熱・水・応力・化学連成解析モデルによる不連続性岩盤の長期透水特性予測解析

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

1．はじめに

放射性廃棄物の地層処分や地熱発電システムの地下空間を利用する様々な工学的問題を検討する上で地下深部での熱・水・応力・化学連成現象による岩盤の水理学特性変化の予測は必要不可欠である．この熱・水・応力・化学連成現象の内，特に岩石構成鉱物の溶解・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いわれている．この地化学作用による岩盤の透水特性変化の評価には自由表面溶解や圧力溶解といった地化学現象の詳細な考慮が重要である．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した連成解析モデル[1]が開発されているが，不連続面接触部での圧力溶解を詳細に考慮したモデルは存在しない．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特性変化を精緻に評価可能な熱・水・応力・化学連成解析モデルを開発し，地下岩盤の水理学特性の長期挙動予測を行う．

2. 解析モデル

本研究で構築した連成解析モデル[2]は，飽和条件の多孔質岩盤を解析対象としている．想定する多孔質岩盤には無数の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二つの領域が存在すると仮定する．従って，本モデルでは，図 1 に示すように一つの計算要素内に，不連続面と岩石実部それぞれの領域存在割合を与えることにより仮想的に異なる空隙系を持つ不連続面と岩石実部を考慮可能な dual porosity[3]理論を用いる．この dual porosity 理論に基づき，多孔質岩盤の圧力溶解速度は岩石実部地と不連続面の両領域における圧力溶解速度を考慮した次式で定義される．

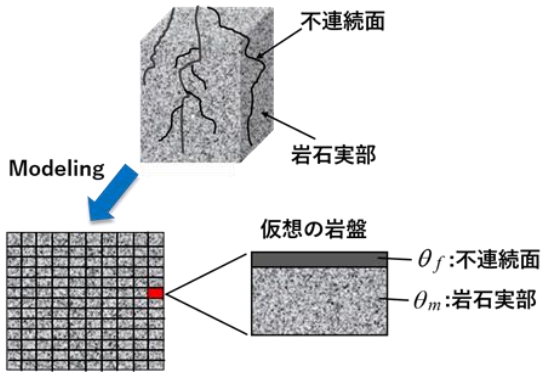

図 1　dual porosity 理論[3]概念図

$$R_j^{PS} = \theta_f R_{f,j}^{PS} + \theta_m R_{m,j}^{PS} \qquad (1)$$

ここで，$R_{f,j}$：不連続面における自由表面溶解・沈殿速度 [mol m^{-3} s^{-1}]，$R_{f,diss,j}^{PS}$：不連続面における圧力溶解速度 [mol m^{-3} s^{-1}]，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．

3. 解析事例

構築した解析モデルを用いて地下岩盤の透水特性変化の長期予測解析を実施する．解析領域は図 2 に示すような地表面から深度 700m までの地下岩盤を設定している．想定する岩盤は珪質岩で構成されており，解析期間は 10000 年である．

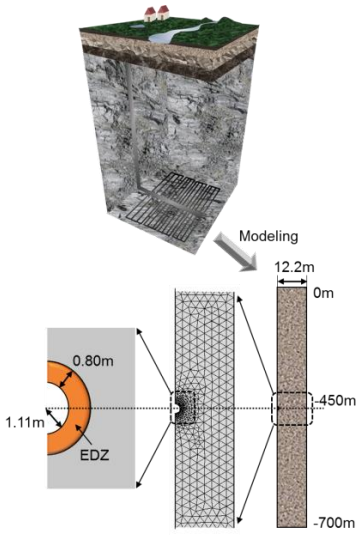

図 2　解析領域

キーワード　地化学作用　岩盤の透水性　圧力溶解　dual porosity
連絡先　〒 615-8540　京都市西京区京都大学桂 C1-2-338　TEL 075-383-3232

4. 解析結果

まず，圧力溶解現象の有無が周辺岩盤の透水性経時変化に及ぼす影響を評価する．空洞周辺の透過率の経時変化を**図 3** に示す．ここでは，透過率を対数表記した値を用いて評価した．図から，圧力溶解を考慮しない場合は，透過率はほとんど経時変化していないが，圧力溶解を考慮した場合は，特に空洞周辺の EDZ（空洞掘削損傷領域）で透水性が顕著に減少する傾向が確認できる．これは空洞周辺の EDZ で圧縮応力が増加し，圧力溶解現象が顕在化したためである．とりわけ，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．つぎに，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．各領域での圧力溶解の有無で，**図 4** に示す観測点(Point.1)における透過率の経時変化を比較したものを**図 5** に示す．図から，不連続面での圧力溶解のみを考慮した場合は，初期状態から 1 年程度で約 2 オーダー透過率が低下し，その後は変化がないことが分かる． 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は，解析開始後 1 年以降も緩やかな勾配で減少していき，約 1000 年間でさらに 1 オーダー程度低下していることが確認できる．

5. おわりに

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・不連続面の両方の領域における地化学作用による岩盤の透水特性変化を精緻に評価可能な熱・水・応力・化学連成解析モデルを開発した．また，解析モデルを用いて地下岩盤の水理学特性（透水性）の長期挙動予測解析を行った．解析結果から，不連続面における圧力溶解の影響により，EDZ において，掘削後 1 年以内に初期値から 2 オーダー程度透水性が低下した後，定常値に収束するという傾向が得られた．また，不連続面の透水性が定常値に一旦収束した後，岩石実部における圧力溶解により再び岩盤の透水性が減少していく挙動が観察された．

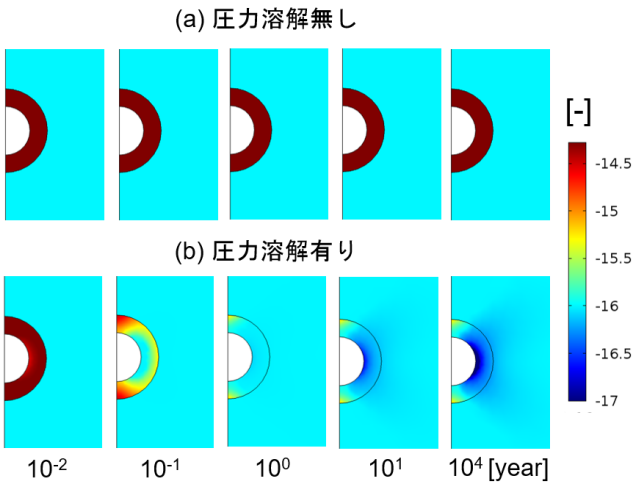

図 3 透過率の経時変化
(a) 圧力溶解無し，(b) 圧力溶解有り

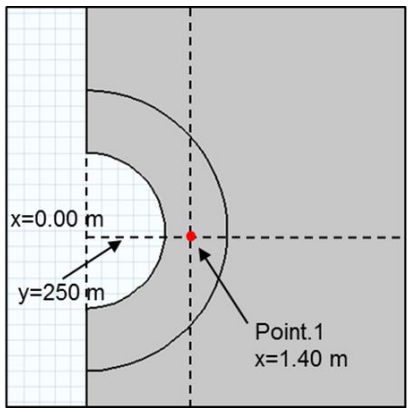

図 4 計測箇所

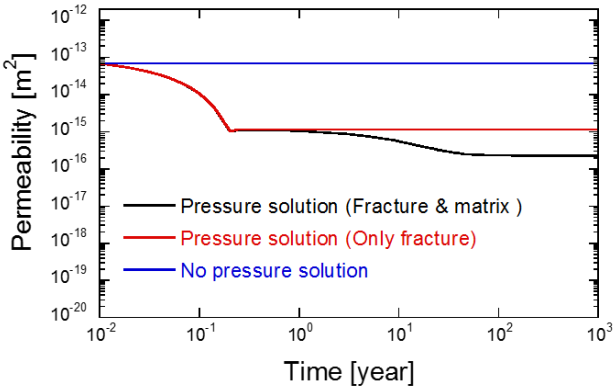

図 5 圧力溶解の有無による透過率変化比較

参考文献

1) 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.

2) 緒方奨：熱・水・応力・化学連成解析モデルの開発と岩盤の長期透水・物質輸送解析，愛媛大学工学部環境建設工学科修士論文，46pp.，2017.

3) 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