Ⅲ－10

温度・応力の影響を受ける花崗岩不連続面の透水・力学特性

愛媛大学大学院　学生会員　○西山　曜平
愛媛大学大学院　学生会員　　重永　三郎
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

熱水貯蔵システムや放射性廃棄物地層処分においては，地下岩盤空洞の長期的安定性評価が重要な課題となる．これらの施設では空洞を熱源として周辺岩盤に非定常の温度分布が生じ，それに伴う熱応力も発生するため，熱・水・応力・化学の相互作用を考慮した長期的安定性評価が必要である．これらの連成問題については種々研究がなされているが [1]，確立された評価手法がない現状にあり，熱・水・応力・化学の相互作用による岩石の透水・力学特性の経時的定量評価やそれを基にした構成モデルの構築，解析手法の開発が望まれている．

そこで本研究では，単一不連続面を有する花崗岩供試体を用い，拘束圧・温度を制御した透水実験，クリープ試験，フロースルー溶解試験を実施し，花崗岩の透水・力学・溶解特性について評価を行った．

2．透水実験

透水実験は図１に示す高温高圧三軸透水試験装置を用いた．装置は拘束圧を最高40MPaまで，セル内温度をヒーターで120°Cまで制御できる．実験は２度行い，条件として拘束圧を 5MPa，透水圧を 0.04~0.1MPa とした．セル内温度は 25°C で実験を開始し，途中拘束圧，透水圧を保ったまま 90°C に加熱した．透水性は不連続面の透水性を示す水理学的開口幅を用いて評価した．水理学的開口幅：b [m]は次式で表される [2]．

$$b=\left\{\frac{12\mu Ql}{w\left(P_0-\rho gl\right)}\right\}^{\frac{1}{3}} \qquad (1)$$

ここで，μ：粘性係数 [Pa·s]，ρ：密度 [kg/m^3]，g：重力加速度 [m/s^2]，Q：流量 [m^3/s]，w：不連続面の幅 [m]，P_0：透水圧差 [Pa]，l：供試体長さ [m]である．

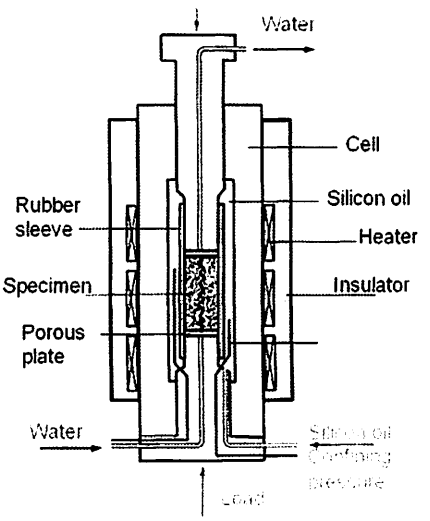

図１　高温高圧三軸透水試験機

実験より得られた水理学的開口幅を図２に示す．実験を 764hr まで行っている実験を No.1，888hr まで行っている実験を No.1 とする．図２より，No.1，2 共に時間の経過に伴い透水性が低下していることが確認できる．初期の開口幅は，No.1 は約 11μm，No.2 は約 5μm と異なるが，380hr 経過後には，同程度の値（約 3μm）に落ち着き，定常状態になっていることがわかる．

その後，温度を 90°C に上昇させると透水性が再び低下し始めることが確認できる．温度を 90°C に上昇させた後は２回の実験の開口幅がほぼ等しく変化しており，実験の再現性を確認することができた．

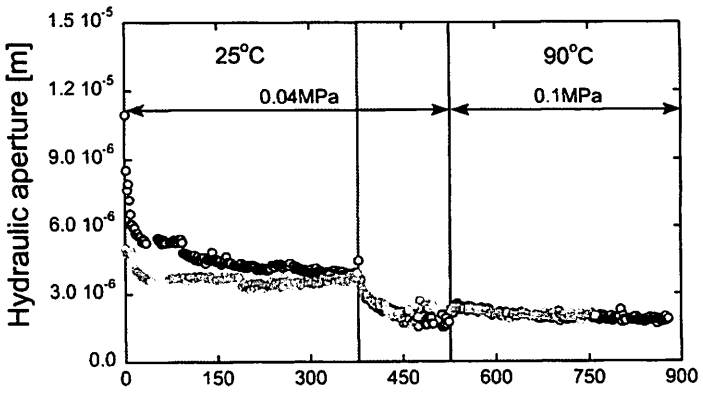

図２　水理学的開口幅

次に No.2 で透過水中に溶出した元素を ICP 発光分析，イオンクロマトグラフィーにより測定した結果を図３に示す．Si，Ca，Na，K は相対的に濃度が高く，花崗岩の構成鉱物である石英，長石が溶解したことに起因しているものと考えられる．一方，Al，Fe，Mg は相対的に濃度が低く，Fe，Mg を含有している黒雲母が実験中の温度条件ではそれほど溶解が進行していないことが推測される．また，25°C から 90°C に加温することにより濃度が上昇しており，溶解が促進されたことがうかがえる．さらに，Si の濃度に着目すると 90°C での濃度は他の元素と比べ 1 オーダー以上もの差がありシリカの含有量が他の元素に比べ最も多く，シリカの溶解が不連続面の透水性の低下に大きく影響を及ぼしていることが確認された．

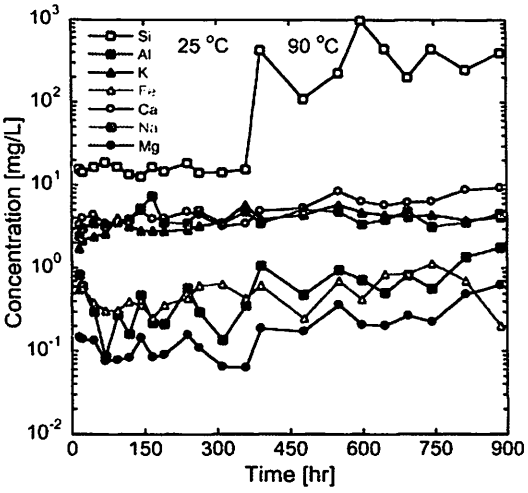

図３　溶出元素濃度の経時変化

３．クリープ試験

前述の透水試験では，時間の経過に伴い開口幅が低下することが確認された．これは，不連続面の破壊に伴う力学的なクリープ現象である可能性も考えられるため，クリープ試験を行い，その有無を確認した．実験は，垂直拘束圧 10MPa の一定条件下で，供試体を乾燥状態・湿潤状態に分け，単一不連続面を含む供試体と含まない供試体 2 種類を用いて実施した．図４より，乾燥状態の供試体と，湿潤状態の単一不連続面を持たない供試体ではクリープ現象はみられなかったが，湿潤状態の単一不連続面を持つ供試体では，圧縮ひずみの増加が確認され，クリープが生じたものと考えられる．以上のことから，クリープは力学的な作用よりも，間隙水の影響によって接触部のアスペリティが溶解する化学作用によって起こったものと考えられる．

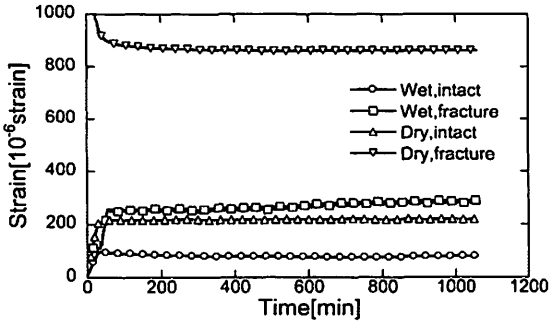

図４　ひずみの経時変化

４．フロースルー溶解試験

花崗岩試料は粉末状にし，溶解速度と温度の関係を評価するためにフロースルー溶解試験を行った．温度条件としては 20°C，50°C，70°C の 3 つの条件を行った．図５は，50°C の実験結果である．透水実験で観察された結果と同様に，Si，Ca，Na，K の濃度が相対的に高いことが確認できる．しかし，透水実験で得られたサンプル濃度よりもほとんどの元素が 1 オーダー程度低い値となっている．これは，透水試験での温度条件（90°C）よりの低い温度（50°C）のため，溶解性が小さいためである．

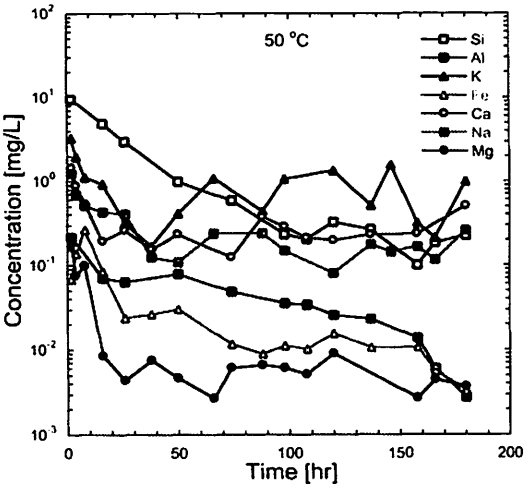

図５　溶出元素濃度の経時変化

５．まとめ

本研究では，花崗岩の供試体を用いた透水実験･クリープ試験・溶解試験を実施した．透水試験では，時間の経過と共に透水性が低下し，再現性も確認することができた．クリープ試験では，不連続面内に含有される間隙水の影響により，アスペリティの溶解を促すことが確認された．

参考文献

1) 例えば，安原英明，木下尚樹，Dae Sung LEE，中島伸一郎，岸田 潔：力学 - 化学連成概念モデルによる花崗岩不連続面の透水・物質輸送経時解析，土木学会論文集 C，Vol.65，No.1，pp.41-52，2009.

2) Witherspoon, P. A., J. S. Y. Wang, K. Iwai and J. E. Gale; Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resources Research, Vol. 16, No. 6, pp. 1016-1024, 1980.