

第Ⅲ部門

岩石単一き裂における透水性の非線形性に関する基礎的研究

京都大学大学院	学生会員	○ 井関 恭輔
京都大学大学院	学生会員	宋 忱潞
関西電力株式会社	正会員	吉津 洋一
京都大学	正会員	岸田 潔

1. はじめに

ダム建設時の基礎岩盤における漏水の防止，高レベル放射性廃棄物の地下深部における地層処分等において，岩盤不連続面の透水性の正確な評価は非常に重要である．地下水の流体挙動については，主としてダルシー流れとして近似し解析されてきた．これは，地下水流動が非常にゆっくりした流れであるという前提に立った考え方である．しかしながら，局所的には非ダルシー流れとなる部分も存在する．過去の研究では，Zimmerman&Yeo¹⁾がレイノルズ数(Re)10以下の流体流れにおいてナビア・ストークス式が線形化されることを示し，岩井ら²⁾は実験によりReが1程度以上のオーダーにおいて非線形性が顕著になることを示している．また，Kishida, et al.³⁾は，低動水勾配条件での不連続面の流れにおいても，局所的に高Reが分布し，流れの支配的な要因になっていることを示している．本研究では，X線CT撮影により得られた不連続面構造データを用いて浸透流解析を行い，レイノルズ数や圧力勾配とレイノルズ数の関係を調べ，単一不連続面における流体挙動の非線形性について検討を行った．

2. 解析概要

本研究では，Kishida, et al.⁴⁾で用いられた平面二次元モデルを用いて解析を行った．解析は，スタッガード格子を用いた有限体積法により，流れを管路状態と仮定したモデルで，ナビア・ストークス(NS)式において圧力項，粘性項，慣性項が考慮されているため，非ダルシー流れにおいても誤差の小さい解析結果が得られる．

三軸セル内に設置した単一き裂を含む円柱供試体をX線CTで撮影し，Region Growing法により不連続面の凹凸形状と開口幅分布を求めた．不連続面のサイズは，幅15.04mm，高さ29.97mm，Z₂方より求めたJRCはき裂面下部で3.475である．

浸透流解析は，この不連続面供試体の凹凸データと開口幅分布を用いて実施した．データ間隔は透水方向が0.17mm，透水方向に垂直な方向が0.15mmである．また，浸透流解析の結果から式(1)に示す三乗則を用いて水理学

的開口幅の算定を行い，その値を用いた平行平板モデルについて浸透流解析を行った．

$$Q = \frac{D_h^3 W}{12\mu} \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

ここで， Q は流量， D_h は水理学的開口幅， W はき裂幅， μ は流体の粘性係数， dh/dx は動水勾配である．

解析ケースは，水頭差0.5, 1.0, 2.0, 3.0cmの4ケースを行った．Reが十分に小さく動水勾配で解析をしており，Stokes近似を用い平行平板内定常流れの仮定の下で，NS式は式(2)に示す3乗則が成り立つと考えられる．

3. 解析結果

1) 単一き裂に対する浸透流解析

X線CTから得られた単一き裂情報を用いて実施した浸透流解析の結果を図1，表1に示す．図1(a)は，水頭差2.0cmにおける定常状態の流速ベクトル図，表1は，各水頭差における流量とReである．Reは，解析より得られた流量から次式(2)により各水頭差において算出した．

$$Re = \frac{\bar{\rho} \bar{u} d}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu W} \quad (2)$$

ここで， ρ は流体密度， $\bar{u}$ はき裂内平均流速， d はき裂内開口幅である．これにより求めたReの不連続面内空間分布を図1(b)に示す．

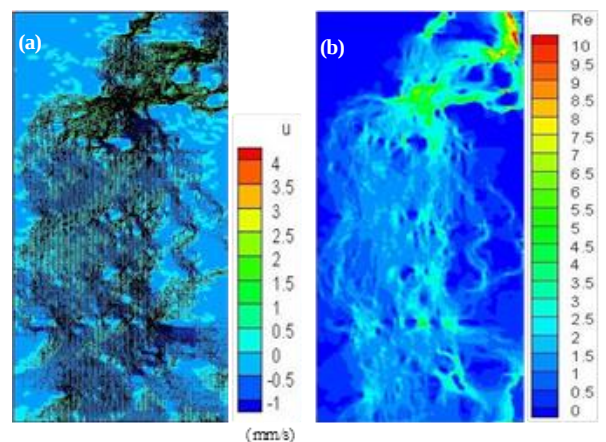


図1 水頭差2.0cmでの浸透流解析結果 (a) 流速ベクトル分布，(b) Re分布

表1 浸透流解析により求めた流量と Re

水頭差 [cm]	0.5	1.0	2.0	3.0
流量 [cm ³ /s]	3.3×10^{-3}	6.5×10^{-3}	1.2×10^{-2}	1.8×10^{-3}
Re	0.24	0.48	0.87	1.40

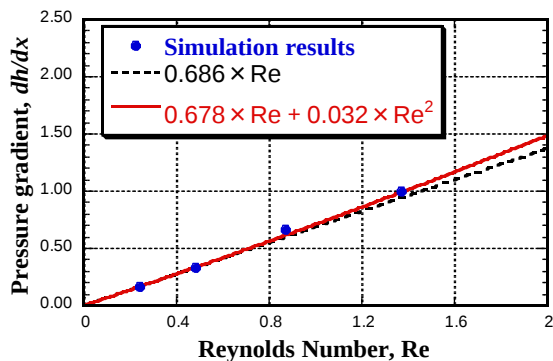


図2 浸透流解析より求めた圧力勾配と Re の関係

図1より、不連続面内の流れは一樣でなく、局所的な流れが卓越することが確認できる。また、表1より水頭差が増加するに従い Re が増加することが確認できる。水頭差 2.0, 3.0 cm では、局所的に $Re > 10$ となる部分もみられた。このことから、水頭差 2.0, 3.0 cm のケースでは線形関係から外れるため、ダルシー則は成り立たないと考えられる。

つぎに、Forchheimer³⁾の式(3)により、本研究での浸透流解析結果の線形性について調べた。

$$\frac{dh}{dx} = au + bu^2 \quad (3)$$

ここで、 u はダルシー流速、 a, b は定数である。ここでは、 u を表1に示した Re に置き換え、Re と圧力勾配との関係を求めた。その結果を図2に示す。図中の緑の線は水頭差 0.5, 1.0 cm がダルシー則を満足すると考えた線形関係の式、青の線は浸透流解析結果を式(3)によりフィッティングした回帰曲線である。この結果より、レイノルズ数 $Re > 1$ あたりで線形関係から外れていることが確認できる。このことから、水頭差 2.0, 3.0 cm の浸透流解析ではダルシー則は満足されず、非ダルシー流れであると考えられる。

2) 平行平板モデルに対する透解析結果

つぎに、浸透流解析により得られた流量に三乗則を適用して得られた水理学的開口幅を用いて平行平板モデル作成し、浸透流解析を行った。また、前項と同様に各水頭差につき、式(2)より Re を算出、式(3)により流体の線形性について調べた。その結果を表2、図3に示す。図3の緑の線は水頭差 0.5, 1.0 cm がダルシー則を満足すると考えた線形関係式、赤の線は浸透流解析結果を式(3)によ

表2 平行平板モデルを用いた浸透流解析より求めた流量と Re

水頭差 [cm]	0.5	1.0	2.0	3.0
流量 [cm ³ /s]	3.0×10^{-3}	6.1×10^{-3}	1.1×10^{-2}	1.7×10^{-3}
Re	0.24	0.48	0.88	1.37

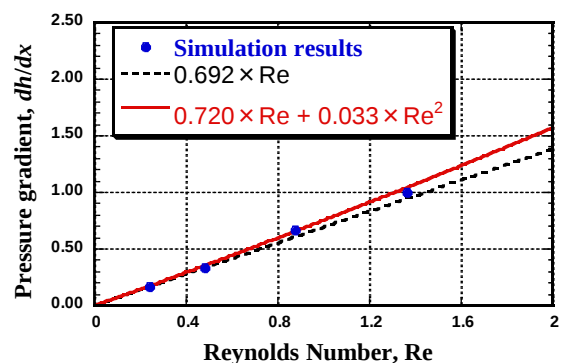


図3 平行平板モデルを用いた浸透流解析より求めた圧力勾配と Re の関係

りフィッティングした回帰曲線である。ここでは、一つの開口幅を用いて、一樣な平行平板モデルに対して解析を実施した。したがって、不連続面内の流れの不均質性は存在せず、Re の局所的な増大はないものとする。表1, 2を比較すると、水頭差が 0.5, 1.0 cm では、単一き裂と平行平板モデルで流量には差異がみられるが、同程度の Re となった。一方、水頭差が増えると平行平板モデルにおいても Re は増加し、水頭差 3.0 cm のケースでは Re が 1 を超え、また、図3からも流れが非線形性を持つことが確認できる。

4. 結論

本研究では、単一き裂を含む花崗岩供試体 CT 画像から抽出した不連続面情報をもとに、浸透流解析を実施した。その結果、き裂モデルや平行平板モデルいずれのケースも水頭差が増加すると、Re が増加し、Re が 1 を超えると流体は非線形性を持ち、非ダルシー流となることが確認された。

参考文献

- 1) Zimmerman, R.W., Yeo, I.W.: Fluid flow in rock fractures: From the Navier-Stokes equations to the Cubic Law, *Geophysical Monograph Series* 122, pp.213-224, 2000.
- 2) 岩井卓, 登坂博行: 単一き裂内の非線形流れに関する実験的・解析的研究, *地下水学会誌*, 45 巻, 3 号, pp.279-298, 2003.
- 3) Kishida, K., Sawada, A., Yasuhara, H., Hosoda, T.: Estimation of fracture flow considering the inhomogeneous structure of single rock fractures, *Soils and Foundations*, 53(1), pp. 105 – 116, 2013.
- 4) Kishida, K., Mgaya, P., Ogura, K., Hosoda, T.: Flow on a single rock fracture in the shear process and the validity of the cubic law examined through experimental results and numerical simulations, *Soils and Foundations*, 49(4), pp. 597 – 610, 2009.
- 5) Forchheimer, P.: *Hydraulik*, Teubner Verlag, Leipzig, In Germany, 1901.