

# 空中放射音波を用いたコンクリート構造物のための 非接触検査法に関する研究

——統計解析によるコンクリート健全部の評価——

Study on Non-contact Inspection Method for Concrete Structures  
using Air-borne Sound Wave  
— Evaluation of a healthy part of concrete using statistical analysis —

杉本 和子、杉本 恒美

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2016年3月28日 受理)

## 1. はじめに

近年、日本の各地で、幾つかのコンクリート橋やトンネルの一部が崩落し、コンクリート構造物の劣化が重大な社会問題となっている。劣化対策として、点検・補修・更新の重要性が認識されている。我々の研究室では、空中音波とレーザドップラ振動計測装置を用いて、コンクリート構造物の内部欠陥を検査するために、非接触音響探査法<sup>1)</sup>を研究してきた。昨年、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーを組み合わせることによって、コンクリート構造物の内部欠陥（浮き・剥離など）を検出する新しい欠陥検出アルゴリズムを提案した。欠陥部・健全部・計測不良点がうまく識別分離され、コンクリートの内部欠陥の画像がリアルに映像化された。本研究では、コンクリート健全部の僅かな振動状態を、測定データから得られる物理学的特徴量を用いて定量的に評価することによって、欠

陥部との識別をより効果的に行うために、実験から得られた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）の分布状態を統計的に解析した。また、その物理学的特徴量の分布の統計量を求めた。

昨年の研究<sup>2)</sup>で、コンクリート構造物の欠陥部は、健全部に比べて、高い振動エネルギー比と低いスペクトルエントロピーを持つ傾向が明らかになった。他方、コンクリート構造物の健全部は、欠陥部に比べて、低い振動エネルギー比と高いスペクトルエントロピーを持つ傾向があった。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）の分布状態が、あるレンジ範囲内に存在することを幾つもの実験で観測確認した。しかし、その特徴量の分布状態は、まだ明らかになっていなかった。そこで今回は、健全部の測定データから得られた各特徴量の分布を推定し、統計的に検証した。その特徴量の分布状態から、ここでは2つの音響学

Kazuko SUGIMOTO and Tsuneyoshi SUGIMOTO

Graduate school of Engineering, Toin University of Yokohama: 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan; E-mail : kazukosu@toin.ac.jp

的特徴量が正規分布を示すと仮定して、その正規性をQ-Qプロットとシャピロウィルク検定を用いて検証した。また、その2つの特徴量の分布の統計量も求めた。この新しい試みによって、我々の欠陥検出アルゴリズムは、定量的基礎に基づき、欠陥部や計測不良点を健全部とより明確に区別することが可能となる。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験セットアップと測定原理

非接触音響探査法<sup>1)</sup>は、主にコンクリート表面近傍の内部欠陥を検出するために、打音検査の代替として研究されてきた。コンクリート構造物の内部に空洞やひび割れなどの欠陥がある場合、その内部欠陥の辺りでは、空中音波で振動エネルギーを与えると、たわみ振動の共振現象が生じる。本測定法は、たわみ振動を利用しているという点で原理的に打音検査と同等なものである。

Fig. 1の実験セットアップに見られるように、長距離音響放射装置(LRAD: Long Range Acoustic Device; LRAD-300X)を音源とし、音源から発した平面波音波により計測対象面を励振し、励振時の面上の振動速度をスキャニング振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer; Polytec Corp., PSV400-H4)を使用して2次元的に計測する。実際には、測定面上の格子点(約4 cmピッチ、9×9点、加算平均回数5回)で測定した。音圧はコンクリート表面での最大音圧が約100 dBになるように調節された。音波として、500-7100 Hzの周波数帯域のトーンバースト波(パルス長3 ms、周波数インターバル200 Hz、パルス・インターバル50 ms)が使われた。

我々の測定方法は、定量的データが振動速度で記録されるという点と、測定面から5 m~10 m離れて測定できるという点で従来法より有利になっている。コンクリート構造物の表面近傍の空洞やひび割れといった劣化を

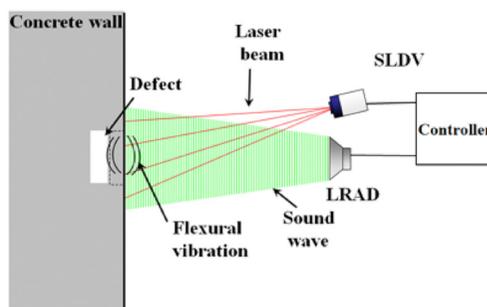


Fig. 1 実験セットアップ

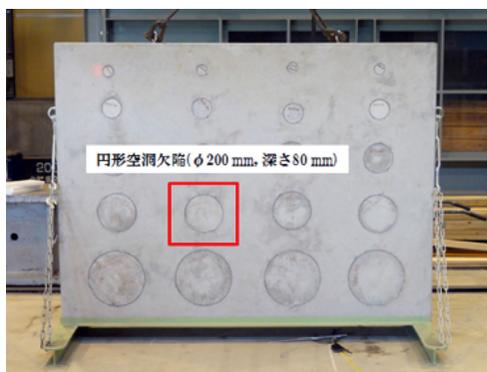


Fig. 2 コンクリート供試体の外観

検出することが可能である。

### 2.2 コンクリート供試体

Fig. 2にコンクリート試験体の外観を示す。コンクリート供試体は、コンクリート壁に円盤状の空洞が埋め込まれている。計測した円形空洞欠陥の位置を赤枠で示す。Fig. 3に円形空洞欠陥の寸法や埋め込みの深さを示す。空洞部に発砲スチロールを入れてコンクリートを流し込んで蓋をするように作製された。

### 2.3 数値解析方法

各計測点での振動速度波形について、音源からの直達波・対象面からの反射波によりレーザーヘッドが振動して生じる光学ノイズを軽減するため、時間ゲート処理(音波とレーザー光の伝搬速度差を用いた時間分離法)で目的信号を抽出する。周囲構造物からの反射波(残響)によるノイズを低減するために、周波数ゲート処理(同期を考慮して周波数制

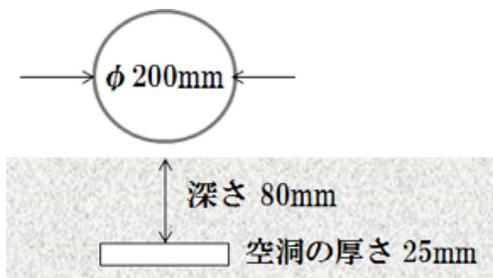


Fig. 3 円形空洞欠陥の形状

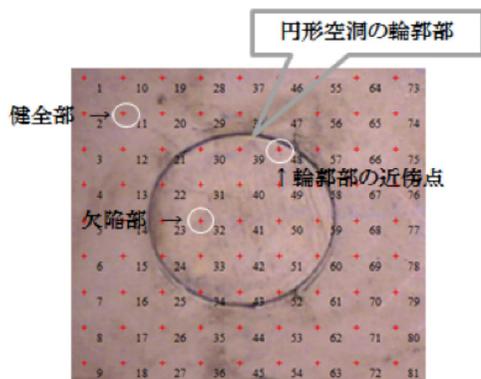


Fig. 4 測定面 (円形空洞欠陥) の CCD カメラ画像

御信号により送波の目的の周波数帯域を分離抽出)を行った。これらをTFゲート処理と呼んでいる。

この処理の後、各測定点で得られた振幅スペクトルから振動エネルギーを計算した。その時、SLDVヘッドの共振周波数の影響を除くため、振動エネルギーを1200-8192 Hzの周波数帯域で計算した。振動エネルギー比は、最小振動エネルギーを基準点として、全測定点について振動エネルギー比を計算した。さらに、得られたデータから各測定点でのスペクトルエントロピーも計算した。その後、我々が提案する欠陥検出アルゴリズムを適用し、各測定点について、健全部・欠陥部・計測不良点を識別した。

### 3. 結果

Fig. 4は、測定時にCCDカメラで撮られた円形空洞欠陥を含む測定面の画像である。黒色の円の位置に円形空洞欠陥の輪郭がある。

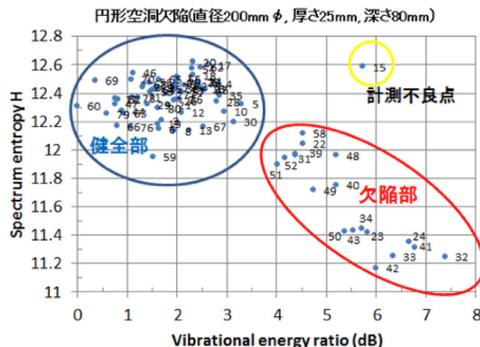


Fig. 5 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー

円の外側に健全部、円の内側に空洞欠陥が存在する。画像中の赤色の+マークは測定点で、その右下に測定点番号が表示されている。

数値解析の後、Fig. 5に示すように振動エネルギー比 vs スペクトルエントロピーのグラフが得られた。欠陥部の測定点は、Fig. 5の右下の赤い枠内に集合している。

コンクリートの健全部の測定点は、図の左上の青枠内に存在する。健全部は、欠陥部に比べて、小さい振動エネルギー比と大きなスペクトルエントロピーの値を示す。青い枠内に健全部を含む62点が存在している。

以下、統計解析ソフトRを用いて、統計解析した。Fig. 6は、コンクリート健全部の振動エネルギー比のヒストグラムである。その分布が正規分布であると仮定して、正規分布曲線をフィッティングさせた結果、赤色の正規分布曲線が描かれる。

Fig. 7は、Fig. 6の振動エネルギー比の分布にQ-Qプロットを適用して、正規性を視覚化したグラフである。プロットが対角線の近傍に存在し、正規分布によく一致している。さらに、シャピロウィルク検定を用いて、その分布の正規性を検証した。W = 0.99、p-value = 0.90 > 0.05 (有意水準)となり、健全部の振動エネルギー比の分布は、正規分布に従っているといえる。この振動エネルギー比の分布は、平均1.81、標準偏差0.71であった。

同様に、Fig. 8は、コンクリート健全部

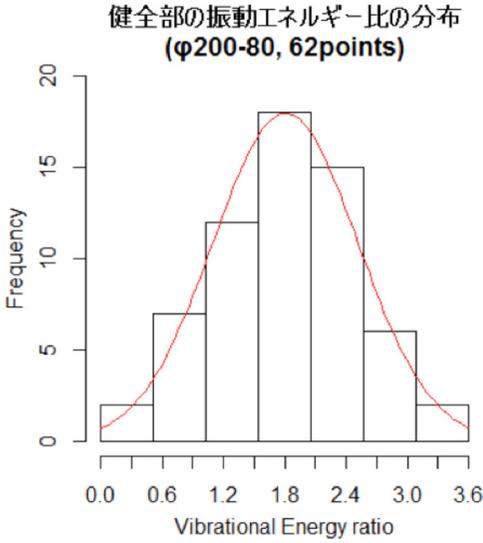


Fig. 6 振動エネルギー比の分布のヒストグラム

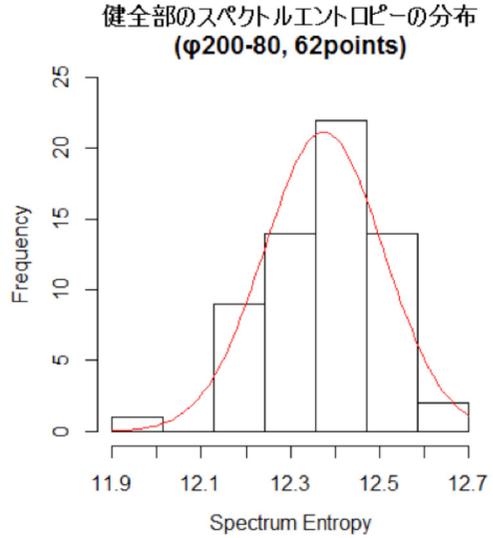


Fig. 8 スペクトルエントロピーの分布のヒストグラム

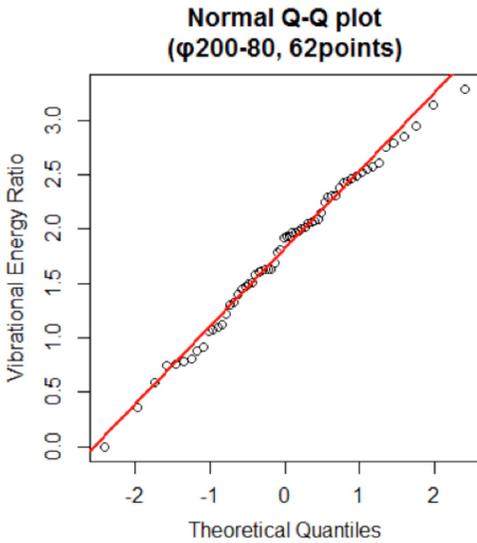


Fig. 7 振動エネルギー比の分布の Q-Q plot

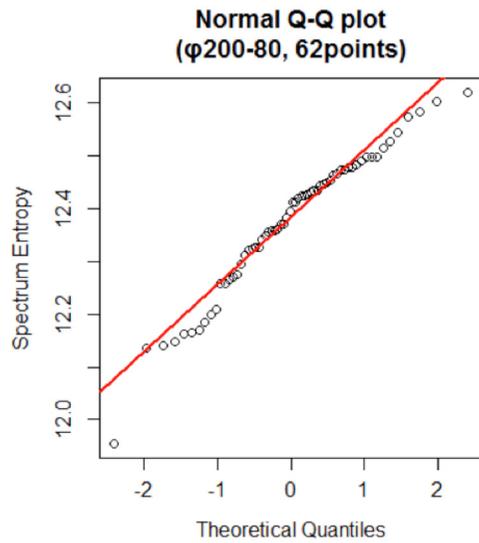


Fig. 9 スペクトルエントロピーの分布の Q-Q plot

のスペクトルエントロピーのヒストグラムである。この分布が正規分布であると仮定して、正規分布曲線をフィッティングした結果、赤色の正規分布曲線が描かれる。Fig. 9 は、Fig. 8 のスペクトルエントロピーの分布に Q-Q プロットを適用して、その正規性を視覚化した結果である。プロットが赤色の対角線の近傍に存在し、正規分布によく合っている。さらに、シャピロウィルク検定を行い、

この分布の正規性を検証した。その結果、 $W = 0.96$ 、 $p\text{-value} = 0.07 > 0.05$  (有意水準) となり、健全部のスペクトルエントロピーの分布は、ほぼ正規分布に従っていると言える。その分布の平均は 12.4、標準偏差は 0.13 であった。

Fig. 10 は、欠陥検出アルゴリズムを用いて、円形空洞欠陥を映像化した画像の例で、振動エネルギー比で表示されている。欠陥の

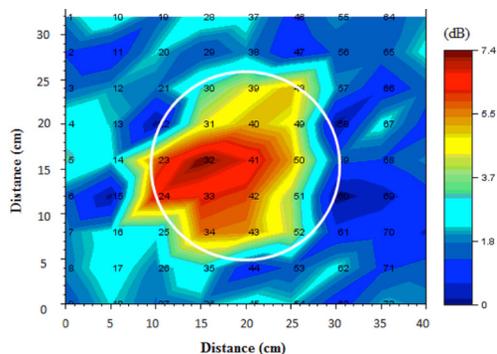


Fig. 10 振動エネルギー比による欠陥部の映像化  
(欠陥検出アルゴリズムを適用)  
振動状態が映像化されて欠陥部の位置がよく  
わかる。

#### 4. 結論と今後の課題

コンクリート構造物の欠陥部と健全部を識別するために、我々は統計的な手法で物理学的特徴量の分布を評価した。その物理学的特徴量の一つは振動エネルギー比で、もう一つはスペクトルエントロピーである。両方の特徴量は測定データから計算することができる。統計解析の結果、コンクリート構造物の健全部について、測定点の2つの特徴量の分布は正規分布に従い、それらの分布に関する統計量が求められた。

今後は、これ以外の供試体や実構造物についても、さらなる検討を行う余地がある。

##### 【参考文献】

- [1] K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15, (2014).
- [2] K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.54, 07HC15, (2015).