

損傷理論を実装した連成数値シミュレータによる岩盤の長期透水特性評価

京都大学大学院 学生会員 ○緒方 奨
 愛媛大学大学院 正会員 安原 英明
 京都大学大学院 正会員 岸田 潔

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検討する上で重要となる廃棄体周辺岩盤の長期透水性変化挙動を予測するためには、廃棄体処分坑道掘削時に形成される亀裂の内部で生じる岩石鉱物の溶解・沈殿現象の考慮が必須である。本研究では、損傷理論を用いた亀裂発生・進展の予測と形成された亀裂内での鉱物溶解・沈殿を実装した熱・水・応力・化学連成数値シミュレータを構築し、高レベル放射性廃棄物地層処分時の廃棄体周辺岩盤の長期透水性変化を予測する。

2. 数値シミュレータの概要

本シミュレータは、図1に示すような熱・水・応力・化学の各要素間の相互作用に Damage (損傷) を加えた連成相互作用を考慮する。亀裂発生・進展挙動の計算に用いる損傷理論では、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損傷条件式 F_1 とせん断損傷条件式 F_2 を用いて判定する¹⁾。

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

ここで、 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 [$^\circ$] である。損傷した要素について損傷変数 D ($0 \leq D \leq 1$) が計算され、岩盤の弾性係数 E は損傷発生に伴い減少する¹⁾。

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ and } F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_t} \right|^n & F_1 = 0 \text{ and } \Delta F_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_c} \right|^n & F_2 = 0 \text{ and } \Delta F_2 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E = (1 - D) E_0 \quad (3)$$

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 [-] ($n = 2$)、 E_0 は損傷の無い

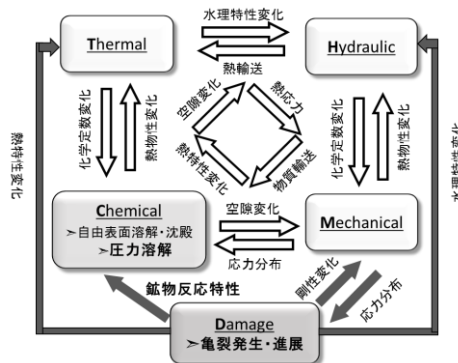


図1 本解析モデルで考慮する連成相互作用

状態の岩盤の弾性係数 [N m^{-2}] である。本研究では、 $D > 0$ を亀裂発生とし、亀裂内での圧力溶解速度は、損傷域 ($D > 0$) でのみ次式で定義される。

$$\begin{cases} R_j^{ps} = 0 & D = 0 \\ R_j^{ps} = \frac{3R_c f_r V_{m,j} k_{+,j}}{RTb \cdot (1 - R_c)} \cdot \left(\frac{\langle \sigma_3 \rangle}{R_c} - \sigma_c \right) & D > 0, F_1 = 0 \\ R_j^{ps} = \frac{3R_c f_r V_{m,j} k_{+,j}}{RTb \cdot (1 - R_c)} \cdot \left(\frac{\langle \sigma_1 \rangle + \langle \sigma_3 \rangle}{R_c} - \sigma_c \right) & D > 0, F_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

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 [-]、 T は温度 [K]、 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 [$\text{kJ mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] である。

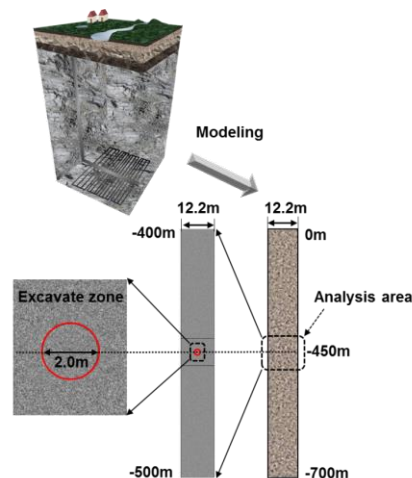


図2 解析領域

キーワード 損傷理論, 圧力溶解, 熱・水・応力・化学連成, 透水性変化, 亀裂発生・進展

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-338 TEL 075-383-323

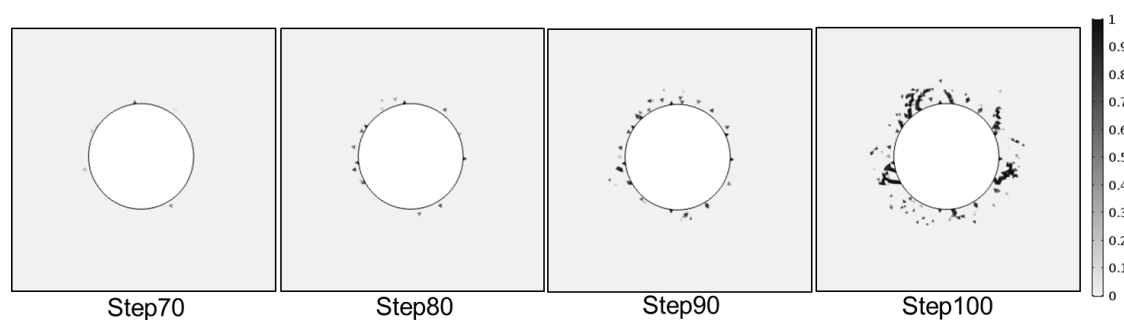


図3 坑道掘削中の損傷進展挙動

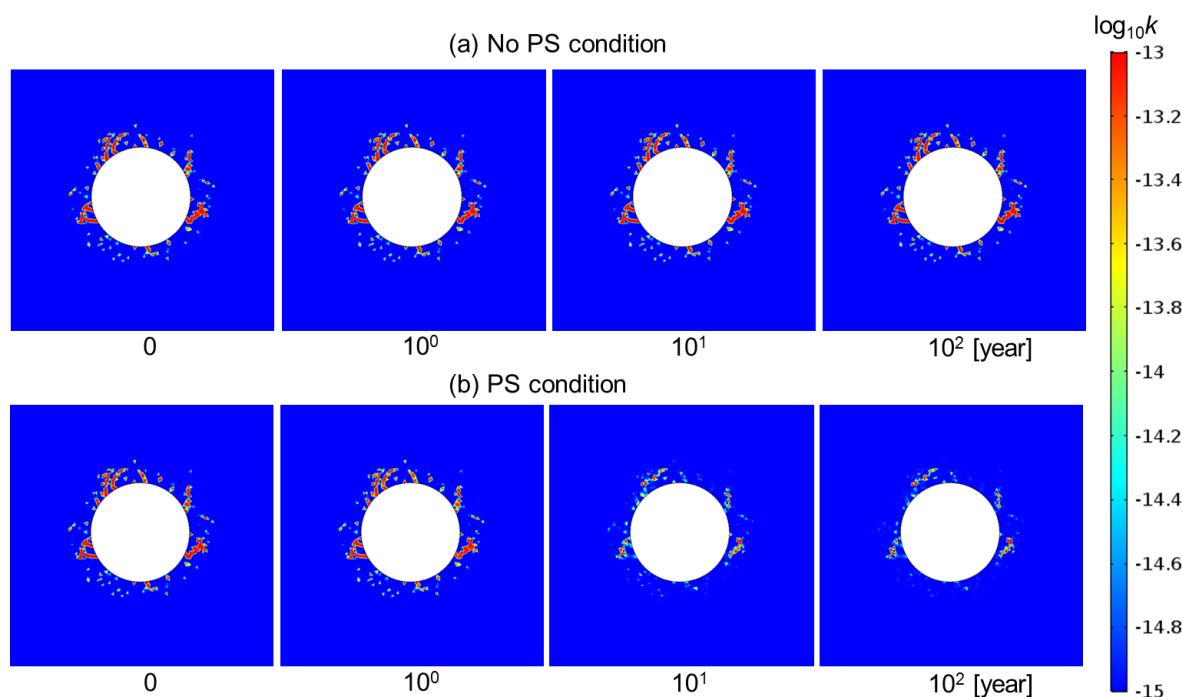


図4 透過率の経時変化：(a) No PS condition, (b) PS condition

3. 透水性変化予測解析の結果と考察及びまとめ

解析領域は、図2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に廃棄体を設置した。最初に廃棄体処分坑道の掘削解析を実施し、つぎに掘削終了時の岩盤内応力を初期条件とし、廃棄体処分後の周辺岩盤の透水性経時変化を予測した。掘削時の亀裂発生・進展挙動（損傷変数 D の変化）を図3に示す。掘削解析では、掘削ステップは100とし、側圧係数 K_0 は1.0とした。図より、坑道周辺に無数の亀裂が発生・進展していく様子が確認できる。本研究では、廃棄体処分後の周辺岩盤の透水性経時変化について、亀裂内部での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 k

を対数表記した値 ($\log_{10} k$) の経時変化を図4に示す。圧力溶解を考慮しない場合は、透過率は変化せず一定であるのに対し、圧力溶解を考慮した場合は、廃棄体設置後100年の時点で、ほとんどの損傷領域において、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。これは、損傷領域で亀裂内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。

上記の結果より、本研究で構築したシミュレータを用いて、廃棄体処分坑道掘削時に生じた亀裂の長期透水性変化シナリオを新たに示すことが出来た。

参考文献

- 1) Wei, C., Zhu, W. C, S., and Ranjith, P.G.: A coupled Thermal-Hydrological-Mechanical Damage Model and Its Numerical Simulations of Damage Evolution in APSE, materials, Vol. 9, doi: 10.3390/ma9110841, 2016.