

コンクリート内部の非均質構造が弾性波伝搬へ及ぼす影響の解析的検討

茨城大学 学生会員 ○山中 理絵
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリートの非破壊検査は、その内部の非均質構造から金属等を対象とした同一の検査と比べ精度が劣る。よって、非均質性が弾性波へ及ぼす影響を知ることとは検査精度の向上につながると考えられる。

そこで本研究では、非均質性による弾性波伝搬への影響を、内部構造を均質と非均質とした場合の数値シミュレーションを行い比較・検討する。また、本研究で用いるイメージベース FEM の問題点による解析結果への影響についての検討も合わせて行う。

2. 数値解析手法

2.1 イメージベース FEM

本研究では、解析モデルをイメージベースモデリングを用いて作成し、有限要素法によって解析を行うイメージベース FEM を用いる。デジタル画像の 1 ピクセルと 1 有限要素を整合させるので、2 次元正方形メッシュにて解析を行う。よって、モデル作成が容易である反面、曲線部の表現が階段状になってしまうという問題がある。

2.2 支配方程式

本研究における支配方程式は運動方程式、変位-ひずみ関係式、応力-ひずみ関係式で以下の通りである。

$$\partial^T \sigma - \rho \ddot{u} + b = 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \partial u \quad (2)$$

$$\sigma = C \varepsilon \quad (3)$$

ここに、 $\sigma, \varepsilon, C, u, \ddot{u}, b, \rho, \partial$ は応力ベクトル、ひずみベクトル、弾性係数マトリックス、変位ベクトル、加速度ベクトル、物体力ベクトル、密度、微分オペレータである。

2.3 有限要素法による空間の離散化

式(1)を弱形式化し、有限要素法により離散化すると以下の有限要素方程式が得られる。

$$M \ddot{d} + K d = F \quad (4)$$

ここに $M, \ddot{d}, K, d, F$ は質量マトリックス、加速度ベクトル、剛性マトリックス、変位ベクトル、荷重ベクトルである。

2.4 中央差分に基づく動的陽解法

コンクリート中を伝搬する弾性波の解析には中央差分に基づく動的陽解法を用いる。集中化質量マトリックス M_f と外力ベクトル F_{ext} 、内力ベクトル F_{int} を用い

表-1 材料特性値

	モルタル	粗骨材
ヤング率 (GPa)	25	55
密度 (kg/m ³)	2000	2700
ポアソン比	0.2	0.2

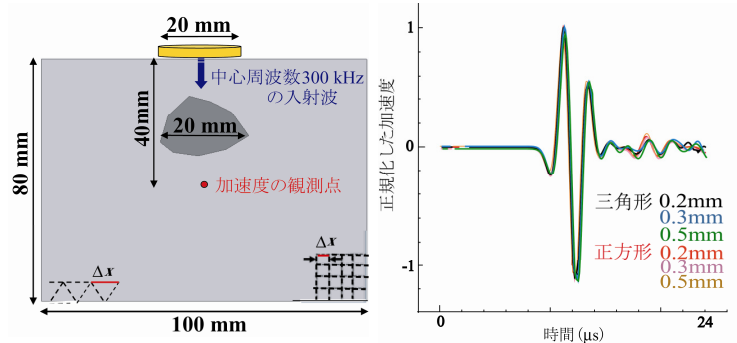


図-1 形状による比較のモデル 図-2 加速度の時刻歴

て式(4)から加速度ベクトルを求める。

$$\ddot{d}^n = M_f^{-1} (F_{ext}^n - F_{int}^n) \quad (5)$$

この式に中央差分を適応させ速度ベクトル $\dot{d}$ と変位ベクトル d を次式のように求める。

$$d^{n+1} = d^n + \dot{d}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (6)$$

$$\dot{d}^{n+\frac{1}{2}} = \dot{d}^{n-\frac{1}{2}} + \ddot{d}^n \Delta t \quad (7)$$

3. イメージベース FEM における問題点の影響

前述したイメージベース FEM の欠点から、1 要素の長さを適切に小さくする必要があるが、これに対し中畑ら¹⁾はイメージベース FEM と BEM の解を比較し精度を検証した結果、1 要素の長さ Δx と入射波の最小波長 λ_{min} の関係について定式化した。

本研究ではこの問題に対し、図-1 のようなモルタル中に粒径 20 mm の粗骨材が存在するモデルに、入射波を送信した際の観測点での加速度を三角形メッシュの FEM とイメージベース FEM で比較することにより検討する。モルタルと骨材の材料特性については表-1 の値を用い、中心周波数 300 kHz (最大周波数 900 kHz) のリッカー波を送信する。今回は $\Delta x = 0.2, 0.3, 0.5$ mm の場合で解析を行った。なお、三角形メッシュにおいては最小の 1 辺の長さを Δx とした。時間ステップ幅 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-8}$ s を 2400 ステップ (24 μ s) まで解析を行い、その結果をすべて重ね合わせたものが図-2 である。

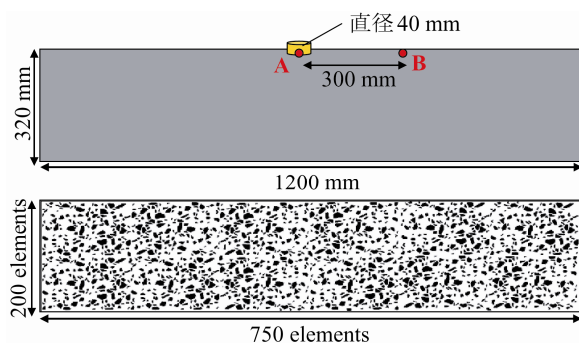


図-3 均質と非均質を想定したモデル

表-2 材料特性値

	コンクリート	モルタル	粗骨材
ヤング率 (GPa)	28	20	55
密度 (kg/m ³)	2192	2000	2700
ポアソン比	0.2	0.2	0.2

表-3 2点での弾性波速度 (m/s)

	A	B
均質	3497	2041
非均質	3386	1911
両者の差	111	130

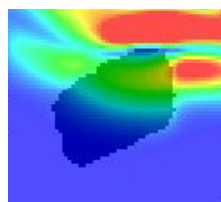


図-5 骨材を透過する弾性波の挙動

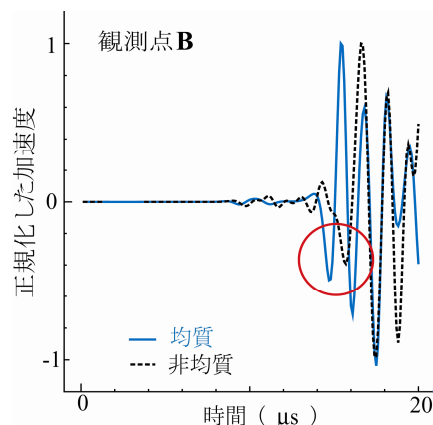
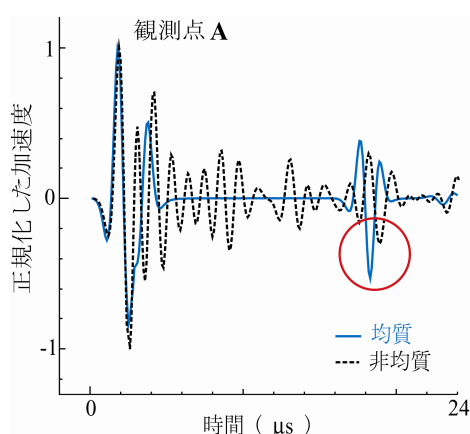


図-4 各観測点での加速度の時刻歴

これより、6つのパターンすべてがほぼ重なり合っていることから、イメージベース FEM は要素を適切に小さくすることで通常の FEM と同様な解析結果を得ることができ、曲線部の表現が階段状になることについては解析結果に大きく影響しないと言える。

4. 非均質構造による弾性波伝搬への影響の検証

コンクリートの内部構造を均質と非均質として考えた場合で同様の解析を行い、可視化ソフトを用いコンクリート中の弾性波の挙動を確認するとともに、弾性波を用いた非破壊検査の際に重要となる弾性波速度の算定による両者の比較を行う。用いるモデルは図-3で、上段が均質、下段が非均質とした場合（白:モルタル、黒:粗骨材）である。前節より $\Delta x = 1.6 \text{ mm}$ とする。材料特性は表-2の値を用いる。この数値の設定については、モルタルと粗骨材の値からコンクリートのヤング率は均質化法²⁾、密度は体積率から決定することで同様の条件とした。モデルに中心周波数 50 kHz（最大周波数 150 kHz）のリッカー波を送信し、時間ステップ幅 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}$ を 2500 ステップ（250 μs ）まで解析を行い、図-3のA、B点の2点での加速度を算出する。

その時刻歴を表したものが図-4である。可視化画像とこの時刻歴と照らし合わせたところ、図-4に示した赤い丸周辺でAはP波、Bは表面波が到達していた。2点で共通して非均質の場合が均質の場合より遅れていることや、非均質の場合に加速度の応答が大きく出てい

ることが分かる。また、可視化画像からはモルタルと骨材の材料特性の違いから起こる弾性波のズレ（図-5参照）や骨材による弾性波の反射等の影響が確認できた。

2点での弾性波の到達時間と伝搬距離から算出した弾性波速度をまとめたものが表-3である。到達時間については可視化からP波の到達ステップを確認し、時刻歴でその時間帯に一番大きな加速度が出ている時間を選んだ。これを見ると、2点で共に非均質の場合の方が 120 m/s 程度遅い結果となっていることが分かり、このことからコンクリート内部の非均質構造が弾性波伝搬へ影響を及ぼしていることが分かる。

5. おわりに

本研究では、コンクリートの非均質構造が弾性波伝搬へ及ぼす影響について、解析で再現・確認することができた。その影響が大きいほど正確な測定が困難であると言えることから、今後は測定距離や入力する弾性波の周波数を変化させて比較を行い、その影響の大小を検証する。

参考文献

- 1) 中畑和之、徳永淳一、廣瀬壮一：イメージベース波動伝搬シミュレーションと超音波探傷法のモデル化への応用、非破壊検査、vol. 59, pp.231-238, 2010.
- 2) 日本計算工学会、寺田賢二郎、菊池昇：計算力学レクチャーシリーズ、均質化法入門、丸善、2003.