

加温条件下でのラフネスを有する不連続面の Slide-Hold-Slide試験とヒーリング現象

津田 直弥^{1*}・矢野 隆夫¹・安原 英明²・岸田 潔¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-5840 京都府京都市西京区京都大学桂C1)

²愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

*E-mail: tsuda.naoya.33c@st.kyoto-u.ac.jp

岩盤不連続面の力学・水理学挙動を評価する上で、温度の影響を考慮することが必要とされる。地下深部に存在する岩盤不連続面は、地熱などの影響によって化学反応が促進し、岩盤鉱物の溶解・沈殿現象が促進されることによって、力学・水理学特性が変化すると考えられる。本研究では、自然のラフネスを有する不連続面を含むモルタル供試体を用いて、温度条件を変化させSlide-Hold-Slide型の一面せん断-透水同時試験を実施した。実験の結果、加温・常温ともにせん断保持後の強度回復が見られたが、温度による影響は明瞭に確認されなかった。また、温度変化が、不連続面のせん断挙動に影響を与えることは確認できた。これは温度の変化により岩石が膨張・収縮を生じ、その影響が不連続面の挙動に現れたものとする。

Key Words : rock joint, heating, permeability, direct shear behavior, strength recovery

1. はじめに

原子力発電を利用する上での最重要課題は、発電に伴い排出される高レベル放射性廃棄物の処分である。国際的な共通認識は、信頼性と実用性から地層処分が最適であると考えられており、複数の適切な人工バリアを施したうえで、天然バリアである地下 300 m より深い地層中に処分することが計画されている。特に、天然バリアに関しては、放射性廃棄物流出の最終バリアであるために、処分地点周辺岩盤の力学・水理学特性を把握することは非常に重要である。

岩盤内には自然の不連続面が存在し、この不連続面は地殻変動などによる応力状態の変化、さらには地盤内の温度変化の影響を受けて開口状況を変える。過去の研究では、例えば、不連続面を有する模擬岩石であるモルタル供試体、および実際の岩石である花崗岩や岩塩供試体などを用いて、拘束圧およびせん断速度一定の条件下、所定のせん断変位までせん断させ(Slide)、せん断変位を固定したまま長時間固定し(Hold)、再び一定速度でせん断させる(Slide)といった Slide-Hold-Slide 型の一面せん断試験が実施されてきた^{1)~3)}。それにより、せん断変位固定に伴う力学的挙動および水理学的挙動についての評価を行っている。しかし、これらは全て恒温下における研究であり、温度の影響についての検討はなされていない。

地下深部の岩盤は、地熱により高温であることが想定される。それにより化学反応が促進し、岩石鉱物の溶解・沈殿現象(圧力溶解現象)が促進されることによって、処分空洞周辺の岩盤不連続面の力学・水理学特性が変化すると考えられる。

本研究では、実験室レベルの時間領域でも化学現象が明瞭に確認でき、供試体の再現性が高いモルタル供試体を用いて、常温・加温のそれぞれの条件下で Slide-Hold-Slide 型の一面せん断-透水同時試験を実施し、温度変化が力学・水理学特性に及ぼす影響を評価した。

2. 実験概要

本実験で用いたモルタル供試体は、1 種類の自然ラフネスのゴム型により不連続面を作製し、水平断面が 80 mm (せん断・透水方向)×120 mm である。実験前の供試体のラフネスコンター図を Fig. 1 に示す。供試体実部の一軸圧縮強さは 39.0 MPa、JRC は上部 : 13.11、下部 : 13.95 である。

本実験で用いた一面せん断試験装置の概略図を Fig. 2 に示す。上流の貯留水槽とせん断箱の間にヒーターを設置することで、加温の透水を行えるように機能を付加した。ヒーターによって温められた水は、管を通して

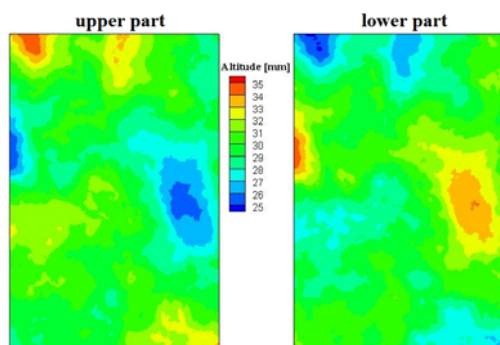


Fig.1 Contour map of joint surface roughness using surface profiling data

Table 1 Experiment cases

Case	Thermal conditions	Holding time
Case-1	Normal	60s, 120s, 180s, 300s, 420s,
Case-2	Heating	900s, 1800s, 1h, 3h, 12h, 1d, 2d, 5d

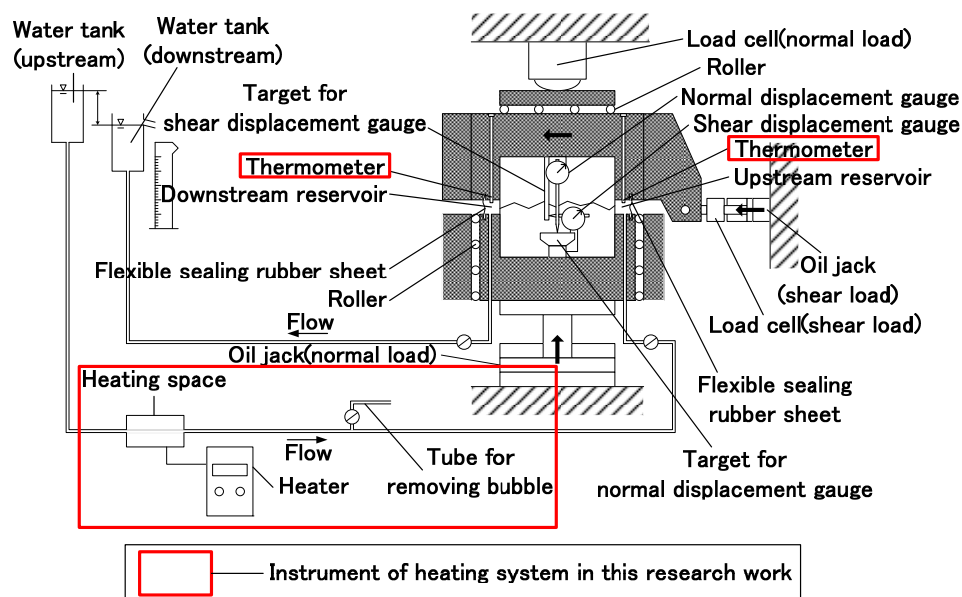


Fig.2 Schematic of instrument

供試体に到達する間および、不連続面内を透水している間に放熱して温度が下がると考えられる。そこで、不連続面内の流体の温度は、供試体の上流端と下流端に設置した温度計で計測し、その平均を加温温度とした。また、加温による気泡が発生し、正確な透水量が計測できなくなる可能性が考えられるので、十分に脱気した水を使用した。それでも気泡の発生を完全に防ぐことはできなかったので、透水経路の途中に別経路のバルブの付いた管を設置して、適宜その管から気泡を除去した。

実験条件を Table 1 に示す。垂直拘束圧は 1.0 MPa、せん断速度は 0.1 mm/min の条件下で実施した。温度条件については、Case-1 ではヒーターを使用せずに、常温 (20°C) での透水を行った。一方、Case-2 ではヒーターを 90°C に設定し、透水を行った。

Slide-Hold-Slide 過程におけるせん断変位の保持は、せん断過程の残留状態で実施し、保持時間は 60 秒から最大 5 日間で実験を行った。

透水試験は、せん断変位保持中に複数回行うことで、保持中の透水性の変化を調べた。水頭差は 10 cm (動水

勾配:1.25) の一定水位で、両ケースともレイノルズ数は 1 以下となり、ほぼ三乗則が満足される実験条件である。なお、透水試験を実施していない間は、貯留水槽のバルブを閉じているので不連続面には流水していない。加温での透水の際は、ヒーターの構造上、水を流していない間は加温し続けておくことができず、長時間透水を続けるには貯留水槽に限界があるので、3 時間より短いせん断保持では常時加温による透水状態とした。12 時間より長いせん断保持においては、透水試験を行うときだけバルブを開け、ヒーターで加温をし、不連続面内の温度が十分に安定してから流量を測定した。

3. 結果と考察

(1) せん断試験結果

Fig.3 に両ケースにおけるせん断変位-せん断応力、ダイレーション関係を示す。Case-2 においてせん断変位が 3.2 mm の付近でダイレーションの急な上昇が確認できる。これは不連続面の凸部分が破壊されてしまったこと

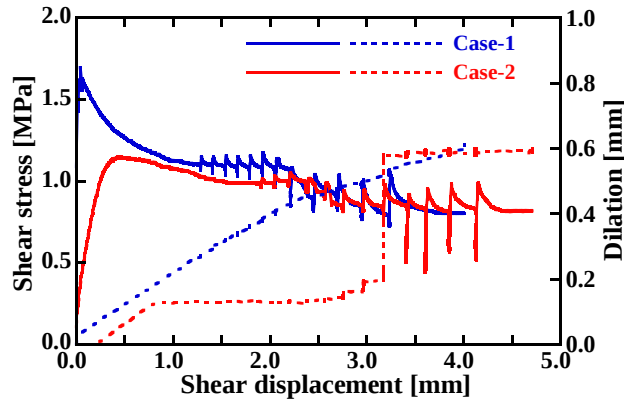


Fig.3 The shear stress - shear displacement and the dilation

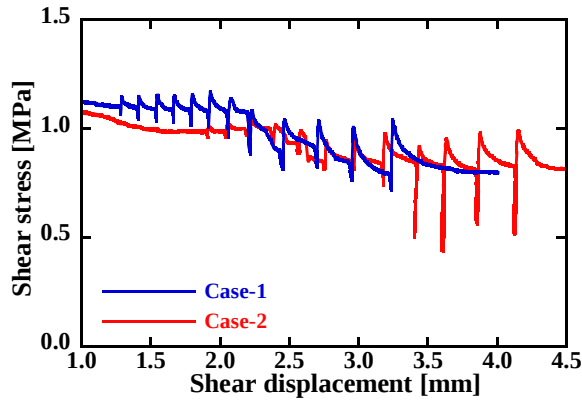


Fig.4 Shear stress - shear displacement around holding points

が原因であると考えられる。Fig.4 に両ケースにおける変位固定付近のせん断変位-せん断応力関係を示す。両ケースともに変位固定後の再せん断時に元のせん断応力曲線を上回る明確なせん断応力の増加が確認された。これは、不連続面接触部において想定していたクリープ変形および圧力溶解現象などの化学作用によって接触面積の増加や粘着力の発現が生じたためであると考えられる。

(2) せん断応力の時間依存性

両ケースにおいて、変位保持時間が長くなれば、再せん断時におけるせん断応力の回復量が大きくなることが確認される。このことから、再せん断時のせん断応力の増加に関しては、Dieterich^{4,6)}が示したせん断強度回復の時間依存性と同様の現象が発生していることが考えられる。そこで、両ケースのせん断応力の増加現象に対して式(1)が適用できるかの検討を行った。応力回復量は再せん断時におけるピークせん断応力からせん断変位保持時直前のせん断応力の差で定義する^{4,6)}。

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

ここで、 τ_s は再せん断時のせん断強度、 τ_0 はせん断停止時のせん断強度、 t_h はせん断保持時間、 A は定数である。

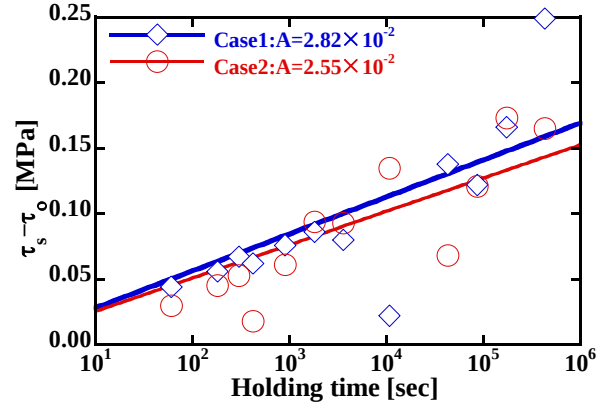


Fig.5 Relationship between holding time, t_h , and shear strength recovery, $\tau_s - \tau_0$

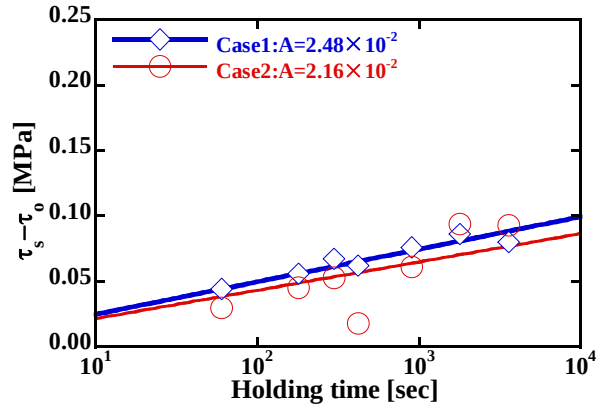


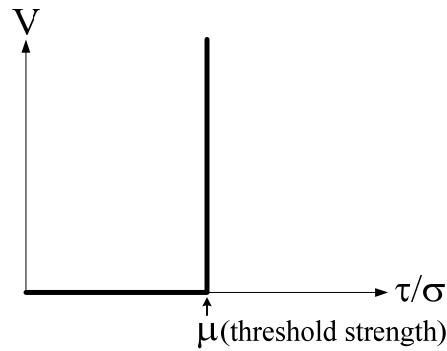
Fig.6 The shear strength recovery, $\tau_s - \tau_0$, are plotted along the holding time, t_h , focusing on shorter holding period

Fig.5 に式(1)を用いて得られた両ケースでの保持時間-せん断応力回復量関係を示す。常温 ($A = 2.82 \times 10^{-2}$) と加温 ($A = 2.55 \times 10^{-2}$) では多少の違いはあるものの、ほぼ同じ対数線形線上に回帰されることが確認できる。従来の研究では、飽和状態における長時間のせん断変位固定期間では、対数線形関係を大きく上回るせん断応力の増加を示すことが確認されているが^{1,2)}、このような現象は本研究では見られなかった。これは今回の実験条件が、垂直拘束圧 1 MPa と低かったことや、保持時間が相対的に短いことが要因であると考えられる。また、せん断途中の温度の変化による影響を除外するために、Fig.6 に両ケースでの 1 時間までの保持時間-せん断応力回復量関係を示す。同様に常温 ($A = 2.48 \times 10^{-2}$) と加温 ($A = 2.16 \times 10^{-2}$) とともにほぼ同じ対数線形線上にのっていることが確認できる。

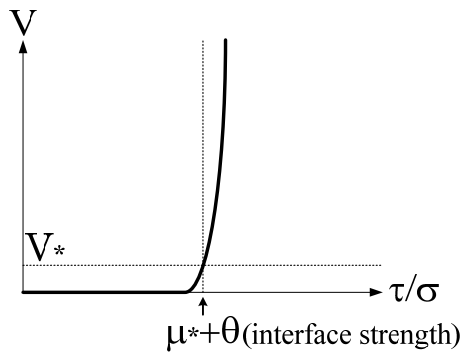
(3) 速度・状態依存摩擦則による評価

Nakatani⁷⁾, Nakatani & Scholz^{8,9)}, 吉田ら¹⁰⁾は, Dieterich⁹⁾によって提案された速度・状態依存摩擦則 (rate- and state-dependent friction law) を用いて、岩石の摩擦挙動を評価してきた。速度・状態依存摩擦則を式(2)に示す⁷⁾。

$$\mu = \tau / \sigma = \mu_* + \theta + a \ln(V / V_*) \quad (2)$$



(a) Classical friction



(b) Modern friction

Fig.7 Shear velocity as a function of the applied shear stress for friction after the work by Dieterich[1979]⁷⁾

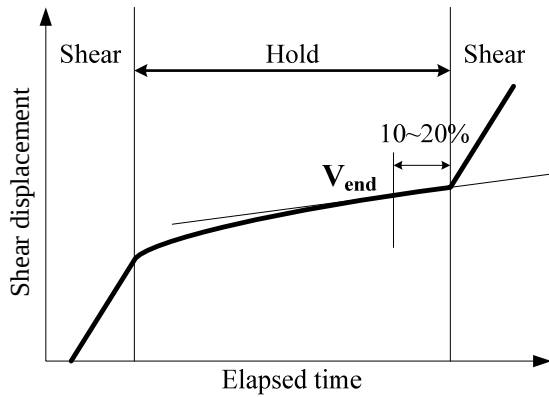


Fig.8 Estimation method of V_{end}

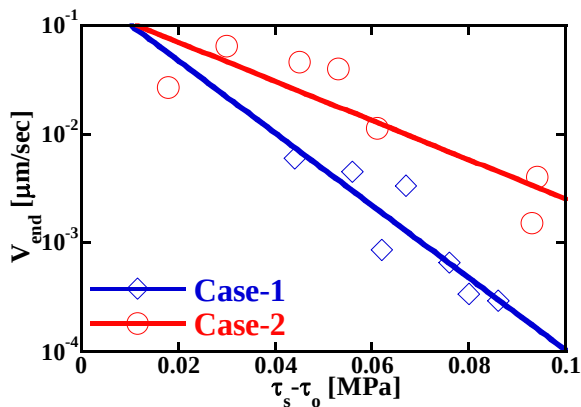


Fig.9 Relationship between evolution of shear strength recovery and shear velocity measured at the end of hold considering only holding for short term

ここで、 μ は摩擦係数、 τ はせん断強さ、 σ は垂直拘束圧、 V はせん断速度、 V_* は任意のせん断速度、 μ_* は $V=V_*$ の時の摩擦係数、 θ は状態変数、 a は定数（摩擦パラメータ）である。この式を V について解くと、式(3)のようになる。

$$V(\tau, \theta) = V_* \exp \left[\frac{\tau / \sigma - (\mu_* + \theta)}{a} \right] \quad (3)$$

Fig.7に示すように、Dieterichの研究⁹⁾が行われるまでの摩擦の考え方は、摩擦強度係数（ μ ）は閾値であり、その値より低いとせん断は停止し、大きいとせん断が発生する、というものである。一方で、Dieterichの研究⁹⁾による摩擦の考え方は、せん断速度はせん断応力が接触面強度（ $\mu_* + \theta$ ）に近づくと、連続的に増加するというものである。この摩擦の考え方が式(3)の示すものである。つまり、式(3)は、状態変数がある値をとる時、せん断速度が外から加わるせん断応力によってどのように決まるかを表している構成式である。

本実験において、せん断保持をしている時でも、せん断変位は微小に動いており、これは摩擦接触面の状態に何らかの変化が生じたためである。その保持中のせん断速度は、保持中に徐々に減少している。そこで、保持中の最終せん断速度 V_{end} が、再せん断時の応力回復量 $\tau_s - \tau_0$ の関係を調べることで、式(3)が適用できるかの検討を行った。Fig.8に示すように、各せん断保持の終了時から10~20%さかのぼった範囲で線形近似を行い、 V_{end} を算定した。

Fig.9に、各ケースでの1時間保持までのせん断応力回復-最終せん断速度関係を示す。今回1時間保持までのデータのみであるのは、長期間保持の時に、加温の時にせん断変位が特殊な変化を起こしていたためなのであるが、それについては3-(3)で言及する。Fig.9より、常温・加温の両ケースで、せん断応力回復量の増加に伴って、最終せん断速度が減少していることが確認でき、これは式(3)が示しているものと一致している。さらに、常温と加温で比べてみると、常温の方が加温よりも、せん断応力回復量の増加量に対してのせん断速度の減少量が大きいことが確認できる。

(4) 温度変化と岩石挙動

Fig.10に、Case-2における5日間変位固定付近のせん断変位-せん断応力関係を示す。Case-2において、加温を止めるとせん断変位およびせん断応力が減少し、加温を再開するとせん断変位、せん断応力が共に増加する挙動が確認できる。このデータは5日間せん断保持によるものであるが、このような現象は、ヒーターの電源を操作していた長時間保持の際に毎回確認されている。Fig.11に、せん断保持中の一部拡大したせん断応力と温度の経時変化、Fig.12に、せん断保持中の一部拡大したせん断変位

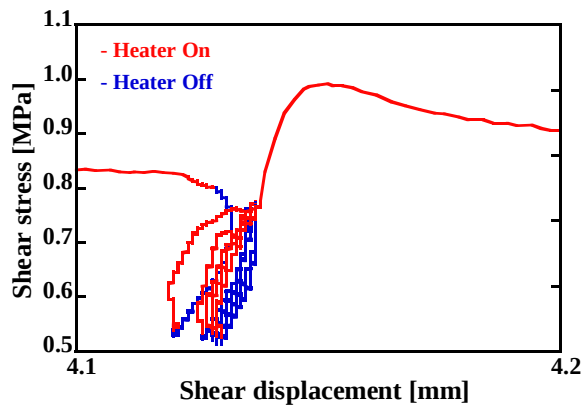


Fig.10 The influence of thermal conditions through shear stress - shear displacement around 5days holding (Case-2)

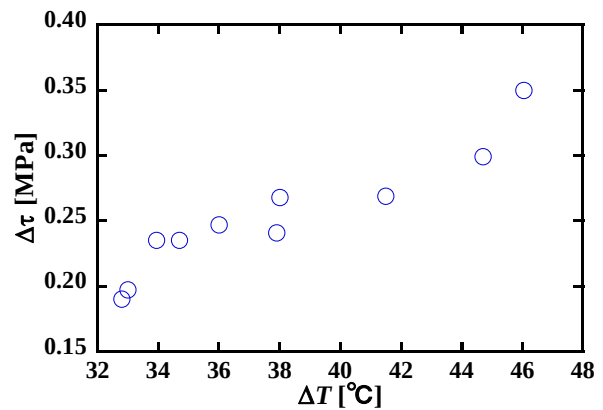


Fig.13 Relationship between the amount of increasing temperature and the amount of increasing shear stress

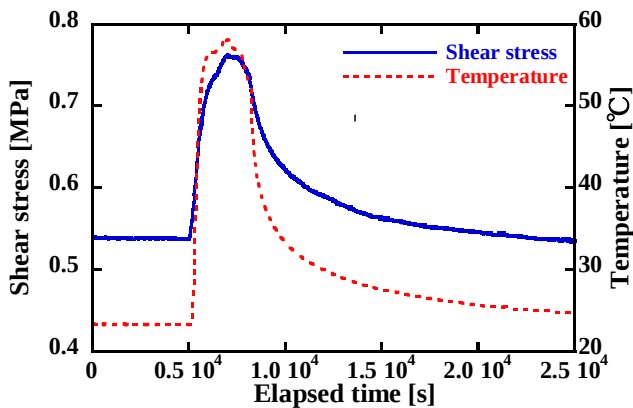


Fig.11 Enlarged plot of relationship among elapsed time, shear stress and temperature during the shear-holding (Case-2)

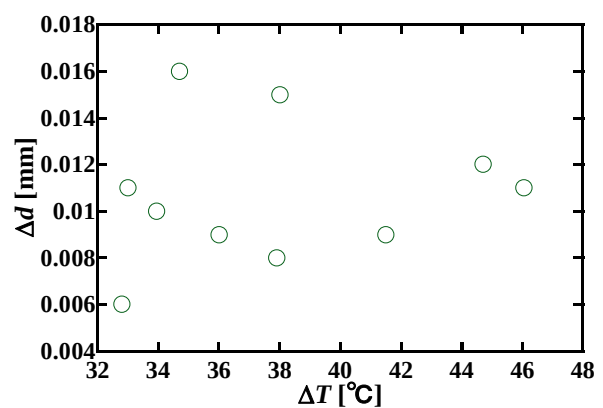


Fig.14 Relationship between the amount of increasing temperature and the amount of increasing shear displacement

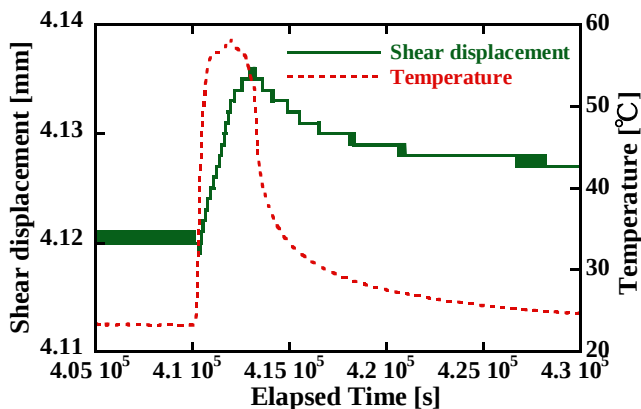


Fig.12 Enlarged plot of relationship among elapsed time, shear displacement and temperature during the shear-holding (Case-2)

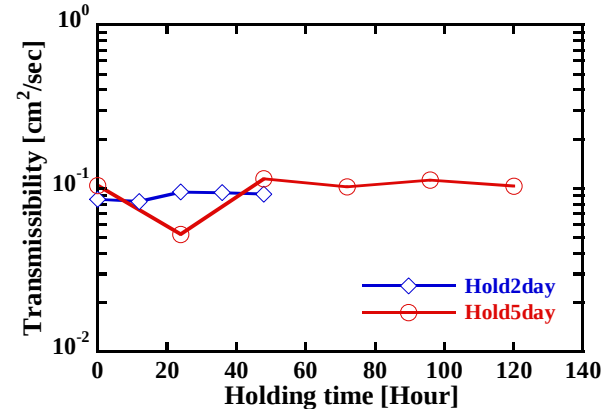


Fig.15 Histories in transmissibility coefficient during the shear-holding (Case-2)

と温度の経時変化を示す。温度の増減とともに、せん断応力およびせん断変位が増減していることが確認できる。これは、温度が上昇することで岩石が膨張し、温度が減少すると岩石が収縮していると考えられる。

また、Fig.13にせん断応力増加量-温度増加量関係、Fig.14にせん断変位増加量-温度増加量関係を示す。Fig.13より、せん断応力増加量は温度の増加量に依存していることが確認できる。一方でFig.14より、せん断変位増加量は温度の増加量に依存しないことが確認できる。

(5) 透水試験結果

Fig.15にCase-2における2日間、および5日間せん断保持中の透水量係数の経時変化を示す。せん断変位保持中に透水量係数については、明瞭な変化は見られなかった。

なお、本実験で実施した透水試験は定水位透水試験であるため、本来は大気圧条件下で実施すべきであるが、Case-2において2日間、5日間保持で行ったケース以外は、大気圧条件下で実験を行っていない。このため、本

研究においては Case-1 と Case-2 を定量的に比較することはできないと考えられる。

4. まとめ

せん断保持中に加温することで、せん断応力およびせん断変位が増加し、加温によるせん断挙動への影響があることが確認できた。また、せん断変位固定によるせん断応力回復値と保持時間の関係は、対数線形のモデルが適用できることが確認できた。結果として、いずれのケースもせん断応力回復値は、時間とともに増加することが確認された。一方、加温と常温による差異は明瞭に確認できず、対数線形関係の傾きはほぼ同じような値となった。さらに、保持中の最終せん断速度は、保持後のせん断応力回復量の増加量に伴って、指数的に減少することも確認できた。

本研究において開放型のせん断箱で加温を実施し、加温と常温により力学挙動に差異がみられることは確認できた。しかしながら、実験装置の能力から長時間加温状態を保つことができず、加温のon/offを繰り返すことになった。結果として、加温に伴う圧力融解現象や強度回復の議論を行うには十分なデータを得ることができなかった。今後は、実験装置を改善し、継続的な加温条件でのSlide-Hold-Slide一面せん断実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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 & Mining Sciences*, Vol. 48(5), pp. 782 - 793, 2011.
- 2) 川口雄大, 中島伸一郎, 安原英明, 岸田潔 : 岩盤不連続面におけるせん断強度回復現象とその時間依存性, *Journal of MMIJ*, Vol. 127, pp. 158 - 164, 2011.
- 3) Kishida, K., Yano, T. and Yasuhara, H. : Healing and shear stress reduction of rock salt single fracture under slide-hold-slide-direct shear experiments, *The Present and Future of Rock Engineering*, ARMS7, 2012.
- 4) Dieterich, J.H. : Time-dependent friction in rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 77, pp.3690-3697, 1972.
- 5) Dieterich, J.H. : Direct observation of frictional contacts; New insights for state-dependent properties, *Pure Applied Geophysics*, Vol. 243, pp. 283-302, 1994.
- 6) 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.
- 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, 2001
- 8) Nakatani, M., and C. H. Scholz : Frictional healing of quartz gouge under hydrothermal conditions: 1. Experimental evidence for solution transfer healing mechanism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, pp. 1029-2001, 2004a
- 9) Nakatani, M., and C. H. Scholz : Frictional healing of quartz gouge under hydrothermal conditions: 2. Quantitative interpretation with a physical model, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, pp. 1029-2003, 2004b
- 10) 吉田真吾, 永田広平, 中谷正生 : 速度・状態摩擦則の物理、物性研究, pp. 254-260, 2007

SLIDE-HOLD-SLIDE EXPERIMENTS AND HEALING PROCESS OF SINGLE ROCK FRACTURE UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

Naoya TSUDA, Takao YANO, Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA

In this study, it is aimed for to evaluate the mechanical and hydraulic behaviors of rock masses under different temperature conditions. Under constant confining pressure and shear velocity conditions, and the direct shear examinations with a slide-hold-slide process in a residual state under two different temperature conditions have been applied using mortar specimens with a single natural fracture. From the test results, it was confirmed that shear strength increased with increase of shear holding time in both cases. On the other hand, significant difference under thermal conditions was not confirmed. Moreover, it was also confirmed that the change of temperature influenced shear strength and shear displacement.