

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

A fundamental study on diagnostic mechanism of the rotary hammering test by acoustic analysis

園田佳巨*, 中山歩**, 三好茜**

Yoshimi Sonoda*, Ayumi Nakayama**, Akane Miyoshi**

*博士(工学) 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

**九州大学大学院修士課程, 工学府建設システム工学専攻(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

Recently, maintenance problems of the existing RC structure have been increasing, thus to evaluate durability and predict deterioration of them come into important. In this study, the rotary hammering test that could improve inspection accuracy and efficiency of conventional hammering test is introduced, and examined diagnostic capability by means of the acoustic analysis based on finite element method. From analytical results of the rotary hammering test for concrete specimen, it is figure out the difference of sound pressure shapes between wholesome model and defect model. In addition, it is confirmed that utility of the rotary hammering test, and verifies the fact that this test method is not influenced by individual performance.

Key Words: the rotary hammering test, acoustic analysis, finite element method

キーワード: 回転式打音検査法, 音響解析, 有限要素法

1. 緒言

近年, 老朽化した構造物に対して適切に維持管理を行い, ライフサイクルコストの低減を図ることの重要性が非常に高くなっており, 構造物の非破壊診断法の研究・提案^{1,2)}が数多くなされている。しかし, 従来の非破壊診断法(超音波探傷, 熱赤外線等)のほとんどは, 高額な計測機器を利用するものであったり, 計測環境に対する適用条件が厳しく, 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³⁾を有している場合が多い。そのため, 実際の橋梁等の構造物の点検業務は, 「目視」による調査を主体とする場合が多く, 大規模な野外構造物などの検査対象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, 従来から簡易な非破壊診断法として利用されてきた方法の一つに打音検査があるが, 検査領域が広範囲に及ぶ場合, 点検員の労力が非常に大きいことが指摘されてきた。また, 従来の打音検査では, 熟練者の経験的な感覚で打音の音質の相違から異常の有無を判断することが多く, 理論的な裏付けが殆どなされていないのが現状である。

回転式打音検査法は, 最も簡易な非破壊診断の一つであ

る打音検査の精度と効率を飛躍的に向上させることを期待して開発されたもので, 図-1に示すようなロッド先端に金属製の回転部を取り付けた検査器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コンクリート内部の異常箇所を調べる方法である。

本手法の特徴として, ①従来の打音検査に比べて構造物に与える打撃力(入力)のばらつきを大幅に低減可能であること, ②検査器先端を転がしながら連続的に加振点を移動させることで, 検査効率を飛躍的に向上でき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で作業効率が高い方法として, 既に実務レベルで診断業務に数多く利用された実績を有している。

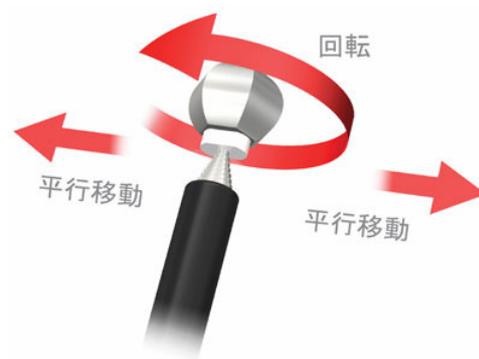


図-1 回転式打音検査器

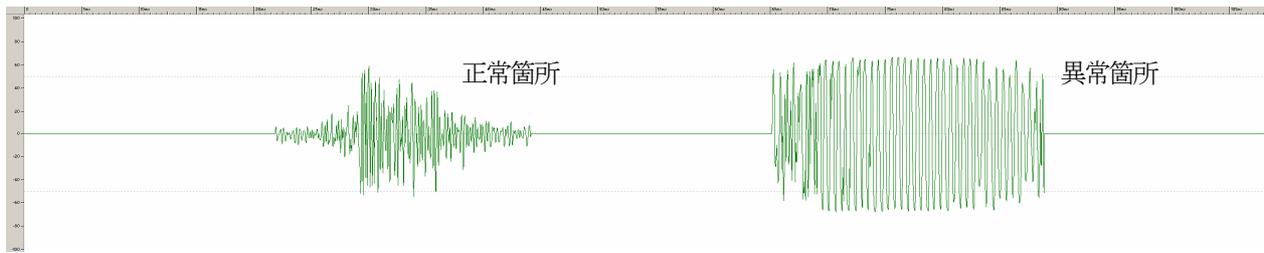


図-2 回転式打音検査を用いた場合の正常箇所と異常箇所の打音波形イメージ

本研究は、回転式打音検査法の数値シミュレーションを試み、そ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い、回転式打音検査で得られる打音特性を数値解析によって再現可能であるか検討したものである。

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

回転式打音検査器の先端をコンクリート表面上に押し当てながら回転・移動させると、先端の角部が検査体に衝突することで打音が発生する。打音は角部がコンクリート面に衝突する度に発生するが、コンクリート内部が正常な箇所と異常な箇所では、コンクリートの振動によって発生した音波の伝播特性が異なることから、打音波形に相違が見られる。従来の打音法と比較した場合、打撃力の与え方が全く異なるため、回転式打音検査で得られる打音特性は、従来の打音検査の場合とは異なることが確認されている。

図-2は、実際の診断業務⁴⁾で収録された正常箇所と異常箇所の典型的な打音波形のイメージを示したものである。これまでの検査実績によると、回転式打音検査器による打音特性には、概ね以下のような特徴があることが報告されている。

- 1) 正常箇所と異常箇所では回転式打音検査による音圧を比較すると、異常箇所では10～20dB程度大きな値が得られることが多い。
- 2) 従来の打音検査では、浮き・剥離等の異常箇所では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は高周波の音圧が大きくなる傾向にある。
- 3) 図-2の打音波形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。

2.2 解析手法の概要

打音検査は、検査対象のコンクリート表面に打撃を与えた時に収録され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方法である。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種類が用いられているが、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⁵⁾。

しかし、従来の打音検査と異なる「回転式打音検査」のユニークな打撃方法の効果についても同時に検討するには、打撃力特性に関する解析も並行して行う必要がある。また、コンクリート内部の欠陥状態のモデル化を検討していくことも想定すると、モデル化に様々な融通が利く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、音響解析と衝撃解析の両方の解析を同一モデルで行うことが可能である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。

具体的には、回転式打音検査シミュレーションを以下に示すような手順で行う。

① 回転式打音検査による打撃力の評価

打音検査のシミュレーションを行うには、入力値となる打撃力-時間特性を把握しておく必要がある。そのため、検査作業を模擬した時刻歴応答解析を行い、回転式打音検査による打撃力-時間関係を数値解析により求める。なお、実検査業務では検査員の個人差による打撃力のばらつきが考えられることから、検査作業の個人差（検査器の速度やコンクリート表面への支圧力など）が打撃力-時間関係に与える影響に関する考察を行う。なお、検査器自体の個体差の影響も考えられるが、少なくとも検査作業の個人差よりはるかに小さいと考えられることから、本研究では考慮しないことにした。

② 音響解析による欠陥有無の評価可能性の検討

解析で求めた打撃力-時間関係を入力データとして、欠陥を有するコンクリート供試体モデルの音響解析を行う。本研究では、まず①の解析で得られた打撃力を入力とした振動解析を実施し、コンクリート供試体の時刻歴応答を計算する。そして、その振動解析により得られた加速度データを境界条件とした音響解析^{6) 7)}により、空間に伝播する音の過渡応答を計算する。音響解析の基本式は、式(1)に示すような音圧 p と音の伝播速度 c を未知定数とした2階の偏微分方程式で表される。

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

式(1)を適切な境界条件の下で解けば、任意点の音圧 p

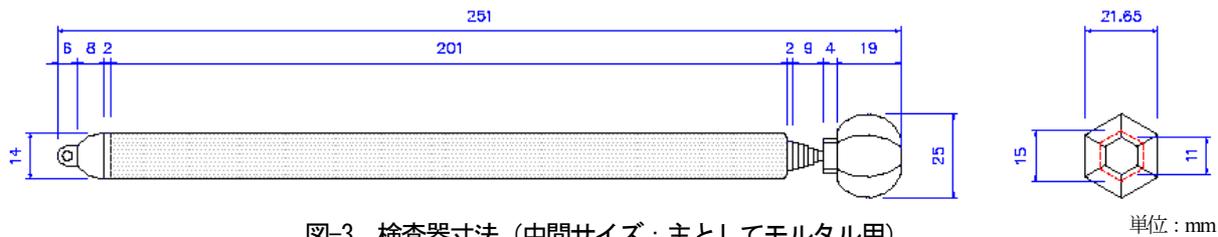


図-3 検査器寸法（中間サイズ：主としてモルタル用）

単位：mm

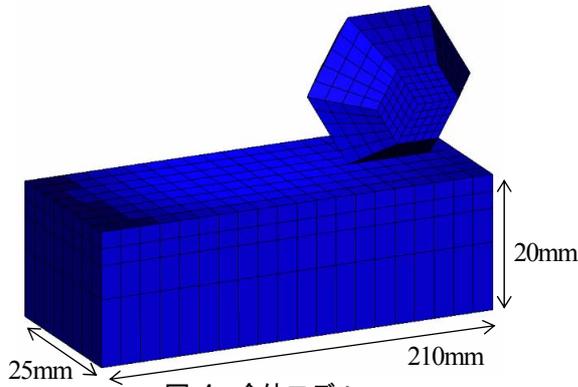


図-4 全体モデル

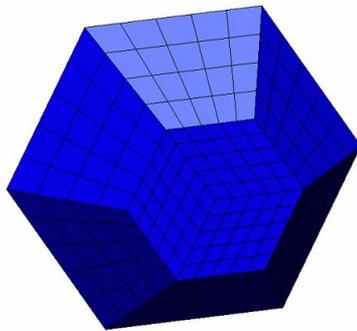


図-5 検査器モデル

を求めることができるが、回転式打音検査シミュレーションの場合には、対象構造物周囲の空間を含む解析領域内で、構造物表面に回転式打音検査器による打撃入力を与えて振動させ、評価点（打音の収録位置）に伝播する音の特性を調べることになる。

以上の2段階の手順により、回転式打音検査シミュレーションを実施し、欠陥を有するコンクリート供試体と健全なコンクリート供試体で発生する音の違いを解析的に確認し、回転式打音検査法の音響メカニズムに関する基礎的な考察を行う。

3. 回転式打音検査器による打撃力の評価

回転式打音検査法の特徴を従来の打音検査法と比較・検証するには、コンクリート表面に与える打撃力の特性について明確にしておく必要がある。しかし、回転式打音検査の場合、検査器先端部がコンクリート表面上を転がる際に線接触もしくは点接触となるため、圧力測定に一定の接触

表-1 本解析に用いた材料定数

	検査器	コンクリート
ヤング率(N/mm ²)	2.1×10^5	2.1×10^4
ポアソン比	0.3	0.2
密度(g/cm ³)	7.85	2.45

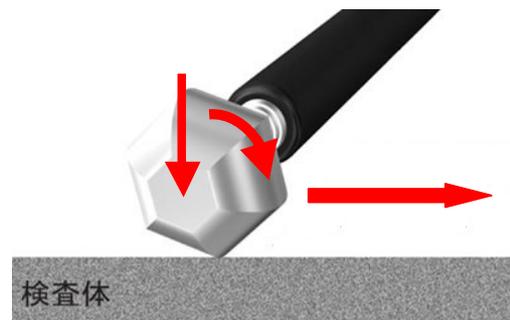


図-6 検査器先端に与える荷重条件

面積を必要とする通常の圧力センサーでは計測が困難である。

そこで、本研究では実際の検査作業における検査器先端の回転・衝突運動を模擬した数値解析を行い、本検査による打撃力の特徴を解析的に求めることにした。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、3通りの打撃力 - 時間関係を求め、その変動特性について考察した。

3.1 解析モデル

図-3に示すように、検査器先端部およびコンクリート供試体を3次元ソリッド要素を用いてモデル化した。実際の検査器には用途に応じた3種類の大きさがあるが、ここでは中間サイズ（主としてモルタル用：幅 25mm，高さ 19mm，重量 130g）の先端部を解析対象とした。なお、検査器の先端部のみをモデル化した理由は以下の通りである。

- 1) 検査員の腕の動きを源にロッド部を介して先端部に与えられる駆動力は、先端部モデルに適切な並進および回転条件を与えることで再現できると考えられる。
- 2) 先端部の並進・回転運動を正確に再現できれば、現実の回転式打音検査と同様の打撃力をコンクリート供試体に与えたとみなされる。

解析には、検査器先端部・コンクリートともに8節点を

表-2 解析ケース

	ケース1	ケース2	ケース3
並進速度 (mm/sec)	500	1000	1200
支圧力 (N)	1.0	5.0	6.0

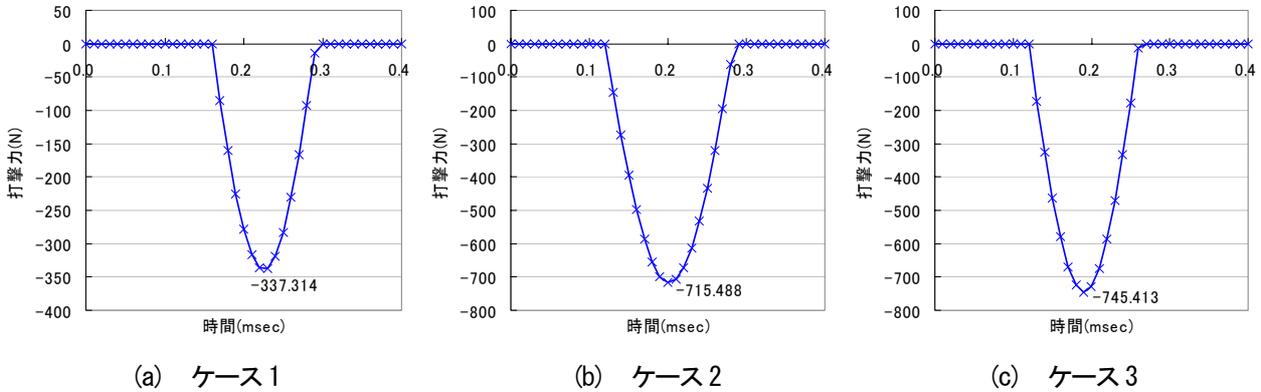


図-7 鉛直方向打撃力 - 時間関係

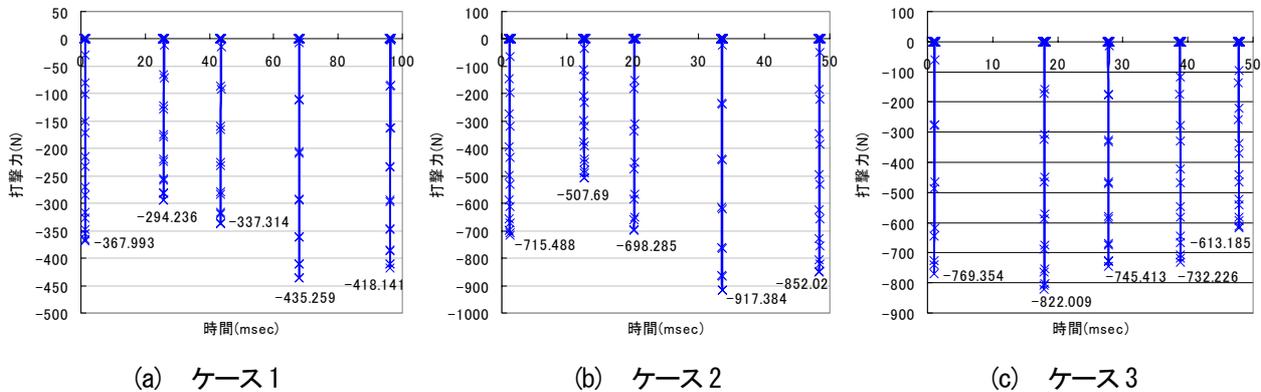


図-8 5回衝突分の鉛直方向打撃力 - 時間関係

有するソリッド要素を用いた。図-4に解析対象の全体モデルを、図-5に検査器先端モデルを示す。本解析モデルの節点および要素の総数は、それぞれ 4385、2992 である。本解析に用いた材料定数を表-1にまとめて示す。検査器およびコンクリートは、どちらも線形弾性体を仮定してモデル化した。

境界条件としては、コンクリート供試体の底面部の節点を全自由度拘束した。また、検査器およびコンクリート供試体の全要素には重力を鉛直下向きに与えた。

3.2 解析手法および解析条件

回転式打音検査器による打撃力 - 時間特性の評価には、非線形有限要素解析ソフトウェアMSC.MARC2005を用いて行った。衝突解析を行う際に必要となる直接時間積分⁸⁾には、無条件安定であるシングルステップフォーボルト法を用い、解析時間刻みは 1.0×10^{-5} sec とした。

実際の検査では、図-6に示すように検査器先端をコンクリート供試体に軽く押し当てた状態で転がし検査する。そこで、解析においては検査器先端に与える条件として、検査器中心に鉛直下向きに支圧力を設定すると同時に、水平

方向に並進速度とそれに見合う角速度を設定した。なお、点検作業の個人差を考慮するため、作業時のビデオ映像から求めた平均的な並進速度 (700~1000mm/sec程度) をもとに、表-2に示すように500、1000、1200mm/secの3ケースの並進速度を設定し、打撃力 - 時間関係の評価を行った。また、検査器とコンクリート面間の摩擦に関しては、摩擦係数を 0.4 と仮定して計算を行った。

3.3 解析結果および考察

(1) 鉛直方向の打撃力 - 時間関係

図-7 にケース 1 からケース 3 の鉛直方向の打撃力 - 時間関係をそれぞれ示す。図-7 に示すように、検査器先端の角部がコンクリート表面に衝突する瞬間に発生する荷重の継続時間は約 0.2msec と非常に短いことがわかる。一般的に、硬い固体間の衝突現象 (両者が接近して衝突し跳ね返る場合) では、接触後に両者の相対速度が正 (接近) から負 (離反) に転じて離れるまでに数ミリ秒の時間を要することが多く、各種の衝突実験⁸⁾で発生する衝撃荷重は数 msec の継続時間を有することが多い。このことから、回転式打音検査では、従来の打音検査と比較すると 1/10

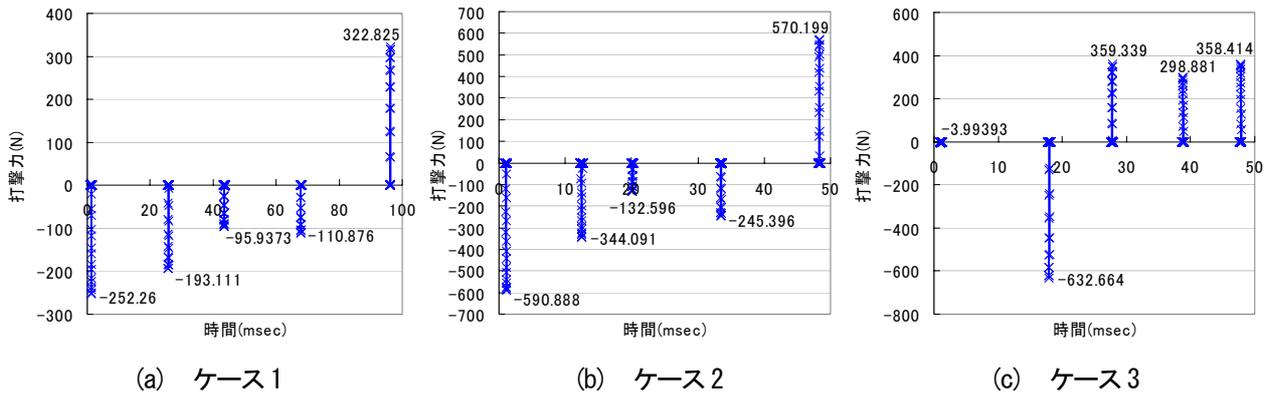


図-9 5回衝突分の水平方向打撃力 - 時間関係

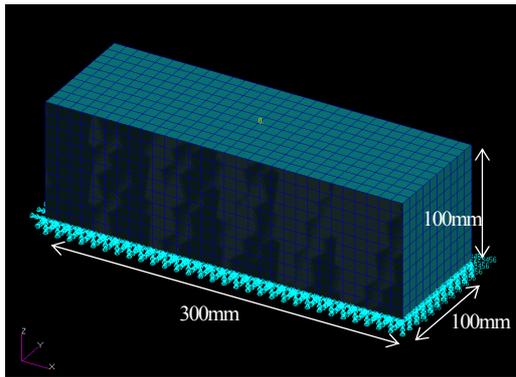


図-10 振動解析モデル

程度の短時間の打撃力を一定間隔で連続して与えていることが明らかとなった。なお、3ケースの比較より、個人差を考慮して並進速度と支圧力を変化させても、衝突する際に発生する荷重の継続時間には大きな相違がないことが確認できた。

図-8はケース1からケース3の条件で検査器を転がし、連続5回衝突した場合の鉛直方向の打撃力 - 時間関係をそれぞれ示している。図-8(a)～(c)に示すように、ケース1からケース3の条件で検査器を転がした場合、発生する鉛直方向打撃力はそれぞれ300～400N、500～900N、600～800N程度の値が発生することが認められる。先端角部が回転しながらコンクリート面に衝突することから、毎回の打撃時間間隔と打撃力の値にある程度のバラツキが生じることは当然であるが、並進速度と支圧力を大きくするほど打撃力の平均値は増大する傾向にあることが確認された。

(2) 水平方向の打撃力 - 時間関係

図-9はケース1からケース3の条件で検査器を転がし、連続5回衝突した場合の水平方向の打撃力 - 時間関係をそれぞれ示している。図-9に示すように、水平方向打撃力については非常にばらつきが大きいことがわかる。これは、検査器が転がりながらコンクリート上面を移動するため、検査器先端がコンクリート上面と衝突する際に、先端角部の衝突角度が毎回異なることに起因するもので、荷重方向の反転などをともなう複雑な挙動を示すことが確認

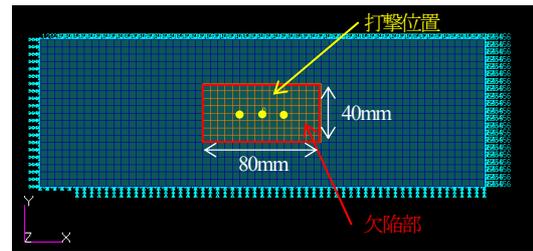


図-11 欠陥部および打撃位置

表-3 振動解析に用いた材料定数

	コンクリート	欠陥 (空洞)
ヤング率(N/mm ²)	2.1×10 ⁴	0.14161
ポアソン比	0.2	0
密度(kg/mm ³)	2.45×10 ⁻⁶	1.225×10 ⁻⁹

された。打音特性に水平荷重が与える影響は明確ではないが、正確な水平荷重を求めるには適切な摩擦係数と接触条件を検討しなければならないと考えられる。

4. 回転式打音検査シミュレーション

回転式打音検査では、コンクリート内部に空洞などの欠陥がある場合には、図-2に示すように音圧波形に有意な違いが見られる。そこで、3.の解析により求めた打撃力を入力荷重とした音響解析を行うことで回転式打音検査の音響解析シミュレーションを行う。

回転式打音検査は、従来の打音検査に比べて構造物に与える打撃力(入力)のばらつきを低減し、作業に熟練性を必要としないと言われている。そこで、回転式打音検査における個人差(図-7～図-9に示す荷重の相違)に関係なく、欠陥を有するコンクリートと健全なコンクリートで発生する打音に有意な相違が把握できることを解析的に確認し、回転式打音検査法の有用性の検証を行う。

4.1 打撃力による振動解析の概要

健全なコンクリート供試体および欠陥を有するコンクリート供試体の打撃力による振動解析を行うため、コンク

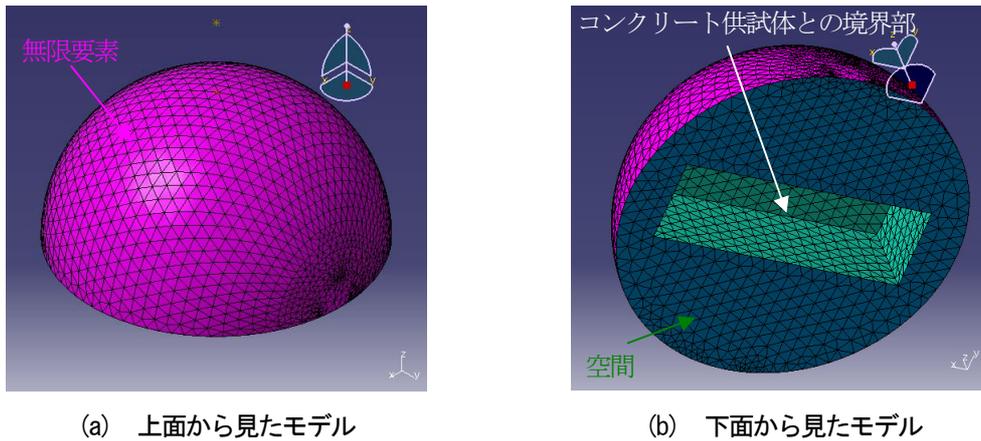


図-12 音響解析モデル

リート供試体を有限要素を用いてモデル化した。コンクリート供試体は $300 \times 100 \times 100 \text{mm}$ の角柱供試体を解析対象とし、8 節点ソリッド要素で離散化した。図-10 に解析モデルを示す。解析モデルの節点および要素の総数は、それぞれ 26901、24000 である。

本研究では、コンクリート内部の欠陥が打音特性に与える影響を基礎的に検討するために、音響インピーダンスが全く異なる空気層の存在だけを考慮することにした。すなわち、欠陥箇所については空洞状態と仮定し、空気材料特性を与えることで表現している。なお、3. の結果より検査器による入力荷重は相対的に非常に小さく、線形弾性応答のみを励起すると考えられるため、供試体のモデル化には線形等方弾性体を仮定し、空気材料特性についても音の伝播速度と密度から弾性係数を算出している。振動解析に用いた材料定数を、表-3 にまとめて示す。図-11 に示すように、欠陥領域は、 $80 \times 40 \times 40 \text{mm}$ の寸法の空洞がコンクリート供試体表面から深さ 10mm の位置に存在することを仮定した。現実の浮き・剥離の状態を考えると、より小さな欠陥状態も想定する必要があるが、ここでは基礎的な考察の段階であることを前提として、上記程度の大きさの欠陥モデルを対象に考察した。境界条件は、コンクリート供試体の底面節点を全自由度拘束した。

入力荷重として 3. の考察で求めた 3 ケースの打撃力をコンクリート供試体表面上に与え、時刻歴応答を計算した。その際、単発の打撃を与えた場合と連続 3 回の打撃を与えた場合の 2 種類の解析を行った。

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 $1.0 \times 10^{-5} \text{sec}$ で、解析時間は単発の打撃を与えた場合で $1.0 \times 10^{-3} \text{sec}$ 、連続 3 回の打撃を与えた場合で $5.0 \times 10^{-2} \text{sec}$ とした。

4.2 音響解析 (打音シミュレーション) の概要

健全なコンクリート供試体および欠陥を有するコンクリート供試体に対する回転式打音の特性を評価するために、供試体の周囲領域を対象とした音響解析を行った。音響解析では、周囲の開空間状態を考慮するために、直径

400mm の半球状の解析領域を設定し、周囲空間の境界上には音波が反射しないように無限要素⁹⁾を配置した。音響解析モデルを図-12 に示す。解析モデルの節点および要素の総数は、それぞれ 7534、37381 である。音響解析に用いた空間(空気)の材料定数は、伝播速度 $3.4 \times 10^5 \text{mm/sec}$ 、密度 $1.225 \times 10^{-9} \text{kg/mm}^3$ とした。

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 β 法 ($\beta=1/4$) を選択した。音響解析で用いた時間刻みと解析時間は、単発の打撃および連続 3 回の打撃を与えた場合いずれも振動解析の時間刻みおよび解析時間と同一とした。

音響解析における入力条件には、図-12 (b) に示すコンクリート供試体との境界面の各節点に 4.1 の振動解析で得られた時刻歴加速度データを与え、それぞれの場合における音の収録点に伝播する音圧の時刻歴応答を計算した。

なお、現時点では音の減衰性に関する考察が不十分であることから、本解析では減衰性に関しては全く考慮していない。音圧の評価点は、実際の録音器の位置を考慮してコンクリート表面から 100mm 上方の位置に設定した。実際の検査器は検査ロッドの手元に録音器が取り付けられているため、低周波域に検査ロッドの振動音も含んだデータが収録されていると考えられるが、今回の解析ではその影響については考慮していない。

4.3 解析結果および考察

図-13 および図-14 に、3. の結果で得られた 3 ケースの打撃力を単発で与えた場合と連続 3 回与えた場合の音圧の時間的变化をそれぞれ示す。これらの結果より、全てのケースにおいて健全な場合と比較して欠陥を有している場合は音圧が増大し、打音が大きくなる傾向にあることが明確に認められた。また、これらの音圧波形に対してフーリエ変換を行った結果、概ね全ケースでピーク周波数は 7000Hz 付近にあり、欠陥の有無によるピーク周波数の変化は明確には見られなかった。

図-15 は、実際に回転式打音検査で得られた健全箇所と異常箇所の 3 次元音圧波形 (時間-周波数軸に対する音圧

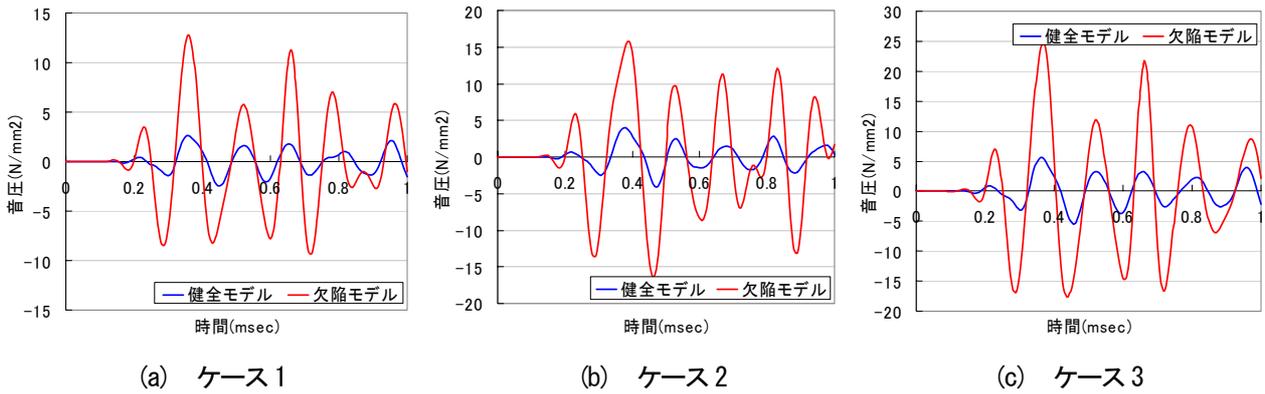


図-13 単発の打撃を与えた場合の打音の時間的変化

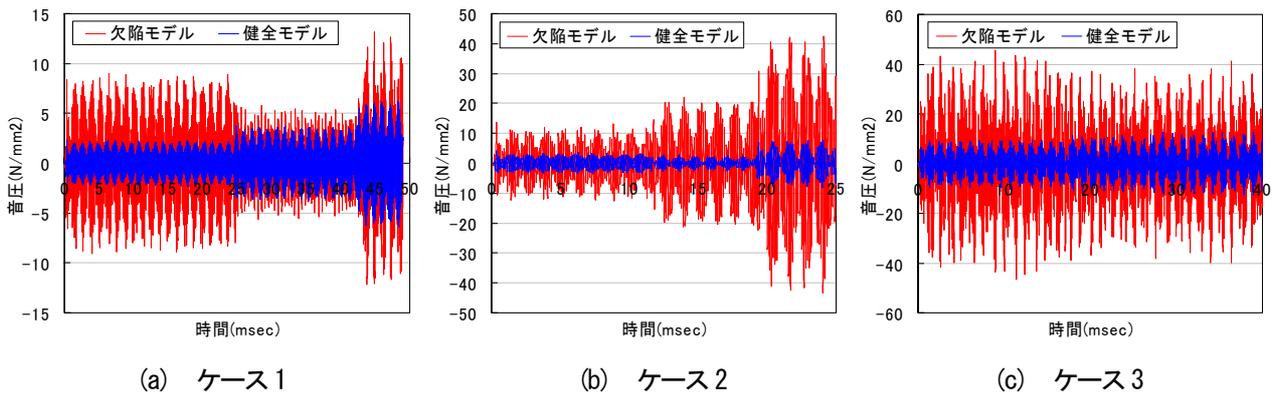


図-14 連続3回打撃を与えた場合の打音の時間的変化

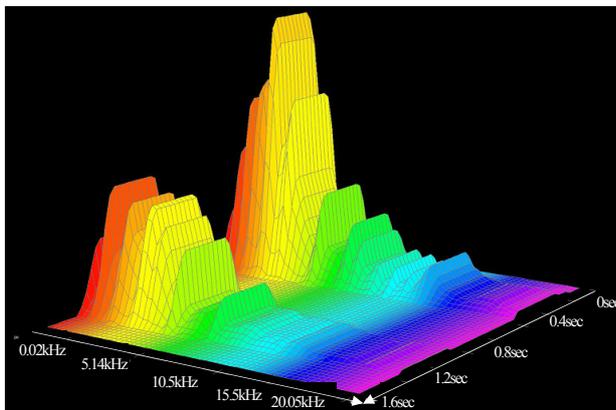


図-15 実験による音圧波形（時間-周波数解析結果）

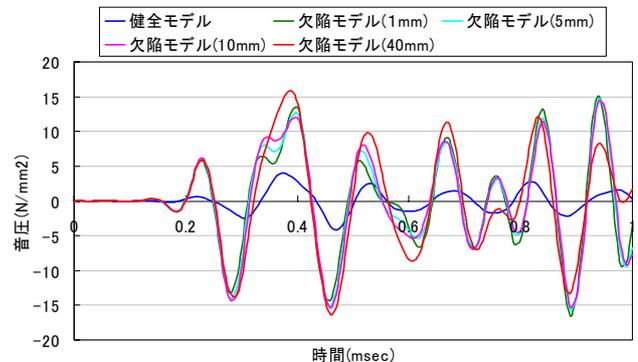


図-16 欠陥厚を変化させた場合の音圧-時間関係

分布) の典型的な例を示したものである。図-15より、回転式打音検査では約4000~7000Hzの周波数域で顕著な音圧の増大が確認できる。これらのことから、本研究で試みた回転式打音検査シミュレーションにより、実際の検査で認められた高周波域における音圧の増大現象については確実に再現できることがわかった。

次に、欠陥の大きさが打音特性に与える影響を考察するため、欠陥厚を40mmから10mm、5mm、1mmと変化させて同様の解析を行った。図-16は、ケース1で得られた打撃力を単発で入力した場合の音圧の時間的変化を示したものである。

図-16より、欠陥部分の厚さが大きくなるほどピーク音圧も大きくなる傾向にあるが、厚さ1mm程度の欠陥であ

っても、健全な場合とは顕著に異なる大きな音圧が得られることが確認された。

以上のことから、音響解析によって欠陥を有する場合と健全な場合で、回転式打音の音圧に明確な相違が認められることから、欠陥有無の診断に本研究で用いた音響解析が採用可能であると考えられる。なお、今回の解析結果には欠陥の有無が音圧の減衰性に与える影響は殆ど認められなかったが、これは今回の解析モデルに全く減衰特性を与えていないためである。本解析では、浮き・剥離に相当する欠陥を単なる空気要素でモデル化したが、今後、実際の欠陥状態と打音の減衰特性の相関性を調査し、妥当な減衰特性を与えられるように検討したいと考えている。

5. 結言

本研究は、回転式打音検査における打撃力評価のための衝突解析と、求めた打撃力を入力値とした音響解析の2段階に分けて回転式打音検査のシミュレーションを行ったものである。その結果、回転式打音検査法の幾つかの力学的な特徴を把握することができた。本研究の主な成果を挙げると以下ようになる。

- (1) 回転式打音検査器による打撃力を解析的に求めた結果、並進速度や支圧力の条件によらず、概ね継続時間は約0.2msecとなることが確認できた。このことから、従来の打音検査に比べて、高周波成分を含む打撃力を与えているものと考えられる。
- (2) 回転式打音検査の場合、検査器先端部の並進速度と支圧力を一定に保っても、転がりながらコンクリート面に衝突するため、打撃力の最大値は毎回変動することが認められた。今回の作業動作のバラツキを考慮した3通りの解析では、300~900Nの範囲の打撃力が得られたが、並進速度と支圧力を大きくすると、平均打撃力は増大し、最大荷重のばらつきが小さくなる傾向にあるものと考えられる。
- (3) 3通りの打撃力波形を用いた打音解析シミュレーションによって、欠陥を有している場合は音圧が増大し、健全な場合よりも打音が大きくなる傾向にあることが明確に認められた。この結果は、実検査で認められた高周波域における音圧の増大現象を、音響解析により再現できることを示している。

今後は、実験や実際の診断業務で得られる打音の実測データと解析結果を比較・検証し、減衰特性も加味した欠陥モデルの再検討を行い、コンクリート内部の欠陥状態と打音の相関性に関するより詳細な検討を行う予定である。

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) 土木学会：コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術，コンクリート技術シリーズ76，2007.
- 4) 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
- 5) 加川幸雄：有限/境界要素法，サイエンス社，1983.
- 6) 安田仁彦：機械音響学，コロナ社，2004.
- 7) 一宮亮一：機械系の音響工学，コロナ社，2005.
- 8) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ15，2004.
- 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.

(2007年9月18日受付)