

多重偏波方式のレーダによるコンクリート 背面空隙の体積推定

朴錫均¹・魚本健人²

¹正会員 工博 大田大学校 土木工学科専任講師 (〒300-716 大韓民国大田広域市東区龍雲洞96-3)
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)

3アンテナ素子を有する多重偏波レーダ方式を用いて道路やトンネルライニング背面空隙の体積が推定できる方法を提案し、その可能性について検討した。空隙の体積を推定するために、まず測定結果から空隙の断面形状の復元及び厚さの推定方法を開発し、多重偏波レーダによりこれらの結果を各方位別に解析し、全方位に対して加算する手法を用いて体積を推定した。その結果、非等軸形空隙については空隙の形状のみが識別可能であったが、等軸形空隙については空隙の体積までも推定できる可能性を確認した。

Key Words : *radar, image analysis, nondestructive test, subsurface void, microwave, polarization method, concrete*

1. はじめに

コンクリート道路やトンネル等の背面空隙は、構造物の陥没や崩壊の主な原因になるため、大事故に繋がる可能性が高い。特に、背面空隙は目視では検出しにくく症状も簡単には表れないため、放置による事故の危険性がさらに大きい。従って、これに対する効率的な検査方法が切実に要求されているのが実情である。

しかし、これらの探査対象構造物は規模が大きいため、広い範囲の構造物を迅速に測定できる非接触走査方式の非破壊検査方法が効果的であり、レーダ法はこのような条件を満たす検査方法として最も適している。土木構造物に対するレーダ法の適用は、既に道路舗装の厚さ等の調査分野では一部実用化されているが¹⁾²⁾、コンクリート背面空隙の探査においてはまだ十分な研究および開発が行われていない。

なお、大部分の研究が背面空隙の存在有無の判断[1・2次調査]にのみ限定されているため、空隙の規模を把握[3次調査]する段階では局部破壊に依存しているのが実情である。このような調査体系下では、交通止め等の措置が必要であるため様々な経済的な損失を招き、既存の空隙や構造物の状態を一層悪化させる恐れもある。

しかしながら、空隙の存在有無の調査だけでは、補修の必要・不要の判定、液状補修材の最適注入位置の選定、注入量の予測等が困難である。特に、空隙の補修において注入補修量の予測は、補修計画の樹立、予算の策定および過剰注入の防止などのためには必要不可欠な要素である。実際に、空隙の補修の場合、空隙に対する補修契約の際に発注者と補修業者間では、工事後の補修所要量が契約当時の予想量と違って、大きな損害を受ける場

合が多いという報告もなされている³⁾。

従って、本研究では非破壊検査方法だけを用いてコンクリート背面空隙をより効果的で定量的に検出するため、地中探査レーダによる新しい解析方法を開発し、空隙の断面形状の復元と空隙の厚さの推定方法を含め、最終的には空隙の体積を求める方法についてその可能性を検討した。このために、空隙は基礎検討段階として無筋コンクリート背面下の代表形状別空隙を選んだ。体積推定を目標とした空隙の範囲は、探査装置の検出特性[アンテナの大きさ、周波数による減衰の影響など]を考慮してその大きさを小空洞に近いW(幅)40cm以上×D(長さ)40cm以上×H(厚さ)10cm以上とし、検出対象深さを1m以内とした。なお、この場合の空隙は、直交する二つの中心軸上での各距離が同一(等軸形)であり、厚さも一定なものとして仮定した。

2. 既往の研究

レーダ法では勿論、一般的な非破壊検査方法でも、コンクリート内または背面空隙を対象にして一面に対する一方向(一次元)測定[線走査]によって体積まで求める方法に関する体系的な研究はまだ報告されていない。一部の道路背面空隙の場合では、一定車線幅別にレーダ探査(線走査の反復)を行い、空隙の上部面積を概略的に算出しようとする試みの研究が行われているが³⁾、この研究では、探査車線幅を狭くして探査回数を増やすと比較的推定精度が良くなることが分かったものの、背面空隙の表面積だけを対象としている。

これに反し、本研究では、空隙の体積を定量的に解析するために、先ず得られた画像から比較的簡単な原理を

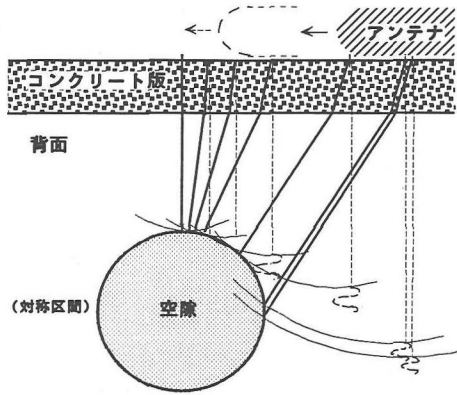


図-1 空隙のレーダ画像表示概念

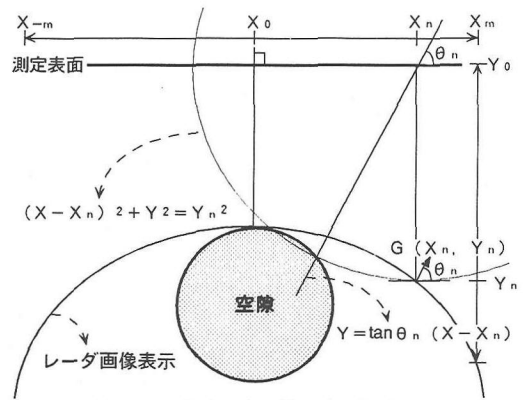


図-2 空隙の実形状の復元概念

用いて目標物の形状をほぼ復元できる解析技術と空隙の厚さを推定する方法を提案した。さらに、これらの技術をもとに多偏波レーダを用いて空隙上部の方位別形状を識別し、これらのデータの組合せによって空隙の体積までを総合的に推定できる方法に関する検討を行った。

3. 解析方法

本研究で提案する空隙の体積の定量的な解析方法は前述したように、先ず空隙の断面形状および厚さを推定した後、これらの結果を全方位に対して加算する手法を用いた。このために、探査装置は一回の測定で全方位に関する情報が得られる、多偏波成分の発受信モードが作用する3ダイポールアンテナ方式のレーダを使用した。

なお、地中探査レーダは、比較的深い位置の目標物を探査対象としているため、減衰の影響を大きく受ける高周波数の使用が困難である。そのため分解能が悪くなり、空隙の厚さ等の推定に限界が予想される。さらに、実形状と異なって表れるレーダの探査画像から目標物の形状を復元するためには、特別な対策が要求される。

以上のレーダによる非破壊検査方法を用いて本研究の目的を達成するためには、大別して次のような各要素に対する解析技術が必要である。次に、これらの各解析方法について説明する。

(1) 空隙の断面形状の復元^{5),6)}

レーダから発せられた信号は一定のビーム幅で広がって伝搬するため、目標物から反射して戻る信号の画像は実際の目標物の形状より広がって示される。これは、レーダから対象媒質に一定のビーム幅で広がって入射した信号が目標物から反射される際、レーダと目標物間の位置によって〔原則的には、両者間の距離が一番短い経路に従って伝搬される信号の影響が最も大きい〕信号の幾何学的分布が変化するため、起こる現象である。すなわち、図-1のように円筒形断面の空隙に対するレーダの

測定結果は、太線で示すように反射して戻り、細点線の軌跡に従って画面上で表示されるため、図-2のように広がった信号として現れる。このとき、図-1の傾斜線(太線)の各信号は円の軌跡に従ってレーダの測定面と直交する方向(細点線)の深さ信号として表示される。

従って本研究では、以上の結果を逆に用い、得られた画像上で画像の濃淡の変化が最大になる方向〔グラディエントベクトル〕はレーダからの信号が空隙の任意面に当たって反射して戻る信号の方向〔図-1の傾斜線と直線の各信号：太線〕を示すと仮定し、そのグラディエントベクトルを測定表面まで垂直移動させて測定当時のレーダからの信号発信位置とした後、移動しただけの距離を深さにする円の軌跡と交差させて目標物(空隙)の断面形状を復元する新手法を開発した。

図-2のように得られたレーダ画像表示の任意の座標 (x_n, y_n) における深さ y_n が半径となる円をその座標のx軸(測定表面)と交差する座標 $(x_n, 0)$ を中心にして描く。これを対称区間の半分である0からmまでの区間で画像表示座標ごとに求めると式(1)となる。つづいて、座標 (x_n, y_n) における画像の濃淡強さのグラディエントベクトル $G(x_n, y_n)$ を式(2)によって求め、そのときのベクトルの方向(傾き)を式(3)によって計算すれば、この方向と同じ傾きを持って座標 $(x_n, 0)$ を通る直線 y を式(4)から求めることができる。

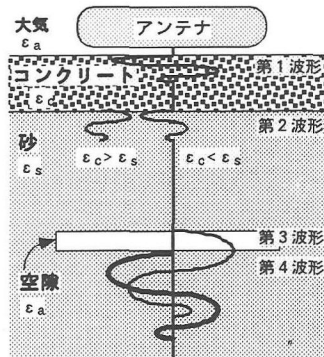
$$\sum_{n=0}^m (x - x_n)^2 + y^2 = y_n^2 \quad (1)$$

$$G(x_n, y_n) = \frac{\partial I(x_n, y_n)}{\partial x} / \frac{\partial I(x_n, y_n)}{\partial y} \quad (2)$$

ここで、 $I(x_n, y_n)$: 画像の濃淡強度

$$\tan \theta_n = \frac{1}{G(x_n, y_n)} \quad (3)$$

$$\sum_{n=0}^m y = \tan \theta_n (x - x_n) \quad (4)$$



図一 3 各境界面におけるレーダ信号の反射特性

$$Y_n = C_s C_r Y_{n0} \quad (5)$$

ここで、 C_s ：屈折影響補正係数、 C_r ：使用レーダの特性補正係数、 Y_{n0} ：補正前の Y_n

従って、もとの空隙の形状は式(1)の円と式(4)の直線が合う交点中で下向値を求めて描くと、復元が可能であり、形状を検出することができる。この際、解析は一定の画像濃度以上の信号に対して実施する。

一方、多層境界または不均質な媒質では各境界や媒質の変化による比誘電率の差が生じるため、これによる電磁波の屈折等の影響を考慮しなければならない場合がある。このために、式(5)のように屈折影響補正係数を定義して補正を行う。各境界における屈折影響補正係数はアンテナのビーム幅がわかればSnellの法則から計算が可能である。なお、実際の探査画像では媒質の分散性および装置の都合等によって目標物の元の形状や大きさに復元できない場合があるため、予めアンテナの実際のビーム幅や指向性の特性に合わせて補正を行う必要がある。このために、標本目標物を対象にして復元された結果から目標物の形状や大きさにさらに近く復元できるように使用レーダの特性補正係数を定義して式(5)によって補正を行う。以上の各影響を補正すると復元画像の収束度がより向上する。

(2) 空隙の厚さの推定

a) 空隙の厚さ関連信号の特性および検出限界

測定対象構造物がコンクリートと砂の2層境界の構造物であると仮定すると、その背面空隙に対する電磁波の反射波形は図一3に示すように、第1波形は空気とコンクリート表面からの反射、第2波形はコンクリート底面と砂面からの反射、第3波形は砂面と空隙表面からの反射、第4波形は空隙底面と砂面からの反射など、計4種類の代表的な反射波形として大別される。

従って、背面空隙の厚さを検出するためには、先ず第3波形と第4波形間の信号の区分別が必要である。理論的に、

表一 1 比誘電率仮定材料別パルス幅と空隙の限界厚さ
() 内は各材料別比誘電率の仮定値)

パルス幅	材料種類		空隙				
	コンクリート	土	(1)	(8)	(12)	(15)	(20)
0.5ns	7.5cm	2.6cm	2.2cm	1.9cm	1.7cm		
1.0ns	15.0cm	5.3cm	4.3cm	3.9cm	3.4cm		
1.5ns	22.5cm	8.0cm	6.5cm	5.8cm	5.0cm		
2.0ns	30.0cm	10.6cm	8.7cm	7.7cm	6.7cm		
3.0ns	45.0cm	15.9cm	13.0cm	11.6cm	10.1cm		
6.0ns	90.0cm	31.8cm	26.0cm	23.2cm	20.1cm		

空隙の表面と底面からの信号がそれぞれ区分できる空隙厚とレーダ信号の特性との関係は、次のようである。

$$t = \frac{2D}{v} = \frac{2D\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (6)$$

ここで、 t は電磁波の往復伝搬時間、 D は空隙までの距離、 v は電磁波の媒質内の伝搬速度、 ϵ_r は媒質の比誘電率、 c は光の速度(3×10^8 m/s)である。この式を整理すると次のようになる。

$$t = \frac{D\sqrt{\epsilon_r}}{15} \quad (7)$$

上式で、空隙内の信号を基準にする場合には ϵ_r が1になるため、式(7)は D だけの関係式になる。式(7)で t をパルスの時間幅(ns)、 D を空隙の厚さ(cm)にかえて定義すると、求めたい空隙の厚さとレーダの信号の特性との関係式が得られる。

従って、隣接した境界間の各反射信号のピークが重畳されなく互いに区分できるためには、各境界間の最小厚さ(D) [これを限界厚さと定義する]は使用レーダのパルス幅(t)と探査対象媒質の比誘電率との関係による式(7)の条件を満足しなければならない。表一1には、この関係式を用い、各材料別比誘電率(括弧内)を設定した後、パルス幅(t)の変化による信号の区分が可能であると予想される限界厚さ(D)を計算して示す。

この結果から分かるように、使用レーダのそれぞれの同一パルス幅内でも比誘電率の差によって限界厚さが変わることが分かる。すなわち、比誘電率が高いほど限界厚さは小さくなり、比誘電率の高い媒質内の場合が低い媒質内の場合より厚さの検出精度(分解能)は向上する。

なお、レーダパルスの時間幅が普通の地中レーダのような2ns以上(周波数500MHz以下)では30cm以下の空隙の厚さを信号区分によって解析することは困難となるため、実際の空隙の厚さを反射信号の識別によって解析することは現実的に難しいことが分かる。勿論、これらの結果は理論に基づいて求めた計算結果であるため、

表-2 空隙の厚さの推定式算出のための実験条件
(W, D, Hの定義は図-1 2 参考)

実験条件 検討項目	空隙の変化条件 (単位: cm)	
	固定因子	変化因子
空隙の埋設深さ の変化	W40,D40,H10 共通	深さ 10 30 50 70
空隙の表面積 [W, D] の変化	深さ30,H10共通 W10 W40 D10 D40 W20 W30 W50	D10,20,30,40 D10,20,30,40 W20,30,40 W20,30,50 D20 D30 D50
空隙の厚さ [H] の変化	深さ30,W40,D40 共通	H 2 5 10 20 30

実際の結果とは異なる可能性も高いと考えられる。特に、媒質の分散性や波の往復伝搬等による信号の歪み等が作用して表れるため、実際の環境を明確に予想することは非常に難しい。さらに、本例で考慮したパルスの幅は、インパルスまたはモノサイクルパルスの理想的な波形の時間幅を基準にしたため、実際の結果において得られるような、装置全体のシステムを経て出力される波とは異なる可能性も多い。

従って、本研究では以上の周辺環境と装置特性等による複合的な影響下での空隙の厚さを信号処理による解析方法に依存せずに実験的な相関関係から推定する方法を次のように提案した。

b) 本研究における空隙の厚さの推定方法

本研究では空隙の任意の深さ(1m以内)および大きさ(表面積、厚さ)に関係なく空隙について測定されたレーダの最大反射強さから空隙の厚さを推定する方法について検討した。

このために、表-2に示す実験条件のように、先ず同一厚さ及び同一表面積の空隙に対して各深さ別に空隙からのレーダの最大反射強さとの変化特性(相関関係)を検討した。次に、上記の条件下で同一深さ及び同一厚さの空隙について空隙の表面積変化別相関関係を分析した。最後に、同一深さ及び同一表面積の空隙について空隙の厚さ変化特性を検討することにより、これらの各検討項目別相関関係を比例式の原理によってまとめ、次の式(8)のような一般式を導出した。

特に、式(8)は、使用探査装置別STC特性を考慮した式で示している。STCとは、レーダ探査で深さによる

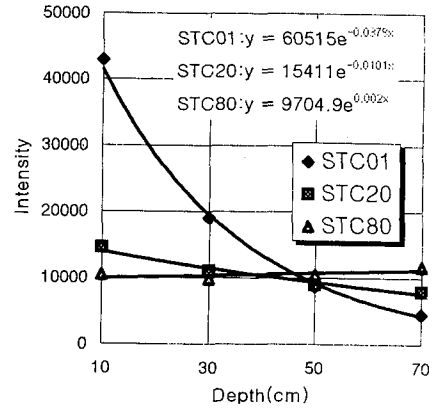


図-4 本使用装置の代表的なSTC等級別各同一深さにおける信号の強調特性比較例

減衰補正機能として、コンクリート内や地中レーダ探査で信号が目標物の距離によって指数関数的に減衰する影響を補正し、信号を強調処理するための機能を意味する。最近のレーダ装置では、本機能を搭載している場合が多く、背面空隙のように比較的深い所までの目標物を探査する際には有利であるため、それによる装置特異的影響を考慮した一般式を提案した。

$$T_{STC}(cm) = \left[\frac{4020 - R_{m/STC1} \frac{A}{1.6 \times 10^6 B} e^{-0.0378 D(cm)}}{49.1} \right] \quad (8)$$

ここで、 T_{STC} は使用装置の特性下での空隙の推定厚さ、 $R_{m/STC1}$ はSTC処理を行わなかった場合の最大反射強さ、A、Bは次式(9)によってSTC処理を行った場合の使用装置の深さ別反射信号特性を基準にして空隙の深さと最大反射強さとの関係式で得られた係数、Dは空隙までの深さである。式(8)で、STC処理を行わなかった場合の最大反射強さを変数にした理由は探査装置別STC機能の差による影響を考慮し、STC機能を持っている装置ではSTC処理を行わなかった場合のデータも簡単に得られることを勘案したためである。

$$R_{m/STC1} = A e^{-BD(cm)} \quad (9)$$

ここで、 $R_{m/STC1}$ はSTC処理を行った場合の使用装置による最大反射強さである。

参考として、本研究で使用した探査装置のSTC処理等級は弱から強までの7等級[区分上STC1, 5, 10, 20, 40, 80, 160と表記されてある]に便宜上分けられており、そのうち、代表としてSTC1, 20, 80の各等級別深さによる信号の強調特性比較例を図-4に示す。この図から分かるように、同一探査結果に対する深さ別信号強度にもかかわらず、各STC処理特性(等級)によって深

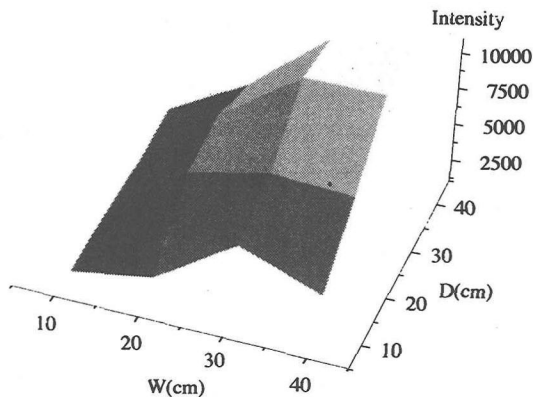


図-5 同一深さにおける空隙の表面積の大きさ別最大反射強さの変化特性（相関関係）

さ別信号強度が強調される様子が異なって示されるため、本機能を搭載している装置ではその装置に合うSTC処理特性を式(9)によって求め、必ずこれの補正を行わなければならない。

一方、本方法は1. 節で述べたように体積推定を目標としたW40cm×D40cm×H10cmの大きさ以上の空隙に対する厚さの推定に有効である。なぜならば、本項で前述した実験条件のうち、同一深さにおける空隙の表面積の大きさ別最大反射強さの変化特性（相関関係）を検討した図-5の実験結果によると、空隙の表面積はレーダのアンテナの大きさによるもの、W40cm×D40cm（またはφ40cm）前後の大きさ以上では空隙に対する最大反射強さの変化がほぼ一定に維持されることが分かり、この大きさ以上の空隙に対しては表面積変化による影響が無視でき、上記式(8)だけでも空隙の厚さが推定できることを立証している。

(3) 3偏波成分による散乱行列の計算原理および空隙体積の推定

一般に使用されている一方向の偏波成分の平行レーダ方式は、より簡単な原理で測定できる長所を有しているが、目標物の方向まで予測するためには、各方位別に測定を繰り返しながら行わなければならない煩わしさがある。これに反し、三つの偏波成分のアンテナを用いた3素子ダイポール方式の装置は、一回の測定で得られた三つの方向に対する散乱行列のベクトル演算により、目標物の埋設方向および各方位別平面形状に関する情報の予測が可能であると考えられる。しかし、本レーダ装置は、埋設管のような線状物体の方向探知用に設計されたため、本研究の対象である空隙のような非線状物体の形状識別等のためには別途の計算および信号処理課程が必要である。次に、本レーダ方式を用いて空隙の平面形

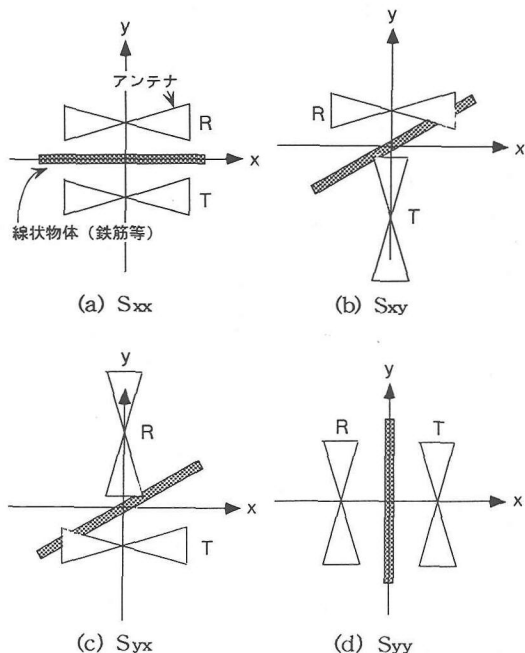


図-6 アンテナの配置による偏波モードの変化 (R:受信アンテナ, T:発信アンテナ)

状の識別および体積の推定方法について説明する。

a) 3ダイポールアンテナによる偏波モードの散乱行列⁹⁾

図-6のように各々のアンテナをx, y軸上で独立に配置することによって4つの偏波モードが得られ、その散乱行列は式(10)のように定義される。ここで、探査対象目標物は線状物体を例とした。アンテナからの放射電界ベクトルを E^T 、受信ベクトルを E^R とし、レーダ出力を $\left\langle E_i^R \middle| E_j^T \right\rangle$ とする。i, jは水平面（地表面）上にと

ったx, y座標系の成分である。散乱行列の各要素は、送信T・受信Rアンテナのベクトル実効長がそれぞれ、 S_{xx} では共にx軸に平行し、 $S_{xy}=S_{yx}$ では互いに直交し、 S_{yy} では共にy軸に平行することを意味する。

$$[S] = \begin{bmatrix} \left\langle E_x^R \middle| E_x^T \right\rangle & \left\langle E_x^R \middle| E_y^T \right\rangle \\ \left\langle E_y^R \middle| E_x^T \right\rangle & \left\langle E_y^R \middle| E_y^T \right\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

一方、図-7に示すように本研究で用いた3ダイポールアンテナによる多重偏波方式で、x, y軸に平行な単位ベクトルを \vec{e}_x, \vec{e}_y 、素子1, 2, 3のベクトル実効長と平行である単位ベクトルを $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ とすると、 $\vec{e}_1 = \vec{e}_x$

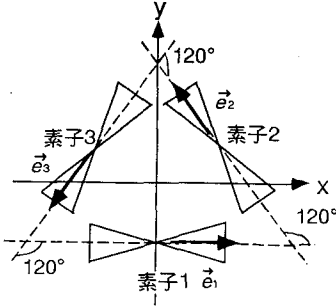


図-7 3素子ダイポールアンテナの構成

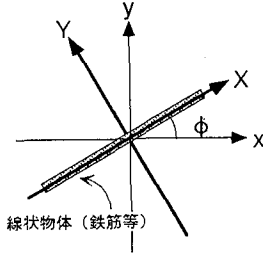


図-8 座標系の回転

$$\vec{e}_2 = -\frac{1}{2}\vec{e}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{e}_y \quad (12)$$

$$\vec{e}_3 = -\frac{1}{2}\vec{e}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{e}_y \quad (13)$$

の関係が成立する。

$$\text{従って、} \left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle, \left\langle E_2^R \middle| E_3^T \right\rangle, \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle \text{は、}$$

y方向のベクトル \vec{e}_2, \vec{e}_3 から次のように表現できる。

$$\begin{aligned} \left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle &= \left\langle \vec{e}_x, -\frac{1}{2}\vec{e}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{e}_y \right\rangle \\ &= -\frac{1}{2}\langle \vec{e}_x, \vec{e}_x \rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}\langle \vec{e}_x, \vec{e}_y \rangle \\ &= -\frac{1}{2}\left\langle E_x^R \middle| E_x^T \right\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}\left\langle E_x^R \middle| E_y^T \right\rangle \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \left\langle E_2^R \middle| E_3^T \right\rangle &= \left\langle -\frac{1}{2}\vec{e}_x + \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{e}_y, -\frac{1}{2}\vec{e}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{e}_y \right\rangle \\ &= \frac{1}{4}\langle \vec{e}_x, \vec{e}_x \rangle - \frac{3}{4}\langle \vec{e}_y, \vec{e}_y \rangle \\ &= \frac{1}{4}\left\langle E_x^R \middle| E_x^T \right\rangle - \frac{3}{4}\left\langle E_y^R \middle| E_y^T \right\rangle \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle &= \left\langle -\frac{1}{2}\vec{e}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{e}_y, \vec{e}_x \right\rangle \\ &= -\frac{1}{2}\left\langle E_x^R \middle| E_x^T \right\rangle - \frac{\sqrt{3}}{2}\left\langle E_x^R \middle| E_y^T \right\rangle \end{aligned} \quad (16)$$

これらの式を式(10)によって[S]の各成分で表し、各偏波成分に関する散乱行列に整理すると次式(17)のようになる。

すなわち、3ダイポールアンテナによる多重偏波方式のレーダを用いると、1回の測定で4つの偏波モードを得ることができる。

$$\begin{aligned} S_{xx} &= -\left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle - \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle \\ S_{yy} &= S_{yx} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle - \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle \right) \\ S_{yy} &= -\frac{1}{3}\left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle - \frac{1}{3}\left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle - \frac{4}{3}\left\langle E_2^R \middle| E_3^T \right\rangle \end{aligned} \quad (17)$$

なお、図-8のように、x, y軸に対して角度phiだけ座標系を回転させた新座標系X, Yでの散乱行列[S]'は次式(18)によって求めることができる。

$$[S]' = |\phi\rangle |S| |\phi\rangle^T \quad (18)$$

$$|\phi\rangle = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

ここで、

b) 多重偏波成分アンテナによる空隙の表面形状(方向性)の推定¹⁰⁾

以上の過程から推察してみると、偏波モードの応答特性上で一般的に知られている次のような事実が分かる。すなわち、平行偏波成分 S_{xx}, S_{yy} では信号の検出対象範囲が広くなり、線状物体の方向が $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ の場合に最大強さを有するに反し、直交偏波成分 $S_{xy} = S_{yx}$ では、等軸形物体には反応せず、線状物体の方向が $\phi = 45^\circ$ の場合に最大強さを有することになる。従って、本方式のレーダを用いて該当空隙の表面を探索した後に平行偏波成分 S_{xx}, S_{yy} と直交偏波成分 $S_{xy} = S_{yx}$ に対する散乱行列を計算すると、該当空隙の概略的な形状または方向性が分かる。

なお、探索対象物体の長軸方向にX軸を合わせて座標系を回転させた[x軸に対してphiだけ]二つの直交主軸X, Yにおける平行偏波成分の比、即ち S_{xx} に対する S_{yy} の比による形状識別係数(R)を式(19)のように定義して物体の形状を識別することも可能である。

$$R = \frac{S_{yy}}{S_{xx}} \quad (19)$$

これらの方法による物体の形状識別概念を図-9に示す。一方、本研究ではレーダ探索における物体の形状を識別する上で、図-9で示すように基本的な物体の形状を軸対称性によって3種類に大別して定義した。まず、鉄筋やパイプのようにほとんど一軸方向成分だけの長さを有している場合を線状物体、円や正方形の物体のように中心主軸間の各方向の長さが互いに同一な場合を等軸形物体、

	S_{xx}, S_{yy} 反応なし	$R = 0$ 線状物体
	S_{xy}, S_{yx} 反応あり ($\phi = 45^\circ$ 最大)	
例: 鉄筋、埋設管、ケーブル等		
	S_{xx}, S_{yy} 反応なし	$0 < R < 1$ 非線状・非等軸物体
	S_{xy}, S_{yx} 反応あり ($\phi = 45^\circ$ 最大)	
例: 楕円形、長方形等の物体		
	S_{xx}, S_{yy} 反応あり	$R = 1$ 等軸物体
	S_{xy}, S_{yx} 反応なし	
例: 円形、正方形、球形等の物体		

図-9 偏波モードの変換による物体の形状識別概念

これら以外の場合を非線状・非等軸形物体と定義した。

c) 空隙の体積推定

以上で空隙の表面形状を識別し、該当空隙が等軸形であると判断された場合には、次のような新しい手法によって空隙の体積を推定することができる。

まず、図-10で示すように多重偏波レーダで探査した空隙画像について式(18)によって各方位角別に座標を変換して計算した平行偏波画像を求める。計算精度を高めるために各方位角を 1° 間隔で変換し、空隙の全方位($0^\circ \sim 360^\circ$)について変換した結果を得る。しかし、いずれの方位に対してもアンテナの走査距離が空隙の大きさ以上で探査された場合には図-10で分かるように $0^\circ \sim 180^\circ$ までの変換結果だけでも全方位に対する情報が得られる。

このような概念により、次は各方位角別に空隙の領域を分割した後、それぞれの分割領域の体積を全方位について集計していくと空隙の全体積を求めることができる。この過程を図式化して説明するために、図-11には図-10の全体の空隙から右上部の1/4部分だけを取り出した空隙を示している。図-11では下の図が空隙の立体断面を、上の図が空隙の表面(平面)を示し、 θ_d° 間隔で分割した各方位角別分割状況を示している。ここで、太線で表示した一番目の分割領域($0^\circ \sim \theta_d^\circ$)に注目

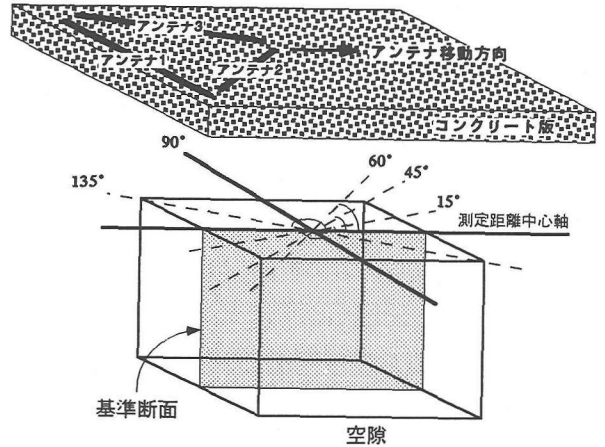


図-10 多重偏波レーダ探査による空隙の体積推定概念

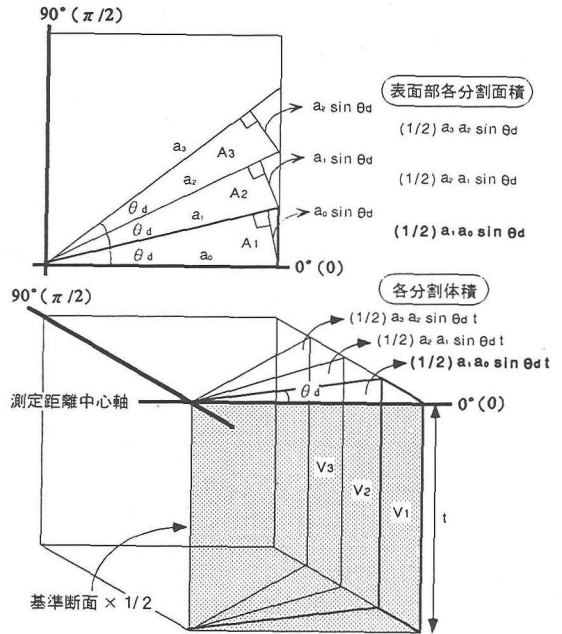


図-11 図-10の1/4部分に対する細部体積推定

すると、図-11の上側の平面図上の該当部の三角形の面積は式(20)のように表すことができる。

$$A_1 = \frac{1}{2} a_1 a_0 \sin \theta_d \quad (20)$$

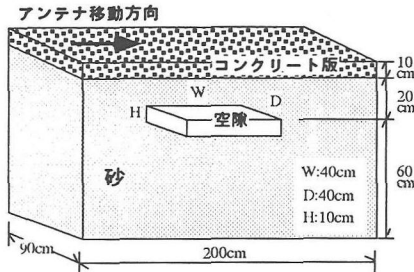
従って、これに関する分割領域の体積は式(21)のように該当面積に厚さ(t)をかけて求められるため、図-11に示す空隙の体積は式(22)のようにこれらの各分割領域の体積を $0^\circ \sim 90^\circ$ まで集計することによって得られる。

$$V_n = \frac{1}{2} a_n a_{n-1} \sin \theta_d t_n \quad (21)$$

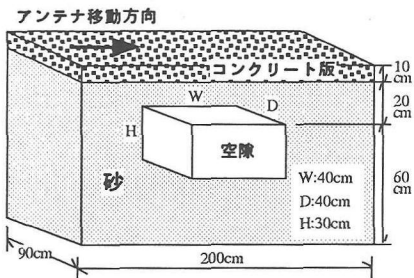
ここで、 V_n は θ_d° で分割した領域の体積を、 a_n, a_{n-1} はそれぞれ各分割領域における上辺と下辺の長さを、 t_n

表-3 コンクリートの配合条件

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位材料量(kg/m ³)				
		水 [W]	セメント [C]	細骨材 [S]	粗骨材 [G]	
					5~13 mm	13~20 mm
55	46	173	318	790	588	392



(a) 空隙厚さ10cm (深さ50cmの条件下でも実験実施)



(b) 空隙厚さ30cm

図-12 コンクリート版背面の正方形空隙の配置 ; 深さ30cmにおける空隙厚さ別配置例

は各分割領域における厚さを意味する。この際の厚さは θ_d を 1° ぐらいにする場合には分割領域内の厚さを一つの値にしても計算には大きな影響がないと考えられるため、普通 a_n の場合の厚さをういれば良い。一方、厚さが一定な場合には式(2.1)の t_n は t になる。

$$V_{\frac{1}{4}T} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_{90} \quad (0^\circ \sim 90^\circ) \quad (2.2)$$

なお、前述したように空隙の表面積が探査アンテナの大きさ以内である場合には $0^\circ \sim 180^\circ$ までの結果だけを集計すれば良いので、図-8の空隙の全体積は式(2.3)によって最終的に求められる。

$$V_{\frac{1}{2}T} = 2 V_{\frac{1}{4}T} \quad (0^\circ \sim 180^\circ)$$

$$V_T = 2 V_{\frac{1}{2}T} \quad (0^\circ \sim 360^\circ) \quad \text{または}$$

$$V_T = \sum_{n=1}^{180} 2 V_n \quad \text{ただし, } \theta_d = 1^\circ \text{ の場合} \quad (2.3)$$

もちろん、以上の計算過程において各分割領域の上辺と下辺の長さ a_n 、 a_{n-1} は各変換画像に対する空隙の断面形状の復元方法 [3節(1)項] により、各分割領域に

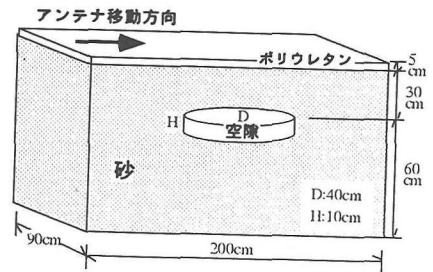


図-13 円形空隙の配置

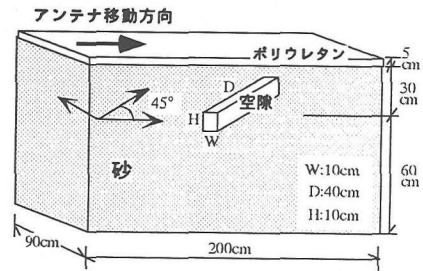


図-14 長方形空隙の配置

おける厚さ t_n は本研究の厚さの推定方法 [3節(2)項] によって求められる。

4. 実験概要

実験は図-12に示すように10cm厚さの無筋コンクリート版を置いて行った場合と図-13と図-14に示すように砂の表面の上に5cmの厚さの発泡ポリウレタンシートを敷いて行った場合の二つの条件に分けて実施した。コンクリート版は表-3の配合条件のコンクリート (スランプ: 5cm, 粗骨材最大寸法: 20mm, 空気量: 2.6%, 含水率: 5.8%, 圧縮強度: 400kg/cm²) を使用し、背面部の砂は比重2.62, 実験期間中の含水率1.7~3.4%の静岡県富士川産を用いた。なお、内部に入れた空隙は電気的性質が比較的空隙の条件に近いポリウレタン系の発泡性材料で人工的に作製し埋設した。

背面の材料は構造物の種類によって異なり、一般的に地盤または岩盤として構成されている場合が多いが、岩盤の場合は内部に空隙を入れて実験することが難しいため、地盤を代表する材料として砂を選択した。なお、一種類の媒質(砂)を選んで実験を行っても、媒質材料の比誘電率を考慮すれば、他の材料についても類推解析することが可能である。例えば、比誘電率は一般的に媒質の含水率などの影響を大きく受けるため⁸⁾、この条件が大きく異なる各現場条件別に本研究の解析手法を用いる場合には3節(2)のb)項の空隙の厚さを推定する式(8)について補正を行えばよい。

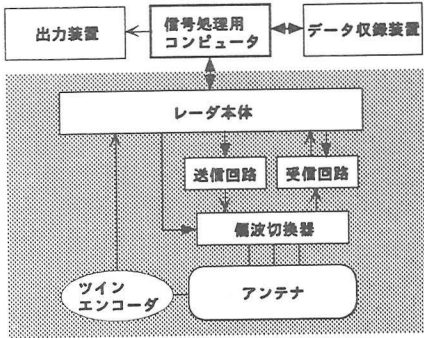
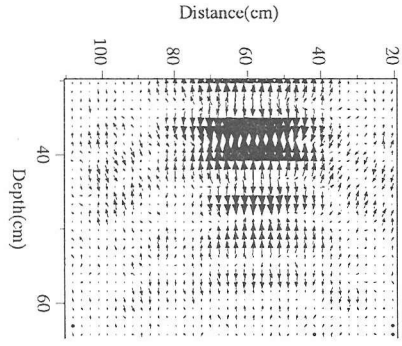


図-15 レーダ探査装置のシステム構成図



(a) 空隙画像に対するグラディエントベクトル

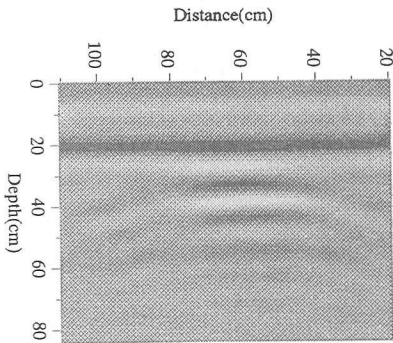
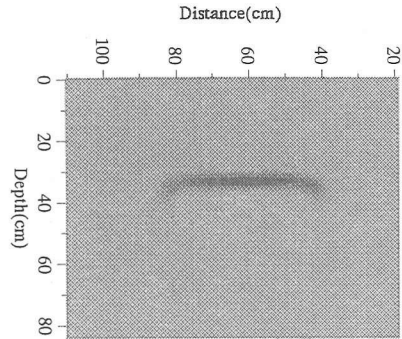


図-16 「図-12 (a)」背面空隙の測定画像



(b) 空隙断面の復元処理結果

図-17 「図-16」画像に対する空隙断面の復元

補正は、W40cm×D40cm×H10cmの大きさの標準空隙を用いて現場内の既知の深さ [1m以内ではいずれの深さでも関係ない] に埋設した後、式(8)の[]内の条件下の計算値と空隙の推定厚さを比較してその比を補正係数とし、これを同一現場内の他の各探査結果で共通して用いれば良い。

一方、図-13と図-14の条件下で砂の表面に発泡ポリウレタンシートを敷いて測定した理由はレーダ装置の測定部のアンテナの移動性を高めるためである。

以上の条件で、空隙の定量的な解析のために選んだ代表的な場合の空隙の実験条件として、まず、等軸形空隙については図-12(a)のコンクリート版背面の深さ(30cm, 50cm)別正方形空隙と図-13の発泡ポリウレタン背面の円形空隙を、非線状・非等軸形空隙については図-14の発泡ポリウレタン背面の長方形空隙を探査対象にした。

測定は前述したように、3ダイポールアンテナ方式を採用している地中探査レーダを用いた。本レーダは20MHz～1GHzの広帯域(中心周波数約600MHz)の周波数を用いているため、時間帯の変換信号が同じ中心周波数の非広帯域の一般型レーダに比べて高分解能型の特性を有している。図-15には本装置のシステム構成図を示す。

5. 測定および解析結果の比較検討

まず、図-12(a)の深さ30cmと50cmの正方形空隙に対する測定結果を図-16と図-18に示し、3節の(1)項で説明した方法によってこれらに対する断面形状の復元解析結果をそれぞれ図-17(b)と図-19に示す。ここで、各結果は空隙を含む伝搬媒質に対するレーダ信号の反射強さを画像の濃淡で示している。

特に、図-17(a)は図-16の測定原画像の空隙部について直接グラディエントベクトルを求めて表示した結果を参考として示している。

これらの解析結果では、コンクリート版[ポリウレタンシートの場合も同じ]に対する一様な分布の反射信号を先ず前処理(除去)し、画像上の雑音を抑制するための画像処理を並行しながら、断面形状の復元解析を行った。雑音を多く含む画像の微分処理[グラディエントベクトルを求めるため]は、雑音の影響をできるだけ減らすために、画像の雑音の重畳などの度合いによって適切な画像フィルタを選択して使用[スムージング処理など]する必要がある。なお、雑音の除去は探査画像の距離方向と深さ方向においてそれぞれの雑音の性質の差を差等化して考慮した非対称フィルタを用いれば効果的である。

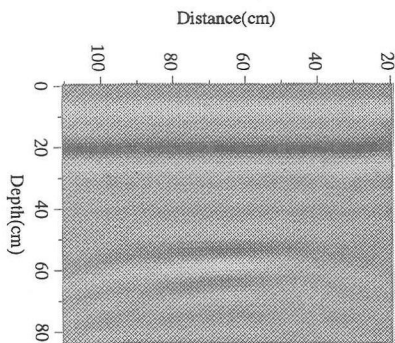


図-1 8 「図-1 2 (b)」背面空隙の測定画像

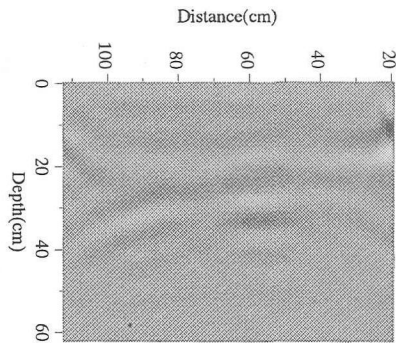


図-2 0 「図-1 2 (a)」の $S_{xy}=S_{yx}$ 偏波の散乱行列計算画像

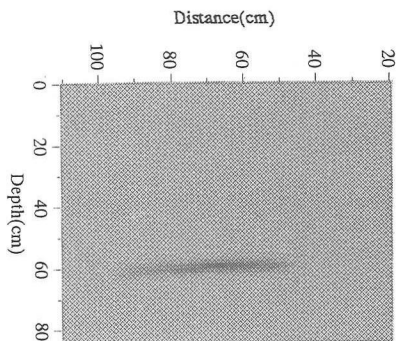


図-1 9 「図-1 8」に対する空隙断面の復元処理結果

しかし、図-1 9 の場合では深さによる信号の減衰[この場合、空隙からの反射信号が弱くなってグラディエントベクトルによる解析が難しい]と分散性、アンテナの指向性等の影響を大きく受け、処理結果も実際の空隙の幅より約10cm以上大きく表れた。このような問題（空隙の深さが50cm以上の場合）は、媒質の比誘電率変化による使用アンテナの指向性を事前に把握しておき、垂直伝搬距離によるビーム幅の比例関係¹²⁾を用いて該当深さでの水平分解能を補正して解決できる。

次に、図-1 2 (a) の正方形空隙と図-1 3 の円形空隙、図-1 4 の長方形空隙を対象例にし、3節の(3)項で説明した散乱行列の計算結果を画像化し、そのうち代表的な結果についてのみ図-1 8、図-2 0~2 3に示す。これらの結果は、式(1 4)、式(1 5)、式(1 6)の3素子アンテナの各組合別散乱行列を用い、式(1 7)の計算によって得られた結果である。このうち、図-1 6の結果は図-1 2 (a)の正方形空隙に対する平行成分 S_{yy} モードの計算結果[測定結果でもある]を、図-2 0はこれに対する直交成分 $S_{xy}=S_{yx}$ モードの計算結果を示す。また、図-2 1は図-1 3の円形空隙に対する全方位信号[0°~360°の全方位について1°間隔の回転角別画像変換を実施]のうち、代表的な各回転角別新座標系における散乱行列の計算結果を示している。

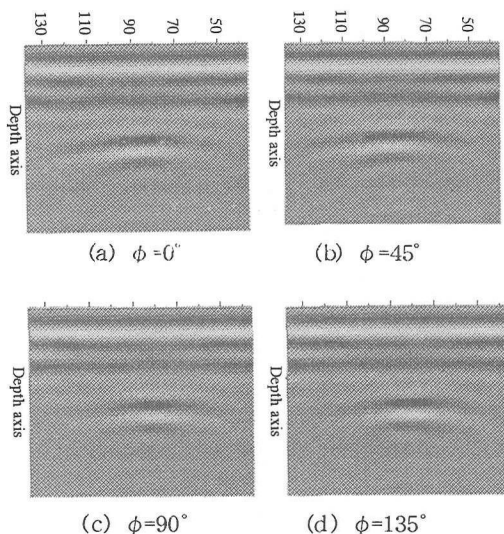


図-2 1 「図-1 3」の各代表回転角別散乱行列計算画像

一方、図-2 2と図-2 3は図-1 4の長方形空隙に対する平行成分 S_{yy} と直交成分 $S_{xy}=S_{yx}$ の散乱行列の計算結果を示している。以上の結果を解析すると次のようである。

まず、図-9の物体の形状識別概念に基づいて解析すると、図-2 2では図-1 4の長方形空隙の方向が45°になっているため、平行成分 S_{yy} では反射信号が弱く、物体形状の推定が困難であるが、図-2 3の直交成分 $S_{xy}=S_{yx}$ では他の散乱行列の計算画像に比べて最も強い信号が得られた。これらの結果から、3節(3)のb)項で前述したように該当空隙の形が線状に近い非線状・非等軸形(0<R<1)であることとその方向が $\phi=45^\circ$ を成していることが予測できる。

なお、平行成分を用いて各回転角別に散乱行列を計算して比較した結果、 $\phi=45^\circ$ 付近で比較的最大強さに近い信号が得られたものの、予想よりは全方位におけるそ

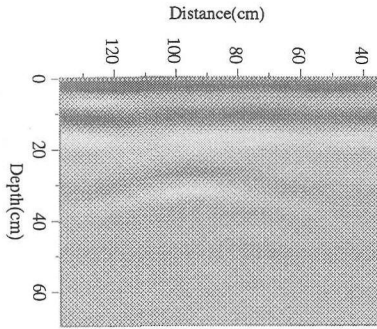


図-2 2 「図-1 4」の S_{yy} 偏波の散乱行列計算画像

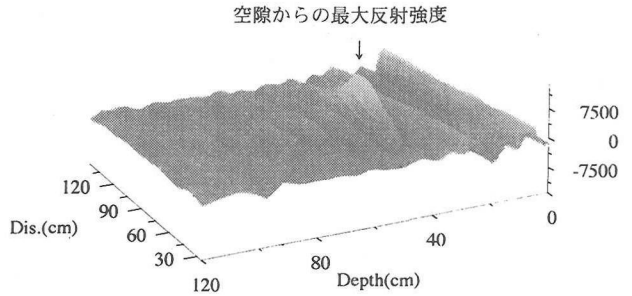


図-2 4 「図-1 2 (a)」の測定画像の3次元変換画像 (空隙厚さ10cmの場合)

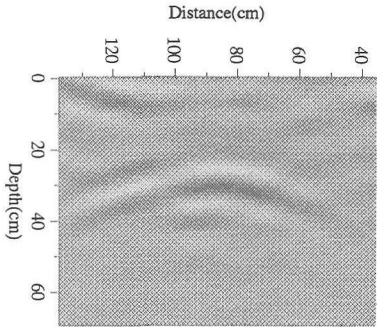


図-2 3 「図-1 4」の $S_{xy}=S_{yx}$ 偏波の散乱行列計算画像

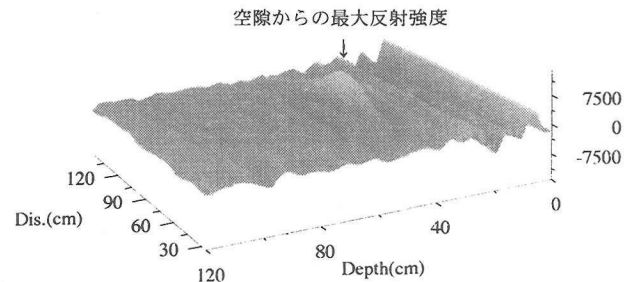


図-2 5 「図-1 2 (b)」の測定画像の3次元変換画像 (空隙厚さ30cmの場合)

それぞれの回転角別計算結果の差は大きくなかった。これは、対象物体が空隙として埋設管のような完全な線状物体とは異なることと、一方位 [測定一方向] だけのレーダ探査結果から全方位の空隙に対して等距離概念で計算したためであると考えられる。なお、 $S_{xy}=S_{yx}$ の散乱行列の計算結果である図-2 3では、式(1 7)に式(1 6)を代入した計算結果でも分かるように S_{xx} の平行偏波成分が消去されるため、表面境界 [等軸形、等方性と見なす] からの反射信号がほとんど得られないことが分かる。なお、図-2 2と比較すると信号の位相が反転している [空隙に対する反射画像が黒白から白黒になっている] のは散乱行列の計算式によるものと各送受信偏波面の方位別偏波状態が保存されるためである。

一方、図-1 2 (a)の等軸形空隙に対する平行偏波 S_{yy} の計算画像の図-1 6と直交偏波 $S_{xy}=S_{yx}$ の計算画像の図-2 0とを比較してみると、 S_{yy} の結果の方でさらに強い反射信号が得られ、対象物体が等軸形であることが予測できる。

次に、等軸形空隙の理想的な例である図-1 3の円形空隙を対象にし、全方位に対する信号の各回転角別新座標系の散乱行列の計算画像である図-2 1について解析した。本図上では全方位に対する各回転角別画像 (全体約360個) 中で代表的な方位として 0° 、 45° 、 90° 、 135° の四つの各方位角別計算画像だけを示しているが、

	<p>等軸形空隙 (正方形)</p> <p>実際の体積の約80%</p>
	<p>等軸形空隙 (円形)</p> <p>実際の体積の約95~105%</p>
	<p>非線形・非等軸形空隙</p> <p>形状の推定のみ可能</p>

図-2 6 空隙形状別体積検出結果

図-1 0と図-1 1でのように全方位にかけて 1° 間隔で各回転角別新座標系の散乱行列を計算した結果、図-2 1でのようにそれぞれの方位角においても全部ほぼ同じパターンおよび信号強度が得られ、空隙の表面形状が

完全な等軸形を成していることが分かる。

以上の実験条件に対する空隙の断面形状の復元および空隙の表面形状の推定結果と、3節の(2)項で提案した空隙の厚さの推定方法による推定結果を用いて空隙の体積を推定した[参考として、図-24と図-25は図-12に対する各厚さ別探査結果を3次元変換した結果であり、各厚さ別空隙からの最大反射強さの差が明確に表れることを示している]。その結果、図-26で示すように、円形空隙の場合では前述したように理想的な等軸形を示しているためほぼ実際の体積に近く(約5%内の誤差)推定できるが、正方形空隙の場合では、約20%の体積推定誤差が発生することが分かった。一方、体積推定の対象外とした等軸形以外の空隙は、体積推定までは困難であったものの、その方向性や形態を予測することは可能であった。

今後、さらに優れた低減衰・高分解能型のレーダが開発されれば形状変化などに対する検出分解能が良くなるため、体積などの推定精度もより向上すると思われる。

6. 結論

本研究で得られた主な結論は次のようである。

(1) 空隙の体積を推定するための本方法の適用条件は、空隙の断面情報、すなわち、断面幅と厚さが一緒に求められる空隙に限定する。そのため、厚さが一定ではない任意断面の立体形空隙の場合や配筋方向および形態によって各方位角別散乱行列が変化する鉄筋配筋下の条件では、本方法の適用が困難である。

(2) 非線状・非等軸形空隙や等軸形空隙等については、3素子ダイポールアンテナの各種偏波成分の散乱行列解析によって空隙の概略的な形状とその方向性の予測が可能であり、これらの空隙は互いに明確な区別ができる。

(3) 本方法による空隙の体積推定は、深さ30cm以内の等軸形空隙については約20%の誤差で推定が可能であるが、非等軸形空隙についてはその形状や方向性が推定できる。

謝辞: 本研究は東京大学大学院工学系研究科で行われた著者の博士論文の一部であり、御協力を頂いた同大学の生産技術研究所魚本研究室の皆さんおよび(株)フジタの坂本大輔さんに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J.H.Bungey : Non-Destructive Testing in Civil Engineering, *An International Conference organized by The British Institute of Non-Destructive Testing*, Vol.1 and 2, The University of Liverpool, 14-16 April 1993.
- 2) G.Schickert and H.Wiggenhauser : *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Proc. Vol.1 and 2, Berlin, Germany, 1995.9.
- 3) G.G.Clema, M.M.Sprinkel and Robert R.Long : Use of Ground-Penetrating Radar for Detective Voids Under a Jointed Concrete Pavement, *Transportation Research Record* 1109.
- 4) G.G.Clema and K.H.McGhee : Applicability of Radar Subsurface Profiling in Estimating Sidewalk Undermining, *Transportation Research Record* 752.
- 5) 朴錫均, 魚本健人: 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(3) - 空隙形状の復元および鉄筋位置の同定 -, 生産研究, 48巻5号, 1996.5.
- 6) 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の定量的評価に関する検討, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, 1996.6.
- 7) 朴錫均, 魚本健人: 3 偏波モードレーダ方式を用いたコンクリート背面空隙の画像解析, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 1996.9.
- 8) Udaya B.Halabe, Arash Sotoodehnia, Kenneth R.Maser, and Eduardo A.Kausel : Modeling the Electromagnetic Properties of Concrete, *ACI Materials Journal*, November-December, 1993.
- 9) 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.
- 10) 上野圭一, 大隅規由: 偏波信号を用いた地中物体画像化の検討, EMT-85-24, 1985.5.
- 11) A.D.Olver et al : Portable FM-CW Radar for Locating Buried Pipes, *Proc. International Conference Radar-82*, 1982, pp413-418.
- 12) 朴錫均, 魚本健人: レーダ法による多層コンクリート床板の非破壊検査のシミュレーション解析, 土木学会論文集, No.538/V-31, 1996.5.

(1996.12.18 受付)

ESTIMATION OF THE VOLUME OF THREE - DIMENSIONAL SUBSURFACE VOIDS BY THE MICROWAVE POLARIZATION METHOD

Seok-Kyun PARK and Taketo UOMOTO

The availability of a new analytical method using radar with three-dipole antenna to infer the volume of voids behind the pavement or the tunnel lining was investigated. In order to infer the volume of voids, the approach is to integrate the information obtained at a certain angle for the shape and thickness of a certain cross section of the void from 0 to 360 degree. For achieving this goal, the method for detecting the shape (the representative geometry) of objects from the image data of a certain cross section of voids using a simpler algorithm and inferring the thickness of voids was first proposed; then, the characteristic shape of voids was detected by the microwave polarization method. By combining the results obtained from the above methods, the method for inferring the volume of voids was suggested. According to the result of verification in this research, this new method was available for inferring the volume of voids with co-axial form while it was only available to distinguish the shape of voids with non co-axial form.