岩石不連続面のSHS型一面せん断試験と 速度・状態を考慮した応力回復現象の評価

松本 航佑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:matsumoto.kosuke.52a@st.kyoto-u.ac.jp

岩盤内には多数の不連続面が存在しており、この不連続面は、応力や温度条件により構造・接触状態が変化する.本研究では、ラフネスを有するモルタル供試体および安山岩供試体を用いて、温度条件を変化させた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確認された.また、速度・状態依存摩擦則を適用した結果、せん断速度の変化が不連続面の接触状態やせん断応力に影響を与えていることが確認できた.

Key Words : rock joint, slide-hold-slide, heating, rate- and state- dependent friction, strength recovery

1. はじめに

関東大震災や阪神・淡路大震災,東日本大震災,2016 年に発生した熊本地震など,日本では多くの地震が発生 しており,その被害は今もなお残っている.日本は世界 に類を見ない地震大国であり,その原因は,地球を覆っ ているプレートのうち4枚のプレートが互いにぶつかり 合いながら隆起・沈降し,非常に大きな力が作用してい る箇所に日本列島が位置しているためであり,日本と地 震とは切っても切り離せない関係にある.そのため,地 震の被害を最小限に留めるためにも地震のメカニズムを 解明することは必要不可欠である.

地震とは、地下深くに存在する断層の摩擦滑り、つまり、地下の岩石内の不連続面の摩擦滑りのことである. したがって、岩石不連続面の摩擦滑りを解明することが、 地震の解明につながると考える.

摩擦滑りに関する研究は過去に多く行われてきた.例 えば、Dieterich¹⁾⁻³⁾は速度・状態依存摩擦(RSF:Rete-and State-dependent Friction)を提案し、主として断層ガウジを 用いて、様々な条件下での実験を行い摩擦挙動の評価を してきた.さらに、Nakatani⁴⁾、Nakatani & Scholz^{5)の}、吉田 ら⁷⁰は、その背後にある物理を詳細に解明し、その有用 性について論じてきた.一方、中島ら⁸⁾、橋本ら⁹⁾、青 山ら¹⁰⁾、津田ら¹¹⁾は、不連続面を有する種々の岩石を用 いて、拘束圧およびせん断速度一定の条件の下、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 (以下 SHS)型の一面せん断試験を実施している.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.これら一連の研究では,不連続面を有するモルタル,花崗岩,岩塩,石灰岩,砂岩において,せん断変位固定後の再せん断時のせん断応力回復現象が確認されている.これは,せん断変位固定時に,不連続面接触部においてクリープ変形および圧力溶解などによって,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ている.また,岸田ら¹¹1は、モルタルおよび花崗岩を用いて加温と常温それぞれの条件下で実験を行い,加温による影響を示している.

本研究では、単一不連続面を有するモルタルおよび安 山岩供試体を用いて、加温と常温のそれぞれの条件下で SHS型の一面せん断-透水試験を実施し、速度・状態依 存摩擦則を適用することで岩石不連続面の摩擦挙動につ いての考察を行った.

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 ネスのゴム型を用いて不連続面を作製した水平断面が 80 mm (せん断方向) ×120 mm の試験体である. モルタ ルの材料は、セメント:砂:水を、1.0:2.0:0.65 (重量 比) で配合したものを用いた. 供試体実部の一軸圧縮強 さは 39.0 MPa¹¹⁾である.



表-1 実験ケース			
Case	Normal stress [MPa]	Holding time	Thermal condition [°C]
M1	3.0	300sec~1day	20
M2	3.0	60sec~5day	60
A_I	1.0	60sec~5day	20
A_II	1.0	60sec~2day	60

安山岩供試体については、兵庫県豊岡市のトンネル建 設現場の掘削ずりを使用し、モルタル供試体と同じ水平 断面に整形した.整形後、供試体の中央部に圧裂により 単一不連続面を生成した.供試体の上部・下部には、変 位計測用治具を取付けるためのかさ上げ用モルタル部を 打設した.供試体寸法やモルタル部の材料・配分につい ては、モルタル供試体と同じである.同岩塊で作成され た円柱供試体を用いて一軸圧縮試験を行った結果、一軸 圧縮強さは45.0 MPaであった.

本実験で用いた一面せん断試験装置の概略図を図-1¹¹⁾ に示す.せん断箱にはヒーターが設置され,供試体を直 接加温できる構造となっている.また,せん断箱を断熱 材で覆い,供試体が一定の温度条件となるように設計さ れている.透水試験用の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,透水試験による供試体の 温度低下を防ぐ構造となっている.供試体は,上流端と 下流端で温度計測することで,温度が一定の状態になる ように管理されている.

表-1 に今回実施した実験条件を示す.本実験では, 同じ形状のラフネスを有するモルタル供試体を2つ

(M1, M2),自然のラフネスを有する安山岩供試体を 1つ用いた.安山岩供試体は同じ供試体を用いて A_Iと A_II の計 2 ケースの実験を実施した.垂直拘束圧はモ ルタル供試体が 3.0 MPa,安山岩供試体が 1.0 MPa,せん 断速度は 0.1 mm/min の条件下で実施した.温度条件は 20℃と 60℃の 2 パターンである.せん断変位の保持は, せん断過程の残留状態で実施し、それぞれのケースで最 短 60 秒から最大 5 日間(60 秒,3分,5分,7分,15分, 30分,1時間,3時間,12時間,1日,2日,5日)まで 保持時間を徐々に伸ばしていくという,SHS型の一面せ ん断試験を行った.

3. 結果と考察

(1) せん断試験結果

図-2 にせん断変位-せん断応力,せん断変位-ダイレーション関係を示す.図-2 より,いずれも変位固定後の 再せん断時に,ピーク時のせん断応力が保持直前のせん 断応力を上回るせん断応力の回復現象が確認された.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. また,図-2(b)では,安山岩における一回目のせん断試験 の開始時に急激なせん断応力およびダイレーションの増 加が確認できる.これは,実験前の段階では,不連続面 ラフネスの影響が強いためであると考えられる.二回目 のせん断試験では一回目のせん断試験時にラフネスがあ る程度削れていたため,ピーク強度は表れなかった.



図-2 せん断変位-せん断応力およびダイレーション関係

(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、Dieterich¹⁾⁻³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回復現象に対して式(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直前のせん断応力の差で定義する¹⁾⁻³.

$$\tau_s = \tau_0 + A \log_{10} t_h \tag{1}$$

ここで、 なは再せん断時のせん断強度、 なはせん断停止 時のせん断強度、 なはせん断保持時間, A は定数である.

図-3 に式(1)を用いて得られた各岩石での保持時間-せん断応力回復量関係を示す.図-3(a)より,モルタルでは, 常温(*A*=6.07×10²)と加温(*A*=6.74×10²)での式(1)の係数*A*に多少の差異はあるものの,ほぼ同じ対数線形線上に回帰されることが確認できる.また,図-3(b)より, 安山岩供試体においても加温(*A*=3.93×10³)と常温(*A*=3.23×10³)でほぼ同じ対数線形線上に回帰されること が確認できる.各供試体において加温による応力回復量







図-4 安山岩保持時間-せん断応力回復量関係

の違いはほとんど確認されなかった.

さらに、せん断応力の緩和現象に対しても式(1)が適 用できるかの検討を行った.応力緩和量はせん断変位保 持時直前のせん断応力と、保持中のせん断応力の最小値 の差で定義する.図-4 に式(1)を用いて得られた安山岩 での保持時間-せん断応力緩和量関係を示す.応力緩和 量についても式(1)の適用が可能であるが、加温による 違いはほとんど確認されなかった.

(3) 速度・状態依存摩擦則による考察

Nakatani⁴, Nakatani & Scholz^{5),6}, 吉田ら⁷は, Dieterich¹⁾⁻³⁾ 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),式(3)に示 す^{7,12)}.

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

式(2)では、表面の状態というものが定義でき、摩擦は 状態変数0の関数で表せると仮定されている.ここで、µ は摩擦係数、れせん断応力、のは垂直応力、Vはせん断 速度、V-は任意のせん断速度、µ4はV=V-の時の摩擦係数、 Qは状態変数、aは定数(摩擦パラメータ)である.

また、状態変数0の時間変化は式(3)で表される.

$$d\theta/dt = 1 - V\theta/D_c \tag{3}$$

ここで、Dcは定数(摩擦パラメータ)である.

式(2)および式(3)に本実験の安山岩A_Iの1分保持にお ける条件を適用させることで、せん断速度が接触面の状 態やせん断応力に与えている影響について考察を行う.

式(2)および式(3)に適用させるにあたって、*V**を定常滑 り状態でのせん断速度(0.1 mm / min), *µ**をせん断変位 保持直前の 10 秒間の平均せん断応力, *Dc* を再せん断後 にせん断応力がピークを経て保持前のせん断応力に戻る までに要したせん断距離, *a* を図-4 より求めた応力緩和 の定数 *A* (*A* =2.21×10²) とした.また,初期の状態変数 を 0.2 とする.

本実験において、せん断保持をしている間でもせん断 変位は微小に動いており、そのせん断速度は保持中に 徐々に減少している.図-5に安山岩 A_Iの1分保持中の 経過時間-せん断変位変化量の関係を示す.図-5に示す ように、保持時間経過に伴うせん断変位をプロットした ものを次式で近似し、その微分係数を保持中のせん断 速度とした.

$$x = t^b / a \tag{4}$$

ここで、Xはせん断変位、tは経過時間、aおよびbは定数である.

これらの条件を用いながら、安山岩A_Iの実験条件 を式(2)および(3)に適用させる.結果として、図-6(a)にせ ん断変位-せん断速度の関係、図-6(b)にせん断変位-状態 変数の関係、図-6(c)にせん断変位-摩擦係数の関係を示 す.さらに、図-7にせん断速度が最小値に達する(保持 終了直前)までのせん断速度-状態変数の関係を示す.

図-6(a),図-6(b)および図-7より,せん断速度を小さく (Hold)すると,保持中の時間経過に伴って状態変数の が増加していることが確認できる.その後せん断速度を 大きく(Slide)すると状態変数のが徐々に減少している. このことは式(3)からも確認でき,せん断速度と状態変 数が反比例の関係にあることが確認できる.さらに,図 -6より,式(2)で示されているようなせん断速度と状態変 数の増減に伴い摩擦係数µも増減しているという関係も 確認できる.つまり,せん断応力はせん断速度と接触面 の状態に依存して変動している.また,図-6(a)より,せ ん断速度は保持前と保持後で一定であるにも関わらず, 図-6(c)より保持後にせん断応力の回復現象が発生してい る.このことから,せん断保持後のせん断応力の回復現 象は保持中の状態変数の増加によって発生していること が確認できる.



図-5 A_I シリーズにおける 60 秒保持中の保持時間経過-せん 断変位の関係







図-7 A_I シリーズにおける 60 秒保持中のせん断速度-状態 変数の関係

(4) 透水試験結果

透水試験は、水頭差10 cmの定水透水試験を、安山岩 A_Iシリーズにおいてせん断変位保持中に数回行うこと で、保持中の透水性の変化を調べた.実験より得られた 流量Qを用いて、透水量係数Tを次式を用いて求めた.

$$T = Q/(i \times w) \tag{5}$$

ここで, iは動水勾配, wは供試体幅(流下方向に直行する長さ)である.

図-8 に A_I での 2 日間のせん断保持中の透水量係数 とダイレーションの経時変化,および A_I での 5 日間の せん断保持中の透水量係数とダイレーションの経時変化 を示す.2 日間保持のケースでは、ダイレーションの変 化がわずかであり、せん断変位保持中に透水量係数にほ とんど変化は見られない.しかし、5 日間のケースでは、 ダイレーションの変化が起こると透水量係数も変化して いることが確認できる.これは不連続面の接触状態が変 化することによってダイレーションの変化が発生し、不 連続面の透水性も変化したためであると考えられる.

4. まとめ

本研究では、単一不連続面を有するモルタルと安山岩 供試体を用いてSHS型一面せん断試験を実施した.いず れのケースもにおいてもせん断変位保持後の再せん断過 程でせん断応力回復現象が発生した.モルタル供試体と 比較すると安山岩供試体での強度回復量はわずかであっ た.また、せん断変位固定によるせん断応力回復量と保 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.一方、加温と常温の比較では、モルタル供 試体でわずかに加温状態の方が強度回復量が大きくなる 傾向を示したが、加温と常温の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. RSF



図-8 A_I シリーズおける2日保持と5日保持中の経過時間-透水 量係数、ダイレーションの関係

則を適用した結果, せん断応力の速度・状態への依存性 が確認できた.また, 不連続面の接触状態の変化によっ て保持中の透水性も変化することも確認できた.

本研究では、より長時間の保持を行うことができなかった.結果として、加温に伴う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、より長期の保持時間においても実験できるよう装置を改良し、加温の影響について議論していきたい.

参考文献

- Dieterich, J.H. : Time-dependent friction in rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 77, pp.3690-3697, 1972.
- 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.
- Dieterich, J.H. : Direct observation of frictional contacts; New insights for state-dependent properties, *Pure Applied Geophysics*, Vol. 243, pp.283-302, 1994.
- Nakatani, M. : Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated theology, *Journal of Geophysical Research* Vol. 106, No. B7, pp. 13,347-13,380, 2001.
- Nakatani, M., and C. H. Scholz : Frictional healing of quartz gouge under hydrothermal conditions: 1. Expe-rimental evidence for solution transfer healing mechanism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, pp. 1029-2001, 2004a.
- 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.
- 7) 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.
- 8) 中島伸一郎、川口雄太、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き裂のせん断強度および

透水性の変化,材料, Vol.59, No.3, pp.211-218, 2010.

- 9) 橋本健次,岸田潔,矢野隆夫,細田尚:岩盤不連続面にお けるせん断保持時の応力緩和の評価,第46回地盤工学研 究発表会,pp.467-477,2011.7.
- 10) 青山太郎, 矢野隆夫, 中島伸一郎, 安原英明, 岸田 潔: Slide-hold-slide 型一面せん断試験における岩盤不連続面の形 状変化と強度回復特性, 第 13 回岩の力学国内シンポジウ

ム&第6回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集,岩の力学連合会, pp.243-247,2013.

- 11) 岸田 潔, 津田直弥, 矢野隆夫, 安原英明:加温条件下での岩石不連続面のせん断応力回復に関する実験的研究, 地盤工学ジャーナル,11,1,11-20,2016.
- 中谷正生,永田広平:速度・状態依存摩擦則とその物理, 地震,第61巻特集号, S519-526,2009.

SLIDE-HOLD-SLIDE EXPERIMENTS AND EVALUATION OF STRENGTH RECOVERY CONSIDERING RATE AND STATE

Kosuke MATSUMOTO, Takao YANO, Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA

In this study, it is aimed for to evaluate the behaviors of rock masses under constant confining pressure and shear velocity conditions, and two different temperatures. Shear examinations with a slide-hold-slide process using mortar, limestone, halite, and granite specimens with a single rough fracture had been conducted in the previous reservch works. In this study, shear examinations using mortar and andesite specimens were conducted. From the test results, it was confirmed that shear strength increased with increase of shear holding time and that shear strength recovery is depend on shear velocity and state of rock surface.