

(59) 岩盤内不連続面の分布性状と比抵抗特性

京都大学工学部	正会員	谷本 親伯
京都大学工学部	正会員	岸田 潔
関西電力株式会社	正会員	吉津 洋一
(株)ニュージェック	正会員	○ 國井 仁彦
(株)ニュージェック	正会員	大友 譲

Interpretation of Electric Resistivity Survey in Consideration of Volumetric Joint Density

Chikaosa TANIMOTO and Kiyoshi KISHIDA (Kyoto University)

Yoichi YOSHIZU (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.

Rock mass, which we have to confront with through a practical engineering problem, is characterized by rock substance and discontinuities in rock mass. Their relationship is complementary each other. Hence, 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.

In this paper, the relation between resistivity values and joint distribution is illustrated from the point of view on the concept of volumetric joint density. It is recognized that resistivity and volumetric joint density show a good propotional relation and the magnitude of resistivity is reflected by joint aperture. When a precise joint survey is carried out and joint distribution can be known by the use of BSS, the magnitude of aperture for representative joint can be estimated from the volumetric joint density.

1 緒 言

岩盤を対象とする構造物を設計・施工するうえで、不連続面の分布性状や力学的特性を把握することは重要な課題である。筆者らは、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), 2), 3), 4)}。

岩盤の比抵抗特性は、岩盤内のき裂の連続性、分布密度および岩盤の実質部とき裂を満たす水（以下、裂か水という）の比抵抗等に影響を受けると考えられる。そこで、本研究では、不連続性岩盤において調査横坑内および調査横坑内のボーリング孔を用いた電気探査を実施し、トモグラフィー手法を用いた解析により岩盤内の比抵抗分布特性を示すとともに、同一地点で既に行なったボーリングコア観察およびボアホールスキナシステム（BSS）を用いた岩種、岩級およびき裂の分布等の情報⁴⁾と比較検討を行ない、比抵抗特性と不連続面の分布特性の関係について考察を行なった。

2 調査地点概要

2.1 地 質

図-1に調査地点の地質概要および電気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、B-1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、大部分が流紋岩で一部に粘板岩がブロック状に取り込まれている。

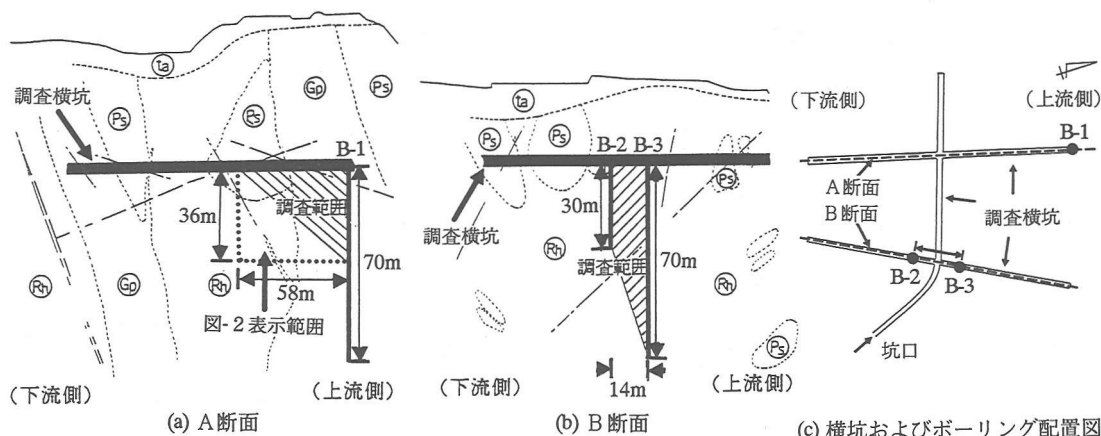


図-1 鉛直地質断面図

(ta: 堆積層, Gp: 花崗斑岩, Rh: 流紋岩, Ps: 粘板岩)

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ある。

図-2に、A断面で比抵抗トモグラフィーを行な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BSS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),4)}。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B-1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。

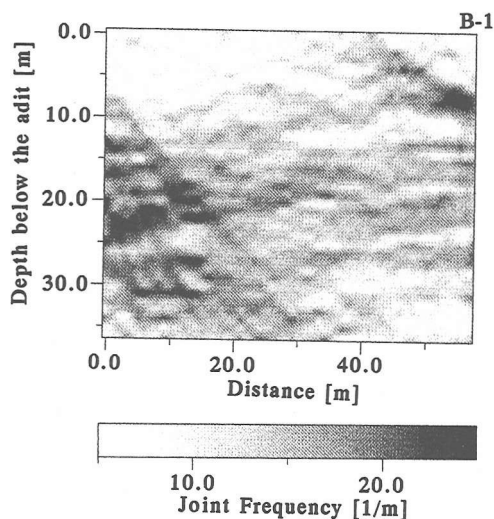


図-2 き裂頻度分布図 A断面

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なった。次に、計測結果の評価を行なうために、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なった。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B-1孔口から下流側に58mおよびB-1孔内地下水面と孔口からの深度36m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-2孔内では地下水面と孔口からの深度29mの間、B-3孔内では地下水面と孔口からの深度66mまでの間および2孔間の間(14m)の坑道内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100m以上離して設置して、2極法で行なった。計測機器は、McOHM-21 (OYO製)を用いた。

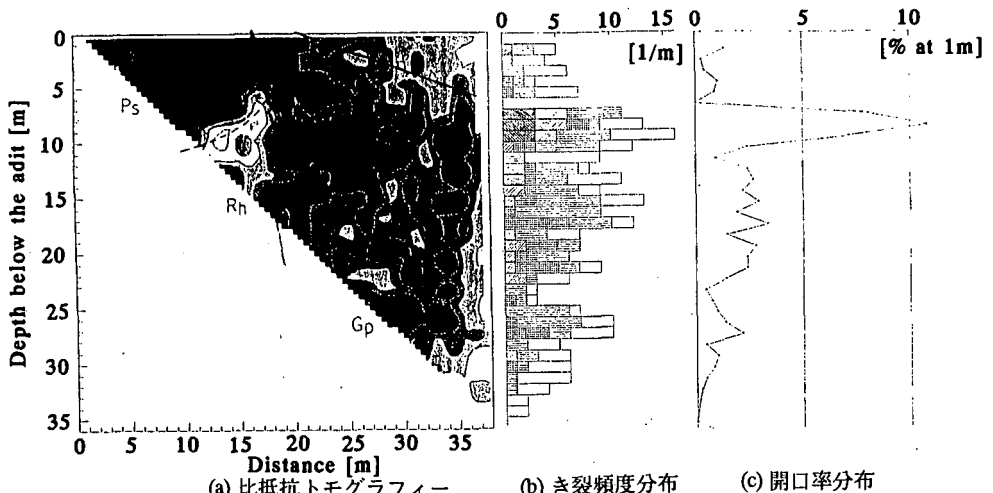
裂か水の比抵抗測定は、半割りの比抵抗測定容器(φ=10cm, 長さ15cm)に岩盤内の湧水を満たし、平行電界のもとで電位差を測定して比抵抗を求めた。また、岩盤の実質部の比抵抗測定は、4極法(電極間隔5cm)で横坑の壁面に直接電極を押し当て計測を行なった。

3.2 比抵抗トモグラフィー

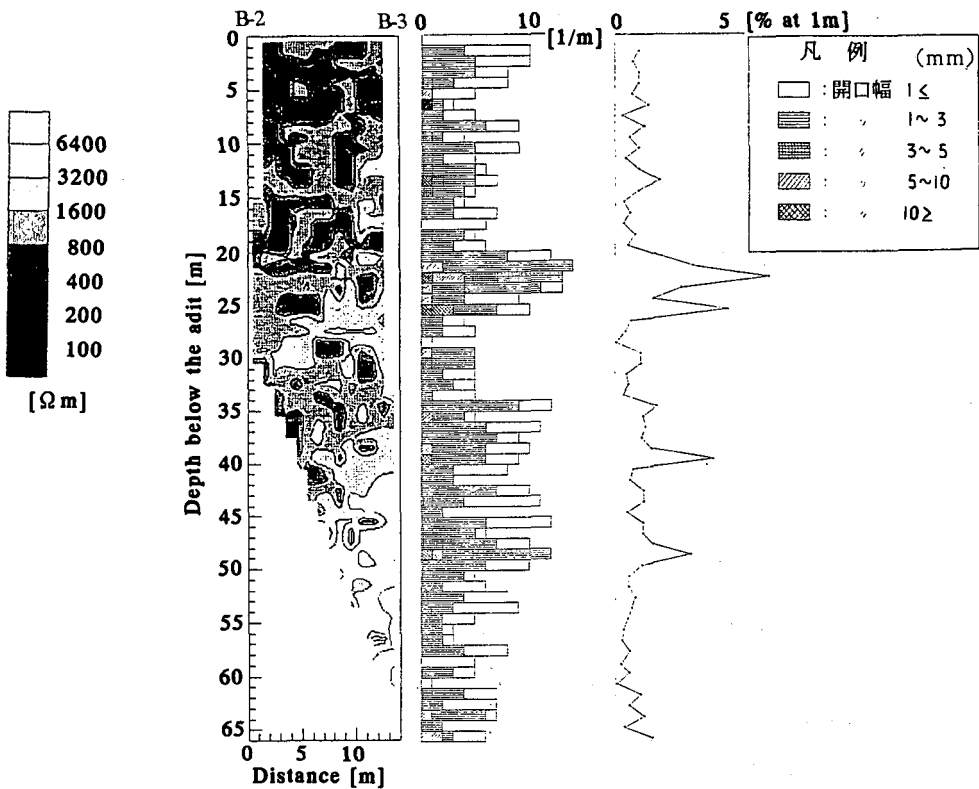
2極法を用いた比抵抗トモグラフィーの解析は、既往の手法⁵⁾で行なった。解析結果を図-3および図

-4に示す。地下水面かに電極を設置しているので、不連続面が地下水で飽和しているとして検討を行った。図-3および図-4から、以下の知見を得た。

- (1) A断面において、比抵抗の分布から岩質の違いが判別できた。すなわち、流紋岩は比抵抗値が $3200\ \Omega\text{ m}$ 以上、粘板岩は比抵抗値 $400\ \Omega\text{ m}$ 以下の領域と対応し、花崗斑岩はそれらの中間の値と対応が見られた。
- (2) 低角断層の上盤と下盤とのあいだで比抵抗の差が認められた。



(a) 比抵抗トモグラフィー (b) き裂頻度分布 (c) 開口率分布
図-3 比抵抗トモグラフィー解析結果 (A断面) とボーリング孔き裂分布 (B-1)



(a) 比抵抗トモグラフィー (b) き裂頻度分布 (c) 開口率分布
図-4 比抵抗トモグラフィー解析結果 (B断面) とボーリング孔き裂分布 (B-3)

- (3) 花崗斑岩に対応する比抵抗値は幅広く分布するが、地下水の比抵抗（150～250Ω m）に近い低比抵抗部分は上流下がり分布している。
- (4) ボアホールスキュナシステム（BSS）によるボーリング孔内のき裂頻度および単位長さ当りのき裂開口幅の累計値（以下、開口率という）とボーリング孔付近の比抵抗の関係から、き裂頻度の低い区間また開口率が1%以下の区間は高い比抵抗値を示した。一方、10mm以上の開口幅を持つ不連続面の多く存在する7～8m区間では低い比抵抗値を示した。
- (5) B断面において、一部粘板岩が存在する区間で低い値の比抵抗の分布を示し、岩質との対応が見られた。
- (6) 断層の上盤と下盤とのあいだに比抵抗の差が認められ、断層に沿って低い値の比抵抗が分布する。
- (7) ボーリング孔内のき裂頻度および開口率と比抵抗の関係から、き裂頻度の低い区間また開口率が1%以下の区間は高い比抵抗値を示す。

3.3 裂か水および岩盤の比抵抗

比抵抗トモグラフィーの解析を行うにあたり、岩盤の実質部と裂か水の比抵抗を把握することは重要である。比抵抗トモグラフィー解析の結果、岩質による比抵抗の差が認められたこと、花崗斑岩では比抵抗の幅があるのに対して、粘板岩ではあまり差がないこと等がわかった。

そこで、まず横坑内の湧水4試料、および沢、および河川の地表水4試料の比抵抗を測定した。地表水と地下水の比抵抗には差があらわれるが、各々の測定値についてはばらつきがなかった。

次に、花崗斑岩についてはB級岩盤で15試料、CH級岩盤で6試料、および粘土狭帯または不連続面の集中箇所5試料の測定を行った。粘板岩については、CM級岩盤を対象として4試料の測定を行った。琉紋岩については、B級岩盤で1試料を測定した。結果を図-5に示す。この図から、トモグラフィー解析結果と同様の傾向、すなわち花崗斑岩はき裂分布、および裂か水の影響を受け、340～6940Ω mと比抵抗値の幅があるのに対し、粘板岩では1190～1380Ω mと岩盤の状態によらず、比抵抗はあまり幅がないことがわかった。

4 考 察

4.1 岩盤の比抵抗と単位き裂容積（ ϕ ）の関係

比抵抗トモグラフィーの解析結果（図-3、4）および岩盤実質部の現地比抵抗測定結果（図-5）から、粘板岩の比抵抗は試料による差が少ないのに対して、花崗斑岩では比抵抗が340～6940Ω mと20倍程度も異なる傾向を示した。この原因として、裂か水の含まれ方が岩盤の比抵抗に及ぼす影響が大きいと考えられる。すなわち、同じ岩質でも不連続面が多いほどまたその不連続面の開口幅が大きいほど岩盤内には裂か水が多く含まれることになり、比抵抗に影響がでてくるものと考ええる。つまり、岩盤の比抵抗と岩盤内に存在する不連続面による間隙との関係について検討を行えば、比抵抗からマスとして岩盤内の間隙の程度をとらえることが可能となる。したがって、岩盤内に存在するき裂が岩盤単位体積中に占める割合を単位き裂容積（ ϕ ）と定義し、比抵抗との関係について検討を行った。岩石の比抵抗と間隙率の関係⁶⁾については、以前から砂岩のコアを用いたAchie等の研究があり、次の一般式が提案されている。

$$\frac{\rho_w}{\rho} = n\phi^{-m} \quad (1)$$

ただし、 ρ : 岩盤の比抵抗、
 ρ_w : 間隙水の比抵抗、
 ϕ : 間隙率、
 m, n : 実験により得られる係数

今回、対象とした岩盤は、き裂の発達した岩盤であったことから、岩盤の実質部の比抵抗と裂か水の比抵抗について検討した。

岩盤の実質部の比抵抗と裂か水の比抵抗

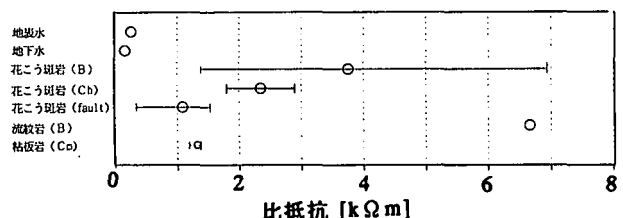


図-5 裂か水および岩盤実質部分の比抵抗

を用いて岩盤の比抵抗を推定すると、式(2)の関係が得られる。

$$\frac{\rho_w}{\rho} = (1 - \beta)\psi + \beta \quad (2)$$

ただし、 β ：裂か水の比抵抗と岩盤の実質部の比抵抗の比、

ϕ ：単位き裂容積(%)

式(2)の β に、現地で測定した裂か水の比抵抗と実質部の比抵抗の比を代入すると、花崗斑岩は $\beta = 0.02$ 、粘板岩では $\beta = 0.11$ となり、図-6に示すように間隙率によって比抵抗の関係が得られる。

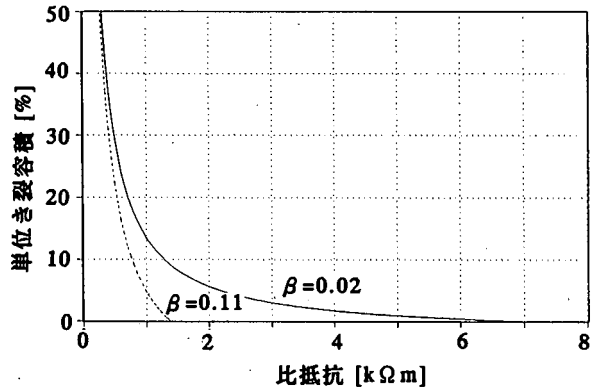


図-6 岩盤の比抵抗と単位き裂容積の関係

BSSにより求められたき裂分布から、現地の間隙率は0～15%と考えられることから、花崗斑岩と粘板岩の比抵抗値は概ね花崗斑岩で1000～8000 (Ω m)、粘板岩で700～1400 (Ω m)となる。

この結果は、現地計測結果とも対応し、比抵抗の分布がき裂の分布を示唆していると考えられる。

5 結 言

本研究では、比抵抗トモグラフィにより不連続性岩盤の比抵抗分布特性を示すとともに、き裂調査や岩盤の実質部および裂か水の比抵抗計測の結果をもとに原位置の比抵抗分布特性の解釈を行なった。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 岩盤の岩種、き裂分布によって比抵抗が異なることから、比抵抗トモグラフィとボーリング等の地質調査を組み合わせることにより、より精度の高い岩盤の調査が可能と考えられる。
- (2) 岩種によって、比抵抗の分布と幅があり、この原因として裂か水と岩盤の実質部の比抵抗の割合が関係することがわかった。
- (3) 比抵抗は単位き裂容積の影響を大きく受けることから、BSS等によるき裂分布の情報と組み合わせることにより、比抵抗から岩盤内のき裂の分布を推定できると考えられる。

今後、弾性波探査から得られる不連続面の分布・密度等の情報と、比抵抗法によるき裂の連続性、岩盤の単位き裂容積の情報を組み合わせることにより、より精度の高い岩盤の評価法の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Tanimoto, C., et al.(1994): Seismic Attenuation Geotomographic Technique in 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) 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.
- 6) 物理探鉱技術協会(1979)： 物理探査用語辞典，pp.8-9.