

SIBIE 法によるコンクリート中の欠陥検出の考察

大津 政康¹・野村 芳弘²

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)

In order to circumvent the difficulty on identifying peak frequencies in the conventional impact-echo 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. Then, the proposed procedure was applied to a real-scale model in a field. As a result, some problems are pointed out in the case that more than two ducts are to be identified. In a laboratory test, these cases are studied.

Key Words : Impact-echo, Nondestructive evaluation, Prestressed concrete, Grouted duct, Flaw

1. はじめに

インパクトエコー法¹⁾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、(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が問題²⁾とされた。さらに、(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が問題とされた。

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。昨年度までに PC グラウトの未充填部を持つ供試体で適用性を検討し^{3), 4)}、さらに多種多様なグラウト充填を行った実物大のモデル梁の屋外試験において、現場試験を実施しその有効性を検討した⁵⁾。

本年度は、さらに実用化を進めるために現場計測で問題点の指摘された複数のシーブ管が存在する断面での適用可能性について、境界要素法 (BEM) を用いた数値解析と実験により検討した結果について報告する。

2. 試験装置

昨年度に報告したコンプレッサの空気圧により弾を打撃させる可搬式装置⁵⁾を用いて、図-1 に示す形状のアルミ弾とチタン弾により打撃を与えた。ここで、実験では、直径 $D = 8 \text{ mm}$ と 10 mm の 2 種類のものを用意した。

この適用にあたっては、予め入力周波数帯を校正用コ

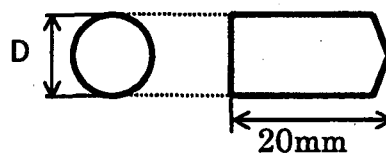


図-1 打撃用飛翔弾の形状

ンクリート板⁴⁾により検討した。その結果、最も平坦で広帯域な周波数応答特性を有した飛翔体として径 8 mm のチタン弾を打撃した場合の入力周波数スペクトルを図-2 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。これによれば、60 kHz 程度まで十分に周波数成分が含まれていることが確認で

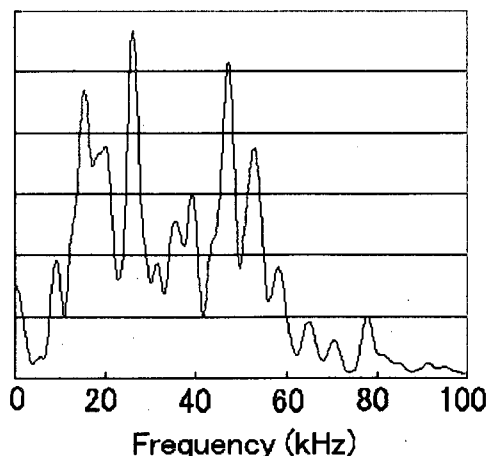


図-2 チタン弾 (直径 8 mm) の周波数応答

きる。この結果より径8mmのチタン弾を打撃し、帯域80 kHz までの加速度計システムにより計測を行うことにした。加速度計は直接にコンクリート表面に貼付し、各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た。サンプリング時間間隔は5μsecで2048 wordsのデジタルデータとして保存した。

3. 実験及び解析の概要

実験を行った供試体は、図-3に示す3連のシース管を有する無筋コンクリート供試体である。コンクリートの配合は、最大骨材寸法20mmの粗骨材を用いて、AE剤によりスランプ4cmで空気量6%に調整した。配合の詳細を表-1に、材齢28日での力学特性は表-2に示す。

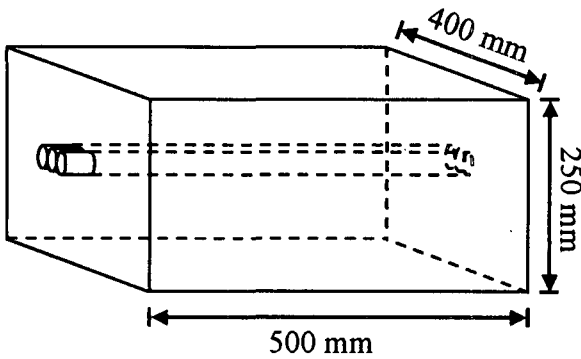


図-3 コンクリート供試体

これより、一般的なコンクリートの特性を有していることが認められる。実験では、図-3の供試体で上面と側面で5cm間隔に打撃点と加速度計を配置し、打撃入力による波形を検出した。

表-1 コンクリートの配合

G max (mm)	W/C (%)	単位量 (Kg/m ³)			
		W	C	S	G
20	50	172	344	830	1021

表-2 コンクリートの力学特性

引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比	P波速度 (m/sec)
3.16	39.1	27.3	0.21	4240

BEM解析では、図-3の供試体での実験断面を想定し表-2のP波速度とポアソン比を用いて2次元解析を行った。弾性波動問題の定常場の解析により、入力周波数に対する検出点での応答を計算することにより、検出点での周波数スペクトルを数値解析により再現した。ただし、図-

2に示す入力周波数の影響は、理想的な計測条件を想定するために考慮しなかった。

4. 画像処理手法 (SIBIE 解析)

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、実用的には、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²⁾。

これは、検出波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-4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-5のような反射強さに関する3次元分布が得られる。

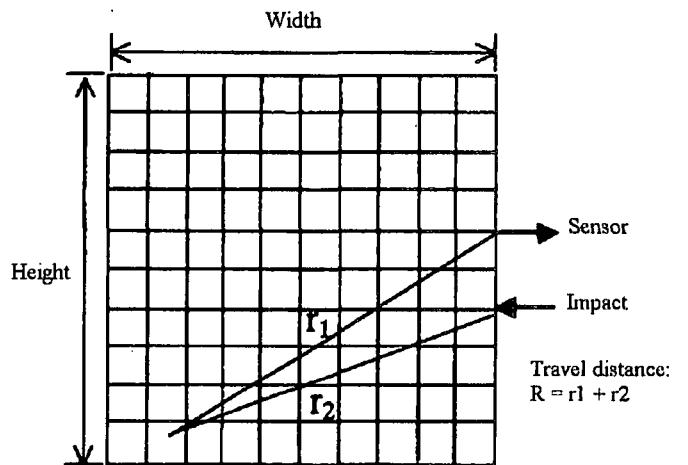


図-4 解析断面の分割図

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、対象外の反射源も画像には描かれることになる。

したがって、断面及び反射源の形状が複雑で反射波が

多い場合や、今回の実験のような多連のシース管に対して分析を行う場合などでは、適用性の確認が必要と考えられる。

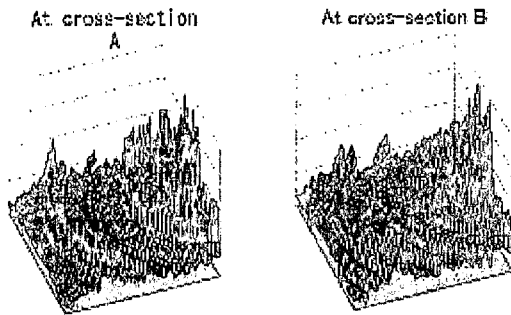


図-5 SIBIE 解析の3次元表示結果

5. 結果及び考察

(1) 3連シース管上方からの打撃の場合

図-3の上面での打撃に対するBEM解析結果から得られたスペクトル図を用いてSIBIE解析を実施した結果を図-6に示す。なお、図では下側から入力及び波形検出を行ったことになっている。これより、3連のシース管の端部に反射源が強く得られることがわかる。また、管での反射の影響としては、3連管の外側に反射の影響としての影響が認められる。

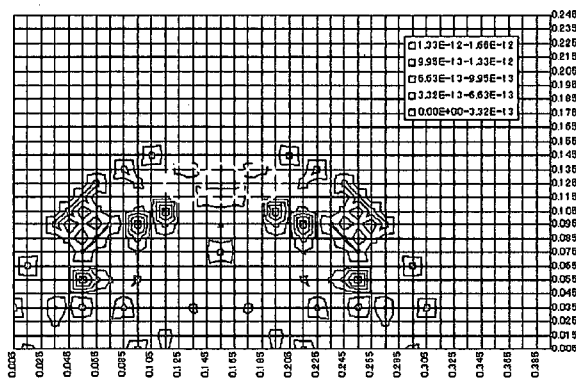


図-6 3連シース管上方(下方)からの打撃のBEM解析のSIBIE結果

同じ条件で実験を行い、SIBIE解析を実施した結果を図-7に示す。白丸で示した3連シース管の位置に顕著な反射源が認められる。ただし、3連の位置に対して同心円状に反射強さの大きい様子が認められ、さらに外側に供試体端部からと見られる反射の領域がやはり同心円に認められる。この結果は、多少は判断に苦しむ可能性はあるが、3連のシース管に対して上方からの打撃に対してSIBIE解析を行えば、未充填のシース管を明示することは可能であることを示している。また、BEM解析で可能

と判断された場合には、実験でも特に問題なく同定されることが確認された。今後は、これらのシース管のいずれかが充填されている場合を検討の予定である。

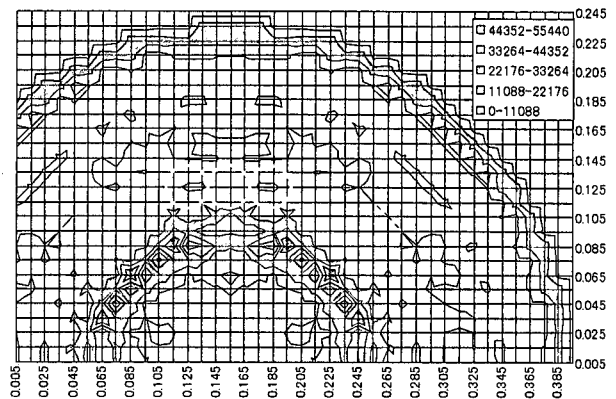
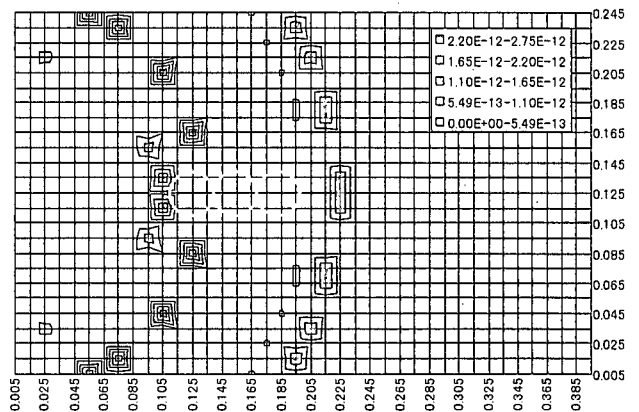


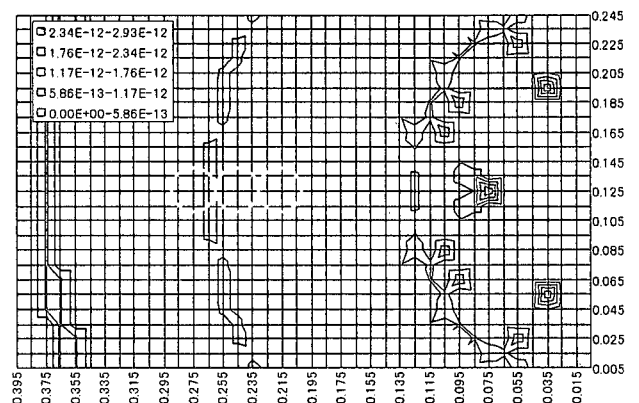
図-7 3連シース管のSIBIE解析結果(実験)

(2) 3連シース管の側方からの打撃の場合

3連シース管の側方からの打撃に対するBEM解析結果をSIBIE処理した断面図を図-8に示す。



(a) 左側からの打撃結果



(b) 右側からの打撃結果

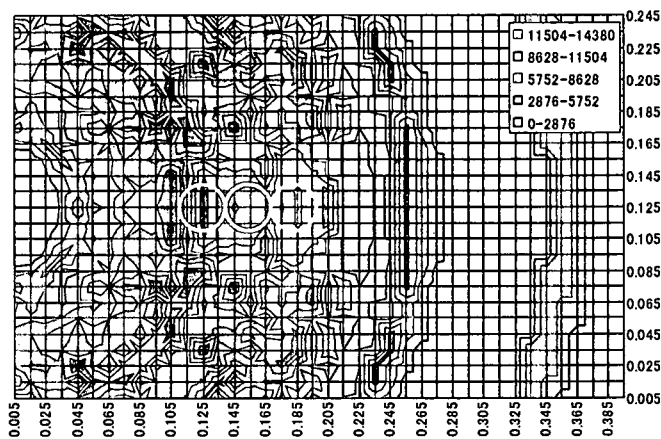
図-8 3連シース管側方からのSIBIE結果(解析)

左側からの打撃の場合には、深さ 10 cm の最も近いシーす管の部分に反射源が認められ、同定可能なことがわかる。しかし、右側からの打撃に対しては、深さ 20 cm の位置のシーす管は供試体の幅 25 cm と同じ程度の位置にある境界からの反射波のためか全く同定できていない。これは、BEM 解析結果に対する結果であるので、実験ではさらなる困難が予測される結果となった。

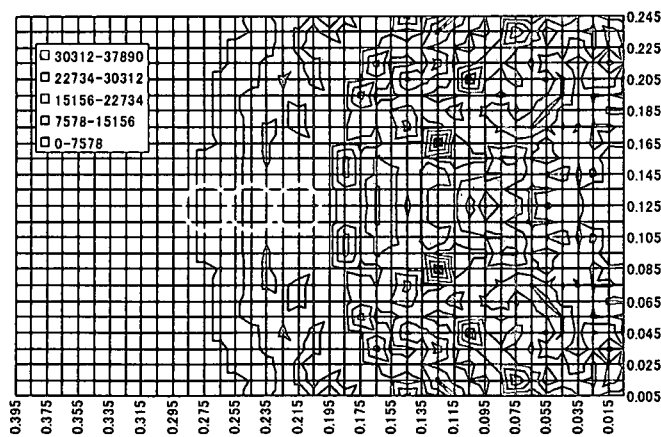
関係とか、欠陥の規模と深さの関係などについて、さらに基礎的な検討が残された。

(3) SIBIE 解析領域に関する考察

これまでに SIBIE の分析能力に関しては、それ程多くの検討がなされてきた訳ではない。そのために、分析可能な欠陥の深さ、形状、大きさ、それらと部材の大きさ及び形状との関係が解明されていない。これらは、今後、本研究のような解析と実験を組み合わせることで基礎的な考察を進める必要があると考えられる。そこで、SIBIE 解析を実施する断面の取り方について考察することにした。これは、図-3 のような実験供試体に比して、現場での部材は一般に大きく全断面を解析することは容易ではない⁵⁾。このため、欠陥を含むある程度の領域を対象とせざるを得ないが、その規模について知見が得られている訳ではない。それには、打撃点と加速度計の設置位置の関係も考慮すべきである。そこで、本実験に用いた入出力点間隔 5 cm を変えること無しに、SIBIE 解析断面の変更で、どの程度、同定が用意となるかについて検討した。



(a) 左側からの打撃結果



(b) 右側からの打撃結果

図-9 3連シーす管側方からの SIBIE 結果 (実験)

図-8 の BEM 解析に対応する実験結果を図-9 に示す。解析では、ある程度の同定が可能であった左側からの打撃に対して反射源は各所に求められ、同定は容易ではない。右側からの打撃では一見すると反射源のような影が見られるが、シーす管からは離れた位置にあり、同定できなかったとは言えないと考えられる。

このように、シーす管が打撃位置から奥の方向に配列している場合には、SIBIE の適用は実際には容易ではないことが明らかになった。また、シーす管の位置が深く他の境界からの反射経路と同程度の距離となる場合には、同定がかなり困難となることも認められた。したがって、測定条件に関して、欠陥や空隙の深さと測定箇所的位置

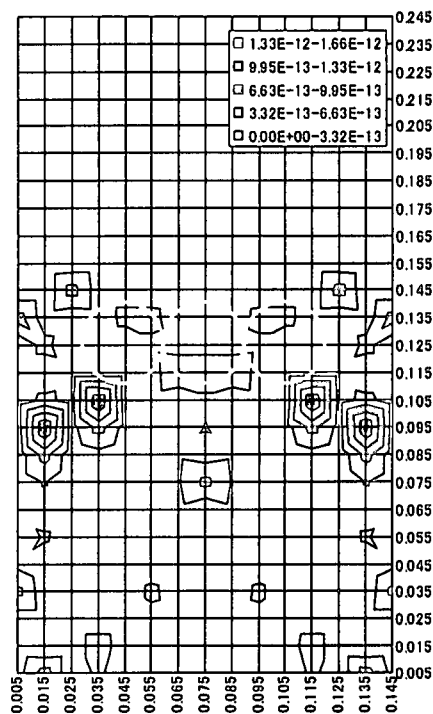


図-10 SIBIE 分析領域の変更 (図-6)

入出力点距離が 5 cm であることより、水平方向の範囲を 3 倍の 15 cm とし、供試体の最小寸法が 25 cm であることから垂直方向の範囲を 25 cm とし変更した断面での図-6 に対応する SIBIE 結果を図-10 に示す。反射源はシーす端部のみに限られ、同定が容易になっていることが認められる。そこで、同じことを実験結果に行った結果を図-11 に示す。図-10 の解析結果に対して確認

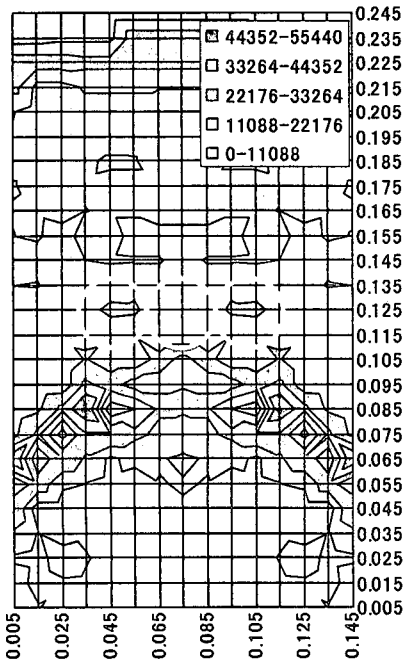
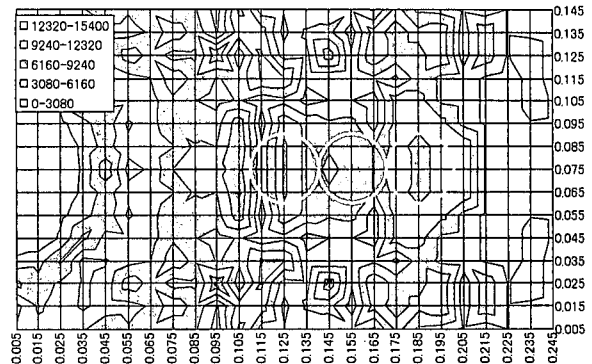


図-11 SIBIE 分析領域の変更 (図-7)

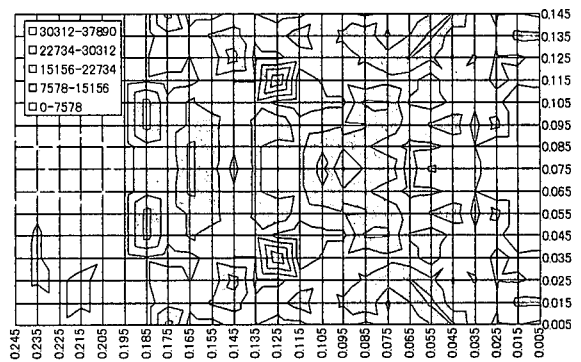
できたと同じく、同定が容易になっていることがわかる。そこで、同定が容易ではなかった側方からの打撃についても SIBIE 分析領域の変更を試みた。

図-8の BEM 解析結果での例を図-12に示す。図-8では同定に問題があった左側からの打撃結果は非常に改善されている。しかし、難しかった左側からの打撃では領域の変更が同定の改良にはつながらなかった。

次に、図-9の実験結果についても同様な領域変更を実施した。その結果を図-13に示す。



(a) 左側からの打撃結果



(b) 右側からの打撃結果

図-13 SIBIE 分析領域の変更(図-9)

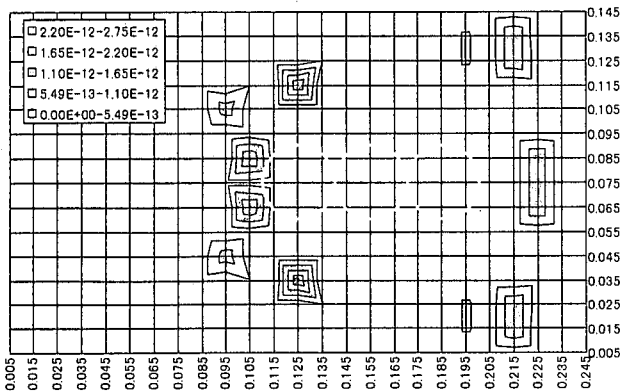
この結果によれば、左側からの打撃に関しては、同定結果の改良はなされていることが認められる。しかし、右側からの打撃については、やはりよい結果とは言えないようである。

これらの結果より明らかになったことは、SIBIE の分析には、深さにある程度制約があること、BEM 解析で他面からの反射の影響が強くないことが確認できた断面では、かなりの同定能力が期待できることである。

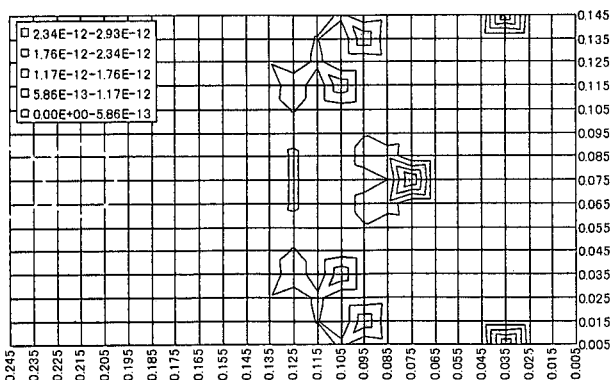
6. 結論

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 の分析能力について、実験供試体と BEM 解析により検討した結果を報告した。これより、以下のよう成果が得られた。

- (1) 入力装置として携帯式衝撃入力装置を開発し、



(a) 左側からの打撃結果



(b) 右側からの打撃結果

図-12 SIBIE 分析領域の変更 (図-8)

径 8 mm のアルミ弾の代わりにチタン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 60 kHz 程度の周波数帯域まで、ほぼ平坦な応答特性を有するシステムを開発した。

- (2) 3連シース管を有する実験供試体でSIBIE法の分析能について検討した。BEM解析では、深さ 20 cm の場合を除けば、有意な同定が期待できることが明らかになった。
- (3) その結果に基づいて実験を実施し、3連シースの上方からの打撃では、かなりの精度で同定可能なことが示された。しかし、3連シースの側方からの打撃では、実験では精度よく同定することは困難な結果となった。
- (4) そこで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、分析断面の変更を検討し、欠陥が深い場合を除けば、同定能力の改善が認められた。

今後は、ここで検討したような多連のシース管のうちに未充填と充填が混在する場合について検討を行う予定である。また、欠陥としての深さ、大きさ、形状などの影響についても検討が残された。

参考文献

- 1) Sansalone, M. J. and Streete, W. B., : Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N. Y., 1997.
- 2) 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
- 5) 大津政康，小坂浩二，神内隆行：SIBIE 法を用いた PC グラウトの現場試験，第 3 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. 17-22, 2002. 2