

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 25日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360215

研究課題名（和文） 構造振動－音響理論に基づく回転式打音検査システムの開発

研究課題名（英文） A study on the diagnosis system using the rotary hammering sound based on the structural vibration and acoustic theory

研究代表者

園田 佳巨（SONODA YOSHIMI）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40304737

研究成果の概要（和文）：

本研究は、従来の打音法の作業効率の改善を目的として開発された回転式打音検査法の診断メカニズムについて調べるとともに、打音データの有効な信号処理およびそれを用いた欠陥状態の評価法について、供試体実験および既設橋梁に関する計測データを用いて検討したもので、以下の成果を得た。

- 1)欠陥の有無が打音に与える影響を検討した結果、欠陥を有する場合には打音の音圧が増大し、音圧の減衰性が低下する傾向があることが確認された。周波数特性は、健全な場合に対する欠陥の場合の音圧スペクトルの割合を表す音圧スペクトル比を求めることで、欠陥の有無による相違を明確にできることから、これらの特性が欠陥の有無・状態を判別する特徴量となりうることが認められた。
- 2)上記1)で示した特徴量（打撃力に対する最大音圧比、打音継続時間）を用いて供試体実験および既設橋梁試験データを評価した結果、従来のテストハンマー法よりも回転式打音法の方が欠陥の検出率が高いことが確認された。
- 3)音圧の実効値で正規化した周波数スペクトルを用いた自己組織化マップ（SOM）を作成することにより、内部空隙を有する欠陥の大きさについて識別可能であることがわかった。
- 4)時間・周波数解析を行って周波数特性の時間変化を考慮すれば、音圧情報だけでは識別が困難な欠陥状態についても識別できる可能性があることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

Recently, it becomes very important to maintain the existing (aging) reinforced concrete structures in Japan. In order to minimize their life-cycle cost, many researches on the nondestructive evaluation technique have been conducted. However, most of nondestructive tests have problems related to their expense or measurement condition. Thus, visual inspection and conventional hammering sound test are usually applied as an effective method. But, the hammering sound test requires a high degree of skill to evaluate hammering sound and theoretical investigation has not well conducted on the acoustic mechanism of the hammering sound test. Therefore, this study appraises the capabilities of conventional hammering test and the rotary hammering test by means of the experiment using mortar specimens and existing bridges. Furthermore, acoustic analysis based on finite element method is conducted in order to grasp influences of defect on the hammering sound. The following results are obtained in this study.

- 1) It is recognized that maximum sound pressure increase due to the existence of inner defect. Whereas, damping performance decrease due to the effect of defect.
- 2) We confirmed the results of rotary hammering sound test shows clear and significant influence of inner defect on their impact sounds. Therefore as for the diagnostic capability, the rotary hammering test is superior to conventional hammering test.
- 3) Identification of defect condition by sound pressure information was attempted using the Self-Organizing Map algorithm and it is confirmed that the size of defect was clearly identified using the result of SOM.
- 4) In addition, combination use of sound pressure and frequency information by time-frequency analysis could evaluate precise defect conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 9,300,000  | 2,790,000 | 12,090,000 |
| 2010年度 | 2,100,000  | 630,000   | 2,730,000  |
| 2011年度 | 1,800,000  | 540,000   | 2,340,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 13,200,000 | 3,960,000 | 17,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：細目：土木工学・(構造工学・地震工学・維持管理工学)

キーワード：回転式打音検査，コンクリート構造物，非破壊診断，音響解析

### 1. 研究開始当初の背景

従来の非破壊診断法（超音波，AE法等）の殆どは，高額な計測機器が必要であったり，計測環境の条件が厳しいなど，屋外の現場計測では効力を発揮しにくい場合が多い。そのため，実際の橋梁等の点検は目視や打音法などの簡易な調査が主である。本研究では，最も簡易な非破壊診断の一つである打音法の精度と効率を向上させることを目的に開発された「回転式打音検査」の診断メカニズムを理論的に考察し，打音データの定量的な評価法について検討する。

### 2. 研究の目的

平成 17～18 年度に研究課題「回転式打音検査法によるコンクリート構造物の健全度診断システムの開発」(基盤C：代表 園田佳巨)を実施し，回転式打音検査の有効な実施方法について検証した。本課題では，打音法自体の診断メカニズムを音響学的に考察した上で，回転式打音データの有効な信号処理方法と欠陥状態の定量的な評価方法について検討するものである。

### 3. 研究の方法

回転式打音検査は，打音法の精度と効率を向上させるために開発されたもので，ロッド先端の金属製の回転部をコンクリート表面に押し当てながら回転させ，発生する打音の変化をもとに異常箇所を調べる方法である。

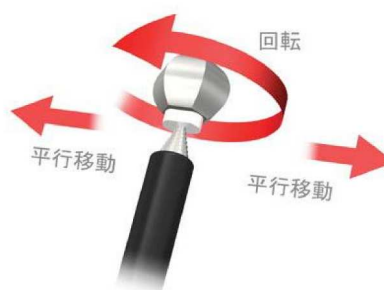


図-1 回転式打音検査器

研究では，回転式打音と従来のテストハンマーによる単発の打音データの両者を用いて，打撃力に対する最大音圧，周波数特性，減衰性の3つの観点から考察を試みた。

具体的には，様々な欠陥状態を模擬した供試体実験や浮き・剥離などの欠陥が認められ

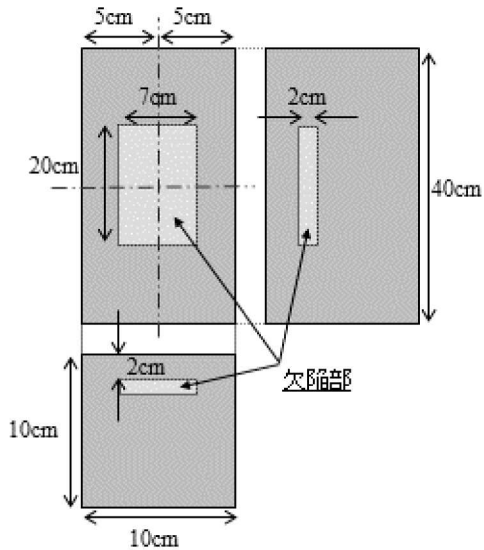


図-2 発泡スチロールを用いた欠陥供試体

る既設橋梁に対して打音試験を実施し、打音データの信号処理方法について検討を行った。図-2は、発泡スチロールを埋設したモルタル供試体の例を示したものである。

欠陥の有無を検出するために有効な打音データの特徴量として、最大音圧（可能であれば入力荷重に対する音圧比）、打音継続時間の2つを抽出し、両者を考慮した欠陥検出能力について検討した。

さらに、最大音圧で正規化した音圧スペクトル図を用いて自己組織化マップを作成することで、周波数特性を考慮した欠陥状態の識別を行ない、実構造物での現地計測データによる診断精度の検討を試みた。

#### 4. 研究成果

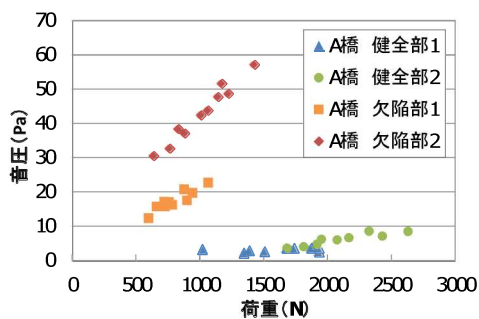


図-3 欠陥が音圧に与える影響（既設A橋）

1)既設橋梁の計測結果の例として、A橋の健全部と欠陥部における最大荷重と最大音圧の関係を図-3に示す。欠陥部では単位入力荷重当りの発生音圧が大きくなることが明瞭に確認できる。そこで、両者の比を振幅比（＝音圧最大値／荷重最大値）を有効な特徴量として用いることにした。

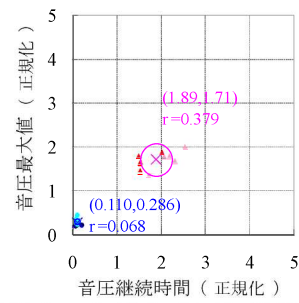


図-4 正規化した最大音圧と継続時間

2)図-4は音圧-時間波形を用いて、縦軸に正規化した最大音圧、横軸に正規化した音圧継続時間を散布図として示したもので、この図より健全箇所（青色データ）と欠陥箇所（赤色データ）で顕著な相違が認められ、2つの特徴量を併用すれば、欠陥の識別能力が大きく向上することが認められた。

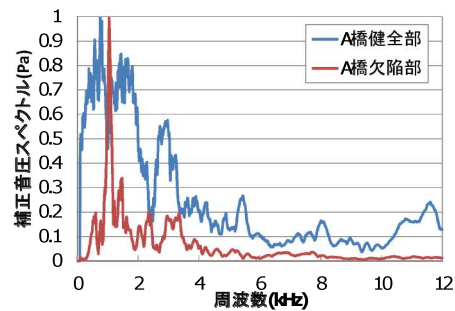


図-5(a) A橋の正規化後の音圧スペクトル

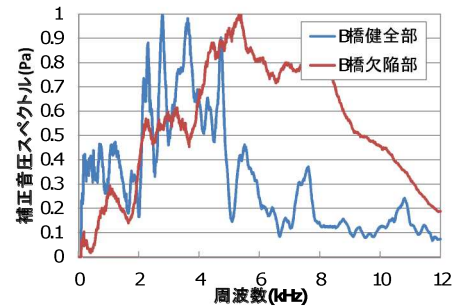


図-5(b) B橋の正規化後の音圧スペクトル

3)打音の周波数特性に関しては、収録データをFFT (Fast Fourier Transform) 処理を行った上で、最大スペクトル値が1になるような正規化処理を行った。得られた結果の一例として、A橋とB橋の健全部と欠陥部における音圧スペクトルを図-5に示す。実橋データの大半は、図-5(a)のように健全箇所であらゆる周波数帯で大きな音圧スペクトルを示し、欠陥部は狭い範囲に明瞭なピークスペクトルを示すが、図-5(b)のよ



うに欠陥部で広い周波数域に大きな音圧スペクトルを示す場合もあり、両者を識別可能な特定の傾向を見出すことは容易でないことが明らかとなった。

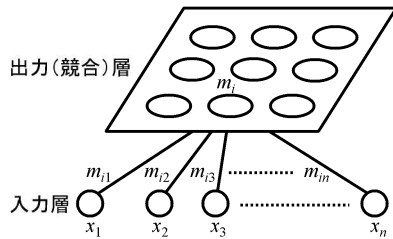


図-6 SOM の概要図

4) 3)で示したように、周波数特性を欠陥の識別に利用することが困難であったので、SOM (自己組織化マップ) の適用を試みた。具体的には、音圧スペクトルデータ横軸の周波数を次元とし、一定の周波数刻みの多次元データを学習させて  $30 \times 20$  の 2 次元ニューロンユニットを持つ SOM 上に投影した。

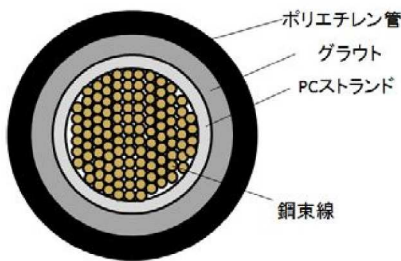


図-6 検討対象のグラウト充填部材

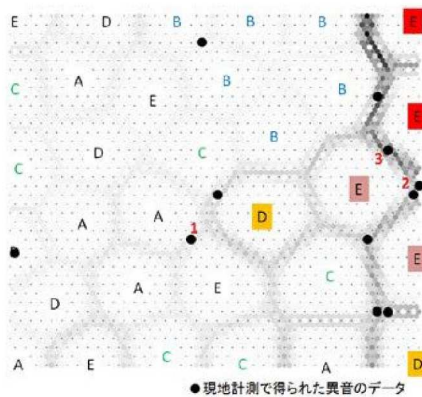


図-7 欠陥供試体に対する SOM マップ

SOM を用いた診断は種々の試験体や既設橋梁に対して行ったが、ここでは欠陥状態を模擬したグラウト充填供試体 (図-4 参照) の例を示す。作成した 5 種類の供試体は、供試体 A (健全)、供試体 B (グラウ

トにひび割れ)、供試体 C (グラウトの付着切れ)、供試体 D (内部空隙)、供試体 E (広範囲な内部空隙) で、得られた結果を図-7 に示す。この図より、結果の種類別に SOM 図上では異なる位置に配置されており、音圧スペクトル図から直接的な識別が困難だった周波数特性も、SOM を適用すれば欠陥と健全を判別できる有用な特徴量として利用できることが分かった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1) 園田佳巨, 中山 歩, 三好 茜, 吉田直紹: 回転式打音法の打音特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 部門 A, Vol.65 No.2, pp.514-522, 2009 年 6 月

2) 大曲正紘, 園田佳巨, 宗本 理: 回転式打音検査に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2143-2148, 2009 年 6 月

3) 三好 茜, 園田佳巨, 川端健太: 打音特性を用いた劣化診断に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2131-2136, 2009 年 6 月

4) 園田佳巨, 川端健太, 別府万寿博, 福井雄気: 打音データを用いたコンクリート内部欠陥の評価に関する基礎的考察, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.802-811, 2011 年 3 月

5) 川端健太, 別府万寿博, 園田佳巨, 福井雄気: 打音法によるコンクリート構造物の劣化診断への自己組織化マップの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.1763-1768, 2011 年 6 月

6) 中山慎也, 玉井宏樹, 坂田力: コンクリートの欠陥状態が判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.1811-1816, 2011 年 6 月

[学会発表] (計 5 件)

1) 川端健太, 園田佳巨: 有限要素法を用いた打音検査のシミュレーション解析, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, 2009 年 9 月

2) 宗本理, 園田佳巨: ニューラルネットワークを用いた打音法による既設コンクリート橋の健全度評価に関する基礎研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月

3) Yuuki FUKUI, Yoshimi SONODA: A fundamental study on the diagnosis method of existing RC structures using the characteristics of hammering sound,

The 3<sup>rd</sup> International Conference of European Asian Civil Engineering Forum,2011.9

4)福井雄気・園田佳巨・渡邊達郎：打音特性を用いた PC グラウト充填部材の健全度評価に関する基礎的考察,平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会,2012 年 3 月

5)渡邊達郎・福井雄気・園田佳巨・上野正人：自己組織化マップを用いた耐火煉瓦の内部欠陥の評価法に関する基礎的考察,平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会,2012 年 3 月

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

園田佳巨 (SONODA YOSHIMI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40304737

### (2)研究分担者

佐川康貴 (SAGAWA YASUTAKA)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10325508

別府万寿博 (BEPPU MASUHIRO)

防衛大学校・建設環境工学科・准教授

研究者番号：90532797

浅井光輝 (ASAI MITSUTERU)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90411230

玉井宏樹 (TAMI HIROKI)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20509632