

三城目安山岩のせん断強度の載荷速度依存性

福井勝則¹・大久保誠介²・小川亮³

¹正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:fukui@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻 (同上)

³東京大学大学院 工学系研究科地球システム工学専攻修士課程 (同上)

本研究ではサーボコントロール式試験機を用い、3種類の定載荷速度 (5×10^{-5} , 5×10^{-4} , 5×10^{-3} mm/s) と4種類の垂直応力 (10, 20, 30, 40 MPa) で一面せん断試験を行い、三城目安山岩のせん断強度の載荷速度依存性を調べた。その結果、載荷速度を1桁増加させると、せん断強度(粘着力)は1.2MPa増加することがわかった。増加率は約6%であり、これは載荷速度を1桁増した時の一軸圧縮強度および引張強度の増加率とほぼ同じである。この結果を踏まえ、破壊条件と強度の載荷速度依存性についても検討した。

Key Words : loading rate dependency, direct shearing test, shear strength, time dependency, failure criteria, cohesion

1. はじめに

岩石の強度・変形の時間依存性は、岩盤構造物の長期安定性を評価する上で重要な特性であるとの認識から、古くより多くの研究がなされてきた。載荷速度を変化させた時の強度の変化を調べる試験¹⁾⁻⁸⁾は、クリープ試験⁹⁾⁻¹²⁾とならび、時間依存性を調べる手法として一般的に用いられており、圧縮応力下において数多くの研究結果が報告されている。

圧縮応力下では載荷速度依存性に関する知見はかなり得られているが、せん断強度、一軸引張強度など圧縮応力下以外での載荷速度依存性の知見^{8),13)-15)}は非常に少ない。福井ら¹⁶⁾は三城目安山岩を用い、載荷速度を1桁増加させると一軸引張強度は6.5%増加することを示した後、一軸圧縮強度、一軸引張強度、圧裂引張強度および破壊じん性値の載荷速度依存性に関する従来の結果をまとめ、載荷速度が1桁増加した際の強度の増加率はほぼ6.5%と、三軸圧縮強度を除く強度の増加率は定量的に同じであることを示した。

この結果は、様々な応力状態での載荷速度依存性

が比較的単純な関係となっている可能性を示唆しており、もしそれを示せれば今後の研究を進める上で有用と考える。例えば、比較的試験が容易な一軸圧縮強度の載荷速度依存性を調べることにより、一軸引張強度など、他の応力状態での時間依存性(載荷速度依存性やクリープ特性など)を推定することができ、構成方程式のパラメータを減らすことができる。しかしながら、比較的、強度のばらつきが小さく、多くのデータが公表されている三城目安山岩でさえ、実用上重要なせん断強度に関する特性はほとんどわかっておらず、関係を定量的に議論するための知見は整っていない。

せん断強度は、土質力学の分野では実用上最も重要な特性であるため、直接にせん断強度を求める試験方法(直接せん断試験)が提案され、岩石についても同じ考えを適用して、せん断強度を測定することが試みられている¹⁷⁾。Petit¹⁸⁾は一面せん断試験を行い、垂直応力による破壊進展状況の違いに関して論じている。しかしながら、岩石の場合、このような直接せん断試験結果の報告は比較的少なく、むしろ不連続面でのすべり特性を調べる研究が多く見ら

れる。Indraratna & Haque¹⁹⁾は不連続面を有する軟岩を用いて載荷速度を変化させた実験を行い、載荷速度の増大によりせん断応力が増加すると報告している。地震関連の研究では、スティック・スリップに注目した実験的検討が多く行われており、見かけの摩擦係数はすべり速度に依存することが指摘されている²⁰⁾。地すべりに関して、斉藤²¹⁾はすべり変位が一次(変位速度減少)、二次、三次(変位速度増大)クリープと似た特性を示すことを指摘しており、地すべりにおいても時間依存性の存在が明らかとなっている。Zhao⁸⁾は punch 試験を行い、粘着力の載荷速度依存性を調べ、載荷速度の増加により粘着力が増加するとしている。古住ら²²⁾は来待砂岩と東北大理石を用いて、一面せん断疲労試験を実施し、せん断特性に時間依存性が存在することを示している。関連する研究はおこなわれてきたが、不連続面を有する岩石の研究がほとんどで、岩石のせん断強度に関しては、載荷速度依存性を示すかどうかすらわかっていないのが現状である。

本研究では一面せん断試験用に新たに二軸試験機を作製し、三城目安山岩のせん断強度の載荷速度依存性を調べることにした。さらに、一軸圧縮強度、三軸圧縮強度、引張強度の載荷速度依存性との関係を明確にした上で、破壊条件の載荷速度依存性に関して考察した結果について述べる。

2. 試料岩石および実験方法

従来から著者らが用いてきた試料岩石のうち最も実績があり、時間依存性を含む様々な特性を把握している、三城目安山岩を試料として用いた。三城目安山岩は流離面が見られるため、流離面と平行にせん断応力を作用させると、せん断強度のばらつきが大きくなることが懸念された。そのため、流離面に対して垂直な方向からボーリングを行い、流離面に垂直な方向のせん断特性を調べることにした。試験片は端面を平面研削盤により、平行度 ± 0.025 mm以内に仕上げた、直径 50 mm、高さ 50 mmの円柱形とした。整形後の試験片を温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 15\%$ の実験室内にて1ヶ月以上放置し、自然乾燥させてから実験に用いた。

表-1 に三城目安山岩の力学的物性値を示す。圧裂引張試験は、万能試験機により破壊するまでの所要時間が 100 s 程度となるように載荷を行った結果である。一軸圧縮試験は、サーボ試験機により載荷速度 10^{-4} s^{-1} で載荷を行い、ピーク強度までの時

間は圧裂引張試験と同様に 100 s 程度であった。

図-1 に示すような容量 500 kN の二軸載荷用のサーボ試験機を、新たに製作した。水平方向と鉛直方向に配置した、二つの載荷用シリンダの諸元および計測・制御方法は同じである。圧力源は住友精密製(QT23-6.3-A)である。押し側となるシリンダの断面積は 311.61 cm^2 で、引き側は 191.43 cm^2 であり、シリンダの断面積比は約 1.6 である。シリンダの変位を差動変圧器式変位計(新光電機製 6114)で測定し、水平および垂直方向のシリンダの変位をそれぞれせん断変位、垂直変位とした。荷重は自製のひずみゲージ式荷重計により測定した。変位は増幅器(新光電機製 1533)で、荷重は直流増幅器(ユニパルス製 AM30)でそれぞれ増幅した後、A/D 変換器(ユニオンデータ製 UAD-ATEE)を通してコンピュータに入る。なお、雑音防止のため変位計、荷重計の出力をそれぞれ 1 kHz、100 Hz のローパスフィルタに通した。A/D 変換器は 16 bit の分解能で、1チャンネルあたりの変換時間は $20 \mu\text{s}$ である。コンピュータの中で演算後、制御信号は D/A 変換器(ユニオンデータ製 UAD-ATHG)を通し、サーボアンプ(日工産業製)で増幅した後、東京精密測器製力フィードバック式サーボ弁(225F-15L-30-201)に導かれる。D/A 変換器は 16 bit の分解能で、変換時間 $10 \mu\text{s}$ である。

表-1 三城目安山岩の物性値

	平均値	標準偏差	変動係数
圧裂引張強度	6.8 MPa	0.39 MPa	5.8 %
一軸圧縮強度	94.7 MPa	1.8 MPa	1.9 %
ヤング率*	10.2 GPa	0.28 GPa	2.7 %

* 一軸圧縮試験で強度の50%接線より

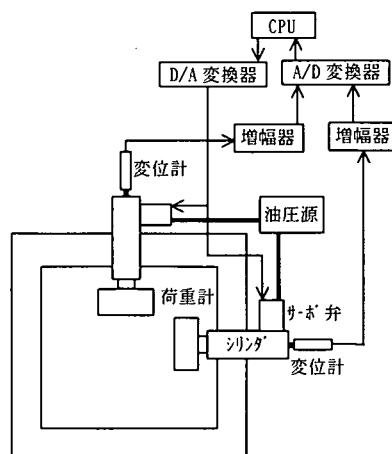


図-1 実験装置の概略図

一面せん断試験は、二軸載荷用サーボ試験機にせん断箱を組み込んで実施した。その際の載荷部を図-2に示す。ベアリング（日本トムソン製 SR-4090）付きのプラテンを介して荷重をせん断箱に伝えることによって、モーメントをなるべく回避するように工夫した。

今回の試験では垂直荷重を一定に保ちつつ、せん断変位速度（載荷速度）一定で載荷し、せん断変位が2mmとなった時点で試験を打ち切った。垂直応

力は10, 20, 30, 40MPaの4通り、載荷速度は 5×10^{-5} , 5×10^{-4} , 5×10^{-3} mm/sの3通り、合計12通りとし、同一条件で4回ずつの試験を行った。なお、せん断変位の増加に伴って、受圧面積が減少するが、本研究では簡単のため、応力の計算に際しては荷重を初期受圧面積で割ることにした。

3. 変形特性

(1) せん断応力-せん断変位曲線

代表的なせん断応力-せん断変位曲線を図-3に示す。図-3(a)は載荷速度 5×10^{-5} mm/sの結果である。最初、せん断応力が5 MPa以下で若干下に凸の傾向が見られるが、これは試験片とせん断箱のなじみの影響である。せん断変位が0.2 mm程度になるとこの影響はなくなり、せん断応力と変位はほぼ直線上を増加する。その後傾きが緩やかになりピーク強度に達する。ピーク強度付近は、変位が増加してもせん断応力の変化は鈍く、変位が0.3 mm程度増加してようやくせん断応力は下に凸な曲線を描きながら低下し、ほぼ一定値（残留強度）に落ち着く。垂直

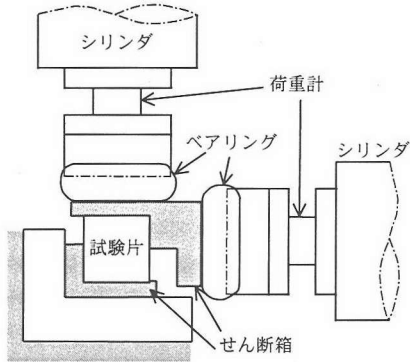


図-2 実験装置の載荷部

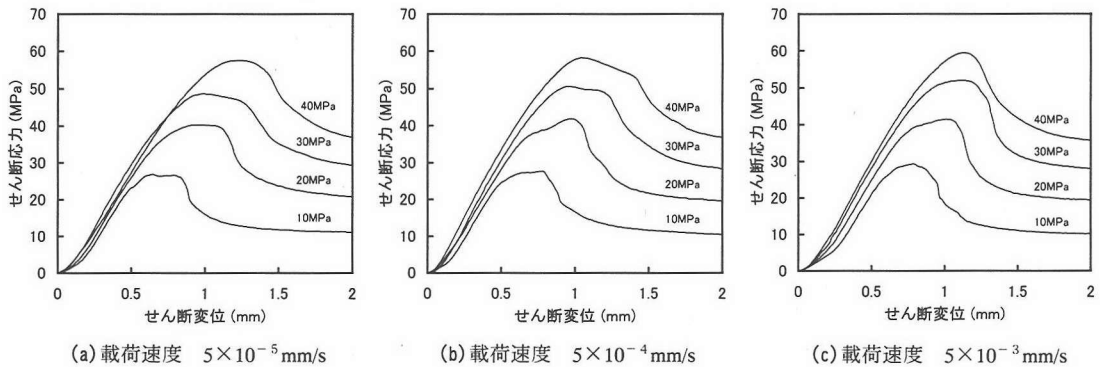


図-3 せん断応力-せん断変位曲線。図中の数字は垂直応力を表す

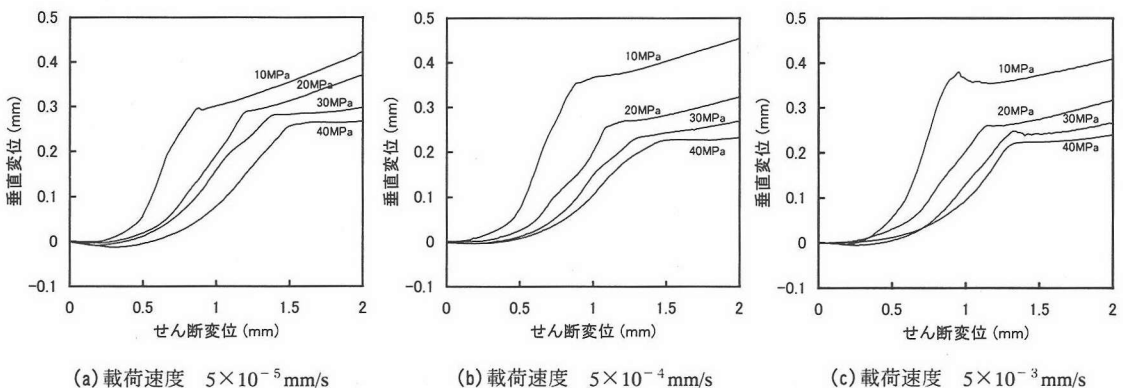


図-4 垂直変位-せん断変位曲線。図中の数字は垂直応力を表す

応力の増加に伴い、ピーク応力は増加するものの、せん断応力-せん断変位曲線の形状は垂直応力の小さいものを内包するような傾向をとっており、三軸圧縮試験における周圧の増加に伴って観察される結果と一致している。

図-3(b)、図-3(c)は、それぞれ載荷速度 5×10^{-4} 、 5×10^{-3} mm/s での結果であるが、多少のばらつきはあるものの、その傾向は図-3(a)とほとんど同じである。

(2) 垂直変位-せん断変位曲線

図-3 に示した結果と同じ試験片で得られた、垂直変位とせん断変位の関係を図-4 に示す。なお、垂直変位は垂直方向の浮き上りを正とした。図-4(a)は載荷速度 5×10^{-5} mm/s の結果である。最初、せん断変位の増加に伴い、垂直変位はわずかに減少する傾向が見られる。その後、垂直変位は下に凸の傾向で急激に増加していき、ある点を境にして変曲し、緩やかな増加傾向となっている。この変曲点において、破断面（せん断面）が形成されたと考えられる。この変曲点以前での垂直変位とせん断変位が直線的となっている部分の傾き（垂直変位の増分/せん断変位の増分）は垂直応力 10 MPa の時、0.6 と比較的大きく、弾性変形以外の変形が生じているのではないかと考えられる。

Petit¹⁸⁾は一面せん断試験における破断面の観察を行い、単純に治具で設定した面内に破断面が形成されるのではなく、図-5 に示すようにそれと若干角度を持った亀裂が数多く形成されながら最終的にその亀裂が連結し、破断面が形成されると述べている。この結果によれば、変曲点以前ではせん断変位の増加に従い、図-5 に示すように複数の亀裂が徐々に形成されるが、まだ連結しておらず、その亀裂が進展し開口するため、鉛直変位が大きくなったものと考えられる。垂直応力が増加するに従い、図-4 の直線部の傾きは小さくなっている。これは垂直応力の増加により亀裂の開口が小さくなるためと考えられる。変曲点以降では、すでに破断面が形成されているため、破断面に沿った摩擦すべりが生じ、破断面の凹凸によるのり上げ現象が卓越する。このように、破断面の形成によって変形様式が変化し、垂直変位-せん断変位曲線が変曲したのと考えられる。変曲点以降では、図-3 に示すせん断応力-せん断変位曲線において、せん断応力が急激に低下していることから破断面が形成されていることがわかる。垂直応力の増加に従い、変曲点以降で緩やかに増加する直線部分での傾きが小さくなっている。この

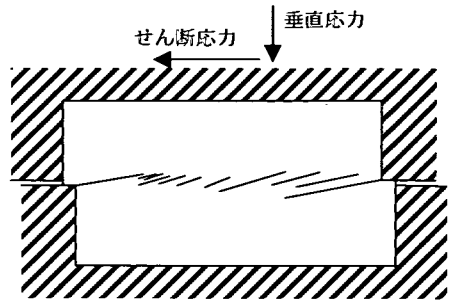


図-5 一面せん断試験時の亀裂の発生状況
Petit¹⁸⁾より引用

表-2 せん断試験結果

鉛直応力 (MPa)	載荷速度 (mm/s)	せん断強度 (MPa)	残留強度* (MPa)
10	5×10^{-5}	26.6	11.1
	5×10^{-4}	27.6	10.8
	5×10^{-3}	28.5	10.7
20	5×10^{-5}	39.1	21.4
	5×10^{-4}	41.7	19.7
	5×10^{-3}	42.5	20.2
30	5×10^{-5}	48.7	29.4
	5×10^{-4}	51.1	28.6
	5×10^{-3}	51.8	30.1
40	5×10^{-5}	57.6	38.2
	5×10^{-4}	58.9	38.4
	5×10^{-3}	59.7	38.5

* せん断変位 2mm の時

傾きが減少することは、垂直応力が大きいほど、破断面の凹凸が小さくなることを示している。試験終了後、破断面の観察を行った結果、垂直応力が大きくなると、破断面の凹凸は小さくなり、摩擦すべりで形成された粉末状のガウジが多くなる傾向が見られた。

図-4(b)、図-4(c)は、それぞれ載荷速度 5×10^{-4} 、 5×10^{-3} mm/s の結果であるが、図-3 の場合と同様に多少のばらつきはあるものの、その傾向は図-4(a)とほとんど同じである。

4. せん断強度と残留強度

(1) 載荷速度依存性

表-2 に条件ごとのせん断強度を示す。

せん断強度の載荷速度による変化を図-6 に示す。図-6(a)は垂直応力 10 MPa の結果であるが、ばらつきはみられるものの、載荷速度の増加によりせん断強度が増加していることがわかる。図-6(b)、(c)、(d)はそれぞれ垂直応力 20, 30, 40 MPa の結果であ

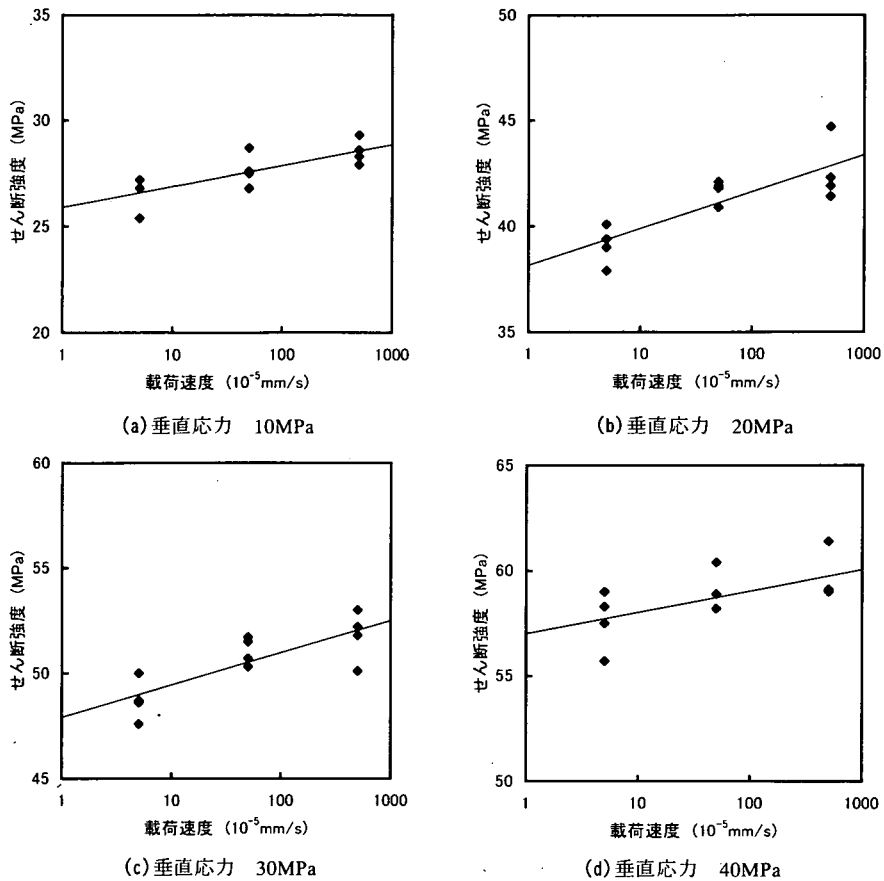


図-6 せん断強度の载荷速度依存性

表-3 鉛直応力ごとの $\Delta\tau$

鉛直応力 (MPa)	$\Delta\tau$ (MPa)
10	1.0
20	1.7
30	1.5
40	1.0

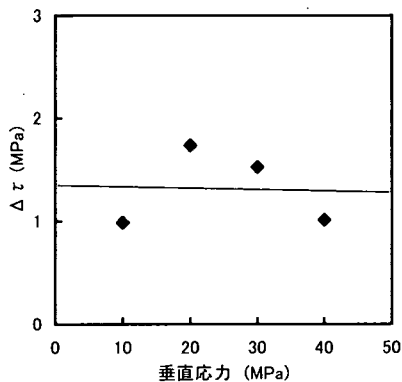


図-7 载荷速度を1桁変化した時のせん断強度の変化 $\Delta\tau$ と垂直応力の関係

るが、载荷速度の増加によりせん断強度は増加しており、垂直応力 10 MPa の時と傾向的に同じである。

圧縮試験では、载荷速度を1桁変化した時の強度の変化を求め、強度の载荷速度依存性を議論している⁵⁾。本研究でもこれにならい、図-6で载荷速度の対数にせん断強度が比例するとして、载荷速度を1桁変化した際のせん断強度の変化を最小二乗法により求めた。垂直応力ごとの $\Delta\tau$ を表-3に、垂直応力との関係を図-7に示す。図-7には最小二乗法で近似した結果を直線で示したが、ばらつきが大きいものの $\Delta\tau$ は 1.3 MPa 前後である。ばらつきが大きい理由の1つとしては、従来の研究^{5)-7),16)}では载荷速度を4通り(4桁)に変化させたが、本研究では3通り(3桁)であったため、試験片毎のばらつきの影響が表れやすくなったためと考えられる。

表-2に各条件で得られたせん断変位 2 mm での残留強度を示すが、表-2からは残留強度の载荷速度依存性を判断することができなかった。Tabagus²³⁾からは、一面せん断試験において残留強度で応力緩和

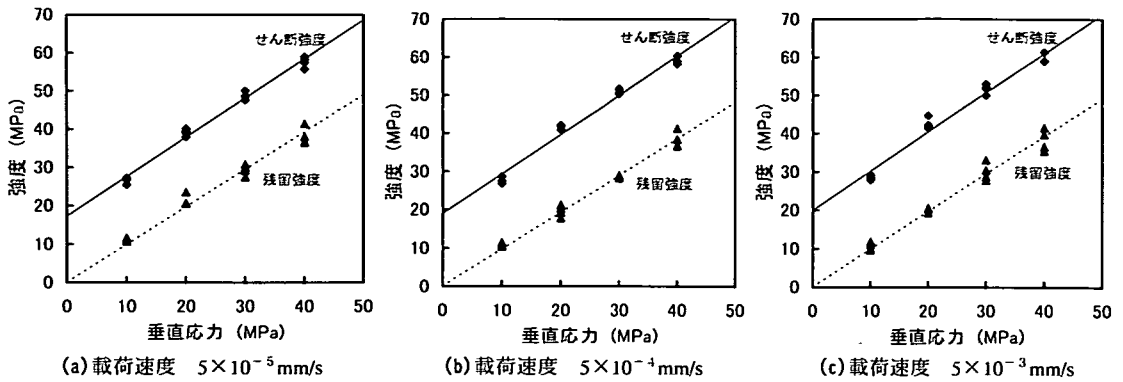


図-8 強度と垂直応力の関係

表-4 せん断試験結果より求めた
粘着力と内部摩擦角

載荷速度 (mm/s)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)
5×10^{-5}	17.5	45.9
5×10^{-4}	19.1	46.1
5×10^{-3}	19.7	46.2

表-5 三城目安山岩の n

試験方法	n の求め方	n	文献
粘着力	載荷速度 3 桁変化	38	本研究
一軸引張	載荷速度 4 桁変化	39	福井ら
	載荷速度 4 桁変化	36	大久保ら ²⁴⁾
	クリープ寿命	37	秋 ²⁵⁾
	クリープ寿命と強度のばらつきを利用	36	西松・山口 ²⁶⁾
圧裂引張	載荷速度 4 桁変化	41	大久保ら ²⁴⁾
一軸圧縮	載荷速度 4 桁変化	35	山口ら ⁵⁾
	載荷速度 4 桁変化	35	大久保ら ²⁷⁾
	ピーク強度直前で載荷速度 1 桁変化	38	大久保ら ²⁷⁾
	載荷速度 4 桁変化	37	大久保・秋 ²⁸⁾
	クリープ寿命	35	大久保・西松 ²⁹⁾
	クリープ寿命	36	趙ら ³⁰⁾
三点曲げ	載荷速度 6 桁変化 (破壊じん性値)	34	大久保ら ¹⁵⁾

試験を行い、時間の経過とともにせん断応力が低下したと報告しており、残留強度でも時間依存性が存在することが明らかとなっているが、せん断応力の低下の割合は、一軸圧縮や一軸引張状態で同様の試験を行った場合に比べ小さいとしている。今回の実験結果でも破断面ができた後の載荷速度依存性は比較的小さいので、試験片のばらつきなどの影響で、残留強度の載荷速度依存性を明らかにすることができなかったと考える。残留強度の載荷速度依存性は岩盤構造物の長期安定性などにおいて重要であり、

せん断変位量がより大きくなった時の挙動などは今後の課題としたい。

(2) 垂直応力依存性

図-8 にせん断強度と垂直応力の関係（せん断曲線）を示す。図-8(a)は、載荷速度 5×10^{-5} mm/s の結果であるが、垂直応力とせん断強度にはほぼ直線関係が見られる。図-8(b), (c)は、それぞれ載荷速度 5×10^{-4} , 5×10^{-3} mm/s の結果であるが、図-8(a)の場合と同様である。

垂直応力 0 の場合のせん断強度を区別するため、以下では粘着力と呼ぶことにする。図-8 から求めた粘着力と内部摩擦角を表-4 に示す。表からは、粘着力は載荷速度の影響を受けており、載荷速度が 1 桁変化した場合、粘着力は平均すれば 1.1 MPa ずつ増加している。他方、載荷速度によらず、内部摩擦角は 46° であることがわかる。載荷速度の内部摩擦角への影響はなく、粘着力のみに影響を与えており、図-7 の整理結果と整合している。

図-8 に残留強度と垂直応力の関係も示す。図-8(a)に示した載荷速度 5×10^{-5} mm/s の結果では、垂直応力と残留強度にはほぼ原点を通る直線関係が見られる。また、直線の傾きは 44° であり、内部摩擦角 (46°) に比べてわずかに小さいが、かなり近い値である。図-8(b), (c)に示した載荷速度 5×10^{-4} , 5×10^{-3} mm/s の結果も図-8(a)の場合と同様である。

(3) 粘着力の載荷速度依存性

以上の結果をまとめると、図-7 からは載荷速度が 1 桁変化すると粘着力は 1.1 MPa ずつ増加しており、表-4 からは載荷速度が 1 桁変化すると粘着力は 1.3 MPa ずつ増加している。この差は求め方の違いからであり、両者の平均値から、載荷速度が 1 桁変

化すると粘着力は 1.2 MPa (6.1 %) 程度ずつ変化するとはいえる。

一軸・三軸圧縮試験や一軸引張試験でも荷重速度の増加により、強度が増加することが知られており、その関係は以下のような式で近似されている。

$$\text{強度} \propto c^{n+1} \quad (1)$$

c は荷重速度である。また、クリープ試験における、クリープ応力とクリープ寿命 t の関係は次式で近似されている²⁹⁾。

$$\text{クリープ応力} \propto t^{-n} \quad (2)$$

粘着力に対して、式(1)が成り立つとして、 n を求めると 38 となる。従来研究において、三城目安山

岩を用い、様々な強度に関して荷重速度依存性やクリープ試験などから求めた n を福井ら¹⁶⁾はまとめており、これと本研究で得られた結果をまとめて表-5 に示す。各強度は表-1 からわかるようになり異なっているため、式(1)より強度の変化の絶対値は各強度に対して異なるが、変化率(荷重速度による強度の変化/強度)はほぼ同じであるので、一軸圧縮強度、一軸引張強度、圧裂引張強度、破壊じん性値(モード I) のすべてにわたり、 n は 38 前後の値をとる。このように種々の試験で n はほぼ共通した値となっていることについて、大久保ら¹⁵⁾は、各強度は破壊じん性値の時間依存性と直接関係したものであり、試験法によらない可能性があるとしており、今回実施した粘着力に関しても同様の結果となった。

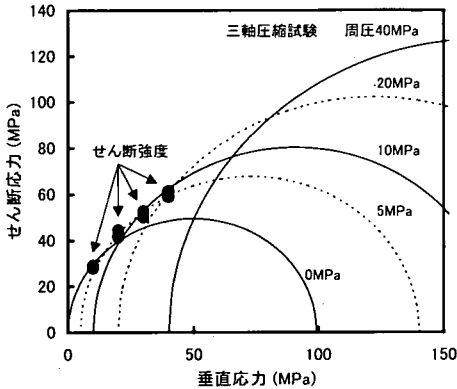


図-9 本研究で得られたせん断曲線と何⁶⁾の三軸圧縮試験より求めた Mohr の応力円。せん断曲線は、荷重速度 5×10^{-3} mm/s、三軸圧縮試験は荷重速度 10^{-4} /s の結果。

5. 考察

水田ら³¹⁾は、Protodjakonov の装置を用いた一面せん断試験における応力状態の弾塑性計算を行い、破断面に沿った応力分布は不均一であるが、破壊の進行の過程で応力分布が均等化するため、鉛直方向から $20 \sim 35^\circ$ (せん断応力と垂直応力の比にすると $1.4 \sim 2.8$) の角度で荷重すればほぼ妥当な結果を得ることができると述べている。本研究では二軸荷重装置を用いているため、Protodjakonov の装置と応力分布は多少異なっているものと考えられるが、せん断強度と垂直応力の比は、 $1.4 \sim 2.8$ とほぼ水田ら³¹⁾が推奨している範囲内にある。

表-6 破壊条件とその無次元化

名称	破壊条件	無次元化した破壊条件	無次元化に使用した値	備考
Coulumb	$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$	$\tau^* = c^* + \sigma_n^* \tan \phi$	σ_c	
Mohr	$\tau^2 = m \sigma_t (\sigma_n + \sigma_t)$	$(\tau^*)^2 = m (\sigma_n^* + 1)$	σ_t	m :定数
Bieniawski	$\sigma_1 = \sigma_c + B \frac{\sigma_3^\alpha}{\sigma_c^{\alpha-1}}$	$\sigma_1^* = 1 + B (\sigma_3^*)^\alpha$	σ_c	α, B :定数
Hoek and Brown	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1}$	$\sigma_1^* = \sigma_3^* + \sqrt{m \sigma_3^* + 1}$	σ_c	m :定数
Johanson	$\sigma_1 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t}\right)^B$	$\sigma_1^* = Br (1 + \sigma_3^*)^B$	σ_t	B :定数 $Br = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$
Von Mises	$J = 2\sigma_c^2$	$J^* = 2$	σ_c	$\sigma_c = \sigma_t$

τ :せん断応力 σ_n :垂直応力 σ_1 :最大主応力 σ_2 :中間主応力 σ_3 :最小主応力

σ_c :一軸圧縮強度 σ_t :一軸引張強度 c :粘着力 ϕ :内部摩擦角

$$J = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad J^* = (\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2$$

山口・西松¹⁷⁾は、一面せん断試験を行って得たせん断曲線（垂直応力とせん断強度の関係）は三軸圧縮試験から求めた Mohr の応力円の包絡線とほぼ一致すると述べている。

何⁶⁾の行った三軸試験結果から描いた Mohr の応力円と本研究で得られたせん断曲線を図-9 に示す。図-9 では山口・西松¹⁷⁾の指摘通り、ほぼ一面せん断試験を行って得たせん断曲線は Mohr の応力円の包絡線とほぼ一致しており、この点でも今回の試験結果は従来の知見と一致している。ただし、何⁶⁾は流離面と垂直方向から载荷しており、本研究で行ったせん断試験とは载荷方向が異なっている。この点は今後の検討事項としたい。

岩石の破壊条件としていくつかの式が提案されており、代表的な破壊条件を表-6 に示す。表-6 に示したこれらの破壊条件は、応力の次元を持った定数で無次元化することが可能である。Coulumb の破壊条件では無次元化に使用した一軸圧縮強度が変化しても、 $\tau \cdot \sigma$ 線図上の破壊条件は変化しない。よって、この破壊条件では、一軸引張強度や粘着力は無次元化に用いた値に比例する。他の破壊条件でも上記と同様に考えると、無次元化に用いた強度に比例して他の強度は変化する。表-5 で議論したように、载荷速度による強度の変化率はほぼ等しく、粘着力、引張強度（一軸、圧裂、曲げ）、一軸圧縮強度の比は変わらない。よって、粘着力、引張強度（一軸、圧裂、曲げ）、一軸圧縮強度に関する限り、無次元化した破壊条件は、载荷速度が変化してもそのまま使用できる。

山口ら⁵⁾、何⁶⁾、趙⁷⁾は、三城目安山岩の三軸圧縮強度の载荷速度依存性に関して報告している。3 者が行った、载荷速度 10^{-4}s^{-1} の時の各周圧に対する三軸圧縮強度を図-10 に示す。図では山口らと何の三軸圧縮強度はほぼ同じであるが、趙の用いた三城目安山岩の強度が小さいことがわかる。各周圧に対する、载荷速度が 1 桁増加した場合の強度の増分 $\Delta\sigma_c$ を図-11 に示す。図では趙、何の結果は周圧によらず $\Delta\sigma_c$ はほぼ一定である。山口の結果は多少ばらつきがみられるが、論文の中では周圧によらず、 $\Delta\sigma_c$ はほぼ一定であるとしている。以上のように三城目安山岩では周圧によらず、 $\Delta\sigma_c$ は同じ値であるというのが従来の結果である。また、強度の小さい趙の結果では、 $\Delta\sigma_c$ も小さくなっており、一軸圧縮強度において、 $\Delta\sigma_c/\sigma_c$ はほぼ 6.5% であり、山口らと何の結果と同じである。

このような結果を満足する破壊条件は、表-6 に示した中では Coulumb の破壊条件のみである。

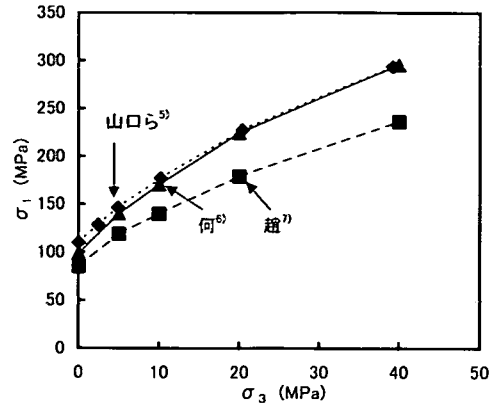


図-10 三軸圧縮強度. 山口ら⁵⁾、何⁶⁾、趙⁷⁾より引用

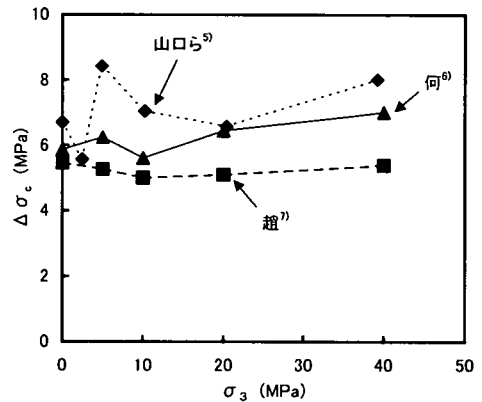


図-11 载荷速度を 1 桁変化させた時の三軸圧縮強度の変化 $\Delta\sigma_c$

山口ら⁵⁾、何⁶⁾、趙⁷⁾の結果では、周圧が大きくなると Coulumb の破壊条件より、次式で示す Johanson の破壊条件で $B=0.5$ とした場合（Yanach の破壊条件）がよく一致する。

$$\sigma_1 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^{0.5} \quad (3)$$

しかしながら、式(3)において、周圧 40MPa で $\Delta\sigma_c$ は一軸圧縮に比べ 50%程度増加することとなり、三軸圧縮強度の载荷速度依存性を正しく表現することができない。表-6 に示した Coulumb 以外の破壊条件においても、三軸圧縮強度の载荷速度依存性は説明できない。

6. まとめおよび今後の課題

本研究では三城目安山岩を用い、一面せん断試験における载荷速度依存性を調べた。本研究で得られた事項をまとめると次のようになる。

- 1) せん断応力-せん断変位曲線のピーク強度付近におけるせん断応力の変化は緩慢で、せん断変位がかなり増加してようやくせん断応力が低下した。垂直応力の増加に従い、せん断応力-せん断変位曲線の形状は垂直応力が小さいものを内包するような傾向を示しており、三軸圧縮試験における周圧の増加による応力-ひずみ曲線の変化と同じであった。
- 2) ピーク強度以降で破断面の形成された時に、垂直変位-せん断変位曲線が変曲することを示した。破断面が形成される前は、内部に発生した亀裂が進展・開口するので、垂直変位が比較的大きくなる。破断面が形成された後は、せん断変位の増分に比べ垂直変位の増分は小さい。また、垂直応力の増加に従い、破断面の凹凸が小さくなり、せん断変位の増分に比べ垂直変位の増分はより小さくなった。
- 3) せん断強度に载荷速度依存性が存在することを示した。粘着力は载荷速度を1桁変化させると6.1%変化し、一軸圧縮強度、一軸引張強度とほぼ同様な変化率であることを示した点は本研究の成果である。また、载荷速度を1桁変化させた時のせん断強度の増加は垂直応力に関係なく1.2MPaであった。
- 4) 残留強度の载荷速度依存性を判読することができなかった。残留強度の载荷速度依存性が小さく、試験片のばらつきなどの影響で明らかにすることができなかったと考える。
- 5) 表-6 に示した破壊条件では、実験結果と同様に粘着力、一軸圧縮強度、引張強度の3者は比例する。
- 6) 垂直応力が小さい場合は、载荷速度依存性を含めて、Coulumbの破壊条件で実験結果を整理できる。周圧が高い場合については今後検討する必要がある。

本研究は三城目安山岩を使用した結果であり、花崗岩に関してはZhao⁸⁾が報告しているが、まだ知見が不足していると考えられ、今後堆積岩を含む他の岩種でも成立するかどうかを調べる必要がある。また、粘着力において载荷速度依存性が認められ、内部摩擦角に対しては载荷速度依存性が現れなかった。この点は重要な事項であると考えられ、今後その機

構などを検討する必要がある。

最後に破壊条件と载荷速度依存性の実験結果の両方を満足する破壊条件を構築する必要がある。

参考文献

- 1) 小林良二：高速荷重下における岩石の力学的性質（第1報）、日本鉱業会誌、Vol.85、No.11、pp.911-916、1969。
- 2) Lindholm, U. S., Yerkley, L. M. & Nagy, A. : The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt, Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.11, pp.181-191, 1974.
- 3) Goldsmith, W., Sackman, J. L. & Ewert, C. : Static and dynamic fracture strength of Barre granite, Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.303-309, 1976.
- 4) Olsson, W. A. : The compressive strength of tuff as a function of strain rate from 10^{-6} to 10^3 /sec, Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.28, pp.115-118, 1991.
- 5) 山口勉, 大久保誠介, 西松裕一, 小泉昇三：三城目安山岩の三軸圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響-岩石の破壊および変形における時間依存性の研究（第1報）、日本鉱業会誌、Vol.99、No.2、pp.87-92、1983。
- 6) 何昌榮：岩石の圧縮荷重下での変形・破壊の時間依存性、東京大学博士論文、第3章、1989。
- 7) 趙頭：岩石の時間依存性挙動と構成方程式に関する研究、東京大学博士論文、第2章、1995。
- 8) Zhao, J. : Applicability of Mohr-Coulumb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock, Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.37, pp.1115-1121, 2000.
- 9) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一：一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性、資源・素材学会誌、Vol.105, No7, pp.521-526, 1989。
- 10) Lajtai, E. Z., Duncan, E. J. & Carter, B. J. : The effect of strain rate on rock strength, Rock Mech. and Rock engng., Vol.24, pp.99-109, 1991.
- 11) 大久保誠介, 秋哲淵：気燥状態と湿潤状態での三城目安山岩のクリープ、資源・素材学会誌、Vol.109, No.11, pp.917-922, 1993。
- 12) 山口勉, 大久保誠介：稲田花崗岩の周圧下の強度とクリープ寿命の分布に関する検討、資源・素材学会誌、Vol.116, No.7, pp.623-629, 2000。
- 13) 趙頭, 大久保誠介, 福井勝則：岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討、資源・素材学会誌、Vol.111, No.9, pp.595-600, 1995。

- 14) 趙顕, 大久保誠介, 福井勝則: 強度のばらつきを考慮した一軸引張試験の計算機シミュレーション, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.13, pp.907-912, 1995.
- 15) 大久保誠介, 新孝一, 西松裕一: 時間効果を考慮したき裂進展のモデル—三城目安山岩の場合—, 材料, Vol.33, No.370, pp.882-887, 1984.
- 16) 福井勝則, 大久保誠介, 岩野圭太: 一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性, 土木学会論文集, No.729/Ⅲ-62, pp.59-71, 2003.
- 17) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門 (第3版), pp.142-151, 東京大学出版会, 1991.
- 18) Petit, J. P. : Normal stress dependent rupture morphology in direct shear tests on sandstone with applications to some natural fault surface, *Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.25, pp.411-419, 1988.
- 19) Indraratna, B & Haque, A. : Shear Behaviour of Rock Joints, pp.29-31, Balkema, 2000.
- 20) Scholz, C.H. : 地震と断層の力学 (柳谷俊訳), pp.85-106, 古今書院, 1993.
- 21) 齊藤迪孝: 土質工学におけるレオロジー, 土と基礎, Vol.29, pp.77-82, 1981.
- 22) 古住光正, 山下秀, 杉本文男, 阿部司: 岩石の繰返しせん断疲労過程の実験的研究, 資源・素材学会誌, Vol.112, No.5, pp.295-301, 1996.
- 23) Tubagus, N.H., Fukui, K. and Okubo, S. : Relaxation of shear stress along rock discontinuity, *Int. Symp. on Rock Stress*, pp.327-332, kumamoto, 1997.
- 24) 大久保誠介, 金豊年, 秋山政雄: 一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性, 資源・素材学会誌, Vol.109, No.11, pp.865-869, 1993.
- 25) 秋哲淵: 岩石の湿潤状態における時間依存性, 東京大学博士論文, 付録, pp.3-6およびp.15, 1995.
- 26) 西松裕一, 山口勉: 岩石の引張遅れ破壊寿命の分布特性に関する確率過程論的研究, 材料, Vol.29, No.317, pp.192-197, 1980.
- 27) 大久保誠介, 何昌榮, 西松裕一: 一軸圧縮応力下における時間依存性挙動, 日本鉱業会誌, Vol.103, No.3, pp.177-181, 1987.
- 28) 大久保誠介, 秋哲淵: 気燥状態と湿潤状態での一軸圧縮強度とクリープ寿命の分布特性, 資源・素材学会誌, Vol.110, No.7, pp.533-538, 1994.
- 29) 大久保誠介, 西松裕一: 三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性, 日本鉱業会誌, Vol.102, No.7, pp.395-400, 1986.
- 30) 趙顕, 大久保誠介, 福井勝則: 周圧下での三城目安山岩のクリープ, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.7, pp.543-548, 1995.
- 31) 水田義明, 国松直, 荻野正二: 一面せん断試験において試験片に生じる応力および変形について, 日本鉱業会誌, Vol.99, No.6, pp.437-442, 1983.

(2002. 9. 11 受付)

LOADING-RATE DEPENDENCY OF SHEAR STRENGTH OF SANJOME ANDESITE

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO and Akira OGAWA

In this study, direct shearing tests of Sanjome andesite were carried out under three shear displacement rates (5×10^{-5} , 5×10^{-4} , 5×10^{-3} mm/s) and four normal stresses (10, 20, 30, 40 MPa) by a servo-controlled testing machine. When shear displacement rate was increased by a factor of 10, increment of shear strength was about 1.2MPa. Relative increment against shear strength was about 6 % that almost coincides with the values obtained in uniaxial tension and compression tests. It can be said that loading rate dependency of shear strength is similar to those of uniaxial tensile and compressive strength. The relationship between failure criteria and loading rate dependency was also discussed.