



粘土を含む水が流れる条件下での 巨視き裂を含む花崗岩の透水係数の変化 *

奈良 禎太¹ 加藤 昌治² 佐藤 努²
河野 勝宣³ 佐藤 稔紀⁴

Permeability Change in Macro-Fractured Granite Using Water Including Clay

by Yoshitaka NARA^a, Masaji KATO^b, Tsutomu SATO^b, Masanori KOHNO^c
and Toshinori SATO^d

- a. Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto Daigaku Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan
(Corresponding author, E-mail: nara.yoshitaka.2n@kyoto-u.ac.jp, Tel: +81-75-383-3210, FAX: +81-75-874-1418)
b. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan.
c. Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori 680-8552, Japan.
d. Japan Atomic Energy Agency, 432-2 Hokushin, Horonobe-cho, Hokkaido 098-3224, Japan.

It is important to understand the long-term migration of radionuclides when considering rock engineering projects such as the geological disposal of radioactive waste. The network of fractures and pores in a rock mass plays a major role in fluid migration as it provides a pathway for fluid flow. The geometry of a network can change due to fracture sealing by some fine-grained materials over long-term periods. Groundwater usually contains fine-grained minerals such as clay minerals, and it is probable that the accumulation of such minerals occurs within a rock fracture upon groundwater flow, thereby decreasing the aperture of a fracture and the permeability. It is therefore essential to conduct permeability measurements using water that includes fine-grained minerals to understand the permeability characteristics of a rock; however, this has not been studied to date. In the present study, we use a macro-fractured granite sample to investigate the change of permeability that occurs under the flow of water that includes two different amounts of clay. Findings showed that clay accumulated in a fracture and that the permeability (hydraulic conductivity) of the granite sample decreased over time, which was greater in for the higher clay content. We concluded that the accumulation of clay minerals in the fracture decreased the permeability of the rock. Furthermore, we consider that the filling and closure of fractures in rock is possible under the flow of groundwater that includes clay minerals.

KEY WORDS: Permeability, Granite, Fracture, Clay

1. 序 論

放射性廃棄物処分や化石燃料の採掘、二酸化炭素地中貯留等の工学プロジェクトを考える上で、岩盤内の流体の流れを理解することは重要である。き裂や空隙のネットワークは流路となるため、岩盤内の流体の流れにおいて主要な役割を果たす¹⁾。

き裂や空隙は、地殻を構成する岩盤内に普遍的に存在する。また、き裂や空隙は、比較的深さの小さい岩盤において、物理的性質や力学的性質、流体の流れ等に大きく影響を与える。例えば、岩盤内でき裂や空隙が連結している場合、透水性が高まる²⁻⁵⁾。また、緻密な岩石にき裂を導入すると透水性が増大し、封圧が上昇するにつれてき裂が閉塞し、透水性が低下することもよく知ら

れている⁵⁻⁸⁾。

き裂・空隙のネットワークの形状は、長い時間が経過すると、き裂や空隙の閉塞により変化する可能性がある。Wang et al.⁹⁾やPérez-Flores et al.¹⁰⁾, Nara et al.¹¹⁾らは、微細な粒子がき裂を閉塞することにより、岩石の透水係数が低下することを、室内透水試験を行うことにより報告している。これらの結果は、蒸留水を用いた透水試験により得られた結果である。しかしながら、地下水は通常、粘土鉱物のような微細な粒子を含んでいる。ゆえに、地下水がき裂の内部で流れる際に、このような粒子がき裂内部で沈殿し集積する可能性がある。さらに、粒子の集積によりき裂開口幅が低下し、透水係数の低下をもたらす可能性がある。したがって、岩石の透水性を理解する上では、粘土を含む水が流れる条件下で透水係数測定を行うことが必須といえる。しかしながら、粘土を含む水を用いて透水係数測定を行った例はない。

そこで本研究では、巨視き裂を含む花崗岩を岩石試料として、粘土を含む水が流れる条件下で岩石の透水係数測定を行うこととした。特に、巨視き裂が自然環境下で元々含まれていた花崗岩を試料として用い、粘土を含む水が流れる条件下で長期間にわたる透水試験を行い、透水係数の経時変化を調べることとした。

*2021年5月21日受付 2022年1月14日受理

1. 正会員 京都大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻
2. 正会員 北海道大学 大学院 工学研究科 環境循環システム部門
3. 正会員 鳥取大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻
4. 正会員 日本原子力研究開発機構

[著者連絡先] TEL: 075-383-3210 (京都大学・奈良)

E-mail: nara.yoshitaka.2n@kyoto-u.ac.jp

キーワード: 透水係数, 花崗岩, き裂, 粘土

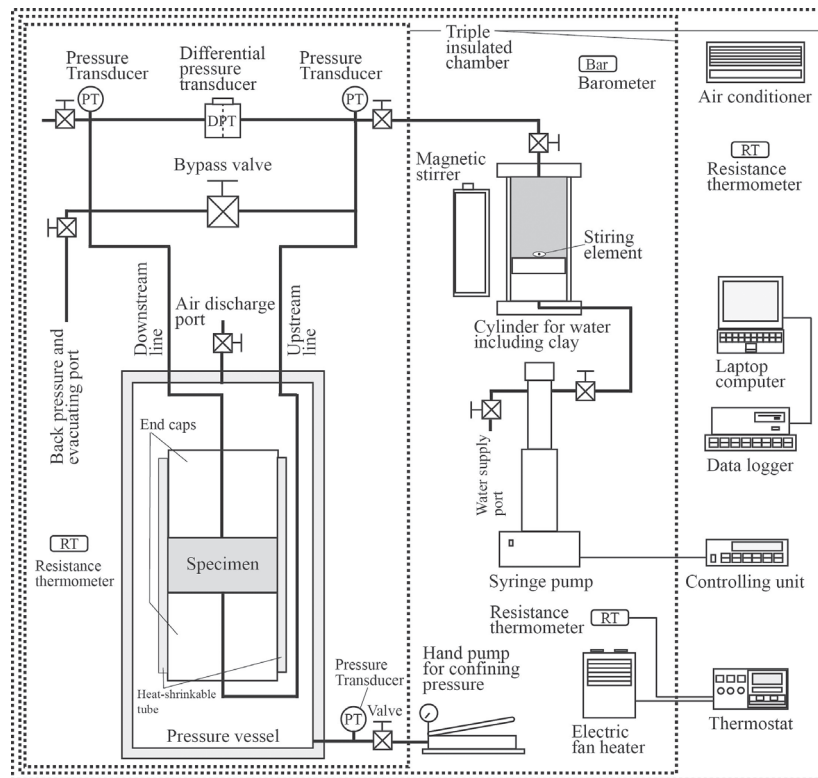


Fig. 1 Schematic illustration of the permeability measurement system.

2. 試験方法

本研究では、フローポンプ法¹²⁾を用いて透水係数測定を行った。この方法では、材料の透水係数は、流速が一定の定常流が生じる条件下でダルシー則を用いて評価される。特に、流速が一定の条件下で、上流側と下流側の水頭差あるいは間隙水圧の差を求めることが必要となる。フローポンプ法では、次式を用いて透水係数 (K [m/s]) が評価される^{12, 13)}。

$$K = \frac{Ql}{A(h_u - h_d)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q は流量 [m³/s]、 l は試験片の長さ [m]、 A は試験片の断面積 [m²]、 h_u は上流側の水頭 [m]、 h_d は下流側の水頭 [m] である。

Fig. 1 に本研究で用いた透水試験装置の概要図を示す。この装置では、定水位法、変水位法、トランジェントパルス法、フローポンプ法等、様々な方法での透水試験が可能であるが、本研究ではフローポンプ法を採用した。この装置は主に、試験片を設置するステンレス製の圧力容器、封圧 (本研究では 1MPa) を加えるために用いるハンドポンプ、間隙流体を入れる容器、間隙流体の流速 (本研究では 0.01ml/min) を制御するために用いるシリンジポンプ、データロガー、温度調節器から成り、装置は恒温室内に設置されている。透水試験を行う際には、周辺環境の温度変化を抑えることが重要である¹⁴⁻¹⁶⁾。本研究では、Fig. 1 中に示されているファンヒーターとエアコンを用いて恒温室内の温度を制御しており、試験中は温度を 22 ± 0.5 °C に制御した。

3. 試料

本研究では、土岐花崗岩を試料として用いた。土岐花崗岩は、これまでに多くの研究で用いられている¹⁷⁻¹⁹⁾。本研究で用いた岩石試料は、岐阜県瑞浪市にある日本原子力研究開発機構瑞浪超

深地層研究所の地下研究施設の深度 200m 調査坑道から採取した。本研究では、巨視き裂が自然環境下で元々含まれていた花崗岩を、直径 50mm、長さ 25mm の円柱形に整形して透水試験に用いた。Fig. 2 に試験片の写真を示す。

また、先行研究¹¹⁾で用いた粘土の層を含む直径 50mm、厚さ 25mm の花崗岩試験片を観察したところ、試験片中央部にある粘土の層の厚さは 1mm 以下であった。本研究で用いた試料では、巨視き裂は試験片中央部からやや外れた位置に存在している (Fig. 2 参照)。開口幅が 1mm である場合、Fig. 2 に示される花崗岩試験片中の巨視き裂を完全に充填する粘土の量は、粘土試料の土粒子密度を 2600kg/m³ とすると、1.5g 程度と見積もられる。そこで本研究では、この量に相当する 1.5g の粘土を、マグネティックスターラーを用いて 1 リットルの蒸留水中に懸濁して、間隙流体として用いた。また比較のため、量が 1 オーダー程度多い 15.9g の粘土を 1 リットルの蒸留水中に懸濁して間隙流体として用いる測定も行った。本研究で用いた粘土試料は、先行研究^{20, 21)}で用いたものと同じく、瑞浪超深地層研究所の地下研究施設の深度 200m 調査坑道の壁面から採取した。粘土試料について、走査型電子顕微鏡で撮影した画像を Fig. 3 に、X 線回折分析の結果を Fig. 4 に、粒度分布を Fig. 5 にそれぞれ示す^{20, 21)}。

4. 結果

本研究では、初めに粘土を含まない蒸留水を用いて岩石試料の透水係数の初期値を測定し、その後粘土を含む水を用いてフローポンプ法による透水試験を長期間行うことで、透水係数の経時変化を調べた。なお、Fig. 2 に示した本研究の岩石試験片 (TG-f2 および TG-f3) は、先行研究 (Nara et al.¹¹⁾) で用いた試験片 (TG-f) とは異なることをここに記しておく。

Fig. 6 に、蒸留水を用いたフローポンプ透水試験から得られた上流側と下流側の間隙水圧の差の経時変化を示す。本研究では、

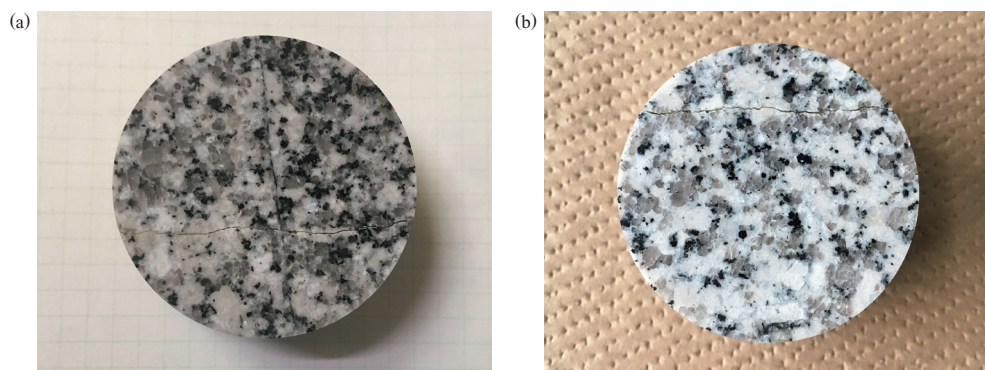
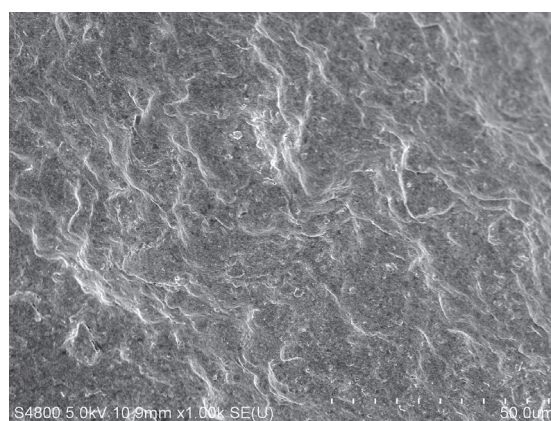
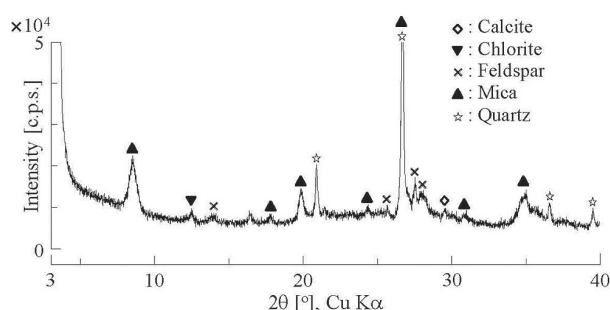
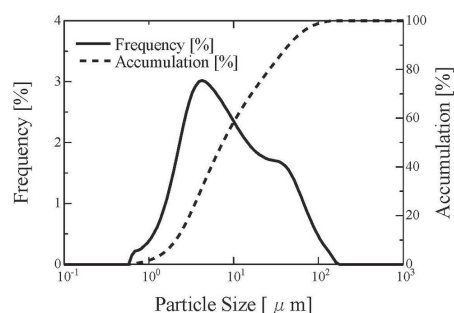


Fig. 2 Photograph of a macro-fractured granite specimen. (a): Specimen TG-f2, (b): Specimen TG-f3.

Fig. 3 Scanning electron photomicrograph of clay sample (after Kato et al.^{20,21}).Fig. 4 X-ray diffraction pattern of clay sample (after Kato et al.^{20,21})Fig. 5 Particle size distribution of clay sample (after Kato et al.^{20,21}).

蒸留水を用いた試験においては、先行研究 (Nara et al.¹¹⁾) に倣い、間隙水圧の差がほぼ一定値に収斂した際の平均値を透水係数の評価に用いた。その結果、試験片 TG-f2 では 2.09×10^{-6} m/s, TG-f3 では 1.53×10^{-8} m/s と評価された。

続いて、粘土を含む水を用いた透水係数測定を行った。TG-f2 では 1 リットル中の蒸留水に粘土を 15.9g, TG-f3 では 1 リットル中の蒸留水に粘土を 1.5g 懸濁して間隙流体として用いた。Fig. 7 に粘土を含む水を用いたフローポンプ透水試験から得られた、上流側と下流側の間隙水圧の差の経時変化を示す。この図より、瞬間的な上下動が認められるものの、間隙水圧の差は、時間経過とともに上昇する傾向があることがわかる。Fig. 8 に、Fig. 7 で示された間隙水圧の差から得られた透水係数の経時変化を示す。透水係数の評価においては、間隙水圧の差の上下動が比較的小さい領域を選択し、その区間の平均値を用いることで評価した。

Fig. 8 に示されているように、透水係数は時間の経過とともに低下していることがわかる。

5. 考 察

本研究で行った透水試験より、粘土を含む水を通し続けることによって、巨視き裂を含む花崗岩の透水係数は、時間の経過とともに低下することが示された。これは、粘土が巨視き裂において集積し、時間の経過とともに集積した量が増えたためであると考えられる。透水係数の時間経過に伴う低下は、Fig. 7 に示される差圧の経時変化 (時間経過に伴う上昇) より得られるものであるが、いずれの場合も上下動を繰り返しながら差圧が上昇する様子が示されている。これは、粒子がき裂内に集積したり、剥がれたりすることの繰り返しで生じると考えられる。つまり、粒子が集積する場合はき裂開口幅が狭まり、き裂内部での水の流れが起こ

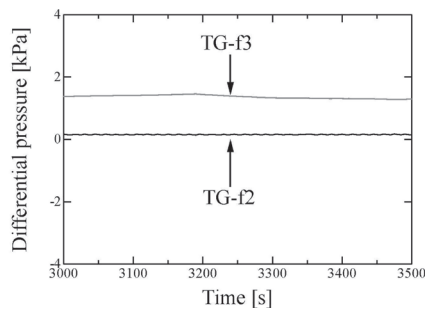


Fig. 6 Temporal change of the pressure difference between upstream and downstream of macro-fractured granite specimens "TG-f2" and "TG-f3" using distilled water (with no clay).

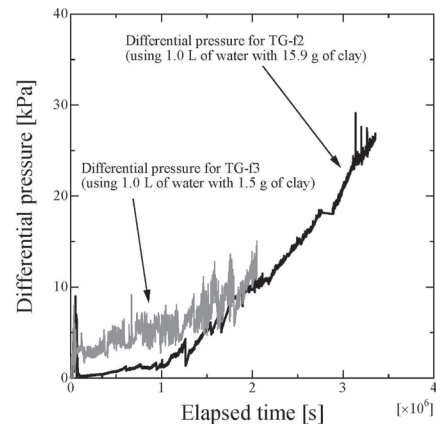


Fig. 7 Temporal change of pressure difference between upstream and downstream for a flow pump permeability test with a fractured Toki granite specimen.

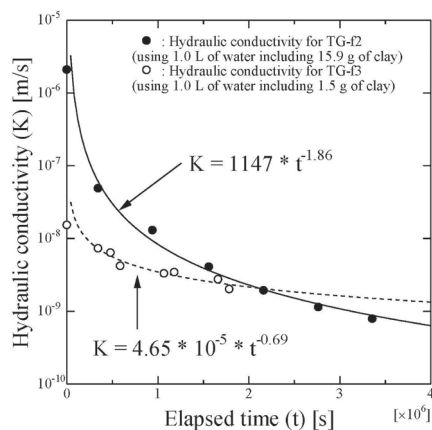


Fig. 8 Temporal change of hydraulic conductivity under flow of water including clay.

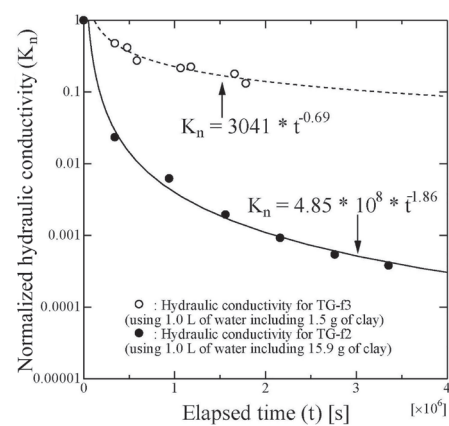


Fig. 9 Temporal change of hydraulic conductivity normalized by values obtained under the flow of distilled water (with no clay).

りにくくなることに繋がるが、粒子が剥がれるとき裂開口幅が増大するため、流れが生じやすくなることに繋がる⁶⁾。このような現象が差圧の上下動の繰り返しに繋がっていると考えられる。また、Fig. 7中の差圧の上下動は、水に含まれる粘土の量が少ない場合に顕著で、粘土の量が多い場合には目立たなくなっている。これは、水に含まれる粘土が多い場合にき裂の一部が閉塞して粒子が安定してき裂内に沈殿しやすくなり、少なくなるとき裂内部が閉塞しづらく、流れる水の量が多くなるため、一度き裂内に集積した粒子が水の流れによって剥がれてしまうことが多くなるためと考えられる。つまり、き裂内部で粒子の沈殿や浸食に相当する現象^{22, 23)}が繰り返し生じ、き裂の開口幅が変化し、差圧の上下動がもたらされたと考えられる。

本研究の試験片に含まれる初期き裂は、圧裂試験のような室内引張試験で導入した人工的なものではなく、現場で得た岩石試料に含まれていたものをそのまま使用している。つまり、自然環境下に存在している巨視き裂を含む花崗岩の挙動を調べている。そのため、試験片ごとにき裂開口幅の初期値を揃えることは不可能であり、透水係数の経時変化を比較する場合には測定された値をそのまま用いることはできない。さらに本研究では、試験片はステンレス製の圧力容器内に設置しているため、粘土の集積量を時間ごとに調べることは不可能である。そのため、透水係数をそれ

ぞれの初期値で正規化して経時変化を比較することが必要である。そこで、透水係数の初期状態からの変化を考察することとし、透水係数を初期値で正規化し、その経時変化を調べた。Fig. 9に正規化した透水係数の経時変化を示す。この図より、正規化した透水係数の時間経過に伴う低下の程度は、粘土を多く含む水が流れる条件下の方が顕著であることがわかる。つまり、試験片TG-f2では、より多くの粘土粒子が巨視き裂内部に集積したために、透水係数のより顕著な低下が示されたものと考えられる。また、いずれの場合も透水係数は時間の経過とともにべき関数的に低下していることがわかる。土岐花崗岩では、インタクトな場合と巨視き裂が導入された場合とでは、透水係数に4オーダー程度の差が生じることが報告されている¹¹⁾。差圧の上下動が少なくより安定してき裂に粘土が充填されるTG-f2(1リットルの水中に15.9gの粘土が含まれる水が流れる場合)を例にとると、透水係数の低下が下記のべき関数でよく表現されている。

$$K_n = 4.85 \times 10^8 \times t^{-1.86} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式は試験結果を時間 t のべき関数を用いた最小二乗法から得たものであり、 K_n は初期値で正規化された透水係数、 t は時間[s]である。このことから、透水係数が4オーダー低下するのに75

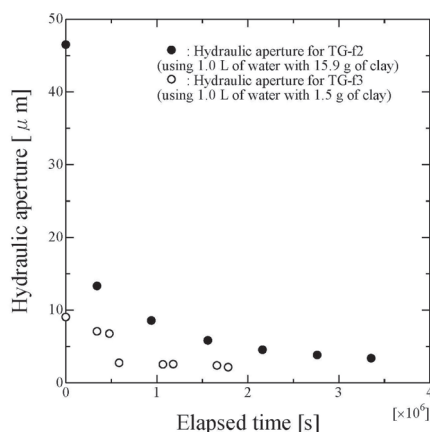


Fig. 10 Temporal change of the hydraulic aperture.

日程度の日数がかかる。このような経過日数であれば、技術的に透水係数を低下させることは可能であると思われる。一方で、1 リットルの水中に 1.5g の粘土が含まれる水が流れる TG-f3 の場合、透水係数の低下は下記の式で表される。

$$K_n = 3041 \times t^{-0.69} \quad (3)$$

この場合、透水係数が 4 オーダー低下するのに 4000 年もの極めて長い期間かかることになる。

本研究では、巨視き裂が自然環境下で含まれていた花崗岩試料を用いて透水係数測定が行われた。Nara et al.¹¹⁾ で求められているように、インタクトな土岐花崗岩の透水係数は非常に低く、 10^{-12} m/s のオーダーとなる。Nara et al.⁵⁾ が既に考察しているように、このような緻密な材料に巨視き裂を導入すると、実質的に巨視き裂でのみ水の流れが生じる。多くの研究により、き裂開口幅は透水係数に大きく影響することが報告されている²⁴⁻²⁹⁾。ゆえに、き裂開口幅（水理学的開口幅）を評価し、その変化を調べることが、現象を正しく理解することに繋がると考えられる。Nara et al.¹¹⁾ は、静止した平行平板間に流れが生じるモデルを用いて、水理学的開口幅と透水係数との関係を次のように求めている。

$$a = \left(\frac{3\pi\mu DK}{\rho g} \right)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 a は水理学的開口幅 [m]、 μ は流体の粘性係数 [Pa/s]、 D は試験片の直径 [m]、 K は透水係数 [m/s]、 ρ は流体の体積密度 [kg/m³]、 g は重力加速度 [m/s²] である。本研究では、水に含まれる粘土の量が少なかったため、全ての場合で流体の粘性係数は 0.001 Pa/s とした。Fig. 10 に水理開口幅の経時変化を示す。この図より、水理開口幅は時間経過とともに低下していることがわかる。水理開口幅の経時変化についても、初期値で正規化することで低下の程度を調べることとした。Fig. 11 に正規化した水理開口幅の経時変化を示す。この図より、水理開口幅についても、粘土を多く含む水が流れる条件下において、低下の程度が顕著になることがわかる。

また、透水試験終了後に、実体顕微鏡を用いて試験片端面（上流側）から巨視き裂を観察し、巨視き裂内部に粘土が集積しているか否かを調べた。Fig. 12 に実体顕微鏡で撮影された、透水試験終了後の試験片表面および巨視き裂内部の画像を示す。Fig. 12

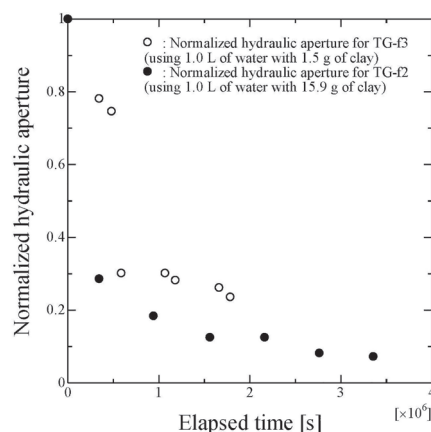


Fig. 11 Temporal change of the hydraulic aperture normalized by the values obtained under the flow of distilled water (with no clay).

はいずれも流入側から撮影した画像であり、焦点深度の異なる画像を複数組み合わせで作成したものである。なお、最大の焦点深度は 0.2mm である。この図において、白色の部分がき裂内部に集積した粘土である。この図より、いずれの場合においても、き裂内部に粘土が含まれていることがわかる。特に、いずれの場合も巨視き裂の大部分が粘土で充填されていることから、試験片の上流側表面から 0.2mm 以内の部分で粘土の集積によるき裂の充填が生じたと考えられる。ゆえに、間隙流体として用いられた水の内部に含まれていた粘土が巨視き裂内部に集積することによって、開口幅が低下し、それに伴って透水係数の低下が生じたと考えられる。

1 リットル中の蒸留水に粘土を 1.5g 懸濁した水を流す試験で用いた試験片 TG-f3 について、試験後に巨視き裂表面の画像を撮影し、Fig. 12 で示された範囲よりも深い部分で粘土の沈殿が生じていたかどうかを調べた。その図を Fig. 13 に示す。この図において、上側が上流側、下側が下流側である。また、白色の部分がき裂面上に付着した粘土粒子である。この図より、粘土粒子は白色であるため、黒雲母のような有色鉱物の表面に沈殿している様子がよく表されているが、粘土の沈殿箇所特別な偏りは認められず、巨視き裂全体に満遍なく沈殿していたことが示される。

1 リットル中の蒸留水に粘土を 1.5g 懸濁した水を流す試験で用いた試験片 TG-f2 の試験後の画像を Fig. 14 に示す。この図に示すように、試験後は巨視き裂が接着した。これは、より多くの粘土が巨視き裂内部に流れ込み、き裂内部から粘土粒子が剥がれず、き裂を修復したために生じたと考えられる。つまり、多くの粘土を含む水が巨視き裂内に流れ込む場合、差圧の上下動の小ささから示唆される粘土粒子の剥がれ落ちが起こりにくくき裂が閉塞しやすいばかりでなく、き裂修復による強度回復が望める可能性がある。き裂が閉じることによって透水係数の低下がもたらされ^{30, 31)}、き裂の閉塞がさらに進んで修復がなされれば材料強度が回復する^{32, 33)} ということが過去の研究で指摘されている。本研究の結果から、粘土が含まれる水が流れる環境下を利用することによって、透水係数の低下や材料強度の回復が技術的に可能になることが示唆される。

岩石内部のき裂やそのネットワークは、放射性廃棄物処分においては適切に評価する必要がある。一方で、自然環境下にある花崗岩においては、粘土のような微細な粒子の集積によってき裂が充填されていることがしばしば報告されている。Ishibashi et al.³⁴⁾ は、花崗岩内のき裂が流入した地下水に含まれる粒子が沈殿する

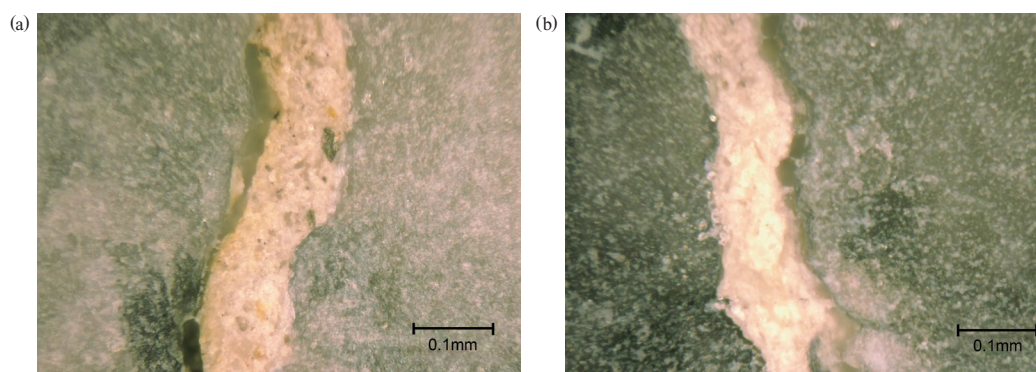


Fig. 12 Photograph of fracture sealed by clay taken from upstream side. (a) Photograph for TG-f2 (using 1.0L of water including 15.9g of clay), (b) Photograph for TG-f3 (using 1.0L of water including 1.5g of clay).



Fig. 13 Photograph of fracture surface of specimen TG-f3 after permeability measurement using water including clays. The upper side in this photo is the upstream side for the permeability measurement.

ことによって修復されると指摘している。Nara et al.¹¹⁾は、花崗岩の巨視き裂の修復が自然環境下で生じると指摘している。これらの研究から、花崗岩内にき裂が存在したとしても、長期にわたって岩盤を利用する場合には、地下水に含まれる粒子の沈殿による修復によって、透水係数が低下することが期待できる。

放射性廃棄物地層処分においては、岩盤は天然バリアとして用いられる。放射性核種の移動がほとんど起こらない条件がより望ましいため、難透水性の岩盤の利用は好都合といえる。本研究の結果より、花崗岩質岩盤の遮蔽性能は、粘土の集積によるき裂の充填によって修復あるいは保持される可能性があることが指摘できる。ただし、通常地下水が流れる環境下では、粘土のような微細な粒子の沈殿によるき裂の閉塞には、極めて長い年月がかかることが予想される。ゆえに、本研究で得た現象を利用するためには、さらなる技術の開発が必要となると思われる。例えば、放射性廃棄物処分を行う際に、粘土を含む水を同時に注入し、岩盤内のき裂閉塞が起こりやすい条件を人為的に作成するような技術が必要になると思われる。これについてはさらなる研究開発が必要であるため、今後の課題としたい。

6. 結 論

本研究では、巨視き裂が自然環境下で含まれている花崗岩を試料として用いて、粘土を含む水が流れる条件下で透水試験を行うことによって、透水係数の変化を調べた。その結果、透水係数は時間の経過とともに低下することが示された。また、透水係数の



Fig. 14 Photograph of specimen TG-f2 after permeability measurement using water including clays. The macro-fracture is closed by the accumulation of clays.

低下の程度は、水中に含まれる粘土の量が多い場合により顕著であった。ゆえに、粘土粒子が巨視き裂内で集積してき裂を閉塞させることによって、巨視き裂を含む花崗岩の透水係数が低下すると結論づけられる。

謝辞 本研究は、「放射性廃棄物共通技術調査等事業(放射性廃棄物重要基礎技術研究調査)」(2014～2017年度)、JSPS 科研費 19K04596 および京都大学 SPIRITS 2019 のサポートを受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

References

- 1) Y. Guéguen and J. Dienes: Transport properties of rocks from statistics and percolation. *Math. Geol.* **21**(1989), 1-13.
- 2) Y. Guéguen, T. Chelidze and M. Le Ravalec: Microstructures, percolation thresholds, and rock physical properties. *Tectonophysics* **279**(1997), 23-35.
- 3) J. Sausse, E. Jacquot, B. Fritz, J. Leroy and M. Lespinasse: Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction. Example of the Brézouard granite (Vosges, France). *Tectonophysics* **336**(2001), 199-214.
- 4) P.M. Benson, P.G. Meredith and A. Schubnel: Role of void space geometry in permeability evolution in crustal rocks at elevated pressure. *J. Geophys. Res.* **111**(2006), B12203, doi: 10.1029/2006JB004309.
- 5) Y. Nara, P.G. Meredith, T. Yoneda and K. Kaneko: Influence of macro-fractures and micro-fractures on permeability and elastic wave velocities in basalt at elevated pressure. *Tectonophysics* **503**(2011), 52 - 59.
- 6) R.L. Kranz, A.D. Frankel, T. Engelder and C.H. Scholz: The permeability of whole and jointed Barre granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **16**(1979), 225-234.
- 7) P. Benson, A. Schubnel, S. Vinciguerra, C. Trovato, P. Meredith and R.P. Young: Modeling the permeability evolution of microcracked rocks from elastic wave velocity inversion at elevated isotropic pressure. *J. Geophys. Res.* **111**(2006), B04202, doi: 10.1029/2005JB003710.
- 8) J. Fortin, S. Stanchits, S. Vinciguerra and Y. Guéguen: Influence of thermal and mechanical cracks on permeability and elastic wave velocities in a basalt from Mt. Etna volcano subjected to elevated pressure. *Tectonophysics* **503**(2011), 60-74.
- 9) G. Wang, T.M. Mitchell, P.G. Meredith, Y. Nara, Z. Wu: Influence of gouge thickness on permeability of macro-fractured basalt. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **121**(2016), 8472-8487.
- 10) P. Pérez-Flores, G. Wang, T.M. Mitchell, P.G. Meredith, Y. Nara, V. Sarkar and J. Cembrano: The effect of offset on fracture permeability of rocks from the Andean Southern Volcanic Zone, Chile. *J. Struct. Geol.*, **104**(2017), 142-158.
- 11) Y. Nara, M. Kato, R. Niri, M. Kohno, T. Sato, D. Fukuda, T. Sato and M. Takahashi: Permeability of granite including macro-fracture naturally filled with fine-grained minerals. *Pure Appl. Geophys.*, **175**(2018), 917-927.
- 12) H.W. Olsen: Darcy's law in saturated kaolinite. *Water Resour. Res.* **2**(1966), 287-295.
- 13) R.H. Morin and H.W. Olsen: Theoretical analysis of the transient pressure response from a constant flow rate hydraulic conductivity test. *Water Resour. Res.* **23**(1987), 1461-1470.
- 14) M. Kato, M. Takahashi and K. Kaneko: Highly precise evaluation of hydraulic constants of low-permeability rocks using the transient pulse method, *Journal of MMIJ*, **129**(2013), 472-478.
- 15) M. Kato, Y. Nara and K. Shibuya: Precise permeability measurement for high strength and ultra low permeability concrete under controlled temperature, *Zairyo*, **69**(2020), 263-268.
- 16) M. Kato, Y. Nara, D. Fukuda, M. Kohno, Toshinori Sato, Tsutomu Sato and M. Takahashi: Importance of temperature control in surrounding environment during permeability test for measuring hydraulic constants of rock, *Zairyo*, **70**(2021), 300-306.
- 17) A. Schubnel, O. Nishizawa, K. Masuda, X.J. Lei, Z. Xue and Y. Guéguen: Velocity measurements and crack density determination during wet triaxial experiments on Oshima and Toki granites. *Pure Appl. Geophys.* **160**(2003), 869-887.
- 18) F. Lanaro, T. Sato and S. Nakama: Depth variability of compressive strength test results of Toki granite from Shobasama and Mizunami construction sites, Japan. *Rock Mech. Rock Eng.* **42**(2009), 611-629.
- 19) Y. Nara, S.H. Cho, T. Yoshizaki, K. Kaneko, T. Sato, S. Nakama and H. Matsui: Estimation of three-dimensional stress distribution and elastic moduli in rock mass of the Tono area, *International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics* **7**(2011), 1-9.
- 20) M. Kato, Y. Nara, Y. Okazaki, M. Kohno, T. Sato, T. Sato, M. Takahashi: Application of the transient pulse method to measure clay permeability, *Zairyo*, **67**(2018), 318-323.
- 21) M. Kato, Y. Nara, Y. Okazaki, M. Kohno, T. Sato, T. Sato and M. Takahashi: Application of the transient pulse method to measure clay permeability, *Mater. Trans.*, **59**(2018), 1427-1432.
- 22) D. Wang, Z. Yuan, Y. Cai, D. Jing, F. Liu, Y. Tang, N. Song, Y. Li, C. Zhao and X. Fu: Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review, *J. Environ. Manage.*, **285**(2021), 112165.
- 23) H. Hao, J. Qin, Z. Sun, Z. Guo, J. Wang: Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils, *Catena*, **203**(2021), 105378.
- 24) D. Norton and R. Knapp: Transport phenomena in hydrothermal systems: the nature of porosity. *Am. J. Sci.* **227**(1977), 913-936.
- 25) P.A. Witherspoon, J.S.Y. Wang, K. Iwai and J.E. Gale: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock failure. *Water Resour. Res.* **16**(1980), 1016-1024.
- 26) C. David: Geometry of flow paths for fluid transport in rocks. *J. Geophys. Res.* **98**(1993), 12267-12278.
- 27) A.J.A. Unger and C.W. Mase: Numerical study of the hydromechanical behavior of two rough fracture surfaces in contact. *Water Resour. Res.* **29**(1993), 2101-2114.
- 28) A.P. Oron and B. Berkowitz: Flow in rock fractures: the local cubic law assumption reexamined. *Water Resour. Res.* **34**(1998), 2811-2825.
- 29) K. Suzuki, M. Oda, M. Yamazaki and T. Kuwahara: Permeability change in granite with crack growth during immersion in hot water. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **35**(1998), 907-921.
- 30) E. Liteanu and C.J. Spiers: Fracture healing and transport properties of wellbore cement in the presence of supercritical CO₂. *Chem. Geol.* **281**(2011), 195-210.
- 31) L. Luquot, H. Abdoulghafour and P. Gouze: Hydro-dynamically controlled alteration of fractured Portland cements flowed by CO₂-rich brine. *Int. J. Greenh. Gas Control* **16**(2013), 167-179.
- 32) E. Tenthorey, S.F. Cox and H. Todd: Evolution of strength recovery and permeability during fluid-rock interaction in experimental fault zone. *Earth Planet. Sci. Lett.* **206**(2003), 161-172.
- 33) S. Pietruszczak and P. Przeczski: On hydro-mechanical response of self-healing and self-sealing fractured geomaterials. *Comput. Geotech.* **134**(2021), 104030.
- 34) M. Ishibashi, H. Yoshida, E. Sasao and T. Yuguchi: Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: An example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan. *Eng. Geol.* **208**(2016), 114-127.