

DFN モデルの水理学的パラメータ推定手法—説明性向上のための予察的検討—

鹿島建設(株) 正会員 石橋正祐紀 三好貴子 升元一彦
 日本原子力研究開発機構 尾上博則
 (株)地層科学研究所 川原秀二 ○関野真登

1. 背景と目的

花崗岩などの硬岩では、主に割れ目が地下水の移行経路となる。そのため、地下水流動の評価に際しては、割れ目分布の不均質性を再現できる割れ目ネットワーク (DFN) モデルが用いられることが多い。DFN モデルを構築するためには、割れ目の分布や透水性を確率論的に表現するための数値モデル (パラメータセット) を推定する必要がある。一方、近年、このような専門性の高いパラメータの推定アプローチや根拠に対する説明性が求められることが多い。そこで、本報では、DFN モデルに適用する水理学的なパラメータの推定に着目し、説明性向上に資するための予察的な検討を実施した。

2. 実施内容と結果

本報では、割れ目の水理学的特性のパラメータセットの推定において「定量化」と「見える化」を試行した結果を示す。具体的には、割れ目の幾何学的特性のパラメータセットを用いて、「DFN モデルの構築」、DFN モデル内への「原位置水理試験区間を模したボーリング孔のモデル化」、「仮想水理試験解析 (浸透流解析)」、「実測値との比較結果の整理」の手順で実施した。なお、割れ目の透水性分布については、既報¹⁾に基づき、割れ目の半径と透水量係数に $T = \log \text{norm}(\mu, \sigma) \times r^c$ (T : 透水量係数, μ : 対数平均, σ : 対数標準偏差, r : 割れ目半径, C : 定数) の関係性があると仮定した (μ , σ , C は推定パラメータとなる)。

2.1 使用したデータと割れ目の幾何学的特性のパラメータセット

本報で使用したデータセットは、岐阜県瑞浪市に位置する瑞浪超深地層研究所 (日本原子力研究開発機構) の地下 500m に分布する土岐花崗岩中の坑道壁面調査ならびにボーリング調査で取得された割れ目情報や水理試験情報で構成される。このうち、割れ目の幾何学的特性に関するパラメータセットについては、表-1 に示す既報¹⁾で推定されたものを用いた。

2.2 DFN モデルの構築

モデル化領域を 100m×100m×100m (以下、100m 領域; 図-1) とし、パラメータセット (表-1) を用いて DFN モデルを構築した。100m 領域の DFN モデルを構築する際、モデル化領域の境界付近では境界の外側から延びる割れ目が生成されず、割れ目密度が低下する傾向にある。そこで、200m×200m×200m の領域で DFN モデルを構築し、中央部から 100m 領域を切り出した (図-1)。なお、確率論的なばらつきを考慮するため、50 リアライゼーションの DFN モデルを構築した。

表-1 割れ目の幾何学的特性のパラメータセット¹⁾

方位区分	傾斜方位 [deg.]	傾斜 [deg.]	Fisher K [-]	べき乗数 [-]	P32 [m ² /m ³]
set1	202.9	87.8	18.5	3.1	0.43
set2	150.6	89.6	17.8	3.4	0.13
set3	80.7	86.2	15.3	4.7	0.05
set4	210.7	30.3	12.1	3.3	0.08

※方位記載は北から時計回り・水平下向きの角度

※P32 は三次元割れ目密度

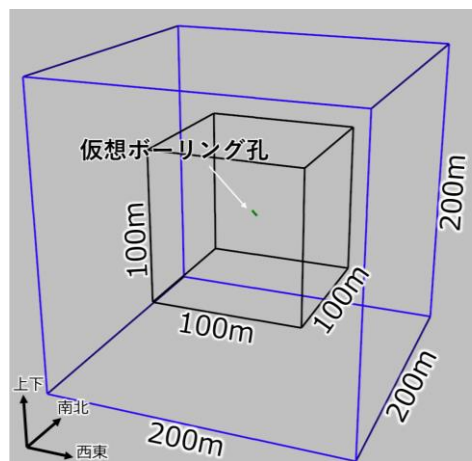


図-1 解析領域

キーワード 割れ目ネットワークモデル, DFN モデル, 地下水流動解析, パラメータ推定

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-6647

2.3 原位置水理試験区間を模したボーリング孔のモデル化

原位置水理試験は、N10°W 方向のほぼ水平傾斜のボーリング孔（試験区間は平均 12.2m）で実施され、区間透水係数が取得されている。そこで、仮想ボーリング孔は、100m 領域の中心に N10°W の水平ボーリング孔（孔長：12.2m）でモデル化した（図-1）。

2.4 仮想水理試験解析（浸透流解析）

2.3 までに構築した 50 リアライゼーションの DFN モデルを用いて、仮想水理試験解析を実施した。具体的には、割れ目の透水量係数分布のパラメータである μ , σ , C を変更し、外側境界と仮想ボーリング孔の水頭差を 1m として浸透流解析を実施した。その後、出力された仮想ボーリング孔の流量から Thiem の理論式を用いて岩盤の透水係数を算出した。 μ , σ , C のうち、 μ は $\log_{10}10^{-17.0} \sim \log_{10}10^{-20.0}$ を $\log_{10}10^{0.2}$ ピッチ、 C は 6.0 ~ 8.0 を 0.2 ピッチでパラメータを変更し、合計で 176 ケースの計算を実施した。なお、本検討では割れ目の半径と透水量係数との関係にばらつきを考慮しないこととし、 $\sigma=0.0$ と仮定した。

2.5 実測値との比較結果の整理

2.4 で算出した 50 リアライゼーションの透水係数を累積頻度分布として整理し、実測値（試験点数：18 点）の累積頻度分布と比較した（図-2）。解析結果と実測値の比較に際しては、「定量化」と「見える化」の方法を検討した。透水係数は一般に対数正規分布として取扱われることから、実測値と解析値を対数化した二乗平均平方根誤差（RMSE）を評価指標として適用し「定量化」することとした。RMSE の算出結果については、 μ および C の 2 変数と RMSE の算出値がアウトプットとなることから、二次元のコンターマップとして「見える化」した（図-3）。この結果、割れ目の透水量係数分布は $\mu=\log_{10}10^{-17.8}$, $\sigma=0.0$, $C=7.2$ (RMSE=0.74) で最も実測値の再現性が良いことが確認され、コンターマップとして図化することで、視認性の向上と決定根拠の説明性が向上したと考えられる。

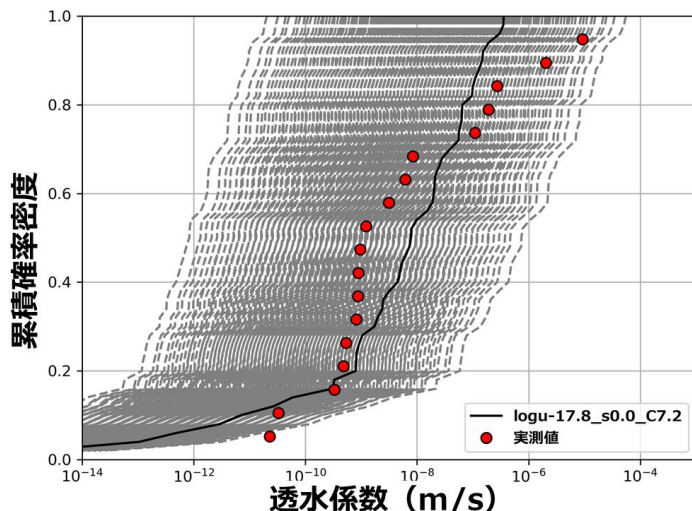


図-2 透水係数分布のグラフ比較（灰色の破線は全解析結果）

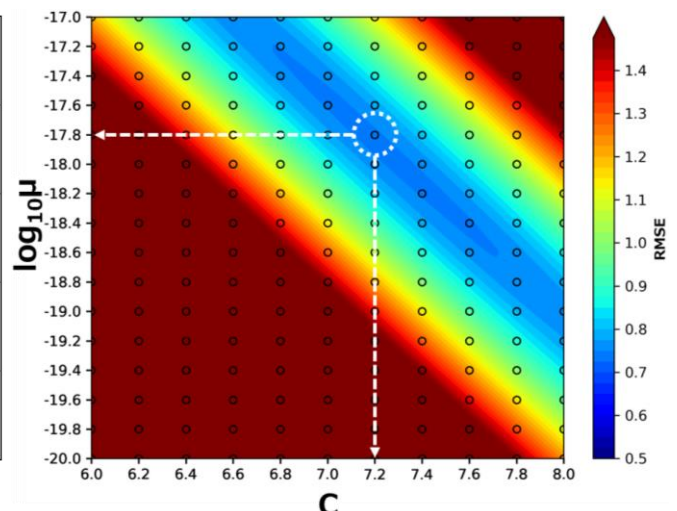


図-3 全解析ケースの RMSE 分布

3. まとめ

日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所で取得されたデータや既報の割れ目分布のパラメータセットを用いて、割れ目の透水性に関するパラメータセットを推定した。推定に際しては、仮想水理試験解析を実施し、解析結果と実測値との誤差の「定量化」や「見える化」を実施し、より説明性の向上に資することができた。一方、本報での方法論には解析量の増加などの課題があることが分かっている。そこで、今後はパラメータ推定の自動化も含めて検討を進めていく。なお、本件は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業－岩盤中地下水流動評価技術高度化開発－」の一部である。

参考文献

- 1) 石橋ほか, 日本応用地質学会平成 29 年度研究発表会講演論文集, pp.65-66, 2017.