

力学—化学連成モデルによるベレア砂岩の透水挙動評価

ベレア砂岩, 鉱物溶解, 透水特性

愛媛大学 学生非会員 ○伊藤文

愛媛大学大学院 正会員 安原英明

愛媛大学大学院 正会員 木下尚樹

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留では、対象となる岩盤の透水特性を詳細に把握する必要がある。地下深部では、圧力および温度レベルが共に高く、そのような環境下では鉱物の溶解・沈殿等の化学作用が卓越し、その結果、岩盤の透水特性にも大きな影響を及ぼすと想定される。本研究では、ベレア砂岩を対象として、既存の力学—化学連成モデルを改良し、改良後のモデルを用いて岩石透水挙動を評価した。また、地下深部の温度・圧力環境を再現した条件で実施している等方圧保持・透水試験の再現解析を実施し、モデルの妥当性を検討した。

2. 等方圧保持・透水試験

実験に使用したベレア砂岩の供試体サイズは、直径 30 mm、高さ 60 mm である。それぞれの供試体を実験用圧力セルにセットしたのち、拘束圧を作用させる (図 1)。実験の境界条件は、温度 20、90 °C、拘束圧 7.5、15.0 MPa である。温度環境については、20 °C の供試体は、20 °C に保たれた恒温実験室内に静置した。また、90 °C の供試体は、シリコンオイルを満たした金属製容器に浸漬させ、シリコンオイルの温度を 90 °C に制御した。実験開始 0 日目から 100 日目までは 5 日ごとに透水試験を実施し、100 日目以降は 10 日ごとに透水試験を実施した。透水試験は、シリンジポンプを用いて透水差圧 350 kPa の条件で、5 秒間隔で流量を計測し、定常状態に落ち着くまで約 15 分間実施した。

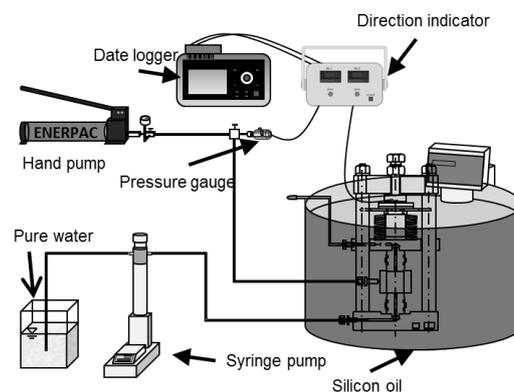


図 1 等方圧保持試験の模式図

3. 力学—化学連成モデル

本研究では、岩石構成鉱物の圧力溶解現象を表現できる概念モデルを用いることにより、温度および応力に依存した化学作用による岩石の透水特性の経時変化を定量的に評価する。圧力溶解現象は、1) 岩石構成粒子間の接触面における溶解現象、2) 接触面から間隙への溶解物質の拡散、3) 間隙自由表面での沈殿現象の一連の過程からなる (図 2)。この一連の微視的プロセスを代表要素として定量的に評価することにより、巨視的な圧縮挙動 (間隙率あるいは透水性変化) を表現することが可能である。本研究では、Kozeny-Carman 式を用いて透過率を評価した。

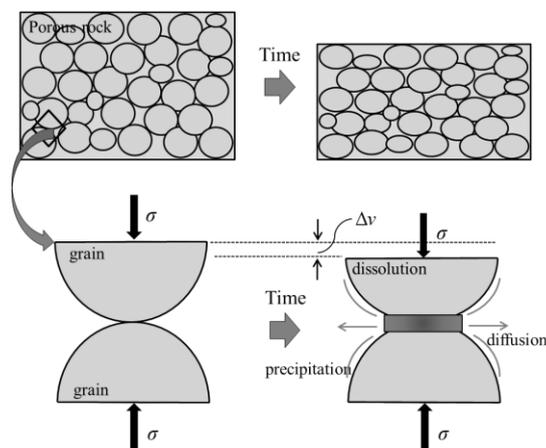


図 2 圧力溶解現象の模式図

$$k = \frac{1}{5S_v^2} \cdot \frac{\phi(t)^3}{(1 - \phi(t))^2} \quad (1)$$

ここで、 S_v : 比表面積 [$\text{m}^2 \text{m}^{-3}$], k : 透過率 [m^2], $\phi(t)$: 間隙率 [-] である。なお、解析の境界条件は実験と同様に温度 20-90 °C、拘束圧 7.5-15.0 MPa である。また、解析では石英(SiO_2)90%、正長石($\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) 5%、曹長石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) 2.5%、灰長石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) 2.5% で構成された岩石と仮定し、溶解物質については Si, Al, K, Fe, Ca, Na の 5 種類について評価する。また岩石を構成する粒子の直径は 100 μm として計算を行う。

Evaluation of Permeability in Berea Sandstone via Chemo-mechanical Model.

Ehime University, Aya Ito

Ehime University, Hide Yasuhara Ehime University, Naoki Kinoshita

4. 解析モデルの有用性の検討

力学—化学連成モデルを用いて、透水試験の再現解析を試み、モデルの有用性を検証した。透水性の再現解析結果を図3に示す。図3より、実験の初期値を概ね再現することができている。また、実験では220日程度から透過率が増加に転じており、この増加傾向についても再現できている。しかし、解析では1500日程度で透過率が増加に転じており、実験結果を10倍程度過大評価している。解析では粒子間の接触部および自由表面、2種類の溶解現象を考慮している。透過率が増加する理由として、解析開始当初は接触部での溶解が卓越しているために透過率が減少するが、接触部に作用する応力が臨界状態に達すると、接触部での溶解は不活性化し自由表面溶解のみ活性化することが考えられる。次に、相対的に濃度の高いSi濃度の再現解析結果を図4に示す。図4より、解析結果は実験結果を概ね精度よく再現できていることが確認できる。

最後に、図5に圧縮変位の再現解析結果を示す。7.5 MPa, 90 °C 条件で560日間実施した透水試験に用いた供試体を取り出し、供試体観察を行った。供試体寸法を計測したところ、実験前は直径30.0mm, 高さ60.0mmに対し、実験終了後は直径30.0mm, 高さ59.8mmに変化していた。軸方向に0.2mm圧縮する結果が得られているが、これは長期間に渡る等方圧保持の影響により供試体が収縮したと考えられる。しかし、力学—化学連成モデルで圧縮変位を評価すると、図5に示すように実験終了時の560日で2.69mm圧縮する結果が得られており、実験結果を1オーダー程度過大評価する結果となった。本研究で用いた解析モデルは粒子径を100 μm , 粒子の構造を体心立方格子構造としている。また、実験に用いた供試体の初期高さが60.0mmであることから、供試体内に粒子が鉛直方向に600個積層していると仮定している。しかし、実際の岩石は粒子径が100 μm と一律ではない。このことから供試体全体での粒子積層数も一概に600個と断言できない。また、粒子径に差があることから粒子の積層構造も体心立方格子構造とは異なっていると想定される。以上の要因により、実験結果を過大評価したのではないかと考えられる。

3. まとめ

本研究では、力学—化学連成モデルを用いて、等方圧保持・透水試験の再現解析を実施することにより透水特性を評価し、モデルの有用性を検証した。その結果、本研究で用いたモデルは透水性および物質濃度を概ね精度よく再現できることが確認された。今後は接触部溶解現象および積層構造についてより詳細に再現できるようモデルの拡張を実施し、より精度の高いモデルの構築を目指す。

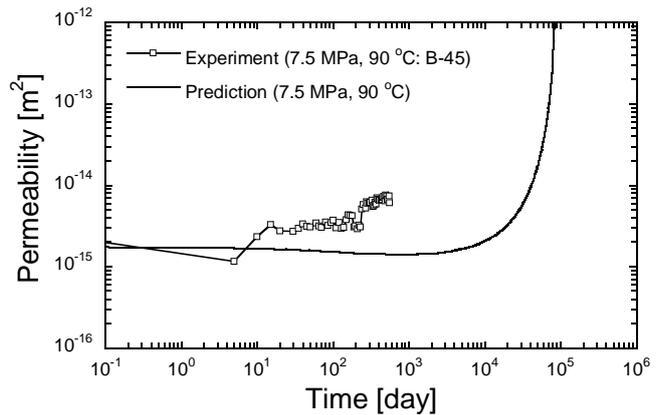


図3 透過率の再現解析変化

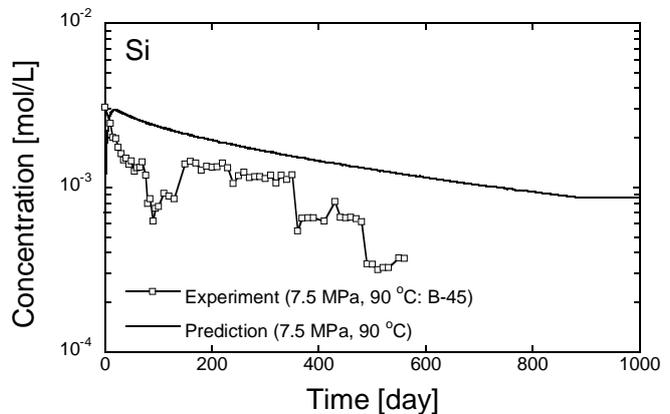


図4 物質濃度の再現解析変化

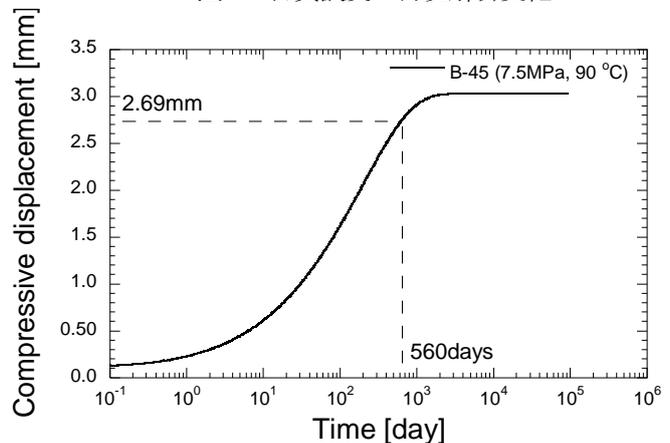


図5 圧縮変位の再現解析変化