単一亀裂内の非線形流れに関する実験的・解析的研究
その1～エポキシ製岩石亀裂レプリカ試料による
非線形流れの実験およびパラメータの検討*

岩井 卓**・登坂博行***

Experimental and analytical study on non-linear
flow through single fracture
Part 1— Experiment and parameterization of non-linear
flow using epoxy replicas of rock fracture

Taku IWAI ** and Hiroyuki TOSAKA ***

Abstract

The fluid flow through a rough walled rock fracture has a big influence on advection, diffusion and dispersion of solvent. On groundwater simulation, Darcy's law is basically used as a dominant equation. But in a rock fracture, the velocity of fluid flow sometimes becomes very large and there is a possibility that non-linear/non-Darcy flow occurs. In this paper, many epoxy replicas of rock fracture are prepared and some experiments of single-phase flow are carried out in order to define the specific parameters of non-linear flow behavior. The topographical shape and three-dimensional spatial distribution of aperture in a fracture are measured in detail. Water or air is injected into the fracture in order to investigate the relationship between the flux and the pressure drop gradient in the steady state condition. As a result, it is confirmed that the pressure gradient could be well approximated to a quadratic function of the flux, and that the non-linear character becomes prominent in the case where the order of Reynolds number of the flux becomes more than 1. In addition, a relatively good

* 本論文の一部は日本地下水学会2001年秋季講演会(2001年10月11日、12日)、日本応用地質学会研究発表会(2001年10月31日、11月1日)にて発表。

** 出光エンジニアリング株式会社技術部

*** 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻

relationship between the specific parameter of the non-linear flow and the geometrical parameter of the fracture surface is found. The authors also newly propose a non-linear equation regressed from all the experimental results in this study and confirm the difference between this equation and some other equations that had already been suggested in past studies with regard to non-linear flow in porous media. The equation proposed in this study would be useful for a simulation study adapted to underground water since the effect of non-linearity can be estimated if the permeability in the region of a flow is defined from the experimental results of hydraulic tests.

Key Words: single-phase flow, flow through single fracture, epoxy replica of rock fracture, non-Darcy flow, non-linear flow

要 旨

岩盤中の亀裂は水の流れ、物質の移流・分散・拡散の大きな支配要因である。通常、地下水流れは基本方程式としてダルシー則を用いているが、亀裂内の流れは時として非常に高速であり、この適用範囲を逸脱した非線形流れ（非ダルシー流れ）が生じることがある。著者等は亀裂性媒体中における非線形流れの構成則の特性パラメータを明らかにする目的で、岩盤単一亀裂のエポキシ製レプリカを多数作成し、単一亀裂内の流体流動を捉える実験を行った。実験では、亀裂の起伏、亀裂開口幅の3次元分布を詳細に測定した後、水あるいは空気単相状態で定常実験を実施し、流量および圧力勾配の関係を計測した。その結果、圧力勾配は流量の2次関数としてよく近似でき、レイノルズ数が1以上のオーダーになると、非線形性が顕著となることが確認された。また、非線形流れの特性パラメータと亀裂面の幾何的特性を表すパラメータとの間には比較的良好な相関があることを確認した。さらに、全ての試料の結果から回帰される単一亀裂内における非線形流動方程式を提案し、多孔質媒体中の非線形流れに対して過去に提唱されたいくつかの式と比較し、その違いを確認した。本提案式は、様々な幾何形状の亀裂においても水理試験によって得られる領域の浸透率がわかれば非線形効果がわかる形で表現されており、地下水解析上有用なものと考えられる。

キーワード：単相流動、単一亀裂内流れ、エポキシ製レプリカ、非ダルシー流れ、非線形流れ

1. はじめに

地下水流動の解析が近年広く行われ、水資源量評価、水汚染対策など環境評価の重要な手段と位置付けられている。一般的に、地盤・岩盤中の地下水流れは、層流状態の遅い流れである場合、流

速とポテンシャル勾配が線形関係にあるダルシー流れとして十分な近似が出来ると考えられている。通常利用されている汎用的な地下水解析コードもそれを基本としたものである。

しかし、ダルシー流れから逸脱するような、より高速の流れ（以降非線形流れと呼ぶことにす

る)が生じる場合も稀ではないと考えられる。非線形流れは、大きな流路をもつ地盤・岩盤中では十分起こりえるものである。例えばその一つは、地表付近の土壌・風化岩石中などの動植物による比較的大きな流路を通る水流であり、地表面の直接流出に対して中間流出と呼ばれるものである。山地斜面は勾配も大きく、中間流出は局所的な乱流が支配的になるとも考えられるものである。また、石灰岩地帯においては、雨水による溶蝕の結果形成される複雑な流路が発達し、地下水流動は線形のダルシー則では捉えきれない様相を呈すると考えられている(例えば、北原(1989))。

ダムの建設時の調査においても、割れ目系岩盤では、水理試験(主としてルジオン試験)の結果に非線形性が観測されることが報告されている(例えば、Yamaguchi *et al.* (1997))。これは、このような試験結果からダルシー流れを仮定して透水係数を導出することに注意を要することを示している。

山岳地帯を通過するトンネルや大深度地下空間(地下備蓄空洞など)などの施工時に、掘削進路が断層破碎帯を貫くことがあるが、その際、大きな湧水が生じることがある。破碎帯の連続性によっては湧水が継続し、流速が非線形流れの領域に達することもある。

さらに、廃棄物処分(低中レベル放射性廃棄物、高レベル放射性廃棄物、高毒性化学物質など)などの地下隔離においても、高透水流路における流体流動の解明が急がれている。Tsang *et al.* (2000)はYucca Mountainの地下トンネル中で径が7.57cmのボーリングから空気を圧入し、流量と圧力との関係から亀裂性岩体の浸透率を評価したが、その結果によると浸透率の大きいものは 10^{-11} (m^2)程度のオーダーであった。このような亀裂性岩盤において地下水位以下数10mの位置に空洞が掘削されることを仮定すると、その圧力勾配は $10^0 \sim 10^3 \text{ kPa/m}$ 程度になることが想定され、それによる地下水流れのレイノルズ数は $10^0 \sim 10^2$ のオーダーとなり、これはダルシー則の適用範囲外に及んでいることがわかる。

このような、非線形流れの基本的な構成則は、当初多孔質媒体で多数の検討が行われた。それによると、ポテンシャル勾配は流速の二次式により表現され、二つの特性パラメータ(浸透率に対応す

るパラメータと媒質の幾何形状に起因する慣性効果を表すパラメータ)が存在することが知られている(例えば、Ergun (1952)、Schneebeli (1955))。また、この式はダルシー流れの領域から非線形性の卓越する領域まで包含したもので、全体をかなり良く近似できるとされる(例えば、Irmay (1964)、Ward (1964))。しかし、多孔質媒体に対する非線形構成則はこのようにいくつか提案されているものの、同じ媒質であっても使う式により算定結果が相互に異なること、亀裂媒体中の非線形流れについては実験結果として報告されているものが少ないこと、などが問題で、特性パラメータをどのように与えればよいか明らかではない。

前述のように、亀裂中の流れについても、通常はダルシー則の範囲で等価多孔質体に置き換え、解析しているのが現状である。これは、非線形流れが起こるとしても、①構成則の特性パラメータが簡単に決まらないこと、②非線形の関係式を解くこと自体が解析上不安定性をもたらすこと、③現状では、非線形の効果を特に問題としないことが多いこと、などによる。しかし、水みちとなる割れ目自体をなるべく現実的にモデル化したネットワークモデルなどの利用により、物質の移流分散を表現する試みが行われつつあり(例えば、Kolditz (1995)、Mazurek *et al.* (1998))、今後、標準的に非線形性までも含めた広範囲の流れの定式化を確立しておくことが重要と考えられる。

そこで、以下を目的とした研究を行った。

(1) 亀裂媒体中の非線形流れ特性パラメータの実験的把握

非線形流れの二つの特性パラメータを評価するため、岩石亀裂のレプリカを複数作成し、高レイノルズ数領域での単相流実験(空気単相流あるいは水単相流)を行い、実験時観測量(流量、ポテンシャル勾配)から導出される非線形流れの特性パラメータと亀裂面の幾何特性との関係を論じる。なお、複数の亀裂サンプルおよび複数の流体を用いて、なるべく一般性のある議論を行う。

(2) 亀裂媒体中の非線形流れの理論的検討

ミクロ的には、亀裂面内の流動は、開口幅の変化する流路内の擬似三次元的流体流動であり、ナビヤ・ストークス方程式を基本として非線形性の説明が可能と考えられる。そのような理論的考察

を試み、アップスケーリングの方法を検討する。また、既存地下水解析シミュレータに非線形構成則を組み込み、解の安定性、広い流速範囲での適用性を確認する。

本論文は、その第一報として、(1) の実験的検討の内容を報告したものである。(2) については続報の予定である。

2. 従来の研究

一般的に、流体流動は次式で示されるような、3次元のナビヤ・ストークス方程式で表現される。

$$\text{grad}\left(\frac{P}{\rho} + \Omega\right) = -\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} - (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} + \nu \Delta \vec{U} \quad (1)$$

上式において P [Pa] は圧力、 Ω [m²/s²] はポテンシャル、 ρ [kg/m³] は密度、 $\vec{U}$ [m/s] は流速ベクトル、 ν [m²/s] は動粘性係数、 t [s] は時間を示す。

しかし、式 (1) を亀裂内流動について厳密に解くことは非常に困難であり、非現実的である。そのため、いくつかの仮定をし、方程式を近似することが必要となる。最も基本的には、レイノルズ数が十分に小さい ($Re \ll 1$) 流れを想定して、Stokes 近似 (圧力勾配と粘性力によってのみ流体が流動するという仮定) を用いることである。特に単管あるいは平行平板内の定常流れを仮定すれば、これは Hagen-Poiseuille 流となり、いわゆる 3乗則 (Cubic Law) に帰着する。

$$Q = \frac{Hd^3}{12\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

ただし、流れは x 軸方向の一様流とし、式中の Q [m³/s] は流量、 d [m] は水理的開口幅で H [m] は流路の幅、 μ [Pa·s] は粘性係数である。

Romm (1966) はさまざまな粗度をもつガラス製の平行平板の実験を実施し、層流に対する 3乗則の有効性を示すとともに、乱流域へ移行するレイノルズ数の閾値を示した。

しかし、自然の亀裂は平行平板ではないため、3乗則を用いる場合でも、その水理的開口幅をい

かに設定するかが問題となってくる。Witherspoon *et al.* (1980) は、花崗岩など天然の岩石にテンションクラックを発生させた供試体を用いて室内実験を実施し、流れの形態、流体性状による影響および亀裂の幾何的形状による影響を形状係数で補正することで、この 3乗則の有効性を示した。

また、Zimmerman *et al.* (1991) は亀裂内の流体流動を複雑にしている要因を tortuosity (流路の屈曲の度合) にあるとし、サインカーブの足しあわせにより構成された亀裂を想定して、これに Reynolds 方程式を適用することで、解析的に亀裂の浸透率を計算し、亀裂の水理的開口幅は算術平均開口幅とは異なることを示した。そして、水理的開口幅と算術平均開口幅との比が算術平均開口幅とその標準偏差との比 (相対粗度: relative roughness) に対して強い相関を持ち、亀裂面の凹凸の波長がその振幅と同じかあるいはそれ以下のオーダーになると Stokes 近似が適用できなくなることを示した。さらに、Zimmerman & Yeo (2000) はレイノルズ数が 10 以下のオーダーにおいてナビヤ・ストークス方程式は線形化されることを示し、亀裂表面の凹凸の代表波長が平均開口幅の標準偏差の 3 倍以上であれば、線形化された Stokes 方程式は 3乗則と等価な Reynolds 方程式に変形できることを示した。

一方、Sharp (1970) は花崗斑岩亀裂を用いて実験を実施し、亀裂の開口幅をさまざまに変化させて、有効開口幅についての検討を実施した。その結果、亀裂の開口幅は亀裂にかかる外部応力により変化するが、亀裂表面の一部が接触してそれ以上の変形が拘束されることで 3乗則が適応可能となるだけの亀裂開口幅が十分に保持されることを示した。これは、花崗岩など天然の岩石にテンションクラックを発生させた供試体を用いた Witherspoon *et al.* (1980) の室内実験によっても確かめられている。

他方で、80年代後半から90年代初頭にかけて、亀裂内流体流動をミクロスケールで評価しようとする試みがなされるようになってきた。例えば、Brown (1989) は亀裂内流れを多孔質媒体流れと同様に扱い、多孔質媒体流れにおけるダルシー則のようなマクロスケールの流動特性を流体流動の

tortuosity を考慮したミクロスケールの等価水路モデルによって記述した。また、Nichol *et al.* (1999) は、Hele-Shaw cell および、すりガラス製の人口亀裂の凹凸を詳細に測定し、それらを用いた流動実験結果から、表面の粗い亀裂ほど水理的開口幅と算術平均開口幅とに相違が生じることを示した。さらに、ミクロスケールでの有限差分離散化に対する局所浸透率の算出法を示した。これらは亀裂内流動の評価に対し、流線の3次元形状を考慮することの重要性を示すものである。これについては Ge (1997) も同様の結論に至っている。すなわち、理想的な平行平板モデルにおける3乗則と自然亀裂内の流れの乖離は自然亀裂が平行平板亀裂でなく、また滑らかでもないという点に起因しているとし、非平行・非平滑な亀裂での Reynolds 方程式の解析解と亀裂を平行平板とみなして3乗則を適用した場合の解との乖離を幾何形状により定量的に評価した。また、Oron & Berkovitz (1998) は自己アフィン（スケールによらない幾何的相似性）変換により自然に近い亀裂形状を設定し、数値計算を実施することで、幾何学的な亀裂の特性と流れの相関についての検討を実施した。彼らは、この亀裂を細かい要素に分割し、その各要素を平行平板として扱う局所3乗則 (LCL: Local Cubic Law) の適用条件を調べた。この結果から、LCL が成立するためには、亀裂の形状および流速においていくつかの制限があることを示した。

また、Brown (1995) は自然亀裂内の流動が3乗則から乖離するのは流線の tortuosity によるものであるとし、これを評価するために3つのパラメータ（フラクタルディメンジョン、二乗平均平方根 (root mean square)、開口幅が0となる点間の長さスケール）を提案した。

以上はいずれも、比較的遅い流れを対象にしており、低レイノルズ数の流れ ($Re \ll 1$) に対しては比較的良好な結果を出している。

しかし、レイノルズ数の増大とともに流量と圧力勾配は線形性を示さなくなる。これは、式 (1) のナビエ・ストークス方程式において、右辺第二項の慣性項が右辺第三項の粘性項に対して無視できなくなることおよび流れが層流から乱流に変化するにつれ、乱れによるエネルギー散逸を無視で

きなくなるためである。

このような流体流動の非線形性については当初、多孔質媒体において多くの議論がなされた。Forchheimer (1901) が最初にこの非線形性について言及したといわれているが、これによると、岩石コアを用いた流動実験の結果、圧力損失と流量との関係が二次関数になることが知られた。

$$J = \frac{dp}{dx} = \varepsilon_1 u + \varepsilon_2 u^2 \quad (3)$$

ここで、圧力損失勾配を J [Pa/m]、ダルシー流速を u [m/s] で示すものとし、 ε_1 [Kg/m³s] および ε_2 [Kg/m⁴] はそれぞれ線形項、非線形項の係数である。この非線形性は当初乱流により生じると考えられたが、乱流が生じる場合には粘性項が逆に無視できることおよび、多孔質媒体の中では乱流が生じるほど流速が増大しないなどの要因により、この非線形性は乱れの影響ではなく慣性によるものであることが、後に Hubbert (1956)、Bear (1972) によって示された。それによると、層流状態であってもレイノルズ数が1以上のオーダーで線形関係が崩れることが示された。さらに、Scheidegger (1974) は解析的に圧力損失が流量の二次関数となることを示した。この後、一次項である粘性項および二次項である慣性項をいかに定量的に評価できるかが問題となるが、工学的には実フィールドの地盤の詳細な幾何的特性は非常に把握しにくく、得られる情報も限られたものになる。多孔質媒体中の流体流動を考える場合には、媒体のマクロな特性として、浸透率や間隙率が用いられるが、非線形流れにおける各項の係数も、流体や媒体の状態によって決定されるものと考えられる。そこで、マクロ的な観点から、ダルシー則が成立する流速域における浸透率あるいは間隙率などのパラメータを用いてこれらを記述しようという試みがなされた（例えば、Irmay (1964)、Ward (1964)、Scheidegger (1974)）。

以上のように、様々な定式化がなされているが、いずれも実験的に求められたものが多く、また、その各式には形状係数など容易に決定することが困難な定数が含まれているなどの問題が残されており、包括的に取り扱えるものがないのが現状である。

一方、亀裂内単相流の非線形性についての研究の数は非常に少ない。亀裂内の非定常流体流動に対する、最初の包括的な実験はガラス平板製の亀裂を用いて、Lomize (1951) によって実施された。彼はこの結果から、亀裂の平均開口幅に対する亀裂表面凹凸の振幅の比（相対粗度：relative roughness）を用いて、壁面の摩擦係数を算出した。さらに、いくつかの実験結果を整理し、半経験的に亀裂粗度および乱れによる効果を評価し、乱流域に満たない比較的緩やかな流れであっても、非ダルシー流動が生じることを見出した。Zimmerman & Bodvarsson (1996) は、層流状態であってもレイノルズ数が1以上のオーダーになると流量と圧力勾配との間の線形関係が満たされなくなるということを示した。また、Choi *et al.* (1997) は亀裂性の油層解析にしばしば用いられる二重空隙モデルの亀裂部の定式化において、前述の Forchheimer による圧力損失と流量の関係式を導入し、従来のダルシー型モデルとの比較を行い、非ダルシー型モデルのほうがフィールドでの観測値と良い一致を見せることを示した。

3. 亀裂媒体内の単相流実験

3.1 実験の概要

亀裂内の流体流動と亀裂の幾何的特性との関係を明らかにするためのデータの採取を目的として実験を実施した。試料としては花崗岩の割れ目面を樹脂により型取りしたレプリカを用いたが、結果に一般性を持たせるために、異なる幾何形状を持つ複数の供試体を用意した。また、流体性状による影響も調べるために、注入流体には空気および水道水を用いた。水を用いた液相の実験の場合には、亀裂や岩石コアの、流路を気泡が閉塞する可能性があるため、脱気水を用いるのが一般的であるが、本実験の場合は亀裂開口幅が比較的大きいことおよび実験時にもそのような状況は認められなかったため、この点については特に配慮していない。実験は亀裂試料の両端部での圧力損失あるいは流量のいずれかを固定し、データの計測を行うものとする。また、各試料に対し、流体が線形的な挙動を示す低レイノルズ数領域から非線形性の現れる高レイノルズ数領域までの計測を実施する

ものとする。また、流体の粘性および密度は温度によって補正する。

3.2 亀裂レプリカの作成および亀裂面の計測

本実験においては、内部流動の観察を目的とするために、実際の亀裂試料に替えて、エポキシ製の岩石亀裂のレプリカモデルを作成、使用した。作成手順としては、以下のとおりである。まず花崗岩の岩石ブロックの側面にノミをあて、ハンマーで打撃することでクラックを発生させ、完全に2つに分離する。さらに、この1対の亀裂面各々をシリコンにて型取りをする。この際、亀裂面にシリコンを十分に密着させることおよび余分な気泡を取り除くために、デシケータ内で真空脱泡させる。十分な養生の後、出来上がったシリコン製のメス型にエポキシを注入し、これも真空脱泡にて気泡を取り除き、恒温室にて十分に養生・固化させる。シリコン型から固化したエポキシレプリカを取り外し、流動実験用のホルダーに収まるよう、亀裂面を合わせた状態で外形寸法を200mm×100mm×30mmのサイズに成型・研磨する。また、これらの単一亀裂試料との比較のために同サイズのアクリル製平行平板も用意した。作成した亀裂レプリカの例を写真1に示す。なお、実際の実験では亀裂面が水平になるようにし、供試体の長手方向に流体を流すものとする。

次に、各供試体の幾何形状を定量化して把握するため、7つの亀裂レプリカと1つの平行平板の計8供試体について亀裂面の形状計測を行った。計測には、ローランド社製の3Dスキャナ (PICZA model PIX30) を用い、約200mm×100mmの領域を0.5mmピッチで約8万点の測定を行った。亀裂面は上面 (図1中の d_2)、下面 (d_3) および亀裂面を合わせた高さ (d_1) を測定し、 d_1 から d_2 および d_3 を差し引くことで、亀裂間隔を求めた。

3.3 実験装置および実験方法

実験装置は、①空気あるいは水を一定流量、長時間にわたり連続的に供給し続けられること、②亀裂の出入り口での圧力差および流量を連続的に精度よく測定できること、③内部圧力が変化しても亀裂の開口幅が一定であるように固定すること、を考慮し構成した。

3.3.1 空気単相流の実験

亀裂内の気相流動の検討を目的として空気を用いた実験を行った。図2のように、コンプレッ

写真1 エポキシ製亀裂レプリカ

Photo. 1 Epoxy replica of rock fracture

aperture of fracture $d = d_1 - d_2 - d_3$

図1 亀裂開口幅 d の算出

Fig. 1 Measurement of fracture aperture d

サーにより圧縮された空気はマスフローメータによって流量を制御され、レプリカ内に注入される。ホルダー出口部は大気開放とし、入り口のエンドプレートに取り付けられたチューブはピエゾメータに接続されており、これにより入り口部の圧力を計測する。実験の手順を以下に示す。

- ①試料をホルダーにセット
- ②実験装置に接続
- ③試料内にマスフローメータから空気を送り込む
- ④試料とホルダーの接触部に石鹼水をかけ漏洩をチェックする
- ⑤圧力の変動が収まり、定常状態になった後ピエゾメータの値を読む
- ⑥フラックスを変えて、同じことを繰り返す
- ⑦流動実験後、亀裂試料の四隅および中心点の計5点において亀裂試料の厚さを計測する
- ⑧ホルダーから試料を取りはずし、亀裂試料内を水で飽和させて重量を測り、亀裂内部体積に換算する
- ⑨再度、⑦と同じポイントにおいて亀裂試料の厚さを計測する

なお、⑦～⑨のデータは最終的に亀裂開口幅分布の補正データとして使用する。

3.3.2 水単相流の実験

亀裂内の液相流動の検討を目的に、水を用いた実験を実施した。図3に実験装置の概要図を示した。コンプレッサーで圧縮された空気はレギュレータにより一定圧に制御し、バッファタンク内に送られる。バッファタンクにはコンプレッサーより送り込まれる空気のパラックスに対し、十分な容量のものを用意し、ある程度の時間間隔（数秒～10秒オーダー）においては、ほぼ一定圧の水流を取り出すことが可能となる。レプリカの両端部はエンドプレートに接しており、そこから水で飽和したチューブにてU字管に接続されている。U字管は先端部の一部に水銀を満たしてある。これによって入り口および出口部の差圧が計測可能となる。出口部の水は上皿電子天秤にて経時的に累積流量を測定しており、この累積流量の傾きからフラックスを求める。気相の実験と異なる点は、亀裂試料も含め流動系内を最初に全て水で飽和させておくこと、流量を計測する必要があるこ

図2 実験装置概要図 (空気相)

Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus for air phase

図3 実験装置概要図 (水相)

Fig. 3 Schematic of the experimental apparatus for water phase

とおよび圧力は亀裂の出入口の差圧をU字管にて計測していることである。各サンプルに対し、流入圧を様々に変化させ、流量および差圧を計測した。また、実験後は亀裂内体積の計測も実施した。

3.3.3 実験結果

前記の手順により、空気単相流の実験では各試料（試料名:ac01a, ep01a～07a）に対し、送気流量を変化させ前記手順③～⑥を繰り返すことでデータを取得した。また、水単相流の実験では各試料（試料名:ac01w, ep01w～07w）に対し、送流圧力を変化させてデータを取得した。実験装置および計測システムの不具合を調整し、最終的に得られた結果として、空気相における流量 Q と圧力損失勾配 $J (= dp/dL)$ の関係およびレイノルズ数 Re と圧力損失勾配 J との関係を図4に、水相におけるそれらを図5に示した。なお、これらの図中の圧力損失勾配には試料の両端にかかる圧力差と図2、3中の亀裂試料の流出入部直線距離である L [m] から算出した平均的な圧力勾配を用いた。また、気相の流量およびレイノルズ数の算出には亀裂内部の平均圧力下（試料の入口圧力と出口圧力の平均値）の体積流量を用いた。また、レイノルズ数の算出には次式を用いた。

$$Re = \frac{\bar{\rho} u d}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu H} \quad (4)$$

ここで、 ρ [kg/m³] は流体の密度、 $\bar{u}$ [m/s] は亀裂内平均流速（流量を平均断面積で除したものの）、 d [m] は亀裂の算術平均開口幅、 μ [Pa·s] は流体の粘性係数、 H [m] は亀裂試料の幅（図2、3参照）である。

これらの図よりわかるように、比較的流量が小さい時には、圧力勾配は流量あるいはレイノルズ数と線形関係にあるが、流量の増大とともに非線形性が増すことがわかる。本プロットは二次関数

$$J = W_1 Q + W_2 Q^2 \quad (5)$$

にて精度よく近似することができる。表1に回帰された W_1 [Kg/m⁵s]、 W_2 [Kg/m⁸] の値を示した。なお、式(5)は式(3)の u [m/s] を Q [m³/s] で置き換えたものであり、本論文に示す図は実際の流量 Q と圧力損失勾配 J の関係で示した。

ここで、亀裂開口幅が極端に変化しない場合および流速が乱流域にまで達するような場合を除き、式(5)右辺第一項の粘性項は流体の粘性に、右辺第二項の慣性項は流体の密度に比例すると近似できるから、式(5)を次の形に変形する。

$$J = \mu w_1 Q + \rho w_2 Q^2 \quad (6)$$

これにより、 w_1 [1/m⁴]、 w_2 [1/m⁵] は流体の性状によらない亀裂の幾何特性によって決定されるパラメータとなる。実験より得られる w_1 、 w_2 を表1に示す。

次に、レイノルズ数の増大による非線形性の増大の傾向を考える。式(5)中の線形項である右辺第一項の大きさと非線形項である右辺第二項の大きさを比べることで、非線形性の効果を評価する。図6に、圧力損失 $W_2 Q^2$ を圧力損失 $W_1 Q$ で除した無次元量 $W_2 Q/W_1$ とレイノルズ数の関係を示した。本図から、大きいものではレイノルズ数のオーダーが10のとき非線形効果が線形効果の40%程度になっているものもあることがわかる。また、 $W_2 Q/W_1$ は次式のように変形できる。

$$\frac{W_2 Q}{W_1} = \frac{w_2}{w_1} \cdot H \cdot R_e \quad (7)$$

ここで、表1より w_2/w_1 の平均値は 9.2×10^{-2} であり、そのオーダーはおおよそ 10^{-1} 程度であることおよび亀裂試料幅 H が 10^{-1} [m]であることを考慮すると、 $W_2 Q/W_1$ のオーダーは次式のように表記できる。

$$O\left[\frac{W_2 Q}{W_1}\right] = O\left[\frac{w_2}{w_1}\right] \cdot O[R_e] \cdot O[H] \approx O[R_e] \times 10^{-2} \quad (8)$$

ここで、 $O[X]$ は値 X のオーダーを示す。

式(8)より、レイノルズ数が10のオーダーでは $W_2 Q/W_1$ は約10%になるが、これは過去の研究（例えば、Zimmerman & Bodvarsson (1996)）で述べられているようにレイノルズ数が10のオーダーになると非線形効果が無視できなくなるという状況と整合的である。

4. 非線形流れの特性パラメータに関する検討

図4、5に示した様に花崗岩の引っ張り亀裂のレプリカ試料内流動は試料毎に大きく異なるが、これは内部の幾何形状によるものである。ここでは、実験から得られた非線形流れのパラメータが各試料の幾何特性とどのような相関を持つか検討を加える。

図4 空気相の実験結果：(a) 流量と圧力勾配の関係、(b) レイノルズ数と圧力勾配の関係

Fig. 4 Air phase experiment results: (a) gradient of pressure drop vs. flux, (b) gradient of pressure drop vs. Reynolds number

4.1 試料亀裂面の幾何特性

3.2で示した手法で計測された d_1 、 d_2 、 d_3 値を用いて、亀裂間隔および亀裂面の起伏の凹凸を算出した。なお、各計測点は水平位置に若干のずれが生じている可能性があるため、亀裂は最もかみ合わせの良い状態（亀裂間隔の最小二乗和が最小となる状態）で存在すると仮定し、亀裂上面と下面を水平方向に微小にスライドしながら最適な

図5 水相の実験結果：(a) 流量と圧力勾配の関係、(b) レイノルズ数と圧力勾配の関係

Fig. 5 Water phase experiment results: (a) gradient of pressure drop vs. flux, (b) gradient of pressure drop vs. Reynolds number

位置を調整した。また、各実験ケースごとに亀裂内部の体積を計測し、これと一致するように面間距離を補正し、開口幅を算出した。以上による計

測値の一例としてケース ep01a における亀裂面の起伏を図 7 (a) に、亀裂の開口幅分布を図 7 (b) に、頻度分布を図 7 (c) に示す。なお、本測定値

表 1 非線形流動方程式の係数と亀裂サンプルの幾何特性

Table 1 Coefficients of non-linear fluid flow equation and geometric characteristics of fracture

sample	実験より得られたパラメータ					試料の幾何パラメータ						
	W_1 (Pa·s/m ⁴)	W_2 (Pa·s ² /m ⁵)	w_1 (1/m ⁴)	w_2 (1/m ⁵)	w_2/w_1	$d'(m)$	$d_s(m)$	$d_e(m)$	$\sigma(m)$	T	D_1	D_2
aca	2.772E+07	2.416E+10	1.509E+12	2.020E+10	1.34E-02	4.454E-04	4.455E-04	4.455E-04	0.000E+00	1.000	2.000	2.937
ep01a	1.662E+08	9.577E+11	9.068E+12	7.994E+11	8.82E-02	2.369E-04	5.968E-04	2.646E-04	4.510E-04	1.085	2.210	2.766
ep02a	3.184E+07	1.645E+11	1.737E+12	1.367E+11	7.87E-02	4.106E-04	5.417E-04	4.968E-04	5.110E-04	1.087	2.196	2.774
ep03a	8.190E+08	7.331E+12	4.473E+13	6.107E+12	1.37E-01	1.390E-04	2.604E-04	1.666E-04	4.750E-04	1.077	2.156	2.626
ep04a	1.123E+09	1.712E+13	6.128E+13	1.426E+13	2.33E-01	1.252E-04	3.078E-04	1.678E-04	3.780E-04	1.054	2.148	2.676
ep05a	1.439E+09	3.431E+13	7.859E+13	2.863E+13	3.64E-01	1.151E-04	6.351E-04	1.620E-04	8.860E-04	1.076	2.214	2.787
ep06a	3.160E+07	1.190E+11	1.724E+12	9.930E+10	5.76E-02	4.104E-04	5.400E-04	4.210E-04	5.400E-04	1.079	2.217	2.757
ep07a	5.800E+07	3.190E+11	3.164E+12	2.663E+11	8.42E-02	3.354E-04	6.111E-04	2.807E-04	6.040E-04	1.069	2.202	2.780
acw	1.492E+09	1.485E+13	1.713E+12	1.490E+10	8.70E-03	4.270E-04	4.019E-04	4.019E-04	0.000E+00	1.000	2.000	2.904
ep01w	4.816E+09	4.067E+14	5.550E+12	4.080E+11	7.35E-02	2.790E-04	5.481E-04	2.643E-04	4.380E-04	1.084	2.202	2.752
ep02w	3.791E+08	4.401E+13	4.369E+11	4.416E+10	1.01E-01	6.511E-04	6.204E-04	5.736E-04	5.440E-04	1.088	2.209	2.793
ep03w	2.157E+09	1.319E+14	2.513E+12	1.323E+11	5.27E-02	3.630E-04	4.042E-04	3.062E-04	4.940E-04	1.078	2.180	2.701
ep04w	9.499E+09	3.663E+14	1.065E+13	3.674E+11	3.45E-02	2.244E-04	3.974E-04	2.939E-04	3.850E-04	1.055	2.166	2.719
ep05w	5.766E+10	4.487E+15	6.718E+13	4.502E+12	6.70E-02	1.214E-04	6.080E-04	1.022E-04	8.430E-04	1.075	2.209	2.778
ep06w	1.634E+09	5.780E+13	1.887E+12	5.799E+10	3.07E-02	3.994E-04	5.615E-04	3.937E-04	3.940E-04	1.080	2.222	2.747
ep07w	1.693E+09	8.347E+13	1.874E+12	8.371E+10	4.47E-02	3.994E-04	6.738E-04	3.196E-04	6.350E-04	1.069	2.211	2.792

* 表中のep01～ep07はエポキシサンプルを、acはアクリル平行平板試料を示す。また添え字a, wは流体の種類 (air, water) を示す。

図 6 レイノルズ数と非線形性の影響の関係

Fig. 6 Relations between Influence of non-linearity and Reynolds number

図7 亀裂凹凸面の計測結果：(a) 亀裂起伏、(b) 亀裂開口幅分布、(c) 亀裂開口幅頻度分布

Fig. 7 Measurement of fracture surface geometry: (a) topography, (b) aperture distribution, (c) histogram of aperture

の有効数字は0.1mmとした。

次に、亀裂の幾何的特性を表すパラメータとしては多様なものが考えられるが、本研究では亀裂試料全体に対するマクロなパラメータとして、算術平均開口幅、調和平均開口幅、亀裂面の屈曲度指数（起伏を表すパラメータ）、亀裂開口幅の標準偏差、フラクタルディメンジョンを用いた。

(1) 算術平均開口幅 (d_a) および標準偏差の算出 (σ)

最も基礎的なマクロパラメータである亀裂レプリカの算術平均開口幅は亀裂内部空間の体積を亀裂面が占める水平投影面積で除することで算出した。また、前項の図7(c)に示した亀裂開口幅分布図を各試料ごとに作成し、その標準偏差を算出した。

(2) 調和平均開口幅の算出 (d_h)

前述の亀裂開口幅分布より、流れ方向に対する調和平均開口幅を算出した。調和平均操作は以下の手順にて実施した。 $N_x \times N_y$ の格子点に対する開口幅データ d_{ij} ($i=1, \dots, N_x, j=1, \dots, N_y$) に対し、まず流れと垂直方向 (y 方向) の N_y 個の格子列について開口幅データの算術平均を行い、この N_x 個の各平均値 d_{ai} ($i=1, \dots, N_x$) を流れ方向 (x 方向) に調和平均するものとする。これを式で記述すると次のようになる。

$$d_{ai} = \frac{1}{N_y} \sum_{j=1}^{N_y} d_{ij} \quad (9)$$

$$d_h = N_x \left\{ \sum_{i=1}^{N_x} \left(\frac{1}{d_{ai}} \right) \right\}^{-1}$$

(3) 亀裂面の屈曲度指標 (T)

Barton & LA Pointe (1995) は二次元の複雑な線を斜線長とその水平距離との比により評価した。これにならい、亀裂面の屈曲度をあらわすパラメータとして、亀裂の x - z 平面における水平方向の参照長さ（測定格子長0.5mm）に対する亀裂面の長さの比で表した。ただし、亀裂は上下2つの複雑面により挟まれていることを考慮するため、上下2つの粗面の効果を足し合わせることでこれを表現するものとする。すなわち、図8において、微小区間 δ_{ij} に対する亀裂上面の斜面長を δ_{uij} 、下面の斜面長を δ_{dij} 、各々の測点数を N_x 、

N_y とし、(平均) 屈曲度指標 T を次式で表す。

$$T = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} (\delta_{uij} + \delta_{dij})}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} 2\delta_{ij}} \quad (10)$$

式(10)を見てわかるように、 T は亀裂表面の形状が複雑に凹凸を繰り返すほど、大きな値をとることになり、最もシンプルな平行平板においては1をとる。

(4) フラクタル次元の算出 (D_1, D_2)

亀裂面の複雑さは、亀裂面の起伏の程度と、亀裂面に沿った面の微視的な凹凸の度合いにより表現される。ここでは代表的なフラクタル次元推定法であるボックスカウンティング法を用いて、上記二つの幾何学的特徴をフラクタル次元として算出する。図9に試料 ep01a に対するフラクタル次元の算出方法を示した。ボックスの大きさが比較的大きい時には、亀裂面の起伏の複雑さを表すフラクタル次元が算出される (D_1)。またボックスの大きさが開口幅スケールより小さくなると、亀裂開口幅分布の複雑さも含めたフラクタル次元 (D_2) が算出される。本研究では、算術平均開口幅スケール (10^{-4} [m]、表1参照) を閾値にして両次元値を求めた。以上の6つのパラメータをサンプルごとに表1にまとめた。

4.2 非線形流れの特性パラメータと試料の幾何パラメータの相関

自然の亀裂は開口幅が一定で無いこと、および

図8 亀裂面の屈曲度指数の算出

Fig. 8 Definition of topographic undulation

流速の増大によって図4、図5、図6に示したように非線形性が生じ、圧力損失勾配と流量の関係は式(6)で近似される。

次にこの w_1 、 w_2 と先に求めた各試料の幾何的特性を示すパラメータとの関係を検討する。

(1) w_1 と幾何特性パラメータとの相関

図10に示したように、幾何的特性パラメータのうち、算術平均開口幅 d_a 、調和平均開口幅 d_h との相関をみると、調和平均開口幅 d_h のほうがより w_1 との相関が強いことがわかる。これは、不均質媒体が直列連結された一次元媒体の平均浸透率が、局所浸透率の調和平均により算出されるということと同様と考えられる。本実験の場合、流れはマイクロレベルでは1次元的不是、平面2次元内のより浸透率の大きな個所を優先的に流れると考えられるが、調和平均開口幅の算出に際し、流れと垂直方向には算術平均操作を施したことでこの効果を少なからず取り込めていることを表している。

一方、3乗則を用いると w_1 は次式のように表現できる。

$$w_1 = \frac{12}{Hd^{*3}} \quad (11)$$

先の調和平均開口幅は、式(11)の関係から逆算した水理的開口幅 d^* とよく一致することが図11よりわかる。また、 w_1 は流れの道のりの長さを示すフラクタル次元 D_1 を、流路の大きさを表す水

理的開口幅 d^* によって除した値 D_1/d^* (図12)、あるいはこれと同様な量と考えることのできる T/d^* (図13) と同様の相関を示す。これは、この2つの値が流れの抵抗の大きさ(道のりの増大により増加し、流路が大きくなれば減少する)を表現しているためと考えられる。

図9 フラクタル次元の算出

Fig. 9 Calculation of fractal dimension

図10 平均開口幅と w_1 の関係：(a) 算術平均開口幅 (d_a) と w_1 の関係、(b) 調和平均開口幅 (d_h) と w_1 の関係

Fig.10 Mean aperture vs. w_1 : (a) arithmetic mean aperture (d_a) vs. w_1 , (b) harmonic mean aperture (d_h) vs. w_1

(2) w_2 と幾何特性パラメータとの相関

w_2 は試料内部の開口幅分布の変化による圧力損失の度合いを表すものと考えられる。そこで、開口幅の複雑さを表す指標となるフラクタル次元 D_2 を、流路の大きさを表す水理的開口幅 d^* によって除した値 D_2/d^* と w_2 とをプロットすると図14のように良い相関を示すことがわかる。これは、こ

の2つの値が慣性項に影響する流線の変化の大きさ（開口幅の複雑さの増大により増加し、流路が大きくなれば相対的に減少する）を表現しているものであるためと考えられる。また、 w_2 は D_1/d^* 、 T/d^* とも良い相関を見せる（図15、図16）ようであるが、これは w_1 と同様に、流路の抵抗の度合いにも相関があることを示している。

図11 d^* と d_h の関係
Fig.11 d^* vs. d_h

図13 w_1 と T/d^* の関係
Fig.13 w_1 vs. T/d^*

図12 w_1 と D_1/d^* の関係
Fig.12 w_1 vs. D_1/d^*

図14 w_2 と D_2/d^* の関係
Fig.14 w_2 vs. D_2/d^*

なお、標準偏差を d^* で除した量 σ/d^* と w_1 との間にはあまり良い相関は確認できなかったため、紙面の都合上割愛するものとする。

(3) w_1 と w_2 の関係

図17に w_1 と w_2 の関係を示した。本図よりわかるように、これらは比較的良好な相関を持つ。この二つのパラメータの相関により、線形流れから非線形流れまでを統一して考える際の基本的なパラ

メータ値を決定できることになる。図17を回帰することで、特性パラメータ w_2 は次式のように w_1 で表現できる。

$$w_2 = 7.607 \times 10^{-5} w_1^{1.236} \quad (12)$$

この式の相関係数は0.97程度あり、実用的には良い相関となっている。なお、図14、15、16、17中の回帰は亀裂レプリカによる実験結果のみを対象に実施し、アクリル平行平板試料 (図中 ac) については対象外とした。これは、平行平板内の定常層流に対し、式 (1) のようなナビア・ストークス式を考えた場合、 Re 数の増大に関わらず非線形性を示す要因となる慣性項は0であり、非線形効果の議論が出来ないためである。厳密に言えば、アクリル平行平板試料も完全に平行ではないが、開口幅が0.5mm程度のオーダーでは、その相対粗度は非常に小さく、平行平板とみなしても差し支えない。

(4) 実験より算出された非線形流動方程式

式 (6) に式 (12) を代入すると、本実験試料の基本構成式は次式のようにになる。

$$J = \mu w_1 Q + 7.607 \times 10^{-5} \rho w_1^{1.236} Q^2 \quad (13)$$

さらに、式 (13) はより一般的に、平均流速 $\bar{u}$ ($= Q/Hd^*$) を用いて次式のように表現出来る。

図15 w_2 と D_1/d^* の関係
Fig.15 w_2 vs. D_1/d^*

図16 w_2 と T/d^* の関係
Fig.16 w_2 vs. T/d^*

図17 w_1 と w_2 の関係
Fig.17 w_1 vs. w_2

$$J = \mu w_1 H d^* \bar{u} + \rho w_2 H^2 d^{*2} \bar{u}^2 \quad (14)$$

ところで、多孔質媒体での線形流れ領域でのダルシー則は浸透率 k [m^2] を用いると次式のように表現できる。

$$\bar{u} = \frac{k}{\mu} J \quad (15)$$

よって、式 (14) の第一項と式 (15) を比較すると、次式の関係があることがわかる。

$$w_1 H d^* = \frac{1}{k} \quad (16)$$

次に、式 (14) の第二項の定係数 $w_2 H^2 d^{*2}$ をひとつの定数 w_2' とおき、 k との相関をみると、図18のようになる。ここで、図中の回帰は図17のときと同様アクリル平行平板試料については対象外としている。これより、式 (14) は次式のように近似できる。

$$J = \frac{\mu}{k} \bar{u} + 3.404 \times 10^{-5} \frac{\rho}{k^{0.854}} \bar{u}^2 \quad (17)$$

実際のフィールドでは、浸透率 k は一般的な水理試験により推定される。そして、その値がわかれば、式 (17) を用いることで、慣性項の係数を決

定出来、非線形流れの領域まで考慮した地下水解析が可能となると考えられる。逆に言えば、慣性項の特性パラメータ w_2 を決めるための高速の水理試験を実施する必要がなくなる。式 (11) と式 (16) の関係を用いて、式 (17) を水理的開口幅 d^* の形式で表現すると、次式のようになる。

$$J = \frac{12\mu}{d^{*2}} \bar{u} + 2.842 \times 10^{-4} \frac{\rho}{d^{*1.708}} \bar{u}^2 \quad (18)$$

ここで、先の図11に示したとおり、式 (18) 中の水理的開口幅 d^* は調平均開口幅 d_h で置き換えても実用上は問題が無い。そこで、亀裂の幾何形状が既知の場合には、式 (18) を用いて非線形流動を表現できることになる。なお、上式は花崗岩引張り割れ目内の流動実験から得られたものであるが、割れ目の表面がせん断などにより磨耗したり、あるいは割れ目内に土砂などが堆積していないような場合には適用が可能であると考えられる。

(5) 多孔質媒体中の非線形流動方程式との比較

前述のように、単一亀裂に関しては、非線形流れに対する幾何形状からの明確な定式化の事例は確認できていない。多孔質媒体に関してはいくつかの式が提唱されているので、ここでは、それらと著者等が得た単一亀裂内流れでの近似式とを比較検討する。具体的には、表2に示した各式の右辺第一項の係数が単一亀裂での非線形流動式 (12) の第一項に等しいものとし、第一項中の未知パラメータを設定し、第二項の w_2' を算出した。ただし、Schneebeli および Ward の式では間隙率 ϕ が含まれているためこれを1とおいた。表2に提唱者と非線形流動方程式、および両対数グラフ上での k と w_2' のプロット (図19参照) の勾配を示した。これより、 k と w_2' の関係を回帰した近似線の傾きは多孔質媒体においては全て -0.5 (回帰直線中の k のべき乗数) となり、絶対値において亀裂のそれより小さいことがわかる。この近似線の傾きは浸透率の変化による非線形性の影響の度合を示すものであるが、浸透率と流路の複雑性が密接に関係することからみて、浸透率の増大に伴う流路の単純化は多孔質媒体よりも単一亀裂の方が容易であると考えられる。

図18 k と w_2' の関係

Fig.18 k vs. w_2'

表2 多孔質媒体における非線型流動方程式との比較

Table 2 Comparison with non-linear equations of porous medium

提唱者	非Darcy流動式	$\log(w_2)/\log(w_1)$	備考
Ergun(1952)	$J = 150 \frac{(1-\phi)^2}{\phi^2 d_r^2} \mu \bar{u} + 1.75 \frac{(1-\phi)}{\phi d_r} \rho \bar{u}^2$	-0.5	
Schneebeli(1955)	$J = 1100 \frac{\mu \phi}{d_r^2} \bar{u} + 12 \frac{\rho \phi^2}{d_r} \bar{u}^2$	-0.5	$\phi=1$
Ward(1964)	$J = \frac{\mu \phi}{k} \bar{u} + \frac{0.55 \rho \phi^2}{\sqrt{k}} \bar{u}^2$	-0.5	$\phi=1$
Irmay(1964)	$J = 180 \frac{(1-\phi)^2}{\phi^2 d_r^2} \mu \bar{u} + 0.6 \frac{(1-\phi)}{\phi d_r} \rho \bar{u}^2$	-0.5	

* ϕ : porosity, d_r : representative length

図19 多孔質媒体内の非線形流動方程式との比較

Fig.19 Comparison with non-linear equations of porous medium

5. まとめと今後の課題

本研究は、単一亀裂中の非線形流れの構成則の特性パラメータを明らかにすることを目的として行ったもので、その内容をまとめると以下のようになる。花崗岩亀裂面のレプリカを複数作成し、空気あるいは水を用いた定常注入実験により、線形流れから非線形流れの領域までの圧力損失勾配と流量の関係を計測した。その結果、圧力損失勾配は流量の2次関数としてよく近似でき、レイノ

ルズ数が1程度以上のオーダーになると、殆どのサンプルで非線形性が顕著となることがわかった。

4.1節で定義した、割れ目壁面の幾何的特性を表す種々のパラメータと非線形流れの特性パラメータとの関係を考察した結果、粘性項の係数は D_1/d^* および T/d^* と、慣性項の係数は D_1/d^* 、 D_2/d^* 、 T/d^* と比較的良好な相関があることが認められた。

全ての試料の結果から回帰される単一亀裂内の非線形流動方程式を提案した。この式は、様々な幾何形状の亀裂においても水理試験によって得られるダルシー領域の浸透率がわかれば亀裂における非線形効果がわかる形で表現されており、地下水解析上有用なものと考えられる。

多孔質媒体中の非線形流れに対して過去に提唱された式と比較した結果、単一亀裂のほうが流量の増大につれて多孔質媒体より非線形の増大が大きくなる傾向が認められた。

参考文献

- 北原 曜 (1989): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性 (II), 日林誌71 (8), 317-322.
- Barton, C.C. and LA Pointe, P.R. (1995): Fractals in

- the Earth Sciences, Kluwer Academic Pub., 82p.
- Bear, J. (1972): Dynamics of fluids in porous media., Dover Science Books, 176-184.
- Brown, S.R. (1989): Transport of fluid and electric current through a single fracture, *J. Geophys. Res.*, 94 (B7), Jul, 9429-9438.
- Brown, S.R. (1995): Simple mathematical model of rough fracture, *J. Geophys. Res.*, 100, B4, 5941-5952.
- Choi, E.S., Cheema, T. and Islam, M.R. (1997): A new dual-porosity/dual permeability model with non-Darcian flow through fractures, *Jour. Petro. Sci. and Eng.*, 17, 331-344.
- Ergun, S. (1952): Fluid flow in through packed columns, *Chem. Eng. Prog.*, 48, 89-94.
- Forchheimer, P.H. (1901): *Wasserbewegung durch Boden*, *Zeitz. Ver. Duetch Ing.*, 45, 1782-1788.
- Ge, S. (1997): A governing equation for fluid flow in rough fractures, *Water Resour. Res.*, 33 (1), 53-61.
- Hubbert, M.K. (1956): Darcy law and the field equations of the flow of underground fluids, *Trans. Amer. Inst. Min. Metal. Eng.*, 207, 222-239.
- Irmay, S. (1964): Theoretical models of flow through porous media, *R.I.L.E.M. Symp. Transfer of Water in porous media*, Paris, *Bull. R.I.L.E.M.* 29, 37-43.
- Kolditz, O. (1995): Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: conceptual model of a 3-D deterministic fracture network, *Geothermics*, 24 (3), 451-470.
- Lomize, G.M. (1951): *Water flow in fissured rocks*, Gosenenrdoizdat, Moscow, 127p.
- Mazurek, M., Lanyon, G.W., Vomvoris, S. and Gautschi, A. (1998): Stratis Derivation and application of a geologic dataset for flow modelling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *J. of Contam. Hydro.*, 35 (1-3), 1-17.
- Neuzil, C.E. and Tracy, J.V. (1981): Flow through fractures, *Water Resour. Res.*, 17 (1), 191-199.
- Nicholl, M.J., Rajaram, H., Glass, R.J. and Detwiler, R. (1999): Saturated flow in single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in mesured aperture fields, *Water Resour. Res.*, 35 (11), 3361-3373.
- Oron, A.P. and Berkowitz, B. (1998) : Flow in rock Fractures: The local cubic law assumption reexamined, *Water Resour. Res.*, 34 (11), 2811-2895.
- Romm, E.S. (1966): *Flow Characteristics of Fractured Rocks*, Nedra, Moscow, Russia, 283p.
- Schneebeli, G. (1955): Experiences sur la limite de validite de la loi de Darcy et l'apparition de la turbulence dans un écoulement de filtration, *La Huille Blanche*, 2, 10, 141-149.
- Scheidegger, A.E. (1974): *The physics of flow through porous media*, 3rd ed., University of Tronto press, Tronto, 152-170.
- Sharp, J.C. (1970): *Fluid flow through fissured media*, Ph. D. thesis, Univ. of London, Imp. Coll. of Sci. and Technol., London, 181p.
- Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A. (1983): The Dependence of Fracture Mechanical and Fluid Flow Properties on Fracture Roughness and Sample size, *J. Geophys. Res.*, 88 (B3), 2359-2366.
- Tsang, Y.W., Huang, K. and Bodvarsson, G.S. (2000): Estimation of the Heterogeneity of Fracture Permeability by Simultaneous Modeling of Multiple Air-Injection Tests in Partially Saturated Fractured Tuff, *Dynamics of Fluids in Fractured Rock*, *Geo. Mono.* 122, AGU, 99-114.
- Ward, J.C. (1964): Turbulent flow in porous media, *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, HY5, 90, 1-12.
- Weir, G.J. (1999): Single-phase flow regimes in a discrete fracture model, *Water Resour. Res.*, 35 (1), 65-73.
- Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. (1980): Validity of Cubic Law for Fluids Flow in a Deformable Rock Fracture, *Water Resour. Res.*, 16 (6), 1016-1024.
- Yamaguchi, Y., Shibuichi, H. and Matsumoto, N. (1997): Permeability evaluation of jointed rock masses using high viscosity fluid tests, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34, 3-4.
- Zimmerman, R.W., Kumar, S. and Bodvarsson, G.S. (1991): Lubricaton theory analysis of the permeability of rough-walled fractures, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 28 (4), 325-331.
- Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S. (1996): Hydraulic conductivity of rock fractures., *Transp. Po-*

rous Media, 23, 1-30.

Zimmerman, R.W. and Yeo, I.W. (2000): Fluid flow in
rock fractures (from the Navier-Stokes Equations to

the Cubic Law), Dynamics of Fluids in Fractured
Rock, Geo. Mono., 122, 213-224.

(受付: 2001年11月29日、受理: 2003年4月23日)