

電磁界有限積分法による電磁波レーダ法の3次元モデリング

愛媛大学大学院 学生員 ○松本大史
愛媛大学大学院 学生員 伊賀達郎
愛媛大学大学院 正員 中畑和之

1. はじめに

コンクリート構造物のメンテナンス手法として、コンクリート中の鉄筋、埋設物、損傷等を電磁波を用いて非破壊的に推定する方法がある。これは、一般的には電磁波レーダ法¹⁾と呼ばれており、電氣的性質の異なる物質の界面で電磁波が反射することを利用して、コンクリート中に電磁波を放射し、反射波が受信されるまでの到達時間から内部鉄筋等の位置、形状を画像化する方法である。これまで、電磁界有限積分法²⁾(EMFIT: Electromagnetic Finite Integration Technique)を電磁波レーダ法のモデル化に適用し、電磁波レーダ法を高度化しようとする試みがなされている³⁾が、これらは2次元波動場を対象としたものであった。しかし、実際の電磁波レーダ法に用いられるアンテナから放射される電磁波は3次元的な指向性を有する。そこで本研究は、3次元 EMFIT を電磁波レーダ法のモデル化に適用し、電磁波計測によって EMFIT の検証を行うことを目的とする。ここでは、計測実験で用いる被検体と同様の数値モデルを作成し、EMFIT で計算した波形と計測実験による波形を比較する。

2. 電磁波計測

日本無線製のハンディーサーチ (NJJ-105 改) を用いて空气中、セメントペースト、モルタル、コンクリート中を伝搬する電磁波を計測した。ハンディーサーチは特別に改良しており、送信アンテナと受信アンテナが分離されている。空气中を伝搬する電磁波は、送信アンテナと受信アンテナを対向させ、セメントペースト、モルタル、コンクリートの供試体については、供試体の上部と下部にアンテナを設置して電磁波計測を行った。供試体は、いずれも直径 100mm、高さ 200mm の円柱で、水セメント比は $W/C=30\%$ とした。モルタル供試体に含まれている骨材の最大粒径は 5mm で、骨材率は 55% である。コンクリート供試体に含まれている骨材の最大粒径は 20mm で、骨材率は 48% である。計測時の供試体は完全乾燥状態であった。

計測結果を図-1 に示す。計測結果より、空气中における電磁波の伝搬速度は $2.90 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、セメントペースト、モルタル、コンクリートのそれは $1.32 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 $1.37 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 $1.36 \times 10^8 \text{ m/s}$ であることが分かる。受信波形をみると、セメントペースト供試体とコンクリート供試体中の電磁波は、速度が若干異なるだけで、骨材による散乱の影響は少ないことがわかった。

従って、本研究の数値モデルでは、コンクリート材料を均質化して扱うこととする。また、図-1 より、空气中に比べて固体中は電磁波の振幅が大きくなることがわかった。この現象の解明を含め、次節で EMFIT と計測実験の波形比較を行う。

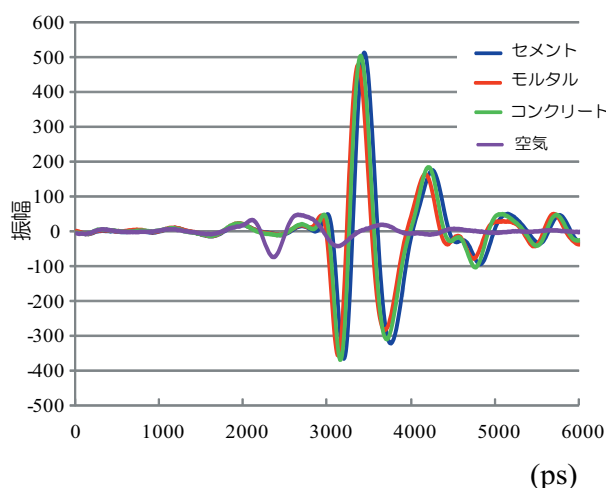


図-1 セメントペースト、モルタル、コンクリート供試体、および空气中を伝搬する電磁波の波形

3. 計測波形と解析波形の比較

図-2 に示すように、波形比較に用いる数値モデルは図-1 と同じ条件となるように直径 100mm、高さ 200mm の円柱とし、周囲は吸収境界を含む空気層を設定した。空气中において、誘電率 $\epsilon = 9.403 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 、透磁率 $\mu = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ 、電気伝導率 $\sigma = 0.0 \text{ S/m}$ とし、コンクリートは、誘電率 $\epsilon = 43.83 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 、透磁率 $\mu = 1.257 \times 10^{-6}$ 、電気伝導率 $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$ とした。また、EMFIT のセル長は $\Delta x = 1.0 \text{ mm}$ とし、時間間隔は $\Delta t = 1.56 \text{ ps}$ と設定した。空气中とコンクリート供試体中を伝搬する電磁波の計測波形 (上) と解析波形 (下) を図-3 に示す。図-3 より計測波形と EMFIT による解析波形は良好な一致を示していることがわかる。また、コンクリート中を伝搬する電磁波は、空气中を伝搬する電磁波よりも振幅が大きくなる現象が、解析波形でも現れた。この現象について詳細に調べるために、電磁波を可視化した。図-4 の左側は空气中を伝搬する電磁波のスナップショット (電場の絶対値) を示す。計算は 3次元で行ったが、スナップは断面を可視化したものである。空气中で放射された電磁波は球面状に広がっているが、円柱コンクリート中ではエネルギーを維持

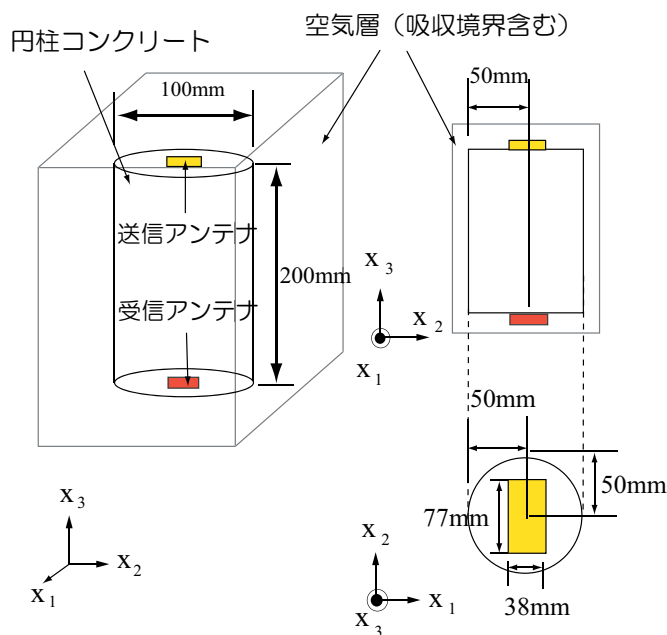
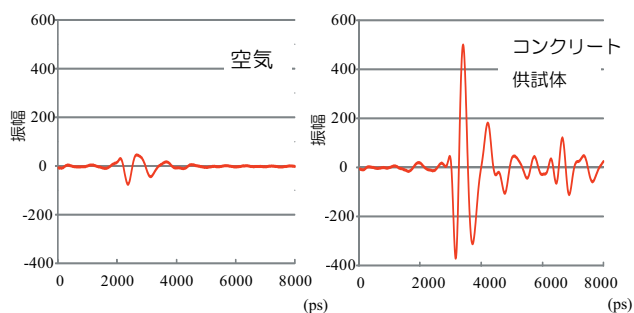


図-2 円柱コンクリートの数値モデル

したまま鉛直下方向に伝搬しているのが分かる．これは，送信波の波長に対して円柱の断面の大きさが同程度のとき，空気と円柱コンクリートの境界部がウェーブガイドとなり，いわば導波管のような構造になっているものと考えられる．導波管では，波動エネルギーは管内に閉じ込められるため，エネルギーの減衰が少ない．

計測波形



EMFIT による解析波形

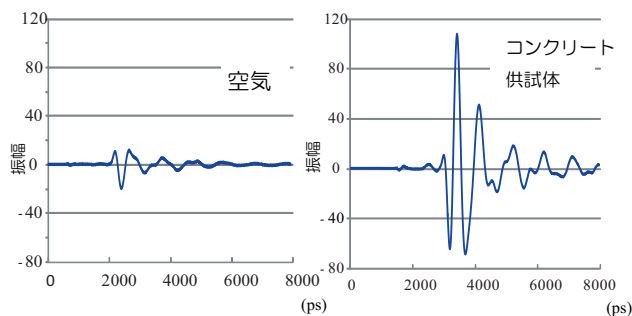


図-3 空気中と円柱コンクリート供試体中の電磁波伝搬の波形比較 [計測波形 (上) と解析波形 (下)]

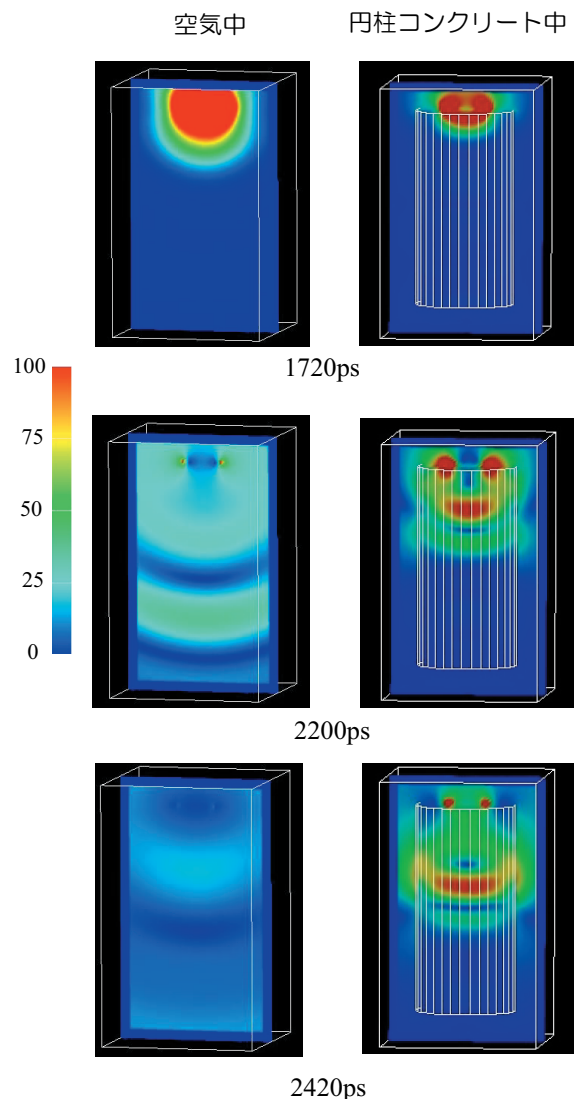


図-4 電磁波伝搬のスナップショット (左: 空気中, 右: 円柱コンクリート中の電場の絶対値)

4. 結論

本研究では，3次元 EMFIT を電磁波レーダ法のモデル化に適用し，妥当性を検証した．空気中と円柱コンクリート中を伝搬する電磁波の波形について，計測と数値解析を比較した結果，両者の波形は良い一致を示した．本研究によって，3次元 EMFIT は実際の電磁波レーダ法を非常に良い精度でモデル化できていることが分かった．今後は EMFIT を電磁波レーダ法の高度化のためのツールとして使用することを考えている．

参考文献

- 1) 魚本健人，加藤佳考: コンクリート構造診断工学，オーム社，pp.75-77, 2008.
- 2) R. Marklein: *Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik*, Shaker Verlag, Aachen, 1998 (in German).
- 3) 伊賀達郎，中畑和之: 電磁波非破壊探査のためのイメージベース FIT に関する検討，計算工学講演会論文集，第16巻，C-11-3, 2011.