第 III 部門

FDEM を用いた熱・水・応力・化学連成数値シミュレータの構築

大阪大学工学部	学生員	○前田	悠太朗
大阪大学大学院工学研究科	正会員	緒方	奨
大阪大学大学院工学研究科	正会員	乾	徹
北海道大学大学院工学研究院	正会員	福田	大祐
愛媛大学大学院理工学研究科	正会員	安原	英明
京都大学大学院工学研究科	正会員	岸田	潔

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を深部岩盤内に長期埋設す る地層処分事業では,安全評価上,岩盤の物質閉じ込 め性能を支配する亀裂の透水性を長期に渡り予測評 価することが重要である.そのためには,地層処分時 に発生が予想される,処分空洞掘削に伴う亀裂進展, 地下水流れ,熱伝導,物質輸送,岩石鉱物の溶解・沈 殿といった種々の現象が絡み合う熱・水・応力・化学

(THMC)連成場での亀裂の長期透水性変化を精緻 に記述可能な数値解析技術が必須である.しかし,既 往のTHMC連成数値解析のほとんどが,亀裂を含む 岩盤の力学挙動を代表要素体積で均質化・平均化し た等価連続体モデルを用いており,肝心の亀裂での 局所現象を詳細に記述することはできない.

そこで本研究では, 亀裂での局所現象を詳細に記 述可能なモデルを用いた新たな THMC 連成数値シミ ュレータを開発し, 高レベル放射性廃棄物地層処分 時の岩盤内亀裂の長期透水性変化を予測評価した.

2. シミュレータの概要

本シミュレータでは,地層処分時の廃棄体処分空 洞掘削プロセスから廃棄体処分後の長期連成プロセ スまでを記述する.掘削時の亀裂進展計算には連続 体 - 不連続体ハイブリッド解析手法である Combined FEM/DEM(以下,FDEM)¹⁾を,その後の 長期連成計算には不連続亀裂ネットワーク(DFN)モ デルを導入している.また,長期連成解析では,鉱物 溶解・沈殿による亀裂の開口幅・透水性の経時変化を 考慮している.具体的には,亀裂内の接触部での鉱物 溶解(圧力溶解現象)と自由表面での沈殿現象による 開口幅・透過率減少機構,自由表面での溶解現象によ る開口幅・透過率増加機構を考慮している.

3. 地層処分時の長期透水性変化予測解析

構築したシミュレータを用いて、北海道幌延地域 での高レベル放射性廃棄物地層処分を想定した廃棄 体周辺岩盤の長期透水性変化予測解析を実施した. 解析領域には地表からの深度300mから深度400mを 対象とした幅 20m の 2 次元のモデルジオメトリを設 定し, 廃棄体は深度 350m に処分するものとした. な お廃棄体処分空洞(直径 2.0m)の掘削解析では、空 洞直径 D に対して空洞部から上下左右の方向に 5D の領域²⁾ (20m×20m) を解析領域とした. 初期地圧は 対象サイトでの実測 3)に基づいて設定し、側圧係数 K₀は0.95とした.解析対象は石英のみで構成される 珪質堆積岩(密度 1840 kg/m³)と仮定し,初期の空 隙率及び透過率は41.6%,2.88×10⁻¹⁶m²に設定した³⁾. 各種強度(引張強度,粘着力)は Weibull 分布に基づ き岩盤内に不均質に分布させ、それぞれの基準値を 2.38 MPa(引張強度), 4.33 MPa(粘着力)とし,形 状パラメータ m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 ーに設定した³⁾.

掘削解析の結果より,図1に示すような空洞周辺 での無数の亀裂進展が確認された.また,図2に示 す掘削完了時の空洞周辺における透過率分布(対数 表示)より,健岩部に比べ,亀裂の透過率は最大10 オーダー程度高くなっていることが確認できる.

つぎに,掘削後の亀裂性岩盤に廃棄体を処分して からの 10³年間を対象とした長期連成解析を実施し た.10³年経過時の空洞周辺の亀裂の透過率を初期透 過率で除した透過率変化割合(対数表示)を図3に

Yutaro MAEDA, Sho OGATA, Toru INUI, Daisuke FUKUDA, Hideaki YASUHARA, Kiyoshi KISHIDA maeda_y@civil.eng.osaka-u.ac.jp

示す.この結果から、多くの亀裂において透過率が1 オーダー程度減少している一方で、中には透過率が 最大3オーダー程度増加している亀裂が確認できる. つぎに、上記の透過率変化をより詳細に把握するた め、図3において透過率減少が確認された亀裂内に Point 1 を,透過率増加が確認された亀裂内に Point 2 を観測点として設置し、この2点における透過率の 経時変化を評価した (図4). Point 1 においては, 廃 棄体設置後200年で透過率は初期の0.15倍まで低下 し、定常状態に至る傾向が確認できる(103年間では 0.13 倍). Point 2 においては、10² 年間で急激に 117 倍まで増加,10³年間で 596 倍まで増加している.こ の透過率の減少は圧力溶解及び自由表面沈殿、増加 は自由表面溶解による影響である.また、この結果よ り,特に自由表面溶解が卓越した場合,その影響度が 大きいということが読み取れる. これは亀裂内の地 下水流に伴い溶解物質の輸送が活発化し、亀裂内で 自由表面溶解が発生しやすい不飽和環境が維持され ることに起因すると考えられる.また、上記のような 自由表面溶解による亀裂での顕著な透水性変化は既 往の連続体モデル⁴⁾を用いた THMC 連成数値解析で は計算できなかった挙動である.



図1 掘削完了時の亀裂進展形状



図2 掘削完了時の透過率分布 (対数表示)



4. まとめ

本研究で提案したシミュレータでは、これまで捉 えられなかった亀裂内自由表面での溶解現象による 影響も記述することができ、掘削時に発生・進展した 亀裂におけるその後の長期の地化学作用による透過 率経時変化を精緻に予測評価し得ることが確認され た.そのため、地層処分システムの長期性能評価にお いて高いポテンシャルを有すると考えられる.

5. 参考文献

- Munjiza, A. The Combined Finite-Discrete Element Method., Wiley, 2004.
- 2)日本道路公団試験研究所:トンネルの標準設計に関する研究報告 書一数値解析と施工実績の分析,1986.
- 3)青柳和平,石井英一,石田毅:幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における 掘削損傷領域の破壊様式の検討, Journal of MMIJ, Vol. 133, No. 2, 2017.
- 4) Ogata, S., Yasuhara, H., Kinoshita, N. and Kishida, K.: Coupled thermalhydraulic-mechanical-chemical modeling for permeability evolution of rocks through fracture generation and subsequent sealing, *Computational Geosciences*, Vol. 24, pp. 1845-1864, 2020.