

熱・水・応力・化学連成解析モデルによる単一不連続面浸透流解析

京都大学大学院 学生会員 ○緒方 奨
愛媛大学理工学研究科 正会員 安原 英明
京都大学工学研究科 正会員 岸田 潔

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの安全性を検討する上で、熱・水・応力・化学連成場における岩石不連続面の透水性変化の長期予測は必須である。実際の地層処分環境で想定されている熱・水・応力・化学連成現象の内、特に岩石内の不連続面接触部で生じる鉱物溶解反応（圧力溶解）が岩石不連続面の長期的な透水性変化に無視できない影響を及ぼすといわれている。しかし、これまでに不連続面接触部での圧力溶解による岩石不連続面の透水性変化を精度よく予測可能なモデルは開発されていない。そこで、本研究では、岩石内不連続面接触部での圧力溶解に起因する岩石の透水性変化を予測可能な熱・水・応力・化学連成解析シミュレータ (*iPSACC*)を開発する。また、そのシミュレータを用いて単一の人工不連続面を有する泥岩供試体を用いた透水試験の再現解析を実施し、シミュレータの性能を検証する。

2. 解析モデル

本研究で構築した連成解析シミュレータ *iPSACC* の特徴は、熱・水・応力・化学連成システムの中に岩石内不連続面接触部で生じる圧力溶解とそれに伴う岩石不連続面の透水性変化を導入している点である。本シミュレータでは、Yasuhara et.al (2011)¹⁾の概念モデルを拡張し、不連続面接触部での圧力溶解現象の定式化を行っている。図1のような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 (REV) と仮定し、不連続面接触部での圧力溶解速度 R_j^{ps} [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$] を次式で定義している。

$$R_j^{ps} = \frac{3 f_r R_c V_{m,j} k_{+,j}}{RTb(1-R_c)} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{R_c} - \sigma_c \right) \quad (1)$$

ここで、 $k_{+,j}$: 鉱物 j の溶解速度定数 [$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]、 f_r : ラフネスファクター、 $V_{m,j}$: モル体積 [$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$]、 σ_c : 臨界応力 [Pa]、 R_c : 不連続面接触割合、 σ_m : 平均有効応力 [Pa]、 T : 温度 [K]、 b : 幾何学的不連続面開口幅 [m]、 R : 気体定数 [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]である。また、図1の不連続面の開口幅 b と不連続面触割合 R_c の関係は次式で近似される¹⁾。

$$b = b_r + (b_0 - b_r) \exp(-(R_c - R_{c0})/a) \quad (2)$$

ここで、 b_r : 残留開口幅 [m]、 b_0 : 初期開口幅 [m]、 R_{c0} : 初期不連続面接触割合 [-]、 a : 定数 [-] である。

3. 解析概要

構築したモデルを用いて、単一不連続面を有する泥岩円柱供試体（直径 50 mm、高さ 100 mm : 図2（左））を用いた透水試験の再現解析を実施しシミュレータの妥当性を検証する。

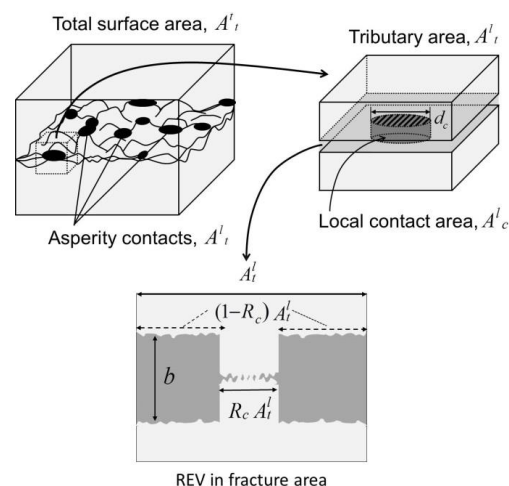


図1 不連続面領域代表要素概念モデル

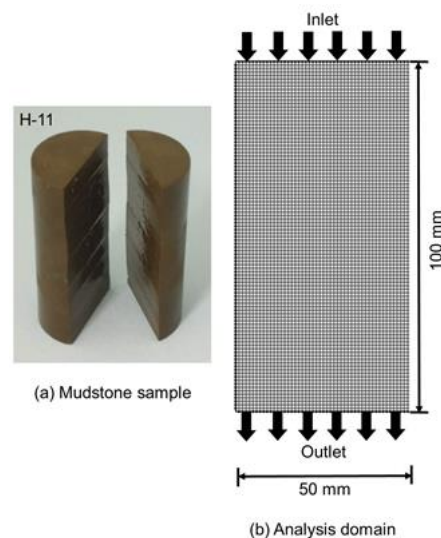


図2 泥岩透水試験の解析領域

キーワード 圧力溶解 岩盤不連続面の透水性 熱・水・応力・化学連成 単一不連続面
連絡先 〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-338 TEL 075-383-3231

解析領域には、幅 50 mm、高さ 100 mm の供試体中の不連続面を 2 次元で模擬した領域を設定した(図 2 (右))。

4. 解析結果

岩石不連続面透過率と透過水中の溶解物質濃度の経時変化について、式(2)中のパラメータ a が 0.06, 0.07, 0.08 の 3 ケースの場合の解析値を実験値と比較する。まず、不連続面透過率の経時変化を比較したものを図 3 に示す。図より、実験期間を通じて、いずれの解析結果も精度よく実際の透水性経時変化を再現できていることが分かる。つぎに、Si, K, Ca の溶出濃度についての実験値と解析値との比較を図 4 に示す。図より、いずれの元素も実験開始後初期の段階(0~200h)では、実験値が解析値を上回っていることが分かる。解析対象である透水試験では、透水開始前に供試体中の不連続面表面の洗浄を行っていない。そのため、実験開始後初期段階において、不連続面の表面に付着していた細粒分が透過水中に溶出し、物質濃度が高くなっていると考えられる。本モデルでは、このような現象は考慮しておらず、結果として解析値は実際の濃度を過小評価していると思われる。一方、実験開始後 200h 以降は、物質濃度(実験値)は定常的な挙動を描いていることが分かる。これは、実験開始後約 200h 以内に前述した細粒分の透過水中への流出が終了し、200h 以降は圧力溶解といった岩石自身の溶解反応が一定に近い速度で生じていることを示唆している。図より、200h 以降の時間帯において、解析値はいずれの元素においても実験値とよく一致しており、本シミュレータは圧力溶解等の岩石不連続面での鉱物溶解挙動を精度よく予測可能であるといえる。

5. おわりに

本研究では、不連続面接触部での圧力溶解に伴う岩石不連続面の透水性変化を考慮可能な連成シミュレータを新たに開発した。また、そのシミュレータを用いて単一不連続面を有する泥岩供試体を用いた透水試験の再現解析を実施した。その結果、提案シミュレータは、岩石不連続面の透水・物質輸送特性変化を精度よく再現可能であることが示された。

参考文献

- 1) Yasuhara et.al. Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model. Applied Geochem. 2011; 26: 2074–2088.

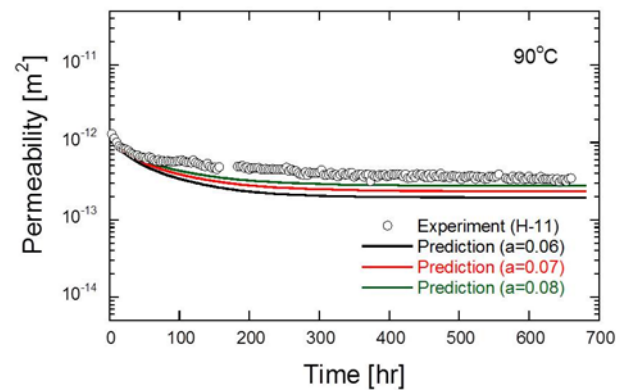


図 3 実験値と解析値の比較 (透過率変化)

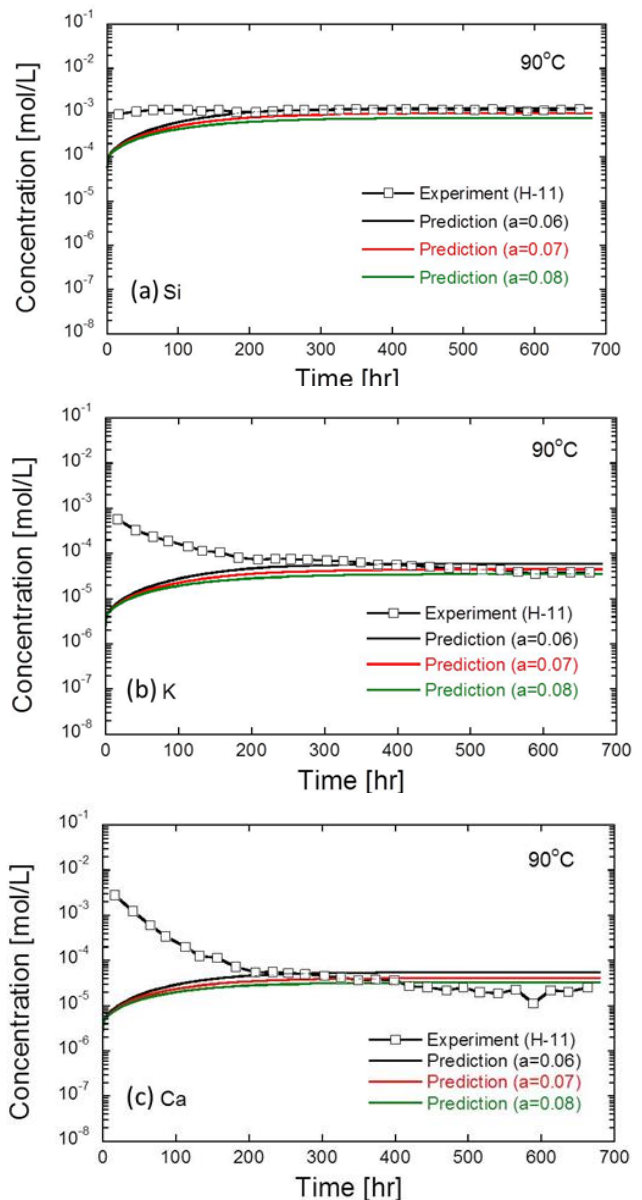


図 4 実験値と解析値の比較
(物質濃度変化 (a) Si, (b) K, (c) Ca)