

軟岩内き裂の透水性に関する基礎的実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON PERMEABILITY OF A SOFT ROCK FRACTURE

石井 卓*・桜井英行*・船山潤一**・木下直人***

Takashi ISHI, Hideyuki SAKURAI, Junichi FUNAYAMA, Naoto KINOSHITA

With respect to anisotropy, stress-dependence, and effects of stress-hysteresis, several tests were performed to investigate the permeability of a natural fracture in a soft rock, Kimachi sandstone. It turned out that there were not remarkable features in those three aspects and that the fracture permeability at the confining pressure of 5.0MPa lied between 4/5 and 1/5 of the counterpart at 0.3MPa. The ratio of a mechanical aperture to the hydraulic one was obtained by measuring the changes in the mechanical one; as a result, it was almost the same as the one obtained in a hard rock, which has a similar hydraulic aperture to Kimachi sandstone. Moreover, regarding the rock mass in which the samples were taken, the permeability as rock mass with fractures was calculated, considering the fracture's permeability and frequency. It was greater in one or two digits than the permeability of an intact rock; therefore, the fracture's one is dominant in this rock mass.

Key Words: soft rock, fractures, permeability, stress-dependence, mechanical and hydraulic apertures

1. はじめに

深部岩盤内に空洞を掘削すると、それに伴って周辺岩盤の透水性が増大する可能性がある。特に硬岩の場合、既存のき裂の開口により大幅に透水性が増大する可能性があると考えられ、これに関連した室内におけるき裂の透水試験や、原位置における空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化の計測等が数多く実施されている^{1)~3)}。これらの室内試験データは、空洞掘削に伴う周辺岩盤の応力変化を考慮して空洞周囲の透水性の変化を予測する際に、参考となる特性データである。

軟岩の場合も、地下深部に空洞等を掘削する際の周辺岩盤の透水性変化は、硬岩と同様に、既存のき裂の開口幅の変化や岩盤の局所的な破壊による透水性の変化に支配される場合があるにもかかわらず、今までのところ、軟岩内き裂の透水性およびその応力依存性に関する実験データは非常に少ない。

本研究では、軟岩内の天然のき裂について、その透水性の異方性、応力依存性および応力履歴の影響を調べるための室内透水試験を実施し、既往の硬岩内き裂についての試験結果と比較・検討を行った。また、き裂試料を採取した岩盤を対象として、その透水性に対するき裂の透水性の影響を考慮することの重要性についても検討を行った。

* 正会員 清水建設株式会社 技術研究所

** (株)地層科学研究所

*** 正会員 (株)地層科学研究所

2. 試験の概要

試料としては、島根県産の来待砂岩を用いた。来待層は、新第三紀中新世の出雲層群に属する。安山岩の微細な岩片を多く含む塊状で中～粗粒の凝灰岩質砂岩からなる。今回採取した試料の間隙率は26.9%、乾燥密度は 1.97g/cm^3 であった。き裂（不連続面）は、mm～cmのオーダーではうねりが認められ、数mオーダーではほぼ直線的である。間隔はおよそ5mであり、き裂に沿って帯状に白黄土色に変色した部分は、雨水等の浸入によって鉱物中の鉄分が酸化したものと考えられる。不連続面は分離し、黒く変色しているものの、食い違いや幾何学的異方性、粘土などの充填物は認められない。

実験装置は安部ら⁴⁾と同様のものを用いた。装置は載荷装置、三軸室、液圧発生装置(3台)、貯留槽および定水位法のための送水・排水装置、真空ポンプおよびコンプレッサーなどから構成されており、定水位法およびトランジェント・パルス法により透水係数を求めることができる。

基質部の透水試験用試料は、チェーンソーを用いてブロック状に切り出した後、直交する3方向(以下a, b, c方向と記す)についてボーリングを行い、直径50mm、高さ100mmに成形した(図-1(a))。実験は6個の供試体(3方向×2)についてトランジェント・パルス法を用い、各方向1個については有効拘束圧0.3, 1.0, 2.0, 5.0MPaで実施し、応力履歴の影響についても調べるため、2回載荷、除荷を繰り返して実験を行った。各方向残りの1個については有効拘束圧1.0MPaでのみ実験を行った。

き裂の透水試験は、岩盤としての透水性を支配すると考えられるき裂を抽出し、それについて実施した。基質部と同様に、チェーンソーを用いてブロック状に切り出した後、対象とするき裂面ができるだけボーリング孔軸に平行で、かつ、コアの中心部にくるように調整して、直交する2方向(以下A, B方向と記す)についてボーリングを行った(図-1(b))。ボーリングのしやすさを考慮して、コアの直径は100mmとし、供試体の高さは原則として100mmとした。実験は計4個(2方向×2)の供試体について定水位法を用い、有効拘束圧0.3, 1.0, 2.0, 5.0MPaで実施した。基質部同様、応力履歴の影響についても調べるため、2回載荷、除荷を繰り返して実験を行った。供試体はき裂で完全に分離しており、試料採取と成形時にかみ合わせや開口幅が変化し、原位置岩盤のき裂とは異なった特性に変化していると考えられるので、その影響を除去するため、5.0MPaの拘束圧を2回繰り返し作用させた後、所定の実験を実施した。

また、幾何学的開口幅と水理学的開口幅の関係について検討するため、各方向1個の供試体についてき裂の開口幅の変化測定を実施した。ひずみゲージ式リング型変位計を供試体の上下端面からそれぞれ25mmの位置に設置し、5.0MPaの垂直応力を2回繰り返し作用させたときも含めて測定を実施した。なお、き裂を含まない供試体にも同じように変位計を取り付け、5.0MPaまで加圧したときの基質部のみの変位量を計測することにより、き裂部のみの変位を差分値として算出した。

3. 実験結果

3.1 基質部

基質部の透水試験結果を、図-2に示す。供試体a1, c1については、1回目の載荷時の試験結果のみを示している。実験を行った供試体の透水係数は、全て 10^{-10}m/s のオーダーの値を示しており、試料を採取した方向による透水係数の違いは小さい。

透水係数の応力依存性もあまり大きくなく、有効拘束圧が5.0MPaのときの透水係数は0.3MPaのときの2/3から

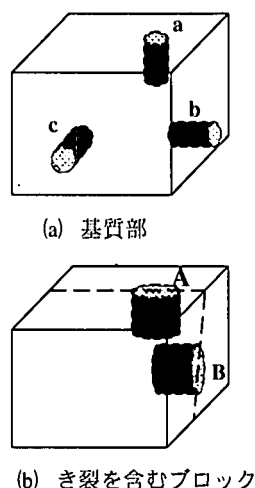


図-1 供試体の採取方向

1/2 程度である。

1 回目の載荷時の透水係数と 2 回目のそれを比較すると、図に示していない a1 および c1 も含めて、後者の方が前者よりやや小さいという傾向はみられるが、全体的に、透水係数に対する応力履歴の影響は小さい。

3.2 き裂部

き裂を含む供試体の透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ のオーダーの値を示しており、き裂を含まない供試体のそれと比較すると、3~4 桁大きくなっている。平行平板を仮定して求めたき裂の透水係数は図-3 に示されるように、 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ のオーダーの値である。A 方向と B 方向の透水係数を比較すると、各方向の個々の供試体によるばらつきの方が大きくなっており、異方性は認められない。これは、き裂面の表面形状に異方性が認められなかったことと対応している。

応力依存性についても、供試体毎にばらついており、有効拘束圧 5.0MPa のときの透水係数が 0.3MPa のときの 4/5 程度のものから、1/5 に低下するものまであった。最も応力依存性が大きい供試体と比較すると、き裂の方が基質部よりも透水係数の顕著な応力依存性が認められる。また、除荷時のき裂の透水係数は、もっとも差が現れたときでも載荷時の約 1/2.5 程度であり、応力履歴の影響も全体的に小さいといえる。

き裂の閉合量の測定結果を図-4 に示す。これらは、5.0MPa の拘束圧を供試体に 2 回繰返し作用させる前の変位を 0 とし、基質部の変位量に対する差分値を計算した値である。既往の硬岩内のき裂についての測定結果⁴⁾と比較すると、載荷・除荷の繰返しに伴う残留変位量が小さいという特徴がみられる。これは、き裂の透水係数に対する応力履歴の影響は小さいという結果と対応している。

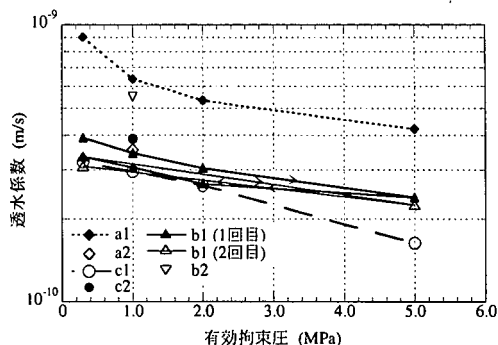
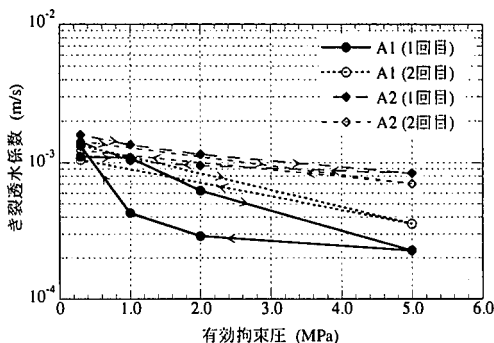
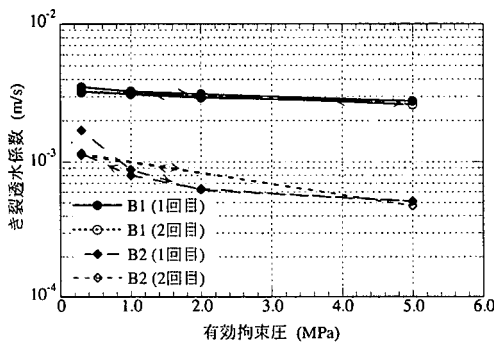


図-2 透水係数と有効拘束圧の関係



(a) A 方向



(b) B 方向

図-3 き裂透水係数と有効拘束圧の関係

4. 考察

4.1 き裂の透水係数の応力依存性（硬岩中のき裂との比較）

筆者ら²⁾は国内外で実施されたき裂の透水試験データに基づいて、硬岩内のき裂の透水係数と垂直応力依存性および応力履歴の影響に関する特徴として、以下の3点を指摘している。

- ① 硬岩内のき裂の透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-1} \text{ m/s}$ と非常に大きなばらつきがある。
- ② 硬岩内の充填物を含まないき裂の透水係数の垂直応力依存性は大きく、垂直応力が 0MPa から 20MPa まで増加すると、き裂の透水係数は最大 2 桁程度低下している。

③ 硬岩内のき裂について、載荷時と除荷時を比較すると、除荷時におけるき裂の透水係数の変化は載荷時におけるそれよりもはるかに小さく、1/10以下である場合が多い。

前に述べたように、今回の試験では、有効拘束圧 5.0MPa のときのき裂の透水係数は、0.3MPa のときの約 4/5 から 1/5 であり、また、除荷時のき裂の透水係数は、最も差が現れたときでも載荷時の約 1/2.5 程度である。したがって、試験を行った有効拘束圧の範囲の違いを考慮しても、今回得られた軟岩内き裂の透水係数の垂直応力依存性の方が、既往の実験における硬岩内のき裂のそれよりも明らかに小さくなっている。今回の試験によって得られた結果が軟岩内き裂に共通する特徴を反映していると考えるならば、空洞掘削等により応力が変化する環境では、掘削によって新たなき裂が発生しない限り、硬岩と比較して軟岩の方が空洞周辺の透水性の変化が小さいということになる。

また、得られたデータをもとに、き裂透水係数と垂直応力の関係を算定・モデル化した。多田ら³⁾は、き裂透水係数 k_f (m/s) と垂直応力 σ_n (MPa) の関係を次の双曲線関数による近似式で表現している。

$$\log_{10} k_f = \frac{\sigma_n}{\alpha + \beta \sigma_n} + \log_{10} \gamma \quad (4.1)$$

上記の式を用いて、応力依存性が最も強かった供試体 B2 の試験結果について、係数 α 、 β 、 γ を求めた。

$$\log_{10} k_f = \frac{\sigma_n}{-0.85 - 1.15 \sigma_n} + \log_{10} 3.0 \times 10^{-3} \quad (4.2)$$

図-5の実線が式(4.2)であり、実験値と良好な一致を示している。式(4.1)は軟岩への適用性も良いといえる。今後、軟岩内き裂の透水試験データをさらに追加することによって、今回の試験結果がどの程度軟岩内き裂に共通する特徴を反映しているかについて明らかにしていくことが重要であると考えられる。

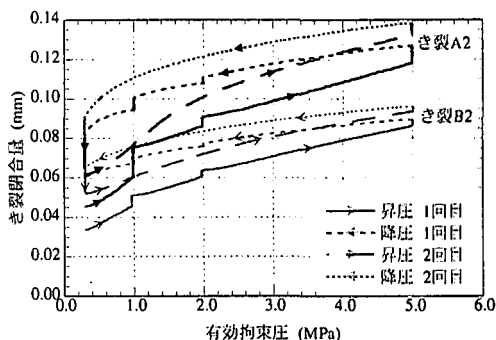


図-4 き裂閉合量と有効拘束圧の関係

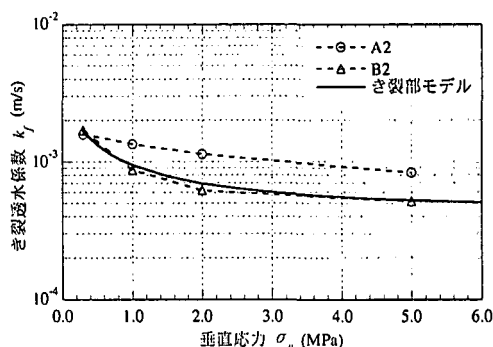


図-5 き裂透水係数と垂直応力の関係

4.2 水理学的開口幅と幾何学的開口幅

水理学的開口幅と幾何学的開口幅の比は一定であるとして、1回目の載荷時における0.3MPaと5.0MPaにおける水理学的開口幅および0.3MPaから5.0MPaへの載荷に伴うき裂の開口幅の変化量(図-4)から、き裂の幾何学的開口幅を求めた。その結果、供試体A2とB2の幾何学的開口幅はそれぞれ0.20~0.30mm、0.06~0.12mmであった。両者の透水係数はほぼ同じであるにもかかわらず、前者の幾何学的開口幅は後者のその2.5~3倍になっている。

き裂の水理学的開口幅に対する幾何学的開口幅の比 α は、供試体A2の1回目の載荷時で約7.2、供試体B2で約3.1となっている。水理学的開口幅の値がほぼ同じであった、釜石鉱山内の花崗閃緑岩のき裂について求められた値は約6.0であり⁴⁾、今回の測定結果とほぼ同じ値を示している。

4.3 岩盤の透水性に対するき裂の影響

き裂を採取した岩盤についてき裂の透水性の影響を考慮するため、き裂群のみによる岩盤の透水係数 k_r を次の平行平板モデルに対する式(4.3)を用いて求めた。

$$k_r = \eta e k_f \quad (4.3)$$

ここに、 η はき裂密度であり、 e は水理学的開口幅、 k_f はき裂透水係数である。第2章で述べたように、き裂を採取した来待砂岩の原位置でのき裂の間隔は平均すると約5mである。4つの供試体のき裂透水係数 k_f は $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ の範囲にあるので、岩盤の透水係数 k_r は、 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$ のオーダーとなる(図-6)。き裂群のみによる岩盤の透水係数は、基質部の約 $10^1 \sim 10^2$ 倍であり、当該岩盤においてはき裂の存在が支配的であるといえる。

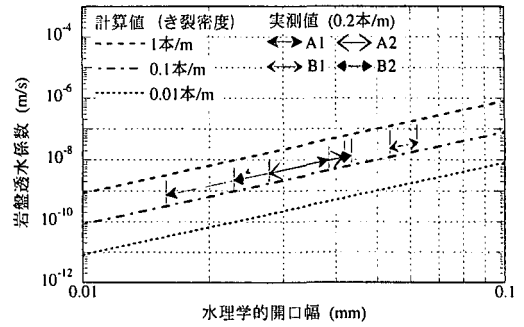


図-6 水理学的開口幅およびき裂密度と岩盤透水係数の関係

5. まとめ

軟岩内天然き裂および基質部の透水性の異方性、応力依存性および応力履歴の影響を室内透水試験によって求め、既往の硬岩内き裂についての試験結果と比較・検討を行った。また、き裂試料を採取した岩盤を対象として、その透水性に対するき裂の透水性の影響を考慮することの重要性についても検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) き裂を含む供試体の透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ のオーダーの値を示しており、き裂を含まない供試体のそれよりも3~4桁大きい。また、き裂の透水係数は、 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ のオーダーの値を示している。
- (2) き裂の透水係数の異方性は認められない。これはき裂の表面形状に異方性が認められないことと対応している。
- (3) 拘束圧が5.0MPaのときのき裂の透水係数は0.3MPaのときの約4/5から1/5である。最も応力依存性が大きい供試体と比較すると、き裂部の方が基質部よりも応力依存性が顕著である。しかし、硬岩を用いた既往の実験結果と比較すると、応力依存性は小さい。
- (4) 除荷時のき裂の透水係数は、最も差が現れたときでも載荷時の約1/2.5程度であり、硬岩を用いた既往の実験と比較すると応力履歴の影響は小さい。
- (5) 水理学的開口幅に対する幾何学的開口幅の比は7.2および3.1であり、同程度の水理学的開口幅の値をもつ硬岩内のき裂についての既往の測定値とほぼ同じである。
- (6) 試料を採取した岩盤について求めた、き裂群のみによる岩盤の透水係数は、基質部の $10^1 \sim 10^2$ 倍であり、当該岩盤においては、き裂の透水性が支配的であると考えられる。

6. 参考文献

- 1) Raven, K.G. and Gale, J. E. : Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, No. 4, pp. 251-261, 1985.
- 2) Kinoshita, N., Ishii, T., Kuroda, H., and Tada, H. : Prediction of permeability changes in an excavation response zone, Nuclear Engineering and Design, No. 138, pp. 217-224, 1992.
- 3) 多田浩幸, 木下直人, 若林成樹 : 岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の特性変化の予測手法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 139-144, 1994.
- 4) 安部透, 松井裕哉, 堀田政國, 木下直人 : 坑道掘削に伴うき裂の透水特性変化に関する基礎実験, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 268-272, 2000.