

# 凝灰岩の三軸せん断-保持-せん断試験と拘束圧による影響

大野 正登<sup>1\*</sup>・矢野 隆夫<sup>1</sup>・安原 英明<sup>2</sup>・菊本 統<sup>3</sup>・岸田 潔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

<sup>2</sup>愛媛大学 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3番)

<sup>3</sup>横浜国立大学 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

\*E-mail: ohno.masato.34u@st.kyoto-u.ac.jp

本研究では、軟岩の一種である凝灰岩を用いて排水三軸せん断試験を行い、残留状態においてせん断-保持-せん断のプロセスを与えた。実験は、せん断過程で発生したせん断帯のヒーリング現象(保持前の軸差応力よりも、再せん断後の軸差応力が大きくなる現象)を観察することを目的としており、拘束圧および温度条件を変化させている。結果、低拘束圧(0.3,0.5,0.7MPa)下で行った実験では、強度回復が確認されていたものの、高拘束圧(5.0,7.0MPa)下では軸差応力-軸ひずみ関係においける明瞭な強度回復は確認されなかった。本稿ではこれを、低拘束圧条件では明瞭なせん断面が生じるのに対し、高拘束圧条件では樽型の破壊形状を呈し、明瞭なせん断面が形成されないことが理由と考察する。

**Key Words :** healing, tuff, slide-hold-slide, triaxial test, heating

## 1. はじめに

放射性廃棄物やCO<sub>2</sub>等エネルギー生成後の副産物を岩盤内に固定し、長期に渡り隔離性能を保証するためには、天然バリアとなる岩盤の力学的・水理学的特性の変化を予測評価することは必要不可欠である。例えば、廃棄物処分空洞の建設により、空洞周辺の岩盤が低拘束圧下になり緩み領域が発生する。それらの緩み領域では、局所的なせん断帯が発生し、そこが岩盤の透水性や力学特性に大きく影響することが考えられる。また、長期間の挙動を議論する場合は、地熱や廃棄物が放出する熱の影響や時間経過に伴う力学特性の変化の検討が必要になる。

時間依存性の強度回復、ヒーリングに関する研究については、Dieterich<sup>1)~3)</sup>は、岩石鉱物粒状体を用いた二面せん断試験を実施し、二面せん断試験実施時においてせん断と保持を繰り返した場合に、滑りが停止している時間が長いほど、その後の摩擦強度が増加することを確認し、摩擦強度の時間的増加は次式

$$\tau_s = \tau_0 + A \log_{10} t_h \quad (1)$$

のように表せることを示した。なお、 $\tau_s$ は再せん断時のせん断強度、 $\tau_0$ はせん断停止時のせん断強度、 $t_h$ はせん断停止時間、 $A$ は定数である。一方Kishida, et al<sup>4)</sup>は花崗岩およびモルタルによる不連続面の一面せん断・透水試験

およびせん断-保持-せん断試験を実施し、せん断途中での負荷状態の長時間にわたる保持が、保持期間中の透水性の変化や再せん断時のせん断強度回復に及ぼす影響を評価している。また、Kishida, et al<sup>5)</sup>は、堆積軟岩の一種である大谷石を用いて、三軸せん断-保持-せん断試験を種々の拘束圧・温度条件条件下で行い、残留状態でせん断-保持-せん断試験を実施している。

本研究では、大谷石を対象として、せん断と停止を繰り返すせん断-保持-せん断型(Slide-Hold-Slide,以下S-H-S)の三軸せん断試験を実施し、S-H-Sプロセスが大谷石の挙動にどのような影響を及ぼすか検討を行った。

## 2. S-H-S三軸せん断試験

供試体は、直径5 cm、高さ10 cmの標準供試体を用いた。Table 1に、供試体の成分分析の結果を記す。これより、モンモリロナイトや沸石など、熱による変質が想定される物質が確認できる<sup>6)</sup>。

三軸せん断実験は、排水状態で軸ひずみ速度0.01%/minで行った。残留状態に至るまでせん断した後、载荷を一時停止し、所定の保持時間後に再び载荷するS-H-S型の三軸試験を行った。その過程においてヒーリング現象が発生するかどうかを検証した。実験温度条件は、

Table 1 Mode composition of pumice lapilli tuff

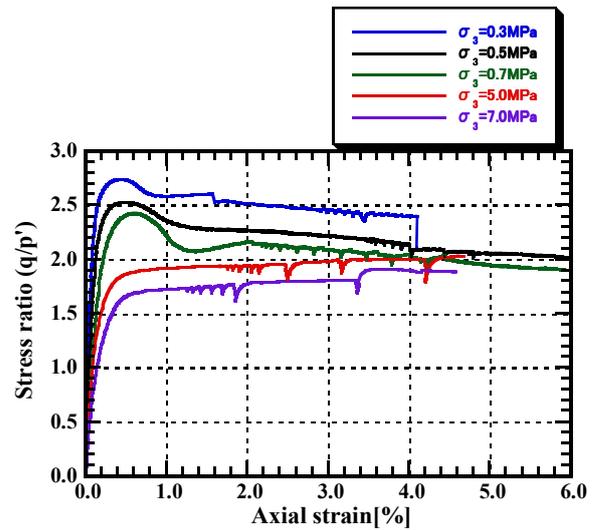
Sample No.		1-1 [%]	1-2 [%]	Average [%]
Natural mineral produced by glassy	Celadonite	38.0	40.0	39.0
	Montmorillonite	12.0	13.5	12.75
	Zeolite	34.0	31.5	32.75
	(Clinoptilolite)	(33.5)	(30.5)	(32.0)
Crystal and lithic	Quartz	4.0	7.5	5.75
	Plagioclase	8.0	6.0	7.0
	Lithic	3.0	1.5	2.25
Void	1.0	-	0.5	

20°Cと60°C、拘束圧条件は5.0MPaと7.0MPaの合計4パターンで実験を実施した。

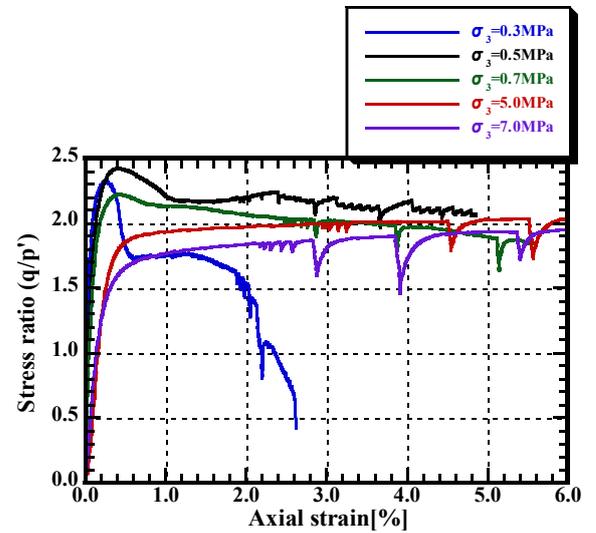
### 3. 実験結果

Fig.1は応力比( $q/p$ )-軸ひずみ関係の結果である。 $p$ は平均有効応力、 $q$ は軸差応力である。図中にはKishida, et al<sup>9)</sup>が行った拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPa条件での実験結果も併せて示した。拘束圧5.0, 7.0 MPa条件では、せん断初期の剛性が高く、変形の進行に伴って徐々に剛性が低下するが、明確なひずみ軟化挙動が確認されない。一方、拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPa条件では、せん断初期に線形的に応力比が増加して、ピーク強度を迎えた後、明確なひずみ軟化挙動を呈している。また、S-H-S過程において強度回復（保持開始時の軸差応力を超過）に着目すると、拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPa条件では、特に長時間の保持を行った際に、保持前に比べて再せん断時の強度が明瞭に増加することを確認できるのに対し、拘束圧5.0, 7.0 MPa条件では、保持時の応力緩和は確認できるものの、明瞭な強度回復は見られなかった。

Fig.2に、体積ひずみ-軸ひずみ関係を示す。体積ひずみは、圧縮を正として表示している。図には、Fig.1と同様Kishida, et al<sup>9)</sup>が行った拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPaでの結果も併せて示している。図より、温度条件が20°C、60°Cいずれにおいても、拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPaでは圧縮の後、膨張する傾向を示すのに対し、拘束圧が5.0, 7.0 MPaでは、いずれの温度条件でもせん断開始から一貫して圧縮傾向にある。保持期間中は、拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPaで20°Cの場合では、体積が膨張するケースが見られる。保持期間中は、軸差応力が減少しているため体積膨張が生じることになる。これに対し、拘束圧が0.3, 0.5, 0.7 MPaで60°Cの場合および拘束圧が5.0, 7.0 MPaで20°Cまたは60°Cの場合では、せん断保持中に体積は圧縮される。いずれのケースも保持中に軸差応力は減少しているが、体積ひずみは圧縮となる。



(a) Thermal condition 20°C



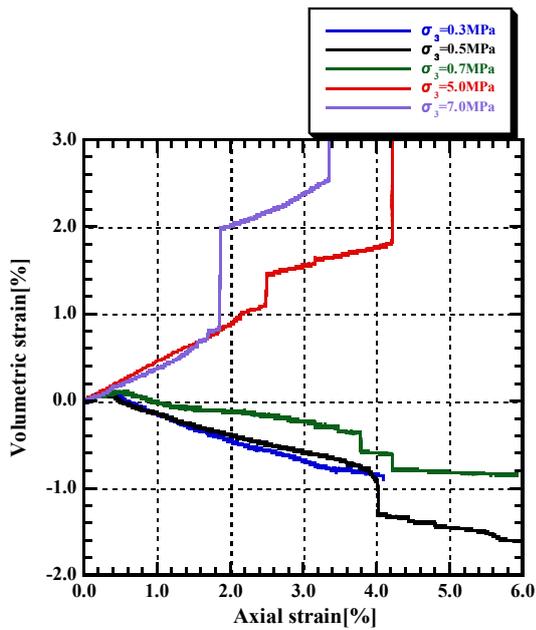
(b) Thermal condition 60°C

Fig.1 The deviator stress – axial strain relation through S-H-S triaxial test

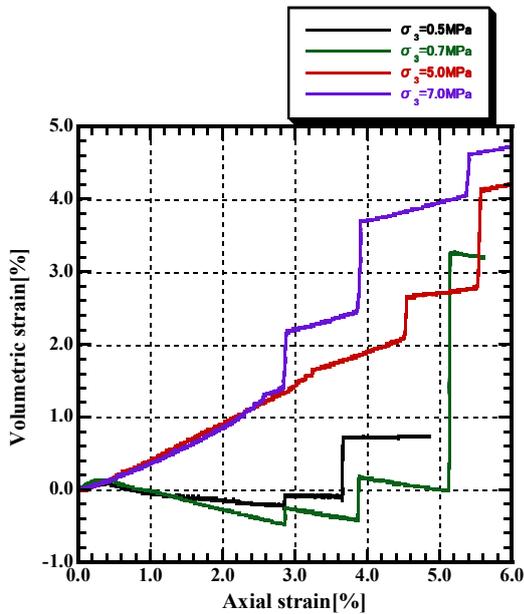
### 4. 考察

#### (1) 強度回復量および応力減少量の定義

拘束圧が0.3, 0.5, 0.7 MPaの実験では、S-H-S過程で再せん断時に軸差応力が保持開始時の軸差応力を超過する様子を確認できたため、Fig.3(a)に示すように定義した強度回復量について考察を行った。一方、拘束圧が5.0, 7.0 MPaでは、Fig.1に示したように保持時に応力緩和を生じた後、再せん断時は軸差応力が保持前の値に漸近し、明瞭な強度回復は現れなかった。そこで本研究では、拘束圧が5.0, 7.0 MPaでの強度回復量をFig.3(b)の示すように、保持後のせん断応力と、再せん断過程において直線挙動から離脱する点（剛性が一定で、線形な応力ひずみ関係を呈する状態から剛性が低下し始める点）との応力差を強度回復量とみなした。一方、応力減少量は、いずれの拘束圧条件においても、保持開始時の応力と再せん断開



(a) Thermal condition 20°C



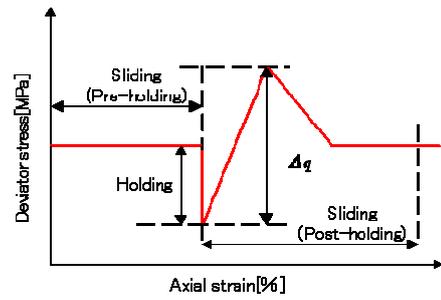
(b) Thermal condition 60°C

Fig.2 The volumetric strain – axial strain relation through S-H-S triaxial test

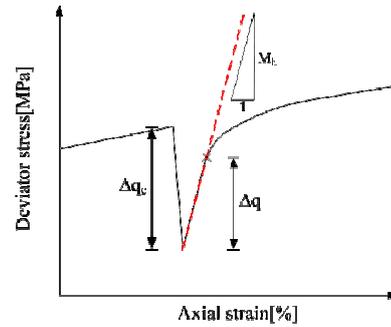
始時の応力の差分，すなわち応力緩和によるせん断応力の減少量と定義した。

## (2) 強度回復量

Fig.4に保持時間と強度回復量( $\Delta q$ )の関係を示す。これより，時間の対数と強度回復量の関係は線形的になり，保持時間と強度回復量の関係は，Dieterich<sup>1)~3)</sup>の式 (式(1))を満足する。Fig.5に，温度条件が20°Cおよび60°Cにおける各実験結果での式(1)のA値と拘束圧の関係を示す。拘束圧が0.3, 0.5, 0.7 MPaでは，温度条件に係らず拘束圧が大きくなればA値は大きくなる傾向になる。この拘束

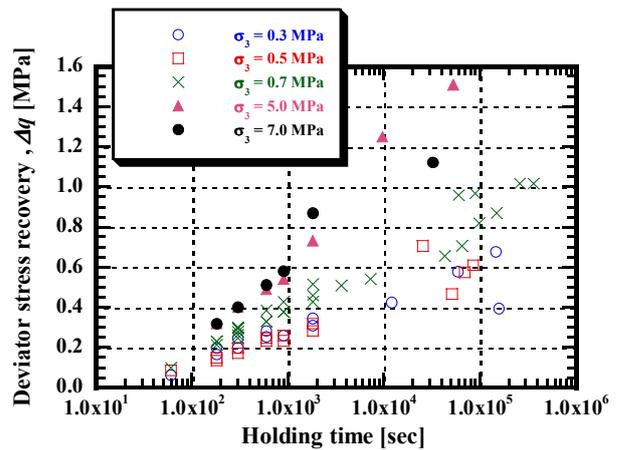


(a) 0.3, 0.5, and 0.7 MPa confining condition<sup>5)</sup>

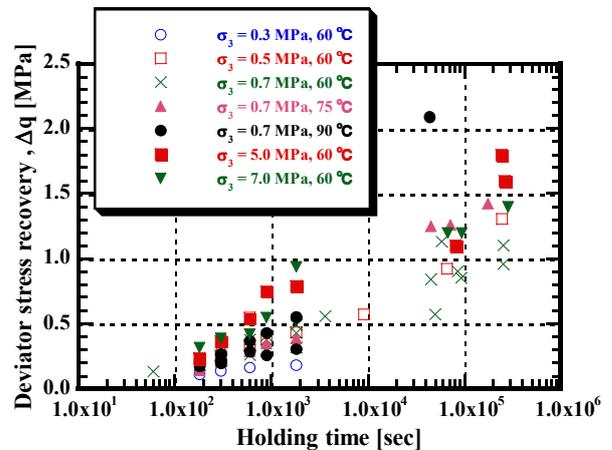


(b) 5.0 and 7.0 MPa confining condition

Fig.3 Definition of shear strength recovery



(a) Thermal condition 20°C



(b) Heating conditions

Fig.4 The deviator strength recoveries are plotted along the holding time through the various confining conditions of the S-H-S triaxial shear experiments

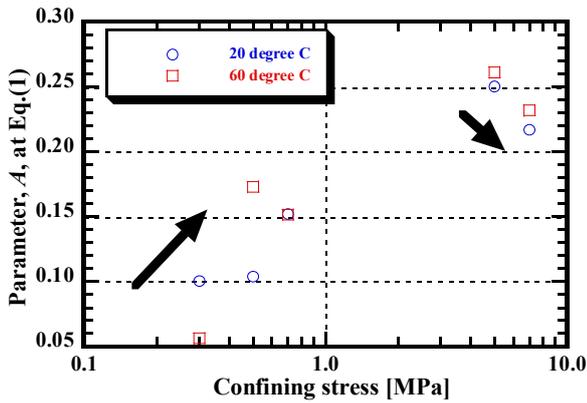


Fig.5 The parameters,  $A$ , as the deviator stress recovery are plotted along the confining stress

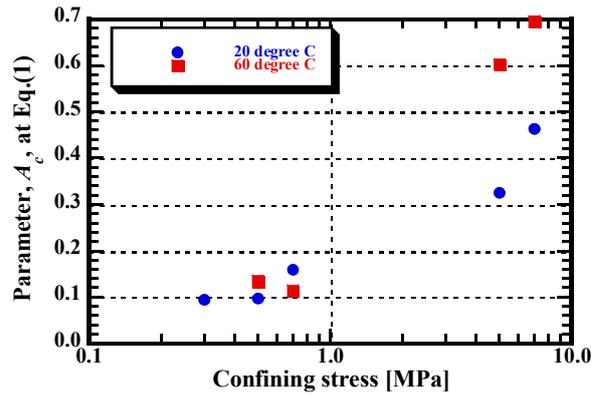
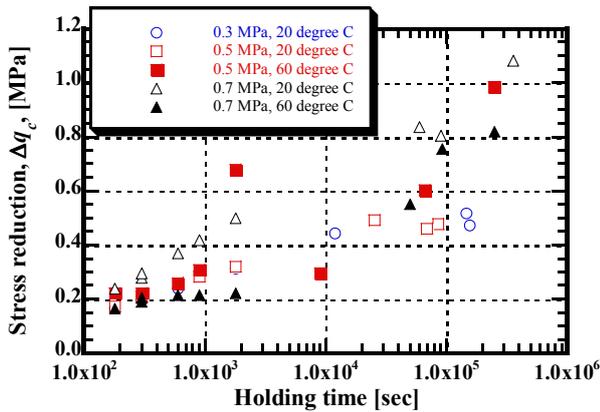
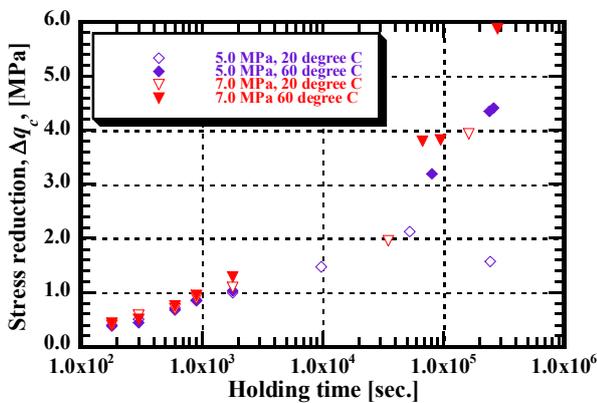


Fig.7 The parameters,  $A_c$  as the deviator stress reduction are plotted along the confining stress



(a) 0.3, 0.5, and 0.7 MPa confining stress conditions



(b) 5.0 and 7.0 MPa confining stress conditions

Fig.6 The relationship between deviator strength deduction and holding time through the triaxial S-H-S shear experiments

圧の範囲であれば、圧力の増加により強度回復が促進されていることが確認できる。一方、拘束圧が5.0, 7.0 MPaでは、拘束圧の増加に伴い $A$ 値は低下する傾向である。また、拘束圧が0.3 MPaを除いて60°C条件での $A$ 値が20°C条件の $A$ 値より大きく、加温により強度回復が促進されていることになる。

### (3) 応力減少量

Fig.6に保持時間と応力減少量の関係を示す。応力減少



(a) 5.0 MPa



(b) 0.3 MPa

Photo 1 Specimen after the experiment (Thermal condition is 20°C)

量についていずれの拘束圧でも、資料の持つ粘性の関係で時間対数線上で直線的になることが確認できる。また、拘束圧が5.0, 7.0 MPaでの短時間の保持では、軸差応力減少量は拘束圧および温度に依存せずほぼ同じである。

時間対数線上での直線の傾きを評価するため、Fig.6での実験結果をDieterich<sup>1)~3)</sup>の式(1)に適用し、Fig.7に温度条件が20°Cおよび60°Cにおける各実験結果での応力減少量に対する式(1)の $A_c$ 値を示す。ここでは、強度回復量と区別するため式(1)のパラメータを $A_c$ として示す。拘束圧の増加に伴い、 $A_c$ 値は増加する傾向にある。また、拘束圧が5.0, 7.0 MPaでは、明らかに加温条件での $A_c$ 値が大きいことが確認できる。よって、高温条件下のほうが経過時間に対して顕著に応力緩和を生じると考えられる。

### (4) 供試体の破壊形状

拘束圧 5.0 MPa と拘束圧 0.3 MPa での実験後の供試体の写真を Photo 1 に示す。いずれも温度条件は、20°Cである。Photo 1(a)では、樽型の破壊形状を示しており、Photo 1(b)では、明瞭なせん断面が入る破壊形状を示す。本研究の実験で行った4ケース(拘束圧が5.0, 7.0 MPa)ともこのような樽型の破壊形状をしており、すべてにお

いて明瞭な強度回復およびヒーリング現象は確認できなかった。一方、拘束圧条件が 0.3, 0.5, 0.7 MPa におけるいくつかの供試体では、Photo 1(b)のような破壊形状でヒーリング現象を確認することができた。

ヒーリング現象は、粒子が破碎し、圧力融解現象が生じることで発生すると考えられているが、Okaら<sup>6)</sup>は、圧縮帯においては、粒子がつぶれるのと同様、構造が変形していきただけであると説明しており、Nakatani<sup>7)</sup>は、保持中も変形は継続すると述べている。樽型の破壊では、形状破壊がせん断面に必ずしも集中していないので粒子の破碎が起こりにくく、かつ保持中も変形が継続するため、圧力融解現象が発生しづらく、ヒーリング現象が生じにくいと考察する。

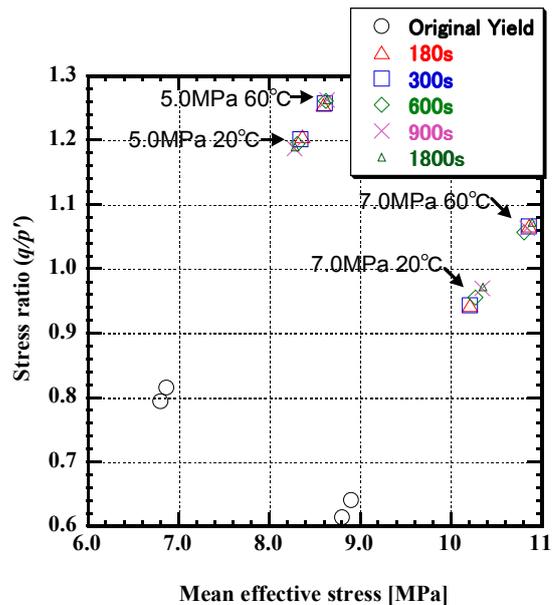
### (5) 応力比-平均有効応力関係

Fig.8に応力比-平均有効応力関係を示す。拘束圧が5.0, 7.0 MPaでは、再載荷時に剛性が一定で、線形な応力ひずみ関係を呈する状態から剛性が低下し始める点を、拘束圧が0.3, 0.5, 0.7 MPaでは初期せん断および再せん断時のピークの軸差応力とする。それぞれの実験の各保持時間 (180, 300, 600, 900, 1800 sec.) での応力比-平均有効応力関係をプロットし、供試体の破壊と、S-H-S過程による構造の回復の様子を表現できるかどうか検証した。

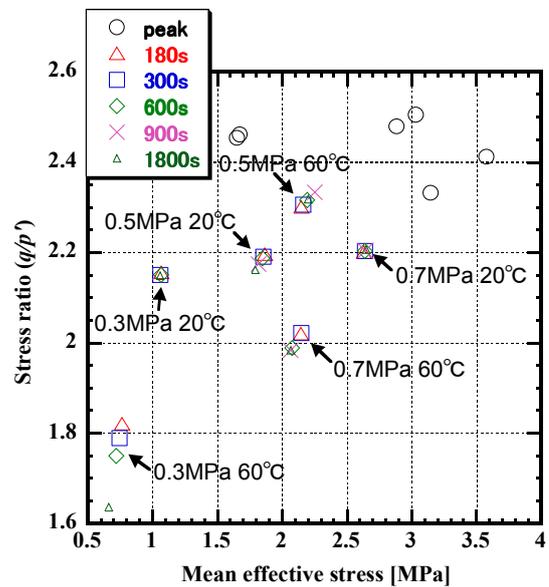
拘束圧が 5.0, 7.0 MPa では、せん断初期の硬化時の応力比は小さい値である。これに対して、S-H-S 過程での応力比の推移は、保持時間が長くなっても、あまり変化のないものが多い。残留状態で応力が徐々に増大していくのを考慮に入れると、弾性変形と弾塑性変形の境界点は、保持時間が長くなると早期に出現する傾向があり、弾性の構造が破壊されていると考察する。一方、拘束圧が 0.3, 0.5, 0.7 MPa では、せん断初期のピークでの応力比は、各 S-H-S 過程での応力比よりも大きい値となる。各 S-H-S 過程では、0.5MPa, 60°Cでの実験結果のように、保持時間が長くなるにつれせん断初期のピーク強度へと推移していくものがあるものの、他の実験結果ではそのような傾向は見られない。その原因としては、S-H-S 過程を実施している残留状態で、軸差応力が一定ではなく不安定であり、残留状態での軸差応力の傾向を考慮した強度回復量を正確に評価できていないことが考えられる。

## 5. 結論

本研究では、凝灰岩 (大谷石) に対して、比較的高い拘束圧条件下で、常温と加温条件で排水三軸せん断試験を行い、残留状態において S-H-S を実施した。拘束圧が 5.0 および 7.0 MPa の実験では、いずれの温度条件でも強度回復およびヒーリング現象が確認できなかった。



(a) 5.0 and 7.0 MPa confining conditions



(b) 0.3, 0.5, and 0.7 MPa confining conditions  
Fig.8 Relationship between  $q/p_m$  and  $p_m$

これらの実験では、せん断後の供試体は樽型の破壊が生じていた。

一方、拘束圧が 0.3, 0.5, 0.7 MPa の実験では、試験後の供試体にせん断面を生じる破壊形状が確認される場合、強度回復やヒーリング現象が明確に確認された。ヒーリング現象の発生を要因として、せん断帯での保持によるクリープ変形および圧力融解現象が考えられる。さらに、拘束圧の増加および加温条件により、強度回復が促進されることが確認された。

保持過程での応力減少量については、いずれの拘束圧条件でも、拘束圧の増加に伴い Dieterich<sup>1)-3)</sup>の式の  $A$  値が増加する傾向となった。

再せん断後のピーク軸差応力を平均有効応力で除した

値と平均有効応力の関係を求めた。拘束圧が5.0および7.0 MPa条件では、供試体の構造の破壊が推察されるが、拘束圧0.3, 0.5, 0.7 MPa条件では、十分な評価には至らなかった。その原因として、S-H-S過程を適用した残留状態での軸差応力が一様ではなく、強度回復量の算定にはらつきが生じたと考えられる。

#### 参考文献

- 1) Dieterich, J.H.: Time-dependent friction in rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 77, pp.3690-3697,1972.
- 2) Dieterich, J.H.: Direct observation of frictional contacts; New insights for state-dependent properties, *Pure Applied Geophysics*, Vol. 243, pp.283-302,1994.
- 3) Dieterich, J.H.: Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, No. B5, pp. 2161-2167,1979.
- 4) Kishida, K., Kawaguchi, Y., Nakashima, S. and Yasuhara, H.: Estimation of shear strength recovery and permeability of single rock fractures in shear-hold-shear type direct shear tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Vol.48(5), doi/10.1016/j.ijrmms.2011.04.002,2011.
- 5) Kishida, K., Araki, T., Yano, T., Yasuhara, H. Elsworth, D.: Slide-hold-slide Experiments On Sedimentary Rock Under Drained Triaxial Stress Conditions, *45th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, 11-418, 2011.
- 6) Oka, F., Kimoto, S., Higo, Y., Ohta, H., Sanagawa, T. and Kodaka, T. : An elasto-viscoplastic model for diatomaceous mudstone and numerical simulation of compaction bands, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 35:244-263,2011.
- 7) Nakatani, M.: Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B7, pp. 13,347-13,380, JULY 10,2001.

## TRIAXIAL SLIDE-HOLD-SLIDE TEST ON TUFF AND THE EFFECT OF CONFINING PRESSURE

Masato OHNO, Takao YANO, Hideaki YASUHARA, Mamoru KIKUMOTO and Kiyoshi KISHIDA

In this research, drained triaxial tests on using comparatively soft tuff have been carried out. In each test, slide-hold-slide processes were repeatedly given after the stress strain relationship reached to the residual strength to observe the healing phenomenon on the shear plane at the shearing process. The tests were carried out changing confining pressure and thermal condition. Although the healing phenomenon was observed in the experiment conducted under relatively low stress level, clear healing phenomena was not seen in the tests conductor under higher confining stresses. Such difference is due to the difference of deformation mode of the specimen, shearing plane (under low confining stress) and barrel-shaped (under high confining stress).