

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560480

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） The development of diagnostic system on the rotary hammering test for deteriorated concrete structure

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

研究成果の概要：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、音響解析をベースとした基礎的な考察を行ったもので、以下の成果を得た。

- 1) 従来の単発式の荷重入力に比べ、打撃力のバラツキが小さく、調査範囲の打音を連続して聞き分けることが可能なため、欠陥の有無を識別し易い。
- 2) 欠陥がある場合には健全な場合と比較して、打音の音圧が増大するだけでなく、減衰性が低下することがわかった。従って、打音の特徴量として最大音圧と継続時間を選択して健全部との相対値を用いれば、欠陥の有無を検出する能力が向上することが確認できた。
- 3) 打音試験のシミュレーションを行った結果、入力荷重・境界条件等に依存する音圧値自体を再現することは困難であるが、欠陥の有無が与える影響を示す最大音圧比（相対値）に関しては、比較的再現が容易であることが認められた。
- 4) 劣化損傷が認められる実橋で従来法と回転式打音法の比較を行った結果、回転式打音法でコンクリート表面加速度を求めた場合が最も欠陥の検出率が高いことが分かった。しかし、同法で音圧を用いた場合の検出率も高いことから、加速度計の設置に要する手間を考えると、回転式打音法で音を計測する方法が精度と効率を兼ね備えた検査法であると言える。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・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

(1)平成 15～16 年度に研究課題「打撃系非破壊診断による鉄筋コンクリート構造物の健全性評価システムの構築」(基盤研究

C: 代表 園田佳巨) を実施し、従来の打音法を対象に構造物内部の欠陥を打音データで推定する場合の問題点や精度を向上させるための留意点を検討し、効率的か

つ精度良く構造物内部の欠陥を発見できる打音検査を実現するには、**打撃入力方法に工夫が必要**であることを実感し、本研究課題に取り組む契機となった。

- (2)平成 17～18 年度の 2 年間で、従来の打音法の打撃入力方法を改良した「回転式打音検査器」を対象に、その検査メカニズムの解明を目的とした研究への取り組みを開始した。

## 2. 研究の目的

コンクリート内部の欠陥状況と打音検査で計測される音圧データの定量的関係の把握を行うために、打音検査で得られる打音特性を、供試体実験および数値シミュレーションにより検証することを試みた。まず、事前に供試体を作製し打音検査を実施することで、欠陥の有無による打音特性の相違を明らかにする。続いて打音検査シミュレーションを行い、実験結果との比較を行う。

## 3. 研究の方法

回転式打音検査法は、打音検査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、発生する連続打音の変化をもとに異常箇所を調べる方法である。研究では、回転式打音検査法の診断メカニズムについて音響解析をベースとした基礎的な考察を試みた。

具体的には、擬似的な欠陥として内部に発泡スチロールを埋め込んだコンクリート供試体を作製し、打音検査を実施することで欠陥の有無による打音特性の相違を調べた。その上で、数値解析による打音試験のシミュレーションを行い、欠陥の有無が打音特性に与える影響について基礎的な考察を試みた。さらに、現実に劣化損傷が認められる複数のコンクリート橋に対して打音検査を実施し、健全部と欠陥部で得られる加速度・音圧特性の相違についてテストハンマーと回転式打音検査器で比較を行い、両者の欠陥検出性能について考察した。

以下に、個々の検討方法を示す。

### (1) 供試体実験の概要

供試体実験では、 $400 \times 100 \times 100 \text{mm}$  の矩形モルタル供試体を対象とし、欠陥の有無が打音特性に与える影響を検討するため、人工欠陥のある供試体と人工欠陥のない供試体を作製した。人工欠陥を含む供試体には、欠陥として矩形の空洞を想定し、厚さ  $20 \text{mm}$  の発泡スチロールを埋設した。人工欠陥の寸法は  $200 \times 70 \times 20 \text{mm}$  であり、埋設位置は供試体表面から  $20 \text{mm}$  の位置とした。試験は、インパルスハンマーを用いて実験供試体の表

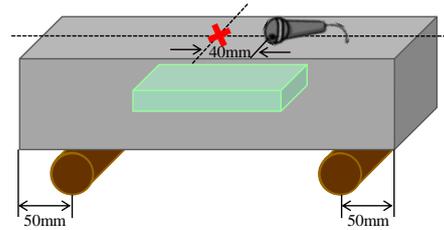


図-1 打撃位置と打音の測定位置

面に打撃を加え、発生する打音を騒音計により録音した。騒音計の計測可能な最大音圧レベルは  $140 \text{dB}$ 、周波数範囲は  $20 \text{Hz} \sim 20 \text{kHz}$  で、サンプリング周波数  $51.2 \text{kHz}$  で計測した。

供試体は、図-1 に示すように供試体の端から  $50 \text{mm}$  の位置を鉛直支持するように設置し、打撃は供試体表面の中央部分への 1 点入力とした。騒音計は打撃位置より水平方向に  $40 \text{mm}$ 、鉛直方向に  $10 \text{mm}$  離れた位置に配置した。

### (2) 打音試験シミュレーションの概要

打音検査シミュレーションの具体的な手順は、以下の 2 段階に分けられる。

- ①ハンマーがコンクリートに与える打撃力を入力荷重とした振動解析を行う。
- ②振動解析で得られたコンクリート表面の加速度応答を境界条件とし、開空間に伝播する打音を求めるために、以下の波動方程式を基礎式とした音響解析を行う。

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

ここに、 $p$  は音圧、 $c$  は音の伝搬速度

#### 1) 振動解析の概要

供試体実験で使用した  $400 \times 100 \times 100 \text{mm}$  のモルタル角柱供試体を解析対象とし、8 節点ソリッド要素を用いてモデル化した。欠陥として埋設した発泡スチロールは線形弾性体と仮定し、実験と同様に大きさは  $200 \times 70 \times 20 \text{mm}$  とし、位置は供試体表面から  $20 \text{mm}$  に設定した。境界条件は、供試体の支持軸上の節点は鉛直方向のみ拘束した。ただし、供試体が並進移動しないよう軸の端上の節点は固定した。入力荷重は、実験で得られた実測のインパルスハンマーの荷重特性を打撃位置に与え、供試体表面の時刻歴加速度応答を求めた。

#### 2) 音響解析の概要

音響解析は、供試体の周囲空間（直径  $480 \text{mm}$  の半球状の範囲）を解析領域に設定し、半球の境界上には音波が反射しないように

無限要素を配置した。音響解析に用いた空間（空気）の材料定数は、伝搬速度  $3.4 \times 10^5$  mm/sec, 密度  $1.225 \times 10^{-9}$  kg/mm<sup>3</sup> とした。

入力条件には、供試体との境界面の各節点に振動解析で得られた時刻歴加速度応答を与え、解析モデル上に設定した評価点における音圧を計算した。なお、音圧の評価点は、実験での打音の収録位置と同一の位置に設定した。

### (3) 既設橋を対象とした打音試験

対象橋梁ごとに健全箇所・欠陥箇所をそれぞれ2箇所ずつ選び、加速度計（東洋テクニカ、352C23）および音圧計（小野測器、MI-1233）を打撃点から5cm離れた位置に配置した。加速度計は下面にグリースを塗りコンクリート表面に接着し、コンクリート表面に対し法線方向の加速度を収録した。音圧計は手で支持し指向性の向きに打撃点が収まるようにした。テストハンマーおよび回転式打音検査器の計測回数は1箇所につきそれぞれ5回とした。サンプリング周波数はFFTアナライザーでは51.2kHz、データレコーダでは50kHzとした。

## 4. 研究成果

以下に供試体実験および音響解析によって得られたそれぞれ知見を示す。

### (1) 供試体実験結果

図-2に、健全な供試体および欠陥を有する供試体から得られる打音の時刻歴応答の平均を示す。これより、欠陥がある場合には健全な場合と比較して、打音の音圧が増大することがわかる。実際に、健全な場合の最大音圧の平均でそれぞれの最大音圧を除して比を求めると、欠陥がある場合には1.2~1.8倍になることが確認された。また、欠陥の有無により減衰性に相違があることもわかる。

最大音圧の10分の1まで音圧が減少するまでの時間を減衰時間と定義した場合、健全な供試体では8.3~13.1msec、欠陥がある供試

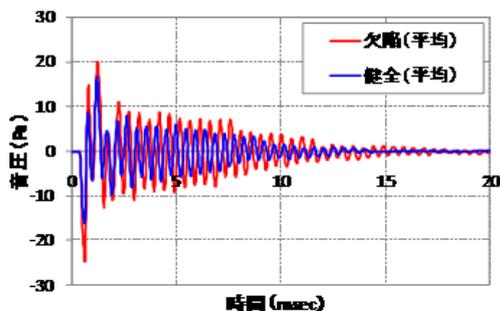


図-2 欠陥が打音特性に与える影響

体では11.3~17.6msecとなった。これらの結果より、打音の時刻歴応答における最大音圧や減衰性は、欠陥の有無を判別する際の有用な特徴量となり得るものと考えられる。

### (2) 振動-音響解析結果

図-3に音響解析により得られた打音の音圧-時間関係を示す。これより、実験と同様に欠陥を有する場合は健全な場合と比較して音圧が増大する傾向を再現できることが確認された。また、最大音圧値に関して実験値と比較すると、解析が1.3倍程度大きな値となったが、欠陥を有する場合と健全な場合の最大音圧比に関しては実験が平均で1.5、解析が1.7となり、音圧値より精度のよい結果が得られた。したがって、入力荷重・境界条件等に依存する音圧値自体を再現することは困難であるが、欠陥の有無が与える影響度を示す最大音圧比に関しては比較的再現が容易であると考えられる。

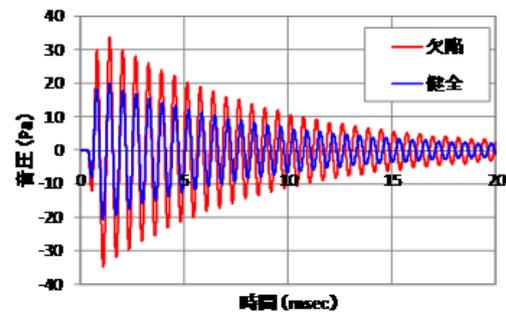


図-3 解析による打音特性

### (3) 既設橋を対象とした打音試験結果

劣化したコンクリート橋に対し、健全部と欠陥部をテストハンマーおよび回転式打音検査器により打撃し、コンクリート表面の加速度および音圧の計測を実施した。得られたデータからそれぞれの加速度・音圧の特性と検査器の検出率を比較した結果、テストハンマーの方が加速度・音圧の最大振幅と継続時間がいずれも大きくなった。

また、加速度と音圧をそれぞれ縦軸と横軸にとり、健全箇所の計測値の平均で正規化した散布図を作成し、健全部が正規分布に従うと仮定したうえで、2シグマ限界を超えるものを欠陥とみなし、欠陥部の有無を正しく検出した割合を検出率とした定義した結果、回転式打音検査器を用いてコンクリート表面加速度を評価した場合が最も検出率が高いことが分かった。しかし、回転式打音検査器で音圧を評価した場合の検出率も非常に高く、加速度計の設置に要する時間や手間を考

慮すると、回転式打音検査器を用いて音圧を評価する方法が、検出精度と作業効率を兼ね備えた検査方法であると言える。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① 中山 歩・園田佳巨・三好 茜・吉田直紹：音響解析を用いた回転式打音検査法に関する基礎的考察，コンクリート技術シリーズ76，コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術pp.43-50，2007
- ② 三好 茜・園田佳巨・中山 歩・吉田直紹：回転式打音検査器によるコンクリート構造物の変状調査，平成19年度土木学会西部支部技術発表会論文集pp.33-38，2007
- ③ 園田佳巨・中山 歩・三好 茜：音響解析を用いた回転式打音検査法の診断メカニズムに関する基礎的研究，構造工学論文集Vol.54A，pp.599-606，2008
- ④ 三好 茜・園田佳巨・中山 歩・吉田直紹：回転式打音検査によるコンクリート構造物の欠陥状態に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.30，pp.1723-1728，2008
- ⑤ 中山 歩・園田佳巨・三好 茜・吉田直紹：回転式打音の音圧特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.30，pp.1729-1734，2008

〔学会発表〕(計7件)

- ① 三好 茜・園田佳巨・中山 歩・吉田直紹：「回転式打音検査法」によるコンクリート構造物の健全度評価に関する基礎的研究，土木学会第62回年次学術講演会，2007.9(広島大学)
- ② 北本 渉・園田佳巨・森谷 晋：打音検査によるコンクリート内部の健全度評価に関する基礎的考察，平成19年度土木学会西部支部研究発表会，2008.3(長崎大学)
- ③ 三好 茜，園田佳巨，吉田直紹：「回転式打音検査法」によるコンクリート構造物の欠陥評価に関する基礎的考察，平成19年度土木学会西部支部研究発表会，2008.3(長崎大学)
- ④ 園田佳巨・中山 歩・吉田直紹：「回転式打音検査法」による打音特性に関する実験的考察，平成19年度土木学会西部支部研究発表会，2008.3(長崎大学)
- ⑤ 三好 茜，園田佳巨，吉田直紹：「回転式打音検査」による打音特性に関する基礎的考察，土木学会第63回年次学術講演会，2008.9(東北大学)
- ⑥ 宗本 理・大曲正紘・園田佳巨：劣化損傷したコンクリート橋梁の打音特性に関する

基礎的研究，平成20年度土木学会西部支部研究発表会，2009.3(九州大学)

- ⑦ 川端健太・三好 茜・園田佳巨：コンクリート構造物の打音検査に関する実験と解析を用いた基礎的研究，平成20年度土木学会西部支部研究発表会，2009.3(九州大学)

#### 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・助教  
研究者番号：10325508

##### (3) 連携研究者

別府万寿博 (BEPPE MASUHIRO)  
防衛大学校・建設環境工学科・准教授  
研究者番号：99999999