

V-578 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

東京大学大学院 学生員 朴 錫 均
 東京大学生産技術研究所 正会員 魚本 健人

1. まえがき

舗装道路の路面下及びトンネルライニング背面等の空隙は構造物の陥没、破損等の直接な原因になるので、非破壊検査方法を用い事前に空隙を検出するための研究が多数報告されている。しかし、これらの研究は空隙の存在有無の把握や連続空隙（ギャップ）に限る研究が大部分であり、限定された大きさの空隙の形状や方向性に関してはまだ具体的な研究が行われていない。そこで、非破壊検査から空隙の位置を概略判定した後、局部破壊方式により該空隙の規模を把握する方法が用いられるが、こういう全過程を非破壊検査で行うことができれば、検査技術の省力化はもちろん、より効果的な補修の実施も可能になるであろう。

従って、著者らはこれと関連し、既に空隙の断面形状の復元方法等について報告しており³⁾、本研究では、空隙の方位に関する立体情報を得るための基本段階として、3 偏波方式の新レーダ方式を用い路面下空隙の方向性や空隙の形態変化による偏波モード別画像解析方法について検討した。

2. 偏波モードレーダの基本特性及び散乱行列¹⁾

図1のように各々アンテナを独立に配置することにより、4つの偏波成分が得られ、その散乱行列は次式(1)のように定義される。ここで、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。

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)

(a) S_{xx} (b) S_{xy} (c) S_{yx} (d) S_{yy}

図1 アンテナの配置による偏波モードの変化

一方、本研究で用いられたレーダ ($f_c=600\text{MHz}$) は図2に示したように3素子アンテナによる3偏波モード方式を採用しているため、次式(2)により1回の測定で上記の4つの偏波成分を得ることができる。

$$\begin{aligned} S_{xx} &= -\left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle - \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle \\ S_{xy} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle - \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle \right) \\ S_{yy} &= -\frac{1}{3} \left\langle E_1^R \middle| E_2^T \right\rangle - \frac{1}{3} \left\langle E_3^R \middle| E_1^T \right\rangle - \frac{4}{3} \left\langle E_2^R \middle| E_3^T \right\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 E_n^m はアンテナからの放射電界ベクトルとして、mは送信T、受信Rを、nはアンテナの素子番号を意味する。従って、図3のように、x、y軸に対し角度 ϕ 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(3)のように示すことができる。

$$[S]' = |\phi| |S| |\phi|^T \quad \text{ここで、} \quad |\phi| = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)で、探査対象物が線状物体の場合は、理論的に $dS_{yy}/d\phi=0$ を満足させる ϕ 、または、回転角別散乱行列値（レーダの画像強度）

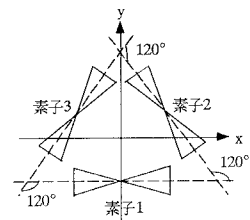


図2 3素子アンテナ・3偏波モードの構成

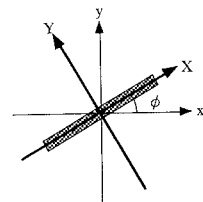


図3 座標系の回転

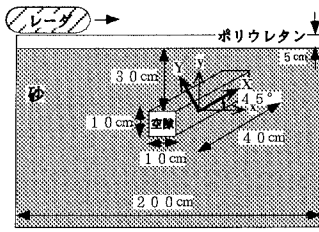


図4 直交異方性空隙配置

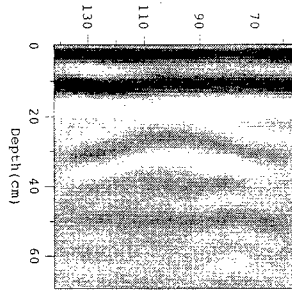


図5

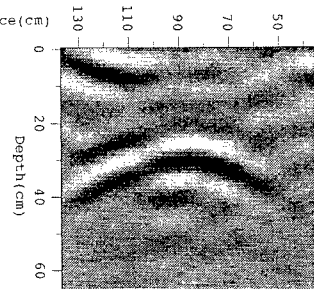


図6

図4の $S_{xy}=S_{yx}$ モードの測定結果

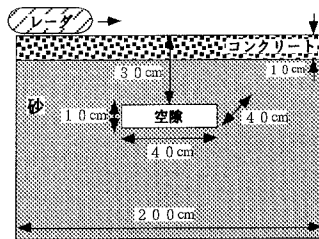


図7 等方性空隙の配置

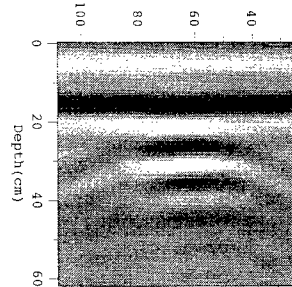


図8

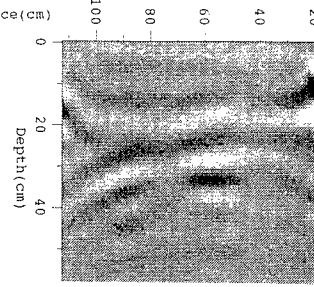


図9

図7の $S_{xy}=S_{yx}$ モードの測定結果

が最大になる角度が埋設物の方向になる。なお、偏波モードの応答特性上、平行偏波成分 S_{xx} 、 S_{yy} では、信号の検出対象範囲が広く、線状物体の方向が $\phi=0^\circ$ 、 90° の場合に最大強度を有するに反し、直交偏波成分 $S_{xy}=S_{yx}$ では、等方性物体には反応がなく、線状物体の方向が $\phi=45^\circ$ の場合に最大強度を有する²⁾。

3. 実験及び解析結果

本研究の実験には図4と図7に示したように、2種類の空隙が用いられ、1つは横10×縦40×厚さ10cmの線状物体に近い直交異方性矩形空隙を $\phi=45^\circ$ の方向で地中30cmの深さに、もう1つは横40×縦40×厚さ10cmのほぼ等方性の矩形空隙を $\phi=0^\circ$ の方向で厚さ10cmの無筋コンクリート床版下の深さ20cmに配置した。これらに対し、一般レーダでよく使用している平行成分の S_{yy} モードで測定した結果をそれぞれ図5と図8に示した。なお、直交成分 $S_{xy}=S_{yx}$ で測定した結果はそれぞれ図6と図9に示した。まず図5では、図4の空隙の方向が 45° になっているから、 S_{yy} では信号が弱く、物体形状の概略的な推定が困難であるが、図6の $S_{xy}=S_{yx}$ では強い信号が得られ、該当空隙の形が線状であることとその方向($\phi=45^\circ$)が分かる。そして、平行成分で各回転角別に散乱行列を計算し比較した結果、 $\phi=45^\circ$ 付近で比較的最大強度に近い信号が得られたが、予想よりは全方位での各回転角別特性差は明確に示されなかった。それは、対象物体が空隙として、埋設管等のような完全な線状物体ではなかったことと、一方向だけの測定で全方向の方位を空隙に対し等距離概念で計算したためであると考えられる。なお、図6では、予想通りに等方性境界からの信号（表面波）がほとんど出ないことが分かり、図5に比べ信号の位相が反転することは散乱行列の変化によるものである。一方、図8と図9では S_{yy} の結果に比べ $S_{xy}=S_{yx}$ に変換した結果は各該当信号がほとんど崩れてしまい検出対象物体が等方性であることが分かり、全方位での信号の各回転角別パターンもほぼ同じであった。

4. まとめ

空隙の場合についても形状の変化につれ偏波モードの応答が変わり、一部の空隙においては上記の解析方法により空隙の概略的な水平形状や方向性等が分かる可能性のあることが明らかとなった。特に、著者が既に報告した³⁾物体の断面形状復元方法と並行し解析すれば、空隙の水平全方向に関する実際の形状の立体情報も一定の範囲以内で求めることもできると考えられる。

参考文献

- 1) 村沢親治ほか：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
- 2) 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，pp.21-30
- 3) 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），生産研究，48巻5号，1996.5