

III-409 電磁波利用による地山探知装置の開発

三井造船(株) 正員 江沢 一明
三井建設(株) 伊藤 達男

1. まえがき シールド工事において、第一の重要ポイントは、“切羽の安定”である。近年、シールドトンネルは地盤条件の厳しい場所での施工が増大し、泥水加圧式、土圧式シールド工法などの、全面密閉式が大半を占めてきている。これらの工法は、“切羽の安定”がはかれる一方、全面の掘削状況が直接目で確認できないため、間接的な掘削管理を行っている。しかしながら、これらの管理は、計器の精度、測定タイムラグ、定数の仮定などにより、測定誤差が生ずる。本来、地山の崩壊によって生じた空隙は、直ちに裏込材を注入することができれば、地表面の沈下等は防ぐことができる。この意味からも早期の崩壊探査を行うことが重要になってくる。この目的の為に電磁波を利用した「シールドレーダ」システムの開発実験について報告する。

2. 電磁波の性質 本装置に関する電磁波の性質と理論を記す。図-1に示す様に、異なった誘電率(ϵ)、透磁率(μ)、導電率(σ)、を持つ2つの媒体中を、電磁波が透過していく状態を考える。

-1. 反射 図-1に示す様に、2つの媒体の平滑な境界面に対し、垂直に入射する電磁波は、音波の場合と同様に、境界面で反射を生ずる。この反射係数： R は次式で近似される。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、この媒体の誘電率の違いによって、反射が発生し、2つの媒体の誘電率の差の大きいほど、その反射は大きい。

-2. 減衰 電界強度 E_0 の平面電磁波が、媒体中を透過し、距離： Z に達したときの強度(E_Z)は、 $E_Z = E_0 \cdot e^{-k \cdot Z}$ $\dots\dots\dots (2)$

となり、電界強度は $e^{-k \cdot Z}$ で減衰する。電界強度が $1/e = 1/2.71828183$ になる距離を、 δ とすると $\delta = 1/\alpha$ ただし α ：減衰定数 $\dots\dots\dots (3)$ となる。

δ が電磁波の透過距離を推定する目安となる。実際には、探査可能な距離はアンテナから発射される電磁波の指向性等レーダシステムの性質と媒体の伝搬損失によって決ってくる。

-3. 電磁波の伝搬速度： v 媒体中の電磁波の伝搬速度： v は、

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \right)^2} + 1 \right)^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表わせる。土中における電磁波の減衰は小さく($\sigma=0$)、地中の土質は非磁性体($\mu=1$)と考えられ、式(4)は次式で近似できる。

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに C ：自由空間での電波の速度 ($c = 3 \times 10^8$ m/sec
= 30 cm/nsec)

ϵ_r ：比誘電率

2. シールド工法への応用 密閉式シールド工法での施工の場合、時には安定機能のアンバランス

によって、図-2に示す様に崩壊が起る場合がある。この崩壊は順次進行して掘削断面上部にまで達してシールド上部に空洞(実際には地下水又は泥水が充満している)を発生させる。この空洞部を探査する目的で種々の実験を実施した。図-3に示す様に送信アンテナから、ある指向角をもって非常に幅のせまい電磁波のパルスを発射する。電磁波のエネルギーは減衰をしながらも媒体1の中を透過し、媒体2との境界面に到達する。このとき電磁波の一部は反対方

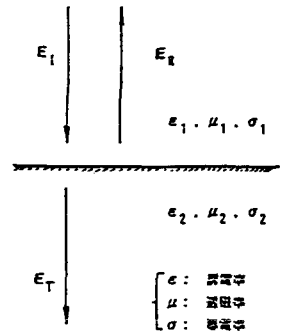


図-1 異種媒体境界での電磁波の反射と透過

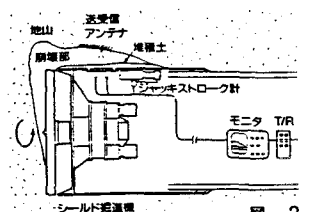


図-2

向に反射し、又一部は更に媒体2の中を透過していく。反射された電磁波は受信アンテナに到達し検出されることになるが、 d の距離を往復する時間 Δt だけタイムラグを生じる。このとき媒体1中の電磁波伝搬速度が既知であれば距離 d を計算することができる。

4. 開発実験と報告 実験の目的として、①使用雰囲気での計測の可能性②計測の精度、可能深度③堆積土砂先の空洞探査の可能性④アンテナの耐水、耐圧、耐久性の確認を行った。

ー1. モデル地盤の設定 図-2に示すような地盤を実験室内につくるとは不可能であるため、鉄製の水層の中に土砂(砂礫・砂・シルト・粘土)を投入し、十分に転圧し完全飽和であるよう湿润状態にしておく。このモデル地盤を条件をかえながら各状況下で各種の計測を行った。

①水深の測定(実験Ⅰ)……図-4に示す様にアンテナを鉄製の箱の中に収納し電磁波の発射面側は、電波をよく通すようにアクリル板によって封印した。アンテナを泥水中で上下させ、深さの変化に伴う反射波受信時間差との関係を考察した。又土砂の種類および泥水(ベントナイト溶液)の濃度を变化させ各々の組合せを行った。

②土砂層厚の測定(実験Ⅱ)……土砂の種類によって各々特有の電波伝搬速度の変化を測定した。

③三層の測定(実験Ⅲ)……センサー部(送/受信アンテナ)に土砂が堆積した場合、その先に発生した空洞の判定の可能性を考察した。

④溶液の導電率の測定……電磁波の減衰率は、透過媒体の導電率(σ)に主に支配される。そこで、各種濃度の泥水の導電率を計測し、電磁波による計測可能深度の考察をした。

ー2. 実験結果の報告と考察

①水深の測定(実験Ⅰ)……水深の変化を横軸に、反射時間差をタテ軸にプロットしたものを図-5に示す。高精度で水深を測定することが可能であった。また溶液が清水又はベントナイト泥水の関係なく電波の透過速度はほぼ一定であると考えられる。これは溶液の体積濃度の100%近くをしめる水分によって比誘電率(ϵ_r)が決定されるためと考えられる。

②土砂層厚の測定(実験Ⅱ)……図-6 土砂の種類によらず、電波の土中の透過速度はほぼ一定値を示す。これは、比誘電率が土の含水比に対応するためと考えられる。

③三層の測定(実験Ⅲ)……電波が透過していき、土→泥水、泥水→土各々の層境界からの反射波を捕えることが可能であった。

④溶液の導電率の測定……各種濃度のベントナイト溶液の導電率を測定したが、その値は小さく電波の減衰はさほどおこらないと考えられる。

5. おわりに 今回の室内実験および実トンネルでの実証実験の結果を考察し、今後さらにハード/ソフト面での改良を進めていく予定です。

(参考文献)鈴木 務:電波による土中水中の探査/計測と制御Vol.2-No.8

北原義一:マイクロ波電磁波による地層内異常物の探知/探鉱と保安Vol.24-4

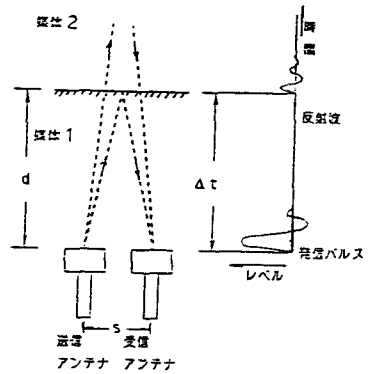


図-3 電磁波による距離測定原理

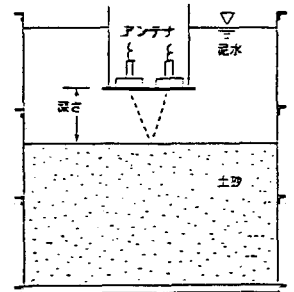


図-4 水深の測定

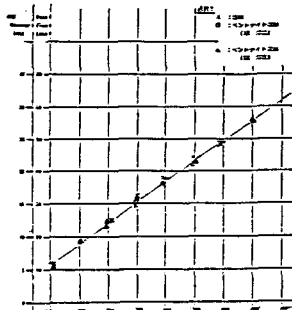


図-5 水深と反射時間差の関係(清水/ベントナイト泥水)

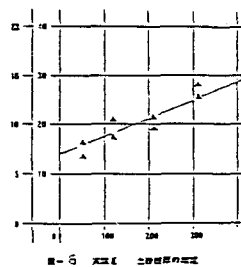


図-6 土砂層厚と反射時間差の関係

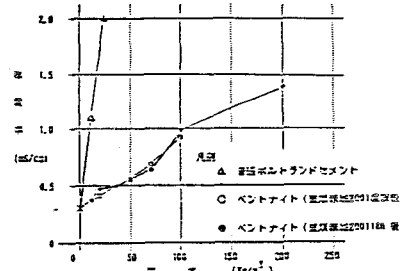


図-7 濃度の異なるベントナイト泥水の導電率