

拘束圧・温度に依存する花崗岩不連続面の不可逆透水特性に関する実験的評価

安原 英明¹, 長谷川 大貴², 中島 伸一郎³, 矢野 隆夫⁴, 岸田 潔⁴

- 1 愛媛大学大学院・理工学研究科生産環境工学専攻
- 2 東京電力株式会社・千葉火力建設所土木グループ
- 3 山口大学大学院・理工学研究科社会建設工学専攻
- 4 京都大学大学院・工学研究科都市社会工学専攻

概 要

温度・応力条件に依存する岩石構成鉱物の溶解現象に起因する岩盤の透水・物質輸送特性の空間的・時間的変化を把握することは重要である。本研究では、加温することが可能な三軸試験装置を用いて、単一不連続面を有する花崗岩供試体に対して、温度を 20 および 90 °C に、拘束圧を 1~10 MPa に制御した環境で透水試験を実施し、温度・拘束圧に依存する透水特性の変化を計測した。また、拘束圧の保持時間が透水特性に与える影響を検証するために、短期載除荷試験、長期保持試験の 2 種類の実験を実施した。その結果、20 °C 条件では透水特性の変化に可逆的な挙動が観察されたが、90 °C 条件では、不可逆的な挙動が得られた。これは、不連続面内アスペリティ接触部の破壊・溶解現象に起因していると考えられる。

キーワード：岩石き裂，花崗岩，透水試験，透水性，溶解

1. はじめに

地熱発電におけるエネルギー回収に関する問題や、放射性廃棄物を地層処分する問題においては、対象となる不連続性岩盤の透水・物質輸送特性の空間的・時間的変化を詳細に把握する必要がある。地下深部の高温・高圧環境では、岩石構成鉱物の溶解や沈殿等の地球化学的作用が顕在化し、その結果、不連続性岩盤の物理特性は時間の経過と共に変性することになる。特に、結晶質性の不連続性岩盤では、流体の流れは不連続面で支配的となるため、不連続面自体の透水・物質輸送特性を空間的かつ時間的に把握することが重要となる。外的要因により不連続面周辺の応力や温度状態が変化する場合、力学および化学作用などの複合的な影響によって不連続面の開口幅は変化し、その結果、透水・物質輸送特性は時間の経過と共に変化することが考えられる。

著者らはこれまで、作用温度・応力に依存する岩石構成鉱物の溶解・拡散・沈殿現象に着目し、それら複合的な現象が、岩石不連続面透水特性の経時変化に及ぼす影響について一貫した検討を行ってきた。実験的な検討として、ほぼ純粋な石英で構成される岩石（ノバキュライト）を用いた不連続面透水試験を実施し、作用温度・応力が不連続面透水特性の変化に大きな影響を及ぼすことを確認している^{1),2)}。また、カルサイトを主鉱物とする石灰岩を用いた不連続面透水試験では、透水特性の経時変化が、透過水の pH 条件に依存することを確認している³⁾。さらに、石英、

長石、黒雲母で構成される花崗岩を用いた不連続面透水試験においては、特に温度環境が及ぼす影響が大きいことがわかっている⁴⁾。

解析的な検討として、温度・応力条件に依存する圧力溶解（Pressure solution）⁵⁾⁷⁾および不連続面内間隙の自由表面溶解（Free-face dissolution）に着目し、それらの 2 種類の溶解現象を記述する力学-化学連成モデルを構築し、上記の不連続面透水試験の再現解析を実施している⁸⁾¹⁰⁾。その結果、不連続面透水特性の経時変化は、90 °C 程度の温度、数 MPa の拘束圧条件でも、溶解現象に代表される力学・化学連成現象による影響を受けることが確認されている。

しかし、花崗岩の不連続面透水試験結果⁴⁾（図 1 参照）に代表されるように、不連続面の透過率は時間の経過と共に減少する傾向が観察されているが、その減少メカニズムが完全に解明されているわけではない。安原ら⁴⁾が指摘しているように、不連続面透過率の減少傾向は圧力溶解に起因している可能性が高いが、粘弾性的な可逆現象による不連続面の圧縮挙動に起因している可能性も排除できない。

そこで本研究では、拘束圧、温度、拘束圧保持時間の 3 点に着目して、種々の条件で透水試験を実施し、それら 3 つのパラメータが透水特性の変化に及ぼす影響について精査すると共に、粘弾性的な可逆現象の有無についても確認する。

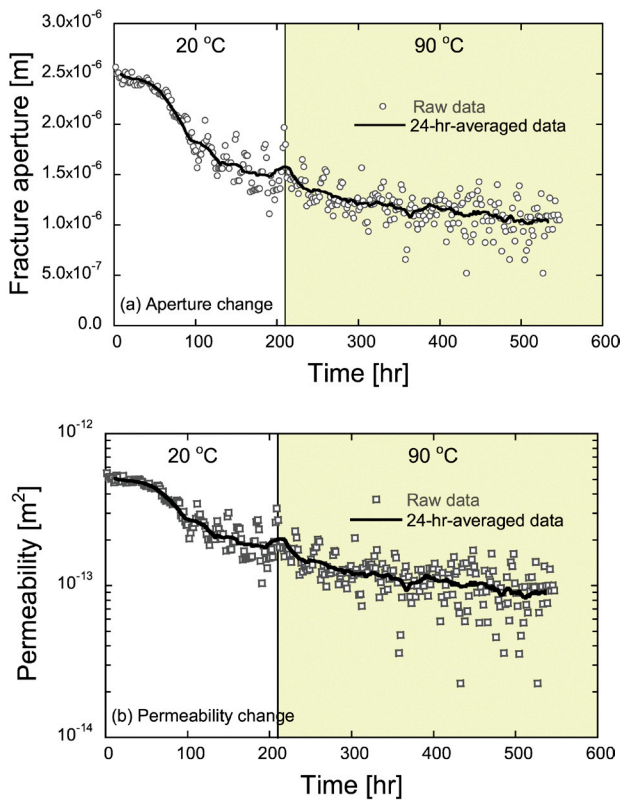


図1 花崗岩不連続面開口幅と透過率の経時変化
(拘束圧=10 MPa)⁴⁾



図2 実験に使用した花崗岩供試体

2. 加温三軸透水試験

2.1 供試体

本研究では、東濃地方の深度180 m~200 mから採取した土岐花崗岩コアを加温透水試験に供した。その一軸圧縮強さは $\sigma_c = 171$ MPaである。直径130 mm×長さ約1000 mmの無垢なボーリングコア試料から、圧裂による縦割れ亀裂を有する直径50 mm×高さ100 mmの円柱供試体を作製した。飽和状態での密度は 2.60 g/cm^3 である。また、本研究では事前に花崗岩供試体に対して蛍光X線分析を実施し、花崗岩の化学組成を同定した。その結果、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O の含有率は、それぞれ、65.5、11.6、7.4、6.2、3.8、3.4%であった。実験に使用した供試体を図2に示す。

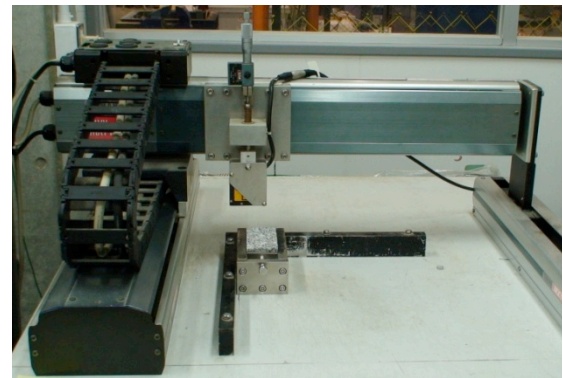


図3 ラフネス形状計測装置

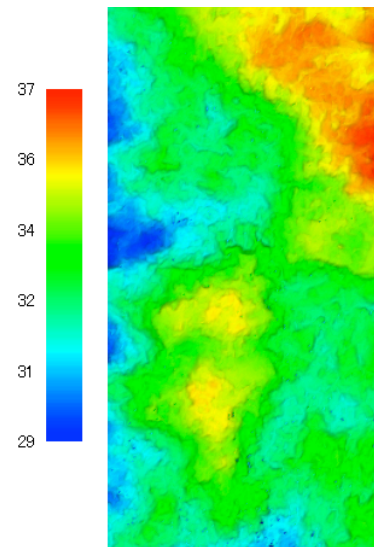


図4 ラフネスの標高コンター (単位:mm)

2.2 不連続面のラフネス計測

不連続面の透水挙動は開口幅分布に支配されており、ラフネスの標高分布の把握は非常に重要である。本研究では、レーザ変位計を用いた岩盤表面形状計測装置を用いて実験前の不連続面の標高分布を計測した。レーザ変位計を用いた岩盤表面形状計測装置を図3に示す。この装置はXY自動位置決めステージ(ストローク300 mm×300 mm, 位置決め精度0.01 mm)にレーザ変位計(最小スポット径0.05 mm, 測定レンジ±5 mm, 測定精度±1 μm)を搭載したものである。Z方向にはマイクロメータ(最小表示1/100 mm, ストローク25 mm)が取り付けられており、最大で35 mmの高低差のあるラフネスまで対応することが可能である。

本研究では、最小スポット径0.05 mmのレーザビームを用いた変位計で、0.25 mm間隔で3次的に計測を行った。計測データを処理した供試体ラフネスの標高コンターを図4示す。なお、実験に供した花崗岩供試体は圧裂により作製した人工亀裂であり、かみ合わせ状態は良いので、図2右図の左側の供試体のみの標高コンターを示す。この標高コンターは図より明らかなように、ラフネスの標高は最大で8 mm程度の高低差がある。また、不連続面表面の粗さ程度を表す指標である $JRC^{11)}$ を、Yu & Vayssade¹²⁾が提案している下式を用いて評価した。

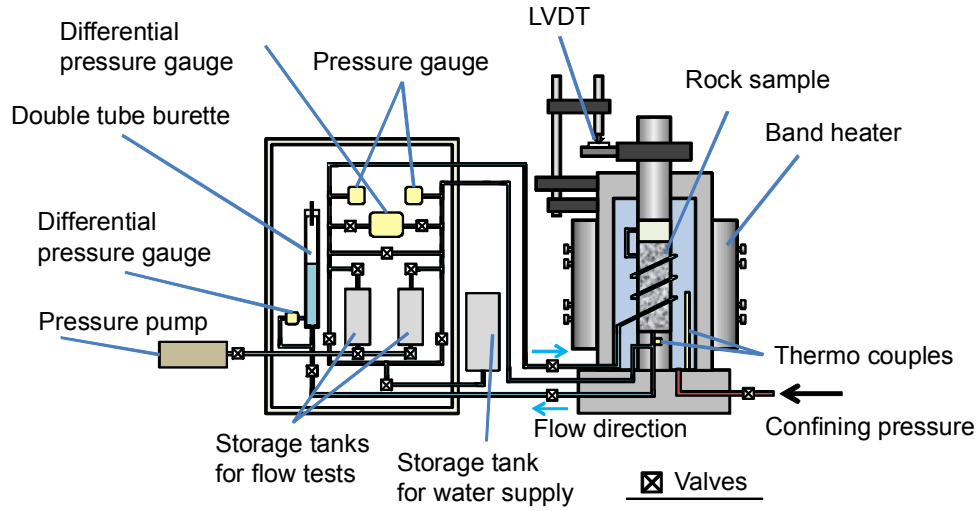


図5 三軸透水試験装置の模式図

$$JRC = 60.32Z_2 - 4.51 \quad (\Delta x = 0.25 \text{ mm}) \quad (1)$$

ただし,

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで, Δx : ラフネス計測間隔, Δy : 計測間隔間におけるラフネスの標高差, M : 1 計測ラインの計測点数である。本研究では, 透水方向の Z_2 を算出しており, 1 計測ラインの計測点数は 399 点で, 計 199 ラインの Z_2 を算出しその平均値より JRC を評価した。その結果, JRC は透水方向 (図 4 の下面から鉛直上方) で約 19 であり, 圧裂亀裂にも関わらず粗い表面形状を有することが判明した。

2.3 加温三軸透水試験装置

本研究で開発した加温三軸透水試験装置 (図 5) は, 圧力室, 定速度軸荷重装置, 透水試験装置, 体積変化測定用ビュレット, 加温装置, 温度計等から構成され, $20^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ の恒温恒湿室に設置されている。供試体はゴムチューブで被覆された後, 圧力室器内に設置される。供試体両端面には間隙水透過用ラインが繋がれており, それぞれ貯留槽, 圧力ポンプに接続されている。また, 上流側には溶液採取のための間隙水供給タンク, 下流側には給排水量を計測する二重管ビュレットがそれぞれ接続されている。圧力室はステンレス製で, 設計上の耐圧, 耐熱はそれぞれ, 20 MPa, 200°C である。試験中の拘束圧は, 低拘束圧下 ($< 1 \text{ MPa}$) では, エア・レギュレータを用いて空気圧で制御し, $> 1 \text{ MPa}$ では窒素ガスを用いて制御する。軸荷重は三軸セルの载荷軸に設置された外部ロードセルによって計測・制御する。また, 軸変位については, 接触型変位計によって外部計測する。

加温装置は圧力室にバンドヒーターを巻き, 周囲を断熱材で被覆している。温度制御にあたり, バンドヒーターの温度, 側液の温度, 岩石供試体下端近傍 (下部ペデスタル

内部) の 3 ヶ所で温度を計測しており, 温度制御は岩石供試体下端近傍の温度計で実施する。

透水試験装置は, 上下流の貯留槽からなり, 容積は最大 1 L である。排水量は供試体の体積変化を評価するために計測し, 供試体からの排水を二重管ビュレット内管に導いて水位一定の外管との水頭差を差圧計により測定し, 排水量に換算する。供試体上下流端の貯留槽の圧力は, 貯留槽近くにある水圧計で計測し, 上流と下流の圧力差をとることで差圧を算出する。本研究では, トランジェント・パルス法を用いて透水試験を実施しており, 詳細を次節で述べる。

2.4 透水試験方法

本研究では, Brace ら¹³⁾が提案したトランジェント・パルス法を用いて不連続面の透水特性を評価する。この試験法では, 供試体の両端に岩石の空隙体積に比べて十分大きい体積を持つ貯留槽を連結し, 上流・下流端の両貯留槽と供試体内の水圧が平衡な状態から一端に加圧する。すると供試体内には浸透流が生じ, 高压側から低压側への圧力伝播が生じ, 一定時間後には平衡状態に達する。このときに得られる圧力の減衰曲線は指数関数的になる。つまり, 圧力を対数軸に取り時間との関係でプロットすると一本の直線となり, この直線の傾きから透過率 (あるいは透水係数) が算出される。ここでは本研究で採用したトランジェント・パルス法の数理基礎を解説する。一次元飽和浸透流の支配方程式は一般的にダルシーの法則と質量保存則とを組み合わせた初期値境界値問題として以下のように定式化される¹⁴⁾。

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \left(\frac{\mu\beta}{k} \right) \cdot \left[\frac{\beta_{\text{eff}} - \beta_s}{\beta} + \eta \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta} \right) \right] \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = 0 \quad (3)$$

$$P(x, 0) = P^0 \quad (4)$$

$$P(0, t) = P_d \quad (5)$$

$$P(L, t) = P_u \quad (6)$$

$$\beta V_d \frac{dP_d}{dt} + A \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \bigg|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

$$P(0, 0) = P_d^0 \quad (8)$$

$$\beta V_u \frac{dP_u}{dt} + A \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \bigg|_{x=L} = 0 \quad (9)$$

$$P(L, 0) = P_u^0 \quad (10)$$

ここで、 P ：流体圧力、 x ：下流端からの鉛直距離、 t ：経過時間、 k ：透過率、 μ ：流体の粘性係数、 β ：流体の圧縮率、 β_{eff} ：岩石有効圧縮率、 β_s ：岩石構成鉱物の圧縮率、 η ：間隙率、 P_u ：上流側の圧力、 P_d ：下流側の圧力、 V_u ：上流側の貯留槽の容量、 V_d ：下流側の貯留槽の容量、 A ：供試体断面積、 L ：供試体長さである。また、式(4)、(8)、(10)の右辺の流体圧力 P の上付き “0” は、時間 $t = 0$ を表す。

式(3)で、 $\partial^2 P / \partial x^2 = 0$ と仮定すると、流体圧力と時間の関係は、下式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \ln(P_f - P_d) &= \ln\left(\frac{V_u}{V_u + V_d}(P_u^0 - P_d^0)\right) - \frac{k}{\beta\mu} \frac{A}{L} \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} t \\ \ln(P_u - P_f) &= \ln\left(\frac{V_d}{V_u + V_d}(P_u^0 - P_d^0)\right) - \frac{k}{\beta\mu} \frac{A}{L} \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで、 P_f ：圧力の収束値である。本研究で用いた試験装置では、上・下流側の貯留槽の体積が等しいため、 $(P_u + P_d)/2 = P_f$ とみなせ、式(11)の2式は下式に統合することができる。

$$\ln((P_u - P_d)/2) = \ln\left(\frac{V_d}{V_u + V_d}(P_u^0 - P_d^0)\right) - \frac{k}{\beta\mu} \frac{A}{L} \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} t \quad (12)$$

つまり、上下流端の圧力差の対数が、時間 t に関する一次関数で表される。この一次関数の傾き α は次式で表される。

$$\alpha = -\frac{k}{\beta\mu} \frac{A}{L} \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \quad (13)$$

ここで、流体（本研究では水）の圧縮率 β [1/Pa] および粘性係数 μ [Pa s] は、作用温度 T [°C] の関数となる。圧縮率については、Millero and Huang¹⁵⁾の近似式を用い、粘性係数については、理科年表に示されている値から近似式を求めた。

$$\begin{aligned} \beta &= 5.088E-10 - 3.816E-12 \cdot T + 8.418E-14 \cdot T^2 \\ &\quad - 1.113E-15 \cdot T^3 + 1.124E-17 \cdot T^4 \\ &\quad - 6.566E-20 \cdot T^5 + 1.666E-22 \cdot T^6 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mu = 2.414E-5 \cdot 10^{(247.8/(T+133.15))} \quad (15)$$

式(13)は、流体が供試体全体に流れる場合を想定しているが、本研究では流体は不連続面内のみを流れる。したがって、不連続面内流れの透過率を評価する場合、式(13)を修正する必要がある。流体が流れる断面積は、次式で表される。

$$A = b \cdot W \quad (16)$$

ここで、 b ：不連続面の水理学的開口幅¹⁶⁾、 W ：供試体幅である。また、不連続面透過率は、水理学的開口幅 b を用いて次式で表される。

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (17)$$

式(16)および(17)を式(13)に代入すると次式が得られる。

$$\alpha = -\frac{b^3}{12\beta\mu} \frac{W}{L} \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \quad (18)$$

つまり、供試体の上下端面に貯留槽を連結し、一端面に圧力パルスを与え、上下端面の流体圧力の経時変化を計測し、得られた経時データと理論収束圧との差の対数を時間に対してプロットし、その直線の傾きを求めることで、水理学的開口幅 b が得られ、その値を式(17)に代入することにより、最終的に透過率 k を算出できる。

本研究では、トランジェント・パルス法による透水試験を実施するにあたり、初期平衡状態における間隙水圧は 0.70 MPa とし、上流側の貯留槽の圧力を 0.77 MPa に増圧し試験を実施した。初期間隙水圧 0.70 MPa に対して、上下流端の差圧を 1/10 の 0.07 MPa に設定したのは、ダルシー則を成立させるためである¹⁴⁾。上流側の貯留槽を増圧後、圧力の減衰過程を時系列で計測し、透水係数を評価した。透水試験の一例として、上下流端の差圧の経時変化結果を図6に示す。図より、差圧の対数値と経過時間の関係には、明瞭な直線関係が確認でき、本実験の透水現象はトランジェント・パルス法の適用範囲であることを示している。なお、図中の実線は、実験結果を対数近似した直線を表しており、近似結果である決定係数を併せて記載している。

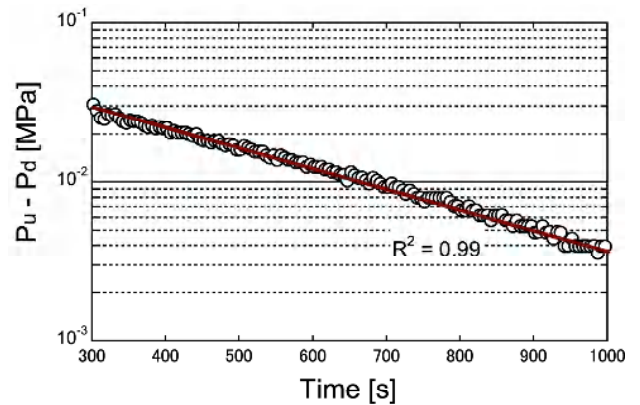


図6 透水試験結果の一例

(上下流端の差圧の経時変化：温度 20°C，拘束圧 7 MPa)

2.5 実験条件・手順

本研究では、単一不連続面を有する花崗岩供試体に対して、拘束圧を 1～10 MPa と変化させ、また、作用温度を 20 および 90 °C に設定して、不連続面透水特性の変化を観察した。20 °C 条件では、実験装置を 20 ±0.5 °C に設定した恒温室内に設置し実験を行い、90 °C 条件では、バンドヒーターおよび温度計で調温し、90 ±0.5 °C の精度で実験を実施した。

本研究では、拘束圧、温度、拘束圧保持時間の 3 点に着目して、2 種類の実験を実施した。それぞれ、短期載除荷試験 (Short-term experiment)、長期保持試験 (Long-term experiment) と呼ぶ。以下に実験手順 (図 7) を詳述する。短期載除荷試験では、まず温度 20 °C の条件で、有効拘束圧 1 MPa を作用させ、飽和供試体の内部間隙水および亀裂内水の余剰水を排出した。つぎに、拘束圧を 1～10 MPa の間で載荷と除荷を一定間隔で 3 サイクル繰り返した (図 7a)。この試験をラフネス剛性試験 (Roughness stiffness experiment) と呼ぶ。ラフネス剛性試験の目的は、供試体を圧力室内にセットした段階では左側供試体と右側供試体は完全にはかみ合っていない可能性があるため、拘束力を作用させることでかみ合わせを良くすることにある。最大 10 MPa という拘束圧は、一軸圧縮強さ (171 MPa) に対して十分に小さい値であるため、ラフネス剛性試験における不連続面内のアスペリティの力学的破壊はほとんどないものと想定される。なお、最初のラフネス剛性試験中

には、拘束圧 1, 3, 5, 7, 10 MPa の各点で透水試験を実施している (図 7a)。

つぎに、ラフネス剛性試験と同様に、拘束圧を 1～10 MPa まで段階的に増圧した後、1 MPa まで減圧し、その間、拘束圧 1, 3, 5, 7, 10 MPa の各点で透水試験を実施した (図 7a)。透水試験は 1 回につき約 1 時間程度の時間を要するが、透水試験終了後は直ちに拘束圧を増圧 (あるいは減圧) しているため、拘束圧保持による影響は小さいと考えられる。

温度 20 °C、拘束圧 1 MPa での透水試験を終了後、約 15 分に 8 °C ずつ昇温し、温度を 90 °C まで上昇させ、再びラフネス剛性試験を 3 サイクル実施した。その後、温度 20 °C の場合と同工程で透水試験を実施した (図 7a)。

短期載除荷試験は、短期的な拘束圧の昇降に対する不連続面の透水特性の変化とそれに対する温度の影響を把握することを目的としている。

短期載除荷試験終了後、同じ供試体を用いて、長期保持試験を実施した (図 7b)。短期載除荷試験と同様に、まず 20 °C 条件で、3 サイクルのラフネス剛性試験 (1～10 MPa) を実施し、その後拘束圧を 10 MPa に増圧した後、35 日間拘束圧を保持した。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 サイクルのラフネス剛性試験を経て、拘束圧を 10 MPa に固定し 18 日間保持した。増圧・保持期間・減圧中には、透水試験を実施し透水特性の変化を計測した。

長期保持試験は、温度・拘束圧の長期保持が不連続面の透水特性に及ぼす影響を把握することを目的としている。なお、20 および 90 °C 条件における拘束圧保持期間中に、概ね 3, 4 日毎に上・下流間に 1 m の水頭差を与え、不連続面内に滞留している間隙水をフラッシングし、溶液を採取した。採取した溶液は ICP-AES により、溶出している物質の濃度を測定した。評価した物質は、Si, Ca, K, Mg, Na の 5 種である。

2.6 実験結果と考察

最初に、ラフネス剛性試験中に計測した透過率と拘束圧の関係を図 8 に示す。図中には、ラフネス剛性試験に続いて実施した 20 °C 条件における短期載除荷試験の結果を参考のため示している。不連続面透過率は、第 1 サイクルの初期値として $5.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ が観察され、拘束圧の増加と共に減少し、10 MPa で $1.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ まで低下していることが確認できる。その後、除荷過程では透過率が再び増加し、1 MPa で $4.1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ まで回復しているが、初期値までは回復していない。これは、載除荷の過程で不連続面のかみ合わせが変化していることの傍証である。第 3 サイクルの実験結果に着目すると、載荷および除荷の過程で概ね近い透過率を示していることから、不連続面のかみ合わせが載除荷の過程で不可逆的な変化をせず、いわゆる弾性的な変形挙動を示していることがわかる。これは、ラフネス剛性

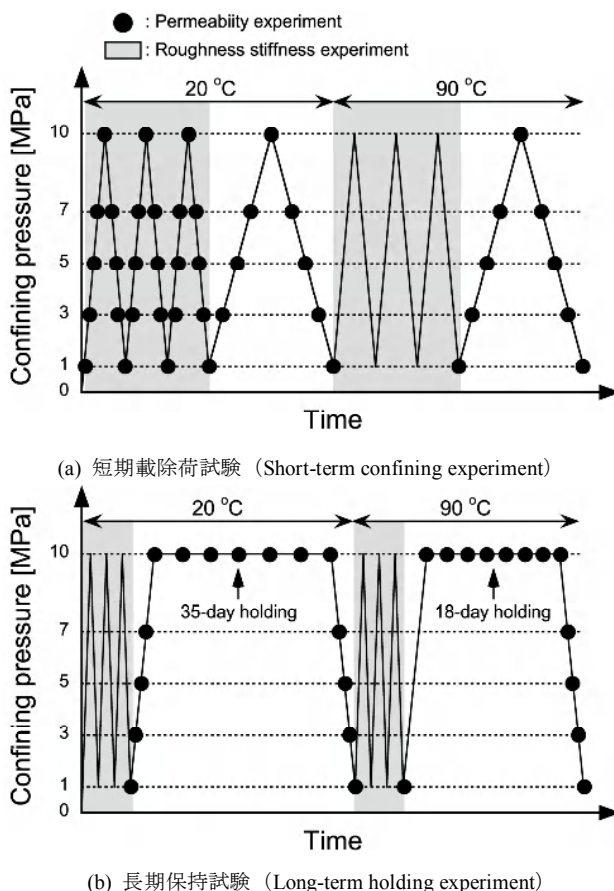


図 7 短期載除荷試験・長期保持試験の実験行程

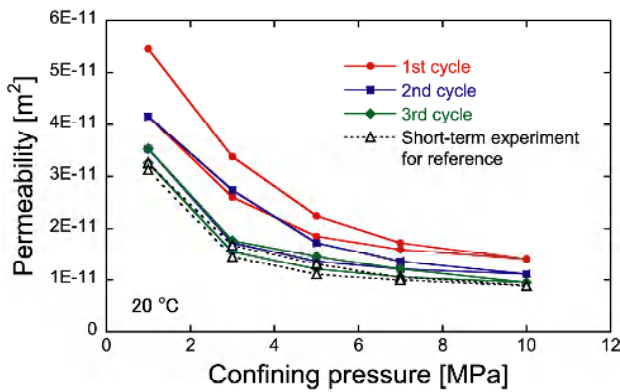


図8 透過率と拘束圧の関係（ラフネス剛性試験結果）

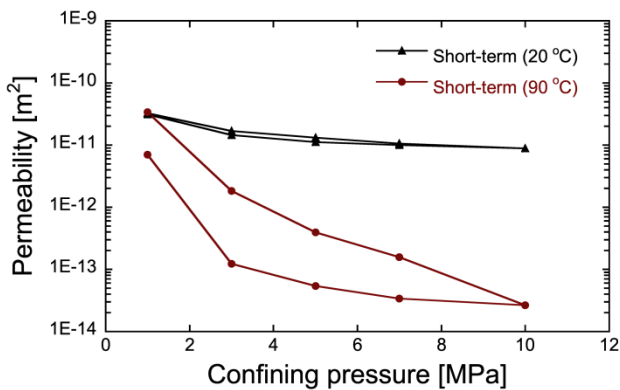


図9 透過率と拘束圧の関係（短期載除荷試験結果）

試験に続いて実施された 20 °C 条件における短期載除荷試験結果からも判断できる。

つぎに、20 および 90 °C 条件で実施された短期載除荷試験結果を図9に示す。前述のように 20 °C 条件では、載除荷過程で可逆的な挙動を示しているのに対して、90 °C 条件では、拘束圧による透過率の減少が著しくなると同時に不可逆的な挙動を示している。特に、1~10 MPa まで拘束圧を増加する過程で、初期値 $3.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ から $2.7 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ まで大きく透過率が減少している。この現象は、温度上昇に伴う岩石の剛性の低下や、不連続面内アスペリティ接触部の破壊・溶解に起因していると想定される。アスペリティ接触部の破壊・溶解現象については、除荷過程での不可逆挙動、つまり透過率の不完全な回復挙動に繋がっていると考えられる。

短期載除荷試験に続いて実施された長期保持試験の結果を図10に示す。最初に行われた 20 °C 条件では、透過率は、拘束圧の増加と共に $1.1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ から $9.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ まで単調に減少している。続いて、拘束圧を 10 MPa に一定にした条件では、35 日間で $4.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ まで約 60% の減少を示している。その後、拘束圧を除荷した過程では、透過率は回復しているが、拘束圧 7~3 MPa の時は載荷時の値よりも 60~70% 程度低い値を示している。最終的に拘束圧 1 MPa では、 $9.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ であり長期保持試験開始時の値より 10 % 程度の低い値を示しており、完全な回復には至っていない。

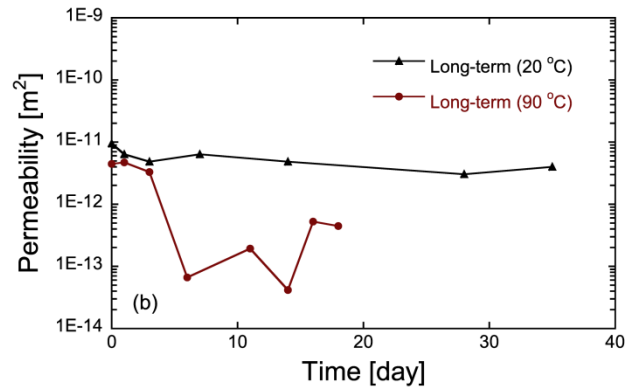
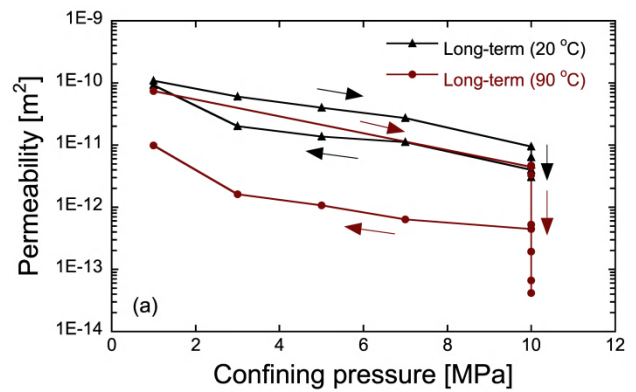


図10 透過率の変化（長期保持試験結果）

(a) 透過率と拘束圧の関係

(b) 拘束圧 (10 MPa) 保持期間中の透過率の時間変化

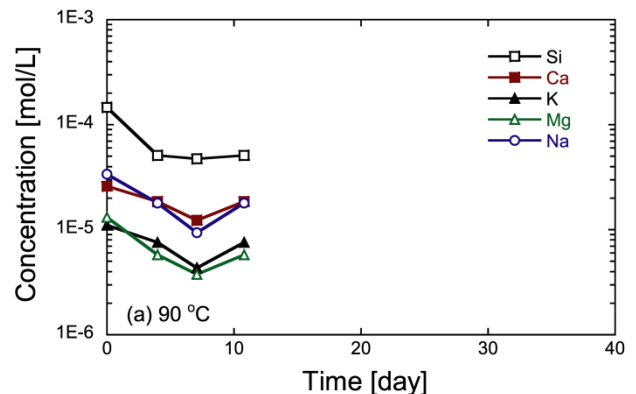
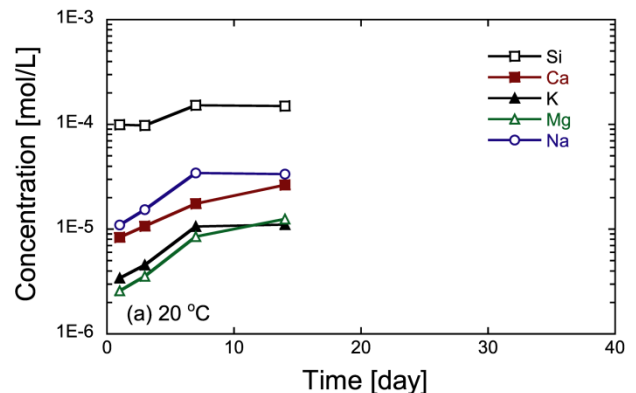


図11 長期保持試験中の物質濃度の時間変化

(a) 20 °C, (b) 90 °C

一方、20 °C 条件後に引き続き実施された 90 °C 条件では、初期値 $7.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ から開始され拘束圧を 10 MPa まで増加した段階で、透過率は $4.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ まで 1 オーダー以上減少している。なお、20 °C 条件終了時の透過率 ($9.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2$) と 90 °C 条件開始時の透過率 ($7.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$) が若干異なるのは、温度上昇に伴う岩石試料の膨張に起因していると考えられる。10 MPa 昇圧後の拘束圧一定条件では、18 日後に $4.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ まで約 1 オーダー減少しており、その減少率は、20 °C 条件の結果より大きい。その後の除荷過程で透過率は回復しているが、最終値は $9.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ となり、90 °C 条件開始時の値よりも約 1 オーダー小さい値となっている。

つぎに、長期保持試験中に採取した溶液中に溶出している物質の濃度変化を図 11 に示す。図より、20 および 90 °C の温度の違いによる物質濃度の明瞭な差異は観察されていないが、含有割合の最も高い Si が他の物質に比較して 1 オーダー程度高い値を示しており、妥当性のある結果であると考えられる。拘束圧保持期間中には、不連続面内アスペリティ接触部および自由表面における溶解が進行することが考えられ、そのことが透水特性の変化に起因していると想定される。一方、既報の研究⁴⁾で、同じ産地、ほぼ同深度の花崗岩試料を用いて実施された連続透水試験 (拘束圧 10 MPa, 温度 20~90 °C 条件) では、温度が高い 90 °C 条件の方が、物質濃度が高くなる傾向が得られており、本研究の結果とは異なる。本研究では、連続的に透過水を採用しておらず透過水の供試体内滞留時間が 3, 4 日と長いことため溶解物質の一部が二次鉱物の析出に寄与したため、温度による濃度の差異が確認されなかった可能性が考えられる。二次鉱物析出の有無については、実験終了後の供試体を用いて微視構造観察を実施する必要がある、今後の課題である。

長期保持試験の結果より、拘束圧一定条件では透過率は時間の経過と共に減少し、その減少分は除荷過程でも完全に回復せず不可逆的であることが明らかとなった。特に 90 °C 条件では、その減少分は大きく不連続面内アスペリティ接触部の破壊・溶解現象が温度の上昇でより活性化されることが示唆される結果が得られた。前述の既報研究⁴⁾では、550 時間 (23 日間) の連続透水期間で約 1 オーダーの透過率減少が得られており、本研究結果と調和的である (図 1 参照)。

3. まとめ

本研究では、拘束圧 (1~10 MPa)、温度 (20, 90 °C)、拘束圧保持時間 (20 °C 条件では 35 日間, 90 °C 条件では 18 日間) の 3 点に着目して、種々の条件で透水試験 (短期載除荷試験, 長期保持試験) を実施し、それら 3 つのパラメータが透水特性の変化に及ぼす影響について精査すると共に、粘弾性的な可逆現象の有無についても評価した。

短期載除荷試験の結果、不連続面の透過率は、載荷過程

で減少し、除荷過程で増加することが確認された。また、不連続面のかみ合わせの良い状態 (ラフネス剛性試験の 3 サイクル目) では、載荷・除荷の 1 サイクルで、透過率は初期状態に回復することが確認され、透水特性の変化は可逆的であることがわかった。

一方、長期保持試験では、20 および 90 °C の両方の条件で、拘束圧保持期間中に透過率が減少することが確認された。拘束圧保持期間中の透過率の減少程度は、90 °C 条件の方が著しく大きくなることが確認された。また、拘束圧保持期間終了後に、拘束圧を除荷しても透過率は初期値に回復することはなく、透水特性の変化は不可逆的であることが判明した。さらに、拘束圧保持期間中に採取した透過水の物質濃度測定結果より、不連続面内の間隙中に鉱物が溶出していることが確認された。以上の結果より、拘束圧保持期間中の不連続面透過率の減少現象は、少なくとも粘弾性的な可逆現象ではなく、拘束圧・温度・拘束時間に依存する岩石構成鉱物の溶解現象に起因している可能性が高いことが判明した。今後は、岩石不連続面内を溶解性のある水ではなく、不溶解性物質で満たし、鉱物溶解を抑制した環境で同様の透水試験を実施し透過率の変化を観察することで上記の考察を検証する予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 No.20760315 および No. 20243066 の助成により遂行された。また、本研究に供した花崗岩は、独立行政法人日本原子力研究開発機構より提供された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Polak, A., D. Elsworth, H. Yasuhara, A. Grader, and P. Halleck : Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 30, No. 20, 2020, doi:10.1029/2003GL017575, 2003.
- 2) Yasuhara, H., A. Polak, Y. Mitani, A. Grader, P. Halleck, and D. Elsworth : Evolution of fracture permeability through fluid-rock reaction under hydrothermal conditions, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 244, pp.186–200, 2006.
- 3) Polak, A., D. Elsworth, J. Liu, and A. S. Grader : Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture with net dissolution, *Water Resour. Res.*, Vol. 40, W03502, doi:10.1029/2003WR002717, 2004.
- 4) 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, pp. 41-52, 2009.
- 5) Rutter, E. H. : The kinetics of rock deformation by pressure solution, *Philos. Trans., R. Soc. London, Ser. A*, Vol.283, pp. 203-219, 1976.
- 6) Raj, R. : Creep in polycrystalline aggregates by matter transport through a liquid phase, *J. Geophys. Res.* Vol.87, pp. 4731-4739, 1982.
- 7) Revil, A. : Pervasive pressure solution transfer in a quartz sand, *J. Geophys. Res.* Vol. 106, pp. 8665-8686, 2001.

- 8) Yasuhara, H., Elsworth, D. and Polak, A. : The evolution of permeability in a natural fracture: The significant role of pressure solution, *J. Geophys. Res.* Vol. 109(B3), B03204, doi:10.1029/2003JB002663, 2004.
- 9) Yasuhara, H. and Elsworth, D. : A numerical model simulating reactive transport and evolution of fracture permeability, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Vol. 30, pp.1039–1062, 2006.
- 10) Yasuhara, H., D. Elsworth, A. Polak, J. Liu, A. Grader, and P. Halleck : Spontaneous Permeability Switching in Fractures in Carbonate: Lumped Parameter Representation of Mechanically- and Chemically-Mediated Dissolution, *Transp. Porous Media.* Vol. 65, pp. 385-409, 2006.
- 11) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.* Vol. 10, pp. 1-57, 1977.
- 12) Yu, X. and Vayssade, B. : Joint profiles and their roughness parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 28, pp. 333-336, 1991.
- 13) Brace, W. F., Walsh, J. B., and Frangos, W. T. : Permeability of granite under high pressure, *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, pp. 2225-2236, 1968.
- 14) Hsieh, P. A., Tracy, J. V., Neuzil, C. E., Bredeheft, J. D., and Silliman, S. E. : A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of ‘tight’ rocks – I. Theory, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 18, pp. 245-252, 1981.
- 15) Millero, F. J. and Huang, F. : The compressibility of seawater from 0 to 95 °C at 1 atm, *Mar. Chem.*, Vol. 126, pp. 149-154, 2011.
- 16) Tsang, Y. W. : Usage of “equivalent apertures” for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests, *Water Resour. Res.*, Vol. 28, pp. 1451-1455, 1992.

(2012. 7. 10 受付)

Experimental evaluation of fracture permeability in granite under temperature and stress controlled conditions

Hideaki YASUHARA¹, Daiki HASEGAWA², Shinichiro NAKASHIMA³,
Takao YANO⁴ and Kiyoshi KISHIDA⁴

1 Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

2 Tokyo Electric Power Company

3 Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

4 Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract

It is of great importance to understand temporal and spatial changes in the hydraulic and transport properties of rock mass mediated by the mineral dissolution controlled by temperature and stress conditions. In this work, a suite of flow-through experiments in a single fracture in granite has been conducted under temperature and stress conditions controlled. Specifically, the two different experiments of the short-term and the long-term experiments are performed to examine the influences of loading time on an evolution of the fracture permeability. The measured changes of the fracture permeability show reversible and irreversible behaviors under short-term and long-term conditions, respectively.

Key words: rock fracture, granite, flow-through experiment, permeability, dissolution