

亀裂発生・進展を考慮したマルチフィジックス シミュレータの開発

緒方 奨^{1*}・安原 英明²・岸田 潔¹

¹京都大学大学院 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C1-2-338)

²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)

*E-mail: ogata.shou.32m@st.kyoto-u.ac.jp

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業において、熱・水・応力・化学 (THMC) 連成作用による廃棄体周辺岩盤の水理学特性変化の予測は不可欠である。特に、廃棄体処分坑道掘削時に形成される亀裂で生じる地化学現象は岩盤の長期透水性変化を予測する上で考慮すべき事象である。そこで、本研究では損傷理論を用いた亀裂発生・進展と併せて、亀裂内で生じる鉱物溶解・沈殿プロセスを導入した熱・水・応力・化学連成シミュレータを構築した。そのシミュレータを用いて放射性廃棄物地層処分時の岩盤の透水性変化の長期予測解析を実施した。解析結果より、坑道掘削に伴う亀裂発生・進展により増加した坑道周辺の透水性が、亀裂内部で生じる地化学現象 (圧力溶解) により経時的に低下する傾向が確認された。

Key Words : THMC coupling, damage, fracture propagation, rock permeability, pressure solution

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分システムの長期性能を評価する上で、天然バリアである廃棄体周辺岩盤における水理学特性変化の長期予測は不可欠である。周辺岩盤を含むニアフィールドでは、ガラス固化体からの放熱、地下水の流入、廃棄体処分空洞掘削時の応力再配分に起因する岩盤内の亀裂発生・進展、空隙水と岩石鉱物の地化学反応等が相互に影響し合う場が形成される¹⁾。したがって、周辺岩盤の水理学特性の長期変化を精緻に予測するためには、熱・水・応力・化学に関する各現象とそれらの相互作用を考慮可能な連成数値解析が不可欠である。既往研究²⁾より、廃棄体処分空洞掘削に伴う亀裂発生・進展により、空洞周辺岩盤の力学・水理学特性が顕著に変化することが判明している。また、空洞掘削時に形成された亀裂内部の自由表面や亀裂接触部において自由表面溶解・沈殿や圧力溶解といった地化学現象が継続的に発生し、それにより岩盤の透水性が時系列で変化することが想定される。また、単一不連続面を有する岩石供試体を用いて、高温高压条件下で実施した透水試験³⁾より、亀裂接触部での鉱物溶解 (圧力溶解) により、岩石の透水性が長期時間スケールで数オーダー低下する可能性が確認されている。したがって、天然バリアの水理学特性の長期挙動を予測するためには、空洞掘削時に形

成された亀裂内部で発生する地化学現象を計算可能な連成解析モデルの構築が不可欠である。過去に、多くの熱 (Thermal) - 水 (Hydraulic) - 応力 (Mechanical) - 化学 (Chemical) 連成解析モデル (以下、THMC 連成解析モデル) が開発されてきた^{4)~8)}。近年では、亀裂発生・進展に伴う熱・水理学・力学特性等の岩盤の各物理特性変化を考慮した連成解析モデルも複数報告されている^{9), 10)}。しかし、既存の連成解析モデルでは、亀裂形成に伴う地化学現象の発生 (亀裂が発生・進展し、その亀裂内部で鉱物の溶解・沈殿が発生するというプロセス) を評価不可能である。

そこで本研究では、損傷理論を用いた亀裂発生・進展と、その亀裂内での鉱物溶解・沈殿プロセス (自由表面溶解・沈殿及び圧力溶解) を導入した THMC 連成解析シミュレータを開発する。また、開発したシミュレータを用いて高レベル放射性廃棄物地層処分時の周辺岩盤における長期透水性変化の予測解析を実施する。

2. 解析モデル

(1) 解析モデルの概要

本モデルの解析対象は天然バリアである多孔質岩盤であり、人工バリア内の物理現象は解析対象外としている。

本モデルでは、図-1 に示すような T・H・M・C 各要素間の相互作用に亀裂の発生と進展を表す相互作用 D (損傷) を加えた連成相互作用を考慮する。本モデルは、筆者らが以前構築した THMC 連成解析モデル (白色の矢印)⁹⁾ では考慮できなかった損傷 (亀裂発生・進展) とそれに伴う岩盤の熱・水理学・力学・化学特性の変化 (灰色の矢印) を考慮可能である。特に、損傷 ⇒ 化学 (発生・進展した亀裂内での鉱物溶解・沈殿) の作用を導入し、既存モデル^{4)~8)} では考慮不可能であった亀裂での地化学現象とそれに伴う岩盤の透水性変化を計算可能であるという点が本研究の新規性である。

(2) 支配方程式

本モデルでは、地下水流動、熱輸送、応力変形、亀裂発生・進展、化学種輸送、地化学反応を考慮し、それぞれの現象を流動方程式 (ダルシー則、水の質量保存式)、熱エネルギー方程式、線形弾性則、多孔質弾性体理論、損傷理論、化学種輸送方程式、鉱物反応式といった複数の支配方程式で記述する。

a) 応力解析

応力解析では、平面ひずみ状態を仮定する。応力つり合い式と、多孔質弾性体理論を適用し、間隙水圧と熱応力の変化を考慮した線形弾性則を用いて岩盤内の応力・変形量を算出する。

$$-\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}_v \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_T) + \alpha_B P \mathbf{I} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{F}_v$ は物体力 [N m^{-3}]、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル [N m^{-2}]、 $\mathbf{E}$ は弾性係数行列 [N m^{-2}]、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル [-]、 $\boldsymbol{\varepsilon}_T$ は熱ひずみテンソル [-]、 α_B は Biott willis 係数 [-]、 $\mathbf{I}$ は方向テンソル [-]、 P は間隙水圧 [N m^{-2}] である。

b) 損傷理論

亀裂発生・進展挙動の計算には、等方性の連続体損傷理論を用いる。損傷理論では、応力解析により得られた岩盤内の応力分布をもとに、対象とする岩盤が引張またはせん断によって損傷が生じるか否かを、それぞれ以下の引張応力条件式とモール・クーロンの破壊規準を用いて判定する^{9),7)}。引張応力を負、圧縮応力を正とする。

$$\begin{cases} F_1 \equiv \sigma_3 + f_{t0} = 0 \\ F_2 \equiv \sigma_1 - \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \sigma_3 - f_{c0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 F_1 は引張損傷条件、 F_2 はせん断損傷条件、 σ_1 は最大主応力 [N m^{-2}]、 σ_3 は最小主応力 [N m^{-2}]、 f_{t0} は一軸引張強さ [N m^{-2}]、 f_{c0} は一軸圧縮強さ [N m^{-2}]、 θ は内部摩擦角 [°] である。損傷した岩盤の弾性係数 E は損傷進展に従い減少する^{9),7)}。

$$E = (1 - D) E_0 \quad (4)$$

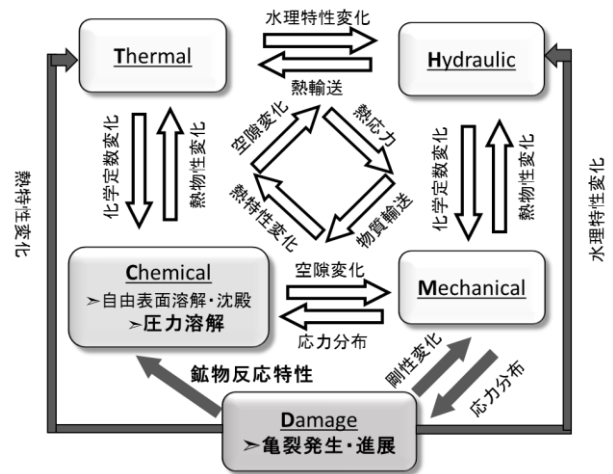


図-1 本解析モデルで考慮する THMC 相互作用

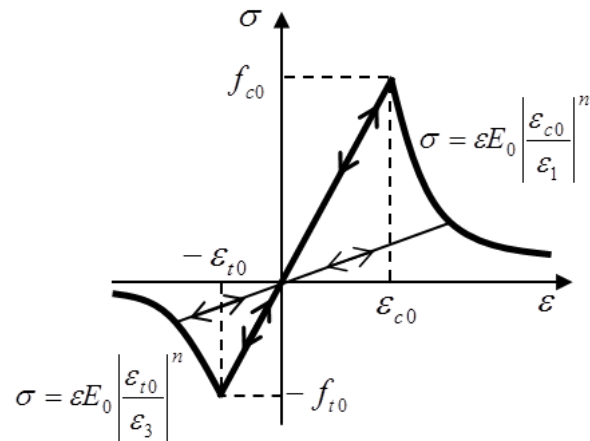


図-2 損傷理論構成則 (一軸圧縮・一軸引張条件)^{9),7)}

ここで、 E_0 は損傷の無い状態の岩盤の弾性係数 [N m^{-2}]、 D は損傷変数 [-] である。損傷変数 D は、 $0 \leq D \leq 1$ の値をとるスカラー変数であり、物体の損傷度合いを表す。損傷がなければ 0、完全に破壊すれば 1 となる。本研究では、 $D > 0$ を亀裂発生とする。損傷変数 D は、ひずみの値を用いて計算され、損傷変数 D の算出に用いるひずみ ε_t 、 ε_c は次式で定義される。

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{E} = \frac{1}{1+\nu} \left[\varepsilon_1 + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_v \right] \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_3 = \frac{\sigma_3}{E} = \frac{1}{1+\nu} \left[\varepsilon_3 + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_v \right] = \varepsilon_t \quad (6)$$

$$\varepsilon_c = \bar{\varepsilon}_1 - \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \bar{\varepsilon}_3 \quad (7)$$

ここで、 ν はポアソン比 [-]、 ε_i ($i = 1, 2, 3$) は最大、中間、最小主ひずみ、 ε_v は体積ひずみ [-] である。式(3)の破壊条件と図-2 に示す構成則に従い、損傷変数 D は次式で計算

される^{9,7)}.

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ and } F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_t} \right|^n & F_1 = 0 \text{ and } \Delta F_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_c} \right|^n & F_2 = 0 \text{ and } \Delta F_2 > 0 \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 ε_{t0} は限界引張ひずみ [-], ε_{c0} は限界圧縮ひずみ [-], n は定数 [-]であり、ここでは経験的な値 $n=2$ とする。

c) 力学物性の不均質性

岩石の不均質性を考慮するため、統計的ばらつきを岩石内の局所的な力学物性に与える。本モデルでは、解析領域を構成する各計算要素の力学物性が次式の確率密度関数で定義される Weibul 分布に従うとする^{9,7)}。

$$f(u) = \frac{m}{u^s} \left(\frac{u}{m} \right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{m}\right)^m\right) \quad (9)$$

ここで、 u は解析領域中の各計算要素の力学物性、 u^s は力学物性分布の指標値となるスケールパラメータ、 m は分布の不均質性を表す形状パラメータである。

d) 地下水流動

地下水流動挙動の解析には、以下の多孔質弾性体理論を適用した連続式とダルシー則を用いる。

$$\rho_w S \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}) + \rho_w \alpha_B \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -f_w \quad (10)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho_w g \nabla h) \quad (11)$$

ここで、 t は時間 [s], ρ_w は水の密度 [kg m^{-3}], S は水の貯留率 [Pa^{-1}], P は間隙水圧 [Pa], $\mathbf{u}$ は水の実流速 [m s^{-1}], f_w は質量源 [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$], k は透過率 [m^2], μ は水の粘性係数 [Pa s], g は重力加速度 [m s^{-2}], h は位置水頭 [m]である。岩盤内の透過率 k は、亀裂と健全部の各領域での透過率を考慮した次式で定義される。

$$k = \begin{cases} k_0 & D = 0 \\ \frac{b^2}{12} & D > 0 \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 k_0 は損傷のない状態の岩盤の透過率 [m^2], b は亀裂の開口幅 [m]である。また、損傷による岩石の透過率および亀裂の開口幅変化は次式で表される⁹⁾。

$$k_D = k_0 \exp(\alpha_k D) \quad (13)$$

$$b_D = \sqrt{12 k_D} = \sqrt{12 k_0 \exp(\alpha_k D)} \quad (14)$$

ここで、 k_D は損傷状態の岩盤の透過率 [m^2], α_k は定数 [-], b_D は損傷状態の岩盤における亀裂開口幅 [m]である。

e) 熱輸送

岩盤の温度分布は下記に示す熱エネルギー方程式によって算出する。

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_{p,w} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{eq} \nabla T) + Q \quad (15)$$

$$(\rho C_p)_{eq} = (1 - \phi) \rho_m C_{p,m} + \phi \rho_w C_{p,w} \quad (16)$$

$$\lambda_{eq} = (1 - \phi) \lambda_m + \phi \lambda_w \quad (17)$$

ここで、 T は温度 [K], $(\rho C)_{eq}$ は平衡熱容量 [$\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$], C_{pw} は水の定圧比熱容量 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], λ_{eq} は平衡熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], ρ_m は岩石固相（乾燥）密度 [kg m^{-3}], C_{pm} は固相の定圧比熱容量 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], λ_m は固相の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], λ_w は水の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], Q は熱量源 [W m^{-3}], ϕ は空隙率 [-]である。また、損傷による岩盤固相の熱伝導率変化は次式で表される⁹⁾。

$$\lambda_m = \lambda_{m0} \exp(\alpha_\lambda D) \quad (18)$$

ここで、 λ_{m0} は損傷前の岩盤固相の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], α_λ は定数 [-]である。

f) 化学種輸送

岩盤空隙水中の物質輸送過程を記述する化学種輸送方程式を以下に示す。本モデルでは溶解物質の空隙水中における移流と拡散を考慮し、岩石への吸着作用と空隙水中の分散現象については考慮しない。

$$\frac{\partial(c_i \phi)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = \nabla \cdot (\mathbf{D}_{i,e} \nabla c_i) + r_i \quad (19)$$

$$r_i = \sum_j v_j R_j \quad (20)$$

ここで、 c_i は化学種 i の空隙水中の濃度 [mol m^{-3}], $\mathbf{D}_{i,e}$ は実効拡散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], r_i は鉱物溶解・沈殿による化学種 i の濃度変化 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$], v_j は化学種 i の化学量論係数 [-], R_j は多孔質岩盤中の鉱物 j の反応速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$]である。

g) 亀裂での地化学反応

本モデルでは、空隙水と岩石鉱物間の反応について、岩石亀裂内の自由表面での溶解・沈殿と亀裂接触部での鉱物溶解（圧力溶解）を考慮する。したがって、鉱物溶解・沈殿速度 R_j は次式で定義される。

$$R_j = R_j^{FF} + R_j^{PS} \quad (21)$$

ここで、 R_j^{FF} は自由表面溶解・沈殿速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$], R_j^{PS} は圧力溶解速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$]である。本研究では、損傷変数 $D > 0$ で亀裂が発生するとしている。したがって、亀裂内での自由表面溶解・沈殿及び圧力溶解反応は、損傷変数 $D > 0$ でのみ発生することになる。本モデルにおける圧力溶解速度式は、緒方ら⁹⁾で提案された亀裂接触部における圧力溶解速度式に基づき、損傷変数 D と式(3)の亀裂破壊モード F_1, F_2 を考慮した次式で定義される。

$$\left\{ \begin{array}{ll} R_j^{PS} = 0 & D = 0 \\ R_j^{PS} = \frac{3R_c f_r V_{m,j} k_{+,j}}{RT(1-R_c)b} \cdot \left(\frac{\langle \sigma_3 \rangle}{R_c} - \sigma_c \right) & D > 0, F_1 = 0 \\ R_j^{PS} = \frac{3R_c f_r V_{m,j} k_{+,j}}{RT(1-R_c)b} \cdot \left(\frac{\langle \sigma_1 \rangle + \langle \sigma_3 \rangle}{R_c} - \sigma_c \right) & D > 0, F_2 = 0 \end{array} \right. \quad (22)$$

ここで、 k_{+} は溶解速度定数 [$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]、 R_c は亀裂接触割合 [-]、 V_m はモル体積 [$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$]、 σ_c は臨界応力 [N m^{-2}]、 f_r はラフネスファクター [-]、 R は気体定数 [$\text{kJ mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]、 $\langle \rangle$ はMacaulayブラケットである。

h) 亀裂開口幅変化

本モデルでは、岩盤内亀裂の開口幅変化について、亀裂発生・進展とその亀裂領域での鉱物溶解・沈殿に伴う地化学作用による影響を考慮する。したがって、任意の時間 t の亀裂開口幅 $b(t)$ は次式で定義される。

$$b(t) = b_D + b^{FF}(t) + b^{PS}(t) \quad (23)$$

ここで、 $b^{FF}(t)$ は任意時間 t までの自由表面溶解・沈殿による亀裂開口幅総変化量 [m]、 $b^{PS}(t)$ は任意時間 t までの圧力溶解による亀裂開口幅総変化量 [m] である。地化学作用により、亀裂開口幅が時間の経過とともに変化すると、それに伴い亀裂接触割合も変化する。この亀裂開口幅とその接触割合の関係性は次式で近似される³⁾。

$$b(t) = b_r + (b_D - b_r) \exp(-(R_c(t) - R_{cD})/a) \quad (24)$$

ここで、 b_r は残留開口幅 [m]、 $R_c(t)$ は任意時刻 t の亀裂接触割合 [-]、 R_{cD} は亀裂発生・進展直後の亀裂接触割合 [-] である。連続体損傷理論に基づく、損傷変数 D の概念は、物体中の任意の代表要素の断面積とその断面積中の空隙面積の比で定義される⁹⁾。この概念に基づき、本研究では、亀裂発生・進展直後における亀裂接触割合 R_{cD} （亀裂域における代表要素中の亀裂接触面積と間隙面積の比）を損傷変数 D を用いて次式で定義する。

$$R_{cD} = 1 - D \quad (25)$$

3. 提案モデルを用いた解析例

上記のモデルを実装したTHMC連成シミュレータを用いて、高レベル放射性廃棄物地層処分時の岩盤の長期透水特性変化を予測する。解析では、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—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想定した。解析領域は、図-3に示すように地表からの深度400 mから深度500 mまでを対象とし、深度450 mに廃棄体を設置するものとした⁴⁾。本解析では、まず、廃棄体処分坑道の掘削解析を実施する。つぎに、掘削解析

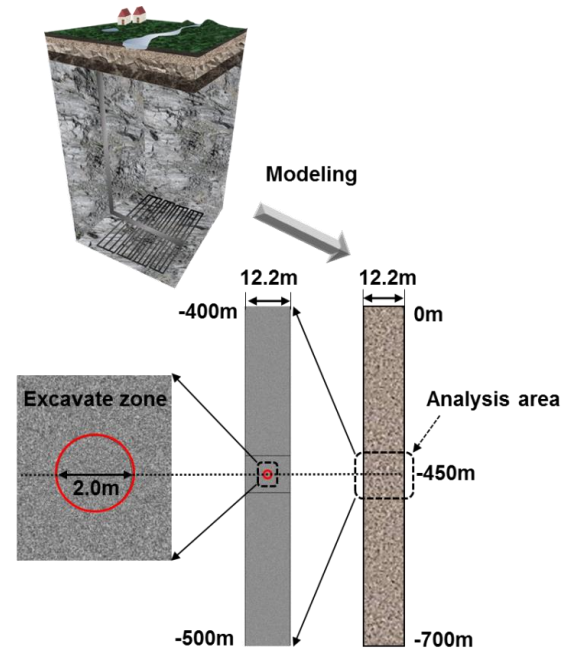


図-3 解析領域

表-1 解析パラメータ

Parameter	Value
Weibul分布の形状パラメータ	4.0
弾性係数分布の指標値[GPa]	3.0
一軸引張強さ分布の指標値[MPa]	2.2
一軸圧縮強さ分布の指標値[MPa]	22.0
ポアソン比[-]	0.3
内部摩擦角[°]	30.0
初期透過率[m ²]	1.0×10^{-15}
初期空隙率[-]	0.4
臨界応力[MPa]	15.0
定数 α_k [-]	5.0

より得られた掘削終了時の岩盤の応力状態を初期条件とし、廃棄体処分後の周辺岩盤における透水性経時変化を予測する。解析対象は石英（Quartz）のみで構成される初期状態で亀裂が存在しない多孔質岩石と仮定する。岩盤物性については、弾性係数と各種強度（一軸引張強さ、一軸圧縮強さ）はWeibul分布を用いて岩盤中に不均質に分布させ、他の物性値は均質に設定している。初期地圧条件は、側圧係数 $K_0 = 1.5$ に設定している。解析に使用したパラメータ一覧を表-1に示す。坑道掘削解析では、深度450 m地点に図-3に示すような直径2.0 mの廃棄体処分坑道を掘削する。解析では、まず自重解析から坑道境界に与える掘削相当応力を評価し、その掘削相当応力を1回の掘削ステップにつき1%ずつ減少させていき、100ステップで掘削する。用いた解析メッ

シュと掘削時の坑道周辺における亀裂発生・進展挙動（損傷変数 D の分布の変化）を図-4に示す。図では、損傷の破壊モードを識別するため、せん断で損傷した領域については、特別に損傷変数 D の値の符号を正から負に変えて表示している（ $0 \leq D \leq 1 \Rightarrow -1 \leq D \leq 0$ ）。図中のコンター分布における $-1 \leq D < 0$ の赤色の領域がせん断による損傷域、 $0 < D \leq 1$ の青色の領域が引張による損傷域を示している。図より、せん断による損傷が支配的であることが確認できる。また、坑道の天端と底部周辺でそれぞれ上下方向に亀裂が発生・進展していく様子が確認できる。これは、掘削に伴う応力再配分により坑道の天端と底部に高い圧縮応力が集中したことに起因している。

坑道掘削終了時の損傷変数の分布より算出される岩盤の物性値（弾性係数、透過率、熱伝導率、亀裂開口幅・接触割合）を初期物性値に設定し、長期THMC連成解析を実施した。解析期間は坑道掘削後、廃棄体を設置して

から100年間とした。廃棄体からの放熱については、第2次取りまとめ²⁾において温度解析から得られた緩衝材外側の岩盤の温度変化をモデルの坑道壁面の温度として与えた。また、本解析では、岩盤中の亀裂発生・進展は坑道掘削過程においてのみ考慮し、坑道掘削後の岩盤内における新たな亀裂発生・進展は考慮しない。本研究では、亀裂接触部で生じる圧力溶解の有無で解析結果の比較を行う。圧力溶解を考慮しない場合（No PS condition）と圧力溶解を考慮した場合（PS condition）の坑道周辺における透過率の経時変化を図-5に示す。ここでは、透過率を対数表記した値（ $\log_{10}k$ ）を用いて透水性変化を評価している。図の初期透過率分布より、坑道掘削に伴い形成された損傷域の透過率は他の健全岩部より最大で2オーダー程度高くなっていることが確認できる。また、圧力溶解を考慮しない場合は、透過率分布は時系列で変化せず一定であることが確認できる。一方、圧力溶解を考慮した場合は、損傷域の透過率が経時的に低下していく挙

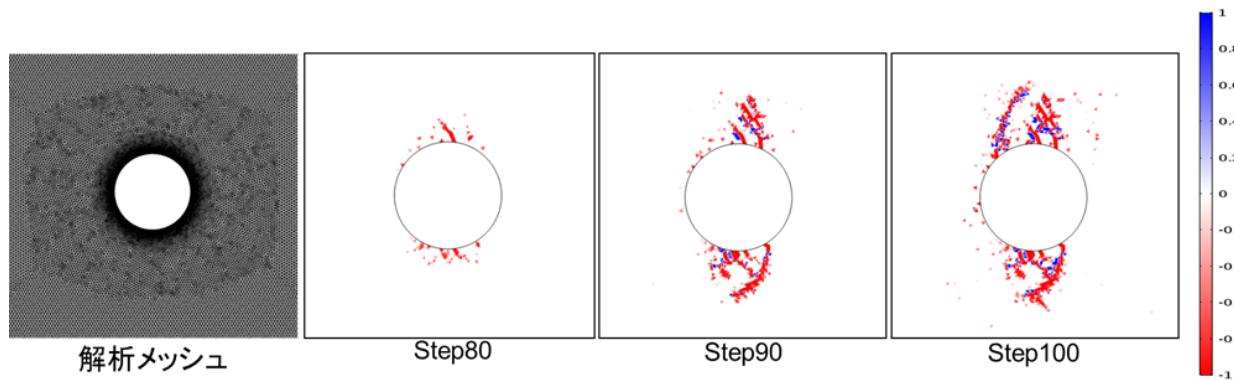


図-4 解析メッシュと坑道掘削中の損傷進展挙動

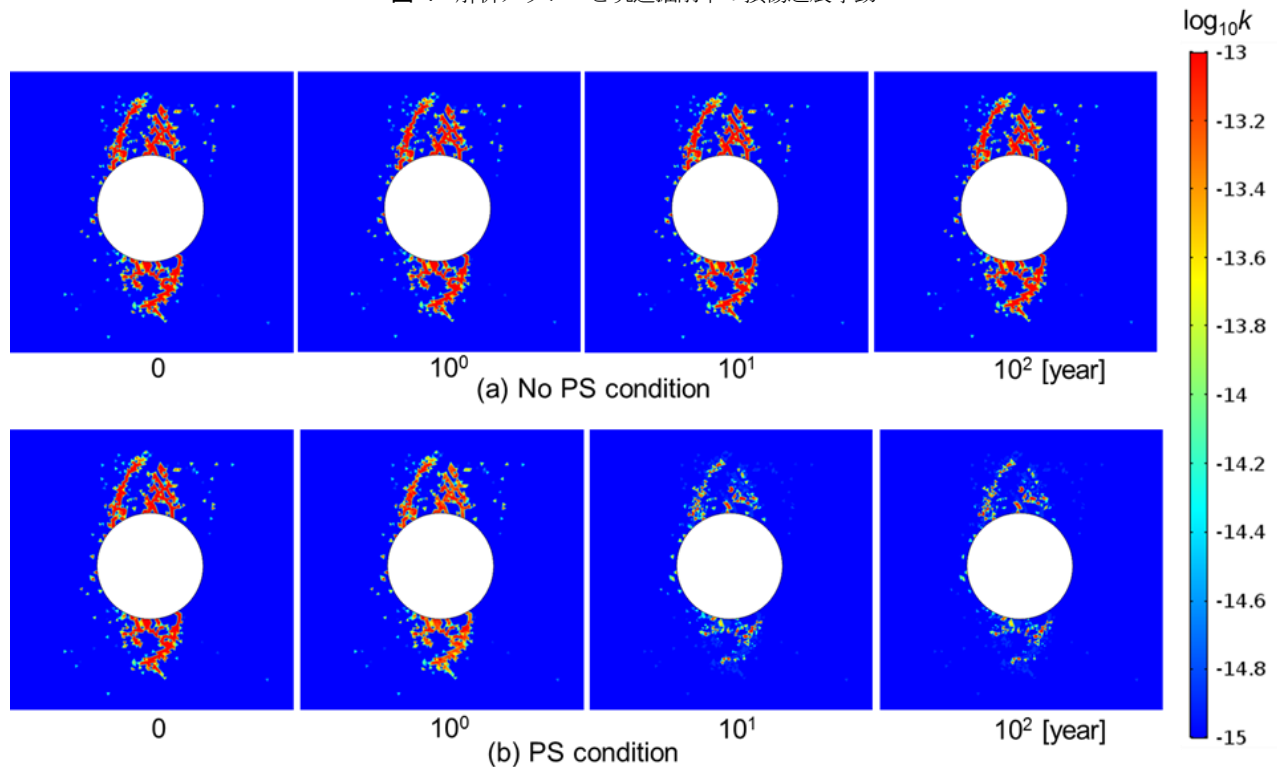


図-5 透過率の経時変化：(a) No PS condition, (b) PS condition

動が確認できる。これは、損傷域で亀裂接触部における圧力溶解が作用していることに起因している。初期状態から廃棄体設置後100年の時点で、ほとんどの損傷域において、健岩部と近い値まで透過率が低下していることが確認できる。しかし、圧力溶解を考慮した場合でも、引張による損傷域では、透過率が初期状態からほとんど変化していないことが分かる。図-4と図-5を比較すると、圧力溶解を考慮した場合で、透過率が変化していない領域は引張による損傷域と一致していることが確認できる。これは、圧縮応力が駆動力である圧力溶解は、引張応力場では生じないためである。これらより、廃棄体設置後の岩盤の透水性経時変化を正確に予測するためには、岩盤内の応力分布を左右する初期地圧条件の詳細な把握が必須であるといえる。

4. まとめ

本研究では岩盤内での亀裂発生・進展と併せてその亀裂内での鉱物溶解・沈殿（圧力溶解及び自由表面溶解・沈殿）を計算可能なTHMC連成解析シミュレータを開発した。また、そのシミュレータを用いて、高レベル放射性廃棄物地層処分時の廃棄体周辺岩盤における長期透水性変化の予測解析を実施した。坑道掘削解析結果から、掘削により坑道周辺で亀裂が発生・進展した領域の透水性が健岩部より顕著に高くなる傾向が確認された。また、廃棄体設置後の長期連成解析の結果から、亀裂接触部での圧力溶解により、坑道周辺のほとんどの損傷域（せん断による損傷域）における透水性が他の健岩部とほぼ同等の値まで低下する傾向が確認された。しかし、引張による損傷域の透過率はほとんど初期状態から変化しておらず、岩盤の経時的な透水性変化を精緻に予測するには、岩盤の初期地圧条件の把握が重要であることが示唆された。

謝辞：本研究は、JSPS科研費JP26249139、JSPS特別研究員奨励費JP1035522および鹿島学術振興財団の助成により遂行された。ここに記して謝意を表する

参考文献

- 1) 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—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) 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.
- 3) Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Lee, D.S., Nakashima, S., and Kishida, K.: Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model, *Applied Geochemistry*, Vol.26, pp.2074–2088, 2011.
- 4) 鈴木英明，中間茂雄，藤田朝雄，今井久，九石正美：熱—水—応力—化による緩衝材の地球化学環境の変遷に着目したニアフィールド長期挙動評価の一例，原子力バックエンド研究，Vol.19，No.2，pp.39-50，2012.
- 5) Rutqvist, J., Wu, Y.-s., Tsang, C.-F., and Bodvasson, G.: A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 39, pp.429–442, 2002.
- 6) Wei, C., Zhu, W. C. S., and Ranjith, P. G.: A coupled Thermo-Hydrological-Mechanical Damage Model and Its Numerical Simulations of Damage Evolution in APSE, *materials*, Vol. 9, doi: 10.3390/ma9110841, 2016.
- 7) Wei, C., Zhu, W. C., Yu, Q. L., and Jeon, X. T., and Jeon, S.: Numerical simulation of excavation damaged zone under coupled thermo-mechanical conditions with varying mechanical parameters, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 75, pp.169–181, 2015.
- 8) 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.
- 9) Cocks, A., Ashby, M.: Intergranular fracture during power-law creep under multiaxial stresses. *Metal Science* Vol. 14，pp.395–402，1980.

DEVELOPMENT OF MULTI-PHYSICS SIMULATOR CONSIDERING FRACTURE INITIATION AND PROPAGATION

Sho OGATA, Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA

We have developed a THMC coupled model that can consider the pressure solution at contacting asperities within fractures predicted by damage theory. Using the developed model, long-term prediction of rock permeability was conducted. The predictions show that a number of fractures are generated near the disposal cavity and permeability increases in damaged zone during the excavation, and after excavation the permeability of the damaged zone decreases to that of intact zone due to pressure solution at contacting asperities within fractures.