

レーダ法によるコンクリートの非破壊検査に関する研究 (1)

—多層境界条件下のコンクリート内のレーダ伝播モデルおよび鉄筋検出特性—

Nondestructive Test for Concrete Structures Using Radar (1)
—Simulation of Radar Response on Embedded Layer in Concrete—

朴 錫均*・魚本健人*・吉沢 勝**

Seok-kyun PARK, Taketo UOMOTO and Masaru YOSHIZAWA

1. ま え が き

レーダ法によるコンクリートの非破壊検査は超音波法等の検査より多くの部材等に広く適用することができ、測定も簡単であるので将来有望な技術として最近、関心が高まっている。しかし、コンクリート内に適用する場合には減衰が大きく、高周波数成分の使用が困難であるので分解能も悪くなり、境界面や異物質等からの雑信号と混ざってしまうため、解析しにくい場合が多い。そこで、効率的な検査を実施するためにはまず、できるだけ十分な事前情報、たとえば目標物または主材料の境界条件、幾何学的特性、電気的性質、地域的条件等を活用する必要がある。もちろん、このように多様な情報を事前に完全に把握するのはほとんど不可能であるので、その代わりにいろいろな条件を仮想的に作り、各条件でのレーダの伝播特性を検討するシミュレーション研究が切実に要望されている。本研究はこのような目的で実施したもので本文では、電気的性質の異なる各層間材料の変化によるコンクリート中のレーダ伝播およびその信号応答特性をシミュレーション解析し、その結果を実際測定した結果と比較することにより、モデルの妥当性も検討した。

2. モデルの基本理論

2.1 媒質中における電磁波レーダの伝播

ある媒質を伝播する電磁波が平面波として、均質な等方性(非分散性)の媒質を伝播すると仮定した時、電磁波信号の伝播に関する減衰および位相定数(α と β)は次式で表現できる。

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon / 2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma / \omega \epsilon)^2} - 1} \quad (1)$$

*東京大学生産技術研究所 第5部

** (財)首都高速道路技術センター

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon / 2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma / \omega \epsilon)^2} + 1} \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 、 ϵ_0 :真空の誘電率、 ϵ_r :媒質の誘電率、 $\mu = \mu_0 \mu_r$ 、 μ_0 :真空の透磁率、 μ_r :媒質の透磁率、 σ :導電率、 ω :角周波数を表す。また、コンクリート中または地中のような非金属性の低損失誘電体では $\mu_r = 1$ としてよいので $\mu = \mu_0$ になる。

一方、表皮深さ(skin depth)の概念により、この深さの定義を電磁波が $1/\alpha$ の深さに到達する時に信号強度が e^{-1} 倍に減衰することであると仮定すると、一定強度の波が深さ D_i の低損失誘電体を通過する場合の減衰係数 A_i は次のように表され¹⁾、ある特定強度の信号だけが対象媒質を透過できることになる。

$$A_i = 1 - D_i \alpha_i e^{-1} \quad (A_i > 0) \quad (3)$$

(もし、 $A_i \leq 0$ の場合は完全に減衰され伝播しない)

図1のような構造の場合、深さ D_i の各層を通過する波の強度 I_i は次式で表される。

$$I_i = A_i R_i T_{i-1} \quad (4)$$

ここで、反射係数 R_i と透過係数 T_i は、誘電率の異なる媒

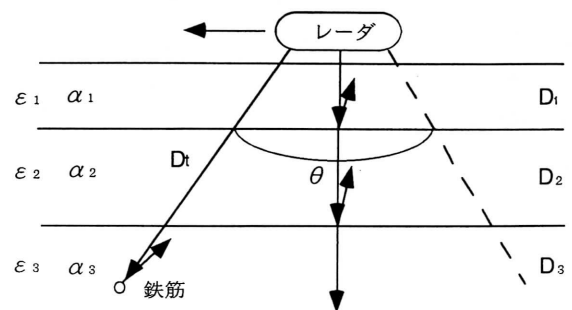


図1 多層構造でのレーダ反射伝播仮想図

質間の境界面を波が入射する場合、おのおの次式で与えられる。

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (5)$$

$$T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (6)$$

しかし、対象物体が鉄筋のように誘電率が ∞ になる場合は上記式はそのまま適用することは無理であるから、ある限界値を仮定しなければならない。なお、鉄筋の直径変化 (mm 単位変化) による影響は、レーダ方程式で対象物の断面積項で考慮して計算することができるが、他の値に比べると無視できる。

なお、式(2)から位相速度 V_p と群速度 V_g は次のように表される³⁾。ただし、 c は光の速度である。

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{2}{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2 + 1}} \quad (7)$$

$$V_g = 1/(\partial\beta/\partial\omega) = V_p \frac{2\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2}}{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2 + 1}} \quad (8)$$

しかし、低損失誘電体と高周波数帯では $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ と考えられるので両式は次のような関係になり、波長 λ_g も同じ方式で表現でき、自由空間での波長 λ_0 の $1/\sqrt{\epsilon_r}$ になる。

$$V_p \approx V_g \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

$$\lambda_g = V_g/f = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

2.2 媒質中の水平分解能

媒質内での水平分解能 R_h は、対象媒質を非減衰性媒質とし、使用アンテナを開口アンテナと仮定すると、アンテナ径 W_d と目標物までの距離 D_t との関係を持つ次式になる。

$$R_h = \frac{cD_t}{2\sqrt{\epsilon_r}fW_d} \quad (11)$$

ここで、 f は使用アンテナの中心周波数であり、アンテナから放射するパターンは線形分布と仮定した。なお、鉄筋等金属性物体からの反射信号は図1で示したように式(11)により、アンテナの進行とともにビーム幅で広がる信号中で最も早く到達する波と仮定したが、各層の境界面のような長方形平面ではアンテナから直角の成分信号が一番早く到達すると仮定した。

2.3 畳み込み積分

解析対象のシステムを線形であると仮定すると、上記のモデルにより計算された結果は畳み込み積分を利用して出力信号として発生させられる。システムの出力 $y(t)$ は次式(12)のように入力 $x(t)$ とシステムに単位インパルスを加えた時の応答 $h(t)$ との畳み込み積分により表せる。

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (12)$$

3. 実験概要

試験体の測定配置と規格を図2に示した。D10, 16, 22の三種類の鉄筋 (ピッチ30 cm) を目標物とし、コンクリート ($w/c=55\%$, 最大骨材寸法20 mm) だけの場合とその間に各々空気 (空間), 砂, 砂利 (砕石) を挿入して各媒質変化によるレーダ測定を実施した。なお、測定時、ふち等からのノイズをできるだけ抑えるために炭素と発泡性ウレタンで作られた電磁波吸収材を使用した。測定は地中探査レーダ (UG-V33, 三井造船(株)製) を使用した。この装置は3素子ダイポール, 3モード動作のアンテナ方式を採用しており (方向検知可能), 20 MHz~1 GHz の広帯域周波数の高分解能型である。

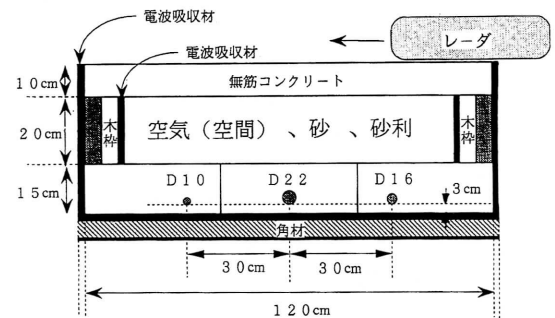


図2 試験体の構成断面

4. モデルの比較検討

上記のモデル理論によるシミュレーション結果としてまず、自由空間中とコンクリート中での鉄筋の検出を試みた。図3と図4は自由空間中でピッチ40 cm, D22の鉄筋に対して深さをおのおの35 cm と62 cm にした場合の結果であり、図5は図3と同じ条件下で自由空間の代わりにコンクリート中で計算した結果である。これらの結果から見ると図3と図4の条件下の鉄筋の水平分解能はおのおの34 cm, 58 cm になり、図4の場合は鉄筋ピッチの区分ができなく

研 究 速 報

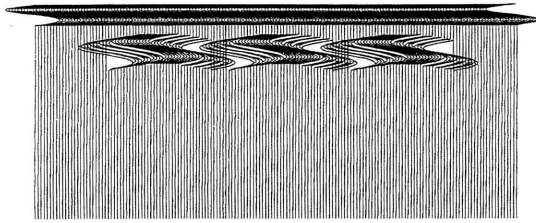


図3 空間中の鉄筋シミュレーション (深さ35 cm)

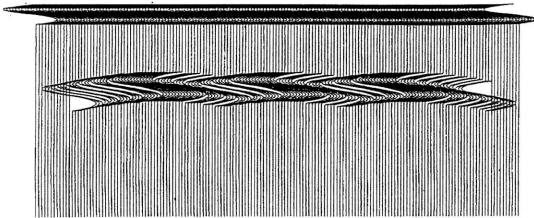


図4 空間中の鉄筋シミュレーション (深さ62 cm)

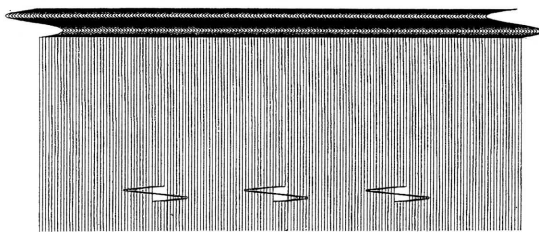


図5 コンクリート中の鉄筋シミュレーション (深さ35 cm)

なるのがわかる. しかし, 図5のコンクリート中ではむしろ水平分解能は5 cmと向上されたが信号が非常に弱くなることから深くなると鉄筋を検出できなくなることがわかる.

次に, 図2の条件下のシミュレーション結果と実際測定結果を比較検討した. 代表的な結果として層間挿入材料が空間の場合と碎石の場合を取り上げれば, シミュレーション結果は図6, 図7に, 実測結果は図8, 図9となる. まず, シミュレーション結果を見ると, 線形伝播分布仮定下の各層別電気的性質と減衰を考慮して計算した鉄筋の分解能は図6と図7でおおの19 cmと13 cmになり実測結果(図8で約20~23 cm)に近く, 層間挿入材料が空間と碎石の場合は伝播速度が他の材料より速い(空間ではコンクリートの3.5倍, 碎石の2.2倍)ことから波の反射距離は相対的に短くなる. また, 各層から反射して戻る波の強度(振幅)と位相等も各材料の電気的性質が変わるに従って変化することが示されている. しかし, 図9の場合は鉄筋からの信号が認められなかったが, パラレルモード(境界検出)から3素子ダイポール3モード(鉄筋検出)に変換することで検出できた. これらの結果を解析モデルに対し

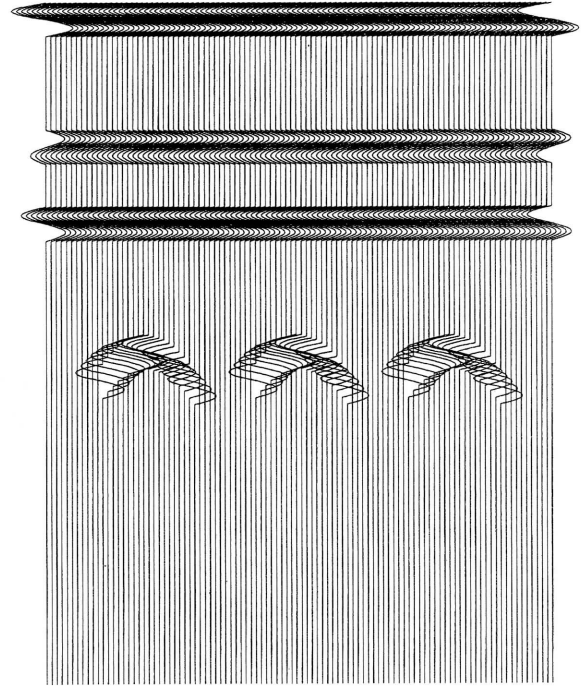


図6 空間挿入下のシミュレーション

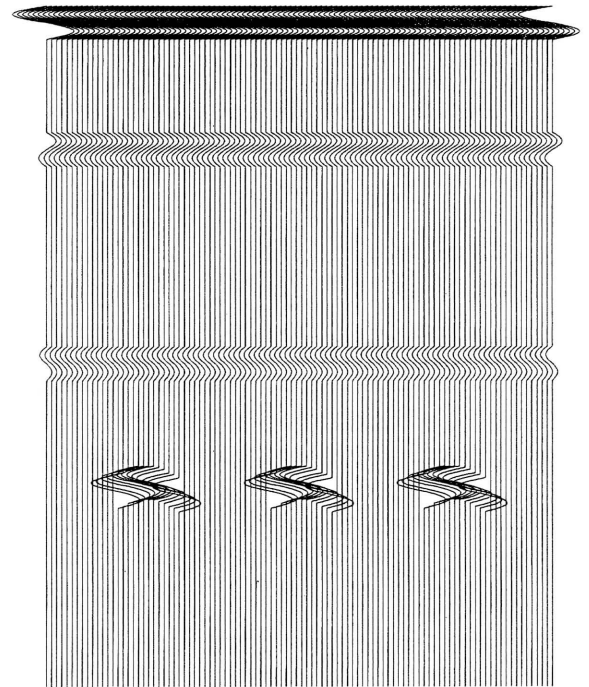


図7 碎石挿入下のシミュレーション

て相対比較したのが表1であり, 各層境界からの反射信号の到達時間も比較的良好傾向を表すことがわかる. ただし, 相対値の発生はモデルで仮定した誘電率(コンク

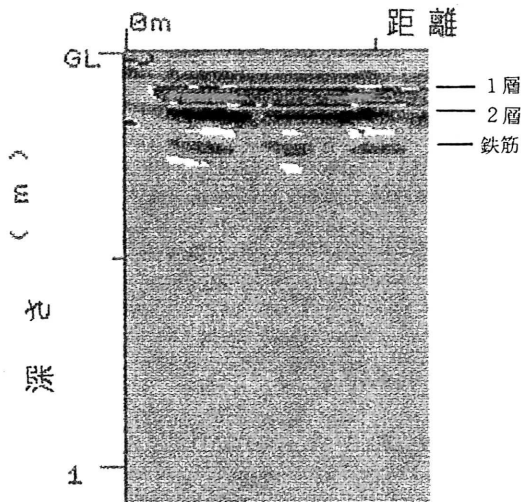


図 8 空間挿入下の実測結果

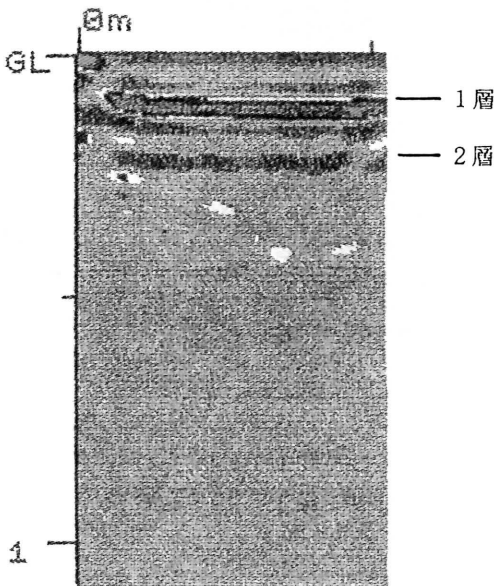


図 9 砕石挿入下の実測結果

表 1 誘電率仮定によるモデルの実測データ (各層厚みと鉄筋深さ) との相対比較

区分 測定対象	空間			砕石		
	モデル	実測	相対差	モデル	実測*1	相対差
1 層厚み	7.9cm	8.8cm	-0.9cm	7.9cm	8.8cm	-0.9cm
2 層厚み	4.7cm	4.4cm	+0.3cm	13.1cm	12.0cm	+1.1cm
鉄筋深さ	20.5cm	22.0cm	-1.5cm	28.4cm	32.0cm	-3.6cm

*1 3 素子ダイポール 3 モードで実測した値による。

リート：12，砕石：5) の差のためでありこれを実測時の値にすると両方がほとんど一致すると考えられる。なお、実測信号での波のくずれ等と鉄筋からの反射信号の形が違うのは実際の電磁波は性質の違う各層を伝播する場合に散乱および回折等の影響を大きく受け (分散性)，適用モデルでは周波数の影響を無視した $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ の場合、 $\alpha = \sigma/2\sqrt{\mu/\epsilon}$ ため使用アンテナの周波数の影響を考慮しなかったこと (波形のくずれ無視)，またはアンテナ方式等使用装置の特性にも関係があると考えられる。

5. ま と め

シミュレーション結果と実際測定結果は全般的に両方がよく合う傾向を示す。もちろん、理想的な仮定に基準したモデルであるから実際との差もあったが、本シミュレーション技法を活用すると、わかっている最小の情報から探したい目標物を検出する場合やこの方法を通じて蓄積された資料から未知のデータを解析する場合に役に立つと考えられる。今後、鉄筋と空隙に関する影響等を検討する予定である。

(1995年 1月10日受理)

参 考 文 献

- 1) N. McCAVITT, M.C. FORDE, "The Application of Convolution to The Simulation of The Response of Masonry Arch Bridges To Ground Proving Radar", Nondestr. Test. Eval., Vol. 6 (1991), pp. 179-194
- 2) 魚本健人ほか著, コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1993
- 3) 山下栄吉編著, 応用電磁波工学 (第10章), 近代科学社, 1992
- 4) 関根松夫著, レーダ信号処理技術, 電子情報通信学会編, 1993
- 5) 村沢観治ほか, 3 アンテナ素子を有する地中埋設物探査レーダ, 三井造船技報 第152号, pp. 18-24
- 6) 佐藤幸男著, 信号処理入門, オーム社, 1992
- 7) 木村憲明ほか, 電磁波によるトンネル覆工厚と空洞検査技術の開発, 三井造船技報 第141号, pp. 11-18