

断層運動によるシールの形成機構の解明を目的とした透水率変化の実験的研究

九州大学工学部 学生員 ○中島 祐一 九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩
九州大学大学院 非会員 田中誠一郎 九州大学大学院 正会員 江崎 哲郎

1. はじめに

断層運動により堆積岩中に形成された破断面はシール(水・油・ガスを通さない地質条件)もしくは流体通路のいずれにもなる可能性がある。地盤内部での流体の貯留現象を把握する上でこの破断面についての評価は重要となるが、堆積岩を対象としたこの断層内部で形成される断層内物質(ガウジ)の形成メカニズムやそのシール能力については十分に解明されていない。また、このシール能力を現場において直接評価することは現時点では困難であり、基礎特性に関する実験室レベルでの評価技術がまず必要となる。そこで、本研究では、不連続面を有する岩石をせん断することで断層運動を模擬し、不連続面に関するせん断-透水同時実験を行い、その時の透水率変化と生成されるガウジの特性について評価を行った結果を示す。

2. 実験方法

実験は筆者らが開発したせん断-透水同時実験装置²⁾を使用し、試験体はBerea砂岩(単位体積重量 21.6 kN/m^3 、破碎物の単位体積重量 26.0 kN/m^3)を $120 \times 100 \times 80\text{ mm}$ に整形したものを使用する。今回行った実験ケースについて Table 1 に示す。

CaseAではガウジの発生量と垂直応力の関連性を評価する目的でせん断実験を行った。実験はまず装置上で圧裂により試験体に人工不連続面を作成し、一定の垂直応力のもと、せん断速度約 0.01 mm/sec で 20 mm までせん断させる。次に垂直荷重を除荷した後、せん断変位 0 mm まで戻して試験体を取り出し、発生したガウジの状況の評価する。実験には同じ試験体を用い、垂直応力を $5, 10, 15\text{ MPa}$ と変化させて行う。生成したガウジの評価には、せん断前後の重量の変化を計測するとともに、開発した三次元表面測定装置を用いて不連続面表面の凹凸の変化を計測する。

CaseBではせん断にともなって生成されるガウジにより、透水率が変化する状況を定量的に把握することを目的としてせん断-透水同時実験を行う。せん断はCaseAと同様にして行い、同時に定水位による透水実験を行う。透水実験は試験体下部中央からの放射流を発生させ、不連続面を通して流れ出た流量を計測することで行われる。計測はせん断変位の 1 mm ごとに一時的にそのせん断変位を保持して行う。またCaseBxA

Table 1 Experimental cases and conditions.

	Case name	Constant normal stress	Options
Shear test under constant normal stress.	CaseA1	5 MPa	
	CaseA2	10 MPa	
	CaseA3	15 MPa	
Shear-flow coupling test under constant normal stress.	CaseB1	5 MPa	Removed gouge
	CaseB1A	5 MPa	
	CaseB2	10 MPa	
	CaseB2A	10 MPa	Removed gouge
	CaseB3	15 MPa	Removed gouge
	CaseB3A	15 MPa	

ではガウジが透水特性に及ぼす影響を評価する目的で、実験後不連続面内に堆積したガウジをほぼ完全に除去した後に試験体を装置内に戻し、せん断履歴を与えずにせん断実験を再現し、任意のせん断変位において透水実験を行う。

3. 実験結果及び考察

(1) CaseA の結果及び考察

Fig.1 にガウジの体積と垂直応力の関係を示す。これによるとガウジの体積は垂直応力の増加とともに指数関数的に大きくなることが分かる。またせん断前後における表面凹凸測定結果から求めた値とよく一致している。

Fig.2 に不連続面下面について表面凹凸測定結果から不連続面表面内の凹凸が破壊された領域をGIS(地理情報システム)を使って解析した結果を示す。せん断により破壊されガウジとなっている部分は垂直応力の増加に伴って拡大しており、ガウジがせん断面内の透水経路を閉塞する可能性は垂直応力の増加とともに大きくなる。また破壊された領域の進展は不連続面上下の全面積に対して、垂直応力 5 MPa で 20% 、 10 MPa で 34% 、 15 MPa で 47% となる。

(2) CaseB の結果及び考察

Fig.3(a) にせん断応力とせん断変位の関係を示す。いずれのケースも、せん断初期段階において、せん断応力はピークを示し、せん断変位 10 mm 以降では一定の残留せん断応力を示す。

Fig.3(b) に垂直変位とせん断変位の関係を示す。いずれもせん断初期において、垂直変位がわずかに減少し、下に凸な曲線を示したのち、明確なダイレクシー特性を示す。

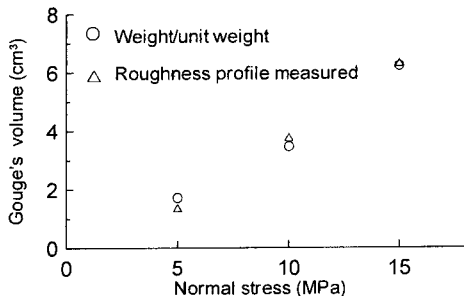


Fig.1 Relationship between gouge's volume and normal stress.

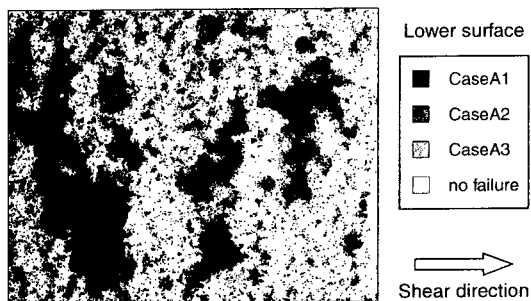


Fig.2 Progress of failure region in discontinuities plane.

Fig.3(c) に透水係数とせん断変位の関係を示す。図中の白抜き記号がせん断一透水同時実験、黒がガウジを除去した透水実験の結果である。まずせん断一透水同時実験について、透水係数は全てのケースにおいてせん断初期で一旦減少し、最小値を示した後にせん断とともに増加する。残留域においては垂直応力が5MPaのケースでは緩やかに増加しながらほぼ一定の値を示すのに対し、10MPaのケースではせん断変位14mm以降減少し、15MPaのケースでは一旦減少した後、再び増加するなどの複雑な挙動を示す。一般に不連続面の透水係数は、間隙幅の変化に依存すると考えられるが、今回の実験結果からもわかるように、せん断に伴ってガウジの発生が生じる場合は必ずしも間隙幅の変化に応じた変化を示さない。せん断に伴って透水率を変化させる要因としては発生するガウジによる影響と垂直応力の増加に伴う接触面積の増加による流路の閉塞が原因として考えられるため、せん断後にガウジを除去し、透水係数の計測を行った。その結果、せん断変位20mmにおけるガウジを除去した場合の透水係数は垂直応力5MPaでほとんど変化せず、10MPaで約3倍、15MPaで約8倍とガウジの発生量が多い場合ほど除去する前の透水係数を大きく上回り、発生するガウジによって不連続面の透水率は明らかに低下する。これは発生したガウジが間隙を充填し流路を閉塞させるため生じると考えられる。しかしながら、透水率の低下には不連続面の凹凸の状況やガウジ自体の特性が少なからず影響を及ぼすと考えられるため、こ

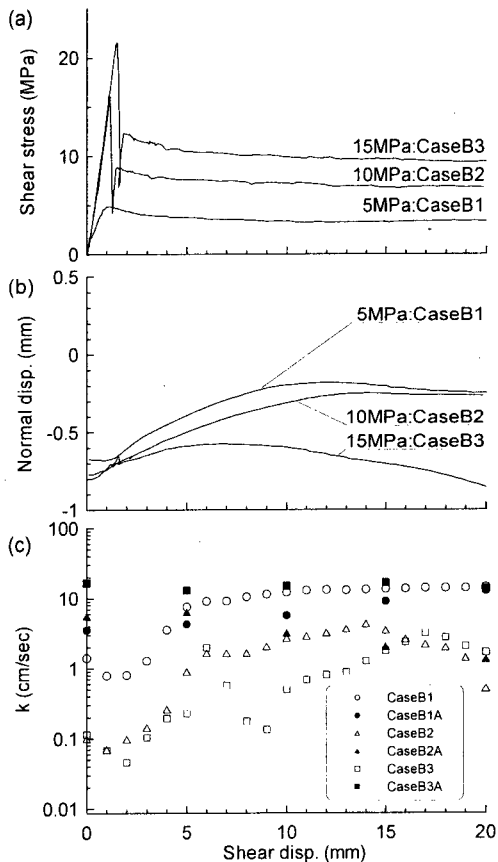


Fig.3 Shear-flow coupling properties of Berea sandstone under the constant normal stress.

- (a) Shear stress vs. shear displacement.
 (b) Normal displacement vs. shear displacement.
 (c) Hydraulic conductivity vs. shear displacement.

れらと透水率との相関性についても今後検討する必要がある。

4. おわりに

本研究では異なる垂直応力下でのガウジの発生量や、ガウジがせん断特性、透水特性に及ぼす影響を調査した。その結果、ガウジはせん断時に与える垂直応力に比例して増大すること、また発生したガウジによって不連続面の透水率は減少することが明らかとなった。

参考文献

- 1) Allan, U.S., Models for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures, AAPG Bulletin, Vol.73, pp.803-811, 1989.
- 2) 江崎哲郎, 三谷泰浩, 亀田伸裕: 岩盤不連続面のせん断一透水同時実験装置の開発, 資源と素材, Vol.112, No4, pp.213-218, 1996.