

III-A 400

円状測線を用いた電磁レーダの野外実験とその解析

大成建設技術研究所	正会員	今井 博
同上	正会員	川上 純
川崎地質開発部		野口 静雄
同上		西山 英一郎
同上		山田 茂治

1. まえがき

トンネル工事において、シールドマシンによる都市地下などの軟岩掘削では、電磁波を用いた前方探査が多く見られるようになってきた。この目的は、掘削前方の障害物の発見を主とし、同時に地質の変化の予測の試みが行なわれている。しかしながら、TBMを用いた山岳トンネルなどの硬岩掘削においては、電磁波を用いた前方探査は行なわれておらず、研究段階にあると言える。

硬岩掘削における電磁波を用いた切羽前方探査を実用化するために、茨城県笠間市の採石場で電磁波反射法による傾斜した反射面の特定のための実験を行った。本研究では、実機にて用いるアンテナの周波数の検討および円状の測線による探査実験データを用いて反射面の特定を行った。以下にこれらの内容を報告する。

2. 円測線による傾斜した反射面のモデル

TBMのカッターヘッドに電磁波アンテナを取り付け、ヘッドを回転させると、アンテナの軌跡は円弧を描く。一方、アンテナから出た電磁波は反射面から垂直に反射し受信される（図1）。

座標軸を右手系とし、トンネル軸をX軸、直交する水平軸をY軸、上方をZ軸とすると、任意の平面の方程式は、係数をa, b, c, dとして

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

で表される。任意の点 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, \dots, n$) から平面 (1) へ下ろした垂線の長さ h_i は次式で表わされる：

$$h_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

ここで、TBMを用いたトンネル掘削状況をモデル化し、図1に示すように、走向角 0° 、傾斜角 α でトンネル軸 (X軸) と切羽 ($x=0$) から距離 k で交差する反射面を設定する。このとき、TBMの面盤に電磁レーダを設置し探査を行うと、反射面からの垂直反射波が正弦波的に全波界の中に表出する。さて、このモデルの反射面の方程式は式 (3) で表わされ、したがって、式 (2) より、TBMでの電磁レーダの位置 $P(0, r \cos \theta, r \sin \theta)$ との距離 h_θ は式 (4) で計算できる。

$$x \tan \alpha + z - k \tan \alpha = 0 \quad (3)$$

$$h_\theta = \frac{|r \sin \theta - k \tan \alpha|}{\sqrt{\tan^2 \alpha + 1}} \quad (4)$$

ここで、 r はTBMの回転に伴うアンテナの軌跡の半径、 θ はTBMの回転角である。 $h_{\theta \text{ MIN}} \leq h_\theta \leq h_{\theta \text{ MAX}}$ であり、この $h_{\theta \text{ MIN}}$ 、 $h_{\theta \text{ MAX}}$ および r から傾斜角が計算でき、 $\theta \text{ MAX}$ および $\theta \text{ MIN}$ から反射面の走向角が計算できる。

ここで、 $k=10$ 、 $r=4$ とし、傾斜角を $-80^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$ で変化した時に得られる反射波の位置を図2に示す。この解

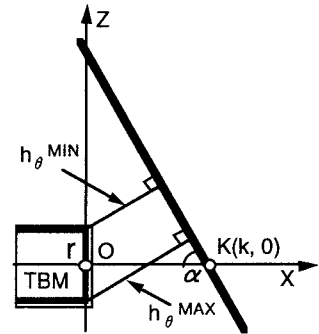


図1 反射解析モデル

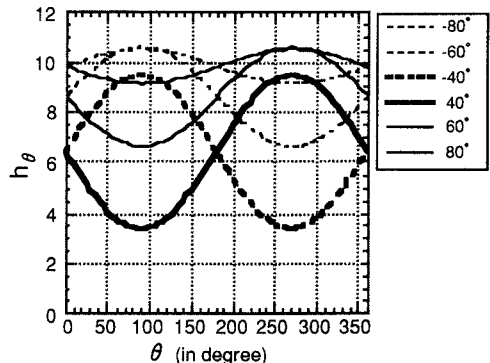


図2 反射面の傾斜角と反射データ

析は走向角が 0° の場合であるが、任意の走向角の場合は、図2の正弦波状に並ぶ波形が左右に移動する。反斜面が急傾斜になるほど反斜面との距離は大きく振動し、 k の値から離れる。

3. 円測線による野外実験

円測線による探査実験を、茨城県笠間市にある稲田花崗岩の採石場で行った。実験では、図3に示すように、半径4m（一周25.13m）の円測線上を3種類のアンテナを用いて反時計回りに探査した。

図4には、フィルタ処理のみを行った反射データをグレイ・スケールで表示した。図4の(a)(b)(c)は各々150 MHz、350 MHz、1 GHzの3種類のアンテナを用いて得られた反射データである。各測定結果には、正弦波状の反射波が3つ認められる。それぞれが地下の反射面を示していると考えられる。ここに示した深

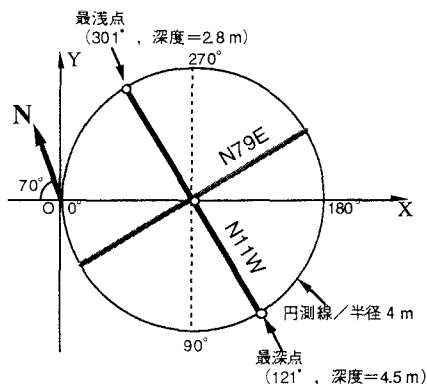


図3 円測線および反射面推定結果

度10m以内では、周波数による可探深度の差は明瞭ではない、一般的には、可探深度はアンテナの周波数が低いほうが深い。しかし、反射データの解像度が悪くなる。図4を見ると、150 MHz程度の低い周波数で十分反射面が特定できることが分かる。

図4で認められる最も浅い反射面について、最浅点および最深点の深度 h_θ とそれらに対応する θ を読み取り、得られた反射面の位置を特定した。その結果を図3に示す。深度の計算は、電磁波透過実験より得られた伝播速度11.6 cm/nsecを用いた。測定データの解析結果は、反射面に関して、走向N79E、傾斜角 12.3° 、円測線の中心軸と反射面との交差までの距離3.8m、が得られ、現場の亀裂状況と調和的な結果であった。他2つの面も同様な解析が出来る。

4. まとめ

電磁波前方探査を実用化する目的で、稲田花崗岩採石場で円測線による測定を行った。アンテナは150 MHzで低周波ではあるが十分な結果が得られた。また、円測線による測定データ内に反射波が正弦波状に表出しており、その反斜面の走向・傾斜・深度を計算した結果、現地亀裂状況と調和的であった。

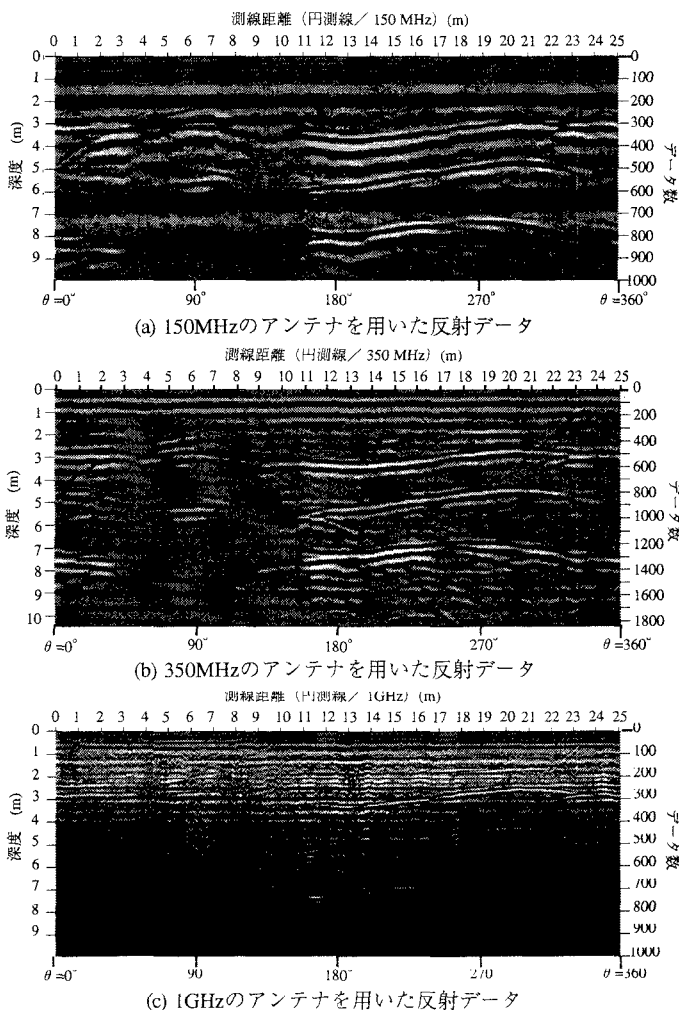


図4 3種類のアンテナによる反射データ