

(54) 電磁波トモグラフィーによる岩盤内の含水状態評価について

鹿島技術研究所 正会員 日比谷啓介

鹿島技術研究所 正会員 稲生 道裕

鹿島技術研究所 ○升元 一彦

Evaluation of Water Content in Rock Mass by Electromagnetic Tomography

Keisuke HIBIYA, KAJIMA Technical Research Institute

Michihiro INOU, KAJIMA Technical Research Institute

Kazuhiko MASUMOTO, KAJIMA Technical Research Institute

Abstract

To realize a geological disposal of radioactive waste, advanced methods are required to survey joints in a rock mass, which function as hydraulic flow paths. Electromagnetic geotomography is being examined as a prospecting technique for investigating geological conditions - especially water content - between boreholes, because the propagation of the electromagnetic wave depends on the water content of a rock mass as a medium.

This paper discusses the results of in-situ tests in a saturated granitic mass conducted with an electromagnetic tomography to evaluate hydraulic flow paths. From these results, the distribution of water content in the rock mass is evaluated based on the electromagnetic properties of rock specimens obtained by laboratory tests.

1. はじめに

将来、岩盤を高レベル放射性廃棄物処分場等の重要構造物として利用することを想定した場合、岩盤内の亀裂や地質構造を詳しく知る必要があり、特に透水経路としての亀裂の分布性状に対するより高精度の調査技術が求められている。なかでもジオトモグラフィーは、岩盤物性の分布をある断面上に画像化する技術であり、従来の手法に比べ高精度で客観性があるという点で優れているため、注目されている手法である。筆者らは、トモグラフィー手法の中で電磁波を媒介とした電磁波トモグラフィーによる岩盤評価についての研究を進めており、これまでに電磁波の速度と減衰度という指標を用いて破碎帯を検出できることを確認している。¹⁾

電磁波トモグラフィーは弾性波トモグラフィーに比べ分解能が高く、また、電磁波の性質は岩石の含水状態に影響されることが知られているので、今回、この電磁波トモグラフィーの特徴を利用した岩盤内の透水経路探索の可能性について検討を行った。具体的には、水で飽和された岩盤内の電磁波速度トモグラフィー結果に、ボーリングコアから作成した供試体の含水状態を変えた誘電率測定結果を適用することにより、含水率分布状況を推定し、水みちとしての間隙構造評価を試みた。

2. 岩盤での原位置試験

2.1 試験の概要

原位置試験は、花崗閃緑岩中のトンネルの横坑に掘削した、孔間5m、深度50m、孔径86mmの鉛直ボーリング孔2本を利用して行った(図-1)。周辺の岩体は、全体的に堅硬であるが、傾斜が60~80°の高角度の亀裂、破碎帯が発達している。図-2にボーリング孔のコア観察による結果とRQDの分布を示す。また、2孔とも孔口から10ℓ/min以上の湧水量があり、岩盤内は水で飽和されていると考えられる。

電磁波トモグラフィーは図-3に示す配置で送信深度から上下10m以内の波線で測定を行った。また、同じボーリング孔においてルジオン透水試験を実施した。

2.2 解析結果

電磁波トモグラフィーの伝播速度と振幅減衰についての解析結果を図-4に示す。解析方法はSIRT法で、繰返し計算回数は10回である。測定周波数は80MHzと150MHzとともに良好な受信波形を得たが、今回は150MHzの結果のみを示す。なお、メッシュは1m四方で切ったが、出力時にはスムージング処理としてメッシュを1/3に細分化して出力している。

初動振幅減衰を用いたトモグラフィーの場合、アンテナの上下方向の指向性を補正する必要があることはすでに指摘されている²⁾。指向特性を求めるため、まず水槽内試験¹⁾から発信点での振幅値を計算し、トモグラフィー波線の中から指向性の影響のない等深度の波線に注目することにより、対象としている岩盤の平均的な減衰係数を求める。次にそれを利用して、原位置試験の全波線について伝播距離による減衰を除くことにより、上下方向の指向特性を求めることができる。以上の検討の結果、今回の解析時には、指向特性 $f(\theta) = \cos^4 \theta$ (θ : 発信器と受信器が水平方向に対してなす角度)と近似して補正を行った(図-5)。

2.3 結果の評価

トモグラフィー解析結果から、Na 1孔10m付近からNa 2孔15m付近に連続した低速度、高減衰帯がみられる。これは、地表で観察されたF-1、F-2の破碎部の延長に対応するものと思われる(図-1、2)。Na 1孔の15m付近の低速度、高減衰部は、RQDがそれほど低くなく、顕著な亀裂も発生していないが、コア観察から褐色に変色したゾーンであることより、透水による岩盤の劣化部を反映しているものと思われる。また、Na 1孔33m付近からNa 2孔40mと45m付近にかけても連続した低速度、高減衰帯がみられる。これらの図の左上から右下へ向かう低速度、高減衰帯の傾きは、周辺地質から推定される亀裂の傾きの傾向と一致している。

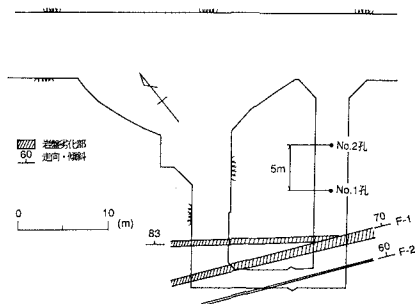


図-1 実験サイト付近図

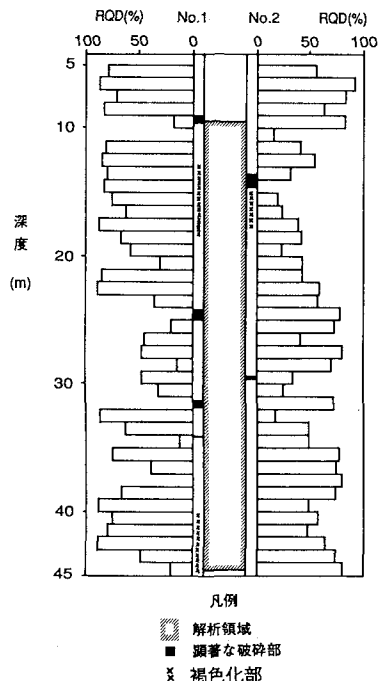


図-2 RQD分布図

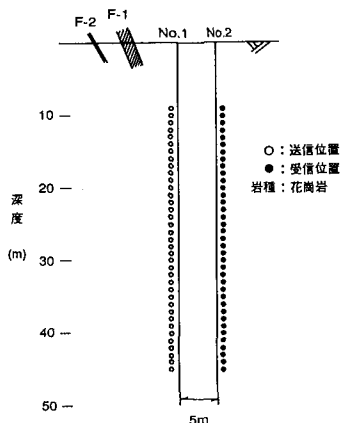


図-3 ボーリング孔配置図

電磁波速度は、周波数が十分に大きい時、 $v = C_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ により求められる。ただし、 C_0 は真空中の電磁波速度（ $\approx 2.997 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）、 ϵ_r は比誘電率（真空中の誘電率との比）である。この式により、電磁波速度分布から比誘電率分布を計算することができる。図-6に解析時の各セルに対応する比誘電率と減衰係数の関係を示す。ほぼ正の傾向がみられるが、相関はそれほどよくない。このことは、比誘電率と減衰係数がともに含水状態、亀裂の分布状態等の岩盤特性に依存するが、その依存の仕方がそれぞれにおいて違うためと考えられる。

3. 岩盤内の含水状態評価

3.1 岩石サンプルの誘電率測定試験の概要

電磁波トモグラフィーの解析によって得られた岩盤の電気的特性は岩盤のある特定の状態と対応しているはずである。特に、電磁波速度を決定している比誘電率は、岩盤の含水状態に大きく影響を受けることが知られている^{3), 4)}。このことに基づき、今回のトモグラフィー解析結果を岩盤内の含水状態分布として定量的に評価するために、ボーリングコアから岩石サンプルを作成し、含水状態を変えて供試体の誘電率を測定した。

測定は HP4194Aインピーダンス・ゲイン・フェーズアナライザ（横河・ヒューレット・パッカード

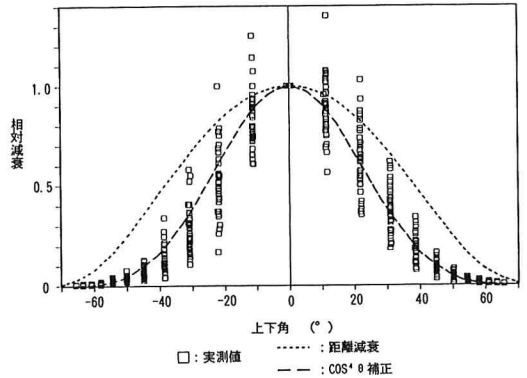


図-5 上下方向の指向特性

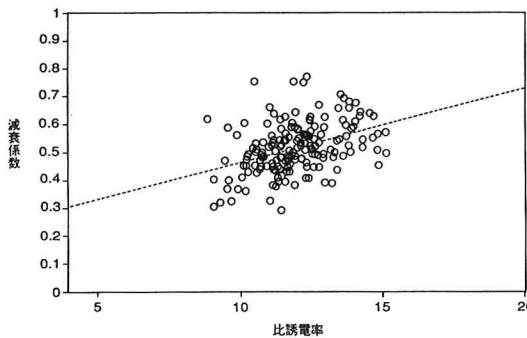


図-6 比誘電率と減衰係数の関係

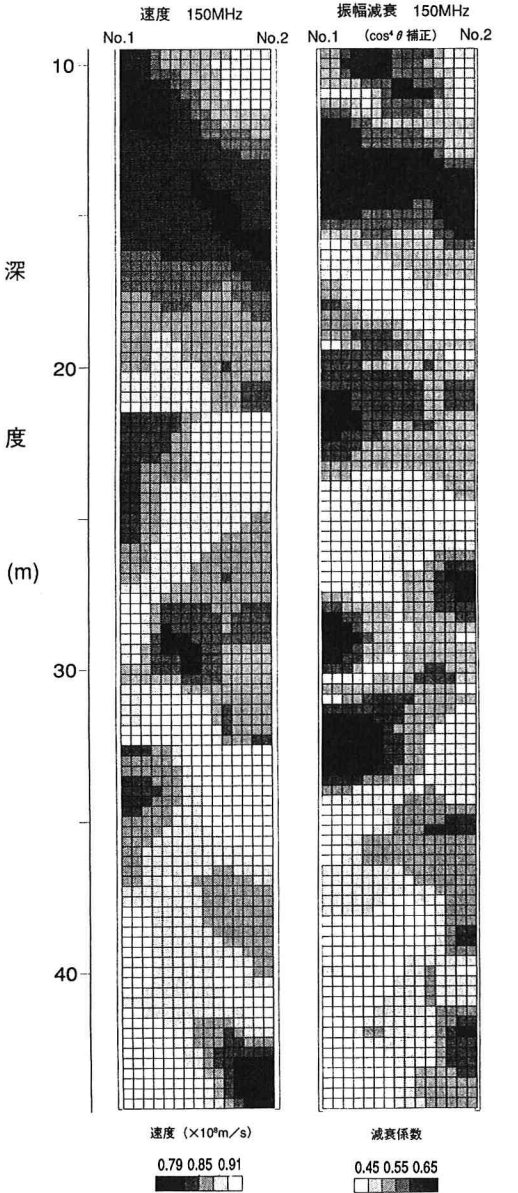


図-4 電磁波トモグラフィー解析結果

表-1 岩石サンプルの比誘電率測定結果

サンプル採取位置	比 重	体積含水率	比 誘 電 率		
			飽和時 (150MHz) ϵ_w	乾燥時 ϵ_d	実岩部 ϵ_o
Br. No. 1 5.0m	2.715	0.0126	6.212	5.423	5.541
Br. No. 1 14.9m	2.657	0.0372	9.355	6.923	7.460
Br. No. 1 23.0m	2.686	0.0064	6.777	6.472	6.550
Br. No. 1 30.8m	2.739	0.0034	7.420	7.350	7.400
Br. No. 1 41.7m	2.589	0.0258	7.804	6.416	6.740
Br. No. 2 6.0m	2.680	0.0058	7.046	6.536	6.608
Br. No. 2 16.8m	2.651	0.0352	8.980	6.922	7.428
Br. No. 2 26.6m	2.637	0.0154	7.445	6.539	6.734
Br. No. 2 33.9m	2.614	0.0013	6.141	5.411	5.423
Br. No. 2 42.4m	2.631	0.0003	6.220	6.008	6.011
花崗岩平均			6.400	6.590	
流紋岩平均*			5.840	6.108	

*: 5 サンプル⁶⁾

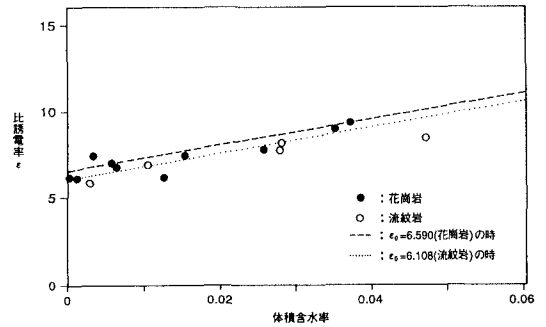


図-7 体積含水率と比誘電率の関係

社製)にHP16034Eテストフィクスチャを取付けたもので行った。サンプルは直径25mm、厚さ4mmの円柱形に整形し、表面を銀でコーティングした。また、同じサンプルで乾燥時、飽和時の2状態のものを周波数を1から40MHzまで変化させ、3回測定を行い平均値をとった。原位置試験では150MHzで測定を行ったので、それと対応させるため1~40MHzで周波数依存の近似式を求め、150MHz時の比誘電率を計算した。測定結果を、サンプルの強制乾燥状態の比重と体積含水率の測定結果と併せ、表-1に示す。

3.2 比誘電率と体積含水率の関連性

岩石が鉱物の集合体であることから、多成分の混合体とみなし岩石の誘電率を理論的に求める式が数多く提案されている⁵⁾。2成分の場合の実験式は下式で表される。

$$f(\epsilon) = \delta_1 f(\epsilon_1) + \delta_2 f(\epsilon_2) \quad , \quad \delta_1 + \delta_2 = 1$$

ただし、 ϵ_1 : 成分1の誘電率 ϵ_2 : 成分2の誘電率

δ_1 : 成分1の容積比 δ_2 : 成分2の容積比

横山、堀津⁵⁾は $f(\epsilon) = \log \epsilon$ とおいたLichteneckerの実験式がよく一致するとしているので、この式を用いて乾燥時の比誘電率から試験サンプルの空隙部 ($\epsilon_r = 1$) を除いた実岩部の比誘電率を求めると表-1のようになる。また、水で飽和させた場合の比誘電率の変化を図-7に示す。この図には流紋岩についての同様の測定結果⁶⁾もプロットしてあるが、岩種による差はほとんどなく、比誘電率は体積含水率にほぼ比例して大きくなることがわかる。

次に、含水させた場合を水と岩石の2成分系として理論上の誘電率を計算することを試みた。この時、実岩部の比誘電率を各サンプルの平均値をとって花崗岩で $\epsilon_o = 6.590$ 、流紋岩で $\epsilon_o = 6.108$ とし、水の比誘電率は81とした。水と岩石の混合体の場合、 $f(\epsilon) = \log \epsilon$ とおいた2成分混合体の実験式では実測値とは合わないので、 $f(\epsilon) = \epsilon$ として計算してみると図-7のようになり、比較的よく一致する。このことは150MHzといった高周波数領域では含水にともなう周波数依存性が小さくなり、含水状態の岩石の比誘電率を混合体の理論式で説明できることを示している。

3.3 間隙率分布と透水試験結果との対比

高周波数領域では、比誘電率と体積含水率との間に $f(\epsilon) = \epsilon$ とおいた2成分混合体の実験式が成り立つことを利用して、原位置試験により得られた電磁波速度トモグラフィ結果を体積含水率分布として表すことができる。ボーリング孔からの湧水の電気電導度が $115 \mu\text{S}/\text{cm}$ であることから、地山の水は比較的純粋な水に近いものとして、上述の実験式の適用が可能であると思われる。また、この岩盤は飽和状態であると考えられるので、体積含水率分布は間隙率分布とみなすことができる。図-8に電磁波速度トモグラフィ結果から得られた間隙率分布とルジオン透水試験結果を示す。この図からほぼ透水係数の大きいところが間隙

率の大きいところに対応しており、電磁波速度トモグラフィーにより水みちとしての間隙構造を推定できることがわかる。

4. おわりに

今回、水で飽和された岩盤内で電磁波トモグラフィー測定を行い、速度と振幅減衰についての解析結果を得た。また、ボーリングコアから作成した供試体の含水状態を変えた誘電率測定を行うことにより、体積含水率と比誘電率との関係式を導き、それを用いて電磁波速度トモグラフィー結果から間隙率分布を推定することができた。今後、電磁波の減衰特性を利用した岩盤評価手法についても検討する予定である。

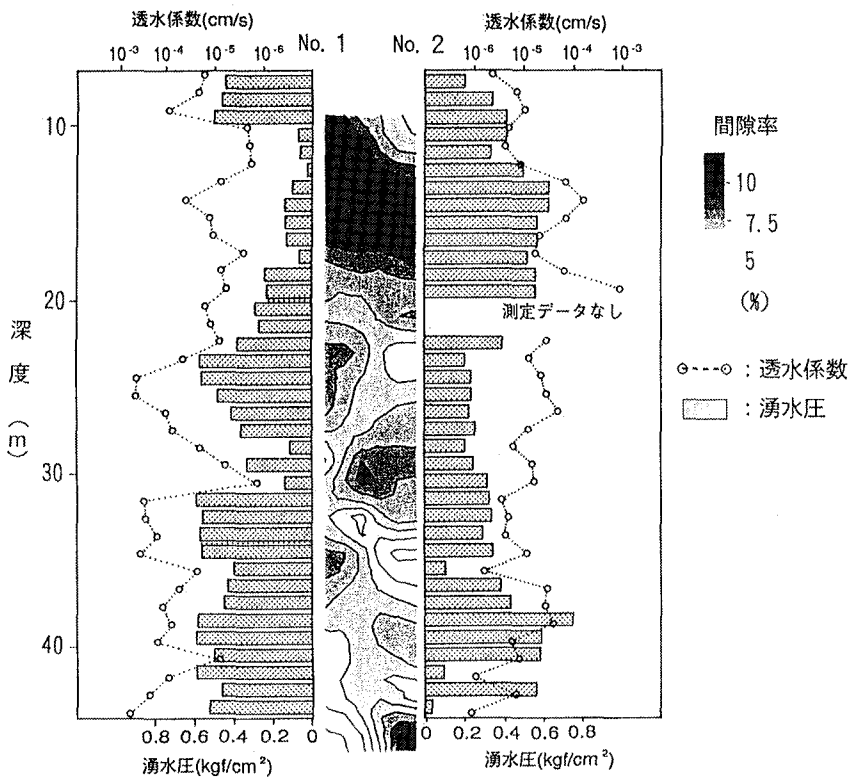


図-8 間隙率と透水試験結果

参考文献

1) 稲生, 広野, 升元; 電磁波トモグラフィーによる岩盤評価技術, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (1992年2月), pp. 459~463. 2) 加藤, 六川, 石井; トモグラフィーにおける初動振幅情報の有効性, 物理探査学会第85回講演論文集 (1991年10月), pp. 181~185. 3) 天野, 田辺; 岩石の電磁波伝播定数に及ぼす水分の影響, 物理探査学会第86回講演論文集 (1992年5月), pp. 421~425. 4) 横山; 30Hz~1MHz周波数領域における岩石の誘電率について, 日本鉱業会誌, 93(1071), (1977年5月), pp. 347~352. 5) 横山, 堀津; 岩石の誘電率の算定について, 日本鉱業会誌, 94(1083), (1978年5月), pp. 317~352. 6) 日比谷, 稲生, 広野, 升元; ポアホールレーダーによる地盤調査技術の開発, 鹿島技術研究所年報, 40, (1992年10月), pp. 205~210.