

音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発 —健全部評価に関する検討—

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
(株)東芝	非会員	千星 淳
佐藤工業(株)	正会員	黒田 千歳
佐藤工業(株)	正会員	歌川 紀之

1. はじめに

コンクリート構造物の非破壊検査法として、空中放射音波とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法を研究してきた¹⁻²⁾。昨年、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーを用いた欠陥検出アルゴリズム³⁾を提案して、欠陥部の映像化を行った。欠陥部の検出では、コンクリート健全部と欠陥部の識別が重要で、健全部を定量的に把握する基礎データが不可欠である。そこで、我々の測定から得られる各測定点での2つの音響学的物理量(振動エネルギー比とスペクトルエントロピー)を統計的に解析し、定量的に評価した。

2. 原理(欠陥検出アルゴリズム³⁾)

振動速度波形の受光漏れした光学ノイズは、外部雑音により大きな振動振幅として検出される。この信号の周波数特性は白色雑音に近い特性を示す。そこで、信号の白色性を表す特徴量であるスペクトルエントロピー H を導入した。これは、信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算したもので、(1)式で定義される。

$$H = -\sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \quad (1)$$

ここで、 S_f は測定点での振動速度の振幅スペクトルである。これに振動エネルギー比(ある周波数帯での振動速度のパワースペクトルの和を振動エネルギーに対応する値とみなし、計測された健全部で振動エネルギーが最も低い値を健全部の基準として計算する)を組み合わせて、Table 1のように非接触音響探査法での2つの音響学的特徴量から欠陥部・健全部・計測不良点の識別が可能となる。

Table 1 健全部・欠陥部・計測不良点の識別

	健全部	欠陥部	計測不良点
振動エネルギー比	低い	高い	高い
スペクトルエントロピー	高い	低い	高い

3. 円形空洞欠陥コンクリート供試体での適用例

3-1 実験方法

非接触音響探査法では、長距離音響放射装置(LRAD: Long Range Acoustic Device)の音源から発した平面波音波により計測対象面を励振し、励振時の測定面上の振動速度を長距離レーザドップラ振動計(Polytec RSV-150)を手動SCANさせながらSLDVを記録用に繋いで2次元面を計測した。計測点での振動速度波形に対して、音源からの直達波・対象面からの反射波によりレーザヘッドが振動して生じる光学ノイズを軽減するため、時間-周波数ゲート処理を行い、FFT処理後、欠陥検出アルゴリズムを適用した。

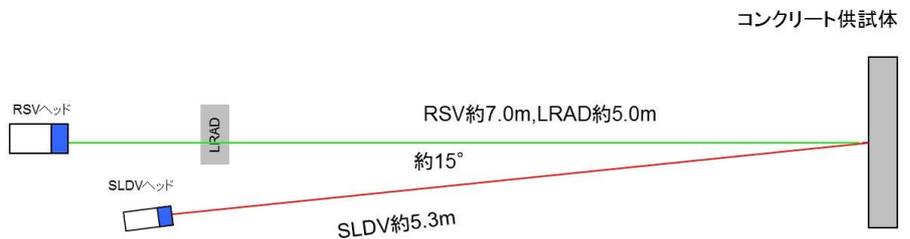


Fig.1 実験セットアップ

計測点での振動速度波形に対して、音源からの直達波・対象面からの反射波によりレーザヘッドが振動して生じる光学ノイズを軽減するため、時間-周波数ゲート処理を行い、FFT処理後、欠陥検出アルゴリズムを適用した。

3-2 実験結果

キーワード ; コンクリート内部欠陥, 非破壊検査, 非接触音響探査法, 長距離音響発生装置(LRAD), 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 TEL 045-974-5059

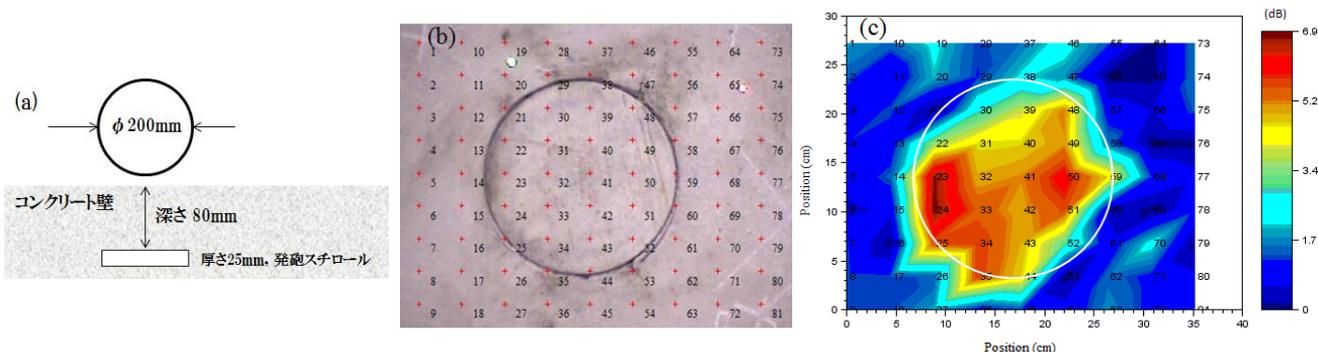


Fig. 2 コンクリート供試体 (円形空洞欠陥)

(a) 円形空洞欠陥の寸法と形状, (b) 円形空洞欠陥の正面 CCD カメラ画像, (c) 欠陥部の映像化の例

Fig. 2(a)に円形空洞欠陥の寸法・形状を, (b)は円形空洞欠陥の正面 CCD カメラ画像 (振動エネルギー比による表示) を示す。図中の数値は計測点番号, 計測ピッチは約 4cm, 計測点は 9×9 points である。(c)はその円形空洞欠陥の映像化の例である。欠陥部を映像化するために, Fig. 3 に欠陥検出アルゴリズムを適用した。Fig. 3 では各計測点での振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの値が示されている。図中の数値は計測点番号である。円形空洞欠陥の輪郭円の外側に存在する計測点を健全部とみなした。健全部は図の左上に集合し, 欠陥部は右下に点在している。今回使用したレーザドップラ振動計 RSV-150 では, 振動エネルギー比の閾値を 2.6dB に, スペクトルエントロピーの閾値を健全部のスペクトルエントロピーの分布の平均値に設定した。コンクリート健全部 50 点に対して, 統計ソフト R を用いて解析した結果を Fig. 4 に示す。コンクリート健全部の計測された振動エネルギー比の分布は(a)より正規分布になることが推定され, (b)の Q-Q plot より正規分布に従うことが視覚的にわかる。一般に Q-Q plot のプロットが赤い対角線に沿って近いほど正規分布に従うといえる。さらにシャピロウィルク検定を行い, W=0.98, 有意確率 p-value=0.54(有意水準 0.05)となり正規分布が確かめられた。同様に, 健全部のスペクトルエントロピーの分布は(c)より正規分布になることが推定され, (d)の Q-Q plot より正規分布に従うことが視覚的にわかる。さらにシャピロウィルク検定を行い, W=0.98, 有意確率 p-value=0.49(有意水準 0.05)となり正規分布に従うことがわかった。

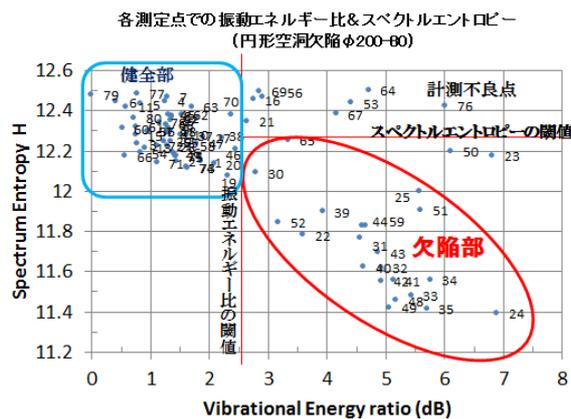


Fig. 3 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー

各測定点での振動エネルギー比&スペクトルエントロピー (円形空洞欠陥φ200-80)

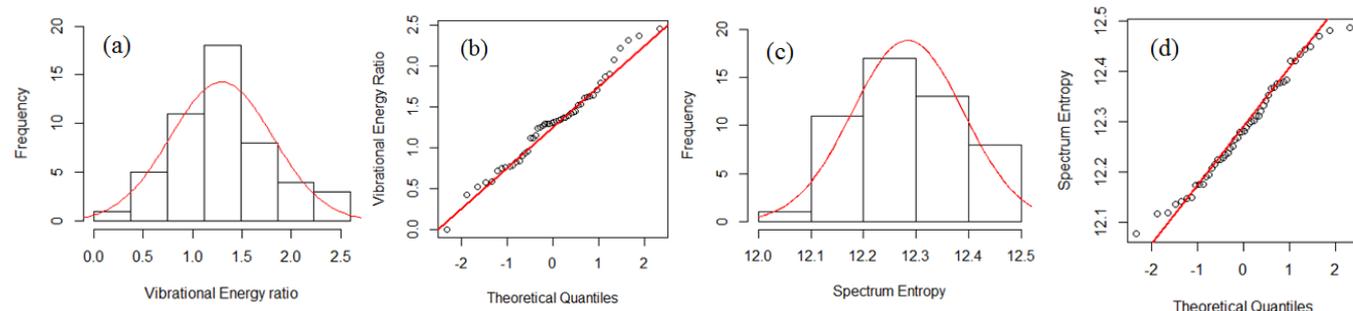


Fig. 4 統計解析の結果 (a)振動エネルギー比の分布(ヒストグラム), (b)振動エネルギー比の分布の Q-Q plot, (c)スペクトルエントロピーの分布(ヒストグラム), (d)スペクトルエントロピーの分布の Q-Q plot

4. まとめ

今回の実験では, コンクリート健全部に対して, 非接触音響探査法の計測から得られる音響学的特徴量 (振動エネルギー比・スペクトルエントロピー) の分布を統計解析し, 正規分布であることを示し, 平均や標準偏差の統計量を求めた。健全部と欠陥部を識別するため, 今後, 測定条件を変えて健全部評価の基礎データを蓄積検討したい。

参考文献:

- 1) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and S. Tsujino, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 52, 07HC12, (2013)
- 2) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto and N. Utagawa, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 53, 07KC15, (2014)
- 3) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, 07HC15, (2015)