

(94) 電磁波トモグラフィーによる岩盤評価技術

鹿島 技術研究所 正会員 稲生道裕
鹿島 技術研究所 正会員 広野 進
鹿島 技術研究所 ○升元一彦

Evaluation of rock mass using electromagnetic tomography

Michihiro INOU Kajima Technical Research Institute.
Susumu HIRONO Kajima Technical Research Institute
Kazuhiko MASUMOTO Kajima Technical Research Institute

Abstract

Recent realization of various utilization of underground space is promoting the development of advanced method for surveying joints and some other geological conditions. Geotomography technique- seismic, resistivity and electromagnetic tomography - is being studied as the prospecting technique to investigate geological condition between the boreholes. In order to establish the geotomography technique to synthetically evaluate the geological condition based on the combination of each tomography, the application of electromagnetic tomography is evaluated. This paper describes the result of the the fundamental tests in a water tank and the in-situ tests in the rock mass by the borehole rader system.

First of all, the electromagnentic tomography test in a water tank is carried out to quantify the characteristics of the instruments. Secondly, in-situ test is conducted to detect the well located fault in rhyolitic rock mass, where the data under two frequencies (80MHz, 150MHz) are analyzed in terms of both velocity and attenuation. The results are compared to that from seismic tomography method to find the superiority in resolution of electromagnetic tomography.

1. はじめに

近年、岩盤内地下空間利用の多様化に伴い、岩盤内の亀裂や地質状況に対するより精度の高い調査技術が必要となっている。特にボーリング孔間の地質状況を探査する技術として、ジオトモグラフィーが注目されているが、その中では弾性波を媒体とするトモグラフィー技術が最も進んでいる。

一方、最近開発されたポアホールレーダーを用いる電磁波トモグラフィーは、弾性波トモグラフィーに比べて探査距離では劣るものの、分解能が高く、測定時に送・受信器を孔壁に密着させたり、振動を与えたりしないので、孔壁をこわさずに容易に測定できるという点ですぐれている。また、弾性波速度以外の岩盤情報を知ることが期待でき、今後弾性波トモグラフィーや比抵抗トモグラフィーと組み合わせることによって、総合的に岩盤の状況を判定することが可能になると思われる。

今回、導入したポアホールレーダーシステムについて水槽での機能確認試験を行った後、電磁波トモグラフィーの岩盤への適用性を検討するために現場実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 水槽での機能確認試験

2.1 ボアホールレーダーシステムの概要

ボアホールレーダーシステムの機器構成を図-1に示す。本システムは、2本のボーリング孔を用いて電磁波を送・受信し2孔間の地質状況を把握する透過法（トモグラフィー法、80MHz、150MHz）と1本のボーリング孔を用いてその孔壁近傍の亀裂や地質状況を把握する反射法（500MHz）の両方の測定ができるが、今回は透過法についての実験結果を報告する。透過法では、送信された電磁波は岩盤中を通過する間に遅延・減衰されて受信されるので、伝播速度と振幅減衰の両方のトモグラフィー解析をすることができる。

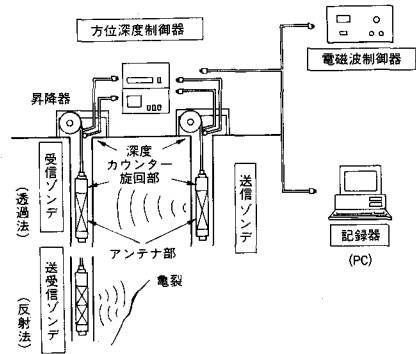


図-1 ボアホールレーダーの機器構成

2.2 機能確認試験

透過法用ソナードの性能を確認するため、水槽内（9m×9m×9m）にて実験を行った。その実験項目および結果を以下に示す。

(1) 減衰特性

送・受信ソナードを水槽内等深度におき、ソナード間の距離を変化させて、振幅の減衰を測定した。減衰特性は、理論的には $\exp(-\alpha l) / l^2$ （ α ：減衰係数、 l ：離間距離）に比例するので実測値に合うように理論曲線を描くと図-2のようになる。この結果は、媒質が同じ場合は、周波数が高いほうが減衰も大きいという一般的傾向と一致している。

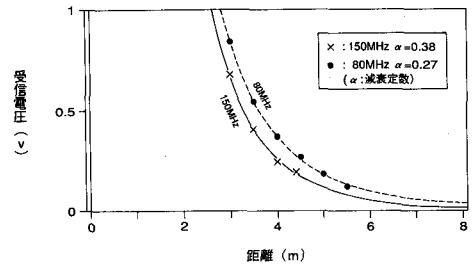


図-2 距離による減衰特性

(2) アンテナの上下方向の指向性

送信ソナードを水槽内のある深度で固定し、受信ソナードを上下方向に移動させて、アンテナの上下方向の指向性を確認した。伝播速度に関しては、上下角が大きくなるとソナード間の距離が長くなる分だけ遅延することが予想されるが、今回の実験により、その理論上の伝播時間より早く伝わるということが確認された（図-3）。これはレーダーのアンテナの長さの分だけ実伝播距離が短くなると考えて80MHzで50cm、150MHzで25cm補正した曲線上に実測値が良くのることから、その影響によるものと考えられる。また、振幅減衰については、距離が長くなるために生じる減衰よりも大きく減衰することが確認された（図-4）。この指向性については、80MHzで $\cos^6 \theta$ 、150MHzで $\cos^{16} \theta$ （ θ ：上下角）を掛けて補正した値と実測値が

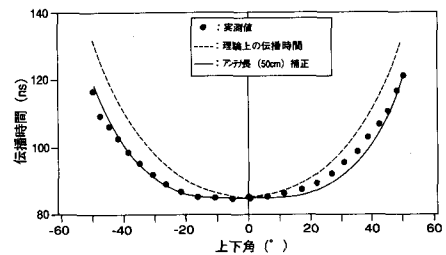


図-3 伝播速度の上下方向の指向性（80MHz）

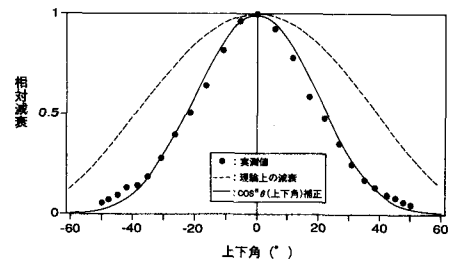


図-4 振幅減衰の上下方向の指向性（80MHz）

良く一致した。

そこで、トモグラフィー計算時には次の補正を行った。①伝播速度；80MHzで25cmずつ、150MHzで12.5cmずつ送信・受信の深度を近づける方向に補正する。②振幅減衰；(実測値) = (実減衰) × $\cos^n \theta$ であるので、実測値に $1 / \cos^n \theta$ を掛けた値を実減衰としてトモグラフィー計算を行う。ただし、nは媒質によって違うので事前にそれを決定する必要がある。

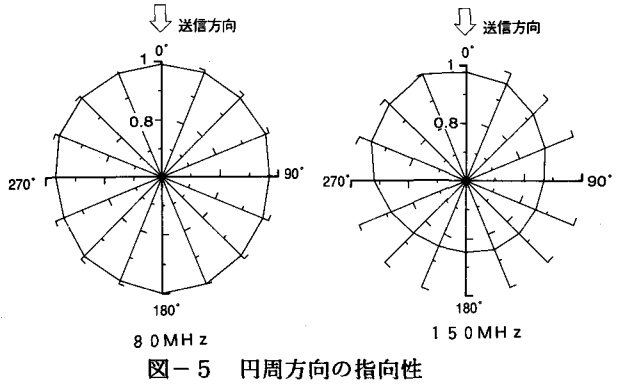


図-5 円周方向の指向性

(3)アンテナの円周方向の指向性

送・受信ゾンドを水槽内の一定距離、等深度におき、受信ゾンドを回転させて、アンテナの円周方向の指向性を確認した。伝播速度に関しては、円周方向の指向性はないが、振幅減衰には指向性が見られた。図-5に示すように、80MHzの場合は、数%程度で指向性は考慮する必要がない。しかし、150MHzの場合は、10~15%送信側に大きくなっており、これはトモグラフィー計算時に影響を与えるので、振幅最大の方向を測定中確認しておく必要がある。

3. 岩盤での現場実験

3.1 実験の方法

電磁波トモグラフィーの岩盤への適用性を検討するために、地下発電所周辺ドレーン坑内において実験を行った。実験サイトの岩質は流紋岩で、亀裂が比較的発達しておりRQDは平均50-60%であった。実験は、図-6に示す配置で鉛直方向にボーリング孔を3本掘削し、表-1に示す周波数と孔間距離の組合わせで行った。この実験位置は、ドレーン坑等の地質調査結果から、破碎帯がボーリング孔と交差することが予想されていた。また、今回のトモグラフィー結果を評価するために、各孔のコア観察とNo.1-No.3孔間で弾性波トモグラフィーを行い、相互間の比較を行った。

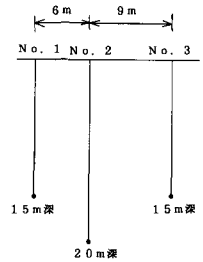


図-6 ボーリング孔配置図

3.2 実験の結果

今回の実験ケースと、トモグラフィー解析の結果を表-1に示す。①電磁波が受信されトモグラフィー解析が可能なもの、②両ゾンドが等深度または深度差が1~2m以内でしか受信されず、解析は不可能なもの、③受信されないもの、に分けられ、これより本機器でこの岩盤での可探距離は、150MHzで6m、80MHzで9m程度であることがわかった。

表-1 実験ケースとトモグラフィー解析結果

送信孔→受信孔	孔間距離 (m)	周波数	
		80MHz	150MHz
No.1→No.2	6	○	○
No.3→No.2	9	○	△
No.1→No.3	15	△	×

○： トモグラフィー解析可能
 △： 受信されるが、解析不可能
 ×： 受信されない

次に、周波数、振幅減衰・速度による違いを比較するためにNo.1~No.2孔間の電磁波トモグ

ラフィー解析結果4ケースを図-7に示す。水槽での試験に基づき、振幅減衰は80MHzで $\cos^4 \theta$ 、150MHzで $\cos^6 \theta$ の補正を行っている。全てのケースについて、No.2孔の7m付近からNo.1孔の10m付近にかけて連続した速度の低い部分または減衰の大きい部分が明瞭に検出されている。その他に速度によるトモグラフィーでは5m以浅に3本の連続した低速度部が、減衰トモグラフィーではNo.1孔の5m以浅付近に減衰の大きい部分が検出された。また、同じ位置での弾性波トモグラフィー解析結果と柱状図を図-8に示す。

3.3 考察

(1)地質状況との対比

図-7と図-8から、電磁波トモグラフィーにより検出されたNo.2孔7mからNo.1孔10mにかけての低速度かつ減衰大ゾーンは、弾性波速度の比較的遅い部分に対応していることがわかる。また、このゾーンに対応するNo.1、No.2孔の深度では、亀裂密度が大きく岩級も悪くなっている。このことから、この連続した低速度、減衰大ゾーンは破碎帯を反映していると考えられる。

5m以浅のトモグラフィー

結果は、減衰によるものと速度によるもので検出部が違っている。また、弾性波トモグラフィー結果とも違っている。このことは、電磁波の速度と減衰度と弾性波速度が、お互い必ずしも同じ地質状況を反映するものではないことを示しているが、その対応の評価については今後の課題である。

(2)分解能の比較

各ケースで検出できたNo.2孔7mからNo.1孔10mにかけての破碎帯の検出状況を周波数の違いにより比較してみると、図-7により150MHzの方が破碎帯の連続性が良く、より鮮明に検出できることがわかる。図-9に亀裂密度と電磁波速度の、図-10に亀裂密度と電磁波減衰の関係を示す。亀裂密

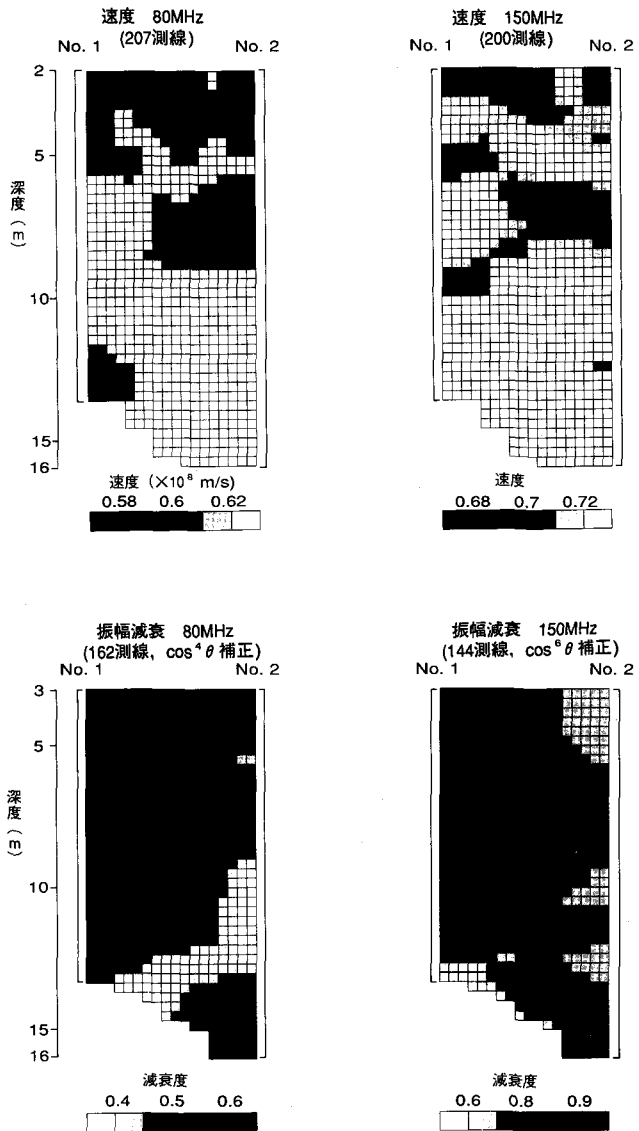


図-7 電磁波トモグラフィー解析結果

度の増大につれ、速度が減少し減衰度が増加する
 するという傾向が読み取れる。また亀裂密度の増
 大による速度の減少、減衰度の増加は、80MHzよ
 り 150MHzの方が大きく、これは 150MHzの方
 が分解能が高いことを示している。同じ破碎帯に
 ついて弾性波トモグラフィー結果と比較すると、
 電磁波トモグラフィーの方が破碎帯の境界をより
 鮮明に表現しており、検出能力が高いことがわか
 る。

このことから、精度を上げた破碎帯の検出とい
 う点からは、150MHzの電磁波トモグラフィーを
 用いるのが有効であるが、周波数を高くすると探
 査距離が短くなるので、電磁波トモグラフィーと
 弾性波トモグラフィーを有効に組み合わせて調査
 を行う必要がある。

4. おわりに

ジオトモグラフィー技術のひとつとして、今回ボ
 アホールレーダーを用いる電磁波トモグラフィー
 による岩盤評価技術の検討を行った。その結果は
 以下のよう
 にまとめられる。

- ① 水槽での機能確認試験により、ボアホール
 レーダー・アンテナの特性を把握した。その結
 果に基づき実際の岩盤を対象としたトモグラ
 フィー解析時には補正を行った。
- ② 岩盤での実験では破碎帯の検出が可能であ
 った。精度を上げた破碎帯検出のためには、周
 波数の高いトモグラフィーを用いるのが有効
 であるが、探査距離を考慮にいれ周波数を変
 えたり弾性波トモグラフィーを組み合わせた
 りする必要がある。

今後の課題としては、電磁波物性（伝播速度、
 振幅減衰）と地質状況（岩質、破碎帯、風化
 度、含水率等）との対応関係をより明確にし
 なければならない。また機器の改良点とし
 ては、より高周波数で探査可能距離をのば
 す技術の開発が必要とされる。

なお、本装置の開発に際し協力していただいた
 川崎地質(株)の大沼氏に感謝の意を表します。

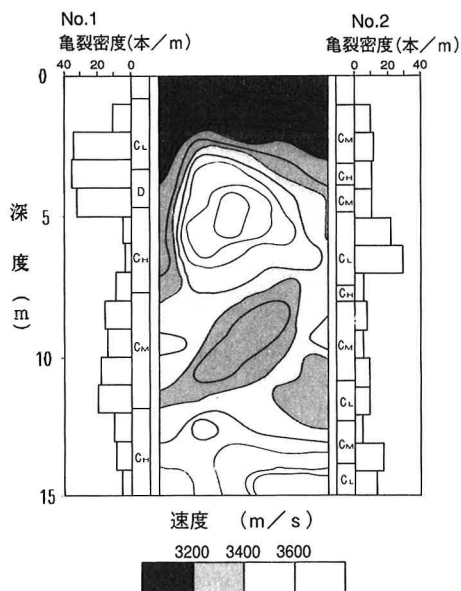


図-8 弾性波トモグラフィー結果

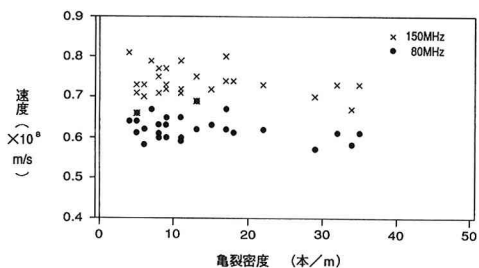


図-9 亀裂密度と電磁波速度の関係

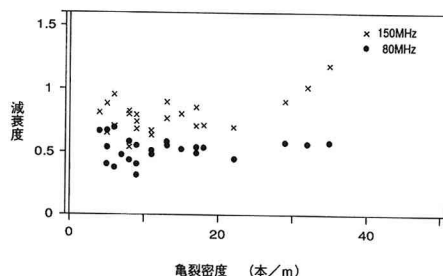


図-10 亀裂密度と電磁波減衰度の関係