

## 非接触弾性波計測を用いた SIBIE 法によるコンクリート内部の三次元可視化

京都大学 正会員 ○橋本 勝文 塩谷 智基

西日本高速道路株式会社 正会員 和田 圭仙

西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 正会員 河田 直樹 上田 憲寿

## 1. 背景

コンクリート構造物の適切な維持管理を目的とした点検技術に関して、非破壊検査手法および試験方法の簡素化ならびに効率化と、健全性評価手法としての高い妥当性が求められており、様々な研究開発がなされているところである。インパクトエコー法<sup>1)</sup>は、コンクリート内部の損傷あるいは欠陥を検出可能な非破壊検査手法として広く適用されている。同手法においては、対象とするコンクリート表面において鋼球打撃等により発生する弾性波を入力し、コンクリート内部や境界面での反射により生じる共振周波数に着目することでひび割れや空隙等の内部の情報を検出できる手法であるとされている。また、上記の手法に基づいて、コンクリート内部を可視化することを目的として、加速度センサあるいは AE センサにより観測される弾性波のスペクトルのピーク周波数とひび割れや空隙などの損傷からの伝搬時間に基づいた、スペクトル振幅のスタックイメージングによる後述の SIBIE 法<sup>2)</sup>が提案されている。本研究では、レーザードップラー振動計（以下、LDV）を用いて弾性波を非接触検出し、コンクリート表面を鋼球ハンマによる複数箇所の打撃を行うことで励起した弾性波の受信信号から、SIBIE 法に基づくコンクリート内部の三次元可視化手法を適用した。

## 2. SIBIE 法の原理と三次元可視化

上述したインパクトエコー法においては、入力した弾性波の受信信号を FFT 処理により周波数スペクトルを求めることにより、部材厚に依存した反射による共振周波数、内部の損傷による共振周波数が観測できる。すなわち、コンクリート中を伝搬する弾性波（P 波）の速度から、検出されるピーク周波数が表される<sup>1), 2)</sup>。

従来の SIBIE 法においては、解析対象となる二次元断面を正方形要素に分割することでイメージング処理を行うとされるが、本研究では、三次元空間内の各要素（ボクセル）を構成する格子点での任意の空間位置座標における弾性波の伝播および反射による共振周波数のスペクトルを用いることで、解析対象を三次元空間とした。なお、上述の通り、弾性波の検出には LDV を用いることで非接触計測による SIBIE 法の適用可能性について検討した。すなわち、非接触弾性波計測を用いた SIBIE 法によるコンクリート内部の三次元可視化手順は以下の通りである。計測手順および数値解析の概念図を図-1 に示す。

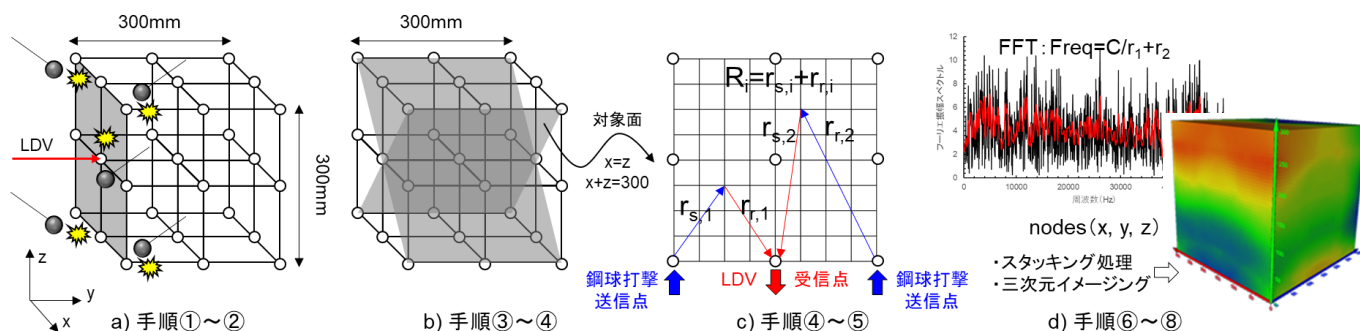


図-1 コンクリート内部の三次元可視化を目的とした SIBIE 法の計測および解析手順

- ① 対象コンクリート表面において LDV の計測ターゲットとする点を中心に 300mm×300mm 四方を鋼球打撃する。
- ② 300mm×300mm の範囲に対する深さ方向（部材厚 y 方向）を解析対象空間とする。

キーワード コンクリート, 非破壊試験, SIBIE 法, レーザードップラー振動計, 三次元可視化

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3-b4S15 TEL 075-383-3496

- ③ 弾性波の反射に着目する格子点は弾性波の伝搬経路を直線とした  $x=z$  および  $x+z=300$  平面上とする。
- ④ 分割された各要素を構成する格子点から弾性波の送受信点への伝搬経路長さ  $R$  を求める。
- ⑤ 伝搬経路長さ  $R$  は弾性波の送信点（打撃点）～格子点～受信点（LDV 焦点）を結ぶ最短経路とする。
- ⑥ P 波の速度を  $C$  として格子点で反射することで生じる共振周波数  $f$  を求める。
- ⑦ 各格子点において  $f$  に対応する振幅を正規化して合計することにより反射強度を数値化する。
- ⑧ 数値化した反射強度と格子点の座標に基づいて三次元画像処理を行う。

### 3. 損傷模擬供試体および実験概要

供試体内部に損傷を模擬するために部材厚（ $y$  方向）に対して中央に幅 50mm（縦 150mm×横 300mm）の発泡スチロールを埋設した。供試体の諸元および上述した LDV を用いた弾性波の受信と鋼球（ $\phi 10\text{mm}$ ）打撃を用いた弾性波の送信による実験の概要を図-2 に示す。なお、本研究で用いたレーザードップラー振動計は 0.5Hz～22kHz の周波数バンドを有しており、 $0.02 \mu\text{m}/\text{sec}/\sqrt{\text{Hz}}$  の検出分解能である、また、 $\phi 10\text{mm}$  の鋼球打撃による励起弾性波の上限周波数  $f_{\text{max}}$  は 29.3kHz である<sup>1)</sup>。

### 4. 実験および解析結果と考察

図-3 に反射強度の三次元可視化画像を  $y=200\text{mm}$  となる深さの断面図とともに示す。これより、発泡スチロールをコンクリート内部に埋設した箇所において、音響インピーダンスの変化に伴う反射強度の増大が検査対象とする三次元空間において可視化できていることが確認できる。LDV のターゲット箇所とした供試体中心部（ $x=150\text{mm}$ ,  $z=150\text{mm}$ ）の供試体深さ（ $y$ ）方向の反射強度のプロファイルを図-4 に示す。これより、 $y=175\text{mm} \sim 225\text{mm}$  の範囲において反射強度が高くなっており、供試体端部（ $y=400\text{mm}$ ）においてもコンクリート-空気の境界面での反射強度の増大が確認できる。なお、本研究で適用した鋼球打撃による励起弾性波（ $f_{\text{max}}=29.3\text{kHz}$ ）と弾性波速度（約 4000m/sec）によれば、約 70mm 以浅（ $2r=4000/29.3$ ）の解析精度は低い可能性がある。鋼球径や打撃箇所に基づく本手法の精度向上が今後の課題であり、実構造物を対象とした本手法の現場実装に向けた検証を進める。

#### 参考文献

- 1) Sansalone, M. J. and Streett, W. B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, 1997.
- 2) Ohtsu, M. and Watanabe, T.: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT&E Int., Vol. 35, pp. 189-196, 2002.

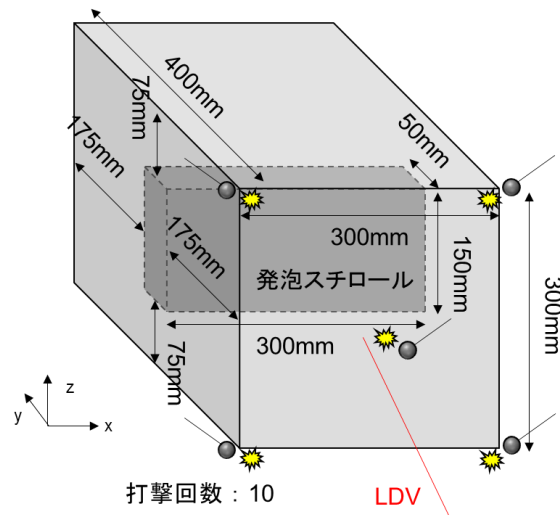


図-2 供試体の諸元および計測概要

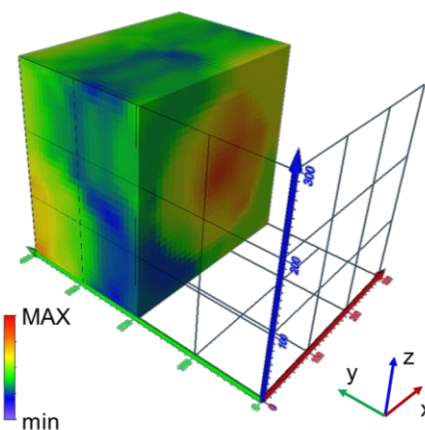


図-3 反射強度の三次元可視化画像  
(深さ  $y=200\text{mm}$  位置の断面)

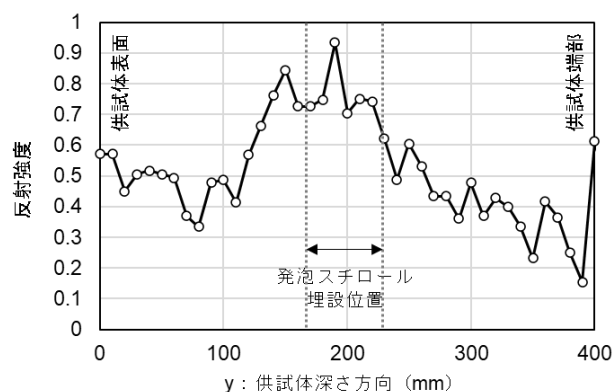


図-4 供試体中心部の反射強度  
( $x=150\text{mm}$ ,  $z=150\text{mm}$ )