

岩盤亀裂ネットワークの非線形流動特性に及ぼす交差部の影響について

長崎大学大学院工学研究科 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 学生会員 劉 日成

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物の地層処分などの深部地下空間の開発・利用が注目されている．特に高レベル放射性廃棄物の管理は環境問題において重要視されている．そのため、自然・社会環境へ及ぼす影響を極力おさえるために、地下の岩盤内における透水性を明らかにする必要がある¹⁾．本研究では、岩盤内の複雑な亀裂ネットワークの流動特性を解明するために、岩盤内亀裂の交差部の影響評価に着目した．亀裂ネットワーク内に流体が流入した際に、開口幅が流入口と流出口の圧力差と流量の関係にどのような影響を与えるのかを実験的に明らかにし、数値シミュレーションと比較検討することを目的としている．

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、開口幅を設けた上で残り 2枚のガラスで挟み、流入と流出口に開閉タンクを取り付け漏水しないように全体を接着剤で固定した．開口幅は Inlet_1 から Outlet_3 への水路を Line_1、交差する Outlet_4 から Outlet_2 の水路を Line_2 とし開口幅を設けた．

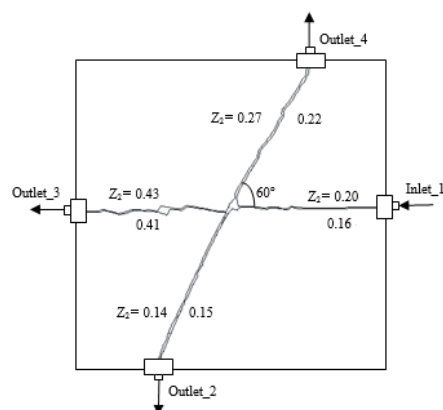


図 - 1 実験モデル概要

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 からパターンに合わせて設定する．実験パターンを表 - 1 に、実験概要を図 - 2 示す．給水する流量は徐々に大きくし、1～100ml/min の範囲で 5ml/min ごとに变化させ、流入出の開閉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．なお、流出口を変えることにより、亀裂の交差角が $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ となる透水実験を 1つの供試体で行うことができる．出口が 2 つになった場合を含め、6 ケースの実験を行った．実験中は、供試体のガラス同士の間に水が入り込まないように、万力で 8ヶ所固定した．また、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 $Z_2^{(2)}$ や実際の開口幅の平均 e を求めるため、実験モデルに赤い染色液を流入した後に CCD カメラで撮影し、画像を CAD に取り込み分析を行った．実験モデルを分析した数値を表 - 2 に示す．

数値シミュレーションは ANSYS FLUENT を使用した．流量の計算方法は式(1)に示す．

$$Q = \frac{e^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (1)$$

ここに、 Q は流量、 e は開口幅、 μ は粘性係数、 ΔP は圧力差、 ΔL は水路の長さである．

表 - 1 実験パターン

開口幅 e (mm)		流入口	流出口	流量 Q (ml/min)
line_1	line_2			
3	3	Inlet_1	Outlet_2	5,10,15,20,
			Outlet_3	25,30,35,4
	5		Outlet_4	0,45,50,55,
			Outlet_2&3	60,65,70,7
	7		Outlet_2&4	5,80,85,90,
			Outlet_3&4	95,100

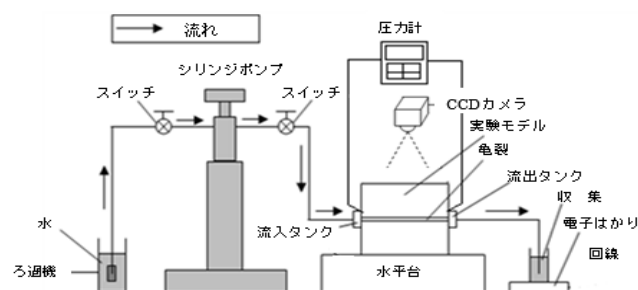


図 - 2 実験概要

透水実験では、流量を設定し、圧力差を測定したが、数値解析では式(1)を用いて圧力差を設定し、開口幅 e は CAD から分析した表 - 2 の数値を用いた。

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(2)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(3)によって評価される³⁾。

$$\Delta p = \frac{\mu}{k_0 A} Q \quad (2)$$

$$\Delta p = \alpha Q + \beta Q^2 \quad (3)$$

ここに、 Δp は圧力差、 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。

透水実験と数値解析の比較を図 - 3 に示す。実験と解析ともに式(2)と式(3)の特徴を判別することができた。さらに、解析結果の流量を 80% に補正したところ、実験値と解析値が非常に近い結果となった。これは数値シミュレーションが亀裂表面の垂直方向のラフネスの影響を考慮できないという点と、表 - 2 に示している実験モデルの分析値は CCD カメラで上部から撮影したものを CAD に取り込み分析したものであるため、水路に傾斜がある部分を判別することができないという二つの要因が影響していると考えられる。実験値は三次元の結果であるが、解析は二次元での結果であるためずれが生じたと考えられる。

5. おわりに

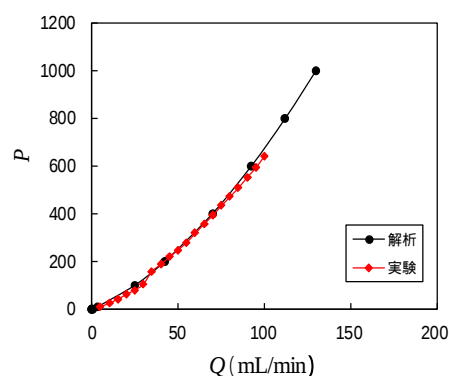
本研究では、岩盤内亀裂ネットワークの交差部に着目した透水実験を行い、数値解析との比較を行った。実岩盤では亀裂ネットワークがより複雑になるため、本研究はまだ基礎的検討の段階にあり、今後は亀裂ネットワークのランダム性などを考慮してより実条件を表現できる数値解析モデルを改善していく。

参考文献

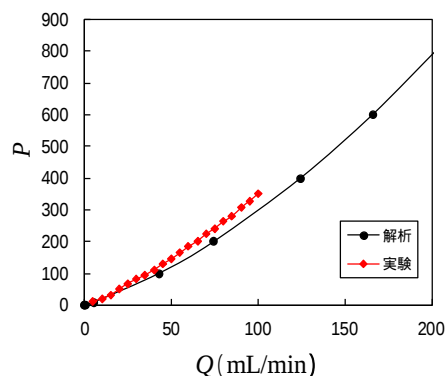
- 1)Liu R, Jiang Y, Li B, et al. A Fractal model for characterizing fluid flow in fractured rock masses based on randomly distributed rock fracture networks. Computers and Geotechnics, 65, pp. 45-55, 2013.
- 2)田島成一郎：岩盤不連続面内の接触状況が透水特性に及ぼす実験的説明,土木学会西部支部研究発表会, -011, 2009.
- 3)Zhang Z, Nemcik J. :Fluid flow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

表 - 2 実験モデルの分析値

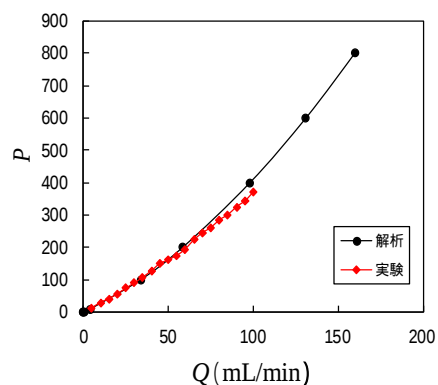
3mm-3mm				
	inlet_1	Outlet_2	Outlet_3	Outlet_4
面積(cm ²)	6.178	6.8908	5.3324	4.9705
周囲(cm)	45.7251	52.3632	42.9482	48.1926
長さ L(cm)	22.86255	26.1816	21.4741	24.0963
開口幅 e(cm)	0.2702236	0.2631925	0.2483177	0.2062765
3mm-5mm				
	inlet_1	Outlet_2	Outlet_3	Outlet_4
面積(cm ²)	6.1808	8.7393	5.2333	9.3233
周囲(cm)	44.0549	48.3935	41.4655	48.1056
長さ L(cm)	22.02745	24.19675	20.73275	24.0528
開口幅 e(cm)	0.2805953	0.3611766	0.2524171	0.3876181
3mm-7mm				
	inlet_1	Outlet_2	Outlet_3	Outlet_4
面積(cm ²)	6.4084	15.2668	6.6381	15.1993
周囲(cm)	44.4158	47.3464	41.4649	49.9235
長さ L(cm)	22.2079	23.6732	20.73245	24.96175
開口幅 e(cm)	0.288564	0.644898	0.3201792	0.6089036



(a) Outlet_2



(b) Outlet_2&4



(c) Outlet_3&4

図 - 3 結果(Lin_1=3mm-Lin_2=3mm)