

# 論文 打音特性を用いた劣化診断に関する基礎的研究

三好 茜<sup>\*1</sup>・園田 佳巨<sup>\*2</sup>・川端 健太<sup>\*3</sup>

**要旨**：近年、構造物のライフサイクルコストの低減を図るため、簡易かつ低コストで実施可能な非破壊検査法の研究・提案が数多くなされている。打音検査は既に実務で広く用いられているが、作業効率や検査精度を向上させた診断システムの構築が必要であると考えられる。そこで、システム構築の基礎的な考察として、本研究では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。その結果、実験から欠陥の有無を簡易に判断可能な打音の特徴量を特定することができ、数値シミュレーションよりそれらの特徴量と欠陥の定性的な関係を再現可能であることが確認された。

**キーワード**：打音検査, 供試体実験, 音響解析

## 1. 緒言

近年、高度経済成長期に建設された多くの構造物が老朽化しており、適切な補修などによる維持管理が求められている。その一方で、経済的観念より構造物に対してもライフサイクルコストの低減を図ることが重要視されている。それに伴い、簡易かつ低コストで実施可能な非破壊検査法の研究・提案<sup>1),2)</sup>が数多くなされている。

従来の非破壊検査法として打音法や超音波探傷法、熱赤外線法などがあげられる。しかしそれらの手法の多くは、高額な計測機器を利用するものや、実験室などの理想的な条件下でなければ効力を発揮しにくい等の問題を有している。そのため、実際のトンネルや橋梁等の構造物の点検業務は、「目視」による調査が主体となって行われている。したがって、大規模な野外構造物に対して適用可能な非破壊検査法は限定されていると言わざるを得ない。一方、打音検査は、使用する検査器具はハンマーのみと比較的簡易に実施することができる手法である。さらに、天候や周囲の環境に関係なく、低コストで実施が可能であるため、従来から実務で利用されてきた。しかし、ハンマーの使用法や打撃音の判断に熟練性を必要とし、広範囲を検査対象とする場合には多大な労力と時間を要するなどの短所も有している。そのような短所を改善するため、打音検査に関する研究や開発が行われている。回転式打音検査器の開発もその一例であり、検査作業の効率化が進められている。また、打撃力や打撃音の判断が検査員の経験や知識に依存してしまう点に関しては、打撃および打音の解析を自動で行う専用の装置<sup>3)</sup>が開発されており、客観的に劣化の診断が可能となってきた。しかし、その装置も高価で大きいため使用できる場所が限られ、低コストで実施できるという利点も活かされない。したがって、検査員の経験や感覚に依存しない打音診断システムの構築が必要であると考えられる。

そこで本研究では、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し、特徴量を用いた判別が可能であるか検討した。続いて、著者らが提案した数値解析手法<sup>4)</sup>を用いた打音検査シミュレーションを適用し、実験結果との比較を行った。さらに、欠陥の位置を変化させた場合に打音の特徴量にどのような変化が見られるかを考察した。

## 2. 打音検査シミュレーションの概要

### 2.1 打音検査の特徴

非破壊検査法は、コンクリート構造物の維持管理において1次および2次検査として用いられる。特に打音検査は1次検査で多く用いられ、部分的な詳細調査の前に実施する事前診断として実際の現場で利用されている。打音検査とは、ハンマーで対象のコンクリート表面を軽打し、健全な部分と劣化がある部分の打音の相違をもとに劣化箇所を判別する手法である。利点としては、①ハンマーで構造物を軽打するという簡単な作業で行えること、②使用機器はハンマーだけであり、安価な道具で実施できることなどが挙げられる。しかし、打音はコンクリートの表面状態や鉄筋の有無などのコンクリート内部の条件で変化すると考えられるため、劣化の種類や程度を正確に診断することは困難であると考えられる。

### 2.2 解析概要

打音法に関する研究は、現在までに数多くなされており、例えば鎌田、六郷<sup>5),6)</sup>らの研究では、コンクリート内部の欠陥の状況（大きさや深さ）が打音特性に与える影響に関して、供試体実験と有限要素解析の両方による検討がなされている。しかし、既往の打音に関する解析的研究においては、コンクリートの表面振動に関する

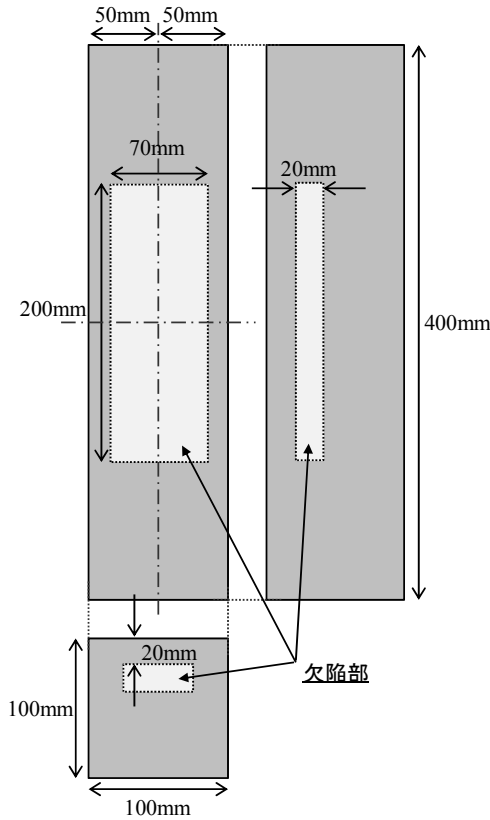
\*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程 (非会員)

表一 供試体の配合

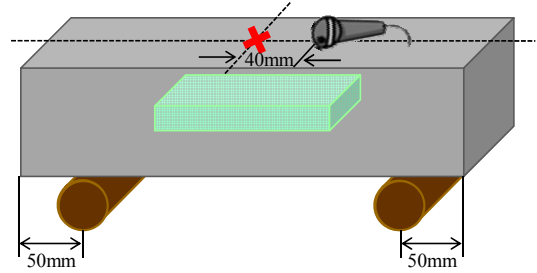
W/C (%)	S/C (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	S
50	2.25	295	590	1327



図一 欠陥を有する供試体

検討はなされているが、振動によって励起される音の伝搬を求める音響解析は行われていない。打音の診断システムを構築するためには、打音の発生過程を解析的に再現し、打音と欠陥状態の関係を理論的に把握することが重要であると考え、本研究では音響解析を試みた。なお、通常の音響解析では開領域の取り扱いが容易な境界要素法がよく用いられるが、コンクリート内部の欠陥条件として様々な状態を検討していくことを想定すると、モデル化における自由度が大きい有限要素法の方が有利であると考えられる。そこで本研究では、有限要素法を用いた打音検査シミュレーションを実施し、打音に関する解析的な検討を行った。

著者らが行う打音検査シミュレーションの具体的な手順として、まず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。次に、振動解析より得られる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音響解析<sup>7,8)</sup>を実施する。以上の2段階に分けてシミュレーションを行う。音響解析では以下の波動方程式を基礎式としている。



図二 打撃位置と打音の測定値

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

ここで、 $p$  は音圧、 $c$  は音の伝搬速度を表している。音響解析では、式(1)を所定の境界条件のもとで解き、任意点の音圧  $p$  を求める。このような手順により、打音検査の数値解析シミュレーションを試み、コンクリート内部の欠陥と打音特性との相関性に関して検討した。

### 3. 供試体実験

#### 3.1 対象供試体

供試体実験では、 $400 \times 100 \times 100$ mm の矩形モルタル供試体を対象とし実験を行った。モルタル供試体の配合を表一に示す。欠陥の有無が打音特性に与える影響を検討するため、健全な供試体と人工欠陥を有する供試体を作製した。欠陥を埋設した供試体の概略を図一に示す。欠陥として矩形の空洞を想定し、厚さ 20mm の発泡スチロールを埋設した。人工欠陥の寸法は  $200 \times 70 \times 20$ mm であり、埋設位置は供試体の打撃面から深さ方向に 20mm の位置とした。モルタル供試体の動弾性係数は 32.38GPa、密度は  $2.184\text{g/cm}^3$  である。ここで、動弾性係数に関しては、共鳴振動による動弾性係数試験 (JIS A 1127-2001) より式(2)を用いて算出した。

$$E_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f_2^2 \quad (2)$$

なお、 $E_D$  : 動弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $L$  : 供試体の長さ (mm)、 $A$  : 供試体の断面積 (mm<sup>2</sup>)、 $m$  : 供試体の質量 (kg)、 $f_2$  : 縦振動の一次共鳴振動数 (Hz) とする。供試体は水中養生とし、打設後 28 日以降で実験を行った。

#### 3.2 実験方法

打音検査で得られる打音特性を把握するため、インパルスハンマーを用いて実験供試体の表面に打撃を加え、発生する打音を騒音計により録音した。騒音計の計測可能最大音圧は 140dB、20Hz~20kHz の周波数域で正面入射レスポンス $\pm 1$ dB の応答特性を有する。今回は、サンプリング周波数を 51.2kHz として計測を行った。

供試体は、図二に示すように供試体の端から 50mm 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

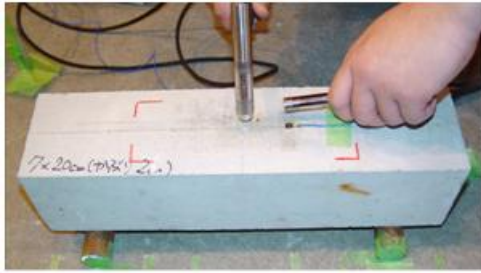


写真-1 実験の様子

水平方向に 40mm、鉛直方向に 10mm 離れた位置に配置した。測定は各供試体につき 20 回ずつ行った。供試体実験の様子を写真-1 に示す。

今回は欠陥の有無で打音に表れる特徴を考察するため、打音の時刻歴応答および周波数特性を比較した。周波数特性に関しては、録音した打音を数値データに変換し FFT (Fast Fourier Transform) 処理を行うことで求めた。

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) 打音の時刻歴応答特性

図-3 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いて比を求めると、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、図-3 より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と考えられる。

#### (2) 周波数特性

周波数特性では、まず騒音計の自己雑音レベルが 19dB 以下であり、それ以下のスペクトル値は計測器での測定が困難ということを考慮し、FFT 処理で得られる周波数特性において 19dB 以下のスペクトル値に関しては最大自己雑音レベルに補正した。次に、欠陥の有無によるピーク周波数の変動を比較するため、最大スペクトル値が 1 となるように補正を行った。図-4 に、補正後の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周波数特性の平均を示す。これより、健全な場合および欠陥を有する場合で共通して 2kHz 付近のスペクトル値が非常に卓越している（本供試体のたわみ共振 1 次周波数は 2121Hz とする）ことがわかる。したがって、この周波数は供試体の振動条件に起因するものと考えられる。一方、2kHz 付近以外の周波数帯の変動は非常に小さく、欠陥の有無による明確な相違がみられなかった。

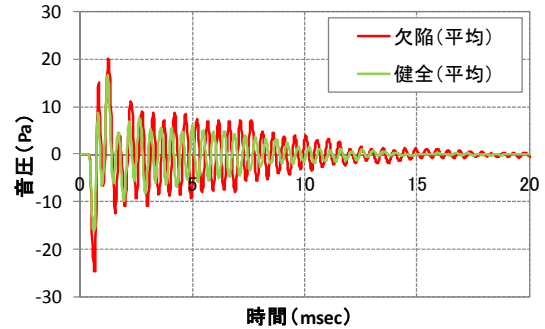


図-3 打音の時刻歴波形

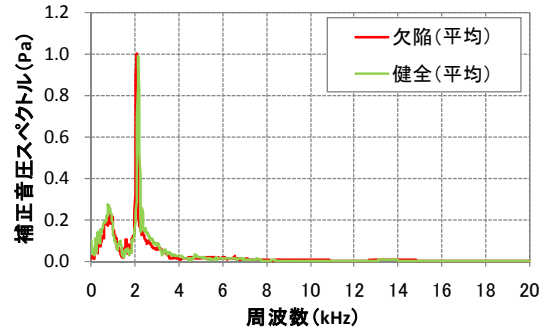


図-4 打音の周波数特性

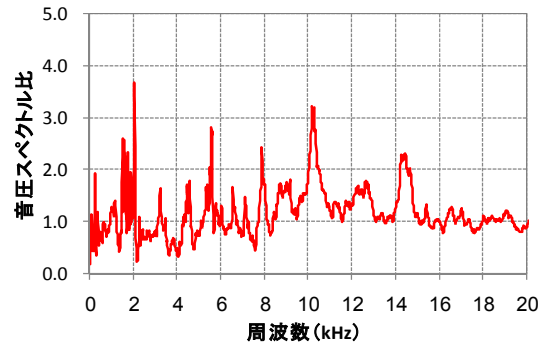


図-5 欠陥を有する供試体の音圧スペクトル比

そこで、以下に示す式(3)を用いて、健全な供試体の周波数特性の平均に対するそれぞれの周波数特性の比をスペクトル比と定義して、比較を行った。

$$S_{x,T}(f) = S_x(f) / |S_T(f)| \quad (3)$$

なお、 $S_{x,T}(f) : |S_T(f)|$  に対するスペクトル比、 $S_x(f) :$

健全あるいは欠陥を有する場合の周波数特性、 $|S_T(f)| :$

健全な場合の周波数特性の平均、 $f :$  周波数である。図

5 に、欠陥を有する場合のスペクトル比の平均を示す。

これより、欠陥の存在によりスペクトル比にいくつかの

顕著なピーク周波数が表れることがわかった。これらの

高いスペクトル比を示す周波数は、欠陥条件によって変

動すると考えられることから、欠陥の状態を示す有力な

特徴量と考えられる。

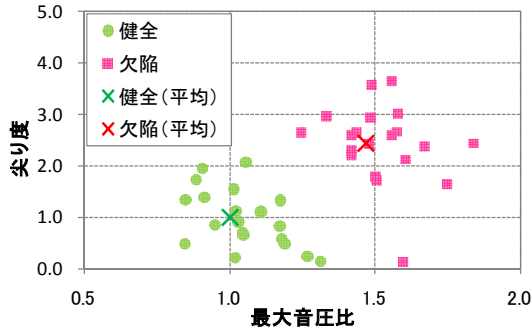


図-6 最大音圧比と尖り度の関係

### (3) 特徴量を用いた欠陥の有無の判別

(1), (2)より欠陥の有無で打音に表れる特徴量を特定することができた。そこで、打音の最大音圧および周波数特性の2つの特徴量を用いて、欠陥の有無の判別が可能であるか検討した。

最大音圧に関しては、スペクトル比と同様の考え方をを用いて、健全な場合の最大音圧の平均に対するそれぞれの最大音圧の比を求めた。一方、周波数特性に関してはスペクトルの平均に対する着目している周波数のスペクトルの割合を尖り度と定義し、スペクトル比において様々なピーク周波数に着目し尖り度を求めた。その一例として、図-6に、最大音圧比と6kHz付近のピーク周波数における尖り度の関係を示す。これより、健全な供試体では値のバラつきが小さく平均値を中心にまとまって分布しているが、欠陥を有する供試体では値のバラつきが大きいことがわかる。これは、打音の音圧は打撃力に左右されやすく、特に内部に欠陥を有する場合にはその影響が大きくなるためであると考えられる。しかし、図-6に示すように健全な場合と欠陥がある場合の区別は十分に可能であり、2種類の特徴量を用いることで判別精度も向上すると考えられる。

## 4. 打音検査シミュレーション

供試体実験より、打音検査で得られる打音特性を把握することができ、特徴量を用いることで欠陥の有無の判別も可能であることが確認された。ここでは、実験を数値解析を用いたシミュレーションにより再現することを試みる。さらに、実験より得られた打音の特徴量を用いて、内部の欠陥の位置が変化した場合の検討も行った。

### 4.1 振動解析の概要

振動解析では、供試体実験で用いた400×100×100mmのモルタル角柱供試体を解析対象とした。図-7に解析モデルを、表-2に供試体の材料定数を示す。供試体は8節点ソリッド要素を用いてモデル化した。解析モデルの節点および要素の総数はそれぞれ9471、8000である。

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、材料定数には表-2に示す値を用いた。供試体実

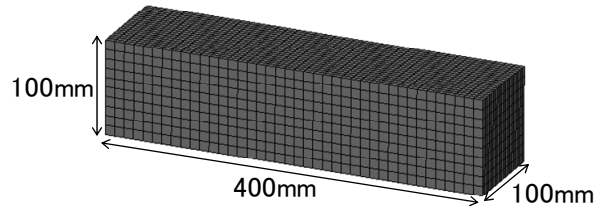


図-7 振動解析のモデル

表-2 振動解析で用いた材料定数

	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
供試体	$3.2 \times 10^4$	0.2	2.2
欠陥部	$2.2 \times 10^3$	0.0	$2.9 \times 10^{-2}$

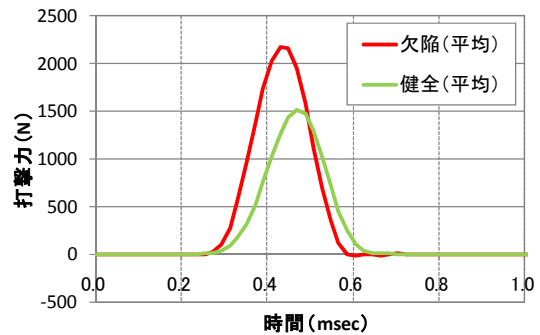


図-8 荷重の入力条件

験と同様に欠陥の大きさは200×70×20mmとし、位置は供試体表面から20mmに設定した。また、欠陥位置が打音に与える影響を考察するため、40mm、60mmの位置に同じ大きさの欠陥を設定した。

実験結果より健全な場合と欠陥がある場合では打音の減衰性に大きな相違があることが確認されているが、実際の減衰特性については考察不足であるので、本解析では供試体の構造減衰として2.0%を与えた。この値は、コンクリート構造物の減衰定数における一般的な値に基づいている。境界条件として、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。入力荷重に関しては、図-8に示す供試体実験で得られた健全な場合と欠陥がある場合のインパルスハンマーの荷重特性を、それぞれの供試体の打撃位置に入力した。この振動解析により、供試体表面の時刻歴加速度応答を求める。

振動解析には、有限要素解析ソフトウェアMSC.Nastranを用いて行った。解析時間刻みは $5.0 \times 10^{-7}$  secで、解析時間は $5.0 \times 10^{-2}$  secとした。

### 4.2 音響解析の概要

音響解析では、供試体の周囲空間を解析対象とした。音響解析モデルを図-9に示す。直径480mmの半球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

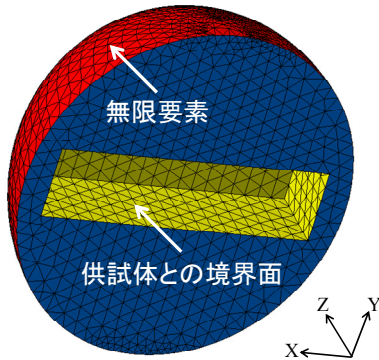


図-9 音響解析モデル

うに無限要素<sup>9)</sup>を配置した。解析モデルの節点および要素の総数はそれぞれ 5804, 28669 である。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。

入力条件として、図-9 に示す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、設定した評価点における音圧を計算した。今回の評価点は、実験での打音の収録位置と同一の位置に設定した。

解析には、汎用音響解析ソフト LMS.Acoustics を使用し、時間積分法として Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用いた。音響解析で用いた時間刻みと解析時間は、振動解析の場合と同一とした。

#### 4.3 解析結果および考察

##### (1) シミュレーションの妥当性の検討

図-10 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、実験結果同様、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という傾向を解析で再現できることが確認された。具体的に、最大音圧値に関して実験と解析で比較すると、解析が 1.3 倍程度大きな値となったが、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、音圧値よりも精度のよい結果を得られた。したがって、最大音圧比に関しては実験で得られる特徴をシミュレーションで再現可能であると考えられる。

図-11 に解析で得られた打音の周波数特性を示す。これより、スペクトル値が最大となる周波数は 1.5kHz 付近となり実験とは若干の相違はあるが、健全な場合および欠陥を有する場合で共通した周波数帯にピークをもつという特性に関しては再現できたことが確認された。また、図-12 に実験と同様の手法で求めた音圧のスペクトル比を示す。これより、1kHz 付近や 6kHz, 10~12kHz 付近でスペクトル比が大きくなり、広い範囲に複数のピーク周波数が存在することがわかる。実験でも 2~14kHz と広範囲に複数のピーク周波数がみられることから、スペクトル比の値自体には相違はあるが、ピーク周波数域

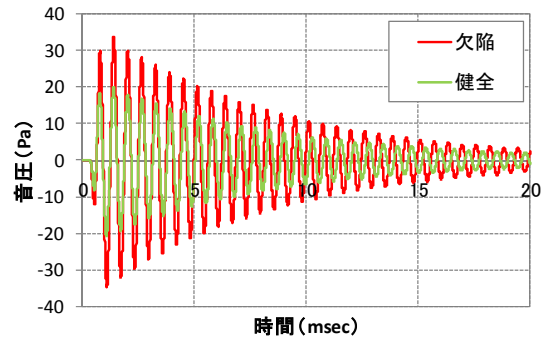


図-10 解析における音圧 - 時間関係

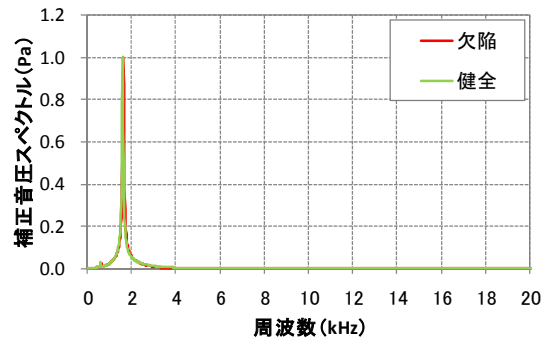


図-11 解析における周波数特性

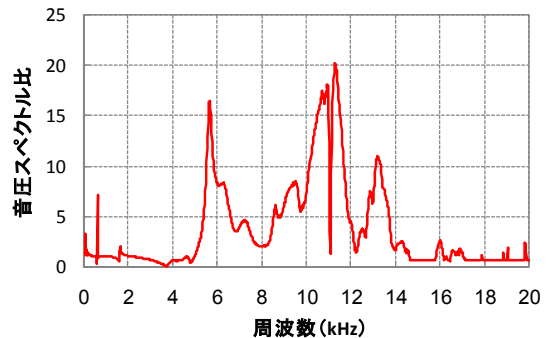


図-12 解析における欠陥の音圧スペクトル比

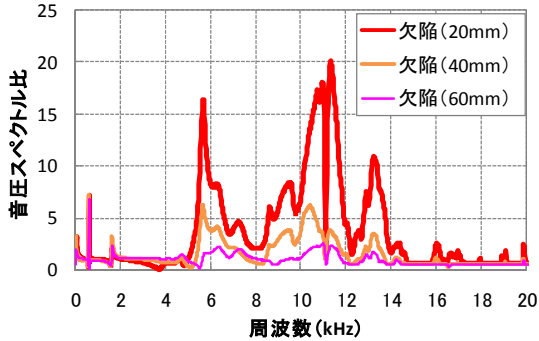
は解析で概ね再現できていると考えられる。したがって、様々な欠陥が打音に与える影響に関して検証する際、打音の最大音圧比やピーク周波数の特性に関して、解析によるシミュレーションで把握可能であると考えられる。

##### (2) 欠陥位置が打音に与える影響

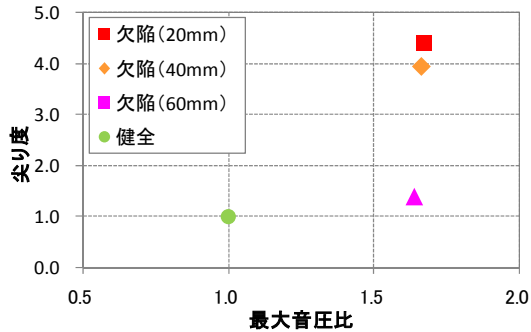
打音検査シミュレーションを用いて、欠陥の位置を変化させた場合の打音特性の変化を検証した。表-3 に最大音圧比の変化を示す。欠陥の位置が深くなるにつれて最大音圧比が小さくなる傾向にあることがわかった。また、図-13 に音圧のスペクトル比を示す。こちらも最大音圧比と同様に、欠陥が深くなるにつれてそれぞれのピーク周波数におけるスペクトル比の値が小さくなっていくことが確認できた。これらの結果から、図-14 に示すような打音の最大音圧比と 6kHz 付近のピーク周波数における尖り度の関係を求めた。すると、健全な場合と欠陥がある場合で分布に明確な相違がみられ、欠陥の位置が深くなるにつれて、健全の値に近づく結果となった。

表一3 位置変化に伴う最大音圧比の変化

	欠陥 (20mm)	欠陥 (40mm)	欠陥 (60mm)	健全
最大音圧比	1.67	1.66	1.64	1.00



図一13 位置変化に伴う音圧スペクトル比の変化



図一14 位置変化による最大音圧比と尖り度の関係

このような図を用いることで、欠陥位置の変化により打音の最大音圧比や尖り度の変化の傾向を可視化することが可能であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、打音検査で得られる打音の特性を実験および数値シミュレーションにより検証した。まずは、供試体実験を行い欠陥の有無により変化する打音の特徴量を把握した。続いて、著者らが提案した打音検査シミュレーションを用いて実験の再現を試み、さらに欠陥の位置の変化が打音の特徴量に与える影響について考察した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 供試体実験より欠陥の有無が打音に与える影響を検討した結果、健全な場合と比較して欠陥を有する場合には打音の音圧が増大する傾向にあり、最大音圧比は 1.2~1.8 程度となることがわかった。また、音圧の減衰性に関しても、欠陥を有する場合には減衰性が低下する傾向があることが確認された。周波数特性としては、健全な場合に対する欠陥を有する場合は音圧スペクトルの割合を表すスペクトル比を求めることで、欠陥の有無による相違が明確化することがわかった。これらの特性は欠陥の有無を判別す

る際の基準となり得る特徴量であると考えられる。

- (2) 実験の結果において、音圧スペクトル比が大きくなる周波数に着目し尖り度を求め最大音圧比との相関性を検討すると、欠陥を有する場合は最大音圧比も尖り度も大きくなる傾向にあることがわかった。複数の特徴量を用いることで、欠陥の有無に関する判別が容易になると考えられる。
- (3) 実験を想定した数値シミュレーションでは、欠陥を有する供試体では、健全な供試体と比較して打音の音圧が増大するという傾向を再現可能であることが確認され、最大音圧比も精度の良い結果を得ることができた。また、周波数特性に関する考察から、音圧スペクトル比の値には大きな相違はあるが、欠陥がピーク周波数に与える影響を解析で再現できた。
- (4) 数値シミュレーションを用いて欠陥位置の影響を検討した結果、最大音圧比と尖り度の関係を求めることで、欠陥位置が深くなるにつれて最大音圧比および尖り度が減少する傾向になることがわかった。

## 参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004
- 2) 土木研究所・日本鋼構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，技報堂出版，2003
- 3) 川上 純，須田 健：トンネル覆工コンクリート打音診断器の開発-トンネルドクター「ソニック・マイスター」の開発-，建設の機械化，pp30-37，2003
- 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，No.3，pp.1723-1728，2008.7
- 5) 鎌田 敏郎，浅野 雅則，国枝 稔，六郷 恵哲：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用，土木学会論文集，No.704/V-55，pp.65-79，2002.5
- 6) 浅野 雅則，鎌田 敏郎，六郷 恵哲，児玉 一郎：コンクリートの欠陥評価における打撃音波形パラメータの役割，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，pp.1583-1588，2003.7
- 7) 安田 仁彦：機械音響学，コロナ社，2004
- 8) 一宮 亮一：機械系の音響工学，コロナ社，2005
- 9) 加川 幸雄，村井 忠邦，山淵 龍夫，土屋 隆生：FEM プログラム選 3 (音場・圧電弾性振動場)，森北出版，1996