

(34) 花崗岩亀裂中の浸透・物質移行に関する実験的研究

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

Experimental Study on Fluid and Mass Transport through a Single Fracture in Granitic Rock

Michito SHIMO, Taisei Corporation
Shigeru IIHOSHI, Taisei Corporation

ABSTRACT

Existing laboratory and field tracer tests suggest that fluid and mass transport in a fracture is significantly controlled by a pore structure in each fracture. For the development and the validation of a model which can simulate such a heterogeneous flow, the accumulation of experimental data is essential.

This paper describes a laboratory study on fluid and mass transport through a natural fracture in granitic rock. A series of injection and tracer tests were conducted using a 30 cm cube granitic rock with a natural fracture. The flow rate and pressure distributions along the fracture was measured during the injection test. The obtained data was used for inverse analysis and transmissivity and flow rate profile were obtained. A tracer test were also conducted using a NaBr solution and the breakthrough was measured at the several points on the outflow boundary.

These results clearly revealed a channel structure in a fracture. Tracer was detected at only a limited location suggesting very few mixing effect.

1. はじめに

不連続性岩盤内の地下水や物質移行現象には、個々の亀裂内の空隙の構造が大きく係わっている。単一亀裂内の流れは、通常、2枚の平行平板中の粘性流体の流れとしてモデル化される。この場合、亀裂の透水量係数と平均開口幅の間には、いわゆる3乗則が成立する。しかし、Neretnieks¹⁾らが行った室内トレーサー実験や、Abelin²⁾らの原位置試験結果によると、地下水は、亀裂内をくまなく均等に流れるというよりも、ある限られた部分を選択的に流れるものと考えられる。このことは、特に物質移行解析への三乗則の適用性または適用方法を考える上で、非常に重要な示唆を与えている。上記の実験結果が発表されて以来、各方面で研究が進められているが、亀裂内の流れを詳細に調べたデータの蓄積は十分であるとは言えない。そこで、筆者らは、自然亀裂を有する花崗岩ブロック試料を用いて一連の透水試験を行い、亀裂面に沿った流量・圧力分布を測定した。また、得られたデータを用いて逆解析を行ない、亀裂内部の透水性のプロファイルおよび流れの分布を求めた。さらに、同試料を用いたトレーサー試験および粒子追跡法解析を行ない、亀裂内の物質移行経路について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験に用いた試料

実験には、茨城県笠間市産の花崗岩を用いた。単一亀裂を有する約2m×1.3mの岩塊から、亀裂を含む30cm角のブロックを2個切り出し、この内の一つを今回の実験に用いた。亀裂は、図-1に示すように、ほぼ平面で試料を斜めに貫いている。後述の透水試験およびトレーサー試験において、亀裂に沿った流量や圧力および濃度を測定するために、文献3)と同様な方法で、試料の表面に複数の注排水孔を取り付けた。図-1に示すように、15mm×30mmの開口部が、5mm幅の仕切部を挟んで多数ならんだシリコンゴム製の止水エレメントを、亀裂に沿ってブロック4面に取り付け、その外側に300mm×300mm×10mmのポリカーボネート板を装着した。このポリカーボネートに荷重を加え、止水エレメントをブロック表面に押し付けることにより、亀裂を水理的に独立した領域に分割する。分割区間の数は、図-1のA、A'面で13個、B、B'面で14個である。文献

3) では、水压による圧着方法を取ったが、本試験では、図-2に示すように、20本づつの鉄板とボルトにより締め付けた。なお、各ボルトには、ひずみゲージを貼付して、荷重が 50 kg / cm^2 程度で均等になるように締め付けた。

2. 2 実験装置の構成

透水試験およびトレーサー試験に用いた装置の構成を、図-3に示す。全ての分割区間には、注排水または圧力測定を行うために、ワンタッチチューブ継手を取り付けた。透水試験では、注水側に油圧サーボ方式の定圧注水ポンプを、排水側に一定空気圧に保たれたスタンドパイプを接続した。注水差圧は、注排水両側に取り付けた中継タンクに差圧計（圧力範囲： $0\sim0.5\text{MPa}$ ）を取り付けて測定した。注排水面以外の箇所での圧力測定にも差圧計を用いた。一方、トレーサー試験においては、トレーサーを注入する箇所と純水（脱気・脱イオン水）を注入する箇所ごとに、2台の定流量ポンプによる注水を行った。図3bに示すように、トレーサー注入用配管の途中で三方弁により配管を2系統に分け、片方に純水の入ったチューブを、もう片方にトレーサーの入ったチューブを接続した。トレーサー試験前に、純水を1時間以上流し、亀裂内の流れがほぼ定常となるのを待った後、三方弁を切り替え、トレーサーの注入を開始した。濃度測定用に、2本の白金線を使った伝導度センサーを作成し、トレーサー注入箇所および排水側の全ての区間に取り付けた。測定は、一台の伝導度計を用い、各伝導度センサーをスキャナーで順次切り替えながら行った。

2. 3 実験方法

(1) 透水試験

透水試験は、図-4に示すような9種類の境界条件のもとで実施した。このように多数の境界条件で試験を行ったのは、後述の逆解析により、亀裂内部の透水係数を求めるためである。各境界条件のもとで、往復方向の注水試験を行い、注水量（全量）、排水量（個別）および圧力（注排水面以外の全ての区間）の測定を行い、全部で圧力284点、流量202点のデータを取得した。注水量は、プースターの変位と断面積から、排水流量はスタンドパイプ内の水位変化から求めた。注水差圧は、 0.1MPa （注水圧 0.2MPa 、排水圧 0.1MPa ）とした。

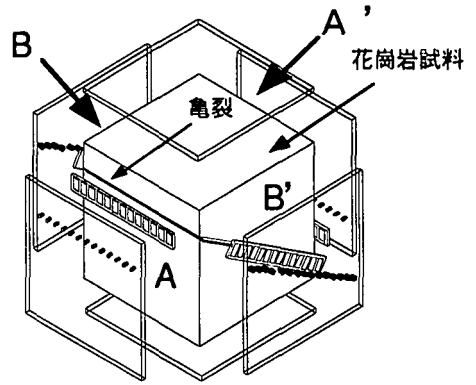


図-1 自然亀裂を有する花崗岩試料と止水エレメント

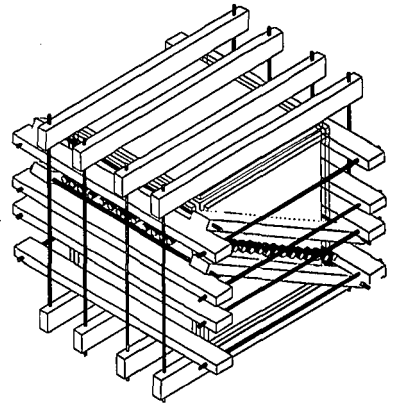


図-2 止水エレメントを取り付けた供試体

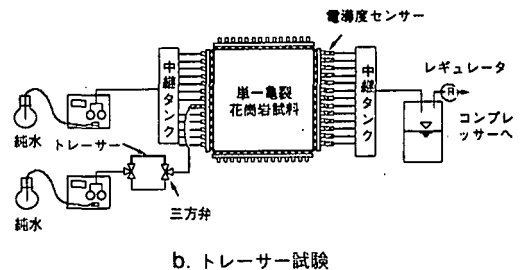
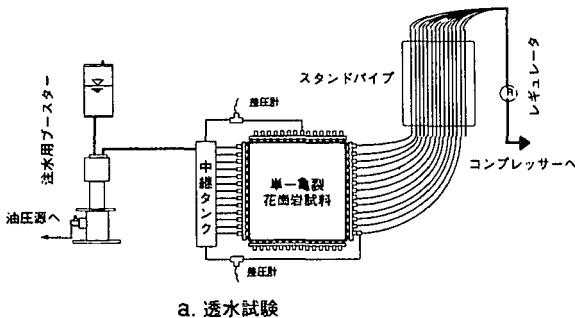


図-3 試験装置の構成

(2) トレーサー試験

トレーサー試験は、図-4に示した透水試験のうち、最初の2ケース(A↔A'、B↔B')の透水条件のもとで行った。注水側の一箇所から10,000ppmのNaBr溶液(約2cc)を、他の箇所から純水を注入し、排水側の全ての区間で伝導度を測定した。トレーサー注入箇所は、A6(A→A')、A'7(A'→A)、B8(B→B')、B'8(B'→B)である。伝導度の計測は、1箇所あたり5秒間測定したが、透水試験と同じ流量で予備試験を行ったところ、濃度変化が速く、ブレイクスルーのピークを正確に捉えられなかったため、トレーサーおよび純水の注入量を、透水試験結果の1/8に設定した。

3. 実験結果

3. 1 透水試験結果

(1) 流量分布

図-5に、透水試験で得られた流量分布のうち、4種類の境界条件に対する結果を示す。図に示すように、流量は区間ごとに大きく異なる。たとえば、A↔A'方向の注水では、1000cc/hrを越す流量の区間が存在する一方で、A1~A2およびA7~A9(番号は、図-4参照)では、ほとんど流れが見られなかった。斜め方向に注水した場合にも、卓越した流量が生じる箇所が見られる。A↔A'およびB↔B'方向の注水総流量は、それぞれ3120.4cc/hrおよび3474.0cc/hrであり、平行平板を仮定して、次式により開口幅を計算すると、それぞれ5.1μmおよび4.4μmとなる。

$$Q = \frac{b_H^3 g}{12\nu} B i \quad (1)$$

ここに、Q: 流量 (cm³/sec)、b_H: 開口幅 (cm)、g: 重力加速度(cm/sec²)、ν: 動粘性係数 (cm²/sec)、B: 亀裂幅 (A面30cm、B面38cm)、i (=ΔH/L): 動水勾配、ΔH: 水頭差 (cm)、L: 亀裂長さ (A面38cm、B面30cm)である。

(2) 圧力分布

図-6に、図-5の各試験に対応する圧力測定結果を示す。図より、圧力は上流側から下流側に向かって減少するものの、その途中で圧力が急変する箇所が見られる。特に、B→B'方向では、A、A'面ともB'面の近傍で大きな圧力低下が生じており、B'面付近に透水性の低い領域が分布すると考えられる。

3. 2 トレーサー試験結果

図-7に、4ケースのトレーサー試験で得られたブレイクスルーカーブを示す。いずれのケースにおいても、排水側では一箇所の区間でしかトレーサーは検出されなかった。この理由については、後程考察する。各試験のトレーサーの滞留時間は、940sec、450sec、480sec、480secであり、 $b_M = Q^*/BL$ (Q*: 滞留時間)として、平均亀裂幅b_Mを求めると、103μm、61μm、54μm、66μmとなる。ただし、流路幅Bは、注水面の亀裂長さを注水区間数で割った値(AA'面で2.3cm、BB'面で2.7cm)を用いた。

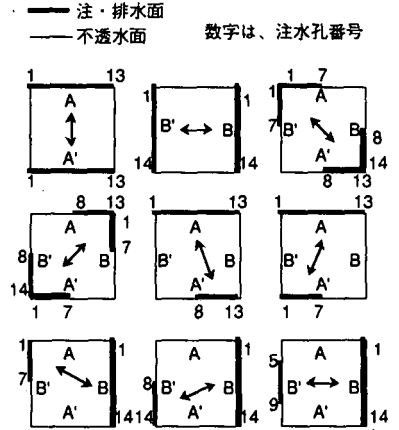


図-4 透水試験条件

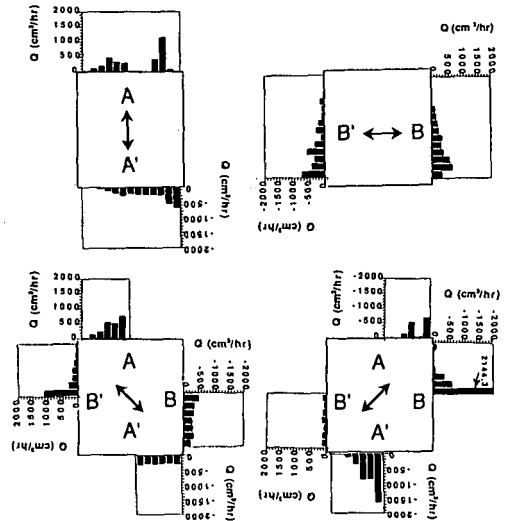


図-5 流量分布

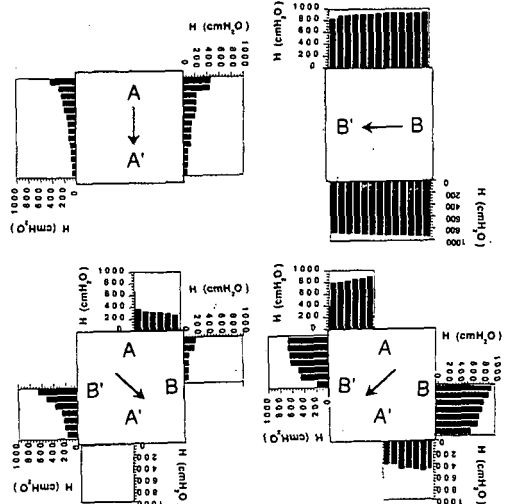


図-6 圧力分布

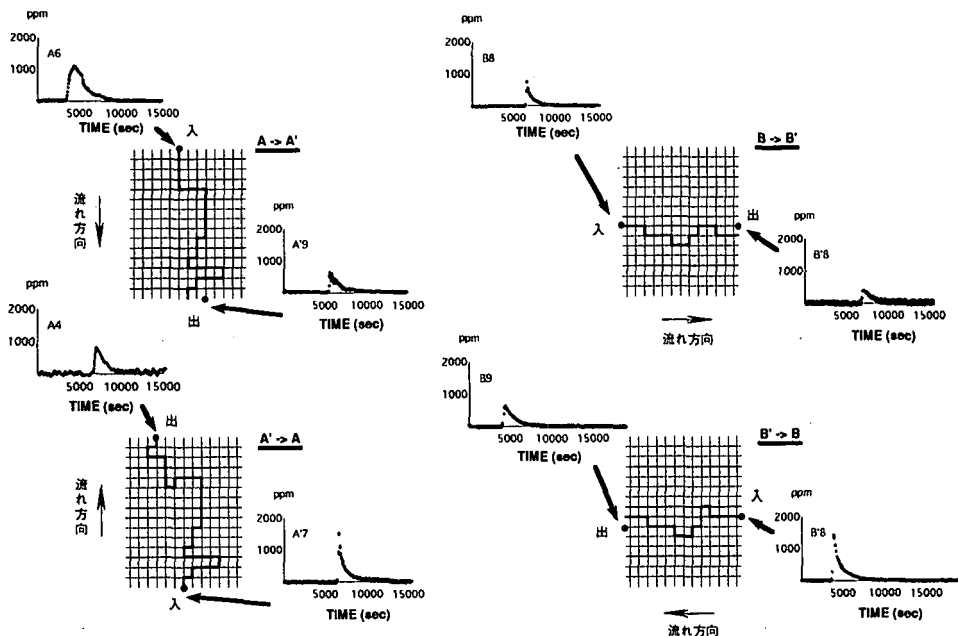


図-7 トレーサー試験結果 (解析で求めた移行経路を併記)

4. データ解析および考察

4. 1 逆解析による透水性および流量分布の評価

透水試験で得られた流量、圧力データをもとに逆解析を行い、亀裂内の透水係数の空間分布を求めた。逆解析手法は、文献4) に準じた手法を用いた。ただし、前回は圧力の観測値と解析結果の差の2乗を目的関数としたが、今回は、流量と圧力の両方を考慮した目的関数 $J = (h_{max} - h_{cal})^2 / \sigma_h^2 + (q_{max} - q_{cal})^2 / \sigma_q^2$ (ここに、obs.、cal. は、それぞれ測定結果、解析結果を、 σ_h 、 σ_q は、水頭、流量の標準偏差を示す。) を最小化するように、手法の改良を行った。手法の詳細については、紙面の都合により別の機会に報告する。解析には、236個の節点と391個の線要素からなる格子モデルを用いた。図-9に、逆解析で得られた透水量係数(透水係数に亀裂幅を掛けたもの)の分布を示す。図より、亀裂内部においては、透水量係数が数オーダーにわたって分布していることが伺える。全要素の透水量係数Tの対数平均は $1.16 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、平行平板を仮定した式 $T = \langle b_H \rangle^2 g / 12v$ を用いて水理学的開口幅 b_H を計算すると、 $5.2 \mu\text{m}$ となり、3. 1(1)で求めた開口幅とほぼ一致する。

図-9、10は、A-A' 方向およびB-B' 方向の透水試験で得られた流量と圧力の測定値と解析結果を比較したものである。図より、両者は良好な整合性が見られ、逆解析で得られた透水係数分布の信頼性が高いことを裏付けている。一方、図-11は、図-9の透水係数分布を用いて順解析を行い、A-A' およびB-B' 方向の流量分布を計算した結果である。図より、自然亀裂内では、平行平板で想定されるような均一な流れではなく、流量が場所的に大きく異なる不均一な流れ、いわゆるチャンネルリングが生じている様子が明確に示された。

4. 2 トレーサー挙動のシミュレーション

今回のトレーサー試験では、前述のとおり、各ケースともただ一つの区間でしかトレーサーは検出されなかった。このことは、亀裂内では流れ直交方向の分散はほとんど生じていないことを示している。亀裂内における分散または拡散が生じる原因としては、①乱流拡散、②分子拡散、③流路交差部の合流分配等が考えられるが、今回の結果から考えると、亀裂内の流れが層流であり、しかも分子拡散が生じるほどの滞留時間が無く、①、②による分散・拡散が見られなかったものと思われる。また、亀裂内でチャンネルリングが生じているにも拘わらず、トレーサーは、チャンネル交差部においても、混合分岐がほとんど生じていないと理解される。言い換えると、トレーサーは亀裂内を一本の流線に沿って移行していると考えられる。物質移行シミュレーションに用いられる通常の粒子追跡法では、個々の粒子は、流れの合流部で流量の比に比例した確率で流下する要素を選択する。しかし、この方法によると、必ず移行経路が分岐し、複数の排水区間にトレーサーが到達する結果が得られる。こ

れは、今回の結果と整合性がない。そこで、「粒子は最大流量を有する流路を選択する」と仮定して移行経路の計算を行なった。その結果、図-7中に示したとおり、4つのケースとも、トレーサー流出区間位置が実測結果とはほぼ一致した。このことから、トレーサーは、流路の交差部でほとんど混合をおこさず、最大流量を有する方向に流下していることが裏付けられた。このことは、トレーサー試験結果から得られた開口幅が、透水試験で得た値に比べて1オーダー大きかったことの原因の一つと思われる。

5. まとめ

一連の透水・トレーサー試験により、単一亀裂内の透水・物質移行現象を詳細に調べた。透水試験で得られた流量・圧力データの逆解析により、亀裂内部の不均一な透水係数や流量の分布が求められ、亀裂内でチャンネルが生じている様子が明確にとらえられた。また、トレーサーが、排水区間の一箇所のみしか検出されなかったことから、トレーサーは、亀裂面内を一本の流線に沿って移行しており、チャンネルの分岐合流による分散効果は少ないことが示唆された。ただし、これはあくまでも室内試験結果であり、原位置における確認が望まれる。

謝辞

実験にご協力頂いた、第一計測(株)土屋慶洋氏、大成サービス(株)鈴木学氏、逆解析プログラムの開発にご協力頂いた(株)ユニテックの久保紳氏に謝意を表します。

参考文献

1. Neretnieks et. al., Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock: Some Experimental Results and Their Interpretation, Water Resources Res., Vol 18, 849, 1982.
2. Final Report of the Migration in a Single Fracture-Experimental Results and Evaluation, Stripa Project TR85-03, 1985.
3. 下茂、飯星：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、第25回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.491-495、1993.
4. 下茂、飯星：3次元逆解析による不連続性岩盤の透水性分布の評価、第9回岩の力学国内シンポジウム、pp.151-156、1994.

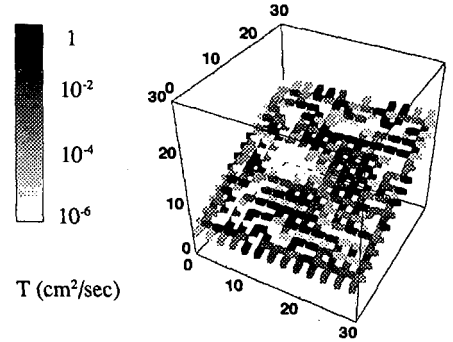


図-8 透水量係数の分布

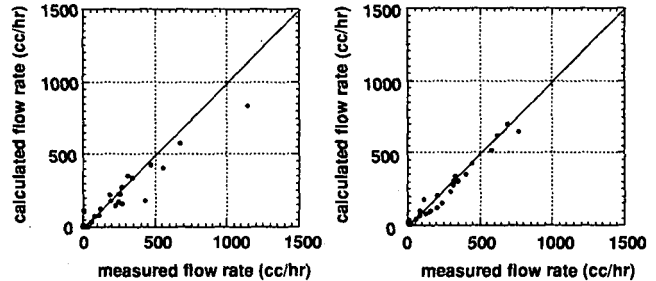


図-9 流量の解析値と測定値の比較

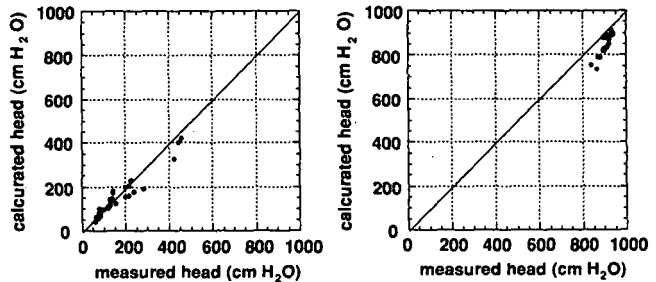


図-10 圧力の解析値と測定値の比較

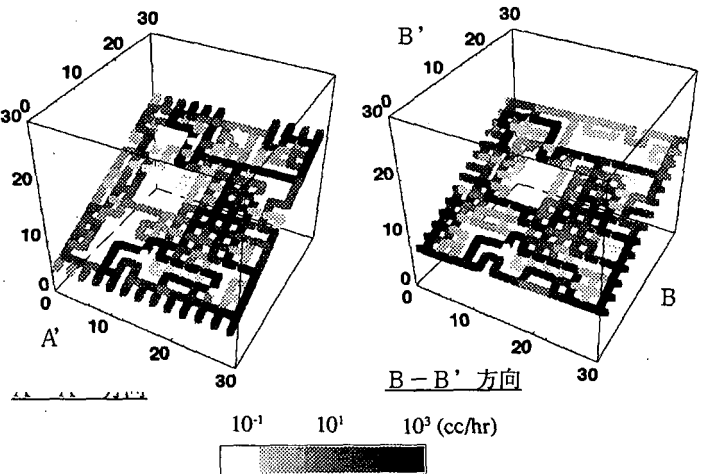


図-11 流量の解析値と測定値の比較