

埼玉大学 工学部 学生員 古田島信義
 正会員 佐藤 邦明
 渡辺 邦夫

はじめに

岩盤内を流れる水の主な浸透経路はcrackであり、従って岩盤浸透流の挙動をとらえるためにはcrack系の諸性質、たとえば方向、間隙幅、連続性、crack壁面の凹凸(粗度)などを十分知る必要がある。しかしそういった性質は非常に複雑で、統一的にとらえがたい。今回これらの性質のうち、特にcrack表面の凹凸が浸透流に与える影響を花こう岩サンプルを用いて実験的に研究をした。従来、たとえば円管や平行平滑板間隙の抵抗係数に与える粗度の影響についての研究はなされているが、実際の岩石内に存在するcrackについて検討した例はほとんどない。したがって、岩盤浸透流の挙動をより詳しくとらえる上で、今回の研究は興味深いものとする。

1. micro-crackの表面形態と流れの性質の検討

今回検討に用いた試料は、群馬県草木ダム及び瀬戸内周辺の花こう岩コアサンプルである。これらコアサンプル(径約5cm,長さ10cm)において、浸透経路となるのは間隙率が数十ミクロン以下で、長さが数mmから十cm程度のmicro-crackである。今回まずこのmicro-crack壁面の形態をS.E.M.(走査型電子顕微鏡)を用いて観察した。その代表的な写真を図-1, 図-2に示す。まず図-1で、中央に見える凹凸のある部分が既存のcrack壁面で、そのまわりのツヤのある部分は、サンプルをハンマーで砕いた時にできた新しい破断面である。浸透水はこの凹凸の著しい既存のcrack部分を通過している。図-2は別のcrack表面の写真であるが、そのcrack表面を切って他のcrackが存在している。やはりcrack壁面にかなりの凹凸が存在している。従来、岩盤crackは二枚の平行平滑板間隙によりモデル化されることが多かったが、実際にはcrackは図-1, 図-2のように、表面にかなりの粗さを考えることが必要であろう。つぎにこのようなcrack中を流れる水の挙動について考えるが、今回著者らは平行平滑板間に粗度がある場合を二次元的にモデル化して、その流線を求めて検討した。この手法はK.P. Stark¹⁾などが電子計算機を用いて、モデル化したPorous media内の流線を求めたものと同様である。基礎式はよく知られるように以下の(1),(2)式で示され、これらの式を連立させて中央差分により計算した。

$$\nabla^2 \bar{\psi} = \bar{\varepsilon} \quad \text{--- (1)} \quad \nabla^2 \bar{\varepsilon} = \text{Re} \left(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} \right) \quad \text{--- (2)}$$

ここで $\bar{\psi}$, $\bar{\varepsilon}$, $\bar{x}$, $\bar{y}$ はそれぞれ渦度, 流関数, 座標を各々最大流速、及びcrackの代表間隙幅を用いて無次元化したもので、Reはレイノルズ数である。その結果を図-3, 図-4に示す。これらは図中上部の中心線を

の凹凸が存在する場合の流線である。今回提示したのは簡単な場合の二例であるが、この手法によりcrack中の浸透流に与える壁面粗

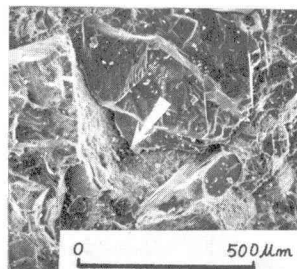


図-1 crack写真

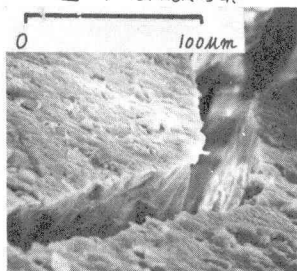


図-2 crack写真

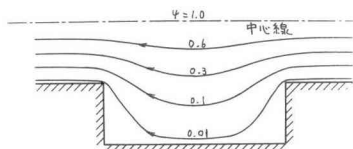


図-3 Re=0.01の場合の流線

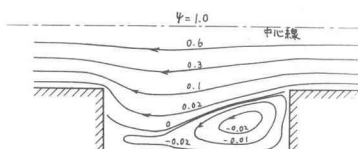


図-4 Re=10.0の場合の流線

度の影響を定性的にとらえることができる。今回はこの手法以外に実際の試料を用いて、レイノルズ数と抵抗係数の関係から粗度の浸透流に与える影響をとらえてみた。

2. レイノルズ数と抵抗係数の関係

C. Louis²⁾は図-5のように、表面に凹凸や規則的な波形粗度をつけた2枚の板の間に水を流して、その抵抗係数 f 、レイノルズ数 Re 、相対粗度 t/D_h （ここで $D_h=2t$:水力直径）の間の関係を実験的に求めている。ここに t は間隙幅、 t は平均的な凹凸の高さである。またLomizeも同様な式を求めており、それらを次に示す。これは層流で $(t/D_h)>0.033$ の場合である。

$$f = \frac{96}{Re} \left[1 + 17 \left(\frac{t}{D_h} \right)^{1.5} \right] \dots (3) \quad f = \frac{96}{Re} \left[1 + 8.8 \left(\frac{t}{D_h} \right)^{1.5} \right] \dots (4)$$

(Lomize) (Louis)

これらの式で、岩石内に存在するcrackについてこの t/D_h を求めることは實際上難しく、あまり実用的ではないと思われる。今回この相対粗度に代わる量を用い、 $Re-f$ の関係を表わすことを考えた。まず、となる間隙幅を持つ平行平板間の層流状態の流れを考えると、平均流速 U_m は $U_m = \frac{g t^3}{12 \nu I} \dots (5)$ で表わし得る。ここで ν は動粘性係数、 I は動水勾配である。実際の流速は、粗度のためこれより小さくなるはずである。ここで、粗度の影響を幅 t がみかけ上 t' となつたとしとらえると仮定すると、実際の流速 U_m は $U_m = \frac{g t'^3}{12 \nu I} \dots (6)$ と表現できる。ただしここで考えた t' は、必ずしも図-5の $(t-t)$ と同じではない。実際の f と Re は、測定量 U_m 、 t を用いて次式で求めることになる。

$$f = \frac{2g D_h}{(U_m)^2} I \dots (7) \quad Re = \frac{U_m' D_h}{\nu} \dots (8)$$

この式に(6)式を代入して整理すると次式のようになる。

このように $(t'/t)^2 = \alpha$ とおけば、 α は比例定数となる。これは粗度の影響を表わす量で、 $t'=t$ つまり粗度の影響がなければ、この式は通常の $f = 96/Re$ に帰着する。ここで三軸圧縮型透水試験機を用い、圧力差1.0~3.0kg/cm²（動水勾配100~300）で透水試験を行い、実際のサンプルの Re と f を測定した。流速 U_m は、単位面積当りのみかけの流量 q を単位面積当りのcrack面積で除して求めたcrack内の平均流速で、いわば真の流速である。この単位面積当りのcrack面積については、偏光顕微鏡下で求めたが、この方法については筆者らが報告している³⁾。

求めた $Re-f$ の関係を図-6に示す。図中に記入してある直線は、平行平板に粗度のない場合の理論値、つまり式(9)において $\alpha = 1$ の場合である。また、図中に記入されている数字は、測定した試料の間隙率(%)である。図-6を見ると、実測値が理論直線より大きな値を示し、ほぼ平行な直線関係になっていることがわかる。図からまずこの程度の動水勾配ではcrack内の流れは層流であるといえる。また間隙率が小さくなると、理論直線からかなり外れてくるが、これは粗度の影響がより増加し、 $\alpha > 1$ となることを示している。これは間隙率が小さくなり、crack幅が狭くなると、相対的に粗度の影響が大きくなることを表わしている。以上、今回の研究により、実際の岩石中の浸透流抵抗をある程度明らかにすることができたが、理論的考察もあわせて、定数 α などをより一般的に評価する研究を行うつもりである。

(参考文献) 1) K.P. stark "Numerical solution of navier stokes equations for flow through idealised porous materials." 2) C.Louis "A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability of rock mass." 3) 渡辺, 佐藤 "花崗岩コアサンプルを対象とした岩盤透水係数の理論的評価" 第34回年次学術講演会概要集

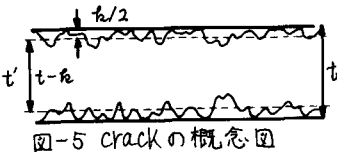


図-5 crackの概念図

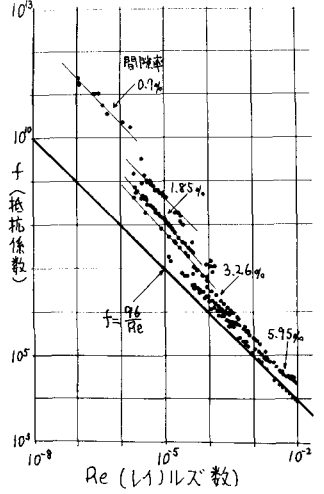


図-6 Reとfの関係