

数値解析を用いた打音法による欠陥状態推定に関する基礎的考察

九州大学大学院 学生会員 ○井上 健太
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

打音検査は簡易かつ低コストで実施可能な手法であることから、実際の診断業務で幅広く利用されている。しかし、打音法による健全度の評価は検査者の識別能力に依存しており、客観性に欠けることは否めない。従来の打音検査に関する研究では供試体を用いて実験と解析の両面から検討行ってきた。しかし、実構造物と供試体では境界条件が全く異なるため、両者で得られる打音特性には大きな相違がある。また、打音特性による欠陥状態の検討は、定量的な評価が容易な音圧の大きさに着目した事例が多く、その他の有用な特徴量と考えられる周波数特性は、欠陥状態との明確な因果関係を見出すことが困難なために診断に直接的に用いた事例は少ない。そこで本研究では、実構造物を対象として、半無限要素を用いた無限境界でモデル化を行った有限要素法での打音のシミュレーションを行った。コンクリート内部の欠陥の深さ・大きさを変えた複数のケースについて振動解析を行い、欠陥状態が打音の周波数特性に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。

2. 打音シミュレーション

2. 1. 解析概要

応力波が放射状に伝播することを想定し、図-1 に示すような半径 200mm の半球領域の 1/4 を解析モデルに設定した。1/4 半球の境界上には応力波が反射しないように 12 節点ソリッド要素の半無限要素を配置し、球内は 8 節点ソリッド要素を用いてモデル化した。図-1 の XZ 面、YZ 面は対称面とした。節点および要素の総数はそれぞれ 76000 と 66000 で、解析に用いたコンクリートの材料定数は表-1 に示す通りである。表面近傍は深さ方向に対して高さ 1mm で要素を作り、欠陥部は要素を削除し空洞とすることでコンクリート内部の欠陥をモデル化した。欠陥の深さや寸法を変化させた場合の振動特性を比較するため、深さについては 30×30mm の欠陥をコンクリート表面より(鉛直下方に)5mm, 10mm, 15mm と変化させた 3 ケースを行った。欠陥寸法の検討については、XY 平面方向のサイズを 30×30mm, 50×50mm, 70×70mm に変化させた 3 ケースを行った。なお、欠陥寸法を変化させた検討においては、欠陥の深さはコンクリート表面から 10mm とした。解析に用いた入力荷重は、実際にコンクリート構造物をインパルスハンマーで打撃した際に得られる平均的な荷重-時間関係を参考に、図-2 に示すような継続時間 0.4msec, 1N の三角波を想定して球の中心に入力した。解析の時間刻みは 1.0μsec, 解析時間は 0.04sec とした。

2. 2. 打音特性の評価方法

振動特性の評価方法として、既往の研究では荷重作用点付近の 1 点のみの応答値に対してフーリエ変換を行い、その周波数特性を検討している。しかし、実際の打音検査では検査面全体の振動が音に変換され、打音データとなっている。このため、打音検査のシミュレーションとしては、検査面全体の振動特性を考慮する必要があると考えられる。そこで、本研究では打音検査時と同様にコンク

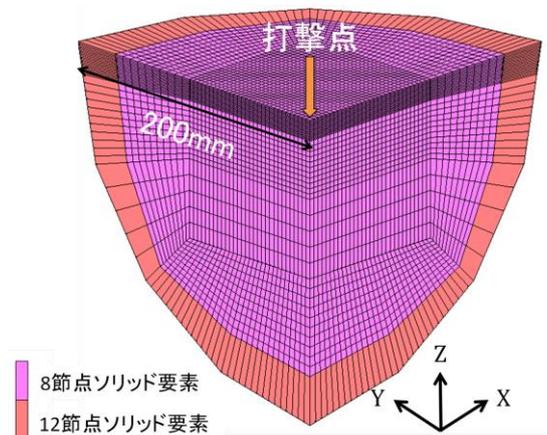


図-1 解析モデル

表-1 材料定数

材料定数	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)
コンクリート	2.4×10^4	0.2	2.2

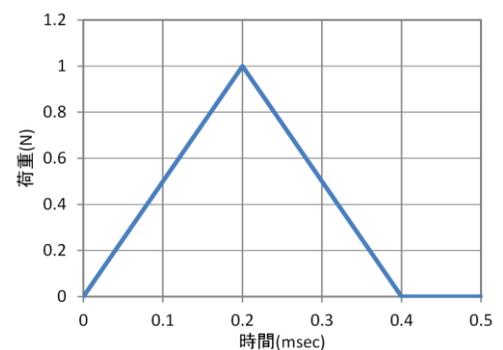


図-2 入力荷重

リート表面の近傍に音の評価点を設け、コンクリート表面上の多数の節点の振動特性を足し合わせて評価を行った。具体的には、打撃点から 10cm までの領域内の 121 節点を評価対象とし、各節点の加速度の時刻歴波形をフーリエ変換した。次に、図-3 のように、打撃入力点の 2cm 横の節点の直上 2cm の位置に打音の評価点を設け、各節点から評価点までの距離に応じて各点の周波数スペクトルの重みを以下の考え方に基づいて決めた。

点音源の音響エネルギーは式(1)であらわされるように音源からの距離の 2 乗に反比例して小さくなる。

$$I = \frac{P}{2\pi r^2} \quad (1)$$

これより、式(2)のように距離と音の強さの関係が表される。

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (2)$$

そこで、評価点と節点の距離が最短の 2cm のときの重みを 1 とし、その他の節点は評価点との距離に応じて重みづけを行った。表-2 に用いた重みの一例を示す。

3. 解析結果および考察

図-4 に欠陥部の位置をコンクリート表面より(Z 軸負方向に) 5mm, 10mm, 15mm と変化させた場合の加速度スペクトルを示す。これらの結果より、3kHz, 6.5~7.5kHz, 13kHz, 17kHz あたりに共通してピークがあることが分かる。3kHz あたりのピークスペクトルは健全の場合は約 4kHz であるのに対し、欠陥の場合はピーク位置が低周波側に移動し 2.5kHz ほどである。しかし、このピークスペクトルは欠陥の深さに関わらず、ほぼ同じ位置であることから、欠陥深さ以外の要因によるものだと考えられる。また、7kHz 付近のピークスペクトルは欠陥深さが 5mm, 10mm, 15mm の順に欠陥部が浅くなるほどスペクトルのピーク値が大きくなっており、欠陥深さが 15mm になるとピーク値が健全とほぼ同じになっていることが確認された。

さらに、13kHz と 17kHz あたりのピークスペクトルには欠陥の有無による周波数の変化は見られないが、欠陥部が浅くなるほどピーク値自体が小さくなることが確認された。図-5 に欠陥部の広さを 1 辺が(XY 平面方向) 30mm, 50mm, 70mm と変化させた場合の加速度スペクトルを示す。これらの結果より、欠陥深さの検討と同様に、概ね共通した周波数域にピークがあることが分かる。3kHz 付近の低周波数域に着目すると、欠陥広さが 50mm の場合は健全の場合と同様に 4kHz 付近にピークスペクトルが存在するが、欠陥を有するケースは共通して 2.5kHz 付近に大きなスペクトル帯が存在し、低周波側にピークスペクトルが移動しているが、この低周波数域のスペクトルの相違は、欠陥広さに起因するものと考えられる。一方、7.5kHz のピークスペクトルは 30mm の場合は健全部より大きく、50mm, 70mm の場合は小さくなるのに対し、13kHz, 17kHz のピークスペクトルは欠陥広さが大きくなるほど小さくなるなど、打音の周波数特性の評価には構造物の表面振動の変化を詳細に検討する必要があることが推察される。

4. 結言

実際のコンクリート構造物を想定した有限要素法による打音検査のシミュレーションを行った結果、欠陥の状態が構造物の表面振動特性に与える影響を詳細に把握する必要があることが確認できた。

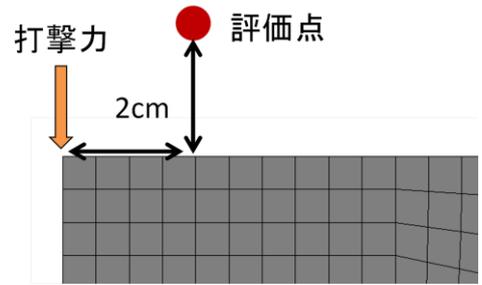


図-3 結果の評価点

表-2 重みの例

評価点までの距離(cm)	2.00	2.24	2.83	3.61	4.47
重み	1.00	0.80	0.50	0.31	0.20

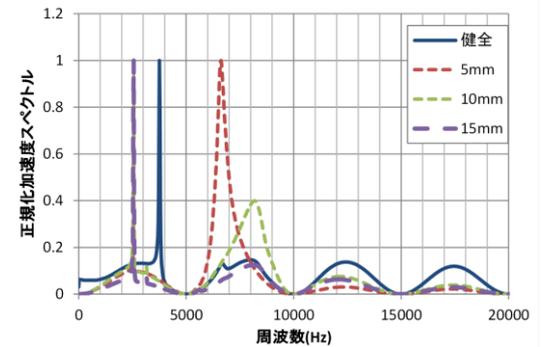


図-4 加速度スペクトル(深さの変化)

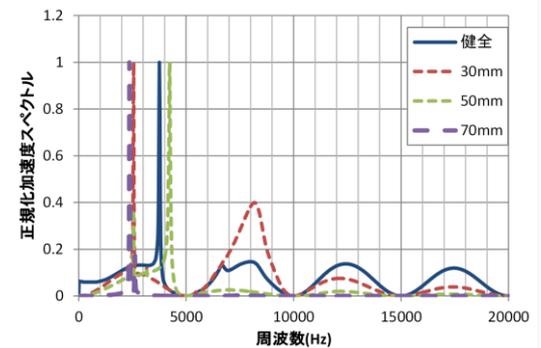


図-5 加速度スペクトル(広さの変化)