

温度・拘束圧の負荷期間に依存する ベレア砂岩の透水力学的特性の評価

鈴木崇史^{1*}・安原英明¹・木下尚樹¹・高橋学²

¹ 愛媛大学 大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 (〒790-8026 愛媛県松山市文京町 3 番)

² 独立行政法人産業技術総合研究所 (〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7)

*E-mail : suzuki.takashi.06@cee.ehime-u.ac.jp

水のある環境下で岩石に長期間高熱と高圧力が作用している状態では、鉱物の溶解・沈殿等の化学現象が促進され、その結果、透水・力学特性が変化することが予測される。しかし、これら化学現象に起因する岩石の透水・力学特性の変化を評価している事例は少なく、精度の高い実験データが不足している。そこで本研究では、ベレア砂岩を用いて、温度・拘束圧を制御した等方圧保持試験を実施し、透水・力学特性の経時変化を観察した。等方圧保持試験は、拘束圧を 7.5 および 8 MPa、温度を 20 および 90°C とした境界条件で行い、定期的に透水試験を実施することで、透水特性の変化を観察した。また、養生後の供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、力学特性を評価した。その結果、一軸圧縮強さの変化は確認されなかったが、透水特性は低下することが確認された。

Key words: Berea sandstone, permeability, mechanical property, dissolution, isotropic compression, XRD

1. はじめに

原子力発電の発電サイクルの中で発生する高レベル放射性廃棄物は地下深部への地層処分が決められている。高レベル放射性廃棄物は地層処分する時点で約 90°C の熱を持っており、処分空洞は地下深部にあることから、周辺岩盤は長期間、高温・高圧にさらされる。そのため、水のある環境下で高温や、高い圧力が作用し、鉱物の溶解・沈殿などの化学作用が卓越して、岩石の内部構造に大きな影響を及ぼし、透水力学的特性が経時的に変化していくことが予想される。しかし、これら化学現象に着目した岩石の透水特性や力学特性を時系列で評価している事例は少なく、精度の高い実験データが不足しているのが現状である。そこで本研究では、ベレア砂岩を用いて、温度・拘束圧を制御した等方圧保持試験を実施し、透水試験、力学試験を行うことで、透水・力学特性の経時変化を観察した。また、透水実験時の透過水中の溶出元素を同定し、化学作用についても考察した。

2. 等方圧保持試験

本研究では、長期間、温度および拘束圧を制御した等方圧保持試験を実施するため、実験用圧力セルを開発した（共和技研製、岩石三軸セル 図-1）。実験に用いた岩石はベレア砂岩で、供試体サイズは、直径 30 mm、高さ 60 mm である。ベレア砂岩は構成鉱物の大部分が石英で、粘土鉱物の含有率が極めて低い岩石である。供試体を実験用圧力セルにセットし、セル上部のねじを締めることにより軸圧を作用させる。また、拘束圧は手押しポンプによりシリコンオイルを加圧し、作用させる。その後、温度を制御したシリコンオイルを満たした金属製容器に入れ、試験を行った。軸圧、拘束圧はそれぞれロードセル（東京測器製 CLN-20KNB 型）と圧力計（東京測器製 PW-20MPa 型）を用いて常時計測した。境界条件は温度 90 °C、拘束圧 8 MPa、温度 20 °C、拘束圧 7.5 MPa に制御して実験を行った。

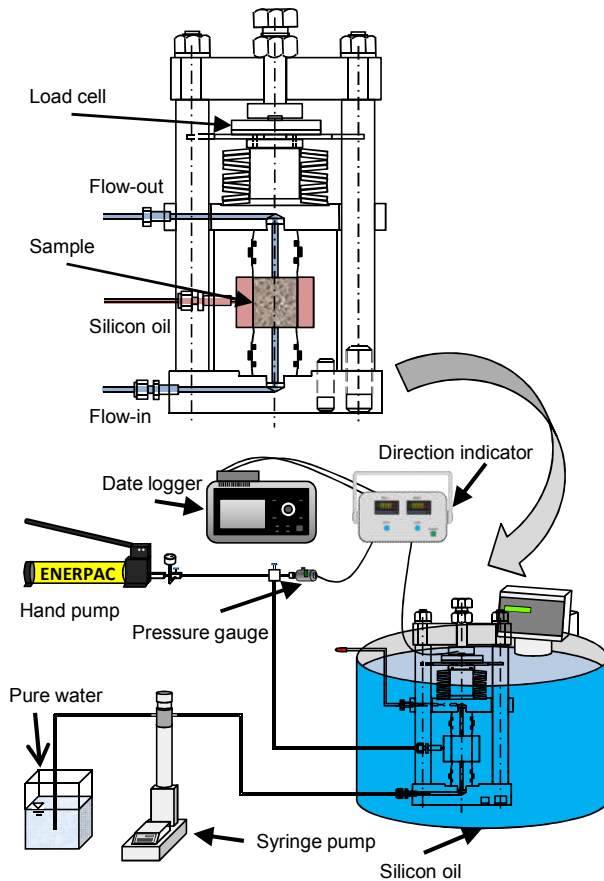


図-1 等方圧保持試験機の模式図

3. 透水試験

長期間、高温・高圧の影響を受けた場合の岩石の透水特性の経時変化を評価するため、等方圧保持試験前後および保持試験中定期的に透水試験を実施した。透水試験は、水温・室温、共に 20°C 、軸圧・拘束圧を 8 MPa 、および 7.5 MPa とし、透水差圧はシリンジポンプ (TELEDYNE ISCO 社製, 500D 型) を用いて 200 kPa とした。(図-1 参照)。透水試験の結果を図-3 に示す。岩石の透水特性は、透過率 K (Permeability [m^2]) を用いて評価した。透過率 K は、ダルシー則が成り立つと仮定して、以下の式で表すことができる。

$$K = \frac{\mu QL}{A\Delta P} \quad (1)$$

ここで、 μ : 透過流体の粘性係数 [Pa s], Q : 流量 [m^3s^{-1}], l : 供試体高さ [m], A : 供試体断面積 [m^2], ΔP : 透水差圧 [Pa]である。透水試験は、流量が定常状態に落ち着くまで約 15 分間行い、 30 秒間隔で流量を計測した (図-2)。温度 90°C 、拘束圧 8 MPa の条件で 31 日

間養生した際、試験前後の定常時の透過率は、それぞれ 9.54×10^{-15} , $7.66 \times 10^{-15}\text{ m}^2$ で、 31 日間で約 20% 透水性が低下することが観察された。一方、温度 20°C 、拘束圧を 7.5 MPa に制御した場合、試験 5 日後と、試験 20 日後の透過率は、それぞれ 1.05×10^{-14} , $1.00 \times 10^{-14}\text{ m}^2$ となり、約 5% の低下を確認した。これは、透水特性の低下に温度が大きく作用していることを示しており、 90°C の温度条件下で、鉱物の溶解・沈殿作用等の化学作用が促進され、岩石構造骨格が変化したと考えられる。

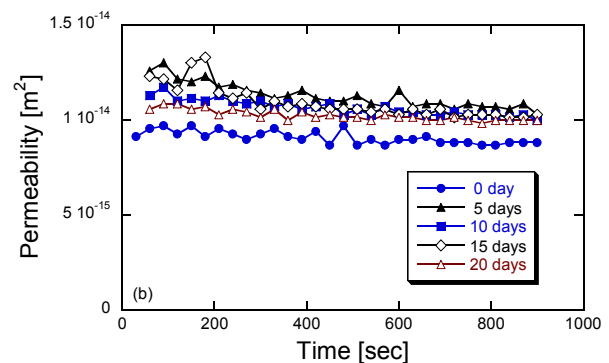
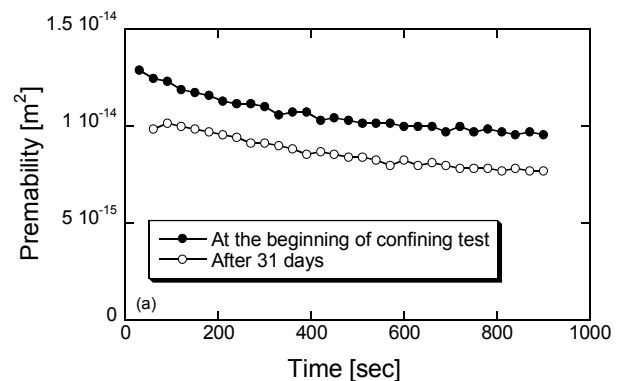


図-2 定常状態までの透過率

(a) 温度 90°C 拘束圧 8 MPa ,

(b) 温度 20°C 拘束圧 7.5 MPa

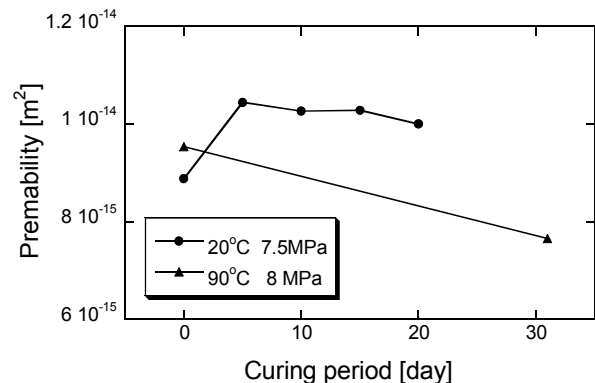


図-3 透水試験結果

4. 一軸圧縮試験

31 日間の等方圧縮試験、透水試験終了後の供試体を用いて、一軸圧縮試験を実施した。圧縮試験は、サーボ式岩石力学試験装置（最大載荷重：150 kN）を用いて行った。供試体は、透水試験装置終了後に50℃に設定した乾燥炉に静置し、24 時間乾燥させた。つぎに、乾燥後の供試体を試験装置にセットし、100 kPa/s（0.07 kN/sec）の荷重制御で静的に試験を実施した。比較のために、今回の実験結果と保持期間無しの実験結果を表-1に示す。これより、今回得られた一軸圧縮強さ、割線弾性係数（ E_{50} ）の結果は、温度 90℃、拘束圧 8 MPa の条件下で 31 日間養生した結果と、保持期間無しの結果と比較して有意な差は確認できなかった。今後、境界条件を変えるなどして、データの蓄積が必要である。

5. ICP発光分光分析

温度 90℃、拘束圧 8 MPa の条件で 31 日間等方圧保持試験を行った試験前後のおよび養生開始 12 日後に、透水試験により供試体の間隙溶液を約 7 mL 採取し、ICP-AES により、岩石構成主元素であるSi, Al, K, Fe, Ca, Na, Mg の定量分析を実施した。分析に使用した機器は、ICP 発光分光分析装置(Thermo Fisher Scientific 社製、iCAP6300DUO 型)である。得られた結果を図-4に示す。ほとんど元素は、養生前よりも高い濃度を示している。これは、室温よりも高い温度条件かつ拘束圧条件下で、鉱物の溶解現象が促進したためであると考えられる。

6. X線回折

保持試験前の供試体粉末と、温度 90℃、拘束圧 8 MPa の条件で等方圧保持試験後、一軸圧縮試験を実施した供試体粉末を用いてX線回折を行い、実験前後の鉱物同定を行った。使用した機器はX線回折装置（リガク社製 RINT2000）である。測定結果を図-5示す。測定結果より実験開始前も Kaolin などの粘土鉱物が確認されたが、実験後の粘土鉱物の回折強度はほとんど上がっておらず、有意な差は確認できなかった。今後SEM-EDXなどで鉱物の詳細な定量分析・検討が必要である。

表-1 一軸圧縮試験結果

Sample	σ_c [MPa]	E_{50} [GPa]	Poissons' ratio	Curing period[day]
B-40	75.3	11.6	0.17	31
B-26	75.5	10.9	0.19	0
B-27	78.0	10.1	0.18	0

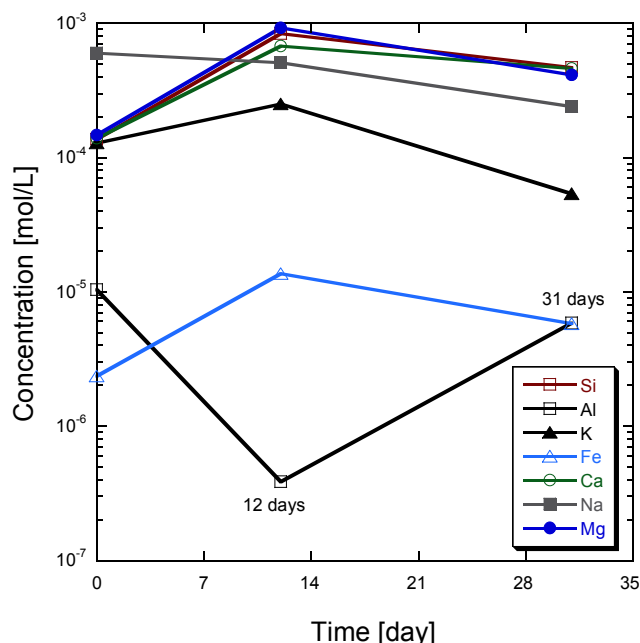


図-4 ICP発光分光分析結果

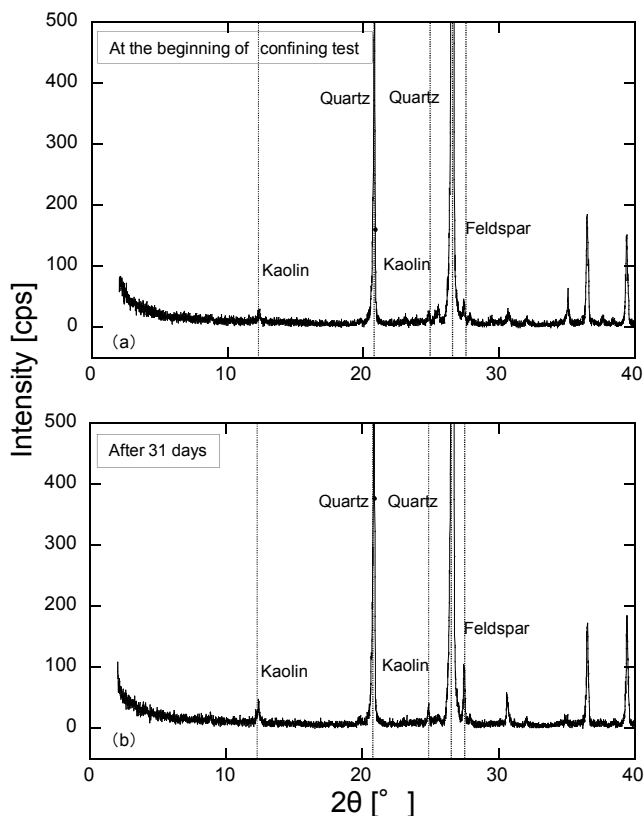


図-5 X線回折結果 ((a)試験前, (b)試験後)

7. まとめ

本研究では、ベレア砂岩を対象として、温度・拘束圧を制御した等方圧保持試験を実施し、試験後の供試体を用いて透水試験および一軸圧縮試験を実施し、透水特性の変化および変形・強度特性を観察した。その結果、温度を 90°C、拘束圧を 8 MPa の境界条件で 31 日間養生をし、試験前後の透水性を比較した結果、透水性が約 20 % 程度低下している結果が得られた。また、割線弾性係数および一軸圧縮強さは、保持無しで行われた一軸圧縮試験より得られた値とほとんど変化がないことが確認された。また、鉱物同定を行うために、保持試験前後の供試体粉末を使用しX線回折を行った結果、試験前の供試体にも粘土鉱物が存在していたが、試験後の粘土鉱物の回折強度とほぼ変化がないことが確認された。

参考文献

- (1) Yasuhara, H., D. Elsworth, and A. Polak, A mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution. *Journal of Geophysical Research*, 2003

EVALUATION OF HYDRAULIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF BEREASANDSTONE UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF TEMPERATURE AND CONFINING PRESSURE

Takashi SUZUKI, Hideaki YASUHARA, Naoki KINOSITA and Manabu TAKAHASHI

The isotropic compression experiments using Berea sandstone were conducted under the different temperature and confining pressure conditions, and the evolutions of hydraulic and mechanical properties were observed. The temperatures and confining pressures prescribed for the experiments are 20 and 90 °C, and 7.5 or 8.0 MPa, respectively. The observed permeability at 20 °C did not significantly evolve during the experiment period, while that at 90 °C decreased by roughly 20 % relative to the original value. This reduction may be attributed to the change of pore-structure induced by mineral dissolution and/or precipitation. Unlikely, the uniaxial compression tests showed no obvious change observed between pre- and post-experimental results. The XRD observation also showed no significant difference of mineralogy between them.