

巨視き裂を含む岩質材料の透水性に及ぼす充填粘土鉱物種の影響

鳥取大学	学生会員	○浅野 匡希
鳥取大学	正会員	河野 勝宣
鳥取大学	フェロー会員	西村 強

1. 緒言

地熱、石油、シェールガスなどの天然資源をより安全に、効率よく採掘することや、原油地下備蓄空洞や放射性廃棄物処理施設等の地下岩盤構造物の長期安定性の確保の面からも、天然資源賦存地盤あるいは地下岩盤構造物の力学特性を把握することは非常に重要である。一方、日本列島の地質は、地質時代を通じて、マグマ活動や地殻変動の産物が多く、熱水変質帯や不連続面が広範囲に分布しており、岩盤中のき裂には、多種多様な鉱物が充填されており、充填された鉱物は粘土鉱物などの微細鉱物である場合が多い。

近年のLPGの長期備蓄、CCSや地層処分などの地下空間の利用の大規模プロジェクトからもわかるように、岩盤の長期的な透水特性評価に関する研究¹⁾²⁾³⁾など、き裂を含む岩盤の透水係数を理解する必要性が高まっている。これまで、粘土鉱物で充填されたき裂を含む岩石の透水性に関する研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾が行われているが、いずれの研究もき裂の充填（閉塞）鉱物の種類やその性状については詳細に検討されていない。

本研究では、各種粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む岩質材料（花崗岩および多孔質岩）の透水性に及ぼす充填粘土鉱物種の影響を明らかにすることを目的とする。さらに、得られた透水係数より三乗則を用いて単一き裂の透水性の指標となる水理開口幅を評価した。

2. 研究方法

(1) 岩石供試体および粘土鉱物試料

定圧透水試験に供した岩石は、花崗岩と多孔質岩を用いた。それぞれ、インタクト、巨視き裂を含む、粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む供試体の3種であり、直径50mm、幅10mm、のディスク状に整形した(図-1)。巨視き裂は図-2に示すように、ダイヤモンドカッターを用いてインタクトな花崗岩供試体の両端面の直径方向に長さ50mm、幅1mm、深さ3mmの切欠きを入れ、3点曲げ圧縮により作製した。粘土鉱物の充填は、含水させた粘土鉱物を圧着させて行った。充填した粘土鉱物は、よく産出される粘土鉱物10種（カオリナイト、蛇紋石、10Åハロイサイト、パイロフィライト、タルク、雲母粘土鉱物、緑泥石、Na型スメクタイト、Ca型スメクタイト、バーミキュライト）を用いた。粘土鉱物の粉末X回析パターン（株式会社リガク製 RINT Ultima IV, CuK α , 40kV, 20mA, スリット系：0.5-0.15mm-2°, 走査範囲：5~40°）を図-3に、土粒子密度を表-1に示す。

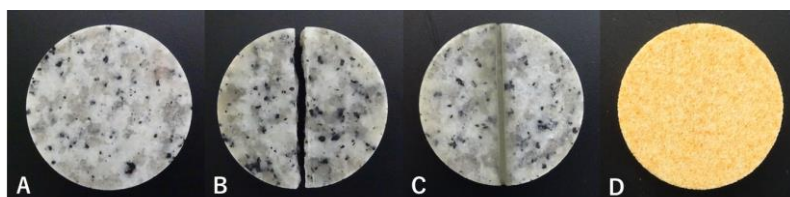


図-1 岩石供試体（A：インタクトな花崗岩，B：巨視き裂を含む花崗岩，C：粘土鉱物を充填させたき裂を含む花崗岩，D：インタクトな多孔質岩）

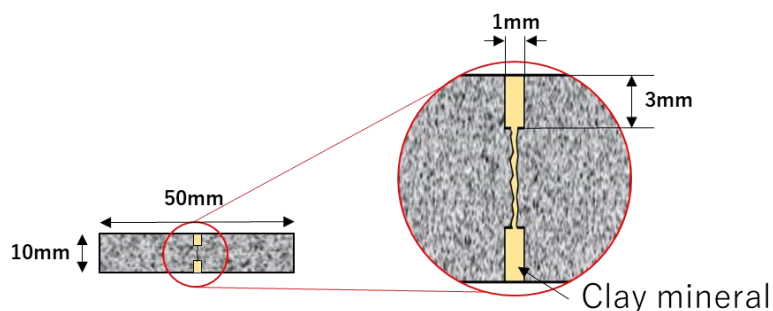


図-2 粘土鉱物を充填した巨視き裂の概略図

キーワード 岩石透水試験 粘土鉱物 き裂

連絡先 〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101 TEL 0857-31-5291

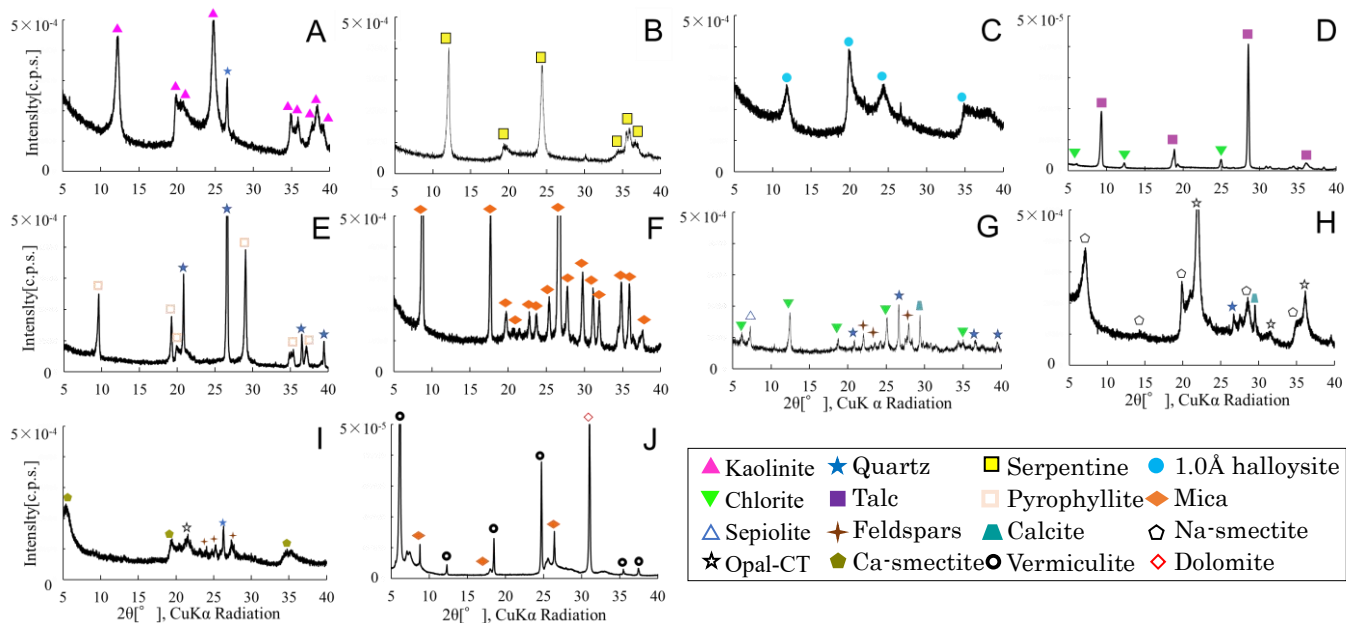


図-3 各種粘土鉱物の粉末 X 線回折パターン (A: カオリナイト, B: 蛇紋石, C: 10Åハロイサイト, D: パイロフィライト, E: タルク, F: 雲母粘土鉱物, G: 緑泥石, H: Na 型スメクタイト, I: Ca 型スメクタイト, J: パーミキュライト)

表-1 各種粘土鉱物の土粒子密度

Clay mineral	ρ_s [g/cm ³]
Kaolinite	2.577
Serpentine	2.518
1.0Å halloysite	2.736
Pyrophyllite	2.718
Talc	2.786
Mica	2.904
Chlorite	2.841
Na-smectite	2.648
Ca-smectite	2.549
Vermiculite	2.663

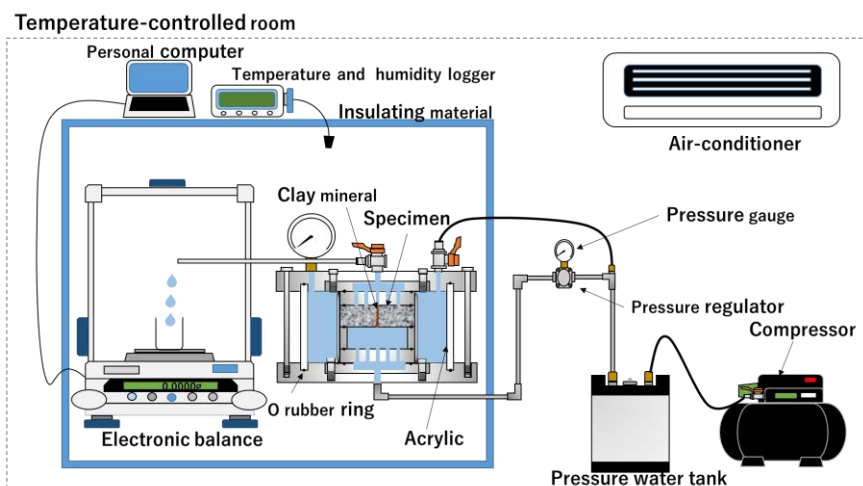


図-4 定圧透水試験装置

(2) 定圧透水試験

本研究では、図-4 に示す加圧式の透水試験装置を独自に作製し透水量を測定した。試験は恒温室内に断熱材で作成した恒温槽内にて実施した。試験は、エアコンプレッサーおよび加圧容器を用いて、供試体側面にポリオレフィン性の熱収縮チューブを介して一定の水圧（封圧）を与えた状態で、供試体下部端面に一定の透水圧で通水（蒸留水）して行った。この時、供試体側面と熱収縮チューブの隙間から水漏れを防ぐため透水圧は封圧より小さい値に設定した。供試体は水浸減圧容器を用いて脱気し、飽和状態とした。透水量は分析天びんを用いて、60 秒間隔でコンピューターにより計算した。なお、透水量については、蒸発量も考慮している。ただし、巨視き裂を含む花崗岩供試体および多孔質岩供試体においては、メスシリンダーおよびストップウォッチを用いて、透水試験を行った。透水係数 k ($= QL/hAt$, Q : 透水量, L : 供試体高さ, h : 水位差, A : 供試体の断面積, t : 測定時間) は Darcy 則が成り立つと仮定して算出し、本研究では水温 15°C における透水係数 k_{15} ($= k \times \eta_T / \eta_{15}$, η_T : 水温 T [°C] における水の粘性係数, η_{15} : 水温 15°C における水の粘性係数) として整理した。水位差 h は加圧容器の圧力として計算した。

3. 試験結果および考察

(1) 透水係数

図-5A の実験結果から、本研究における透水圧または封圧の範囲では、いずれの供試体の透水係数にも大きな影響は与えるものではないと考えられる。表-2 の実験結果から、花崗岩の透水係数は、インタクトな供試体から巨視き裂を含むことで、 $2.3 \times 10^{-11} \text{m/s}$ から $6.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$ まで上昇した。両者には、5 オーダー程度の差が見られ、巨視き裂の存在が花崗岩の透水係数に大きな影響を及ぼすことが確認できた。粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む花崗岩供試体の透水係数は $3.3 \times 10^{-8} \sim 2.1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ の広範囲にあり、いずれも巨視き裂を含む花崗岩供試体よりも透水係数は小さい値を示した（図-5B）。これ

は言うまでもなく巨視き裂が微細な粘土鉱物でシーリングされたことが理由である。また、これらの透水係数は、充填する粘土鉱物の種類によって、異なる値を示しており、これは、岩石の透水係数が充填する粘土鉱物の透水性（すなわち、粘土鉱物の種類）に依存することを示唆するものである。

多孔質岩の透水係数は、インタクトな供試体では $7.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、巨視き裂を含む供試体は $4.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と透水係数に変化が見られなかった。また、粘土鉱物を充填すると透水係数は $4.2 \times 10^{-6} \sim 8.1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ となり、同程度の値となった。この結果、透水係数が、充填鉱物よりも高い岩質材料であれば、透水係数は岩質材料に依存することが明らかになった。

(2) 三乗則を用いた水理開口幅の評価

既往の研究⁴⁾をもとに、平行平板間の流れの式（ $Q = a^3 \rho g D / 12 \mu \cdot dh/dx$ 、 Q ：流量、 a ：平行平板の間隔（き裂開口幅）、 D ：き裂長さ、 ρ ：流体の密度、 μ ：流体の粘性係数、 g ：重力加速度、 dh/dx ：動水勾配）と Darcy 則に基づく多孔体内の流れの式（ $Q = -kA \cdot dh/dx$ 、 Q ：流量、 k ：透水係数、 A ：流れの方向に垂直な多孔体の断面積、 dh/dx ：動水勾配）の関係より、(1)式に示す透水係数と水理開口幅との関係（三乗則）³⁾を導くことができる。

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi\mu Dk}{\rho g}} \quad (1)$$

本研究では、定圧透水試験により得られた透水係数より、三乗則を用いて単一き裂の透水性の指標となる水理開口幅を評価した。花崗岩および多孔質岩の水理開口幅を表-2 に、透水係数と水理開口幅の関係を図-6 に示す。水理開口幅の大小関係は透水係数の大小関係と同じであった。多孔質岩の場合、水理開口幅に大きな差はみられなかった。花崗岩の場合、水理開口幅は巨視き裂を含む花崗岩供試体で $72.16 \mu\text{m}$ と最も大きく、インタクトな花崗岩供試体や Na 型スメクタイトを充填した巨視き裂を含む花崗岩供試体で $1.09 \mu\text{m}$ という結果であり、充填される粘土鉱物の種類によって水理開口幅に差が生じることがわかった。また、粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む花崗岩供試体の水理開口幅は、インタクトな花崗岩供試体に相対的に近い値を示すことがわかった。

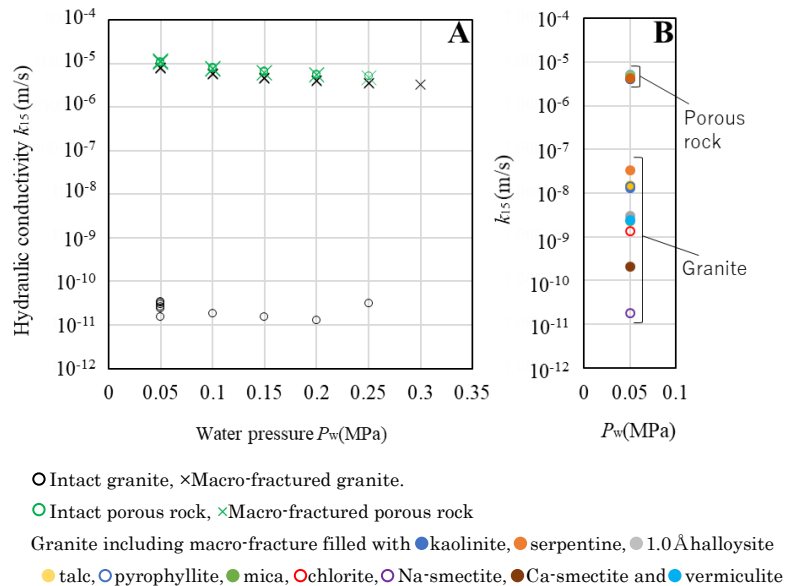


図-5 透水試験結果（A：インタクトな供試体，巨視き裂を含む供試体 B：粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む供試体）

表-2 花崗岩および多孔質岩の透水係数 k_{15} と水理開口幅 a

Specimen	Granite		Porous rock	
	$k_{15}[\text{m/s}]$	$a[\mu\text{m}]$	$k_{15}[\text{m/s}]$	$a[\mu\text{m}]$
Intact rocks	2.3×10^{-11}	1.09	7.9×10^{-6}	75.63
Macro-fractured rocks	6.9×10^{-6}	72.16	8.1×10^{-6}	76.21
Rocks including macro-fracture filled with clay minerals				
kaolinite	1.3×10^{-8}	8.93	4.3×10^{-6}	61.58
serpentine	3.3×10^{-8}	12.19	4.8×10^{-6}	64.19
1.0nm-halloysite	3.0×10^{-9}	5.48	5.2×10^{-6}	65.69
pyrophyllite	1.4×10^{-8}	9.16	4.4×10^{-6}	62.18
talc	1.5×10^{-8}	9.37	4.8×10^{-6}	63.86
mica	2.2×10^{-9}	4.94	4.4×10^{-6}	62.43
chlorite	1.3×10^{-9}	4.15	4.2×10^{-6}	61.22
Na-smectite	2.1×10^{-11}	1.05	5.0×10^{-6}	64.83
Ca-smectite	2.1×10^{-10}	2.26	4.2×10^{-6}	61.19
vermiculite	2.4×10^{-9}	5.09	4.4×10^{-6}	61.99

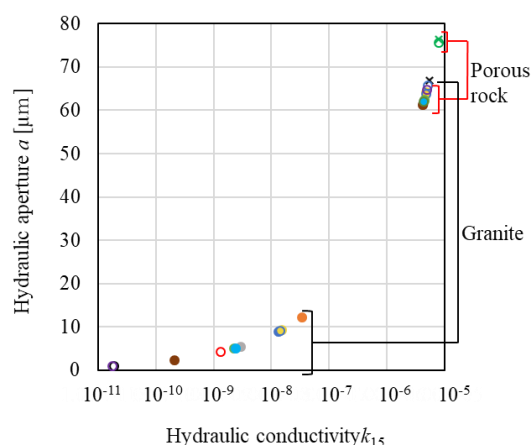


図-6 透水係数と水理開口幅の関係
(凡例は図-5 と同様)

4. 結 論

本研究では加圧式の透水試験装置を独自に作製し、インタクトな岩石、巨視き裂を含む岩石、各種粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む岩石の透水性を明らかにした。その結果、花崗岩の透水性は、割れ目の存在により上昇するものの、割れ目が粘土鉱物で充填されることで低下し、さらに、その低下度合いは、粘土鉱物の種類によって異なると結論付けた。また、粘土鉱物より透水係数が高い多孔質岩の場合、充填する粘土鉱物に関わらず、透水係数は岩石そのものの透水係数に依存することが明らかになった。

今後は、地下深部の圧力環境を表現できる岩石透水試験を用いて実験を行う予定である。

謝辞：本研究の一部は、日本学術復興会科学研究費（課題番号：19K15489）を受けて実施したものである。

引用文献

- 1) H. Yasuhara, N. Kinoshita, S. Ogata, D.-S. Cheon and K. Kishida : Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical modeling by incorporating pressure solution for estimating the evolution of rock permeability, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **86**, 104-114, 2016.
- 2) H. Yasuhara, N. Kinoshita, H. Ohfuji, M. Takahashi, K. Ito and K. Kishida : Long-term observation of permeability in sedimentary rocks under high-temperature and stress condition and its interpretation mediated by microstructural investigations, *Water Resources Research*, **51**, 5425-5449,
- 3) H. Yoshida : Fluid Conducting Fractures and Their Long-term Behavior in Crystalline Rocks, *Journal of Geography*, **121**, 68-95, 2012
- 4) M. Kato, Y. Nara, Y. Okazaki, M. Kohno, T. Sato, and M. Takahashi : Application of granite including macro-fracture naturally filled with fine-grained minerals, *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 917-927, 2018
- 5) Y. Nara, M. Kato, R. Niri, M. Kohno, T. Sato, D. Fukuda and M. Takahashi : Permeability of granite including macro-fracture naturally filled with fine-grained minerals, *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 917-927, 2018.
- 6) G. Wang, T. M. Mitchell, P. G. Meredith, Y. Nara and Z. Wu : Influence of gouge thickness on permeability of macro-fractured basalt, *Journal of Geophysical Research*, **121**, 8472-8487, 2016.