

SIBIE 法を用いた PC グラウトの現場試験

大津 政康¹, 小坂浩二², 神内隆行³

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

²学士 (工) 熊本大学大学院自然科学研究科 (同上)

³工修 (株)ピー・エス メインテナンス部部长 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-13-17)

The impact-echo method recently draws a remarkable attention for nondestructive evaluation (NDE) of defects in concrete structures. Extracting resonance frequencies responsible for the locations of reflectors, the depths of defects can be estimated. To circumvent the difficulty on identifying peak frequencies in the conventional method, a new analysis is developed by applying an imaging technique. The procedure is named a stack imaging of spectral amplitudes based on the impact-echo (SIBIE). Previously, an application to a prestressed concrete beam was confirmed, identifying a fully-grouted duct and an incompletely-grouted. In the present study, therefore, the proposed procedure is applied to a real-scale model in a field.

Key Words : Impact-echo, Nondestructive evaluation, Prestressed concrete, Grouted duct, Field test.

1. はじめに

インパクトエコー法は弾性波を用いた定量的な非破壊検査法として開発され、コンクリート構造物の欠陥検査に適用されている。しかし、実施にあたっては、現在までに幾つかの問題が指摘されている。それは(a) 衝撃力を発生させる入力装置に問題があり、新たなインパクトの開発が求められていること、(b) 衝撃力と同様に、計測装置もピーク周波数を確実に検出できる周波数帯を有している必要があること等である。(b) について、インパクトエコー法¹⁾のために開発された受信部内臓センサは、米国 NIST 仕様の変位型センサで感度は悪いが高い周波数まで平坦な応答を示すことが特徴である。しかし、このセンサを組み込んだ市販装置では高い周波数帯での応答はかなり悪くなっており、検討結果によれば 40 kHz 程度までしか応答しないことが明らかになっている²⁾。実際に、最も大きな問題点は (c) 実在のコンクリート部材では欠陥以外の境界面からの反射波が発生するため、共振周波数以外にも多くのピーク周波数が検出されることである。

これらを克服すべく衝撃入力装置を開発し、加速度計から構成された受信システムを用いてスペクトル分析結果をイメージング処理する SIBIE³⁾ 手法を研究中である。

本論文では、屋外に設置された多様なグラウト充填を行った実物大のモデル梁で屋外現場試験を実施することによって、この手法の実構造物でのグラウト充填度判定への現場適用性を検討した結果について報告する。

2. 試験装置

上記の(a)について検討し、ハンマ打撃では 5 kHz 以下の成分しか持たないことを明らかにした一方、鋼球落下では鋼球径を小さくすれば上限周波数は高く出来るが、衝撃エネルギーは小さくなって実験には不向きとなることを確認した。実際に、50 kHz 程度までの周波数成分を入力するには、径 5 mm 以下の鋼球しか使用できず、これによって発生した弾性波動は微弱で実構造物への適用は困難と考えられた。

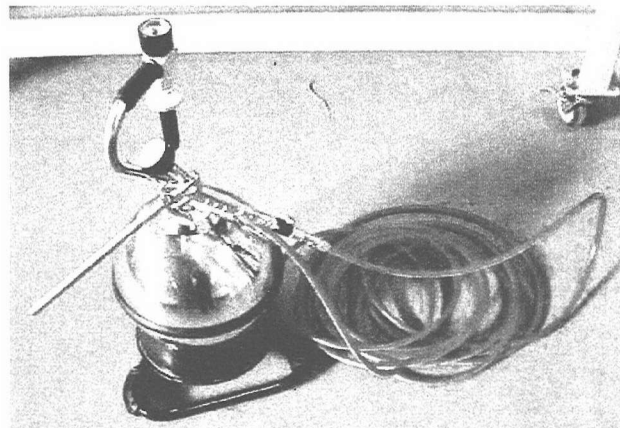


図-1 携帯式衝撃力入力装置

そのためコンプレッサの空気圧によりアルミ弾を打撃させる装置を開発したが³⁾、可搬式ではなかった。そこで、現場実験用に図-1のような携帯式の入力装置を新たに開発した。これは、自動車用タイヤの空気圧入力装置を転用したものである。打撃用のアルミ弾については、

図-2に示す形状で直径D=8 mmと10 mmの2種類のものを用意した。

この適用に当たっては、予め入力周波数帯を校正用コンクリート板⁴⁾により検討した。2種類のアルミ弾打撃

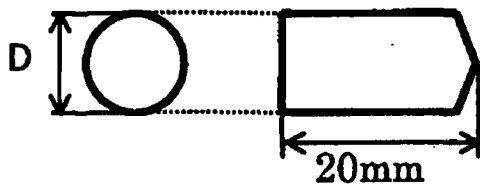


図-2 アルミ弾の形状

による衝撃入力周波数応答特性を検討した結果を図-3、図-4に示す。これらは今回用いた加速度計システムで検出されたものを校正した結果である。径8 mmのアルミ弾の場合には、60 kHz程度まで十分に入力周波数帯があることが確認できる。一方、径10 mmの場合には10 kHz付近のエネルギーが大きくなるが、60 kHz以下にエネルギーの少ない領域が認められる。

この結果より径8 mmのアルミ弾を図-1の入力装置を用いてコンクリート表面を打撃し、加速度計システムにより現場計測を行うことにした。加速度計システムとし

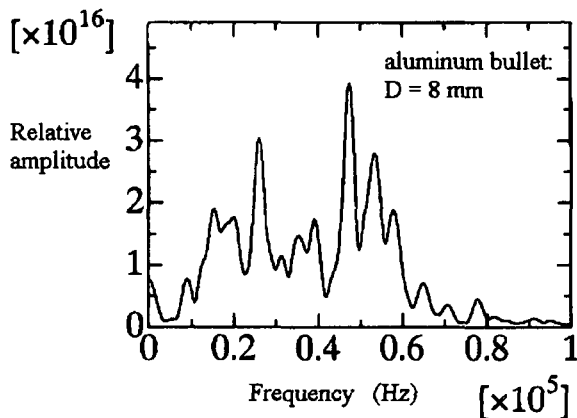


図-3 アルミ弾(直径8 mm)の周波数応答

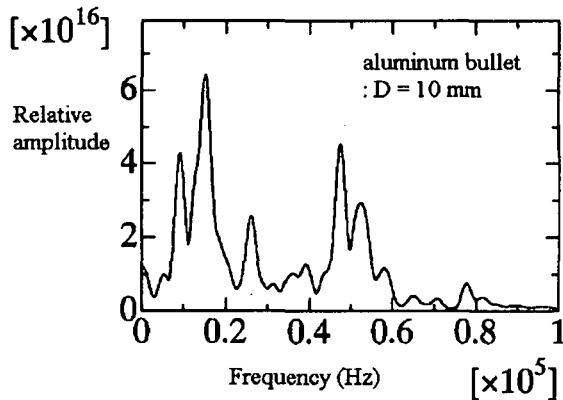


図-4 アルミ弾(直径10 mm)の周波数応答

ては帯域の広い(80 kHz程度まで)ものを採用し、計測に当たっては直接にコンクリート表面に貼付した。検出波形はチャージアンプで40dB増幅した後に、波形記憶装置により処理し、MOディスクを媒体として記録した。

3. 現場実験の概要

実験を行った供試体は実寸法のプレストレストコンクリート(PC)梁であり、検証実験用にグラウト充填が様々に施され屋外に設置されていた。その概要を図-5に示す。

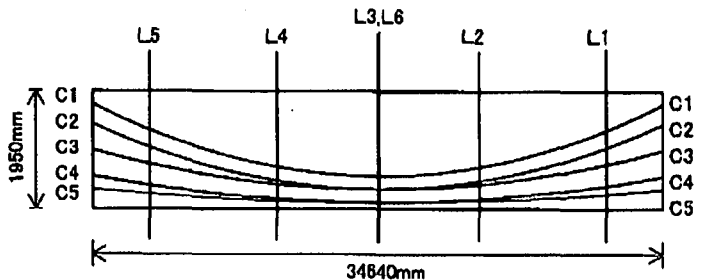


図-5 PC梁のシース管配置

図中の5本のシース管C1～C5は、以下のようにグラウト注入がなされていた。

- (1) シース管C1は、L2断面からL4断面の間のみ充填されている。つまり、断面L1, L2, L4, L5では未充填であり、L3, L6断面は充填部である。
- (2) L3とL6断面は同じものであるが、測定を両側より実施したために、別の断面として名付けている。
- (3) シース管C2とC5は全長に渡り完全にグラウト充填されている。
- (4) シース管C3は完全に未充填である。
- (5) シース管C4では断面L1とL5の間が充填されている。つまり、断面L1とL5では未充填となっている。

このように図-5に示す6つの断面L1, L2, L3, L4, L5, L6で、シース管によってグラウトの充填度が異なる。その詳細を図-6、図-7、図-8、図-9に示す。

なお、図-8と図-9に示す断面L3とL6は、上述のとおり同じ断面を両側面から測定したために便宜的に名付けたものである。また、図-7以降のとおり中心部に近づく断面では、シース管は並列して配置されている。

実験では、まず、断面L1からL6の6ヶ所各シースの位置を野書き出した。次に、図のシース管の位置を中心に、打撃点と検出点の距離を5 cm間隔として、それぞれの断面位置で10回計測を実施し、10個の波形を収録した。その現場での測定の様子は、図-10に示す。

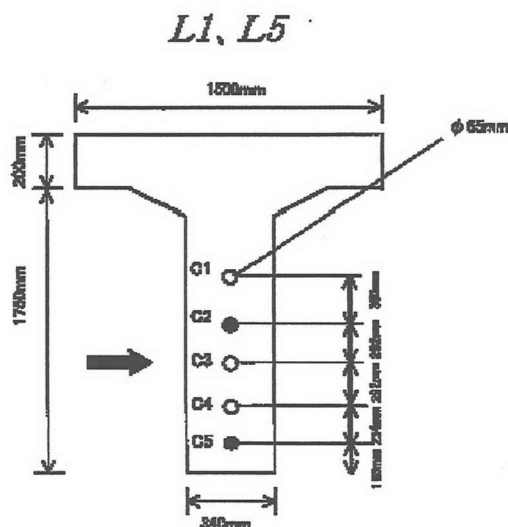


図-6 L1及びL5断面のグラウト充填状況

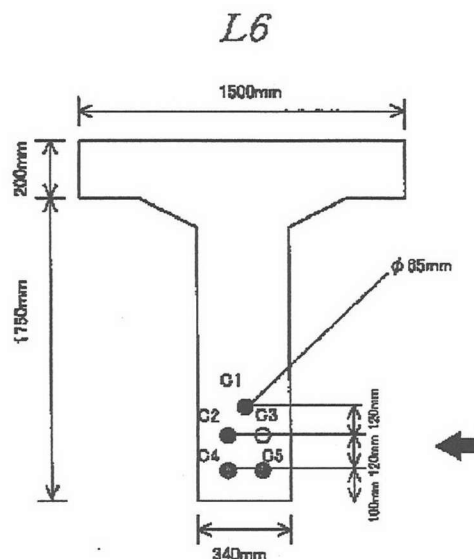


図-9 L6断面のグラウト充填状況

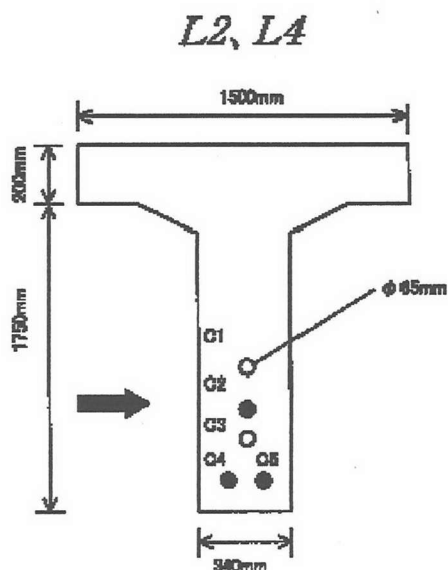


図-7 L2及びL4断面のグラウト充填状況

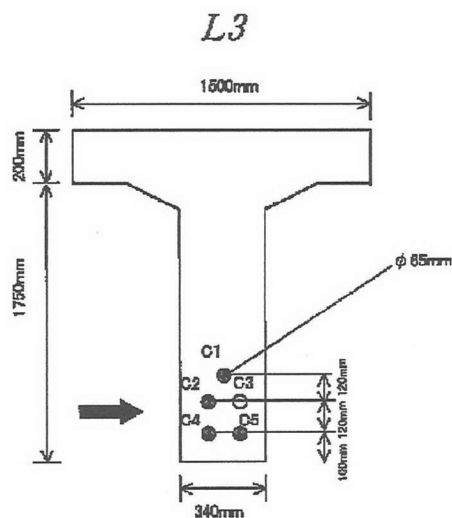


図-8 L3断面のグラウト充填状況



図-10 現場試験の様子

4. 画像処理手法 (SIBIE 解析)

弾性波法のみならず、電磁波レーダ法などでも画像処理には時間波形を対象に処理したものが一般的である。その場合には、CT スキャン等のように走査手順が必要となる。インパクトエコー法にもそのような手法を組み込むことは可能であるが、実務的には、1ヶ所での計測で、グラウトの充填度が評価できれば非常に有用と考えられる。そこで、1ヶ所で検出された波形のスペクトル情報から断面内の反射源の存在を同定するイメージング法 (SIBIE: Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact Echo) を開発した。

これは、検出波動の周波数スペクトルより反射源の位置による共振周波数の存在を断面上に画像として表示するものである。断面を図-11のように分割し、各要素中心から入出力点までの伝播経路長 R を求め、このパスで

反射が生じたと仮定した場合の共振周波数,

$$f_1 = V_p/R/2, f_2 = V_p/R, f_3 = V_p/2R \dots \dots \dots (1)$$

を断面厚さの反射周波数を下限に上限周波数 (50 kHz に設定) までの範囲で決定する。ここで、 V_p は P 波の伝播速度である。それらの周波数に対応するスペクトル振幅値を要素での反射スペクトル強さとして積み上げる (Stack) と、図-1 2 のような反射強さに関する 3 次元分布が得られる。

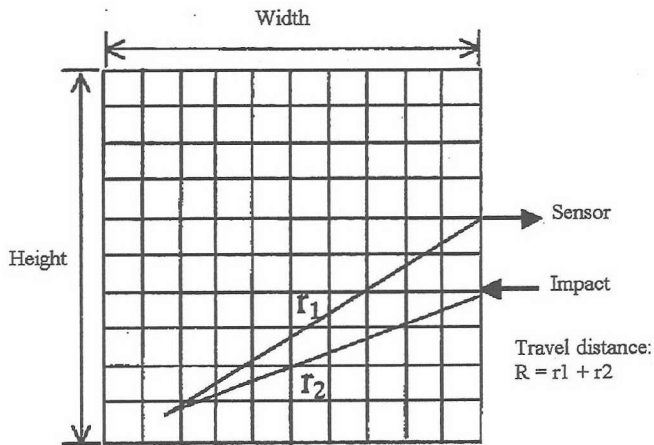


図-1 1 解析断面の分割図

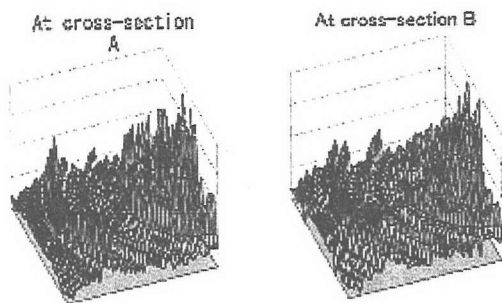


図-1 2 Stack Imaging of Spectral Amplitudes

これを等高線図として表示することにより SIBIE 画像が得られる。ここで、高い等高線部ほど反射が強いことを意味しており、そこに反射源があると推定される。ただし、全てのピーク周波数を考慮することになるため、対象以外の反射源も画像には描かれることになる。

したがって、反射源の想定物が多い場合や、今回の現場実験のように各断面でシース管付近のみに対して分析する場合などには、まだ適用性は確認する必要がある。

5. 結果及び考察

各断面の測定箇所より得られた加速度波形は、全て FFT 分析により周波数スペクトルを求めた。次に平滑化の手

段として各計測点での 10 個のスペクトルを足し合わせ (Stack), 測定箇所でのスペクトル情報とした。SIBIE 解析を実施する断面としては、図-6~図-9 の PC 梁のウェブ幅 340 cm はそのままに、各測定箇所に対して梁高さとして 30 cm を採用した。そして、各測定箇所の SIBIE 解析を実施した。

L1 断面のシース管 C2 に対する解析結果を図-1 3 に示す。このシース管はグラウト充填がなされているため

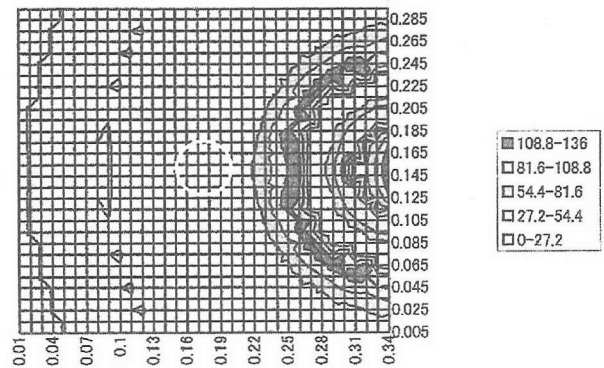


図-1 3 L1 断面シース管 C2 の解析結果

、白丸で示したシース管の位置には顕著な反射源は認められない。ただし、入出力点の近傍にはスペクトル強さの大きな領域が認められる。なお、図中の色分けに対応する数値はスペクトル累積値 (相対値) を示している。このような、入出力部付近のスペクトル強さの存在は、現在の SIBIE の欠点であり、今後改良の余地があると言わねばならない。

グラウト充填されていないシース管 C3 では、図-1 4 のように白丸で示したシース管位置の右側に明瞭な反射原が認められる。これより、SIBIE 解析が実在構想物のグラウト充填度評価に有効であることが確認できる。図-1 3 と比較して、スペクトル強さの相対値も明らかに大きく、強い反射源の存在は有意であると考えられる。

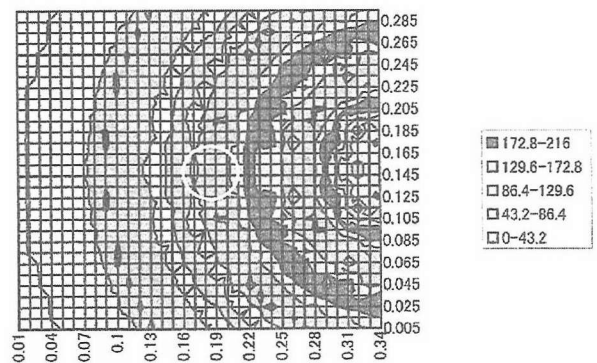


図-1 4 L1 断面シース管 C3 の解析結果

同じく空隙となっているシース管 C4 での解析結果を図-1 5 に示す。この場合には、シース管の白丸の位置には、反射が認められない。実際に反射の強い部分からは 2

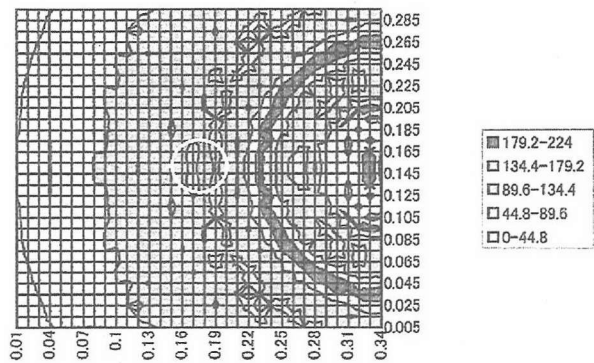


図-15 L1断面シース管C4の解析結果

cm程度はなれており、また、シース管位置に次の弱い反射源が認められる。これは、実際にシース管位置がずれているためか、あるいはウェブ下端部に近いために他の境界からの反射が混入したためと考えられる。

L2断面のシース管C1での解析結果を図-16に示す。図-12の場合と同様に、空隙シース管による反射源が白丸のシース管位置に明確に認められる。

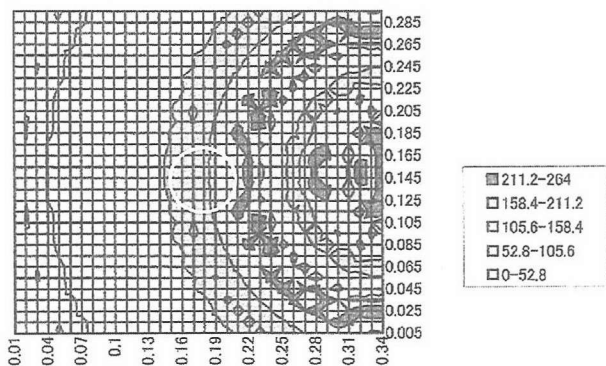


図-16 L2断面シース管C1の解析結果

グラウト充填されたシース管C2に対しては図-17のようになり、弱い反射源が白丸中に認められる。これは、シース管内部からの反射と考えられる。それでも明らかにシース管空隙のような強い反射源が存在していないことは確認できる。この結果は、さらに検討は必要であるが、シース管の端部か内部のPC鋼材による反射の可能性

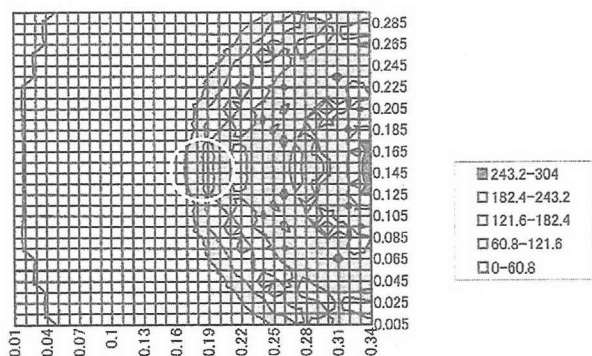


図-17 L2断面シース管C2の解析結果

が大きいことは特記できる。

このようなシース管内部の位置における弱い反射源の存在は、図-18のように断面L3のC4-C5断面でも認められる。これより、この2つのシース管は充填されていると見なしてよいと思われる。

L5断面のシース管C3は、グラウト未充填であったが、図-19のようにシース管位置より少しずれて強い反射源が認められた。これは、断面中央部で他の表面からの反射も考えられないことから、恐らくシース管位置が2cm程度ずれているためと考えられる。このようなシース管位置の内部での移動(ずれ)は、グラウト充填後には現在の非破壊検査法では判定の困難な問題であるが、そのような場合でもSIBIEによる同定が可能なことを示したと考えられる。ただし、強い反射源の存在のみが評価の対象であるため、他面からの反

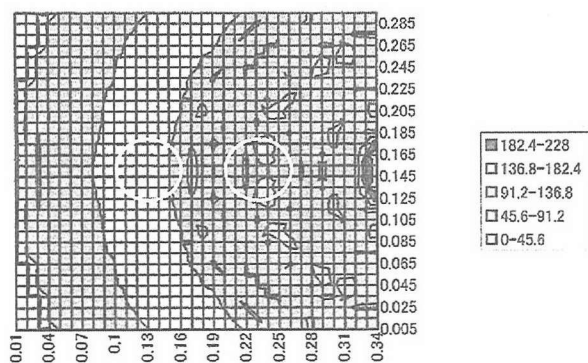


図-18 L3断面シース管C4-C5の解析結果

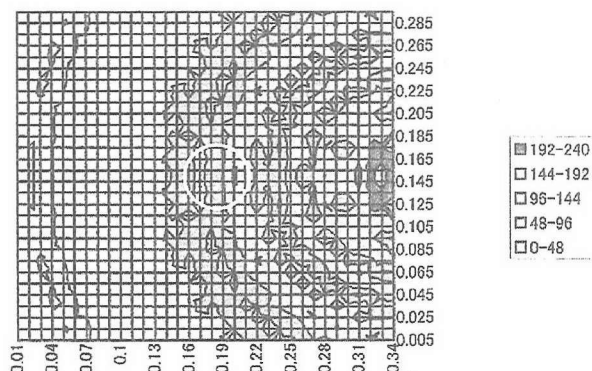


図-19 L5断面シース管C3の解析結果

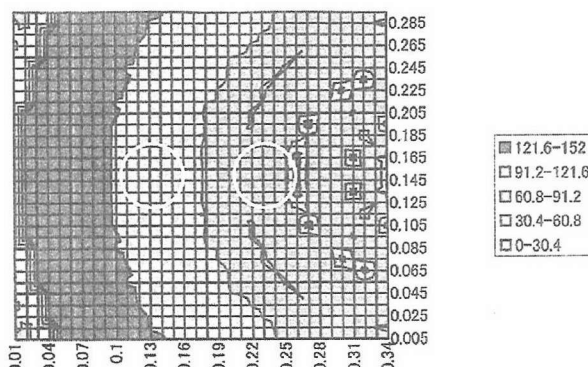


図-20 L6断面シース管C2-C3の解析結果

射波の無いことの確認は不可欠である。これには、SIBIE 画像のみでは不明確な事例については、現行のインパクトエコー法と同様に数値解析による考察の必要性があると考えられる。

L6断面に関しては、図-9のシース管位置C2-C3では、図のように2連のシース管の内の打撃側に未充填の空隙部が存在し、奥に充填部が存在する。その解析結果を図-20に示す。この逆の場合のL3断面では顕著な反射源はSIBIE 解析では認められなかった。それに対して、図-20では図中右の白丸の空隙側には明確な反射源が認められ、奥にはグラウト充填されたため顕著な反射源が無いことが分かる。これより、2連のシース管の場合でも、打撃に近い側に存在するグラウト未充填部は同定可能と考えられる。

以上の結果より、本手法の現場試験への適用性は、十分に確認されたと考えられる。

6. 結論

本研究は、インパクトエコー法に基づいたイメージング手法SIBIE の実在のPC梁でのグラウト充填度評価について現場試験により検討した結果を報告したものである。これより、以下のような成果が得られた。

- (1) 入力装置として携帯式衝撃入力装置を開発し、その実用性を確認した。径8mmのアルミ弾を飛翔体として用いることにより、加速度計システムと併せて60kHz程度の周波数帯域までに存在するピーク周波数の検出可能なシステムが開発できた。
- (2) 屋外に設置されている実寸法のPC梁でSIBIE法の有効性について検討した。その結果、イメージングのための断面の取り方、入出力部付近の欠陥とは異なるスペクトル強さの大きい領域の存在などの改良点については検討が残されたが、未充填シース管の特定可能なことが確認された。
- (3) 充填部については、全く反射源の存在と無関係なスペクトル強さの位置となる場合と、シース管端部あるいは内部のPC鋼材に相当すると見なされる反射源の存在が認められた。これは、SIBIE ソフトウェアの改良とともに、今後確認すべき点であると考えられる。
- (4) シース管が2連に配置されている断面でも、今回の解析断面での結果では、測定面に近い側に存在する未充填部については、検出可能なことが認められた。

謝辞

本研究の現場実験には、(社)建設機械化研究所に設置のPC梁を使用した。計測に際して種々のご配慮をいただ

いた関係各位に深く感謝する。実験の実施に当たっては、太平洋セメント(株)中央研究所の内田昌勝、辻伸幸の両氏に測定・データ収録にご協力を賜った。さらに、実験及び解析の多くの点について熊本大学の重石光弘助教授、友田祐一技官の両氏に多大なご協力をいただいた。それらの各位に対して、そのご厚意に深く感謝する。

参考文献

1. Sansalone, M. J. and Streete, W. B., : Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N. Y., 1997.
2. 渡辺 健：コンクリートの弾性波動理論と欠陥評価に関する研究, 熊本大学学位論文, 2001. 3
3. 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関するシンポジウム論文集, pp.23-28, 2001. 3
4. 渡辺 健, 大津政康：衝撃力の周波数成分がスペクトルイメージング SIBIE に及ぼす影響, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS6-030, 2001. 10