

Dual porosity理論を考慮した連成シミュレータ による岩盤浸透流解析

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

本研究では、粒子接触部と共に既往のTHMC連成解析モデルでは考慮されていなかった不連続面接触部における圧力溶解現象を考慮することで岩石実部及び不連続面での地化学作用による岩盤の水理学特性変化を評価可能なTHMC連成解析モデルを構築した。また、構築したモデルを用いて、放射性廃棄物地層処分近傍の廃棄体周辺岩盤の透水特性変化の長期予測解析を実施した。解析結果から、本解析で想定したような地質環境条件下では、岩盤不連続面における圧力溶解の影響により、EdZにおいて空洞掘削後約1年程度で透水性が他の健全部と同等の値まで低下するという挙動が観察された。

Key Words : HLW repository, natural barrier, rock permeability, pressure solution, THMC coupling

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物システムの長期性能を検討する上で、天然バリアである廃棄体周辺岩盤（以下、周辺岩盤）の水理学特性変化の予測は重要である。地層処分施設近傍における周辺岩盤を含むニアフィールド環境では、廃棄体からの放熱、地下水環境の変化、空洞掘削による岩盤の応力環境変化、空隙水と岩石構成鉱物間の溶解・沈殿反応等の熱・水・応力・化学に関する各現象が相互に作用し合う場が形成され¹⁾、これらの熱・水・応力・化学に関する各現象の相互作用が周辺岩盤の水理学特性を長期的に変化させる。したがって、周辺岩盤の水理学特性の長期挙動の予測には、熱・水・応力・化学に関する各現象を包括的に考慮可能な連成数値シミュレータの開発が不可欠である。前述した熱・水・応力・化学連成現象の内、特に空隙水と岩石構成鉱物の間で生じる鉱物溶解・沈殿反応等の地化学作用が岩盤の水理学特性に無視できない影響を及ぼすと考えられている。これまでに、多くの熱(Thermal)・水(Hydro)・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^{2,3)}、実際の地質環境条件に即した数値解析を実施し、周辺岩盤を含むニアフィールド環境の長期挙動を予測する研究が実施されてきた。しかし、既往のTHMC連成解析モデルの中には、地化学現象に伴う周

辺岩盤の水理学特性変化を詳細に評価した事例はほとんど存在しない。

これらをふまえ、筆者はこれまでに自由表面溶解と共に岩石実部内の粒子接触部での圧力溶解を考慮可能なTHMC連成解析モデルを開発している⁴⁾。しかし、このモデルでは岩石内不連続面接触部で生じる圧力溶解現象は考慮されておらず、これまでに、粒子接触部と不連続面接触部での圧力溶解を共に考慮したモデルは構築されていない。

そこで、本研究では、粒子接触部と共に不連続面接触部での圧力溶解を考慮することで、岩石実部・不連続面の両領域における地化学作用による岩盤の透水性変化を精緻に評価可能なTHMC連成解析モデルを開発し、周辺岩盤の水理学特性の長期挙動予測を行うとともに、粒子接触部及び不連続面接触部における圧力溶解現象が周辺岩盤の水理学特性変化に及ぼす影響を評価する。

2. THMC連成解析モデル

(1) モデルの概要

本研究で構築した THMC 連成解析モデルは、周辺岩盤におけるガラス固化体からの放熱や地下水流動特性、岩盤の応力環境、空隙水と鉱物の反応等の熱・水・応

力・化学に関する各現象が相互に影響し合う連成プロセスを記述する連成解析モデルである。本モデルは、筆者らが以前開発した THMC 連成解析モデル⁴⁾に種々の改良を施すことにより構築された解析モデルである。最も大きな改良点は、前述した現行モデル⁴⁾で考慮されていなかった不連続面接触部における圧力溶解現象を新たに組み込んでいる点である。これにより、岩石実部と不連続面の両領域における地化学現象に伴う岩盤の水理特性変化を評価可能であるという点が従来の THMC 連成解析モデルと異なる本モデルの特徴である。他にも、前述した現行モデル⁴⁾で考慮出来ていなかった水-応力、熱-応力それぞれの連成相互作用を導入し、T-H-M-C 全ての作用が相互に影響し合う連成関係を構築している(図-1)。また、筆者らのこれまでのモデルでは、単一鉱物についての地化学反応しか記述出来なかったが、本モデルでは、複数鉱物に関する鉱物溶解・沈殿現象といった地化学反応プロセスを記述可能である。

(2) 支配方程式

本モデルは、地下水流、熱輸送、化学種輸送、地化学反応(鉱物溶解・沈殿)を考慮し、各現象を流動方程式、熱エネルギー方程式、線形弾性則、多孔質弾性体理論、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(構成則)で記述する有限要素モデルである。

a) 地下水流動

本モデルでは、弾性体の挙動を示す水飽和状態の多孔質岩盤を評価対象として想定しており、水-応力の相互作用の計算には多孔質弾性体理論⁹⁾を用いる。また、想定する多孔質岩盤は、亀裂から構成される不連続面と粒子と空隙から構成される岩石実部の異なる空隙系を有すると仮定する。このような二重空隙媒体中の水の流れを記述するため、異なる空隙系間での水の移動等を考慮可能な dual porosity⁹⁾理論(図-2)を多孔質弾性体理論に適用した以下の流動方程式を用いる。式(1)～(3)は、それぞれ岩石内亀裂部、岩石実部におけるダルシー則と水の質量保存式である。式(4)は亀裂部と岩石実部の間を移動する水の量を表している。

$$\rho_w S_f \frac{\partial P_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}_f) + \rho_w \alpha_f \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = f_w \quad (1)$$

$$\rho_w S_m \frac{\partial P_m}{\partial t} + \rho_w \alpha_m \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = f_w \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_f = -\frac{k_f}{\mu} (\nabla P_f + \rho_w g \nabla D) \quad (3)$$

$$f_w = \frac{-\alpha k_m}{\mu} (P_f - P_m) \quad (4)$$

ここで、 ρ_w : 水の密度 [kg/s], $\mathbf{u}_f$: 不連続面における

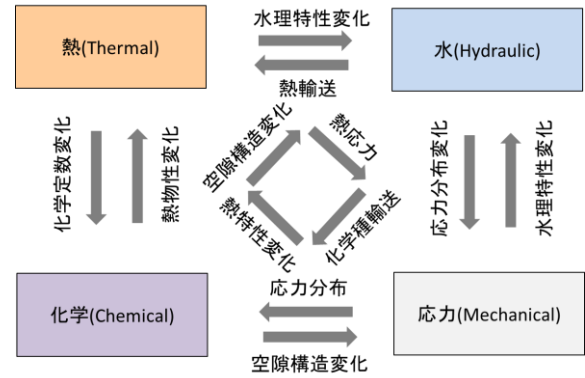


図-1 本モデルで考慮する THMC 相互作用

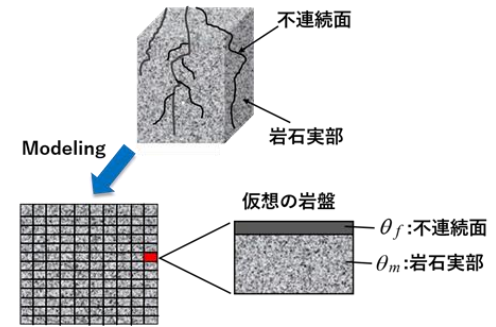


図-2 Dual porosity 理論概念図⁹⁾

水の流速 [m/s], $k_{f,m}$: 透過率 (添え字 f,m はそれぞれ不連続面, 岩石実部を表す) [m²], $P_{f,m}$: 間隙水圧 [Pa], $S_{f,m}$: 水の貯留率 [1/Pa], $\alpha_{f,m}$: Biot willis 係数 [-], μ : 水の粘性係数 [Pa·s], ε_v : 体積ひずみ [-], g : 重力加速度 [m/s²], D : 位置水頭 [m], f_w : 不連続面と岩石実部間で移動する水の質量 [kg/(m³s)], α : 岩石実部領域の形状係数 [1/m²]である。不連続面と岩石実部を合わせた多孔質媒体全体としての流速は、それぞれの領域の値に多孔質岩盤中に存在する不連続面・岩石実部それぞれの領域割合を乗じて求められる。

$$\mathbf{u} = \theta_f \mathbf{u}_f + \theta_m \mathbf{u}_m \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{u}$: 多孔質岩盤内の地下水流速 [m/s], θ_f : 多孔質岩盤内に不連続面が占める割合 [-], θ_m : 多孔質岩盤内に岩石実部が占める割合 [-]である。

b) 応力解析

応力解析では、平面ひずみ状態を仮定し、多孔質弾性理論に基づき、応力つり合い式と水圧及び熱応力の変化を考慮した線形弾性則により岩盤内応力を算出する。また、本解析では岩石の破壊は考慮していない。

$$-\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}_v \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_T) + \alpha_B P \mathbf{I} \quad (7)$$

$$\alpha_B P = \alpha_B (\theta_f P_f + \theta_m P_m) \quad (8)$$

ここで, F_v : 物体力 [N/m³], σ : 応力テンソル [N/m²], E : 弾性係数行列 [N/m²], ε : ひずみテンソル [-], ε_T : 熱ひずみテンソル [-], α_B : 多孔質岩盤の Biot willis 係数 [-]である.

c) 化学種輸送

岩盤空隙水中の物質濃度の輸送過程を記述する化学種輸送方程式を次式に示す. 本解析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.

$$\frac{\partial(c_i \phi)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = \nabla \cdot (\mathbf{D}_{i,e} \nabla c_i) + r_i \quad (9)$$

$$\mathbf{D}_{i,e} = \phi \tau \mathbf{D}_{i,b} \quad (10)$$

$$r_i = \sum_j v_i R_j \quad (11)$$

ここで, c_i : 化学種 i の空隙水中の濃度 [mol/m³], ϕ : 空隙率 [-], $\mathbf{D}_{i,e}$: 化学種 i の実効拡散係数 [m²/s], τ : 液相屈曲率 [-] ($\tau=1$), $\mathbf{D}_{i,b}$: 空隙水中の拡散係数行列 [m²/s], r_i : 鉱物溶解・沈殿による化学種 i の濃度変化 [mol/(m³ s)], v_i : 化学種 i の化学両論係数 [-], R_j : 多孔質岩盤中の鉱物 j の反応速度 [mol/(m³ s)]である.

d) 鉱物反応

本モデルでは, 不連続面・岩石実部の各領域それぞれにおいて生じる鉱物反応 (自由表面溶解沈殿現象と圧力溶解現象) を考慮する. ここで, 各領域の鉱物反応について dual porosity 理論を適用すると, 多孔質岩盤における鉱物 j の反応速度式は各領域における鉱物反応速度と各領域の存在割合を考慮した次式で表される.

$$R_j = \theta_f R_{f,j} + \theta_m R_{m,j} \quad (12)$$

ここで, $R_{f,j}$: 不連続面における鉱物反応速度式 [mol/(m³ s)], $R_{m,j}$: 岩石実部における圧力溶解速度 [mol/(m³ s)]である. また, 岩石実部と不連続面それぞれにおける鉱物反応速度は各領域における自由表面溶解速度と圧力溶解速度を考慮した次式で定義される.

$$R_{m,j} = R_{m,j}^{FF} + R_{m,j}^{PS} \quad (13)$$

$$R_{f,j} = R_{f,j}^{FF} + R_{f,j}^{PS} \quad (14)$$

ここで, $R_{m,j}^{FF}$: 岩石実部における自由表面溶解・沈殿反応速度 [mol/(m³ s)], $R_{m,j}^{PS}$: 粒子接触部における圧力溶解速度 [mol/(m³ s)], $R_{f,j}^{FF}$: 不連続面における自由表面溶解・沈殿反応速度 [mol/(m³ s)], $R_{f,j}^{PS}$: 不連続面接触部における圧力溶解速度 [mol/(m³ s)]である.

e) 岩石実部内の鉱物反応

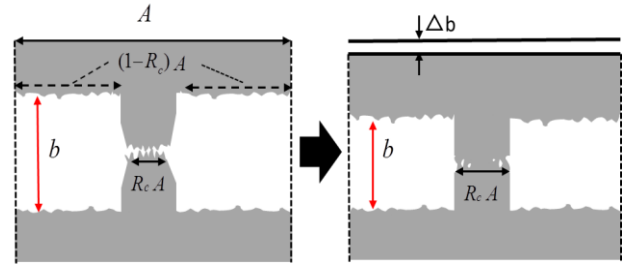


図-3 不連続面内代表要素⁹⁾

岩石実部の空隙内で生じる自由表面溶解・沈殿反応は考慮する全鉱物数が n であるとき, Lasaga⁷⁾の溶解速度式により次式で表される.

$$R_m^{FF} = \sum_j^n f_r x_j k_{+,j} A_g (a_{H^+})^q (1 - Q_j / K_{eq,j}) \quad (15)$$

ここで, x_j : 鉱物 j の体積含有割合 [-], $k_{+,j}$: 鉱物の溶解速度定数 [mol/(m² s)], f_r : ラフネスファクター [-], A_g : 幾何学的に求めた単位溶液当たりの鉱物表面積 [m²·m³], a_{H^+} : H⁺の活量 [-], q : 反応次数 [-], Q_j : 鉱物のイオン活量積 [-], $K_{eq,j}$: 鉱物の平衡定数 [-]である. また, 考慮する全鉱物数が n であるとき岩石実部内の粒子接触部で生じる圧力溶解速度は次式で表される^{4,8)}.

$$R_m^{PS} = \sum_j^n \frac{3 f_r x_j R_{m,c} V_{m,j} k_{+,j}}{4RTd} \left(\frac{\sigma_{VM}}{R_{m,c}} - \sigma_c \right) \quad (16)$$

ここで, V_m : モル体積 [m³/mol], σ_c : 臨界応力 [Pa], d : 粒子直径 [m], $R_{m,c}$: 粒子接触割合 [-], σ_m : 平均有効応力 [MPa], ϕ_m : 岩石実部領域の空隙率 [-].

f) 岩石不連続面内の鉱物反応

本解析モデルでは, 岩石不連続面内において, 図-3のような一つの不連続面接触と空隙から構成される任意の不連続面領域を代表要素と仮定する. 上記の様な代表要素を仮定すると, Lasaga⁷⁾の溶解速度式に基づき, 考慮する全鉱物数が n であるとき, 自由表面溶解・沈殿速度は次式で定義される.

$$R_{f,j}^{FF} = \sum_j^n f_r x_j k_{+,j} (a_{H^+})^q (1 - Q_j / K_{eq,j}) / b \quad (17)$$

ここで, b : 代表要素の平均幾何学的開口幅 [m]である. また, 本解析モデルで最も重要となる不連続面内アスペリティ接触部 (不連続面接触部) で生じる圧力溶解の速度式は, 代表要素内の不連続面接触面積と空隙体積を考慮することにより次式で定義される.

$$R_{f,j}^{PS} = \sum_j^n \frac{3 f_r x_j R_{f,c} V_{m,j} k_{+,j}}{RTb} \left(\frac{\sigma_{VM}}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (18)$$

ここで, $R_{f,c}$: 不連続面接触率 [-]である. 不連続面接触部において, 圧力溶解現象が進行すると, 不連続面開

口幅が減少してゆき、それに伴い不連続面接触率が增大していく。この不連続面開口幅とその接触率の関係は以下の式で表される⁹⁾。

$$b = b_r + (b_0 - b_r) \exp(-(R_{f,c} - R_{f,c0}) / a) \quad (19)$$

ここで、 b_r ：残留開口幅 [m]、 b_0 ：初期開口幅 [m]、 $R_{f,c,0}$ ：初期不連続面接触率[-]である。

g) 岩石不連続面における開口幅・透水性変化

本解析モデルでは、不連続面の開口幅変化について鉱物溶解・沈殿反応等の化学作用による影響のみ評価する。

$$b = b_0 + \Delta b^{FF} + \Delta b^{PS} \quad (20)$$

ここで、 Δb^{FF} ：不連続面内自由表面溶解・沈殿による開口幅変化 [m]、 Δb^{PS} ：不連続面接触部における圧力溶解による開口幅変化 [m]である。また、不連続面における透過率変化は、不連続面において三乗則が成立すると仮定し、次式により評価される。

$$k_f = \frac{b^2}{12} \quad (21)$$

3. 提案モデルを用いた解析例

(1) 解析条件

構築した解析モデルを用いて放射性廃棄物地層処分近傍の廃棄体周辺岩盤の長期挙動予測解析を実施した。天然バリアのモデル化に際し、我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—第2次取りまとめ¹⁰⁾—（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。解析領域は図-4に示したような地表から深度700mまでの岩盤を対象としている。岩盤は石英(60 Vol %)、正長石(25 Vol %)、曹長石(14 Vol %)、灰長石(1 Vol %)の4種類の鉱物から構成される珪質堆積岩を設定した(初期空隙率40%、乾燥密度1700 kg/m³)¹¹⁾。地下岩盤の動水勾配は1/1000、地温勾配は5°C/100mとし、地表面は15°Cに設定している¹²⁾。また、坑道掘削影響領域 (EdZ) に関しては、第2次取りまとめ¹⁰⁾で示された掘削影響モデルより評価している。第2次取りまとめ¹⁰⁾では、EdZとして坑道壁面より約1mの範囲でマイクロクラックが発生し、透過率が健岩部より、2オーダー程度高くなることが報告されている^{2,10)}。そのため本解析では、坑道壁面から0.8mの範囲をEdZ、他の領域を健岩部とし（図-4）、健岩部の透過率である $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ¹³⁾に対して、EdZの初期透過率を2オーダー高い $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ に設定している。また、岩石実部と無数の不連続面が混在するEdZの計算においてのみdual porosity理論を適用しており、解析上、EdZ内に平均的に1.0%の不連続面領域が存在する設定となっている。一方、健岩部領域においては、

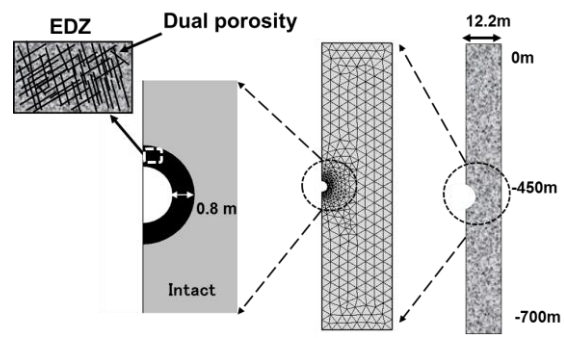


図-4 解析領域^{2,4)}

表-1 解析に用いたパラメータ¹¹⁾⁻¹³⁾

	Edz	健岩部
ヤング率[GPa]	2.5	2.5
ポアソン比[-]	0.3	0.3
初期透過率[m ²]	1.0×10^{-14}	1.0×10^{-16}
初期空隙率[-]	0.4	0.4
初期不連続面開口幅[μm]	11	—
岩石実部占有割合[%]	99	—
不連続面占有割合[%]	1.0	—

不連続面の存在が極めて少ないと仮定し、岩石実部のみから構成される通常のsingle porosityモデルを適用する。解析期間は廃棄体設置後10000年間を設定している。次に、境界条件について記す。廃棄体からの放熱については、第2次取りまとめにおいて実施された温度解析から得られた緩衝材外側の温度変化をモデルの坑道壁面の温度として与えている¹⁰⁾。また、熱移動に関しては、坑道に垂直な側面に対象条件を設定し、この側面と坑道壁面を除く他の全側面に熱流出条件を設定している。化学種輸送については、坑道に垂直な側面に対象条件を設定し、この側面を除く他の全側面に化学種濃度の流出条件を設定している。岩盤内応力に関しては、空洞掘削に伴う応力再配分を考慮した自重解析を実施した。土圧係数 K_0 は、地表面から深度200mまでの領域では0.5に200m以深では1.0に設定した¹⁴⁾。解析に用いたパラメータの一覧を表-1に示す。

(2) 解析結果

まず、岩盤内の温度分布変化を図-5に示す。図より、廃棄体からの放熱により空洞周辺の温度が100年間で最大80°C程度まで増加していることがわかる。また、空洞周辺温度が10000年の時点で、領域全体の温度は初期温度に近い値まで低下している。次に空洞掘削前と、空洞掘削後10000年までのvon Mises応力分布を図-6に示す。

本解析においてvon Mises応力は、圧力溶解の駆動力となる重要なパラメータである。また、一般的にvon Mises応力は岩石の破壊判定基準等に用いられることが多いパラメータであるが、本解析では、岩石の破壊現象は考慮しておらず、von Mises応力値による破壊判定は行わないものとする。図より、空洞掘削に伴う応力再配分により、空洞周辺のEdZでvon Mises応力が増加していることが確認できる。本解析では圧力溶解が岩盤に与える影響を評価するため、圧溶解の有無で解析結果を比較する。圧力溶解を考慮する場合（自由表面溶解・沈殿と圧力溶解を考慮する場合）と圧力溶解を考慮しない場合（自由表面溶解・沈殿のみを考慮する場合）の空洞周辺の透過率（透過率 k を対数表記した値（ $\log_{10}k$ ））の経時変化を図-7に示す。ここで、留意すべきは、圧力溶解現象が、想定される実際の地層処分環境で発生するかどうかは現状判明してはいないが、本解析では、あくまで式(18)で示される圧力溶解の理論式の条件を満たす様な地下環境条件下では圧力溶解が発生するというケースを想定し、解析を実施しているという点である。図から、圧力溶解を考慮しない場合は、透過率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、初期状態から1年間でEdZ内の透過率が他の健岩部と同等の値まで低下していることが分かる。また、1年以降も空洞周辺において、更に透水性が経時的に低下していく様子が確認できる。これらの空洞周辺のEdZにおける経時的な透水性低下は、空洞掘削に伴う応力再配分により、空洞周辺のEDZでvon Mises応力が増加し、その結果として、EdZで圧力溶解現象が顕在化しているためである。

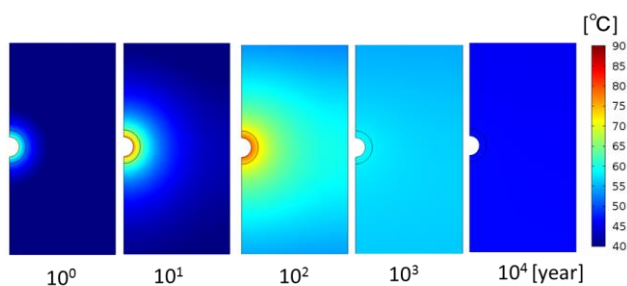


図-5 岩盤内温度変化

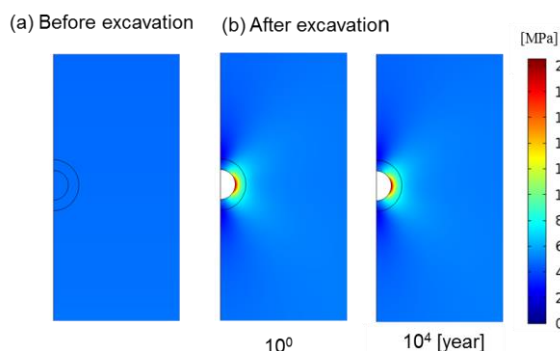


図-6 掘削前後の von Mises 応力分布変化

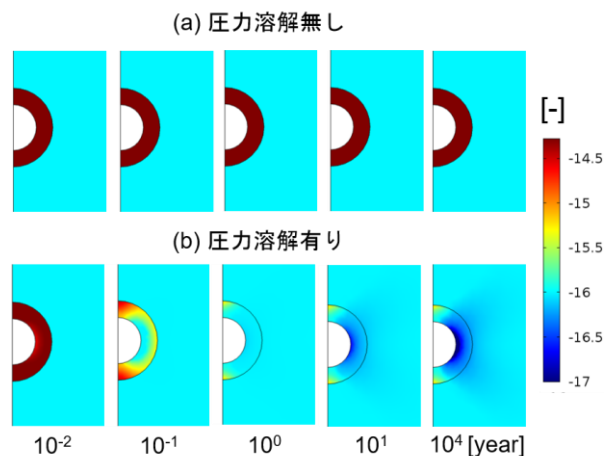


図-7 透過率経時変化

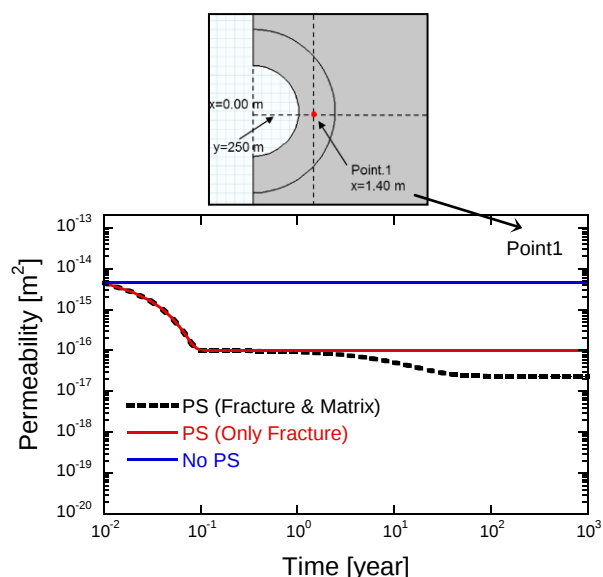


図-8 Point1における圧力溶解の有無による透過率変化比較

つぎに、EdZでの岩石実部と不連続面の各領域における圧力溶解が周辺岩盤の透水性経時変化に及ぼす影響を評価する。各領域（岩石実部、不連続面）での圧力溶解の有無で、図-8に示すEdZ内の観測点(Point.1)における透過率の経時変化を比較したものを図-8に示す。EdZで不連続面における圧力溶解のみを考慮した場合（図中、PS（Only Fracture））は、初期状態から約1年程度で約2オーダー程度透過率が低下し、健岩部の初期透過率（ $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ）と同等の値まで低下し、定常状態に至っていることが分かる。一方、不連続面と共に岩石実部における圧力溶解を考慮した場合（図中、PS（Fracture & matrix））は、岩石実部における圧力溶解により、不連続面での圧力溶解による減少挙動が定常化した後もより緩やかな勾配で透水性が減少していく挙動が確認できる。

4. まとめ

本研究では、粒子接触部と共に不連続面接触部における圧力溶解現象を考慮することで岩石実部と不連続面の両領域における地化学現象による岩盤の透水性変化を評価可能な THMC 連成解析モデルを新たに開発した。また、解析モデルを用いて、放射性廃棄物地層処分近傍の廃棄体周辺岩盤の透水特性変化の長期予測解析を行った。解析結果から、岩盤不連続面における圧力溶解の影響により、EdZ において空洞掘削後約 1 年程度で透水性が他の健岩部と同等の値まで低下した後、岩石実部における圧力溶解の影響により透水性が時間の経過とともに緩やかに減少していく挙動が観察された。これらの結果から、本解析で想定したような地下環境条件下では、EdZ のような岩石実部と不連続面の異なる空隙系を持つ領域において、岩石実部より不連続面における圧力溶解現象の方が岩盤の透水性変化に支配的影響を持ち、その働きにより空洞掘削に伴う EdZ における透水性増加の影響を低減させるということが判明した。

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 99-022，634pp.，1999.
- 2) 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.
- 3) 核燃料サイクル開発機構東海事業所，熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析コードの開発：JNC TN8400 2002-022，pp. 1-47，2003.
- 4) 安原英明，緒方奨，木下尚樹，岸田潔：圧力溶解現象を考慮した数値解析モデルによる岩盤の長期透水特性評価，土木学会論文集 C，Vol.71，No.4，pp.292-300，2015.
- 5) Stephan C. Cowin：Bone poroelasticity，Journal of Biomechanics，Vol.32，pp.217-238，1999.
- 6) Barenblatt, G.I., Zheltov, I.P. and Kochina, I.N., : Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, Journal of Applied Mathematical Mechanics, vol.24, No.5, pp.1286-1303, 1960.
- 7) Lasaga A.C. : Chemical Kinetics of Water-Rock Interactions, Journal of geophysical Research, Vol.89, No.B6, pp.4009-4025, 1984.
- 8) Yasuhara, H., Elsworth, D. and Polak, A. : A mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution, J.Geophys.Res., Vol.108, No.B11, 2530, doi : 10.1029/2003JB002536, 2003.
- 9) Yasuhara, H., Polak, A., Mitani, Y., Grader, A., Halleck, P., and Elsworth, D.: Evolution of fracture permeability through fluid-rock reaction under hydrothermal conditions. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 244, pp. 186-200, 2006.
- 10) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ—分冊 1 深地層の科学的研究，JNC TN1400 2005-14，415pp.，2005.
- 11) 亀井玄人，本多明，三原守弘，小田恵，村上裕，増田賢太，山口耕平，松田節郎，市毛悟，高橋邦明，目黒義弘，山口大美，榊原哲郎，佐々木紀樹：TRU 廃棄物処理・処分技術に関する研究開発，JAEA-Research 2008-082，pp. 1-84，2008.
- 12) 宮澤大輔，真田祐幸，木山保，杉田裕，石島洋二：幌延地域に分布する珪質岩を対象とした間隙弾性パラメータの取得と室内試験法の提案，Journal of MMIJ，Vol.127，pp.132-138, 2011.
- 13) 日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター，幌延深地層研究計画平成25年度調査研究成果報告，85pp.，2014.
- 14) E. Hoek, P. K. Kaiser and W. F. Bawden, SUPPORT UNDERGROUND EXCAVATION IN HARD ROCK, pp. 1-235, 1993.

Coupled THMC modeling by incorporating pressure solution with dual porosity theory and its application to long-term flow simulation of porous rocks

S.Ogata, H.Yasuhara,K.Kishida

A coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical (THMC) numerical model was developed to evaluate the long-term permeability change of the fractured rocks by adopting the dual porosity theory. The model examines influence of the geochemical reaction on the evolution of the permeability in sedimentary rocks to consider pressure solution in detail. Pressure solution that may occur in both grain contacts and the contacting asperities within fractures was incorporated in the model. The long-term prediction of rock permeability by assuming subsurface environment near the radioactive waste repository was conducted using the developed model. As a result, the permeability reduction by two orders of magnitude smaller than the initial value occurs due to pressure solution within the fractures in the EdZ area.