

III-352 3主応力下における粒状体の不安定な滑動について

東北大学大学院 学生会員 土 倉 泰
東北大学工学部 正会員 佐 武 正 雄
東北大学工学部 正会員 岸 野 佑 次

1. まえがき：著者らは砂のような粒状体のシミュレーション解析法の1つである粒状要素法¹⁾を3次元問題を取り扱えるよう具体的に定式化し、粒子数6の簡単な規則配列を用いて3主応力状態での粒子の滑動とそれに伴う変形特性について解析した結果を既に報告している²⁾。ここでは同じ規則配列において、粒子間摩擦角を変えた4通りの解析結果を示し、粒状体に不安定な滑動を生じさせる応力条件に関して検討する。

2. 解析条件と記号の定義：解析モデルは図-1で座標の原点近くに存在する径の等しい6つの球粒子の集合体である。これは等方的な規則配列の一要素とみなすことができる。図-2にx-y面、y-z面の断面図を示している。簡単な配列であるが、せん断時の応力～ひずみ関係を求めることは容易ではない。解析は σ_1 をz軸、 σ_2 をx軸、 σ_3 をy軸に一致させて行う。この場合粒子間の滑りはx-y面、y-z面、x-z面の3つの断面内においてとらえることが可能である。したがって滑りのモードが3つ存在する。図-1で外側の薄く色を施した粒子は境界として配置した要素で、これらの要素はそれぞれの剛性マトリックスをもとに算定される共通の線形変換テンソルに基きその中心座標を動かされる。粒子径は0.4cm、法線方向、接平面内方向のバネ定数の k_n, k_t はそれぞれ 1.0×10^8 dyn/cm、 7.0×10^7 dyn/cm、粒子間摩擦角 ϕ_μ は0, 5, 15, 25°の4通りとする。重力は考えない。平均応力は16000 dyn/cm²で一定とし、収束判定の精度¹⁾は10dyn とする。まず16000 dyn/cm²の等方圧を加えて初期状態とする。このとき解析モデルには18の接触点が存在し、内部粒子間の接触力の大きさは全て等しい。解析は応力制御で行い、せん断応力は τ_{oct}

の値で単調に増加させる。以下に記号の定義を示す。

μ を-1から 1までの間で9通りに固定して解析する。

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (1)$$

$$q = (3\sigma'_{11} \sigma'_{11} / 2)^{1/2} \quad ('): \text{偏差成分} \quad (2)$$

$$r = q / p \quad (3)$$

$$\mu = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4)$$

3. 解析結果：図-3は $\phi_\mu = 25^\circ$ の解析で粒子の滑動が起こり始める点を π 面上に r の値でプロットしたものである。一点鎖線が載荷経路を示している。せん断が進むと個々の粒子間の滑りが先に挙げた3つの断面内で段階的に生じる²⁾。いま図-2の断面図と等しい円粒子の配列を考えて2次元の応力制御でのせん断を行えば、粒子間の滑りの発生と共に σ_1 方向の2粒子が急に近づく不安定な滑動が生じる。しかし3次元で行った本解析では、たとえ滑りが発生しても必ずしも不安定とはならない。安定状態は以下のように得られている。図-2-(b)に示すのはy-z面で滑り出した状態である。これ以降のせん断に対し、図中の傾いた接触力はその傾きのままに大きくなる。この結果生じたy方向の力の不釣り合い成分のため、y方向の2粒子は互いに離れる向きに動く

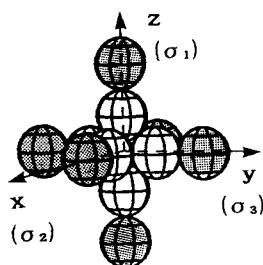
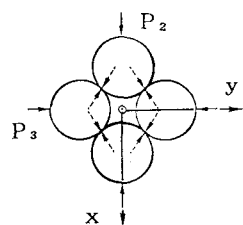
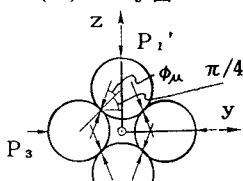


図-1 解析モデル



(a) x-y面



(b) y-z面

図-2 モデル断面図

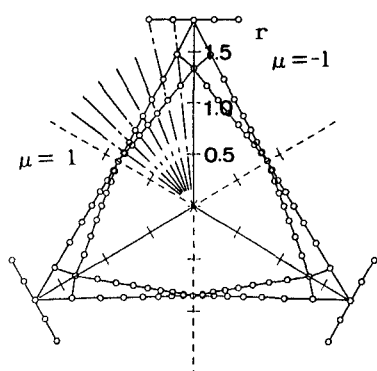


図-3 π 面上の粒子滑動の始点 ($\phi_\mu = 25^\circ$)

が、これと同時に、図-2-(a)の4粒子の間隔が広がって接触力が小さくなる。これによってy方向の力の不釣り合いは解消し、y方向の2粒子の動きは止まるのである。さらにせん断を続けると、図-2-(a)の4粒子は分離し最終的に σ_1 方向の2粒子が急に近づく不安定な滑動が生じる。このときのrの値は図-3では5点を結んで軸と直交した直線として表れている。pを変化させた場合にも π 面上にrで示した滑動の始点は変化しない²⁾ので、不安定な滑動は σ_1/p が一定値となった場合に生じていることになる。図-4は各経路で γ_{oct} を一定の値にとった場合の σ_1/σ_3 の値を示す。 $\mu=-1$ の付近で限界値が存在するのはそこで不安定な滑動が生じているためである。なお $\gamma_{oct}=9.0 \times 10^{-2}\%$ で $\mu=1$ のときの値が不連続になっているのは、 $\mu=1$ では他の場合と異なりx-y面内の粒子が離れないからである。図-5, 6, 7はそれぞれ ϕ_μ を0, 5, 15°とした場合の粒子滑動の始点を示す。 ϕ_μ が大きいほどrが大きくなるまで滑り出さないことがわかる。

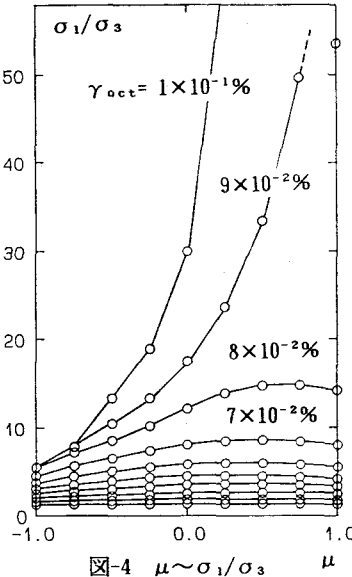

 図-4 $\mu \sim \sigma_1/\sigma_3$

図-4は各経路で γ_{oct} を一定の値にとった場合の σ_1/σ_3 の値を示す。 $\mu=-1$ の付近で限界値が存在するのはそこで不安定な滑動が生じているためである。なお $\gamma_{oct}=9.0 \times 10^{-2}\%$ で $\mu=1$ のときの値が不連続になっているのは、 $\mu=1$ では他の場合と異なりx-y面内の粒子が離れないからである。図-5, 6, 7はそれぞれ ϕ_μ を0, 5, 15°とした場合の粒子滑動の始点を示す。 ϕ_μ が大きいほどrが大きくなるまで滑り出さないことがわかる。

4. 解析モデルに対する不安定な滑動の条件： σ_1 方向の2粒子が急に近づく不安定な滑動が生じる応力状態は、y-z面とx-z面での滑りの条件から求めることが可能である。いま $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 方向に働く境界からの力を P_1, P_2, P_3 とし、 P_1 を便宜的に P_1', P_1'' に分ける。 P_1' はy-z面で考える P_1 の成分、 P_1'' はx-z面で考える P_1 の成分である。滑り条件はy-z, x-z面で、

$$P_1'/P_3 = \tan(\pi/4 + \phi_\mu) \cdots (5)$$

$$P_1''/P_2 = \tan(\pi/4 + \phi_\mu) \cdots (6)$$

である。したがって、

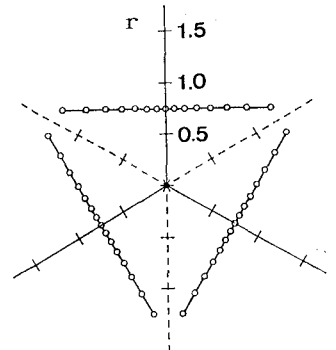
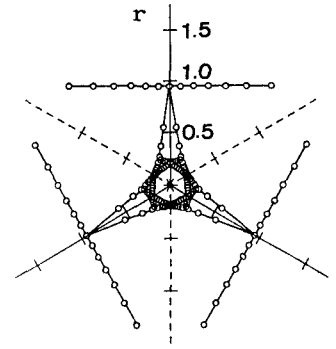
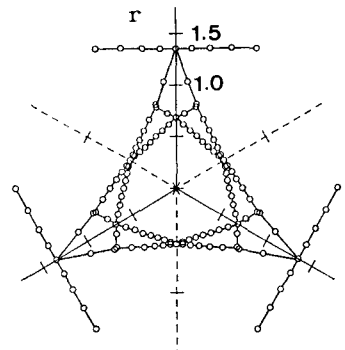
$$P_1 = P_1' + P_1'' = (P_2 + P_3) \tan(\pi/4 + \phi_\mu) \cdots (7)$$

となる。Pは σ と置き換えることができ、

$$\sigma_1/(\sigma_2 + \sigma_3) = \tan(\pi/4 + \phi_\mu) \cdots (8)$$

と解析モデルに対する不安定な滑動の条件が求まる。(8)式は σ_1/p が一定という条件式に書き改めることができる。(8)式で ϕ_μ が0, 5, 15, 25°のとき $\mu=-1$ とするとrは0.75, 0.947, 1.35, 1.80となる。

5. あとがき：解析モデルは規則配列であったが、現実の砂のような粒状体においてもここに述べた不安定な滑動が生じることが考えられる。実際には、小さいrで(8)式の条件を満たす $\mu=-1$ (3軸圧縮)のときに不安定になる可能性が最も大きい。砂のせん断試験結果を解釈する際の新たな視点になると考える。


 図-5 π 面上の粒子滑動の始点 ($\phi_\mu=0^\circ$)

 図-6 π 面上の粒子滑動の始点 ($\phi_\mu=5^\circ$)

 図-7 π 面上の粒子滑動の始点 ($\phi_\mu=15^\circ$)

文献1) 岸野：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, JSCE, Vol.406/III-11 (1989)

2) 土倉, 佐武, 岸野：3次元粒状要素法とその応用, 第25回土質工学研究発表会 (1990)