# 亀裂接触面の応力依存性と透水異方性に関する 実験および解析

山辺 正<sup>1</sup> ·橋脇 健弘<sup>2\*</sup> ·飛田 大二郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科(〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)
<sup>2</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科 環境システム工学系専攻
\*E-mail: s12me116@mail.saitama-u.ac.jp

本研究は掘削影響領域における岩盤の透水性を解明するため,単一亀裂を対象として幾何学特性を調べると 共に変形を伴う透水実験を実施した.具体的には実験に用いた凝灰岩・砂岩について亀裂の表面形状を詳細に 計測し,流れ場をモデル化した透水シミュレーションを行い,亀裂面における透水異方性を評価した.

Key Words : surface roughness, stress dependency, seepage analysis, anisotropy

# 1. 本研究の目的

岩盤地下空間を地層処分や液化ガスの備蓄に利用し, 地下構造物の安全性や信頼性を向上させるには,岩盤 の力学的・水理学的な特性を確認する事が必要である。 自然の産物である岩盤は一般に不連続体であり,大小 様々な不連続面の存在に伴う不均一性や異方性などに 起因する複雑な挙動を定量的に捉える試みも多い<sup>1)-7)</sup>. その中には温度・応力に依存する岩石構成鉱物の溶解・ 拡散・沈殿現象に着目し,それらの複合的な現象が岩石 不連続面透水特性の経時変化に及ぼす影響についての 検討を実施<sup>1),2)</sup>したり,岩石中の間隙構造に着目しその 可視化手法についても報告されている3).また,せん断 変位を与えた引張亀裂面をモデル化し流れ解析を実施 した例4)もある.本研究では掘削影響領域における岩盤 の透水性を解明するため,単一亀裂の力学特性を把握 した後, 亀裂面の変形を伴う透水実験を実施した. さ らに,亀裂面の幾何学情報をモデル化した上で,有限 要素法を用いた透水シミュレーションを行い, 亀裂面 を通過する流体の透水異方性について評価することを 目的とした。

# 2. 試験概要と試験方法

#### (1) レプリカの作成と圧縮感圧試験

本研究では供試体に田下凝灰岩と白浜砂岩を使用し 圧裂引張破壊した亀裂面を作成した後,レーザー表面 粗さ計測器(図-1)を用い縦横 50mmの正方形領域に



図-1 レーザー表面粗さ計測器(解像度 = 50 µ m)



図-2 レプリカ表面の凹凸状況 (計測ピッチ 100 µ m) 左 = 田下凝灰岩,右 = 白浜砂岩 (測定領域 50×50mm)

対し表面粗さを測定した.また,この亀裂面の形状を 損傷することなく保存するため,エポキシ樹脂を用い てレプリカを作成した.レプリカの再現性を検討する ため,供試体とレプリカを共にレーザー計測器で表面 形状の測定を行い表面積を比較した結果,相対誤差は 0.17% 程度であり再現性の高い結果となった.図-2は, 凝灰岩と砂岩のレプリカにおいて各辺の計測ピッチを



図-3 レプリカに対する接触面積の応力依存性

100 µmにした時の凹凸を示しており,右図の砂岩が 比較的平坦であることが判る.圧裂引張破壊した後に 完全に分離した状態の亀裂2面に対し共にレプリカを 作成した後,再び噛み合わせた状態で垂直応力を作用 させ,所定の応力毎に感圧紙による接触面積率を計測 した結果を図-3に示す.接触面積率とは亀裂面に形成 される接触部(ブリッジ)の面積の広がりを表す指標 である.各応力段階において反応した感圧紙の写真を 画像処理により二値化処理し,その面積から接触部の 面積比を算出した.同図から二種の岩石において垂直 応力の増加に伴い接触面積率が増加し,レプリカ表面 の凹凸程度に応じて,その応力依存性の程度を判断で きる.この試験方法を圧縮感圧試験と呼ぶ.

### (2) 亀裂間の空隙体積と開口幅の算定

亀裂面の幾何学情報から, 亀裂面間に発生する空隙の 体積を算出した.図-4に示す亀裂凹凸面の鉛直方向の 最大値と最小値の差を h(mm) とし, 縦横 50mm で高さ hの体積をV1, 亀裂で分離された上下の体積をそれぞれ V2, V3とすれば,空隙体積  $\Delta V$ は  $\Delta V = V1 - (V2 + V3)$ となる.空隙体積などの計測例と物性値を表-1に示す と,凹凸を含む亀裂面の面積はS1=3757mm<sup>2</sup>となり, 亀裂部分の水平面への投影面積 (2500mm<sup>2</sup>) と比較する と,約1.5倍となる.このS1は実際に流体が亀裂を通 過する時の流路に相当する値であり,レーザー計測器 で亀裂面の形状測定を行う際, 亀裂面は無応力状態で あるため,  $\Delta V/S1$  は垂直応力=0 に対応する水理学的 開口幅を意味すると考えられる.一方,△Vを投影面 積で除した値(0.135 mm)は, 亀裂の幾何学的な平均 開口幅を表している.比較のため,亀裂面を一次元方 向に計測し算術平均粗さ Ra を算出した.算術平均粗さ  $R_a$ とは,粗さ曲線からその平均線の方向に基準長さl



図-4 亀裂面の凹凸高さの差 h と体積 V1, V2, V3 の定義



図-5 算術平均粗さの概念図

だけ抜き取り,図-5の中心線から測定曲線までの偏差 f(x)の絶対値を合計し,基準長さlで平均した値であり次式となる.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \tag{1}$$

表-1 は,田下凝灰岩に発生させた亀裂面の算術平均 粗さ $R_a$ と $\Delta$ V/S1より算出される開口幅も比較してい るが, $R_a$ は一次元方向の計測に過ぎず,その測線が偶 然開口幅の小さな部分を対象としていた事も考えられ, 亀裂間の開口幅を計測する手法としては不十分である. 一方, $\Delta$ V/S1より求まる開口幅は2次元平面内の計測 結果を用いているため,より忠実に平均的な開口幅を 計測できており,さらに上述の通り垂直応力=0に対応 する水理学的開口幅を意味すると考えられる.

表-1 田下凝灰岩の間隙率 n, 一軸圧縮強さ  $q_u$ , 空隙体積  $\Delta V$ , 幾何学的な平均開口幅  $\Delta V/S1$  と算術平均粗さ  $R_a$ 

諸元	n	$q_u$	$\Delta V$	$\Delta V/S1$	$R_a$
単位	%	MPa	$\mathrm{mm}^3$	$\mathbf{m}\mathbf{m}$	$\mathbf{m}\mathbf{m}$
	33.0	7.30	338.17	0.090	0.025



図-6 水理学的開口幅 b の比較

## 3. 水理学的開口幅

圧裂引張試験で破壊させた円柱供試体に対して三軸 圧縮応力下で透水試験を実施した.透水試験にあたって は,圧裂引張面が鉛直方向となる状態で供試体を三軸 室内にセットし,下端から透水圧0.03MPaで亀裂面に 平行する方向に透水させた.得られた透水量に関する データから透水係数と水理学的開口幅 b を求めた.具 体的には,透水量 Q,動粘性係数 v,動水勾配 i,重力加 速度 g,及び供試体直径 D を用いて水理学的開口幅 b を 決定した.Q の添字は,亀裂を含まない場合を intact, 圧裂供試体の場合を all で表すと, b は次式となる.

$$b = \sqrt[3]{\frac{12(Q_{all} - Q_{intact})\nu}{gDi}}$$
(2)

図-6は,透水試験から得た拘束圧力下の水理学的開口 幅をプロットし,亀裂の幾何学情報から得た無応力状 態の水理学的開口幅を拘束圧力=0上に示し比較した. 実際の透水試験において拘束圧力=0にすると,不安 定な状態となり正確なデータを取得する事が困難とな る.透水試験で田下凝灰岩は,凹凸の差が大きいため 応力依存性の効果は大きいが,白浜砂岩は比較的平坦 な亀裂面で基質部の剛性が高いため応力依存性は顕著 ではない.この傾向は,図-3と調和的である.

#### 4. 亀裂面における流れ場のモデルと解析

#### (1) 亀裂面における流れ場のモデル化

亀裂面内部の流れ場を解析する2次元モデルとして, 圧裂引張試験時に発生した亀裂面の幾何学情報を元に 亀裂接触部(ブリッジ)の広がりとその位置をモデル 化した結果を図-7に示す.同図の作成には,亀裂面の



図-7 圧裂引張亀裂面のモデル化円形領域



図-8 せん断亀裂面内のモデル化円形領域

レーザー表面粗さ計測器(図-1)を用いて幾何学情報 を取得した後,圧縮感圧試験で拘束圧を作用させる事 に対応して,幾何学情報を得た2枚の亀裂面を画像上で 接近させ,接触部分の形状を取得する方法を用いた.図 -7右の円形領域において完全に接触した場所を淡色で 表し,この部分は亀裂接触部(ブリッジ)を表す.後に 示す透水解析では,ブリッジ部分を不透水とし図-3に 対応して拘束圧0.2MPaを想定し,接触面積率10%の 条件で解析を実施した.圧裂引張亀裂面の画像解析に 用いた供試体は,直径5cm高さ5cmの田下凝灰岩で ある.

次に, せん断亀裂面を測定した結果が 図-8である. このモデルにおいても亀裂面に垂直応力が作用した事 に対応する模擬的な解析を行い, 亀裂が閉塞する際の 接触位置の形状変化について高精度の情報を得た.図 中右端の矢印は, せん断変形方向を表している.対象 とした供試体は, 直径 5cm 高さ 10cm の田下凝灰岩を 三軸圧縮試験において, せん断破壊させたものである. 図-8 右の円形領域は計測結果であり, せん断亀裂面に おいて直径 5cm の円形領域を抽出している.この場合 も淡色部分がブリッジを表している.せん断変形方向 に向かい, 閉塞形状が派生していく様子が観察される.

以上,2種類の亀裂面について計測結果を示したが,



図-9 圧裂引張亀裂面内の流速分布(0.2 MPa の例)

いずれの場合も亀裂面内部ではブリッジを避けて透水 すると考えられ,亀裂面内部の流れにおいて不均一性 や異方性が発生することが予想される.関連して変形 を伴う透水試験や解析も多く実施<sup>8)-13)</sup>されているが, ここでは亀裂面内部の流れ場に関連する透水異方性に 着目し,次項において数値解析結果とその近似手法を 示す.

(2) 有限要素法を用いた亀裂内部流れの数値解析

亀裂内部の透水性について考察するため,圧裂引張 亀裂面とせん断亀裂面に対し流れの支配方程式として 非圧縮性 Navier Stokes 方程式を適用した有限要素法に よる透水解析<sup>14)</sup>を実施した.亀裂面内部を通過する流 体には水の物性値を採用した.円形領域おいて180°だ け離れた直線上に流入と流出部分を,それぞれ±10°の 幅で設定し,流入方向を回転させて透水特性を検討す るため,流入方向を0°から360°まで10°ずつ回転し て解析を実施した.解析における境界条件として,流 入境界は流入速度  $v = 1.0 \times 10^{-6}$ m/s,流出境界は圧 力0とした.また,流入境界,流出境界以外の境界は全 て不透水境界とした.図-9は,図-7の圧裂引張亀裂面 に垂直方向から拘束圧力 0.2MPa が作用した時の流速 分布を示している.その他の拘束圧力(0.5,0.9 MPa) についても検討したが,同様の傾向を得た.流入と流 出部分の圧力差から,仮想的に透水係数を求め無次元 化表示し図-10を得た.同図は解析結果と4階テンソ ルによる近似を示しているが,2階と4階の成分は互い に直交せず,後に述べる図-12と比較して近似の程度 は必ずしも高いとは言えない.

以上に述べた圧裂引張亀裂面に対する透水解析手法を, せん断亀裂面内の流れ場に適用し流速分布として 図-11を得た.さらに,仮想透水係数分布として図-12を 得た.せん断方向の透水性が顕著で,最大主方向とは 異なる方向にも小さな極値が存在する.せん断亀裂面



図-10 圧裂引張亀裂面内の仮想透水係数分布 (0.2 MPa の例)



図-11 せん断亀裂面内の流速分布(0.2 MPa の例)

内の流れ場の透水係数を評価するには2階のみならず, より高階なテンソル量も必要である事を意味しており, ここでは4階のテンソル成分を導入した.このように 得られた近似式を図-12に併せて示す.最大主方向の 無次元化仮想透水係数は,接触面積比にかかわらず他 の極値の3倍程度の値を示すと共に,最大値と最小値 の主方向はほぼ直交し,その比についても近似できて いる.

#### 5. まとめ

亀裂面の幾何学情報を精度良く計測する手法を適用 し,再現性の高いレプリカを用いる事により接触面積 の応力依存性を明らかにした.亀裂面の幾何学情報を 利用して得られた凹凸を含む表面積は亀裂面の投影面 積より大きく,また,凹凸を含む表面積から得られる



図-12 せん断亀裂面内の仮想透水係数分布(0.2 MPa の例)

開口幅は透水試験で得られた水理学的開口幅の拘束圧 依存性を表す傾向線の非線形な延長上にある事を示し た.さらに,圧裂引張亀裂面とせん断亀裂面を通過す る流れ場を高精度にモデル化し,透水解析を実施した. せん断方向に沿った閉塞が確認され,透水解析結果も 閉塞部分の形状に影響を受けるため構造的に分散する 傾向を示した.この透水場を回転させて透水異方性を 検討し,せん断方向には透水性が高い事を確認すると 共に解析結果を近似する手法についても検討した.

#### 参考文献

Yasuhara, H., Polak A., Mitani Y., Grader A. S., Halleck P. M. and Elsworth, D. : Evolution of fracture permeability through fluid rock reaction under hydrothermal conditions, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.244, pp.186-200, 2006.

- 2) 安原 英明,長谷川 大貴,中島 伸一郎,矢野 隆夫,岸田 潔:拘束圧・温度に依存する花崗岩不連続面の不可 逆透水特性に関する実験的評価,地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.1, pp.71-79, 2013.
- () 廣野 哲朗,高橋 学,林 為人:岩石における間隙部の 可視化手法,資源と素材,Vol.119,No.9,pp.603-607, 2003.
- 4) Nemoto, K., Watanabe, N., Hirano, N. and Tsuchiya, N. : Direct measurement of contact area and stress dependence of anisotropic flow through rock fracture with heterogeneous aperture distribution, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.281, pp.81-87, 2009.
- 5) Koyama, T., Li, B., Jiang, Y. and Jing, L. : Numerical modeling of fluid flow tests in a rock fracture with a special algorithm for contact areas *Computers and Geotechnics*, Vol.36, pp.291-303, 2009.
- 6) Esaki, T., Du S., Mitani, Y., Ikusada, K. and Jing, L. : Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.36, pp.641-650, 1999.
- 7) 石井 卓,桜井 英行,船山 潤一,木下 直人: 軟岩き裂 の透水性に関する基礎的実験,第31回岩盤力学に関す るシンポジウム講演論文集,pp.301-305,2001.
- 8) 張 銘,高橋 学,江崎 哲郎:室内における岩盤材料の せん断透水同時計測の現状と課題,応用地質,Vol.40, No.4, pp.240-246, 1999.
- 9) 矢野 隆夫,大西 有三,西山 哲,齋藤 竜平:単一岩盤 不連続面のせん断透水特性に関する実験的研究,土木学 会論文集, No.792/ III-71, pp.159-174, 2005.
- 10) 蒋 宇静:岩盤不連続面の流動機構の解明における課題 と試み,電力土木, No.339, pp.1-7, 2009.
- 11) 朴 赫,長田 昌彦,渡辺 邦夫:岩石のせん断-透水-可視 化同時試験装置の開発とそのデータ解析法,応用地質, Vol.49, No.5, pp.266-276, 2008.
- 12) 岩永 啓佑,遠藤 孝志,山辺正:透水特性の応力依存性 と掘削影響領域への導入に関する基礎的研究,第12回 岩の力学国内シンポジウム,pp.259-264,2008.
- 13) 山辺正,後藤雄平,高橋学:マイクロフォーカスX線 CTを用いた流れ場のモデル化と亀裂内部における透水 解析,資源・素材(札幌),pp.23-24,2009.
- 14) COMSOL : Multiphysics

# STRESS-INDUCED ANISOTROPY OF PERMEABILITY BY SURFACE OBSERVATION METHOD OF ROCK FRACTURE

#### Tadashi YAMABE, Takehiro HASHIWAKI and Daijiro TOBITA

Changes in permeability around an underground opening induced by stress-relief is an important factor in the design of underground structures. In order to evaluate the mechanical and hydraulic properties of rock inside the effective damaged zone, fracture characteristics is the most indispensable elements. In this study, the information of fracture surface geometry is obtained by using laser measurement system. After obtaining the surface roughness, simulation of water flow is conducted. As the results, permeability anisotropy is observed in the contact surfaces of rock fracture.