凝灰岩を用いたSHS型三軸せん断試験における せん断面の有無が強度回復現象に与える影響

岸田 潔1*・酒井 慎二1・矢野 隆夫1・安原 英明2・大野 正登3・菊本 統4

¹京都大学大学院 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) ²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) ³四国電力株式会社 (〒760-8573 香川県高松市丸の内2番5号) ⁴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: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

本研究では、き裂面を有する比較的軟らかい凝灰岩に対して種々の条件下で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-せん断過程を実施した.実験は、人工的に60度の切断面を挿入した供試体 を用いて行った.拘束圧0.3 および5.0 MPa の実験では強度回復現象が確認できなかったが、0.7 MPa の実 験においては強度回復現象が確認できた.三軸せん断SHS 過程での強度回復現象の発現は、明瞭なせん断 帯の発生と関連するとしてきた^{1)~3)}.切断面を挿入すると、低拘束下での強度回復現象の発現は確認され たが、応力状態と切断面の角度によっては、発生しないことも考えられる.一方、高拘束圧下では、切断 面に沿う破壊とならず少し樽型に変形した.これは、切断面の存在しない実験結果と同様の傾向であった.

Key Words : drain triaxial test, slide-hold-slide process, healing, tuff, shear band

1. はじめに

放射性廃棄物の処分施設や高温岩帯地熱発電の施設な ど、地下空間を安全に維持するためには地質・岩盤の構 造や力学的性状を把握しなければならない. そのために は岩盤不連続面における、長期的な強度特性・変形特性 の把握が必要である.地下空間を建設する際,掘削に伴 い空洞周辺の岩盤にゆるみ域やせん断帯が発生すること が想定される. これらのゆるみ域やせん断帯の力学特性 や水理学特性を把握することは、建設時の安定性のみな らず,空洞の長期安定性や封じ込め性能を評価するうえ で必要不可欠である. Kishida, et al.¹⁾, 荒木ら²⁾, 大野ら³⁾ は、 堆積岩である凝灰岩を用いて、 種々の拘束圧・ 温度 条件下で三軸せん断試験を行い、残留状態においてせん 断一保持一せん断(Slide-Hold-Slide) 試験を実施している. これらの実験により、低拘束圧条件下では、供試体中に 明瞭なせん断帯が現れ(Photo 1(a)),併せて残留状態で SHS 過程を実施すると強度回復現象が確認された.一方, 比較的高拘束圧では試験後の供試体は樽状に変形し、明 確な強度回復現象が確認できなかった.結果として、変 形形態と載荷応力の関係が.強度回復現象の発生の有無 に強く寄与しているものと考えられる. すなわち, 明瞭 なせん断帯(せん断面)が生じる場合,残留状態ではそ

のせん断帯に沿って挙動する. せん断帯に沿って挙動す るので,残留状態で SHS 過程を実施すると,断層ガウ ジや岩石不連続面で実施している SHS 試験^{4,5}と同様の 実験となり,強度回復現象が観察できると考える.

強度回復現象とは, Fig.1 に示すようにせん断過程の 残留状態において,所定の時間せん断を停止させるこで, 保持する直前の応力より保持後に再せん断を行った後の 応力の方が,一時的に大きくなる現象のことである.

本研究では、凝灰岩にPhoto 1(b)に示す人工的なき裂 (切断面)を挿入し、せん断と保持を繰り返し行うSHS 型の三軸せん断試験を行い、切断面の有無がSHS 過程で の強度回復にどのような影響を及ぼすか検討を行った.



Photo 1 Specimen of employed tuff ((a) after triaxial tests under 0.7 MPa of condining stress, (b) with artificial installed single fracture)



Fig.1 Example of of shear strength recovery from undrain Slide-hold-slide experiments at 0.7 MPa of confining stress condition.

2. SHS 型三軸せん断試験

供試体は、Photo 1(b)に示す通り,直径 5.0 cm,高さ 10.0 cm の人工的なき裂面(切断面)を与えた供試体を 用いた.切断面の角度は、文献^{1)~3}の実験結果から,低 拘束圧での三軸せん断試験で現れたせん断帯の角度が 60 度であり、それを用いた.三軸せん断試験は、排水 条件でせん断速度 0.01 %/min で行った.残留状態に至る までせん断載荷した後、載荷を一時停止し、所定の時間 保持し、その後に再び載荷する Slide-Hold-Slide (SHS)型 の三軸せん断試験を行った.保持時間は、180秒、300 秒、600秒、15分、30分の短期保持と、12時間、24時 間、72時間の長期保持を実施した.三軸セル内の温度 は 20度、拘束圧条件は 0.3, 0.7, 5.0 MPa の 3 種類で行い、 拘束圧条件 0.7 MPa の実験のみ 2 ケース行った.

3. 実験結果

(1) 軸差応力- 軸ひずみ関係

Fig.2 に、切断面を有する供試体を用いた実験の軸ひ ずみと軸差応力の関係を示す.拘束圧が0.3,0.7 MPaの実 験では、軸差応力は、せん断に伴いひずみ硬化し、残留 状態に至るという挙動を示している.一方、拘束圧が 5.0 MPa の実験では、軸差応力はせん断に伴いひずみは 硬化し、ピーク強度を迎えなだらかに軟化する.拘束圧 条件が0.7 MPa と5.0 MPaの実験におけるSHS 過程を拡大 した図をそれぞれFig.3(a)、Fig.3(b) に示す.Fig.3(a) より、 拘束圧条件が0.7 MPa の実験においては、強度回復現象 が確認できることが分かる.拘束圧条件が0.7 MPa の別 のケースにおいても同様に、強度回復現象が確認できた. Fig.3(b) より、拘束圧条件が5.0 MPa の実験においては、



Fig.2 The deviator stress - axial strain relations through SHS-type triaxial tests employed specimens with artificial cutting plane



Fig.3 The enlarged view of the deviator stress-axial strainrelationsat slidehold-slide process

明瞭な強度回復現象が確認できなかった. 拘束圧条件が 0.3 MPa の実験においても同様に, 強度回復現象は確認 できなかった.

(2) Intactな供試体を用いた実験結果との比較

拘束圧条件0.7, 5.0 MPaの本研究で用いたのと同種の切 断面を含まない(Intact) 堆積岩でSHS型三軸試験結果^{1)~} ³⁾を**Fig.4**示す. ここでは,比較のため0.7, 5.0 MPa の切断



Fig.4 The comparison of the deviator stress - axial strain relations through SHS-type triaxial tests of intact rock and with cutting plane.

面を有する供試体の実験結果も併せて示す.拘束圧条件 が0.7 MPa の実験では、Intact な供試体では、ひずみ硬化 後ピークに至り軟化する挙動を示しているが、切断面を 有する供試体では、明瞭なピークは発現せず残留状態に 至っている.これは、足立・林^のの実験結果と同様の傾 向ある.また、Intact と比べき裂を有する供試体で強度 が低下するのも同様である.いずれも、残留状態での SHS過程で強度回復は観察された.

一方,拘束圧条件が5.0 MPa の実験においては,切断 面の有無に関わらず強度回復現象は確認されなかった. ただし,Intact な供試体での72 時間保持後の再せん断で のみ強度回復現象が確認されている³. 軸差応力-軸ひず み関係は,切断面が存在する場合のみピーク後の軟化傾 向が確認される.切断面を有する供試体で,拘束圧が増 加するとなだらかなピークが表れ,また,低拘束圧に比 べ,切断面の有無が軸差応力-軸ひずみ関係に差異を示 さなくなる.これは,足立・林⁵の結果と同様である.

4. 考察

(1) 強度回復量

Fig.5 に本研究で用いる強度回復量Δq の定義を示す. ここでのΔqは,保持前の点と再せん断後の残留状態の 点を結んだ直線に再せん断後のピーク強度から鉛直に降 ろした線との交点と再せん断後のピーク強度との差分応 で定義した.拘束圧条件0.3,0.7 MPa での保持時間と強度 回復量の関係をFig.6 に示す.Fig.6 には,切断面の無い 供試体での結果も併せて示す.拘束圧が0.7 MPa では, 切断面の有無にかかわらず,保持時間の増加に伴い強度 回復量が増加する傾向が確認できる.一方,拘束圧が 0.3 MPa では,短期保持期間では,保持時間の増加に伴







いΔqは一定かわずかに増加している.保持時間が24時間,72時間では、大きく減少しており、ここでは示していないが保持時の体積ひずみの変化が生じており、クリープなど他の現象か卓越していると考えられる.

保持時間に対して Δq が増加する現象に関して, Dieterichⁿ⁻⁹は、岩石試料に対して実施した二面せん断試 験結果に基づき、摩擦強度の保持時間に沿った増加を対 数線形モデルで表現している.

$$\tau_s = \tau_0 + A \ln t_h \tag{1}$$

ここで、 τ_s は再せん断時のせん断強度、 τ_0 はせん断停止時間、A は定数である. 本研究では、 Δq をせん断強度の差分として実験結果に式(2)を適用し、定数 A を求めた.ただし、0.3 MPa に関しては、保持時間 24 時間、72 時間の結果を除いて実施した.

$$\Delta q = A \ln t_h \tag{2}$$

Fig.7 に、式(2)により求めた A 値と拘束圧の関係を示す. 拘束圧条件の増加に伴い, A 値が増加することが確認で きる.わずかに切断面を有する供試体の A 値が Intact と 比べて大きいが、ほぼ同等である.



Fig.7 The relationship among confining stress, σ_3 , Parameter A and A_c

(2) 応力緩和

Fig.5 に本研究で用いる応力緩和量 Δq_c の定義を示す. **Fig.5** に示すように Δq_c は、保持前の点と保持終了時の点 との軸差応力の差とした.**Fig.8**に、切断面を有する供 試体の SHS 型三軸せん断試験で得られた Δq_c と保持時間 の関係を示す.**Fig.8**より、いずれの拘束圧においても 保持時間に比例して Δq_c が増加するが確認できる.拘束 圧が 0.3, 0.7 MPa ではほぼ同じような値となっているが、 拘束圧が 5.0 MPaは、明らかに他の拘束圧より大きな Δq_c を示している.各拘束圧ごとに式(3)に示す対数線形の 関係で近似した.

$$\Delta q_c = A_c \ln t_h \tag{3}$$

Fig.7に,式(3)により求めた*A*_c値を示す.*A*_c値は,拘束 圧の増加に伴い増加する傾向が確認できた.

(3) 切断面での応力評価

本研究では、供試体に切断面が存在する.そこで、 Fig9 に示すように奥行きの広がりは考慮せず、切断面 の中心点における、せん断(t)および垂直応力(o)をtをo で除した応力比(t/o)を用いて強度回復を評価した.な お、ここで用いるせん断変位は、軸ひずみから切断面に 沿った方向の変位に換算したものである.

せん断変位となの関係をFg.10 に示す. せん断変位 となの関係では、いずれの拘束圧においても明瞭なピ ークが表れず、せん断変位の進行に伴い残留状態に至っ ている. 残留状態におけるなの値は、強度回復現象が 発生した拘束圧条件0.7 MPaの2ケースが他の実験より大 きい値を示している. 拘束圧条件5.0 MPaの実験におい て、Fig.2 の軸差応力-軸ひずみの関係では残留状態での 軸差応力は減少傾向を示していたが、Fg.10 では、残留 状態でのならは、いずれの拘束圧条件でもほぼ一定の値 を示す. これより、残留状態での応力変動の評価はなっ を用いる方が、残留状態における不安定な力学挙動の要 因を除くことが可能となる.



Fig.8 The Δq_c - holding time relations with cutting plan



Fig.9 The definition of the shear stress, τ , and the normal stress, σ , on the cutting plan



Fig.10 The stress ratio, τ/σ , and shear displacement relations through SHS-type triaxial tests with cutting plane

(4) 保持時間と切断面での応力比回復量

応力比回復量($\Delta \tau / \sigma$)は、**Fig.5** で示す考え方で定義した. 保持時間と $\Delta \tau / \sigma$ との関係を**Fig.11** に示す.これより、い ずれの拘束圧においても、保持時間の増加に伴い $\Delta \tau / \sigma$ が 増加する傾向が確認できる.**Fig.6** の結果と同様、長期 保持において値が減少する傾向が一部で見られる.また、 $\Delta \tau / \sigma$ は、拘束圧が0.3 MPaより0.7 MPaで大きくなってい る.拘束圧の増加に伴い、せん断面での応力比(摩擦係



数)が増加することになる.一方,拘束圧が5.0 MPaでは、0.7 MPaに比ベΔτ/σは減少する.足立・林⁹は、人工 的な切断面を有する供試体での三軸せん断試験において、 必ずしも切断面に沿った変形とはならず、拘束圧等の条 件によっては樽型の変形となることを示している.本研 究においても、拘束圧が5.0 MPaの実験後の供試体を確 認すると、形状が樽型変形を示していた.このため、拘 束圧が5.0 MPaの実験では、せん断面に応力が集中せず、 せん断面に沿った変形が卓越しなかったと考えられる.

(5) 構造回復を模擬したシミュレーション

Kikumoto, et al¹⁰ は, SHS 型三軸せん断試験での強度回 復現象を再現するため,限界状態モデルをベースとし, 保持時に限界状態線がシフトすること降伏関数に状態変 数を導入したモデルを提案している.導入された状態変 数は,構造の回復および変性の時間依存性を考慮したも のである.すなわち,状態変数は,保持時間の経過に伴 い増加し,塑性変形の進行に伴い減少するものと仮定す る.本研究では,簡易的に式(2)を援用し,構造の回復 表現する状態変数を導入し,拘束圧 0.7 MPa での三軸せ ん断試験のシミュレーションを行った.シミュレーショ ンに用いた圧縮指数λと膨潤指数κは,切断面を有しな い供試体で実施した等方圧密試験結果を用いた.

シミュレーションに用いたパラメータは、 $\lambda = 2.38 \times 10^2$, $\kappa = 5.85 \times 10^3$, $M = (q/p)_{ss} = 2.3$ を用いた.本研究では、状態変数 Ψ のうち、構造回復を表現する項Qを、

 $Q = b \ln t_h \tag{4}$

とし、ここでは**Fig7**の結果を参考に $b = 2.0 \times 10^2$ を用いた.また、保持中に応力が減少する現象を簡易的に応力比Mをひずみ速度の関数として

$$M = 1.8 + 3.0 \times 10^{-3} \cdot \dot{\varepsilon} \tag{4}$$

を用いた.ここで $\dot{\epsilon}$ はせん断速度で、実験の値を用いた. 保持以外のせん断中は、M = 2.3となる.応力比Mは、切断面を有する供試体の実験結果より、設定を行った.

シミュレーション結果を **Fg.12** に示す. シミュレーションでは,下負荷面に関するフィッテングパラメータ *a*



Fig.12 The deviator stress - axial strain relations through the simulations

を 1000,500,100 の 3種類について行った. 拘束圧は 0.7 MPa である. 残留状態で SHS 過程のシミュレーション を行った. 応力の減少と再せん断に伴う応力増加は表現 できている. 一方で, aを減少させることで再せん断に 伴う軸差応力が増大することが確認できる. 初期のせん 断過程では, a を減少させることでピーク時の軸差応力 は減少し, ピーク後の挙動はなだらかになる. 初期のせ ん断の SHS 過程での再せん断で a 値の変動によるせん 断挙動への影響が異なる結果となった.

5. おわりに

本研究では、切断面を有する比較的軟らかい凝灰岩に 対して種々の条件のもとに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-せん断過程を実施した. 結果、いくつかのケースでせん断強度の回復現象が確認 できた.既往の研究¹⁾⁻³から、明瞭なせん断面の発生が 強度回復現象の発現と関連すると考えられてきた.切断 面により強度回復が発生することが確認された一方で、 切断面が一定の角度で挿入されており、角度と作用応力 の条件では、強度回復が明確に現れないケースが存在す る.

また, Kikumoto, et al ¹⁰ が提案したモデルを用いて,切 断面を有する供試体を用いた実験のシミュレーションを 試みた. SHS 過程で応力の減少や再せん断に伴う強度回 復は表現できたが,パラメータの設定により挙動が変化 する. これに関しては,他のパラメータと併せて検討を 行う必要がある.

参考文献

1) Kishida, K., Araki, T., Yano, T., Yasuhara, H. and Elsworth, D.: Slide-

hold-slide experiments on sedimentary rock under drained triaxial stress conditions, *ARMA 11-418*, ARMA, 2011.

- 2) 荒木壯則,矢野隆夫,安原英明,岸田潔:凝灰岩における加温条件下での三軸応力保持中の力学的特性に関する研究,第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,(公) 土木学会,pp.220-225,2012.
- 大野正登,矢野隆夫,安原英明,菊本統,岸田潔: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,第
 42回岩盤力学に関するシンポジウム論文集,(公)土木学会, pp.337-342,2014.
- Yasuhara, H., Marone, C., Elsworth, D.: Fault zone restrengthening and frictional healing : The role of pressure solution, *JGR*, 110, B06310, June, 2005.
- Kishida, K., Kawaguchi, Y., Nakashima, S., Yasuhara, H.: Estimation of shear strength recovery and permeability of single rock fractures in shearhold-shear type direct shear tests, *IJRMMS*, 48(5), 782-793, July, 2011.

- 6) 足立紀尚,林正之:軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の 影響,土木学会論文集, No.305, pp.97-110, 1981.
- Dieterich, J. H. : Time-dependent friction in rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 77, pp.3690-3697, 1972.
- Dieterich, J. H. :Direct observation of frictional contacts; New insights for state-dependent properties, *Pure Applied Geophysics*, Vol. 243, pp.283-302, 1994.
- 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.
- 10) Kikumoto, M,Nguyen Pham,Q. V,Ohno, M, Kishida, K, Yasuhara, H, Elsworth, D.: Structural Healing and Decay of Sedimentary Soft Rock in Triaxial Slide-Hold-Slide Process and its Modeling, *ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium*, Document ID ISRM-ARMS8-2014-061, 2014.

EVALUATION OF STRENGTH RECOVERY ON ARTIFICAL CUTTING PLANE THROUGH SHS TYPE TRIAXIAL COMPRESSION TESTS USING TUFF

Kishida, KIYOSHI, Shinji SAKAI, Takao YANO, Hideaki YASUHARA, Masato OHNO and Mamoru KIKUMOTO

The consolidated-drained triaxial compression tests with artificial cutting plane of cylindrical tuff specimen were carried out under various confining conditions, and the slide-hold-slide (SHS) processes were applied on the residual stress state. In 0.3 and 5.0 MPa of the confining stress, the shear strength recovery could not be confirmed clearly. On the other hand, the shear strength recovery could be found on the SHS process in 0.7 MPa of the confining stress. The previous reserved works^{1) ~ 3)} discussed the relation between the shear band and the shear strength recovery. In this study, it was confirmed that the shear strength recovery is strongly affected through the shear pleane and its stress conditions.