

金沢大学工学部 正員 西田義親
鹿島建設 KK 正員 O松村夏樹
金沢大学工学部 正員 八木則男

1. はじめに

高活性な粘土鉱物として代表的なモンモリロナイトの有効摩擦角 ϕ_e は、他の比較的低活性なカオリン系、イライト系の粘土に比べ極端に小さく、わずか2〜3度である。この小さな値が わずか数度の傾斜面が安定を保持し得ないこと（地すべり）の根本的理由であろう。しかし、いかに粘土鉱物種が異なっても、本来その物理摩擦角 ϕ 自体は それほど差異があるとは思われない。それゆえ飽和したモンモリロナイトの ϕ_e が、他の飽和粘土に比べ、かくも大きく減少する原因は一体何であろうという素朴な疑問が生じて来る。本文はこの理由を知る意味で、摩擦の根本である凝着摩擦説の立場より、Hvorslevの有効摩擦角(ϕ_e or ϕ_r)の意味についで物理化学的な手法を取り入れて行なった若干の考察と実験の概要を述べたものである。

2. 混合摩擦モデルより見た有効摩擦角について

飽和した粘土系の2個の粒子間のみの摩擦を考える場合、Fig-1のような混合摩擦モデルが適用されよう。吸着層と摩擦体で支持される力を P_s 、潤滑液を通して支持される力を P_f とすれば $P_s = \sigma - P_f$, $P_f = U/A_f$ と示されここに、 A_f は潤滑液の占める面積である。粘土の間隙水は、どこからどこまでが吸着水であるとの区別はできない。しかし粘土粒子表面より10Å程度の水分子は強く吸着されており、この吸着エネルギーは化学吸着に近い4000 cal/molに達することもあり、それ以上の吸着水層とは区別される。著者らは、この固着水層を境界摩擦に於ける吸着膜に対応するものと考えている。そこで、土質実験に於ける通常の剪断速度での範囲では、潤滑摩擦は無視できるものとすれば、混合摩擦の全剪断抵抗力（摩擦抵抗力） T は次式で示される。

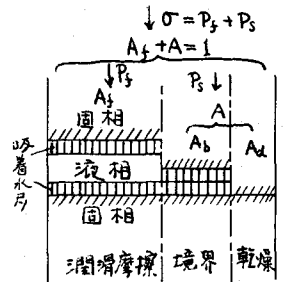


Fig-1 混合摩擦モデル

$$T = A \left\{ \alpha S_d + (1 - \alpha) S_b \right\} \quad \alpha = \frac{A_d}{A} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 S_b :吸着膜の剪断強さ、 S_d :粘土鉱物の剪断強さ、 A_d :乾燥摩擦面積、 A :アスペリティー面積。アスペリティーは、荷重層により既に支圧強度に達しているものと考えてるのが通常であるので、 $A = P_s / P_y$ (P_y :粘土鉱物の支圧降伏応力)。さらに $A_f \div A = 1$ より $P_s = \sigma - U$ となる。一般に粘土の比表面積は極めて大きいので、界面力がその力学的に無視し得ない。そこで、粘土粒子間に作用する内的な力、すなわち拡散2重層による斥力(R)とVan der Waals 引力(V)を考慮すれば、ネットの粒子間力 P_s は

$$P_s = \sigma - R + A - U = \sigma' - R + V \quad \text{----- (2)}$$

と示される。ここに σ' はTerzaghiの有効応力であり、 P_s は単位面積当りの粒子間力の合計。したがって飽和粘土系の2個の粒子間の物理摩擦角 ϕ_{sm} は、 σ' を基準とすれば $\tan \phi_{sm} = T / \sigma'$ で示される。この2個の粒子間の摩擦角は、粘土粒子とその吸着膜を含めたミセルを単位粒子と考えられるから、粒状体の物理摩擦角と内部摩擦角との関係を示すCagnotの理論が適用することができ、簡単に粘土-水系全体の内部摩擦角に拡張される。この内部摩擦角は、Hvorslevの有効摩擦角 ϕ_e に対応すると考えられ、ここでは一定エネルギー補正された有効摩擦角 ϕ_r に相当するものと考えてよい。結局、次式により飽和工の有効内部摩擦角 ϕ_r が示される。

$$\tan \phi_r = \frac{\pi}{2} \tan \phi_{sm} = \frac{\pi}{2} \left\{ \frac{\alpha S_d + (1 - \alpha) S_b}{P_y} \right\} \left\{ 1 - \frac{R - V}{\sigma'} \right\} \quad \text{----- (3)}$$

すなわち有効応力の関数として ϕ_r は示される。一般に大気中での摩擦は、境界摩擦と乾燥摩擦が同時に起るものであり、この様な状態での摩擦係数は $\mu = \{\alpha S_d + (1-\alpha)S_b\} / P_d$ と表わされている。通常この様な状態での摩擦に Amontons-Coulomb の第1則が成立するというのは、 μ はほとんど変化しない量であることを示す。したがって(3)式において、 ϕ_r がある一つの土質に対して一定であるためには、 $(\frac{R-V}{\sigma})$ 項も常数である必要がある。この可能性は Roscoe の限界状態と降伏曲面の概念で説明し得る。すなわち非排水剪断において、同じ間隙比の粘土はその過圧密比によらずすべての応力経路はある一点(限界状態)に集中するといわれている。この状態では、土粒子構造はすべて等しく過圧密比には無関係であろう。内的な粒子間力 ($R-V$) は間隙比と間隙形状(粒子構造条件)によって決まるものであるため、限界状態における $(\frac{R-V}{\sigma})$ 値は一定となる。さらに、正規圧密曲線と限界間隙比曲線がほぼ平行であることから $\frac{R-V}{\sigma}$ は間隙比に独立しているといえる。かくして ϕ_r または ϕ_r は有効応力、間隙比に無関係に一定値を取り得る。

3. 実験結果について

吸着水の状態から ϕ_r は α 値 (= A_d/A) すなわちアスペリティー面積に対する固着膜を突き破って粘土粒子間が直接接触する面積の比が減少すれば減少し、また σ' に対する粒子間力 ($R-V$) の比率が大きくなるほど ϕ_r は減少する。一般に高活性な粘土は固着水層を発達しているし、拡散層も十分に大きく浸透圧成分 R も大きくなる。したがって、高活性な粘土ほど ϕ_r が小さくなることが(3)式より明らかである。この粘土の活性と ϕ_r の関係は Gibson (1953) の実験より裏付けられる。さて粘土を乾燥し、浸透圧力 R をなくすれば(3)式に従い ϕ_r は増加するはずで、湿潤状態での ϕ_r との比較により粘土粒子表面に形成された拡散2重層が ϕ_r の減少にもたらす影響を知ることが出来る。そこで著者らは2-3種の粘土パウダーによる一面剪断試験を行なった。

試料は105°C (24時間)乾燥されたモンモリロナイト、セリサイト及び九谷(カオリン)粘土で、いずれも74 μ 以下である。同様の目的で無極性液 CCl_4 を間隙液としたモンモリロナイトの実験も行なった。結果は

Clay Type	LL	PL	PI	ϕ'	ϕ_r	ϕ_f
Na-Bentonite Powder	458	66	392	28.5	28.0	—
Cericite Powder	39.3	26.5	12.8	29.0	28.5	—
Kutani-Clay Powder	79.3	26.8	49.6	31.5	30.5	—
Na-Bentonite(H_2O)	458	66	392	—	—	2.5
Na-Bentonite(CCl_4)	—	—	—	—	26.0	—
Kutani-Clay(H_2O)	79.3	26.8	49.6	27.8	21.0	—
by Authors						
Na-Bentonite(H_2O)	570	40	580	8.5	2.5	3.0
Illite (H_2O)	73	28	45	16.0	15.0	16.0
Kaolinite (H_2O)	63	38	25	20.5	20.2	21.0
by Gibson(1953)						

Table-1 空隙性状による内部摩擦角の変化

Table-1 に示される。鉱物種が同じといっても全く同一の粘土ではないので、厳密な比較はできない。しかし3層構造粘土の Na モンモリロナイトやセリサイトパウダーは Gibson の用いた Na モンモリロナイトやイライトの飽和(H_2O)状態での ϕ_r よりも著しく増加しているし、2層構造粘土のカオリンも同様である。さらに、粘土粒子の持つコロイダルな性質をなくする四塩化炭素での実験結果も著しい ϕ_r の増加を示している。しかもそれらはいずれも砂質土の摩擦角に近似しているのも興味ある事実で、土の摩擦角の本質を示唆して興味がある。

4. おわりに

著者らは粘土の有効摩擦角と活性(例えば塑性指数)との関連性を示した。この粘土の活性と ϕ_r の関係がさらに定量的に明確にされ、技術的な問題が解決すれば、我々は物理化学的な手段による地盤改良への道が開かれる。そのために今後多くの Data の集積を待たねばならない。

参考文献

- 1) 最上武雄：土質力学、技報堂
- 2) Bowden & Tabor：The Friction & Lubrication of Solids, II. (Oxford 1964)
- 3) R.E. Gibson (1953)：Experimental Determination of the True Cohesion & True Angle of Internal Friction in Clays, Proc. 3rd Int. Conf. SMFE, Vol. 1, pp.126~130
- 4) 曾田範宗：摩擦と潤滑、岩波全書
- 5) 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック、養賢堂