

速度・状態依存摩擦則を用いた

モルタル不連続面の Slide-Hold-Slide 型一面せん断試験結果の一考察

京都大学大学院工学研究科	学生会員	○	津田 直弥
愛媛大学理工学研究科	正会員		安原 英明
京都大学工学研究科	正会員		矢野 隆夫
京都大学工学研究科	正会員		岸田 潔

1. はじめに

岩盤不連続面のせん断応力保持に伴う強度回復現象に関しては、モルタル不連続面供試体でのせん断-保持-せん断(Slide-Hold-Slide)型一面せん断試験を実施し、Dieterich^{1)~3)}の示した対数線形モデルを用いて、せん断応力の回復量を評価してきた⁴⁾。さらには、温度条件がせん断応力の回復量に及ぼす影響について検討を行ってきたが、明瞭な差異はみられなかった⁵⁾。

本研究では、文献 4),5)の実験結果に、Dieterich²⁾によって提案された速度・状態依存摩擦則(RSF 則)を適用し、考察を行った。

2. 実験方法と条件

本実験で用いた一面せん断試験装置の概略図を図 1⁵⁾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し、加温した水を流すことで、供試体を温められる機能を付加した。

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、常温での実験を行った。一方、Case-2 ではヒーターを使用し、加温を行った。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。

3. RSF 則の実験への適用と考察

RSF 則²⁾を式(1)に示す。

$$\tau = \Phi + A \ln(V/V_*) \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、 Φ は摩擦強度、 V はせん断速度、 V_* は任意のせん断速度、 A は定数である。Dieterich^{1),2),6)}は、実験によって摩擦強度 Φ を 3 ケースに分類している。本研究では、文献 5)の実験結果にこの 3 ケースの適用を試みる。

式(2)は、静摩擦強度が静止接触時間の対数に比例して増加することを示す。

$$\Phi(t) = \Phi_* + B \ln(t/t_c + 1), \text{ for } V = 0 \quad (2)$$

ここで、 Φ_* は $V = V_*$ の時の摩擦強度、 t は静止接触時間、 t_c はカットオフ時間、 B は定数である。カットオフ時間は、 t が t_c より小さい時に、 Φ の時間依存性がなくなることによって由来する^{1),6)}。本研究において、 V_* を定常滑り状態でのせん断速度とすると $\Phi(t) - \Phi_* = B \ln(t/t_c + 1)$ はせん断応力回復量に相当すると考える。

図 2 に、保持時間とせん断応力回復量の関係図を示す。 $B \ln(t/t_c + 1)$ での近似は、Dieterich^{1)~3)}の対数線形近似よりも高い相関性を示した。カットオフ時間は、加

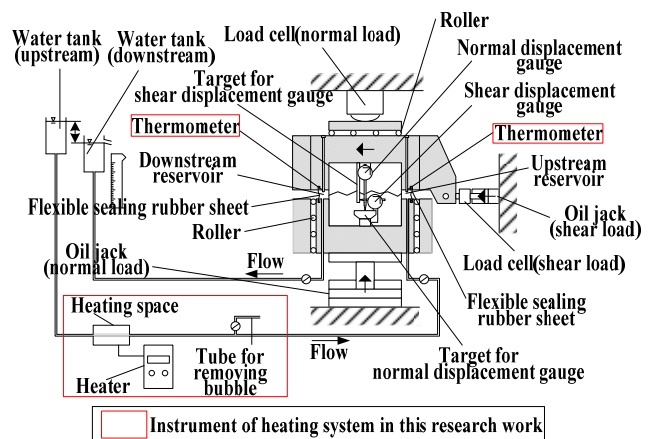


図 1 加温型一面せん断試験装置の概略図⁵⁾

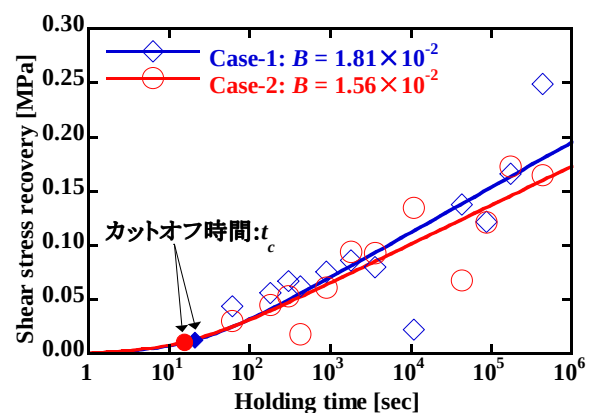


図 2 保持時間 - せん断応力回復量関係図

キーワード 岩盤不連続面, SHS 型せん断試験, 速度・状態依存摩擦則, 加温

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1 京都大学工学研究科都市社会工学専攻 TEL 075-383-3269

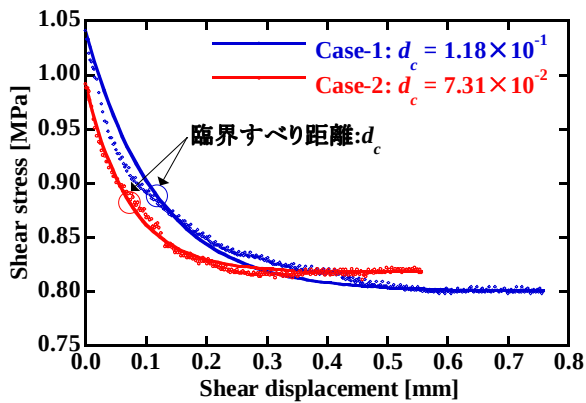


図3 5日間保持後のせん断距離 - せん断応力関係図

温($t_c = 15.25$ sec)が常温($t_c = 20.85$ sec)よりも短く、高温下の方が早い段階で強度増加が発生していることが確認できる。

式(3)は、滑り距離とともに強度が静摩擦から動摩擦に降下していく滑り軟化を表現したものである。

$$\Phi(x) = (\Phi_s - \Phi_d) \exp(-x/d_c) + \Phi_d \quad (3)$$

ここで、 Φ_s は静摩擦強度、 Φ_d は動摩擦強度、 x は滑り距離、 d_c は臨界滑り距離である。滑り軟化は、臨界滑り距離 d_c 程度で完了するとされている^{2),6)}。本研究において、この過程は、せん断再開後の最大応力から残留状態に移行するまでの過程に相当すると考える。

図3に5日間保持後のせん断距離とせん断応力の関係図を示す。 $\tau = (\Phi_s - \Phi_d) \exp(-x/d_c) + \Phi_d$ で近似を行った結果、高い相関性を示した。臨界すべり距離は、加温のケースが常温よりも短く、高温により滑り軟化が促進されることが確認された。

式(4)は、滑り速度 V での定常状態滑りにおける摩擦強度が、速度の対数に負の依存性をもつことを示す。

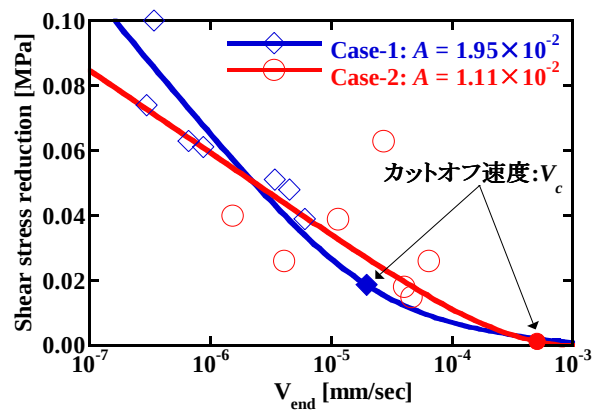
$$\Phi(V) = \Phi_* - B \ln(V/V_c + 1), \text{ for } V > 0 \quad (4)$$

ここで、 V_c はカットオフ速度である。カットオフ速度は、実接触部の平均接触時間がカットオフ時間より短い時に、 Φ の速度依存性がなくなることに由来する^{7),8)}。

式(1)と式(4)を用いて、次式が得られる。

$$\tau(V) = A \ln(V/V_*) + \Phi_* - B \ln(V/V_c + 1) \quad (5)$$

この式(5)を基に、本研究において定常滑り状態からせん断保持する過程について考える。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、この微小滑りの保持終了時から10～20%さかのぼった範囲で線形近似し、得られた傾きを保持中の速度 V_{end} と定義した。せん断保持が、滑り速度が V_* から V_{end} に変化した

図4 V_{end} - せん断応力減少量関係図

過程と捉えると、式(5)より、せん断応力減少量は、 $\tau(V_*) - \tau(V_{end}) = B \ln[(V_{end}/V_c + 1)/(V_*/V_c + 1)] - A \ln(V_{end}/V_*)$ と表すことができる。

図4に V_{end} とせん断応力減少量の関係図を示す。 $B \ln[(V_{end}/V_c + 1)/(V_*/V_c + 1)] - A \ln(V_{end}/V_*)$ で近似を行ったが、加温ケースでは高い相関性は得られなかった。カットオフ速度は、 V_{end} とせん断保持の関係から累乗で近似した式に、カットオフ時間を代入して求め、加温が $V_c = 5.05 \times 10^{-4}$ mm/sec、常温が $V_c = 1.96 \times 10^{-5}$ mm/sec であった。

4. まとめ

本研究では、RSF 則を3つのケースに分類して文献5)で実施した実験結果に適用させた。せん断応力回復量の評価では、従来の対数線形近似よりも高い相関性を示した。応力増加後の滑り軟化においても高い相関性を持ち、高温下では強度増加や滑り軟化が促進されることが確認された。今後もより多くの条件でデータを集積し、RSF 則の適用性を評価する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 24560602 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Dieterich, J.H.: *JGR*, Vol. 77, 3690-3697, 1972.
- 2) Dieterich, J.H.: *JGR*, Vol. 84, No. B5, 2161-2167, 1979.
- 3) Dieterich, J.H.: *Pure Applied Geophysics*, Vol. 243, 283-302, 1994.
- 4) Kishida, K. et al.: *IJGRMMS*, Vol. 48, 782-793, 2011.
- 5) 津田直弥 他：第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 331-336, 2014.
- 6) Dieterich, J.H.: *Pure Applied Geophysics*, Vol.116, 790-806, 1978.
- 7) Okubo, P.G. and Dieterich, J.H.: *Earthquake Source Mechanics*, 22-35, 1986.
- 8) Nakatani, M. and Scholz, C.H.: *JGR*, Vol.111, Issue B12, 2006.