

(25) 単一亀裂を有する供試体による浸透特性の研究

関西電力(株) 正会員 打田 靖夫

正会員○吉田 次男

関電興業(株) 安原 敏夫

Permeability Test of Single Fracture

Yasuo UCHITA, Tsugio YOSHIDA, The Kansai Electric Power Co., Inc
Toshio YASUHARA Kandenkogyo Co., Inc

Abstract

Groundwater flow is influenced by the fractures of rocks. And the states of the fractures are various. In some cases, the fractures are closed, the other cases, the fractures are widely open. The velocities of groundwater flow are also various. And in some cases, Darcy's law may be invalid.

So it is necessary to understand not only Darcy flow but also Non-Darcy flow to estimate permeability. And the Darcy flow and non-Darcy flow were studied in single fracture.

1. はじめに

岩盤中の水の流れは割れ目系に支配されている。この場合、割れ目の状態は、密着したものから、大きく開口したものまで様々である。また、流速についても、自然の流れでは、流速が非常に遅い場合もあり、逆に、ルジオン試験などでは、流速が非常に速い場合もある。岩盤の透水特性を評価する場合、一般にDarcy則が成り立つと仮定しているが、このような多様な条件下で岩盤の透水特性を評価する場合、Darcy流だけでなく、non-Darcy流の透水特性も把握する必要があると考えられる。

そこで、単一亀裂を模擬した供試体を用いてDarcy流、non-Darcy流の透水特性のうち、注水圧力と通水量の関係、亀裂開口幅と通水量の関係、通水時の圧力減衰特性を調べた。

2. 試験方法

供試体は、図1に示すように、模擬亀裂面の内径が8cm、外径が50cmの単一亀裂を有するアクリル製円盤供試体であり、亀裂開口幅は、周囲に配置した8個のボルトにより制御する。亀裂面には、#24の金剛砂によって研磨するとともに、1cm間隔で円周方向に幅1mm、深さ1mm程度の溝を掘ることでラフネスを持たせている。

亀裂開口幅は、最小目盛り0.01mmの隙間ゲージにより供試体周辺部の開口幅を測定した。通水量については、最小目盛り $0.01\text{cm}^3/\text{s}$ の電磁流量計により測定した。注水圧力と亀裂面の圧力分布については、最小目盛り $0.001\text{kgf}/\text{cm}^2$ の間隙水圧計により①供試体とチューブの接続部分②亀裂注入部より0.4cm③亀裂注入部より7.2cm④亀裂注入部より13.8cm⑤亀裂注入部よ

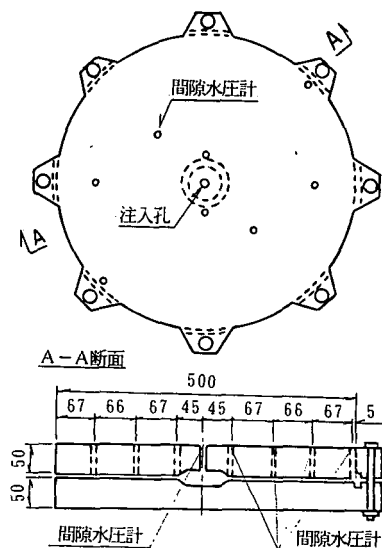


図1 供試体

り20.5cmの各位置で水圧測定を行った。

0.01mmから1.0mmの各亀裂開口幅における試験を行い、注水圧力と通水量の関係、および亀裂面における圧力分布特性について調べた。試験は、飽和状態を保つために水槽の中で行った。

また、アクリル製供試体での注水圧力と通水量の関係を再確認するために、滑らかな亀裂面を有するモルタル供試体による追加試験も併せて行った。

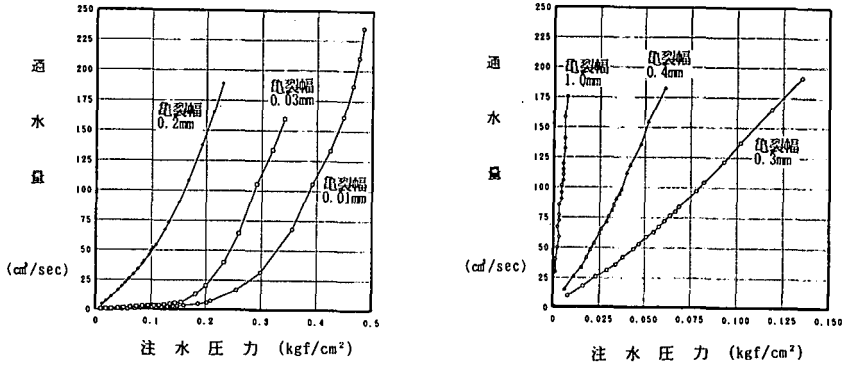


図2 注水圧力～通水量（亀裂流入部圧力を注水圧力）

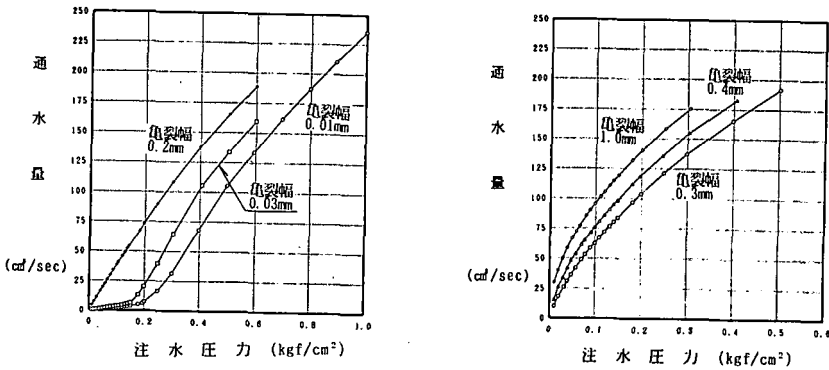


図3 注水圧力～通水量（注水チューブ接続部圧力を注水圧力）

3. 試験結果と結果の考察

（1）注水圧力と通水量の関係

図2に亀裂開口幅0.01mm、0.03mm、0.2mm、0.3mm、0.4mmおよび1.0mmにおける注水圧力と通水量の関係を示す。注水圧力については、注入水が亀裂部に流入する際に圧力の低下が生じるので、亀裂流入部より0.4cmの位置で測定した水圧を注水圧力とした。

亀裂開口幅が0.3mm以下の場合には、注水圧力と通水量の関係は下に凸の関係となり、注水圧力が大きくなるに従って透水係数が増加する。この特性は、亀裂開口幅が小さいほど顕著である。この特性は、粘土などの土質材料にみられる高粘性流と呼ばれる流れと同様の特性である。¹⁾

亀裂開口幅が0.4mm以上の場合には、注水圧力と通水量の関係はほぼ比例関係にありDarcy則が成立している。

試験装置の通水能力等の関係から最大亀裂開口幅1.0mm、注入圧力0.007kgf/cm²としたが、さらに亀裂開口幅が大きく、注水圧力が大きくなると乱れによるエネルギーの損失が増大し、注水圧力と通水量の関係は上に凸の関係になるものと予想される。

図3は供試体と注水チューブの接続部分の水圧を注水圧力として、注水圧力と通水流量の関係を示した

ものである。亀裂開口幅、注水圧力が小さい場合には、図2と同様に注水圧力と通水流量の関係は下に凸に関係がある。しかし、亀裂開口幅や注水圧力がある程度大きくなると、注水圧力と通水流量の関係は上に凸となる。また、亀裂開口幅と通水流量の関係を図2の場合と比較すると、亀裂開口幅の変化による通水量の変化が小さい。

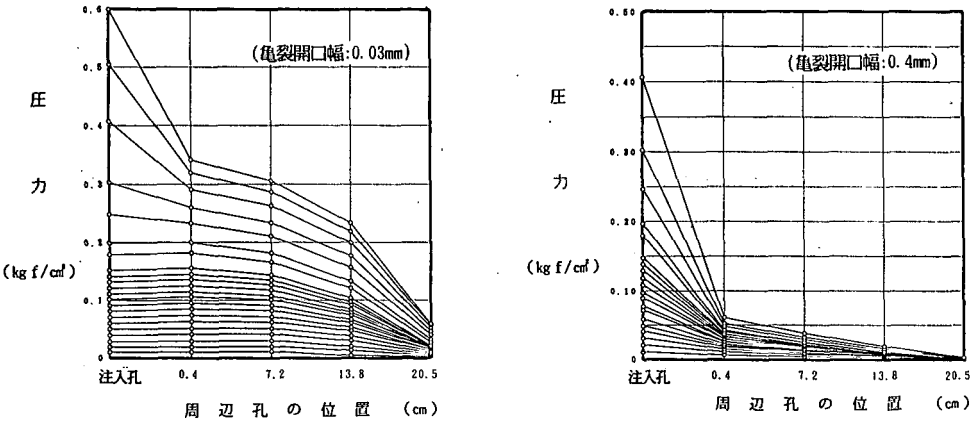


図4 周辺孔圧力減衰特性

(2) 圧力減衰特性

図4に亀裂開口幅0.03mm、0.4mmにおける注水時の圧力変化を示す。亀裂開口幅、注水圧力が小さい場合には、注入水が亀裂部に流入する際の圧力の減衰が小さいが、亀裂開口幅、注水圧力が増大するに従って圧力の減衰が大きくなる。これにより、図3のように供試体と注入チューブの接続部の圧力を注水圧力とした場合には、亀裂開口幅、注水圧力が大きい場合、通水量を過小評価することになる。ルジオン試験などを行う場合、注入水が亀裂部に流入する際に大きく圧力低下を起こす可能性があり、検討を要するものと考えられる。

亀裂面での圧力減衰特性と亀裂開口幅、注水圧力の関係をみると、亀裂開口幅、注水圧力が増加するに従って、圧力減衰が速くなる傾向にある。そこで、Darcy則が成立する場合の平行円盤の圧力減衰特性と比較する。Darcy則が成立する場合、連続の式、および境界条件より以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned}
 v &= -K \cdot dP / dx & \text{--- ①} \\
 2\pi \times 4.5 \times v_0 &= 2\pi \times (4.5 + x) \times v & \text{--- ②} \\
 x = 0 \quad P &= P_0 & \text{--- ③} \\
 x = 20.5 \quad P &= 0 & \text{--- ④}
 \end{aligned}$$

ここで、 v : 流速 K : 透水係数
 P : 亀裂面の水圧 x : 亀裂注入部からの距離
 v_0 : 亀裂注入部での流速
 P_0 : 亀裂注入部での水圧

①②③④式より圧力減衰特性は、

$$P = \frac{P_0}{\ln(25/4.5)} \ln \{25/(4.5+x)\} \quad \text{--- ⑤}$$

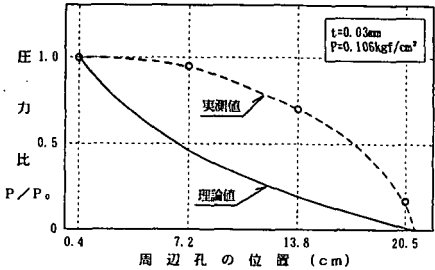


図5.1 圧力減衰特性 (亀裂幅0.03mm)

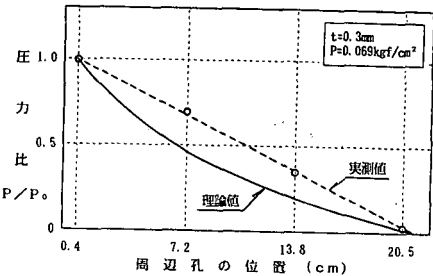


図5.2 圧力減衰特性 (亀裂幅0.3mm)

となる。図5は、この理論式と実測値を比較したもので、縦軸には、亀裂流入部との圧力比をとってある。亀裂開口幅が小さい場合は、理論値よりも圧力の減衰が遅く、逆に亀裂開口幅が大きい場合には、理論値よりも圧力の減衰が速くなる。

(3) 亀裂開口幅と通水量の関係

図6に注水圧力一定の場合の亀裂開口幅と通水量の関係を示す。注水圧力が $0.02 \sim 0.06 \text{ kgf/cm}^2$ （動水勾配 $I \approx 1 \sim 3$ ）においては、亀裂開口幅の3乗と通水量が比例する。しかし、注水圧力が増加するに従ってこの乗数が減少し、注水圧力が 0.2 kg/cm^2 （動水勾配 $I \approx 10$ ）では、亀裂開口幅の1.7乗と通水量が比例する。

亀裂開口幅と通水量の関係は、Poisuilleの法則、Darcy則が成立する場合には、

$$Q = AKI$$

$$= hgt^3I / 12\nu \quad \text{----- ⑥}$$

ここで、 Q ：通水量 A ：亀裂の断面積
 K ：透水係数 I ：動水勾配
 h ：亀裂横幅 t ：亀裂開口幅
 g ：重力加速度 ν ：動粘性係数

となり、通水量は亀裂開口幅の3乗に比例する。しかし、⑥式は流速が遅い層流状態に対する式であり、流速が速く乱れが生じると、例えば、マンニングの式のように乱流を対象とした式に近い挙動を示すようになると考えられる。この場合、通水量は、

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} = \frac{t \cdot h}{n} \left(\frac{t \cdot h}{2t + 2h} \right)^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

$$\approx \frac{t \cdot h}{n} \left(\frac{t \cdot h}{2h} \right)^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (t \ll h)$$

$$= \frac{h}{2^{\frac{2}{3}} n} t^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad \text{----- ⑥}$$

ここで、 R ：径深 n ：粗度係数
 となり、通入量は亀裂開口幅の5/3乗に比例することになる。この乗数は、注水圧力が 0.2 kg/cm^2 の時の乗数1.7に近い値である。

4. モルタル供試体を用いた追加試験

アクリル製供試体による試験結果の確認をするために、 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ の滑らかな亀裂面を有するモルタル供試体を用いて透水試験を行った。注水は、供試体中央の $\phi 20.5 \text{ cm}$ の注水孔より行った。

図7は、供試体と注水チューブの接続部の圧力を注

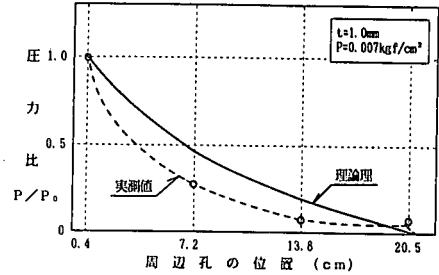


図5.3 圧力減衰特性（亀裂幅1.0mm）

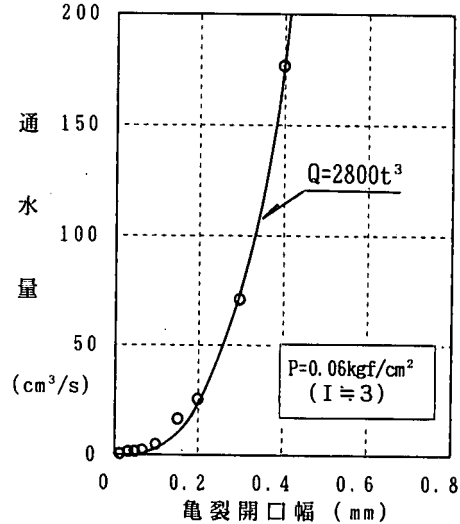


図6.1 亀裂開口量～通水量（ $P=0.02 \text{ kgf/cm}^2$ ）

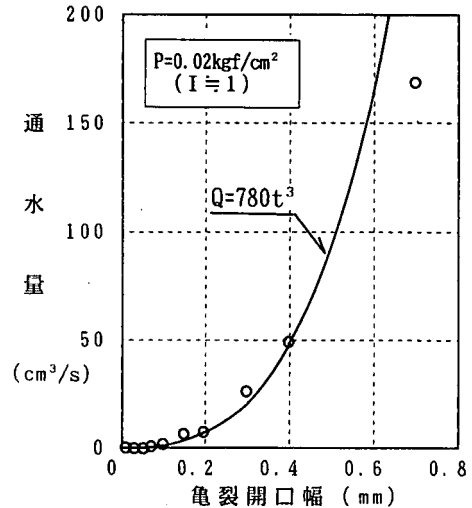


図6.2 亀裂開口量～通水量（ $P=0.06 \text{ kgf/cm}^2$ ）

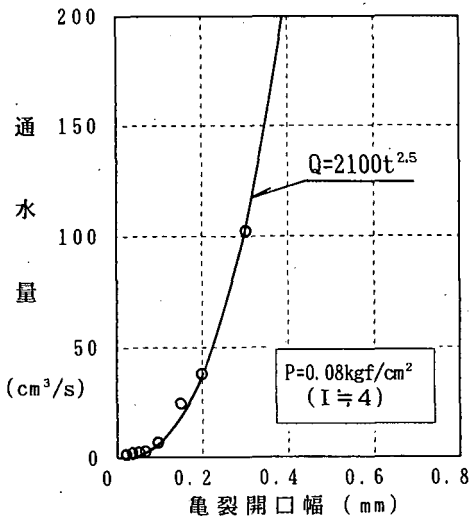


図6.3 亀裂開口量～通水量 ($P=0.08\text{kgf/cm}^2$)

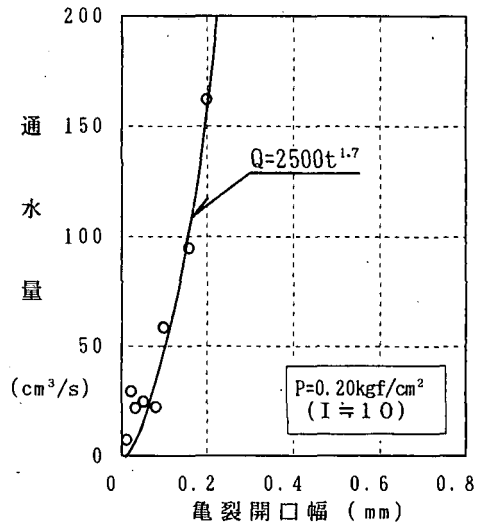


図6.4 亀裂開口量～通水量 ($P=0.20\text{kgf/cm}^2$)

水圧力として、注水圧力と通水量の関係を示したものである。亀裂面に凹凸がある場合と同様に、亀裂面が滑らかな場合も亀裂開口幅が小さい場合には、注水圧力と通水量の関係は下に凸の関係にあり、亀裂開口幅が大きくなると上に凸の関係となる。

5. まとめ

単一亀裂を有する供試体を用いて、透水特性を調べ以下の結果を得た。

- (1) 亀裂開口幅が小さい場合、注水圧力と通水量の関係は比例関係とならず、注水圧力が増加するに従って、透水係数が増加する。
- (2) 注水圧力が低い場合には、Poisuilleの式が示すように通水量は亀裂開口幅の3乗に比例するが、注水圧力が高くなると通水量は亀裂開口幅の3乗に比例しなくなり、この乗数は減少する。
- (3) 亀裂開口幅が小さい場合には、Darcy則が成立すると仮定した場合の理論式よりも圧力の減衰が遅く、逆に、亀裂開口幅が大きい場合には、この理論式よりも減衰が速くなる。

6. 参考文献

- 1) 土質工学会：地下水入門，pp47-56，1983

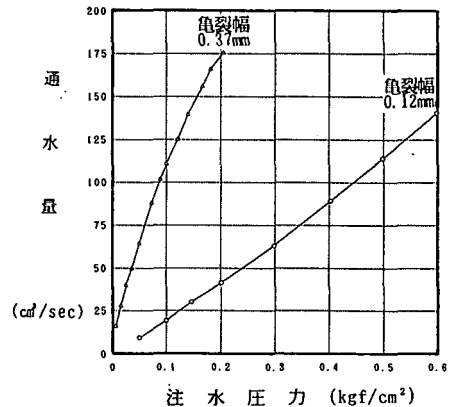
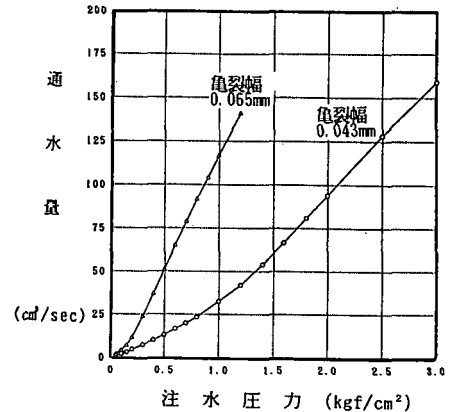


図7 モルタル供試体の透水特性