

弾性波および電磁波トモグラフィーによるトンネル周辺の亀裂分布調査

Fracture Detection around Tunnel using Seismic and Radar Tomography

下茂道人*、井尻裕二*、飯星茂*、橋本憲和**、長田和洋**

Michito SHIMO, Yuji IJIRI, Shigeru IIHOSHI, Norikazu HASHIMOTO, Kazuhiro NAGATA

Information on fracture distribution in a rock mass is important for stability analysis as well as for prediction of groundwater inflow during tunnel excavation. To investigate the applicability of tomography technique for the use of fracture detection, a series of in-situ tests were conducted in a granitic rock. The velocity profiles obtained from cross-hole radar and seismic tomography reveals anomalies along fractured zones in the measurement area. From cross-hole injection test, it was shown that these fracture zones can be major water flow paths.

Keywords: in-situ test, fracture detection, seismic and radar tomography, cross-hole injection test, groundwater flow path

1. はじめに

トンネルや地下空洞の施工時における岩盤の挙動や地下水挙動の予測を行う上で、岩盤中に存在する亀裂や破碎帯の分布を把握することが重要であることは広く認識されているところである。最近、新しい地盤構造調査法として、弾性波や電気（比抵抗）または電磁波を用いたトモグラフィーが注目され、土木の分野でもいくつかの実施事例が報告されている。しかし、亀裂や破碎帯の把握を目的としたトモグラフィー調査の事例は、いまだ限られており、現場適用に向けたデータの蓄積が望まれる。

そこで、今回、花崗岩中において、50m×30mの領域を調査対象領域とした弾性波および電磁波トモグラフィーを実施し、ボアホールTV、比抵抗検層、電磁波反射法等のデータとの比較により、トモグラフィーの亀裂分布調査への適用性について検討した。また、単孔透水試験およびクロスホール透水試験結果と上記調査結果をもとに、岩盤中の地下水浸透経路の特定を試みた。

2. 調査地点概要

調査は、日本地下備蓄株式会社が、愛媛県菊間町に建設中の菊間地下石油備蓄基地¹⁾内の水封トンネルで実施した。図-1に示すように、一連の調査試験は、トンネル壁面から削孔された3本のボーリング孔（No. 1、No. 2、No. 3）を用いた。各ボーリングは、口径66mm、長さ50m、伏角10度で、それぞれ15m間隔に平行に削孔されている。

* 正会員 大成建設（株）技術研究所

** 正会員 （株）物理計測コンサルタント

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観察結果によると、幅1mm以上の開口性亀裂が、1mあたり約1本の割合で存在する。図-2に示すように、開口性亀裂は、NW方向に走向を持つ比較的急傾斜のことが多い。

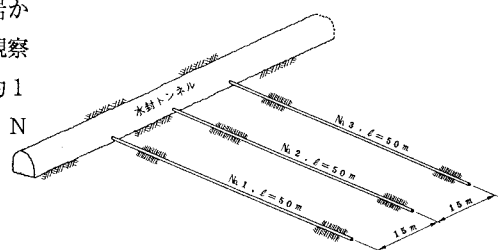


図-1 調査地点鳥瞰図

3. 調査試験の概要

3.1 調査試験のフロー

図-3に示す調査試験フローにしたがって、ボアホールTV観察、比抵抗検層（2極法：電極間隔25cm、100cm）、電磁波探査（反射法およびトモグラフィー）、弾性波トモグラフィー、単孔透水試験およびクロスホール透水試験を実施した。

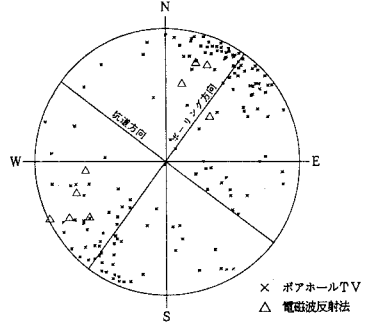


図-2 開口亀裂分布（ウルフネット下半球）

3.2 調査試験方法および解析方法

電磁波探査、弾性波トモグラフィー、単孔透水試験およびクロスホール透水試験の試験方法および解析方法について以下に述べる。なお、電磁波探査と弾性波トモグラフィーの詳細については、参考文献2）を参照されたい。

（1）電磁波探査（反射法、トモグラフィー）^{3）}

電磁波探査には、ABEM社製のRAMACボアホールレーダーシステムを用い、反射法とトモグラフィー法の2種類の測定を実施した（図-4）。発信には、すべて中心周波数60MHzの電磁波パルスを用い、受信には、無指向性および指向性アンテナ（反射法のみ）を用いた。

反射法測定では、3本の各ボーリング孔内で発信器と受信アンテナを50cmピッチで移動させながら、岩盤中の亀裂面からの反射波を捕らえた。

トモグラフィー測定では、No. 3孔内において発信器を2mピッチで移動させながら電磁波パルスを発信させ、各発信点からの透過波を、No. 1孔内で2m間隔で受信した。最大受・発信点間距離は約5.3mで、測定した波線総数は517本である。速度トモグラフィー解析では、直線波線を仮定し、CG法（共役傾斜法）を用いた。

（2）弾性波トモグラフィー

弾性波トモグラフィー測定は、No. 1孔、No. 3孔の孔内および坑道壁面に起振点を4m間隔に、受振点を2m間隔に配置して実施した（図-5）。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。データ収

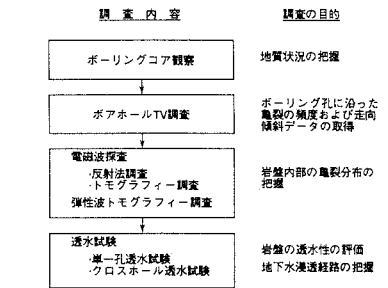


図-3 調査試験のフロー

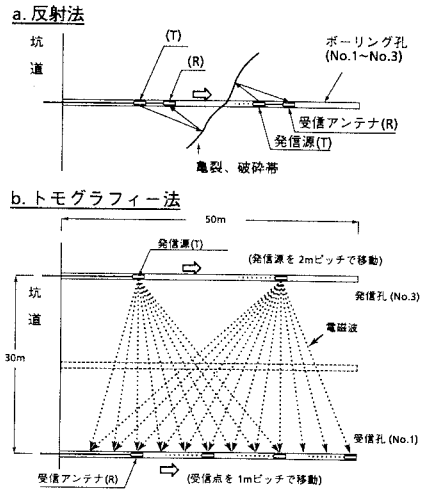


図-4 電磁波探査の概要

録には、応用地質（株）製のMcSEIS-1600を用いた。測定した波線総数は、1411本である。速度トモグラフィー解析では、波線の屈折を考慮し、CG法による反復計算を行った。

（3）単孔透水試験

単孔透水試験は、No. 1とNo. 3の2孔において実施した。各ボーリング孔に沿った深度1.5m～4.9mの間を、ダブルパッカーにより2.5m毎の連続した19区間に区切り、計38区間で注水試験を実施した。

各試験区間にパッカーを設置後、間隙水圧がほぼ安定するまで放置した後、一定差圧（2.0kgf/cm²）による注水を約1時間行い、注水量の経時変化を測定した。注水停止後は、約1時間放置し、注水区間の圧力測定を継続した。なお、今回は、注水停止直前の状態を疑似定常状態と仮定して算定した各試験区間の透水係数のみを示す。

（4）クロスホール透水試験

クロスホール透水試験は、図-6に示すように、No. 2孔の深度3m～4.8mの間をダブルパッカーにより9つの区間（各5m）に区切り、それぞれの注水区間から発生させた水圧パルスの伝播を、両脇の観測孔内（No. 1、No. 3）で測定した。両観測孔内には、1度に4区間（1区間3m）の圧力測定が可能な5連パッカーを1式ずつ挿入し、1回の注水に対して各孔内で8区間ずつ、計16区間において水圧測定を行った。計測した測線総数は、160である。試験条件は、注水圧力を約10kgf/cm²、注水時間を約30分とした他は、単孔透水試験の手順とほぼ同様である。

4. 調査試験結果および考察

（1）電磁波反射法

図-7の例に示すように、指向性アンテナによる反射法測定では、約15m程度の深度まで（無指向性アンテナで約25m程度²⁾）の反射波を捕らえることができた。図-8は、3本のボーリング孔で得られた反射波データから9つの亀裂面を選び出し、それらを3次元表示したものである。各々の位置および走向傾斜から判断して、これら9枚の亀裂面はそれぞれ別々の亀裂面であると考えられたが、No. 1の深度26mから36mの位置に存在する3枚の亀裂面は、No. 2およびNo. 3の孔奥に存在する亀裂面と連なり、調査領域を横断するような地下水浸透経路を形成している可能性がある。これは、後述のトモグラフィーおよびクロスホール透水試験結果を評価する上で重要な知見である。なお、上記の

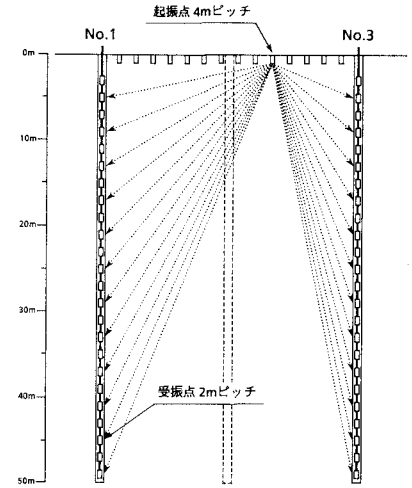


図-5 弾性波トモグラフィーの概要

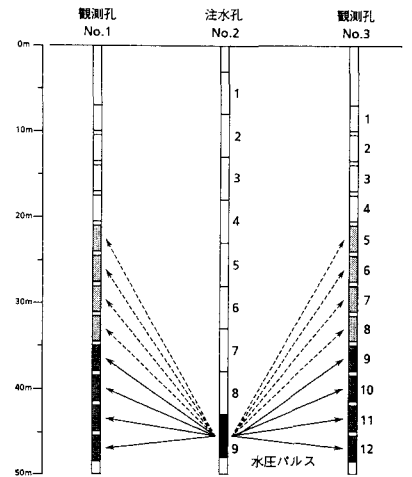


図-6 クロスホール透水試験の概要

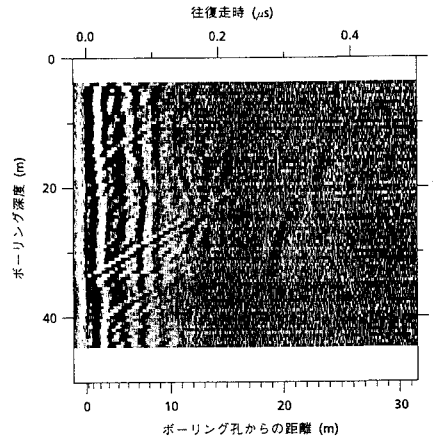
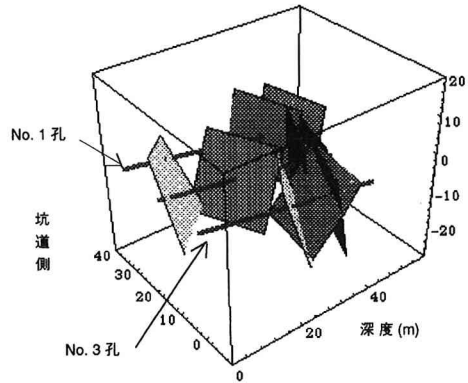


図-7 電磁波反射法の結果（No. 2孔）

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。

（２）電磁波トモグラフィー

図－９に、電磁波の速度トモグラフィー解析結果を示す。調査領域内の電磁波速度は、 $111 \sim 117 \text{ m}/\mu\text{s}$ の比較的均一な値を示しているが、波線密度の小さい坑道壁面および孔奥部を除いて、電磁波反射法で見つかった亀裂面の平面位置（図中に白線で示してある）に沿って、低速度部が分布している。また、図の両脇には、ボーリング孔内で測定した亀裂頻度、比抵抗値、さらに単孔透水試験で求めた透水係数の分布を示してある。トモグラフィー解析結果は、亀裂頻度が小さく比抵抗値が大きい所ほど、速度が高く（図の白っぽい部分）なっている。すなわち、電磁波トモグラフィーの結果は、調査領域内の亀裂分布をほぼ表現できていると考えられる。なお、透水係数は、後述するように亀裂分布との相関が見られる。



図－８ 電磁波反射法で求められた亀裂分布

（３）弾性波トモグラフィー

図－１０に弾性波トモグラフィーの解析結果を示す。調査領域内の弾性波速度は、 $3.8 \sim 5.8 \text{ km}/\text{s}$ の速度値を示しているが、電磁波トモグラフィー結果と同様に、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が現れている。この低速度帯は、電磁波反射法で見つかった亀裂面にほぼ沿っている。また、両側のボーリング孔に沿った速度値は、亀裂頻度および比抵抗値の分布と良い対応が見られる。例えば、 $3000 \sim 7000 \Omega \cdot \text{m}$ の高比抵抗値を示すNo. １孔の11m～23m区間およびNo. ３の23m～38mの亀裂が比較的少ない部分では、トモグラフィー結果では $5 \text{ km}/\text{s}$ を越える高速度帯となっている。一方、 $2000 \Omega \cdot \text{m}$ 以下の比抵抗値を示すNo. １孔の23m～40m区間およびNo. ３孔の38m以深の亀裂が多い区間では、大部分が $4.5 \text{ km}/\text{s}$ 以下の低速度部となっている。従来、弾性波トモグラフィーは、亀裂探索には不向きであると考えられていたが、今回の調査ではその有用性が示された。

（４）単孔透水試験

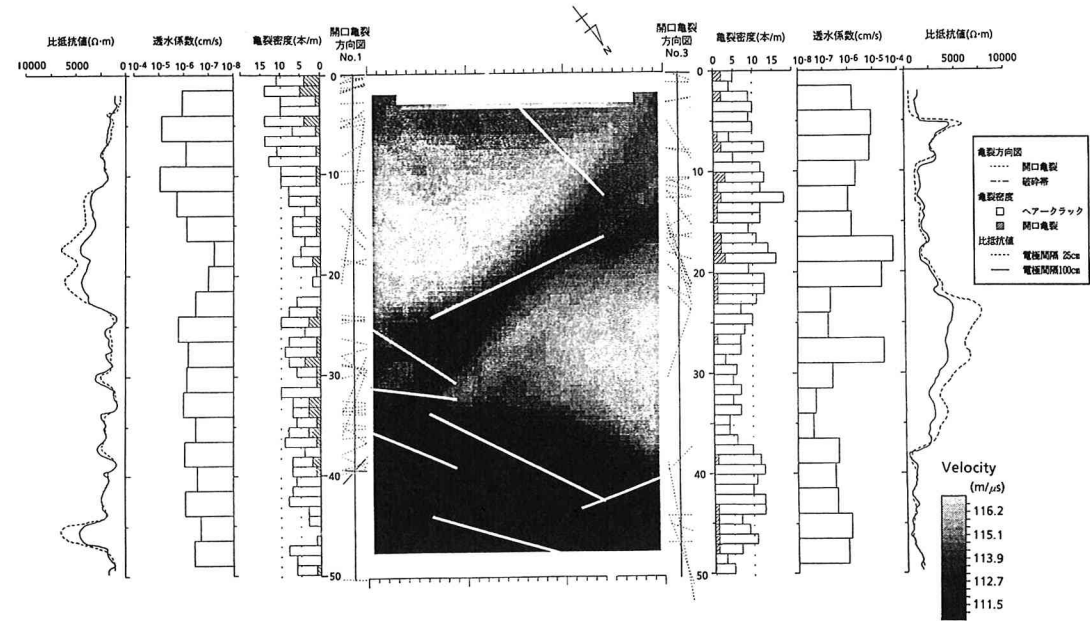
図－９、１０中に示したように、No. １およびNo. ３孔に沿った透水係数は、大部分が $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ cm}/\text{s}$ の範囲に分布しており、全体的な傾向としては、亀裂頻度が小さく、比抵抗値が高い部分で透水係数が低い。但し、No. ３の深度23m～38mの間では、亀裂頻度が小さく、比抵抗値が高いが、一部 $10^{-4} \text{ cm}/\text{s}$ オーダーの透水係数を示す区間が存在する。これは、試験区間内に１本だけ存在する開口性亀裂に起因していると考えられる。亀裂性岩盤の透水性には、亀裂の数だけでなく、開口幅や連続性等の要因も影響ため、亀裂頻度や比抵抗値は、全体的な透水性の分布傾向を推定する上での一指標として位置付けるべきであろう。

（３）クロスホール透水試験

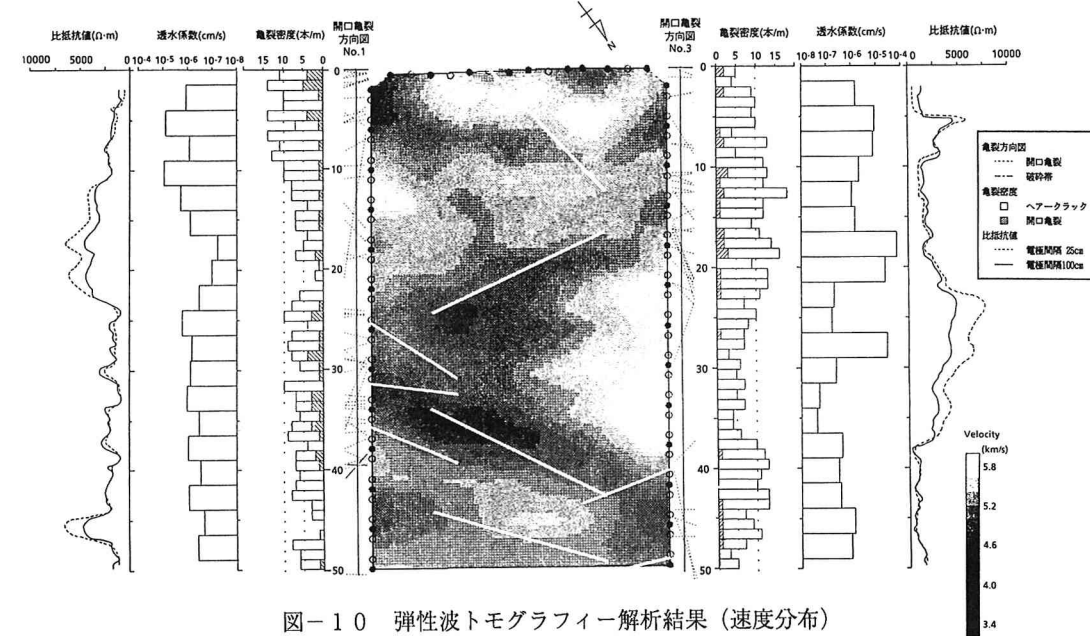
図－１１は、クロスホール透水試験を行った区間のうち、水圧パルスに対する応答が見られた測線を示す。図に示したように、応答があったのは、全測定区間の約６％にあたる１０測線のみであった。圧力の伝播速度や応答圧の大きさは、岩盤の透水係数や、注水区間から間隙水圧測定区間までの距離等に依存するが、少なくとも上記の１０測線に沿って、相対的に透水性の高い経路が存在すると考えられる。図の右側には、電磁波反射法で得られた亀裂面の分布を示してある。同図中に白線で示したように、比較的大きな応答（ $0.01 \text{ kg f}/\text{cm}^2$ 以上）を示した圧力伝播経路の多くは、これらの亀裂面に沿っていることがわかる。すなわち、中央のボーリング

孔No. 2で発生させた水圧パルスは、複数の亀裂面に沿って両側のボーリング孔に伝わっているものと推定される。また、No. 2孔の3～8mの注水区間からNo. 3の6～12mの区間に向かう伝播経路については、No. 2孔の孔口付近で電磁波反射法により確認された亀裂面が、No. 3孔でボアホールTVにより観測された複数の開口亀裂とつながっているものと推測される。一方、No. 2孔の23m～38m区間からNo. 3の20m～27mmに向かう、比較的小さい応答を示した経路は、電磁波速度や弾性波速度値の高い部分を通過していることから、良好な岩体中に存在する少数の開口性亀裂中を通過、圧力が伝播しているものと考えられる。

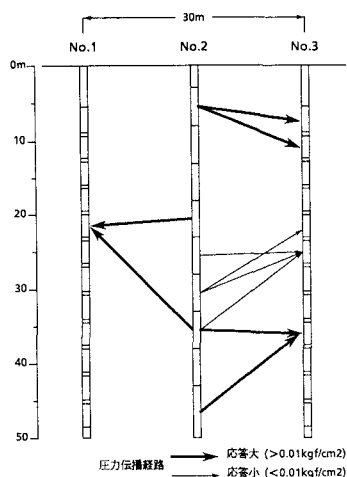
以上のように、クロスホール透水試験結果の解釈を行う上で、ボアホールTVやトモグラフィー結果、さらに電磁波の反射法で得られる3次元的な亀裂分布に関する情報が有用である。



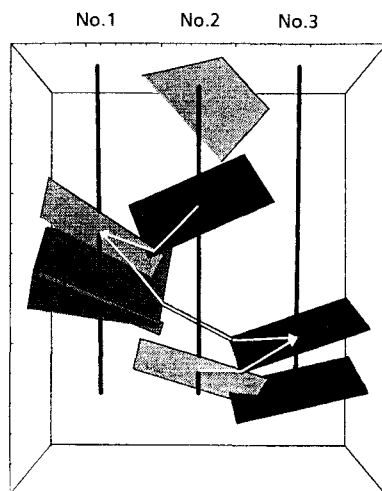
図－9 電磁波トモグラフィー解析結果（速度分布）



図－10 弾性波トモグラフィー解析結果（速度分布）



a. 圧力伝播経路



b. 電磁波反射法で求められた亀裂分布

図-11 クロスホール透水試験結果と亀裂分布との比較

5. まとめ

花崗岩中の50m×30mの領域を対象として電磁波探査（反射法、トモグラフィー）および弾性波トモグラフィー調査を実施し、ボアホールTV、比抵抗検層ならびに透水試験（単孔、クロスホール）の結果と比較することにより、岩盤内の亀裂分布と地下水浸透経路の把握を試みた。

電磁波および弾性波トモグラフィーで求められた速度分布は、調査領域内の亀裂分布と良い対応が見られ、トモグラフィーが、岩盤内の亀裂調査に有用であることが示された。また、クロスホール透水試験結果とトモグラフィーあるいは電磁波反射法の結果を比較検討することにより、地下水浸透経路となる亀裂の特定が可能であることも示された。

今回行ったような一連の試験を実際の現場で行うことは現実的ではないが、各現場の岩盤状況や対象とする領域の広さ等を考慮した、適切な試験法を選択することにより、施工上問題となるような亀裂位置や地下水浸透経路の把握、ひいては効率的なグラウト計画の立案等が可能になると考えられる。

なお、今回のトモグラフィー解析では、岩盤の異方性を考慮していないが、これについては解析精度の向上にむけた、今後の研究課題の一つとしたい。

6. 謝辞

原位置調査の実施にあたり、現場を提供頂いた日本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。

7. 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