

(株) 熊谷組(埼玉大学研究生)正員 ○伊藤 洋  
 埼玉大学工学部 正員 佐藤 邦明  
 (株) 熊谷組 正員 清水 昭男

はじめに

岩盤中の地下水流動は、岩盤割れ目系を主たる経路とするが、砂岩質の破碎岩盤のようなものは岩質自体も透水し得るといった性質を備えている。つまり、岩盤の岩質自体とその割れ目系が二重空隙系をもつことになる。本研究は、Barenblatt らが岩盤の水理モデルとして導入した二重空隙モデル(double porosity model)を割れ目系をもつ透水性ブロックの集合により模擬し、透水実験を行い、二重空隙性を考慮した岩盤浸透流の抵抗則を実験的に検討したものである。

## 1. 実験装置と実験方法

実験装置の概略は、図-1に示したように、機能別に分けると、①オーバーフロー水槽、④透水槽、⑥マノメーターとなっている。透水媒体は、図-2に示すような平面形状で正方形と平行四辺形の2種のブロックを用いて図-3に示した三つの形態の割れ目系に配列することにより作る。図-2の左側に示した透水性ブロックは、金網を張ったフレームの中にガラス球(平均粒径 $d_g=3\text{mm}$ )が充てんされており、透水係数 $k_a=0.0214\times 10^{-2}\text{m/s}$ ( $20^\circ\text{C}$ )、空隙率 $\lambda_a=38.4\%$ である。また、ブロック壁面は粗面であり、平均粗度高さは $d_r=0.5\text{mm}$ である。一方、図-2の右側に示した不透水性ブロックは、通常の割れ目系岩盤のモデルを作るもので、アクリル製であり、壁面は滑面と見なし得る。

実験は、表-1に示したような割れ目幅 $d$ を設定し、オーバーフロー水槽の高さを調節することにより水頭差を種々変化させて行う。使用流体は、エンジンオイル(動粘性係数 $\nu=4.38\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ,  $20^\circ\text{C}$ )を用いた。

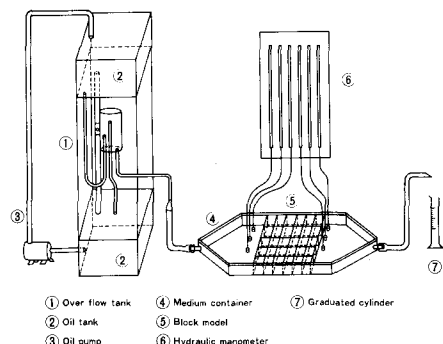


図-1 実験装置の概略

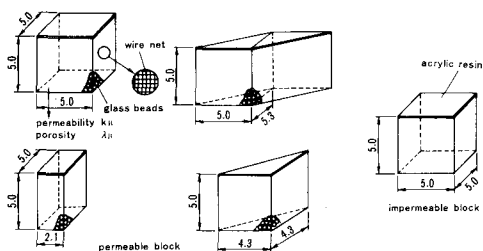


図-2 基本ブロックモデル

## 2. 実験結果と考察

上述したように、岩盤の二重空隙性に力点を置いたものが、double porosity model であるため、本実験の場合、ブロック部分が岩質自体に、それらの空隙が割れ目系にあたる。透水の観点より、岩質部の空隙を貯留空隙(一次空隙)、割れ目系のそれを流路系空隙(二次空隙)と呼ぶ。それぞれの空隙系は岩盤モデル全体として、透水係数 $k_1, k_2$ 、有効空隙率 $\lambda_1, \lambda_2$ を有している。ここでは、二重空隙岩盤浸透流における透水係数 $k$ の基本表現、 $k=Cg/\nu\cdot R_H^2$ を基本として検討する。ここに、 $C$ :定数、 $g$ :重力加速度、 $\nu$ :動粘性係数、 $R_H$ :代表寸法である。いま、一次、二次空隙系における透水係数は、上述した基本式より、

$$k_1=A_1/A\cdot C_1\cdot g/\nu\lambda_1(ed_e)^2, \quad k_2=A_2/A\cdot C_2\cdot g/\nu\cdot d^2\cdots\cdots (1)$$

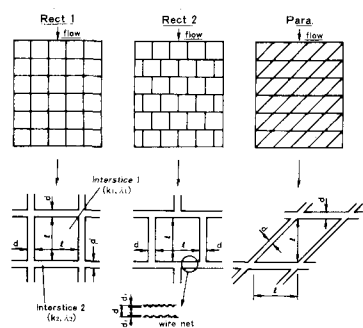


図-3 配列形態

と書き得る。ここに、 $e$ はブロックの間隙比、 $A$ は透水面の全体透水面積、 $A_1$ は岩質自体の占める面積、 $A_2$ は割れ目部の占める面積である。これより岩盤全体の透水係数 $k$ は、 $k = k_1 + k_2 \dots (2)$ と表現できる。式(2)に式(1)を代入し、 $A_1/A \approx 1$ 、 $A_2/A = \lambda_2$ および割れ目系の曲がり度 $\alpha$ を考慮して整理すると、

$$k = C_2 \frac{g}{\nu} D^2, D = \sqrt{C_1/C_2 \lambda_2 (ede)^2 + \alpha \lambda_2 d^2} \dots (3)$$

となる。ここで、本実験では、定数 $C_1, C_2$ は、屈曲のない割れ目を有する Rect 1 およびブロックのみの透水実験より、実験的に $C_1 = 0.00717$ 、 $C_2 = 0.073$ となった。参考までに述べると、これらの値は Kozeny<sup>2)</sup>が多孔体(ガラス球等)を対象に求めた $C_1 = 0.0053 \sim 0.0084$ 、Louis<sup>3)</sup>による壁面凹凸をもつ単一割れ目における $C_2 = 0.076$ (相対粗度 $d/2d = 0.05$ )ともほぼ一致している。また、曲がり度 $\alpha$ は、透水媒体の長さ $L$ と実際の割れ目長さ $l'$ の比( $\alpha = L/l'$ )であると定義すると、Rect 1 の場合は $\alpha = 1$ 、Rect 2 ;  $\alpha = 1/2$ , Para ;  $\alpha = 1/2.41 \times \sqrt{2}$ となる。

岩盤全体の流れの抵抗則を検討するため、式(3)によって表現された代表寸法 $D$ を用いて抵抗係数 $\zeta$ とレイノルズ数 $Re$ の関係を調べたものが、図-4である。図中には、一次空隙のみをもつ場合( $k_2 = 0$ , Block)、二重空隙をもつ場合(Rect 1, 2, Para)および二次空隙のみをもつ場合( $k_1 = 0$ , a-Rect 1)のそれを同時に示した。これより、 $\zeta$ と $Re$ は-1乗に比例しており、層流状態と見なせ $\zeta = 26.7 \sim 33.9/Re$ の関係があることがわかる。つぎに、図-5は式(3)により求まる透水係数 $k$ と割れ目幅 $d$ の関係を示したものである。図中の破線は、表-1に示した実験値である。これより、岩盤全体の透水係数は、主に割れ目幅に支配されるが、それがかなり小さく全体の透水係数も小さい場合には、岩質自体のもつ透水性( $k_1$ )にも大きく影響されることが認められる。実例として、花崗岩のコアサンプル透水試験結果 $k_1 = 1.4 \times 10^{-9}$  m/s、 $\lambda_1 = 2.17\%$ 、 $k_2 = 9.8 \times 10^{-9}$  m/s、 $\lambda_2 = 1.02\%$ を用いて考えると、この場合、割れ目幅 $d$ は、式(3)において $C_2 = 0.034$ ( $d_r/2d = 0.3$ )<sup>3)</sup>、 $\alpha = 1$ と仮定し逆算すると $d = 1.7 \mu\text{m}$ となる。また、コアサンプル全体の透水係数は、式(2)より $k = 1.12 \times 10^{-8}$  m/sと計算される。全体の透水係数は、空隙率1.02%の割れ目系空隙によって約8倍増加させられているが、割れ目を $\lambda_2 = 0.5\%$ 、 $d = 1.0 \mu\text{m}$ と仮定すると、 $k = 3.1 \times 10^{-9}$  m/sとなり、約2倍程度の増加しかみられないことが確認できる。最後に、本実験に当って、高橋誠氏(大豊建設)の助力があったことを付記し、謝意を表わす。

表-1 実験結果

| Packing type                              | Name of Exp. | width (d)<br>( $\times 10^{-3}$ m) | effective porosity of<br>fissures ( $\lambda$ ) (%) | (k)<br>permeability<br>( $\times 10^{-10}$ m/s) |
|-------------------------------------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Rectangular 1                             | Rect 1-1     | 0.3                                | 5.8                                                 | 0.106                                           |
|                                           | Rect 1-2     | 0.4                                | 7.5                                                 | 0.231                                           |
|                                           | Rect 1-3     | 0.5                                | 9.3                                                 | 0.392                                           |
|                                           | Rect 1-4     | 0.6                                | 10.9                                                | 0.670                                           |
|                                           | Rect 1-5     | 0.7                                | 12.5                                                | 0.929                                           |
| Rectangular 2                             | Rect 2-1     | 0.3                                | 10.0                                                | 0.0967                                          |
|                                           | Rect 2-2     | 0.4                                | 13.5                                                | 0.190                                           |
|                                           | Rect 2-3     | 0.5                                | 16.7                                                | 0.320                                           |
|                                           | Rect 2-4     | 0.7                                | 22.4                                                | 0.848                                           |
| Parallelogrammic                          | Para. 1      | 0.3                                | 10.0                                                | 0.0978                                          |
|                                           | Para. 2      | 0.4                                | 12.2                                                | 0.178                                           |
|                                           | Para. 3      | 0.5                                | 14.2                                                | 0.220                                           |
| Rectangular 1<br>(acrylic resin<br>block) | a-Rect 1-1   | 0.3                                | 5.8                                                 | 0.0645                                          |
|                                           | a-Rect 1-2   | 0.4                                | 7.5                                                 | 0.168                                           |
|                                           | a-Rect 1-3   | 0.5                                | 9.3                                                 | 0.306                                           |

\*20℃における透水係数に換算した。

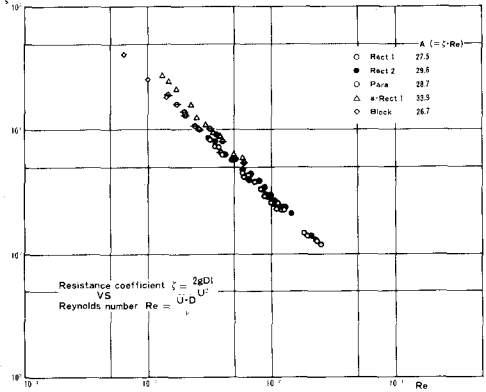


図-4 抵抗係数 $\zeta$ とレイノルズ数 $Re$ の関係

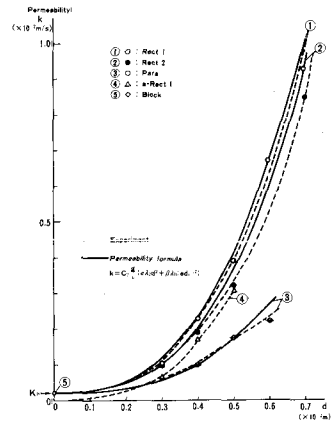


図-5 透水係数と割れ目幅の関係

参考文献

- 1) Barenblatt, et al : P.M.M, vol 24, PP. 852 ~ 864, (1960)
- 2) 鹿島出版 : 透水, P79, (1980)
- 3) Louis, C : Rock. Mech. Res. Rept. 10, PP 1 ~ 90, (1969)