

岩盤不連続面のせん断透水試験と三乗則の適用性について

岸田 潔^{1*}・中島 伸一郎²・安原 英明³・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C)

²京都大学 次世代研究開拓ユニット (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂B)

³愛媛大学 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3番)

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

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ている。不連続面の透水特性を評価する手法としては、三乗則を適用するのが一般的である。三乗則は、不連続面が平行で滑らかな二つのプレートで仮定され、その中を流れる流体は、層流で流速分布は開口幅に沿って中心が最大となる放物線形状を仮定している。本研究では、不連続面のせん断-透水試験を実施し、試験結果に三乗則を適用を行った。結果として、三乗則に限られた条件で成立することが確認された。

Key Words : cubic law, rock fracture, hydraulic conductivity, shear process, joint surface roughness

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分を考える上で、天然バリアとなる処分空洞周辺の岩盤の力学・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、ラフネスを有し部分的に接触する不連続面を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。Pyrak-Nolte et al.⁴⁾は、実験結果から三乗ではなく7.6~9.8乗の値を示している。これらの限界を検討するため、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た^{5)~9)}。それらの研究の結果では、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、筆者らはNavier-Stokesによる鉛直平面2次元モデルによる解析を行い、不連続面としては Re が1以下の流れでも、局所的に Re が大きい値を示す部分が存在し、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),11)}。

本稿では、せん断-透水同時試験を実施した結果を用い、三乗則の適用性に関する議論を行う。

2. せん断-透水同時試験

(1) 実験概要

不連続面のせん断過程下の透水性を解明するため、せん断-透水同時試験を行った。せん断箱の概要をFig.1に示す^{12),13)}。

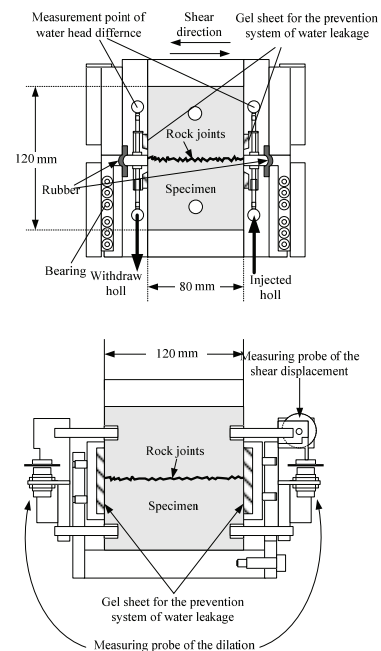


Fig.1 Shear box^{12),13)}

Table 1 Material properties of the specimens

Combination ratios for cement, sand, distilled water, and kaolin		1 : 2 : 0.65 : 0	1 : 2 : 0.917 : 0.5	1 : 2 : 1.184 : 1
Uniaxial compressive strength σ_c [MPa]		37.33	21.78	13.84
Basic friction angle ϕ_b [degree]		37.3	34.9	34.4
Specimen's name	Roughness A ($JRC=5.51$)	A-K	A-L	A-M
	Roughness B ($JRC=10.68$)	B-K	B-L	B-M
	Roughness C ($JRC=12.21$)	C-K	C-L	C-M

供試体は、3種類の自然のラフネス(Roughness A, B, and C)を選び、3種類の配合比で作成したレプリカ供試体で実験を行った。供試体のサイズは、120×80 mmで、80 mmが流下方向である。Table 1に配合比および材料自身の一軸圧縮強さおよび基礎摩擦角を示す。

レプリカ供試体の不連続面の形状は、3次元非接触型ラフネスプロファイラーで¹²⁾計測を行った。計測結果から、Bartonの JRC ¹⁴⁾を Z_2 ¹⁵⁾により求めた。各ラフネス形状の JRC 値をTable 1に示す。

試験は、垂直拘束圧1.0 MPaで水頭差1.0 mの条件で3.0 mmまでせん断を行い、あらかじめ定めた複数のせん断変位で透水試験を行った。透水試験を行わない場合のせん断試験のせん断速度は、0.1 mm/min.である。

(2) 初期開口幅の設定

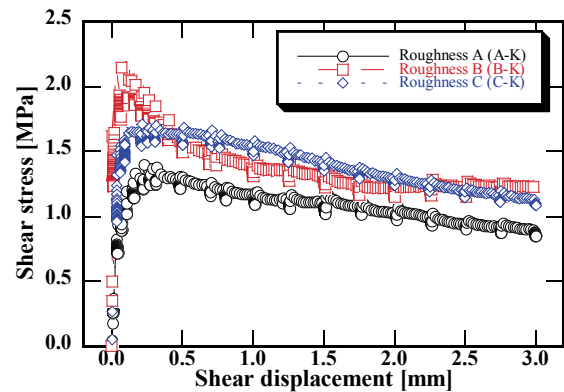
不連続面の透水性を議論する際、不連続面のラフネス特性だけでなく、開口幅の分布特性が重量な因子となる。実験結果からは、垂直変位は計測できるが、開口幅を同定することは難しい。そこで、本研究では、一軸圧縮状態で不連続面を含む供試体の繰り返し剛性試験を実施し、その結果得られた開口幅の変化と鉛直応力の関係に次の式¹⁶⁾を適用して近似を行った。

$$\sigma_n = \frac{v_j \cdot k_{ni} \cdot V_{mc}}{V_{mc} - v_j} \quad (1)$$

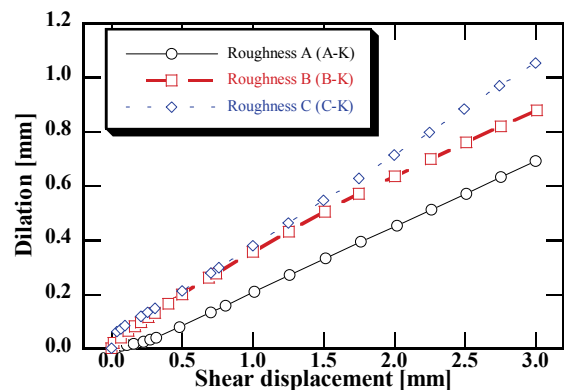
ここで、 σ_n , v_j , k_{ni} , V_{mc} はそれぞれ垂直応力、開口幅閉塞量、不連続面の垂直剛性、開口幅の最大可能閉塞量である。この関係を用い、垂直応力がゼロでの閉塞量から初期開口幅を算定した。

(3) 実験結果

Fig.2にせん断応力-せん断変位関係およびダイレーション-せん断変位関係を示す。ダイレーション-せん断変位関係では、 JRC が大きい供試体では、ダイレーションが大きく発生することが確認できる。これは、 JRC が大きい場合、相対的に傾斜角の大きいアスペリティが多く存在し、ダイレーションが大きく表れる結果となる。一方、ピークせん断強さと JRC には明確な関係が見られなかった。ピークせん断強度は、せん断初期の数か所の接触状況で支配されており、面全体を表す JRC との相関性



(a) The shear stress - shear displacement relation



(b) The dilation - shear displacement relation

Fig. 2 Sample of the experimental results of the direct shear tests on rock joints (Uniaxial compressive strength of material, σ_c is 37.33 MPa)

が低いと考えられる。

Fig.3に透水量係数とせん断変位の関係を示す。透水量係数は、以下の関係で求められる。

$$T = \frac{Q \cdot l}{w \cdot \Delta H} \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 l は供試体の透水方向の長さ、 w は供試体の透水直交方向の長さ、 ΔH は水頭差でここでは、1.0 mである。Roughness Cは、他のラフネスの供試体に比べ、大きい透水量係数を示している。一方、Roughness AとBの間には、明瞭な関係は確認できない。Fig.2のせん断試験の結果から、Roughness Cは大きなダイレーションを発生している。結果として開口が相対的に大きくなり、透水量が大きくなる結果が得られた。

Fig.4に透水量係数と開口幅の関係を示す。ここで示す開口幅には、力学的開口幅と水理的開口幅の2種類

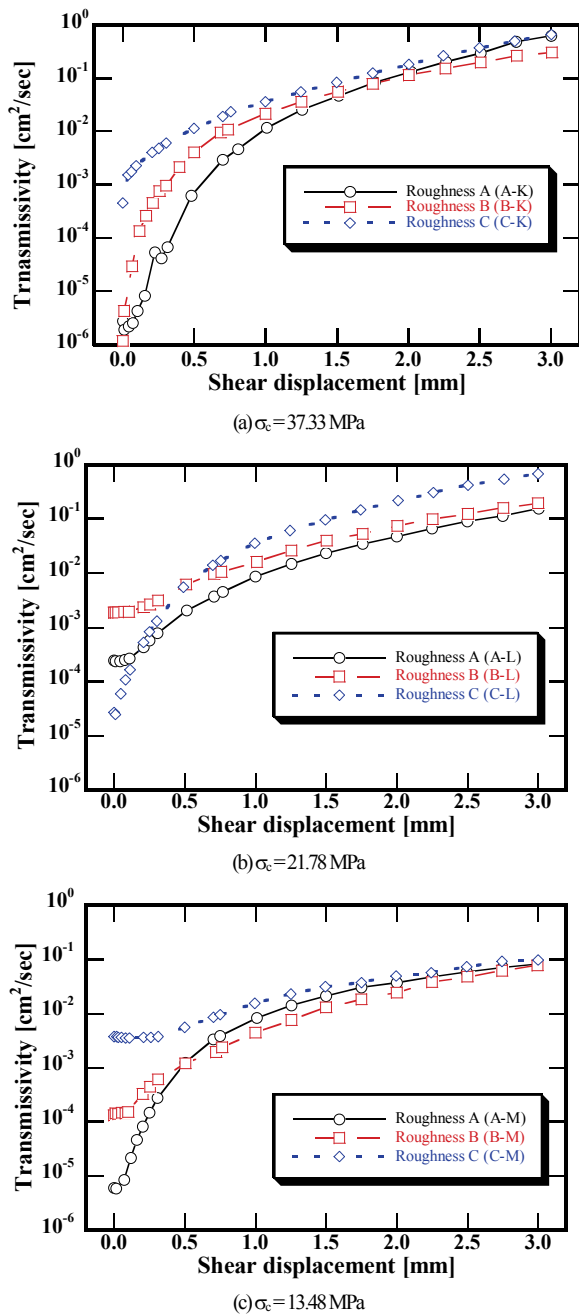


Fig.3 Relationship between transmissivity and shear displacement

がある。力学的開口幅は、先に述べた初期化開口幅の設定法で設定された値と計測されたダイレーションで算定される。一方、水理学的開口幅は、計測された流量に三乗則を適用し、逆解析的に求めた値である。三乗則は次の式で示される^{1),2)}。

$$\frac{Q}{\Delta H} = C \cdot b^3, C = \frac{g}{12\nu} \cdot \frac{w}{l} \quad (3)$$

ここで、 b は開口幅、 ν は粘性係数である。さらに、水理学的開口幅は、以下のように定義される。

$$b_h = \sqrt[3]{\frac{12\nu Q l}{g w \Delta H}} \quad (5)$$

Fig.4に示す水理学的開口幅は、三乗則によって決めら

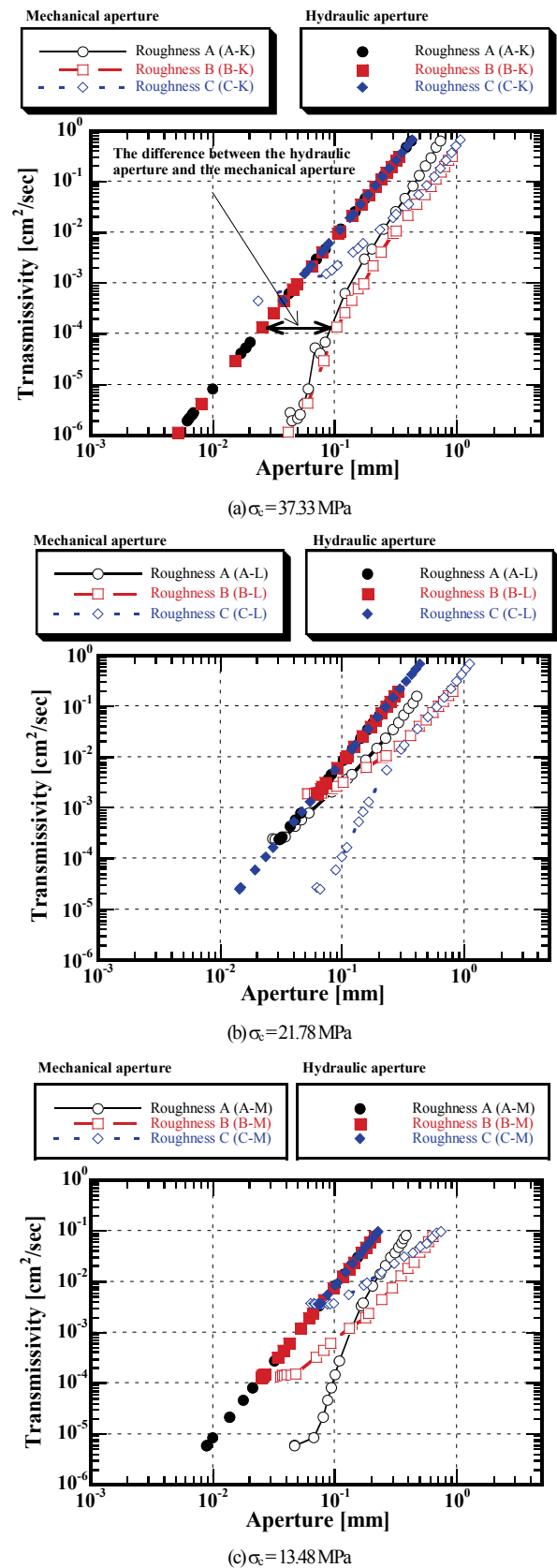


Fig.4 The relationships between mechanical aperture and transmissivity, and hydraulic aperture and transmissivity

れているので、透水量係数と水理学的開口幅が一定の関係になることが示されている。一方、ダイレーションの計測結果から算定された力学的開口幅と透水量係数には、

特定の関係は見られない。特に、透水流量が小さい状況では、力学的開口幅と明瞭な関係が見出せない。力学的開口幅は、その決定方法から不連続面の平均的な開口幅を示すものであり、実際の水の流れは、不連続面内の接触状況や凹凸状況の局所的な配置に左右されており、これらの要因を平均的な開口幅で表すことは困難であると考えられる。いずれも開口幅が増加すれば、透水量が増加すること、透水量係数が $10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ より大きくなると、力学的開口幅と透水量係数の関係および水理学的開口幅と透水量係数の関係の勾配が、ほぼ同じような傾きとなる。流量が増えれば、平均的な開口幅での評価も可能であると考えられる。

3. 三乗則の適用

上記の実験結果より、必ずしも三乗則が実験を表現できているとは考えにくい。慣性項を考慮に入れない三乗則やLCLでは、一般に Re が1以下の範囲でレイノルズ方程式の適用が可能であるとされている^{7~9, 17}。ここでは、レイノルズ数と様々なパラメータを比較し、三乗則の適用性についての検討を行う。

(1) レイノルズ数

レイノルズ数は、慣性力と粘性力の比で定義される無次元数で、以下の式で表わされる。

$$Re = \frac{DV}{\nu} \quad (6)$$

ここで、 D は代表長さで、 V は特性速度、 ν は動粘性係数である。不連続面の透水問題を扱い場合、 D の設定方法は2種類ある。ひとつは、円管路の考えに基づき径深の4倍の値が用いられる^{9, 13, 18}。この場合、径深が開口幅の半分となる。もう一つの考えは、不連続面の開口幅をそのまま用いるものである^{8, 13}。実験条件は、円管路とは実験条件が異なり、開口幅に比べて流下直交方向が非常に大きい構造になっている。したがって、流れを支配するのは開口幅そのものであり、本研究では、レイノルズ数の決定に開口幅を用いる。実際には、式(6)に連続式を代入することで、レイノルズ数は、

$$Re = \frac{Q}{\nu w}, \because V = \frac{Q}{bw} \quad (7)$$

となり、実験条件と計測された、開口幅によらず流量からレイノルズ数を決定することができる。

(2) fracture surface characteristic factorとの比較

Witherspoon et al.³は、不連続面の凹凸形状による影響を考慮に入れた修正三乗則を提案している。

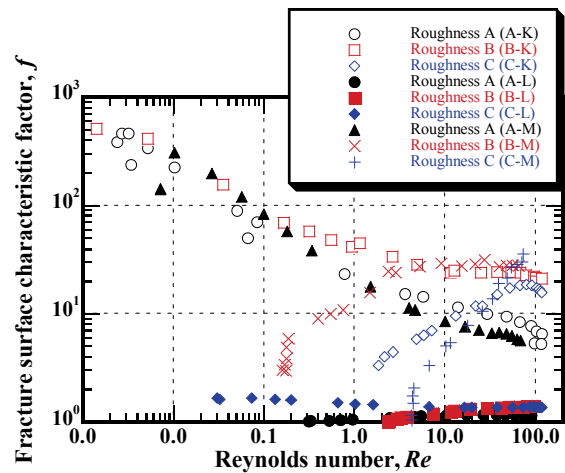


Fig.5 The relationship between fracture surface characteristic factor, f , and Reynolds number, Re

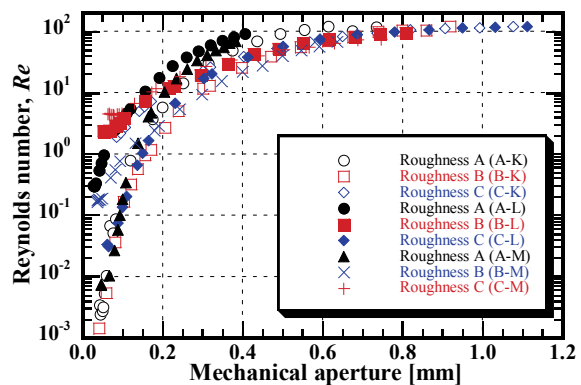


Fig.6 The relationship between Reynolds number, Re , and mechanical aperture

$$\frac{Q}{\Delta H} = \frac{C}{f} \cdot b^3 \quad (8)$$

ここで導入されているパラメータ f は、fracture surface characteristic factorとされ、不連続面の凹凸特性を考慮したパラメータと位置付けられている。一般には、 f が1に近いほど平行平板状態に近いといえる。

Fig.5に f とレイノルズ数の関係を示す。Roughness C (C-M)を除いて、ほとんどのケースは Re が1以上で f が一定の値を示している。本来、三乗則が成り立つ範囲である Re が1以下では、 f の値は大きければつきを示し、本実験は、三乗則が十分に成り立つ条件ではないと考えられる。

(3) Re と力学的開口幅の関係

Re と力学的開口幅の関係をFig.6に示す。開口幅が0.2 mm以下で Re が1以下となっており、小さい開口幅（せん断初期状態）では、三乗則を満足する条件であったと考えられる。一方、開口幅が大きくなり、流量が多くなるにしたがって Re が大きくなり、三乗則が適用できない条件となっていると考えられる。不連続面としては、せん断が進行し、凹凸成分が失われていることになり、実際、凹凸成分を表すパラメータ f は、 Re が大きいところで1に近づくことを示している。

(4) エネルギー損失

不連続面の凹凸を流れることで、エネルギー損失が生じる。管路のエネルギー損失は、Darcy-Weisbachの式により以下のように定義される。

$$I = f' \frac{1}{R} \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

ここで、 I は動水勾配、 R は径深、 f' は摩擦損失係数である。 R は、実験条件から以下のように表すことができる。

$$R = \frac{bw}{2(b+w)} \quad (10)$$

さらに、 $w \gg b$ の関係から、

$$R = \frac{b}{2} \quad (11)$$

となる。式(9)に式(11)を代入して

$$f' = \frac{2glb^3w^2}{Q^2} \quad (12)$$

を得ることができる。さらに、式(7)を用いることで、一定の開口幅 **b** の実験条件の摩擦損失係数と Re の関係は、

$$f' = \frac{12}{Re} \quad (13)$$

となる。

Fig.7に実験により得られた Re と f' の関係を示す。**Fig.7**には、併せて式(13)の関係も示す。 Re が大きくなると壁面による摩擦損失係数は小さくなる。 Re が大きくなると開口幅が大きくなること、また、せん断の進行に伴い凹凸が減少していることなどと整合する結果である。また、 Re が0.02から1.0の範囲において、実験結果は比較的式(13)を満足しており、不連続面壁面の凹凸特性の影響を受けず、透水を評価できる範囲であると考えらる。

4. まとめ

本研究では、比較的高い動水勾配で実験を実施したので、実際には三乗則は成立しにくい条件であったと考えられる。実験結果とその考察から、 Re が1以下でも不連続面の凹凸形状の影響を受けることがあることが確認できた。一方、せん断過程下で実験を行っているので、せん断の進行でダイレーションが発生し、開口が大きくなると、流量が多くなるため、三乗則は成立しづらい条件となっている。しかしながら、せん断の影響により、流れに対する凹凸形状影響が減少しているものと考えられる。開口幅の小さい範囲(せん断初期状態)では、流量が小さいこともあり、 Re の値からは三乗則が成り立つ条件であるが、平行平板ではなく凹凸形状の影響を受けているものと考えられる。ただし、 Re が0.02から1.0の範囲

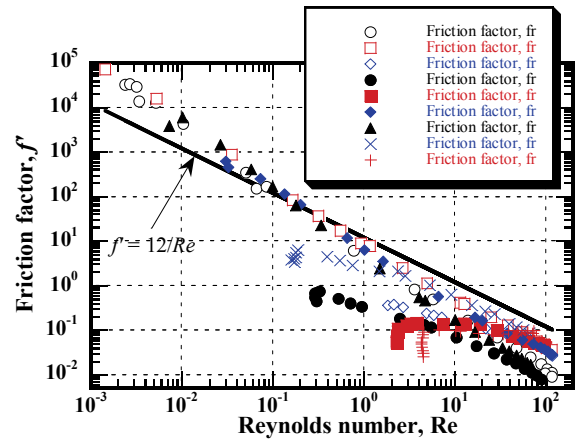


Fig.7 The relationship between hydraulic friction factor, f' , and Reynolds number, Re .

では、エネルギー損失と Re の関係は理論と一致する結果となり、この範囲では、三乗則を適用して実験結果を評価することが可能であると考えらる。

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) 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.
- 11) Mgaya, 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.
- 12) Ohnishi, Y., Yano, T., Iwamoto, H. and Nishikawa, N.: The history of the research and development of the apparatuses measuring both the shear strength and the roughness profile of rock joints, *J. of Geotechnical Engineering, JSCE*, No. 645/III-50, 307 – 320, 2000(in Japanese).
 - 13) Yano, T., Ohnishi, Y., Nishiyama, S. and Saito, R.: Experimental study of shear-flow coupling characteristics of single joints in rock masses, *J. of Geotechnical Engineering, JSCE*, No. 792/III-71, 159 – 174, 2005(in Japanese).
 - 14) Barton, N.: Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, 7(4), 287 – 332, 1973.
 - 15) Tse, R. and Cruden, D. M.: Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. of Rock Mech. and Mining Science & Geomech. Abst.*, Vol. 16; 303 – 307, 1979.
 - 16) Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R.: Fundamental of Rock Joint Deformation, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech.Abst.*, Vol.20, No.6, pp.249-268, 1983.
 - 17) Brown, S. R., Stockman, H. W. and Reeves, S. J.: Applicability of Reynolds equation for modeling fluid flow between roughn surface, *Geophysical Res. Lett.*, 22(18), pp.2537-2540, 1995.
 - 18) 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.

SHEAR-FLOW COUPING EXPERIMENT ON SINGLE ROCK FRACTURE AND VALIDITY OF CUBIC LAW THROUGH THE EXPERIMENTAL RESULTS

Kiyoshi KISHIDA, Shinichiro NAKASHIMA, Hideaki YASUHARA
and Takashi HOSODA

The groundwater flow in rock mass is strongly affected by the discontinuities and/or the fractures. It is general to apply the cubic law as the estimating technique for the hydraulic conductivity of discontinuity and/or fracture. In the cubic law, an individual fracture is represented by two infinite smooth parallel plates separated by constant distance. The flow in fracture is assumed to be laminar with a parabolic velocity profile across the aperture. In this research work, the shear-flow coupling experiment on single rock fracture has been carried out and the experimental results has been applied to the cubic law. Consequently, it is confirmed that the cubic law can be applied to fracture flow as limited condition.