

粉体摩擦における間隙流体圧上昇と不安定すべり

Increase in pore pressure and unstable slip in granular friction

東大・農（正）*山口 哲生 東大・農（非）Chengrui Chang

Tetsuo Yamaguchi*, Chengrui Chang*

*The University of Tokyo

1. はじめに

粉体層にせん断を加えたときに生じる粉体摩擦において、流体の存在は、地すべりや地震といった地球科学現象だけでなく、スラリーの攪拌・塗工などの工業プロセスにおいても重要である。本研究では、地すべり現象において重要な、すべり変位の加速を伴う不安定すべり現象を念頭に置き、リングせん断試験装置を用いて間隙流体圧を制御しながら粉体層のせん断摩擦実験を行った。また、実験結果を説明するため、地震学や金属学で用いられる Rate-and-State Friction (RSF) Model^{1),2)}を拡張した数理モデルを新たに開発し、現象のメカニズム解明を試みた³⁾。

2. 実験

2.1 試料

本実験には、地すべりサイト（和歌山県紀の川市西脇地区）から採取した粘土粒子を用いた。ふるいによって、4.75mm以上の粒子を除去した。

2.2 摩擦実験

Fig.1には、地すべり現象の模式図、リングせん断試験装置の概略図、入力値・測定値の時間変化を示した。Fig.1(a)のように、地すべりでは土壌中の特定の面にすべりが発生する。また、粉体中に水が介在し、流体圧によって実効的に法線応力が低減することで、すべり変位の加速を生じる。その状況を模擬するため、Fig.1(b)に示すリングせん断試験を行った。試験装置（京都大学防災研究所に設置）は、上部と下部に分かれている。上部は回転しないよう固定されており、粉体層の垂直荷重を作用させた。一方、下部が一回転することで封入された粉体層にせん断がかかり、上部と下部の境界付近（図中ギャップが開いている部分、実際にはゴムでシールされている）で摩擦を生じた。その際、せん断応力 τ 、法線応力 σ を一定に保ったまま流体圧 P を時間とともにゆっくりと増加させ、外周のすべり距離から変位量 δ を計測した。また、変位量の時間微分により、すべり速度およびすべり加速度を求めた。実験は、室温で行った。

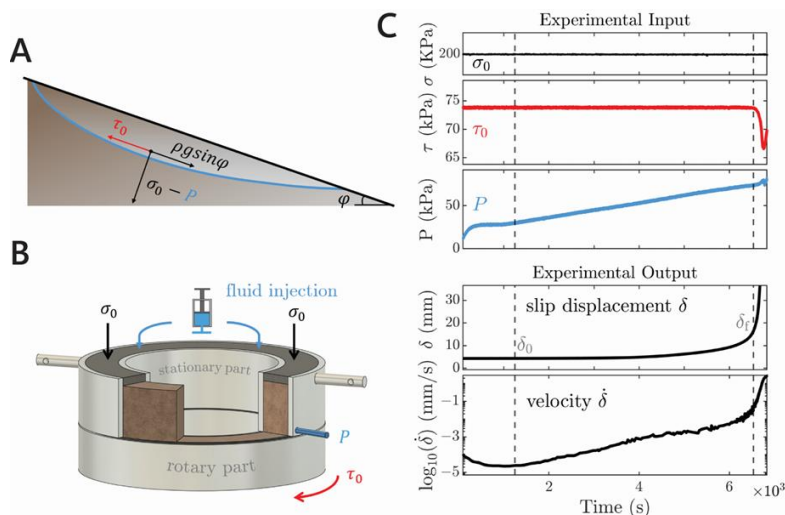


Fig. 1 (a) Schematic of landslide phenomena. (b) Ring-shear test, (c) Time evolutions for normal stress, pore pressure, shear displacement, and shear velocity.

3. 結果と考察

Fig.2(a)に、本実験で得られた典型的なすべり変位の時間変化、および、すべり速度—すべり加速度曲線を示した。フレッシュな試験体を用いた場合（A）、一度せん断試験を行った試験体を用いた場合（B）の両方において、次第にすべり変位が増大する結果が得られたが、すべり変位速度—変位加速度曲線には異なる振る舞いが見られた。すなわち、

(A) の場合には、初期に V に比例、後期に V の二乗に比例する振る舞いが見られた一方、(B) ではすべての時間帯

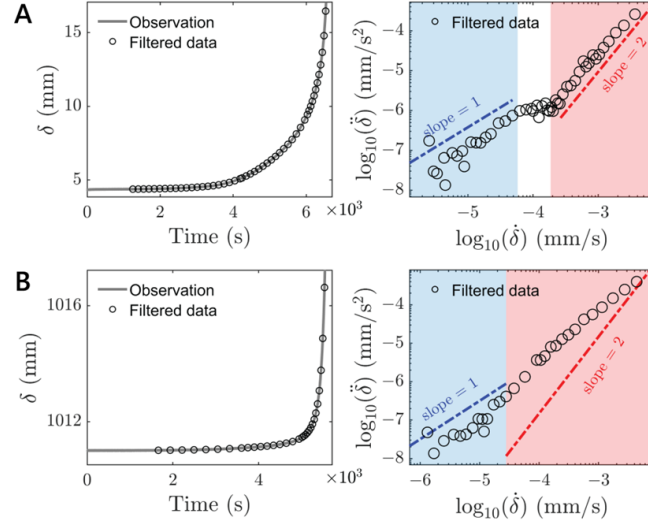


Fig. 2 Time-displacement curves and log-log plots for acceleration versus velocity from representative experiments: Sample undergoing the first-time shear (a) and pre-sheared sample subjected to repeated shear (b).

において、ほぼ V の一乗に比例する振る舞いが観察された。とくに、A の挙動は、粉体層があるすべり距離を経験したところすべり挙動が質的に変化することを示しており、興味深い結果であると言える。

4. 理論

最後に、実験結果を説明するため、摩擦に関する Rate-and State Friction Model^{1),2)}を拡張した理論を構築した。摩擦係数 f の表式、および、状態変数 θ の発展則は以下の通りである。

$$f(V, \theta) = \frac{\tau_0}{\sigma_0 - P} = f_0 + a \ln\left(\frac{V + V_{th}}{V_{th}}\right) + b \ln\left(\frac{\theta}{\theta_{th}}\right), \quad (1)$$

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

ここで、 V はすべり速度、 τ_0 , σ_0 , P はそれぞれせん断応力、法線応力、間隙水圧であり、 V_{th} , θ_{th} はそれぞれ特徴的なすべり速度、状態変数である。 a , b はともに正の定数であり、摩擦係数の振る舞いを表す代表的なパラメータである。また、 L は特徴的なすべり距離を表す定数である。式(1), (2)を用い、応力一定の条件下、慣性項が無視できるとして式変形を行うことで、漸近的な挙動として以下の結果が得られた。

$$\frac{dV}{dt} \sim \begin{cases} V & (V \ll V_{th}) \\ V^2 & (V \gg V_{th}) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)に示されたすべり速度とすべり加速度との関係は、Fig.2(a)に示された実験結果をよく再現している。

5. まとめ

本研究では、地すべりを模擬した粉体摩擦実験、および、実験結果の再現を意図した摩擦理論の構築を行った。すべり速度—すべり加速度関係に見られる過渡的な振る舞いは、RSF Model を拡張することにより説明することができた。今後は、粉体層中のせん断挙動、とくに、せん断変形の局在化とすべり速度—加速度曲線との関係を理解するため、その場可視化実験や離散要素法 (DEM) を用いた数値シミュレーションなどを試み、現象の理解を進めていきたい。

文献

- 1) A. Ruina, Slip instability and state variable friction laws. JGR: Solid Earth **88**(B12), 10359 (1983).
- 2) H. Noda, C. Chang, Tertiary creep behavior for various rate- and state-dependent friction laws. Earth and Planetary Science Letters **619**, 118314 (2023).
- 3) C. Chang, H. Noda, Q. Xu, D. Huang, T. Yamaguchi, Slow-to-fast Transition and Shear Localization in Accelerating Creep of Clayey Soil, Geophys. Res. Lett. **51**(23), e2024GL111839 (2024).