

岩石の比抵抗における不連続面と挟在物の影響について

Influence of discontinuity and its filling materials on rock resistivity

関根一郎*・西牧 均*・石垣和明*・原 敏昭*・斎藤 章**

Ichiro SEKINE, Hitoshi NISHIMAKI, Kazuaki ISHIGAKI, Toshiaki HARA and Akira SAITO

In order to interpret resistivity profiles derived from electrical and electromagnetic surveys, it is necessary to study the influence of discontinuity and its filling materials on rock resistivity. In this paper, the influence of discontinuities on resistivity of rock specimens such as granite, shale, welded tuff and tuff was investigated, and the effect of discontinuity filled with clay was studied. The results of experiments showed that the influence of discontinuity filled with clay was important.

1. まえがき

地下構造物を安全かつ経済的に建設するためには地山の地質予測精度を向上させることが不可欠である。そのため、近年、電気・電磁探査や比抵抗トモグラフィーと言った手法がしばしば適用されるようになったが、探査結果として得られた比抵抗分布を考察する際に参考となるバックデータが不足している。そのため筆者らは岩石の比抵抗の支配要因について研究し、比抵抗と工学的性質との関係について検討してきたが¹⁾ ²⁾、不連続面やその挟在物の影響については課題を残している。本研究では、割裂によって不連続面を設けた岩石とそれに粘土を挟んだときの比抵抗を測定し、比抵抗に対する不連続面や挟在物の影響について考察した。

2. 割裂によって不連続面を設けた岩石の比抵抗

2.1 実験方法

実験に用いた試料は、茨城県笠間市の花崗岩、宮城県牡鹿郡の頁岩、福島県西白川郡の溶結凝灰岩、栃木県宇都宮市の凝灰岩である。供試体は直径 5cm、高さ 10cm に成形し、24 時間炉乾燥し乾燥重量を測定した後トンネルの湧水の比抵抗を参考にして比抵抗 $80\Omega\cdot\text{m}$ の水中で 96 時間以上脱気し、強制飽和させた。飽和させる水の比抵抗は、純水に NaCl を溶解させることによって調整した。飽和中に岩石から電解質が溶出するため水の比抵抗が低下するが、1 日の低下量が 3 % 以上の場合、純水を加え比抵抗を再調整した。

飽和後の供試体は、比抵抗を 4 電極法³⁾により測定した後、直ちに割裂し、比抵抗 $80\Omega\cdot\text{m}$ の水中で割裂面を合わせ、割裂面に水を挟んだ状態で比抵抗を測定した。割裂の方向は、供試体の縦断方向、横断方向の 2 通りとし、横断方向に割るときは供試体の上下に丸鋼を添えて割裂した。割裂は十分慎重に実施したが、割

* 正会員 戸田建設(株)

** 理博 三井金属資源開発(株)

れ方により供試体の欠損が生じる場合もあるので、供試体は余裕をもって用意し、割裂後良好な不連続面を有する供試体を各3個得られるようにした。

縦断方向に不連続面を有する供試体の比抵抗測定状況を図-1に示す。縦断方向の場合、不連続面からの水の脱落を防止するために供試体を横にして測定した。不連続面の接触状態を一定にするために、不連続面に重錘により 0.01 N/m^2 を作用させた。供試体の両端部には銅製の電流電極を接触させ、接触部には導電性グリスを塗布し、バネによって 0.01 N/m^2 を作用させ、接触状態を一定に保った。電位電極は銅リングを2ヶ所接触させ、その間の電位差を測定した。電位電極間隔は、20mm、30mmと変えて各間隔での測定値を平均して比抵抗値を求めた。なお、割裂前の供試体の比抵抗測定も全く同様な条件で実施した。

横断方向に不連続面を有する供試体の比抵抗測定状況を図-2に示す。基本的な実験方法は縦断方向の場合と同じだが、不連続面に垂直方向に重錘により 0.01 N/m^2 を作用させた。電位電極間隔は20mm、30mmとしたが、両者ともほぼ同様な傾向を示したので後述する計算結果との比較には30mmの値を用いた。比抵抗は次式によって求めた。

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot \frac{V}{I} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、A：供試体断面積、L：電位電極間隔、V：電位差、I：電流値である。

また、各供試体について割裂前の有効間隙率をノギス法によって求めた。さらに割裂後の供試体については、表面の水分を表乾状態になるようにふき取った状態で、不連続面に水分を保持させた場合と不連続面も表乾状態にした場合の重量を測定した。

2.2 実験結果および考察

(a) 縦断方向の不連続面の影響

図-3に、縦断方向の不連続面を有する岩石の比抵抗を有効間隙率に対してプロットした結果を示す。この有効間隙率は、不連続面に水分を保持させた状態で測定した湿潤重量から乾燥重量を差し引いた水分量から求めている。また、参考に割裂前の岩石の比抵抗と有効間隙率との関係を併記した。縦断方向の不連続面の影響は花崗岩で認められたが、他の岩石では殆ど認められなかった。花崗岩の場合、不連続面による有効間隙率の増加に対応して比抵抗が低下しているが、頁岩では花崗岩と同程度の有効間隙率にもかかわらず有効間隙率の増加に対応した比抵抗の低下が見ら

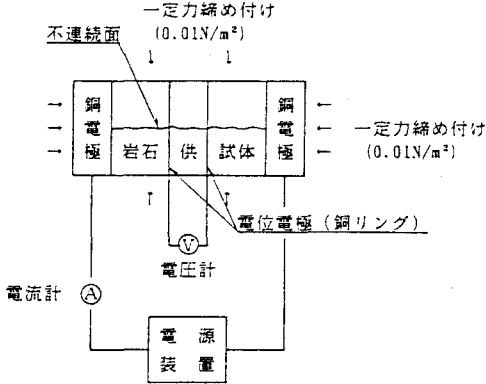


図-1 供試体縦断方向の不連続面を含む供試体の比抵抗測定

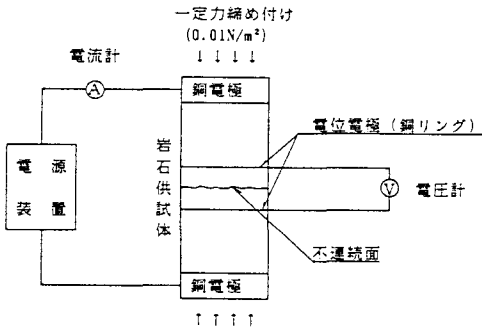


図-2 供試体横断方向の不連続面を含む供試体の比抵抗測定

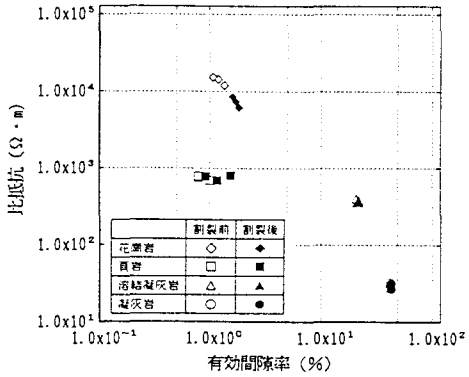


図-3 縦断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗と有効間隙率との関係

れなかった。これは間隙水の比抵抗が高い場合、頁岩のような比較的比表面積の大きな岩石の比抵抗は固体と液体の界面を電気が流れる表面伝導の影響を受けるので²⁾、不連続面による影響が不連続面を含んだ有効間隙率の変化だけでは説明できないことを示している。

そこで、縦断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗を複合体の比抵抗のモデルで検討する。複合体の比抵抗は図-4のように並列の抵抗からなるモデルで表されると考えられている³⁾。その場合、不連続面を含む岩石の比抵抗 ρ_v は次のように表される。

$$\frac{1}{\rho_v} = \frac{t \cdot N}{\rho_j} + \frac{1-t \cdot N}{\rho_i} \quad \dots \dots \dots (2)$$

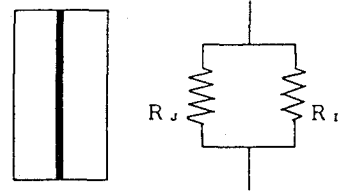
ここに、 ρ_j は不連続面を満たす物質の比抵抗でこの場合は水の比抵抗 ($80 \Omega \cdot m$)、 ρ_i は岩石実質部分の比抵抗、 t は不連続面の開口幅、 N は単位長さあたりの不連続面の個数である。この式で縦断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗を計算し、実験結果と比較した。なお、不連続面の開口幅は、不連続面に水分を保持させた場合と不連続面を表乾状態にした場合の重量の差から求める方法と割裂前後の供試体直径の変化を直接ノギスで測定する方法が考えられたが、両者の差はあまりなかったので直径の変化は微量なことから重量差から開口幅を求めた。

図-5に式(2)によって計算した結果と実験結果を比較して示した。実験結果と計算結果は良く一致しており、花崗岩の場合は岩石実質部分の比抵抗 ρ_i と不連続面を満たす水の比抵抗 ρ_j の差が大きいため不連続面による比抵抗の低下が認められたものと判断される。また、溶結凝灰岩や頁岩では、 ρ_i と ρ_j の差が花崗岩に比べて小さいために比抵抗の低下が微量であり、凝灰岩の場合は ρ_j の方がむしろ大きいので、比抵抗に与える影響は殆ど認められなかったものと考察される。

(b) 横断方向の不連続面の影響

図-6に、岩石実質部分の比抵抗 ρ_i と横断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗 ρ_h との関係を示した。頁岩は潜在的な弱面を有しており比抵抗も異方性を示すが、実験では弱面の方向に割裂しているので、縦断方向より横断方向の方が高い比抵抗を示している。図-6に示すように横断方向の不連続面による比抵抗の低下は殆ど認められなかった。横断方向の不連続面を含む比抵抗 ρ_h は図-7のように直列の抵抗からなるモデルで表現され³⁾、次式で求められると考えられる。

$$\rho_h = t \cdot N \cdot \rho_j + (1-t \cdot N) \rho_i \quad \dots \dots \dots (3)$$



R_j :不連続面部分の抵抗
 R_i :岩石実質部分の抵抗

図-4 縦断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗モデル

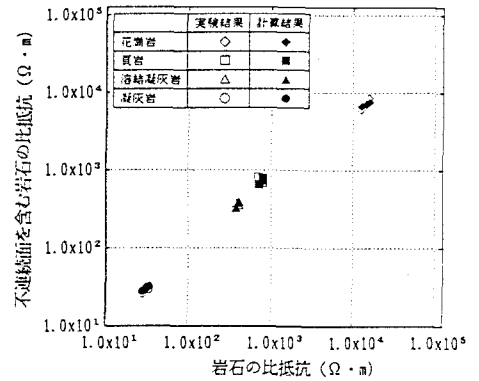


図-5 縦断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗の計算値と測定値の比較

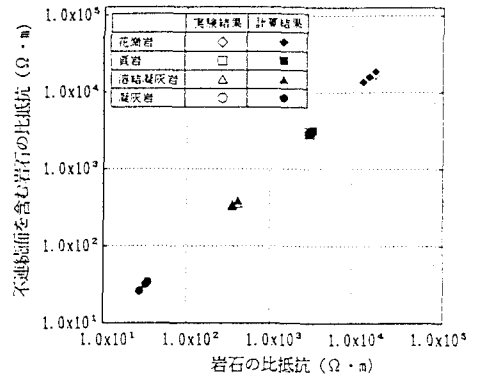


図-6 横断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗の実験結果と計算結果

ここに、 ρ_j 、 ρ_i 、 t 、 N は縦断方向の場合に準じる。
この式で縦断方向と同様に横断方向に不連続面を含む岩石の比抵抗を計算し、実験結果と比較した結果を図-6に併記した。実験結果と同様に不連続面による比抵抗の低下は殆ど認められなかった。

以上から、割裂による明瞭な不連続面の影響は、比抵抗の測定方向と同方向に不連続面を有し岩石実質部分と不連続面を満たす水の比抵抗に十分差がある場合に認められる。式(2)から、不連続面を満たす水の比抵抗が海水($0.3\Omega\cdot m$)のように低い場合は、比較的比抵抗の低い岩石でも比抵抗が低下すると考えられる。海岸沿いや海成の堆積層では地下水が高い塩分濃度を示す場合があるが、一般的には浅層地下水で $50\sim 100\Omega\cdot m$ 、深層地下水で $20\sim 50\Omega\cdot m$ とされているので、不連続面のみにによる影響は高比抵抗な岩(およそ $1,000\Omega\cdot m$ 以上)では大きい、低比抵抗な岩では小さいと考察される。

3. 粘土を挟んだ不連続面を有する岩石の比抵抗

3.1 実験方法

節理等の岩盤の不連続面は割裂によって作ったものと異なり、不連続面に沿って風化が進行していたり開口した割れ目内が粘土などで充填されている場合もある。前章の割裂による不連続面の影響はそれほど大きくなかったが、不連続面付近の風化や粘土を挟んだ影響は大きいと考えられる。そこで割裂した不連続面に粘土を挟んだ状態で比抵抗を測定した。供試体は前章の実験に用いた割裂した岩石から各岩種について縦断方向、横断方向各1個を使用した。

割れ目の開口幅は、割裂前の供試体の直径または高さ、粘土を挟んだ状態の直径または高さをノギスで測定し、それらの差から求めた。開口幅の範囲は $0.5\sim$ 数mm程度の範囲で3通り変化させた。

粘土は石川県鳳至郡のトンネル切羽の熱水変質帯から採取したものを炉乾燥した後、含水比88%で練り混ぜたものを用いた。練り混ぜた粘土は、容器に入れて岩石の比抵抗を測定するのと同じく4電極法で測定したところ、 $6.43\Omega\cdot m$ であった。粘土を挟んだ岩石の比抵抗測定は、前章と同じ方法で実施した。不連続面に対する重錘による載荷は、粘土が変形するため行わなかった。

3.2 実験結果および考察

(a) 縦断方向に粘土を挟んだ影響

縦断方向の不連続面に粘土を挟んだ岩石の比抵抗と開口幅との関係を図-8に示す。凝灰岩ではあまり変化がないが、花崗岩、頁岩、溶結凝灰岩は粘土を挟むことによって比抵抗が大幅に低下している。これらの3種類の岩石の比抵抗は開口幅が増大すると一定値に近づいているが、これは開口幅が大きくなると粘土を挟んでいることの影響が支配的になるためと考察される。凝灰岩は岩石実質部分の比抵抗が $29\Omega\cdot m$ と小さいために、粘土を挟んだことの影響が十分に表れないものと考察される。

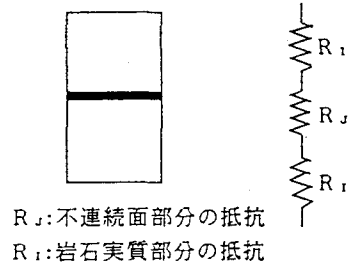


図-7 横断方向の不連続面を含む岩石の比抵抗モデル

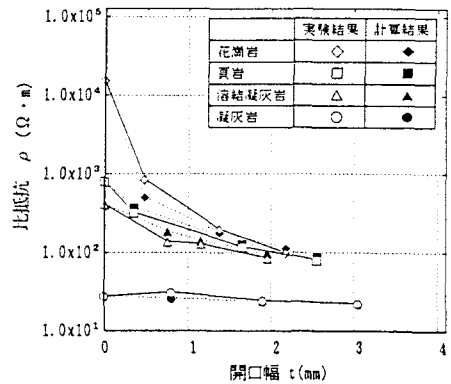


図-8 縦断方向の不連続面に挟在物を挟んだ岩石の比抵抗と開口幅との関係

前述した式(2)を用いて比抵抗を計算した結果を図-8に併記した。計算結果は実験結果と良く一致しており、式(2)が適用できることが確認された。

(b) 横断方向に粘土を挟んだ影響

横断方向の不連続面に粘土を挟んだ岩石の比抵抗と開口幅との関係を図-9に示す。各岩種とも開口幅の増加に伴って比抵抗が若干低下している。式(3)を適用して比抵抗を計算した結果を併記したが、計算結果は開口幅の増加に伴ってわずかに低下しており、実験結果とほぼ同様の傾向を示している。このことから、横断方向の不連続面に粘土を挟む場合、図-7に示した直列のモデルで表現でき式(3)が成り立つことがわかる。

以上から、不連続面に0.5～数mm程度の厚さの粘土を挟んだ場合は比抵抗の低下が認められ、特に縦断方向に不連続面を設けた場合低下量が大きい。その比抵抗は、式(2)、(3)によって表され、割れ目の開口幅や単位長さあたりの割れ目個数に応じて比抵抗が低下するものと考えられる。

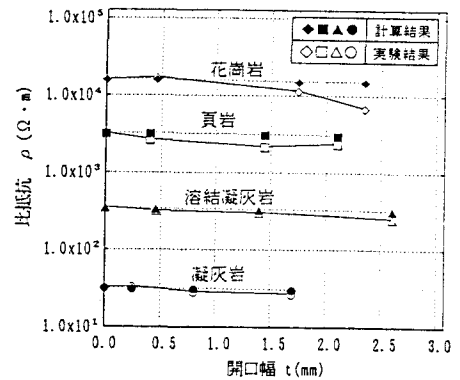


図-9 横断方向の不連続面に挟在物を挟んだ岩石の比抵抗と開口幅との関係

5. まとめ

岩石の比抵抗における不連続面と挟在物の影響について検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- ①割裂によって比抵抗の測定方向(供試体の縦断方向)に発生させた不連続面による比抵抗の低下は、高比抵抗な花崗岩で認められたが、比較的低比抵抗な他の岩種では比抵抗の変化は殆ど認められなかった。挟在物を挟まず開口幅も小さい明瞭な縦断方向の不連続面による比抵抗の変化は比較的小さい。
- ②割裂によって比抵抗の測定方向と直交方向(供試体の横断方向)に発生させた不連続面による比抵抗の低下は、殆ど認められなかった。挟在物を挟まず開口幅も小さい明瞭な横断方向の不連続面による比抵抗の変化は殆ど認められない。
- ③縦断方向の不連続面に粘土を挟んだ場合、粘土の比抵抗に比較的近い比抵抗を示す凝灰岩を除いて比抵抗は顕著に低下する。そのときの比抵抗は岩石実質部分と不連続面部分を並列の抵抗モデルとした式(2)で表わされる。この式は挟在物を挟まずに不連続面が水で満たされている場合にも適用できる。
- ④横断方向の不連続面に粘土を挟んだ場合、比抵抗は開口幅の増大に対応して緩やかに低下する。そのときの比抵抗は、岩石実質部分と不連続面部分を直列の抵抗モデルとした式(3)で表わされる。この式は縦断方向の場合と同様に不連続面が水で満たされている場合にも適用できる。

6. 参考文献

- 1) 関根一郎・西牧均・石垣和明・原敏昭・斎藤章：岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係，土木学会論文，No.541，Ⅲ-35，pp.75-86，1996年6月
- 2) 関根一郎・西牧均・石垣和明・原敏昭・斎藤章：表面伝導を考慮した岩石の比抵抗と弾性波速度との関係について，第51回土木学会年次講演会Ⅲ-A，pp.740-741，1996年9月
- 3) Parkhomenko, E.I. : Electrical properties of rocks, (translated by Keller, G.V.), PLENUM PRESS, NEW YORK, 1967