

—— 粒状体の変形における粒子回転のはたす役割 —— 埼玉大学工学部 小田 匡寛
信州大学工学部 小西 純一
Northwestern Uni. S. Nemat-Nasser

1 はじめに

土粒子回転は、粒状体の微視的変形機構の一つとして従来から重要と考えられている。Roweの有名な Strss-dilatancy 理論がASCE誌上に発表されると、Rowe理論に粒子回転の影響が加味されていないとして多くの否定的なdiscussionが寄せられた。たとえばRoscoeらは、彼等の実験において砂粒子の回転現象を実際に観察したと述べている。著者の一人(小田)は、巨視的変形による砂の構造変化を直接顕微鏡下で観察し、その結果から粒子回転の存在を確認しているし、また落合は、アルミ丸棒の二次元積層体を用いた二軸圧縮試験を行い、モデル粒状体においても粒子回転は起り、粒状体の変形機構の一つとして重要であると述べている。この研究は、微視的変形機構の中で粒子回転(rolling)と接点でのすべり(sliding)とがどのような割合に含まれ、結果として粒状体の巨視的変形や強度特性にどのような具体的影響を及ぼしているかを実験的に究明しようとするものである。

互いに接している粒子 G_1, G_2 は、図・1にまとめられる三つの微視的機構で相対的に変位する。変位前の粒子 G_1 が変位後に G'_1 に移るとする(図・1)。(1)純すべり(pure sliding)とは、粒子の回転は伴わず($\omega=0$)、接点 C_1 は変位と共に C_2 に、また変位前の接点 C_1 は C'_1 にそれぞれ移動する。今、 $\widehat{C_1C_2}$ の長さを a 、 $\widehat{C'_1C_2}$ の長さを b とする。ただし変位後の接点 C_2 に対し、 C'_1 は C_1 と反対側に位置するので a を正、 b を負と定義する。(図・1の1)。(2)純回転(pure rolling)の場合、粒子 G_1 は粒子 G_2 の上で相対的に ω (時計方向を正と定義)回転し、そのために C_2 に対し C'_1 は C_1 と同じ側にあり、かつ $\widehat{C_1C_2} = \widehat{C'_1C_2}$ ($a=b>0$)の関係を満たしている。(図・1の2) (3)すべりと回転が混在すると、 $\widehat{C_1C_2} \neq \widehat{C'_1C_2}$ となり、(1)、(2)の中間的性質をみせる。(図・1の3) 以上述べたように粒子間の相対回転と相対すべりとを分離するには、 $\widehat{C_1C_2}$ 、 $\widehat{C'_1C_2}$ の長さと同転角 ω に注目しなければならない。従来の研究には粒子の絶対回転を報告したものもある。しかし粒状体の微視的変形を論ずるには、相対回転 ω がより本質的な意味を持つている。

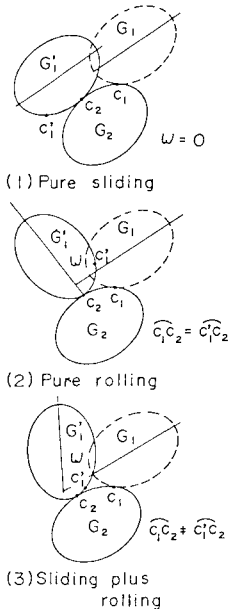


図1 微視的変形機構

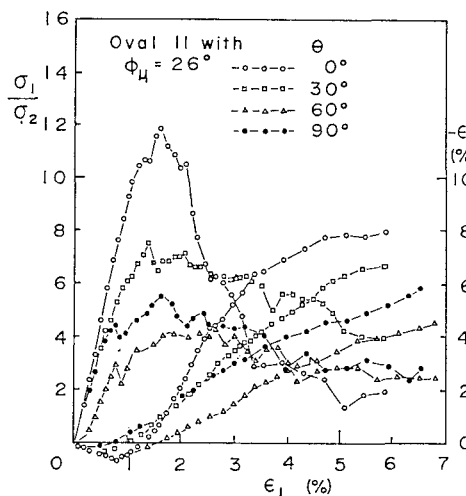


図2 代表的応力比~歪関係

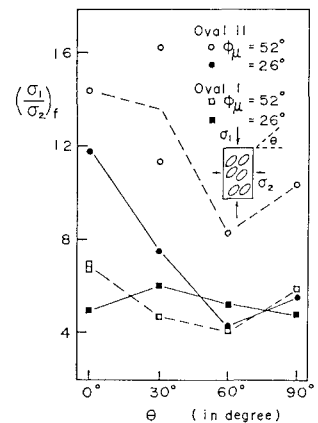
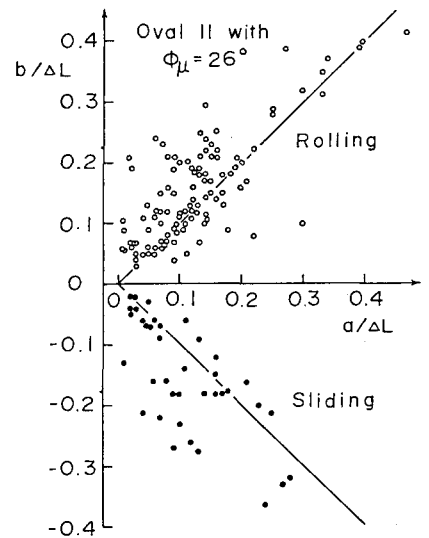


図3 応力比と堆積角の関係

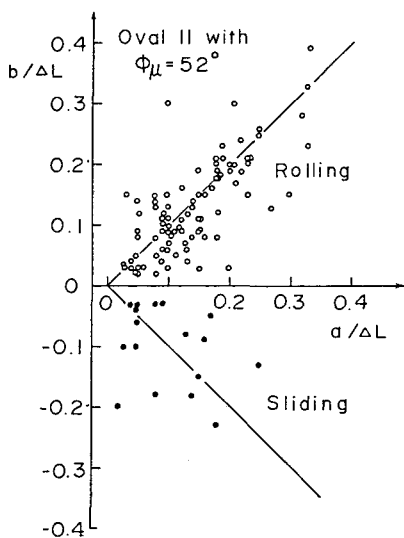
2. 実験と実測 : 上述の視点から, 階円形状の粒子を $330 \times 207 \text{ mm}$ の載荷フレームに密着のし, 二軸圧縮試験を行つた。粒子は光弾性材料で作られ, 短軸と長軸の比を $1:1.1$ (Oval I) と $1:1.4$ (Oval II), またその粒子間摩擦角 ϕ_μ は, 52° (non-lubricated) と 26° (lubricated) の合計4種類である。粒子の長軸の卓越方向を指定される堆積面の傾角 θ を $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に選り, 初期構造の影響も検討した。図・2に代表的な主応力比 σ_1/σ_3 と軸歪 $\epsilon_1 (= \Delta L/L)$ の関係を示し, 図・3に破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ と堆積面の傾角 θ の関係を示した。破壊強度に及ぼす, 粒子形状, 粒子間摩擦角, 初期構造の影響を定量的に表わして興味深い。

残留状態にまで変位を大きくした積層体から撮られた光弾性写真を用いて解析した。(Activeな微視的変形機構は, 初期から残留まで同じと考えてよい。) 図・4, 5には, 変位量 ΔL で無次元化した a と b の関係を, Oval II の $\phi_\mu = 26^\circ$ と 52° の二例について示した。接点の相対変位が回転によるものは $\circ$ で, すべりによるものは $\bullet$ で示される。それによると, (1) $a=b$ の近傍にプロットされる回転する接点の割合は, $a=-b$ の近傍でかつ $\omega \neq 0$ のすべる接点のそれに比べて大きく, (2) ϕ_μ の大きい粒状体 ($\phi_\mu = 52^\circ$) より小さい ($\phi_\mu = 26^\circ$) ものにおいて, すべる接点の占める割合は大きい, などが指摘できる。小さい ϕ_μ の粒状体の接点ですべり変位が卓越するのは自然である。図・6は oval II ($\phi_\mu = 52^\circ$) の例で, ω を ϵ_1 で割った値の頻度分布を示している。極めて大きい相対回転が存在することを示している。

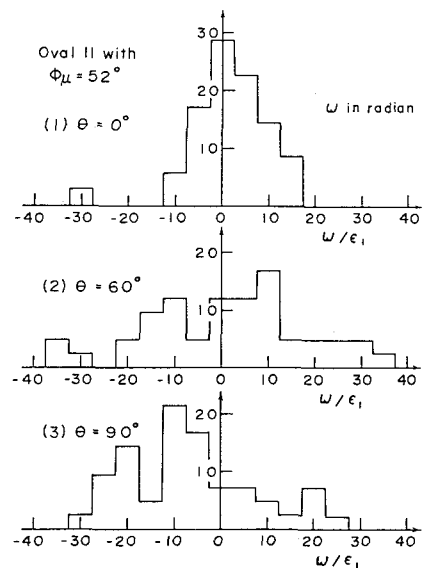
3. 結論 : 粒子回転は, 粒状体の微視的変形機構として, すべり変位以上に重要なものであることが明らかになった。図・3に示す oval I の二つの $(\sigma_1/\sigma_3)_f - \theta$ 関係は, ϕ_μ が互いに 26° と 52° と大きく異なるにもかかわらず, $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ はほとんど変化しない。この事実は, oval I の粒子断面が円に近いので, 粒子回転が生じやすく, 結果として ϕ_μ が強度に影響しないと考えると矛盾が無い。



図・4 a と b の関係



図・5 a と b の関係



図・6 粒子回転の頻度分布図