

(33) 亀裂性媒体水理試験装置による単一亀裂岩体の透水・トレーサー試験

動力炉核燃料開発事業団

内田雅大

○ 野田兼司

(株) 大林組 技術研究所

丸山 誠

須藤 賢

Laboratory Experiment on Flow and Mass Transport Properties of Single Fracture Rock Block

Masahiro Uchida

PNC Tokai

Kenji Noda

PNC Tokai

Makoto Maruyama

Obayashi Co.Ltd

Ken Sudo

Obayashi Co.Ltd

Abstract

Fracture within fractured rock, such as granite, forms major flow path. Nuclide transport processes have close relationship with channel geometry as follows; advection is affected by cross sectional area of channel and channel length, dispersion is affected by bifurcation and merging of channels, and matrix diffusion and sorption are affected by reactive surface area of channels which contacts with solution. Therefore, it is important to understand geometry to define processes. So, we developed the equipment which is called LABROCK (LABoratory test on mass-transport in fractured ROCK). LABROCK is able to measure the distribution of pressure and tracer concentration not only at the inlet and outlet sides but also inside the fracture. LABROCK allows to understand transport processes and validate the model with detailed geometry model, and with well controlled boundary conditions. This paper summarize the preliminary result of the permeability and tracer test using 50cm cube rock blocks which have an artificial fracture. As a result, localized flow in single fracture was able to be tested by LABROCK. Also locally different aperture closure was observed under the several stress levels.

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、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、亀裂を主要な経路として起きると考えられているため、亀裂中で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。

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装置を製作し、人工的に作成した単一亀裂を含む岩石を対象に、種々の載荷条件下での透水・トレーサー試験を実施した。以下に、試験装置の概要と今までに得られた試験結果について報告する。

2. 亀裂性媒体水理試験装置の概要

今回開発した亀裂性媒体水理試験設備（以下、LABROCK試験装置と呼ぶ）は、(1)載荷本体部、(2)透水・トレーサー圧負荷装置部、(3)計測部、及び(4)試験制御・データ収録処理部、から構成される。以下に、

各機能部ごとに概説する。

(1)垂直荷重負荷装置部：亀裂開口部の閉塞を再現するため、最大15MPaの垂直応力を加えることが可能である。このため垂直荷重は最大375tonfまで載荷可能で、試験体は寸法50×50×50cmまで扱える規模の試験設備とした。

(2)透水・トレーサー圧負荷装置部：透水・トレーサー圧力負荷装置は、透水用に5基、トレーサー用に1基備えており、いずれもステッピングモーターを使用し、駆動軸との伝達にタイミングベルトとデジタル変位計を装着し、精度の高い一定流量、一定圧力での注入が可能である。トレーサー圧負荷装置は、トレーサー液による腐蝕を考慮して材質は耐食性の高いチタン合金を採用した。なお装置は全体として最大10kgf/cm²までの水圧でもリークしないよう耐圧性能を有している。

(3)測定装置部：透水量及びトレーサー量は、透水・トレーサー圧負荷装置のシリンダ内のピストン移動量をデジタルパルス型変位計（計測長さ200mm、10μmで1パルス発生）で検出し、高精度の一定流量が得られるようになっている。排水量の測定は、最大5ヶ所において、試験体排水側と接続する越流水槽を内蔵した集水ポットの中で越流した排水量の重量を電子天秤で測定する。なお、排水側の集水ポット内の越流水槽は、試験体内に空気が混入しないように設けるとともに背圧を負荷できる機構も備えている。圧力の測定は、試験体注水部に5カ所、試験体内部に25カ所及び排水部に1カ所、それぞれ容量2kgf/cm²の圧力計を設置した。濃度の測定は、注水部1カ所と排水部5カ所及び試験体内部25カ所に導電率型の濃度計を入れ、トレーサー濃度の経時変化を測定する。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納されている。また、こ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での透水・トレーサー試験も可能である。

(4)試験制御・データ収録／処理部：試験装置の制御は、ワークステーションからの指令で作動する試験制御装置（シーケンサー）で行い、操作性や保守性を考慮して簡易な手動操作でも作動できるようにした。シーケンサーは透水・トレーサー負荷制御や切り替え用の電磁弁制御に必要な機器構成となっている。電磁弁は、電気信号によりバルブの開閉を行い、透水用は耐圧10kgf/cm²、毎分100ccの流量に対しても十分機能するものである。トレーサー用は、耐圧4kgf/cm²で耐食性の高いものを使用した。データの収録／処理は、計測センサーの収録をデータロガーで行い、GP-IBインターフェイスにより上位のワークステーションに転送するシステムとした。データ処理では、試験体内部と注入・排水部の計測データを用いて、亀裂全体の濃度や圧力分布を補間処理によって求めるアルゴリズムを考案し、精度良くリアルタイムに分布図を得ることができる。図-1に装置の概要と計測位置を、表-1に装置仕様の概要を示す。

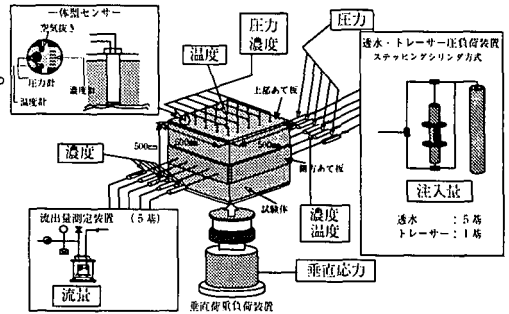


図-1 装置概要と計測位置

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)
注入装置	ステッピングモーターによる圧力フィードバック方式 試験体側面5ヶ所から注入可能(最大注入圧: 10kgf/cm ²) 透水路 : 5基 (注入能力: 10cc/min~100cc/min) トレーサー用: 1基 (注入能力: 40cc/min~400cc/min)
測定装置	注入量 : ステッピングシリンダの変位量 (マグネスケール) 排水量 : 電子天秤 : 5ヶ所 (0~7kg) 圧力 (0~2kgf/cm ²) : 5ヶ所 注水ポート : 5ヶ所 岩体内部 : 25ヶ所 (一体型センサー: 直径17mm) 排水ポート : 1ヶ所 濃度 (0~3%) : 5ヶ所 注水ポート : 5ヶ所 岩体内部 : 25ヶ所 (一体型センサー: 直径17mm) 排水ポート : 1ヶ所 温度 : 注水ポート : 1ヶ所 岩体内部 : 1ヶ所 (一体型センサー: 直径17mm) 排水ポート : 1ヶ所 室温 : 1ヶ所

3. 単一亀裂を有する試験体を用いた試験

3.1 試験体の概要

今回の試験には、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スペーサーとしてセットし、再び重ね合わせ、切断面を平滑な亀裂とみなした試験体（試験体A：平滑亀裂）、同じく一辺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、亀裂を発生させ、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：凹凸亀裂）の2種類の試験体を使用した。双方の試験体には、合計25孔のセンサー孔を穿孔している。この計測孔には濃度計、圧力計及び温度計の組み込まれた一体型のセンサーを設置した。また、試験体側面のうち、注水及び排水する部分は各々5区間に分割して5つのポートを設置し、残りの側面は、当て板と軟質ゴムを接着して止水し、不透水境界とした。試験体の外観を図-2に示す。

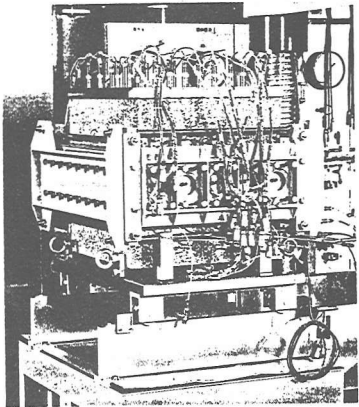


図-2 試験体の外観

3.2 試験方法

単一亀裂内を流れるトレーサー挙動を捉えるために、一方向の透水・トレーサー試験を行った。透水試験は、注水側の5つのポートに各ポートが等圧となる流量を各々スッテピングシリンダーから注水し、排水側の5つのポートに接続した各々同一高さの越流槽から越流する排水量を測定する。また、トレーサー試験は、透水試験で流れが定常状態に達した後に、注水側の5つのポートのうち中央のポートの流入水をトレーサー液（濃度1%の塩水）に切り替えた。試験は、亀裂の開口幅を変化させる目的で、垂直荷重を5tonf～15tonfの間で段階的に変化させて実施した。測定項目は、注水側で区分した5つのポートの流量、圧力、濃度と排水側の5つのポートで流量、濃度および試験体内部の亀裂位置での25点の圧力、濃度である。温度は、室内、注水・排水側、試験体内部で測定した。

4. 試験結果と考察

4-1 透水試験結果と考察

透水試験で得られた試験体A、試験体Bの亀裂内部の圧力分布を各々図-3、図-4に示す。各図とも試験開始後20分を示す。また、図-5には、10tonf載荷時の5つの対面する注水・排水ポートの流量比を示す。図-3より、試験体Aの平滑な亀裂の圧力分布は、透水方向と直交してほぼ等間隔で水平に分布していることが分かる。ただし、止水した側面部には計測点がないので、補間処理して求めた圧力分布の側部には誤差が生じる。一方、図-4に示す試験体Bの凹凸のある亀裂の圧力分布は、透水方向と直交しておらず、右に傾いた圧力分布がみられ、排水ポートNo. 1の方向へ流れが生じていると思われる。また、図-5に示すように、試験体Aの注水側と排水

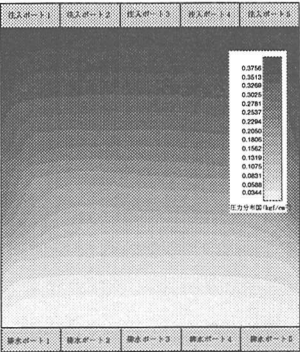


図-3 平滑亀裂圧力分布図

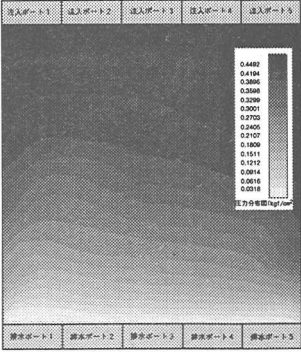


図-4 凹凸亀裂圧力分布図

側で各々対面する区分されたポートの流量の比は、ほぼ1であり、一次元の流れが生じていることが推定できる。一方、試験体Bでは注水側と排水側で各々対面する区分されたポートの流量の比は異なり、亀裂内で不均質な流れが生じていることを示している。次に、垂直荷重を載荷する際に、試験体側面に変位計を取り付け、各載荷段階での亀裂に垂直な方向への変位を測定し、これを亀裂の閉合量とみなして亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係性を調べた。

Witherspoon等¹⁾が報告した亀裂の特徴を表す抵抗係数 f を導入した修正3乗則 (1)(2)式) を用いてフィッティングを行った結果を図-6、図-7に示す。

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

Q は流量、 Δh 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。ここで C は、直線流れであるため次式で求める。

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

ここで、 W は亀裂の幅、 L は亀裂の長さ、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 μ は流体の粘性係数である。また、初期開口幅は、載荷荷重が0 tonfの結果を用い、亀裂閉合量を0mmとして(1)式に代入して $2b_0$ を算出した。結果として、試験体Aでは、初期開口幅 0.17mm、抵抗係数 11、試験体Bでは初期開口幅 0.25mm、抵抗係数 28となり、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することができた。なお試験体Aで、抵抗係数 11が算出されたのは試験体内のセンサー孔が影響しているためと考えられる。

4-2 トレーサー試験結果と考察

トレーサー試験で得られた試験体Aの亀裂内部のトレーサー濃度分布を図-8に、試験体Bの垂直荷重5 tonf、10tonf、15tonfの場合の亀裂内部のトレーサー濃度分布を図-9、図-10、図-11に示す。各図とも試験開始20分後の状況である。図-8に示すように、試験体Aの平滑な亀裂内部の濃度分布は、透水方向に沿って分布していることから、明らかに一次元の流れが生じていることが測定結果から確認できる。一方、図-9～11に示すように、試験体Bの凹凸のある亀裂内部の濃度分布は、垂直荷重5 tonfの場合でも排水側に近づくに従って左

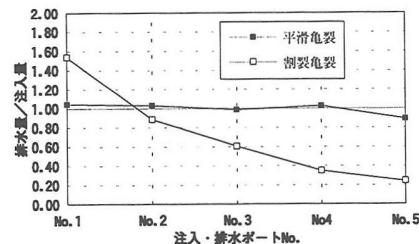


図-5 対面するポートの流量比

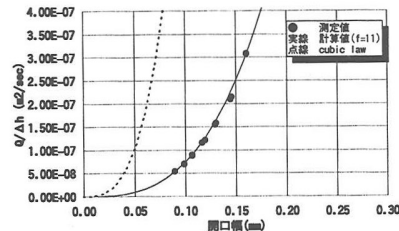


図-6 亀裂の透水性と開口幅の関係 (試験体A)

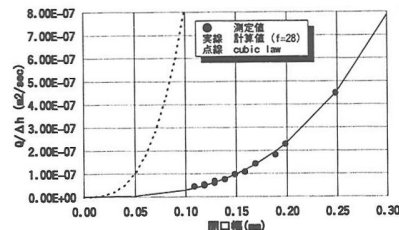


図-7 亀裂の透水性と開口幅の関係 (試験体B)

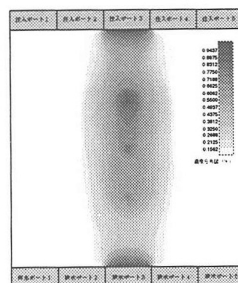


図-8 平滑亀裂濃度分布図 (10tonf)

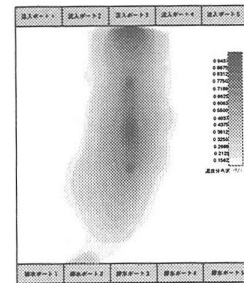


図-9 凹凸亀裂濃度分布図 (5tonf)

側へ曲がる様子が分かる。垂直荷重が、10tonf、15tonfと増加するに従って、その傾向が強くなることが測定結果から確認できる。これは、垂直荷重が10tonf、15tonfの濃度分布の急激な曲がり方から凹凸のある亀裂のかみ合わせの影響で亀裂開口幅が変化して通水経路が変化したものと考えられる。図-12~14に、各垂直荷重段階での破過曲線を示す。注水側の5つのポートの中央にトレーサーを注入した開始時間は、透水開始後5分で、トレーサー注入時間は、約71分である。注水側のNo. 3ポートから注入したトレーサーは、排水側のNo. 1、No. 2、No. 3のポートから排出された。注水ポートNo. 3からの亀裂内部の卓越した水みちは、排水ポートNo. 2への経路であると思われる。以上の結果から、この試験装置で亀裂状媒体の単一亀裂内の流れのチャネリング現象を把握することが可能であることがわかった。

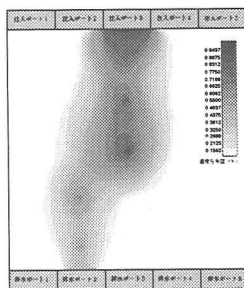


図-10 凹凸亀裂濃度分布図
(10tonf)

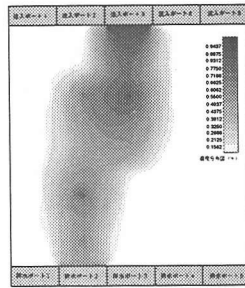


図-11 凹凸亀裂濃度分布図
(15tonf)

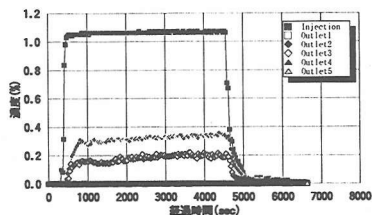


図-12 荷重 5 tonfの時の破過曲線

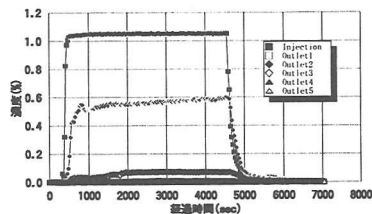


図-13 荷重10tonfの時の破過曲線

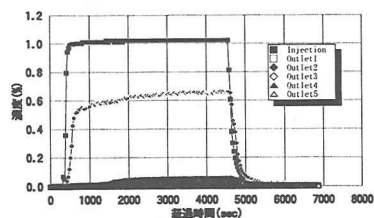


図-14 荷重15tonfの時の破過曲線

5. まとめ

亀裂状媒体の単一亀裂内の流れのチャネリング現象を把握することを目的に、亀裂内の圧力分布やトレーサー濃度分布が測定可能である試験装置と試験手法を開発した。この試験装置の基本的な機能を確認するために人工的な単一亀裂を有する花崗岩試験体を用いて、透水・トレーサー試験を行い、平滑な亀裂と凹凸のある亀裂の圧力分布や濃度分布が測定できることを確認した。この試験装置は、一方向の透水・トレーサー試験のほかに、放射流試験、試験体に設置する計測センサー孔を利用した孔間透水試験等も実施可能である。今後は、自然の単一亀裂を極力乱さないよう採取した岩体を試験体として試験を行い、亀裂内の流れのチャネリング現象を解明するためのデータの蓄積と亀裂性岩盤の移流・拡散解析モデルの妥当性の検証に役立てていく予定である。

(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.