

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14030

研究課題名（和文）フラクチャーの劣化・回復特性の構成則で解き明かす地震発生のメカニズム

研究課題名（英文）Exploring generation mechanism of earthquake through a constitutive law for rock incorporating decay and healing of fracture

研究代表者

岸田 潔（Kishida, Kiyoshi）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20243066

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来、速度・状態依存による摩擦のみに着目してきた地震工学における断層すべりを、三軸せん断-保持-せん断試験により、岩石摩擦（岩石内のせん断帯の形成とその摩擦挙動）ダイレイション 間隙水圧（有効応力）のインタラクションの帰結として再検討・再評価し、せん断-保持-せん断過程で発現する強度回復・劣化現象を限界状態モデルの拡張で再現することを目的とする。さらに、開発した構成モデルを用いて、ダイレイタンス挙動や間隙水圧の消散過程が、断層滑りの繰返しメカニズムにどのような影響を与えるのか、数値実験により検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The fault slip has been considered as the rate- and state dependent friction in the seismology. In this research work, the Slide-Hold-Slide triaxial on sedimentary rock has been carried out and the friction law has been reconsidered and re-estimated as the interaction of the dilatancy behavior and pore pressure (effective stress). A continuum constitutive model for rocks incorporating the healing and decay of structure considering variable strength and dilatancy based on critical state theory has been developed. The proposed model is verified with experimental slide-hold-slide triaxial tests on soft sedimentary rock and the potential applications of the proposed model in the numerical simulation of faulting have been discussed.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 岩盤工学 フラクチャーの劣化と回復 三軸試験 構成則 断層の繰返しメカニズム

1. 研究開始当初の背景

これまで多くの研究者が、地震の発生要因である既存断層の摩擦滑りを検討してきた。Dieterich¹⁾ (J. Geophys. Res., 1979) の速度・状態依存摩擦則 (RSF 則) はその代表的成果であり、滑り速度を段階的に変化させた摩擦試験でのせん断応力の刻々の変化をよく再現した。RSF 則によれば、摩擦面の強度を滑り速度と固着状態の関係で示すことが可能で、図-1 のような摩擦運動の多様性を表現するモデルとして断層挙動の考察に用いられてきた。その後、RSF 則は断層ガウジのせん断 (Slide) - 保持 (Hold) - せん断 (Slide) 試験 (SHS 試験) を通じて確認されている (例えば、Scholz (2002)²⁾)。しかし、過去の SHS 試験は一面せん断条件で実施されており、実地盤の地殻応力や間隙水の影響は考慮できない。そこで本研究では、これらの相互作用を特定できる三軸応力下で、残留状態までせん断した後、残留状態で SHS 試験を実施し、拘束圧の影響も含めて検討し、断層の繰返し挙動のメカニズムの解明を試みる。

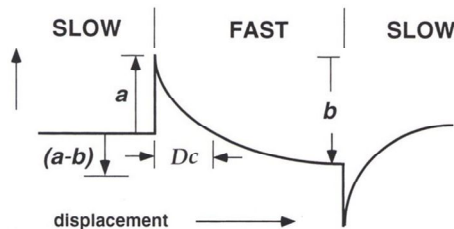


図-1 Dieterich¹⁾の実験で示された断層運動の多様性

2. 研究の目的

従来、速度・状態依存摩擦のみに着目してきた地震工学における断層滑りについて、三軸せん断(Slide)-保持(Hold)-せん断(Slide)試験により、岩石摩擦(岩石内のせん断帯の形成とその摩擦挙動)ダイレーション 間隙水圧(有効応力)のインタラクションの帰結として再検討・再評価し、SHS 過程で発現する強度回復・劣化現象を限界状態モデルの拡張で再現する。さらに、開発した構成モデルを用いて、ダイレイタンシー挙動や間隙水圧の消散過程が、断層滑りの繰返しメカニズムにどのような影響を与えるのか、数値実験により検討する。

3. 研究の方法

本研究では、力学特性を調べるため三軸せん断(S)-保持(H)-せん断(S)試験を凝灰岩と砂岩(ベレア砂岩)において実施した。さらに、種々の拘束圧、温度条件の下で三軸せん断 保持 せん断 (SHS) 試験を実施し、SHS 過程でのせん断帯の回復・劣化現象を観察するとともに、Dieterich の速度・状態摩擦則で試験をシミュレートし、その適用性と限界を明らかにする。試験結果を参考にして、せん断帯の結合

度合いをスカラー変数として、その回復と劣化の発展則とそれを組み込んだ構成モデルを定式化する。構成モデルの妥当性は試験のシミュレーションにより検証する。さらに、提案モデルによる数値実験を実施し、断層のアスペリティの劣化・回復や断層の繰返しせん断メカニズム(地震発生の素過程)の合理的な説明を試みる。

4. 研究成果

凝灰岩において、種々の拘束圧、温度条件において、SHS 型三軸せん断試験を実施した。拘束圧が正規圧密領域では全ての試験ケースで強度回復現象は確認できなかった。これに対して、拘束圧が過圧密領域では一部のケースでは強度回復現象が確認できた。拘束圧が過規圧密領域である条件では、拘束圧が大きい条件ほど、強度回復現象が発生する確率が高くなる傾向を示した。拘束圧が正規圧密領域では、実験後の供試体を確認すると明瞭なせん断帯は形成されておらず、中心部がふくらむ樽型の破壊形状を示し、拘束圧が過圧密領域である条件では明瞭なせん断面が入る破壊形状を示した。強度回復現象は、拘束圧が正規圧密領域か過圧密領域かによって発生状況が異なるため、破壊形状が強度回復現象発生に影響を与えると考える。これは、明瞭なせん断面が生じる破壊形状の場合では、せん断面に变形が集中するため、圧力融解現象が発生しやすく、強度回復現象が生じやすいと考察する。凝灰岩で人工的に切断面を挿入した場合でも、高拘束圧下では樽型の变形を生じ、強度回復現象は確認できなかった。一方、有効拘束圧が 0.7 MPa の実験では、保持時間に対して強度回復量が確認され、図-2 に示す通り Dieterich 型の保持時間に対して強度回復量が対数線形的に比例することが確認できた。一方、0.3 MPa では、そのような関係が実験の保持時間の範囲では確認できなかった。

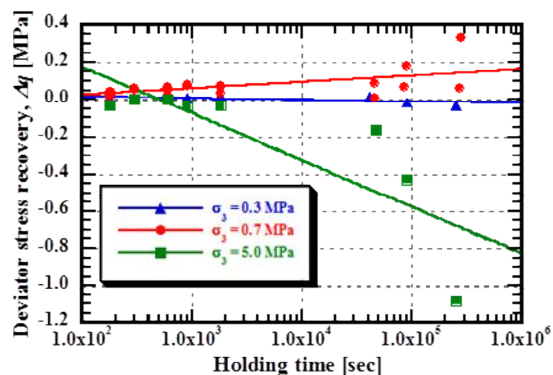


図-2 人工的なき裂面を挿入した凝灰岩での強度回復量と保持時間の関係

Intact なペレア砂岩では、明瞭な強度回復現象は確認されなかった。実験後にμフォーカス X線 CT で供試体の内部構造の撮影を行った。図-3 から、脆性的な破壊が生じ、明瞭なせん断帯が発生しなかったことが確認できる。その結果、SHS 過程において強度回復が発生しなかったと考える。

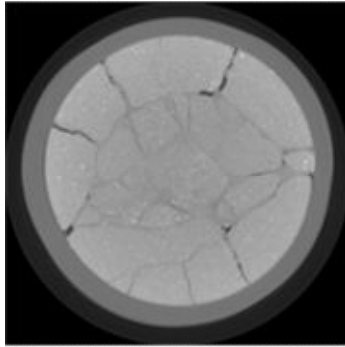


図-3 実験後のペレア砂岩の CT 画像

一方、人工的なき裂面を有するペレア砂岩では、図-4 で示す通り強度回復現象が確認された。図-4 より、保持時間に対して強度回復量が対数線形的に比例して増加すること、拘束圧の増加に伴いその増加率は大きくなること、が確認できる。また、温度条件を 20 と 60 で拘束圧 3.0 MPa で実験を実施したが、1000 秒までの保持時間であれば、強度回復量の出現に差異は確認できないが、それ以降の保持時間では、明らかに加温条件下の方が大きな強度回復量が表れることが確認できた。

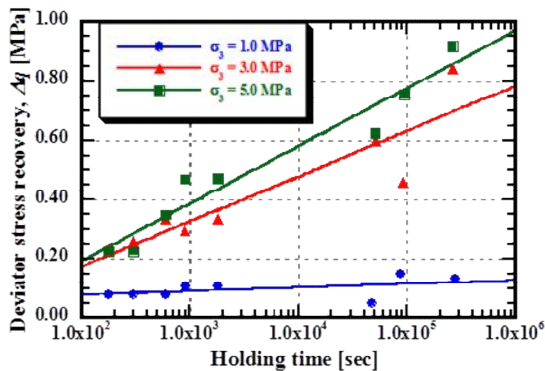


図-4 人工的なき裂面を挿入したペレア砂岩での強度回復量と保持時間の関係

断層摩擦滑りの速度・状態依存摩擦則¹⁾ (Rate- and State-dependent Friction law) を用いた検討を行った。断層摩擦滑りモデルとして代表的に用いられる Stick-Slip 現象を速度・状態依存摩擦則では以下のように表現する。

$$\tau/\sigma = \mu = \mu^* + A \ln(V/V^*) + B \ln(V^*\theta/L) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - V\theta/L \quad (2)$$

ここで、 τ , σ , μ , V , V^* は、せん断応力、垂直応力、摩擦係数、せん断速度、代表せん断速度である。また、 θ は状態変数、 L はせん断速度変化後に元の摩擦状態に戻るまでの距離となる。 A , B は定数である。Nakatani and Scholz³⁾ は、様々な材料の摩擦係数が、保持時間にも対数線形的に増加することを実験的に理解しており、再せん断時の摩擦強度増分と元の摩擦強度の差分を次のように示している。

$$\mu(t) = \mu_0 + b \ln\left(\frac{t}{t_c} + 1\right) \quad (3)$$

ここで、 μ_0 はせん断速度を変化させる前の摩擦係数、 t_c はカットオフ時間、 b は定数である。ここでは、式(1)において $V = 0$ と考えたケースに相当する。もし t_c より短い時間であれば、摩擦強度や摩擦係数に時間依存性が表れないとされている。

本研究では、 V^* を定常滑り状態でのせん断速度 ($0.007 \text{ mm/min} = 7 / 60000 \text{ mm/sec}$) とすると、式(3)より $\mu(t) - \mu_0 = b \ln(t/t_c + 1)$ は強度回復量に相当すると考えることができる。人工的な切断面を有するペレア砂岩を用いて実施した、温度条件 20°C 、拘束圧条件が 3.0 MPa, 5.0 MPa の二つの実験に対して、 $b \ln(t/t_c + 1)$ により近似した保持時間-強度回復量関係を図-5 に示す。

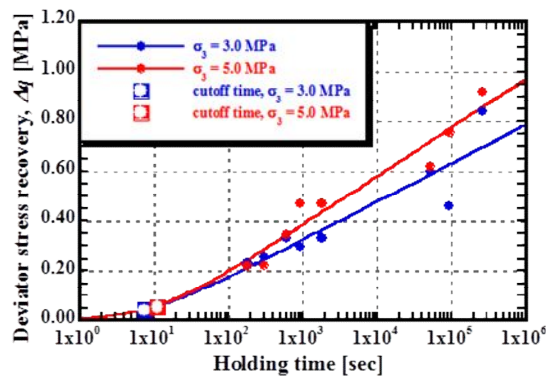


図-5 人工的なき裂面を挿入したペレア砂岩での強度回復量と保持時間の関係(20)

$b \ln(t/t_c + 1)$ による近似と Dieterich^{1), 4), 5)} の対数線形近似との明確な差異は確認されなかった。カットオフ時間に関しては、拘束圧条件が 3.0 MPa の実験 ($t_c = 7.60 \text{ s}$) と 5.0 MPa の実験 ($t_c = 11.2 \text{ s}$) では、非常に近い値となり、拘束圧依存性は確認できなかった。

つぎに、拘束圧条件 3.0 MPa、温度条件が 20°C と 60°C の 2 つの実験に対して、 $b \ln(t / t_c + 1)$ により近似した保持時間-強度回復量関係を図-6 に示す。 $b \ln(t / t_c + 1)$ による近似の方が、Dieterich^{1), 4), 5)}の対数線形近似より、相関性が僅かに高くなることを確認された。また、カットオフ時間は温度条件が 20°C の実験 ($t_c = 7.60$ s) の方が、温度条件が 60°C の実験 ($t_c = 262.0$ s) よりも短く、低温条件下の方が早い段階で強度回復が発生していることが確認できる。強度回復の一因が圧力融解であるならば、低温低拘束圧下の方が早い段階で強度回復が発生するのは不自然である。これは、保持時間が比較的短い場合の強度回復量が小さいことが要因であり、供試体の繰返し使用が原因の可能性もある。

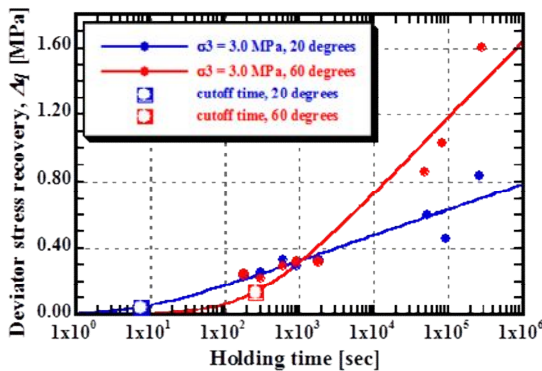


図-6 人工的なき裂面を挿入したペレア砂岩での強度回復量と保持時間の関係(20 と 60 の比較)

Kikumoto, et.al⁶⁾の限界状態面モデルを参考に、保持による構造の回復と、せん断による構造の劣化モデルを提案した。また、Samuelson, et.al⁷⁾のせん断速度と摩擦係数の関係を参考に、保持挙動における応力緩和モデルを提示している。

ここでは、Kikumoto, et.al⁶⁾の限界状態面モデルを用いて凝灰岩や人工的なき裂面を有するペレア砂岩のシミュレーションを行った。その際、式(4)に示すように、降伏関数に状態の変化を表すパラメータを導入した。

$$\frac{d\psi}{1+e_0} = -L(\psi) \left| d\varepsilon_{ij}^p \right| + Q(x) \quad (4)$$

さらに、Dieterich^{1), 4), 5)}の対数線形の関係より得られたパラメータから式(4)中の関数 Q を定義している。

実験結果よりパラメータの初期せん断における軸差応力や体積ひずみの挙動は概ね実験結果に則した結果が得られたが、ひずみ軟化挙動における軸差応力や体積ひずみの挙動は実際の挙動とは異なる値を示した。SHS 挙動のシミュレーションでは、実験に則したモデルを

構築し、強度回復現象に関しては再現可能となった。シミュレーションによる強度回復と保持時間の関係を図-7 に示す。

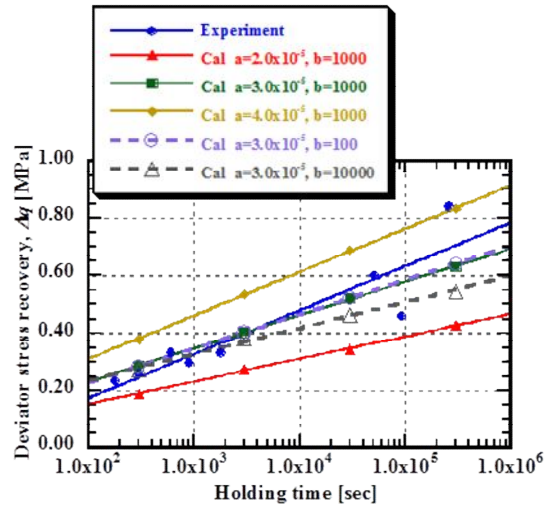


図-7 シミュレーションによる強度回復量と保持時間の関係

< 引用文献 >

- 1) Dieterich, J. H.: Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, *JGR*, 84(B5), 2161-2168, 1979. DOI: 10.1029/JB084iB05p02161
- 2) Scholz, C. H.: *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge, 2002.
- 3) Nakatani, M. and C. H. Scholz. 2004. Frictional healing of quartz gouge under hydrothermal conditions; 2. Quantitative interpretation with a physical model, *J. Geophys. Res.*, 109: B07202.
- 4) Dieterich, J. H.: Time-dependent friction in rocks, *JGR*, 77(20), 3690-3697, 1972. DOI: 10.1029/JB077i020p03690
- 5) Dieterich, J. H.: Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties, *Pure and Applied Geophysics*, 143(1), 283-302, 1974.
- 6) Kikumoto, M., Muir Wood, D. and Russell, A. : Particle crushing and deformation behavior, *Soils and Foundations*, 50(4), 547-563, 2010. DOI: doi.org/10.3208/sandf.50.547
- 7) Samuelson, J., Elsworth, D., and Marone, C. : Influence of dilatancy on the frictional constitutive behavior of a saturated fault zone under a variety of drainage conditions, *Journal of Geophysical Research*, 116, B10406, 2011. DOI: 10.1029/2011JB008556

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計4件)

Sakai, S., Yano, T., Yasuhara, H., Ohno, M., Kishida, K.: Estimation on SHS Process Strength Recovery through Rock Specimen Included Artificial Cutting Plane, *Proc. Of*

the 29th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, 263-266, 2016.

Vu, P.Q.N., Kikumoto, M., Yasuhara, H., Kishida, K.: Critical State Modeling of Sedimentary Rock Incorporating Healing and Decay of Rock Structure, *Proc. of 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA-2016-115, 2016. 査読有

<https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2016-115>

岸田 潔, 酒井 慎治, 矢野 隆夫, 安原 英明, 大野 正登, 菊本 統: 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, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 188-193, 2016.

酒井 慎治, 矢野 隆夫, 安原 英明, 岸田 潔: き裂面を有する凝灰岩の SHS 型三軸せん断試験による強度回復現象の評価, 第 50 回地盤工学研究発表会, 499-500, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸田 潔 (KISHIDA, Kiyoshi)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20243066

(2) 研究分担者

菊本 統 (KIKUMOTO, Mamoru)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション

研究院・准教授

研究者番号: 90508342

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()