

(102) 複数亀裂を有する岩盤ブロック内の浸透挙動に関する室内実験

大成建設（株）技術研究所
同 上

正会員○下茂道人
正会員 飯星茂

Laboratory Experiment on Water Percolation through a Rock Block with Multiple Fractures

Michito SHIMO, Taisei Corporation
Shigeru IIHOSHI, Taisei Corporation

ABSTRACT

A method of laboratory test to study water flow in a fractured rock is developed. The method has the control of pressure conditions at arbitrary locations of block surface. A 30 cm cube of chert containing multiple set of natural fractures are used in this study. Each of the six faces of the block is divided into 25 subpanels which are isolated hydraulically using a gasket. A total of 150 separate sections of the cube surface are isolated in this manner. The cube is placed in a polyaxial loading frame and a uniform water pressure was applied to seal the gasket on the rock surface. Panel-to-panel injection tests are carried out under many different boundary conditions. The results show that the flow rate at an outflow panel depends strongly on intersections with the main fractures. This new laboratory tests may provide a well controlled validation of the fracture network flow modelling approaches.

1. はじめに

岩盤内の地下水は、亀裂の空間的な分布ならびに個々の亀裂面内の幾何形状に大きく影響を受け、複雑な挙動を示す。近年、不連続性岩盤を対象とした地下水解析モデルがいくつか提唱され¹⁾、これらのモデルの妥当性の確証のために実施された原位置試験も大きな成果を上げつつある²⁾。しかし、一般に原位置試験では、亀裂分布や地下水の境界条件が必ずしも明確で無く、試験結果の解釈に困難を伴う場合が少なくない。

一方、室内実験は、試料の大きさ等による制限はあるものの、境界上での水圧や流量を正確にコントロールでき、同じ不均質性を有する試料に対して、種々の異なる境界条件下での水理学的なレスポンスを捕らえることができるという利点を有している。そこで、筆者等は、解析モデルの確証を行う上で、原位置試験を補足するような室内試験手法を開発するために、ブロック状の試料を用いた実験手法の研究を行ってきた³⁾が、このたび、亀裂を含む岩盤ブロック内の浸透現象を詳細に調べられる手法を開発した。本論文では、その実験手法について述べたのち、複数の自然亀裂を含むチャート試料を用いた透水実験結果を基に手法の妥当性について検討する。また、得られたデータを基に、試料表面からの流量分布と亀裂分布との関係について考察する。

2. 実験方法

今回開発した試験方法の最も大きな特徴は、ブロック状の試料表面の任意の場所から、注水または排水が行えることである。すなわち、図-1に示すように格子状の止水エレメント（シリコン製）をブロック表面に取り付けることにより、ブロック各面を水理学的に独立した複数の窓（以下パネルと呼ぶ）に区切り、各パネル内の圧力条件を、任意にコントロールすることができる。止水エレメントの外側には、アクリル板を

装着し、これを圧力セルの中に入れ、水压をかけることにより、アクリル板を介してエレメントがブロック表面に押し付けられ、隣接するパネル間をシールする。各アクリル板のつなぎ目とブロック試料および止水エレメントの隙間には、シリコン系接着剤を充填し、6枚の止水エレメントを一体化する。各パネルからの注水または排水用に、アクリル板には、各パネル毎に孔を開け、高耐圧性のナイロンチューブを接続する。後出の図-4に、エレメント装着後の試料の概観を示す。図-2に、実験装置の全体構成を示す。試料をセル内に設置後、ナイロンチューブは、まとめて止水パッキンによりセルの外へ取り出し、注水用のチューブは、プースターポンプに接続する。排水側は、図-2に示したように、流量測定用のスタンドパイプに接続する。注水側の加圧は、油圧サーボによるプースター制御（定流量注水の場合は定流量ポンプを用いる）、排水側は、レギュレータによる空気圧制御を行う。不透水境界のチューブは、先端のバルブを閉じる。このようにして、ブロック表面の、任意のパネルにおける水压または流量を自由にコントロールでき、対応する2面間で一定の動水勾配を与えるといった単純な境界条件から、トモグラフィー的なパネル間の透水試験まで、広範囲な境界条件下での透水試験が可能である。

3. 亀裂を有する試料を用いた実験

3. 1 実験方法

手法の妥当性の確認のために、複数の自然亀裂を有するブロック試料を用いた実験を行った。実験には、図-3に示すような層状縞を有する赤褐色チャートをを用いた。試料の薄片観察によると、基質は泥質褐鉄鉱を含む蛋白石およびイン微晶質珪酸の微粒を主とし、赤鉄鉱-褐鉄鉱微スチロライトの黒色条脈および白色網状の石英脈を含む。亀裂の発達が顕著で、最大0.2mm程度の開口幅を有する開口性亀裂も一部存在する。直径

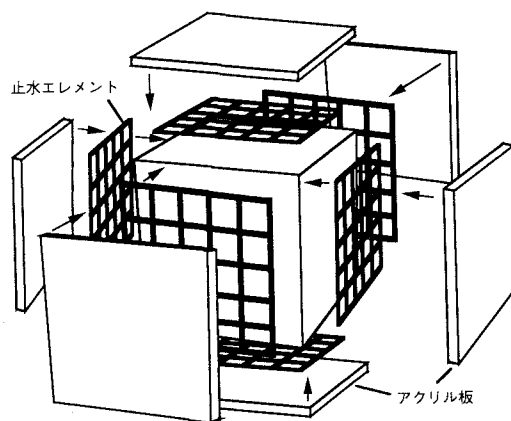


図-1 ブロック試料への止水エレメントの装着

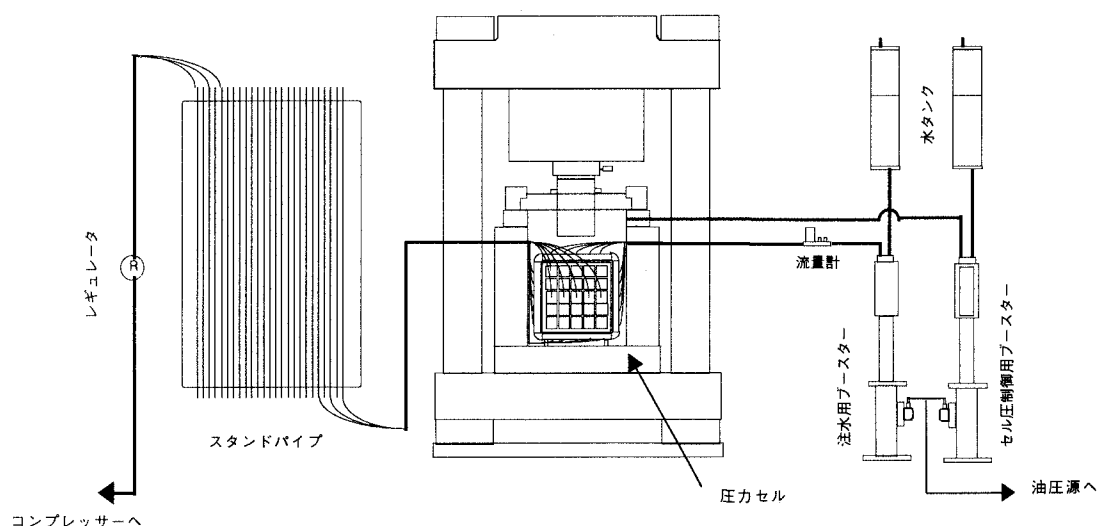


図-2 試験装置の構成

1 m程度の玉石状の岩塊から、2個の30cm角ブロックを切りだし、その内の一つを今回の実験に用いた。ブロック成型によっても、試料の崩壊は少なく図-3に示すようにその形を保持している。ブロックの各面は、図中に示したように、向い合う2面を一組として、A、A'、B、B'、C、C'と呼ぶことにする。ブロック表面の展開図を図-7に示す。図中には、開口性の主要な亀裂位置を直線で示してある。地層面は、C、C'面にほぼ平行で、開口性の亀裂は、この層方向に最も多く見られるが、これと高角度で交差するような亀裂も存在する。亀裂の連続性は必ずしも高くなく、途中で途切れているものも多く見られる。試料表面の亀裂のマッピングを行った後、止水エレメントとアクリル板を取り付けた。図-4にその概観を示す。ブロックの各面には、5cm角のパネルを $5 \times 5 = 25$ 個づつ、6面で合計150個を設け、各パネルにチューブを接続した。これを圧力セルの中に入れ、シールのための圧力として、 3.5kgf/cm^2 の水圧をかけた。注水および排水条件の組み合わせで、多数の試験条件が考えられるが、今回は次の2種類の試験を行った。

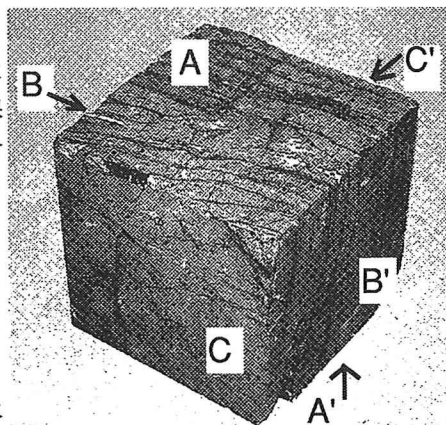


図-3 チャートのブロック試料

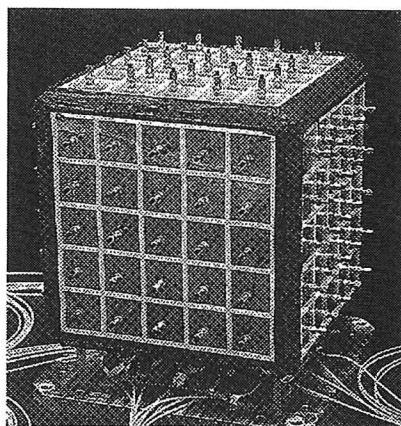


図-4 止水エレメント装着後

ケース1：向かい合う面に一定の水圧差をつけ、排水側の面の各パネルからの流量を測定する（ $A \rightarrow A'$ 、 $A' \rightarrow A$ 、 $B \rightarrow B'$ 、 $B' \rightarrow B$ 、 $C \rightarrow C'$ 、 $C' \rightarrow C$ の6ケース）。

ケース2：B'面の全パネルから同一圧力で注水し、残りの面の各パネル一個づつから排水したときの流量を測定する。

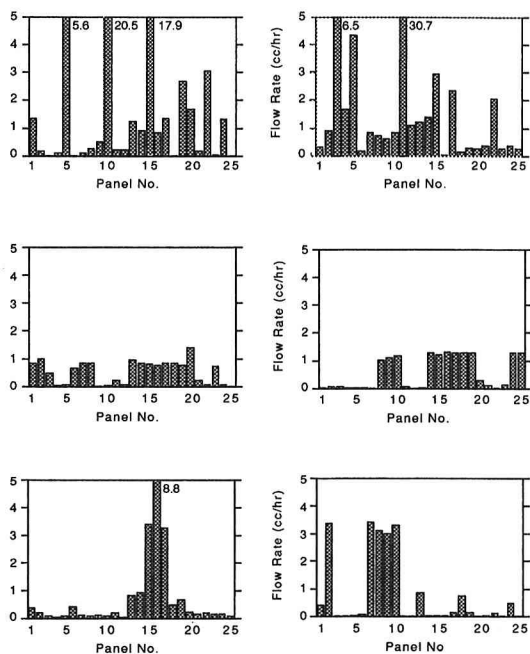
なお、いずれのケースについても、注水圧は 2.0kgf/cm^2 、排水側の水圧は 1.0kgf/cm^2 とした。流量は、注水側では、プースターポンプのピストンの変位量および流量計（オーバル社製、測定範囲 $10\text{--}200\text{cc/hr}$ ）の2種類の方法で25個のパネルからの総注水量を求めた。また、排水側では、25個の各パネル毎の排水量をスタンドパイプ内の水位変化により測定した。スタンドパイプの校正値は、 0.095cc/cm であり、 $1\text{mm/hr} \equiv 0.01\text{cc/hr}$ を、最少測定可能流量とした。流量測定は、注水量と排水量をモニターしながら、両者の流量がほぼ等しくなった後に、2時間～数時間程度継続して行った。

3. 2 実験結果

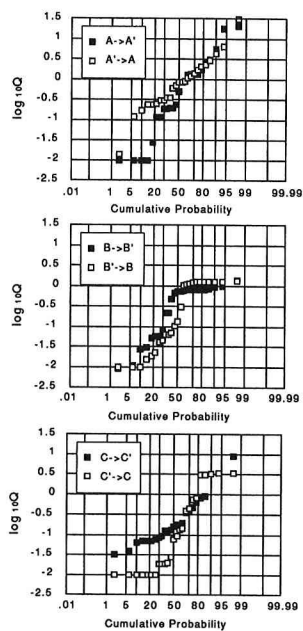
図-5に、ケース1の試験で得られた各パネルの流量値を棒グラフで示す。 $A-A'$ 、 $B-B'$ 、 $C-C'$ の各方向の流量は、 60.3 、 13.8 、 20.0cc/hr であり、直交異方差性を仮定して各方向の等価な透水係数を算出すると、それぞれ、 5.6×10^{-7} 、 1.3×10^{-7} 、 $1.9 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ である。図-6は、6つの各面毎の流量の分布を対数確率紙にプロットしたものである。図-8および図-9には、ケース1およびケース2における各パネルの流量を濃淡表示で示した。黒っぽい部分ほど、流量の多い場所であることを示している。

3. 3 考察

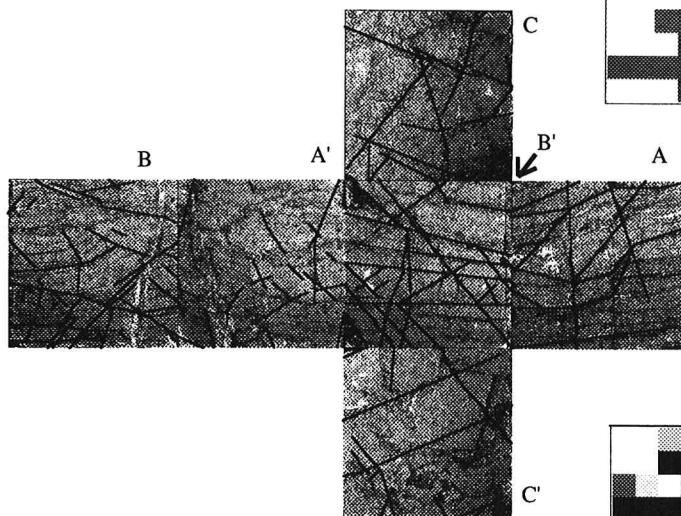
（ケース1）図-5から、各パネル毎の流量のバラツキが大きく、各面とも半分以下（パネルの数で8～13個）の面積に全流量の90%以上が集中していることが分かる。特に、 $A-A'$ 面間では、最少流量（ 0.01cc/hr ）と最大流量の間には3オーダーの開きが見られる。隣り合ったパネルにおける大きな流量差は、今回採用した止水方法が有効に機能していることを示している。図-6より、 $A \leftrightarrow A'$ および、 $C \rightarrow C'$ における



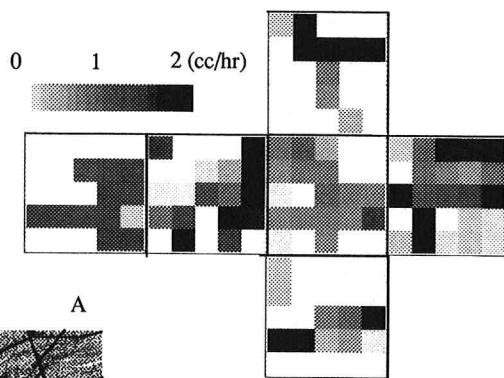
図ー5 各パネルの流量分布（ケース1）



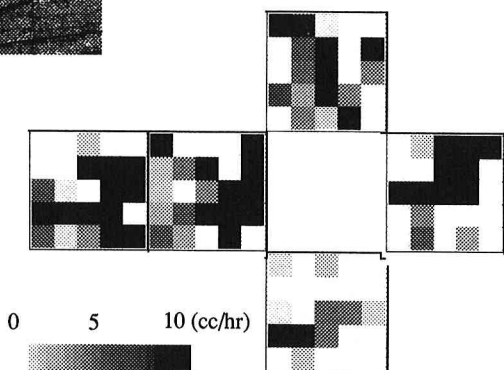
図ー6 流量の累積確率（ケース1）



図ー7 チャートブロック試料の展開図



図ー8 流量分布図（ケース1）



図ー9 流量分布図（ケース2）

各パネルの流量は、対数正規分布にほぼ近い分布を示しているが、B⇄B' および C' →C 方向については、高流量領域で対数正規分布からずれており、均一な流量分布を示す。これは、比較的透水性の高い部分が面内を横断していることを示唆している。図-7と図-8を比較すると、これら流量の大きいパネルのほとんどは、主要な亀裂と交差しており、亀裂分布と流量分布の対応が顕著である。特に、亀裂どうしが交差した部分では、大きな流量値を示す傾向がある。

(ケース2) 図-9の結果を見ると、流量のパターンは、ケースAと類似しており、流量の大きな部分が主要な亀裂に沿っている。ただし、このケースにおいては注水面をB'面に限っているため、この面につながった亀裂が強調されている。図-7、8、9を併せて解釈すると、B'面においては、左上から右下に向かう連続性の高い亀裂の透水性が最も高いと考えられる。しかし、この亀裂は、隣接するA'面およびC'面とつながっており、反対側のB面とは直接つながっていない(これは、実際の亀裂の走向傾斜とも対応している)。また、A-A'およびC-C'間を貫く亀裂の数に比べて、B-B'方向を貫く亀裂の数は少ない。B-B'方向の流量が、他の2方向に比べて少ないのは、上記の理由によると解釈される。

実験終了後、試料を取りだし、大気中に放置したところ、半日以上にわたって、亀裂からの水の浸み出しが続いた。図-10にこのときの試料表面の様子を示す。図-8、図-9の流量分布と浸水箇所分布は良く対応しており、両者を比較することにより、透水に寄与する亀裂を特定することができる。

以上の結果から、今回提案した実験手法が、亀裂を有する試料内の浸透挙動の室内試験への適用性を有することが示された。

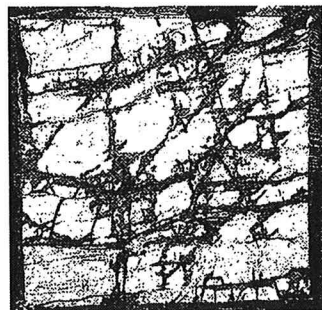
4. まとめ

亀裂を有する岩盤ブロック内の浸透挙動を詳細に調べることのできる、新しい室内透水試験法を開発した。本実験手法は、格子状の止水エレメントを、ブロック表面に装着することにより、ブロック表面の任意の場所に所定の境界条件を与えた透水試験が行える。複数の亀裂を有するチャート試料を用いた室内実験の結果から、この止水方法が有効に機能することが確かめられた。また、得られた試料表面の流量の分布は、約3オーダーにわたって分布しており、主要な亀裂に沿って大きな流量が分布していることが示された。また、亀裂どうしの交差が、流量を増大させる傾向があることも示された。

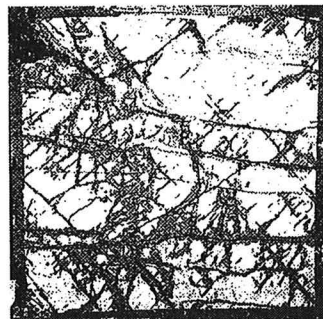
本実験手法は、複数亀裂を有するブロック試料に限らず、異方性や不均質性を有する岩石試料や単一亀裂を対象とした試験まで応用範囲は広いと考えられる。今後は、流量測定法等の改良を行うとともに、実験データの蓄積を行い、亀裂性岩盤の地下水解析手法の妥当性の検討に役立てていきたい。

参考文献

- 1) Dershowitz, W., Herbert, A., Long, J., Fracture Flow Code Cross-Verification Plan, Stripa Project TR 89-02, 1989
- 2) O. Olsson (editor), Site Characterization and Validation - Final Report, Stripa Project TR 92-22, 1992
- 3) 下茂道人：岩盤ブロック試験機の開発とそれを用いた岩盤の透水性評価手法の研究、大成建設技術研究所報第22号、p93-104、1989。



A 面



B' 面

図-10 実験終了後の試料表面
(黒っぽい部分から水が浸み出ている)