論文　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

三好　茜[*1]・園田　佳巨[*2]・中山　歩[*3]・吉田　直紹[*4]

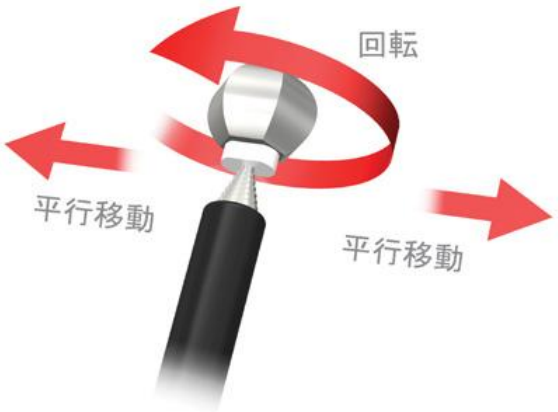
要旨：非破壊検査法の中で，比較的簡易かつ低コストで実施が可能な打音検査法の検査精度と作業効率を改善するために回転式打音検査が開発された。この検査法は，金属製の回転部分を有している検査器をコンクリート構造物表面に軽く押しあてながら移動・回転させ，一定間隔で発生する連続打音をもとに内部の異常箇所を探査する手法である。本論文は，音響解析を用いて回転式打音検査のシミュレーションを行い，コンクリート供試体内部の欠陥の有無や欠陥状態と打音の相関性に関して考察した。その結果，数値解析シミュレーションを用いて，回転式打音検査により欠陥の有無の把握が可能であることが確認された。

キーワード：回転式打音検査，音響解析，スペクトル

1. 諸言

近年，老朽化した既存構造物に対して適切に維持・補修管理を行い，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。コンクリート構造物においても，トンネル覆工の剥離事故に代表されるように，経年劣化等の要因により使用性や安全性が低下するのは避けられないため，定期的に検査を行い耐久性の評価を行う必要がある。しかし，従来の非破壊検査法（超音波探傷法，レーザー法，熱赤外線影像法など）は，高額な計測機器を利用するものが多く，計測環境に対する適用条件が厳しいため実験室等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[1)]も有している。そのため，実構造物の点検業務では「目視」による調査が主体となっている。

また，比較的簡易に行うことができる非破壊検査法として，従来から実務で使用されてきた打音検査がある。この手法は簡易かつ低コストで実施可能であるが，ハンマーの使用方法や打撃音の判断に熟練性を必要とするだけでなく，広範囲の検査には多大な労力と時間を要するなどの短所を有している。そこで，打音検査の検査精度と作業効率を飛躍的に改善することを目的として回転式打音検査器が開発された。回転式打音検査は，**図－1** に示すようなロッド先端に金属製の回転部分を有している検査器を使用し，金属部分をコンクリート表面に押し当てながら回転させ，一定間隔で発生する連続打音の変化をもとにコンクリート内部の異常箇所を探査する手法である。本手法の特徴としては，従来の打音検査に比べ検査員による打撃力のばらつきが低減されること，検査器を転がすことで打撃点が連続的に移動し広範囲を短時間で検査可能であることなどが挙げられ，検査対象が大規模な野外構造物に対しても簡易かつ有効な手法であると考えられる。しかし，現時点では，回転式打音検査においても打音による診断基準は定量的に明確にされておらず，経験的な感覚に依存していることから，診断精度を向上させるためには，回転式打音の特性を踏まえた診断システムの構築を行う必要がある。



図－1　回転式打音検査器

本研究では，数値解析による回転式打音検査のシミュレーションを行い，打音特性を理論的に検証することで，コンクリート内部の欠陥の有無を解析的に把握するための基礎的検討を試みる。

2. 回転式打音検査のシミュレーション

2.1 回転式打音検査の特徴

*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　博士（工学）(正会員)
*3 西部ガス株式会社　(正会員)
*4 （株）第一復建　道路構造部　(非会員)

図－2　回転式打音検査で得られる正常箇所と異常箇所の打音の波形イメージ

これまでの検査実績により，回転式打音検査で得られる打音特性には幾つかの特徴があることが確認されている。第一の特徴としてコンクリート内部の異常の有無により，コンクリート表面の振動によって発生した音波の伝播特性が異なることがあげられ，異常箇所では音圧が大きくなることが多い[2)]。第二の特徴として，**図－2**の打音波形の典型的なイメージ[3)]にも見られるように，正常箇所と異常箇所では打音の減衰特性に大きな相違があり，異常箇所では大きな反響音が長時間継続する傾向がある。第三の特徴としてはピーク周波数の相違があげられる．一般的な打音検査では，浮き・剥離等の異常箇所で低周波音が得られるように言われているが，回転式打音検査では逆に異常箇所で高周波域の音圧が大きくなる傾向がみられる。これは，通常の打音検査と比較して回転式打音検査がコンクリート表面に与える打撃力の継続時間が短いという特徴[2)]が，従来の手法では得られない高周波音を発生させているためであると考えられる。

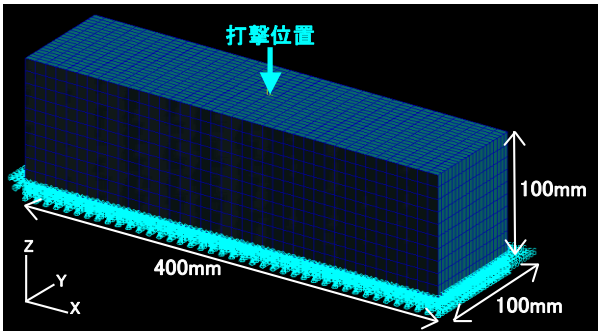
2.2 解析手法の概要

打音検査は，コンクリート表面に検査器で打撃を与える際に発生する音がコンクリート内部の欠陥等の有無によって変化することを利用して診断する手法である。したがって，打音検査を理論的に検討するには，現実の検査条件（コンクリートの内部の状態や周囲空間の条件など）を忠実に再現した音響解析を行う必要がある。

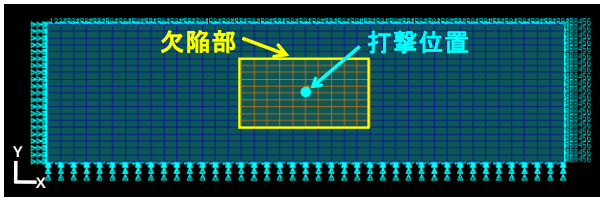
通常の音響解析には，有限要素法と境界要素法の2種類が用いられ，開空間に対応する半無限境界条件を満足するグリーン関数を直接利用した境界要素法の方が，一般には音響解析に適していると言われている[4)]。

しかし，本研究ではコンクリート内部の欠陥状態を変化させ，欠陥状態が打音に与える影響を検討するため，打音を発生させる打撃力による振動応答についても解析を行う必要がある。したがって，一連の解析を統一的に行うには，有限要素法の方が有利であると考えられる。そこで今回は，有限要素法を用いて回転式打音検査のシミュレーションを試みた。

数値シミュレーションでは，検査器がコンクリート表面に与える打撃力を入力値とした振動解析を予め実施し，振動解析により得られたコンクリート表面の加速度データを入力とした音響解析 [5)6)]を行う。以上の手順により，



図－3　振動解析のモデル



図－4　欠陥位置および打撃位置
（欠陥：100×50×20mm）

表－1　振動解析で用いた材料定数

ヤング率 [N/mm²]	ポアソン比	密度[g/cm³]
3.238×10⁴	0.2	2.184

コンクリート周囲空間内の任意の位置に伝播する打音の時間的変化を計算する。

音響解析は，以下の波動方程式を基礎式としている。

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

ここで，p は音圧，c は音の伝播速度を表している。音響解析では，式(1)を適切な境界条件のもとで解き，任意点の音圧 p を求める。

具体的には，対象であるコンクリート構造物およびその周囲空間を解析領域とし，コンクリート表面に検査器による打撃力を入力し振動させ，得られるコンクリート表面の時刻歴加速度データを入力し，音響解析を行うことで空間内に設定した評価点における打音特性を求める。本解析で，コンクリート内部の欠陥の有無が打音にどのような影響を与えるか解析的に確認し，続いて欠陥位置

や欠陥形状の変化と打音特性の相関性について検討する。

3. 回転式打音検査シミュレーション

3.1 振動解析の概要

振動解析では，400×100×100mm のコンクリート角柱供試体を解析対象とし，検査器による打撃を入力した際の表面振動の加速度応答を求める。**図－3** および**図－4** に解析モデルおよび欠陥部の位置を示す。また，供試体は 8 節点ソリッド要素でモデル化した。**表－1** に解析に用いたコンクリートの材料定数を示す。

回転式打音検査で得られる打音には正常箇所と異常箇所で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，本解析では構造減衰定数として 1.0%を設定した。

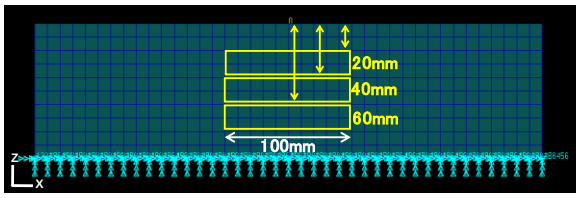
欠陥については空洞状態を想定し，供試体中央部に配置した。また，位置や形状を変化させた場合の打音特性を比較するため，位置については**図－5** のように 100×50×20mm の欠陥を供試体表面より（Z 軸負方向に）20mm，40mm，60mm と変化させた。形状については，**図－6**，**図－7** に示すように欠陥寸法を(1)供試体の奥行き方向（Y 軸方向）に変化させた場合，(2)供試体の奥行き方向（Y 軸方向）および水平方向（X 軸方向）に変化させた場合の 2 通りを検討した。(1)の場合の欠陥寸法は 100×30×20mm，100×50×20mm，100×70×20mm であり，(2)の場合の欠陥寸法は 100×50×20mm, 160×60×20mm, 200×70×20mm である。形状を変化させた場合の欠陥の位置はコンクリート上面から 20mm とした。今回の欠陥寸法は，実際の構造物内部の欠陥（剥離や浮きなど）よりはるかに大きいが，基礎的な考察の段階であるため，欠陥が打音に与える影響を明確に把握するために上記程度の大きさとして考察した。境界条件として，供試体モデルの底面の節点の全自由度拘束とした。

検査器の打撃力を想定した入力荷重は，事前に行った打撃力評価解析 [2]により決定した。具体的には，検査器先端の回転・衝突運動を模擬した数値シミュレーションを行い，回転式打音検査による打撃力の特徴を解析的に求めた。その際，検査作業時の点検員の個人差（動作の相違による検査器の移動速度やコンクリート表面への支圧力などの相違）を考慮し，**表－2** に示すように 3 通りの解析条件を設定した．得られた解析結果をもとに，点検員の個人差を考慮した平均的な荷重として，**図－8** に示すような大きさ 1000N，継続時間 0.2msec の三角波を想定し，供試体表面の中央に入力した。

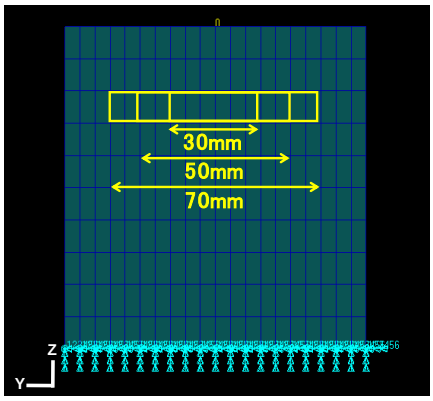
振動解析には，汎用有限要素解析ソフトウェア MSC.Nastran を用いて行った。解析時間刻みは 20μsec，解析時間は 0.04sec とした。

3.2 音響解析の概要

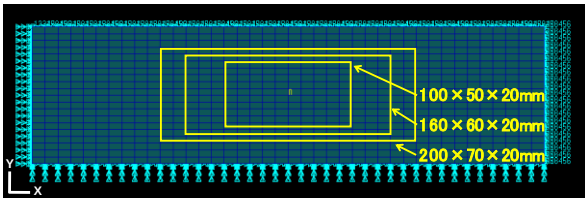
音響解析では，供試体が健全な場合と欠陥を有する場合で発生する打音の特性を評価するため，供試体の周囲空間を解析対象とした。周囲空間を直径 480mm の半球上の領域でモデル化し，空間の境界面には音波が反射しないよう無限要素 [7]を配置した。音響解析モデルを**図－9** に示す。音響解析に用いた空間の材料定数は，伝播速度



図－5　欠陥位置を変化（欠陥：100×50×20mm）



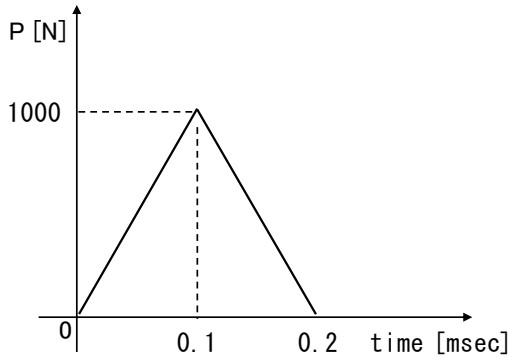
図－6　欠陥形状の変化（1）（欠陥位置：20mm）



図－7　欠陥形状の変化（2）（欠陥位置：20mm）

表－2　打撃力評価解析の解析条件

	ケース1	ケース2	ケース3
検査器の移動速度（mm/sec）	500	1000	1200
支圧力（N）	1.0	5.0	6.0



図－8　振動解析に用いる入力荷重

3.4×10^{2}m/sec，密度 1.225×10^{-3}g/cm^3 とした。打音の評価点は供試体表面から 100mm 離れた空間内に設定した。なお，解析モデルの節点および要素の総数はそれぞれ 5771，28507 である。

入力条件として，**図－10** に示すように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データを与え，コンクリート供試体が健全な場合と欠陥を有する場合の打音の音圧 - 時間関係およびスペクトルを比較するとともに，欠陥の位置や形状の変化が音圧特性に与える影響についても考察した。

音響解析には，汎用音響解析ソフト LMS.Acoustics を使用し，時間積分法として Newmark β 法（β＝1/4）を選択した。また，解析時間刻みおよび解析時間は振動解析と同一とした。

3.3 解析結果および考察

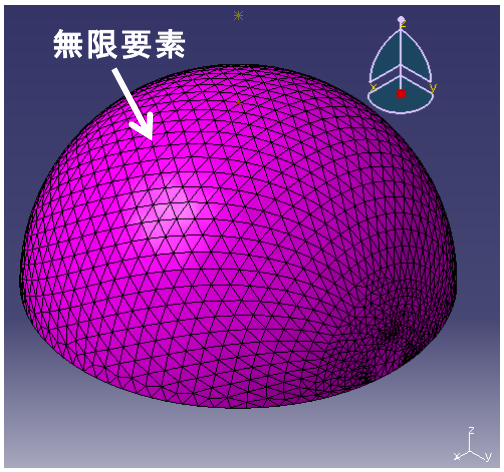
(1) 欠陥の有無の把握

図－11 および**図－12** に，健全な供試体および欠陥（形状 100×50×20mm，位置 20mm）を有する供試体に打撃を与えた場合の音圧 - 時間関係および打音スペクトルを示す。音圧の時間変化より，欠陥を有する場合は健全な場合と比較して，打音の音圧が増大する傾向にあることが確認された。また，健全な場合は打撃により増加した音圧はすぐに減衰しているが，欠陥を有する場合は音圧の増加後も減衰せずに長時間継続することが確認された。また，音圧スペクトルより，欠陥を有する場合は 8000Hz 付近のピーク周波数のスペクトル値が増加することがわかる。これらの結果から，回転式打音検査で得られる打音の特徴を数値解析で得ることが可能であり，供試体が健全な場合と欠陥を有する場合の打音特性が明確に異なり，欠陥の有無を解析的に把握することが可能であることが確認された。

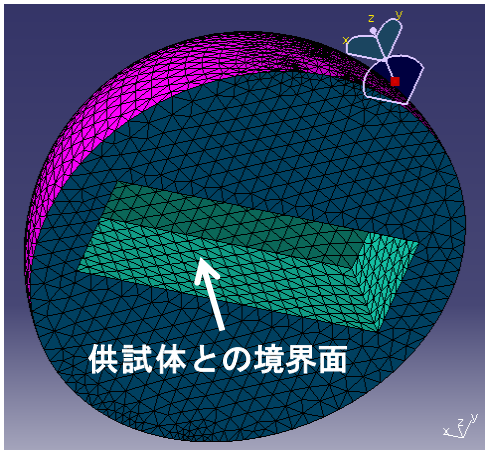
(2) 欠陥位置や欠陥形状を変化させた場合

図－13 および**図－14** に，欠陥の位置を供試体表面より（Z 軸負方向に）20mm，40mm，60mm と変化させた場合の音圧 - 時間関係および打音スペクトルを示す。これらの結果より，欠陥の位置が供試体表面に近いほど，打音の音圧が増加することが確認された。また，スペクトルより欠陥位置が深くなるほどピーク周波数が低周波域に変動することが認められた。

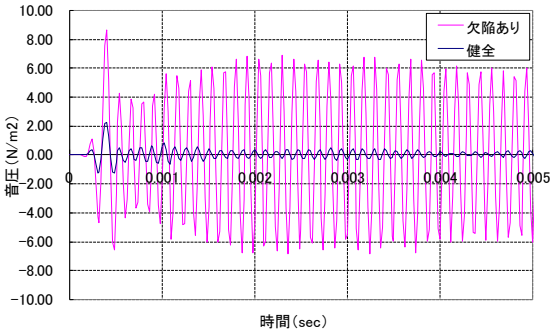
図－15 および**図－16** に，欠陥の形状を奥行き方向（Y 軸方向）に変化させた場合の音圧 - 時間関係および打音スペクトルを示す。音圧の時間変化より，欠陥の形状の拡大にともない打音の音圧が増加することが確認された。また，減衰性を示す指標として最大音圧の 1/10 まで音圧が低下するまでの時間を求めると，**表－3** に示すように欠陥が大きくなるにつれて長くなっており，減衰性が低下することが確認された。一方，スペクトルより欠陥が



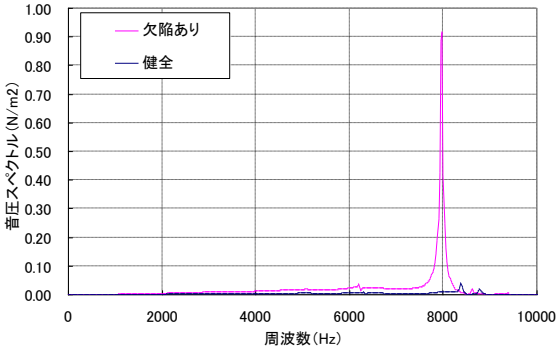
図－9　音響解析のモデル



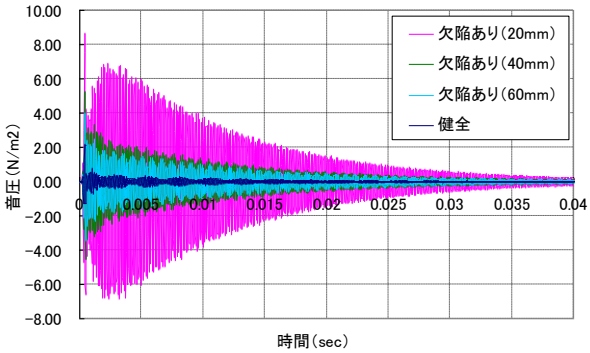
図－10　音響解析の境界条件



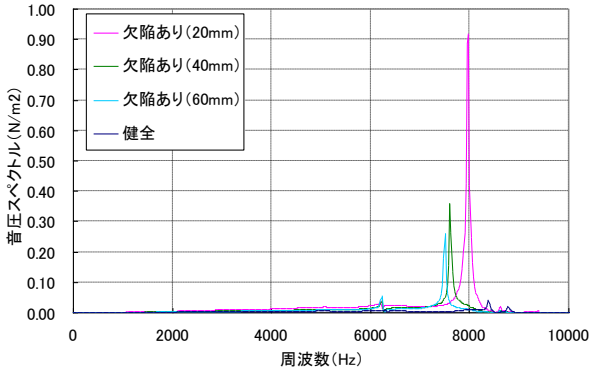
図－11　音圧 - 周波数関係



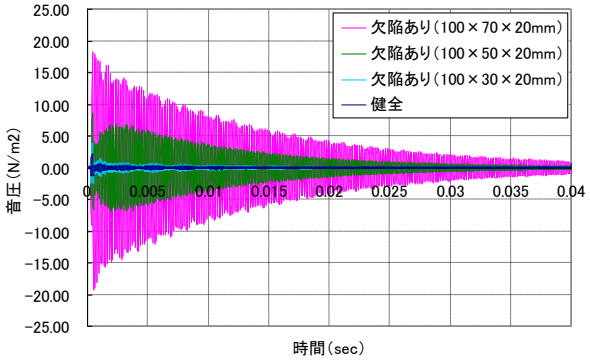
図－12　打音スペクトル



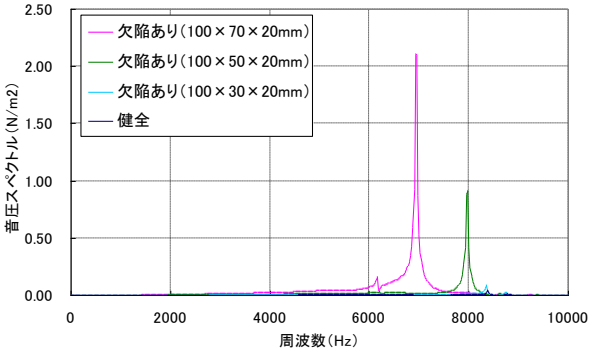
図－13　音圧 - 時間関係(欠陥位置を変化)



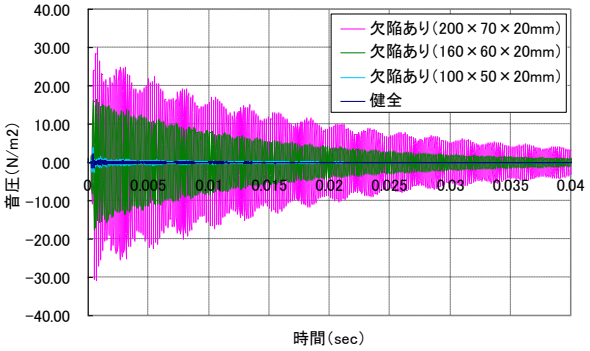
図－14　打音スペクトル(欠陥位置を変化)



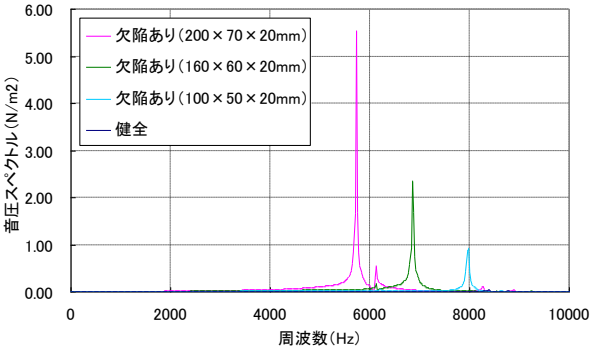
図－15　音圧 - 時間関係(欠陥形状を変化(1))



図－16　打音スペクトル(欠陥形状を変化(1))



図－17　音圧 - 時間関係(欠陥形状を変化(2))



図－18　打音スペクトル(欠陥形状を変化(2))

大きくなるにつれて，高周波域のピーク周波数が低周波域に変動することがわかる。

図－17 および**図－18** に，欠陥の形状を奥行き方向（Y 軸方向）および水平方向（X 軸方向）に変化させた場合の音圧 - 時間関係および打音スペクトルを示す。位置や奥行き方向のみを変化させた場合と同様に音圧が増大しており，最も大きい欠陥を有する場合の波形にはうなりのような特徴が現れている。これは，打音が狭い周波数領域に 2 つのピーク周波数を持つ場合に現れるものであり，**図－16** および**図－18** より 8000Hz 付近のピーク周波数が欠陥の拡大にともない低周波域に変動したことで生じたものであると考えられる。欠陥の形状も奥行き方向のみに変化させた場合より大きいため，ピーク周波数の変動は大きくなっている。

表－3　減衰時間と欠陥形状の関係

欠陥の大きさ (mm)	100×70×20	100×50×20	100×30×20	健全
最大音圧の1/10の音圧に減衰するまでの時間 (sec)	0.03126	0.02666	0.01074	0.0076

これらの結果より欠陥位置や欠陥形状を変化させた場合，ピーク周波数が変動することが認められた。しかし，位置を変化させた場合も形状を変化させた場合も同様に低周波域への変動であるため，周波数特性のみで両者の区別をすることは困難であると考えられる。両者の区別を含めた欠陥状態の判別には，さらに詳細な解析を行い検討する必要があると考える。

4. 結言

本研究では，回転式打音検査の検査器による打撃力を入力値とした供試体の振動解析と振動解析で得られたデータを用いた音響解析により，回転式打音検査のシミュレーションを行った。解析の結果，回転式打音検査で得られる打音の幾つかの特徴を解析的に把握することができた。本研究の主な成果を以下に示す。

(1)回転式打音検査のシミュレーションより，コンクリート内部に欠陥を有する場合，健全な場合と比較して打音の音圧が増大し，減衰性が低下する傾向が明確に認められた。また，高周波域のピーク周波数のスペクトル値が増加した。これらの結果より，欠陥の有無が打音に与える影響を解析的に把握可能であると考えられる。

(2)欠陥の位置が供試体表面に近くなるにつれて，音圧が増大し，ピーク周波数が高周波域に変動することが確認された。また，欠陥の形状が大きくなるにつれて，位置の変化と同様に音圧が増大し，高周波域のピーク周波数が低周波域に変動することが認められた。

今後，実際の検査や実験で得られた打音の実測データを解析結果と比較することで現実の欠陥のモデル化を検討し，コンクリート内部の欠陥状態と回転式打音の相関性に関するより詳細な考察を行う予定である。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート構造物のヘルスモニタリング技術，コンクリート技術シリーズ 76，2007
2) 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
3) 日本道路公団試験研究所道路研究部トンネル研究室：打音検査システム・器具の性能評価試験及びモデル試験検討資料，平成 16 年
4) 香川　幸雄：有限／境界要素法，サイエンス社，1983
5) 安田　仁彦：機械音響学，コロナ社，2005
6) 一宮　亮一：機械系の音響工学，コロナ社，2005
7) 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