

## 非接触音響探査法による SSE 解析を用いた 吹付けコンクリート供試体の内部欠陥の検出と映像化

桐蔭横浜大学 正会員 ○杉本 和子

桐蔭横浜大学 正会員 杉本 恒美

佐藤工業(株) 技術センター 正会員 歌川 紀之

佐藤工業(株) 技術センター 正会員 黒田 千歳

### 1. はじめに

非接触音響探査法は、測定対象の浅層(～10 cm 程度)に対して音波加振を行い、レーザドップラ振動計による振動速度分布の測定から、非接触・非破壊で遠隔(5～30 m 程度)からコンクリートなどの複合材料の内部欠陥を検出・映像化する方法である。トンネル内壁・高架橋の床版などの表面の滑らかなコンクリートを対象として測定・解析を行ってきたが、大規模なコンクリート構造物である地下空洞やトンネルでは、吹付けコンクリートにより施工される。施工過程や性状が異なる、吹付けコンクリート供試体を作製し、非接触音響探査法[1,2]により測定を実施し、SSE 解析[3,4]を行って、内部欠陥の検出および映像化を試みた。

### 2. 実験方法

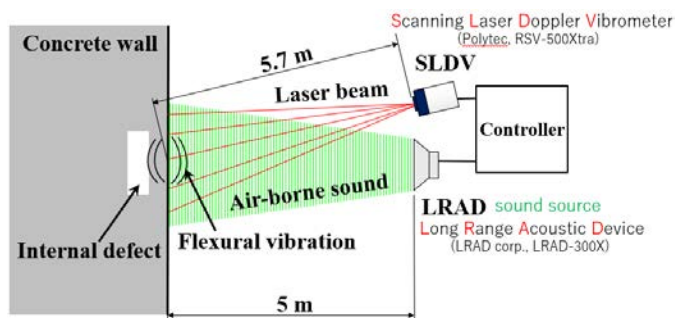


図1 非接触音響探査法の基本セットアップ

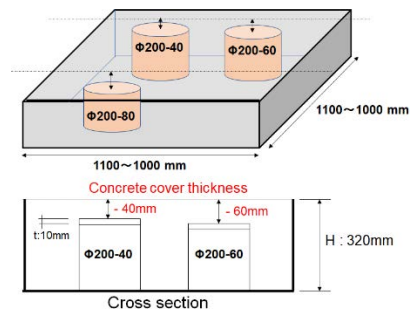


図2 吹付けコンクリート供試体

非接触音響探査法の基本セットアップを図1に示す。長距離音響発生装置 (Genasys Inc., LRAD-300X) から空中平面音波を測定面上に放射し、測定面の2次元の振動速度分布をレーザドップラ振動計 (Polytec GmbH, PSV-500Xtra) で測定する。時間-周波数ゲート処理後、振動速度スペクトルを計算し、SSE 解析を行った。送信波形には、トーンバースト波を用いた。吹付けコンクリート供試体は、図2のようにコンクリート円柱の上に10mm厚の発泡スチロールが設置され、かぶり厚さが40,60,80 mmとなるように、手作業の職人技による吹付け工程で作製された。

### 3. SSE 解析

コンクリート浅層に内部欠陥(ひび割れや空洞)がある時、叩き点検では、打撃により欠陥部にたわみ振動が生じ、音色の違いから欠陥の有無を検出する。同じ原理を用い、音波で測定面を継続的に加振することにより内部欠陥の共振現象を効率よく誘発する。意図的に周波数を変えて加振することにより、様々な欠陥に対する共振現象を誘発できる。2次元格子点で計測された振動速度分布から計算された、各測定点での振動速度スペクトルを見れば、欠陥の共振周波数で共振ピークが立っているのが見られる。SSE 解析を用いれば、全ての測定点・全ての周波数を目視で確認しなくても、測定面上の内部欠陥の共振周波数を検出し、どこに内部欠陥が存在するかもわかる。検出した共振周波数帯で振動エネルギー比により映像化すれば、欠陥画像が得られる。SSEは、空間スペクトルエントロピー (Spatial Spectral Entropy) [3]の頭文字で、今回、規格化した SSE [4]を(1)式のように定義した。

$$H_{SSE}(f) = -\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{i,j}(f) \log_2 P_{i,j}(f)}{\log_2(m \cdot n)}, \quad P_{i,j}(f) = \frac{S_{i,j}(f)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{i,j}(f)} \quad (1)$$

キーワード 非接触音響探査法, SSE 解析, 非破壊検査, 吹付けコンクリート, レーザドップラ振動計

連絡先 〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 杉本研究室 Tel:045-974-5059

$S_{i,j}(f)$ は、計測点で計測された信号を離散フーリエ変換して得られるパワー・スペクトルの周波数成分  $f$ [Hz]である。 $P_{i,j}(f)$ は、計測点におけるパワー・スペクトルの周波数成分  $f$ [Hz]が、計測面内で存在する確率である。 $H_{SSE}(f)$ は、測定空間内の観測点で計測された信号のパワー・スペクトルの周波数成分について計算された情報エントロピーを示す。 $(m \cdot n)$ は、測定点数である。SSEによって、内部欠陥の共振周波数と共に、SLDV共振周波数も同時検出できる。SSEは規格化されたため、測定点数に依存しない。SSE値は[0,1]の値を示す。

#### 4. 実験結果と解析結果

吹付けコンクリート供試体の円形欠陥( $\Phi 200,40$ )の SSE 解析結果を図3に示す。 $(\Phi 200,40)$ は、円形欠陥の直径が200 mm、内部欠陥のかぶり厚さが40 mmを示す。図3の赤枠に囲まれた周波数帯3260-3420HzでSSE値が下がり、内部欠陥の共振周波数が検出されている。図4は、その共振周波数帯で振動エネルギー比を計算し、映像化した例である。音響画像中の黒色の点線円は、円形欠陥の正確な大きさと想定される位置である。赤く見える所は、健全部に比べて振動エネルギーが高く、内部欠陥の存在がその振動状態により確認できる。

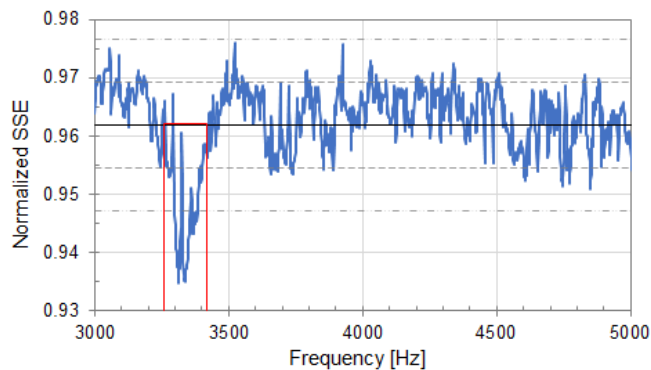


図3 円形欠陥( $\Phi 200,40$ )の SSE 解析の結果

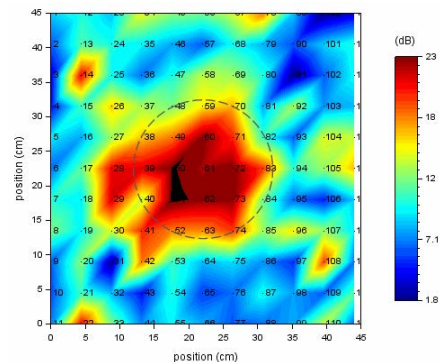


図4 円形欠陥( $\Phi 200,40$ )の音響画像

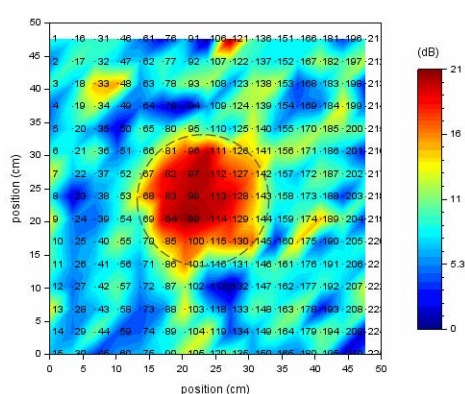


図5 円形欠陥( $\Phi 200,60$ )の音響画像

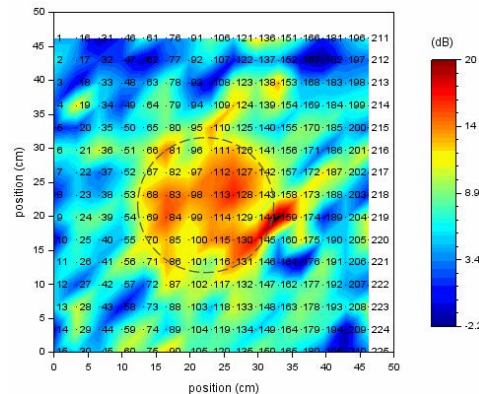


図6 円形欠陥( $\Phi 200,80$ )の音響画像

図5および図6は、かぶり厚さ60mmと80mmの映像化例である。音響画像上の数値は、測定点番号で、その左側に測定点がある。各音響画像の基準振動エネルギーは、同一でなく、各測定での最小振動エネルギーが基準となっている。SSE解析では、外れ値  $3\sigma$  以上を考慮した。

#### 5. まとめ

吹付けコンクリート供試体に対して、非接触音響探査法による測定が実施され、SSE解析によって内部欠陥の共振周波数帯が検出され、その共振周波数帯で振動エネルギー比により映像化された。直径200 mm、かぶり厚さ40,60,80 mmのいずれの円形欠陥も検出され、映像化された。

#### 謝辞

吹付けコンクリート供試体を作製・提供して戴いた太平洋マテリアル(株) 開発研究所の皆様へ感謝する。

本研究はJSPS 科研費 JP19K04414の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utogawa, K. Katakura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 07HC12, 2013.
- [2] K. Katakura K, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utogawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 07KC15, 2014.
- [3] K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utogawa, C. Kuroda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 58, SGGB15, 1–14, 2019.
- [4] K. Sugimoto, T. Sugimoto, *Entropy* 2022, 24, 142. <https://doi.org/10.3390/e24020142>.