

亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK試験装置) による

人工亀裂岩体を用いた透水性の応力依存性試験

1994年10月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

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。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)1994

## 亀裂状媒体水理試験設備（LABROCK試験装置）による 人工亀裂岩体を用いた透水性の応力依存性試験

野田兼司 内田雅大

### 要 旨

本報告書は、亀裂状媒体水理試験設備（以下、「LABROCK試験装置」という。）の概要と、その試験設備を実際に用いて試験を行った結果を報告するものである。

複雑な岩盤内の亀裂を流れる地下水および核種の移行挙動を解明するために、移行経路の基本単位である単一亀裂に着目し、注・排水側の測定だけではなく、亀裂面内での圧力分布、トレーサー濃度分布についても測定可能な試験設備を製作した。

この試験設備は、一辺が50cmの立方体岩体を試験することが可能であり、垂直荷重負荷・制御装置、透水・トレーサー圧負荷・制御装置、計測装置、データ収録・処理装置から構成され、圧力・濃度・温度の各センサーが設置されている。この装置を用いて、50cm立方体の試験岩体の中央を切断し平滑な亀裂面を有する岩体と、割裂し亀裂面が凹凸を有する岩体の2つの試験岩体について透水・トレーサー試験を実施した。その結果、亀裂の透水性は亀裂に垂直に作用する荷重により変化し、亀裂の表面形状により透水性の変化の割合が違ふことや物質移行にかかわる亀裂開口幅 (Transport Aperture) と3乗則から求められる水理学的開口幅 (Hydraulic Aperture) との関係が、平滑な面を持つ亀裂ではTransport ApertureがHydraulic Apertureの5～6倍、凹凸面を持つ亀裂ではTransport ApertureがHydraulic Apertureの9～9.5倍程度という結果を得た。

## 目 次

1	はじめに	1
2	亀裂状媒体水理試験設備の概要	1
	2-1 試験設備	1
	2-2 透水試験の種類	2
3	試験体	3
4	試験方法	4
	4-1 透水試験	4
	4-2 透水試験の試験条件	4
	4-3 トレーサー試験	4
	4-4 トレーサー試験の試験条件	5
	4-4-1 試験体Bの試験条件	5
	4-4-2 試験体Cの試験条件	5
5	試験結果・考察	6
	5-1 透水試験	6
	5-2 トレーサー試験	9
	5-2-1 試験体B	9
	5-2-2 試験体C	11
6	まとめ	13

## 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物を地下数百メートルに地層処分する場合、想定される核種移行事象の中に地下水シナリオがある。地下水シナリオを考える際、地下深部での岩盤中の地下水および核種の移行を把握することがきわめて重要な問題となっている。岩盤中の地下水および核種の移行は、花崗岩などの亀裂状媒体においては、亀裂を主要な経路として起きると考えられている。この亀裂中の移行現象は、亀裂開口部の幾何形状と透水性によって影響される。亀裂状媒体における主要な移行プロセスは、移流・分散・マトリクス拡散・収着であるが、特に遅延上重要となるマトリクス拡散の効果は、亀裂中の液相と接触する亀裂表面積に支配される。

岩盤亀裂中の地下水および核種の移行を解明するために、世界各国において原位置試験や室内試験等が行われている。しかし、原位置では、境界条件の設定や亀裂面内流れの計測等に問題があり、また、今までの室内試験では試験体の大きさや計測等に限界がある。そのため、単一亀裂内の不均質な流れの現象についてよく制御された試験が行われていないのが現状である。

そこで、本研究では、移行経路の基本単位である単一亀裂に着目し、注・排水側での測定だけでなく亀裂面内での圧力分布、トレーサー濃度分布についても測定可能な設備を製作し、亀裂を含む岩石の室内透水試験を行い、亀裂に作用する垂直応力の変化に伴う亀裂の透水性を調べた。

## 2 亀裂状媒体水理試験設備の概要

### 2-1 試験設備

亀裂状媒体水理試験設備（以下、「LABROCK試験装置」という。）は、垂直荷重負荷・制御装置、透水・トレーサー圧負荷・制御装置、注水量および流出量測定装置、データ収録・処理装置から構成される。計測センサーとしては圧力センサー、濃度センサー、温度センサーが設置されている。圧力センサーは、試験体内部測定用に25ヵ所、試験体の注水・排水側合せて6ヵ所、各透水・トレーサー圧負荷装置に1ヵ所（計6ヵ所）。濃度センサーは、試験体内部測定用に25ヵ所、試験体の注水・排水側合せて6ヵ所。温度センサーは、試験体内部に1ヵ所、注・排水側にそれぞれ1ヵ所、室温測定用に1ヵ所設置可能である。試験体内部測定用センサーは、圧力・濃度（一部温度センサーも含む）一体型センサーで、直径17mmの大きさの円筒中に収容可能とした。また、すべての一体型センサーには、空気抜きのパイプが付設してあり、このパイプを注水・排水ラインとして孔間透水・トレーサー試験も可能である。試験体に載荷する垂直荷重は375tonfまで載荷可能であり、試験中の荷重状態が収録可能である。また、試験体の寸法は、一辺が50cmの立方体まで試験可能である。図-1に設備の概要と計測位置を、表-1に設備仕様の概要を示す。

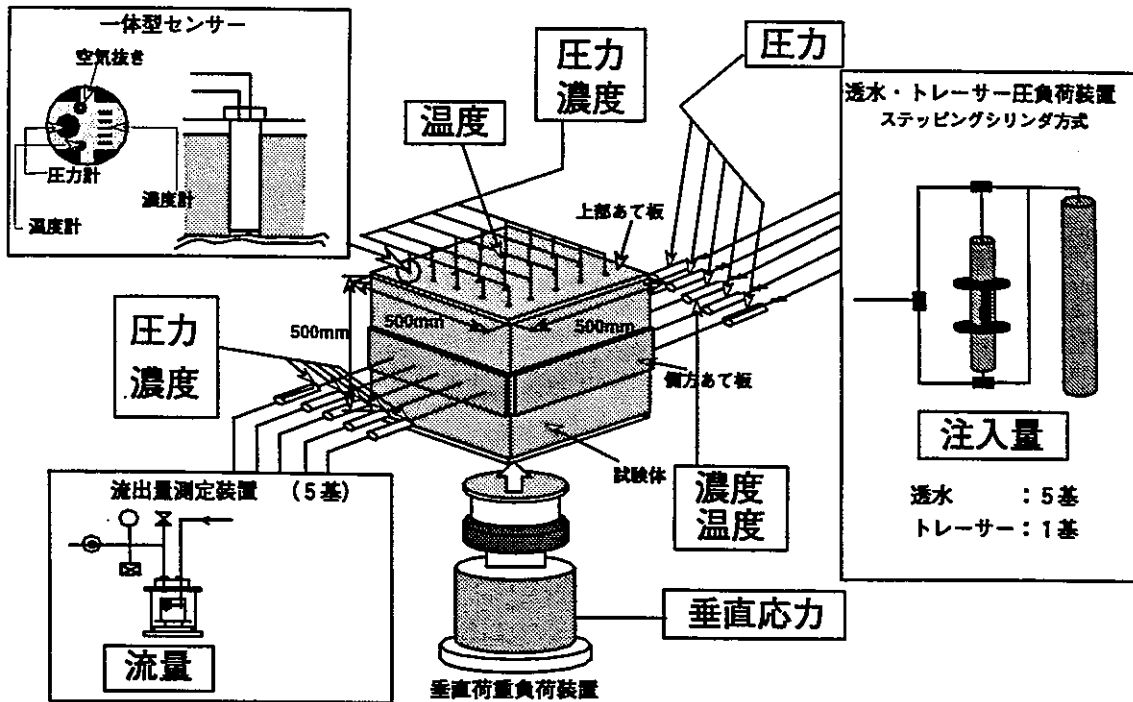


図-1 LABROCK試験装置の概要と計測位置

表-1 LABROCK試験装置仕様の概要

項目	内容
試験体規模	50cm×50cm×50cm
荷重装置	最大荷重 375tonf (垂直荷重のみ)
注水装置	ステッピングモータによる圧力フィードバック方式 試験体側面 5カ所から注水可能(最大注水圧: 10kgf/cm <sup>2</sup> ) 透水用 : 5基 (注水能力: 10~100cc/min) トレーサー用: 1基 (注水能力: 40~400cc/min) 圧力センサー: 5カ所 (0~2kgf/cm <sup>2</sup> ) マグネスケールによる流量測定
排水量測定装置	電子天秤: 5台 (0~7kg)
センサー	注水ポート 圧力センサー: 5カ所 (0~2kgf/cm <sup>2</sup> ) 温度センサー: 1カ所 濃度センサー: 1カ所 (0~3%) 試験体内部 (一体型センサー: 直径17mm) 圧力・濃度センサー: 25カ所 (うち1カ所温度センサー含む) 排水ポート 圧力センサー: 1カ所 (0~2kgf/cm <sup>2</sup> ) 濃度センサー: 5カ所 (0~3%)

2-2 透水試験の種類

現在、LABROCK試験装置では以下の3つの試験が可能である。(図-2)

I. 透水・トレーサー試験

岩体側面を不透水境界とし、1方向の透水・トレーサー試験を行う。  
注水口および排水口は、5区間に分割して注水・排水することが可能。  
トレーサーは、任意の1区間に注水可能。

II. 放射流透水試験

岩体の中央部にパッカー（直径42mm）の孔を穿孔し、透水試験を行う。  
境界条件は4側面とも大気開放とする。

III. 孔間透水試験

試験体内部測定用の任意のセンサー孔を使って、孔間透水試験を行う。  
センサー孔は1岩体につき25孔。1センサー孔につき最大24回の試験が可能。  
境界条件は、4側面すべてを不透水境界とする。

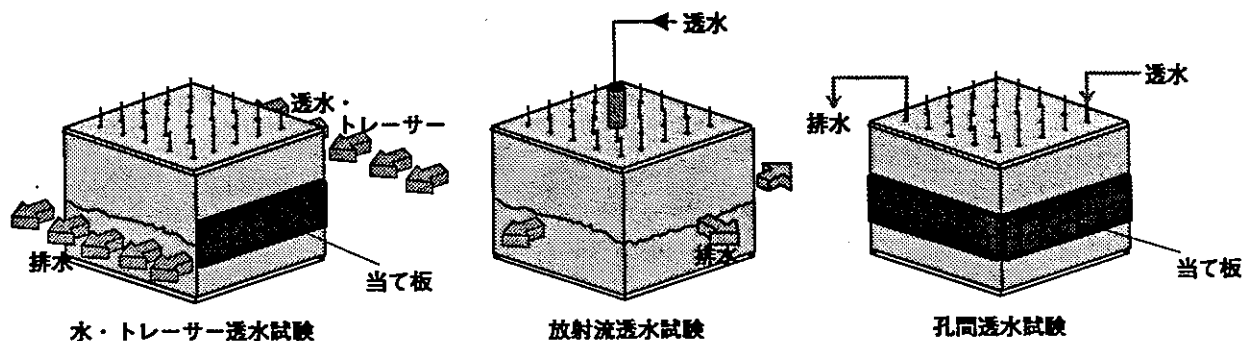


図-2 透水試験の種類

3 試験体

今回の試験に用いた試験体は、一辺50cmの立方体の花崗岩の岩石ブロックを割裂により破断し、完全に分離したものを再び重ね合わせた試験体（試験体B：亀裂面に凹凸を有する）、同じく一辺50cmの立方体の花崗岩の岩石ブロックを岩石カッターで切断し、薄いステンレス板を透水方向に向かって両側にスペーサーとしてセットし、再び重ね合わせた試験体（試験体C：平滑な亀裂面を有する）であり（図-3）、これらについて透水試験を実施した。双方の試験体には、合計25本のセンサー孔を穿孔している。センサーの配置を図-4に示す。亀裂面内の水理挙動は、圧力センサー、濃度センサーを各25カ所と温度センサーを1カ所、試験体に設置して測定した。

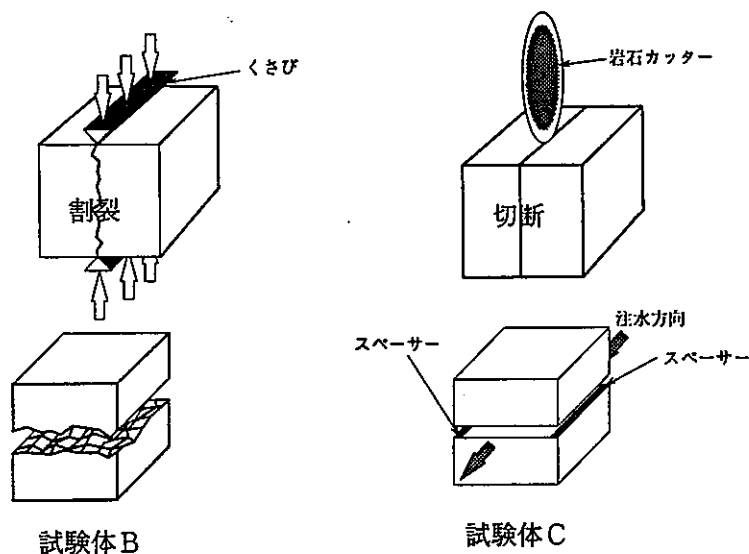


図-3 試験体の調製方法

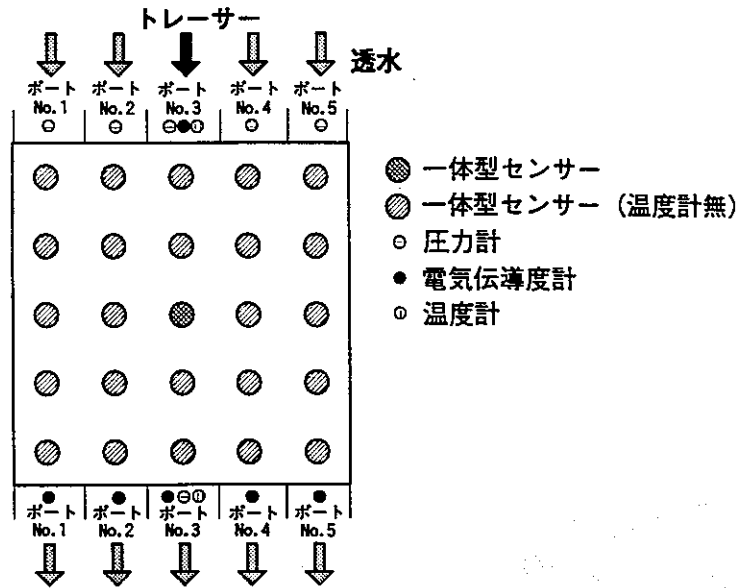


図-4 センサー配置図

#### 4 試験方法

##### 4-1 透水試験

透水試験（図-2 透水・トレーサー試験 参照）は、試験体の亀裂を含む面の1面から注水し、その反対側の面から排水する。その他の亀裂を含む面は当て板を接着し不透水境界とする。注・排水側は、注水面に注水用ポートを、排水面に排水用ポートを設置し、それぞれ5ポートに分割し、注・排水を行う。注水方法は、5基のステップングシリンダで同時に一定注水量で注水する。この時の各注水ポートの圧力が等しくなるように各ポート間は連結している。試験体に作用する垂直応力は、試験中を通して一定である。

##### 4-2 透水試験の試験条件

透水試験は以下の条件で行った。

試験体 試験体B（割裂亀裂）

試験体C（平滑亀裂）

注水量 30cc/min

垂直荷重 0~30tonfで载荷・除荷を繰り返し、各応力段階（0, 5, 10, 15, 20, 25, 30tonf）で透水圧・注水量を測定する。

##### 4-3 トレーサー試験

トレーサー試験では、5つの各ポートが同じ圧力になるように、あらかじめ設定した注水流量を各ラインそれぞれ注水する。トレーサーは、透水開始後、試験体内部圧力が一定になった後、トレーサー（1%NaCl溶液）を注水する。トレーサーの注水は注水の5つのラインのうち、中央のポート（No.3）のラインを水注水からトレーサー注水に自動的に切り替えて行う。



4-4 トレーサー試験の試験条件

4-4-1 試験体Bの試験条件

試験体Bのトレーサー試験は以下の条件で行った。

垂直荷重：5,10,15tonf

注水量

ポートNo.1: 87.80cc/min

ポートNo.2: 77.30cc/min

ポートNo.3: 50.60cc/min トレーサー注水

ポートNo.4: 24.10cc/min

ポートNo.5: 12.50cc/min

この時の各ポートの圧力を表-2-1に示す。表中の圧力は、試験開始5分後から終了までの平均を示す。各ポートは、ほぼ同じ値を示しているとみなした。

表-2-1 各荷重における各注水ポートの透水圧

	垂直荷重5tonf 注水圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	垂直荷重10tonf 注水圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	垂直荷重15tonf 注水圧(kgf/cm <sup>2</sup> )
ポートNo.1	2.21E-01	3.54E-01	4.95E-01
ポートNo.2	2.20E-01	3.57E-01	5.00E-01
ポートNo.3	2.23E-01	3.70E-01	5.19E-01
ポートNo.4	2.25E-01	3.69E-01	5.19E-01
ポートNo.5	2.28E-01	3.73E-01	5.21E-01

4-4-2 試験体Cの試験条件

試験体Cのトレーサー試験は以下の条件で行った。

垂直荷重：5,10,15tonf

注水量

ポートNo.1: 55.70cc/min

ポートNo.2: 55.80cc/min

ポートNo.3: 55.40cc/min トレーサー注水

ポートNo.4: 49.20cc/min

ポートNo.5: 43.10cc/min

この時の各ポートの圧力を表-2-2に示す。表中の圧力は、試験開始5分後から終了までの平均を示す。各ポートは、ほぼ同じ値を示しているとみなした。

表-2-2 各荷重における各注水ポートの透水圧

	垂直荷重5tonf 注水圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	垂直荷重10tonf 注水圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	垂直荷重15tonf 注水圧(kgf/cm <sup>2</sup> )
ポートNo.1	2.94E-01	3.95E-01	5.10E-01
ポートNo.2	2.92E-01	3.93E-01	5.09E-01
ポートNo.3	2.92E-01	3.93E-01	5.08E-01
ポートNo.4	2.92E-01	3.94E-01	5.10E-01
ポートNo.5	2.91E-01	3.94E-01	5.03E-01

5 試験結果・考察

5-1 透水試験

図-5、図-6にそれぞれの試験体についての載荷荷重と亀裂の透水性を表す指標 $[Q/\Delta h$  ( $m^2/sec$ ):単位水頭あたりの流量]の関係について示す。縦軸は、載荷荷重0 tonfのとき（試験開始時）の $Q/\Delta h$ で除した値となっている。応力履歴の影響を見るため、載荷・除荷の繰り返し（「RUN」という。）は試験体B、Cとも計4回（測定は載荷・除荷ごとに行い、計8回）行った。図-5、図-6より試験体B（割裂亀裂）、試験体C（平滑亀裂）とも載荷荷重が増加すると透水性は低下している。試験体Bについては、除荷の際の透水性は載荷の際の透水性よりも低くなっており、応力履歴の影響を受けていると思われる。また、試験体Bと試験体Cの透水性の変化を比較すると、試験体Bの載荷荷重の増加による透水性の変化は大きくなっている。これは亀裂の噛み合わせによる違いを反映しているものと思われ、亀裂形状の違いが亀裂の透水性に大きく影響することを示唆していると思われる。

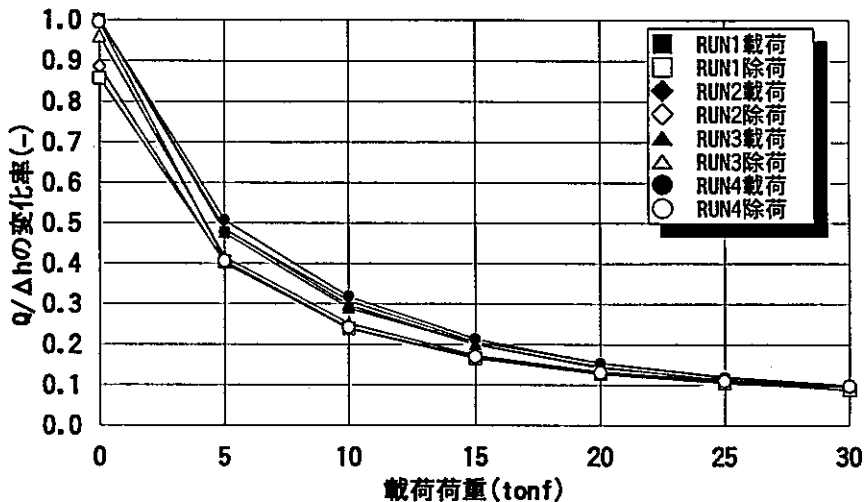


図-5 繰り返し載荷による透水性の変化（試験体B）

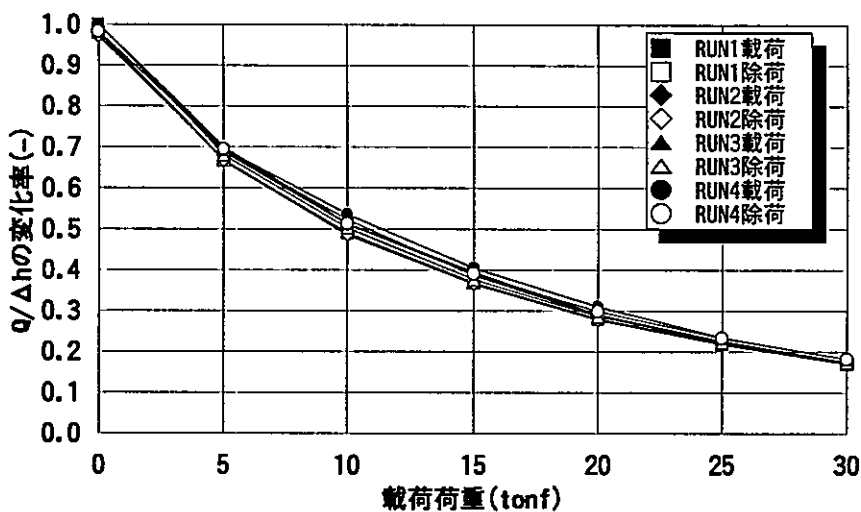


図-6 繰り返し載荷による透水性の変化（試験体C）

図-7に、試験体B (RUN4)、試験体C (RUN4)の試験を行った際に試験体に非接触型の変位計を取り付け、各載荷荷重段階での亀裂に垂直な方向への変位（亀裂閉合量）を測定した結果を示す。

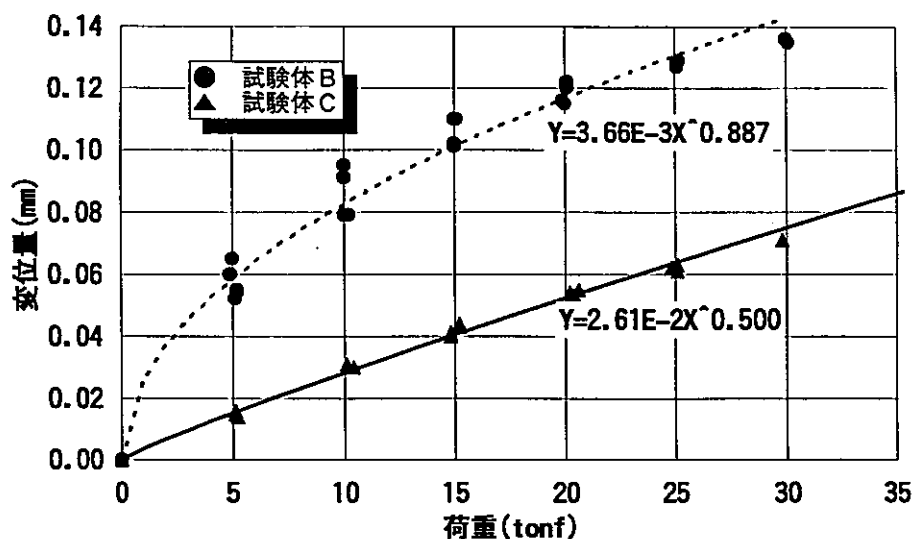


図-7 割裂亀裂と切断亀裂の変形の違い

図より、亀裂形状の違いによって亀裂の閉合挙動に違いのあることが分かった。これは、透水性の変化の違いにも現れてくるであろうと考えられる。今後、亀裂を再度開き詳細な亀裂形状観察を予定しており、これにより亀裂形状と透水性の関係や亀裂の閉合挙動との関係が理解できるものと考えている。

以上のような透水試験の結果より、亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係を示す。亀裂中の流れを表す基礎式には「亀裂の平均流量は、開口幅の3乗に比例する」という、いわゆる3乗則 (cubic law) が提唱されている。しかし、これは亀裂を2枚の平行平板で置き換えた場合について導かれた式であり、複雑な亀裂表面形状を持つ岩石の亀裂に適用するには問題があると言われている。Witherspoon等は、表面が滑らかでない亀裂に対しても3乗則が適用できるように、3乗則に亀裂の特徴を表す抵抗係数を導入し、(1)式の形で表すことができることを報告している<sup>1)</sup>。

$$\frac{Q}{\Delta h} = \frac{C}{f} (2b_0 - d)^3 \quad (1)$$

ここで、 $Q$ は流量、 $\Delta h$ は圧力水頭差、 $C$ は流れ系の形状と流体の性質に依存した比例定数、 $f$ は亀裂表面の特徴を表す抵抗係数、 $2b_0$ は亀裂の初期開口幅、 $d$ は亀裂閉合量を示す。 $C$ は(2)式から求める。

$$C = \frac{W}{L} \cdot \frac{\rho g}{12\mu} \quad (2)$$

ここで、 $W$ は亀裂の幅、 $L$ は亀裂の長さ、 $\rho$ は流体の密度、 $g$ は重力加速度、 $\mu$ は流体の粘性係数である。(1)(2)式を用い亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係を図-8、図-9に示す。初期開口幅は、試験開始時(荷重: 0tonf)を亀裂閉合量0mmとして計算した。その際に $f$ をパラメータにして

フィッティングを行った。結果として、試験体Bでは、初期開口幅 $2b=0.25\text{mm}$ 、抵抗係数 $f=28$ となり、試験体Cでは、初期開口幅 $2b=0.17\text{mm}$ 、抵抗係数 $f=11$ が求められた。●は試験結果を示し。実線で示した曲線は(1)(2)式より求めたものを示す。また、点線で従来の3乗則の結果も合わせて示す。

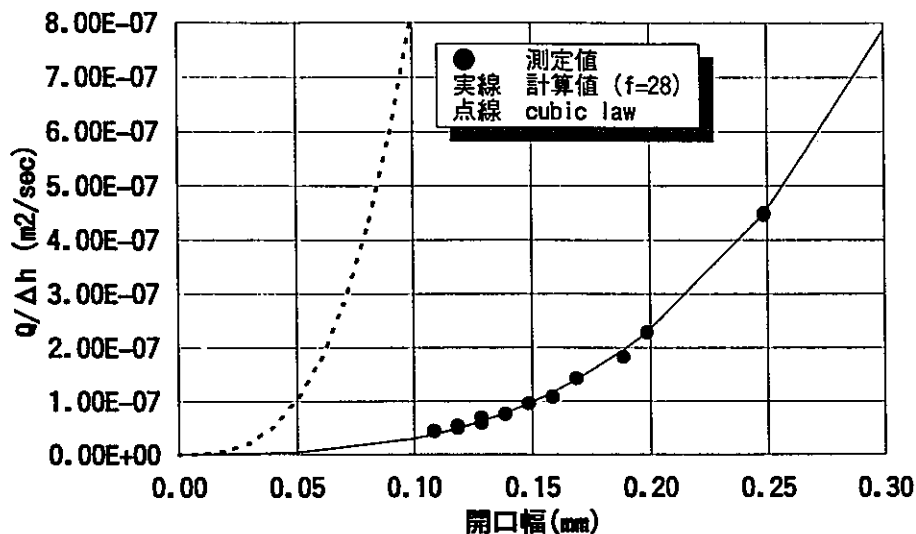


図-8 単位水頭あたりの流量と亀裂開口幅の関係 (試験体B)

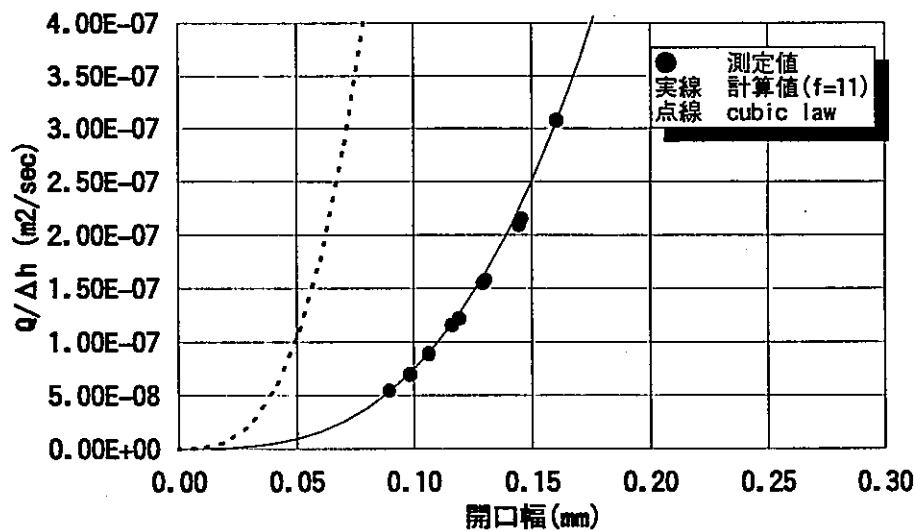


図-9 単位水頭あたりの流量と亀裂開口幅の関係 (試験体C)

図-8、図-9では、亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係が3乗則に抵抗係数 $f$ を導入した関係式により、測定値をよく近似できている。なお、試験体Cでは、従来の3乗則に近くなるはずであるが、試験体内のセンサー孔の影響が見られ、抵抗係数 $f=11$ が算出されたのではないかと考えている。しかし、試験体Bのような、割裂亀裂と比べると抵抗は少なく、より平板に近い亀裂であると言える。

5-2 トレーサー試験

5-2-1 試験体B

図-10～12に、試験体Bを用いた、各載荷荷重における破過曲線（検出されるトレーサー濃度の時間的変化をグラフ化した曲線）を示す。トレーサーの注水開始時間は、透水開始後5分から行い、トレーサー注水時間は、約71分である。（図中、注水側のポートをInjection、排水側のポートをOutletで示した。）

各載荷荷重においてトレーサーの流出は、主に排水ポートのNo.2, No.3 からであった。また、トレーサーの濃度は、垂直荷重が増加すると排水ポートNo.2においては増加し、排水ポートNo.3においては減少する傾向が見られる。これは、垂直荷重の増加により、亀裂開口幅が減少し、卓越した水みちのみにトレーサーが流れるようになったためと思われる。また、排水ポートのNo.2では荷重の増加につれてトレーサーの流出開始時間が若干早くなっているが、No.3については遅れていく現象が見える。表-3に注水ポートから各ポートまでのトレーサーの到達時間（travel time）を示す。

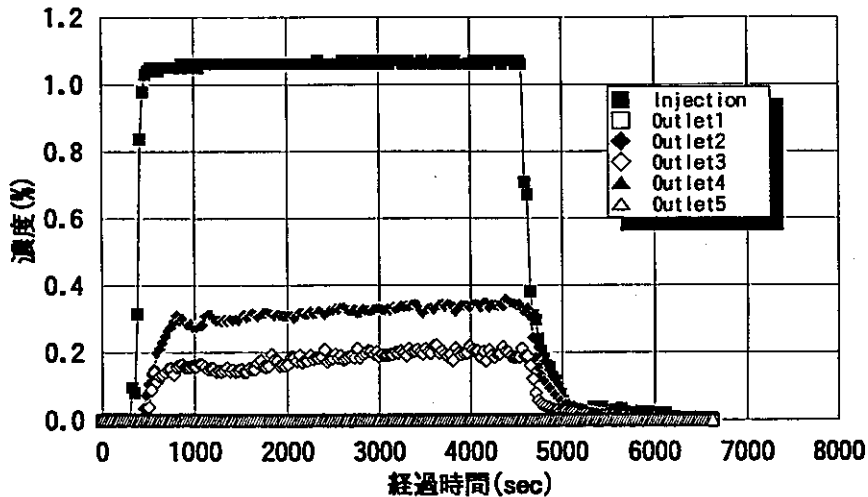


図-10 載荷荷重 5 tonでの破過曲線（試験体B）

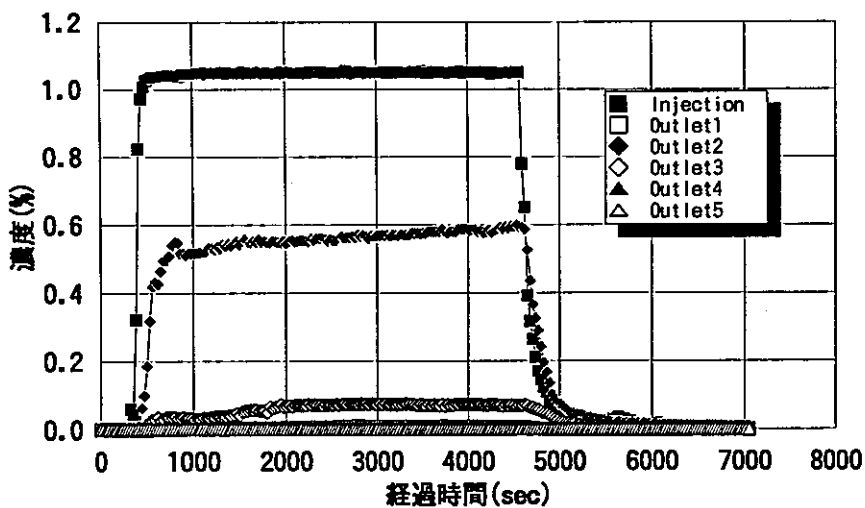


図-11 載荷荷重 10tonでの破過曲線（試験体B）

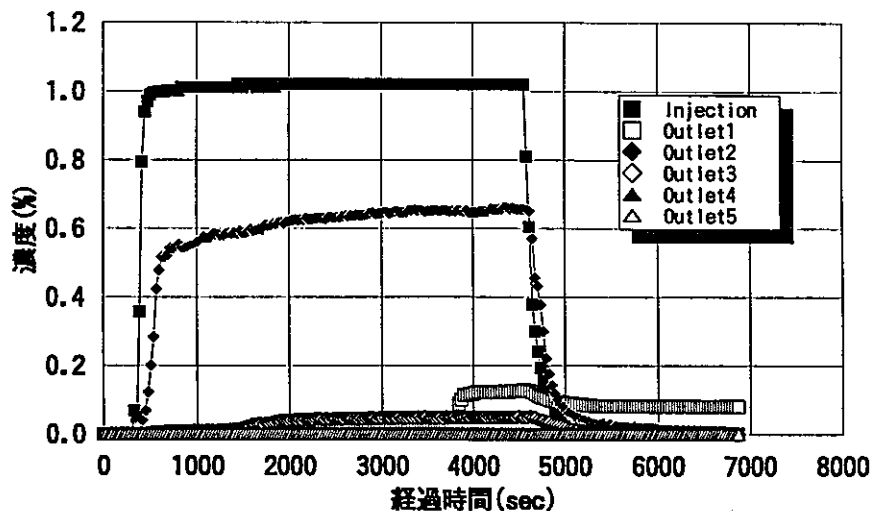


図-12 載荷荷重15tonでの破過曲線 (試験体B)

表-3 No.2, No.3排水ポートまでのトレーサーの到達時間  
(注水ポート到達時間から)

	No.2	No.3
5tonf	約114sec	約162sec
10tonf	約90sec	約186sec
15tonf	約84sec	約264sec

トレーサー試験の結果より亀裂開口幅を予測する方法として"Mass Balance Aperture"という考えかたのもとに算出する方法が提案されている<sup>2)</sup>。

$$\delta_m = \frac{Q t_w}{LW} \tag{3}$$

ここで、 $\delta_m$ は亀裂開口幅、 $Q$ は流量、 $t_w$ は滞留時間、 $L$ は亀裂の長さ、 $W$ は亀裂の幅を示す。(3)式に以下のとおり試験結果を代入する。(ただし、滞留時間と流出ポート部は、一番早く到達したポートNo.2の0.1m部分を対象とした。)

$Q$ : トレーサー注水量 8.43E-7 m<sup>3</sup>/sec

$L$ : 亀裂長さ 0.5 m

$W$ : 注水ポート幅 0.1 m

$t_w$ : 注・排水ポート間時間 114 sec (5tonf)

(travel time) 90 sec (10tonf)

84 sec (15tonf)

計算の結果、"Mass Balance Aperture"は、5 tonfの時1.92mm、10tonfの時1.52mm、15tonfの時1.42mmとなった。ここで、透水試験の実測データより求めた開口幅(Hydraulic Aperture)の結果をまとめて示すと以下のようになる。

	5tonf	10tonf	15tonf
Mass Balance Ap.	1.92mm	1.52mm	1.42mm
Hydraulic Ap.	0.20mm	0.17mm	0.15mm

このことより、物質移行にかかわる開口幅 (Mass Balance Aperture) は、透水試験の実測データから求められる亀裂の開口幅 (Hydraulic Aperture) より約9～9.5倍程度大きく、亀裂中の実流速は3乗則に基づく流速よりも1/9～1/9.5程度遅いことを示している。

#### 5-2-2 試験体C

図-13～15に、試験体Cを用いた、各載荷荷重における破過曲線を示す。トレーサーの注水開始時間は、透水開始後5分から行い、トレーサー注水時間は、約30分である。

各載荷荷重においてトレーサーの流出は、主に排水ポートのNo.3 からであった (これは、試験体Cが平滑な亀裂であれば当然の結果といえる)。排水ポートのNo.3では荷重の増加につれてトレーサーの流出開始時間が早くなっていく現象が見える。表-4に注水ポートから排水ポートNo.3までの到達時間 (travel time) を示す。この結果をもとに試験体Bと同様にして、透水試験の実測データより求めた亀裂の開口幅 (Hydraulic Aperture) と物質移行にかかわる開口幅 (Mass Balance Aperture) を算出すると以下のような結果を得た。

表-4 No.3排水ポートまでのトレーサーの到達時間

	No.3
5tonf	約 51sec
10tonf	約 36sec
15tonf	約 30sec

以下の試験結果を式(3)に代入する。

Q : トレーサー注水量	9.23E-7 m <sup>3</sup> /sec
L : 亀裂長さ	0.5 m
W : 注水ポート幅	0.1 m
t <sub>w</sub> : 注・排水ポート間時間	51 sec ( 5tonf)
(travel time)	36 sec (10tonf)
	30 sec (15tonf)

計算の結果、"Mass Balance Aperture"は、5 tonfの時0.94mm、10tonfの時0.66mm、15tonfの時0.55mmとなった。ここで、透水試験の実測データより求めた開口幅 (Hydraulic Aperture) の結果をまとめて示すと以下ようになる。

	5tonf	10tonf	15tonf
Mass Balance Ap.	0.94mm	0.66mm	0.55mm
Hydraulic Ap.	0.15mm	0.13mm	0.12mm

このことより、物質移行にかかわる開口幅 (Mass Balance Aperture) は、透水試験の実測デー

タから求められる亀裂の開口幅 (Hydraulic Aperture) より約5~6倍程度大きく、亀裂中の実流速は3乗則に基づく流速よりも1/5~1/6程度遅いことを示している。

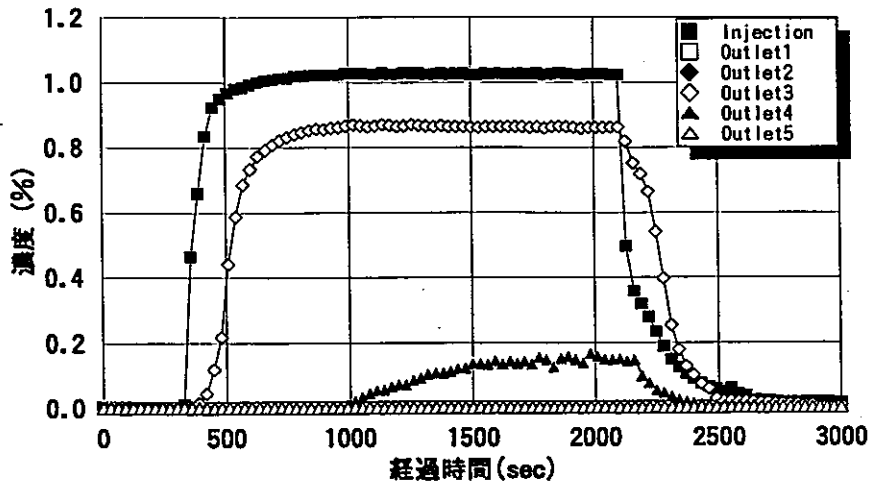


図-13 載荷荷重 5 tonfでの破過曲線 (試験体C)

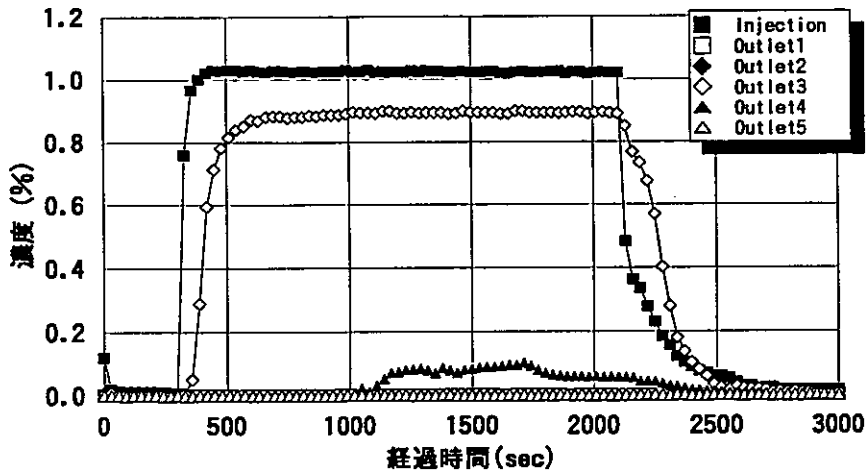


図-14 載荷荷重10tonfでの破過曲線 (試験体C)

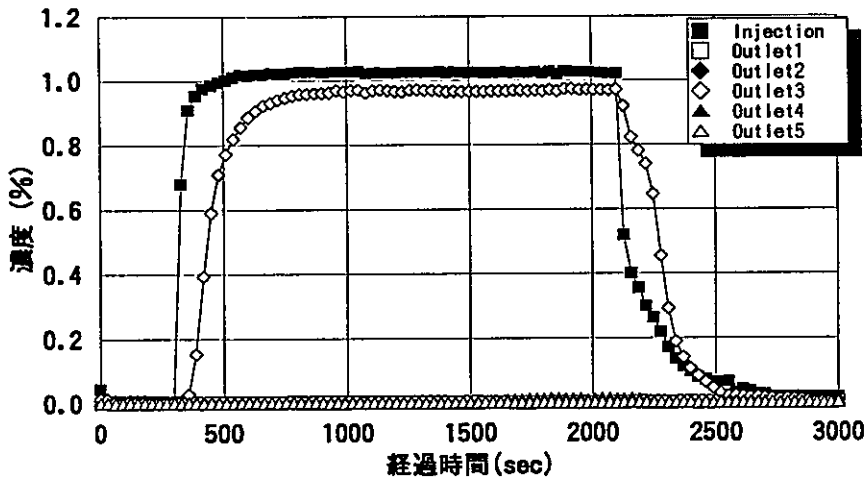


図-15 載荷荷重15tonfでの破過曲線 (試験体C)



## 6 まとめ

単一亀裂内の不均質な流れの現象を解明するために、亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK試験装置)を製作した。また、この設備を用いて人工的に亀裂を発生させた岩体を使って透水試験およびトレーサー試験を行い、以下のような結果を得た。

1. 亀裂の透水性は、亀裂に垂直に作用する荷重により変化し、亀裂の表面形状により透水性の変化の割合が違う。
2. 亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係が3乗則に抵抗係数 $f$ を導入した関係式により、よく近似できる。
3. 割裂により発生させた亀裂においては、物質移行にかかわる亀裂開口幅は、3乗則から求められる亀裂開口幅の約9~9.5倍程度大きくなる。
4. 平滑な亀裂においては、物質移行にかかわる亀裂開口幅は、3乗則から求められる亀裂開口幅の約5~6倍程度大きくなる。本岩体には、25個のセンサー孔が開いているが、もし、センサー孔がなければ、この差はさらに小さくなる可能性がある。

今後、今回用いた試験体B・Cを解体し、亀裂面の詳細な観察を行う予定である。また、原位置から採取してきた岩体についても同様な試験を行い、試験終了後に解体して亀裂面形状の観察まで行う予定である。

## 参考文献

- 1) P.A. Witherspoon 他: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resour. Res., Vol. 16, No. 6, pp1016-1024, 1980.
- 2) 例えば Y.W. Tsang: Usage of "Equivalent apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer test, Water Resour. Res., Vol. 28, No. 5, pp1451-1455, 1992.