Extrinsic Cohesive Zone Modelに基づいた ハイブリッドFEM-DEMを用いた THMC連成シミュレータの開発

前田 悠太朗^{1*}·緒方 奨¹·福田 大祐²·乾 徹¹·安原 英明³·岸田 潔⁴

¹大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1)
 ²北海道大学大学院 工学研究院環境循環システム部門(〒060-8628北海道札幌市北区北13条8丁目)
 ³愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577愛媛県松山市文京町3番)
 ⁴京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8540京都府京都市西京区京都大学桂C1)
 *E-mail: maeda_y@civil.eng.osaka-u.ac.jp

高レベル放射性廃棄物地層処分施設では、安全評価上、廃棄体を処分する空洞周辺の岩盤内亀裂の透水 性変化を追跡可能なシミュレータが不可欠である.処分期間中、岩盤内で熱・水・力学・化学に関する複 雑な連成場が形成され、亀裂の透水性に影響を及ぼす.本解析では、亀裂面を明確に導入した熱・水・力 学・化学連成シミュレータを新たに開発した.亀裂進展解析ではExtrinsic Cohesive Zone Modelに基づいた ハイブリッドFEM-DEMを、地下水・熱・物質移動解析には不連続亀裂ネットワークモデルを用いた.ま た、提案シミュレータによる地層処分時の周辺岩盤の長期透水性変化予測解析を実施した.解析結果から 空洞掘削時に発生した亀裂の内、圧力溶解が発生した亀裂において経時的な透過率の減少が確認された.

Key Words : coupled THMC simulation, rock permeability, pressure solution, fracture generation, Hybrid FEM-DEM (FDEM) , Extrinsic Cohesive Zone Model

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の長期的な安全性 を評価するためには、天然バリアとなる岩盤中の透水特 性を支配する亀裂の透水性を数値解析により長期的に追 跡することが必須である。地層処分期間中、岩盤では廃 棄体処分空洞掘削時の亀裂発生・進展、廃棄体からの放 熱、地下水流動に伴う熱や物質の輸送、岩石鉱物の溶 解・沈殿現象等が相互に影響し合う複雑な連成場が形成 される¹⁾. これらの熱(Thermal) 一水(Hydraulic) 一力 学 (Mechanical) - 化学 (Chemical) (以下, THMC) に 関する連成現象により、岩盤内亀裂の透水性が経時的に 変化することが予想される.特に,処分空洞掘削時の亀 裂発生・進展と、

亀裂内部の自由表面で発生する自由表 面溶解・沈殿や接触部で発生する圧力溶解などの鉱物反 応による影響が想定される. 圧力溶解とは亀裂の接触部 において発生する鉱物溶解現象であり、温度条件や亀裂 面に対して作用する直応力に大きく依存するとされてい る²⁾. 既往研究²⁾では,高温高圧条件下で実施された透水 試験の結果、圧力溶解によって、亀裂の透水性が長期時 間スケールで数オーダー減少する可能性が確認されてい る.そのため, 亀裂発生・進展および圧力溶解等の鉱物 反応による亀裂の透水性変化を記述可能なTHMC連成数 値解析が必要である.しかし,既往のTHMC連成数値シ ミュレータ³は, 亀裂面を明瞭に定義出来ない連続体モ 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, 亀裂内での圧力溶解の駆動力とされる応力成分 (亀裂面に作用する直応力)を精緻に評価することがで きない.

そこで本研究では、亀裂面を明瞭に導入した形で、亀 裂発生・進展から鉱物反応による亀裂の長期透水性変化 まで追跡可能な新たなTHMC連成数値シミュレータを開 発する.また、提案したシミュレータを用いて、高レベ ル放射性廃棄物の地層処分を想定した岩盤の長期透水性 変化の予測解析を実施する.

2. シミュレータの概要

本研究では、多孔質岩盤から成る天然バリアを解析対

象とし、人工バリア内の現象は考慮しない、また、対象 岩盤は二次元でモデル化しており、平面ひずみを仮定し ている.本シミュレータの解析フローを図-1に示す.本 シミュレータは、空洞掘削解析と長期連成解析で構成さ れる. 空洞掘削解析では, 連続体--- 不連続体混合解析手 法であるハイブリッドFEM/DEM (FDEM) ∜を用いて, 廃棄体処分空洞掘削時の亀裂発生・進展挙動を計算する. 本研究では、既往のFDEMの多くがベースとしている Intrinsic Cohesive Zone Model (ICZM) に比べて健岩部での 応力変形計算の精度が高いExtrinsic Cohesive Zone Model (ECZM) ⁵に基づいたFDEMを用いた.長期連成解析で は、掘削解析で得られた亀裂の発生形態や構造(開口幅 や亀裂の接触度合)に関する情報を初期状態として、不 連続亀裂ネットワーク (DFN) モデルを用いて, 廃棄体 処分後の透水性変化挙動を計算する、上述した様に、本 シミュレータの解析プロセスは亀裂面を明確に定義可能 な数値モデル (FDEM, DFN) を用いて構成されており、 既往のモデル³では詳細に評価困難であった、 亀裂面に 沿った流体流動や物質輸送をはじめ、圧力溶解の駆動力 となる亀裂面に作用する直応力等の詳細評価を可能とす る点が本研究の特色である.





(1) 掘削解析

本シミュレータで用いたFDEMでは、連続体力学, Extrinsic Cohesive Zone Model (ECZM)⁵,接触力学に基づ いて、それぞれ岩盤の連続変形過程、亀裂発生・進展過 程、岩盤表面の接触過程をモデル化しており、節点に対 して運動方程式を陽解法により解く、本研究では、オー プンソースのFDEMコード (Y-code)⁴に、後述のECZM を新たに実装し、解析に用いた.

連続体要素に作用するCauchy応力は、有限変位理論に 基づき、Neo-Hookean弾性モデルを用いて算出する.本 解析では、引張応力を正、圧縮応力を負とする.

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\lambda}{2} \left(J - \frac{1}{J} \right) \mathbf{I} + \frac{\mu}{J} \left(\mathbf{B} - \mathbf{I} \right) + \eta \mathbf{d}$$
(1)

GはCauchy応力テンソル [N/m²], **B**は左Cauchy-Greenテン ソル [-], λ , μ はLameの定数 [N/m²], *J*は変形勾配テンソル の行列式 [-], Iは単位テンソル [-], η は減衰係数 [kg/(m·s)], dは変形速度テンソル [1/s]である. なお右辺第三項は粘 性減衰項であり,人工粘性減衰により準静的なプロセス を近似的に解く.

亀裂の発生・進展過程では、巨視亀裂先端の破壊進行 域(FPZ)を扱うモデルであるECZMを用いる.図-2の ように3節点三角形要素(TRI3)の境界に4節点Cohesive 要素(CE4)をアダプティブに挿入し、CE4を構成する2 面の変位量に応じて結合力を作用させることで、FPZで みられる材料の軟化を表現する.なお、CE4は所定の破 壊判定を満たし、FPZ内にあるとみなされたTRI3境界に のみ挿入する.

破壊判定のために、TRI3境界に隣接する2つのTRI3に 対して、Cauchy応力テンソルσと境界面の単位法線ベク トルnを用いて、境界面に作用する直応力($\sigma_n = \sigma n$)と せん断応力($r_n = \sigma - \sigma n \otimes n$)を算出する(\otimes はテンソル積). これらの2つのTRI3の平均値($\sigma_{nave, Tnave}$)がそれぞれ要素 境界の微視的引張強さとモール・クーロンに基づいた微 視的せん断強さに達した場合に軟化開始とみなす.軟化 開始した要素境界にはCE4を挿入し、次式で示される結 合力を作用させる(図-3).

$$\sigma^{\operatorname{coh}} = \begin{cases} \frac{2o}{o_{p}} f_{t} & \text{if } o < 0 \\ \left[\frac{2o}{o_{p}} - \left(\frac{o}{o_{p}} \right)^{2} \right] f(D) f_{t} & \text{if } 0 \le o \le o_{p} \\ f(D) f_{t} & \text{if } o_{p} < o < o_{t} \end{cases}$$

$$\tau^{\operatorname{coh}} = \begin{cases} \left[\frac{2|s|}{s_{p}} - \left(\frac{|s|}{s_{p}} \right)^{2} \right] f_{s} & \text{if } 0 \le |s| \le s_{p} \\ f_{s} & \text{if } s_{p} \le |s| \le s_{t} \end{cases}$$

$$(3)$$

$$f_{\rm s} = -\sigma^{\rm coh} \tan \phi + f(D)c \tag{4}$$

$$D = \min\left(1, \sqrt{D_{\rm o}^2 + D_{\rm s}^2}\right) \tag{5}$$

$$D_{o} = \min\left(1, \frac{o - o_{p}}{o_{t} - o_{p}}\right)$$
 if $0 \le o \le o_{p}$, otherwise 0 (6)

$$D_{\rm s} = \min\left(1, \frac{|s| - s_{\rm p}}{s_{\rm t} - s_{\rm p}}\right) \quad \text{if } s_{\rm p} \le |s| \le s_{\rm t}, \text{ otherwise } 0 \quad (7)$$

o^{ch}, t^{ch}はそれぞれ垂直方向および接線方向の結合力 [N/m²], o, klはそれぞれ開口量[m]および滑り量[m], o_b, s_p はそれぞれo, klの弾性限界[m], o_b, s_lはFPZ内CE4の限界開 口量および滑り量[m], f_b, f_b, c, øltそれぞれCE4の微視的引 張強さ [N/m²], 微視的せん断強さ [N/m²], 微視的粘着力 [N/m²], 微視的内部摩擦角[^o], f(D)は軟化形状を決める 関数, DはCE4の損傷状態を示す損傷変数[-], D_o, D_oはそ れぞれ引張およびせん断損傷変数[-]である.

CE4挿入前のTRI3境界に作用する応力(*σ*_n, *τ*_n)とCE4挿 入時の結合力(*σ*^{cch}, *t*^{cch})を整合させるために見かけの相 対変位(*o*₀, |s₀))を考慮する.CE4挿入後の相対変位(*σ*^{real}, |*s*^{real}|)と見かけの相対変位の和(*σ*^{real}+*σ*₀), |*s*^{real}+|*s*₀))を式(2), (3)で用いる相対変位(*o*, |*s*|)として結合力を与えること で,CE4挿入前後で連続的な推移を可能とした(**図**-3).

脆性材料である岩石の力学物性の不均質性については, 式(8)に示す確率密度関数で定義されるWeibull分布を用い て考慮した⁹.本解析では力学物性の中でも微視的引張 強さfと微視的粘着力cについてのみ統計的なばらつき を与えた.

$$\varphi(u) = \frac{m}{u^{\text{ref}}} \left(\frac{u}{m}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{u^{\text{ref}}}\right)^{m}\right]$$
(8)

uは各計算要素の力学物性, u^{et}は力学物性分布の指標値, mは分布の不均質性を表す形状パラメータである.

(2) 長期連成解析

地下水流動,熱・化学種輸送,鉱物反応について,流 動方程式(ダルシー則,連続式),熱エネルギー方程式,



化学種輸送方程式,鉱物反応式を用いて記述する.これ らの内,本稿では、特に、流動方程式と鉱物反応による 亀裂の構造・透水性変化計算について説明する.岩盤の 実質部領域をΩm, 亀裂境界部をΓfとして以下に支配方程 式を示す.

a)地下水流動

地下水流動は,実質部と亀裂部に対して,以下の多孔 質弾性体理論に基づく流動方程式を用いる.

$$\rho_{\rm w} S \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_{\rm w} \mathbf{u} \right) = 0 \qquad \text{in } \Omega_{\rm m} \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{k_{\rm m}}{\mu} \left(\nabla p + \rho_{\rm w} g \nabla h \right) \qquad \text{in } \Omega_{\rm m} \ (10)$$

$$b\rho_{\rm w}S\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla_{\tau} \cdot \left(b\rho_{\rm w}\mathbf{u}_{\rm f}\right) = Q_{\rm H} \qquad \text{in}\,\Gamma_{\rm f}\,(11)$$

$$\mathbf{u}_{\mathrm{f}} = -\frac{k_{\mathrm{f}}}{\mu} \left(\nabla_{\mathrm{\tau}} p + \rho_{\mathrm{w}} g \nabla h \right) \qquad \text{in} \, \Gamma_{\mathrm{f}} \, (12)$$

$$k_{\rm f} = \min\left(k_{\rm m}, \frac{b^2}{12}\right)$$
 in $\Gamma_{\rm f}$ (13)

 ρ_w は水の密度 [kg/m³], Sは水の貯留係数 [l/Pa], pは間隙 水圧 [Pa], tは時間 [s], uは実質部における水の実流速ベ クトル [m/s], k_m は実質部の透過率 [m²], μ は水の粘性係 数 [Pars], gは重力加速度 [m/s²], hは位置水頭 [m], bは亀 裂の開口幅 [m], ∇_i は亀裂接線方向の勾配演算子, urta 裂内の水の実流速ベクトル [m/s], kiは亀裂の透過率 [m²], O_iは実質部と亀裂部間の質量交換項 [kg/(m²·s)]である.

b) 亀裂の構造・透水性変化

本シミュレータでは, 亀裂の開口幅に関しては, 掘削 時の亀裂発生・進展と亀裂内で発生する経時的な鉱物反 応による影響のみを考慮する.したがって, 任意時間 *t* における亀裂開口幅 *b(t)*は次式で定義される⁷.

$$b(t) = b_{\rm D} + \int \dot{b}^{\rm FF}(t) dt + \int \dot{b}^{\rm PS}(t) dt \qquad \text{in} \Gamma_{\rm f} (14)$$

$$\dot{b}^{\rm FF}(t) = \sum_{j}^{n} 2f_{\rm r} \chi_{j} \left(1 - R_{\rm c}\right) V_{{\rm m},j} k_{+,j} \left(1 - \frac{Q_{j}}{K_{{\rm eq},j}}\right) \quad \text{in} \, \Gamma_{\rm f} \, (15)$$

$$\dot{b}^{\rm PS}(t) = \sum_{j}^{n} \frac{-3f_{\rm r}\chi_{j}V_{{\rm m},j}^{2}k_{+,j}}{RT} \cdot \left(\frac{\sigma_{\rm n}}{R_{\rm c}} - \sigma_{\rm c}\right) \text{ in }\Gamma_{\rm f}$$
(16)

bbは掘削時の亀裂発生・進展による開口幅 [m], $\dot{b}^{\text{FF}}, \dot{b}^{\text{PS}}$ はそれぞれ自由表面溶解・沈殿および圧力溶解による亀 裂開口幅の変化速度 [m/s]である.また, f(はラフネスフ アクター [-], χ は鉱物 jの体積含有割合 [-], Rは亀裂接触 割合 [-], V_{m} はモル体積 [m³/mol], $k_{\text{H},j}$ は溶解速度定数 [mol/(m²s)], Qは鉱物 jのイオン活量積 [-], $K_{\text{eq},j}$ は鉱物 jの 平衡定数 [-], Rは気体定数 [kJ/(mol·K)], Tは岩石の温度 [K], σ_{h} は亀裂に作用する平均直応力(圧縮応力) [N/m²], σ_{e} は臨界応力 [N/m²]である.

本章では、提案シミュレータを用いた、高レベル放射 性廃棄物地層処分時の岩盤における長期透水性変化予測 解析の概要と結果を示す. 処分方式としては、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ー 地層処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート1)(以 下,第2次取りまとめと記す)に示されている横置き方 式を採用した. 深度300mから深度400mの幅20m、高さ 100mを解析領域として,深度350mに直径 dが2mの廃棄 体処分空洞を掘削するものとした(図-4).解析対象は、 石英のみで構成される珪質堆積岩と仮定した。湿潤密度 と初期の含水比および透過率は、それぞれ1840 kg/m³、 41.6%, 2.88×10⁻¹⁶m²に設定した⁸. 岩盤の力学物性につい て、各種微視的強度(引張強さ、粘着力)をWeibull分布 に基づき岩盤内で不均質に分布させ、同分布の指標値? と分布の形状パラメータ¹⁰をそれぞれ1.83 MPa(引張強 さ), 4.81 MPa(粘着力), 3と設定した. ヤング率9, ポアソン比⁹, 内部摩擦角¹¹はそれぞれ1.82 GPa, 0.17, 26°とし、解析領域内で一定とした. 圧力溶解を支配す る臨界応力 σ_cは15 MPa³とした.本解析は,処分空洞掘 削時の亀裂発生・進展を計算する掘削解析と、掘削解析 で得られた亀裂発生・進展結果を初期状態として、廃棄 体処分後の透水性変化挙動を計算する長期連成解析で構 成される.

掘削解析では、まず、初期応力場(側圧係数 K_0 =0.95) を再現するための自重解析を実施し、その後1ステップ で掘削部要素を取り除く処理を行った.また、掘削解析









は損傷変数 Dの増分が十分に小さくなった時点で終了とした. 具体的には, 解析領域中の全要素において, 損傷 変数 Dの前ステップとの差分 ΔDが継続して0.01以下となった時点で解析終了とした. 解析で用いたメッシュの平



図-6 亀裂の透過率変化割合(対数表示)の経時変化 (a) PS condition, (b) no-PS condition

均要素寸法は150mmである.図-5に掘削解析より得られ た掘削部周辺における亀裂進展形態と亀裂の透過率分布 に関する結果を示す.図-5(a)には、掘削解析終了時にお ける亀裂進展形態(式(5)の損傷変数 D の空間分布)を 示している.本解析では、D>0.1のCE4を亀裂と定義す る. 図より, 進展した亀裂は空洞壁面から0.5m (= d/4) の領域に集中している.他方,珪質泥岩が分布している 地域(日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター の深度350mにおける馬蹄型の掘削坑道で実施されたボ アホール・テレビューア観察の結果、亀裂の集中箇所は 空洞直径 dに対して壁面からd4の範囲内であるという結 果が確認されている⁹. この観察結果と今回の掘削解析 の亀裂進展範囲は整合しており、両者の空洞形状自体に 違いはあるものの、解析によって比較的現実的な亀裂発 生・進展結果が得られたと考えられる. 図-5(b)には、空 洞掘削で発生した亀裂群の透過率(対数表示)について のヒストグラムを示している.図より、透過率(対数表 示)が-16 < loguk <= -15の範囲内にある亀裂が最も多いこ とが確認される. 開口量 bが小さく, $b^2/12 < k_m$, あるい は、b²/12 ≒ kmとなる亀裂が多く存在することを示してい る. 亀裂部の透過率が、実質部の透過率と同程度であり、 透過率変化があまりみられない亀裂(-16 < logiok <= -15) を除くと、透過率が約3オーダー程度増加している亀裂 が最も多いことが確認された.

つぎに、掘削終了時における亀裂の開口幅と亀裂に作 用している直応力を初期条件として、処分空洞に廃棄体 を設置した後の103年間を対象とした長期連成解析を実 施した.長期連成解析では、新たな亀裂発生・進展は発 生せず、岩盤内の応力場も掘削終了時から変化しないと 仮定した.処分期間中の廃棄体からの廃熱については, 第2次取りまとめ¹⁾より、緩衝材外側の岩盤の温度変化を 境界条件として掘削壁面に与えた.また、本解析では、 亀裂の透過率変化に対する圧力溶解の影響を評価するた め、圧力溶解の有無による解析結果の比較を行う. 図-6 には、圧力溶解を考慮した場合((a) PS condition)と考慮 していない場合((b) no-PS condition)の長期連成解析より 得られた亀裂の透過率変化割合の経時変化を示している. ここで、透過率変化割合とは、任意時間の透過率 kを解 析開始時の透過率 k (掘削終了時の透過率) で除したも のであり、対数化して表示している. 圧力溶解を考慮し ていない場合(no-PS condition)では、解析期間を通して、 全亀裂において透過率にほとんど変化はみられない. 一 方, 圧力溶解を考慮した場合(PS condition)では、複数 の亀裂において、透過率が経時的に減少している様子が 確認できる.また、103年時点で亀裂の透過率は最大で 約1035倍まで減少している.この様な経時的な透過率の 減少は亀裂内での圧力溶解発生に起因していることは、 圧力溶解の有無による結果の比較から確認できる. 亀裂

内での圧力溶解の駆動力(亀裂に対する直応力)は、亀 裂の向きや発生箇所に強く依存していることから、亀裂 群の中でも選択的に圧力溶解が発生したと考えられる. また、亀裂毎で駆動力が異なるため、透過率低下量にも 大きなばらつきが生じている.

4. まとめ

本研究では、亀裂面を明確に導入可能な数値モデルを 実装し、亀裂発生・進展から鉱物反応による亀裂の長期 透水性変化まで包括的に記述するTHMC連成数値シミュ レータを提案した.また、提案したシミュレータを用い た、高レベル放射性廃棄物の地層処分を想定した解析事 例を示した.解析結果より、処分空洞掘削に伴い岩盤中 に発生した亀裂の内、廃棄体処分後において圧力溶解が 発生した亀裂に関してのみ長期的な透過率減少が確認さ れた.これらの結果より、本研究で構築したシミュレー タが地層処分時の岩盤内の個々の亀裂形態に由来する局 在的な透過率変化を詳細に捉え得る可能性が示唆された. これは天然バリアとなる亀裂性岩盤のマクロなバリア性 能を長期評価する上で有益な成果であると考える.

謝辞:本研究は,JSPS科研費 20K14826の助成を受けた ものです.

参考文献

- 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一地層処分研究開
 発第2次取りまとめ-総論レポート,JNC TN1400 99-022, 1999.
- 2) Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Lee, DS., Nakashima, S., and Kishida, K.:Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model, *Applied Geochemisry*, Vol.26, pp.2074–2088 ,2011.
- 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.
- 4) Munjiza, A. The Combined Finite-Discrete Element Method., Wiley, 2004.
- 5) 福田大祐,二瓶恵理菜,趙祥鎬,呉世旭,奈良禎太, 児玉淳一,藤井義明: Extrinsic Cohesive Zone Model に 基づくハイブリッド FEM-DEM を用いた岩石の3次元 動的破壊過程解析法の開発に関する基礎的検討, *Journal of the Materials Sciences, Japan*, Vol. 69, No. 3, pp. 228-235, 2020.
- Zok, F. W.: On weakest link tehory and Weibull statistics, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 100, pp. 1265-1268, 2017.

- 7) 緒方奨,安原英明,岸田潔: 圧力溶解を考慮した連成モデ ルへの Dual Porosity 理論実装と岩盤の長期透水性評価, Journal of the Society of Materials Science, Vol. 67, pp.310-317, 2018.
- 8) 太田久仁雄,阿部寛信,山口雄大,國丸貴紀,石井英 一,操上広志,戸村豪治,柴野一則,濱克宏,松井裕 哉,新里忠史,高橋一晴,丹生屋純夫,大原英史,浅 森浩一,森岡宏之,舟木泰智,茂田直孝,福島龍朗: 幌延地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第1段階)研究成果報告書, JAEA-Research, 2007-044, 2007.
- 9) 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, pp.25-33, 2017.
- 10)Zhu, W. C. and Tang, C. A.: Micromechanical Model for Simulating the Fracture Process of Rock, *Rock Mechanics* and Rock Engineering, Vol. 37, pp. 25-56, 2004.
- 11) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 52 pp. 385-401, 2019.

DEVELOPMENT OF A COUPLED THMC SIMULATOR BASED ON HYBRID FEM-DEM USING EXTRINSIC COHESIVE ZONE MODEL

Yutaro MAEDA, Sho OGATA, Daisuke FUKUDA, Toru INUI, Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA

When assessing the safety of the geological repository of high-level radioactive waste (HLW), it is essential to develop a numerical simulator that can model the evolution of fracture permeability within rock masses under the coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical (THMC) processes. In this study, we have proposed a novel coupled THMC simulator that explicitly introduces fracture geometry. Subsequently, the proposed simulator was applied to predict the long-term changes in rock permeability within geological repository. The results showed that the gradual decrease in permeability with time was observed only within specific fractures where the pressure solution had been induced after disposing HLW into the cavity.