



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*

川口雄大¹ 中島伸一郎²
安原英明³ 岸田 潔⁴

Healing of Shear Strength and Its Time Dependency in a Single Rock Fracture

by Yuta KAWAGUCHI^a, Shinichiro NAKASHIMA^b,
Hideaki YASUHARA^c and Kiyoshi KISHIDA^d

- a. Civil Engineering Division, Taisei Corporation, 1-25-1, Nishishinjyuku, Shinjyuku, Tokyo 163-0606, Japan
b. Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan
c. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University, 3, Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan
d. Associate Professor, Department of Urban Management, Kyoto University
(Corresponding author E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp / FAX: 075-383-3271)

Evolution of the long-term mechanical, hydraulic, and transport characteristics of rock fractures should be, in advance, predicted in considering an issue on entombment of energy byproducts of high level radioactive wastes. Under stressed and temperature conditions, those behaviors of the rock fractures of interest may be evolved in time and space likely due to the change in topographical aperture distributions. This irreversible process may be induced by pure mechanical and/or chemo-mechanical creeps such as water-rock reactions like stress corrosion and pressure solution, and chemical effects including mineral dissolution and reprecipitation in the free-walls of fractures. Specifically, the chemo-mechanical processes active at the contacting asperities within rock fractures may exert a significant influence on the mechanical, hydraulic, and transport behaviors throughout a long period, and thus, should be vigorously examined theoretically and experimentally.

This paper presents the slide-hold-slide shear test results for fully-saturated, single-jointed mortar specimens so as to investigate the effects of load holding on mechanical properties of rock joints. From the test results, it was confirmed that shear strength increased for mortar specimens in both short and long time holding cases. However, the evolution of shear strength recovery in two cases is different. This is because a dominant factor of shear strength recovery during the short time holding may be attributed to a pure mechanical process like creep deformation at contacting asperities, while the one during long time holding is affected by both mechanical and chemical processes like pressure solution.

Moreover, to reproduce the shear strength recovery during short time holding we develop a direct shear model by including temporal variation of dilation during holding. The model predictions are in relatively good agreement with the test measurements.

KEY WORDS: Rock Joint, Direct Shear Behavior, Shear Strength Recovery

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分を考える上で、処分地点周辺岩盤の力学特性の長期的な変化を評価・検討することは重要課題のひとつである。結晶質岩の場合は特に、弱部となる不連続面の

強度・変形特性が全体挙動を支配する。

空洞掘削により不連続面の一部に応力が集中し、その負荷状態が保持されれば、機械的なクリープによって不連続面が圧縮・せん断変形を生じ、新たな応力再配分や力学特性の変化をもたらしていくことが予想される。たとえば、不連続面の摩擦抵抗力は、すべりが停止している時間が長いほど大きくなること、岩石表面の直接接合、あるいは鉱物の粉末を挟んだ模擬断層のすべり実験において確認されている¹⁻³⁾。このような摩擦強度の時間的増加は、不連続面の実接触部に働く垂直応力による変形によって実接触面積が増加していくことがひとつの原因であると考えられている。

*2010年5月17日受付 2011年1月19日受理

1. 大成建設(株)土木設計部

2. 山口大学大学院理工学研究科 助教

3. 普通会员 愛媛大学大学院 理工学研究科 准教授

4. 普通会员 京都大学大学院 工学研究科 准教授

[著者連絡先] FAX: 075-383-3271 (京都大学・岸田)

E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

キーワード: 不連続面, 一面せん断挙動, せん断強度回復

また、水環境・熱環境下では化学的な作用も無視できない。廃棄物からの発熱により、岩石鉱物の溶解・沈殿現象等の化学反応が促進されることによって、岩盤の力学特性および透水特性が変化することも想定される。

岩石などを構成する粒子が、粒子同士の接触面で応力集中により溶解し、溶解した物質が圧力の小さい表面や領域に析出することによって変形が生ずる機構を圧力溶解現象という^{4,5)}。このような圧力による溶解・沈殿現象は、一般には、高温・高圧の条件下で顕著であり、実験的研究として、例えば、拘束圧が数 10MPa、温度が数 100℃程度の条件下で、石英等の岩石構成粒子を用いた圧縮・せん断試験等が実施され⁶⁻⁹⁾、圧力溶解現象の評価が行なわれている。また、比較的低い圧力・温度条件下 (<5 MPa, <150℃) であっても、圧力溶解現象が岩石不連続面や粒状体の透水性の変化に大きな影響を及ぼすことが確認されている^{10, 11)}。しかしながら、圧力溶解に関する従来の研究は、化学反応速度の定量的表現と、固体の変形速度に関する検討が中心であり、力学的影響、特に、不連続面のせん断挙動についての検討は十分ではない。

本研究では、不連続面のせん断過程において、接触状態の長期間にわたる保持がせん断強度特性に与える影響を実験的に明らかにし、その力学的影響をモデル化することを目的とする。まず実験では、岩石不連続面を模擬したモルタル供試体を用いて Slide-Hold-Slide 型¹²⁾の一面せん断試験を実施した。ここでいう Slide-Hold-Slide 型一面せん断試験とは、垂直拘束圧一定の下で、一定速度でのせん断 (Slide) と停止 (Hold) とを繰り返す試験である。この試験は、粒状体に対する二面せん断試験¹²⁾が主として実施されてきているのに対し、岩盤不連続面の、特に自然ラフネスを有する不連続面に対する一面せん断試験での Slid-Hold-Slide 型試験は例がない。実験上のパラメータとして、せん断変位を固定する時間の効果、垂直拘束圧の効果、ラフネスの効果 (自然ラフネスと平滑面)、不連続面内の水の効果 (乾燥と飽和)などを考慮した。

つぎに、実験で得られた再せん断時のせん断強度増加の時間依存性については、Dieterich¹⁻³⁾による対数時間線形モデルにより評価を行なった。また、せん断変位固定期間中の不連続面圧縮量に関する実験結果をモデル化し、これを Kishida and Tsuno¹³⁾の一面せん断挙動モデルに組み込むことで、再せん断時のせん断強度増加の時間依存性を再現することを試みた。

なお、本実験で供試体材料として実岩ではなくモルタルを使用する意図は、実験上のメリットとして、第一に、モルタルであれば型取りによって同一ラフネス形状の供試体を複数用意することができること、すなわち不連続面内の接触状況とせん断強度の発現に大きな影響を及ぼす因子であるラフネス形状をコントロールして検討を行なえることにある。また、第二に、モルタルであれば母岩強度をコントロールしやすく、等方均質な供試体が作製できるため、実岩では避けられない材料の不均質性や力学的な異方性などのせん断挙動を複雑にする因子をいったん排除した形で検討できると考えるからである。一方、拘束状態の保持によりモルタルによる不連続面の強度特性が変化した場合、その現象が、実岩に生じる現象と同一であるかどうかについては疑問が残る。しかし、供試体を十分に養生し、水和反応がほぼ収束した状態であれば、実験中に水和反応が進行して母岩の強度が増加することはないと判断した。また、不連続面内を水で満たした実験では、実験中にモルタルから不連続面内に溶出した物質が、壁面において再び沈殿・固結する現象は生じうるが、セメントの水和反応が水の介在によって促進されること、固結の程度は圧力・温度・時間

Table 1 Experimental conditions.

Fracture type	Case No.	Normal stress [MPa]	Saturation of fracture
Rough fracture	—	5.0	Wet
	Case-1	3.0	Dry
Smooth surface	Case-2	7.0	Dry
	Case-3	3.0	Wet
	Case-4	7.0	Wet

に依存することは、岩石の圧力溶解・沈殿現象と同様であると判断した。当然のことながら、岩石とモルタルとは力学特性が異なり、上述のとおりせん断挙動に関わるいくつかの要因を単純化して実験しているので、本研究の実験結果およびモデル化結果はただちに実岩に適用できるものではない。本研究は、せん断中の拘束状態の保持が不連続面の強度特性に及ぼす影響について、その基本的な性質を検討したものとの位置づけである。

2. モルタルによる模擬岩石不連続面の Slide-Hold-Slide 試験

2・1 試料条件および実験条件

せん断面の寸法が 80 mm × 120 mm (80 mm がせん断方向) で、高さが上下合わせて 120 mm のモルタルによる模擬岩石不連続面に対して実験を実施した。

モルタルは、早強ポルトランドセメント、ケイ砂 6 号、水、1.0:2.0:0.65 (重量比) で配合したものを使用した。養生は 28 日間の水中養生とした。同材料・同配合のモルタルに対して材令と一軸圧縮強さとの関係を調べたところ、養生日数が 3 週間程度を過ぎれば一軸圧縮強さが安定することを確認している。一軸圧縮強さは $\sigma_c = 40.0$ MPa、ヤング率は $E = 4.0 \times 10^3$ MPa である。

実験条件を Table 1 に示す。実験パラメータは、垂直拘束圧、不連続面のラフネス、不連続面内の水の有無である。

不連続面のラフネスは、ラフな不連続面とスムーズな不連続面の 2 種類とした。ラフな不連続面は、自然のラフネス ($JRC = 7^{14-16})$ を型取りしたゴム型を用いて作製した^{17, 18)}。また、スムーズな不連続面は、金属板上にモルタルを打設することで作製した。以下では、自然ラフネスによるラフな不連続面の供試体を“不連続面供試体”、金属板によるスムーズな不連続面の供試体を“平滑面供試体”を称する。

Table 1 に示すとおり、不連続面供試体の実験は、垂直拘束圧 $\sigma_n = 5.0$ MPa の条件で、不連続面内部を蒸留水で満たした状態 (Wet) で実施した。せん断変位固定条件については、ピークせん断応力付近で 2 週間固定したほか、残留応力状態で 60 s ~ 11,500 s の間で変位固定時間を変えながら、7 段階でせん断変位を固定させた。

平滑面供試体の実験は、垂直拘束圧 $\sigma_n = 3.0$ MPa, 7.0 MPa の 2 条件とし、各拘束圧下において不連続面内部を蒸留水で満たした場合 (Wet) と乾燥させた場合 (Dry) の計 4 ケース実施した。平滑面供試体の実験は 1 つの供試体を繰り返して使用した。せん断変位固定条件については、全てのケースにおいて残留応力状態で 60 s ~ 600 s 程度の短期間の変位固定と、約 1 日程度の長期間の変位固定を実施した。短期間の変位固定は同条件で 3 回ずつ実施した。せん断時の変位速度は、いずれのケースも 0.1 mm/min である。

実験装置を Fig. 1 に示す。本装置は岩石不連続面用の一面せん断・透水試験装置^{17, 18)}で、載荷容量は、鉛直方向に 245 kN、水平方向に 196 kN である。せん断変位と垂直変位は、供試体側面に直接取り付けられた接触式変位計とターゲットにより計測する。供試体の止水は、不連続面周辺を軟質ゴムおよびゲルシートにより覆うことで行なう。実験条件を同じにするため、この止水対策は、

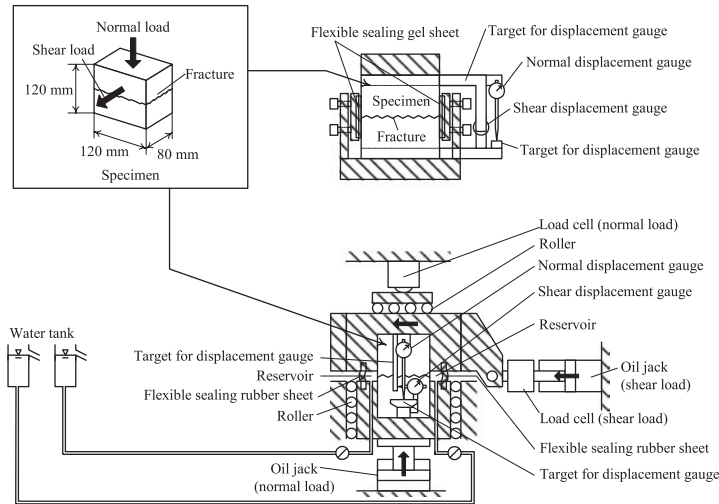


Fig.1 Schematic view of direct shear – flow testing device.

不連続面内の水の有無に拘わらず設置した。

不連続面内部を蒸留水で満たした実験 (Wet) は、Fig. 1 に示すように供試体排水境界面の水頭を等しくし、せん断期間、固定期間を通じてバルブを開放し排水条件で実施した。

2・2 実験結果

Fig. 2, Fig. 3 はそれぞれ不連続面供試体および平滑面供試体の Slide-Hold-Slide 試験によるせん断応力曲線を示す。図より、せん断応力は変位固定時に低下し、続く再せん断時に上昇してピークを示した後に、変位固定前の応力レベルに落ち着く。これは、垂直拘束圧やラフネス条件、不連続面の湿潤条件によらず、本実験の全てのケースに共通する傾向である。また、再せん断時のピークせん断応力は、変位固定直前のせん断応力よりも大きくなる。

Fig. 2 (b) は、不連続面供試体における残留応力状態付近でのせん断応力曲線を示す。この図から、再せん断時のせん断応力の増加量は変位固定時間とともに増加することが確認できる。

なお、Fig. 2, Fig. 3 より、せん断変位固定期間中も、わずかではあるがせん断変位が増加している。これは、本実験で使った計測・制御プログラムが、一方通行の変位制御を前提として組まれているためである。すなわち、せん断変位固定期間中に、ノイズ等の理由で目標変位よりも小さな変位信号が計測される場合にはせん断を進行させる方向に制御を行なうが、目標変位よりも大きな変位信号が計測される場合には、せん断を後退させる方向には制御を行なわない。これは、せん断試験中に、その場で前後に繰返しせん断が発生することを避けるための措置である。しかし、結果として、計測ノイズの片側だけを拾うことになり、変位固定で長期間放置すると正方向に変位が蓄積する。ただし、その速度は最大でも 3.0×10^{-6} mm/min 程度 (0.004 mm/day) である。

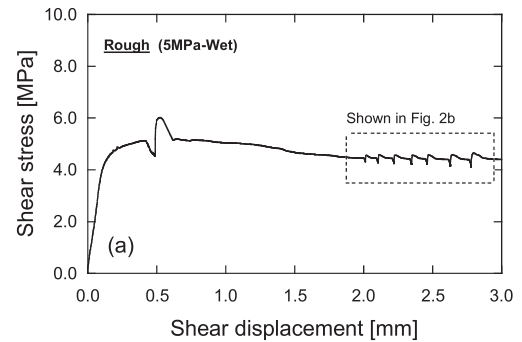
2・3 せん断強度増加現象の時間依存性

Slide-Hold-Slide 試験の結果から得られた再せん断時のせん断強度増加の時間依存性について、Dieterich の提案した次式で表される対数線形モデル式を用いて考察を行った¹⁻³⁾。

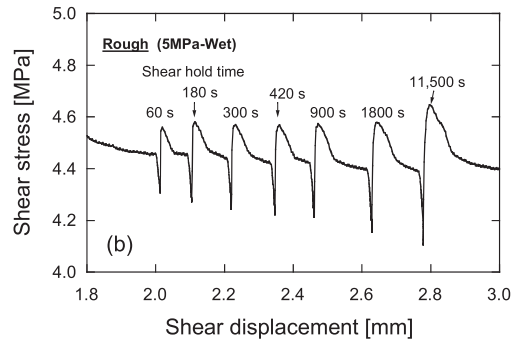
$$\tau_s = \tau_0 + A \log_{10} t_h \quad (1)$$

ここで、 t_h ：せん断変位固定時間、 τ_s ：再せん断後のせん断応力、 τ_0 ：せん断変位固定開始時 ($t_h=0$) のせん断応力、 A ：定数である。

Dieterich によると、岩石鉱物粒子の摩擦試験においてすべりと停止を繰り返す場合、すべりが停止している時間が長いほど、そ



(a) The shear stress – shear displacement curve



(b) Enlarge view around Slide-Hold-Slide points

Fig.2 Relationship between shear displacement and shear stress of rough fracture specimen.

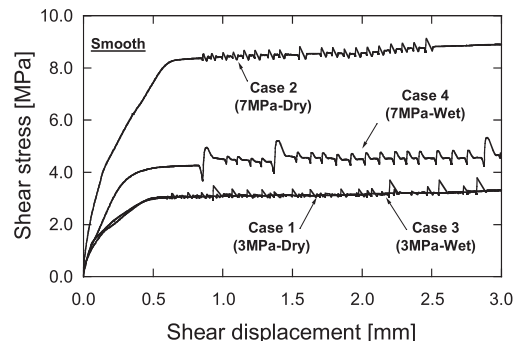


Fig.3 Relationship between shear displacement and shear stress of smooth fracture specimens.

の後の摩擦強度が増加する。岩石に応力が作用している場合、実際に接触している岩石鉱物粒子に応力が集中するため、実接触部には非常に高い応力が作用すると考えられる。実接触粒子に働くこの高い応力によって接触粒子がクリープ変形を生じ、実接触面積が時間的に広がることから、摩擦強度の時間的増加をもたらす1つの原因と考えられている¹⁻³⁾。

本研究では、Fig. 4 に示すように、式 (1) における τ_s を、変位固定後の再せん断時におけるピークせん断応力と定義した。

Fig. 5, Fig. 6 は、Fig. 2 および Fig. 3 に示した不連続面供試体と平滑面供試体での Slide-Hold-Slide 試験結果から、せん断変位固定時間 t_h とせん断変位固定前後のせん断応力の差 $\tau_s - \tau_0$ との関係を片対数グラフ上にプロットしたものである。

図より、不連続面供試体および平滑面供試体ともに 10^4 s 程度の短期間の変位固定時間によるせん断応力の増加量は、Dieterich の対数線形モデルを満足する結果となった。このことから、短期間

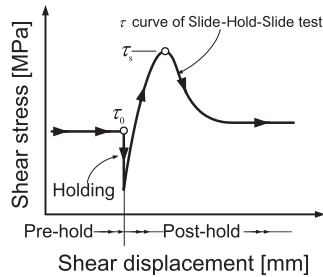


Fig. 4 Conceptual diagram of the shear stress - shear displacement relation at prehold, holding, and posthold periods.

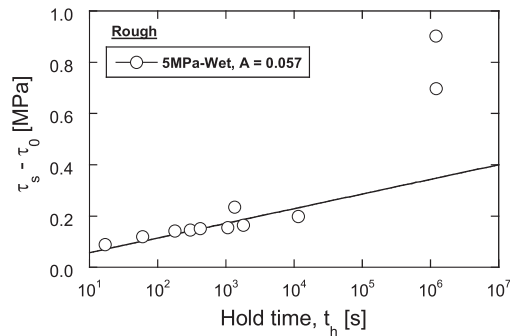


Fig. 5 Evolution of shear strength recovery with holding time of rough fracture specimen.

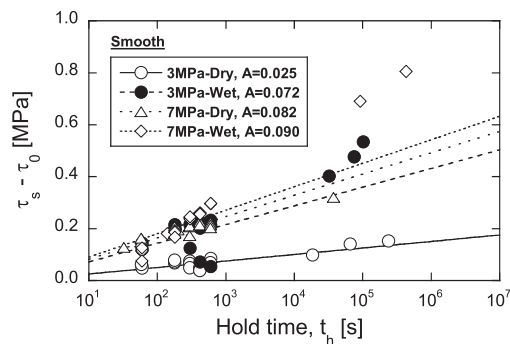


Fig. 6 Evolution of shear strength recovery with holding time of smooth fracture specimen.

の変位固定では、Dieterich が指摘しているように不連続面内の接触部のクリープ変形に起因して接触面積が増加することによりせん断強度が時間的に増加したと考えられる¹⁻³⁾。また、平滑面供試体では、垂直拘束圧が高くなれば対数線形関係の直線の傾きが大きくなることが確認できる。これは、垂直拘束圧が高くなれば接触部に作用する応力も高くなるために、クリープ変形による接触面積の増加の時間的な割合が増加するためであると考えられる。

一方、 10^4 s を超える長期間の変位固定を行った場合では、不連続面内部に水が存在しなければ、短期間の変位固定と同様に対数線形モデルを満足するのにに対し、不連続面内部に水が存在すれば、対数線形モデルを上回るせん断応力の増加量を示す結果となった。これは、不連続面内部に水が存在すれば、Dieterich の提案している接触面でのクリープ変形に加えて、さらに異なるメカニズムがせん断強度回復現象の支配的要因に加わったためであると考えられる。つまり、不連続面内部に水が存在することで、岩石-水相互作用による圧力溶解現象といった化学作用が促進し、接触面積の増加や接触部における粘着力の発現によりせん断強度が大きくなったためであると予想される。

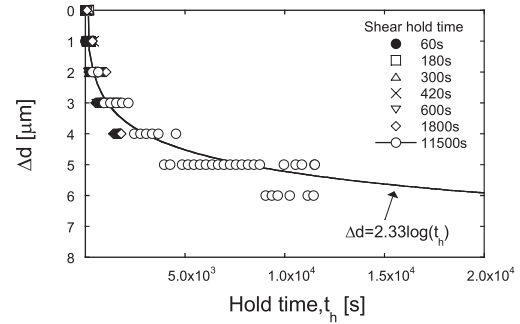


Fig. 7 Evolution of compaction with holding time of rough fracture specimen during shear holding.

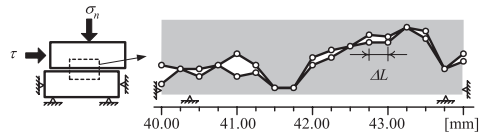


Fig. 8 Fracture model.

Fig. 7 に不連続面供試体での変位固定中の不連続面圧縮変位量と変位固定時間（約 10^4 s 間）の関係を示す。なお、垂直変位は接触式変位計（分解能：1 μm）を用いて計測している¹¹⁾。この図より、不連続面供試体では変位保持時間に依存して圧縮量が増加することが確認できる。この圧縮量の増加は、クリープ変形に起因する不連続面内接触部での接触面積増加の傍証であると考えられる。

3. 変位固定によるせん断強度増加現象のモデル化

Slide-Hold-Slide 試験で確認された変位固定によるせん断強度回復現象のうち、Dieterich の提案した接触部でのクリープ変形によるものについて、Kishida and Tsuno の岩石供試体の一面せん断挙動解析モデル¹³⁾を用いて再現することを試みた。

3・1 Kishida and Tsuno の一面せん断挙動モデル¹³⁾

Kishida and Tsuno は、自然ラフネスを有する不連続面の一面せん断挙動について、以下のような解析モデルを示した。この解析モデルは、材料条件（一軸圧縮強さ、基礎摩擦角）、载荷条件（垂直拘束圧）およびラフネス条件（壁面標高分布）を入力値として、せん断の進行に伴うせん断応力と垂直変位の変化およびラフネス標高分布の変化を出力するものである。

- Fig. 8 のように、上下面の標高がせん断方向に等間隔 ΔL で計測された自然ラフネスを有する不連続面を、垂直拘束圧 σ_n の下で単位距離 ΔL だけせん断させることを考える。
- アスペリティの頂点（すなわち標高計測点）は、上下面が接触する頂点と接触しない頂点に分類される。接触する頂点は、せん断変位に伴い傾斜角度のより大きなアスペリティの斜面に沿って乗り上がろうとするが、自然ラフネスでは一般に急傾斜のアスペリティは数が少なく応力集中により破壊してしまうため、乗り上げる傾斜角度が徐々に小さくなる。また、傾斜角度の大きいアスペリティの破壊は、数が少ないために巨視的なせん断強度の発現に直接的に寄与しない。最終的には、ある傾斜角度 α_f で乗り上がることになる。このときのすべり抵抗は接触面の摩擦角（基礎摩擦角） ϕ_b とダイレイション角 α_f の和を見かけの摩擦角とする摩擦則に従う。

$$\tau' = \sigma_n' \tan(\phi_b + \alpha_f) \quad (2)$$

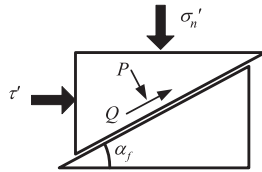


Fig. 9 Stress acting on contacted asperity.

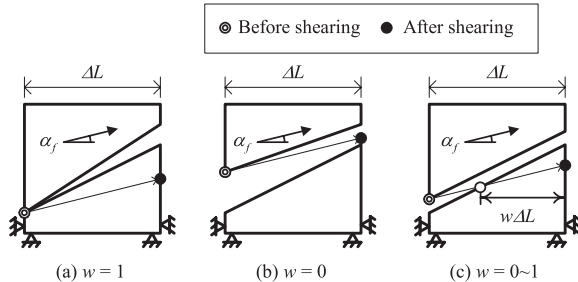


Fig. 10 Concept of contact ratio.

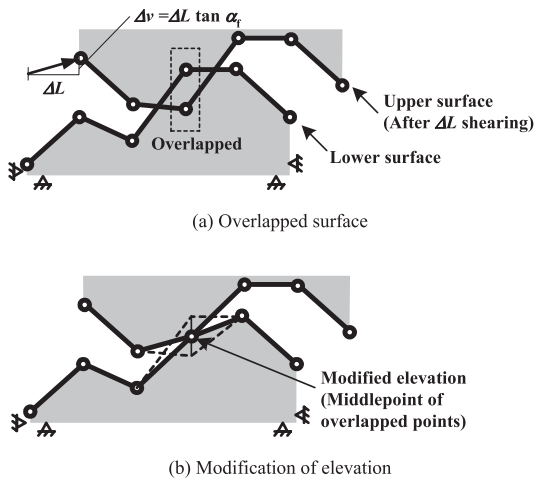


Fig. 11 Modification of overlapped surface.

ここに、 σ_n' および τ' はそれぞれ、接触アスペリティに作用する鉛直応力とすべり上がりに必要な水平応力である。

鉛直応力 σ_n' は、全アスペリティに対する接触アスペリティの割合、すなわち接触率を $1/r_f$ とすると、不連続面全体に作用する見かけの鉛直応力 σ_n を用いて次式で表される。

$$\sigma_n' = r_f \sigma_n \quad (3)$$

- c) アスペリティの破壊とすべり上がりとの境界であるダイレーション角 α_f については、式 (2)、式 (3) に従ってすべり上がった時の、接触面に作用する垂直応力 P が、材料強度（本モデルでは一軸圧縮強さ σ_c ）よりも大きい場合にはアスペリティが破壊し、一軸圧縮強さ以下になるとすべり上がることができるものとして判定する。

ここに、接触面に作用する垂直応力 P とせん断応力 Q は、Fig. 9 の幾何学的関係から、式 (1)、式 (2) による σ_n' と τ' を用いて次式で表される。

$$P = (\tau' \sin \alpha_f + \sigma_n' \cos \alpha_f) \cos \alpha_f \quad (4)$$

$$Q = (\tau' \cos \alpha_f + \sigma_n' \sin \alpha_f) \cos \alpha_f \quad (5)$$

Table 2 Calculation condition.

Normal stress [MPa]	5.0
Friction angle [°]	37.2
Uniaxial compressive stress [MPa]	40
Shear displacement at holding [mm]	2.2
Holding time [s]	60~259200

- d) 接触率 $1/r_f$ については、せん断変位 ΔL の間にアスペリティの頂点が相対する面に接触している距離から求める。すなわち、全ての頂点は、Fig. 10 に示すように、せん断変位 ΔL の間に、(a) 接触し続ける頂点、(b) 接触しない頂点、(c) せん断の途中から接触する頂点、の3種に分類できる。アスペリティの頂点が面に接触する場合のせん断方向の距離を $l = w \Delta L$ とすれば、(a) および (b) の場合は、それぞれ $w = 1$ 、 $w = 0$ である。また、(c) については、頂点の経路を直線として接触区間の水平投影を求める ($w = 0 \sim 1$)。全頂点について w の総和を取って、頂点数 N で除せば $1/r_f$ が求まる。

$$\frac{1}{r_f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \quad (6)$$

- e) せん断変位 ΔL によるダイレーション量は、 $\Delta v = \Delta L \tan \alpha_f$ である。また、 ΔL せん断後のラフネス形状について、上下面がオーバーラップする頂点については、上下面が等しく減耗することを想定し、Fig. 11 のように、重なり合う標高の midpoint に新たな頂点に来るものとする。

以上のようにして、せん断変位 ΔL ごとにダイレーション角 α_f での摩擦抵抗とラフネス標高の変化を順次求めて行くことにより、一面せん断によるせん断変位-せん断応力関係、せん断変位-ダイレーション関係を求めることができる。

3・2 変位固定期間中の不連続面圧縮のモデル化

Fig. 7 で示したように、不連続面供試体の場合、変位固定期間中に不連続面圧縮量は時間的に増加する。そこで、実験より得られた不連続面圧縮量の時間的変化を、次式を用いて近似し、前述の解析モデルに組み込むこととした。

$$\Delta d = 2.33 \log_{10} t_h \quad (7)$$

ここで Δd : せん断変位固定時からの垂直変位量、 t_h : せん断変位固定時間である。

本研究では、一面せん断挙動解析モデルを用いて、所定のせん断変位までせん断させた後、変位固定時間に対応した垂直変位量 Δd (式 (7) に従う) だけ上部供試体ラフネスデータを鉛直下向きに移動させ、その後再せん断させることにより Slide-Hold-Slide 試験を再現する。変位固定時に Δd 下向きに変位させたとき、ある座標点で上部供試体ラフネスデータの標高が下部供試体座標より下側に位置する場合は、前節 e) と同様に、その座標点での上部供試体標高と下部供試体標高との midpoint を、その点での新たな上部・下部供試体標高とした。

3・3 解析条件

Table 2 に解析条件を示す。本解析では、不連続面供試体と等しいラフネスデータを用いて検討を行った。Fig. 12 に解析に使用したモルタル不連続面供試体のラフネス標高分布を示す。ラフネスデータは、レーザー変位計を有する表面形状測定装置¹⁷⁾を用いて計測した。計測間隔 ΔL は 0.25 mm であり、供試体上下面ともに、計 151209 点 (477 点 $\times$ 317 点) の座標を計測した。

一面せん断挙動解析は、実験値との整合性を検討するために、

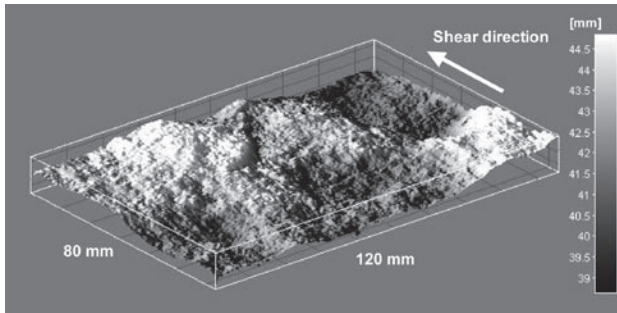
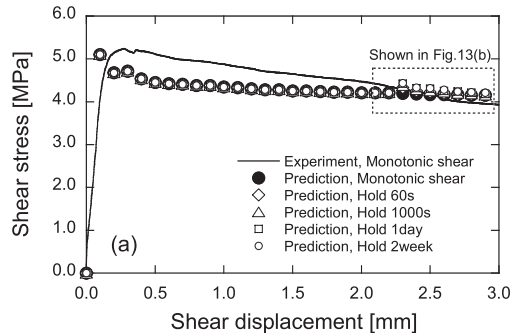
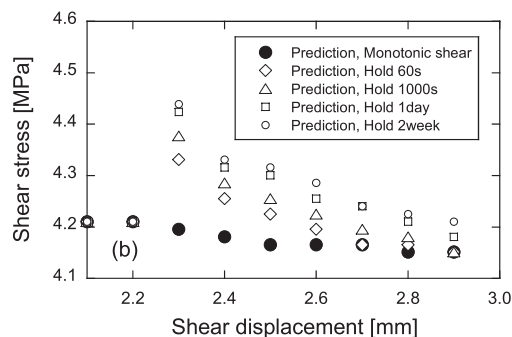


Fig.12 Elevation distribution of fracture specimen surface obtained by surface profilometry.



(a) Shear stress curve.



(b) Shear stress curve around holding point.

Fig.13 Predictions of relation between shear stress and shear displacement.

解析における垂直拘束圧 σ_n は実験条件と等しい 5.0 MPa とし、せん断変位固定は残留応力状態と想定されるせん断変位 2.2 mm で実施した。またせん断変位固定時間は、60 s ~ 1209600 s (2 週間) に設定し段階的に増加させた。

3・4 解析結果

Fig. 13 に、解析より得られたせん断応力-せん断変位関係を示す。Fig. 13 (a) より、解析結果におけるせん断応力曲線は、実験結果のせん断応力曲線と概形がほぼ一致することが確認できる。実験結果と解析結果では、ピーク強さおよび残留強度の値が一致し、強度値については再現性が十分なものであると確認できる。一方で、ピーク強さ発現時のせん断変位や軟化のプロセスにおいて、実験と解析で差異が確認できる。これらの問題は、Kishida & Sakurai¹⁹⁾ が、指摘し検討しているが、ここでは強度の議論が中心となるので、Kishida & Tsuno¹³⁾ のモデルの改良で Slide-Hold-Slide 過程の検討を行った。

一面せん断モデルにせん断固定期間中の不連続面圧縮プロセスを加えたモデルの解析結果を Fig. 13 (b) に示す。せん断変位固定

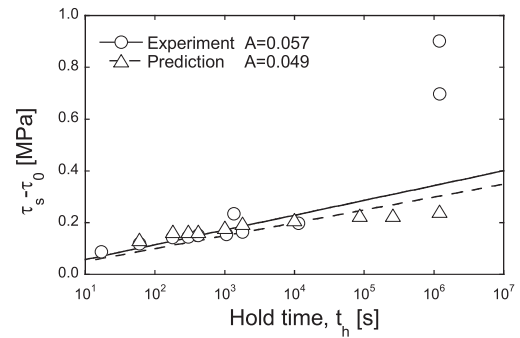


Fig.14 Comparison of evolution of shear strength recovery between experiments and predictions.

後の再せん断時において、実験結果と同様にせん断応力の増加を再現することができた。つぎに、解析結果と実験値との整合性を検討するために、解析結果に対して式 (1) を用い、実験値との比較・考察を行った。

Fig. 14 に実験および解析から得られたせん断変位固定時間 t_h と変位固定前後のせん断応力の増加量 $\tau_s - \tau_0$ の関係を示す。図より、解析結果は、式 (1) で示す対数線形上に乗ることが確認された。また、実験および解析で得られた傾き A は、それぞれ 0.057 と 0.049 であり、非常に調和的な結果が確認された。このことから、本解析モデルは、実験における約 10^4 s 程度の短期間の変位固定期間中でのせん断応力の増加現象を精度良く表現できると言える。つまり、実験における短期間の変位固定中に式 (7) で示したようにダイレーションが時間的に減少することにより接触面積が増加することで、変位固定後の再せん断時にせん断応力が増加すると考えられる。一方、約 2 週間程度の長期的な変位固定時では、解析結果と実験値では大きく異なる結果となった。すなわち、実験値では Dieterich の対数線形モデルを上回るせん断応力の増加量を示すのに対し、解析結果では、Dieterich の対数線形モデルを満足する結果となっている。この原因としては、本研究での解析モデルでは、接触部におけるクリープ変形が与えるせん断強度への影響のみを考慮しているため、長期間の変位固定中に生じると想定される岩石 - 水相互作用による圧力溶解現象等の化学的要因が与えるせん断強度への影響を考慮していないことが考えられる。

4. ま と め

本研究では、モルタルによる模擬岩石不連続面を用いた Slide-Hold-Slide 試験を実施することにより、不連続面せん断過程における接触状態の保持が、せん断強度特性に与える影響を詳細に検討した。その結果、ラフネスを有する供試体および平滑面の供試体ともに再せん断時に明確なせん断応力の増加が確認された。また、60 s ~ 10^4 s 程度の短期間の変位固定時では不連続面内部の水の有無に関わらず、Dieterich の対数線形モデルと同様にせん断強度が変位固定時間に対して対数線形的に増加することが確認された。

一方、 10^4 s を超える長期間の変位固定時では、不連続面内部が乾燥状態の場合は、せん断強度の増加量は対数線形上に乗るものの、不連続面内部が水で飽和された場合には、せん断応力の増加は対数線形上より大きなせん断応力となることが確認された。これらの結果は、短期間のせん断変位固定では接触部でのクリープ変形などの力学的メカニズムがせん断強度増加の支配的要因であるのに対し、長期間のせん断固定時では、接触部における岩石 - 水間での化学作用が促進され、その結果粘着力の発現しせん断強度増加に繋がったと考えられる。

また、本研究で提案した保持期間中の垂直変位の変化を考慮した解析モデルでは、短期間 ($<10^4$ s) の変位固定時に確認されたせん断変位固定期間後の再せん断時におけるせん断応力の増加現象を精度良く表現することができた。このことから、実験で確認された短期間のせん断変位固定期間におけるせん断応力増加は、接触部の力学的なクリープ変形に起因する接触面積の増加が原因であると考えられる。しかし長期間においては、実験値と大きく離れた結果となった。これは、本研究の解析モデルでは、長期間のせん断変位固定期間中に発生・促進したと考えられる岩石 - 水相互作用現象等の化学的なメカニズムによるせん断強度回復現象を考慮していないことが原因として考えられる。

今後は、より長期間の変位固定前後のせん断挙動を観察することにより、せん断強度増加に与える影響をより詳細に検討するとともに、本研究では考慮していない化学的なメカニズムを考慮し、長期変位固定時のせん断挙動を再現可能な解析モデルを構築することが必要である。

References

- 1) J. H. Dieterich: J. Geophys. Res., **77** (1972), 3690-3697.
- 2) J.H. Dieterich: Pure Applied Geophysics, **243** (1994), 283-302.
- 3) J.H. Dieterich: J. Geophys. Res., **84** (1979), 2161-2167.
- 4) P. K. Weyl: J. Geophys. Res., **64** (1959), 2001-2025.
- 5) A. Revil: Geophys. Res. Lett., **26** (1999), 255-258.
- 6) T. Dewers and A. Hajash: J. Geophys. Res., **100** (1995), 13093-13112.
- 7) B.P. Elias I and A. Hajash: Geology, **20** (1992), 451-454.
- 8) B. Bos, C.J. Peach and C.J. Spiers: J. Geophys. Res., **105** (2000), 16699-16717.
- 9) K. Kanagawa, S.F. Cox and S. Zhang: J. Geophys. Res., **105** (2000), 11115-11126.
- 10) H. Yasuhara, D. Elsworth and A. Polak: J. Geophys. Res., **109** (2004), B03204.
- 11) H. Yasuhara, C. Marone and D. Elsworth: J. Geophys. Res., **110** (2005), B06310.
- 12) C. Marone: (1998), Annu. Rev. Earth Planet. Sci., **26**, pp.643-696.
- 13) K. Kishida and K. Tuno: J. Geotech. Eng. (III), JSCE, **680** (2001), 245-261.
- 14) R. Tse and D. M. Cruden: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **16** (1979), 303-307.
- 15) Y. Xianbin and B. Vayssade: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **28** (1991), 333-336.
- 16) N. Barton: Engineering Geology, Vol. 7, No. 4, pp.287-332 (1973).
- 17) T. Yano, Y. Ohnishi, S. Nishiyama, and R. Saito: J. Geotech. Eng. (III), JSCE, **792** (2005), 159-174.
- 18) Y. Ohnishi, T. Yano, H. Iwamoto, and N. Nishikawa: J. Geotech. Eng. (III), JSCE, **645** (2000), 307-320.
- 19) K. Kishida and Y. Sakurai: Soils and Foundations, JGS, **47-3** (2007), 613-628.