

論文 SIBIE 法及び電磁波レーダ法による橋脚損傷検出方法に関する研究

松山 公年\*1・下菌 晋一郎\*2・大津 政康\*3

**要旨**：インパクトエコー（衝撃弾性波）法に基づいてコンクリート内部欠陥の位置を断面部の画像化により検出する SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitude Based on Impact Echo)法 を開発中である。この手法を実橋脚での表面ひび割れ深さ評価及び PC プレキャストパネルの内部剥離探査に適用した。また、電磁波レーダ法による PC プレキャストパネルの内部剥離探査も実施した。今回の実験により、断面画像としてひび割れ深さと内部の剥離箇所を検出する SIBIE 法の有効性が明らかにでき、レーダ法の適用性も示された。

**キーワード**：SIBIE 法、衝撃弾性波、電磁波レーダ法、ひび割れ深さ、内部剥離探査

1. はじめに

近年、我国の多くの社会資本において、補修・補強対策、更新などの保全工費が増加する傾向にあり、点検業務の必要性が指摘されている。これまで比較的維持管理に関わる費用が低いと考えられてきた鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 構造物も例外ではなく、維持管理のための点検及び調査が実施されるようになってきている。このため、例えば、グラウト未充填の検出に対して、非破壊検査手法の中で弾性波法の適用が検討されており<sup>1), 2)</sup>、弾性波の伝播速度変化や反射波の検出に注目しているが、未だに実務性に乏しく、実用に耐える検出法は確立できていないと考えられる。

著者らは、弾性波法の一つである衝撃弾性波（インパクトエコー）法<sup>3)</sup> において得られる周波数スペクトルから、弾性波の反射・回折の影響を画像化し欠陥部を評価する SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)法 を開発中である。そして、本手法が断面画像としてグラウト未充填部の検出に適用可能であることを報告済みである<sup>4)</sup>。

本研究では、この手法を実橋脚での表面ひび割れ深さ評価及び PC プレキャストパネルの内部剥離探査に適用した結果を報告したものである。また、SIBIE 法と合わせて電磁波レーダ法の PC プレキャストパネルの内部剥離探査も行ったので、この適用性についても報告する。

2. SIBIE 法の原理と改良点

2.1 Impact Echo 法の原理と検討事項

(1) Impact Echo 法の原理

インパクトエコー(Impact Echo)法は、衝撃力入力により発生させた弾性波の欠陥部における反射・回折を利用し、スペクトル成分のピーク（共振）周波数から欠陥位

置を決定する検査法である。例えば、空隙部（未充填グラウト部など）の検出の場合には、供試体底部の反射による共振周波数 $f_T$ 及び空隙部からの反射による共振周波数 $f_{void}$ が、検出波形のスペクトルピークとして、図-1 のように出現するとされている。

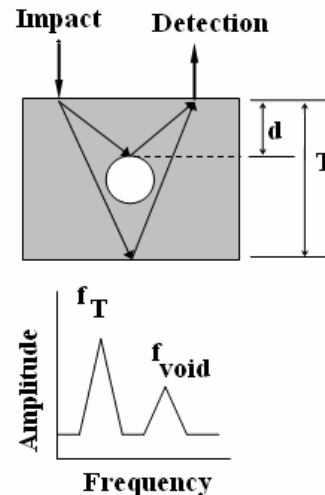


図-1 インパクトエコー法の原理

それらの周波数は、コンクリートの P 波伝播速度  $C_p$ 、板厚を  $T$ 、シーす管までの距離を  $d$  として、次式のように表される。

$$f_T = C \frac{C_p}{2T} \tag{1}$$

$$f_{void} = C \frac{C_p}{2d} \tag{2}$$

ここで、係数  $C$  は Shape Factor と名付けられた定数で、一般の床版や直方体供試体では 0.96 とされている。

\*1 日本工営（株） インフラマネジメント部 工修（正会員）

\*2 日本工営（株） インフラマネジメント部 工修

\*3 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授（正会員）

## (2) Impact Echo 法の検討事項

Impact Echo 法について問題点を考察すれば、次のような点が挙げられる。

上式により厚さ  $T$  や深さ  $d$  を評価するには伝播速度  $C_p$  を正確に求める必要がある。しかし、測定装置の感度やコンクリート強度分布の不均一性を考えれば、速度値に多少のバラツキが必ず存在する。これは Impact Echo 法の開発初期にはかなりな問題であったようで、一般の超音波機器でなく測定箇所を使用する付随の測定装置が市販されるに至っている。しかし、未充填グラウトの場合には、その有無と位置が重大で深さのわずかな差異は実務ではあまり問題とはならない場合が多い。

式(1), (2)は波動の伝播経路を1次元的に考慮したもので、Impact Echo 法を説明したテキスト類ではこれを強調するために図-2 のように多重反射の様子などを描いていることが多い。しかし、衝撃力に伴う波動伝播はそう簡単ではなく<sup>5)</sup>、断面での形状共振や内部欠陥による反射・回折などの全ての影響がスペクトル成分には含まれる。

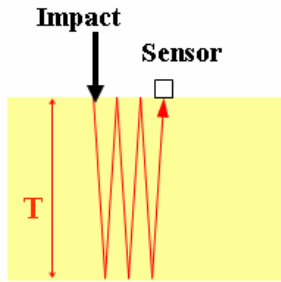


図-2 多重反射の概念図

このような知見は、境界要素法(BEM)による検出スペクトルの再現結果<sup>6)</sup>で確認され、図-2の下面からの反射波のみならず多くの共振・反射によるスペクトルピークの出現が明らかになっている。したがって、1次元的な多重反射のみを考慮し、その結果、断面形状に応じた各種の Shape Factor を提示している<sup>3)</sup>のは、合理的な手法とは考えにくい。

また、衝撃力の入力に関しては、上限周波数を与えて、それに対応する寸法の鋼球の使用が提案されている。しかし、上限周波数を高くするには、鋼球の径を小さくせざるを得ず、高周波数成分を含んだ十分な衝撃エネルギーを加えることが困難となる。式(1), (2)に検出されるピーク周波数を適用するには、それらの周波数成分が入力に含まれていることが要求される。

SIBIE 法を開発・検討している理由は、図-1のように単純なスペクトル形状が得られる場合は非常に少なく、多くのピーク周波数が観察されることに対して対応できる点である。

## 2.2 SIBIE の原理とこれまでの改良点

### (1) SIBIE 法の原理

コンクリート内部欠陥の存在による弾性波動の形状共振には様々な知見が得られており、剥離などに伴う欠陥上部に形成される板振動を除けば、波動の周波数成分には伝播時間を周期とする成分が卓越すると知られている。したがって、スペクトル成分には欠陥部や反射源を経て伝播する弾性波動の伝播時間(周期)の逆数(周波数)が卓越して出現する。そこで、図-3に示すような伝播経路を対象とし、検出波形の周波数スペクトルを用いて供試体断面を画像化する SIBIE 法を開発した<sup>4)</sup>。

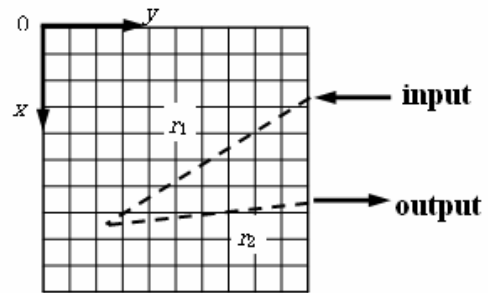


図-3 SIBIEにおける解析断面(伝播経路)

手順としては、解析対象の断面を正方形要素に分割しモデル化し、分割された各要素の中心からの弾性波の伝播距離から共振周波数を求める。その場合に、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が、その最短伝播経路を  $R$  とすると式(3)のように表される。

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

したがって、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、図を参照して、

$$f_R = C_p / R, \quad f_{r_2} = C_p / r_2 \quad (4)$$

となる。式(4)により各要素位置での理論的な反射・伝播による共振周波数を求め、実測された周波数スペクトルでその周波数( $f_R, f_{r_2}$ )に対応するスペクトル振幅値を合計し、その値を各要素での反射強さとして算定する。

ここで解析対象とする上限周波数は、加速度計の応答周波数と供試体形状を考慮して決定している。下限周波数は、断面上での評価であることから、式(1)で決定される板厚  $T$  による共振周波数 ( $f_T$ ) とする。なお、正方形要素の大きさ  $\Delta x$  は、計測時のサンプリングタイム  $\Delta t$  による最短経路

$$\Delta x = C_p \Delta t / 2 \quad (5)$$

を考慮し、図-3解析断面に近い整数値(cm)とする。今回の解析では  $\Delta x = 1 \text{ cm}$  とした。

## (2) SIBIE 法の改良点

下限周波数は式(1)と後述のコンクリート中のP波伝播速度を考慮して本実験での解析断面の深さ(15cm)に対する共振周波数(12 kHz程度)を採用した。上限周波数は、ほぼ加速度計の上限に相当する40 kHzに設定した。

SIBIE 法を提案した既報<sup>4)</sup>では未充填グラウトの検出に際して空隙を挟む1点で衝撃力を与え、もう1点で波動検出を行う図-1のような配置としていた。この場合に図-3のようなモデルを解析すれば、結果は必ず左右対称なイメージ図となり、かつ空隙での反射もそれほど大きくはならない可能性があると考えられた。そこで、空隙の直上を打撃し、その両側に設置した加速度計から検出される2点での波形スペクトルのSIBIE解析結果を重ね合わせる方法に改良した<sup>7)</sup>。なお、表面ひび割れ深さの検査は、従来の1点入力-1点受信の方法を採用した。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験手順と使用機器

衝撃力の入力には、鋼球より大きな衝撃力を与えられ、再現性も問題ない方法として開発した図-4のアルミ飛翔体を写真-1のような可搬式コンプレッサからの空気圧(約0.05MPa)により打撃する方法<sup>4)</sup>を用いた。

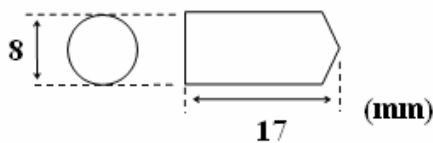


図-4 アルミ製飛翔体



写真-1 入力用コンプレッサと発射装置

試験では、打撃点の上部からアルミ飛翔体により衝撃を入力し、そこから離れた左右の2箇所に加速度計を固定し、波形を検出した。取り付けた加速度計の計測位置は、打撃点の左右各5cmとした。また、ひび割れ部では、ひび割れを挟んで5cm離れた点を打撃し、反対側に5cm離れた点に加速度計を設置して波動を検出した。

波形記録には写真-2のメモリスコープを用い、サンプリングタイムを4 μsecとし、1波形のサンプリング個数を2048とした。メモリスコープで記憶した波形データは、PCに取り込み、上述のSIBIE解析を行った。

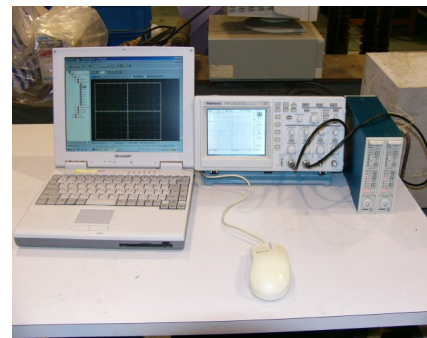


写真-2 波形検出・解析装置

### 3.2 測定概要

#### (1)測定対象

対象は、耐震補強のPCプレキャストパネルが施工された橋脚A(図-5)、橋脚B(図-6)である。柱部にPCケーブル及び鉄筋がそれぞれ15cmピッチで配置されている。測定前に近接目視・打音調査で、ひび割れ・浮きの有無を把握し、鉄筋探査機で鋼材位置を把握した(図中実線が鉄筋、破線がPCケーブル)。

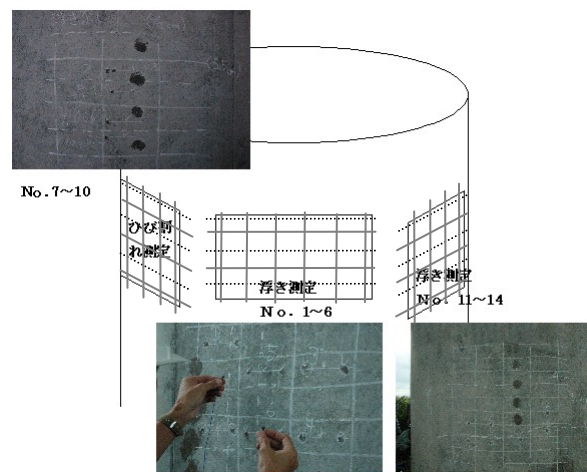


図-5 橋脚Aの測定箇所の概要

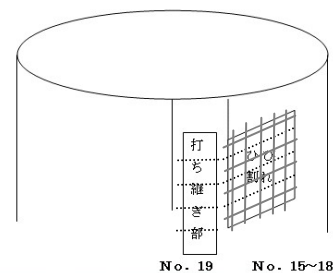


図-6 橋脚Bの測定箇所の概要

## (2) 測定方法

加速度計は躯体表面にグリースで固定し、実験を行った。図中に測定を行った箇所とその番号、測定箇所の写真を示している。図中の黒い点は伝播速度測定のためにセンサをグリースで固定した跡である。

ひび割れを挟んだ各5cmの位置に衝撃入力位置と加速度計による検出部を設けた。測定中に検出波形を目視で確認することにより、雑音と認識された波形データは除去し、各測定点で5個の波形データを収録し、周波数分析に続いてSIBIE解析を実施した。

## (3) 弾性波測定結果

SIBIE解析に必要なコンクリートの物性値はP波の伝播速度のみである。そこで予め弾性波速度測定装置を用いて表面法で、図-6のように1点から入力し、3箇所まで伝播時間を10回測定し、その距離と時間の平均勾配からP波の伝播速度を求めた。その結果を表-1に示す。P波伝播速度は3200~3900m/sの範囲で分布している。

表-1 P波伝播速度

測定箇所	P波伝播速度
No.1~No.6	3405 m/s
No.7~No.10	3396 m/s
No.11~No.14	3181 m/s
No.15~No.19	3918 m/s

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 SIBIE 解析結果

#### (1) 内部剥離部における解析結果

各測定点で5回の打撃と波形収録を行い、ほぼ同程度の結果であったため、各測定箇所を代表的な結果を示す。

A橋脚剥離部（測定点1）のSIBIE解析結果を図-7に示す。打音調査で剥離部と見られる深さ10cmあたりから下方2cmにわたって反射の強い箇所が認められ、これが剥離の幅ではないかと考えられる。なお、これらの図では剥離がプレキャストパネル（厚さ10cm）と橋脚部コンクリートの間には存在すると仮定し、それに相当するスリットを図中に示している。

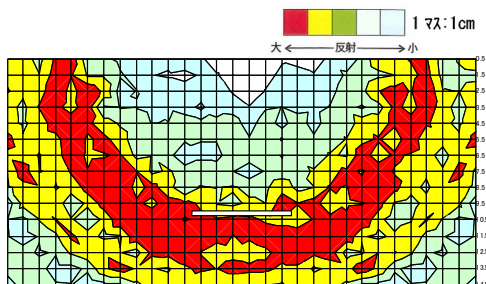


図-7 測定点1（剥離箇所）の解析結果

また、剥離あるいは浮きの境界部と思われる箇所で測定し解析を行ったが、弱い反射のみが認められ、境界部では剥離が広がっていないと推定された（図-8）。

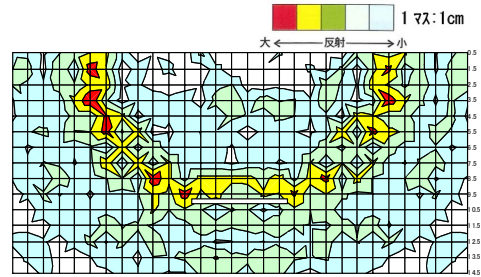


図-8 測定点2（剥離境界部）の解析結果

#### (2) ひび割れ部における解析結果

近接目視でひび割れが認められた箇所でも測定・解析を行った結果を示す。解析結果は各測定点において、ほぼ同様な傾向であったため代表的な結果を示す。

測定点7の解析結果を図-9に示す。この場合にはひび割れ先端と評価される反射強度の強い点までひび割れの想定線を記入している。測定点7のひび割れ幅は0.3mmであった。解析結果より、ひび割れ先端付近において、剥離部からの反射が生じていると推定された。

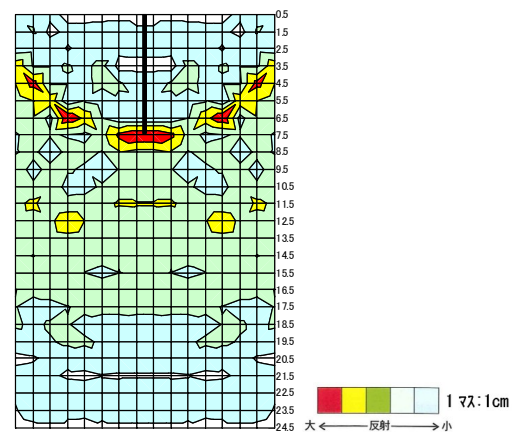


図-9 測定点7（ひび割れ幅0.3mm）の解析結果

測定点17での解析結果を図-10に示す。測定点17のひび割れ幅は0.1mmと狭いものであったが、10cm近くの深さがあり、かつ、剥離がその下にあると推定される。

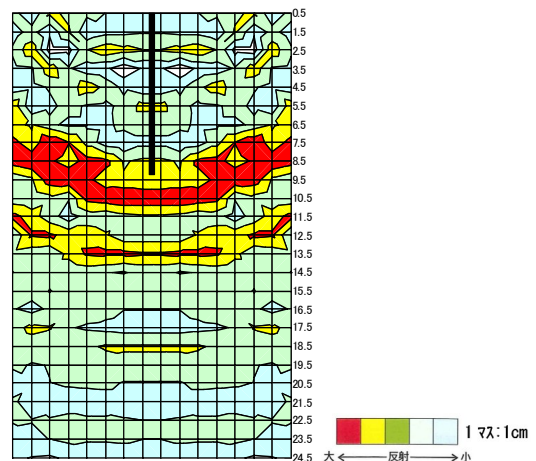


図-10 測定点17（ひび割れ幅0.1mm）の解析結果



(2) SIBIE 解析結果の考察

プレキャストパネルと母材コンクリートの境界に認められた剥離による浮きとひび割れについて、SIBIE法による解析を行った。これより、剥離部が鉄筋かぶり、鉄筋の存在、PCケーブルに関係なく浮きとして検出できた。一方、ひび割れについては、深さの違いとその奥の剥離の有無を検出できる可能性があると考えられた。

4.2 電磁波レーダ法測定解析結果

(1) 電磁波レーダ法の位置づけ

SIBIE 法を実施した橋脚に対し、電磁波レーダ法によるプレキャストパネルと母材コンクリートの境界の剥離による浮きの有無を検知可能か検討した。

(2) 使用機材

写真-3 に示す計測システムを使用した<sup>9)10)</sup>。本システムはアンテナの発信周波数を 400~1500MHz まで選択可能で、本実験では剥離深さが約 10cm と想定されることから 1500MHz のアンテナを使用した。



写真-3 電磁波レーダ計測システム

(3) 測定結果

レーダ測定結果例を図-11 に示す。図は基準波形を確認するために気中に向けて測定した結果である。2.7ns に見られる第 1 ピークが直接波であることから、この時間をコンクリート表面とした。

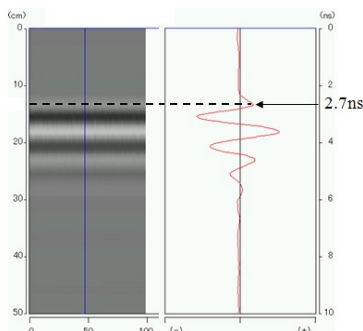


図-11 基準波形（コンクリート表面波）の測定

A 橋脚の剥離（浮き）が有る箇所と無い箇所測定した結果を図-12 に示す。図中上段に浮きが認められる箇所の波形を示す。図中下段に浮きが認められない箇所の波形を示す。両者の比較からパネル境界以深の反射波形において、浮き無しの波形が、浮き有りのものと比べて振幅が減少していることが分かる。

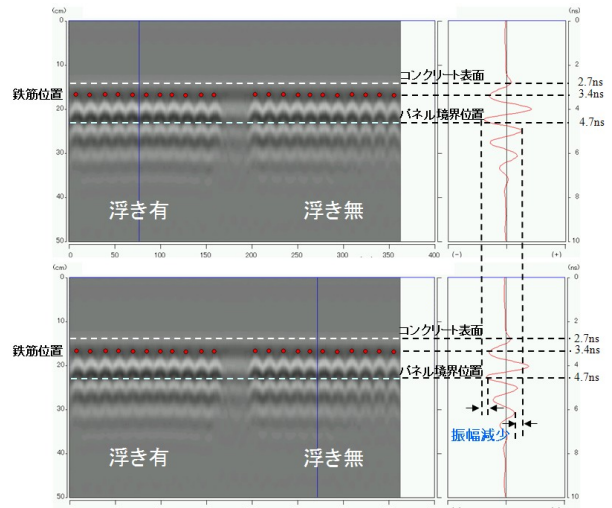


図-12 反射波形の比較（青線は波形の位置を示す）

(4) 解析結果

パネル以深のレーダ反射波形の振幅が変化していることから、図-13 に示すように反射波形の各ピークの振幅と時間幅に着目して、その変化を整理した。反射波形のパラメータ A1,A2,A3 及び Z1,Z2,Z3 を図中に示す。

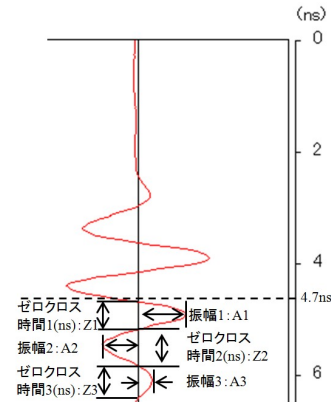


図-13 反射波形のパラメータ化

図-14 に反射波形の振幅値の変化を示す。いずれも浮き無しの振幅値が浮き有りの振幅値よりも 26~39%減少している。これは、浮きが無い場合、コンクリート中に発信した電磁波の一部がパネルの境界で反射せず、奥に透過しており、浮きがある場合には、パネル境界部の剥離部でほとんどの反射波が返ってくるため、振幅値が比較的大きくなったと考えられる。

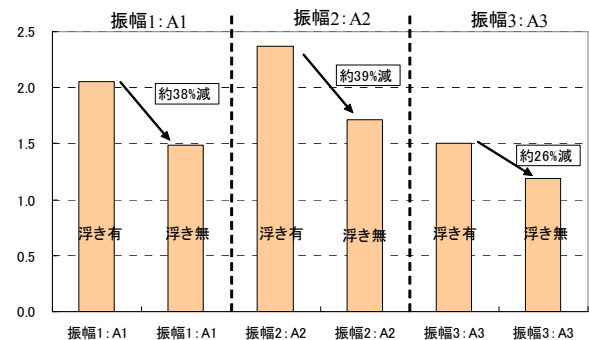


図-14 反射波形の振幅値の変化

一方、反射波形のピークの時間幅（ゼロクロス時間）に着目して、浮きの有無に関わる変化を整理したものを図-15に示す。いずれのパラメータにおいても、浮きの有無で明瞭な変化が見られなかった。このことは、パネル境界の剥離による浮きの有無の変化は、電磁波の伝播時間に影響を与えないことを示している。

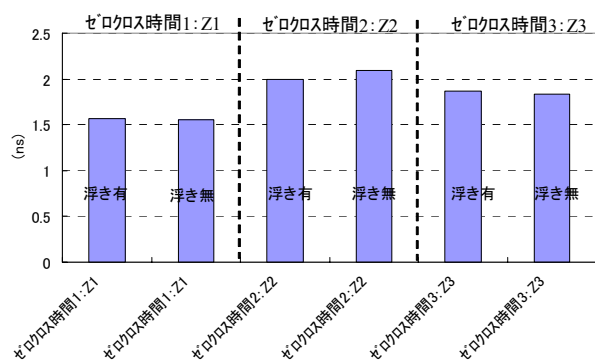


図-15 反射波形の時間幅の変化

#### (5) レーダ計測結果の考察

プレキャストパネルと母材コンクリートの境界に認められた剥離による浮きによる、レーダ波形の変化について検討した。これにより、レーダ反射波形のピークの振幅値が浮きの有無により変化し、ピークの時間幅は変化しないことが明らかになった。通常、トンネルの覆工コンクリートの厚さや背後の空洞を把握するためにレーダを使って調査する場合、反射波形の時間と振幅の両方に変化が現れるのが一般的であるが、本実験対象としたパネル及び境界の浮きが薄いことから、レーダ反射波形の時間変化に影響を及ぼさなかったことが理由と考えられる。

#### 5. まとめ

橋脚のプレキャストパネルに生じたひび割れや剥離による浮きに対して、衝撃弾性波による SIBIE 法と電磁波レーダ法による適用性を検討した。以下に本実験により得られた知見を示す。

- (1) SIBIE 法の測定方法で、打撃点の両側に設置した加速度計から検出される2点での波形スペクトルの SIBIE 解析結果を重ね合わせる方法に改良した。
- (2) SIBIE 法により、パネル境界の剥離による浮きの有無、幅の違いを検出することが可能である。
- (3) SIBIE 法により、パネルに生じたひび割れの深さ及びひび割れ先端の浮きの有無についても検知できる可能性がある。
- (4) 電磁波レーダ法により、パネル境界の剥離による浮きの有無については、反射波形の振幅の変化に着目することで検知することが可能である。

今後、SIBIE 法及び電磁波レーダ法の実構造物への適用事例を蓄積することにより、さらに実務的な非破壊検査手法の適用性を検討したい。

#### 謝辞

本実験を実施するにあたり八代河川国道事務所から現場を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 境 友昭: 弾性波を用いたコンクリート構造物の健全性試験方法について、第 126 回破壊力学部門委員会講演会資料、日本材料学会、pp. 9-15, 2008.
- 2) 山口岳思, 鎌田敏郎, 寺田孝, 六郷恵哲: 超音波によるコンクリートひび割れ注入材の充填確認方法、コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1681-1686, 2005
- 3) Sansalone, M. J. and Streett, W. B. : Impact-Echo, Ithaca, NY Bullbrier Press, 1997.
- 4) Ohtsu, M. and Watanabe, T : Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact-Echo for Flwa Detection, *NDT&E International*, No. 35, pp. 189-196, 2002.
- 5) 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集、土木学会、コンクリート技術シリーズ 73, 2004.
- 6) Ata, N., Mihara, S, Ohtsu, M. : BEM Analysis on Dynamic Behavior of Concrete Member due to Impact, 土木学会論文集 V 部門, No. 68, pp. 157-163, 2005.
- 7) Ata, N., Mihara, S. and Ohtsu, M.: Imaging of UngROUTED Tendon Ducts in Prestressed Concrete by Improved SIBIE, *NDT&E International*, Vol. 40, No. 3, pp. 258-264, 2007.
- 8) Alver, N and Ohtsu, M.: BEM Analysis of Dynamic Behavior of Concrete in Impact-Echo Test, *Construction and Building Materials*, No. 21, pp. 519-526, 2007
- 9) レーダ法によるコンクリート舗装版下空洞探査技術に関する研究、土木学会、第 54 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.406-407, 1999.
- 10) Radar Technique for Detecting Voids under Concrete Pavement, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000 (NDT-CE2000), pp. 559-566, 2000.