

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360402  
 研究課題名（和文） き裂の力学的挙動とその寸法効果のメカニズムに関する研究  
 研究課題名（英文） Mechanical behavior of a rock fracture and mechanisms for the scale effect  
 研究代表者  
 松木 浩二（MATSUKI KOJI）  
 東北大学・大学院環境科学研究科・教授  
 研究者番号：10108475

研究成果の概要（和文）：本研究では、き裂の力学的挙動とその寸法効果のメカニズムに関する実験的・理論的研究を行い、垂直応力下ならびに垂直応力とせん断応力が同時に作用する条件におけるき裂の力学的挙動（閉鎖挙動およびせん断挙動）の寸法効果が主としてき裂間隙の標準偏差の寸法効果に依存することを明らかにし、さらに、主応力軸と任意の方向に傾斜しているき裂の透水性を評価する方法を提案し、実際にき裂の方向によって透水性がどのように変化するか示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we experimentally and theoretically investigated mechanisms for scale effect on the mechanical behaviors of a rock fracture, and showed that the scale effect on the closure and shear behavior of a fracture under normal and shear stresses primarily depends on that on the standard deviation (SD) of the aperture. Furthermore, we proposed a method for estimating the hydraulic conductivity of a fracture with an arbitrary direction in the axes of principal stresses, and illustrated the variation in the hydraulic transmissivity with the direction of the fracture.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：廃棄物地下保存・処分，地下き裂，き裂の力学的挙動，き裂透水性，寸法効果

## 1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分や CO<sub>2</sub> の地下貯留，地熱開発など，様々な地殻環境技術の工学的設計においては，岩盤構造物の安

定性や浸透水の評価・管理などのため，岩盤中のき裂の透水性を評価する必要がある．一方，岩盤中の実際のき裂の力学的挙動と透水性を正確に評価するためには，き裂の力学的

挙動と透水性に及ぼすき裂寸法の影響を考慮することが不可欠である。しかし、これまでの研究の対象は、実験的な困難さのために、き裂寸法が1 m以下の場合が殆どであり、与えられた地殻応力のもとで大きな寸法のき裂がどのような力学的挙動を示し、その結果、どのようなせん断変位と平均間隙を生ずるかを寸法効果を考慮して評価する手法はなく、与えられた地殻応力のもとで現実的な寸法のき裂がどのような透水特性を有するかを正確に評価する手法も存在しない。従って、一般的応力条件におけるき裂の力学的挙動の寸法効果を評価する手法を開発することは、地殻環境技術の発展のために極めて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、一般的地圧条件におけるき裂の力学的挙動に及ぼすき裂寸法の影響を実験的に明らかにし、測定した間隙分布を基にき裂の力学的挙動とその寸法効果のメカニズムを解明することであり、さらに、き裂の力学的挙動のメカニズムから、与えられた地殻応力条件における現実的な寸法のき裂のせん断変位と開口変位を評価する手法を開発し、与えられた地殻応力条件で実際のき裂がどのような透水性を示すのかを明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

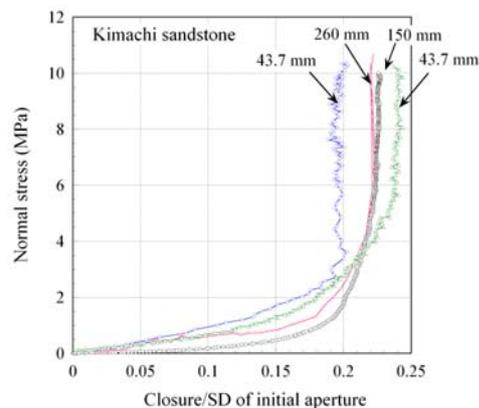
本研究では、まず、実験室で扱うことのできる0.5 mまでの種々の寸法のき裂に対し、その表面形状や間隙分布を測定した後、垂直応力のみが作用する場合とともに垂直応力とせん断応力が同時に作用する場合について、き裂の力学的挙動の寸法効果を実験的に明らかにする。次に、き裂の力学的挙動とき裂の表面形状・間隙分布の関係を理論的に考察することにより、き裂の力学的挙動（閉鎖挙動とせん断挙動）に及ぼす寸法効果のメカニズムを明らかにして実験結果を再現するき裂の力学的挙動とその寸法効果に関する理論モデルを構築し、最後に、様々な応力条件における様々な寸法のき裂の透水特性を評価する手法を提案する。

## 4. 研究成果

### (1) 垂直応力下におけるき裂の閉鎖挙動の寸法効果

Brown & Scholz の理論式に基づき、間隙データからき裂の閉鎖挙動を求める計算コードを開発し、従来の花崗岩の引張き裂について得られた間隙データを用いて解析した結果、垂直応力が大きい場合には、間隙の確率密度関数として正規分布よりカイ平方分布を用いる方がよいことを明らかにした。また、1 mのき裂について得られている間隙データを元にき裂の閉鎖挙動の寸法効果のシミュレーション

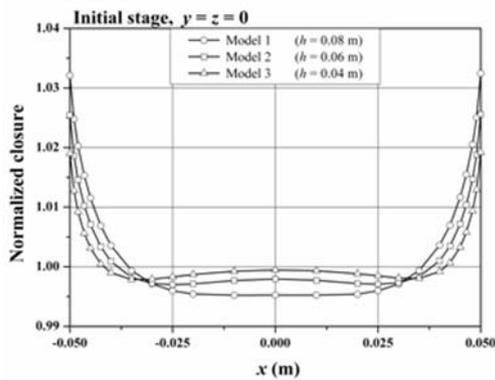
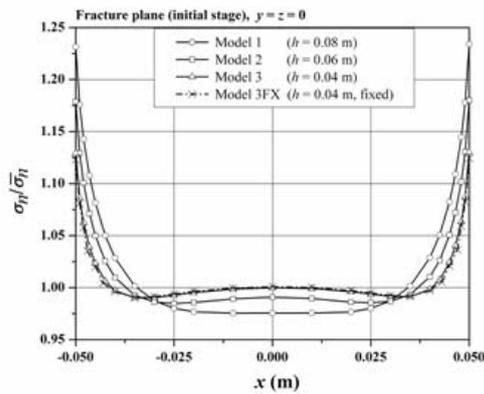
を行った結果、閉鎖量を初期間隙の標準偏差で基準化すればき裂寸法に依存しない閉鎖挙動が得られることを明らかにした。なお、これは、き裂の寸法効果のみならず、き裂表面の matedness の差によって生ずる閉鎖挙動の非線形性の差にも適用できる。次に、くさびを用いて砂岩ブロックに引張き裂を作成し、き裂の表面形状と間隙分布を測定した後、種々の寸法の試験片を切り出してき裂の閉鎖挙動の寸法効果を調べた。その結果、き裂の寸法が大きいほど閉鎖量が増加し、著しい寸法効果を示すこと、さらには、き裂寸法とともに初期間隙の標準偏差が増加し、き裂閉鎖量を初期間隙の標準偏差で基準化すれば、き裂寸法に依存しない垂直応力—開口変位関係が得られることを明らかにした（図1）。従って、理論的研究で得られた結果を実験により検証した。



### (2) 一面せん断試験における岩石き裂の変形と応力分布

岩石き裂の一面せん断試験に関する三次元有限要素解析を行った結果、せん断応力および垂直応力とも、き裂中央における応力分布はほぼ一様であるのに対し、き裂面の両端には大きな応力集中が生じること（図2）、試験片の高さが小さいほどこの応力集中が小さいことから、この応力集中は同じ軸線上にないせん断力によって生ずるモーメントの大きさに依存すること、さらに、き裂の応力集中はき裂がない場合に比べて格段に小さいこと、ならびにせん断変位が大きな残留強度領域では応力集中が小さくなることを明らかにした。これは、軟弱層としてのき裂に大きな変形が生じ、応力が緩和されるためである。しかし、き裂両端におけるき裂閉鎖量ならびにせん断変位の集中は、き裂の閉鎖挙動の著しい非線形性とせん断剛性の垂直応力依存性によって無視できる程度であることも明らかになった（図3）。従って、本研究の範囲内では、一面せん断試験によりき裂の透水性が合理的に

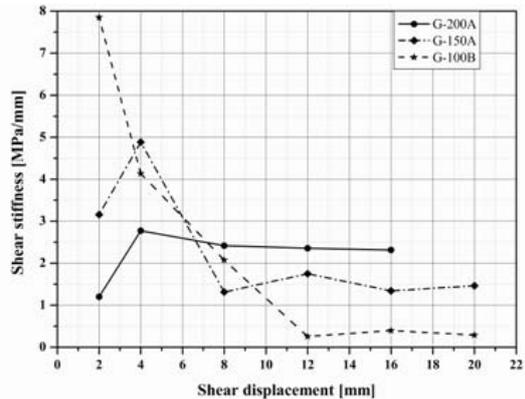
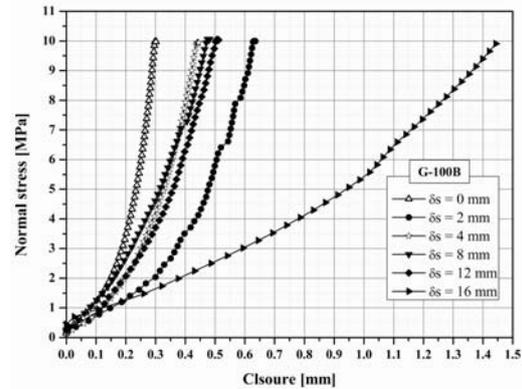
評価できることが分かった。



### (3) 一面せん断試験におけるせん断挙動の寸法効果

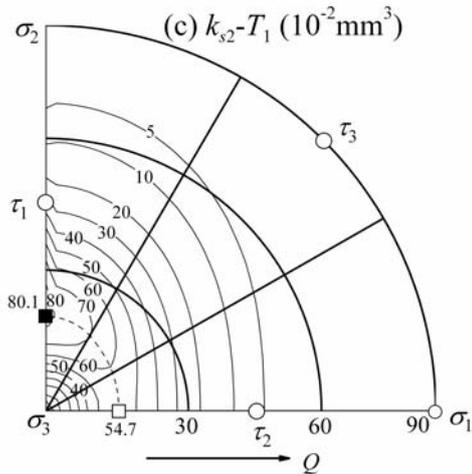
最大試験片寸法 200 mm × 200 mm (高さ 80 mm), 最大垂直荷重 500 kN, 最大せん断荷重 500 kN, 最小せん断変位速度 0.5 mm/min でせん断試験を行うことができる一面せん断試験装置を設計・製作し, 花崗岩中に作成した 3 種類の寸法の引張き裂について, 垂直応力一定の条件でせん断試験を実施した. 途中で何回か除荷することにより, せん断過程におけるき裂面形状, 間隙分布, 垂直剛性, せん断剛性等の変化を調べた. その結果, 間隙の標準偏差がき裂寸法およびせん断変位とともに増加すること, 従って, き裂閉鎖の非線形性がせん断変位とともに増加すること (図 4), さらには, せん断変位が小さい場合, せん断剛性はき裂寸法とともに小さくなるのに対し, せん断変位が大きな残留強度の領域では, せん断剛性がき裂寸法とともに大きくなること (図 5) を初めて明らかにした. 後者の現象は, せん断変位に垂直な方向に形成されるき裂表面の損傷が主として波長の小さな突起で起こり, 振幅が大きい長波長成分の損傷は小さいことに起因する. また, せん断変位とともにき裂の垂直剛性が減少するのは, せん断変位とともにき裂表面の matedness が悪化するため

あり, このことは, 従来のシェアダイレクションには垂直剛性の減少分が含まれていることから, き裂表面の凹凸への乗り上げ効果は得られたシェアダイレクションよりもかなり大きいことがわかった.



### (4) 任意のき裂の透水性の評価法

これまでの研究成果を用いて, き裂の水理学的間隙を, 平均間隙, き裂間隙の標準偏差, せん断変位ならびにせん断変位と巨視的水の流れ方向のなす角の関数として定式化し, 巨視的水の流れ方向が最大主応力 ( $\sigma_1$ ) 方向と中間主応力 ( $\sigma_3$ ) 方向の場合について, 主応力軸と任意の傾きをもつき裂の透水量係数 (transmissivity) を解析し, 与えた応力条件 ( $\sigma_1 = 29$  MPa,  $\sigma_2 = 25$  MPa,  $\sigma_3 = 13.5$  MPa) では, 最小主応力 ( $\sigma_3$ ) からの傾斜角がほぼ一定のき裂で透水性が極大となること, この傾斜角はせん断変位が大きくなるほど小さくなること, さらには, せん断き裂の透水性の異方性のために, 最大の透水性を示すき裂は, そのせん断変位が巨視的水の流れ方向と直交する場合であることなどを明らかにした (図 6).



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① K. Matsuki, Y. Kimura, K. Sakaguchi, A. Kizaki, A.A. Giwelli, Effect of shear displacement on the hydraulic conductivity of a fracture, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 査読有, 47巻, 2010, 436-449.
- ② A.A. Giwelli, K. Sakaguchi, K. Matsuki, Experimental study of the effect of fracture size on closure behavior of a tensile fracture under normal stress, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 査読有, 46巻, 2009, 462-470.
- ③ 坂口清敏, 後藤匡雄, 高西哲郎, 松木浩二, 木崎彰久, せん断変位に伴うき裂透水性の不均一性に関する実験的研究, Journal of MMIJ, 査読有, 124巻, 2008, 748-755.
- ④ K. Sakaguchi, J. Tomono, K. Okumura, Y. Ogawa, K. Matsuki, Asperity height and aperture of an artificial tensile fracture of metric size, Rock Mechanics and Rock Engineering, 査読有, 41巻, 2008, 325-341.
- ⑤ A.A. Giwelli, K. Sakaguchi, K. Matsuki, Scale effect on closure of a tensile fracture under normal stress, AIP CP (Water Dynamics), 査読有, 987巻, 2008, 39-45.

- ⑥ K. Matsuki, E.Q. Wang, A.A. Giwelli, K. Sakaguchi, Estimation of closure of a fracture under normal stress based on aperture data, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 査読有, 45巻, 2008, 194-209.

[学会発表] (計3件)

- ① A.A. Giwelli, K. Sakaguchi, K. Matsuki, Three-dimensional finite element analysis of stress and deformation in a fracture in the direct shear test, Proceedings of the International Conference of Rock Joints and Jointed Rock Masses, Jan. 8, 2009, Tuscon, Arizona, USA, CD-Rom,
- ② A.A. Giwelli, K. Sakaguchi, K. Matsuki, Scale effect on closure of a tensile fracture under normal stress, 5th International Workshop on Water Dynamics, Sep 25, 2008, Sendai.
- ③ A.A. Giwelli, K. Sakaguchi, K. Matsuki, An experimental study of size effect on closure of a tensile fracture under normal stress, Proceedings of the 13th Formation Evaluation Symposium of Japan, Sep 27, 2007, Makuhari.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松木 浩二 (MATSUKI KOJI)  
 東北大学・大学院環境科学研究科・教授  
 研究者番号：10108475

### (2) 研究分担者

坂口 清敏 (SAKAGUCHI KIYOTOSHI)  
 東北大学・大学院環境科学研究科・准教授  
 研究者番号：50261590  
 木崎 彰久 (KIZAKI AKIHISA)  
 東北大学・大学院環境科学研究科・助教  
 研究者番号：60344680

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

ジュウエリ オサマ (GIWELLI A. AUSAMA)  
 東北大学・大学院環境科学研究科・博士課程後期3年の課程大学院生