

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

荒木 壯則^{1*}・矢野 隆夫¹・安原 英明²・岸田 潔¹

¹京都大学 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 (〒790-8540 愛媛県松山市文京町3番)

*E-mail:t.araki@ax2.ecs.kyoto-u.ac.jp

岩盤の力学および水理学的特性を長期的な視点で論じる場合、熱や化学変化にともなう構造の変化、不連続面の変化を議論する必要がある。本研究では、比較的軟らかい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適用した。実験は、拘束圧および温度条件を変化させ、せん断過程で発生したせん断帯におけるヒーリング現象について検討を行うものである。結果として、ヒーリング現象が発生し、保持時間に比例して強度回復が大きくなることを確認した。しかし加温した場合、強度回復の傾向が小さくなった。また保持中の体積ひずみの経路に関しても常温の場合と加温の場合とで異なる傾向を確認した。常温の場合は、保持中の体積ひずみは膨張し、加温の場合は圧縮する。

Key Words : triaxial experiment, sedimentary rock, slide-hold-slide process, healing, heat

1. はじめに

放射性廃棄物や CO₂ 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。堆積岩を対象とした空洞を処分場とする場合、空洞掘削に伴い周辺の岩盤が低拘束圧となり、ゆるみ領域が発生する。ゆるみ領域ではせん断帯が発生し、それらの力学的・水理学的挙動の把握が重要となる。長期間廃棄物を処分すること、地熱や廃棄体から発生する熱を考慮する必要がある、熱・水・応力・化学連成を考慮した力学的・水理学的長期挙動の解明が必須である。加温した場合の堆積岩の力学的特性についての研究は実地されている^{1),2)}。一方で、せん断帯が発生した後の長期挙動や強度回復についてはあまり研究がなされていない。

強度回復に関する研究については中島ら³⁾が花こう岩及びモルタルによる不連続面の一面せん断-透水試験を実施し、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に及ぼす影響を評価したが、堆積岩の、その上加温の影響に対しては評価していない。

そこで、堆積岩の一種である凝灰岩を対象として、せん断過程において所定の応力-温度状態で一定期間保持

し、その後の再せん断を実施する。亀裂を含まない凝灰岩をせん断することで、せん断帯が生成される。岸田ら⁴⁾は、先行研究として、残留状態において保持-再せん断することで、ヒーリング現象が発生することを確認されている。本研究では有効拘束圧が同じ場合、残留状態における力学的挙動が時間、温度条件でどのように変化するかを解明するのが目的である。

2. 三軸せん断-保持-せん断試験

(1) 岩石試料

本研究で用いた岩石試料は、軽石火山礫凝灰岩（流紋岩質軽石火山礫凝灰岩）である。緑灰色で多孔質の vesicular 軟質火砕岩であり、主に径 5 mm 以下の軽石 pumice 片などの火山砕屑物から構成される。軽石片は、変質して緑～白色を呈し扁平なものが多く存在する。

対象とする岩石は、実験に先立ち鑑定を行っている⁴⁾。軽石の気孔(空隙)組織および火山ガラス微粒子の多くが、粘土鉱物のセラドナイトに変化している。一方、濃緑色の「ミソ」では、気孔・気孔壁の全組織または気孔に限りモンモリロナイト化している。一部の気孔には、低温熱水に溶解したガラス成分の結晶化により粘土鉱物と共生して斜プチロル沸石の晶出も認められる。これらの分析

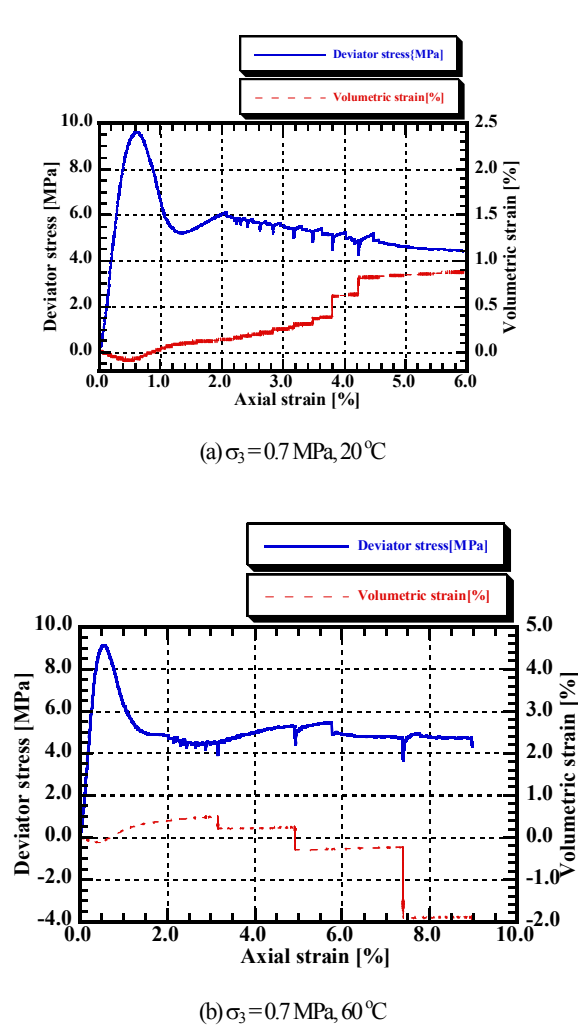


Fig.1 The deviator stress-axial strain and the volumetric strain-axial strain relations

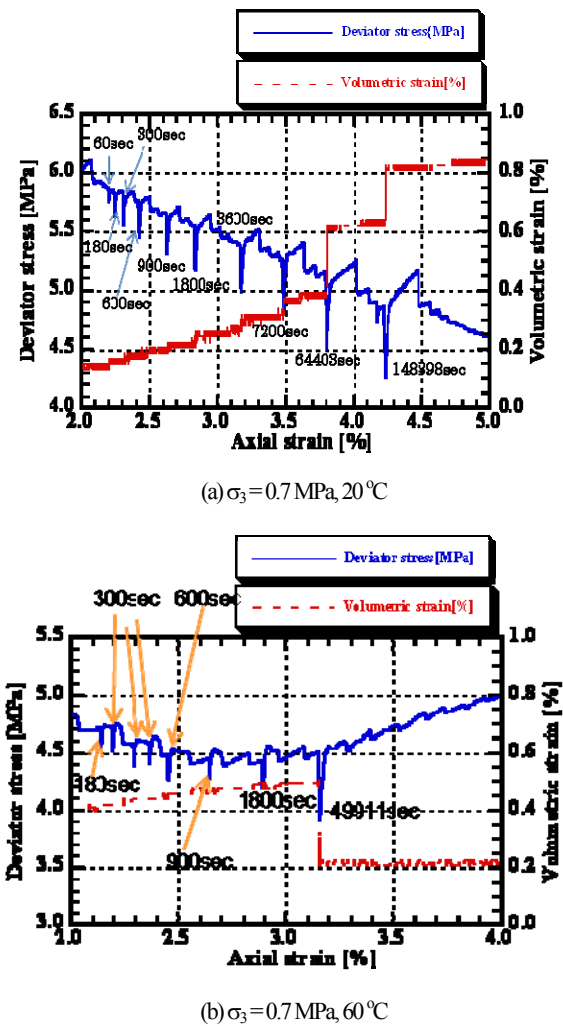


Fig.2 Enlarged plots of the deviator stress-axial strain and the volumetric strain-axial strain relations focused on the slide-hold-slide process

結果より、本研究で用いる岩石は、熱による変質が想定される。

(2) 実験概要

この岩石試料を用いて 5 つの直径約 5cm、高さ約 10cm の円柱供試体を作製し、実験を行った。装置は、圧力室、定速度軸荷重載荷装置、体積変化測定用ビュレット、加温装置、温度計等から構成されている。圧力室はステンレス製で、耐圧は 20MPa である。試験中の拘束圧を一定に保つため、低拘束圧下 (1MPa 以下) ではエア・レギュレータを用いて空気圧で制御した。また、それ以上では窒素ガスを用いて制御した。上下流に設置された貯留槽は、容積が最大 1L であり、中にスペーサーを設置することで容積を変化させることが可能である。

加温装置は三軸セルにバンドヒーターを巻き、周囲を断熱材で覆ったものである。温度制御にあたり、バンドヒーター近傍、側液、供試体内部 (ペデスタル部) の 3 ヶ所で温度を計測しており、供試体内部の温度計の温度が所定の温度になるようバンドヒーターの温度を制御し

た。

本研究における計測項目は、軸荷重、軸変位、排水量、貯留槽の圧力変化の 4 項目である。以下に各項目の計測方法について述べる。

軸荷重是三軸セルの载荷軸に設置されたロードセルによって、軸変位は载荷軸の変位を 25mm 接触型変位計によって外部計測する。排水量は供試体の体積変化を知るために測定するものであり、供試体からの給排水量を二重管ビュレット内管に導いて水位一定の外管との水頭差を差圧計により測定し、ビュレットの断面積で除して排水量に換算する。上下流端の貯留槽の圧力は、貯留槽近くにある水圧計で計測し、上流と下流の圧力差をとることで差圧を求めた。以上の測定項目は、データロガーを通してパソコンに収録される。

実験は、圧密排水状態で、軸ひずみ速度を過剰間隙水圧が発生しないとされている⁵⁾0.01 %/min として三軸せん断を行った。保持は、ピーク後残留状態で行い、保持時間は、60, 180, 300, 600, 900, 1800 秒を基本とし、長期保持としては、約 12 時間や約 24 時間、約 3 日の保持を行

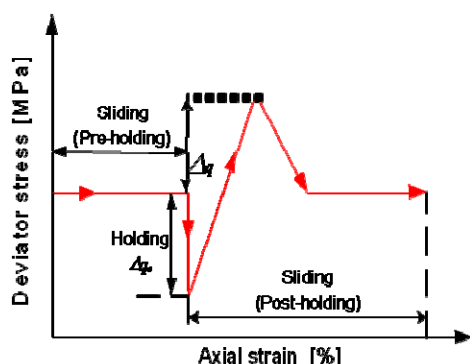


Fig.3 Definition of stress reduction and stress recovery in slide-hold-slide process

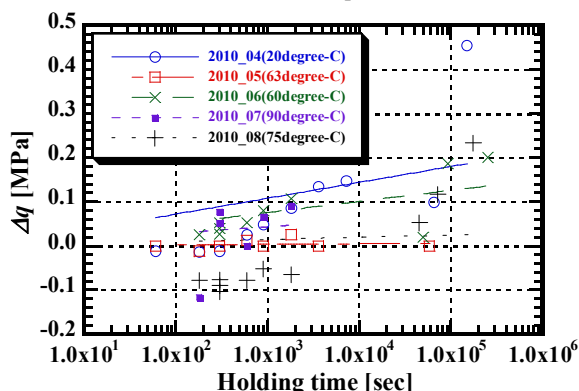


Fig.4 Shear strength recovery are plotted versus holding time(0.7MPa)

った。有効拘束圧は、0.7 MPaとし、温度は20, 60, 75, 90°Cで実験を行った。

(3) 実験結果

有効拘束圧0.7MPa、温度条件20°Cで実施した実験の軸差応力-軸ひずみおよび体積ひずみ-軸ひずみ関係をFig.1(a)に示す。軸差応力-軸ひずみ関係では、せん断に伴いひずみは硬化し、ピークを迎えその後軟化し、残留状態に至る挙動を示している。一方、体積ひずみ-軸ひずみ関係は、ピーク応力に達するまでは、体積が圧縮する挙動を示し、その後膨張する挙動を示している。これらは、一般的な堆積岩の低拘束圧下での挙動である。つぎに、有効拘束圧0.7MPa、温度条件60°Cで実施した実験の軸差応力-軸ひずみおよび体積ひずみ-軸ひずみ関係をFig.1(b)に示す。軸差応力-軸ひずみ関係では、常温時と同様の挙動を示している。また、体積ひずみ-軸ひずみ関係は、残留状態のまでは常温時と同様の挙動を示している。しかしながら、残留状態での長時間保持の過程では、常温時とは異なり、体積ひずみが収縮する挙動を示している。加温時の最終保持における体積ひずみは大きに収縮してしまっているが、再せん断後の軸差応力が回復していることから完全な破壊は生じていないことが分かる。

有効拘束圧0.7MPa、温度条件20°C、60°Cで実施したせん断-保持-せん断過程で拡大した軸差応力-軸ひずみお

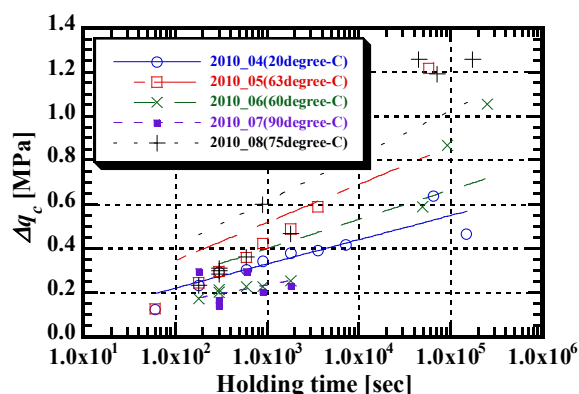


Fig.5 Shear strength reduction are plotted versus holding time(0.7MPa)

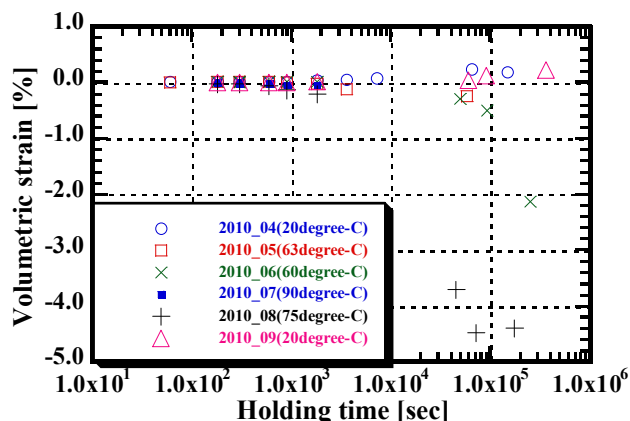


Fig.6 The volumetric strain are plotted versus holding time(0.7MPa)

よび体積ひずみ-軸ひずみ関係をFig.2に示す。いずれの温度条件においても保持に伴い軸差応力が減少し、再せん断に伴い軸差応力が増加し、ピークを迎えて残留状態に至ることが確認できる。再せん断後のピーク強さは、保持開始時の軸差応力より大きくなり、明らかな強度回復が確認できる。

また、体積ひずみは、残留状態では緩やかに増加している。長期間保持することにより、20°C条件では体積ひずみが増加し、膨張を示す。これは、軸差応力の低下、すなわち拘束状態がゆるくなり、膨張したものと考えられる。一方、60°C条件では、長時間保持に伴い常温状態と同様軸差応力は低下し、拘束状態がゆるくなるが、体積ひずみは収縮を示す。

3. 考察

(1) 再せん断過程での強度増加

保持後の再せん断過程でみられる強度増加は、Fig.3に示すように、再せん断後のピーク軸差応力と保持直前の軸差応力の差分(Δq)で定義する。Fig.4に拘束圧0.7MPaで温度が異なる場合の Δq と保持時間関係を示す。いずれのケースでも保持時間の増加に伴い Δq が増加することが確認できる。これらの関係は、Dieterichが示す対数線

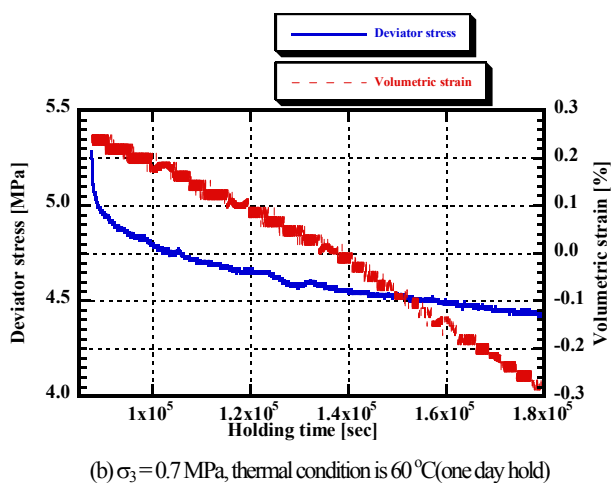
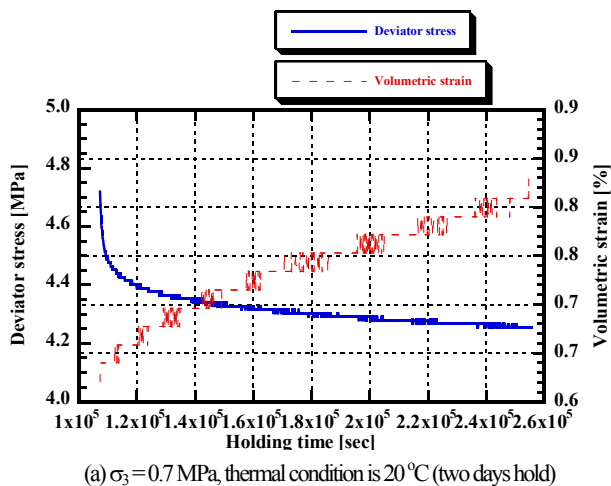


Fig.7 The deviator stress–time and the volumetric strain–time relations

形⁶⁾で表現することが可能である。限られた実験結果ではあるが、加温することで Δq は減少する傾向にある。先にも述べたが、本供試体は、一部の気孔には、低温熱水に溶解したガラス成分の結晶化により粘土鉱物と共生して斜プチロル沸石の晶出も認められる。すなわち、温度を作用させることで、粘土鉱物の晶出を促し、強度増加が顕著に表れなかったことが考えられる。

(2) 保持前後の強度過程

拘束圧0.7MPaで温度が異なる場合の応力減少(Δq)と保持時間の関係をFig.5に示す。 Δq_c は、Fig.3に示すように保持期間の軸差応力の減少量とする。Fig.5より、時間の増加とともに Δq_c が増加することが確認できる。また、加温した場合、常温と比べて加温したものは Δq_c が大きいことが確認できる。そもそも応力が減少するのは、せん断を止めることにより粒子が再配列し、その結果、微小な下降変位が生じているからだと考えられる。つまり、加温した場合、応力減少量が増加するのは、せん断面に加温とともに粘土鉱物が晶出され、接触部分が軟化し、常温時よりが生じる下降変位が増大したためと考えられ

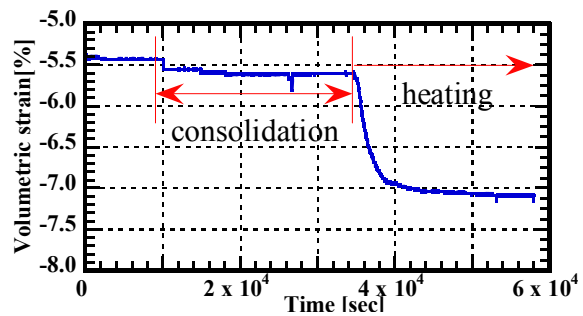


Fig.8 The volumetric strain–time relations in consolidation and heating

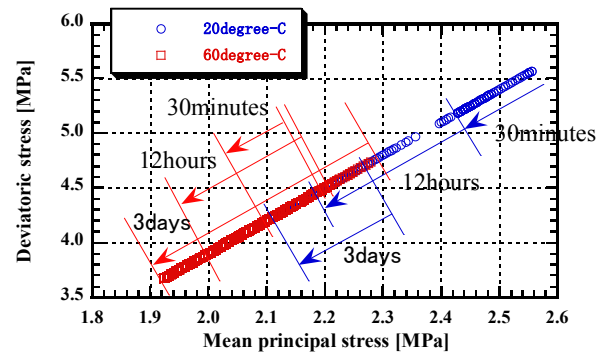


Fig.9 The deviator stress–mean principal stress relations in holdings

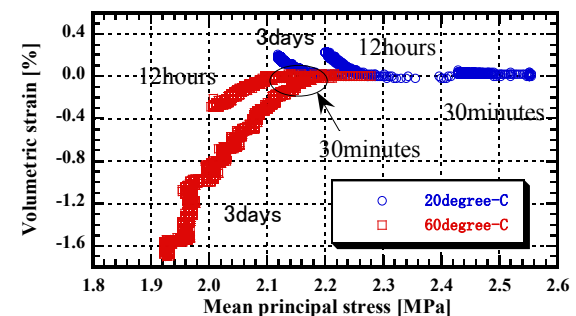


Fig.10 The volumetric strain–mean principal stress relations in holdings

(3) 保持前後の体積ひずみ過程

Fig.6に、拘束圧0.7MPaで種々の温度条件下での体積ひずみと保持時間の関係を示す。これより保持時間が増加すると体積ひずみの変化量が増加することが確認できる。また、温度条件が高くなれば、体積ひずみの収縮の度合いが大きくなっているのが確認できる。

加温時の収縮は、先にも述べた様に、高温による粘土鉱物の晶出が原因でせん断面の接触部分が軟弱化して、微小ではあるが、常温時より下降変位が生じやすくなると考えられる。その結果、常温時に見られる膨張現象が見られなくなると考えられる。

常温状態で2日間保持中を実施したケースの軸差応力–時間および体積ひずみ–時間関係をFig.7(a)に示し、加温時の1日間保持中の軸差応力–時間および体積ひずみ–時間関係をFig.7(b)に示す。これより、保持中のせん断応力の経路は常温・加温ともに収束していて、体積ひずみ

の経路は線形的な変化であることが確認できる。

せん断試験実施前の圧密-加温プロセス中の体積ひずみ-時間関係を Fig.8に示す。圧密は終了し、せん断前の加温中の体積ひずみの変化は収束していることが確認できる。圧密に比べて加温による体積ひずみの減少量が大きく、加温による影響は多大であることが確認できる。加温条件下での保持後に発生する体積ひずみの減少は、せん断面の生成やその面での新たな鉱物の変化あるいはクリープ現象等が要因で発生するものと考えられる。

常温・加温状態で30分、約12時間、約3日間保持した時の軸差応力-平均主応力関係をFig.9に示す。これより、加温状態では、保持時間が長くなるにつれて、応力経路の移動距離も長くなることが確認できる。しかし、常温状態では、保持時間が長くなっても応力経路の移動距離はそれほど変わらない。加温に伴い、平均主応力の減少、すなわち拘束状態がより緩くなることになる。

つぎに、常温・加温状態で30分、約12時間、約3日間保持した時の体積ひずみ-平均主応力関係をFig.10に示す。この図から、体積ひずみの変化の発生時の平均主応力を読み取り、その保持開始時の平均主応力と比較する。比較した結果、常温・加温で約12時間、約3日間保持のいずれの場合においても、保持開始時から平均主応力が約5%減少すると、体積ひずみが増減することが確認できる。一方、30分保持では、保持開始時から平均主応力が30分以内に5%減少しなかったため、明確な体積ひずみの変化の発生が確認できなかった。

4. まとめ

凝灰岩による圧密排水条件下での三軸せん断-保持-せん断試験を行い、残留状態で保持することで、保持時間に比例して再せん断後の強度回復現象が確認できた。

一方、加温したケースでは、明瞭な強度増加が確認できなかった。これらは、本研究で用いた供試体の温度による鉱物的な化学変化に起因する可能性が考えられる。特に、モンモリロナイトはせん断面において多大な影響を及ぼすことが知られている⁸⁾。これの強度回復に対する影響として、膨張による粒子再配列や間隙水の出入による吸着力がある。これらの度合いが、加温によって低下するため強度回復が小さくなったと考えられる。

参考文献

- 1) 岡田哲実：高温環境下における堆積軟岩の力学特性（その1）-三軸圧縮試験による温度依存性の把握-，電力中央研究所報告，N04026, 2005.
- 2) 大田 恭史，林 為人，高橋 学：異なる温度・封圧・歪速度条件下における玄武岩の破壊・変形特性，月刊地球 24(3), 219-223, 2002-03, 海洋出版.
- 3) 中島伸一郎，川口雄大，岸田潔，安原英明，矢野隆夫，細田尚：負荷状態保持による岩石亀裂のせん断強度および透水性の変化，材料，59(3)，日本材料学会，pp. 211-218, 2010.
- 4) 岸田潔，Derek Elsworth，矢野 隆夫，安原 英明，中島 伸一郎：堆積岩による排水三軸せん断-保持-せん断試験，岩盤力学に関するシンポジウム，pp.173-178, 2010
- 5) 岩の試験・調査方法の基準・解説書，平成 14 年度版
- 6) Dieterich, J. H.: Time-dependent friction in rocks, *JGR*, Vol. 77, pp. 3690-3697, 1972.
- 7) Dieterich, J. H.: Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, *JGR*, 84, 2161-2168, 1974.
- 8) 山崎孝成：再滑動型地すべりににおけるせん断帯の構造と土質特性に関する研究，佐賀大学博士論文，130-135, 2000

A STUDY ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TUFF WITH THE TRIAXIAL COMPRESSION TESTS ON HEATING

Takenori ARAKI, Takao YANO, Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA

To discuss mechanics and hydrological characteristics in rock at a long period, we need to refer to the change of discontinuous surface and construction with the thermal and the chemical changes. In this study, the consolidated-drained triaxial compression tests with comparatively soft tuff were conducted, and the slide-hold-slide process in a residual state was applied. These conditions of the effective confining stress and temperature, the degree of the healing at the shear band, occurring of the shear process was confirmed. As a result, we confirmed the healing, moreover, the proportion of the healing to the holding time. However, in heating, the degree of the healing became decreased.