

論文

コンクリート構造物のための 非接触音響探査法に関する研究

——健全部の統計評価——

Study on Noncontact Acoustic Inspection for Concrete Structures:
Statistical Evaluation of a Healthy Part of Concrete

杉本 和子*・大平 武征¹・杉本 恒美¹

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2020年3月14日 受理)

I. はじめに

高度成長期に建設されたトンネルや橋梁といったコンクリート構造物が耐用年数を迎え、保守・点検が重要な社会問題となっている。高所でのコンクリート構造物の点検では、非接触・遠隔からの計測点検が望まれている。しかしながら、現状では、目視点検や打音検査が主流である。それらの利点は費用が安いことであるが、欠点は作業者の技術や経験に依存することや、計測面に接近・接触する必要があるため、足場の設置が不可欠となっている。

非接触音響探査法において、一般的なコンクリート健全部に対する音響学的特徴量（振動エネルギー比とスペクトルエントロピー）の分布は、コンクリート供試体の実験結果の統計解析から、正規分布を示すことが明らかとなった³⁾。このことは、一般的なコンクリート健全部に対して、我々の方法では、音響学的に均質かつ等方的であるとみなせるため

と考えられる。そこで、内部欠陥を検出・識別するために、コンクリート健全部を評価することを検討した。

II. 原理

まず、従来の欠陥検出アルゴリズムに用いられた音響学的特徴量の定義から説明する。

1. 音響学的特徴量と欠陥検出アルゴリズム (1) 振動エネルギー比¹⁾

振動エネルギー比は、非接触音響探査法の内部欠陥の映像化の表示量に用いられ、(1)式で表される。

$$VER[dB] = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{healthy}) df} \dots\dots\dots (1)$$

ここで *PSD* はパワースペクトル密度である。各測定点で計測される振動速度スペクトルに対して、対象周波数帯域で *PSD* を積算し、振動エネルギーを計算する。測定面上の

* SUGIMOTO Kazuko: Researcher, Graduate School of Engineering, Tooin University of Yokohama. 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ OHDAIRA Takeyuki: Researcher, SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Tooin University of Yokohama

健全部の最小振動エネルギーを基準として、その比の常用対数をとる。

(2) スペクトルエントロピー²⁾

スペクトルエントロピーは、信号の白色性を表す特徴量で、信号のスペクトルを確率分布とみなし、情報エントロピーを計算するもので、(2)式で表される。

$$H = -\sum_f P_f \log_2 P_f, \quad P_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \dots\dots\dots(2)$$

S_f は測定点での振動速度のパワースペクトルである。スペクトルエントロピーはホワイトノイズのようなスペクトルが均一な信号では高い値となり、音声信号のようなスペクトルが不均一な信号では低い値となる。

(3) 欠陥検出アルゴリズム²⁾

2つの音響学的特徴量を組み合わせることによって、内部欠陥の検出を行った。図1は、円形空洞欠陥(Φ200-80)の実験結果で、縦軸にスペクトルエントロピー、横軸に振動エネルギー比をとって描いた散布図である。

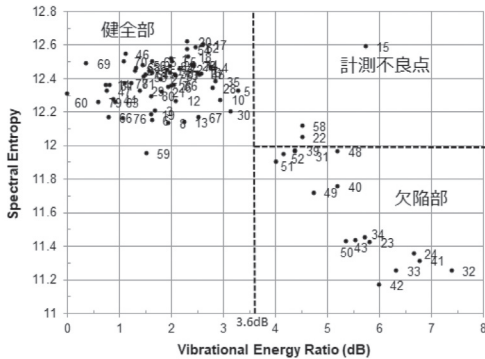


図1 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる散布図の例

健全部の測定点は、振動エネルギーが低くスペクトルエントロピーが高い所に集合している。内部欠陥の測定点は、振動エネルギーが高くスペクトルエントロピーが低い所に点在する傾向がある。計測対象の表面状態に依存して、レーザ戻り光量が減少し、受光漏れに起因する光学ノイズが生じる場合がある。これによって計測不良点が存在すれば、振動エネルギーが高くスペクトルエントロピーも

高い所に存在する。

2. 健全部抽出アルゴリズム³⁾

欠陥検出アルゴリズムでは、直線の閾値を用いているが、実際のコンクリート構造物では、直線の閾値でうまく区切れない場合もあり、新たな健全部の評価方法が必要であった。

統計処理に十分な数の測定データを用いれば、コンクリート健全部の2つの音響学的特徴量(振動エネルギー比とスペクトルエントロピー)の分布は、それぞれ正規分布に従うことが分かってきた。そこで、図2に示すような健全部抽出アルゴリズムを考えた。

全測定データに対して、まずその音響学的特徴量である振動エネルギー比の分布に着目し、その分布が正規分布であると仮定して外れ値を検出し、その外れ値として検出された測定点データを除く。残った測定点データの振動エネルギー比の分布について、繰り返し外れ値の検出を行い、外れ値の測定点データを除いていく。次に、残った測定点データに対して、スペクトルエントロピーの分布に着目し、その分布が正規分布であると仮定して外れ値を検出し、その外れ値の測定点データを除いていく。最後に、2つの音響学的特徴量の分布に対して、正規性を検定し、終了する。この過程で残った測定点データが健全部

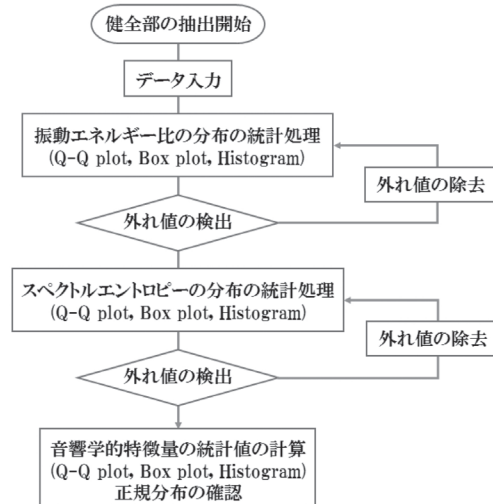


図2 健全部抽出アルゴリズム

の候補となる。

測定エリアで健全部でない測定点は、欠陥部か計測不良点ということになる。測定エリア内に、統計処理に十分な数の健全部の測定点が存在することが必要である。

Ⅲ. 実験方法および実験結果

1. 実験方法

(1) 実験セットアップとデータ解析の流れ

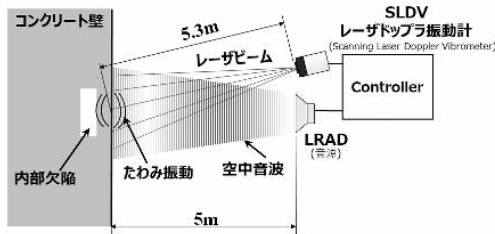


図3 実験セットアップ

LRAD 音源から、可聴域の強力な平面空中音波を放射し、コンクリート壁面を振動励起させる。もし内部欠陥が存在する場合には、欠陥部にたわみ振動が生じる。レーザドップラ振動計を用いて、測定面の振動速度分布を2次元的に計測する。時間-周波数ゲート処理を行い、目的信号を抽出し、各測定点での振動速度スペクトルを求め、欠陥検出アルゴリズム及び健全部抽出アルゴリズムを適用した。

(2) 円形空洞欠陥の供試体

直径 200mm, 厚さ 25mm の空洞を模した内部欠陥として、発砲スチロールを深さ 80mm に埋め込んだ供試体を作製した。図4はその供試体の内部欠陥の寸法と埋め込み位置を示す。

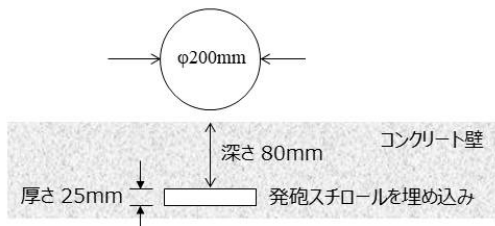


図4 空洞欠陥の供試体の寸法と埋め込み位置

2. 実験結果

前述の円形空洞欠陥を用いて、非接触音響探査法により測定した結果を以下に示す。

(1) 円形空洞欠陥の2つの音響学的特徴量

図5は円形空洞欠陥(Φ200-80)の供試体の正面 CCD 画像である。中央の円は、空洞欠陥の位置を示す。+は測定点, その右の数字は測定点番号である。

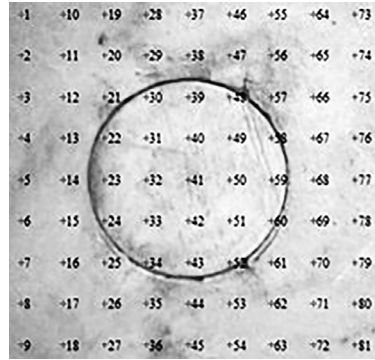


図5 空洞欠陥供試体の正面の CCD 画像

円形空洞欠陥(Φ200-80)の実験データから得られた各測定点での振動速度スペクトルから、各測定点での音響学的特徴量(振動エネルギー比とスペクトルエントロピー)を計算した。縦軸にスペクトルエントロピー、横軸に振動エネルギー比をとり散布図を描くと、図6になる。

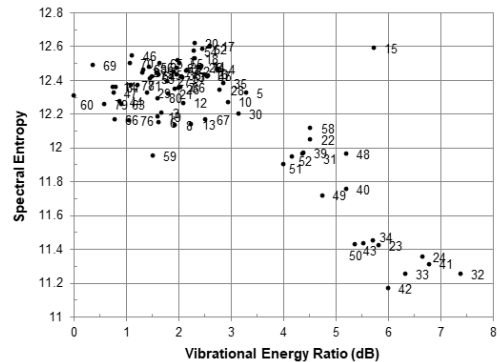


図6 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる相関図

(2) 健全部抽出アルゴリズムの適用

2つの音響学的特徴量(振動エネルギー比,

スペクトルエントロピー)の分布に、健全部抽出アルゴリズムを適用する。

図7は、アルゴリズム適用前の全測定点の振動エネルギー比の分布である。

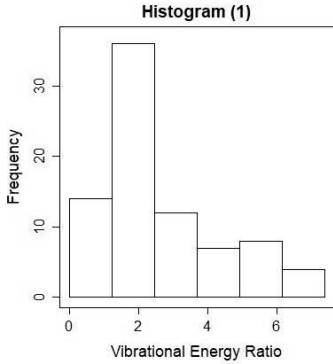


図7 振動エネルギー比の分布 (全測定点)

[第1段階: 振動エネルギー比分布への適用]

まず、振動エネルギー比の分布に Box plot を適用した結果、図8が得られた。Box plot の上側に外れ値が検出されている。これらの外れ値は、健全部の振動エネルギー比の分布を正規分布と仮定して検出された外れ値(1)である。外れ値(1)は、第1回目に検出された外れ値である。図6に外れ値(1)を表示したものが図10となる。点線枠内に外れ値(1)が見られる。図9は、振動エネルギー比の分布に Q-Q plot を適用したもので、右上に外れ値(1)が見られる。

外れ値を除去していき、振動エネルギー比の分布に対して、外れ値がなくなるまで、Box plot による外れ値の検出、及び、その外れ値の除去を繰り返す。図11は、第1段

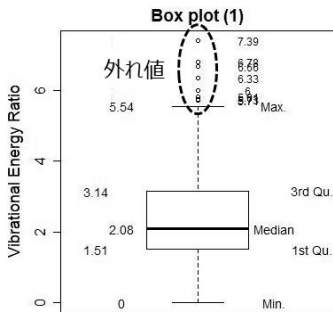


図8 振動エネルギー比分布の Box plot 適用結果

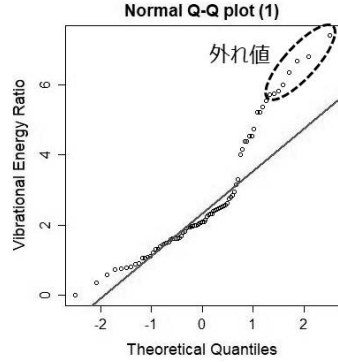


図9 振動エネルギー比分布の Q-Q plot 適用結果

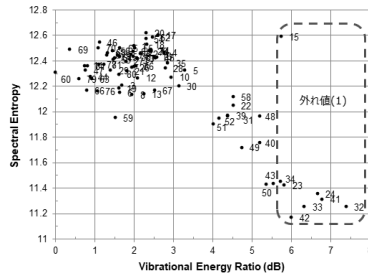


図10 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる相関図 [外れ値(1)を表示]

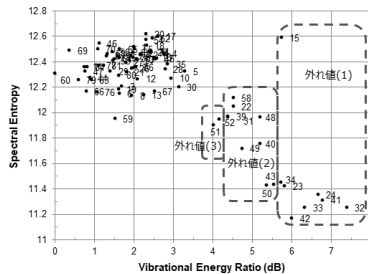


図11 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる相関図 (外れ値(1)～(3)を表示)

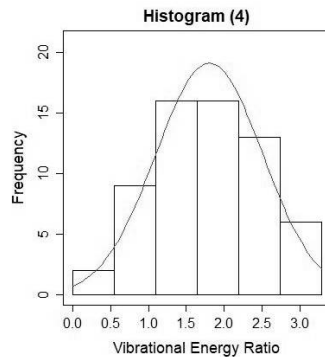


図12 振動エネルギー比の分布 (第1段階の振動エネルギー比に対する健全部抽出アルゴリズム適用後)

階で検出された外れ値を示す。その結果、**図 12**に示すような振動エネルギー比の分布になった。

[第 1 段階:スペクトルエントロピー分布への適用]

ここまでの統計処理において、残った測定点データに対して、そのスペクトルエントロピー分布に対して、健全部抽出アルゴリズムを適用した。スタート時点でのスペクトルエントロピー分布は、**図 13**になる。このスペ

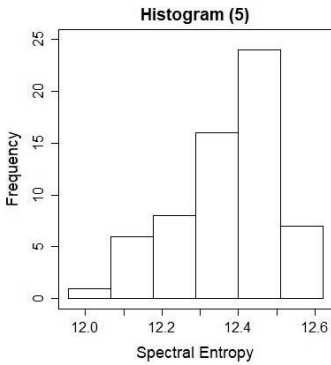


図 13 スペクトルエントロピー分布

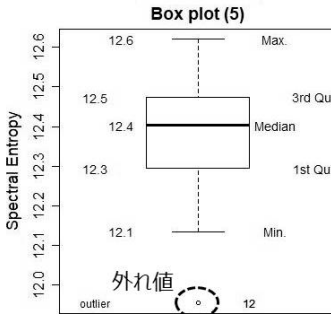


図 14 スペクトルエントロピー分布の Box plot 適用結果

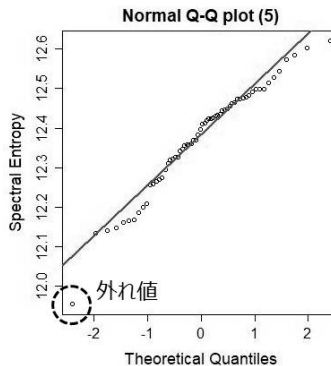


図 15 スペクトルエントロピー分布の Q-Q plot 適用結果

クトルエントロピーの分布に Box plot を適用した結果、**図 14**が得られた。外れ値が 1 つ検出されている。同じデータの Q-Q plot 結果を**図 15**に示す。

図 16では、正規分布を仮定したスペクトルエントロピー分布からの外れ値を、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの散布図に示す。

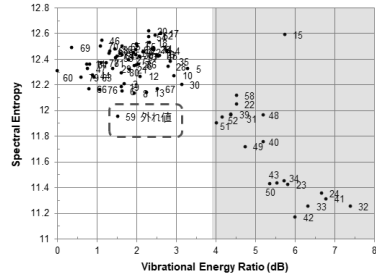


図 16 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる散布図 (スペクトルエントロピーによる外れ値を表示)

以上の処理の結果、残った測定点について、そのスペクトルエントロピーの分布は**図 17**になり、振動エネルギー比の分布は**図 18**になる。これらの分布に対して、正規性の検定を行った。

Shapiro-Wilk normality test の結果は、振動エネルギー比分布について

$$W=0.989, p\text{-value}=0.85$$

スペクトルエントロピー分布について

$$W=0.967, p\text{-value}=0.097$$

であった。測定点数は十分多くないが、正規分布を否定できない結果が得られている。

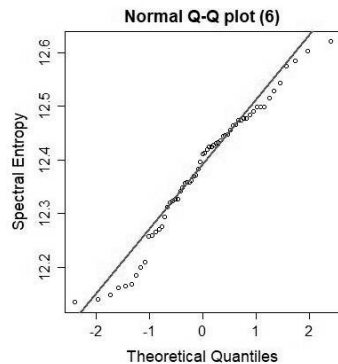


図 17 スペクトルエントロピー分布の Q-Q plot 結果

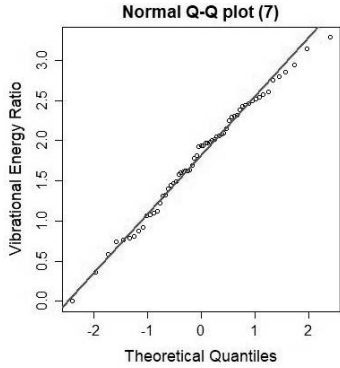


図18 振動エネルギー比分布の Q-Q plot 結果

(3) 健全部の検証と内部欠陥の映像化

図19は円形空洞欠陥の正面 CCD 画像である。空洞部のエッジ近傍の測定点を点線○で囲んでいる。図20は、円形空洞欠陥(Φ200-80)の実験結果で、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる散布図である。

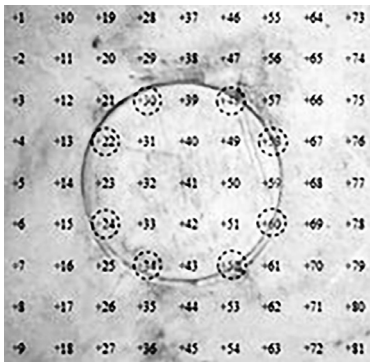


図19 空洞欠陥の輪郭部近傍の測定点

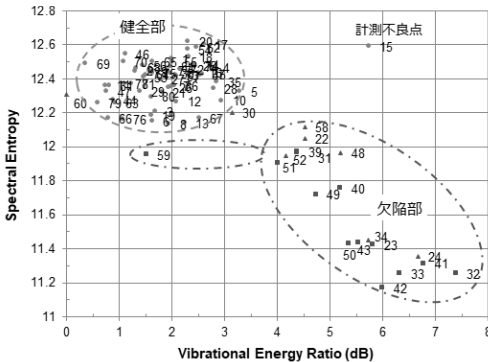


図20 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーによる散布図(健全部・欠陥部・計測不良点)

健全部を●, 空洞のエッジ近傍の測定点を▲, 空洞欠陥内の測定点を■で示した。

この照合により、健全部抽出アルゴリズムの適用によって、欠陥部と計測不良点の測定点が検出され、健全部の測定点が残る、結果的に健全部の測定点がうまく特定・抽出されていることがわかる。この空洞欠陥の例では、欠陥部の振動エネルギーが健全部に比較して十分大きいので、計測不良点を除いた全測定点の振動エネルギー比で映像化しても遜色はない。しかしながら、欠陥部の振動エネルギーが健全部のそれに比べて差がない場合には、健全部を特定してグレースケール(またはカラースケール)の階調を0等とすることによって、クリアな映像化が可能である。

図21は、計測不良点を除く全測定点について、その振動エネルギー比を用いて映像化した例である。図22は、同じデータについて

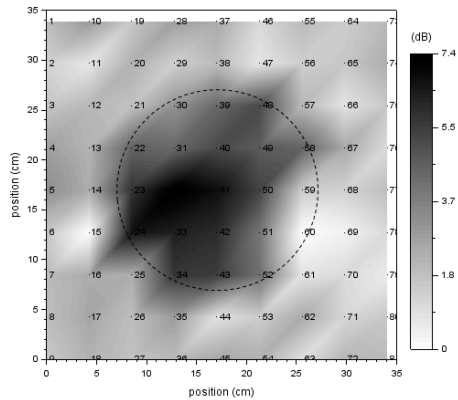


図21 空洞欠陥の映像化例

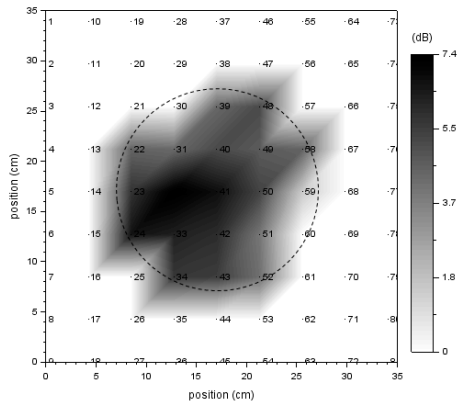


図22 健全部抽出アルゴリズム適用後

て、健全部のグレースケールの階調を0にして映像化したものである。欠陥部がよりクリアに映像化される。

IV. まとめ

非接触音響探査法では、測定面を面的に測定し評価を行う。2つの音響学的特徴量の分布から健全部を統計的に評価・特定することによって、欠陥部を検出することが可能である。これにより、内部欠陥のよりクリアな映像化を期待できる。

謝辞：本研究は、JSPS科研費基盤(C)15K06195の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

- 1) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa; Jpn. J. Appl. Phys., 53, 07KC15, (2014)
- 2) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, and K. Katakura; J. Appl. Phys., 54, 07HC15, (2015)
- 3) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, and A. Kawakami; Jpn. J. Appl. Phys., 57, 07LC13, (2018)