

レーダ法による多層コンクリート床版の 非破壊検査のシミュレーション解析

朴錫均¹・魚本健人²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 土木工学専攻(〒106 港区六本木7-22-1)
²正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授(〒106 港区六本木7-22-1)

多層からなるコンクリート床版についてレーダ検査を行い、多層境界条件を考慮したシミュレーション結果との比較により、モデルの妥当性およびシミュレーション技法の有用性を検討した。解析では、電気的性質の異なる各媒質での電磁波の伝播を各境界面と媒質内の物体(鉄筋)について入射形態別に反射および透過特性を考慮し、減衰および鉄筋の水平分解能等を新しい方式で解析することにより、実測結果と非常に類似な特性が得られ、レーダ検査解析の場合、有益な解析手法としての利用可能性が立証された。

Key Words : radar, simulation, nondestructive test, concrete, slab, embedded layer, electromagnetic properties

1. はじめに

レーダ法によるコンクリートの非破壊検査は適用部材に対する制約が比較的少なく、測定も他の検査方法より速く簡単であるので最近、将来有望な技術として関心が高まっている。しかし、コンクリートのような骨材が含まれた非均質性媒質に対して適用する場合には、減衰及び散乱等の影響が大きく、高周波成分の使用が困難であるので分解能も悪くなり、各種境界や異物質等からの雑信号が目標物からの信号と混合されてしまうため、解析に専門的な知識と経験が要求される。特に、舗装道路のように、各層別構成材料(媒質)が異なる場合は各媒質の電気的性質の差により電磁波の位相速度と反射および透過特性等が一層複雑に変化するため、これに関する電磁波の基本伝播特性を事前に究明して解析を併用しない限り、解析が難しい場合も多いと考えられる。それにもかかわらず、今までのレーダ法の解析は主に、測定結果に対する解析のみに偏って来た傾向がある。しかも、コンクリート構造物の場合はレーダ技術が比較的活発に適用されている地中の埋設管探査分野とは異なり、得られる画像があまり明らかでない場合が多い(部材の境界条件、鉄筋の大きさと配筋状態、対象深さ、構成材料の性質等の差による:これはまたコンクリート専用のレーダ装置が必要な理由もある)、測定結果の解析に効果的な画像処理にも多くの制約が存在する。

したがって、効率的な検査を行うためにはまず、できるだけ充分な事前情報、すなわち構造物の境界条件、幾何学的特性、電気的性質等を活用するとか予測することにより、該当構造物に対するレーダ信号の事前解析を導入することが望ましい。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技法が有効と考えられる。本研究はこのような現状を考慮し、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、モデルの妥当性及び事前解析の有用性を検討したものである。

2. 既往の研究

土木構造物に対するレーダのシミュレーション研究としては、N. McCAVITT, M.C.FORDEの研究^{1,2)}が代表的である。この研究は、メーソンリーアーチ橋に対するインパルスレーダのシミュレーション研究として、アンテナからのパルス波が対象構造物の測定面について垂直成分のみ入射すると仮定し計算している。しかし、こういう仮定は該当構造物内の境界条件が横方向へ連続的である場合は合理的であると考えられるが、内部に限定された大きな空洞とか鉄筋等が存在する場合は、垂直成分以外の入射信号の影響も大きく作用し、シミュレーションと実際測定結果の間には大きな差が発生するため、適用に限界があると考えられる。

一方、朴、魚本、吉沢の研究^{3,4)}では、実験用多層床版構造体に対するシミュレーションで、上記N.McCAVITT, M.C.FORDEのモデル¹⁾を基準にしたが、各層の連続境界条件では垂直成分の波が、内部の鉄筋まではある入射角(アンテナからの一定ビーム幅による)を持つ斜めの波が先にアンテナから伝播し反射すると仮定した。しかし、この場合も後者の波は直進すると仮定し、試験体の各層毎の材料の電気的性質が異なるにもかかわらず

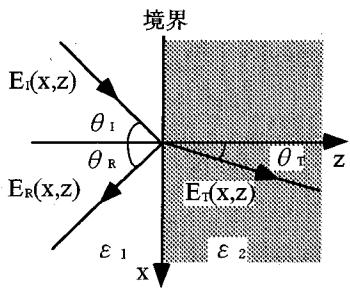


図-1 誘電体の異なる媒質境界面における入射波の変化

入射角による反射と透過係数の影響を考慮しなかったため、減衰および鉄筋に対する水平分解能の正確な算出には限界があった。

なお、以上の研究等では各境界を通過する信号の減衰を表皮深さ (skin depth) 概念により表した。これは伝導電流が変位電流よりもっと大きな場合、すなわち $\sigma \gg \omega \epsilon$ (導電率 \gg 角周波数 \times 誘電率) の条件で電磁波が空間から導体面に垂直入射し、侵入する深さの目安として主に適用されて来た概念である^{6),8),14)}ので（もちろん、無損失もしくはコンクリートのような低損失誘電体でもこの概念は式の分類で適用は可能である）、あえてこの概念に拘る必要性はないと考えた。さらに、波が各境界を透過する際、減衰の影響が伝播距離だけで表れ、各境界毎の反射により累積損失される電磁波量を考慮しなかったため、深さおよび各媒質変化による減衰を十分に表せなかつたと考えられる。

一方、媒質中の電磁波レーダの探知可能距離を求めるのに使われる一般的なレーダ方程式による考慮^{5),11)}も、媒質が本場合のように電気的性質の異なる多層境界構造の場合では別の考え方が必要であると判断される。

したがって、本研究では、モデルを改良するため、誘電体の異なる各媒質を伝播する電磁波に対して入射角による反射と透過係数の影響を考慮し、一般的な電磁波の媒質内減衰式を利用するとともに、電気的性質の異なる各境界を透過する波の強さに各境界面毎に反射による累加損失量も一緒に考慮することにした。

3. モデルの基本理論

(1) 電磁波の反射と透過^{6),8),11),14)}

a) 境界面に斜めに入射する場合

図-1 のようにある媒質の境界面を平面電磁波（平行偏波）が斜めに入射する場合の電界は次のような関係式で表すことができる。

$$E_i(x,z) = E_0 (\hat{x} \cos \theta_i - \hat{z} \sin \theta_i) e^{-jk_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (1)$$

$$E_R(x,z) = R E_0 (\hat{x} \cos \theta_R + \hat{z} \sin \theta_R) e^{-jk_1(x \sin \theta_R - z \cos \theta_R)} \quad (2)$$

$$E_T(x,z) = T E_0 (\hat{x} \cos \theta_T - \hat{z} \sin \theta_T) e^{-jk_2(x \sin \theta_T + z \cos \theta_T)} \quad (3)$$

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_1} \quad (4)$$

$$k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_2} \quad (5)$$

ここで、式(1)から式(3)は各々入射、反射、透過波の電界を表し、 E_0 は一定電界、 \hat{x} , \hat{z} は各軸方向の単位ベクトル、 k_1 , k_2 は各媒質での波数、 ω は角周波数、 μ_0 は真空の透磁率、 ϵ_1 , ϵ_2 は各媒質の誘電率を意味する。

一方、上記式で電界の連続性と入射角と反射角の一一致という境界条件を適用し、方程式を解くと、次のように誘電率の異なる媒質間の境界面での反射係数Rと透過係数Tに関する式が得られる。

$$R = \frac{\eta_2 \cos \theta_T - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_T + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (6)$$

$$T = \frac{2 \eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_T + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (7)$$

$$\eta_1 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_1} \quad (8)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_2} \quad (9)$$

ここで、 η_1 , η_2 は各媒質のインピーダンスであり、 θ_i , θ_T は入射角と透過角を表す。

よって、式(6), 式(7)と式(8), 式(9)からi層からi+1層への入射に対する一般式が次のように得られる。

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_{T,i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_{T,i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_i} \quad (10)$$

$$T_i = \frac{2 \sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_{T,i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_i} \quad (11)$$

b) 境界面に垂直に入射する場合

入射角 θ_i が 0° になる場合、すなわち境界面に電磁波が垂直に入射する場合には上記式は次のようにになる。

$$E_i(z) = \hat{x} E_0 e^{-jk_0 z} \quad (12)$$

$$E_R(z) = \hat{x} R E_0 e^{+jk_0 z} \quad (13)$$

$$E_T(z) = \hat{x} T E_0 e^{-j\gamma z} \quad (14)$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (15)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (16)$$

ここで、 γ は複素伝播定数として定義され、電磁波の伝播に関する減衰および位相定数 (α と β) は次のように表される。

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} - 1} \quad (17)$$

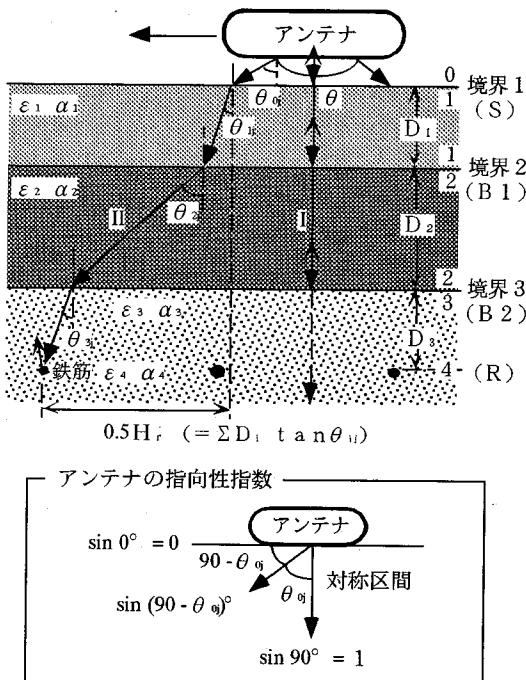


図-2 多層境界構造における電磁波レーダの伝播仮想図

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_e / \epsilon_r} \sqrt{\sqrt{1 + (\gamma_{\omega e})^2} + 1} \quad (18)$$

ここで、 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 、 ϵ_0 : 真空の誘電率、 ϵ_r : 媒質の比誘電率、 $\mu = \mu_0 \mu_r$ 、 μ_r : 媒質の比透磁率、 σ は導電率を表す。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 $\mu_r = 1$ として良いので、 $\mu = \mu_0 (=1)$ になる。

一方、媒質中における電磁波は $+z$ 方向に位相速度 v_p (ω / β)で指数関数的に減衰しながら伝播(透過)する。この場合、位相速度 v_p は次のように展開される。

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{1 + (\gamma_{\omega e})^2} + 1}} \quad (19)$$

しかし、低損失誘電体と高周波数帯では $(\gamma_{\omega e})^2 \ll 1$ と考えられるので、次の様な関係になり、波長 λ_p も同じように表現でき、自由空間での波長 λ_0 の $1/\sqrt{\epsilon_r}$ になる。ここで、 c は光の速度、 f は中心周波数である。

$$v_p \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (20)$$

$$\lambda_p = v_p / f = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (21)$$

一方、入射角 θ_{ij} が 0° になる場合の反射係数 R と透過係数 T は次式のようになる。

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (22)$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (23)$$

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (24)$$

$$T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (25)$$

(2) 多層境界条件下の電磁波モデル

以上の基本式を根拠にして図-2のような多層境界構造の場合について電磁波の伝播モデルを検討する。本モデルでは電磁波の伝播経路をまず、二つの条件に分けて仮定した。すなわち、一つの条件は各層の境界面のように横方向に連続である構造ではアンテナから境界面に垂直入射する信号(I)が、もう一つの条件は鉄筋のように限定された大きさの物体では斜めの入射信号(II)が一番早く到達すると仮定した。後者の条件ではアンテナの進行とともに入射角が変化するため、信号の強さも物体からの距離と反射および透過係数の値により変化することになる。

したがって、図-2のような構造の場合、任意のアンテナの移動距離(x方向)上の一点で深さ D_{ij} (+z方向)の各層を垂直入射および透過しながら各層境界等から反射して戻る電磁波の受信信号(往復信号)の強さ RE_{S-B2} は式(26)のように表わすことができる。この場合の反射と透過係数 R 、 T は式(24)と式(25)により求まり、垂直に入射する信号のみを考慮するため、 $\cos \theta_{ij} = 1$ になっている。このとき、入射角 θ_{ij} における i は z 方向の各層での変化を、 j はアンテナの x 方向の移動による変化を意味する。

$$\begin{aligned} RE_S &= IE_{\theta_{0j}} R_{10} \\ RE_B &= IE_{\theta_{0j}} T_{01} T_{10} R_{21} e^{-2\alpha_1 D_1} \\ &= IE_{\theta_{0j}} (1 - R_{01}^2) R_{21} e^{-2\alpha_1 D_1} \\ RE_{B2} &= IE_{\theta_{0j}} T_{01} T_{10} T_{12} T_{21} R_{32} e^{-2\alpha_1 D_1 + 2\alpha_2 D_2} \\ &= IE_{\theta_{0j}} (1 - R_{01}^2) (1 - R_{12}^2) R_{32} e^{-2\alpha_1 D_1 + 2\alpha_2 D_2} \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、 $IE_{\theta_{0j}}$ はアンテナから出力される初期入射信号を、 R_{mn} と T_{mn} における m 、 n は図-2の右側に数値で示されている各層の境界の前後を各々意味する。

なお、鉄筋のように限定された大きさの物体からの反射受信信号(往復信号)の強さ RE_R に関する式は次式のように示すことができる。この場合の反射と透過係数 R 、 T は式(10)と式(11)により求まる。

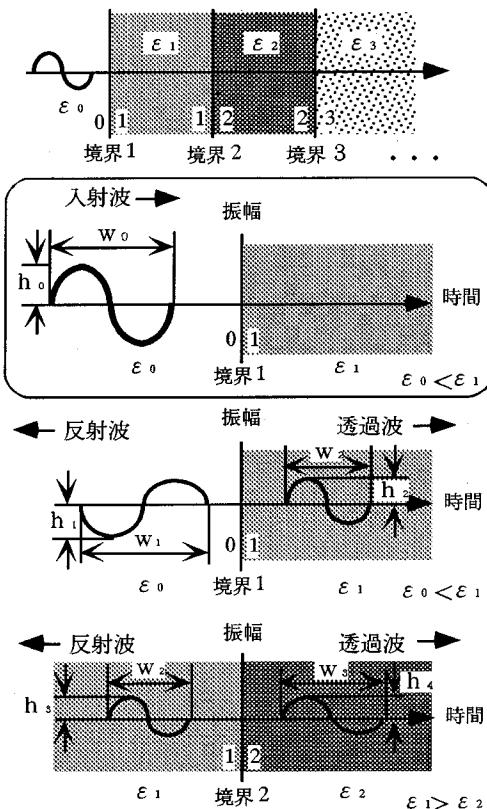


図-3 多層境界条件下の反射波と透過波の変化

$$RE_R = \sin(90 - \theta_{0j}) IE_{0j} (1 - R_{01}^2) (1 - R_{12}^2) (1 - R_{23}^2) R_{43} e^{-2(\alpha_1 D_1 / \cos \theta_{0j} + \alpha_2 D_2 / \cos \theta_{2j} + \alpha_3 D_3 / \cos \theta_{3j})} \quad (27)$$

ここで、 $\sin(90 - \theta_{0j})$ は図-2 の下端に示したように、アンテナから発せられた入射角によって変化するアンテナの指向性係数である。すなわち、 θ_{0j} が 90° である場合（アンテナから垂直入射する場合）にはその値が 1 として、最大値を表すことになる。

図-3 は入射波が媒質の境界面に垂直入射する場合、各境界での反射波と透過波の波形に対して変位および幅の変化を中心に示したものである。この例を見ると、変位 h_0 、幅 w_0 の入射パルス（ここでは、便宜上モノサイクルパルス形を例にしたがインパルス形についても概念は同じである）は、時間が経つにつれて右に進み境界 1 に達する。境界 1 では、 $\epsilon_0 < \epsilon_1$ であるから、反射波は変位が $h_1 = R_{10} h_0$ と入射波に対して反転（-）されて左に進み、透過波は変位が $h_2 = T_{01} h_0$ と減少され、幅も $w_0 \times \epsilon_0 / \epsilon_1$ になる。このような現象は境界 1 を通過した波が境界 2、3 の各境界を通過しながら次々と展開されることになる。しかし、図-3 のような例は理想的な場合であり、実際には媒質の非均質性等による波形の崩れと往復伝播による受信波形の変化等のため、例のよう

な幅等の変化の波形は得られにくい。そこで、本モデルではコンクリートの単一媒質を波が進行する場合の波長を基本波長（幅）として仮定した。

式 (26) と式 (27) は電気的性質の異なる各境界を透過する波の強さ（変位または振幅）に各境界面毎に反射による往復累加損失量が考慮され表現されている。例えば、各係数のみを考慮する場合、境界 3 での反射波は境界 1 と 2 を透過した波に対する反射波 $[T_{01} \times T_{12} \times R_{32}]$ として表れるが、この反射波はアンテナに戻るまでは透過波に変わるため、 $T_{21} \times T_{10}$ の透過係数の影響が追加される。ただし、この場合には透過波であるため位相には変化（反転）がない。このように、本モデルでは、一定の大きさの入射波について各境界から反射される基本波だけを考慮し、各層内で反復され反射する付属信号（多重エコー）やリングイング等の影響は無視した。

一方、図-2 に示されたように、媒質内に鉄筋のような良導体（完全導体）が存在する場合には計算上では鉄筋の誘電率が ∞ になるため反射係数が 1（全反射）になるが、これは鉄板等のような一定の大きさ以上の面体から反射する場合に有効であると考えられる。よって、次式のような鋼管からの反射係数式を別に考慮する必要がある。この式は偏波面が円柱長軸に平行であり、材質が完全導体で形状が口径 d の無限長円柱の場合に有効である^{7),10)}が、鉄筋の場合にも適用が可能であると判断した。但し、式 (28) は図-2 で境界 3 を透過した信号について鉄筋からの反射係数として適用した。ここで、 λ は媒質内の波長である。

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{\ln^2(2.8d/\lambda) + \pi^2/4}} \quad (28)$$

(3) 媒質中の鉄筋の水平分解能

一定媒質内の物体からの水平分解能（ここでは、最小振幅まで至るレーダの反射信号の影響が物体の左右両方向に及ぼす全長として定義した。よって、実際物体間の判読時の分解能はこの値の半分になる）を計算するためにはアンテナの受信電界範囲を求め、考慮することになる⁹⁾が、図-2 のような多層境界条件下的媒質に対しては計算が複雑になるため別な考え方が必要であり、次のような方法を利用した。

媒質内での水平分解能 H_d 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、アンテナからのビーム幅 θ は次のように表される。

$$\theta = \frac{\lambda}{W_d} \quad (29)$$

ここで、 W_d はアンテナ径である。しかし、本研究の測定ではダイポール系アンテナを使ったため、アンテナ径の代わりにダイポールアンテナの長さを代入し簡易計算

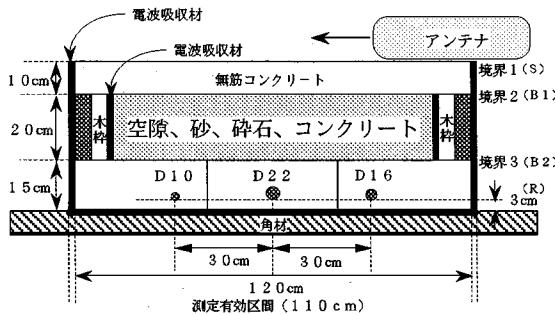


図-4 多層構造試験体の構成断面

表-1 使用コンクリートの配合

W/C (%)	S/A (%)	単位材料量(kg/m³)					
		水	セメント	細骨材	粗骨材		混和剤
					5~13 mm	13~20 mm	
55	46	173.4	318.2	790.2	587.6	391.7	1.6

*N'リカAE

した。なお、アンテナから放射するパターは線形分布と仮定した。よって、図-2 のように検出対象物(物標)が各々誘電率の異なる多層内にある場合の物標からの水平分解能は電磁波の屈折影響を考慮し、次のように表すことができる。ただし、アンテナと測定境界間距離は無視する。

$$H_r = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=l}^l D_i \tan \theta_{ij} \quad (30)$$

ここで、nは媒質の層数、lは最大入射角を成すときの値である。各層の屈折率はアンテナからの走査されるビーム幅θがわかれば次式(31)のSnellの法則から各層毎に屈折角度とともに計算が可能である。

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_T} = \frac{k_{i+1}}{k_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{i+1}}{\epsilon_i}} \quad (31)$$

さて、式(6)から分かるように、反射係数Rが0になる角度θ_B、いわゆるブルースタ角(Brewster angle)が存在することになるため、本計算ではこの角度以下の範囲で値を求めるにした。この角度は次式で求められる。

$$\theta_B = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_{i+1}}{\epsilon_i}} \quad (32)$$

(4) 信号処理(信号の発生)

解析対象のシステムを線形時不变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法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(33)のように入力x(t)とシステムに単

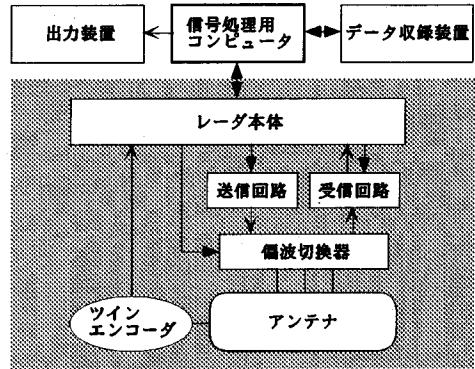


図-5 測定装置のシステム構成図¹⁹⁾

表-2 各材料の誘電率仮定値と計算結果の比率比較

	誘電率ε (仮定値)	深さD	速度v	波長λ
コンクリート	12	1.00	1.00	1.00
空隙	1	0.30	3.46	3.46
碎石	5	0.65	1.54	1.54
砂	7	0.74	1.31	1.31

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。ここで、τは積分変数である。

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) h(t-\tau) d\tau = x(t) * h(t) \quad (33)$$

一方、h(t)がインパルスに対する応答であるため、本システムは次のような重合わせ型の式で表すことができる。

$$y(nT) = \sum_{n=0}^m x(nT) \delta(t-nT) \quad (34)$$

ここで、nTは出力信号のサンプリング周期、mは応答信号の区間である。

参考に、本計算の境界1における基本入力信号に対する解のみを取り上げると次のようになる。

$$\text{区間 } 0 \sim 10 : y(n) = -\sin(2\pi n / 20) \quad (35)$$

$$\text{区間 } 11 \sim 20 : y(n) = -0.8\sin(2\pi n / 20) \quad (36)$$

アンテナの移動距離による信号の発生間隔は測定装置と同じく1cmとし総100cmを基準にした。1cm毎の発生信号の一列は470~530個のデータと構成され(1パルス幅は0.48ns:20個に該当)、一画面のデータの総数は4万7千~5万3千個になる。

4. 実験概要

本研究の実験のために製作した試験体の概要を図-4に示した。D10, 16, 22の三種類の鉄筋(ピッチ30cm)

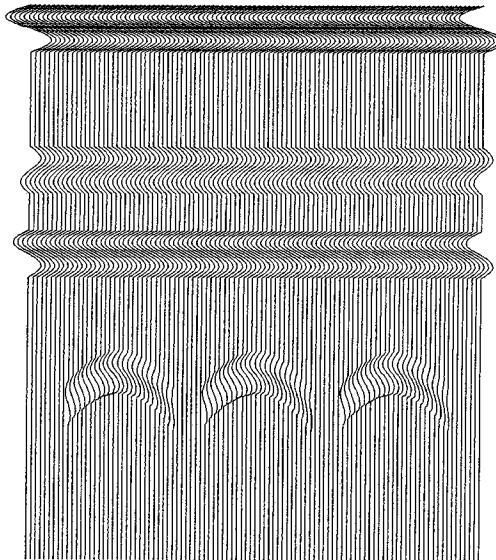


図-6 空隙挿入下のシミュレーション（波形信号）

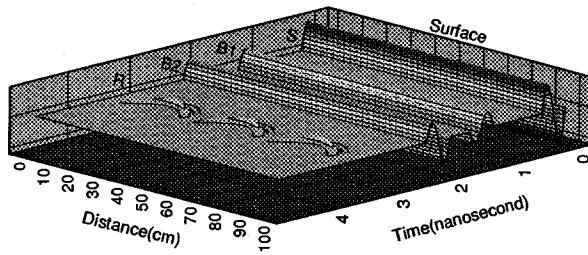


図-8 空隙挿入下のシミュレーション（3次元）
(S:境界1-表面, B1:境界2-1層と2層の間, B2:境界3-2層と3層の間, R:鉄筋)

を物標とし、図-2に示したように境界1と境界2の間、境界3以下の媒質は表-1の配合条件のコンクリート床版（スランプ:5cm、最大骨材寸法:20mm、空気量:2.6%、含水率:5.8%、圧縮強度:400kg/cm²）とし、境界2と境界3の間には各々空隙、砂、砂利（碎石）、同じコンクリート床版を層間すきまが無視できるように挿入して各媒質変化によるレーダ測定を実施した。挿入材料の砂（静岡県富士川産、比重:2.62）と碎石（秩父産、比重:2.70）は水洗いをしないコンクリート用原材料をそのまま使用し、含水率はおのおの1.7%と0.3%であった。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モード動作の新アンテナ方式を採用

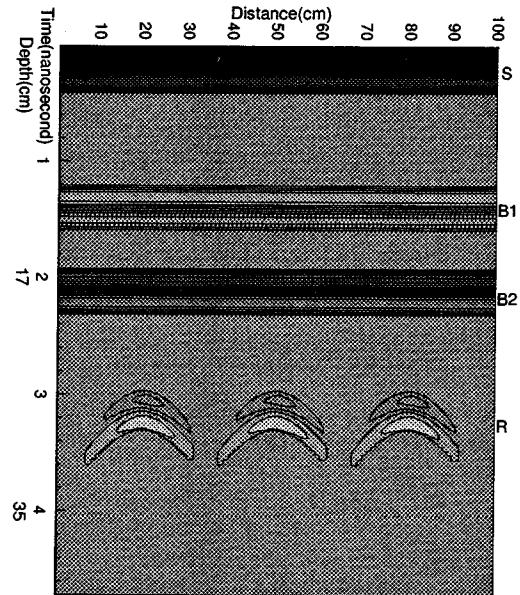


図-7 空隙挿入下のシミュレーション（画像信号）

しているため埋設管等の方向検知と、散乱行列計算により表面波の除去等が可能である。なお、パラレルモード（固定偏波）とクロスダイポールモードの選択が可能である。周波数範囲は20MHz～1GHzの広帯域（中心周波数約600MHz）であるため高分解能型である。図-5は本装置のシステム構成図を示した。

5. モデルの比較検討

上記モデル理論により、層間材料の変化によるレーダシミュレーション結果と実測結果を比較検討した。先ず、シミュレーション結果を取り上げると、層間挿入材料が空隙の場合が図-6～図-8に、碎石の場合が図-9～図-11に、砂の場合が図-12と図-13に、同じコンクリートの場合が図-14と図-15のようである。各場合において共通で出力結果は画像信号と3次元図に分けて各々モノクロム画像で示したが、層間挿入材料が空隙と碎石の場合には、代表的に疊み込み積分による計算結果（波形信号）を図-6と図-9に示した。これは、画像表示前の信号出力結果を表す。

また、実測結果は代表的な例として層間挿入材料が空隙と碎石、そして砂の場合を各々図-16と図-17、図-18に取り上げた。この場合、コンクリートの表面からの表面反射波は除去されている。

シミュレーションでは、層間挿入材料がコンクリートの場合を実際深さ(cm)と同じく調整して他の結果と比較した。各図で、一番目の信号が境界1からの表面反射波(S)を、二番目の信号は境界2からの反射波(B1)

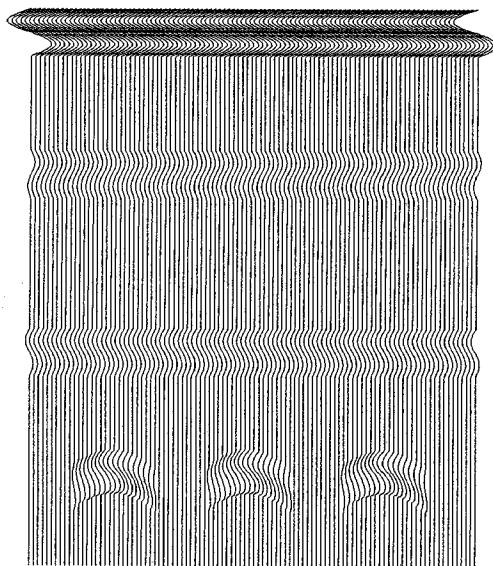


図-9 碎石挿入下のシミュレーション（波形信号）

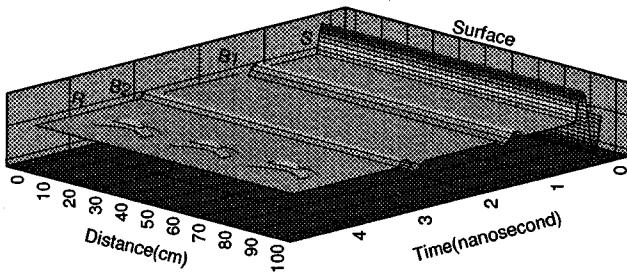


図-11 碎石挿入下のシミュレーション（3次元）

を、三番目と四番目の信号はそれぞれ境界3（B2）と鉄筋（R）からの反射波を意味する。なお、各図の信号の強さ（振幅）は、アンテナからの入射信号の強さを1と基準にして相対比較したものである。

参考に、表-2ではこれらの結果において、挿入層（境界2と境界3の間）の各材料の誘電率仮定値から計算された深さ、速度（波長比と同一）の比率をコンクリートを基準として比較して示した。

以上の計算結果に基づいてシミュレーション結果を見ると、挿入層の計算深さが表-2で示された比率の通りに実際試験体上では同一深さにもかかわらず、コンクリート1に対して空隙0.3、碎石0.65、砂0.74の順に実際深さと違って現れた。これは、コンクリートに比べて各媒質を伝播する電磁波の速度が式（20）から分かるように各々3.5倍、1.5倍、1.3倍速かったためである。よって、実際の解析時には材料の変化による判読誤差に

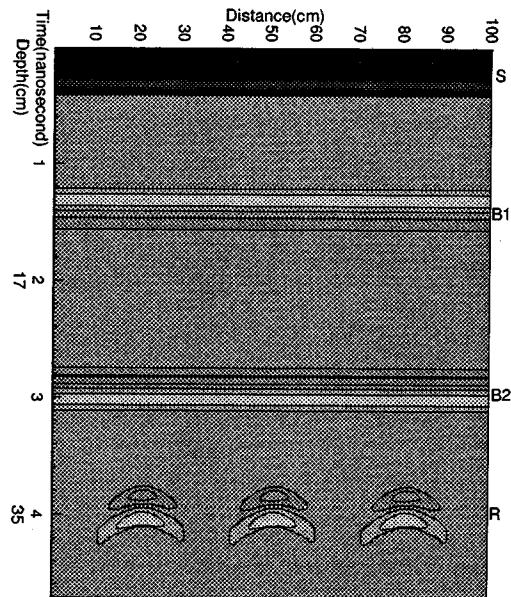


図-10 碎石挿入下のシミュレーション（画像信号）

注意が要されることと、逆に断面構造がわかればレーダーの出力結果から材料の特性把握もある程度可能であることが分かる。特に、層間挿入材料の変化によって物標（鉄筋）における信号が変わることから、正常（もしくは健全）条件のコンクリートの場合と比べて、鉄筋について測定された形状および水平分解能、そして深さに対する変化を観察することによって、内部に劣化部や空隙の存在可能性を予測することもできると考えられる（なぜなら、劣化部や空隙も結局、誘電率の異なる媒質として取り扱うことが可能であるため）。

また、各シミュレーション結果を見ると、各層から反射して戻る波の強さ（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（各境界の誘電率の差が大きければ大きいほど信号の変化も大きい）。さらに、各媒質を透過する波の強さが距離による減衰だけでなく、各層境界からの反射による透過量の累積損失で表れ、アンテナから出力される信号の諸特性値が正確に与えられれば、ある深さおよび境界まで波の反射および透過が可能であるかもある程度予測できることが分かる。

なお、各シミュレーション図で示されたように、図-2と式（30）によって、鉄筋の水平分解能は層間挿入材料が空隙の場合で24cm、碎石の場合で19cm、砂の場合で19cm、同じコンクリートの場合で18cmと計算され、空隙の場合以外にはほとんど同じ値になることが分かった。これは、非金属性の層間材料の変化による鉄筋の水平分解能の影響はあまり大きくないことを表している。その理由としては、入射角と透過角の変化（材料のイン

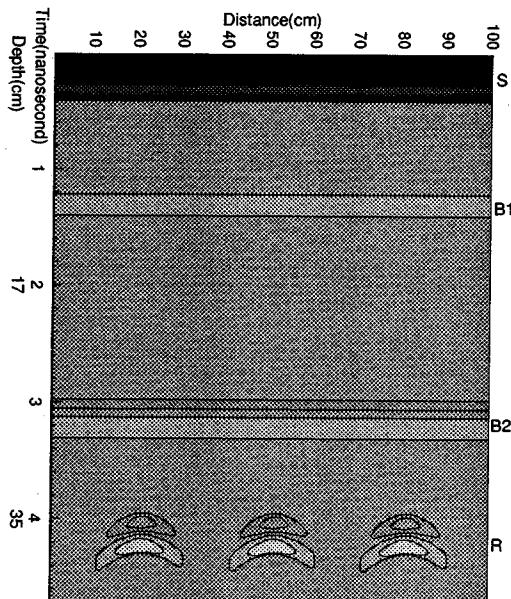


図-12 砂挿入下のシミュレーション（画像信号）

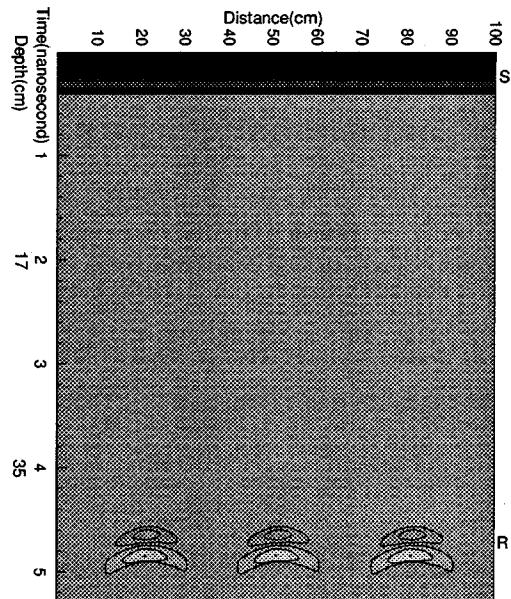


図-14 コンクリート挿入下のシミュレーション（画像信号）

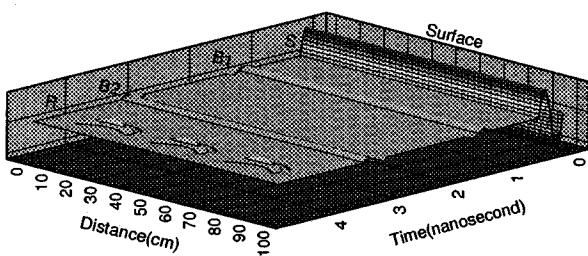


図-13 砂挿入下のシミュレーション（3次元）

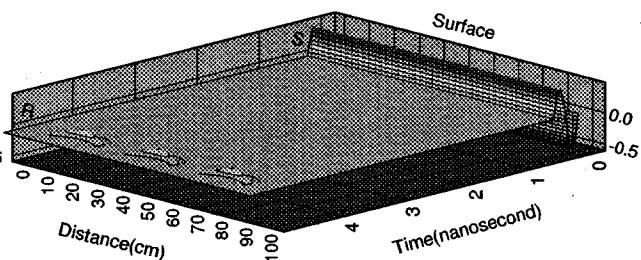


図-15 コンクリート挿入下のシミュレーション（3次元）

ピーダンス差) が大きければ大きいほど深さ Dに対する波の伝播距離 ($= D_i / \cos \theta_{ij}$) は相対的に短くなり水平分解能も小さくなるため(その反対も成立), このような変化による影響が相殺されるためであると判断される。

一方, この計算結果は空隙の条件の図-6~図-8に対する実測結果(図-16)が20~23cmの範囲(平均22cm)であることと比較すると(計算結果は24cm), 実測値に近く計算されたことが分かる。また, 図-17と図-18の場合の実測結果も画像状態が不良で判読しにくかった碎石の場合を除けば, 計算結果と類似であった(砂の場合で, 実測された平均水平分解能は約20cm, 計算結果は19cm)。

しかし, 本実験で使用されたレーダ装置は3素子ダイポール, 3モードアンテナから測定したデータをパラレルモードに変換した結果であるため, パラレルアンテナから直接測定した結果とは多少の差が予想されることを

考慮すると, 計算と実測の差はある範囲内では認められると考えられる。なお, ここで求めた水平分解能の値は最小振幅の信号までを考慮した上で使用装置の増幅もできるだけ合わせて比較した結果であるため, 実際は測定装置の特性および種類によって違う結果が出る可能性も十分ある。即ち, シミュレーションの場合は該当装置の特性等を考慮する必要があることが明らかとなった。

以上の結果を解析モデルに対して実測結果と相対比較したのが表-3であり, 各層境界からの反射信号の到達時間による距離も33cmまでの深さでは1.2cm以下の精度で求められている。但し, 相対値の発生はモデルで仮定した誘電率と実際の材料の誘電率の違いが原因であると推定され, 両誘電率の一一致する場合はモデルとの相対差がほとんど発生しないことが分かる。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異なるのは実際媒質は材料自体の不均一性が大きく, 層間材料の変

表-3 モデルと実測値の相対比較

区分 測定対象	空隙 (ε 仮 : 1, ε 実 : 1)			碎石 (ε 仮 : 5, ε 実 : 5.3)			砂 (ε 仮 : 7, ε 実 : 6) *3		
	モデル	実測	相対差	モデル	実測*1	相対差	モデル	実測*1	相対差
1層厚み	10.0cm	10.0cm	0.0cm	10.0cm	10.0cm	0.0cm	10.0cm	10.0cm	0.0cm
2層厚み	6.0cm	5.8cm	+0.2cm	13.0cm	13.2cm	-0.2cm	14.8cm	15.5cm	-0.7cm
鉄筋深さ	26.0cm	26.2cm	-0.2cm	33.0cm	33.0cm	0.0cm	34.8cm	36.0cm	-1.2cm
水平分解能	24cm	22cm	-2cm	19cm	不良*2	-	19cm	20cm	+1cm

*1 3素子ダイポール3モードで実測した値による。

*2 画像状態が不良（判読困難）

*3 ε 仮：誘電率仮定値, ε 実：誘電率実測値（コンクリートの場合は, ε 仮 : 12, ε 実 : 12）

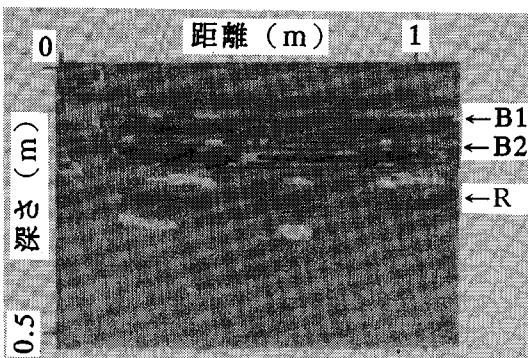


図-1 6 空隙挿入下の実測結果

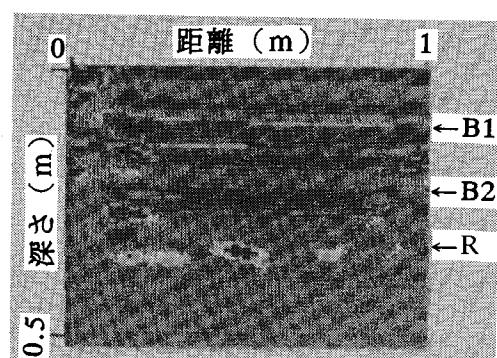


図-1 7 碎石挿入下の実測結果

化等による分散性が原因であると考えられる。さらに、アンテナ方式と解析システム等、使用装置の特性にも大きな関係があると考えられる。一方、シミュレーションでは各層を伝播する信号によって画像強度が減衰の影響とともに変化することが表されているが、実測結果では多少違う傾向を表すのは測定装置でSTC処理（減衰を補正する機能）が行われたためである。

6. 結論

本研究で得られた主な結論は次のようにある。

(1) シミュレーション結果によると、多層構造内の層間挿入材料がコンクリートの場合を基準とすると、空隙0.3、碎石0.65、砂0.74の比率順に実際深さより小さく表れた。よって、実際の解析時には材料の変化による判読誤差に注意が要望され、なお、逆に断面構造がわかれればレーダーの出力結果から材料の特性把握もある程度可能であると考えられる。

(2) 本モデルでは、各層から反射して戻る波の強さと位相等も各材料の電気的性質が変わるにつれて変化することが示されている。さらに、各媒質を透過する波の

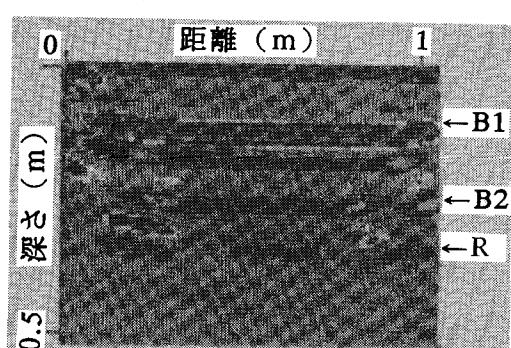


図-1 8 砂挿入下の実測結果

(B1:境界2-1層と2層間, B2:境界3-2層と3層間, R:鉄筋)

強さが距離による減衰だけでなく、各層境界からの反射による透過量の累積損失で表れ、媒質中の波の反射および透過限界に対する予測もある程度可能であると考えられる。

(3) 媒質中の鉄筋に対する本研究条件下的水平分解能は、シミュレーション結果では、層間媒質が空隙の場合(24cm)以外には各層間材料の変化にもかかわらず

18~19cmの範囲となり（隣接した物体の判別能はこの値の半分），非金属性の層間材料の変化による影響は大きく受けないことが分かった。なお、この結果は実測結果と類似な傾向を表し、多層境界条件下の水平分解能算出に関する本モデルの仮定は有効であると判断される。

(4) シミュレーションと実測結果による各境界層の深さは33cmまで1.2cm以下の精度で求められている。但し、相対値の発生はモデルで仮定した誘電率と実際の材料の誘電率の違いが原因であると推定される。

(5) 特に、以上の結果から、健全なコンクリートの場合と比べて、レーダで測定された物標（ここでは鉄筋）の形状、水平分解能、深さ等に対する変化を観察することによって、内部に劣化部や空隙の存在有無を予測することも十分可能であると判断される。

(6) 総合的に、誘電体が互いに異なる各媒質を伝播する電磁波の特性をシミュレーションした本モデルは各特性値上で実測結果と比較的良好一致していることが明らかとなった。特に、このような多層構造では予測しにくい鉄筋のような目標物に対する水平分解能を反射透過の理論を利用し新しく解析することにより、良好な精度で算出することが可能であった。種々の仮定に基づいたモデルではあるものの、本シミュレーション技法を活用すれば、既知の最小の情報から測定されたレーダの結果解析に大きく役に立つと考えられる。

謝辞：本研究の実験にあたり、御協力を頂いた芝浦工業大学の卒業生の齊藤啓子さん、東大生研魚本研究室の西村次男技術官、（財）首都高速技術センターの吉沢勝氏に感謝の意を表します。

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, pp. 179-194,1991.
- 2) 朴錫均,魚本健人,吉沢勝: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),*生産研究*47巻4号,1995.4.
- 3) 朴錫均,魚本健人,吉沢勝: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(2),*生産研究*47巻5号,1995.5.
- 4) 朴錫均,魚本健人,吉沢勝:レーダ法によるコンクリート内部の空隙計測に関する基礎研究,*JCI年次論文報告書*,Vol.17,1995.6.
- 5) 荒井郁男,鈴木務:地中レーダシステム,電子通信学会論文集,Vol.J66-B, No.6,1983.6.
- 6) David M.Pozar: *Microwave Engineering*,Addison Wesley Publishing Company,1990.
- 7) 田中弘明,松浦正行:地中可視化センシングシステム, *Computrol*No.21.
- 8) 三輪進著:高周波電磁気学,東京電機大学出版局,1992.
- 9) 荒井郁男:地中・水中・雪中の電波探査と合成開口技術,第10回「リモートセンシング部会」資料,1985.10.
- 10) 田中弘明ほか:地中探査レーダーの研究(その1),第24回SICE学術講演会,1985.7.
- 11) 山下栄吉編著:応用電磁波工学,近代科学社,1992.
- 12) 村沢觀治ほか:3アンテナ素子を有する地中埋設物探査レーダー,三井造船技報第152号,pp.18-24.
- 13) 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.
- 14) 林重憲ほか著:電気磁気学,オーム社,1967.
- 15) 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.
- 16) コンクリートの非破壊試験法研究委員会:コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,1992.3.
- 17) 関根松夫著:レーダ信号処理技術,電子情報通信学会編,1993.
- 18) 中村尚五著:デジタル信号処理,東京電大出版局,1993.
- 19) 地中探査レーダUG-V33カタログ,(株)三井造船.
- 20) R.GABILLARD,PIERREDEGAUQUE, and JAMES R.WAIT:Subsurface Electromagnetic Telecommunication, *IEEE Transactions on Communication Technology*, December 1971.
- 21) 須藤彰三:波動方程式の解き方,共立出版,1994.
- 22) P.A.Lynn and W.Fuerst: *Introductory Digital Signal Processing With Computer Applications*, Chichester,UK, John Wiley & Sons Ltd., 1989.

(1995.6.9 受付)

VERIFICATION OF SIMULATION OF RADAR RESPONSE ON SUBSURFACE OBJECTS IN CONCRETE

Seok-Kyun PARK and Taketo UOMOTO

This study introduces an advanced simulation model of radar response on embedded layer in concrete. The applicability of the simulation is verified by comparing the test results with calculated results. In this model, the electromagnetic wave was assumed to have two different propagation modes at the interface (normal incidence and oblique incidence) depending on the subsurface objects. A new approach has also been proposed to analyze the attenuation in each interface which has different electromagnetic properties and the horizontal resolution of target object (reinforcement bar).

Since analytical results by proposed model coincide well with the test results, it is concluded that this simulation technique can be used to analyze radar response on subsurface objects in concrete.