

PNC TJ7060 98-002

公開資料

飽和・不飽和条件下におけるき裂の透水試験

(動力炉・核燃料開発事業団委託業務成果報告書)

平成10年3月

清水建設株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Evaluation and Patent Office

Technological Management Division

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

©動力炉・核燃料開発事業団(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

公開資料

PNC TJ7060 98-002

平成10年3月

飽和・不飽和条件下におけるき裂の透水試験

木下直人* 堀田政國**

要旨

不連続性岩盤の透水特性は、主としてき裂の透水特性に支配されていると考えられる。このような不連続性岩盤内に坑道を掘削した際の透水特性の変化もまた、き裂の透水特性の変化に支配されていると考えられる。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、坑道周辺の岩盤が部分的に不飽和状態になることによって、見かけ上き裂の透水性が変化することも考えられる。そこで、栗橋花崗閃緑岩中に特徴的にみられる2種類のき裂を対象として、き裂の飽和状態の違いがき裂の透水性に与える影響を定量的に検討するための試験を実施した。

その結果、き裂の飽和度の変化に伴う透水性の変化もまた、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、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。

本報告書は、清水建設株式会社が、動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：090C0339

事業団担当部課室および担当者名：東濃地科学センター 地質環境研究室

佐藤 稔紀

* 清水建設株式会社 技術研究所

** 清水建設株式会社 電力・エネルギー本部

PNC TJ7060 98-002

March, 1998

Permeability Tests on a Joint in Saturated or Unsaturated Condition

Naoto KINOSHITA* and Masakuni HORITA**

Abstract

The permeability change of a joint in rock is mainly caused by the change in stress acting on the joint. In addition, the permeability change is also caused by the change of saturation condition in a joint.

In this research, some permeability tests are conducted on two types of typical joints in Kurihashi Diorite in order to evaluate the effect of saturation in the joints quantitatively.

This work performed by Shimizu Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Tono Geoscience Center, Geological Environment Research Section:

Toshinori SATO

* : Shimizu Corporation, Technical Research Institute

** : Shimizu Corporation, Power & Energy Project division

飽和・不飽和条件下におけるき裂の透水試験

目 次

	ページ
1. 概要	1
2. き裂の透水試験の概要	1
3. 試験結果	1 4
3.1 き裂A	1 4
3.2 き裂B	1 4
4. 考察	2 0
5. まとめ	2 1

図 目 次

	ページ
図 1 き裂の透水試験装置 (定常法)	7
図 2 き裂の透水試験装置 (トランジェントパルス法)	8
図 3 トランジェントパルス法の概念図	1 3
図 4 飽和・不飽和透水試験結果 (A - 3 供試体)	1 6
図 5 飽和・不飽和透水試験結果 (A - 4 供試体)	1 6
図 6 飽和・不飽和透水試験結果 (B - 3 供試体)	1 8
図 7 飽和・不飽和透水試験結果 (B - 4 供試体)	1 8

表 目 次

表 1 き裂Aの飽和・不飽和透水試験結果一覧表	1 7
表 2 き裂Bの飽和・不飽和透水試験結果一覧表	1 9

写 真 目 次

写真 1 き裂A - 3 供試体	3
写真 2 き裂A - 4 供試体	4
写真 3 き裂B - 3 供試体	5
写真 4 き裂B - 4 供試体	6

1. 概要

不連続性岩盤の透水特性は、主としてき裂の透水特性に支配されていると考えられる。このような不連続性岩盤内に坑道を掘削した際の透水特性の変化もまた、き裂の透水特性の変化に支配されていると考えられる。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、坑道周辺の岩盤が部分的に不飽和状態になることによって、見かけ上き裂の透水性が変化することも考えられる。そこで、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、き裂の飽和状態の違いがき裂の透水性に与える影響を定量的に検討するための試験を実施した。

その結果、き裂の飽和度の変化に伴う透水性の変化もまた、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、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. き裂の透水試験の概要

これまでに釜石鉱山 250m レベル坑道にて採取されているボーリングコアから、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種類についてサンプリングを行った。

(1) き裂A

タイプBと呼ばれているき裂であり、割れ目面に沿ってほぼ左右対称に幅数 cm～十数 cm 程度の赤色～褐色の変質部を有している。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、割れ目表面をコーティングする形態を示している。

(2) き裂B

タイプAと呼ばれている、充填鉱物のみを伴う単一割れ目である。充填鉱物は、「方解石±沸石類からなる単一鉱物もしくは混合鉱物」¹⁾であり、き裂Aと同様に、割れ目表面をコーティングする形態を示している。

き裂A、Bのそれぞれについて、き裂ができるだけ軸に平行でかつ供試体の中心部にくるように成形を行った。き裂Bはき裂面で完全に分離しているのに対して、き裂Aは成形時もき裂面から分離することなく、一体のままになっている。供試体の寸法は直径 100mm、長さ 150mm とする予定であったが、サンプリングしたコアの端部のダメージが大きい等の理由により、成形して 150mm の長さの供試体を作成することが困難であったため、供試体長を約 100mm とした。

き裂の透水試験は、2種類のき裂について、それぞれ2供試体ずつ、飽和状態および不飽和状態の二つの状態で行った。き裂A供試体およびき裂B供試体を写真-1～写真4に示す。

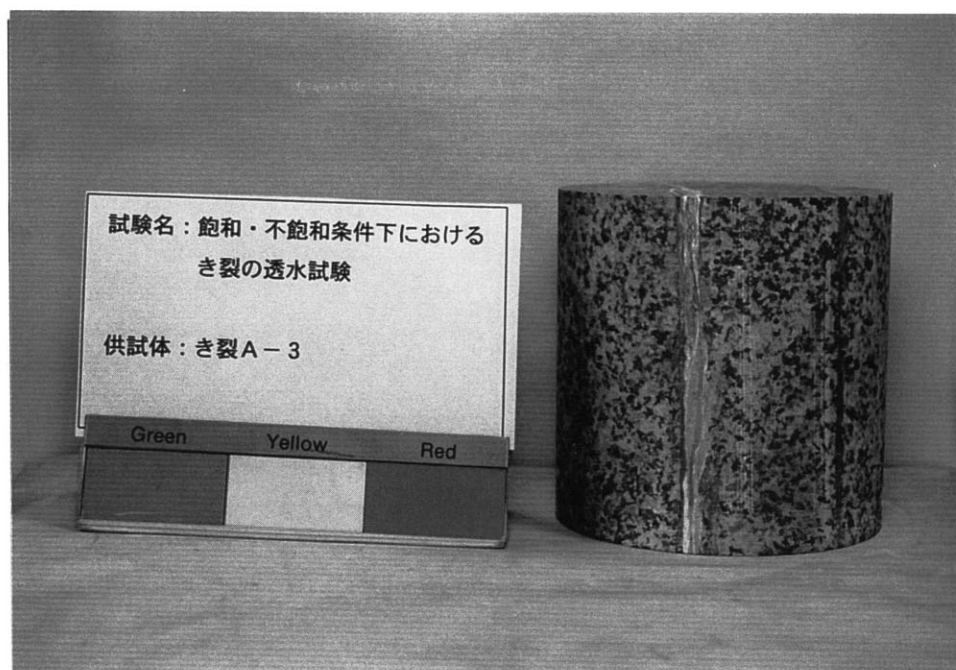
室内試験結果に基づいて、原位置岩盤のき裂の力学特性や水理特性を推定しようとする場合、試料採取時の攪乱の影響（主として開口幅の変化）が問題になる。き裂の特性に対する試料の採取、成形の影響がどの程度あるかについてほとんどわかっていない現状では、攪乱の影響を考慮する定まった方法は存在しない。Bartonら²⁾は、き裂に垂直応力を繰り返し作用させ、1回目のサイクルで大きな残留変形がみられる場合、それは試料採取時の乱れによるものであり、実際の原位置でのき裂は、3回目か4回目のサイクルと同じ圧縮変形特性を示すと考えるべきであるとしている。今回の試験では、き裂Bは、試料採取時にき裂面から完全に分離してしまったことから明らかなように、試料採取時の攪乱の影響を受け、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。そこで、き裂Bに関しては、試料採取時の攪乱の影響をできるだけ少なくするため、Bartonの指摘にしたがって、原位置においてき裂に作用していたと考えられる垂直応力を2回繰り返し作用させた後、所定の試験を実施した。一方、き裂Aは、き裂面から分離することなく、一体のまま試料を採取できたので、試料採取時の攪乱の影響はないと考え、そのまま所定の試験を実施した。

き裂の透水係数は、応力履歴の影響を受けることが知られている。したがって、き裂の透水性に対する飽和状態の影響を調べようとする場合、試験の途中で供試体を三軸セルから取り出して応力状態を変化させることは好ましくない。そこで、後述するように、供試体を三軸セル内に設置し、一定の応力状態を保ったままで、飽和度を変化させて試験を行った。

試験は、MTS社製の透水試験装置を用いて行った。この試験装置を用いて、定常法（図1）およびトランジェントパルス法（図2）により透水係数を求めることができる。この試験装置は、載荷装置、三軸室、液圧発生装置（3台）、貯留槽および定常法のための送水・排水装置などから構成されており、載荷装置および各液圧発生装置は独立にコンピュータ制御を行うことができる。3台の液圧発生装置のうち1台は拘束圧を、残りの2台はそれぞれ供試体両端の間隙水圧を制御する。なお貯留槽の体積 V_1 および V_2 は $2,000\text{cm}^3$ である。

試験に使用した圧力計および変位計の仕様は、以下のとおりである。

- ・圧力計（拘束圧用）：SENSOTEC 製 A-5/1108，容量 300kgf/cm^2
- ・間隙水圧計：共和電業株製 PA-10KB，容量 10kgf/cm^2
- ・差圧計：共和電業株製 PA-10KB，容量 10kgf/cm^2

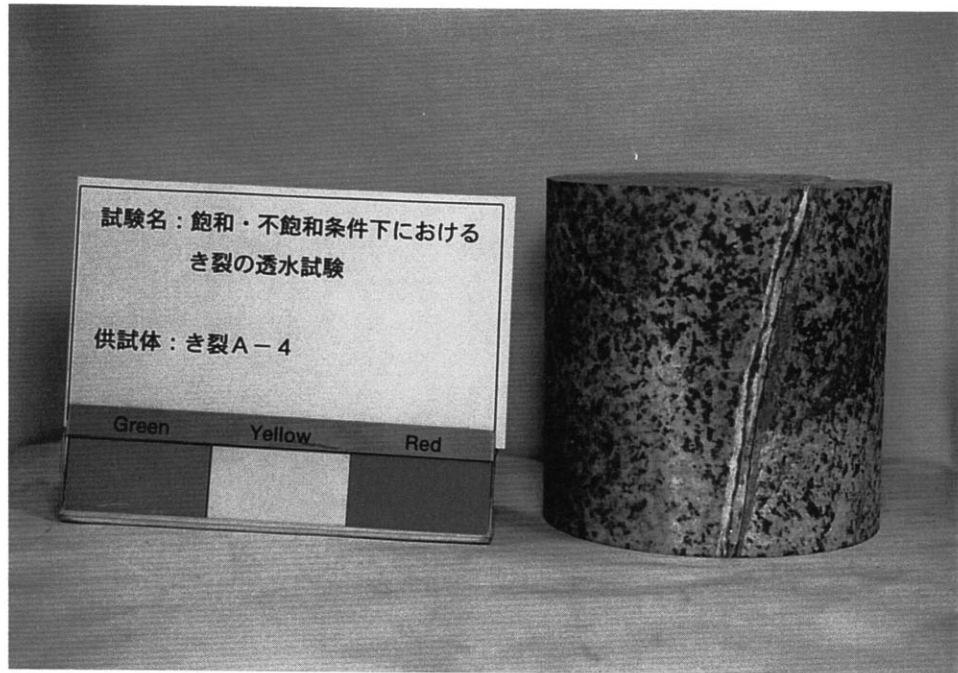


a) 側 面

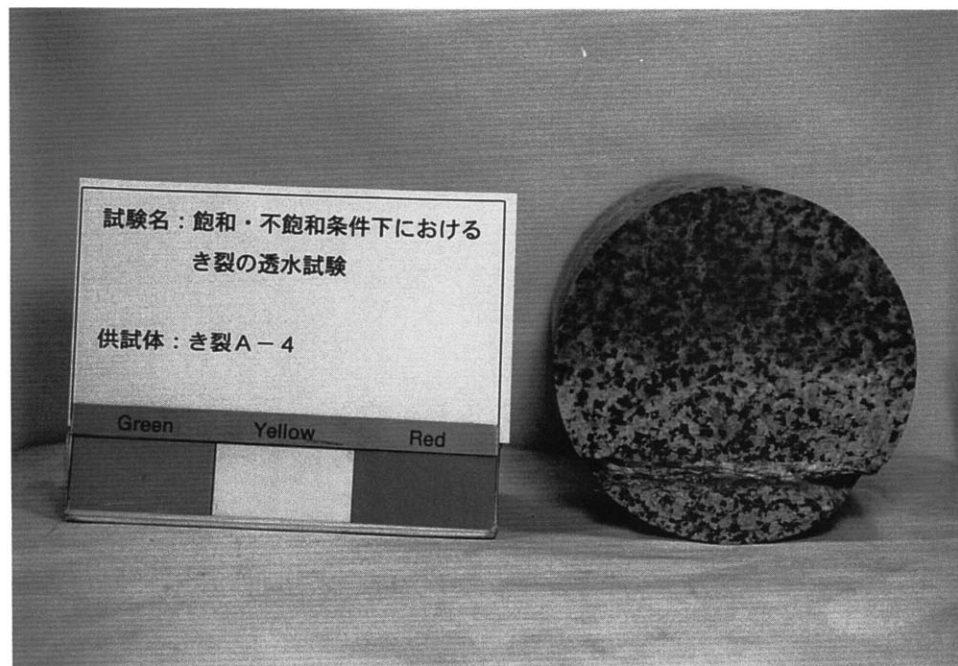


b) 端 面

写真一 1 A-3 供試体

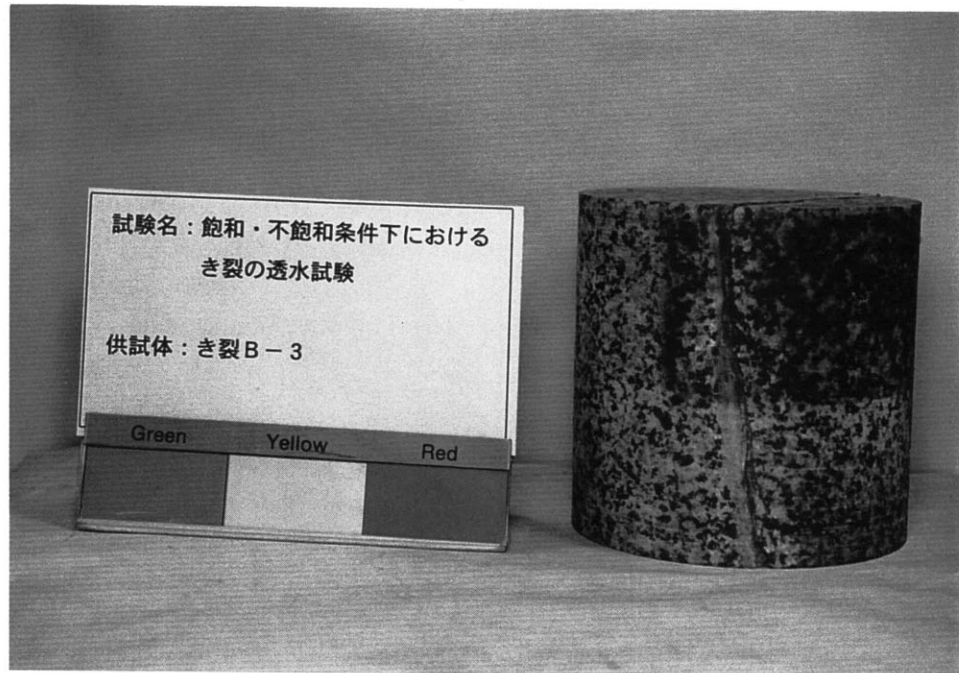


a) 側 面



b) 端 面

写真-2 A-4 供試体

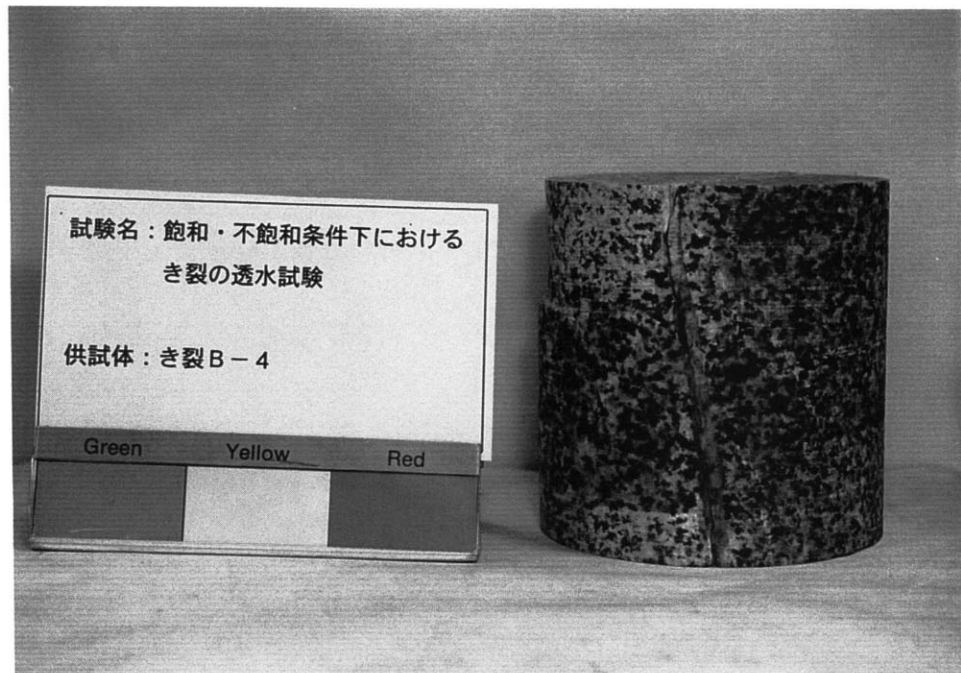


a) 側面

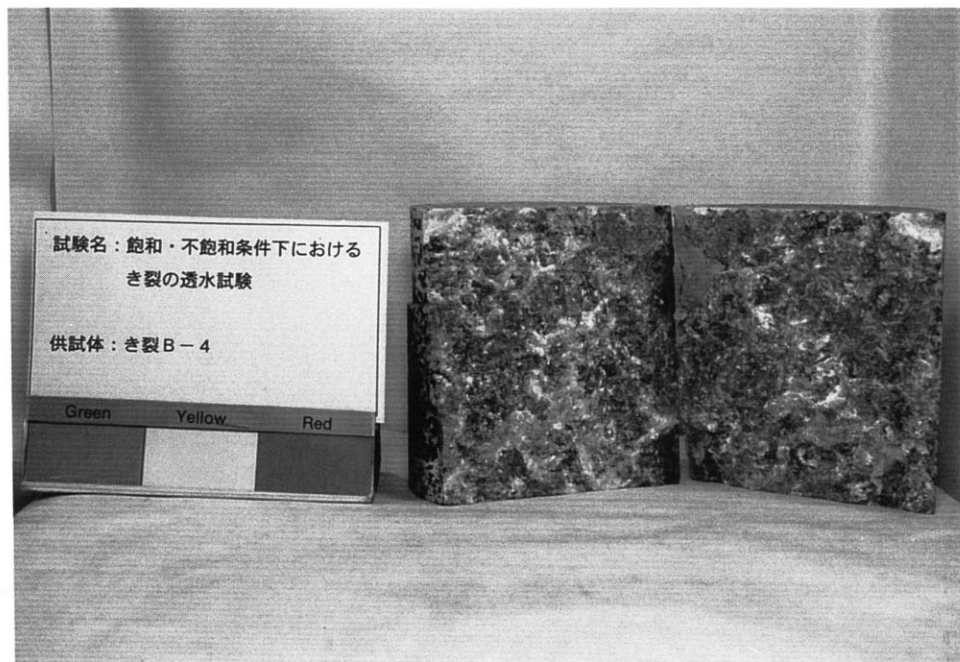


b) き裂表面

写真-3 B-3 供試体



a) 側面



b) き裂表面

写真－4 B－4 供試体

き裂の側面付近に見える黄色い部分は、メンブレンの破損を防ぐために用いたコーキング剤(シリコンシーラント)である。

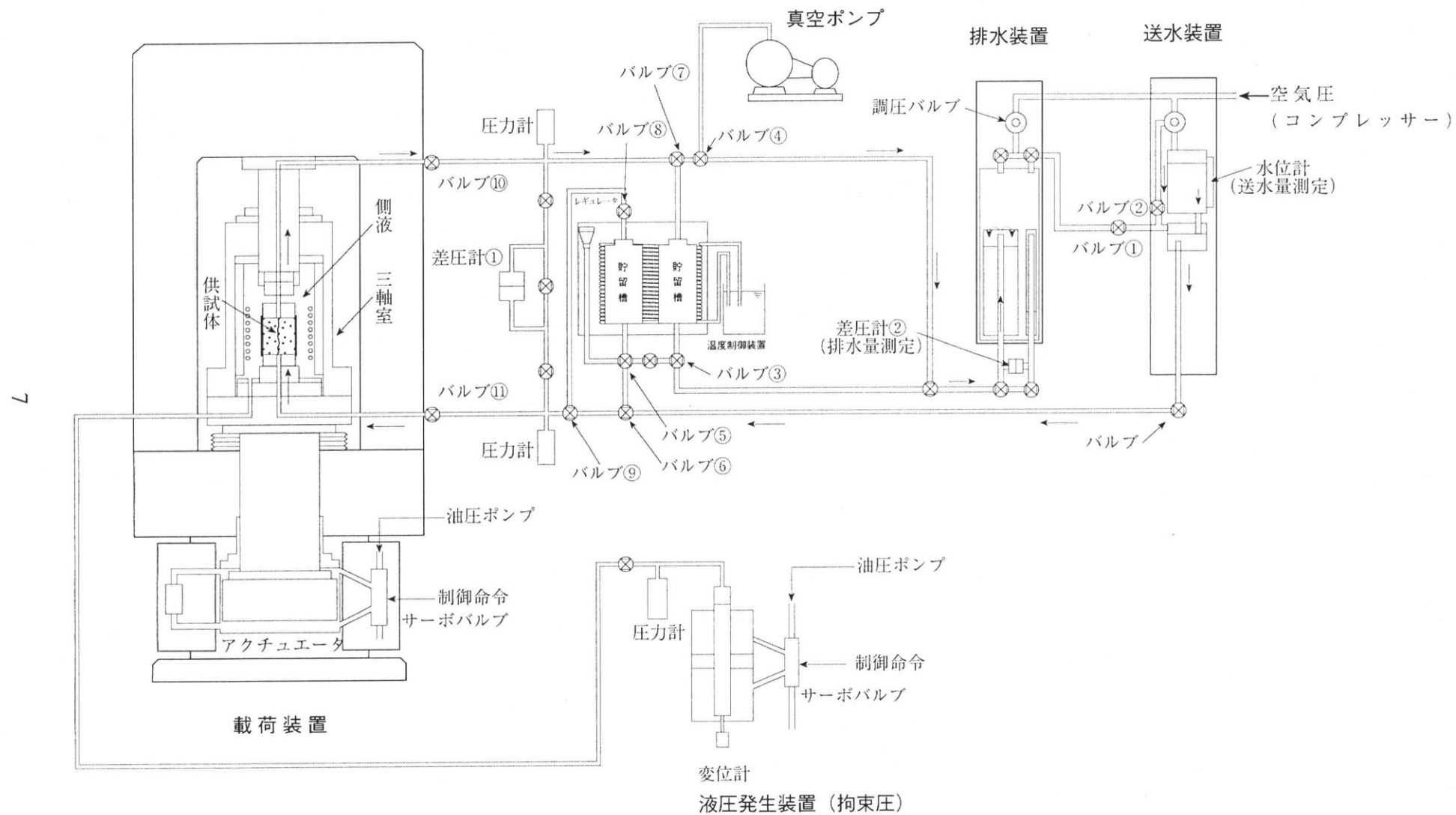


図-1 き裂の透水試験装置 (定常法)

図-2 き裂の透水試験装置（トランジェントパルス法および試験手順Ⅱ）

トランジェントパルス法は、変水位法の一つであり、透水性の低い岩石でも比較的短時間で測定が可能である。そのため目詰まり現象を生じる可能性が少ないなどの長所があり、透水性の低い岩石の透水試験に適している。その原理を以下に示す。

図-3に示すように、供試体両端に体積 V_1 、 V_2 が既知である圧力容器を設置し、初期状態で各容器内の圧力 P_1 、 P_2 および供試体の間隙水压 P_p を等しく設定する。時間 $t=0$ において圧力パルス ΔP を V_1 に与えると、時間の経過とともに供試体内の動水勾配が変化し、最終的に P_1 と P_2 がともに圧力 P_f に収束する。この間の圧力と時間の関係から、透水係数を求めるものである。

間隙率が充分小さい岩石に対しては、ダルシー則に従うとして導かれた(1)および(2)式を用いて固有浸透係数を算定することができる。

$$P_1 - P_f = \Delta P \cdot \frac{V_2}{V_1 + V_2} \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \frac{KA}{\mu\beta L} \cdot \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

P_1 、 V_1 : 送水側の貯留槽の圧力(kgf/cm²)、体積(cm³)

P_2 、 V_2 : 排水側の貯留槽の圧力(kgf/cm²)、体積(cm³)

P_f : 圧力の収束値(kgf/cm²) ΔP : 圧力パルス

t : 時間(sec) K : 固有浸透係数(Darcy)

μ : 水の粘性係数(cP) β : 水の圧縮率(cm²/kgf)

A : 供試体の断面積(cm²) L : 供試体の長さ(cm)

(1)式によれば、 $P_1 - P_f$ は時間経過に伴って指数的に減少する。したがって、 $\log(P_1 - P_f)$ と時間 t の関係から傾き α が得られ、(2)式により固有浸透係数を求めることができる。

定常法は、一定の水頭差の下で、一定時間内に供試体を透過する水量を測定することによって透水係数を求める試験で、透水係数は以下の式から求められる。

$$k = \frac{L}{H} \cdot \frac{Q}{A \cdot t} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

k : 透水係数(cm/s) L : 供試体高さ(cm) Q : 時間(t)間の流量(cm³)

H : 水頭差(cm) A : 供試体の断面積(cm²) t : 試験時間(s)

試験は試験手順Ⅰ（はじめに供試体を含水飽和状態にし透水試験を実施した後、圧縮空気を送って供試体を乾燥させ、不飽和状態の透水試験を行う方法）と試験手順Ⅱ（はじめに供試体を乾燥状態にし不飽和状態の透水試験を実施した後、通水しながら供試体を飽和させ透水試験を行う方法）の2種類の方法で行った。以下にそれぞれの試験手順を示す。

試験手順Ⅰ（はじめに供試体を含水飽和状態にし透水試験を実施した後、圧縮空気を送って供試体を乾燥させ、不飽和状態の透水試験を行う方法）

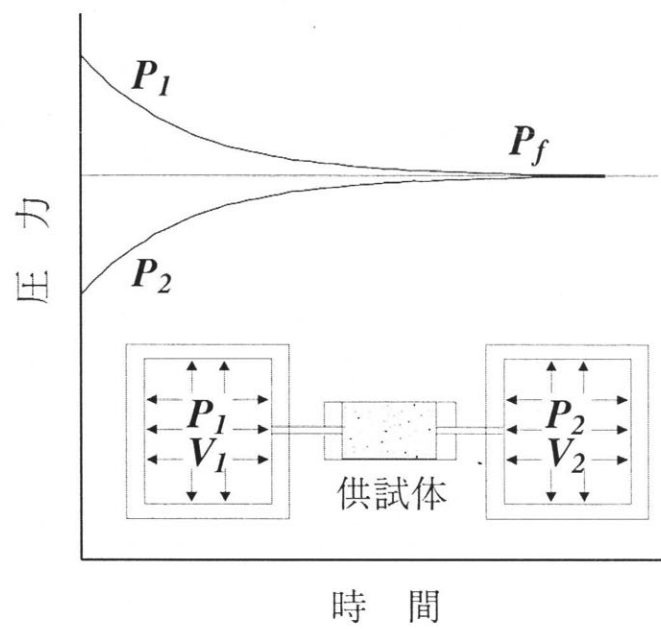
- ①真空ポンプを使用して供試体を強制湿潤させる。はじめに真空脱気を行った後、真空引きを続けながら48時間以上水浸させる。
- ②供試体にメンブレンを装着し、三軸室に設置する。供試体の乾燥防止と空気の混入を防ぐため、メンブレンの装着は水中で行う。
- ③送水および排水ライン内の空気を真空ポンプを用いて約1時間吸引した後、配管ライン内を水で満たす。
- ④き裂面で完全に分離しているき裂Bについて試験を行う場合は、試料採取時の乱れの影響を除去するため、二度 2.0kgf/cm^2 から 300kgf/cm^2 までの拘束圧を繰り返し作用させた後試験を行う。昇圧、降圧の速度は $10\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ 以下とする。
- ⑤拘束圧を 52kgf/cm^2 、間隙水压を 2.0kgf/cm^2 まで昇圧する。間隙水压の昇圧時には、供試体の上下方向に差圧が生じることによりき裂の状態が乱されることがないように、充分時間をかけて行う。
- ⑥供試体の間隙水压が定常状態になったのを確認してから含水飽和状態の透水係数を測定する。試験は、透水係数の小さいき裂Aについてはランジェントパルス法で、透水係数の大きいき裂Bについては定常法で行った。
- ⑦三軸室内で、拘束圧を作用させた状態を保ちながら、コンプレッサーを用いて圧縮空気を供試体内に送り、供試体を不飽和状態にする。この場合も、き裂の状態が乱されることがないように、供試体の上下方向の差圧は 0.5kgf/cm^2 程度とする。また、供試体が充分不飽和となるようにするため、通気の時間は48時間以上とする。なお、A-3 供試体の飽和状態における透水係数は小さな値を示したので、コンプレッサーを用いて圧縮空気を送り供試体を不飽和状態にする際には、供試体の上下方向の差圧を 1.0kgf/cm^2 と大きめにし、また、通気の時間も約117時間と長くした。
- ⑧送水および排水ライン内（供試体および三軸室内の配管部分を除く）の空気を真空ポンプで吸引した後、配管ライン内を水で満たし、供試体の上下方向の差圧を 0.5kgf/cm^2 として送水を行う。

- ⑨不飽和状態における透水係数を測定する。試験は、飽和状態の場合と同様に、き裂Aについてはトランジェントパルス法で、き裂Bについては、定常法で行った。透水係数は時間の経過とともに変化すると予想されるので、定常法の場合は送水側および排水側の流量の経時変化を測定することにより、またトランジェントパルス法の場合は、適当な時間間隔で試験を行うことにより、透水係数の経時変化を求めるものとする。

試験手順Ⅱ（はじめに供試体を乾燥状態にし不飽和状態の透水試験を実施した後、通水しながら供試体を飽和させ透水試験を行う方法）

- ①供試体を室内で2週間以上自然乾燥させる。
- ②供試体にメンブレンを装着し、三軸室に設置する。
- ③送水および排水ライン内および液圧発生装置シリンダー内の空気を真空ポンプを用いて約3時間吸引した後、配管ライン内を水で満たす。
- ④き裂面で完全に分離しているき裂Aについて試験を行う場合は、試料採取時の乱れの影響を除去するため、二度 2.0kgf/cm^2 から 300kgf/cm^2 までの拘束圧を繰り返し作用させた後試験を行う。昇圧、降圧の速度は $10\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ 以下とする。この間の排水条件は非排水とする。
- ⑤拘束圧を 52kgf/cm^2 、液圧発生装置の水圧を 2.0kgf/cm^2 まで昇圧する。
- ⑥三軸室内で、拘束圧を作用させた状態を保ちながら、2台の液圧発生装置を用いて供試体の両端面に差圧を与え、供試体を徐々に飽和状態にする。この場合、き裂の状態が乱されることがないように、供試体の上下方向の差圧は 0.1kgf/cm^2 程度とする。
- ⑦この間、不飽和状態における透水係数を求める。透水係数は時間の経過とともに変化すると予想されるので、液圧発生装置のピストンの変位から送水側および排水側の流量の経時変化を測定することにより、透水係数の経時変化を求めるものとする。
- ⑧送水側および排水側の流量が変化しなくなったら不飽和状態の試験を終了し、間隙水圧を大気圧に戻す。
- ⑨原則として、真空ポンプを使用して48時間以上真空引きを続け供試体を強制湿潤させる。
- ⑩間隙水圧を 2.0kgf/cm^2 まで昇圧する。間隙水圧の昇圧時には、供試体の上下方向に差圧が生じることによりき裂の状態が乱されることがないように、充分時間をかけて行う。供試体の間隙水圧が定常状態になったのを確認してから含水飽和状態の透水係数を測定する。
- ⑪試験終了後供試体を三軸室から取り出し、重量変化を測定することにより不

飽和度を測定する。



図一 3 トランジェント・パルス法の概念図

3. 試験結果

3.1 き裂A

不飽和状態におけるA-3供試体の透水係数は非常に小さな値を示したので、試験は、トランジェントパルス法を用いて行った。一方、A-4供試体は、相対的に透水係数が大きかったので、定常法を用いて試験を行った。A-3供試体についての飽和・不飽和透水試験結果を図4に、A-4供試体についてのそれを図5に示す。また、試験結果の一覧表を表1に示す。

図4および図5の経過時間は、供試体を不飽和状態にした後、送水および排水ライン内を水で満たし、再び通水を開始した時を時間ゼロにとっている。通水開始直後は、供試体周辺の配管内の空気が供試体内に送られるため、「透水」試験ではなく、「透気」試験を行っていると考えられる。そこで、試験結果が安定し、確実に「透水」係数を測定していると考えられる時間以降の測定結果についてのみ透水係数を求めている。

通水開始2.3時間後のA-3供試体の透水係数は約 6.7×10^{-10} cm/sであり、含水飽和状態における透水係数 6.3×10^{-8} cm/sと比較すると、約1/100に低下している。その後時間の経過とともに透水係数は増加していくが、20時間以降はわずかな変化しか示さなくなっている。通水開始20時間から40時間の間の透水係数は、 7.5×10^{-9} ~ 9.2×10^{-9} cm/sの値を示しており、飽和状態における透水係数の値 6.3×10^{-8} cm/sと比較すると、その12~15%程度である。したがって、この試験例では、いったん不飽和になったき裂の透水係数は、数日間といった短期間では、飽和状態における透水係数を大きく下回る状態が続いているということになる。

A-4供試体の、通水開始約20時間後の透水係数は約 1.9×10^{-8} cm/sである。その後、時間の経過とともに透水係数は増加しており、290時間後の透水係数は約 1.6×10^{-7} cm/sと約1桁大きくなっている。

不飽和透水試験終了後に実施した試験により求めた、飽和状態における透水係数の値は約 1.9×10^{-7} cm/sであり、直前に実施した不飽和状態における透水試験結果とほぼ同じ値を示している。

透水試験終了後、不飽和透水試験開始時の供試体の飽和度を求めるための諸測定を実施した。飽和度は、不飽和透水試験開始時の供試体の重量、含水飽和状態の供試体の重量および炉乾燥状態の供試体の重量を測定することにより求めた。含水飽和状態の重量は、真空ポンプを用いて72時間以上減圧水浸することによって、また、炉乾燥状態の重量は、105℃の乾燥炉を使って24時間乾燥を行うことによって求めた。その結果、A-3供試体の飽和度は49.7%、A-4供試体の飽和度は62.1%であった。

3.2 き裂B

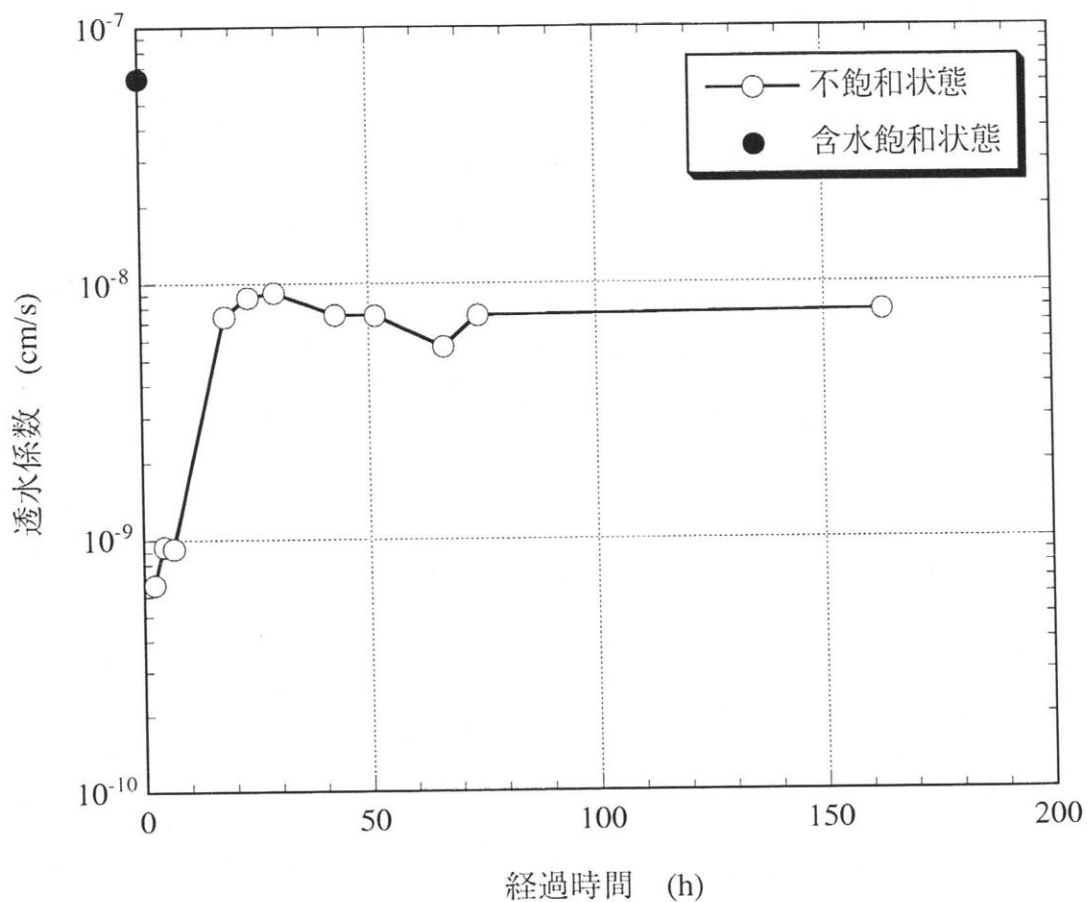
き裂Bの透水試験は、飽和状態でも、不飽和状態でも、定常法を用いて行った。B－3 供試体についての試験結果を図6に、B－4 供試体についてのそれを図7に示す。また、試験結果の一覧表を表2に示す。

飽和状態におけるB－3 供試体の透水係数は約 2.3×10^{-4} cm/s、B－4 供試体のそれは約 1.8×10^{-5} cm/s であり、き裂Aのそれより3～4桁大きい値を示している。

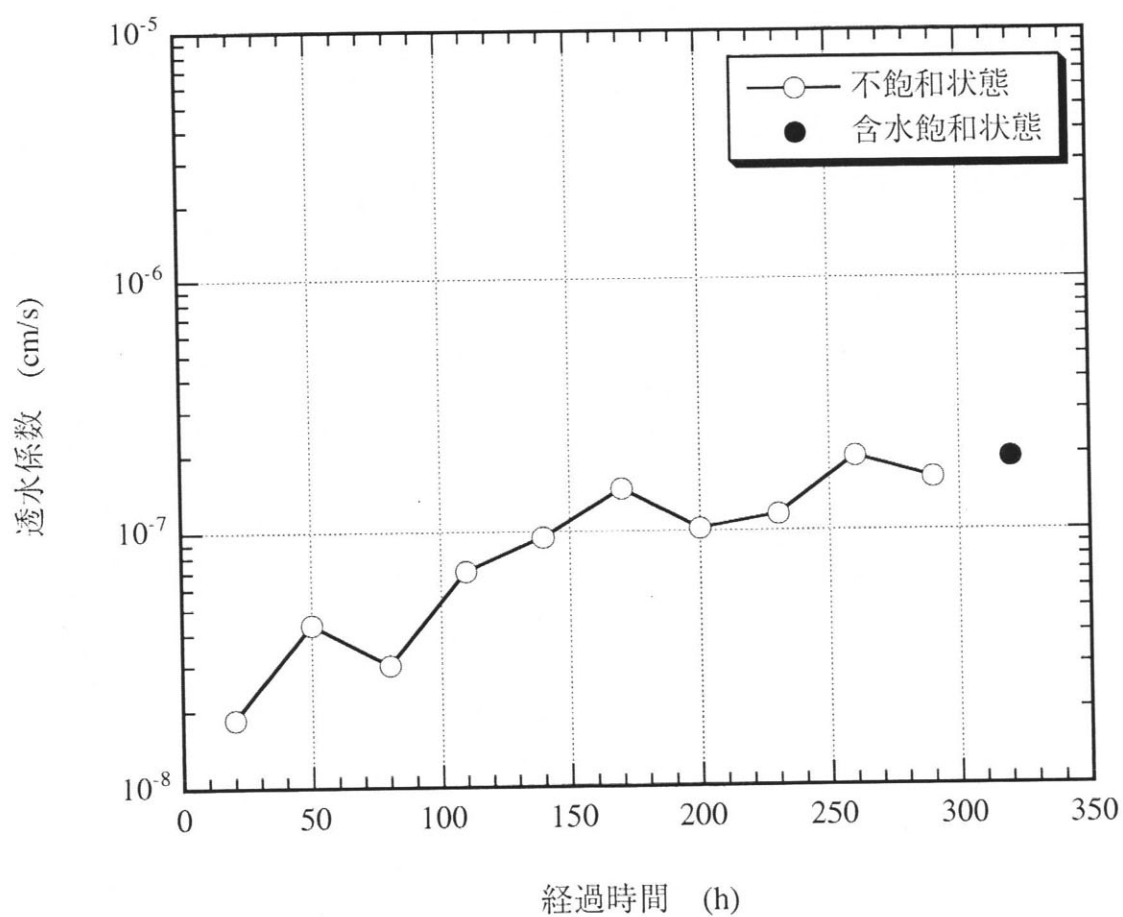
B－3 供試体の場合、き裂の透水性に対する不飽和の影響はほとんどみられない。図6に示すように、不飽和状態における透水係数の測定値は、時間の経過に伴う変化がほとんどなく、全体として、飽和状態における透水係数とほぼ同じ値を示している。

不飽和状態において、通水開始2.8時間後のB－4 供試体の透水係数は、約 3.0×10^{-7} cm/s であり、含水飽和状態における透水係数と比較すると、約1/60に低下している。その後透水係数は時間の経過とともに増加しており、7時間後には約 5.6×10^{-6} cm/s と、飽和状態におけるその約1/3まで回復している。しかし、それ以降は、時間の経過に伴って透水係数は減少する傾向を示している。

透水試験終了後、き裂Aと同様に、き裂Bについても、不飽和透水試験開始時の供試体の飽和度を求めるための諸測定を実施した。その結果、B－3 供試体の飽和度は52.4%、B－4 供試体の飽和度は69.8%であった。



図一 4 不飽和透水係数の経時変化 (A-3 供試体)



図一 5 不飽和透水係数の経時変化 (A-4 供試体)

表－1 透水試験結果一覧表（き裂A）

供試体番号	含水条件	通水時間 (h)	透水係数 (cm/s)
A－3	含水飽和状態	---	6.31E-08
	不飽和状態	2.3	6.68E-10
		4.5	9.46E-10
		6.7	9.25E-10
		18.3	7.43E-09
		23.6	8.77E-09
		29.3	9.20E-09
		42.7	7.50E-09
		51.5	7.45E-09
		66.6	5.64E-09
		74.4	7.47E-09
		162.9	7.73E-09
A－4	不飽和状態	20	1.85E-08
		50	4.37E-08
		80	3.01E-08
		110	6.99E-08
		140	9.49E-08
		170	1.47E-07
		200	1.02E-07
		230	1.16E-07
		260	1.96E-07
		290	1.61E-07
	含水飽和状態	320	1.93E-07

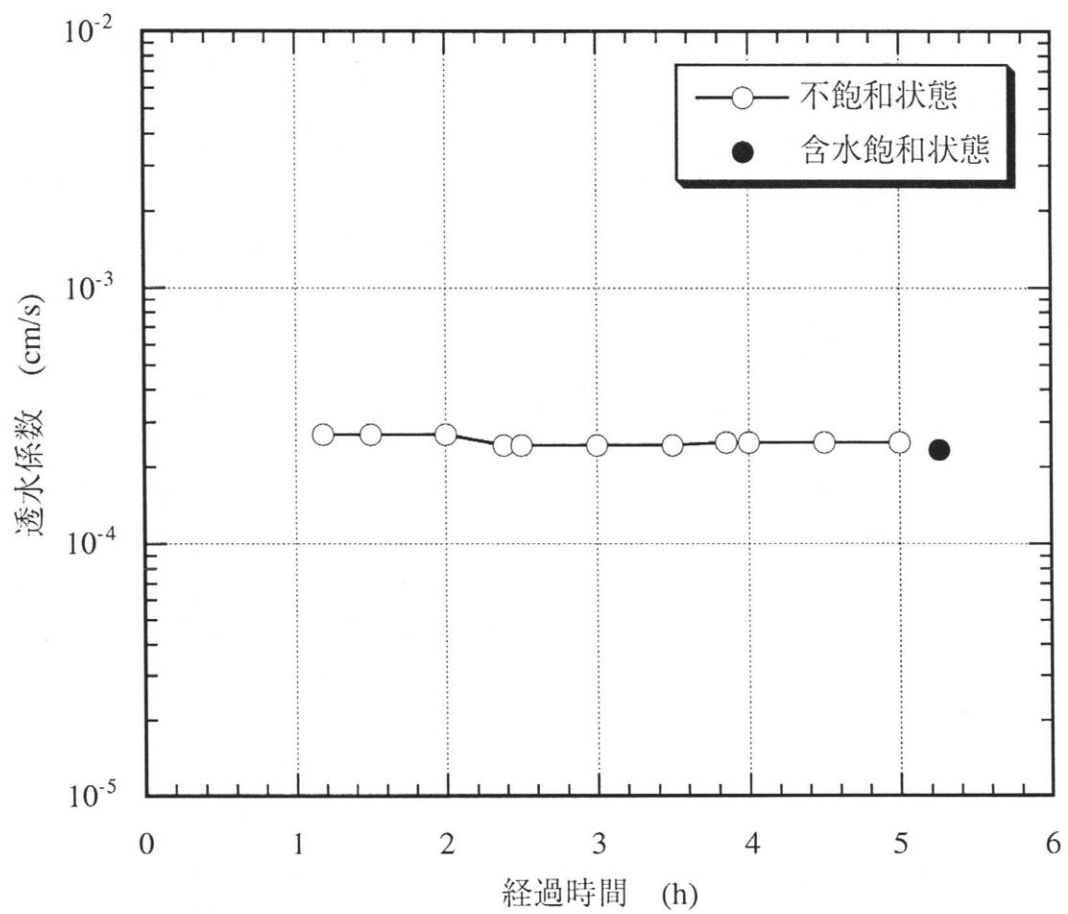


図-6 不飽和透水係数の経時変化 (B-3 供試体)

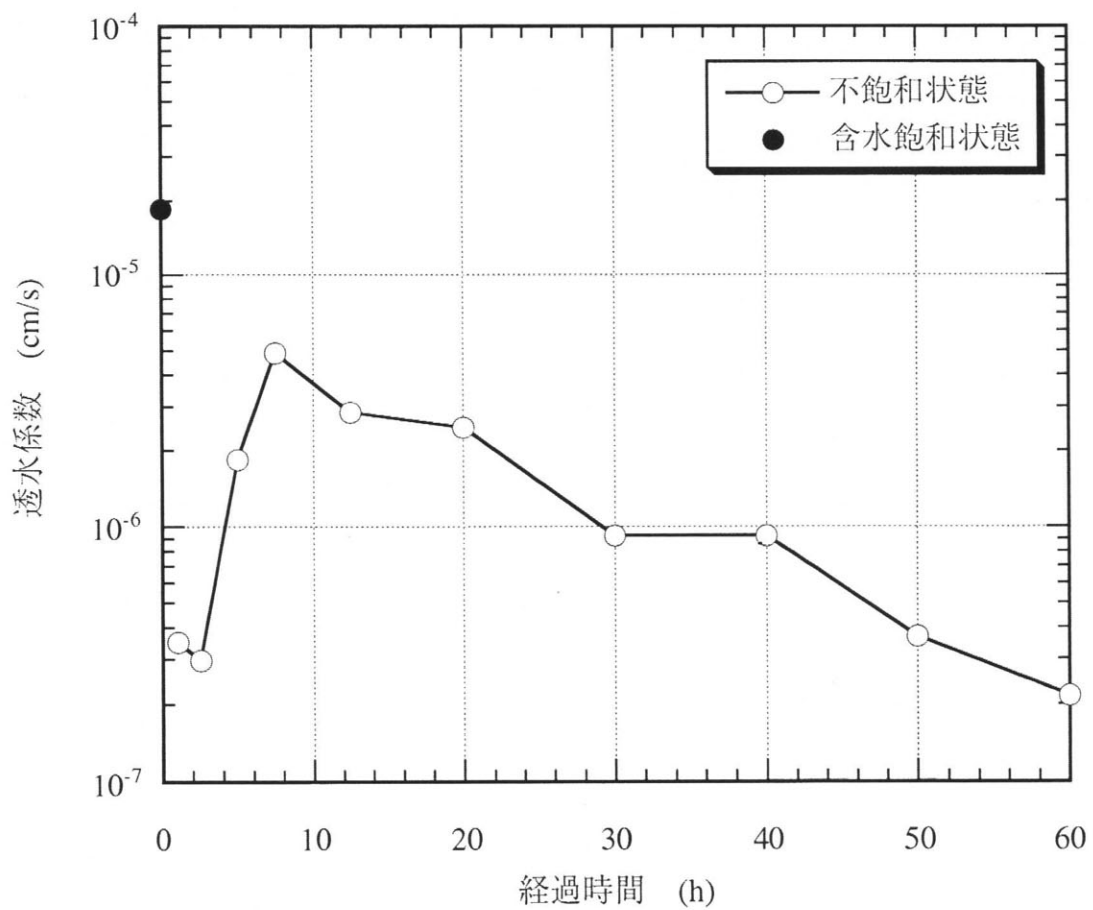


図-7 不飽和透水係数の経時変化 (B-4 供試体)

表一 2 透水試験結果一覧表（き裂B）

供試体番号	含水条件	通水時間 (h)	透水係数 (cm/s)
B－3	不飽和状態	1.2	2.69E-04
		1.5	2.69E-04
		2.0	2.69E-04
		2.4	2.44E-04
		2.5	2.44E-04
		3.0	2.44E-04
		3.5	2.44E-04
		3.9	2.50E-04
		4.0	2.50E-04
		4.5	2.50E-04
		5.0	2.50E-04
	含水飽和状態	5.26	2.33E-04
B－4	含水飽和状態	---	1.84E-05
	不飽和状態	1.0	3.50E-07
		2.5	2.97E-07
		5.0	1.84E-06
		7.5	4.89E-06
		12.5	2.83E-06
		20.0	2.46E-06
		30.0	9.18E-07
		40.0	9.21E-07
		50.0	3.68E-07
		60.0	2.15E-07

4. 考察

前に述べたように、A-3 供試体の不飽和状態における透水係数は、飽和状態における透水係数を大幅に下回る値を示している。そしてき裂に通水を続け、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、飽和状態における透水係数を大きく下回る状態が続いている。また、A-4 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-3 供試体と比較すると、透水係数の低下の度合いは小さくなっている。

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。

この結果から、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考えられる。き裂 A 供試体も、き裂 B 供試体も、不飽和透水試験時には、基質部分是不飽和であり、また、き裂の表面にも気泡が必ず存在している。そして、A-3 供試体のように、き裂の開口幅が小さい場合には、き裂表面の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。き裂の開口幅がもう少し大きくなると、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、時間経過に伴って透水係数が低下する現象は、「目詰まり透水試験」においてみられた現象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、「目詰まり現象」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。

5. まとめ

釜石鉱山 250m レベル坑道にて採取された、栗橋花崗閃緑岩中に特徴的にみられる2種類のき裂を対象として、き裂の飽和状態の違いがき裂の透水性に与える影響を定量的に検討するための試験を実施した結果以下のことが明らかになった。

(1) A-3 供試体のように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係数は大幅に低下する。このようなき裂に通水を続け、飽和度が回復するのに伴って、透水係数は徐々に増加するが、数日間といった短期間では、飽和状態の透水係数を大きく下回る状態が続く。したがって、き裂の飽和度の変化に伴う透水性の変化もまた、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、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。

(2) き裂の開口幅が大きくなるにしたがって、き裂内を不飽和にすることの影響は徐々に低下する。そして、B-3 供試体のように、き裂の開口幅が大きい場合には、不飽和の影響による透水係数の低下はみられなくなる。

参考文献

- 1) 天野健治, 吉田英一, 笹本 弘 : 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.
- 2) Barton, N. R., Bandis, S. C. and Bakhtar, K. : Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.3, pp.121-140, 1985.