

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)

—シミュレーションによる異質境界条件下のコンクリート内の空隙検出特性—

Nondestructive Test for Concrete Structures Using Radar (2)

—Simulation of Radar Response on Voids in Concrete—

朴 錫 均*・魚 本 健 人*・吉 沢 勝**

Seok-Kyun PARK, Taketo UOMOTO and Masaru YOSHIZAWA

1. はじめに

コンクリート構造物に対するレーダ検査は一般的に地中検査に比べ検出対象物が小さく、対象検出深さも数十 cm 以内の場合が多い。そこで、もっと高い周波数成分の使用により分解能および検出精度を高めることが望ましいが、実際にはコンクリートの減衰の影響等を大きく受けるためその実現が難しい実情である。特に、検出対象物が空気泡のように大きさがより小さく、非金属の場合は一層検出しにくくなり、たとえ検出が可能であっても空隙の形状および構造等はほとんど区別できない場合が多い。したがって、本研究ではこのような問題を解決するため、シミュレーション技法を活用してコンクリート層内の空隙が検出できるような新しい方法を検討した。即ち、まず電気的性質の異なる層内に形の異なる各種空隙を挿入し、そのレーダ伝播特性をシミュレーションし、これらの結果を実測結果と比較解析することにより、本方法の妥当性を検討した。

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、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 ($A_i > 0$) は次のように表わされる^{1), 2)}。

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

ただし、 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 、 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 ：角周波数を表わす。なお、コンクリート中の

ような非金属の低損失誘電体では $\mu = \mu_0$ になる。したがって、図 1 のように内部にある形状の検出対象物がある場合は、物体の表面から反射して戻る波の強度は物体からの接線と波のなす傾斜角 θ_{wj} により変わると考えられるのでこの影響を表面傾斜影響係数（減衰加重値） $W_{\theta_{wj}}$ で考慮すると、深さ D_i の各層を通過する波の強度 I_i は次式で表わされる。

$$I_i = W_{\theta_{wj}} A_i R_i T_{i-1} \quad (2)$$

ここで、反射係数 R_i と透過係数 T_i は、誘電率の異なる媒質間の境界面を波が入射する場合、次式(3)で与えられる。

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}}, \quad T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (3)$$

一方、位相速度 v_p と群速度 v_g は低損失誘電体と高周波数帯では式(4)となる。なお、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。但し、 c は光の速度である。

$$v_p \approx v_g \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad \lambda_g = v_g / f = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

2.2 媒質中の水平分解能および伝播距離

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 との関係により次式のように表わせる¹⁾（ビームが往復進行しているため、 R_h は半分になっている）。

$$R_h = \frac{c D_t}{2\sqrt{\epsilon_r} f W_d}, \quad \theta = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f W_d} \quad (5)$$

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。さて、図 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

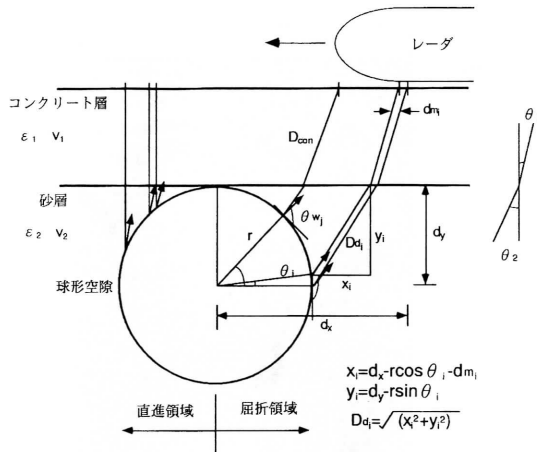


図 1 空隙からのレーダ反射伝播仮想図

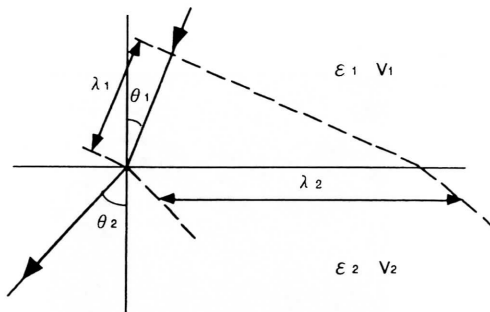


図 2 電磁波の屈折と波長の関係

のように検出対象物が電気的性質の異なる材料内にある場合には図 2 に示したような電磁波の屈折影響を考慮しなければならない。この影響は式(5)によるアンテナのビーム幅 $\theta (=2\theta_1)$ がわかれば次式(6)の Snell の法則から求められる。ここで、 v_1, v_2 は各媒質の伝播速度である。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (6)$$

一方、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ることができる。システムの出力 $y(t)$ は次式(7)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わせる²⁾。

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

3. 実験概要

各種空隙の検出特性を検討するための試験体の測定配置

と規格を各々図 3, 図 5, 図 7 に示した。10 cm 厚みのコンクリート床版 ($w/c: 55\%$, slump: 5 cm, 最大骨材寸法: 20 mm, 含水率: 5.8%) 下に砂層を置き, その中に各空隙を配置した。砂の中に空隙を配置した理由は異質層内からの信号の変化特性 (もちろん, この影響は計算では考慮し, シミュレーション結果では空隙からの反射波の位相変化だけを表した) と空隙配置の用意性等を考慮するためである。砂は水洗い等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 1.7% である。図 3 の球形空隙はゴムまりを用い, 図 5 の傾斜空隙と図 7 の矩形空隙は発泡スチロールで人工的に製作した。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 3 素子ダイポール, 3 モードアンテナ方式の地中探査レーダ (20 MHz~1 GHz の広帯域周波数) を使用した。

4. モデルの比較検討

上記モデル理論による形別空隙条件下のシミュレーション結果と実測結果を比較検討した。ここでは空隙検出信号だけの相対比較のため, ほかの信号は無視した。これは測定装置の画像出力が 3 素子ダイポール 3 モード方式として

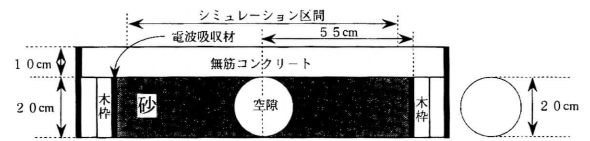


図 3 試験体の構成断面 (球形空隙)

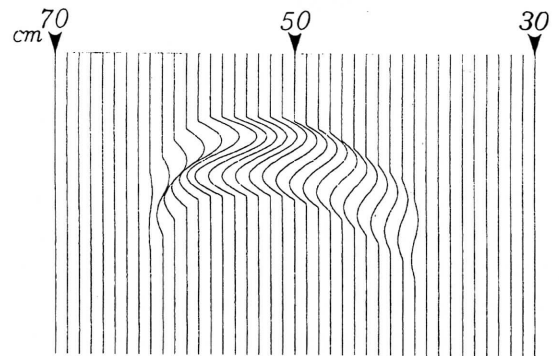


図 4 球形空隙シミュレーション

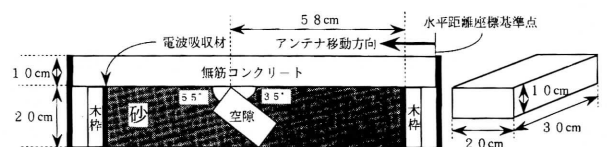


図 5 試験体の構成断面 (傾斜空隙)

研 究 速 報

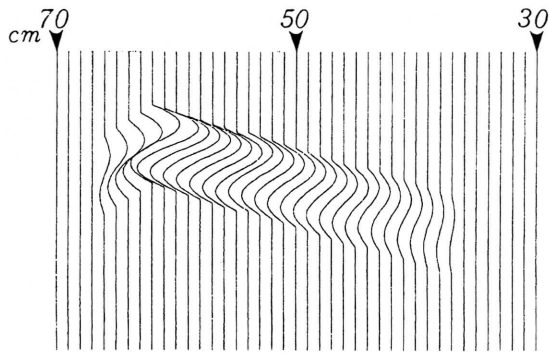


図 6 傾斜空隙シミュレーション

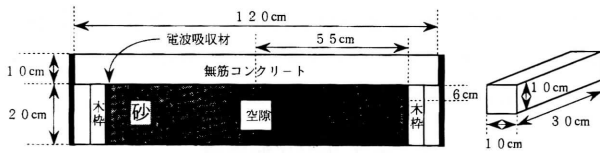


図 7 試験体の構成断面 (矩形空隙)

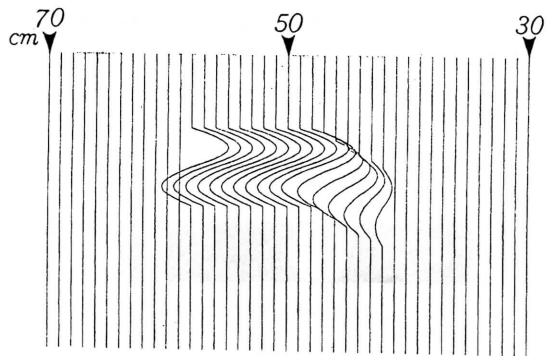


図 8 矩形空隙シミュレーション

主に空隙等のような特定信号変化のある部分等が画像で得られるためでもある (コンクリートと砂の境界層からの信号は該当モードでは検出されない). 図 4 と図 6, そして図 8 に各場合のシミュレーション結果を示し, 図 9 から図 11 ではこれらの実測結果を示した. シミュレーションでは信号の発生間隔を測定装置と同じく 1 cm (アンテナの移動距離) とした. なお, より正確な比較のため, 各空隙からの信号 (画像) 中で輪郭線だけのデータを取り上げ両方の比較対象にした (誘電率は実測値に近く仮定した). この場合, 図の縦軸方向の目盛りは輪郭線抽出部を基準にして配率を調整した.

これらの比較結果を図 12 から図 14 に示した. 図 12 の球形空隙の場合はモデルと実測結果がほとんど一致していることが分かる. 特に, 両信号とも後半曲線部信号の曲率半径の変化 (非対称で後半部が小さい) がよく一致され表れて

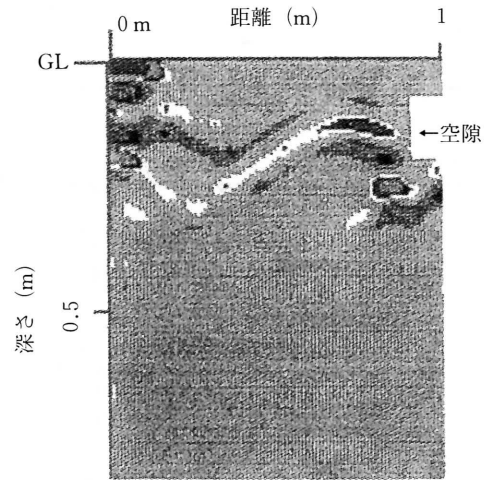


図 9 球形空隙の実測結果

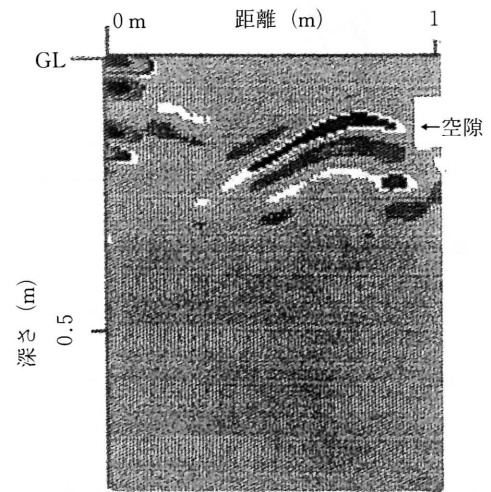


図 10 傾斜空隙の実測結果

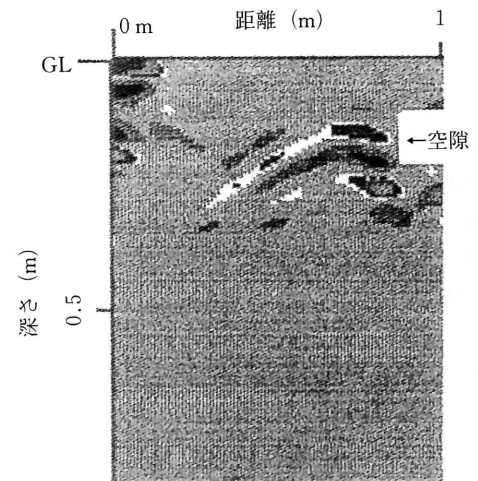


図 11 矩形空隙の実測結果

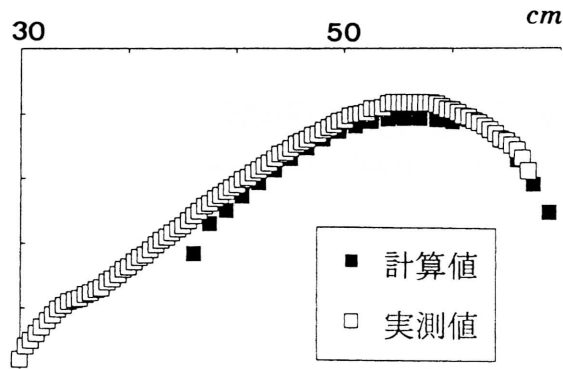


図12 球形空隙の結果比較

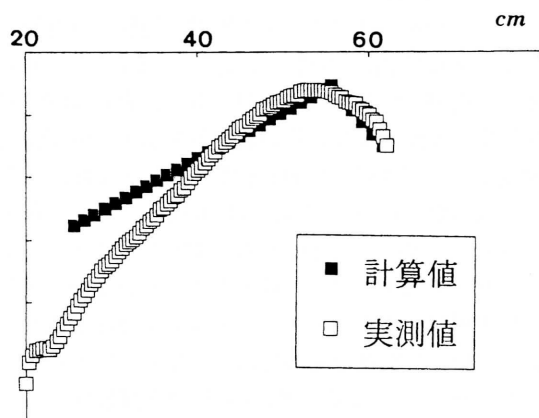


図13 傾斜空隙の結果比較

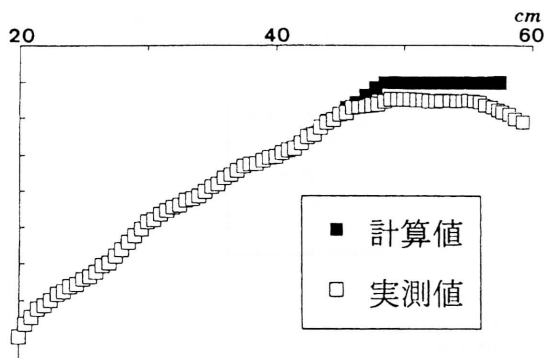


図14 矩形空隙の結果比較

いることを見ると、図2のような反射領域の区分（屈折と直進）が有効であることが分かる。一方、図13及び図14の場合は多少ずれた部分も現れたが、この原因については、まず測定装置の周波数帯による波長（アンテナの大きさ）の影響、すなわち波長が長い場合はそれ以下の長さの形状

変化は無視してしまう可能性、矩形隅角部での反射波の不規則的散乱（この影響は図の該当部で見ると大きいと考えられる）、対象空隙を透過した信号の影響、それにアンテナ方式等測定装置の特性による影響等が考えられる。また実測値がもっと長く現れた主な理由は実際のアンテナのビーム幅がもっと広がったためであることと、画像強度の調整による不要信号の発生のためであると考えられる。しかし、モデルと実測データの主要部は両方とも比較的似た傾向を示していることが分かる。さらに、実測結果だけでは各条件下の信号がほとんど類似なパターンとなり判別しにくかったが、シミュレーション結果と比較解析すれば効果的な検出ができるともいえる。なお、シミュレーションで式(2)のように表面傾斜影響係数（減衰加重値）を考慮することにより、実測結果で表れたような空隙信号の減衰（両側部）も表すことができた。したがって、このような各空隙形状および大きさ変化別シミュレーション結果を基準データとして置き、未知のデータに対して比較して行きながら、そのデータとシミュレーションデータの中心距離が最小になるシミュレーションデータを選べば、該当もしくは類似な空隙の検出も画像解析上可能であると考えられる。

5. ま と め

実測値の信号だけでは区分しにくかった各種空隙の形態からの情報もシミュレーション結果により推定解析すれば効果的に検出できる可能性が明らかとなった。したがって、レーダ画像データと対象物からのシミュレーション信号との対応関係を調べ、画像解析する方法も可能であると見られる。しかし、根本的な解決のためには検出対象物に適合する測定装置（周波数の考慮）、特にコンクリート内部探査専用のレーダの開発等が必要であり、それに従うモデルの最適化も必要であると考えられる。

(1995年2月13日受理)

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 山下栄吉編著: 応用電磁波工学, 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