

透水係数の応力依存性を考慮した解析手法による坑道ゆるみ域の試算

清水建設株式会社技術研究所^{*)} 正会員 石井 卓, 正会員 桜井 英行, 正会員 郷家 光男
株式会社地層科学研究所 正会員 里 優, 正会員 菅原 健太郎, 正会員 木下 直人

1. はじめに

最近では, 地下空洞の掘削に伴って周辺岩盤の力学的性質, 水理学的性質あるいは地球化学的性質が変化する領域を「掘削影響領域」と呼んで着目されるようになり, 我が国においても実測例がいくつか報告されている⁴⁾. 特に, 透水性の変化は, 放射性廃棄物の地層処分安全性を評価する上で重要である。

掘削に伴う透水性変化の原因の一つとして, 応力再配分による既存割れ目の開口を挙げることができ, 硬質岩ではこの現象が主要な因子となっていると考えられる。著者らは, 多田ら²⁾の研究を発展させて, 空洞掘削に伴う岩盤の透水性変化を予測するための手法を開発した¹⁾. 予測結果は三次元異方性の透水係数の分布形情報として出力される。

2. 仮想割れ目モデルの概要

本手法は, 岩盤の透水性が割れ目の分布と各割れ目の透水性により決定されると考える。なお, 割れ目の大きさは, 考えている構造物の規模に比べて十分小さい場合に限定し, 割れ目の空間分布は無数に均質異方的に分布していると仮定する。予測手順は以下のとおりである。

- 1) 初期状態の岩盤について計測により原位置の透水テンソルを求める。
- 2) 仮想的な割れ目システムをモデル上にて発生させ, 計測された透水テンソルと同じ透水性になるように仮想割れ目モデルのパラメータを設定する。
- 3) この割れ目システムで特徴づけられる岩盤に空洞を掘削した場合の力学解析を行い, 応力変化量を要素毎に計算する。
- 4) 室内試験で得られた単一割れ目の透水性の応力依存性カーブに基づいて, 要素毎の応力変化量に相当する割れ目の透水係数変化量を算定し, 各要素の三次元透水性がどのように変化するかを予測する。

本手法では, 小さな割れ目が無数に分布しており, その空間分布は均質異方性を有していると仮定している為, 個々の割れ目はその方向によってのみ特徴づけられる。ここでは, 割れ目の放線ベクトルを Bingham 分布により近似し, 無数の (実際には十分に多数の) 割れ目システムを発生させている。Bingham 分布は $k_1 \sim k_3$ の関数で, 一般的には, $k_3=0$ であり, 係数を丸めて次式で Bingham 分布を表現することができる。

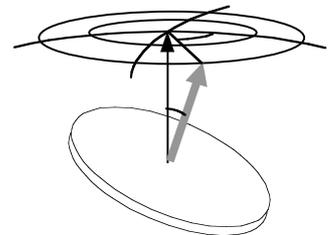


図-1 割れ目の方向の定義

$$f(n) = c \exp\{(k_1 \cos^2 \phi + k_2 \sin^2 \phi)\} \sin^2 \theta \quad (c: \text{正規化のための係数}) \quad (1)$$

割れ目の透水性 k_f が応力依存性を示すことは, 既往の研究により明らかであり, 多田ら²⁾より以下の式が提案されている。

$$\log_{10} k_f = \frac{\sigma_n}{-2.44 - 0.28\sigma_n} + \log_{10} 2.2 \times 10^{-3} \quad (\sigma_n: \text{割れ目の垂直応力}) \quad (2)$$

割れ目の方向分布が定まり, 各割れ目面の垂直応力が算定できれば, 割れ目毎の透水係数を求めることができる。各割れ目の透水係数を割れ目の方向分布を考慮して重ね合わせることで掘削影響を受けた後の周辺岩盤の透水テンソルを求める。例えば平行な割れ目が多数分布し

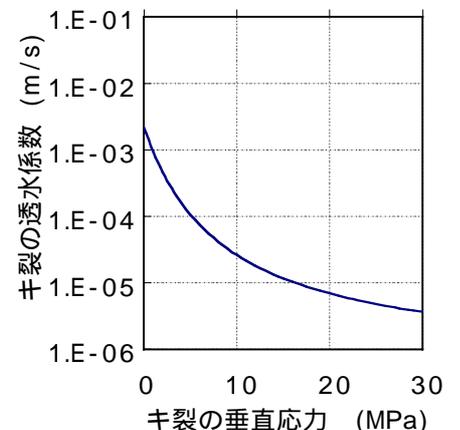


図-2 割れ目透水性の応力依存性²⁾

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

連絡先: 〒135-8350 江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 Tel.03-3820-5476 Fax.03-3820-5959

ている場合には、平行平板流れを仮定して岩盤の透水係数 k_r を割れ目の透水係数、密度 η 、水理的開口幅 e を用いて、次のように結びつけることができる。

$$k_r = \eta e k_f \quad (3)$$

本手法では、(3)式を体積の重みをつけて平均化し、面に沿う方向の割れ目の透水係数を座標変換後に加え合わせて、岩盤の3次元透水テンソルを求める。例えば、割れ目を円盤状とモデル化した場合には次のようになる。

$$k_{ij}^r = \rho \sum_f \frac{\pi r_f^2}{4} e_f k_f (\delta_{ij} - n_i n_j) D \quad (4)$$

ここに、 D は割れ目の法線ベクトルの方向頻度を表す密度関数であり、本手法では Bingham 分布を用いている。以上により、割れ目の体積密度 ρ と割れ目の方向 n 、ならびにその頻度 D が定められれば、応力依存性を考慮して岩盤の透水テンソルを求めることができる。

3. 解析例

本手法の妥当性を検討するために、三次元有限要素解析を行い、空洞周辺の透水性の変化を調べた。空洞形状は、高さ 5m、幅 5m、アーチ部 R2.5m の馬蹄形とした。岩盤物性は、文献⁴⁾の硬岩系データセットを引用し、初期地圧は、土被り 1000m を想定し、 $\sigma_v = \text{岩盤密度} \times \text{深度}$ 、 $\sigma_h = 1.5 \sigma_v$ とした。

図-5 は線形弾性解析により求めた応力場である。馬蹄形空洞では、鉛直方向の応力が底盤部で減少し、坑道に直交する水平方向の応力が側壁部で減少する。その応力変化に伴う空洞周辺の透水性の変化を本手法で求めると図-5 のようになる。図-5 は、坑道軸方向の透水係数の変化を掘削前後の比で表しており、坑道側壁と底盤で透水性が増大していることがわかる。

堀田ら³⁾は、結晶質岩坑道での計測から、底盤の坑道軸方向透水性分布に基づく掘削損傷領域の範囲は 50~60cm 程度で、母岩の透水性より最大で 2 オーダー程度高くなっていたと報告している。岩盤条件は異なるが図-5 の結果の妥当性を裏付けている。なお、本手法では、透水性の三次元的な変化を計算できるので、図-6 のような切羽周辺での透水性変化も評価できる。

4. まとめ

仮想割れ目モデルによる掘削影響領域の透水係数の変化を予測する本手法は硬質岩に対して適用できる可能性を示すことができた。我が国の硬質岩盤内空洞における実測例との対比をさらに実施して、本手法の妥当性を明らかにする予定である。

今後の課題として、本手法を軟質岩に適用する場合には、既存の割れ目に与えるせん断ひずみの影響と塑性挙動による応力ひずみ分布の影響について考慮する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 桜井, 里, 木下, 石井: 掘削の影響による岩盤透水性の変化に関する研究, 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) 多田, 木下, 若林: 岩盤割れ目の透水係数と応力との関係を用いた空洞周辺岩盤の透水性変化の予測手法, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演 論文集, pp.139-144, 1994
- 3) 堀田, 木下, 松井, 杉原: 坑道底盤の坑道軸方向透水性の計測, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.166-170, 1999
- 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 地層処分の工学的信頼性, 1999

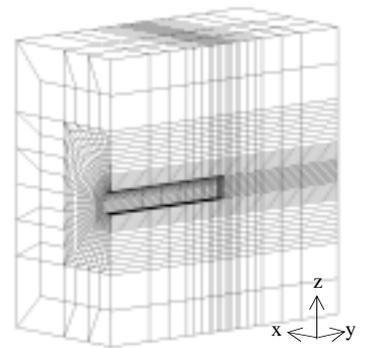


図-3 解析メッシュ

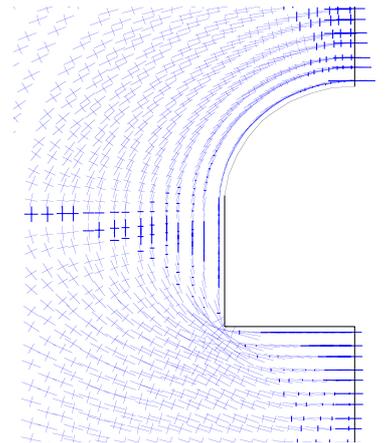


図-4 主応力図

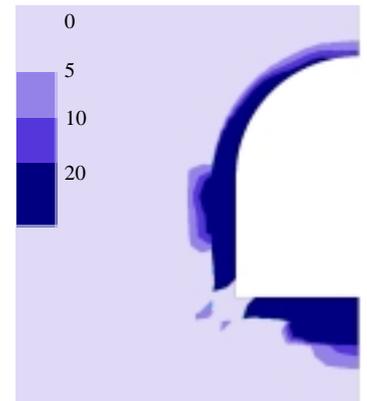


図-5 坑軸(y)方向の透水性

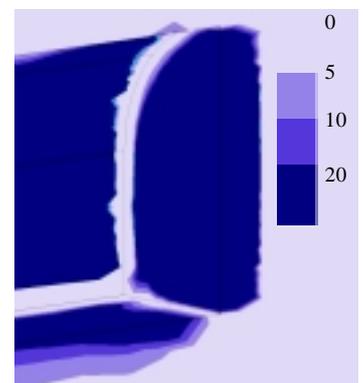


図-6 z 方向の透水性