

## 軟岩に対する透水性変化予測手法の一提案

清水建設 正会員 郷家光男，正会員 石井 卓

地層科学研究所 正会員 里 優，正会員 木下直人，正会員 菅原健太郎

1.はじめに 岩盤中に空洞を掘削すると、岩盤の性質が変化する領域（掘削影響領域）が生じる。透水性の変化は放射性廃棄物地層処分の安全性を評価する上で、特に重要と考えられている。これまで、筆者らは硬岩を対象として、応力再配分による既存割れ目の開口に着目したモデルの開発を行ってきた<sup>1)</sup>。一方、軟岩に目を向けると、原位置における計測例<sup>2)</sup>はあるが、予測手法に関する研究はほとんど行われていない。

本報告では、筆者らが開発した仮想割れ目モデルの考え方<sup>1)</sup>を発展させて、軟岩に適用する方法を提案し、解析例を示す。

2.巨視的透水係数の算定 岩盤のある領域における巨視的な透水係数を求めるために、体積による重み付け平均を用いる。図-1 の様に岩盤の基質部と割れ目部で透水性が異なり、割れ目部の体積が岩盤の体積  $V$  に対して十分に小さいと仮定すると、巨視的な透水係数  $k$  は、

$$k = k_0 + \frac{1}{V} \sum_f V_f k_f \quad (1)$$

となる。ここに、 $k_0$  は基質部の透水係数、 $V_f$ 、 $k_f$  は割れ目の体積と透水係数である。式(1)を一般化し、割れ目を半径  $r_f$  の円盤でモデル化したとき、式(1)の右辺第2項の割れ目部成分は、

$$k_{ij}^r = \rho_f \sum_f \pi r_f^2 e_f k_f (\delta_{ij} - n_i^f n_j^f) D_f \quad (2)$$

となる<sup>1)</sup>。ここに、 $\rho_f$ 、 $e_f$  は割れ目の体積密度と水理学的開口幅、 $\delta_{ij}$

は Kronecker のデルタ、 $D_f$  は割れ目の法線ベクトル  $n^f$  の相対頻度を示す関数である。割れ目の透水係数  $k_f$  は応力依存性を有するが、単一割れ目を対象とした実験により求めることができる。

軟岩では基質部の透水性は無視できないと考えたとき、基質部の透水性を支配しているのは、図-1 の様に空隙を形成する既存のマイクロクラックであると考えられる。この既存のマイクロクラックの体積と透水性を考慮すれば、基質部の透水テンソルも割れ目部と同じように定式化ができる。よって、マイクロクラックを半径  $r_c$  の円盤でモデル化すると、式(1)は、

$$k_{ij} = \rho_c \sum_c \pi r_c^2 e_c k_c (\delta_{ij} - n_i^c n_j^c) D_c + \rho_f \sum_f \pi r_f^2 e_f k_f (\delta_{ij} - n_i^f n_j^f) D_f \quad (3)$$

となる。ここで、 $\rho_c$ 、 $e_c$ 、 $k_c$  はマイクロクラックの体積密度、水理学的開口幅および透水係数、 $D_c$  はマイクロクラックの法線ベクトル  $n^c$  の相対頻度を示す関数である。 $k_f$  と同様に  $k_c$  も応力依存性を有していれば、式(3)の右辺第1項の基質部成分も応力依存性を示すことになる。

割れ目の方向分布  $D_f$  とマイクロクラックの方向分布  $D_c$  が評価できれば、軟岩においても平均的な透水係数を求めることができる。仮想割れ目モデルでは目視観測などにより方向分布を求めるのではなく、計測で得られた透水テンソルから、これと同じ透水性を示すように方向分布  $D_f$  を評価する<sup>1)</sup>。したがって、基質部についても、実験などにより透水テンソルを求めて、その結果から方向分布  $D_c$  を評価することになる。

3.透水性の応力依存性 石井ら<sup>3)</sup>は、来待砂岩の割れ目や基質部を対象とした室内透水試験を行い、いずれの透水性も応力依存性を示すこと、および、割れ目の透水係数と垂直応力の関係式を示している。その文献<sup>3)</sup>には、基質部の透水係数の関係式が示されていないが、同様の式を用いて表現することが可能である。基質部のデータの内、最も応力依存性が大きい結果(試料 a1)より、基質部の透水係数  $k_m$ (m/s)と拘束圧  $\sigma_0$ (MPa)

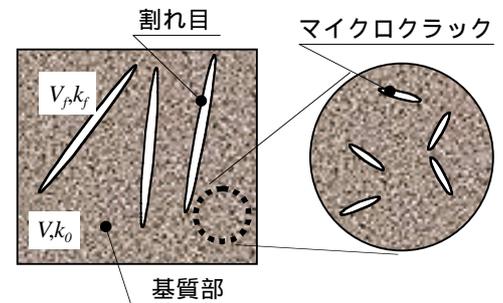


図-1 軟岩系岩盤における透水モデル

キーワード：掘削影響領域，軟岩，透水係数，応力依存性，放射性廃棄物，地層処分

連絡先：〒135-8350 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設技術研究所 Tel.03-3820-5451 Fax.03-3820-5959

の関係は次式のように表される（図-2 参照）。

$$\log_{10} k_m = \frac{\sigma_0}{-2.2 - 1.75\sigma_0} + \log_{10} 1.2 \times 10^{-9} \quad (4)$$

ここで、 $k_m$  はマイクロクラック 1 個あたりの透水係数  $k_c$  ではないことに注意が必要である。これは、次の様にして求めることができる。

マイクロクラックの透水係数の平均値  $\bar{k}_c$  や体積の平均値  $\bar{V}_c$  を用いて、クラック総数  $N_c$  だけ重ね合わせると、

$$k_m = \frac{N_c \bar{V}_c}{V} \bar{k}_c = \omega \bar{k}_c \quad (5)$$

となる。ここに、 $\omega$  は基質部の間隙率で、この試料の場合は  $\omega=26.9\%$ <sup>3)</sup> であった。よって、平均値  $\bar{k}_c$  をマイクロクラック 1 個あたりの透水係数  $k_c$  (m/s) と見なせば、式(4)、式(5)より、

$$\log_{10} k_c = \frac{\sigma_{cn}}{-2.2 - 1.75\sigma_{cn}} + \log_{10} 4.46 \times 10^{-9} \quad (6)$$

となる。ここに、 $\sigma_{cn}$  はマイクロクラックに作用する垂直応力(MPa)である。

**4. 解析例** 基質部成分の影響がどの様に現れるのかを確認するために、三次元有限要素解析を行い、坑道周辺の透水性の変化を調べた。応力は線形弾性解析により求めた。坑道形状は、高さ 12m、幅 13m、アーチ部 R6.5m の馬蹄形とした。岩盤の物性は、文献<sup>4)</sup>の軟岩系データセット SR-C を引用し、初期地圧は土被り 100m、 $\sigma_v$ =単位体積重量×深度、 $\sigma_h=1.0\sigma_v$ 、GL-100m での初期透水係数を  $k=1.0 \times 10^{-9}$  m/s とした。解析上、坑道軸方向を y 方向（図-3 参照）とした。割れ目の法線ベクトルの卓越方向は坑道軸方向（図-4 参照）で、ほとんどの割れ目は坑道に直交して、基質部の透水性は等方的であったと仮定した。

これらの条件のもとに、掘削前後の透水テンソルを式(3)により求め、透水係数の変化率を算定した。坑道軸方向の透水係数 ( $k_{yy}$ ) の変化率を図-5 に示す。図-5 によると、坑道近傍全体にわたって、透水係数はわずかではあるが増加しているのがわかる。これは、割れ目の垂直応力（ほぼ  $\sigma_y$ ）は掘削前後で変化してないので、透水テンソルの割れ目部成分は増加していないが、坑道壁面に平行な面を持つ基質部のマイクロクラックの垂直応力（ほぼ  $\sigma_r$ ）が減少したことにより、基質部成分の増大が寄与したためである。ただし、マイクロクラックの透水係数の応力依存性は割れ目ほど大きくないために、急激に増加するまでには至っていない。

**5. まとめ** 基質部の透水性に仮想割れ目モデルの考え方を応用することにより、軟岩の透水性変化を予測する方法について説明した。また、解析例により基質部成分の効果を確認することができた。

今後の課題として、より深部の空洞に対して適用する場合、既存割れ目と基質部に対するせん断の影響が顕著になることが考えられ、それらについても考慮していく必要があると考えている。

**参考文献** 1) 桜井ほか：第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.43-49, 1999. 2) 杉原ほか：土木学会論文集, No.589/III-42, pp.239-251, 1998. 3) 石井ほか：第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.301-305, 2001. 4) 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, 分冊 2 地層処分の工学技術, 1999.

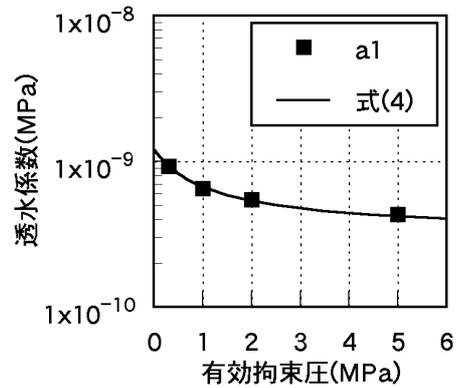


図-2 基質部透水性の応力依存性

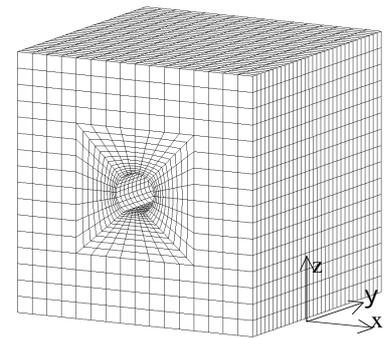


図-3 解析メッシュ図

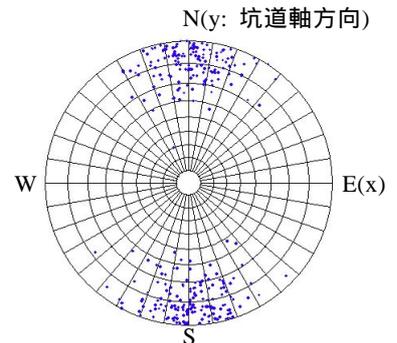


図-4 割れ目部の配向性

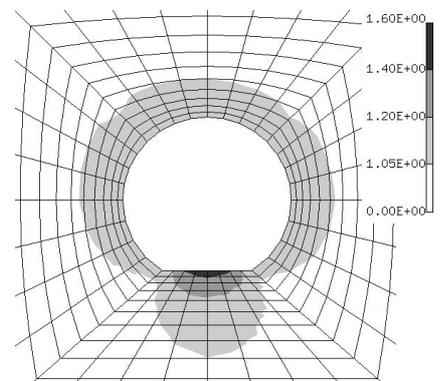


図-5 坑道軸方向の透水係数変化率