

(45) 岩石と亀裂を含んだ供試体の比抵抗と透水性

RESISTIVITY AND PERMEABILITY OF ROCK AND FRACTURED SPECIMENS

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, Akira SAITO

In order to interpret resistivity profiles obtained by electromagnetics, it is necessary to study the relationship between rock resistivity and geo-engineering parameters. In this study, the relationship between specimen resistivity and permeability derived from laboratory tests was investigated. The specimens were 17 rock samples and artificially fractured granite. The experiments involving the artificially fractured granite showed that resistivities were strongly related to permeability. Study of rock samples showed the influence of specific surface on resistivity and permeability to be important.

Key Words : Resistivity, permeability, fracture, specific surface

1. はじめに

近年、トンネルやダム基礎、地下貯槽等の地盤調査に電気・電磁探査や比抵抗トモグラフィーを用いる例が増加している。調査結果として比抵抗分布が得られるが、比抵抗と工学的性質の関係についてはあまり研究されていない。筆者らは今までに比抵抗の支配要因について調べるとともに、比抵抗と弾性波速度や一軸圧縮強度等の力学的性質との関係を実験検討してきた^{1) 2)}。比抵抗と水理学的性質との関連性についても石油探鉱や地熱、地下水開発などの目的では研究されているが^{3) 4)}、土木分野で岩盤の調査を目的としては、研究事例は少ないのが実情である^{5) 6)}。

そこで本研究では、人工的に亀裂を発生させた供試体および多種類の岩石供試体を用いて比抵抗の測定および室内透水試験を行い、比抵抗と透水係数の関係について考察した。

2. 亀裂を含んだ供試体の比抵抗と透水性

2.1 実験方法

亀裂を含んだ供試体は、亀裂性岩盤のモデルとして茨城県稲田産の花崗岩を加熱し組織を緩めて作成した。加熱は電気マッフル炉内で 350～650℃まで昇温率 100℃/hで行った後、徐々に冷却した。図-1のように加熱温度に対応して有効間隙率は増加して

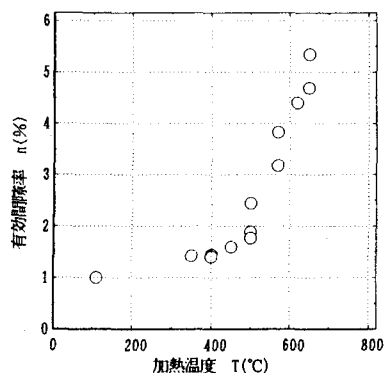


図-1 加熱温度と加熱後の有効間隙率

* 正会員 戸田建設(株)

** 理博 三井金属資源開発(株)

おり加熱した供試体はオープンクラックを多く含んでいる。

比抵抗の測定は4電極法によって実施した。図-2に比抵抗測定装置の概要を示す。供試体の上下端に電流電極を取り付けて電流を流し、供試体の中程に銅リングからなる電位電極を2ヶ所取り付け、その間の電位差を測定した。比抵抗 ρ は次式で計算した。

$$\rho = \frac{AV}{LI} \quad \dots \dots \dots ①$$

ここに、A：断面積、L：電位電極間隔、V：電位差、I：電流値である。電位電極間隔Lは2cm、3cmと変えて測定し、①式で算出した結果を平均した。透水試験では中空供試体を主に使用したが、その場合は中空供試体の実断面積を用いて同様に比抵抗を算出した。なお、供試体は比抵抗 $80\Omega \cdot m$ の水中で真空ポンプを使って強制飽和させ実験に用いた。

比抵抗測定後、透水試験を行った。花崗岩等の透水性の低い岩石の透水試験は難しく、従来からトランジェントバルス法、中空供試体による方法などが行われている。中空供試体を用いた透水試験では $10^{-12}cm/s$ までの報告例があり、ここでは中空供試体を用いた透水試験を実施した。また、比較のために三軸透水試験も実施した。図-3に試験装置の概要を示す。試験方法は中空供試体の内側に水圧を作用させ、浸出した透水量を測定した。中空供試体の場合、端部からの漏水に特に注意する必要があるため⁸⁾、供試体の上下端にシリコングリースを塗布したゴムパッキンを挟んで締めつけ、端部からの漏水を防止した。締め付け圧力を測定したが、約 $5kgf/cm^2$ が作用していた。供試体の寸法は、外径5cm、内径3cm、高さ10cmとした。肉圧を1cmとしたのは透水係数の小さい岩石まで実験するためである。内圧は $1kgf/cm^2$ としたが、次章の緻密な岩石を用いた実験の場合は透水量が少ないので、 $2kgf/cm^2$ とした。水は蒸留水を用い、実験前に真空ポンプで脱気した。透水量は透水係数が小さい岩石では二重管ビュレットで、透水係数が大きい岩石はメスシリンダーで測定した。透水性の小さい岩石の場合、透水量が非常に小さくなる。そのため、図-5の透水係数が $10^{-9}cm/s$ 以下の岩石についてはオーダーのみ表示した。なお、三軸透水試験では、 $5kgf/cm^2$ の等方圧下で直径5cm、高さ10cmの供試体の上下端間に $1kgf/cm^2$ の水圧差を与え、透水量を測定した。

2.2 実験結果および考察

図-4に、比抵抗、有効間隙率と透水係数の相互の関係を示した。図中の(●)は三軸透水試験の結果を、(○)は中空供試体の試験結果を示している。三軸透水試験の結果は、中空供試体の試験結果と比較して透水性が小さくなっているが、これは等方圧を作用させたために亀裂が閉塞したと考えられる。

図-4の物性相互の関係はいずれも両対数グラフ上で直線になっている。図-4b)で、比抵抗 ρ は有効間隙率 n が増大するのに伴って低下しており、従来指摘されているように次式の関係がある。

$$\rho = a n^b \quad \dots \dots \dots ②$$

図-4c)に比抵抗と透水係数 k との関係を示すが、この関係は次の式で表される。

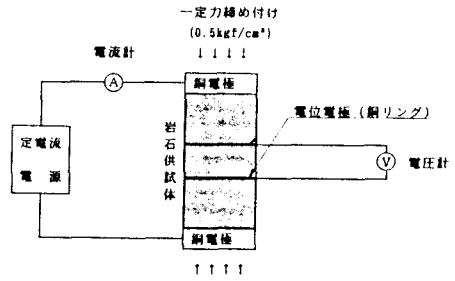


図-2 比抵抗測定装置の概要

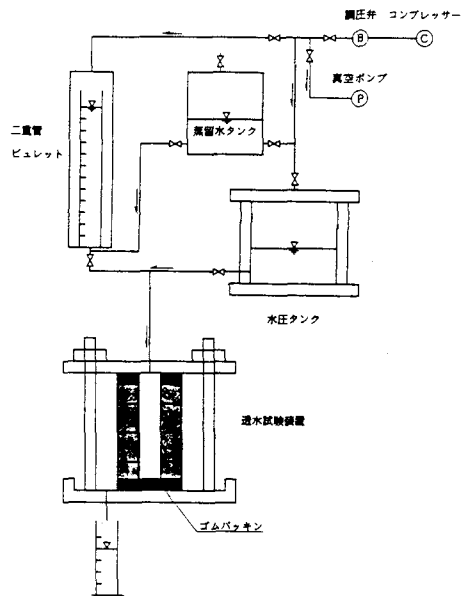


図-3 中空供試体の透水試験装置

$$\rho = c_1 k^{-a} \quad \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

従来、地層比抵抗係数 F と透水係数との間には次式の関係があるとされている⁷⁾。

$$F = c_2 k^{-a} \quad \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

地層比抵抗係数は岩石の比抵抗を間隙水の比抵抗で除した値であり、③式と④式は基本的に同じである。

図-4の結果から、有効間隙率が增大するのに伴い、透水係数が増大し、比抵抗は低下することがわかった。岩石の比抵抗は、間隙水の比抵抗が高い場合で粘土分などの細粒分の含有量が異なると、固体と液体の界面を電気が伝わる表面伝導の影響が大きくなると考えられている⁷⁾。花崗岩を加熱して亀裂を発生させた供試体の場合、開口亀裂を多く含む粘土分が少ないので、表面伝導の影響を受けにくいと、明瞭な直線関係が得られたものと考えられる。

3. 岩石の比抵抗と透水性

3.1 実験方法

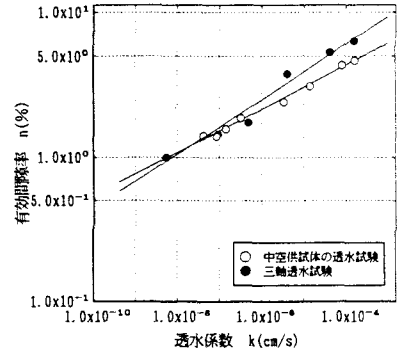
次に、種々の岩石に対して、比抵抗、有効間隙率および透水係数を測定した。実験に用いた岩石は17種類で、表-1に凡例を示した。測定方法は前章と同じだが、透水係数は中空供試体による試験方法のみ実施した。

3.2 実験結果および考察

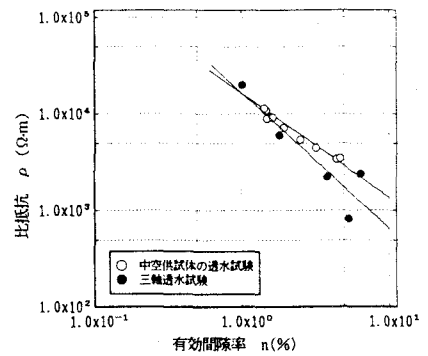
図-5に、比抵抗、有効間隙率および透水係数の相互の関係を示した。どの関係にも前章の亀裂を発生させた花崗岩に見られたような明瞭な直線関係は見られない。図-5 a) に有効間隙率と透水係数との関係を示したが、様々な種類の岩石で実験した場合、透水係数は有効間隙率からだけでは決まらないことは明らかであり、間隙の形状や大きさなどの影響を大きく受ける。

図-5 b) に比抵抗と有効間隙率との関係を示した。この関係は、間隙水の比抵抗が低く粘土分などの細粒分が少ない場合、②式に従うとされている。今回の実験の場合、飽和させた水の比抵抗が $80 \Omega \cdot m$ と高く、また様々な種類の岩石を対象としたため図-4 b) のような明瞭な関係は見られない。これは、比抵抗も透水係数と同様に間隙の形状や大きさなどの影響を受けるためと考えられる。図-5 a) b) の結果からも明かなように、図-5 c) に示した比抵抗と透水係数との関係に明らかな相関性は認められない。この実験結果を考察するためには、間隙の形状や大きさなどを表す指標を導入する必要があると考え、間隙の細かさと関係がある比表面積を測定した。

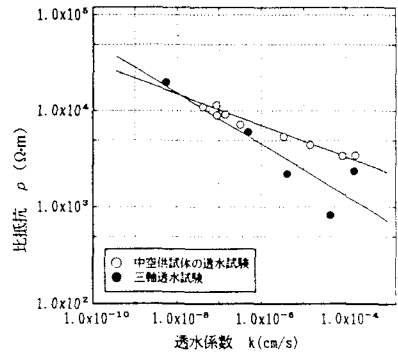
表-1の岩石の中から代表的なものを選び、比表面積を測定し、図-5の記号の後に記入した。試験にはカンタクローム社製の NOVA-1200を用い、BET法(多点法)で測定した。比表面積の測定結果から、図-5 a) では同程度の有効間隙率の岩石なら、比表面積が大きい方が透水係数が小さくなる傾向があることがわ



a) 有効間隙率と透水係数との関係



b) 比抵抗と有効間隙率との関係



c) 比抵抗と透水性との関係

図-4 亀裂を含んだ供試体の実験結果

表-1 実験に用いた岩石

記号	分類	岩種	記号	分類	岩種
◆A	深成岩	花崗岩	△C	〃	流紋岩
◆B	〃	〃	●A	堆積岩	頁岩
◆C	〃	〃	○A	〃	溶結凝灰岩
◆D	〃	閃緑岩	○B	〃	〃
◆E	〃	〃	○C	〃	〃
◆F	〃	〃	□A	〃	砂岩
△A	半深成岩	ひん岩	□B	〃	凝灰岩
△A	火山岩	安山岩	□C	〃	火山礫凝灰岩
△B	〃	〃			

かる。流紋岩 (△C) は、比表面積が小さい割には透水係数が小さくなっているが、偏光顕微鏡を用いた観察によると独立した気泡を多く含んでおり、そのため透水係数が小さいものと思われる。

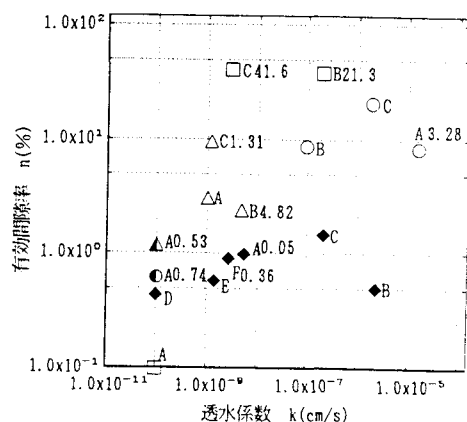
図-5 b) では同程度の有効間隙率の岩石では比表面積が大きい方が比抵抗が小さくなっている。これは、比表面積が大きい岩石の場合、固体と液体の界面を伝わる電気伝導が大きくなるためと考察される。図-5 c) では比表面積が大きい岩石の方が、比抵抗と透水係数とともに小さくなるのがわかる。頁岩 (●A) は、比表面積が $0.74\text{m}^2/\text{g}$ と小さいにもかかわらず比抵抗と透水性がともに小さくなっている。しかし、この頁岩は有効間隙率が 0.64% と小さい緻密な岩石なので、その割には比表面積が大きいと考えられ、そのために比抵抗および透水係数がともに小さいものと思われる。

4. 岩盤の比抵抗と透水性に関する考察

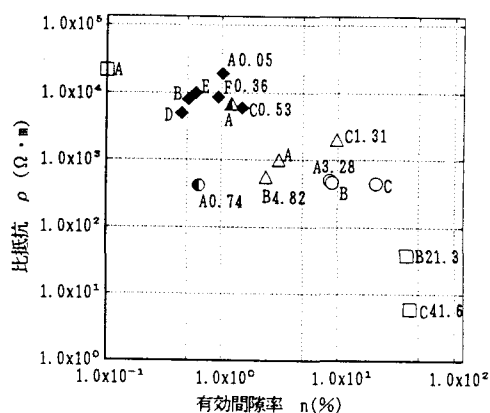
以上の実験結果から、有効間隙率と透水係数および比抵抗の相互の関係を模式的に表したのが図-6 である。比表面積が一定で有効間隙率が異なる場合と、有効間隙率が一定で比表面積が異なる場合に分けて考察する。

比表面積が一定の場合、有効間隙率の増加に伴って透水性が増大し、比抵抗が低下する。この関係は花崗岩などから成る高比抵抗な岩盤では間隙水の比抵抗との差が大きいため顕著になると考えられる。それに対し、泥岩や凝灰岩など比抵抗が $100\Omega\cdot\text{m}$ を下回るような岩石では、岩石の比抵抗が間隙水の比抵抗と同程度かそれ以下のため、このような関係は成立しないと考えられる。

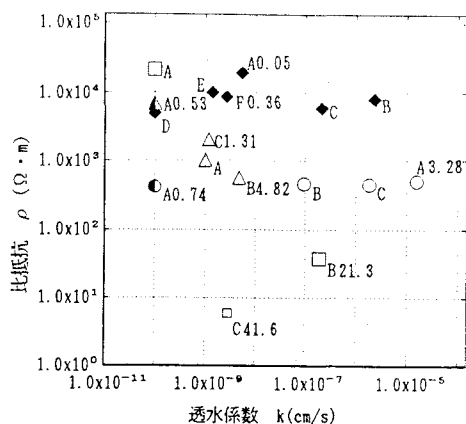
次に、有効間隙率が一定で比表面積が異なる場合について考察する。有効間隙率が一定の場合、比表面積が異なることの影響の表われ方は、透水係数と比抵抗で異なっている。すなわち図-7 のように、水は間隙を流れ電



a) 有効間隙率と透水係数との関係



b) 比抵抗と有効間隙率との関係



c) 比抵抗と透水係数との関係

図-5 岩石の実験結果 (凡例は表-1 を参照
記号の後の数字は、比表面積、 m^2/g)

気も主に間隙を流れると考えられるが、有効間隙率が一定の条件下では、間隙が微細になるほど水は粘性が効いてくるので、流れにくくなる。それに対し、電気は間隙が微細になるほど固体と液体の界面の面積が増大するので、そこを伝わる表面伝導が卓越し、流れ易くなる。したがって比抵抗は低下する。

帯水層の調査の場合、地盤の比抵抗を間隙水の比抵抗で除した値である地層比抵抗係数が4程度のとき、透水性が最も良くなると経験的に指摘されている⁴⁾。これは、地層比抵抗係数が4以上では間隙率が小さくなることによって透水係数が低下し、地層比抵抗係数が4以下では細粒分の影響によって比抵抗が低下する現象が顕著になるとともに透水性も小さくなると考えられる。今回の実験結果から岩盤の場合も間隙の細かさなど間隙形態の影響が大きいものと考えられる。

5. まとめ

加熱して亀裂を発生させた花崗岩と、17種類の岩石について、比抵抗と透水係数および有効間隙率を測定し、相互の関係について考察した。その結果、亀裂を発生させた花崗岩の場合、有効間隙率の増加に伴って比抵抗は低下し、透水性は増大した。17種類の岩石の実験結果ではそのような関係は成立せず、間隙の形態の違いが大きな影響を与えることが明らかになった。

比抵抗の探查結果を解釈する際、比抵抗値と透水性を単純に結びつけることはできず、風化等による粘土化の程度や岩種の違いなどに留意した上で考察する必要があると考えられる。また、岩盤では卓越した亀裂が全体の透水性に大きな影響を与えるとされている他、亀裂の介在物の影響も大きいと考えられるが、それらについては今後の課題としたい。

6. 参考文献

- 1) 関根・西牧・石垣・原・斎藤：岩石と人工亀裂性供試体の含水状態と比抵抗について，土木学会第50回年次学術講演会，Ⅲ，p.618，1995年9月
- 2) 関根・西牧・石垣・原・斎藤：岩石の比抵抗と力学的性質の関係について，第30回土質工学研究発表会，pp.1175，1995年7月
- 3) Tixier M.P.: Evaluation of permeability from electric - log resistivity gradients, The Oil and Gas Journal, June 16, p.113-133, 1949
- 4) 山口久之助：帯水層の地層比抵抗係数と水理定数の関係について，物理探鉱，第13巻，第4号，1960年
- 5) Katsube T.J. and Hume J.P.: Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs, Geophysics, Vol.32, No.3, p.342-352, 1987,3
- 6) 茂木透・佐々宏一：砂のセン断特性及び透水性と比抵抗，水曜会誌，第20巻，第1号1983年12月
- 7) Worthington P.F.: Quantitative geophysical investigations of granular aquifers, Geophysical Surveys, Vol.2, p.313-366, 1975
- 8) Bernaix J.: New laboratory methods of studying the mechanical properties of rocks, Int.J.Rock Mech. Min. Sci., vol.6, pp.43-90, 1969

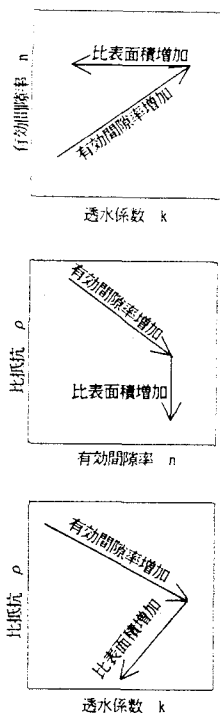


図-6 物性相互の関係を表した模式図

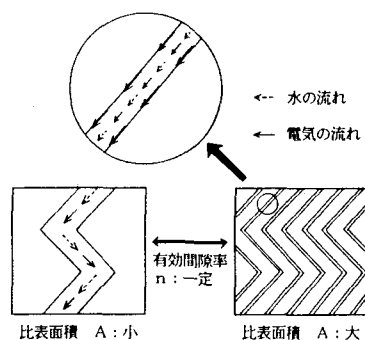


図-7 間隙の形態と電気と水の流れ