

# 一面せん断変形下における 岩石の透水特性の変化

熊谷 聡之<sup>1\*</sup>・長田 昌彦<sup>2</sup>・朴 赫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム系工学専攻  
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255番地)

<sup>2</sup>埼玉大学 地圏化学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255番地)

\*E-mail: s07me113@saitama-u.ac.jp

せん断変形下における岩石の透水特性を把握することを目的とし、能登半島の珪藻泥岩を対象に一面せん断透水試験を行った。試験結果より、せん断が進むと脆性的な破壊を起し、1秒にも満たないごく短時間で割れ目が形成され、急激な応力の低下と透水性の上昇が起きることがわかる。透水係数の上昇は、供試体に割れ目が出来ることによって、割れ目がない元の状態の $10^3 \sim 10^4$ 倍になる。割れ目と透水性の関係を知るため、試験中に撮影したCCDカメラ画像から割れ目面積を求めた。これより面積の増加は透水性の増加に関係しているが、軽石凝灰岩と比較するとその増加傾向が異なる。両者は割れ目の出来方が異なり、その違いが透水の増加傾向に影響を与えていると考えられる。

**Key Words :** diatomaceous muddy rock, shear deformation, permeability, fracture area,

## 1. はじめに

岩盤中に空洞を掘削すると周辺岩盤の力学特性、水理特性が変化する事が知られている<sup>1)</sup>。このような変化を生じる領域は掘削影響領域(以下 EDZ)と呼ばれるが、放射性廃棄物の地層性分では EDZ が放射性核種の移動経路になり、処分場の安全性に影響を与える事が懸念されている。したがって、周辺岩盤の透水特性の変化を知る事が重要となる。

これまで青森県六ヶ所村の地下に分布する凝灰岩に対して一面せん断試験を行い、割れ目の発生・進展・すべりに伴う透水特性の変化を調査してきた<sup>2)</sup>。岩石の透水特性は、石井ら<sup>3)</sup>によって亀裂を有する岩石の透水性が亀裂を含まないものより 3~4 桁大きくなる事が示されている。また江崎ら<sup>4)</sup>は岩石の亀裂部分に着目し、圧裂引張り割れ目の両端を非接触型レーザー変位計によって凹凸を計測して重ね合わせることで開口幅を求めた。矢野ら<sup>5)</sup>は透水性の変化が開口幅だけではなく空隙構造によることを示した。郷家ら<sup>6)</sup>などによってせん断による透水性の変化が研究されているが、可視化されている事例はない。

本研究では珪藻泥岩を使い、せん断に伴う割れ目の形成と、その透水特性の変化を調べるために、一面せん断透水試験を行った。

表-1 珪藻泥岩の物性値

含水比 (%)	114.64
湿潤密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.29
乾燥密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	0.60
間隙比	70.08
湿潤時 一軸圧縮強さ (MPa)	1.83
湿潤時 引張強さ (MPa)	0.26

## 2. 試料および試験方法

### (1) 試料

試料として、石川県能登半島の珪藻泥岩を使用した。古山ら<sup>8)</sup>の試験結果より主な物性値を表-1に示す。

また宮北ら<sup>9)</sup>によると、非常に多孔質で強度的には安定した性質であるが、明確な破壊規準を得難い事が挙げられている。

試料は  $60 \times 40 \times 20(\text{mm})$  の角柱供試体に成形する。

### (2) 試験方法

試験装置は埼玉大学建設工学科岩盤研究室所有のせん断-透水-可視化同時試験装置を用いた<sup>3)</sup>。変位速度は  $0.05\text{mm/min}$  で行う。せん断試験中、連続的に透水試験を行う。同時に CCDカメラによって上部から供試体を撮影する。

試験装置の簡易図を図-1に示す。これにより求められた流量を元に、式(1)より供試体の透水係数 ( $k$ ) を求める。

$$k = \frac{QL}{A\Delta ht} \quad (1)$$

L ; 供試体高さ, Q ; 流量,  $\Delta h$  ; 水頭差,  
A ; 断面積 t ; 時間

### (3) 割れ目面積の計測方法

実際の割れ目の幅は割れ目が直線ではないことから定義が難しい。そこで本研究では試験中に撮影した CCDカメラ画像から割れ目の面積を計算し透水性の評価をする。カメラ画像から確認できる割れ目を画像編集ソフト(フォトショップ5.0)でデジタル化し、実際の面積に換算することによって得られた面積を、割れ目面積(fracture area)と定義する<sup>3)</sup>。

## 3. 試験結果

### (1) 変形特性

得られた試験結果の一例として、珪藻泥岩(表-2の D4)における試験結果を図-2に示す。図-2の①~⑥の段階に対応する CCDカメラ画像を図-3に示す。せん断が進み、応力が増大しても供試体表面に割れ目は見受けられない(①)。せん断変位1.5mm地点で脆性的な破壊を起こして割れ目が出る(②)。その後は徐々に割れ目が広がっていく(③~⑥)。

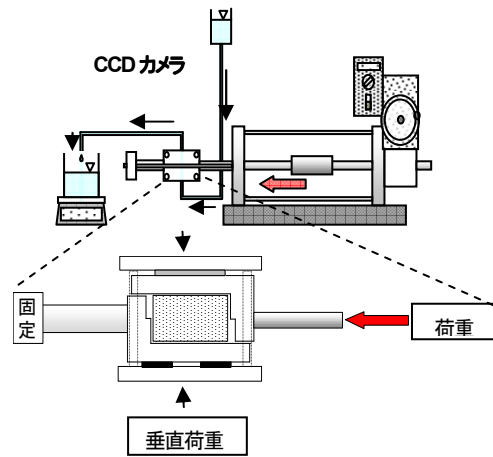


図-1 試験装置簡易図

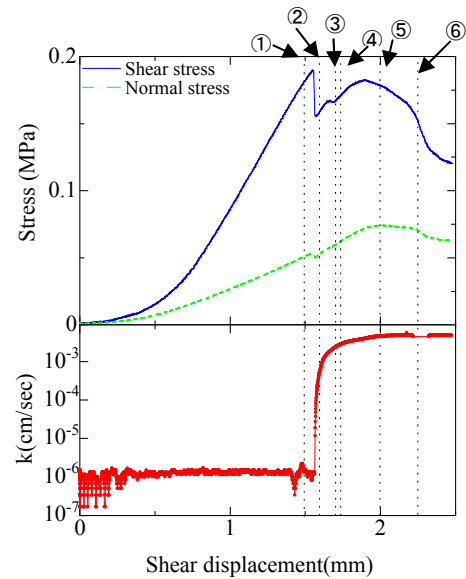


図-2 せん断透水試験結果

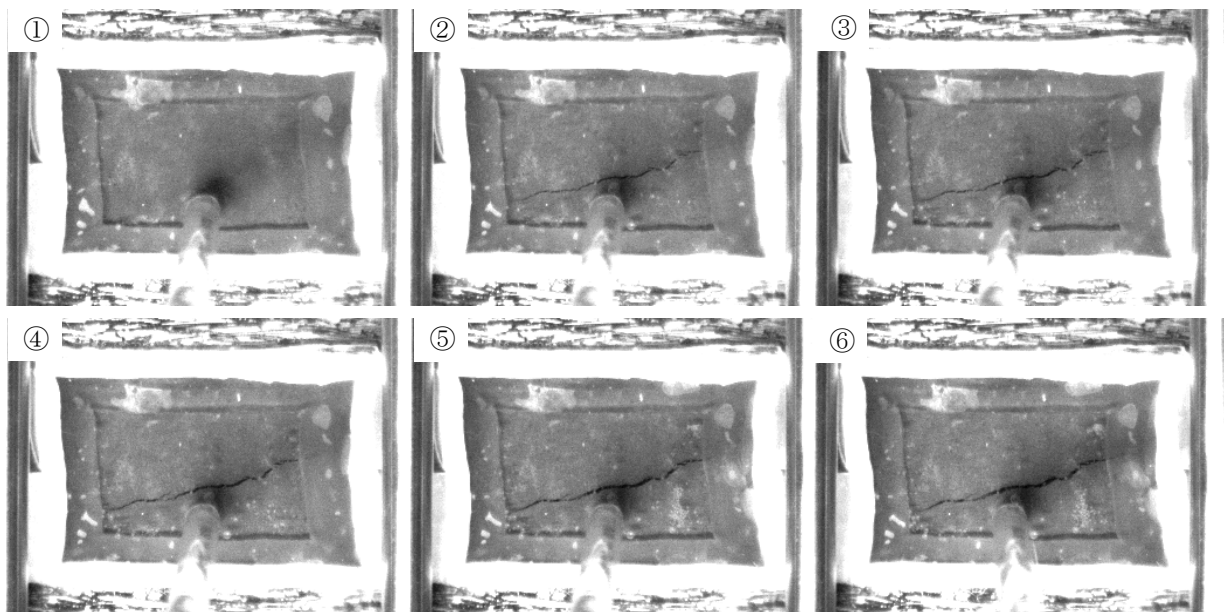


図-3 せん断による割れ目の発生

割れ目の発生はごく短時間で起きており、CCDカメラで1秒おきに撮影をしているが、発生の瞬間を明確に捉えることは出来ない。

## (2) 強度特性

応力が増加し①まで、その後、脆性的に破壊して割れ目が生じ、応力の急激な低下が見られる(①→②)。

使用した供試体の一覧を表-2に示す。試験時の最大せん断応力に供試体ごとの差が見られる。これは湿潤密度と最大せん断応力の関係を図-4に示すと、密度と応力が比例する傾向が出るため、湿潤密度の影響と考えられる。

## (3) 透水特性

初期透水係数は平均して $1.5 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ である。せん断による応力の増加に対しては透水係数の大きな変動は見られない。せん断が進み、破壊した直後に急激な透水性の増加が見られる(①→②)。この挙動は脆性的な破壊による割れ目の形成によるものだと考えられる。

初期透水係数が平均して $1.5 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ であり、割れ目ができた場合の透水係数は平均して $6 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ となる。割れ目発生後の透水係数は、せん断前と比較すると $10^3 \sim 10^4$ 倍大きい値が出る。これは石井ら<sup>4)</sup>が示した軟岩では亀裂を有する試料と有さない試料の差が $10^3 \sim 10^4$ 倍という実験結果と一致している。

## 4. 考察

### (1) 試験結果に対して

珪藻泥岩に対する試験結果として、脆性的な破壊する特徴が顕著に出たと言える。しかし、脆性的な破壊をすることによって、本来得られるであろう最大せん断応力の値が過小評価されてしまう可能性がある。急激な破壊の形式にせん断速度が関連している可能性があるので速度を遅くして試験を行うのも、今後の展開として考えられる。

### (2) 軽石凝灰岩との比較

両者の試験結果を図-5に示す。不均質材料である軽石凝灰岩(pt)では、珪藻泥岩の脆性的な破壊に比べて、徐々に破壊していく。両者は応力挙動に加えて透水特性の変化に明らかな違いが生じる。泥岩の急激な透水係数の増加に対して、ptではせん断応力最大後も徐々に増加する。これはptでは割れ目が多数発生し、珪藻泥岩では、1つの大きな割れ目ができるという両者の割れ目の出来方が違うことによって生じていると考えられる。

表-2 使用した供試体一覧

No	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最大せん断応力 (MPa)	初期透水係数 (cm/sec)	最大透水係数 (cm/sec)
D1	1.319	0.157	2.544E-06	6.544E-03
D2	1.361	0.191	1.028E-06	4.940E-03
D3	1.349	0.169		
D4	1.368	0.19	1.010E-06	6.508E-03

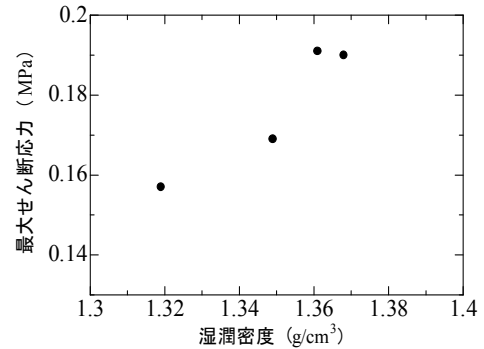


図-4 湿潤密度-最大せん断応力

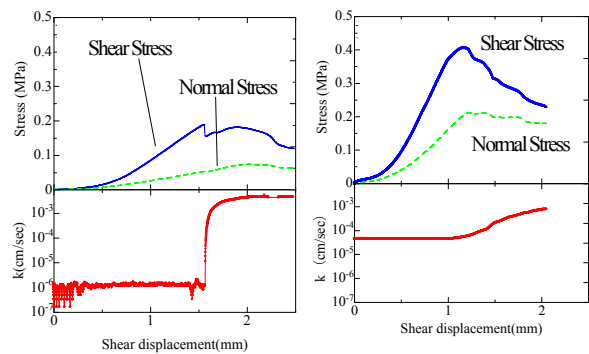


図-5 試験結果比較(左;珪藻泥岩 右;軽石凝灰岩)

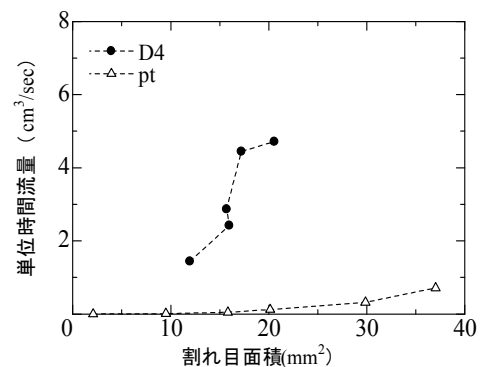


図-6 割れ目面積と流量

### (3) 割れ目面積による透水性の評価

供試体D4についてCCDカメラ画像から割れ目面積を求めた。得られた面積と流量の関係を図-6に示す。

割れ目の幅が増加するとその透水性が増加するのは既に知られているが、本研究では割れ目面積にて透水性との関係性を評価する。

その増加傾向から、割れ目面積を用いても、面積の増加が流量の増加に直接的につながっていると考えられる。しかし、珪藻泥岩に対しては微小割れ目が確認出来ないことから、低面積時の透水量を得る事が出来ない。(1)で述べたようにせん断速度を変えることが考えられるが、1秒にも満たない時間で破壊する性質がある供試体に対して、その部分を知る事が有用かどうかは疑問が残る。

2種類の試料を比較すると、増加傾向には明確な違いが生じる。(2)で述べた透水性の違いはこれから来たものだと推測される。脆性的な破壊を起こす珪藻泥岩の方が面積に対する透水量の影響が大きい。割れ目面積に対して、これほど明らかな違いが出るのは、材質による割れ目の出来方の違いが、流水経路の形成に影響を与えていると考えられる。

## 5. まとめ

せん断変形下における岩石の透水特性の変化を把握することを目的として、珪藻泥岩に対する一面せん断透水試験を行った。

- ・ 破壊は脆性的であり、割れ目の形成は1秒にも満たないごく短時間でなされる。破壊で形成された割れ目に伴い、急激な応力の低下と透水量の増加が見られる。
- ・ 割れ目の発生後の透水係数は試験前より $10^3 \sim 10^4$ 倍大きくなる。
- ・ 透水量の増加に割れ目面積が関係するが、その割れ目に出来方による違いが影響すると考えられる。珪藻泥岩では不均質な軽石凝灰岩と比較して割れ目が脆性的に出来るため、割れ目面積の透水性への影響が大きい。

今後の展望としては、応力状態による割れ目面積と透水性の関係を調べる事が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，地層処分研究開発第2次取りまとめ，総論レポート，pp.III-71，1999.
- 2) 熊谷聡之，長田昌彦，朴赫：一面せん断変形下における堆積軟岩の透水特性に関する研究，第62回年次学術講演会概要集，3-204，pp407-408，2007
- 3) 朴赫，長田昌彦，渡邊邦夫：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，応用地質学会投稿論文，2008（印刷中）
- 4) 石井卓，桜井英行，船山潤一，木下直人：軟岩内き裂の透水性に関する基礎的実験，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.301-305，2001
- 5) 木村強，江崎哲郎：岩盤不連続面の凹凸および開口幅の特徴と水理学特性，応用地質，Vol13，No2(19920610)，pp.61-70，1992
- 6) 矢野隆夫，大西有三，西山哲，齋藤竜平：単一不連続面のせん断透水特性に関する研究，土質学会論文集，No.792，III-71，pp154-174，2005
- 7) 郷家光男，石井卓，木下直人，船山潤一：せん断変形下における軟岩基質部の透水特性の変化，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.167-172，2003
- 8) 古山成紀，近藤亮祐：熱環境下におかれた珪藻泥岩の力学的特性に関する実験的研究，埼玉大学卒業論文，2003
- 9) 宮北啓，前川晴義：能登地方における珪藻質軟岩（珪藻土）の工学的性質，土と基礎，Vol13，No1(19830125)，pp.83-88，1983

## VARIATION OF PERMEABILITY PROPERTIES ON DIATOMACEOUS MUDDY ROCK DUE TO SHEAR DEFORMATION

Satoshi KUMAGAI · Masahiko OSADA · Hyuck PARK<sup>1</sup>

In order to investigate the variation of hydraulic properties of rock due to shear deformation, a series of the coupled shear-flow tests were performed on diatomaceous mud rock. The experimental results showed that the specimens failed in the brittle manner when shear displacement increased. Furthermore, the fracture formed in a short time. Meanwhile, shear stress was decreased and permeability was increased suddenly. We also calculated fracture area from CCD camera image to investigate relationship between fracture area and permeability. The results obtained for mud rock were compared with those for pucime tuff. The results indicated, permeability increased when fracture area increased. However, increasing trend of permeability was different in diatomaceous mud rock and pucime tuff. Therefore, the fracture formation will be important for the permability of rock