

粘土の残留強度発現機構に関する基礎的研究

— 固体表面間の潤滑状態と摩擦の起因 —

岩手大学工学部 正会員 大河原正文
 北海道大学大学院 フェロー 三田地利之
 北海道大学大学院 正会員 金子勝比古

1. はじめに

残留強度とは、“排水せん断あるいは定圧せん断試験において、せん断抵抗がピーク値（せん断強さ）を超え、漸次低下して定常状態に達したときの値”と定義されており¹⁾、移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられている。せん断面は大変位を経験しているため、面を構成している平板状あるいは鱗片状の粘土粒子はせん断面に沿って配向し、地すべりのすべり面においても粒子配向を示す鏡肌が広く認められている。ゆえに残留状態におけるせん断とは、せん断面を境にした粘土粒子表面間あるいは粘土粒子-水との摩擦現象と理解されるが、その発現機構の解明に取り組んだ研究²⁾は極めて少ない。そこで本研究では、摩擦・潤滑および摩耗の分野を一括しているトライボロジーから粘土の残留強度の発現機構に関わる概念を整理した。

2. 摩擦係数とせん断抵抗係数

アモン・クーロンの摩擦法則では、垂直荷重 W に対する摩擦力 F の比を摩擦係数 μ ($=F/W$) としている。摩擦係数は、見かけの接触面積には関係しないものであり、摩擦を発現している固体の表面状態とその種類に関する。図1に摩擦係数 μ とせん断抵抗係数 $\tan \phi$ との関係を示す。残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ は、間隙比一定のもと（体積変化 $\Delta V \doteq 0$ ）で、破壊時に破壊面上に作用する有効垂直応力 σ' のみに依存するせん断抵抗を表す材料定数であり、Hvorslev の破壊基準における $\tan \phi_e$ に相当する³⁾。このように残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ は、排水条件によらない真の強度定数であり、応力履歴に依存しないと仮定されることから、せん断抵抗係数 $\tan \phi_r$ と摩擦係数 μ は等価と考える。

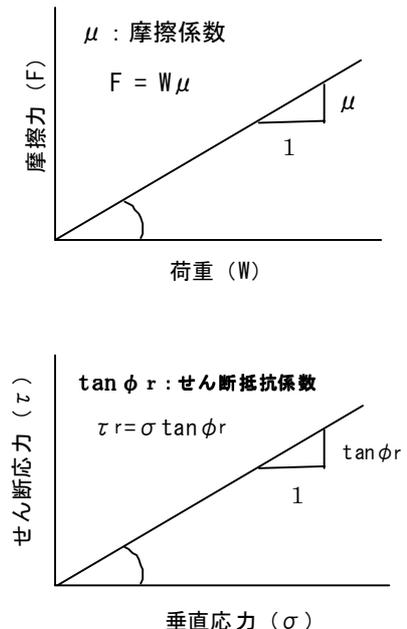


図1 摩擦係数とせん断抵抗係数

3. ストライベック曲線と各潤滑状態における摩擦の起因

トライボロジーでは、固体表面間の潤滑状態をストライベック曲線と呼ばれる特性曲線により3領域（「流体潤滑」、「混合潤滑」、「境界潤滑」）に区分している（図2）。粘土の残留状態を想定した場合、せん断面での潤滑状態は、水を流体膜とした「流体潤滑」、「混合潤滑」、「境界潤滑」のいずれかの状態にあると考えられることから、それぞれの潤滑状態に相応した残留強度を発現しているものとする。

「流体潤滑」では、せん断面は流体膜で完全に分離され、ここでの摩擦は流体膜の粘性または粘弾性によって決まる。流体の粘性には、ニュートン粘性 ($\tau = \eta V$) と非ニュートン粘性があるが、残留強度 (τ_r) とせん断速度 (V) とは対数比例を示すことが知られており⁴⁾、このことはせん断面間の流体膜が非ニュートン粘性（アイリング粘性）であることを示している。

キーワード：残留強度，摩擦，トライボロジー

連絡先：〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部建設環境工学科 Tel/Fax 019-621-6445

「混合潤滑」では、「流体潤滑」と「境界潤滑」が混在している状態で、互いの表面が接近しているため混合潤滑に特有の摩擦現象として表面の凹凸のかみ合いが生じていると考えられる。かみ合い機構には「凹凸説」,「凝着説」,「掘り起こし説」の3説がある(図3)。「凹凸説」とは、1つの突起が相手の突起や斜面を滑り上がる時に要する力の摩擦方向成分を摩擦力とする説で、接触部の摩擦はないものとする。「凝着説」とは、接触した突起間に作用する凝着力に逆らって突起を摩擦方向に動かして、接触部をせん断するのに要する力を摩擦力とする考え方である。「掘り起こし説」とは、硬い突起が柔らかい材料を引っ掻いて進むのに要する力を摩擦力とする考えである。粘土の残留状態を想定した場合、これら3説は独立したのではなく、一連のすべり摩擦プロセスの各段階における摩擦の起因として考えるべきものである。

「境界潤滑」では、流体膜の厚さが数分子層以下と非常に薄くなり、一部では凸部同士の固体接触も起きている。ここでの摩擦は、粘土鉱物と水との界面電気化学的作用が摩擦の主な原因と考える。すなわち、①静電力、②粒子全体に作用する分子間力、③水和力、に起因した相互作用である。

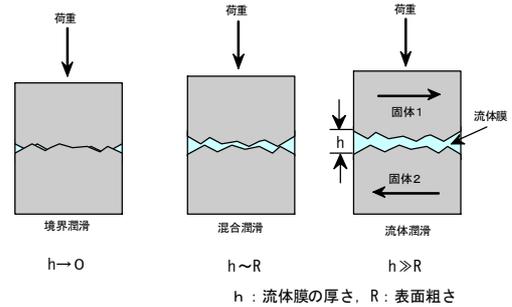
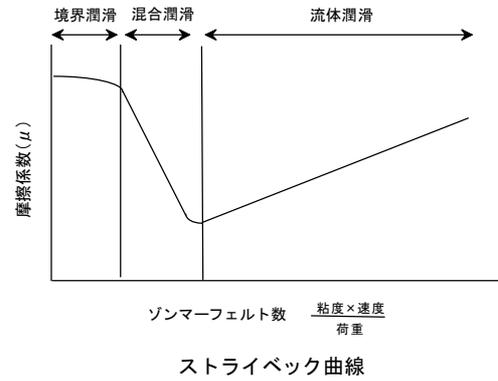
4. まとめ

粘土の残留強度の発現機構を、トライボロジーから面の潤滑状態に応じて整理すると次のようである。

- ①流体潤滑：流体膜の粘着作用（非ニュートン粘性）
- ②混合潤滑：①，②の混在，表面凹凸の「かみ合い機構」が作用
- ③境界潤滑：粘土鉱物の界面電気化学的性質による固体-流体膜間の相互作用
一部，表面凸部同士の固体接触による凝着作用

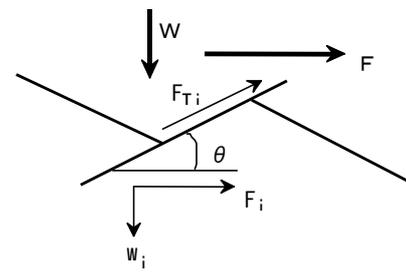
<参考文献>

- 1)土質工学標準用語集，地盤工学会，1996.
- 2)大河原・三田地・棚田：粘性土の残留強度発現機構に関する基礎的研究，第34回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.463-464,1999.
- 3)三田地・九田・大河原：全自動繰り返し一面せん断試験装置の開発と安定解析用強度パラメータの決定，第39回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.265-268,2000.
- 4)鈴木素之：リングせん断試験による土の残留強度に関する研究，信州大学博士論文,1998.



各潤滑状態に対する摩擦形態

図2. ストライベック曲線と潤滑状態

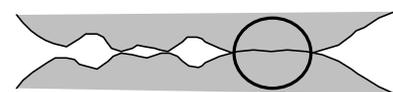


$$F_{Ti} = W_i \cdot \sin \theta \quad F_{Ti} = F_i \cdot \cos \theta$$

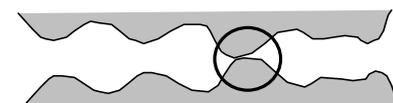
$$F_i = W_i \cdot \tan \theta$$

$$F = \sum W_i \cdot \tan \theta = \tan \theta \sum W_i = W \cdot \tan \theta$$

凹凸説



凝着説



掘り起こし説

図3 表面凹凸のかみ合い機構