

(68) 岩石コア試料の比抵抗値と孔内検層結果に基づく間隙率分布の推定

Prediction of Porosity Distribution in a Borehole
Based on Resistivity of Rock Samples and Insitu Electrical Logging

岩本 宏*・熊田政弘**・飯 博行***・千葉昭彦****
Hiroshi IWAMOTO, Masahiro KUMATA, Hiroyuki II and Akihiko CHIBA

The resistivity of the saturated granite samples taken from a borehole with the various porosities were measured under the stable moisture condition. These data showed that the resistivity depended on the pore-surface conduction correlates with the porosity. Based on the experimental results, an empirical formula for formation resistivity factor was obtained with the porosity and pore fluid resistivity.

Using this empirical formula, the porosity distribution along the borehole was predicted from the rock mass resistivity data obtained from insitu electrical logging.

1. はじめに

間隙の飽和した岩石の比抵抗が、間隙水の比抵抗等に影響されることは様々な研究で明らかになっている。しかし、結晶質岩の比抵抗と間隙水の比抵抗との関係についての報告があまりないことから、我々は花崗岩試料について室内実験をもとに両者の関係について研究を行い、原位置電気検層で得られる岩盤の比抵抗から間隙率等の岩盤物性の定量的解釈への適用を試みている。

これまでに、粘土粒子分を含まない新鮮な花崗岩を電解質溶液で飽和させ、安定した湿潤状態で比抵抗を測定することにより、花崗岩の比抵抗 ρ_R は、間隙水（電解質溶液）の比抵抗 ρ_w に比例する比抵抗と、間隙が飽和されることによって間隙水と間隙表面の間に生じる表面伝導に起因する比抵抗 ρ_e の並列回路モデルで表わされることを示した¹⁾。

また、単一ボーリング孔から採取した間隙率が0.55～2.66%の範囲にある8本の花崗岩試料を用いて、濃度の異なる電解質溶液により飽和させた岩石の比抵抗を測定し ρ_e を求めた結果、 ρ_e は測定した岩石試料の間隙率と高い相関を示した。そこで $\rho_e = g(\phi)$ として、

$$Fa = \frac{1}{\frac{1}{F} + \frac{\rho_w}{g(\phi)}} \quad (1)$$

ここに、Fa：見掛け地層比抵抗係数（ $= \frac{\rho_R}{\rho_w}$ ）
F：真の地層比抵抗係数

なる一般式から、岩石の比抵抗と間隙水の比抵抗及び間隙率の間の関係を表し、実験結果から得た式(1)の

* 正会員 日本原子力研究所 東海研究所 環境安全研究部 天然バリア研究室

** 日本原子力研究所 東海研究所 環境安全研究部 天然バリア研究室

*** 日本原子力研究所 東海研究所 (現 住鉱コンサルタント(株) 技術開発部)

*** 正会員 住友金属鉱山(株) 資源事業部技術部 地下利用技術グループ

定数を用いて孔内電気検層結果から孔壁近傍の岩盤内間隙水の比抵抗を推定した²⁾。

今回、さらに間隙率が0.59～1.12%の7本の試料を加えて全15試料（間隙率0.55～2.66%）に対する実験式を得、孔内電気検層結果からボーリング孔周辺の岩盤の見掛間隙率を推定した。

2. 岩石比抵抗の室内測定

室内比抵抗測定に用いた試料は、瀬戸内海に位置する小島で清水掘りした全長550mのボーリング孔から採取した中生代白亜系の領家変成岩類に属する片麻状花崗閃緑岩で、ボーリングコアを直径5cm×長さ8cmの円柱形に整形した後、重量法により有効間隙率 ϕ を求めた。

比抵抗の測定は、試料及び電極を保持するホルダーを底に水を張った密閉容器内に収め、安定した湿润状態が保てるよう工夫した装置¹⁾を用いて行った。試料は、水道水及び3種類の濃度のKCl溶液を用いて、溶液の比抵抗 ρ_w の高い方から順に飽和させた。岩石の比抵抗 ρ_R は、

$$\rho_R = \frac{S}{L} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

ここに、S：試料断面積（ m^2 ） ΔV ：試料両端間の電位差（V）
L：試料長（m） I：試料両端間に流れる電流（A）

を用いて算出した。

3. 室内試験における物理量の関係

電解質溶液で間隙が飽和された岩石試料の比抵抗 ρ_R と間隙水の比抵抗 ρ_w との関係は、式(3)で表わされる^{1) 3)}。

$$\frac{1}{\rho_R} = \frac{1}{F \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad (3)$$

ここに、F：真の地層比抵抗係数（ Ωm ）

ρ_c ：間隙の表面伝導に起因する比抵抗（ Ωm ）

式(3)は、 ρ_w が低い領域では右辺第一項の影響が大きく第2項が無視され、 ρ_R は ρ_w に比例することを示している。これは、Archieが間隙率の大きい砂岩層を対象として、20,000ppm以上の低比抵抗のNaCl溶液を用いた実験から導いた、

$$F = \frac{\rho_R}{\rho_w} = a \phi^{-m} \quad (4)$$

ここに、a：迂回率係数

m：膠結係数

なる関係式で表わされる⁴⁾。

式(3)は、逆に ρ_w が高い領域では右辺第2項の影響が大きく、 ρ_w が高くなるにつれて ρ_R は一定値 ρ_c に漸近することを示している。

全ての ρ_w の領域において、 ρ_R と ρ_w の関係が式(3)で表されるとき、

$$Fa = \frac{\rho_R}{\rho_w} \quad (5)$$

で定義される見掛地層比抵抗係数Faは、 $\rho_c = g(\phi)$ と表わされるならば、式(3)を用いることにより

$$Fa = \frac{1}{\frac{1}{F} + \frac{\rho_w}{g(\phi)}} \quad (1)$$

と変形できる。式(1)は、全ての間隙水の比抵抗に対して、岩石の比抵抗 ρ_R と間隙水の比抵抗 ρ_w 及び間隙

率 ϕ の関係を表している²⁾。

式(3)における F と ρ_c は各試料において異なる値をとるが、これらは濃度の異なる電解質溶液で間隙を飽和した岩石の ρ_R を測定することで決定できる。すなわち、 $1/\rho_w$ に対する $1/\rho_R$ の直線回帰により F と ρ_c を決定できる¹⁾(図-1)。図-2は全15試料から得られた地層比抵抗係数 F を間隙率 ϕ に対してプロットした図である。相関係数は0.864であり、べき乗回帰から、 $F=13.52\phi^{-1.08}$ として $\phi-F$ の関係を表すことができる。図-3は全試料の ρ_c を ϕ に対してプロットした図である。相関係数が0.766と若干低いものの、良好な相関が認められ、 $\rho_c=3.19\phi^{-1.52}$ として表すことができる。ここで、式(1)の F 、 ρ_c に実験から得られたべき乗回帰式をそれぞれ代入し、

$$\frac{\rho_R}{\rho_w} = \frac{1}{\frac{1}{13.52} \phi^{1.08} + \rho_w \frac{1}{3.19} \phi^{1.52}} \quad (6)$$

なる実験式が得られる。これは間隙率0.55~2.66%の範囲における岩石の比抵抗と間隙水の比抵抗及び間隙率との関係を表している。

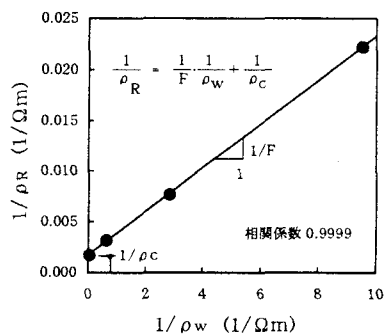


図-1 F 、 ρ_c の決定方法

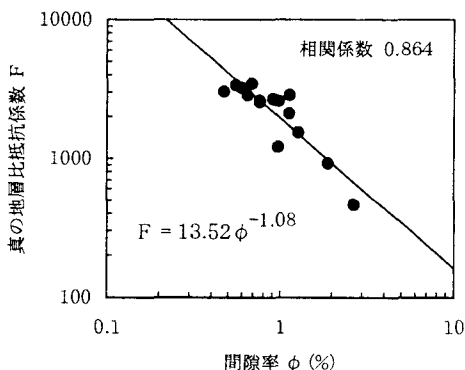


図-2 $\phi-F$ 関係図

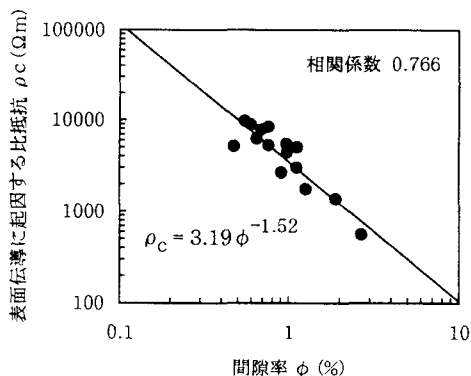


図-3 $\phi-\rho_c$ 関係図

4. 室内試験結果と原位置検層結果の比較

4.1 地下水の比抵抗

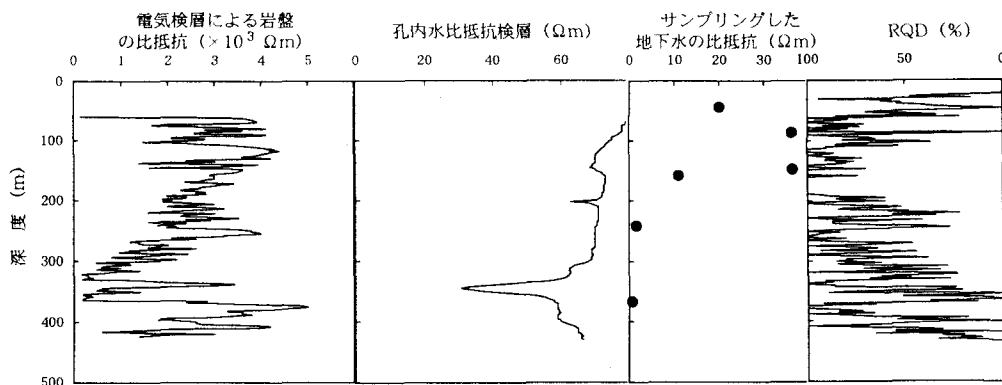


図-4 原位置検層結果

試料を採取したボーリング孔で電気検層（ノルマル法）を実施し、岩盤の比抵抗を測定した結果を他の測定項目とあわせて図-4に示す。

電気検層による岩盤の比抵抗を ρ_R とし、岩石試料の間隙率を式(6)の ϕ に代入して解けば、試料採取深度における孔壁近傍の岩盤内間隙水の比抵抗が ρ_w として求まる（図-5の●印）。図-5には孔内水の比抵抗検層結果を破線で、地下水サンプラーを用いて採取した地下水の比抵抗実測値を○印で併せて示した。式(6)より求めた間隙水の比抵抗は10 Ω m程度以下の値となり、孔内水比抵抗とは全深度に渡って大きく異なるが、深度160m以深ではサンプリングした地下水の比抵抗実測値と良く一致している。実際の岩盤内間隙水はサンプリングした地下水の比抵抗や式(6)を用いて計算した比抵抗値に近い分布であると考えられる。

4.2 間隙率の分布

電気検層による岩盤の比抵抗 ρ_R は深度方向に連続データとして記録されているので、岩盤の間隙水の比抵抗 ρ_w を連続データとして与えることができれば、式(6)を用いることにより孔壁に沿った岩盤の間隙率の分布が求まる。

電気検層結果と式(6)を用いて求めた間隙水の深度方向への分布（図-5）では、深度160m以浅でサンプリングした地下水の比抵抗と20~30 Ω mほどの差がある。そこで、サンプリングした地下水の比抵抗値をもとに間隙率を推定した場合と計算で求めた比抵抗値をもとにした場合とを比較したものが図-6である。計算で求めた比抵抗値をもとにした間隙率は岩石試料の間隙率（●）であるから、これとサンプリングした地下水の比抵抗値から式(6)を用いて推定した間隙率（○）を比較すると、両者は良く一致している。したがって式(6)を用いた岩盤の間隙率の推定のためには、岩盤の間隙水として、計算から求めた値を用いても実用上十分であると考えられる。

図-7は、電気検層による岩盤の比抵抗 ρ_R と図-5の（●）で示した間隙水の比抵抗を用いて式(6)から2m毎に間隙率を求めたものである。ただし、間隙水の比抵抗は15個の離散データとして与えられるので直線補間して用いている。図-7は、図-6における15点の岩石試料の間隙率データ（●）を深度方向に直線補間する代わりに、電気検層結果をもとにして式(6)で補間したものである。

図-8は回収したボーリングコアの観察から得られたRQDを深度に対してプロットした図である。この図において深度100m付近、200~250m、300~330m、360m付近、400m付近などでRQDが小さい。これは、図-7における間隙率分布とよく調和しており、図-7が亀裂部まで含んだ見掛けの間隙率として表されることが考えられる。

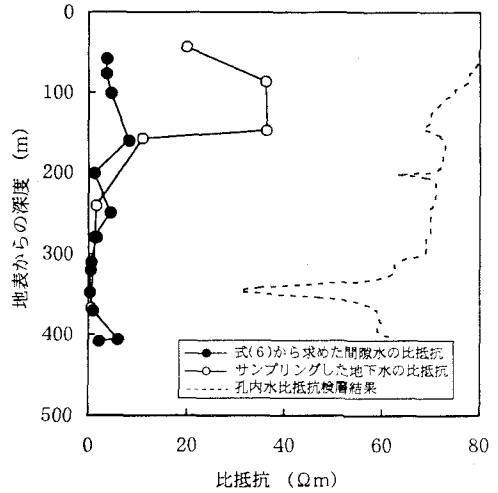


図-5 岩盤内間隙水の比抵抗の比較

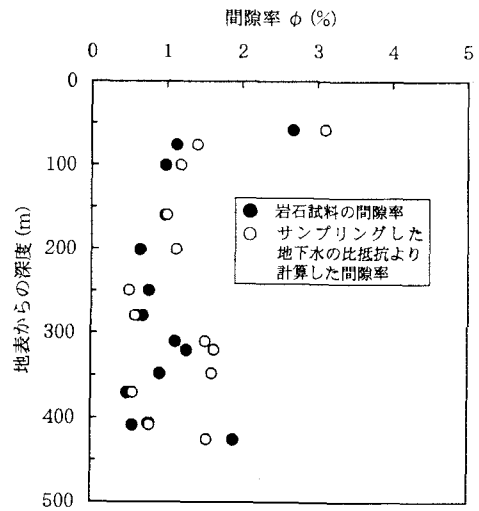


図-6 試料採取位置での間隙率の比較

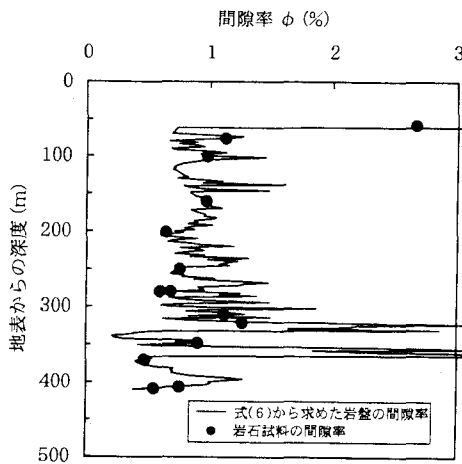


図-7 岩盤の見掛け間隙率の深度方向分布

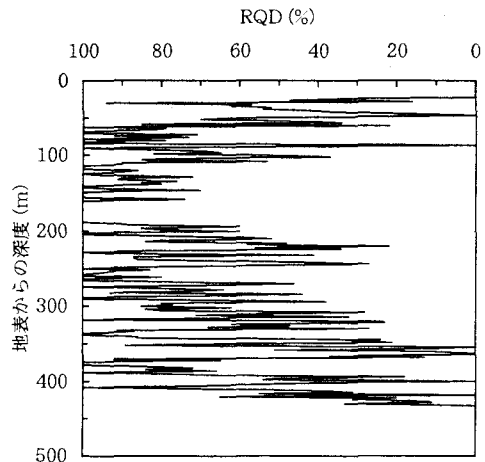


図-8 RQDの深度方向分布

5. まとめ

同一ボーリング孔から採取した花崗岩岩石試料を電解質溶液で飽和させ、室内比抵抗試験を行い、間隙率 ϕ と間隙水 ρ_w と岩石の比抵抗 ρ_r の間の関係を実験的に求めた。得られた実験式を用いることにより電気検層結果からボーリング孔周辺岩盤の見掛け間隙率を求めることができた。

今後、亀裂の定量評価を透水係数などの指標で行うためには、見掛け間隙率とそれら指標の間の関係についてさらに研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 千葉昭彦、熊田政弘(1994)：花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定 - 間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響について -、物理探査 第47巻、第3号、pp161-172
- 2) 岩本宏、熊田政弘、飯博行、千葉昭彦(1995)：花崗岩の比抵抗と間隙率及び間隙水との関係、土木学会第50回年次学術講演会、第III部門、pp64-65
- 3) Katsube, T. J. and Hume, J. P. (1983): Electrical resistivities of rocks from Chalk River, Proc. Ws. Geophys. Geosci. Res. at Chalk River, pp105-114
- 4) Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. A. I. M. E., 146, pp54-67