

メゾスケール構造に着目したコンクリート中の超音波伝搬特性に関する考察

愛媛大学大学院 正会員 ○中畑和之, 非会員 平岡拓也
東京工業大学大学院 学生員, 金井淳, 正会員 廣瀬壮一

1. はじめに

弾性波, とりわけ超音波領域の波動を利用することによって, コンクリート部材の健全度を推定したり, きずを検出したりといった目的の研究が近年多く報告されている¹⁾. 使用される周波数帯域は, センサの実用的性能の制限もあって, 一般的には数十~数百 kHz であり, 波長に換算すれば大凡ミリメートルからセンチメートルのスケールである. コンクリート中の波動場を特徴付ける要因はスケール毎に異なる. 例えば, エントレインドエアで散乱するような波長のスケール(ミクロスケール)と, 骨材による散乱減衰が支配的な波長スケール(メゾスケール)では波動伝搬特性が異なることは, 弾性波の伝搬メカニズムを考えれば明白である. 本研究では, メゾスケール構造が超音波伝搬に及ぼす影響を, 数値解析(動弾性有限積分法²⁾:EFIT)を援用して検証を行うことを目的とする. 既往の研究³⁾ではコンクリート中の縦波音速, 周波数, 減衰の3つのパラメータに着目し, 骨材率の違いによる超音波伝搬特性の調査が行われている. そこで本研究では, 骨材率を一定として骨材の大きさの違いによる透過超音波の特性を調査する.

2. 二探触子法による透過試験

本研究では, 図-1(a)に示す円形探触子(ジャパンプローブ社製)を2つ用いて計測実験を行った. この探触子の公称中心周波数は400kHzであり, 広帯域型のものを用いた. また, ここでは骨材率を一定とし, 骨材の径が異なる供試体(図-1(b))を作成した. 骨材を16.0~13.2mm, 11.2~9.5mm, 6.7~4.0mmに分類し, それらを使用して作成した供試体をA, B, Cとした. それぞれ4体のコンクリート供試体を作成した. 供試体の高さは200mm, 直径は100mmであり, 供試体の骨材率は50%, 水セメント比は40%で統一した. 各供試体は計測条件を揃えるために, 計測の時以外は常に水潤させている.

また, 供試体A, B, Cと同じ大きさ・形状の3次元数値モデル(それぞれa, b, cとする)を作成し, EFITによって超音波伝搬解析を行った. この数値モデルには空隙は無く, 骨材とセメント硬化体から成る. また, 数値モデルの骨材はすべて球形とした. この骨

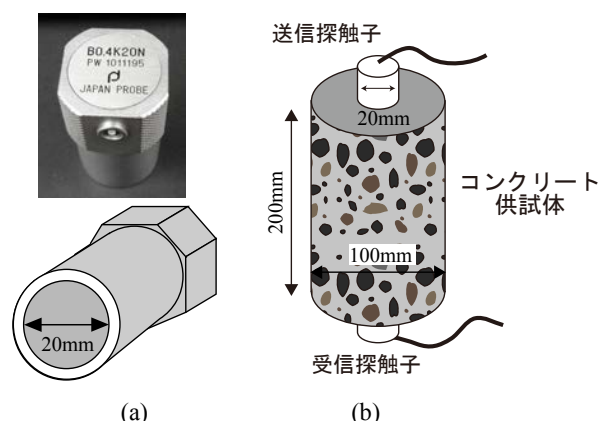


図-1 低周波垂直型探触子(a)と二探触子法による透過試験(b).

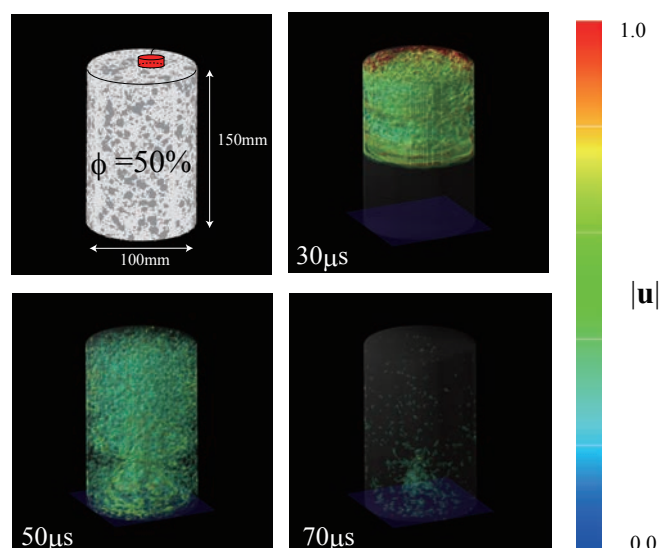


図-2 EFITによるコンクリート中の超音波の可視化.

材を3次元空間にランダムに配置させるために, 乱数発生プログラムを作成した. 数値シミュレーションで用いた材料定数は, 予備実験から求めた値を使用した. EFITによるシミュレーションの例を図-2に示す. この図は, 超音波を送信後, 30 μ s, 50 μ s, 70 μ sの時のコンクリート中の変位場 $|u|$ を可視化したものである. 図-2より, 超音波を送信後に, 骨材同士の散乱によって波頭が乱れ, 波動が減衰しているのがわかる. また, それが時間の経過とともに徐々に拡散していく様子が確認できる.

キーワード: 超音波, 音速, 散乱減衰, メゾスケール構造, 動弾性有限積分法

連絡先 〒790-8577 愛媛県松山市文京町3, E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

3. 骨材径を変化させたときの透過波の特性

コンクリート供試体の反射波の特性について、音速、周波数、振幅減衰の観点から考察する。まず、計測実験から得られた透過波の縦波音速 c_L と EFIT シミュレーションから算出した c_L を図-3 に示す。この結果から、骨材の粒径が小さくなると音速が低下することがわかる。数値シミュレーションでも同様な傾向がみられたが、実験の方がその低下率は大きい。これは、骨材粒径が小さくなるとセメント硬化体との接触面積が増え、セメント硬化体との間に形成される遷移帯の影響が大きくなるためと考えられる。

次に、コンクリート中を伝搬する超音波の中心周波数の変化について調査する。得られた時刻歴波形の $30 \sim 55 \mu\text{s}$ と $55 \sim 200 \mu\text{s}$ をサンプリングし、それぞれ FFT を施した。透過波形の $30 \sim 55 \mu\text{s}$ は、縦波が最初に到達する時間帯である。透過波形の $55 \sim 200 \mu\text{s}$ は、縦波の後に到達する波動(コーダ波)を含む時間帯である。得られたパワースペクトルの分布から中心周波数を比較する。図-4 に、各供試体の中心周波数の変化を示す。図-4(a) では、骨材の大きさによらず中心周波数はほぼ同じであった。一方、図-4(b) に示すように、コーダ波成分を FFT した場合は、骨材径が小さくなるほど中心周波数は低下していることがわかる。これより、コーダ波成分は骨材の多重散乱によって高周波成分が拡散していくために、受信波は低周波側にシフトすると考える。透過波の第1到達波は骨材の多重散乱の影響が小さく、入力周波数がそれほど低下することなく透過していると考ええる。

最後に、第1到達波の振幅値から、波動の減衰特性を調べる。図-5 に計測実験の第1到達波の振幅値(受信電圧)と EFIT で得られた探触子部分の圧力の値を示す。このとき、供試体 C の振幅値が大きな値を示したので、その最大値で割ることによって、正規化したものをプロットしている。この結果から、透過波の第1到達波の場合、骨材径が小さくなるほど振幅値が大きくなる傾向にあることがわかった。供試体 C と供試体 A の骨材径は約3倍程度異なるが、供試体 C の透過波の振幅は供試体 A に比べて2倍程度大きく、計測値と数値解析は良好な一致を示した。

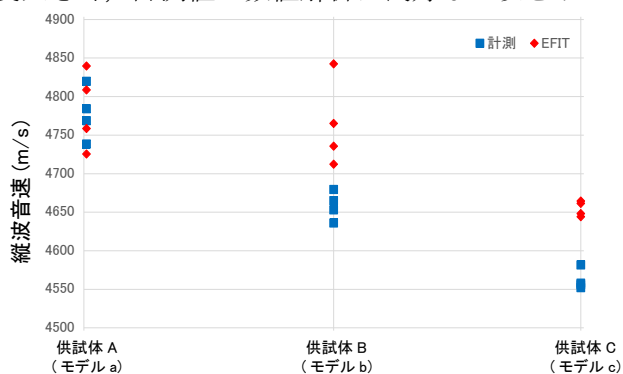


図-3 透過波の音速の変化。

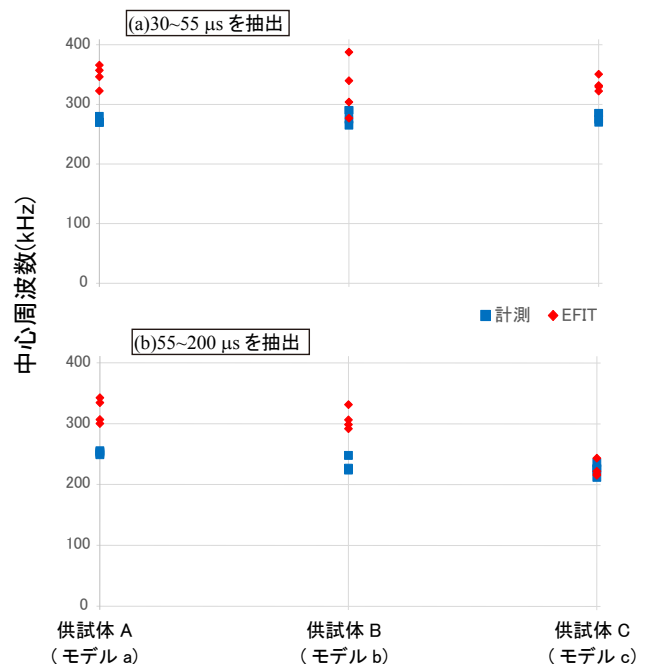


図-4 (a) 第1到達波, (b) コーダ波成分の中心周波数。

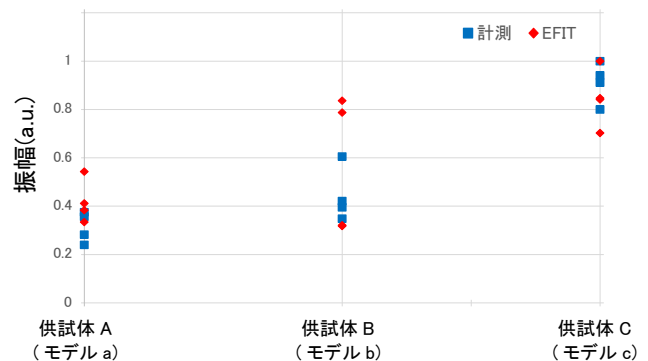


図-5 第1到達波の振幅の変化。

4. まとめ

骨材径の違いによる超音波の伝搬特性や散乱特性を調査した。コンクリート中の空隙、遷移帯、入力波の周波数の違い等によって、絶対的な値は一致しなかった数値解析があるが、全体として実験とよい相関がみられた。今後は、数値モデルの精度を高めると共に、これを経年的に劣化するコンクリートのシミュレーションに発展させていきたい。

参考文献

- 1) G. Acciani et al., Nondestructive evaluation of defects in concrete structures based on finite element simulations of ultrasonic wave propagation, *Nondestruct. Test. Eval.*, Vol.25, pp.289-315, 2010.
- 2) P. Fellinger et al., Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT - elastodynamic finite integration technique, *Wave Motion*, Vol.21, pp.47-66, 1995.
- 3) K. Nakahata et al., Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, *Construction and Building Materials*, Vol.78, pp.217-223, 2015.