

亀裂を陽に導入した岩盤の マルチフィジックス数値モデルの開発

地球総合工学専攻 社会基盤工学コース

地盤工学領域 前田 悠太郎

1. はじめに

岩盤内に造設する地下構造物の設計にあたり、亀裂部での諸現象の予測に基づく、安定性・安全性および事業効率（地熱発電や石油開発）の評価が求められる。本研究紹介では、特に地層処分事業に着目した事例を提示する。地層処分は、原子力発電によって既に生じている高レベル放射性廃棄物を数万年間にわたり、地下 300 m 以深の岩盤内に隔離する処分方法である。地層処分の信頼性・安全性を担保する上で、岩盤が有する放射性核種の閉じ込め性能、すなわち、岩盤の物質輸送特性を左右する岩盤内亀裂の透水性を長期にわたり詳細に把握することが不可欠である。そのためには、地層処分環境下で想定される亀裂部透水性の経時変化（以下の①～②のプロセス）を高精度に予測する必要がある（図 1）。

- ① 廃棄物の処分空洞を掘削する際に、周辺空洞で新たに亀裂が生成・進展する。
- ② 廃棄物を処分空洞に設置後、廃棄物からの放熱と地圧作用の影響で、温度と応力に依存する岩石鉱物の溶解・沈殿が発生する。その結果、亀裂のマイクロ構造（水みち）が変容し、亀裂の透水性が変化する。

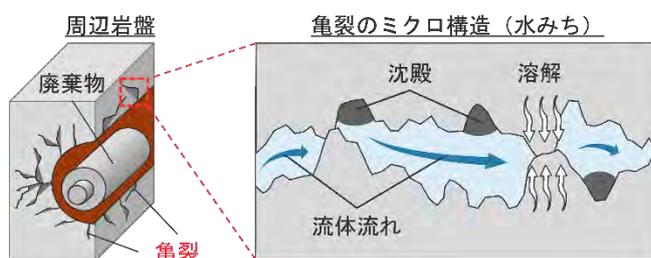


図 1 亀裂部透水性の経時変化

上記の熱・水・力学・化学（THMC）連成現象の中でも、処分空洞掘削と鉱物反応（特に、圧力溶解）による亀裂部透水性への影響の大きさが指摘されている。圧力溶解とは、亀裂接触部で、温度条件と亀裂面に作用する直応力に依存して生じる鉱物溶解現象であり、亀裂開口幅・透水性の低下を引き起こす。以上の背景から、掘削時の亀裂生成・進展および圧力溶解による亀裂部の透水性変化を追跡可能な THMC 連成数値モデルが必要である。

2. モデル概要

既往の THMC 連成数値モデルは、亀裂を含む一定体積で丸ごと平均化した等価連続体モデルをベースとしており、亀裂面に沿った流体流動・物質輸送、圧力溶解の駆動力となる亀裂面に作用する直応力の精緻な評価が困難であった。そこで、本研究では亀裂面を解析領域内に明瞭に定義可能な手法を適用し、亀裂での局所現象を詳細に記述可能な THMC 連成数値モデルを開発した。掘削時の亀裂進展計算にはハイブリッド FEM-DEM (FDEM)¹⁾ を、廃棄体処分後の長期連成計算には不連続亀裂ネットワークモデルを適用した。

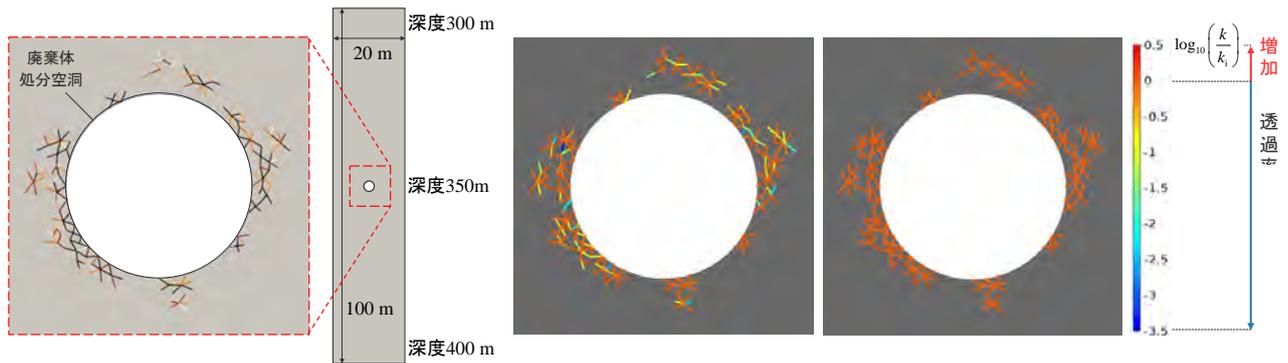


図2 解析結果 (a) 掘削後の亀裂分布 (b) 亀裂の透過率変化

3. 解析事例

提案モデルを用いて、地層処分を想定した廃棄体周辺岩盤の長期透水性予測解析を実施した。解析モデルを図2(a)に示す。対象岩石は珪質堆積岩（湿潤密度 1840 kg/m^3 ）として、初期の空隙率と透過率はそれぞれ 41.6% 、 $2.88 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ に設定した。各種強度は Weibull 分布に基づき岩盤内に不均質に分布させ、同分布に用いる基準値を 1.83 MPa （引張強さ）、 4.81 MPa （粘着力）とし、分布の形状定数は3とした。ヤング率、ポアソン比、内部摩擦角はそれぞれ 1.82 GPa 、 0.17 、 26° を領域内均一に設定した。本研究紹介では、掘削および廃棄体処分後の長期連成解析の結果に着目する。

長期連成解析では、掘削終了時の亀裂分布（図2(a)）を初期条件として、廃棄体設置後の 10^3 年間における亀裂部透過率の変化を確認した。また、圧力溶解の影響を確認するため、圧力溶解の考慮の有無で2ケースの解析を実施した。図2(b)には 10^3 年後の亀裂部透過率 k を掘削終了時の初期透過率 k_i で除した透過率変化を対数表示で示している。図より、圧力溶解を考慮しない場合、亀裂部透過率に大きな変化はみられない。一方、圧力溶解を考慮した場合、複数の亀裂で透過率の減少がみられる。圧力溶解考慮の有無の比較より、この透過率減少は圧力溶解発生に起因していると確認できる。また、亀裂群の中でも選択的に圧力溶解が発生しており、透過率低下量は亀裂毎で様々である。ここで、圧力溶解の駆動力である亀裂に対する直応力は亀裂の方向や発生箇所に強く依存するが、提案モデルでは亀裂毎に異なる駆動力を精緻に評価可能であるため上述の結果が得られたと考える。

4. おわりに

本研究では、亀裂面を解析領域内に明瞭に定義可能な手法を適用し、亀裂での局所現象を詳細に記述可能な THMC 連成数値モデルを開発した。また、提案モデルを用いた地層処分の解析事例より、従来手法では詳細な評価が困難であった、岩盤内の個々の亀裂形態に由来する局所的な透過率変化を、提案モデルでは高度に捉え得ることが確認された。これは、地層処分を含む岩盤構造物の安定性・安全性および事業効率を評価する上で有益な成果であると考えられる。

参考文献

- 1) Munjiza, A. The Combined Finite-Discrete Element Method., Wiley, 2004.