

坑道掘削に伴うき裂の透水特性変化に関する基礎実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON PERMEABILITY CHANGE IN A FRACTURE DUE TO EXCAVATION OF DRIFT

安部 透*, 松井裕哉**, 堀田政國*, 木下直人***

Tohru Abe, Hiroya MATSUI, Masakuni HORITA and Naoto KINOSHITA

Permeability Tests on a fracture of Kurihashi Granodiorite are conducted in the different normal stress conditions, and in the different saturation conditions. The purpose is to estimate the degree of permeability change in fractured rock due to the stress redistribution, un-saturation and plugging of a fracture induced by a groundwater flow to a drift.

It is confirmed that permeability change in a fracture due to elapsed time and saturation condition change is one of possibilities to cause permeability change in rock around a drift after excavation as well as the normal stress change on a fracture surface.

1. はじめに

不連続性岩盤内に坑道を掘削した際の坑道周辺岩盤の透水性の変化は、き裂透水性の変化に支配されると考えられる。坑道掘削に伴うき裂の透水性の変化は、主としてき裂に作用する応力の変化によって引き起こされると考えられるが、それ以外に坑道周辺岩盤中の地下水の動水勾配が変化することによりき裂内の充填物が移動して目詰まりを起こすことや、坑道周辺岩盤が部分的に不飽和状態になることによって、き裂透水性が変化することも考えられる。本研究では、釜石鉱山内の栗橋花崗閃緑岩体中に特徴的にみられるき裂を対象として、き裂法線方向に作用する応力の変化、き裂の飽和度および時間経過がき裂の透水性に与える影響について室内試験により検討した。

2. き裂の透水試験の概要

試験対象としたき裂は、釜石鉱山内の栗橋花崗閃緑岩体中に見られる、充填物を介在しき裂沿いに赤色変質を伴うき裂(以下き裂Aと記す)と、充填物のみを介在するき裂(以下き裂Bと記す)の2種類とした。き裂Aの充填鉱物は、「緑泥石+方解石+沸石類+緑れん石+ブドウ石からなる混合鉱物」¹⁾であり、き裂Bのそれは、「方解石+沸石類からなる単一鉱物もしくは混合鉱物」¹⁾である。対象とするき裂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、コア採取機の位置と角度を調整して、直径100mmのコアを採取した。

試験装置の概要を図-1に示す。試験装置は、載荷装置、三軸セル、液圧発生装置、貯留槽、定常法のための送水・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ようになっている。

き裂の透水係数の応力依存性を調べるための試験は、有効拘束圧が0.49, 0.98, 4.90, 14.7, 29.4MPaの各段

* 正会員 清水建設(株) 技術研究所

** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

*** 正会員 (株)地層科学研究所

階で実施した。その後0.49MPaまでゆっくりと降圧させた時の透水係数の測定も行った。また、き裂の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、試験時に、ひずみゲージ式リング型変位計を用いて、き裂に垂直な方向の変位（き裂の閉合量）の測定を行った。設置位置は、供試体の上下2カ所とし、両端から約2.5cmとした。

時間経過に伴うき裂透水性変化を調べるための透水試験は、き裂Aとき裂Bのそれぞれの供試体について、供試体の上下に与える差圧を0.98kPa, 9.81kPa, 98.1kPaと順次変化させて実施した。各動水勾配条件毎に、定水位法を用いて、流量の経時変化を測定することにより、き裂の透水係数の経時変化を測定した。

飽和・不飽和条件下のき裂の透水試験は、供試体を三軸セル内に設置し、一定の拘束圧を作用させた状態で飽和度を変化させて行った。具体的にはコンプレッサーを用いて圧縮空気を三軸セル内に設置した供試体内に送りこむことにより供試体を不飽和状態にした後、一定圧でき裂内に水を注入し、ある時間間隔で流量を測定することにより透水係数を求めた。なお、試験終了後、実際の試験と同じ手順で不飽和状態にした後供試体を三軸セルから取り出し、重量変化を測定することにより試験開始時の不飽和度を測定した。

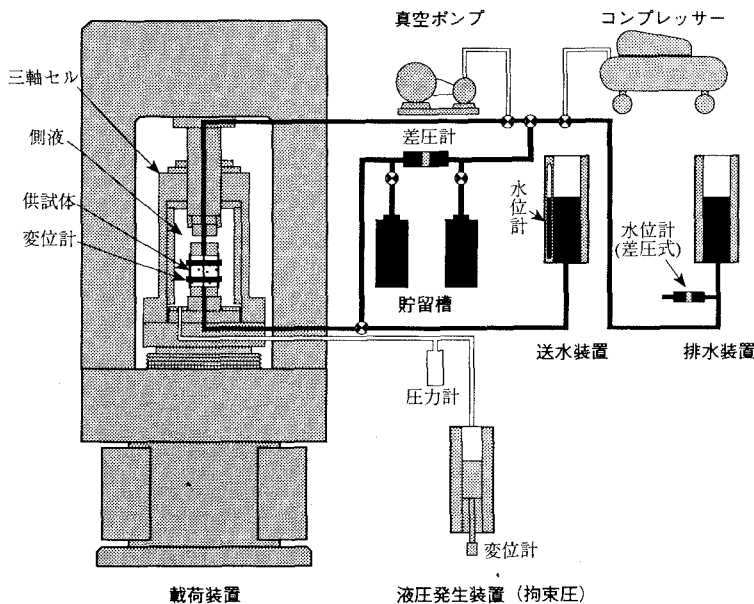


図-1 透水試験装置

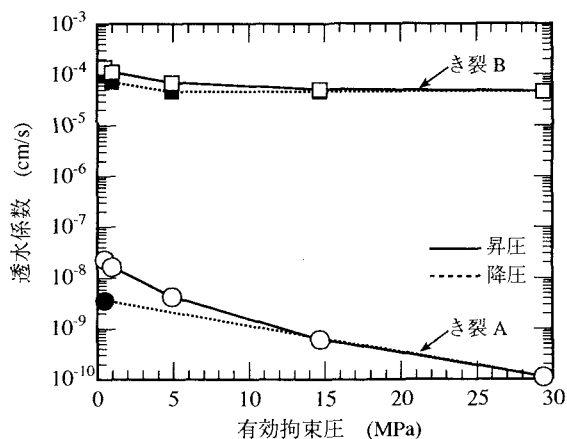


図-2 透水係数と有効拘束圧の関係

3. 試験結果および考察

3・1 透水係数の垂直応力依存性

有効拘束圧を、0.49MPaから29.4MPaの範囲で昇圧および降圧させた際のき裂A、き裂Bの透水係数の変化を求めた結果を図-2に示す。

拘束圧が0.49MPaから29.4MPaに増加するのに伴って、き裂Aの透水係数は約1/200に低下している。特に拘束圧が低い場合の透水係数の低下が著しい。逆に降圧時における透水係数の増加は約33倍であり、昇圧時における透水係数の低下量の約1/6である。

拘束圧0.49MPaにおけるき裂Bの透水係数は、き裂Aのそれよりも約4桁大きい。拘束圧が29.4MPaのときの透水係数は、拘束圧が0.49MPaのときの約1/3である。き裂Aと比較すると、昇圧時においても、降圧時においても、透水係数の応力依存性はずっと小さい。

き裂Aの試験結果は、き裂の透水性の応力依存性に関する既存の試験データ (Kinoshitaら²⁾) と基本的には同じ特徴を有している。このようなき裂が岩盤内に存在する場合には、坑道の掘削に伴って周辺岩盤の透水性は大きく変化することが予想される。一方、き裂Bの試験結果は、透水係数の垂直応力依存性が非常に

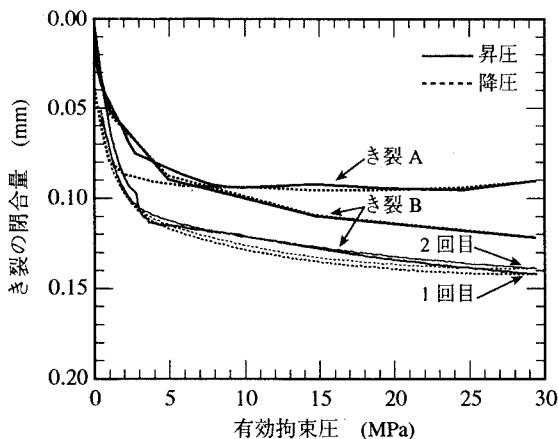
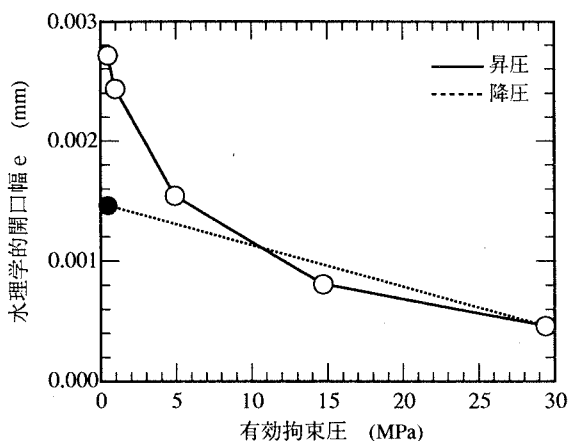
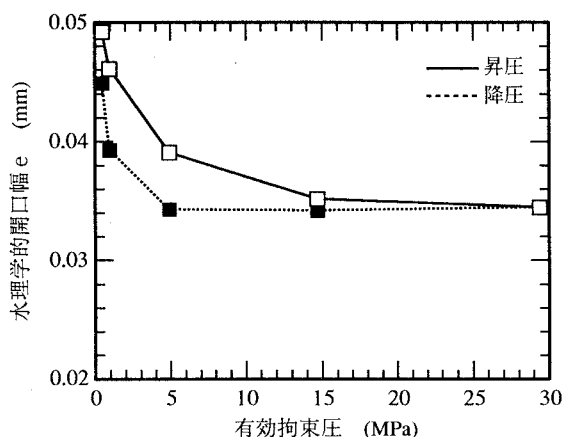


図-3 き裂の閉合量と有効拘束圧の関係



a) き裂A



b) き裂B

図-4 水理的開口幅と有効拘束圧の関係

小さいこと、および降圧時の透水係数の変化が昇圧時のそれに比較的近いことなど、既存のデータと異なる特徴を示している。

3・2 水理的開口幅と幾何学的開口幅

昇圧および降圧に伴うき裂の閉合量の測定結果(2個の変位計による測定結果の平均値)を図-3に示す。き裂Bの場合は、試料採取時の乱れの影響を除去するため、透水試験前に二度29.4MPaまでの拘束圧を繰り返し作用させており、その結果も同時に示している。二度昇圧と降圧を繰り返した影響はほとんどみられず、残留変位は全く生じていない。

拘束圧が低い時のき裂の閉合は顕著であるが、拘束圧が大きくなると、き裂はあまり閉合しなくなる。相対的には、き裂Aと比較して拘束圧の増加に伴うき裂Bの閉合量が大きくなっている。

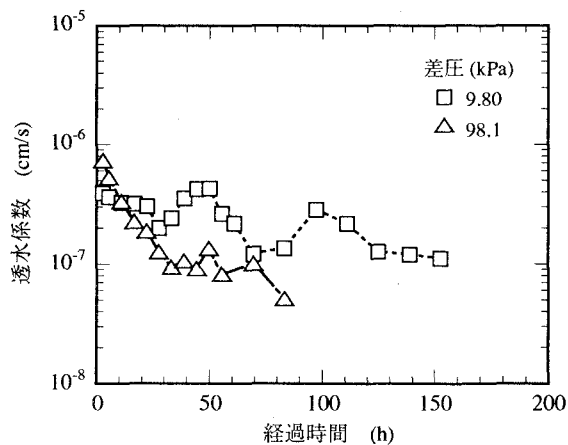
き裂Aの場合、降圧時において拘束圧が8MPa以下になると残留変位がみられるようになっている。このことから、き裂Aについては応力履歴を与えることによってき裂が閉合し、それに対応して降圧時の透水係数が昇圧時のそれよりも低下したと考えられる。一方、き裂Bの場合は、昇圧、降圧に伴う残留変位はほとんど生じていない。

透水試験結果から、平行平板モデルを仮定して水理的開口幅 e を求めた結果を図-4に示す。拘束圧を0.49MPaから29.4MPaまでの範囲で変化させた時の、水理的開口幅の変化量に対する幾何学的開口幅の変化量(き裂の閉合量)の比 α は、き裂Aでは、昇圧時約24、降圧時約29になっているのに対して、き裂Bでは、昇圧時約6.0、降圧時約8.2になっており、両者は大きく異なる。

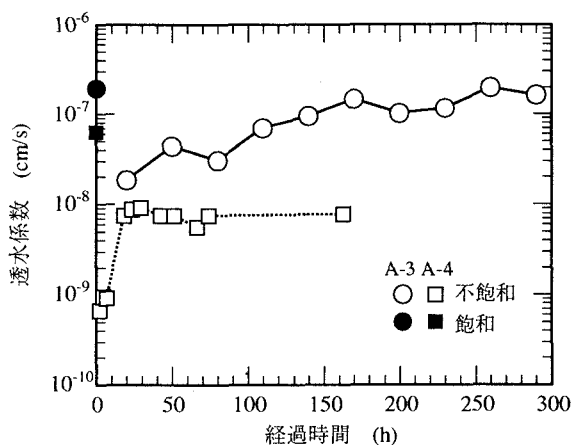
一般に、き裂の開口幅が大きくなるにしたがって、き裂の力学特性や水理特性に対するき裂表面の粗さの影響は小さくなるため、 α が小さくなると考えられる。今回の実験結果も、き裂の開口幅が大きいき裂Bでは、き裂の透水性に対するき裂表面の粗さの影響は相対的に小さくなり、 α が小さくなったと考えられる。

3・3 透水係数の経時変化

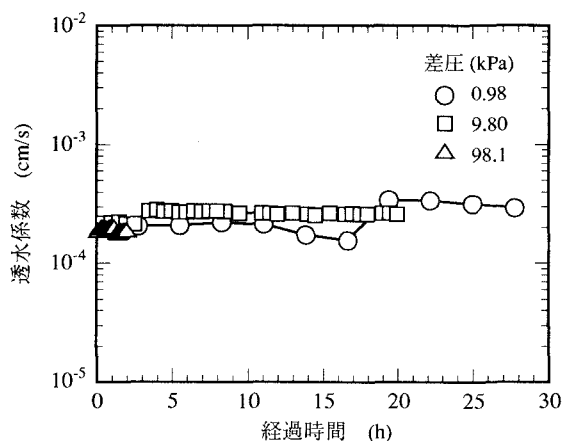
一定動水勾配下での送水量および排水量の経時変化に基づいて、透水係数の経時変化を求めた結果を図-5に示す。き裂Aの透水係数は小さく、差圧を0.98kPaとした場合、流量が小さすぎたため透水係数の経時変化を求めることができなかった。測定結果では差圧が9.8kPaの場合には、150時間後でも透水係数は試験開



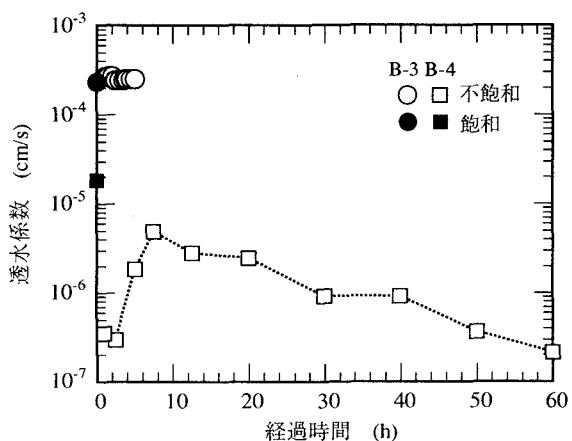
a) き裂 A



a) き裂 A



b) き裂 B



b) き裂 B

図-5 透水係数の経時変化

図-6 不飽和透水係数の経時変化

始時の約 1/3 程度に低下しているだけであるのに対して、差圧が 98.1 kPa と大きい場合には、時間の経過に伴う透水係数の低下が顕著であり、150 時間後には、約 1/30 に透水係数が低下している。

き裂 B では、き裂 A とは異なり、差圧が小さい場合も大きい場合も、時間の経過にともなって透水係数が低下する傾向はみられない。

時間の経過に伴って透水係数が低下する原因が、き裂内の充填物が移動し目詰まりが生じるためであると仮定した場合、き裂 A のように開口幅が小さいと、き裂内の充填物の移動により目詰まりを生じると考えられる。それに対して、き裂 B のように開口幅が大きい場合は、充填物が移動しても、それが水とともに流出してしまうため、目詰まりを生じにくいと想定できる。また、差圧の大きさによって透水係数の変化も異なることから、時間の経過に伴って、目詰まりによって透水係数が低下する現象は、き裂の開口幅と動水勾配がある範囲内の値を示す場合に顕著にみられると考えられる。

以上のように、動水勾配の変化した条件下において、時間経過に伴ってき裂の透水性が変化する現象も、坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化を引き起こす要因として重要であることが確認された。そして、時間の経過に伴って透水係数が低下するのは、き裂内の充填物が移動し、目詰まりが生じるためであると仮定すれば、今回の実験結果を説明できることが明らかになった。ただし、今回の実験では、実際にき裂内の充填物が移動し、目詰まりが生じているか否かについては、直接確認を行っていない。今後何らかの方法で確認を行うことが重要であると考えられる。

3・4 飽和度の変化に伴うき裂の透水性の変化

き裂A, き裂Bについての, 飽和・不飽和透水試験結果を図-6に示す。なお, 不飽和透水試験開始時におけるA-3, A-4 供試体(き裂A)の飽和度はそれぞれ49.7%, 62.1%, B-3, B-4(き裂B) 供試体のそれは52.4%, 69.8%であった。

A-4 供試体の不飽和状態における透水係数は, 飽和状態におけるそれより2桁小さい値を示している。き裂に通水を続けると, 飽和度が回復するのに伴って, 透水係数は増加するが, 数日間といった短期間では, 飽和透水係数を大きく下回る状態が続いている。また, A-3 供試体とB-4 供試体も, 不飽和状態における透水係数は, 飽和状態におけるそれを下回っている。ただし, A-4 供試体と比較すると, 透水係数の低下の度合いは小さい。

一方, B-3 供試体では, A-3 供試体やB-4 供試体とは異なり, 不飽和状態における透水係数の測定値は, 時間の経過に伴う変化がほとんどなく, 全体として, 飽和状態における透水係数とほぼ同じ値を示している。

飽和透水試験の結果によれば, 各供試体のき裂の開口幅は, $A-4 < A-3 < B-4 < B-3$ の関係になることから, 図-6の試験結果は, き裂の開口幅が小さい場合は不飽和の影響が顕著に現れるが, き裂の開口幅が大きくなると不飽和の影響は無視できるようになるということを示していると考えられる。不飽和透水試験時には, き裂の表面に気泡が必ず存在している。そして, A-4 供試体のように, き裂の開口幅が小さい場合には, 気泡の存在等の影響を受けて透水係数は大幅に低下し, その後の通水に伴う透水性の回復もゆっくりしている。き裂の開口幅が相対的に大きくなると, A-3 供試体やB-4 供試体のように, 透水係数の低下はみられるものの, 低下量は減少する。そして, B-3 供試体のように, さらにき裂の開口幅が大きくなり, 流量が増加すると, そのような不飽和状態の試験結果への影響は無視できるほど小さくなると考えられる。なお, B-4 供試体において, 通水開始約7時間後以降にみられる時間経過に伴う透水係数の低下は, 図-5に示したそれと同じものであると考えられる。したがって, B-4 供試体の場合は, その影響がなければ, 比較的短時間で透水係数が飽和状態におけるそれまで回復した可能性が高いと考えられる。

4. まとめ

不連続性岩盤内に坑道を掘削した際の透水性の変化について検討するため, 栗橋花崗閃緑岩中に特徴的にみられるき裂を対象として, き裂法線方向に作用する応力の変化, き裂の飽和度の変化および時間経過がき裂の透水性に与える影響を把握するための試験を実施した。また, き裂の幾何学的開口幅と水理学的開口幅の関係について検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(1)き裂の開口幅と動水勾配がある範囲内の値を示す場合には, 時間の経過に伴って透水性が低下する現象が顕著にみられた。また, き裂の開口幅が小さい場合には, き裂内を不飽和状態にすることによって透水性は大幅に低下するという結果が得られた。したがって, き裂に作用する応力の変化に伴う透水性の変化と同様に, 時間経過に伴うき裂の透水性の変化やき裂の飽和度の変化に伴う透水性の変化もまた, 坑道掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化を引き起こす要因となり得ることが確認された。

(2)幾何学的開口幅と水理学的開口幅は大きく異なっている。また, き裂表面の粗さが同じであれば, き裂の開口幅が大きくなるにしたがって, 水理学的開口幅に対する幾何学的開口幅の比は小さくなる。

5. 参考文献

- 1) 天野健治, 吉田英一, 笹本 広: 釜石鉱山における栗橋花崗岩体中の割れ目形態と空隙構造, 応用地質学会中部支部平成7年度研究発表会講演要旨集, pp.9-12, 1995.
- 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) Barton, N. R. : Modelling rock joint behaviour from in situ block tests - implications for nuclear waste repository design, Office of Nuclear Waste Isolation, Columbus, OH, ONWI-308, 1982.