

有限要素法を用いた打音検査のシミュレーション解析

九州大学大学院 学生会員 ○川端 健太
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

コンクリート構造物のライフサイクルコストを低減するため、既設構造物の健全性の評価を行う手法として多くの非破壊検査法が開発されている。しかし、その多くは高価な計測装置が必要であったり、センサーの取り付けなどに時間を要するため、広範囲な点検作業への適用が困難である。本研究では、非破壊検査の中で簡易かつ低コストな打音検査について、供試体レベルの実験と数値解析を比較し、実験で得られる打音特性を数値解析でシミュレートできるか検証した。さらに、打音検査によるコンクリートの表面加速度と音圧の周波数特性について考察した。

2. 供試体実験

実験で用いる供試体は、写真-1に示すような400×100×100mmのモルタル角柱供試体とした。欠陥を模した供試体には、発泡スチロールを供試体中央の打撃位置から深さ方向に20mmの位置に(欠陥の大きさが打音に及ぼす影響を調べるため、200×70×20mm, 100×50×20mmの2種類の大きさを設定)埋設している。実験の手順として、写真-1に示すように両端から50mmの場所に鋼棒を支承として設置し、その上に供試体を載せて試験体中央をインパルスハンマーで軽打した。その際に発生する供試体表面の加速度と音圧を、打撃点から40mm離れた位置で加速度計と騒音計を用いて計測し、実験から得られる加速度と音圧の特性が欠陥の有無でどのように変化するか考察した。

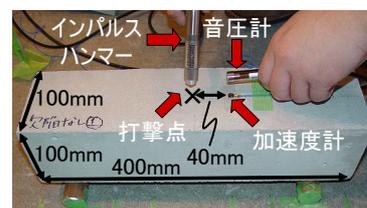


写真-1 供試体実験の様子

表-1 供試体の材料定数

	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)
供試体	3.238 × 10 ⁴	0.2	2.184
欠陥部	10	0.075	2.9 × 10 ⁻²

3. シミュレーション解析

3.1 打音シミュレーションの概要

本研究では有限要素法を用いた音響解析を行った。打音検査のメカニズムを理論的に考察するために、まず供試体実験で得られたインパルスハンマーの荷重を入力値とした振動解析を実施し、得られた供試体表面の加速度データを入力条件とした音響解析の2段階の計算によって、実際の打音検査の再現性を検証した。

3.2 振動解析

振動解析では、供試体実験で用いたモルタル角柱供試体を対象とし、健全な場合と欠陥を有する場合でハンマーによる打撃を与えた際の供試体表面の加速度応答を求めた。振動解析で用いた供試体の材料定数を表-1に示す。境界条件として供試体の底面を図-1のように固定し、入力荷重として実験で得られたインパルスハンマーの荷重-時間特性を供試体表面の中央に与えた。

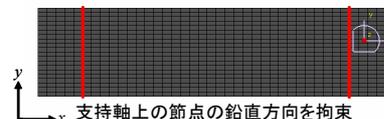


図-1 供試体の境界条件

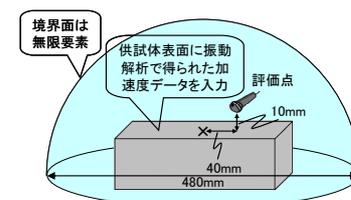


図-2 音響解析のイメージ

3.3 音響解析

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比較するため、供試体の周囲空間を解析対象とし、直径480mmの半球でモデル化した。開空間状態を考慮して空間の境界面には無限要素を配置した。音響解析モデルのイメージを図-2に示す。また、音響解析は以下の波動方程式を基礎式としている。

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

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、上式を実験と適切な境界条件のもとで解き、任意点

キーワード 打音検査, 供試体実験, 音響解析, 周波数特性

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番 九州大学 ウェスト 2 号館 11 階 1102 号室 Tel/Fax: 092-802-3370

の音圧 p を求める。音響解析に用いた空間の材料定数は、伝播速度 $3.4 \times 10^2 \text{m/sec}$ 、密度 $1.225 \times 10^3 \text{g/cm}^3$ とし、打音の評価点は図-2のように実験と同様の位置とした。入力条件として、供試体と空間の境界面上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、各入力条件における評価点の音圧の時刻歴応答を計算した。

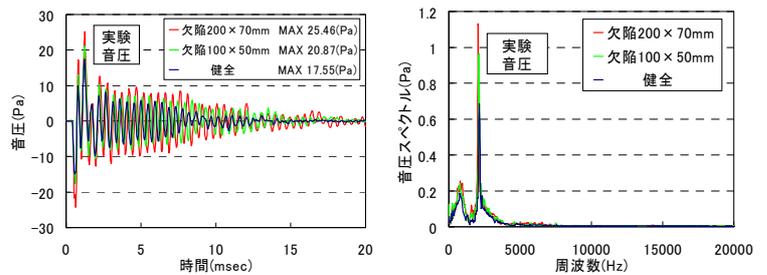
4. 実験結果と解析との比較

実験で得られた打音特性を図-3に示す。各供試体における音圧の最大値を比較すると、欠陥を有する供試体の方が大きくなることが確認された。この結果は加速度においても同様の傾向となった。現実の打音試験では検査員が与える力によって打撃力にバラツキが生じるため、直接的に最大値を比較することはできない。そこで、音圧の最大値をインパルスハンマーによる打撃力の最大値で除した振幅比を導入することで打撃力のバラツキの影響を低減した結果を表-2に示す。表-2より、欠陥を有する供試体の方が単位入力荷重に対する応答が大きいことが分かり、打撃力の大きさに関わらず欠陥の存在によって音圧が大きくなる傾向を示すことが確認された。図-3(b)に示すように打音の周波数特性として、500Hz や 2000Hz 付近のスペクトルが卓越していることが分かる。この特徴は欠陥の有無に関わらず確認されたことから、供試体形状や支持条件に起因していると考えられる。また、4000~8000Hz 付近において、健全な場合と欠陥を有する場合とで異なる周波数特性を示すことが確認された。しかし、打音全体に対する割合としては小さな変動であるため、その影響は小さいと思われる。

次に、解析で得られた打音特性を図-4に示す。最大音圧については、実験値と比べ解析値が 1.3~1.4 倍ほど大きくなっているが、欠陥を有する供試体の方が大きくなる傾向は再現できた。一方、加速度の最大値については、実験値と解析値の間で 1.8~3.6 倍程度の相違が見られたが、音圧の結果と同様に、欠陥を有する供試体の方が大きくなる傾向は再現できた。また、振幅比についても、表-3に示すように実験と同様の傾向が確認された。打音の周波数特性について、健全な供試体と欠陥を有する供試体で周波数特性に明瞭な相違は確認されなかったが、2000Hz 付近のスペクトルが卓越する特徴は認められたことから、振動解析と音響解析の2段階の手順によって打音検査により得られる音のシミュレーションが可能であると考えられる。

5. 結言

本研究で行った実験と解析によって、健全な供試体と欠陥を有する供試体における最大音圧の関係を、数値解析によって再現可能であることが確認された。なお、供試体表面の加速度応答の時点で実験と解析に相違が認められることから、コンクリート表面振動の解析精度について確認する必要があると考えられる。また、実際に浮きや剥離を有する構造物で得られる打音特性と発泡スチロールを埋設した供試体から得られる打音特性には相違があることが予想される。したがって、実構造物内部の浮きや剥離を想定した欠陥モデルを検討し、現実の打音データを用いた内部欠陥の推定法について検討を行う必要があると考えられる。

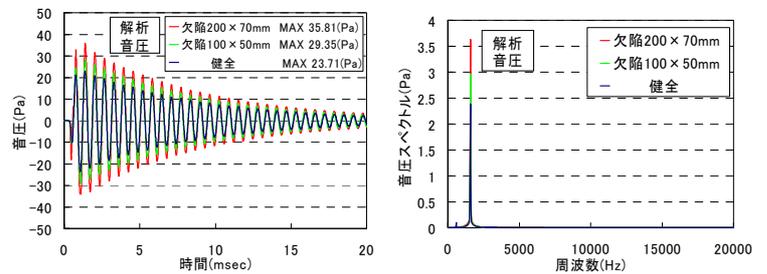


(a) 時刻歴波形 (b) 周波数特性

図-3 実験の打音特性

表-2 実験の振幅比

実験音圧	振幅比 (Pa/kN)	健全に対する比	実験加速度	振幅比 (G/kN)	健全に対する比
健全	9.33	1.00	健全	19.11	1.00
欠陥100	9.92	1.06	欠陥100	19.80	1.04
欠陥200	11.80	1.26	欠陥200	20.04	1.05



(a) 時刻歴波形 (b) 周波数特性

図-4 解析の打音特性

表-3 実験の振幅比

解析音圧	振幅比 (Pa/kN)	健全に対する比	解析加速度	振幅比 (G/kN)	健全に対する比
健全	12.93	1.00	健全	34.23	1.00
欠陥100	13.92	1.08	欠陥100	36.59	1.07
欠陥200	16.68	1.26	欠陥200	72.92	2.13