

(60)比抵抗および弾性波トモグラフィーを用いた 岩盤内不連続面の評価

Evaluation of discontinuities in rock mass by using both electric resistivity and seismic geotomographic techniques.

谷本 親伯¹⁾・岸田 潔¹⁾・旗持 和洋²⁾・國井 仁彦³⁾・大友 譲¹⁾

Chikaosa TANIMOTO and Kiyoshi KISHIDA (Kyoto University), Kazuhiro HATAMOCHI
(Kansai Electric Power Co.), Kimihiko KUNII and Yuzuru OHTOMO (NEWJEC)

Abstract

Both seismic and electric resistivity tomographic techniques were applied to the same rock mass consisting of slate, grano-porphry and rhyolite. Fundamentally seismic tomography represents the state of rock substance which allows elastic wave to propagate through, and electric resistivity tomography is highly influenced by the existence of water, which saturates voids and fissures in rock mass, namely discontinuities themselves.

In this paper, it is concluded that the application of these two different tomographic sensings to the same objective rock mass is meaningful and provides more reliable information than the single use of respective tomographic technique.

1. 緒 言

不連続性岩盤を対象とする構造物を施工するうえで、不連続面の分布性状や力学特性を把握することは重要な課題である。著者らは、この課題に対して以前から各種の原位置調査および原位置試験を行ってきた^{1)~4)}。

不連続面の分布性状については、従来のボーリングコア観察や地表踏査に加え、ボアホールスキヤナによるボーリングおよびジョイントマッピングによる調査横坑の孔壁観察を行った。これにより詳細な不連続面の分布特性の把握が行えるが、ボーリング孔周辺や調査領域周辺に限定された情報による。

一方、弾性波ジオトモグラフィー手法は透過する弾性波の伝播速度および減衰定数により、未知の岩盤内の可視化を行うもので、室内での弾性波伝播試験の結果をもとに、不連続面の評価に関する解析結果の解釈を行ってきた^{1), 2)}。

比抵抗トモグラフィー手法を用いた比抵抗分布は、岩盤内のき裂の容量、その中に含まれる水(裂か水)の分布等の影響を受けると考えられ⁵⁾、岩盤中の水分の分布に関する評価には適しているものとする。不連続性岩盤において、水分のほとんどがき裂を透過することを考えれば、比抵抗トモグラフィーは不連続面の分布を評価するのに適しているものとする。しかし、弾性波と異なり比抵抗の分布と力学的特性との結び付きは今だ不明確である。

本研究では、比抵抗および弾性波トモグラフィーの結果を比較検討し、それぞれの特性を利用して不連続面の性状、分布特性を総合的かつ詳細に把握することを目的とする。

2. 調査地点概要

2.1 地 質

¹⁾ 正会員 京都大学工学部

²⁾ 正会員 関西電力株式会社

³⁾ 正会員 (株)ニュージェック

図-1に調査地点の地質概要、電気探査および弾性波探査実施領域を示す。調査地点の地質は、主として節理の卓越した流紋岩、花崗斑岩および中生層の粘板岩から構成されている。

横坑内坑壁での地質調査およびボーリングコア観察の結果から、図に示すA断面付近では、A孔付近に節理の発達した花崗斑岩が分布し、下流側に粘板岩、粘板岩の下方に流紋岩が分布している。B断面では、A孔付近に節理の発達した花崗斑岩、D孔に近づくにしたがって流紋岩が主流で一部に粘板岩がブロック状に取り込まれている。

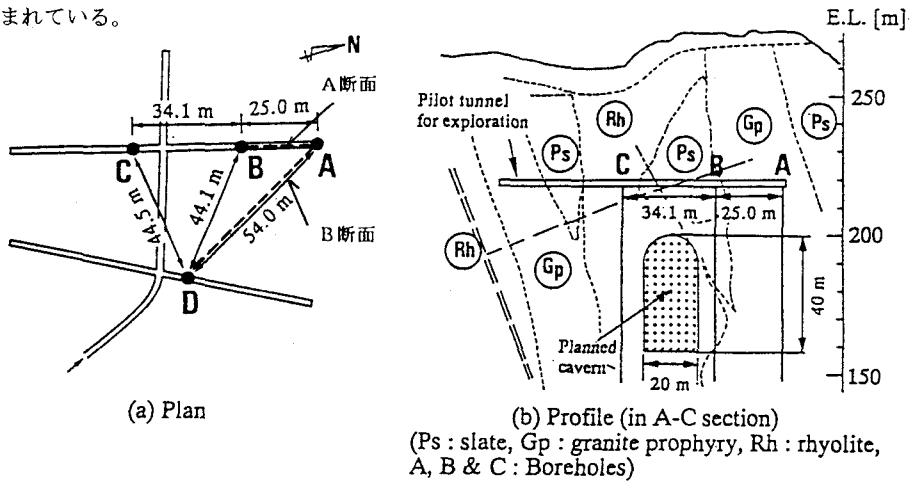


図-1 ボーリング孔配置および地質断面

2.2 不連続面の分布

流紋岩および、花崗斑岩はCH～Bクラスの堅硬な岩盤で、節理の卓越方向は直交する3方向、すなわち横坑方向、横坑と直交する高角方向および低角方向である。節理面は、いずれの方向もアンジュレーションが少なく平面的で風化した充填物が多く見られる。過去にせん断等の作用を受けたものと考えられる。

図-2に、A断面で比抵抗トモグラフィーを行う領域のき裂頻度分布図を示す。これは、坑壁におけるジョイントマッピングおよびボアホールスキャナシステム(以下BSSと略す。)によるボーリング孔壁観察から得られた不連続面情報をもとに作成したものである¹⁾。この図から、花崗斑岩内では不連続面の分布密度が横坑のA孔側の低角断層の下盤で高いこと、水平方向の不連続面が卓越していること、および粘板岩内では不連続面の分布密度が低いこと等の傾向が認められる。粘板岩の分布密度が低いのは、図-2が連続性を想定したモデルで作成されているのに対し、実際の粘板岩は、熱水変成などの影響からブロック状にき裂が存在し、そのことを十分に評価できていないためであるとする。

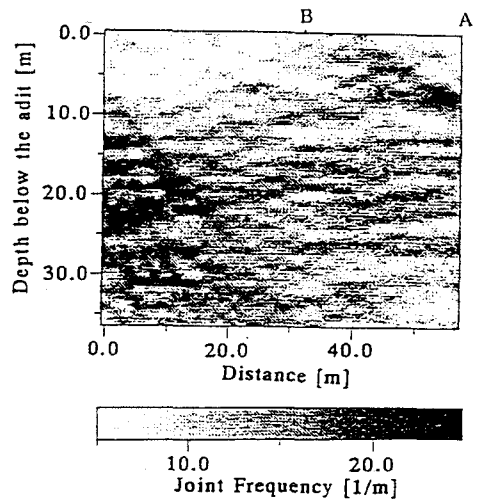


図-2 き裂頻度分布図 (A断面)

3. 現地計測

3.1 計測概要

岩盤の比抵抗特性を調べるために、まず図-1のA断面およびB断面に示す領域において比抵抗トモグラフィーの計測を行った。次に、計測結果の評価を行うために、岩盤からの湧水、岩盤の実質部およびき裂部の

比抵抗の計測を行った。以下に、計測の概要について述べる。

比抵抗トモグラフィーの計測は、A断面については坑道内にA孔口からB孔口間の25mおよびA孔内孔口から36mまでB孔内地下水面と孔口からの深度62mまでの範囲に電極を設置して計測を実施した。また、B断面については、B孔内では地下水面と孔口からの深度62mの間、D孔内では地下水面と孔口からの深度66mまでの間に電極を設置して計測を実施した。

計測は、いずれの断面も1mごとに電極を設置し、2本の遠電極を500m以上離して設置して、2極法で行った。計測機器は、McOHM-21(OYO製)を用いた。

裂か水の比抵抗測定は、半割りの比抵抗測定器($\phi=10\text{cm}$ 、長さ $=15\text{cm}$)に岩盤内の湧水を滴し、平行電界のもとで電位差を測定して比抵抗を求めた。また、岩盤の実質部の比抵抗測定は、4極法(電極間隔5cm)で横坑の壁面に直接電極を押し当て計測を行った。

弾性波探査の計測は、A、B、CおよびD孔を用いて実施した。図-1にボーリング孔の配置および地質断面の概略を示す。発信・受信点は1m間隔に設置した。

3.2 比抵抗トモグラフィー結果

2極法を用いた比抵抗トモグラフィーの解析は、既往の手法⁷⁾で行った。

まず、横坑坑壁における不連続面調査、ボーリング調査およびBSSで不連続面調査を実施し、不連続面の分布および地質状況がわかっているA断面について検討を行った。

図-3にA断面の比抵抗分布を示す。図-3から以下のことが確認できる。

① A断面の地質と比抵抗分布を比較する

と、B孔付近に花崗斑岩と粘板岩の地質境界が存在するが、境界付近で比抵抗の変化が見られ、インパート付近ではき裂分布が顕著でないにもかかわらず、比抵抗値は $200\Omega\text{m}$ 以下と低い。これは、き裂の分布ではなく粘板岩という岩石自体の比抵抗が低いためと考えられる。また、低角断層に着目すると、断層境界付近で $200\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗を示し、これはき裂中の裂か水と同様の値であり、5mm以上のき裂が多く分布することからも、裂か水の影響と考えられる。

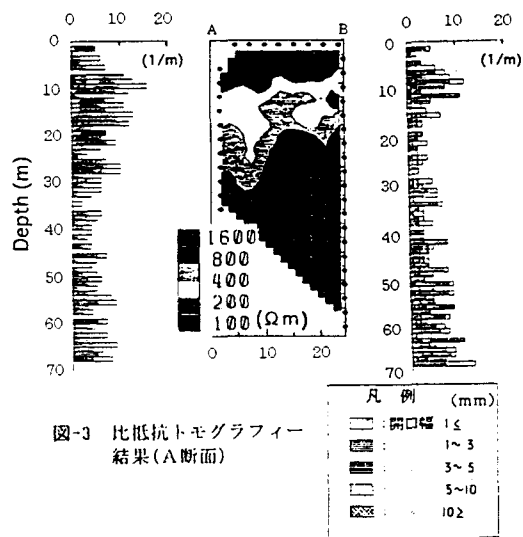
② ボーリング孔内のBSS観察結果からき裂幅別頻度分布を作成した。孔内のき裂分布と孔付近の比抵抗分布の関係をみると、

B孔付近では深度20m以深ではき裂頻度は浅部と大差ないにもかかわらず、5mm以上の開口き裂がほとんど見られず、比抵抗値は $1600\Omega\text{m}$ 以上を示した。一方、深度10m~20mでは5mm以上のき裂が存在し、 $400\Omega\text{m}$ 以下の値を示した。

A断面において比抵抗分布と地質境界、断層位置およびき裂頻度分布との対応が把握できたことから、次に、ボーリング調査およびBSSによる孔内不連続面調査のみを実施しているB断面について、比抵抗分布からの地質状況およびき裂頻度分布の推定を行った。

図-4にB断面の比抵抗分布を示す。図-4から以下のことが確認できる。

① 地質に着目すると、A孔の深度10m付近から右上に分布する低比抵抗部分はA断面と同様に低角断層の影響と考える。また、A孔からD孔に向かって約40mの位置から左下に向かう $800\Omega\text{m}$ 以下の部分は、他



断面で観測されている高角断層の影響と考える。

- ② 岩質の分布は、A孔とD孔のコア観察から、A孔側が花崗斑岩、D孔側が流紋岩であり、両者の比抵抗に明瞭な差異が確認でき、 $400\ \Omega\text{m} \sim 800\ \Omega\text{m}$ の間を境界として、比抵抗の低い側が花崗斑岩、比抵抗の高い側が流紋岩となる。

- ③ 孔内のき裂分布と孔付近の比抵抗分布の比較から、 $800\ \Omega\text{m}$ 以下の部分はA孔と同様き裂頻度が高くかつ5mm以上のき裂が存在する範囲、D孔側の $800\ \Omega\text{m}$ 以上の部分はき裂頻度が高いにもかかわらず、5mm以上のき裂が存在しない部分である。

3.3 弾性波トモグラフィー結果との比較

図-5にA断面の弾性波トモグラフィー結果を示す。図-3と図-5の比較から以下の知見が得られた。

- ① A孔の深さ20m付近からB孔の深度10mより浅いの $400\ \Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗部と減衰定数の大きい部分に対応が見られ、低角断層およびき裂の顕著な部分と考えられる。一方、弾性波速度はこの範囲で大きい値を示し、対応が見られない。
- ② B孔側の20m以深の $800\ \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗部分は30m付近の一部を除き減衰定数の小さい部分と

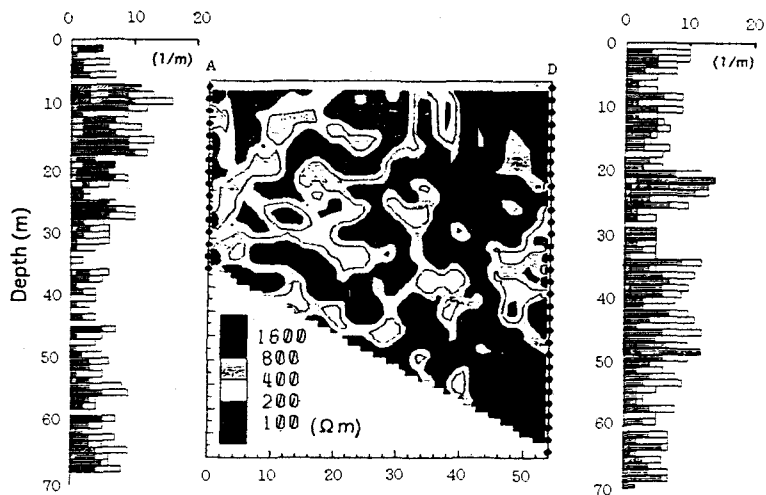


図-4 比抵抗トモグラフィー結果(B断面)

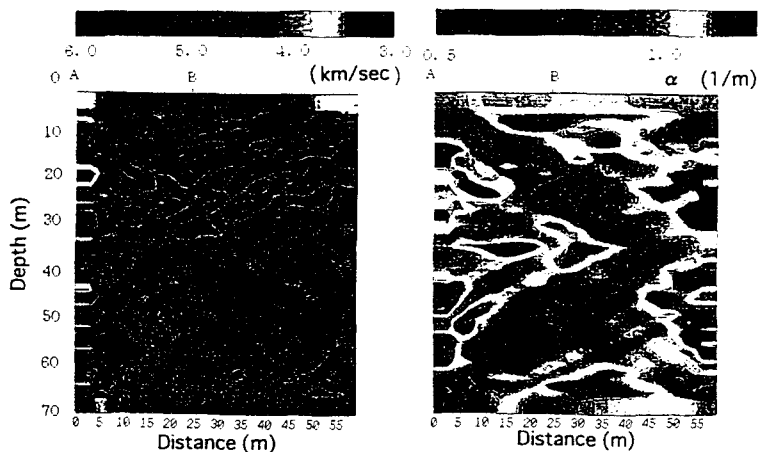


図-5 弾性波トモグラフィー結果(A断面)

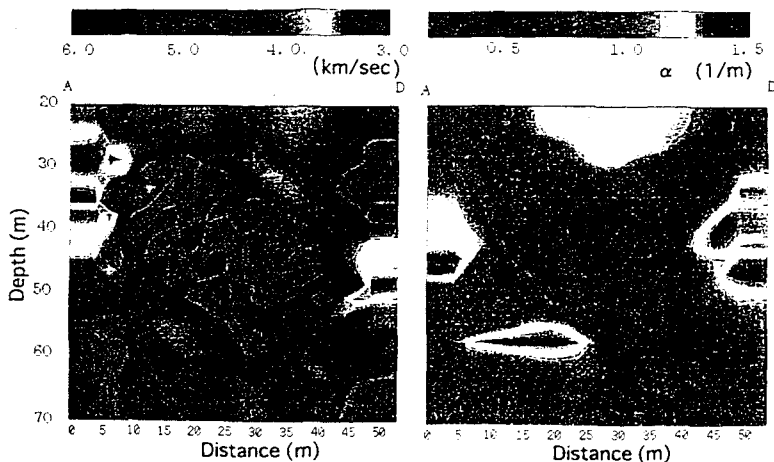


図-6 弾性波トモグラフィー結果(B断面)

対応が見られた。A孔側の30m以深については、比抵抗の計測範囲にはっていない。

図-6にB断面の弾性波トモグラフィー結果を示す。図-4と図-6の比較から以下の知見が得られた。

- ① 200 Ω m以下の低比抵抗部分で低角断層の影響と推定される部分は、弾性波の計測範囲外であった。しかし、減衰分布からはA孔とD孔の中央部の深度20~30mで減衰定数が大きい部分が200 Ω m以下の一部と対応している。
- ② 比抵抗分布から推定された高角の断層の影響は弾性波速度、減衰とも明確には現れていない。また、岩質による弾性波速度および減衰定数への影響も明確ではない。但し、A孔とD孔の中央で深度30~50mの周辺は、比抵抗および弾性波速度が大きい値を示し、減衰定数が低い、いわゆるき裂の少ない岩盤と推定される。
- ③ BSSによる不連続面の分布調査から、5 mm以上のき裂が存在していたA孔およびD孔の深度30~50mの比抵抗800 Ω m以下の部分は、弾性波速度および減衰の分布とほぼ対応した。

以上、低比抵抗分布と減衰定数の大きい部分の分布は傾向がよく一致するのに対し、弾性波速度の分布は、特に水平方向の不連続面の分布が検出できない場合が見られた。また、岩質の境界に対しては、弾性波速度および減衰ともに明確に現れていない。

4. 結 言

比抵抗トモグラフィー結果と弾性波速度および減衰トモグラフィー結果の比較から、対象となる不連続面に対する応答は以下のとおりとなった。

- ① A断面では花崗斑岩と粘板岩、B断面では花崗斑岩と流紋岩が分布するが、岩質の区分は両断面とも比抵抗分布からは、可能であったのに対し、弾性波速度分布および減衰分布からは困難であった。
- ② 低角断層および高角断層への検出は、比抵抗分布からは断層の位置、方向ともに可能であり、減衰分布からも断層の傾向は認められたものの、速度分布からは断層の位置・方向の特定が困難であった。
- ③ き裂の少ない良好な岩盤は、比抵抗、速度および減衰分布からその範囲が特定できた。
- ④ き裂の多い岩盤は、比抵抗および減衰分布からその範囲が特定できたが、速度分布からは、水平方向に広がるき裂に対してその範囲の特定が困難であった。

本研究では、比抵抗トモグラフィー、弾性波速度トモグラフィーおよび弾性波減衰トモグラフィーを同一地点で実施し、各々のトモグラフィーの特性を利用して岩盤内不連続面の性状、規模および分布状況を総合的にかつ詳細に把握することを試みた。

その結果、き裂の少ない良好な岩盤、き裂の多い岩盤およびそれらの分布、岩質の変化等に対する比抵抗、弾性波速度および弾性波減衰トモグラフィーの検出特性に対する知見が得られ、これらの特性を有効に組み合わせることによって、岩盤不連続面に対する調査および評価の精度向上が可能となると考えられる。

今後、数値シミュレーションによる検討、現地における詳細な地質情報(き裂分布、き裂の性状等の調査)との比較検討により、さらに精度の高い岩盤不連続面の評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) Tanimoto, C., et al.(1994): Seismic Attenuation Geotomographic Designing a Large Underground Cavern, the 1994 ISRM International Symposium IV Congress, Santiago, pp.195-206.
- 2) Tanimoto, C., et al.(1994): Seismic geotomography: Amplitude versus velocity in consideration of joint aperture and spacing, 1st North American Rock Mech. Symp., June 1-3, 1994, pp.147-155.
- 3) 谷本 親伯 他(1994): 原位置載荷試験による永久変形係数と載荷スケールの影響に関する基礎的研究, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 403-408
- 4) 谷本 親伯 他(1993): 岩盤不連続面に関するデータベース作成のための基礎的研究, ダム工学, No.12, pp. 35-44.
- 5) 谷本 親伯 他(1995): 岩盤内不連続面の分布性状と比抵抗特性, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 281-285.
- 6) 谷本 親伯 他(1994): 弾性波減衰ジオトモグラフィーの応用とき裂性状, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 266-270.
- 7) 島 裕雅 (1992): 二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法, 物理探査第45巻, 第3号, pp. 204-223.
- 8) 谷本 親伯 他(1995): ボーリング孔壁観察に基づく不連続性岩盤のモデル化, 第30回地盤工学研究発表会, pp. 1199-1202.