

応力・温度が与える 花崗岩不連続面の透水性への影響

長谷川大貴^{1*}・岸田 潔¹・中島 伸一郎²・安原 英明³・矢野隆夫¹・細田尚¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

²京都大学 次世代開拓研究ユニット (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

³愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

*E-mail:dhasegawa_1986@mail.goo.ne.jp

高レベル放射性廃棄物地層処分を行う場合、廃棄体からの発熱により処分施設ニアフィールドの岩盤は高温となる。また岩盤不連続面に負荷が作用した状態が長期間持続されれば、不連続面内で鉱物の溶解・沈殿等の化学現象が生じ、それに伴って、不連続面のせん断強度や透水性は時間の経過と共に変化すると考えられる。このような岩石-水の相互作用現象は、間隙水の化学条件や作用する温度・圧力によって非常に非線形なものとなる。本研究では、鉱物の溶解・沈殿等の化学現象に起因する花崗岩不連続面の透水性の変化を検証するために、20、60、90°Cの温度条件で拘束圧を制御した透水試験を実施し、温度が透水性の変化に与える影響について考察した。

Key Words : granite, fracture, permeability test, dissolution

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分を考える場合、空洞周辺岩盤の地質学・力学・水理学特性を詳細に把握することが必要不可欠である。花崗岩等の結晶質性の岩盤では、地下水は主に岩盤に存在する不連続面内を流れ、この不連続面は地殻変動などによる応力状態の変化、さらには地盤内の温度の変化の影響を受けて開口状況を変える。したがって、岩盤不連続面の長期的な力学および水理学的挙動の予測・評価には、応力、熱などによる影響を考慮する必要がある。

岩盤不連続面の圧縮特性、せん断特性、透水特性は、三軸圧縮試験や一面せん断試験などの手法を通じてこれまでにも研究されてきた¹⁾²⁾が、そのモデル化は必ずしも十分ではない。さらに、温度の影響、長期問題、化学反応の影響などが加わると、その挙動はさらに複雑になると予想される。

本研究では、鉱物の溶解・沈殿等の化学現象に起因する花崗岩不連続面の透水性の変化を検証するために、加温三軸透水試験を行い、不連続面を有する岩盤の温度を考慮した水理学特性を考察する。透水特性の変化に対する温度の短期的な影響及び長期的な影響について実験により調査した。

さらに不連続面の透過水について化学分析を行うこと

により、物理特性の変化に鉱物の溶解が寄与しているのか考察を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体および実験装置

本実験で用いた花崗岩供試体を図-1に示す。これは、東濃地方の深度180m~200mの花崗岩試料である。直径約83 mmのコアを割裂し、不連続面を重ね合わせて固定した状態でコアリング・整形し、縦割れ亀裂を有する直径50 mm×高さ100mmの円柱供試体を2本 (No.1, 2) 作製した。平均の一軸圧縮強さ、ヤング率はそれぞれ171MPa、 5.5×10^4 MPaである。

試験装置を図-2に示す。本装置は200°Cまでの耐熱性能をもち、圧力室についてはステンレス製であり耐圧は20MPaである。加温については圧力室の外周に巻いたバンドヒーターによって行う。セル内の温度分布のむらを抑えるため、セル内には側圧用の液体を攪拌させるための小型のファンが設置されている。透水試験は、トランジェントパルス法と定水位・変水位法が可能である。



No.1 No.2

図-1 供試体写真

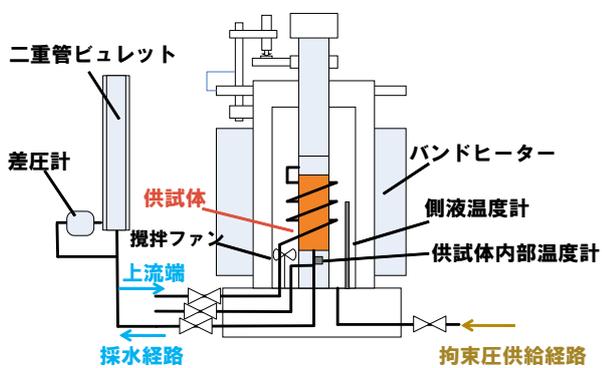


図-2 三軸透水装置

(2) 実験方法

実験の手順を図-3 に示す。供試体 No. 1 は、まず、 20°C の下、拘束圧を $1\sim 10\text{ MPa}$ の範囲で4サイクル昇降させた。続いて、温度を 60°C まで上昇させ、再び拘束圧を $1\sim 10\text{ MPa}$ の範囲で4サイクル昇降させた。温度の上昇については、温度のムラをなくすため約15分に 8°C ずつ加温し、ファンで攪拌している。透水試験は、それぞれの温度における第4サイクルの、拘束圧 $1, 5, 7, 10\text{ MPa}$ の時点で実施した。試験法はトランジェントパルス法である。

この実験は、短期的な拘束圧の昇降に対する不連続面の透水性の変化とそれに対する温度の効果を把握することを意図している。4サイクルの拘束圧の昇降のうち、はじめの3回は、不連続面の噛み合わせを良くするための予備荷的な位置づけである。

供試体No. 2は、まず 20°C の下、3サイクルの予備荷荷 ($1\sim 10\text{ MPa}$) を経て、拘束圧を 10 MPa に固定し35日間保持した。その後、いったん 1 MPa まで減圧してから、 90°C まで加温し、再び3サイクルの予備荷荷 ($1\sim 10\text{ MPa}$) を経て、拘束圧を 10 MPa に固定し18日間保持した。保持期間中は、トランジェントパルス法および定

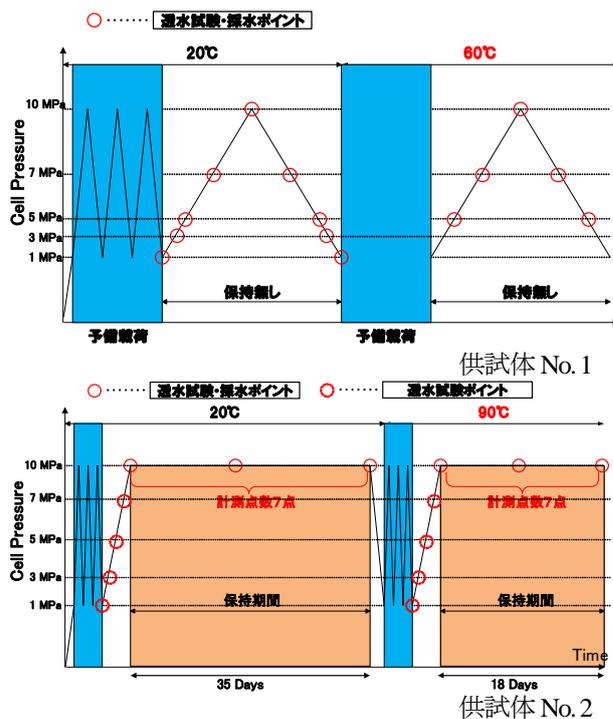


図-3 実験手順

水位法による透水試験を定期的実施した。

この実験は、3~4週間程度の拘束圧および温度の荷荷が不連続面の透水性に及ぼす影響を把握することを目的としている。

定水位法による透水試験は水頭差 1.0 m で実施した。各計測ポイントでの試験回数は1回である。トランジェントパルス法³⁾による透水試験は、上下流端の差圧を 0.07 MPa (上流端圧 0.77 MPa , 下流端圧 0.70 MPa) として実施した。各計測ポイントでの試験回数は3回である。

定水位透水試験時に供試体から排水された水を採水し、ICP 発光分析を行なうことにより、透過水中の元素濃度を測定した。分析する元素の種類は、別途実施された蛍光 X 線分析の結果に基づき、Si, Ca, Al, Fe, K, Mg, Na とした。

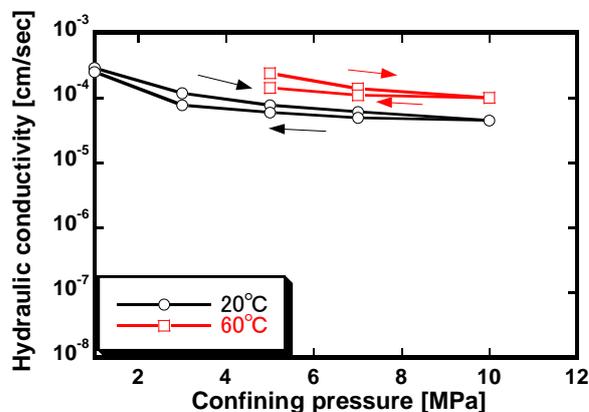


図-4 拘束圧一透水係数関係 (供試体No.1)

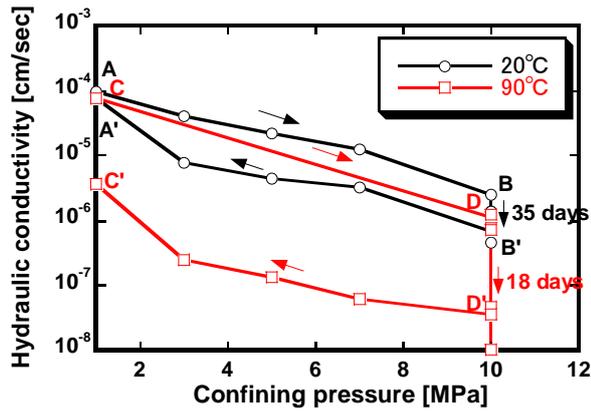


図-5 拘束圧透水係数関係 (供試体No.2)

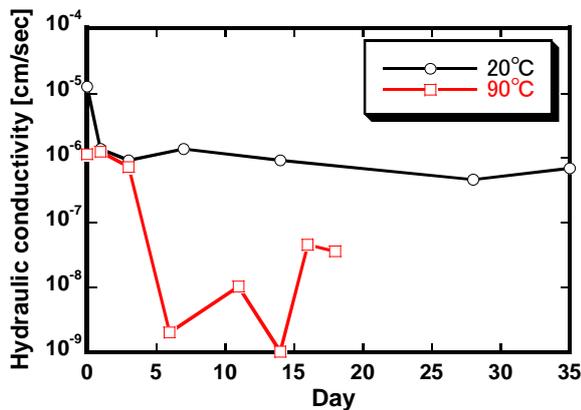


図-6 拘束圧保持期間中の透水係数の変化

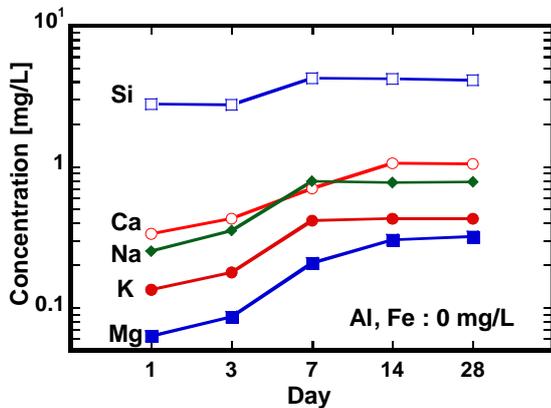


図-7 ICP分析結果 (供試体No.2, 20°C)

3. 実験結果

(1) 加温三軸透水試験結果

図-4, 図-5 は, それぞれ供試体 No.1, No.2 の第 4 サイクルの昇圧・降圧時における拘束圧と透水係数の関係を示している. この透水係数とはトランジェントパルス法により透過率を求め, その値を透水係数に換算したものである. 換算式を式(1)に示す.

$$k = \frac{\rho g}{\mu} k_0 = \frac{g}{v} k_0 \quad (1)$$

ここで k は透水係数, k_0 は浸透率, ρ は密度, g は重力加速度, μ は粘性係数, v は動粘性係数である.

なお, 供試体 No.1 の 60°Cでの実験では, 実験装置の不具合により, 1 MPaおよび 3 MPa での透水試験のデータが取得できなかった. そのため, 図-4 では, 5 MPa 以上のデータのみプロットしている. 図-4 の 60°Cの結果についてはについては実験装置の不具合により 1 MPa, 3 MPa のデータが取得 5MPa 未満のデータが所得できていない.

図-4 は供試体 No.1 による短期的な拘束圧の昇降の結果であり, 図-5 は供試体 No.2 による 10MPa の拘束圧を長期間保持した場合の結果である. 図-4 をみると 20°C の場合は, も 60°C の場合も, 拘束圧の昇降後 1 オーダーを超えて透水係数が低下するような大きな変化は見られなかった.

一方図-5のNo.2の拘束圧長期保持の場合, 20°Cでは保持期間中であるB点からB'点の間に73%程度透水係数が低下し, その後, 拘束圧減圧の過程で初期の透水係数に戻る結果が得られている. 一旦は低下した透水係数もA点とA'点の透水係数の値を比べてると大きな差はなかった. また, 90°Cでは, 18日間の保持期間中にD点からD'点の間に透水係数が2オーダー近くの変化があり, C'点の透水係数の値とC点での透水係数の値を比較しても1オーダーを超える変化を示した.

拘束圧保持期間中における透水係数の推移を図-6に示す. 実験ではデータを3回取り, その平均値をプロットしている. 図-6より, 20°Cでは, 保持開始から1日で透水係数が1オーダーも低下しているが, その後は透水係数がほとんど変化していない. 一方で90°Cでは保持開始から6日目, 11日目, 14日目が極端に低い値となっているが, 18日の保持において97%程度透水係数が低下した値に収束した.

(2) ICP分析結果

供試体 No.2 を, 20°C, 10MPa の条件下で 35 日間放置した際の 28 日目までの透水試験時の採水サンプルに対する ICP 分析の結果を図-7 に示す. ICP 分析においては特に Si が大きく溶出され, Si に比べて, 他の元素の溶出量はいずれも小さかった. そしてすべての元素の濃度は時間の経過と共に増加する傾向が得られ, 7 日目以降はほぼ定常状態となることが確認された.

4. 実験結果の考察

供試体を高拘束圧下で保持した結果、温度を90°Cとする実験において透水係数に大きな変化が見られた。

20°Cでの透水係数の変化は加圧・保持・減圧という過程を経ても初期の透水係数の値にまで戻る変化をするのに対し、高温（90°C）下では上記過程により透水係数を初期より1オーダー以上も下げる変化を見ることがわかった。これは不連続面内のアスペリティ接触部が溶解あるいは破砕により取り除かれ、結果として不連続面が閉口した可能性が考えられる。それにより、透水係数が1オーダー以上低下し、供試体の透水特性に変化があったと想定される。

さらに図-4、図-6より花崗岩不連続面における変化には温度は高温である必要があるが、時間を条件として考えると日単位での保持時間であっても変化が起こることがわかった。

図-6によると20°Cでは1日目に、90°Cでは6日目に、透水係数が1オーダー近く低下するが、それを過ぎると、変化は比較的緩やかになる。これより1カ月程度の期間に限って考えれば、長時間保持すれば、時間に対して加速的あるいは比例的に透水性能が低下するわけではないということがわかった。つまり構造に一定の変化が起きた後はその拘束圧・温度下においては、それ以上の変化が小さいと考えられる。

5. まとめ

(1) 短期的な実験の結果について

本研究では、加温三軸透水試験を拘束圧の保持状態について短期的条件において行い応力、温度の作用する花崗岩不連続面の透水性変化を評価した。拘束圧をほとん

ど保持しない短期的な条件の下では、透水係数に大きな変化はなく、透水係数に変化を起こすためには高温であっても数秒分という短期間では不十分であることがわかった。

(2) 長期的な実験の結果について

本研究では、加温三軸透水試験を拘束圧の保持状態について長期的条件の下でも行った。実験結果より、透水性の変化は高温度によって促進させる傾向にあることがわかった。そして、高温の下で長時間保持させることで花崗岩不連続面は実験の前後における透水係数において変化を見せること、常温の下では長時間保持したとしても、実験の前後で透水係数に変化は起きないことも確認できた。時間の影響については今後もさらなる検討が必要であるが、1カ月程度の期間であれば数日を経過することで、同拘束圧・温度の条件のもとで定常状態となることがわかった。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C) No.20560460によって実施した。

参考文献

- 1) 岸田潔, 津野究：摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化, 土木学会論文集 No.680/III-55, pp.245-261, 2001.
- 2) Iwano, M. and Einstein, H.H.: *Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture*, EUROCK '93, pp. 135-141, 1993.
- 3) 高橋学, 薛自求：パルス圧を用いて岩石の透水係数を測定する場合の問題点について, 地質ニュース 421号, pp.46-56, 1989.

EVALUATION OF FRACTURE PERMEABILITY IN GRANITE INFLUENCED BY STRESS AND TEMPERATURE

Daiki HASEGAWA, Kiyoshi KISHIDA, Shinichiro NAKASHIMA,
,Hideaki YASUHARA, Takao YANO and Takashi HOSODA

A series of flow-through experiments in a granite fracture has been conducted under the confining pressures and temperatures prescribed. Fracture permeabilities under cyclic loading conditions showed a reversible behavior at 20 and 60 °C. In contrast, under long-term holding of the confining pressure the permeability at both 20 and 90 °C showed a rapid decrease in a relatively short period within a couple of days. As the confining pressure was removed after the holding, the permeability at 20 °C returned to the initial, while that at 90 °C was still lower than the beginning. This irreversible response may be attributed to the compaction resulting from dissolution-mediated crushing at propping asperities within a fracture.