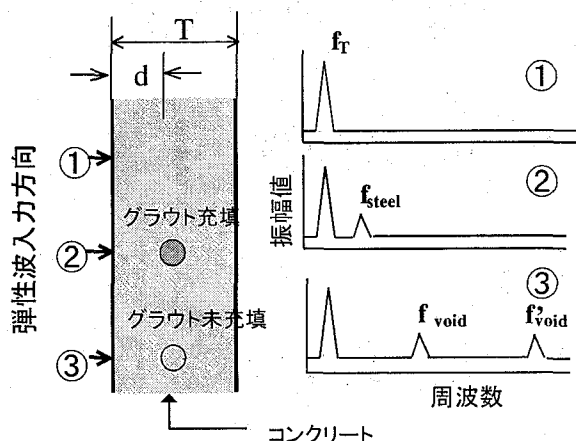


図-1 ポストテンション PC 部材における周波数応答

$$f'_{\text{void}} = C_p/d \quad (4)$$

(2) スペクトルイメージング

一般に、弾性波の入力によってコンクリート部材で計測される周波数スペクトルのピーク周波数は、境界面を含む不連続面で弾性波が反射することにより生じる。そのため、実際に得られる周波数スペクトルは複雑な挙動を示す。そこで、コンクリート部材内部に存在する空隙などを明瞭に識別する目的で、弾性波の反射位置を画像化するスペクトルイメージング (SIBIE) 法が開発された。解析手順は、まず、解析対象断面を正方形要素 (10×10mm) に分割しモデル化して、コンクリートの縦波弾性波速度を入力した後、各要素中心の応答周波数を計算する。図-2 の例では、解析要素の中心と弾性波の入力点および出力点を結ぶ弾性波の伝播距離は、式(5)で表される。なお、弾性波の入力点と検出点の距離は、縦波の検出感度などを考慮して 50mm としている。

$$R = r_1 + r_2 \quad (5)$$

次に、計測された周波数スペクトルから、各要素の位置での式(3)および式(4)の応答周波数に相当する周波数スペクトル強度を合計し、各要素の反射強さとして画像化する。

(3) 弾性波入力装置

シース管に含まれる空隙から反射する弾性波の周波数応答を評価するためには、コンクリート中に高い周波数でかつ大きなエネルギーをもつ弾性波を入力する必要がある。たとえば、縦波の弾性波速度が 4000m/s のコンクリート中に表面から深さ 100mm に設置されたシース管内部のグラウト充填状況 (空隙の有無) を評価する場合、式(4)の応答周波数を得るためには 40kHz 以上の弾性波を入力する必要がある。インパクトエコー法では、この周波数を入力するためには、小径の鋼球をコンクリートに打撃して弾性波を入力することになるが、球径が小さくなるにつれてエネルギー量が小さくなるので 40kHz 以上の弾性波を入力することは困難であった。

そこで、入力する媒体や手法などについて検討を

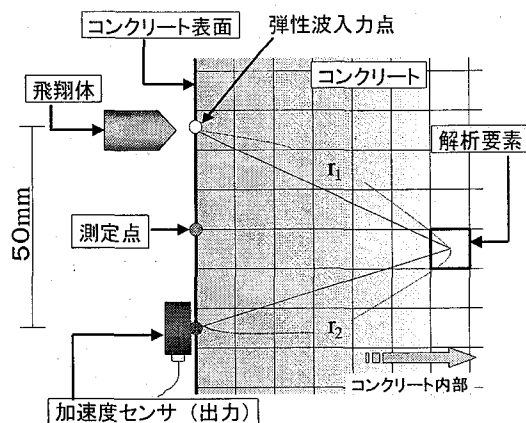
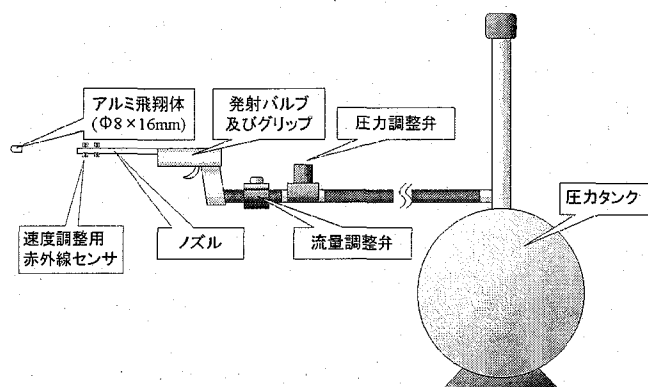


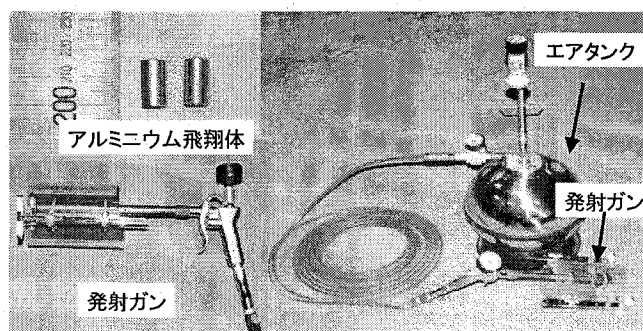
図-2 スペクトルイメージングモデル

加えた結果、周波数が高くかつエネルギーの大きな弾性波を入力できる弾性波入力装置を開発した。この装置は、アルミニウムの飛翔体を発射ガンに装着し、空気圧によりコンクリート表面に入射するものである (図-3)。

本入力装置で入力できる周波数成分を確認するため、デービス棒法⁹⁾によって応答特性試験を行った。実験概要を図-4 に示す。デービス棒には、音響インピーダンスがコンクリート (約 $11 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) と近い御影石 ($13 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) を選び、直径 30mm 長さ 1400mm に加工した。弾性波の収録は、デービス棒が軸方向へ自由に運動できるようにレールの上に設置されたベアリング用鋼球 4 個で水平に支持し、



(a) 概略図



(b) 装置の写真

図-3 弾性波入力装置の概要

端面からアルミニウム飛翔体を入射し、棒の側面に取付けたひずみゲージからの信号を動ひずみ計で増幅した後、データレコーダーに収録した。

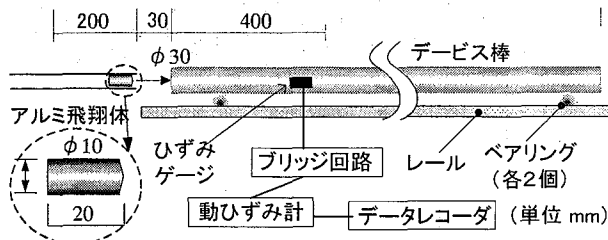


図-4 デービス棒法による周波数応答試験の概要

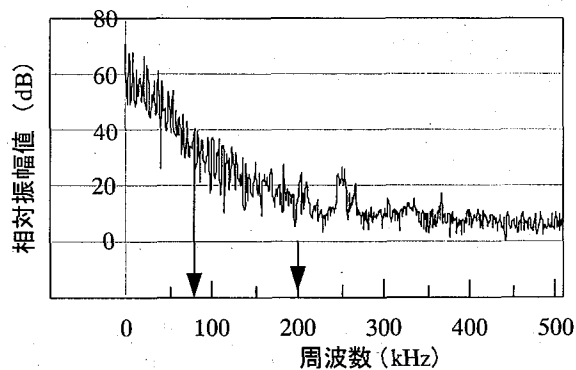


図-5 アルミニウム飛翔体を用いた周波数スペクトル⁷⁾

計測した周波数スペクトルを図-5に示す⁷⁾。この結果、200kHzを超えるまでは一定の割合で減衰し、その後減衰率にほとんど変化がなくなっているのがわかる。このことから、アルミニウム飛翔体によって入力した弾性波には200kHzまでの周波数成分を含むと考えることができる。また、80kHz付近では最大値より20dB程度の低下に留まるため、本手法を適用する場合、少なくとも80kHz程度までは高エネルギーの弾性波を入力できるものと考えられる。

実際の計測では、直径8mm、長さ16mmのアルミニウム飛翔体を0.15MPaの一定圧で弾性波を入射し

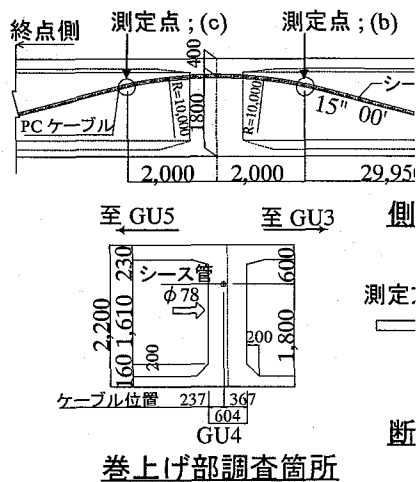


図-7 調査断面

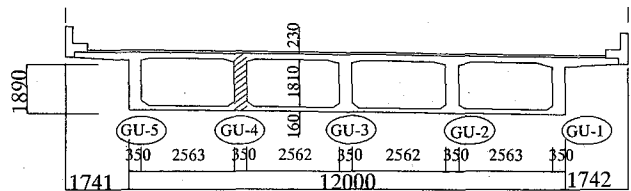


図-6 調査橋梁断面図⁷⁾

ている。

3. 実橋における調査事例（その1）

(1) 概要

調査を実施した橋梁は、3径間連続PC箱桁である。図-6に調査した橋梁の断面図を示す。ここでは、GU-4桁の最も急勾配となる1本のケーブルの巻上げ部と下フランジに着目し調査を行った。

PCケーブルの位置は、設計図書より求めこれをシース管の中心とした。測定位置は、図-7に示すようにフランジ1箇所とウェブ部の巻上げ部2箇所の計3箇所計測を行った。

(2) 調査結果

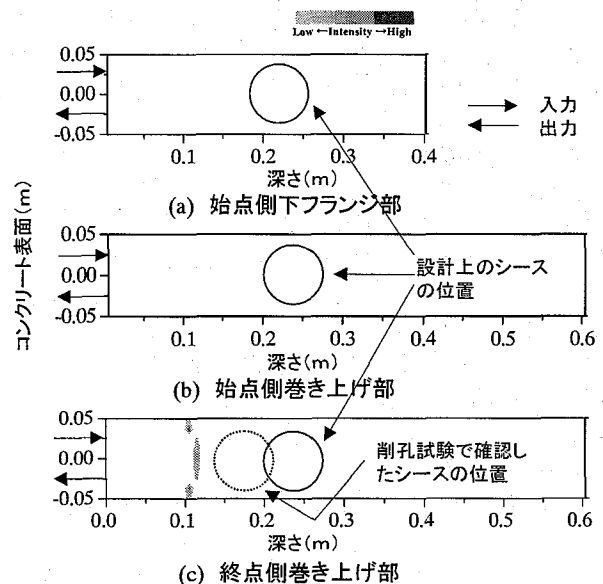


図-8 SIBIEの解析結果

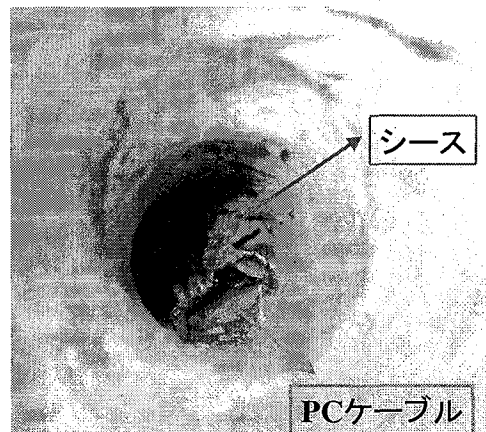


写真-1 削孔内部の状態⁷⁾

ラウトの充填状況を確認した。その結果、シース管の位置が設計位置よりコンクリート表面側にずれて深さは 140mm にあり、シース管内にはグラウトが充填されていない、SIBIE の解析結果とほぼ一致することがわかった。写真-1 にシース管の内部の状態を撮影した結果を示す。PC グラウトは充填されていなかったものの、PC ケーブルは腐食がしておらず健全な状況にあった。また、検査結果より PC グラウトは始点側より注入され、巻上げ部を超えた後、グラウトの先流れが起こり測定点(c)において未充填部が存在したと推察することができる。

4. 実橋における調査事例（その2）

（1）概要

調査を実施した橋梁は前回と同様の連続 PC 箱桁である。今回の調査は、図-9 に示すように 4 室箱桁の F 橋梁と 3 室箱桁の S 橋梁で行った。F 橋梁では、GF-1 と GF-2 の 2 本の桁から各 1 本のケーブルを選定し、調査位置 A、B の 2 箇所ではグラウトのシース管の充填状況を調査した。S 橋梁も同様に、GS-1 と GS-2 の 2 本の桁から各 1 本のケーブルを選定し、調査位置 C、D で調査を行った。図-10 に各橋梁の代表的な断面をそれぞれ示す。シース管の位置は、設計図書およびレーダー探査結果より求めた。

（2）計測条件

前回の調査で、中間支点の巻上げ部のケーブルで PC グラウトの充填不良が発見された。これは、グラウトの先流れにより空気溜りが残ったためと考えられた。そこで、今回は、中間支点部の巻上げ部分に着目し、調査を行った。

図-11 に F 橋梁の GF-1 桁側面図およびケーブル配置を図-12 に S 橋梁の GS-1 側面図およびケーブル配置を示す。計測は、中間支点部から 2m の位置を基準とし、200mm 間隔で各 5 箇所で行った。図-11 および図-12 中に測定箇所の拡大図が記載されて

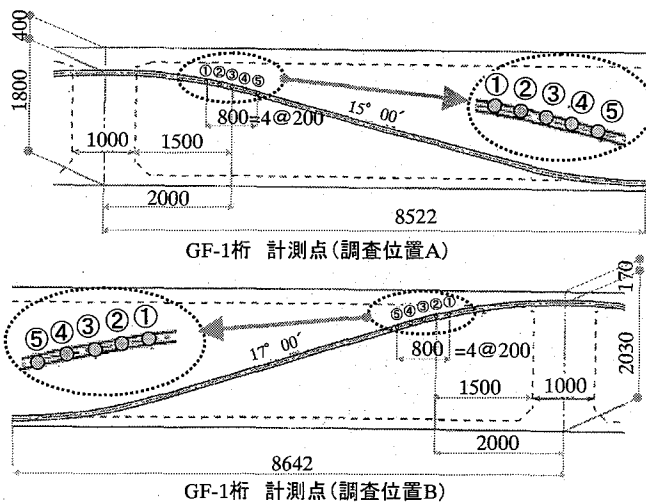


図-11 桁側面およびケーブル配置図：F 橋梁 GF-1 桁

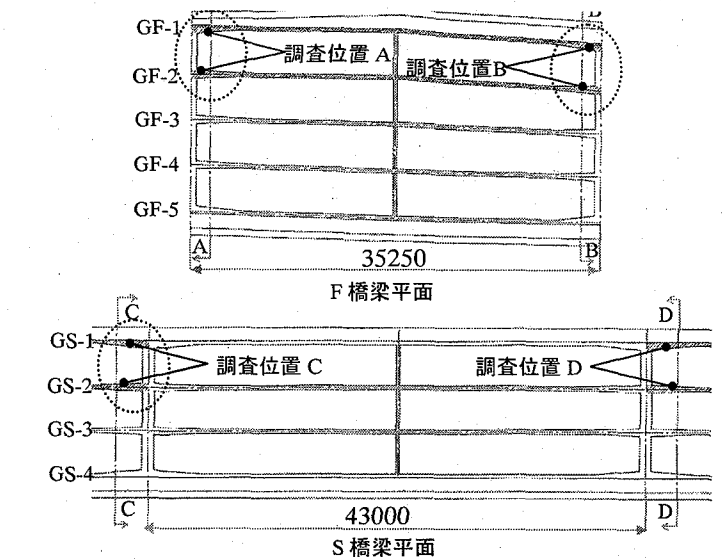


図-9 調査橋梁平面図

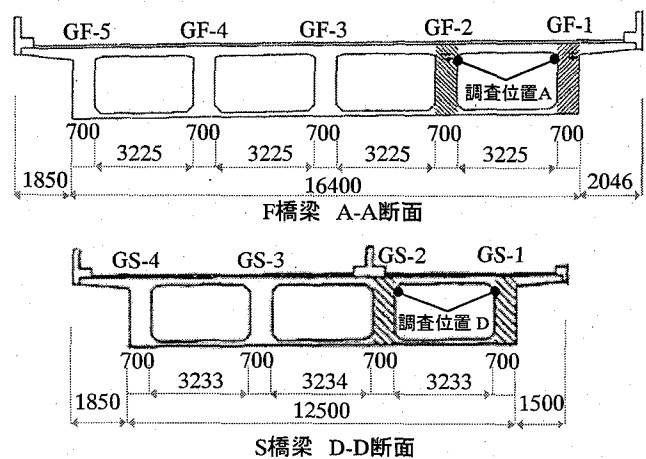


図-10 調査橋梁断面図

り、①～⑤の順とした。

（3）SIBIE 法による調査結果

今回の調査で、S 橋梁の GS-2 桁の C 部でその一部にシース管前面での強い反射が検出された。図-13 に、GS-2 桁 C 部の SIBIE の解析結果を示す。ここで、解析場は全て深さ 70cm で統一し、図中には、

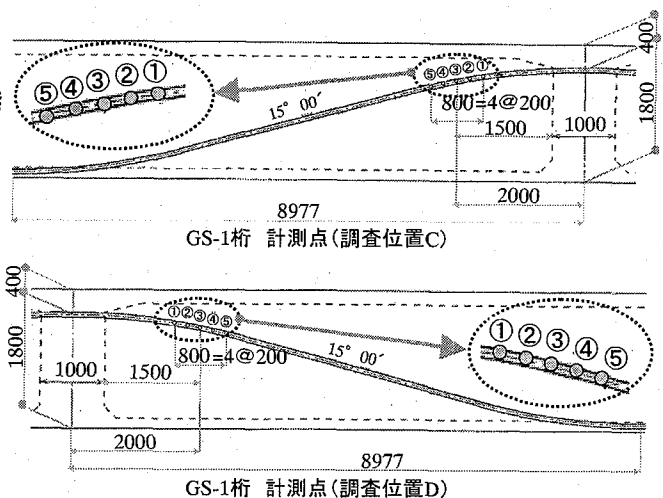


図-12 桁側面およびケーブル配置図：S 橋梁 GS-1 桁

いるが、計測点の番号は、近接する中間支点部側よ

設計上のシース管の位置を記載した。この結果、④

の位置で、シース管の前面部で強い反射波が検出されているのがわかる。したがって、SIBIE の調査結果ではここを充填不良と判定した。

図-14 は、F 橋梁の GF-2 桁の A 部における SIBIE の解析結果を示したものである。③でシース管前面より弱い反射波が検出されているが、反射が弱いいため、シース管以外の部分からの反射波とも考えられ

でコンクリートが良好な状態にある上、測定前に想定したシース管の位置が実際とほとんどずれていなかったことも一因と考えられる。

実際の構造物では、設計図面と実際のシース管の位置がずれているケースもある。そこで、実際のシース管位置と測定位置とのずれを少なくするため、レーダーや電磁誘導法などの非破壊試験方法による

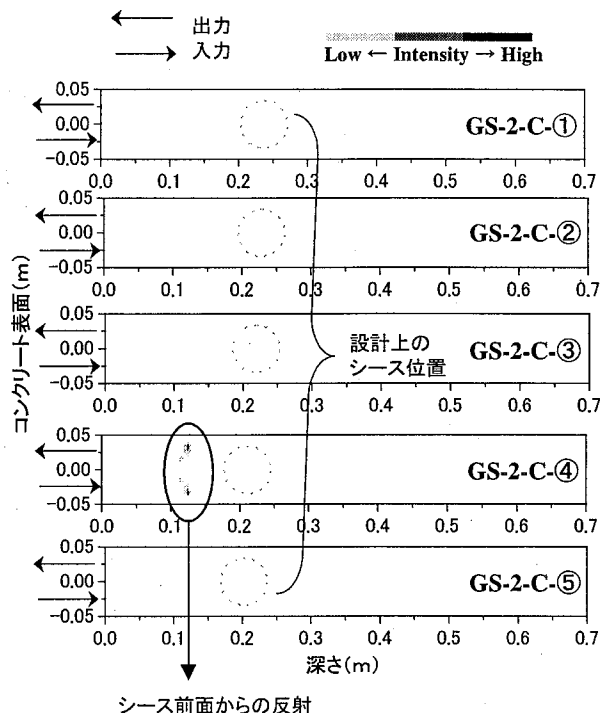


図-13 SIBIE の解析結果 (S 橋梁 : GS-2-C)

たので、ここでは不明と判定した。

その他の結果は、シース管の無いコンクリート部分のデータと同様に、シース管前面からの有意な反射が検出できなかったため、PC グラウトが充填されていると判定した。

(4) 削孔調査

SIBIE 法による調査結果を検証するため、検査部の削孔を行い、グラウトの充填状況を観察した。本調査結果より、充填不良および不明と判定された、GS-2-D-④および GF-2-A-③部分の他に充填と判定されたその他の 5 箇所を追加し、計 7 箇所で行った。削孔調査位置と SIBIE 法による調査結果および削孔試験結果を表-1 にまとめて示す。

この結果、充填不良と判定された GS-2-D-④では削孔によってグラウトの充填不良が確認されたが、GS-2-D-⑤でも僅かに充填不良部があることが確認された。この箇所では、PC 鋼材の露出を伴わない比較的小規模な空気だまりであったため、場所によっては検出が困難であったものと推察される。

一方、GF-2-A-③では、グラウトが完全に充填されており、検出された信号は、グラウト以外の部分より反射したものと推察される。

今回の削孔調査の結果、7 箇所中 5 箇所 SIBIE 法による調査結果と削孔試験結果が一致した (適合率 70% 以上)。これは、測定した箇所が箱桁内部

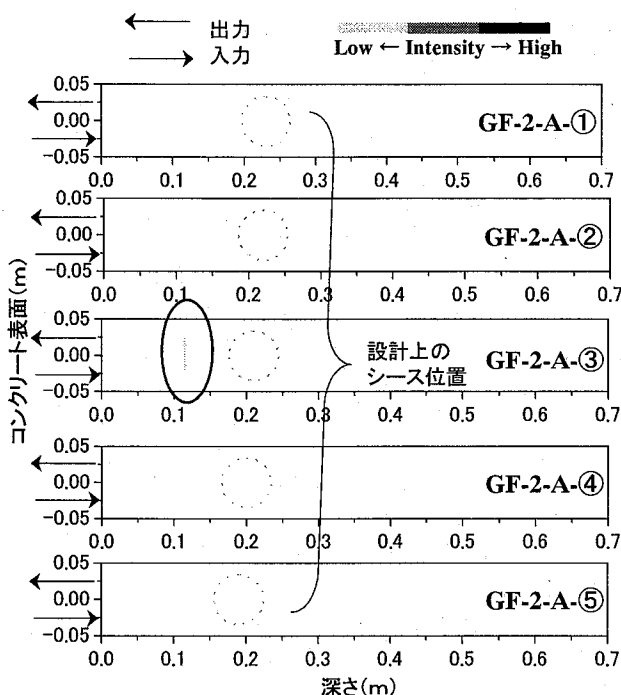


図-14 SIBIE の解析結果 (F 橋梁 : GF-2-A)

位置の推定に加え、削孔試験を併用しながらグラウトの充填状況を調査することが望ましいと思われる。また、屋外でコンクリート表面劣化が激しい場合、弾性波がシース管表面まで達する前に減衰してしまう可能性もあるため、この影響についても検討する必要がある。

表-1 SIBIE 法による調査結果の検証

調査箇所	調査結果	削孔結果	適合性
GF-1-A ③	○	○	○
GF-2-A ③	△	○	×
GF-1-B	① ○	○	○
	② ○	○	○
	④ ○	○	○
GS-2-C	③ ×	×	○
	④ ○	×	×

○: 充填, △: 不明, ×: 充填不良

5. まとめ

本研究では、インパクトエコー法の欠点を改良し、

コンクリート内部の欠陥を可視化することができる SIBIE 法を用いて、実橋のポストテンション方式の PC 箱桁でグラウト充填検査を行った。

グラウト充填不良と判定された箇所では削孔した結果、実際にグラウトの充填不良が確認されたため、さらに調査範囲を広げて SIBIE 法によるグラウトの充填調査を行った。

その結果、グラウトの充填不良に起因するシーす管前面からの反射がほとんど無く、明瞭に充填不良と判定されたのは 1 箇所であった。削孔試験の結果、その周辺でもわずかな充填不良が発見されたが、SIBIE の調査結果からは、グラウトの不良が検出できなかった。このことより本手法は、鋼材が見えるほどグラウトが充填されていない状況の判断は可能であるが、小規模の空気溜りのような空隙は検出することが難しいと考えられる。

しかしながら、今回の結果より条件の良いケースではあるが 70% 以上の適合性があったことから、本手法はグラウトの充填検査の一次調査手法としては、有効な手法と考えられる。

本手法の適用に際して、測定対象のケーブル位置が設計上の位置から大きくずれる場合、検出できない可能性もある。また、多段に配置されたケースでは、計測する面から奥側に配置されたシーす管は検出することが困難である。今後、これらの適用限界を把握する予定である。

PC 構造は、耐ひび割れ構造で耐久性に優れたものであるが、その緊張材が腐食し破断した場合、橋梁であれば落橋の恐れもある。したがって、ポストテンション方式の PC 構造では緊張材を保護するグラウトが充填されていることが重要である。PC 構造物のさらなる品質向上に、本技術が貢献できることを願っている。

謝辞： 本研究をまとめるにあたり、川田工業（株）の竹淵様および（株）太平洋コンサルタントの辻様には多大なる協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sansalone, M. J., Streett, W. B.: Impact-echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.
- 2) 渡辺健, 大津政康, 友田祐一: PC グラウト充填度評価のインパクトエコー法に関する波動論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.293-298, 1998.
- 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集, Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000.
- 4) 渡海雅信, 大津政康: SIBIE を用いたコンクリートの欠陥画像の同定, 第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.23-28, 2001.
- 5) Ohtsu, M. : On High-Frequency Seismic Motions of Reinforced Concrete Structures, JCSE, 544/V-32,

pp.277-280, 1996.

- 6) 上田和永, 梅田章: デービス棒による加速度計の特性評価に関する研究, 第一報, 日本機械学会 日本機械学会論文集 (C 編) 57 巻, 553 号, pp.143 - 147, 1991.
- 7) Uchida, M., Ohtsu, M., Shigeishi, M., Takebuchi, T., Ito, N.: Evaluation of Grouted Duct in Post-tensioning Prestressed Concrete Bridges Using SIBIE, Structural Engineers World Congress 2002, CD-ROM(T9-1-e-5), 2002.