

せん断時の粒状体における応力鎖の流動的変形とインターロッキング

応力鎖 回転抵抗 個別要素法

名古屋工業大学 国際会員 ○前田健一  
 名古屋工業大学 学生会員 近藤明彦  
 名古屋工業大学 学生会員 館井 恵  
 名古屋工業大学 学生会員 大石暢彦

1. はじめに

粒状体の力学挙動を理解するには、粒度や粒子形状が内部構造の発展則にどのように影響するのかを明らかにすることは重要な課題である<sup>1)~5)</sup>。また、個別要素法 (DEM) を用いて地盤工学の問題に取り組む際には、円形粒子を用いる方が計算時間の面からも容易であるものの、より土らしさを表現するためには、非円形粒子が持つ接触状態の多様性が重要となる。特に、凹凸による引っ掛かりという不安定性と凹凸がロッキングする高い安定性の二面性を表現することが必要である。

そこで、本報告では、粒子の接点変位モードや凹凸によるロッキングが巨視的な単調せん断過程でどのように変化するかについて、二次元 DEM の解析結果を基に考察した。

2. 解析手法

通常の二次元 DEM を用いて、側圧一定の下 (100kPa)、二軸圧縮試験を行った。パラメータを含め、解析方法・条件の詳細は既報<sup>3)~5)</sup>に詳しい。解析結果は、最大主応力方向を  $y$  方向とし、直ひずみ  $\epsilon_{xx}$  と  $\epsilon_{yy}$ 、体積ひずみ  $\epsilon_v$ 、平均主応力  $\sigma_m$  と最大せん断応力  $\tau_m$  を用いて整理した。また、図-1 に示すように、円形粒子 (cl01) だけでなく同じ粒子を規則配置して結合させた凹凸を有する非円形粒子 (cl03-cl08) も用いた。

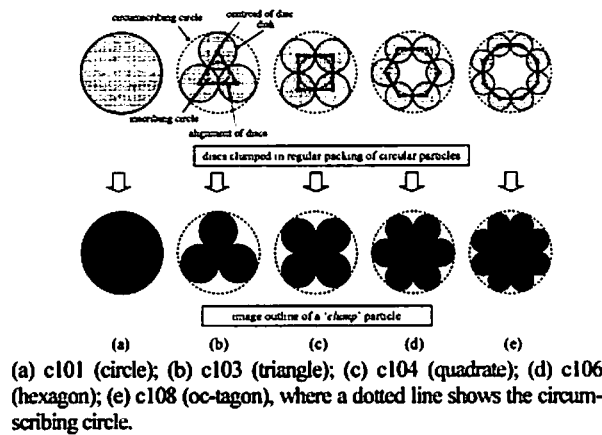
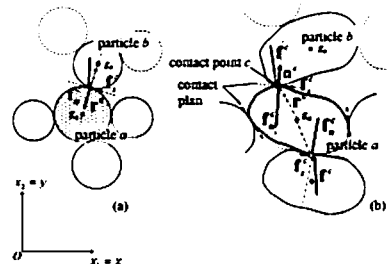


図-1 解析に用いた粒子

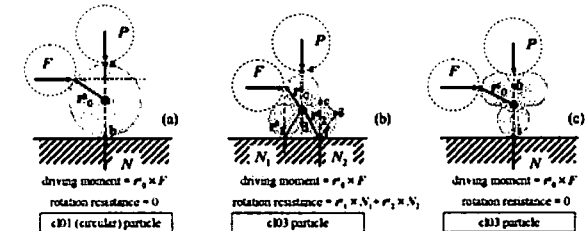
一方、粒状体を粒子接点の接触要素で形成される構造物のようにして捉えることもできる<sup>6)</sup>。図-2 のような粒子群を考えるとそれらの平均剛性は平均粒子接点数と接触面の方向およびその集中方向によって支配される。それぞれは、その代表値として配位数  $N_c$  とファブリックテンソル (最大主値、最小主値を  $F_1, F_2$ ) で表すことができる。



(a) circular particles; (b) non-circular particles  
 図-2 接点に関する幾何学パラメータ

ここで、粒子  $a$  から見た接点  $c$  に関する法線および接線方向の単位ベクトル  $n^c$  と  $f$ 、接点ベクトル  $r^c$ 、図心間 (粒子  $a$  と粒子  $b$ ) のプランチベクトル  $f$  が定義され、接触力ベクトル  $f^c$  から粒子単位で平均化された応力  $\sigma^p$  を算定できる。

また、粒子に作用する回転抵抗は材料定数として定義されるものではなく、粒子の幾何学的配置と接触力との相対関係で決定される。図-3 は、単一粒子について働かされる回転抵抗について考察したものである。荷重  $P$  と  $F$  が作用するとき、図-3(a)の円形粒子では回転に対して抵抗することができないが、図-3(b)の非円形粒子 (cl03) の場合には回転に抵抗するモーメントが発生する。しかし、同じ非円形粒子でも図-3(c)のような配置であれば回転抵抗は発生しないことになる。これらから、垂直接触力 ( $N$ ) によるモーメントに着目する。



(a) neutrally unstable state; (b) locking state; (c) unstable state

図-3 単純なケースにおける粒子働かされる回転抵抗

粒状体がモーメントに対して釣合い状態にあれば、垂直接触力とせん断力によるモーメントの総和は以下の式となる (ここで  $M^p$  は供試体内の粒子接点数)。

$$\left\{ \sum_{c=1}^{M^p} (r^c \times f_n^c) + \sum_{c=1}^{M^p} (r^c \times f_t^c) \right\} = 0 \quad (1)$$

本報告では、垂直接触力のみによるモーメントの成分の総和を供試体内に働かされている回転抵抗度として定義してみた (こ

ここで、 $V$ : 供試体体積、 $V^p$ : 個々の粒子体積、 $N$ : 粒子数)。

$$M_{mob}^n = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N V^p \left\{ \sum_{c=1}^{M_c} (\mathbf{r}^c \times \mathbf{f}_n^c) \right\} / (V^p \cdot \sigma_m^p) \quad (2)$$

上式の値は円形粒子では常にゼロとなり、非円形粒子では配置や接触力ベクトルの幾何条件で決まることになる。また、本報告では、内部構造の応力鎖の変形を調べるために、隣り合う粒子の速度と接線方向の接点速度との関係についても調べた。

### 3. 解析結果および考察

図-5 は粒状体の円形 (cl01) と非円形 (cl03) の応力比~ひずみ~ダイレイタンスー関係を異なる密度下で解析した結果を示している。非円形の方が圧縮性も高く強度も高い。

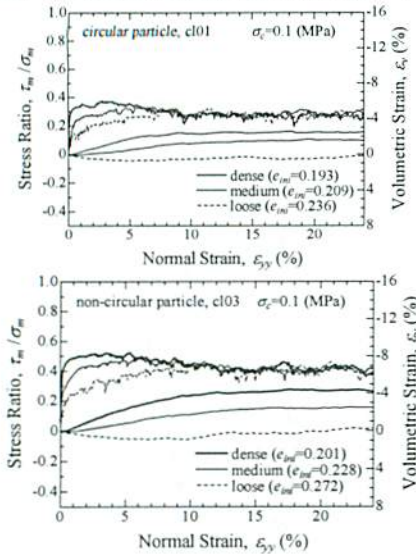


図-5 粒状体の変形・破壊挙動の解析例：円形と非円形

また、図-6 は、図-5(a)の円形粒子の場合について、軸ひずみ  $\epsilon_{yy}=0.1\%$  と  $10\%$  のときの、隣接する2粒子 (添字を粒子番号の1と2とする) の粒子の並進相対速度による接点速度 ( $v_1 - v_2$ ) と粒子回転速度  $\omega$  (反時計周りを正) による接点速度 ( $r_1 \omega_1 + r_2 \omega_2$ ) の関係を示している。接線方向の接点速度は、 $\delta_s = (v_1 - v_2) + (r_1 \omega_1 + r_2 \omega_2)$  で表され、このミクロな変位によって粒子間にはせん断力が発生する。黒丸は全ての接点について、灰色の丸は平均接触力以上の接点についての結果である。

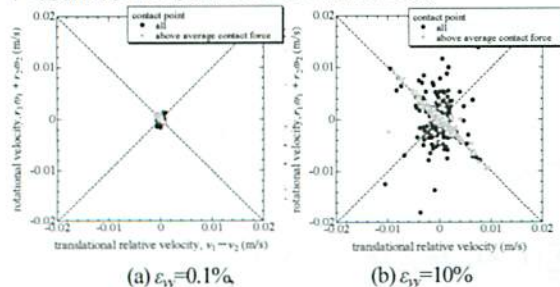


図-6 接点における回転・並進速度差の関係：円形

図から分かるようにせん断が進むと、灰色のプロットが、左斜め  $45^\circ$  の線上に集中している。この線は  $\delta_s=0$  を意味し、図-7 のイラストに示されるように、粒子の速度が大きいにも関わらず、せん断力を増加することなく変形する不安定なモー

ドである。一方で、大きな荷重を受け持っていない黒丸の方がこの線からの距離が大きく、せん断力を発生していることになる。つまり、円形の粒状体ではせん断が進行すると、大きな荷重を支える応力鎖ほど不安定な条件となり、流動的に崩壊してしまう。異方性の発達とともに、構造が不安定化するという。また、例え大きな力を支持していなくても周辺から支える粒子が重要で、応力鎖の流動的崩壊を抑制していることになる。

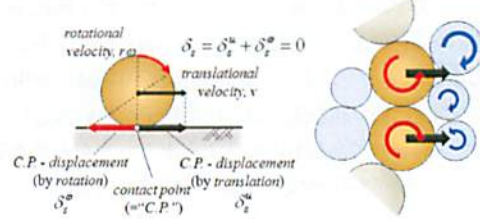


図-7 粒子接点におけるせん断速度ゼロの変形モード

上記のような接点せん断力増加ゼロの変形モードにおいても、回転抵抗の発揮は応力鎖の安定度を増加させる。図-8 は、せん断中に働かされる回転抵抗度 (式(2)) を示している。密な試料では、等方応力下で低い値を示し、せん断とともに増加後、減少している。一方、緩い試料では等方応力下から高い値を示し、せん断による変化はほとんどない。また、形状が同じ場合には、密度に関係なく、極限值は一定の値を示す。緩い供試体を形成するには回転抵抗による粒子間のロッキングが必要であり、逆に、密な状態とは回転抵抗を発揮しないような力学的・幾何学的条件を満たしているといえる。さらに、マクロな応力のピークの発現は回転抵抗度のピーク発現とはほぼ同時であることから、粒状体の応力発現には、応力鎖の流動的変形による崩壊を抑制する回転抵抗の発揮が重要である。

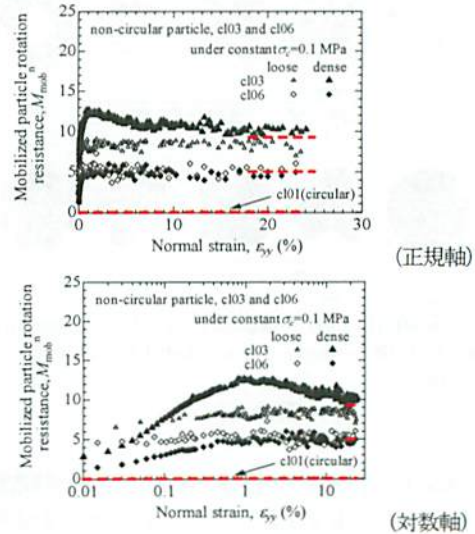


図-8 マクロなせん断変形に伴う発揮される回転抵抗度の変化

参考文献： 1) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M., Toki, S., S&F, 37(3), 53-64 (1997). 2) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M., Toki, S., S&F, 38(4), 159-172 (1998). 3) Maeda, K., Hirabayashi, H., J of Appl Mech, JSCE, 9, 623-630 (2006). 4) Wood, D. M. and Maeda, K., Acta Geo-technica, 3 (1), 3-14 (2008). 5) Wood, M. D., Maeda, K., Nukudani, E., Geo-technique, (2010). 6) Chang, C. S., Chao, S. J., Chang, Y., Int. J. of Solids and Struct., 32(14), 1989-2008 (1995)