

三乗則成立条件下での局所レイノルズ数 による透水挙動の評価

岸田 潔^{1*}・澤田 淳²・佐藤 久²・音田 慎一郎¹・細田 尚¹

¹京都大学 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

²(独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

*E-mail: kishida@mbox.kupdc.kyoto-u.ac.jp

自然の亀裂は、複雑な開口幅分布を有することが知られているが、透水挙動を評価する場合、一般には平行平板モデルに代表される等価な亀裂開口幅として扱い、三乗則が適用される。平行平板モデルで三乗則が適用されるのは、レイノルズ数(Re)が1以下の極めて遅い流れであり、移流項が流れに影響しないとされている。本研究では、Reが1以下の三乗則が成立する条件下での単一亀裂透水実験に対し、慣性項を考慮したモデル(2Dモデル)による2次元浸透流解析を行った。得られた結果から、局所Reを算定し、三乗則成立条件下での単一亀裂透水実験における亀裂内の局所三乗則の成立性に関する検討を行った。

Key Words : rock fracture, cubic law, hydraulic conductivity, numerical simulation, LCL

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を深地層下の岩盤内に隔離し、長期に渡り隔離性能を保証するためには、天然バリアとなる岩盤の力学・水理学特性の変化を予測評価することは必要不可欠である。岩盤の水理学特性は、岩盤内に存在する不連続面により大きく支配される。岩盤不連続面の透水特性の評価手法としては、一般的に三乗則(cubic law)が用いられる¹⁾³⁾。しかしながら、亀裂面内は凹凸形状(ラフネス)が存在し、部分的に接触するものであり、滑らかな一定の開口の平行平板としてモデル化するのは限界があると考えられてきた⁴⁾。これらの限界を検討するため、局所的には三乗則が成り立つと仮定したLocal Cubic Law(LCL)モデルやレイノルズ方程式による三乗則の成立性の議論がなされてきている^{9)~10)}。それらの研究の結果では、主としてレイノルズ数(Re)が1以下の状況で三乗則が保障されていることになっている。すなわち、慣性項が卓越しない極めて遅い流れである場合に、三乗則が適用できることになる。

一方で、Mgaya et al.^{11) 12)}による慣性項を考慮した鉛直平面2次元モデル(2Dモデル)を用いて単一亀裂の浸透解析を行い、局所的にReが1より大きい領域が不連続面内に存在し、必ずしも不連続面内の透水特性は慣性項を無視して議論できるものではないという結論を得ている¹⁰⁾。ただし、ここで行われた数値解析の対象は、比較的

動水勾配が大きく、対象とした実験そのものが三乗則を満足する条件ではなかった。

本研究では、佐藤・澤田¹³⁾の作成したレプリカ供試体を用いた三乗則成立条件下での単一亀裂透水試験を実施した。それらの結果の対して、レプリカ供試体の亀裂を光学的手法により計測した亀裂開口幅データ¹³⁾により、2Dモデルによる浸透解析を実施した。実験結果および解析結果をもとに、三乗則成立条件下での単一亀裂面内の透水特性評価を行った。なお、単一亀裂内の透水実験は、種々行われているが、動水勾配が1以下の三乗則成立条件下での実験はあまり行われておらず、また、その解析評価も未だ十分でないのが現状である。

2. 透水試験

(1) 透明レプリカ供試体と開口幅測定¹³⁾

透明レプリカ供試体の作成に用いられた亀裂は、一辺100 mmの立方体に整形した稲田花崗岩の中央を割裂したものである。透明レプリカ供試体は、型取り用のシリコンにより亀裂の型を作成し、その型に透明エポキシ樹脂を注入することにより作成されている。

亀裂の開口幅の測定は、光学的測定手法により行われた。計測された1ピクセルが代表する大きさは、0.104 mm×0.104 mmである。測定された開口幅分布をFig.1に

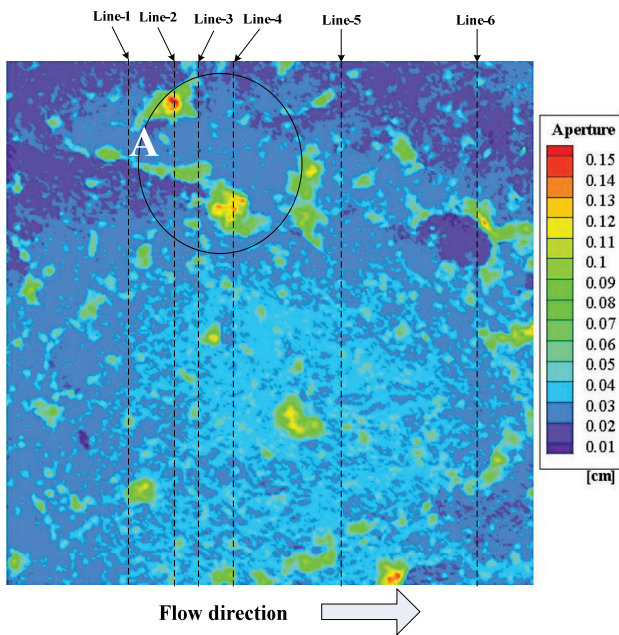


Fig.1 Aperture distribution of single fracture

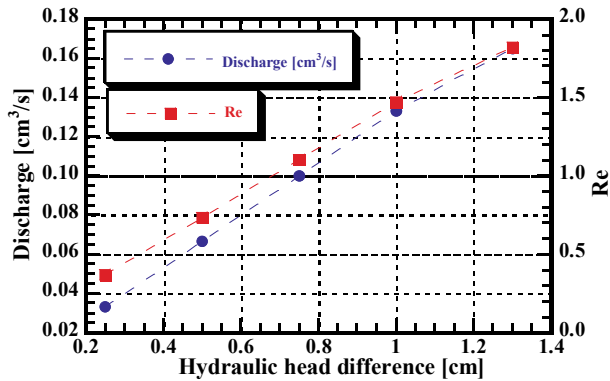


Fig.2 The discharge - hydraulic head difference relation and the Re - hydraulic head difference relation

示す。亀裂内体積測定から求められた平均開口幅は0.35 mm、屈折率マッチングを行った光学的手法による平均開口幅は0.33 mmである。

(2) 透水試験とその結果

透水試験は、Fig.1に示す透水方向に一定動水勾配条件（水頭差が0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.30 cm）で行い、亀裂を透過する単位時間当たりの流量を測定することで実施した。Fig.2に流量と水頭差の関係およびReと水頭差の関係を示す。ここで示すReは、亀裂全体の平均的なもので、以下の式¹⁰⁾で算定を行った。

$$Re = \frac{Q}{\nu W} \quad (1)$$

ここで、 Q は単位時間流量、 ν は動粘性係数、 W は亀裂幅である。図より、流量と水頭差の関係は、ほぼ線形関係となっており、実験はダルシー則を満足していると考えられる。また、ここでの実験は、亀裂の平均的なRe

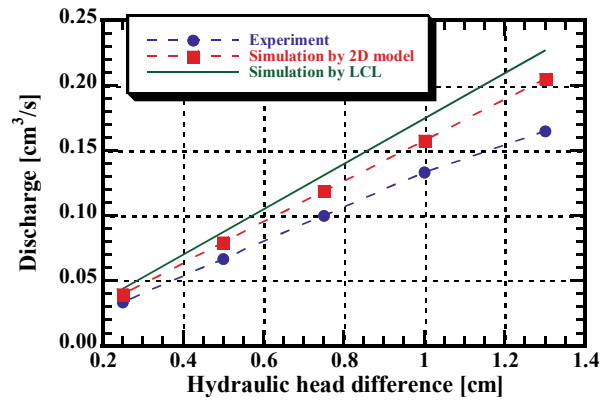


Fig.3 Comparison with experimental results and numerical results in the relationship between discharge and hydraulic head difference

が2.0以下であり、少なくとも水頭差が0.75 cm以下では一般に言われる三乗則を満足する実験条件となっている。

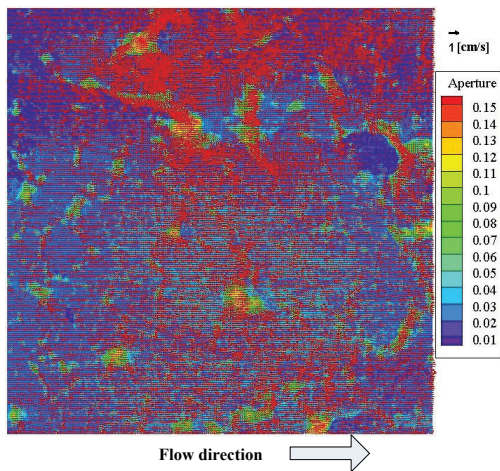
3. 浸透解析

(1) 解析結果

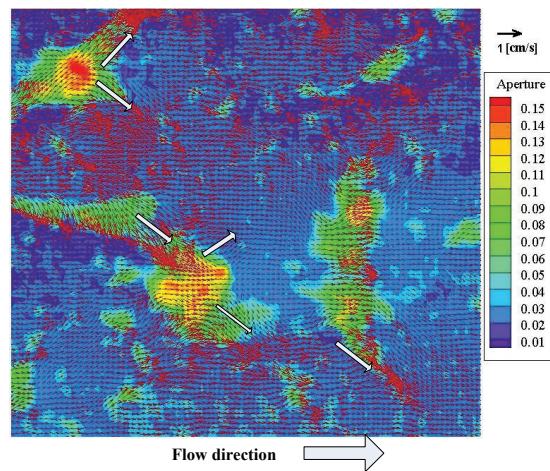
ここでは、光学的手法により計測された亀裂の開口幅分布と供試体の形状を用いて、亀裂の浸透解析を行った。解析に用いた方法は、Mgaya et al.^{11), 12)}による慣性項を考慮した2Dモデルである。また、水頭差1.30 cmのケースでは、LCLによる浸透解析も行った。実験、2DモデルおよびLCLで求めた単位時間流量と水頭差の関係をFig.3に示す。2Dモデルは、比較的精度良く実験結果を表現していることが確認できる。また、水頭差1.30 cmのケースでLCLと2Dモデルの結果をそれぞれ比較すると、2Dモデルの方が実験結果に近いことが確認できる。実Mgaya et al.^{11), 12)}は、単純な歯型モデルを用いてReが1を超えると、LCLと2Dモデルの流量計算結果に差異が生じることを示している。ここでは、Fig.2からReは亀裂平均として1を超えており、Mgaya et al.^{11), 12)}の結果と同様の傾向を示した。

(2) 亀裂内の流れ

2Dモデル解析により得られた亀裂内の流速ベクトル分布の一例をFig.4に示す。Fig.4(a)は、水頭差が0.5 cmの解析結果である。流下方向に均質な流れにならずに、開口幅分布の影響を受けた流れとなっている。Fig.4(b)にFig.1で示すA領域の水頭差0.5 cmでの流速ベクトル分布を示す。A領域では、開口幅の大きな領域が流下方向と直行する方向に連続しており、その領域から下流の開口幅の小さい領域には、あまり流れないことが確認できる。さらに、上部の開口幅の大きな領域に流れ込み、そこがある種の水源のような状態となり、そこから下流に流れ

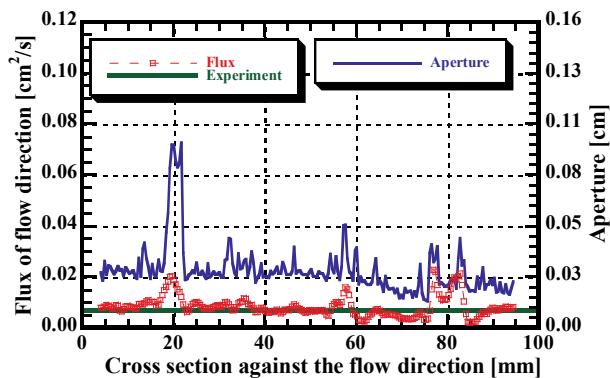


(a) Velocity vector distribution on the fracture

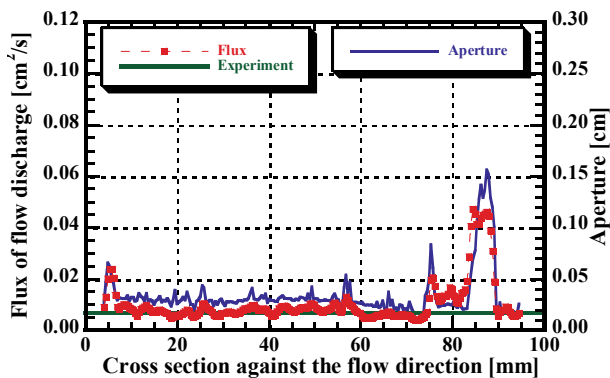


(b) Velocity vector distribution on the section A in Figure 1

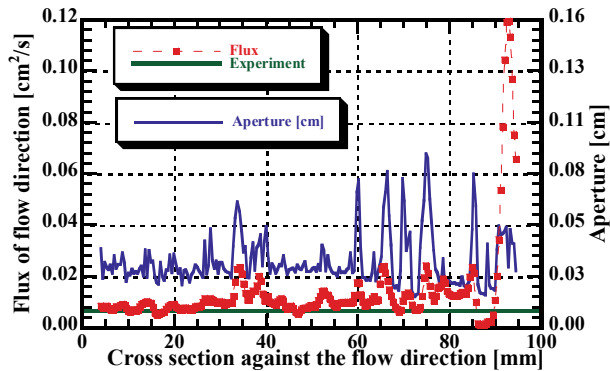
Fig.4 A sample of velocity vector distribution on the fracture in case of 0.5 cm hydraulic head difference



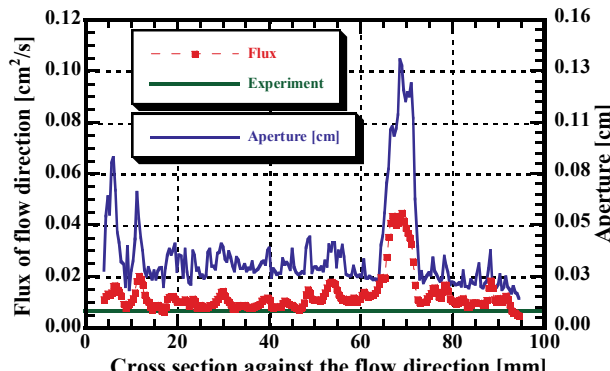
(a) Line-1 (at 26.34 cm from the edge of upstream)



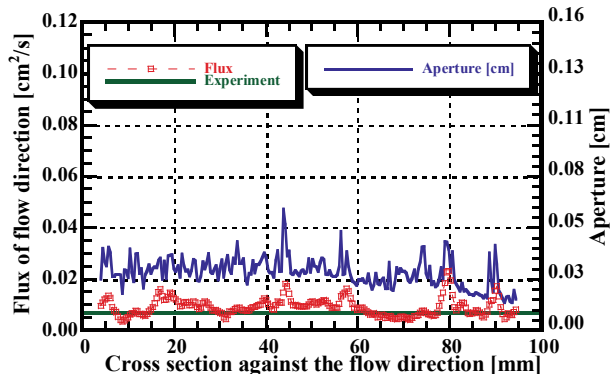
(b) Line-2 (at 33.04 cm from the edge of upstream)



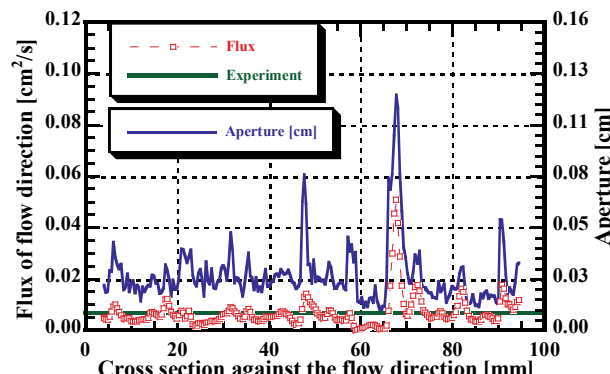
(c) Line-3 (at 36.81 cm from the edge of upstream)



(d) Line-4 (at 43.51 cm from the edge of upstream)



(e) Line-5 (at 61.94 cm from the edge of upstream)



(f) Line-6 (at 85.82 cm from the edge of upstream)

Fig.5 Flux and aperture distribution along each cross section in case of 0.5 cm hydraulic head difference

出している。ただし、直下流は開口幅の極端に閉塞した領域であり、開口幅の大きな領域から分流するように流れ、必ずしも直線的で一様な流れとなっていないことが確認できる。

Fig.5にFig.1に示す6つの断面(Line)での流下方向の流量フラックス分布を示す。Fig.5には併せて、その断面での開口幅分布と実験結果から求めた平均的な流量フラックスを示す。全体として開口幅が大きいところでは、流量フラックスが大きくなり、平均的な流量フラックスより大きくなっていることが確認できる。各断面で局所的な開口部分が、透水性を支配していることが確認できる。また、Fig.5(a)の区間では、比較的大きな開口部分が確認されているが、極端にその部分に流れが集中していることにはなっていない。どちらかといえば、実験結果に沿った平均的な流れとなっている。Fig.5(b), (d)では、亀裂開口部分に明瞭な流れ込みが確認できる。これは、Fig.1に示すA領域左上部に位置する開口部であり、水源を形

成するような現象となっている。一方、Fig.5(c)では、Fig.5(b)での流量フラックスの増加部の直下流で流量フラックスが小さくなっていることが確認できる。この現象は、Fig.4(b)で示す左上部の開口部から流れが分流していることを示すことになる。Fig.5(e), (f)は、開口部では流量フラックスが大きくなり、その他では、開口幅の大小にほぼ対応し、流量フラックスが増減していることが確認できる。

いずれの断面においても、大部分は実験で求められる平均的な流量フラックスと同量かそれ以上であることが確認できる。

(3) Reによる亀裂内流れの評価

2Dモデルにより求めた流速分布から、下記の式を用いて局所的なReを求めた。

$$Re = \frac{DV}{\nu} \quad (2)$$

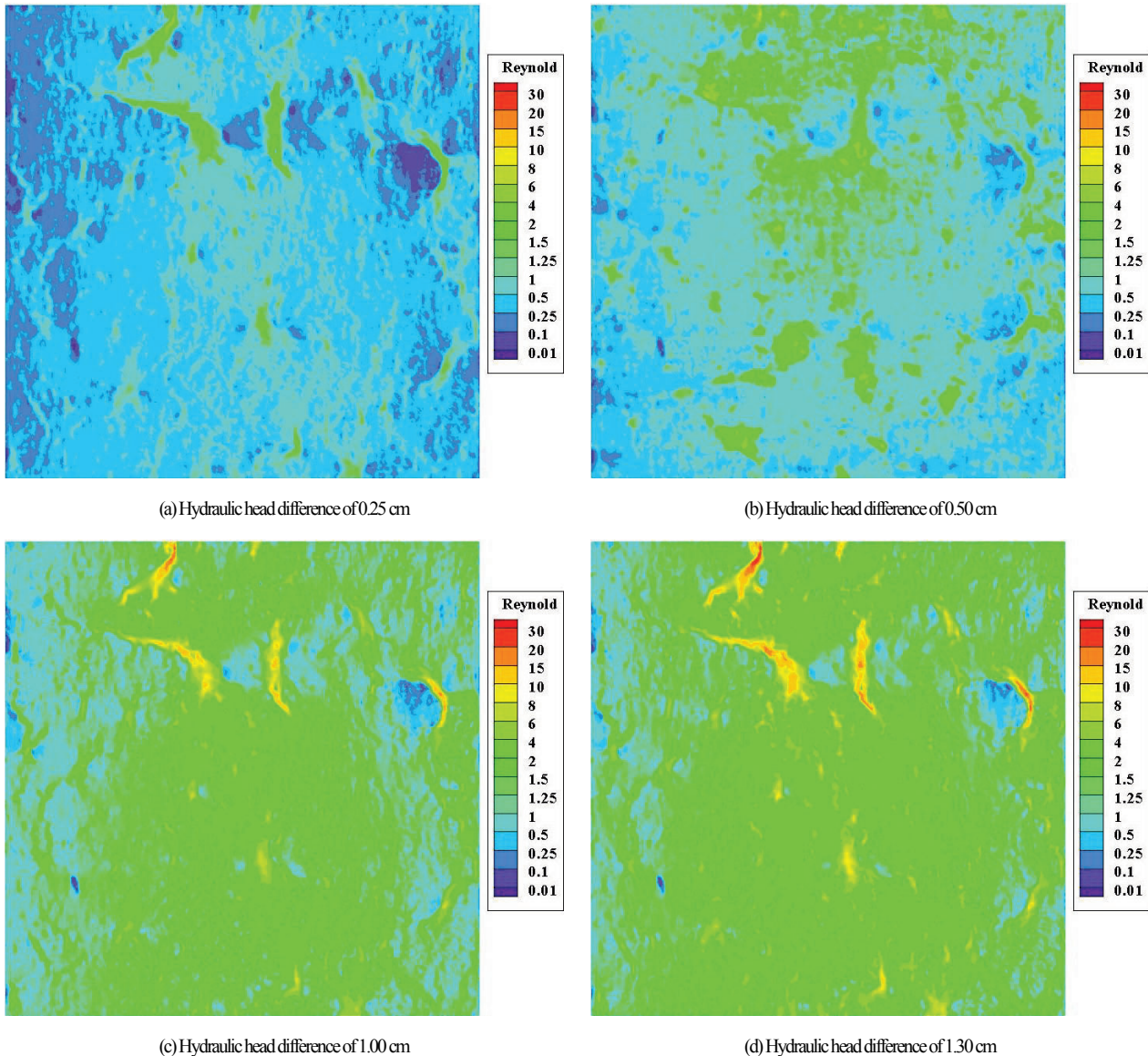


Fig.6 Re distribution

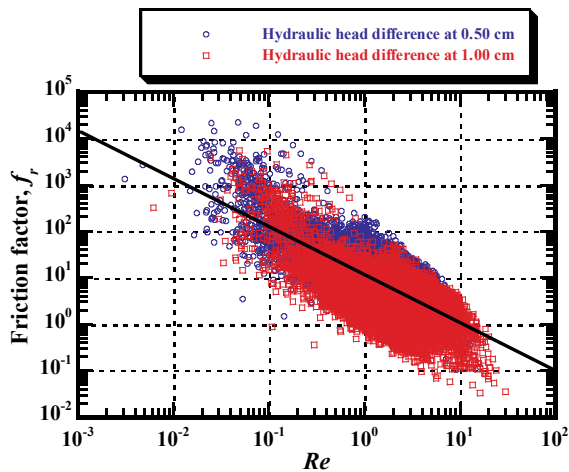


Fig.7 Relationship between hydraulic friction, f_r , and Reynolds number, Re , through the 2D model simulation in cases of 0.50 and 1.00 cm hydraulic head difference

ここで、 V は平均流速、 ν は動粘性係数、 D は流れを支配する代表長さである。ここでは、 D を開口幅として Re の算定を行った^{8)~10)}。亀裂面内の Re の分布をFig.6(c)に示す。

Fig.6(a), (b)など水頭差の小さいケース（実験結果から求められる Re は1以下のケース）では、亀裂面内は主として Re が1以下であることが確認できる。しかしながら、局所的に Re が大きくなっている箇所が存在し、Fig.1に示すA領域では、開口幅の大きい領域で Re が大きくなっており、また、大きな開口部に沿うように Re の大きな領域が連なっている。これらの領域は、Fig.4, 5などから流れを支配する領域であると考えられ、それらの領域の Re が1以上であるということは、三乗則が成立しにくい条件の流れが支配的になっていると考えられる。Fig.6(c), (d)より、水頭差が大きくなるにつれて亀裂面内の Re は大きくなり、 Re が1以下の領域は極端に減少する。さらに、流れの集中する領域では、 Re が20近くになる。Fig.6(c), (d)では、実験結果からの算定で Re が1以上となっており、実験条件としても三乗則が成立しにくい条件であったが、解析結果からも亀裂面全体で三乗則が成り立ちにくい状況になっていることが確認できる。

Fig.7にDarcy-Weisbachの式に基づく亀裂面内の局所的な摩擦損失係数 f_r と Re の関係を示す。Fig.7では、水頭差が0.50 cmと1.00 cmの結果を示す。水頭差が1.00 cmでは、局所 Re が1以上が主流であることが確認できる。亀裂内の流れに対する f_r と Re の関係について、Kishida et al.¹⁰⁾は以下のような関係を求めている。

$$f_r = \frac{12}{Re} \quad (3)$$

Fig.7にこれらの関係も併せて示す。ここでの検討は、比較的 Re の小さい領域での検討であり、局所 Re は総じて式(3)と高い相関性がある結果となった。

5. まとめ

三乗則が成立するような非常に遅い流れでの実験に対して数値解析を実施し、局所的な流れの検討と三乗則の成立性について検討を行った。2Dモデルでの解析は、実験結果と比較的整合性があり、LCL解析よりも精度が高いことが確認された。

三乗則が成立する条件では、主として局所 Re は1以下であるが、局所的に局所 Re が大きくなっているところの確認されている。これらの領域は、開口幅と流量フラックの関係から流れを支配している領域であると考えられる。亀裂面全体として三乗則を満足する状態であっても、局所的に流れを支配する領域が三乗則を満足していないことになる。

参考文献

- 1) Snow, D. T.: *A parallel plate model of fractured permeable media*, Ph.D. thesis, UC-Berkeley, 1965.
- 2) Iwai, K.: *Fundamental studies of fluid flow through a single fracture*, Ph.D. thesis, UC-Berkeley, 1976.
- 3) Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K. and Gale, J. E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 1016 – 1024, 1980.
- 4) Pyrak-Nolte, L., Myer, L.R., Cook, N.G.W. and Witherspoon, P.A.: Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, *Proc. of 6th International Rock Mech. Symp.*, pp. 225-231, 1985.
- 5) Louis, C.: A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, *Rock Mechanics Research Report*, 10, Imperial College, London, p. 90, 1969.
- 6) Elsworth, D. and Goodman, R.E. : Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 23(3), pp. 233-243, 1985.
- 7) Brown, S. R.: Fluid flow through rock joint: The effect of surface roughness, *J. of Geophys. Res.*, 92(B2), 1337-1347, 1987.
- 8) Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G. S.: Hydraulic Conductivity of Rock Fractures, *Transport in Porous Media*, 23, 1996.
- 9) Brush, D. J. and Thomson, E. R.: Fluid flow in synthetic rough walled fracture: Navier-Stokes, Stokes and local cubic law simulations, *Water Resources Research*, 39(4), 1085, 2003.
- 10) Kishida, K., Mgaya, P., Ogura, K. and 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*, Vol.49, No.4, pp. 597 – 610, 2009.
- 11) Mgaya, P. T., Hosoda, T. and Kishida, K.: Estimation of flow behavior on rock joints using the depth averaged flow model, *J. of Applied mechanics*, JSCE, 7(II), pp.761-766, 2004.

12) Mgya, P. T., Hosoda, T. and Kishida, K.: Nonlinear analysis of spatial variation of velocity profile in a pressurized laminar flow between wavy boundaries, *Annual J. of Hydraulic Engineering, JSCE*, 50, pp.115-120, 2005.

13) 佐藤久, 澤田淳: 単一亀裂を対象とした光学的手法によるトレーサー移行計測データに基づく物質移行評価, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.263 – 268, 2008.

ESTIMATION OF ROCK FRACTURE FLOW WITH LOCAL REYNOLDS NUMBER UNDER CUBIC LAW AVAILABLE CONDITION

Kiyoshi KISHIDA, Atsushi SAWADA, Hisashi SATOH, Shinichiro ONDA and Takashi HOSODA

Although it is generally known that the natural rock fracture indicates on the complex aperture distribution, the fracture represents the parallel plate model ideally and the cubic law is applied to evaluate the hydraulic property on fracture rock. From previous several research works, it is known that the cubic law can be applied under Reynolds number of less than 1.0 and it is basically considered that the advection term can be ignore in such a fracture flows. In this research work, two dimensional seepage flow analyses using the authors' proposed 2-D model which is considered with the advection term have been carried out to the single fracture hydro conductivity experiment under the condition that the cubic law can be applied. From the numerical results, the validity 2-D model has been discussed and the local Reynolds number under the cubic law available condition has been also discussed.