

交差亀裂による流体の非線形流動特性に関する実験的検討

長崎大学工学部 学生会員 ○梶原志保 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 大嶺 聖
 正会員 杉本知史 正会員 李 博 学生会員 劉 日成

1. はじめに

近年、地下エネルギー貯蔵施設や高レベル放射性廃棄物の地層処分等のプロジェクトが注目を集めている。これらの施設の設計、施工及び維持管理については、適切な対策を施す必要があり、基礎的な情報として、岩盤の力学的、水理的特性を明確に把握することが重要である¹⁾。本実験では、岩盤内亀裂を再現したモデルに流量を設定した上で水を流入し、流入口と流出口に設置した差圧計によって水頭差を測定する。そして、モデル内の流量 Q と水頭差 P との関係を定量的に評価し、既往研究で提案された式と比較・検討することで、平行平板モデルとラフネスを有するモデルの透水特性の違いを明らかにすることを目的とする。

2. 供試体の作成

実験で使用した供試体の概略を図 - 1 に示す。本実験では、流動挙動を可視化するために、岩盤の代わりに高強度透明ガラスを用いて供試体を作成した。1つの供試体に対し50cm×50cm×5mmのガラスを3枚使用した。1枚は亀裂の交差角が $\theta = 60^\circ$ となるように、4枚に切断し、開口幅1mmを設けた上で残り2枚のガラスで挟み、流入と流出口にタンクを取り付け漏れしないように接着剤で固定した。1つのモデル中の亀裂は完全な平行平板（以下、平行平板モデル）となり、もう1つの亀裂はラフネス（以下、ラフネスモデル）を有するように加工した。ラフネスの大きさをTse and Crudenによって提案された粗さ指標 Z_2 の換算で計算するとJRC値=18~20であった²⁾。なお、平行平板モデルのJRC ≈ 0 、開口幅は1mmと固定した。

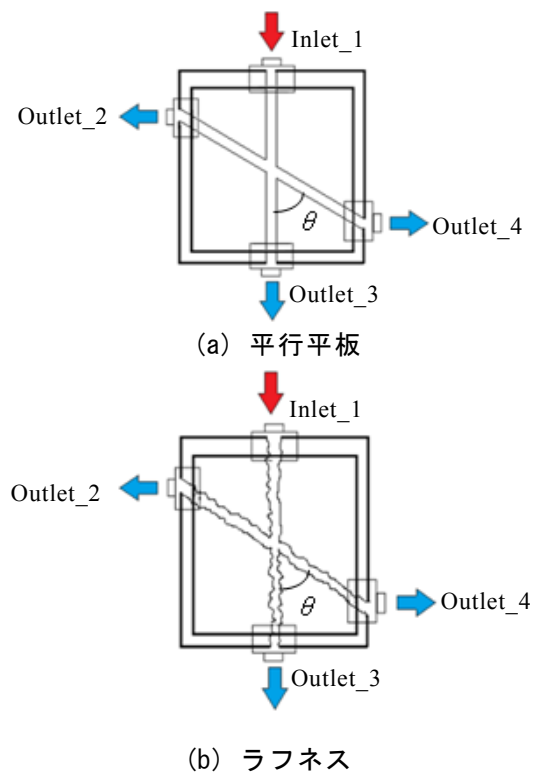


図 - 1 供試体の概要

3. 実験概要

本研究では、給水口をinlet_1で固定し、流出口はoutlet_2, 3, 4からケースに合わせて設定する。流出口を変えることにより、亀裂の交差角は 0° 、 60° 、 120° となる実験を1つの供試体で行うことができる。また、出口が2つになった場合を含め、各モデルに対して6ケースの実験を行った。実験のケースを表 - 1 に示す。ここで、給水する流量は徐々に大きくし、1~100ml/minの範囲で変化させ、計14回の測定を行った。流入タンクと流出タンクに差圧計を取り付けることによりモデル内の水頭差を計測する。実験中はモデルが常に水平を保つようにしているため、出口が2つの場合はどちらか片方に差圧計を取り付ける。

表 - 1 実験ケース

供試体	流入口	流出口	流量 (ml/min)
平行平板	Inlet_1	Outlet_2	1,3,5,7,
		Outlet_3	10,20,30,
		Outlet_4	40,50,60,
Outlet_2&3		70,80,	
ラフネス		Outlet_2&4	90,100
		Outlet_3&4	

4. 実験結果と考察

亀裂内の流体の流れは一般的に3乗則を用いて評価することができる。既往研究では、単一亀裂において流量が小さい場合、流量 Q と水頭差 P の関係が線形関係であり、式(1)に従うことを示している。しかし、流

量が大きくなった場合には、流量 Q と浸透圧 P の関係は非線形となり、式(2)によって評価される³⁾。

$$\nabla p = \frac{\mu}{k_0 A} Q \quad (1)$$

$$\nabla p = \alpha Q + \beta Q^2 \quad (2)$$

ここに、 ∇p は水頭差、 Q は流量、 μ は粘性率、 k_0 は透水係数、 A は断面積、 α 、 β はモデル係数である。

図 - 2(a) に平行平板モデルの水頭差と流量の関係 (1~100ml/min)、図 (b) に図 (a) 中の流量 1~10ml/min までの水頭差と流量の関係の拡大図を示す。図 - 3 に平行平板モデルと同様にラフネスモデルの実験結果を示している。同じ流量の場合流出口が 2 つある方が、流出口が 1 つのケースと比べ水頭差と流量の勾配が小さくなっている。それは、出口が 2 つになると、流れの経路が増え、断面積 A が大きくなったためである。

図-2 (b) と図-3 (b) に着目すると、流量が小さい 1~10ml/min 時には水頭差と流量の関係は線形関係であり、式(1)が適用できる。流量が大きくなるとその関係が非線形となり、式(2)が適用できるようになる。このことから、式(1)と(2)は単一亀裂のみならず、亀裂交差部にも適用できることがわかった。

図 - 2, 3 を比較すると、平行平板モデルと比べて、ラフネスモデルの方が β の値が 1 オーダー程度大きく、強い非線形性を示している。これは水がラフネスを有する亀裂を通る際に屈曲や回流などが起こり、水頭損失が発生したためであると考えられる。

5. おわりに

本研究では、ガラス材を用いて交差する亀裂を再現した模擬供試体を作成し、変水頭透水試験を行うことで、水頭差と流量の非線形的関係を定量的に評価した。今後は、実際の岩盤材料を使って実験を行い、岩盤内の亀裂ネットワークの透水特性をより詳細に評価していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Liu R, Jiang Y, Li B, et al. A Fractal model for characterizing fluid flow in fractured rock masses based on randomly distributed rock fracture networks. Computers and Geotechnics, 65, pp. 45-55, 2013
- 2) 田島成一郎ら：岩盤不連続面内の接触状況が透水特性に及ぼす実験的解明, 土木学会西部支部研究発表会, III-011, 2009
- 3) Zhang Z, Nemeik J. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures, Journal of Hydrology, 477, pp. 139-151, 2013

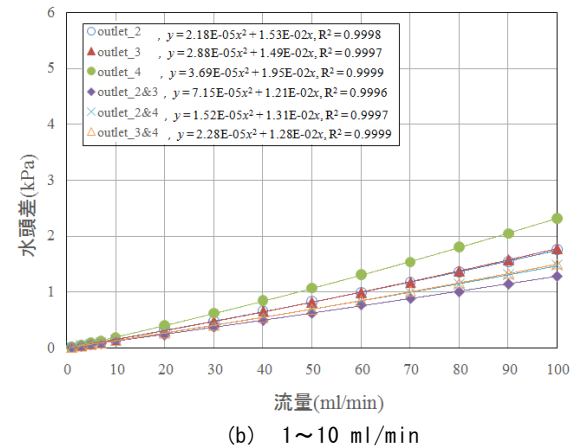
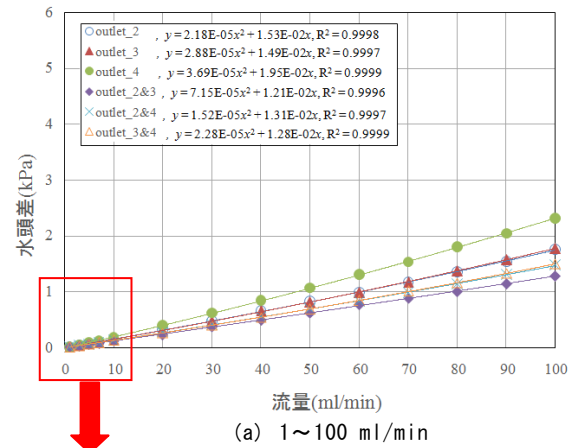


図 - 2 水頭差と流量の関係 (平行平板)

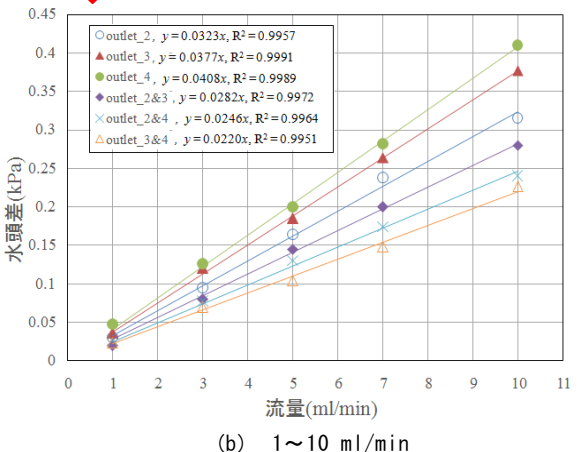
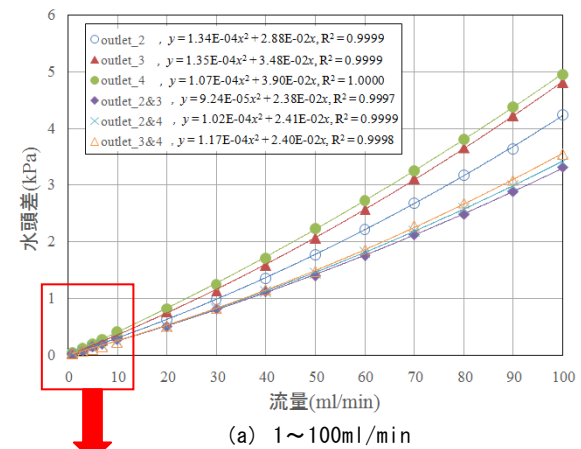


図 - 3 水頭差と流量の関係 (ラフネス)