

電磁波・比抵抗・弾性波を利用した岩盤の水利地質構造評価について

Evaluation of Hydrogeological Structure
by Electromagnetic Tomography and Geophysical Loggings

戸井田 克*・升元 一彦*

Masaru TOIDA and Kazuhiko MASUMOTO

Advanced methods are required to survey joints in a rock mass, which function as hydraulic flow paths. Geotomography is being examined as a prospecting technique for investigating geological conditions between boreholes.

This paper discusses the results of in-situ tests in a saturated granitic rock mass conducted with an electromagnetic tomography and geophysical loggings. From these results, hydraulic flow paths in the rock mass is evaluated based on the electromagnetic and electric properties obtained by in-situ tests.

1. はじめに

岩盤構造物の設計・施工に際しては、岩盤の構造や各種物性値を精度良く把握することが必要であり、特に、地下深部の岩盤を対象とする場合は事前に十分な情報量を得られないこともあり得るので、複数の情報を総合的に評価することが望ましい。筆者らは、これまでに複数の調査手段（主に、トモグラフィ手法）の組み合わせによる水利地質構造の高精度評価を目的とした研究を実施してきた。具体的には、電磁波・比抵抗トモグラフィを用いた岩盤内の水みちとしての間隙構造評価¹⁾、比抵抗・弾性波トモグラフィによる岩盤内の地下水賦存状況評価²⁾、さらに弾性波・電磁波トモグラフィに基づく岩盤内の破碎帯・亀裂分布状況評価³⁾等について検討を進めてきた。今回は、火成岩サイトにおいて電磁波・比抵抗・弾性波の3つを用いた原位置測定（トモグラフィ、検層）の結果を対比・分析することにより、岩盤中の水みちの推定を試みたので、その結果について報告する。

2. 試験概要

試験位置は、土被り約500mの岩盤中に掘削されたトンネルであり、図-1に示すようにトンネル底盤から鉛直下向きに削孔したボーリング孔に囲まれた部分を評価対象とした。2本のボーリング孔の長さは各々7m、孔間距離は4.5m、岩種は花崗岩であり、亀裂頻度が平均5本/m程度という堅硬な岩盤である。また、試験区域の水位はほぼ孔口付近であり、全体として飽和状態にあるものと判断した。図-2は、本試験における水利地質構造評価の検討フローを示したものである。

また、試験方法の概要を孔間試験と孔内試験に分類して以下に述べる。

* 正会員 鹿島技術研究所

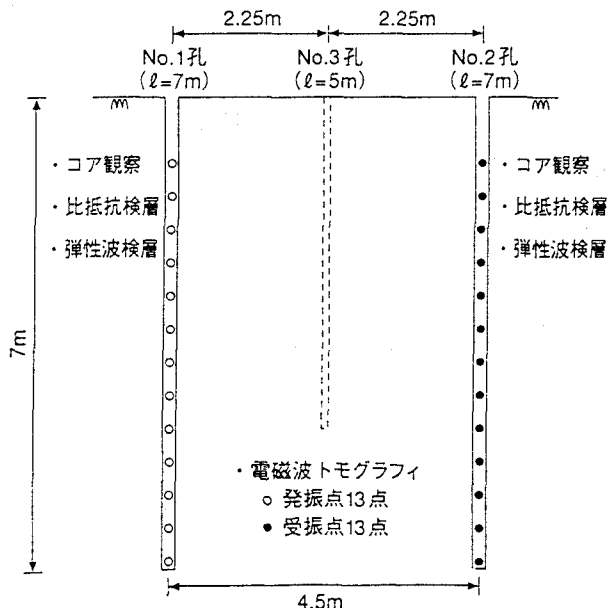


図-1 測定概要

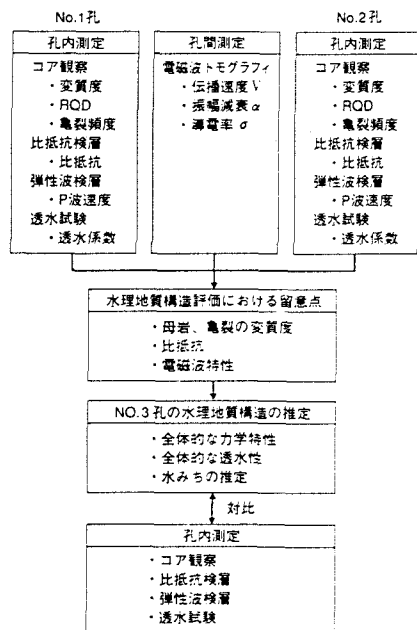


図-2 検討フロー

2. 1 孔間試験

孔間試験としては、電磁波トモグラフィを実施した。使用したシステムは、アンテナの中心周波数が80 MHzであり、各ボーリング孔の深度1～7m区間で発受振間隔を0.5mとした。深度1m以下は、トンネル掘削時の発破による損傷の可能性があると考え試験対象から除外した。また、既出の図-1に示すようにNa1孔とNa2孔の削孔長を(7m)をNa3孔(5m)より長くしたが、これはトモグラフィ測定の波線密度が深部で小さくなることへの対処である。

また、水理地質構造の重要な要素である水みちに関する具体的な情報を得るため、ボーリング孔内にトレーサ投入を行った後に再度、電磁波トモグラフィを実施している。そして、これら2回の試験結果の対比から水みちの推定を行った。

2. 2 孔内試験

孔内試験としては、ボーリング・コアの観察を始めとして比抵抗検層、弾性波検層及び透水試験を実施した。コア観察では、一般的な亀裂頻度(本/m)やRQDの他に、母岩や個々の亀裂に関する変質程度を観察した。具体的には、未変質を0%、全体変質を100%として母岩及び亀裂の変質度を%表示した。また、比抵抗検層では、堅硬な岩盤中に存在する個々の亀裂の性状を知る必要があるため、ノルマル法(2極法)において電極間隔を5cmとしたマイクロ検層⁴⁾を採用した。弾性波検層については、50cm間隔の多連式受振器を孔内に挿入し、孔口付近の岩盤表面をハンマー打撃することによって発生させたP波の伝播速度を観測した。透水試験は、孔口から深度1mの部分にパッカーを設置し、通常の「ルジオン・テスト」⁴⁾に準拠して実施した。

3. 試験結果

孔間試験である電磁波トモグラフィの測定結果からは、電磁波速度 V 、電磁波の振幅減衰 α 並びに導電率 σ (今回は簡便的に $\alpha = \sigma / v$ とした)を算出した。これらの電磁波トモグラフィから得られたNa1孔及びNa2孔付近の V 、 α 、 σ と共に、前項で示した孔内試験結果を整理したものが図-3～4である。また、透水試験結果についてはNa1孔で 1×10^{-6} (cm/sec)、Na2孔で 1×10^{-7} (cm/sec)であった。したがって、Na1孔はNa2孔よりも、亀裂頻度や変質度が小さく弾性波速度も大きい透水特性では劣ることがわかった。

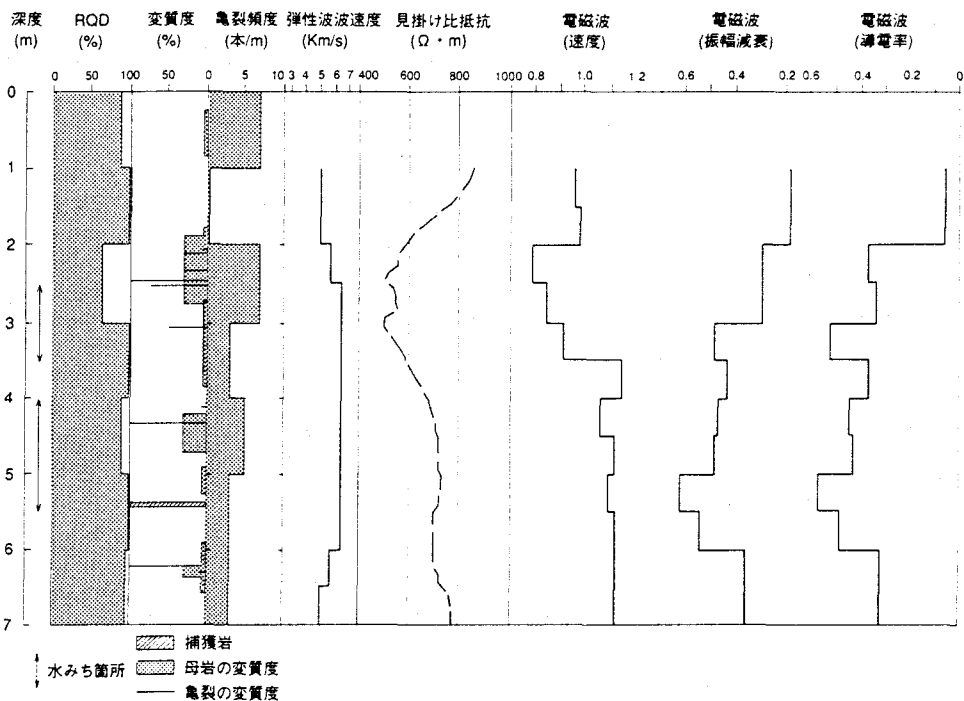


図-3 No. 1孔トモグラフィ測定・物理検層結果

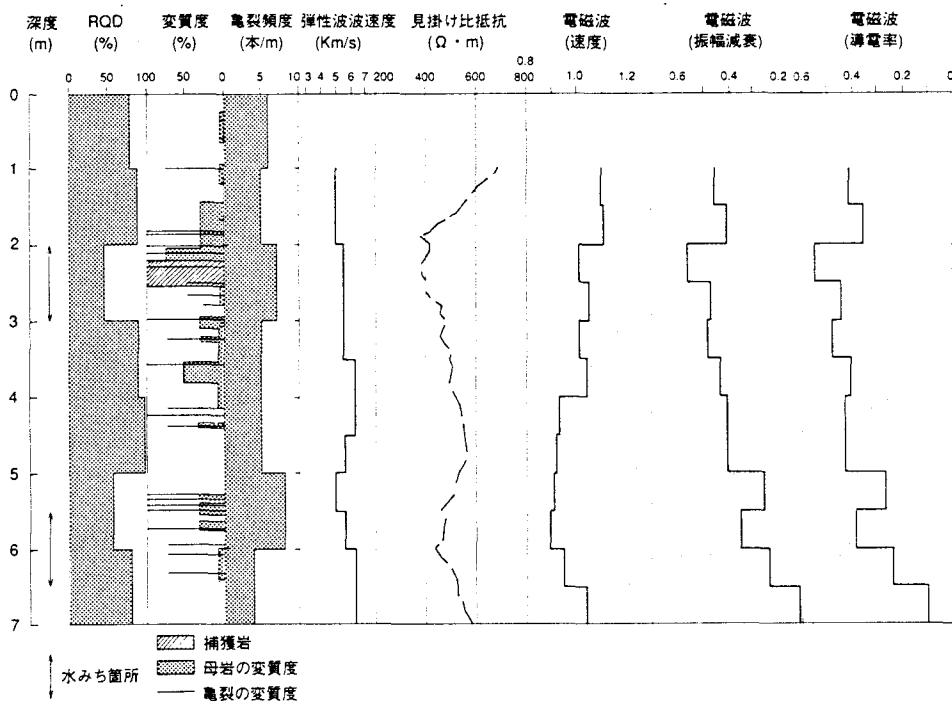


図-4 No. 2孔トモグラフィ測定・物理検層結果

4. 考 察

前項で示した図-3～4より、地質・水みちや電磁波トモグラフィ結果を主体に考察を加えると以下のとおりである。

- ・ 水みちと推定される部分は、相対的に変質度が大きい部分や補獲岩が存在する部分に該当するが、亀裂頻度が大きいとは限らない。
- ・ 亀裂頻度が大きい部分では弾性波速度、見掛け比抵抗及び電磁波速度が小さく、電磁波振幅減衰は大きくなる傾向が見られる。一方、変質度についても弾性波速度以外の測定結果との間に同様の傾向が見られる。
- ・ 電磁波速度 V は、見掛け比抵抗 ρ と比較的相関が良く、この傾向は、本サイトと同様の火成岩での実測例⁵⁾と整合している。さらに、 V と ρ が変質部で小さくなる傾向にあるが、変質度との間に定量的な関係は見られないようである。
- ・ 電磁波の振幅減衰 α 及び導電率 σ については、図-3～4に示されるように電磁波速度 V のばらつきが小さいため、 α と σ はほぼ同様の分布を示す結果となった。コア観察による変質度の大きい部分で α と σ は大きくなる傾向にあるが、変質度との定量的な関係は見られない。

以上より、本サイトにおいて水みちとの関連を示唆する現象としては、比抵抗 ρ （または電磁波速度 V ）の低下や電磁波振幅減衰 α 及び導電率 σ の増加が挙げられる。但し、Na 1 孔・Na 2 孔で水みちと推定された部分はいずれも変質した亀裂が存在するが、亀裂頻度が比較的大きく、変質した単一亀裂に対しても同様な評価ができるかどうかは不明であった。上記の解釈に基づいてNa 3 孔に相当する部分の水理地質構造を推定したものが図-5であり、具体的な内容は以下のとおりである。

- ① 水みちが存在する可能性は、深度2m～2.5m、3.5m～4m、4.5m～5mの3箇所であった。
 - ② Na 3 孔の電磁波速度 V は、Na 1 孔及びNa 2 孔とほぼ同じであり、振幅減衰 α や導電率 σ もNa 1 孔、Na 2 孔よりやや小さいので、Na 3 孔の力学的特性はNa 1・Na 2 孔とほぼ同程度と推定された。
- これに対し、実際にNa 3 孔を掘削した後に実施した孔内試験や水みち調査の結果は、以下のとおりである。

(表-1 参照)

- ① 水みちについては、深度1.5m付近と深度3.5m付近に小規模なものがあり、深度4m～5mに比較的大きいもの存在した。3ヶ所の内、深度1.5m付近と深度4.5～5mには単一の変質亀裂の存在が認められ、深度3.5m付近には母岩の変質部と数本の変質亀裂が散見された。したがって、前述の推定内容は実際の状況と整合的であったと考えられる。さらに、変質した単一亀裂の存在もある程度検出可能との見通しが得られた。
- ② Na 3 孔の亀裂頻度・変質度や弾性波速度はNa 1 孔・Na 2 孔と同程度であったが、透水係数は 9.0×10^{-8} (cm/sec)とNa 1 孔・Na 2 孔よりやや小さかった。透水係数の大小については、電磁波特性(V 、 α 、 σ)との間に相対関係があるとの見方もできるが、データ数が少ないため今後の検討課題と考える。

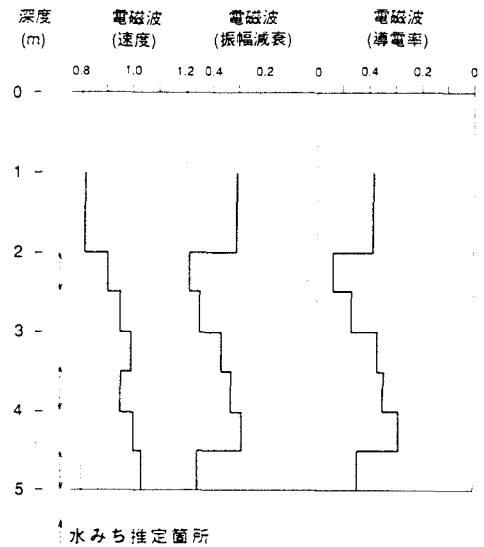


図-5 No. 3 孔付近のトモグラフィ測定結果

表-1 孔内試験結果の対比

	コ ア 観 察 [*]		弾 性 波 速 [*] (km/sec)	見 掛 け 比 抵 抗 [*] ($\Omega \cdot m$)	電 磁 波 ト モ グ ラ フ ィ [*]			透 水 係 数 (cm/sec)
	亀 裂 頻 度 (本/m)	変 質 度 (%)			速 度 V (m/n sec)	誘 電 率 α	導 電 率 α/V	
No.1孔	3.5	5.9	5.9	746	1.03×10^8	0.43	0.38	1.0×10^{-6}
No.2孔	5.7	15.8	5.7	500	1.00×10^8	0.37	0.43	1.0×10^{-7}
No.3孔	5.0	5.6	6.0	610	1.01×10^8	0.35	0.35	9.0×10^{-8}

*深度1m以深の平均値

5. おわりに

本論文では、火成岩サイトにおいて電磁波トモグラフィを主体とする孔間試験や比抵抗検層・弾性波検層等の孔内試験を実施し、岩盤内の水理地質構造に関する以下の知見を得ることができた。

- ① 本サイトでは、変質度が大きいような亀裂が水みちとなっている可能性が高いため、これらの検出手法について検討した。
- ② 変質した亀裂を検出する目安としては、比抵抗または電磁波速度の低下や電磁波振幅減衰・導電率の増大、の両項目を併用することが有効と考えられた。

今後は、岩種の異なるサイトでの実績を積み重ねると共に、水みちとなっている単一亀裂を検出するための電磁波反射法の高精度化⁶⁾や母岩並びに亀裂の変質程度をより定量的に把握するための岩石試料の電磁波特性評価⁷⁾も併せて進める予定である。

6. 参考文献

- 1) 日比谷啓介, 稲生道裕, 升元一彦: 電磁波トモグラフィによる岩盤内の含水状態評価について, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.256~260, 1993. 2.
- 2) 日比谷啓介, 稲葉武史, 稲生道裕, 戸井田克, 升元一彦: 比抵抗トモグラフィによる岩盤の水理地質構造評価について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.331~336, 1994. 1.
- 3) 戸井田克, 升元一彦: 電磁波を利用した岩盤構造探査について, 平成8年度応用地質研究発表会講演論文集, pp.25~28, 1996. 10.
- 4) 土質工学会(編): 岩の調査と試験, 1990. 9.
- 5) 佐々木靖人, 藤井厚企, 中村康夫: 電磁波トモグラフィによるダムの地質解析技術(その3), ダム技術No.90, pp.57~72, 1994. 3.
- 6) 升元一彦, 宮嶋保幸, 戸井田克: ポアホールレーダー反射法による岩盤内亀裂調査, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(投稿中), 1997. 1.
- 7) 戸井田克, 升元一彦, 宮嶋保幸, 日比谷啓介: 岩石試料の比誘電率・導電率と含水状態との関係について, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.706~707, 1996. 8.