

割れ目を含む堆積岩を対象とした原位置透水試験に関する数値解析 NUMERICAL ANALYSES OF IN-SITU PERMEABILITY TESTS FOR SEDIMENTARY ROCK MASS WITH FRACTURES

田中靖治*・重野喜政**

Yasuharu TANAKA and Yoshimasa SHIGENO

We examined Lugeon test at sedimentary rock sites with fractures for its accuracy of measurement of hydraulic conductivity by numerical analyses. The numerical models were cubes with sides of 100 m and included more than 300 fractures. At the test sections with fractures, the hydraulic conductivities from the simulations of Lugeon tests were 3.08 times at the maximum and 1.93 times on average as large as the ones under the steady state. And through the numerical analyses, the influences of the permeabilities of the fracture and the rock matrix on the results of the hydraulic tests became clear.

Key Words: Lugeon test, hydraulic conductivity, sedimentary rock, fracture, numerical analysis

1. はじめに

岩盤の透水性状を調査する場合、我が国では従来ルジオンテストが一般的に行われている。そして、ルジオンテストの結果得られる有効注水圧力と注水量の関係、いわゆる $P \sim Q$ カーブの勾配から理論解により透水係数を算出するということが広く行われている。その理論解の導入にあたっては、(1)岩盤は均質な多孔媒体である、(2)注水により生じる岩盤内の水の流れは定常状態となっている、等の仮定が用いられている。しかし、実際には、花崗岩等の結晶質岩では、地下水は岩盤の割れ目内を選択的に流れ、また、一部の新第三紀堆積岩では、割れ目とマトリクス部の両者での地下水流れが無視できないものの¹⁾、割れ目とマトリクス部は透水性や貯留性が大きく異なり、水理学的に均質な多孔媒体ではない。そのような新第三紀堆積岩においてルジオンテストを行う場合、試験区間から注入された水は、透水性が高く貯留性は小さい割れ目を流れた後、透水性が低く貯留性は大きいマトリクス部へと浸透していくため、定常状態に達するには長い時間を要するものと考えられる。また、試験結果から得られる透水係数が、割れ目やマトリクスの透水係数、割れ目の連続性等、それぞれの岩盤性状にどの程度影響を受けているのかも明らかではない。

本研究では、割れ目がさほど発達しておらず、マトリクス部と割れ目の両者の透水性がルジオンテスト結果に影響を及ぼすような岩盤を対象として、数値解析による模擬透水試験を実施し、ルジオンテストにより得られる透水係数の精度について検討した。また、割れ目やマトリクス部の透水性、および試験区間と交差する割れ目の大きさ等が、試験結果から得られる透水係数に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 解析モデル

本研究においては、解析領域内に多数の割れ目を確率的に発生させた解析モデルを作成した。発生させる

* 正会員 工学博士 (財)電力中央研究所 高レベル廃棄物処分研究プロジェクト

**正会員 修士(工学) (株)竹中工務店 技術研究所

割れ目に比べて解析領域が十分な大きさとなるように、解析領域は一辺の長さ 100m の立方体とした。

割れ目を確率的に発生させるには、割れ目の半径分布、方向、密度等を仮定する必要がある。主に花崗岩の例ではあるが、大野・小島²⁾や井尻ら³⁾は、原位置において様々なスケールで観察された割れ目のトレース長分布から、亀裂・断層のトレース長がスケールに依存しない 1 つのべき乗分布にしたがうことを報告している。また、井尻ら³⁾は、断層を対象とした文献から割れ目トレース長の頻度分布のべき乗数は場所や岩種により 2.0～3.0 の範囲に分布し、割れ目の形状を円盤と仮定することにより、割れ目の半径分布はトレース長のべき乗数に 1 を加えた 3.0～4.0 の範囲に分布するとしている。そこで、本研究において、発生させる割れ目の半径は、べき分布にしたがうものとした。べき分布にしたがう割れ目の半径の確率密度関数は、次式で表される。

$$f(r) = \alpha r^{-\alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{\int_{r_{\min}}^{\infty} r^{-\alpha} dr} = \frac{\alpha-1}{r_{\min}^{1-\alpha}}, \quad r \geq r_{\min}$$

ここに、 α はべき乗数、 α は正規化定数の逆数、 $r_{\min}$ は割れ目半径の最小値である。

本研究においては、べき乗数を 4.0 とした。また、原位置での観察等から、小さい割れ目は一般に透水性が低く、透水試験への影響も小さいと考えられる。本研究においては、 $r_{\min}$ を 5m と仮定した。その結果、上式より α の値は 375 となる。また、割れ目密度については、解析モデルの相対する境界面を割れ目だけで連結する経路が生じない範囲で、できるだけ多くの割れ目をモデル内に発生できるように、試行錯誤を繰り返し、最終的に割れ目の体積密度を 3.75×10^{-4} 条/ m^3 に設定した。割れ目の方向については、特定の方向への集中はなく、ランダムとした。そして、これらの統計量を基に、解析領域内に多数の割れ目を確率的に発生させたモデルを 2 つ作成した（以下、モデル 1、モデル 2 と呼ぶ）。同一の統計量を基に作成したため、割れ目数はモデル 1 の 374 条に対しモデル 2 では 376 条、割れ目の最大半径はモデル 1 の 28.8m に対しモデル 2 では 28.9m、また、いずれのモデルにおいても、相対する境界面を割れ目のみで繋ぐ経路は存在しないなど、2 つのモデルには本質的な違いはない。それぞれのモデルに発生させた割れ目を、図-1、2 に示す。

解析モデルには、模擬透水試験の試験孔とするため、モデル中央に一本、中央からモデルの 4 つの角に向かって 20m 離れた場所にそれぞれ一本づつ、計 5 本の長さ 100m の鉛直ボーリング孔を配置した。

本研究においては、割れ目のみならず、半径 5m 未満の割れ目を含むマトリクス部への地下水の浸透も考

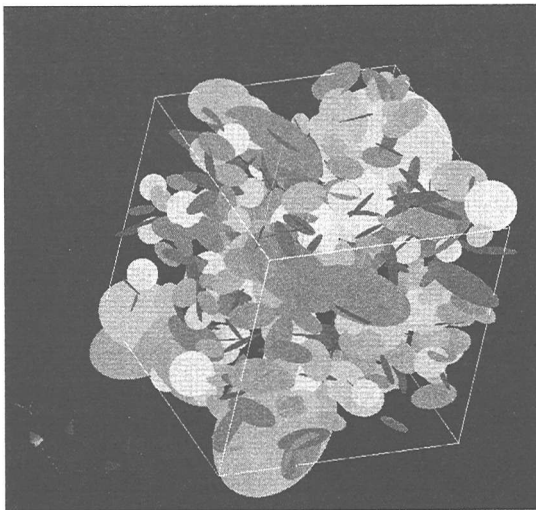


図-1 発生させた割れ目群（モデル 1）

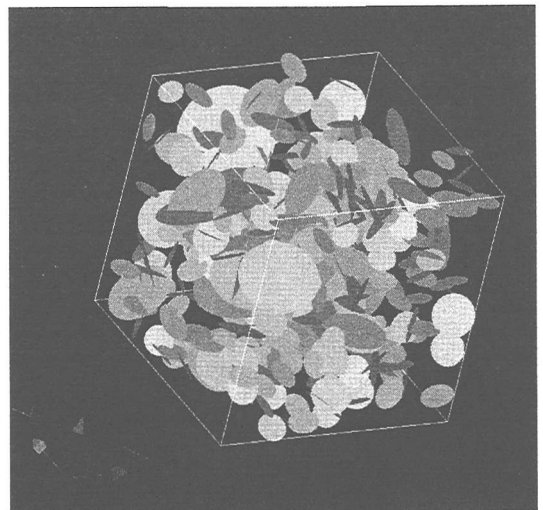


図-2 発生させた割れ目群（モデル 2）

慮できるように、解析領域の有限要素分割にあたっては、割れ目を面要素で表すとともに、マトリクス部を四面体要素で表現した。モデル1では、面要素数 73,614、四面体要素数 1,847,415、節点数 317,377 であり、モデル2では、面要素数 72,074、四面体要素数 1,865,661、節点数 320,209 である。モデル1に対する有限要素メッシュを図-3に示す。

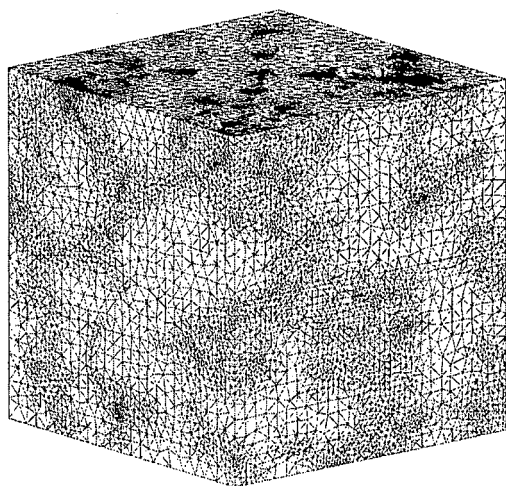


図-3 有限要素メッシュ (モデル1)

3. 解析結果

解析には、電力中央研究所の開発した有限要素法に基づく地下水流動解析コード FEGM⁴⁾を使用した。FEGM は、米国オークリッジ国立研究所の Yeh らが開発した有限要素法に基づく飽和・不飽和鉛直2次元地下水流動解析コード FEMWATER⁵⁾に、空間次元の拡張、演算の高速化や、割れ目を含む有限要素の物性をマトリクス部との体積平均として与えることにより割れ目分布を意識しない要素分割を可能にしたスメアード割れ目機能、kriging による物性値空間分布の推定機能等の改良を加えて作成した解析コードである。

(1) ルジオン試験から得られる透水係数に関する検討

岩盤を対象とした原位置透水試験として我が国で最も一般的に行われているルジオン試験について、数値解析による模擬試験を実施し、その結果について検討を行った。

入力物性値は、マトリクス部と割れ目の両者の透水性がルジオンテスト結果に影響を及ぼすような岩盤を想定して設定した。割れ目の透水量係数と貯留係数は、すべての割れ目についてそれぞれ一律 $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 1×10^{-9} とした。また、マトリクス部の透水係数は $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ で一様とし、比貯留係数に関しては $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ と $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ の2通りの場合について計算を行った。境界条件としては、不透水層に挟まれた水平方向に広がりを持つ地層を想定して、上下面は不透水境界とし、他の境界面はすべて水位固定（不飽和領域が生じないように全水頭ゼロ）に固定した。また、初期状態では、モデル内のすべての点において、全水頭はゼロであるとした。

まず、モデル1のボーリング孔と割れ目との交差箇所について、試験区間長を 1m とし、注水圧力から試験区間の間隙水圧を差し引いた有効注水圧力を $0.098 \text{ MPa} (1 \text{ kgf/cm}^2)$ から 10 分毎に 0.098 MPa ずつ最大 $0.49 \text{ MPa} (5 \text{ kgf/cm}^2)$ まで上げ、その後逆に 0.098 MPa まで段階的に下げた場合の注水量の変化を計算した。ここで、各段階の継続時間を 10 分としたのは、実際の現場での試験において、この程度の継続時間としている例が数多く見受けられるためである。マトリクス部の比貯留係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ としたケースについて、各圧力段階における後半 5 分間の注水流量の平均値と、有効注水圧力との関係の一例を図-4に示す。この計算には Intel Pentium 4 2.00GHz のパソコンを使用し、15,806sec の計算時間を要した。図には参考のために、一定の圧力で無限時間注水を続けた場合（以下、定常状態と呼ぶ）の有効注水圧力と注水流量の関係を示した。定常状態での注水流量は有効注水圧力に比例するため、図には直線で示した。昇圧段階の注水圧力 0.098 MPa と 0.49 MPa の2点間の P~Q カーブの勾配から求めた透水係数は、定常状態での注水圧と流量の関係から得られる透水係数の 3.08 倍となった。「ルジオンテスト技術指針・同解説」⁶⁾によれば、「注入量の測定時間は原則として 5 分間とするが、その間 1 分毎に注入量を測定し、変動が小さい（通常 10% 未満）ことを確認す

る必要がある。」とある。図-4に示したケースでは、降圧過程の0.098MPaを除くすべての圧力段階において、10分間の継続時間で後半5分間の流量の変動が10%未満（最大で7.4%）となったが、降圧過程の0.098MPaの圧力段階では、42分を要した。これは、前の圧力段階までに注入された水が注水区間に一時的に逆流する状態が、10分間では解消されないためである。割れ目を含むすべての区間についてみると、昇圧段階のP~Qカーブから得られる透水係数は、定常状態から得られる透水係数に対して、マトリクス部の比貯留係数が $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ の場合には1.15~3.08倍（平均1.93倍）、 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ の場合には1.03~1.74倍（平均1.29倍）となる。

比較のため、割れ目を含まない区間についても同様な計算を実施した。その結果得られたP~Qカーブを図-5に示す。P~Qカーブの勾配は定常状態と大差なく、昇圧段階の勾配から求めた透水係数は、定常状態での透水係数の1.07倍でほぼ一致していた。

次に、定常状態との乖離が最も顕著な図-4に示した区間について、各圧力段階の継続時間を20分あるいは60分とした模擬透水試験を実施した。マトリクス部の比貯留係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ とした場合のP~Qカーブ（昇圧段階）を図-6に示す。各圧力段階の継続時間を増やすにつれて、P~Qカーブの勾配は定常状態の勾配に近づく。ただし、同図のP~Qカーブから得られる透水係数は、定常状態での透水係数に対して、継続時間が10分の場合に3.1倍、20分の場合に2.6倍であり、継続時間を60分にしても1.9倍にまでしか下らない。

さらに、マトリクス部の比貯留係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ とし、一定圧力で注水を続けた場合の注水量の変化を計算した。各時刻での注水量を定常状態の注水量で正規化したグラフを図-7に示す。割れ目を含まない区間では、10分後には注水量は既に定常状態の1.2倍以下になっているのに対し、割れ目を含む区間（図-4、6と同一の区間）では1時間後でも定常状態の2.6倍となっている。これが、図-4と図-6のP~Qカー

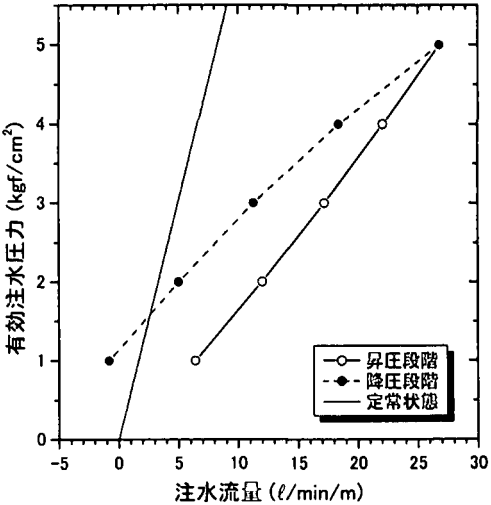


図-4 模擬透水試験によるP~Qカーブの例（試験区間に割れ目を含む）

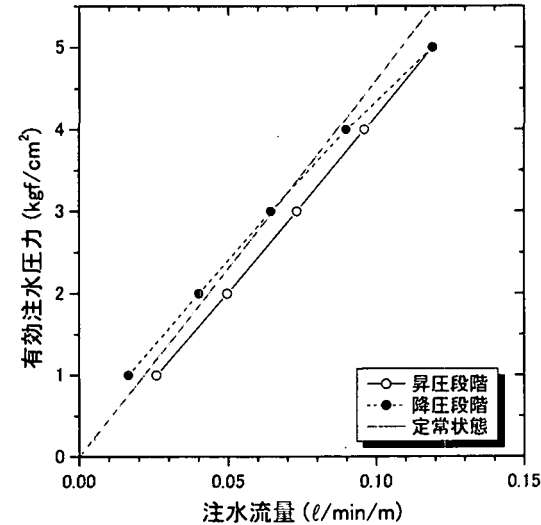


図-5 模擬透水試験によるP~Qカーブの例（試験区間に割れ目を含まない）

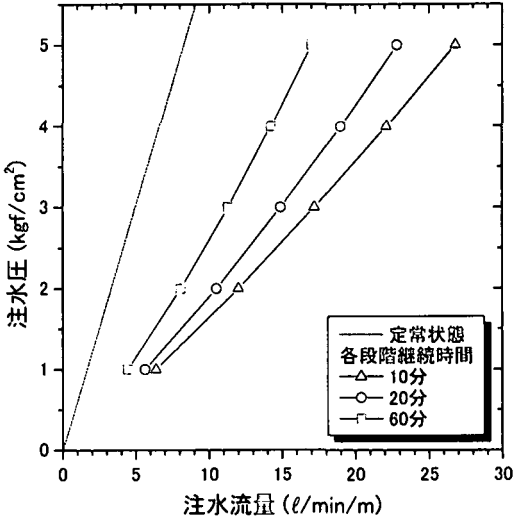


図-6 各圧力段階の継続時間とP~Qカーブの関係の一例（試験区間に割れ目を含む）

ブの違いとなって現れているものと考えられる。本研究において想定した岩盤では、マトリクス部の透水性が高いため、注入された水は割れ目内を注入区間から割れ目の端部に向かって流れていくとともに、その途中の割れ目面からマトリクス部へも流れていく。したがって、特にマトリクス部の比貯留係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ と大きくした場合には、割れ目の末端まで圧力が定常状態に達するには非常に時間がかかり、その結果注水量もなかなか一定にならない。一方、割れ目を含まない区間では、注水量は、注水区間近傍のマトリクス部の動水勾配のみに支配されるため、定常状態に達するのが早い。

(2) 定常状態での注水量から得られる透水係数に関する検討

ここでは、定圧注水法による原位置透水試験において、定常状態における注水量が測定できたものと仮定して、試験により得られる透水係数と割れ目との関係について、検討を行う。

モデル 1 および 2 において、各ボーリング孔と割れ目との交差箇所について、試験区間長を 1m とし、一定圧力で注水を続けた場合の定常状態での注水量を計算した。その際、境界条件は、(1)と同様に、上下面は不透水境界とし、他の境界面はすべて全水頭ゼロに固定した。

まず、割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、マトリクス部の透水係数を $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ として、定常状態での試験区間からの注水量を計算した。そして、注水圧力と注水量との関係を基に、以下の式⁶⁾により各試験区間の透水係数（以下、区間透水係数と呼ぶ）の算定を行った。

$$k = \frac{Q}{2\pi PL} \cdot \ln \frac{L}{r}$$

ここで、 k は区間透水係数、 P は有効注水圧力、 L は試験区間長、 r はボーリング孔の半径である。割れ目を含む区間の区間透水係数は、最大値 $2.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、最小値 $1.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 、対数平均値 $7.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ となった。各試験区間には割れ目が 1 本ずつ含まれており、割れ目が無限遠まで広がっていれば、割れ目の透水量係数が $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、試験区間長が 1m であり、マトリクス部へも水が流れることから、区間透水係数は少なくとも $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ よりも大きくなるはずである。区間透水係数がその値を下回るのは、割れ目の密度がそれほど大きくなく、割れ目のネットワークの広がり有限であるためである。割れ目の密度が大きく連続性が高い結晶質岩を対象とした場合、試験区間と交差する割れ目の透水量係数を、試験区間の透水量係数から推定する方法がしばしば用いられる⁷⁾。しかし、今回の解析結果は、そのような割れ目の透水量係数の推定方法が、割れ目の連続性が比較的乏しい岩盤においては、あまり有効でない場合があることを示唆している。

今回対象としたようなマトリクス部にもある程度透水性があり、割れ目の連続性が乏しい岩盤では、試験区間から注入された水は、主にまず割れ目の中に入り、それから割れ目内部を周縁部に向かって浸透するとともに、割れ目面からマトリクス部へと浸透していくものと考えられる。各試験区間と交差する割れ目の面積と区間透水係数との関係を図-8に示す。交差する割れ目の面積が大きいほど区間透水係数が高いという傾向はあるものの、相関性は強いとは言えない。交差する割れ目の面積が同程度であっても、それが孤立した割れ目である場合に比べて、その割れ目が他の割れ目と交差しクラスターを形成している場合の方が、区間透水係数は大きくなる。各試験区間と交差する割れ目とともにクラスターを形成する全割れ目の面積の合計値（交差割れ目が孤立している場合にはその割れ目の面積のみ）と区間透水係数との関係を、図-9に

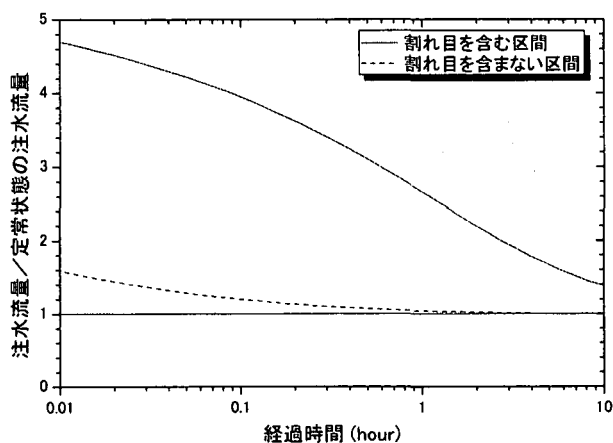


図-7 一定圧力で注水し続けた場合の流量と定常状態の注水量との比の時系列変化

示す。クラスターの割れ目面積と区間透水係数との間には、比較的良好な相関関係がみられる。ただし、同図において、同一の割れ目クラスターに属する複数の割れ目がそれぞれボーリング孔と交差する場合、大きい割れ目と交差する試験区間の方が大きな区間透水係数となる傾向もみられる。

次に、割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合と、 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合について、各試験区間の定常状態での注水量を計算し、区間透水係数を算定した。割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合、区間透水係数は、割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合の 10 倍にはならず、最大で 9.49 倍、最低で 1.07 倍、平均で 3.7 倍の変化にとどまった。割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合の区間透水係数に対して割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合の区間透水係数の増率と、各試験区間と交差する割れ目が属する割れ目クラスターの面積との関係を図-10 に示す。相関性は強いとは言えないが、クラスターの面積が大きいほど区間透水係数の増率が大きくなる傾向が全体的にはみられる。割れ目の透水量係数が小さい場合には、割れ目内部での圧力の減衰により、割れ目端部付近からのマトリクスへの水の流入が少ないが、割れ目の透水量係数が大きい場合には、割れ目内部の圧力の減衰が少なく、割れ目端部からもマトリクス部へ水が流入する。そのため、クラスターの面積が大きいほど、割れ目の透水量係数の影響が強く表れたものと考えられる。同様に、割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合、区間透水係数は、割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定した場合の 1/10 にはならず、0.15~0.71 倍、平均で 0.31 倍の変化となった。本研究で設定したような岩盤では、試験区間から注入された水は、割れ目の中を浸透していくとともに、割れ目面からマトリクス部へも浸透していく。そのため、注水量は、割れ目の透水性だけではなく、マトリクス部の透水性にも依存することとなるため、区間透水係数は割れ目の透水量係数に単純には比例しなくなるものと考えられる。

続いて、試験区間と交差する割れ目の透水係数が区間透水係数に与える影響を調べるために、試験区間と交差する割れ目のみ透水量係数を $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

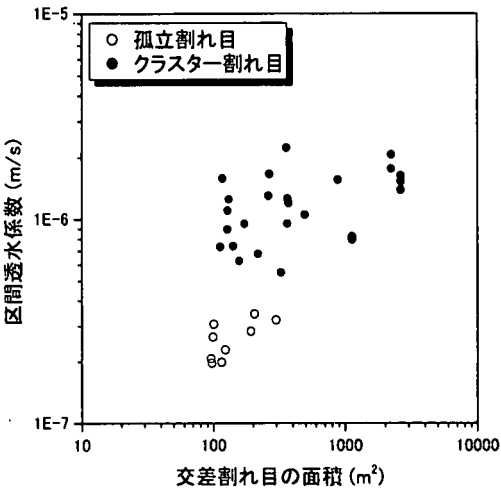


図-8 区間透水係数と交差割れ目の面積の関係

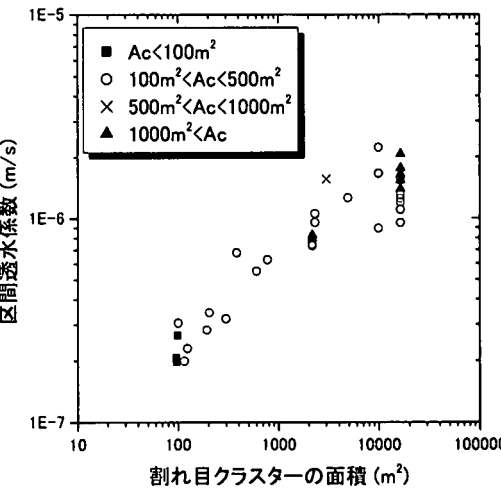


図-9 区間透水係数と割れ目クラスターの面積 (Ac は試験区間と交差する割れ目の面積)

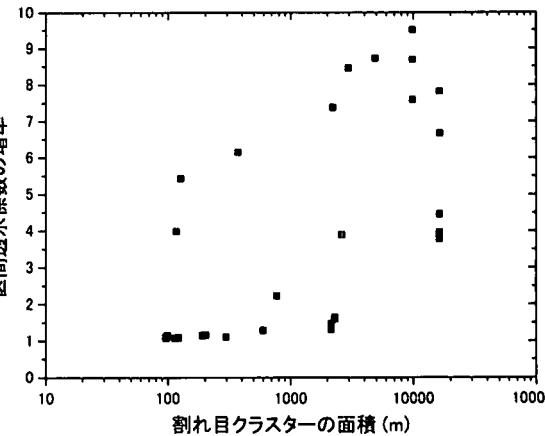


図-10 割れ目の透水性を 10 倍にした場合の区間透水係数の増率と割れ目クラスターの面積の関係

とし、他の割れ目の透水量係数は $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ として、試験区間からの注水量を計算した。その結果から得られる区間透水係数を k_i 、すべての割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ とした場合の区間透水係数を k_{i-4} 、すべての割れ目の透水量係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とした場合の区間透水係数を k_{i-5} とする。そして、試験区間と交差する割れ目の透水係数が区間透水係数に与える影響の度合いを表す指標 S を次式により定義する。

$$S = \frac{k_i - k_{i-5}}{k_{i-4} - k_{i-5}}$$

試験区間と交差する割れ目の面積がその割れ目の属するクラスターの全割れ目面積に占める比率と、指標 S との関係を図-11 に示す。同図において、 S の値は交差割れ目の面積比率を概ね上回っている。つまり、試験区間と交差する割れ目の透水性は、その割れ目が属するクラスター内での面積比以上に、区間透水係数に影響を与える可能性がある。これは、試験区間と交差する割れ目の透水性が高い場合に、その割れ目内での圧力の減衰が小さくなり、より多くの水が割れ目からマトリクス部へ流れるためであると考える。

最後に、割れ目の透水量係数は $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ としたままで、マトリクス部の透水係数を $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ に下げて、定常状態での注水量の計算を行った。その結果を図-12 に示す。交差する割れ目が割れ目面積 $3,000\text{m}^2$ 以下のクラスターに属する試験区間では、区間透水係数は、マトリクス部の透水係数にほぼ比例して、マトリクス部の透水係数が $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ の場合の $0.011 \sim 0.027$ 倍となった。一方、交差する割れ目が割れ目面積 $3,000\text{m}^2$ 以上のクラスターに属する試験区間では、区間透水係数は $0.26 \sim 0.94$ 倍となった。このように、交差割れ目が属するクラスターの面積により、区間透水係数に対するマトリクス部の透水係数の影響度に違いがみられた。これは、面積が大きい割れ目クラスターでは、マトリクス部の透水量係数が小さくなくても、割れ目内部での圧力の減衰が小さくなることにより、割れ目周縁部からのマトリクス部への水の流入が相対的に大きくなり、マトリクス部の透水量係数の減少による影響が少なくなるものと考える。

4. おわりに

割れ目がさほど発達しておらず、マトリクス部と割れ目の両者の透水性がルジオンテスト結果に影響を及ぼすような岩盤を対象として、数値解析による模擬透水試験を実施し、原位置透水試験の測定精度、および透水試験から得られる透水係数に影響を及ぼす要因について検討を行った。

その結果、本研究において想定したような岩盤では、試験区間に割れ目を含む場合に、現実的な測定時間による試験では、注水状況が真に定常状態にはならず、透水係数を過大評価する可能性があること

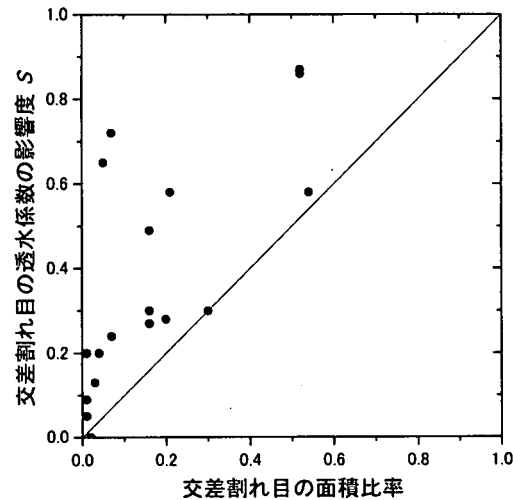


図-11 区間透水係数に対する交差割れ目の影響度とクラスター内での面積比の関係

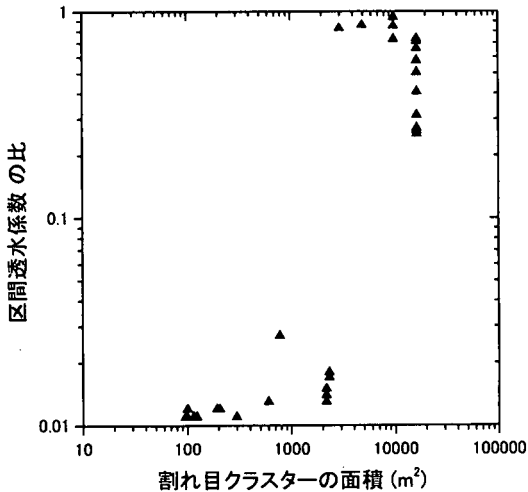


図-12 マトリクス部の透水係数が $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ の場合と $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ の場合の区間透水係数の比と割れ目クラスターの面積の関係

が明らかとなった。また、割れ目のネットワークの広がり有限であるため、試験により得られた透水係数と試験区間長との積が、試験区間と交差する割れ目の透水量係数を下回ることが示された。そして、試験区間と直接交差する割れ目の面積というよりも、その割れ目が属する割れ目クラスターの全割れ目面積の方が、試験区間の透水係数との相関性が強いことが明らかとなった。さらに、試験区間の透水係数は、マトリクス部の透水係数が同じである場合、割れ目の透水量係数には比例せず、同様に、割れ目の透水量係数が同じである場合、マトリクス部の透水係数には比例しないことがわかった。また、試験区間と交差する割れ目の透水性は、その割れ目が属するクラスター内での面積比以上に、区間透水係数に影響を与えることが明らかとなった。

以上に示したように、割れ目があまり発達しておらず、マトリクス部と割れ目の両者の透水性がルジオンテスト結果に影響を及ぼすような岩盤において原位置透水試験を実施する場合には、得られる透水係数にはある程度の誤差を含む可能性があることに注意する必要がある。特定のサイトにおいて、その可能性の有無を確認するには、多数の試験区間の中から数点を抽出し、長時間にわたる定圧注水試験を実施することなどが考えられる。また、露頭調査やコア観察、テレビカメラを用いたボーリング孔内壁面観察等により、サイトの割れ目特性を把握しておくことや、室内試験によりマトリクス部の透水係数等を測定することも重要であると考えられる。

今後、様々な条件で数値解析を行い、原位置岩盤透水試験法の精度や試験結果の解釈の仕方について、さらに検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 井尻裕二、澤田淳、赤堀邦晃：我が国の岩盤の水理特性について、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8400 99-090、1999.
- 2) 大野博之、小島圭二：岩盤割れ目のフラクタル（その2）－フラクタル特性と分布のばらつき－、応用地質、第34巻第2号、pp.12-26、1993.
- 3) 井尻裕二、澤田淳、内田雅大、石黒勝彦、坂本和彦：割れ目ネットワークモデルを用いた岩盤中の核種移行解析、亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム、2001.
- 4) 河西基、田中靖治、五十嵐敏文：高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発（その1）－割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法－、電中研研究報告 U93054、1994.
- 5) Yeh, G. T. *et al.* : FEMWATER. A finite-element model of water flow through saturated -unsaturated porous media, ORNL-5567, 1979.
- 6) (財)国土開発技術研究センター：ルジオンテスト技術指針・同解説、1984.
- 7) 例えば、核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－、1999.