

(34) 割れ目岩盤の透水試験における乱流の影響評価の試み

埼玉大学 工学部 正会員 渡 辺 邦 夫
" " 芦 川 亮 一

はじめに

最近、九州・東北地方を中心に、割れ目の多い火山岩やオープクラックの多い岩盤上に、ダムなど水を貯留する施設が多く計画されるようになってきた。建設にあたって大きな問題の1つは、漏水量の正確な見積りと止水対策である。これらを十分な精度で行うためには、まず岩盤透水係数を正しく測定することが必要である。こういった高透水割れ目岩盤の透水係数測定では2つの点が主要な問題となると考えられる。1つは、高透水岩盤では一般に地下水位が低いことである。従って、貯水後には飽和域となるが、現状では不飽和である領域で透水試験を行なわねばならないことになる。つまり、不飽和流れを考慮しなければならない。他の問題は、高透水岩盤中ではルジオン試験等行った場合に、流れがいわゆる乱流状態となり、みかけ上透水係数がかかなり小さくなることである。現場試験ではこれらの点に十分配慮しなければならないはずである。しかしながら、従来不飽和な割れ目中の流れの様子や乱流の影響はあまり研究されていない。今回の研究は以上の問題をふまえ、とくにピット法試験や低圧でのボーリング孔注入試験を対象として、室内実験と野外実験により、流れの様相や乱流の影響を基礎的に調べたものである。さらに、実験結果をもとにして、高粘性流体を用いた透水試験を提案し、その有効性を考察する。

1 室内実験による割れ目内の不飽和流れ特性

実際の岩盤中には、種々の方向、間隙幅を持つ割れ目が多数存在している。今回はまず基礎的に、単一で開口した鉛直割れ目内流れの性質を調べる。

図-1に用いた実験装置の模式図および寸法を示す。実験装置は2つあり、図中(a)はピット法試験、(b)はボーリング孔からの注入をモデル化したものである。両方の装置共、割れ目は2枚の亚克力板の間隙により表現されている。(a)モデルの割れ目間隙幅は3mm、(b)モデルの間隙幅は1.5mmである。モデルの間隙幅を一定とするため、約15cm間隔でスペーサーが入れられ、ボルト止めされている。流れの性質を調べるために使用した流体は水およびグリセリン水溶液である。グリセリン

水溶液を用いた理由は流体の粘性を高め、層流状態での流れ性状をみるためである。流体は、ピットおよび、定水位水槽に入れられ、割れ目モデル内に導かれる。(a)モデルにおいては図中破線で示されるように、亚克力板片側に1mm厚の亚克力小板がはりつけられ、割れ目間隙幅が局所的に変えられている。これは割れ目の透水係数を局所的に小さくするものである。また、(b)モデルでは、長さ15.1cm、高さ4.5cm、厚さ1mmの長方形亚克力小板を種々の場所に挿入した。挿入した小板中心点位置を図-2に示す。両モデル共、亚克力小板をはりつけ、もしくは挿入することによって、透水係数が(a); 1/2, (b); 1/8程度に低下する。(b)モデルにおいて、注入孔付近の圧力は、図中示す

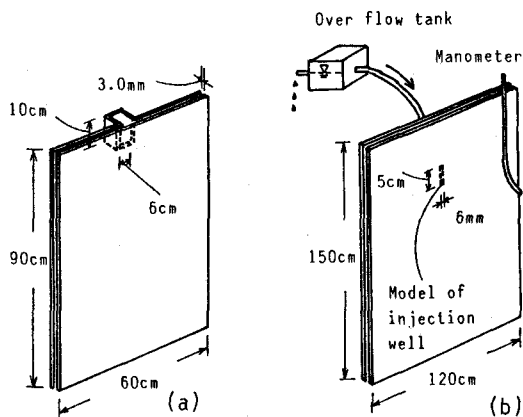


図-1 実験装置 (a); ピット式 (b); 低圧注入式

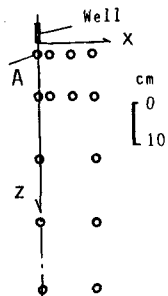


図-2 挿入小板の中心位置

る。

つぎに、実験で見られた流れ特性とその意味について示す。図-3はピット注入試験でみられた流れパターンの例である。(b)図では、図中1mmと示された部分にアクリル板がはりつけられ、間隙幅が小さくなっている。使用流体はグリセリン水溶液であり、動粘性係数は、 $0.12\text{ cm}^2/\text{s}$ である。まず(a)より、流体はピット直下で多少横にひろがるものの、全体として鉛直下方に流下していることがわかる。横にひろがる理由は、ピット内水位が高いためである。全体として鉛直下方に流れることは、不飽和な高透水性割れ目内の低下下での流れが基本的に重力方向に向かう一次元流となっていることを示している。このことから、割れ目透水係数が、ピット法試験の場合たとえばア・カ・ボルドイレフの近似式¹⁾あるいは、地下水位が低い場合の透水係数算定式²⁾によってかなり精度良く計算しうることが推定しうる。

一方、(b)では(a)と比べ流れの様相がかなり異っている。ピット直下、および間隙幅の小さい低透水部では、割れ目を満たした流れとなっているが、低透水部下方の高透水部でクシ歯状の流れとなっている。これは、流れが基本的に重力方向の一次元流れとなり、動水勾配がピット直下を除いてほぼ1.0となるためである。このような条件下で、低透水部と高透水部境界で連続条件が満足されるためには、高透水部で流水断面が縮小することが必要であり、そのためにクシ歯状流れが形成される。これが不飽和流れの1つの特徴である。

図-4は、低下下でのボーリング孔よりの注入実験の結果例を示している。図中(a)、(b)は動粘性係数約 $1.0\text{ cm}^2/\text{s}$ のグリセリン水溶液を用いた場合であり、(c)、(d)は水(動粘性係数約 $0.01\text{ cm}^2/\text{s}$)を使用した場合である。(d)は、注入孔直下(図-2のA)にアクリル小板を挿入している。(a)、(b)においては基本的には図-3にみられたような鉛直1次元流れであり、(b)では低透水部下方に規則的なクシ歯状流れが形成されていることがわかる。一方、(c)、(d)はかなり様相が異なっている。まず、流れ経路内に白く示される水の流れない部分が形成されている。これは、モデル内のスペーサーの下方に生じたものである。また(d)において、低透水部直上で流れが大きく分かれ、低透水部下方の流れも(b)のように規則的なクシ歯状になっていない。(a)、(b)と(c)、(d)の流れパターンの違いは、後者の流体の動粘性係数が小さく、流れが乱流に移行したことによるものと考えられる。なおこの時のレイノルズ数は約4000であった。

図-5は、注入孔付近のマノメーター水頭を一定とし、挿入アクリル小板位置による注入量の変化をみたものである。図中の縦軸は注入流量である。x、z軸はそれぞれ注入孔下端面中心より測った水平、鉛直座標であり、図-2に示されるものである。使用流体の動粘性係数は約 $0.7\text{ cm}^2/\text{s}$ である。この時のマノメーター水頭は、注入孔下端より測って17cmである。また小板を挿入しない時の注入量は 12.6 cc/s であった。図から、鉛直一次元流れでは下方の条件によって注入量がかなり影響されることがわかる。小板位置が注入孔に近くなれば注入量が減少し、図-2 A位置では1/3程度となっている。

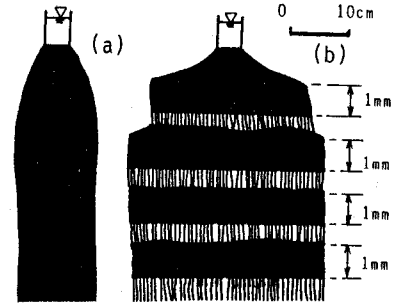


図-3 ピット注入の流れ性状

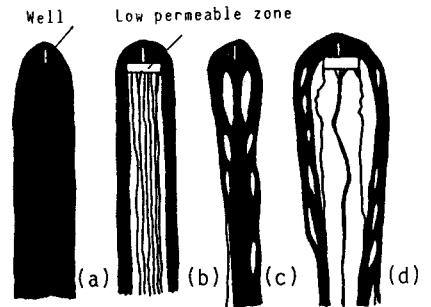


図-4 注入孔よりの流れパターン

(a)、(b)は高粘性グリセリン水溶液、
(c)、(d)は水を使用した場合

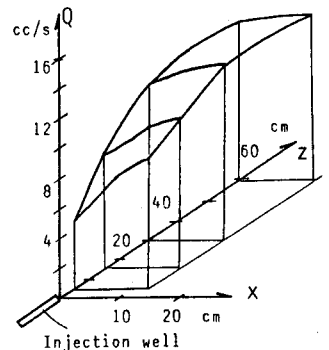


図-5 アクリル小板挿入位置
と流量変化

2 室内・野外実験における乱流の影響

つぎに、図-4にみられたような層流から乱流への変化をレイノルズ数 Re と抵抗係数 f との関係から調べてみる。 Re と f は以下の式で定義される。

$$Re = UL/\nu \cdots (1), f = 2gLI/U^2 \cdots (2)$$

ここに、 U は平均流速、 L は代表寸法、 ν は動粘性係数、 I は動水勾配である。 L として一般に水力(換算)直径 D_h 、 $D_h \div 2\bar{l}$ が使われる。 $\bar{l}$ は割れ目平均間隙幅である。 f は層流であれば Re の -1 乗に比例する。 Re と f の関係は、割れ目内流れとしてcubic lawが成立し、動水勾配一定で粘性係数を変えた1次元流れ実験を行えば、動粘性係数比 ν_w/ν_g と流量比 Q_w/Q_g との関係におきかえることができる。ここに ν_w 、 ν_g はそれぞれ水、高粘性(今回はグリセリン水溶液)流体の動粘性係数、 Q_w 、 Q_g は水およびグリセリン水溶液を使用した場合の注入量である。

図-6は、図-1に示した実験装置を用いた結果である。図中 a はピット試験、 b は注入口試験である。これらの実験では局所的に放射流が生じるが全体的にみて1次元流れが卓越すると考えている。図から、とくに a において、 ν_w/ν_g が小さい領域、つまり使用流体の動粘性係数が大きい領域ではほぼ -1 乗の関係を持つことがわかる。しかし、 ν_w/ν_g が大きくなると上方に外れ、最終的に $Q_w/Q_g = 1.0$ 、 $\nu_w/\nu_g = 1.0$ の点を通る。これは流れが層流から乱流に移行することに対応した現象である。 b でも a と同様な傾向が認められるが a 程明らかでない。これは注入口モデルの間隙幅が 1.5 mm と小さいことによるものである。

一方、図-7は開口割れ目の多い安山岩上に掘り込んで、広さ $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 、深さ 30 cm のピットをつくり、一定水位で種々の動粘性係数をもつ流体を注入した結果である。地下水面位置は地表から 50 m 以上である。ピットは A 、 B 2つ設けた。ピット側面は木板で止水した。いずれのピット底面にも、局所的に $3 \sim 5\text{ mm}$ の開口部を持つ割れ目が認められた。図-7の整理をするにあたって、岩盤内の流れは平均的に、cubic lawに従うと考えている。図-7から、とくに A において、 ν_w/ν_g が大きくなるにつれ、 -1 乗の直線からははきりと外れてくる傾向が認められる。 B においても、 A ほど顕著でないが、同様な傾向が認められる。直線から外れる ν_w/ν_g 値は、 A がほぼ 0.1 、 B が 0.35 程度である。これは、流体の動粘性係数が小さくなるにつれ、流れが乱流となり抵抗が増大し、みかけ上透水係数が小さくなることを意味している。 A の場合、水を使った場合の透水係数は、高粘性流体を使って測った場合の $1/5$ 程度となる。図-6に比べ図-7の方が層流から乱流への移行がより顕著にあらわれているが、これは実験モデルの間隙幅がそれぞれ 3 mm 、 1.5 mm とやや小さく、またモデルのアクリル板が平滑であり、乱流に移行しにくかったことが考えられる。いずれにしても、これらの結果から、不飽和高透水岩盤の透水試験では高粘性流体の使用が、より妥当であるといえる。つぎに、どの程度の動粘性係数を持つ流体を使うべきかを定量的に考察してみる。

3 1次元性の卓越した流れにおける流体の動粘性係数の選定

割れ目内流れが層流であるか乱流であるかは、流れのレイノルズ数が限界値 Rec を越えるかどうかで判断される。 Rec 値は、割れ目壁面の凹凸の状態によって異なるが、Louis³⁾によれば、凹凸がない場合は 2300 、か

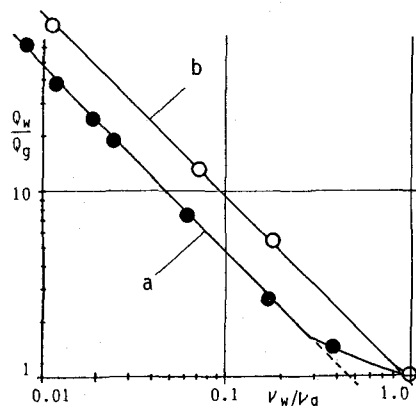


図-6 室内実験の $Q_w/Q_g \sim \nu_w/\nu_g$

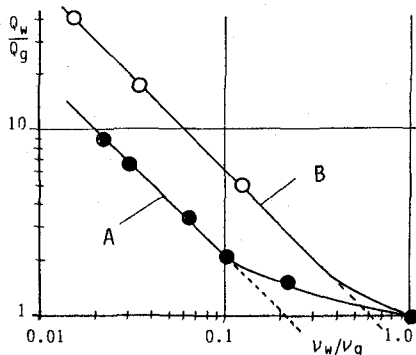


図-7 野外ピット試験の $Q_w/Q_g \sim \nu_w/\nu_g$

なり凹凸が大きくなって500程度の値と報告されている。この報告に基づき、今回安全側をみて、500を1つのめやすと考える。

一方、渡辺⁴⁾によれば、割れ目壁面に凹凸がある場合の流速は、間隙幅が6.5 mmより小さい場合、以下の式で表される。

$$v = C \cdot g \bar{t}^2 I / 12 \nu \dots (3)$$

ここに、Cは補正係数であり、

$$C = 1 / (1 + (\bar{t})^{-0.6}) \dots (4)$$

と表現される。(3)式の流速 v を(1)式 U に代入し、以下の式を得る。

$$Re = 2gCI(\bar{t})^3 / 12\nu^2 \dots (5)$$

図-8は水を想定して、種々の動水勾配 I に対して、 Re と平均間隙幅 $\bar{t}$ の関係を示したものである。 $I, \bar{t}$ が増大するに従って Re が増大し、 $Rec = 500$ の破線を越えることがわかる。図中、 $I < 1.0$ は、傾斜した割れ目を想定したものである。いま $I = 1.0$ を考えると、約1 mm程度の割れ目の流れが乱流に移行する可能性があるといえる。なお図中破線は、 $I = 1.0$ の場合の、(3)式中 $C = 0$ 、つまり凹凸がない場合の関係を例示したものである。この場合、 Rec は2300と考えるべきである。図-9は動粘性係数とレイノルズ数との関係を $I = 1.0$ の状態

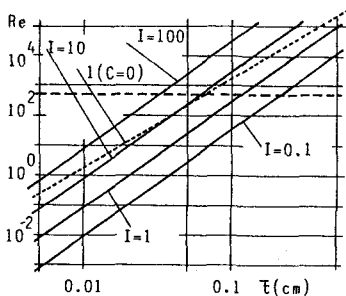


図-8 渡辺⁴⁾の式による平均間隙幅とレイノルズ数との関係

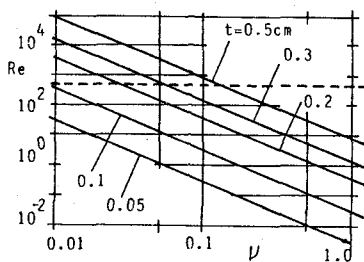


図-9 各間隙幅における動粘性係数とレイノルズ数との関係

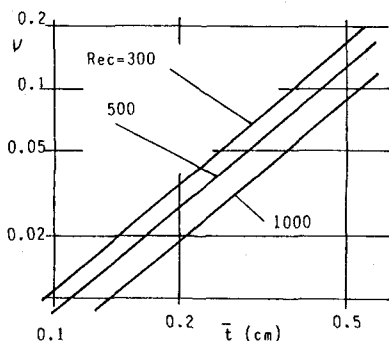


図-10 種々の限界レイノルズ数に対する平均間隙幅と動粘性係数との関係

$= 1.0$ の状態で種々の割れ目間隙幅 $\bar{t}$ について示したものである。動粘性係数を大きくすることによって、レイノルズ数を小さくしうることが読みとれる。図-10は、種々の割れ目間隙幅について、その中の流れのレイノルズ数を Rec 以下とするに必要な流体の動粘性係数を示したものである。 I は1.0である。図から、たとえば $Rec = 500$ の時、間隙幅0.5 cmの割れ目内の流れのレイノルズ数を Rec 以下にする動粘性係数は約0.13 cm²/sであると読みとれる。これ以下では乱流となり正確な透水係数は得られない。

この図はまた野外で図-7のような動粘性係数を変えた実測から、その場所の支配的な割れ目の間隙幅を推定するのに用いることができる。たとえば図-7 A地点では、前述したように ν_w / ν_g が0.1付近で層流から乱流へ移行する。 ν_w を0.01 cm²/sとすると ν_g は0.1 cm²/sである。 $Rec = 500$ とすると、図-10から、 $\nu_g = 0.1$ cm²/sで乱流となる割れ目間隙幅は約0.4 cm程度とよめる。つまり、A点では、局所的にせよ間隙幅0.4 cm程度を持つ割れ目内の流れが支配的というわけである。

以上述べたように、高粘性流体を用いた試験は、不飽和な高透水岩盤の透水係数を測定するのに必要であり、また、その結果から流れを支配する割れ目間隙幅を推定することで大変有効といえる。

参考文献

- 1) 外尾善次郎, 永井正夫訳, ペ・ペ・クリメントフ他, 地下水の力学, ラティス刊, 1967.
- 2) 建設産業調査会, 地下水ハンドブック, pp. 291, 1979.
- 3) Lous, C., A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, Imperial College Rock Mech. Rept., no. 10, pp. 1-90, 1969.
- 4) 渡辺邦夫, 古田島信義, 割れ目系岩盤における透水係数算定の基礎的考察, 応用地質, vol. 22, pp. 309-316, 1981.

- (34) Turbulent flow formed under a injection well in unsaturated fractured rock and its influence on the measurement of permeability

Kunio WATANABE* and Ryoichi ASHIKAWA**

Abstract

Some artificial reservoirs are now planned to construct on the high permeable fractured rock mass such as erupted or intrusive volcanic rock of Quaternary period. Accurate measurement of permeability of fractured rock is indispensable in such areas because some protection works to lower the amount of leakage from these reservoirs must be taken into account in the course of these plannings.

Most of permeability tests such as injection tests should be performed in situ under the unsaturated condition as the location of groundwater table is in usual deep in high permeable rock mass. From the reason, flow behavior of water injected in each unsaturated fracture must be basically studied for the accurate measurement of permeability. Moreover, as pointed by many previous authors, water injected may flow under the turbulent condition in some high permeable fractures. Consequently, the influence of turbulence on flow resistance should be well evaluated to properly estimate the permeability.

In the paper, at first, the flow patterns of fluids of some different viscosities injected under the low pressure conditions into a opened fracture are experimentally studied by the use of two fracture models. In these models, the fracture is simulated by the interstice between two vertical flat plates. Some small thin plates are also inserted in the model to partly decrease the permeability. From these experiments, it was found that the injected fluids essentially flow downward by the gravity acceleration and that the flow can be approximated by the one dimensional flow under the condition of unit hydraulic gradient. In addition to these points, comblike pattern of flow was generally observed below the low permeable parts.

And after, resistance values of some fluids flowing not only in these models but also in two actual fractured rock were tried to measure with following conclusions.

- (1) High viscous fluid should be used to accurately measure the permeability of unsaturated high permeable fractured rock mass.
- (2) The relation between resistance coefficient f and Reynolds number Re of flow in fractured rock mass can be obtained by the successive injection tests with some fluids of different viscosities under the constant condition of pressure.
- (3) The gap width of fracture dominating the permeability near the injection well can be estimated from the relation between f and Re .

* Dr. Engng., Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Japan.

** Student, Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Japan.