

FDTD 法による内部欠陥を有するコンクリート内の電磁波伝播応答評価

名古屋大学 学生会員 ○堀田 茉那
名古屋大学大学院 正会員 山本 佳士, 中村 光, 三浦 泰人

1. はじめに

電磁波レーダ法は、コンクリート内部に電磁波を放射し、内部の鉄筋等に反射された信号を受信することによって内部対象物の位置を評価する手法であり、現在既に広く実用化されている。ただし、その探知能力は、送信電力、送信波の形状、アンテナ種類等によって大きく変化することが知られている¹⁾。

一方、近年の計算機性能の向上により、高精度・高解像度で電磁波伝播現象のシミュレーションが可能になってきている。広範な条件の数値モデルの応答を評価することで、より高度な電磁波レーダによる非破壊検査手法の開発が可能になると考えられるが、鉄筋、内部欠陥、ひび割れ等を含むコンクリートの電磁場解析となるといくつかの先行研究^{1) 2)}はあるものの数は少なく十分な検討は行われていない。

そこで、本研究では、コンクリート構造物の特に内部欠陥や、ひび割れの探査を目的とした電磁波レーダ法の高度化を目的として、コンクリートを対象とした電磁波伝播シミュレーションを試みた。ここでは、特にその基礎的な検討として、コンクリート内の欠陥を模擬した空気層のサイズを変えたモデルの電磁波伝播シミュレーションを行い、コンクリート表面で計測される電場の応答とコンクリート内の空気層の厚さの関係を評価する。

2. 解析手法

本研究では、電磁波伝播解析手法として、マクスウェル方程式を有限時間領域差分法(FDTD 法)によって解く、汎用ソフトウェア Poynting を用いた。ここで、マクスウェル方程式は次式で表される。

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

ここで、 \mathbf{E} : 電場(V/m), \mathbf{H} : 磁場(A/m), \mathbf{D} : 電束密

度(C/m²), \mathbf{B} : 磁束密度(Wb/m²) μ : 透磁率(H/m), σ : 導電率 (S/m), ε : 誘電率 (F/m)である。

FDTD 法では、電場と磁場の評価点を時間方向 t , 空間方向(x,y,z)に交互に配置し、それぞれの方向に中心差分を用いて計算を行っている。

3. 空気層を有するコンクリート供試体の電磁波伝播シミュレーション

3.1 解析概要

解析モデルを図-1 に示す。解析領域は、横 800mm×奥行 400mm×縦 400mm であり、その中に横 500mm×奥行 200mm×縦 150mm の空気層を含むコンクリートモデルを配置した。解析領域の境界は、すべて吸収精度が高い Perfect Matched Layer(PML)吸収境界条件とし、コンクリートの比誘電率 $\varepsilon_r=8.0$, 導電率 $\sigma_r=0.03$, 比透磁率 $\mu_r=1.0$ とした。また、コンクリート内に空気層を設定し、空気層の幅を変えた 4 つのモデルと、コンクリートのみのモデル、合計 5 つのモデルを作成した。図-1 に示すように、空気層の上面は供試体上面から深さ 30mm の位置に固定し、幅をそれぞれ 15, 30, 60 および 90mm と設定した。また、コンクリート表面から 20mm の上方に送信アンテナを配置した。送信アンテナはダイポールアンテナとし、フーリエスペクトルの中心周波数がおおよそ 1.6GHz になるよう、アンテナの長さを設定した。時間刻みは Courant-Friedrich-Lewy(CFL)条件を満たすように設定している。

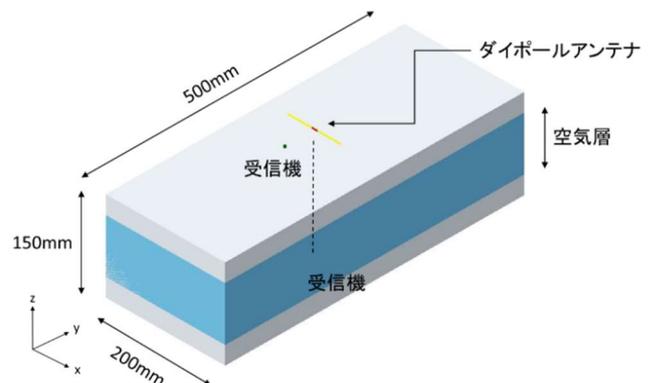


図-1 解析モデル

3.2 解析結果

図-2 に、送信アンテナ直下のコンクリート底面に配置したアンテナによって観測された電場の応答を示す。図より、電磁波が底面に到達するまでの時間は、コンクリートだけのモデルが最も長く、空気層の幅が大きいほど早く到達することが確認できる。電磁波の伝播速度は、空気中よりもコンクリート中を進む場合の方が遅く、したがって当然上記のような応答時間の差が生じる。また、空気層が小さくなるに従って、振幅が大きくなる傾向も確認できる。

図-3 に、送信アンテナから y 方向に 50mm 離れた表側のアンテナ(図-1)における電場の応答を示す。図より、まず、第 1 波の負側および第 2 波の正側の振幅に顕著な差が見られた。空気層の幅が小さいほど、振幅が大きくなる様子が確認できる。その後も応答の振幅および周期が複雑に変化しながら振動するが、その特徴は空気層の幅の変化に応じて滑らかに連続的に変化している。図-4 に、アンテナを含む x 軸に垂直な断面における電場の大きさのコンター図を示す。図の濃い灰色の部分に空気層であり、電磁波が空気層内で速く伝わる様子が観察できる。

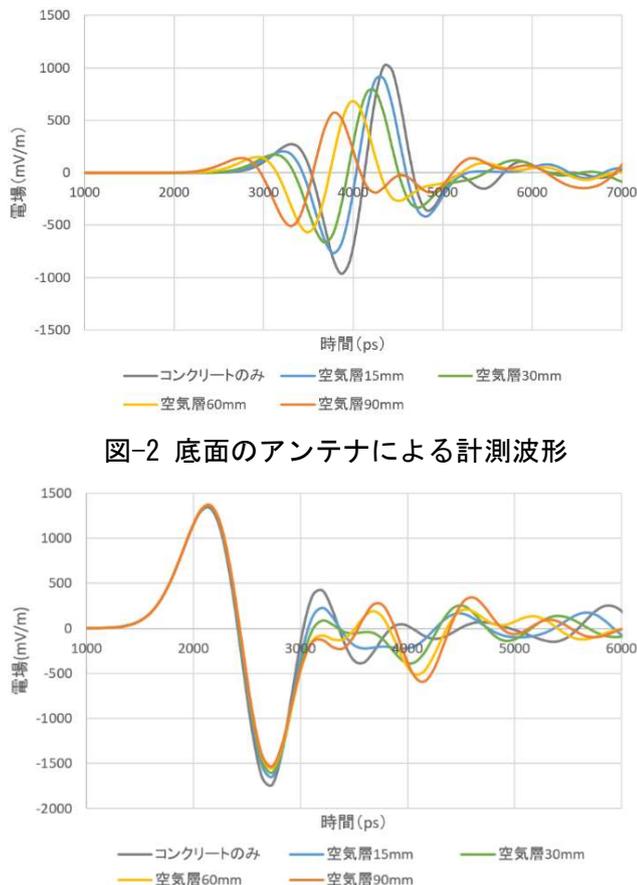


図-2 底面のアンテナによる計測波形

図-3 表側のアンテナによる計測波形

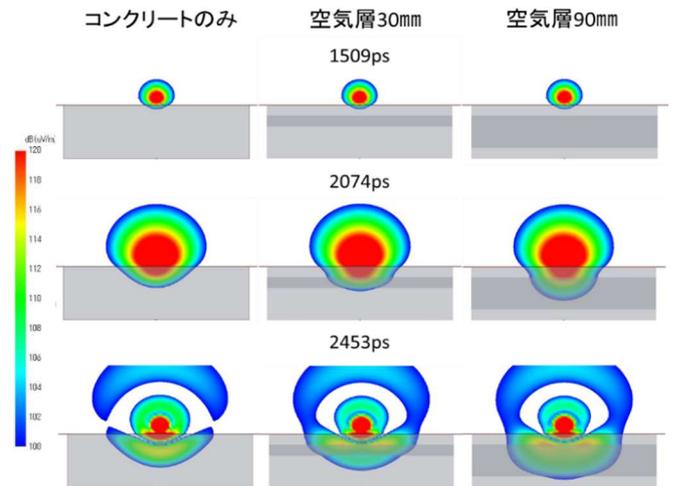


図-4 コンクリート中の時間ごとの電場の大きさ

4. まとめ

本研究は、コンクリートの内部欠陥・損傷と電磁波伝播応答の関係性を数値シミュレーションにより評価することを試みたものである。ここでは、その基礎的な検討の一例として、表面および裏面で計測される電場の応答とコンクリート内の空気層の厚さとの間に一定の相関があることを示した。ただし、コンクリートは骨材、空隙を含む非均質材料であり、今後はその影響を評価する必要がある。さらに、内部欠陥、特にひび割れのような非常に厚さの小さい空気層の判別に最適な、送信アンテナタイプ、送信波形状・周波数特性、受信位置、数等も数値実験的に検証するとともに実験も行なって妥当性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 西尾壮平, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸(2002) : 電磁波レーダ法によるコンクリートの内部探査に関する有限時間領域差分法解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 557 号, 29-36
- 2) 岸岡大樹, 中畑和之, 清良平(2011) : 電磁界有限積分法(EMFIT)による電磁波レーダ法のモデリング, 土木学会第 66 回年次学術講演会
- 3) 松本大史, 伊賀達郎, 中畑和之(2012) : 電磁界有限積分による電磁波レーダ法のモデル化とその検証, 土木学会第 67 回年次学術講演会