

## (7) トモグラフィーとクロスホール透水試験による岩盤内地下水浸透経路の調査

大成建設 (株) 技術研究所	正会員	○下茂道人
同 上	正会員	井尻裕二
同 上	正会員	飯星茂
物理計測コンサルタント (株)	正会員	橋本憲和
同 上	正会員	長田和洋

### Detection of Groundwater Flow Paths in a Rock using Geotomography and Cross-hole Injection Test

Michito SHIMO, Yuji IJIRI, Shigeru IIHOSHI Taisei Corporation  
Norikazu HASHIMOTO, Kazuhiro NAGATA Butsuri Keisoku Consultants Co. Ltd.

#### ABSTRACT

It has been well recognized that fractures play an important role in the groundwater flow through fractured rock. The authors have conducted seismic and radar tomography surveys and cross-hole injection test to detect major discontinuities and flow paths at 50m x 30m rectangular test area in a granitic rock site. The reconstructed slowness and amplitude profiles, the latter was obtained only for radar tomography, compared well with the fracture distribution observed from Borehole TV and radar reflection survey. From cross-hole injection test, it has been shown that some of fracture zones detected by tomography and radar reflection survey are hydraulically connected, however, some other flow paths might have been missed where groundwater table is not kept high enough above the boreholes.

#### 1. はじめに

近年、大規模化、多様化する傾向にある岩盤内構造物の施工において、地下水挙動予測の重要性が増してきている。特に、不連続性を有する岩盤中の地下水挙動を明かにするためには、主たる浸透経路となる不連続面およびその水理学的な連続性を、なるべく広範囲にわたって特定できる原位置調査試験法の確立が望まれている。そこで、今回、著者等は、花崗岩サイト内の50m×30mの領域を調査の対象として、弾性波および電磁波を用いたトモグラフィー調査、さらにクロスホール透水試験を実施し、電磁波反射法、ボアホールTV、比抵抗検層、単孔透水試験等のデータと比較により、その地下水浸透経路調査への適用性について検討し、いくつかの知見を得たので報告する。

#### 2. 調査試験概要

##### 2.1 調査地点

調査試験は、愛媛県菊間町に建設中の菊間地下石油備蓄基地<sup>1)</sup>の水封トンネル内で実施した。図-1に示すように、トンネル側壁から、3本の調査用ボーリング(φ66mm、長さ50m、伏角10°)を15m間隔に削孔した。調査地点の岩盤は、新期領家花崗岩類に属する花崗閃緑岩からなる。岩石コアのRQDは約80%で、ボアホールTV観察によると、亀裂は、NW方向に走向を持つ比較的急傾斜のものが多く、幅1mm以上の開口性亀裂が、1mあたり約1本の割合で観察さ

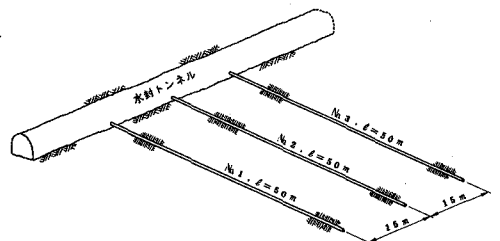


図-1 調査地点鳥瞰図

れた(図-2)。また、30~60cm程度の小規模な破砕部及び粘土の充填や酸化変色が見られる亀裂が一部存在する。

## 2. 2 調査試験方法<sup>2) 3)</sup>

ボアホールTV、比抵抗検層(電極間隔25cm及び100cm)を行った後、下記の調査試験を実施した。

### (1) 電磁波探査(反射法、トモグラフィー)

電磁波探査は、図-3に示すように反射法とトモグラフィーの2種類の方法で行った。反射法測定は、ボーリング孔近傍に存在する亀裂面の位置と方向を知ることを目的として、3本の各孔内で50cmピッチで実施した。トモグラフィー調査では、No.3孔内から2m間隔で電磁波パルス(中心周波数60MHz)を発信し、No.1孔内において2m間隔で透過波を受信した。最大受・発信点間距離は約53mで、測定した波線総数は517本である。調査には、ABEM社製のRAMACボアホールレーダーシステムを用い、無指向性および指向性アンテナ(反射法のみ)による受信を行った。測定した波形データは、CG法(直線波線を仮定)を用いて解析し、調査領域内部の速度および減衰率の分布を求めた。

### (2) 弾性波トモグラフィー

弾性波トモグラフィーの測定では、図-4に示すように、No.1とNo.3の孔内および坑道壁面に起振点を4m間隔に、また受振点を2m間隔に配置した。起振には、電気雷管を使用し、受振には、固有周波数28Hzの速度計を使用した。測定した波線総数は、1411本である。弾性波トモグラフィー解析には、初動走時データを用い、CG法(波線の屈折を考慮)による反復計算により、速度分布を求めた。

### (3) 単孔透水試験

No.1とNo.3孔で、深度1.5m~49mの間を、ダブルパッカーにより連続した19区間(1区間2.5m)に区切り、一定差圧(2.0kgf/cm<sup>2</sup>を標準とする)により単孔透水試験を行い、ボーリング孔に沿った透水係数の分布を調べた。

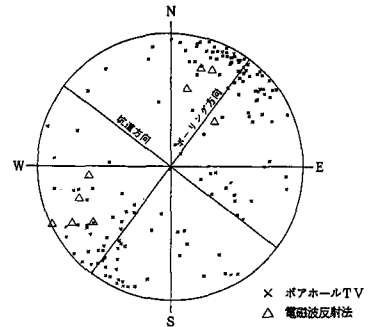


図-2 開口亀裂分布(ウレネット下半球)

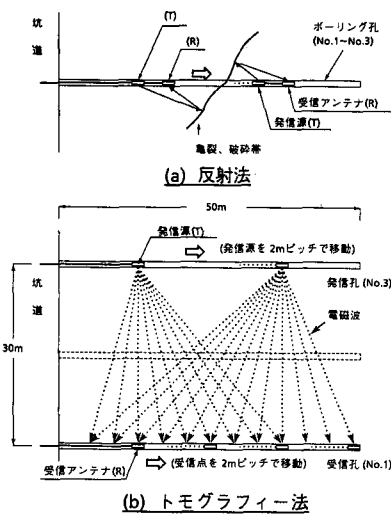


図-3 電磁波探査の概要

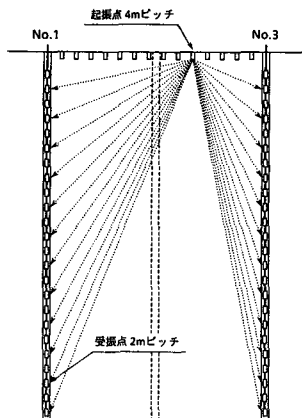


図-4 弾性波トモグラフィーの概要

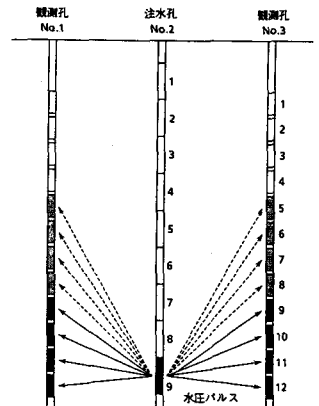


図-5 クロスホール透水試験

(4) クロスホール透水試験

クロスホール透水試験は、図-5に示すように、No.2孔の深度3m~48m区間をダブルパッカーにより9区間(1区間5m)に区切り、各区間から発生させた水压パルス(5kgf/cm<sup>2</sup>または10kgf/cm<sup>2</sup>、注水時間約30分)の伝播を、No.1とNo.3孔で観測した。両観測孔内には、5連パッカーを1式ずつ挿入し、1注水区間に対して各孔内で8区間(1区間3m)ずつ、計16区間において水压測定を行った。計測した測線総数は、160である。

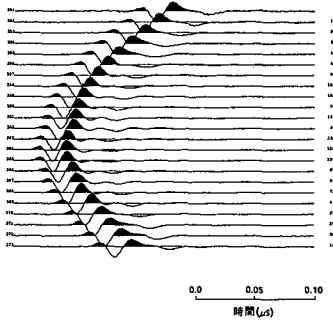


図-6 電磁波トモグラフィ-測定波形 (発信No.3, 28.8m; 受信No.1, 2.8~46.8m)

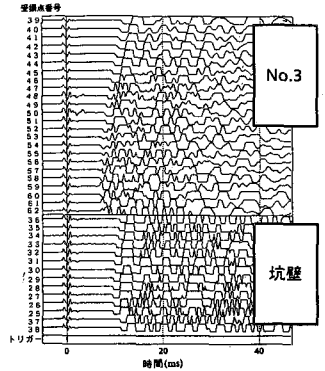


図-7 弾性波トモグラフィ-測定波形 (発振No.1, 42.0m; 受信No.3, 2.0~46.0m)

3. 調査試験結果および考察

(1) トモグラフィ-調査

図-6、図-7に、電磁波および弾性波トモグラフィ-調査で得られた波形記録の例を示す。電磁波トモグラフィ-調査においては、最大53mの受発信点間距離に対してもS/N比の高い良好な透過波形が得られた。全測定データのうち、初動が不明瞭なもの、弾性波測定では、さらに往復走時の差が大きいデータを除き、それぞれ490本、885本の波形データを用いて、トモグラフィ-解析を行った。

電磁波トモグラフィ-解析で得られた速度および減衰率の分布を、図-8、9に、弾性波トモグラフィ-で得られた速度分布を、図-11に示す。調査領域内の電磁波速度は111~117m/μs、減衰率は1.1~1.8dB/m、弾性波速度は、3.8~5.8km/sの間で分布している。

一方、図-10は、各ボーリング孔で行った反射法測定で明瞭な反射面として認識された9つの亀裂面を選び出し、3次元表示したものである。亀裂面の形状や広がり是不明であるので、図中では、各亀裂面を一辺が20mの正方形として描いてある。これらの亀裂面の走向傾斜は、図-2中にプロットしたように、ボアホールTVで得られた開口亀裂の分布と良く対応している。図-10には、比較のために、ボアホールTVによる亀裂頻度、開口亀裂の方向図、比抵抗値さらに単孔透水試験による透水係数の分布を示してある。また、電磁波反射法で見つかった亀裂面の平面位置を、速度分布図中に白線で示した。

3つのトモグラフィ-解析においては、No.1孔の30m付近からNo.3孔の15m付近および45m付近に向かう二つの低速度帯(又は、高減衰率帯)が現れている。反射法測定結果によると、これらの低速度帯に沿った、複数の亀裂面が確認されている。特に、これらの亀裂面が集中しているNo.1孔の深度30m前

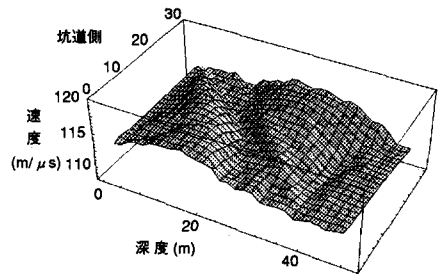


図-8 電磁波速度分布図

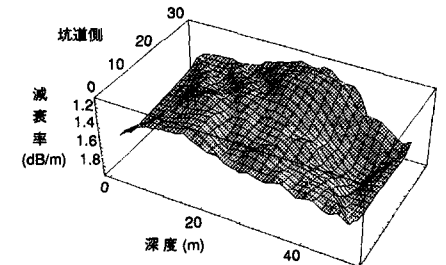


図-9 電磁波減衰率分布図

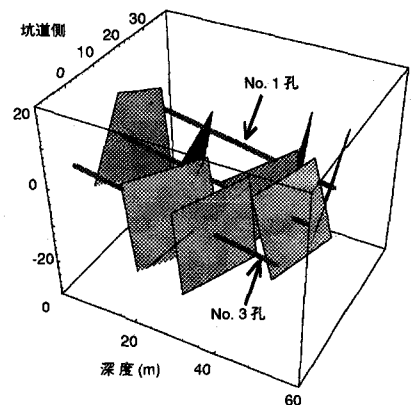


図-10 電磁波反射法で得られた亀裂面

後では、いずれのトモグラフィー解析結果にも、速度値が低い（又は、減衰率が高い）区間として現れている。また、図-10に示したように、両側のボーリング孔に沿った弾性波の速度値は、亀裂頻度および比抵抗値の分布と良い対応が見られる。これらの結果より、電磁波トモグラフィーおよび弾性波トモグラフィーとともに、花崗岩中の亀裂分布調査への適用性が高いことが示された。

(2) 単孔透水試験

図-10中に示したように、ボーリング孔に沿った透水係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ の範囲に分布しており、No.1、No.3の両孔で実施した38区間の透水係数の対数平均は、 $7.7 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ である。全体的に見ると、透水係数の値と亀裂頻度および比抵抗値との間には、相関関係が認められる。但し、No.3の深度26.5m~29mの区間のように、亀裂頻度が小さく、比抵抗値が高いにも拘らず、 $10^{-4} \text{cm/s}$ オーダー近い相対的に高い透水係数を示す箇所も存在する。この区間では、ボアホールTVで開口亀裂が一本観察されており、これが高透水性を有しているものと考えられる。但し、この亀裂は、電磁波反射法では検知されていない。単孔透水試験の結果

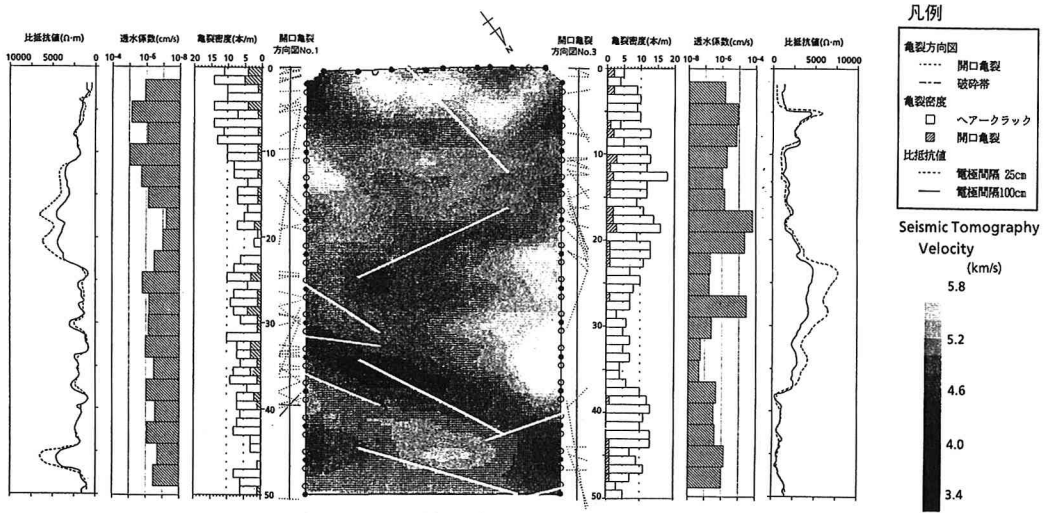


図-1 1 弾性波速度分布図

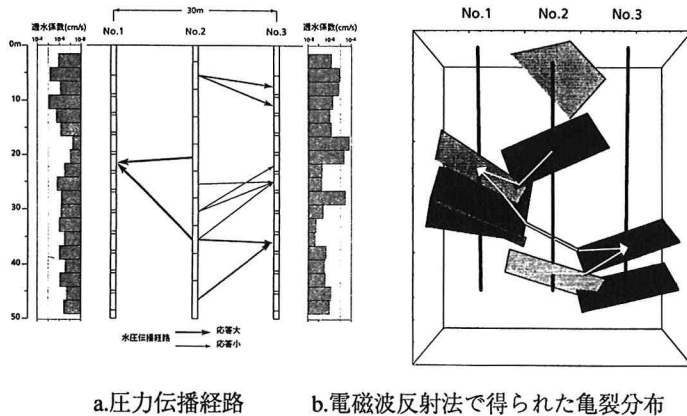


図-1 2 クロスホール透水試験結果と亀裂分布との比較

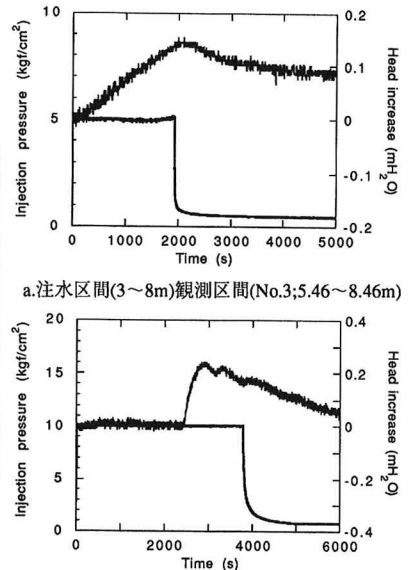


図-1 3 注水圧力と応答圧力の経時変化  
a.注水区間(3~8m)観測区間(No.3;5.46~8.46m)  
b.注水区間(43~50m)観測区間(No.3;34.5~37.5m)

果は、ボーリング孔に交差する開口性亀裂の存在をより反映した結果となっている。

### (3) クロスホール透水試験

図-1 2 aに、クロスホール透水試験で水圧パルスに対する応答が見られた測線と、No.1とNo.3孔に沿った透水係数分布を示す。今回測定した測線のうち、測定時間中に有意な圧力応答が見られたのは、全測定区間の約6%にあたる10測線のみであった。図-1 2 bには、電磁波反射法で得られた亀裂面の分布を示す。図中の白線で示したように、今回確認された圧力伝播経路のいくつかは、電磁波反射法で得られた亀裂面に沿っている事が分かる。また、トモグラフィー調査や電磁波反射法で良好な岩盤とみなされた区間にも、伝播経路が存在する。これは、速度(減衰率)変化や反射面として捕らえられなかった亀裂が、圧力伝播経路となっていることを示唆している。

一方、(1)電磁波反射法で得られた亀裂面のうち、圧力伝播経路となっていないものがあること、(2)単孔透水試験で、比較的大きな透水係数を示した区間と圧力伝播経路とが対応していないこと等、検討を要する点も指摘される。(1)については、単孔透水試験結果から、電磁波反射法で得られた亀裂面の透水係数は、必ずしも高くはないことが示された。この理由としては、亀裂面が、圧力の伝播を妨げるような充填物を介在していることが考えられる(コア観察によると、粘土を介在する亀裂や破碎部が確認された)。すなわち、電磁波反射法や、トモグラフィーで検知された亀裂面は、必ずしも水理学的な連続性を有しているものではないと言える。(2)の理由としては、今回の試験結果には、地下水位が影響している可能性があると考えている。観測区間の圧力測定では、自然地下水位に対応する $1.5\text{kg/cm}^2$ 程度の初期間隙水圧値を示す一部の区間を除き、 $0.5\text{kg/cm}^2$ 以下の値を示す区間が多く見られた。調査孔近傍近くに水位がある場合には、被圧条件下での試験に比べると、伝達速度が遅く応答値も小さくなると考えられる。図-1 3 bに示すような40分近い応答の時間遅れは、上記の理由によるものと理解される。このような状況を考慮すると、調査領域内には、今回の試験で確認された10測線以外にも浸透経路が存在する可能性がある。

## 4. まとめ

今回、花崗岩サイトで実施した一連の調査試験結果から、電磁波反射法は、ボーリング孔近傍の比較的連続性の高い破碎部や亀裂集中部の位置および走向傾斜を知る上で有効であることがわかった。また、電磁波および弾性破トモグラフィーが、 $50\text{m}\times 30\text{m}$ という比較的広い範囲内の岩盤内の亀裂分布の調査に適用できる事が示された。これらの調査結果は、クロスホール透水試験結果から、岩盤中の地下水浸透経路を特定する上で重要である。一方、今回実施したクロスホール試験では、試験孔近傍の地下水位の影響により、すべての浸透経路を検知できなかった可能性がある。この点については、今後、同様な試験を実施する際の教訓としたい。

## 5. 謝辞

最後に、原位置調査の実施にあたり、現場を提供頂いた日本石油地下備蓄株式会社殿に対して、深甚の謝意を表します。また、御協力を頂きました菊間地下石油備蓄JV殿、応用地質(株)殿、(株)トータルシステム研究所の久保紳殿に謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 山本和彦、大津宏康：菊間地下石油備蓄基地の建設工事概要、(社)地下水技術協会、平成2年度秋季講演会、pp.79-101、1990
- 2) 下茂道人、井尻裕二、飯星茂、橋本憲和、長田和洋：弾性波および電磁波トモグラフィーによる花崗岩中の亀裂探査、物理探査学会第85回学術講演会講演論文集、pp.203-208、1991
- 3) 牧野憲一郎、橋本憲和：ボアホールレーダーによる地質診断、可視化情報、Vol.11、No.40、pp.2-9、1991