

DEMによる粒状材料の破壊挙動に及ぼす粒子回転の影響

名古屋工業大学 学生員 ○松本 崇
 名古屋工業大学 学生員 平林大輝
 名古屋工業大学 学生員 福間雅俊
 名古屋工業大学 正会員 前田健一

1. はじめに

著者らは、粒状材料のマクロの挙動と配位数（粒子の平均接点数） N_c や異方性の強さであるファブリックテンソル（最大と最小の主値 F_1 と F_2 ）などの構造との関係について調べている。それらの結果をまとめると図-1 のようでありマクロな挙動の限界状態が構造の限界状態に支配されていることを明らかにしている¹⁾。

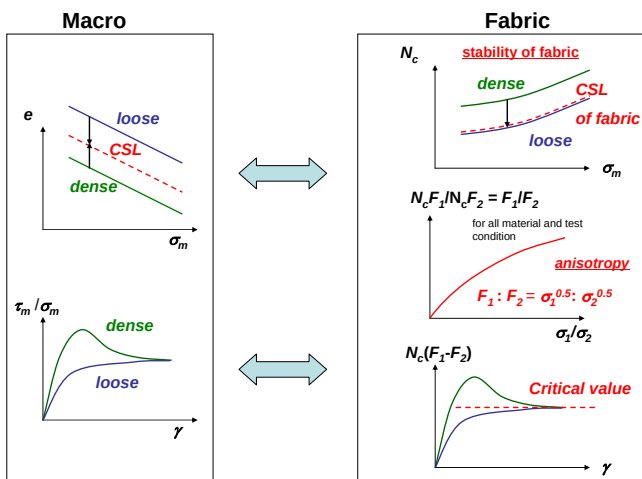


図-1 マクロ挙動の限界状態と粒子骨格構造の限界状態

一方、繊維補強（ファイバー）混合土の力学特性や補強効果発揮メカニズムおよび設計手法について検討している²⁾。DEM 解析結果から、繊維の混入による新たな粒子塊（クラスター）が形成されることで最小主応力方向における粒子骨格構造の崩壊が抑制できることが分かってきた。これは、補強効果が通常考えられている粘着成分の増加ではなく、粒子回転の抑制効果による延性の増加であると考えられる。ここで、粒子回転や粒子形状が無補強の粒状材料の変形・破壊にどのように影響を与えているのかについて明らかにすることが重要となる。

本報告では、補強されていない粒状材料の破壊メカニズムを再考するために、最も影響力をもつといわれる粒子間摩擦係数と粒子回転の効果について DEM を用いて検討した結果を報告する。

2. 解析手法¹⁾

解析は二次元 DEM によって側方応力一定の下で二軸圧縮試験を行った。円形粒子（cl01）の他に粒子を多角

形配置し連結させ非円形粒子（三角形、六角形の場合をそれぞれ cl03, cl06 の表す）を用いた。本報告ではそれぞれの試料の最も密詰めの場合で側方向応力 $\sigma_{c0}=0.1\text{MPa}$ の結果についてのみ報告する（詳細なパラメータについては既報¹⁾に詳しい）。円形粒子は転がり摩擦のような回転抵抗を全くもたないが、非円形粒子では凹凸の引っ掛りが生じるため回転抵抗が働く。また、数値実験では理想的な状態以外にも極端な状態も再現できるので、粒子の回転を完全に拘束し粒子間の相対変位がすべりのみによるケースも計算し比較した。この場合、力学挙動は粒子間摩擦特性に大きな影響を受けるので、粒子間摩擦係数 $\tan\phi_\mu$ を 0~1000（摩擦角 $\phi_\mu=0^\circ\sim89.9^\circ$ ）という極端に広範な値について検討も試みた。

3. 解析結果および考察

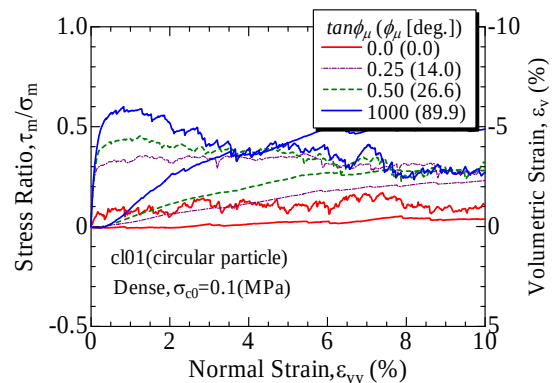


図-2 粒子間摩擦の異なる変形・破壊挙動(円形): 粒子回転を拘束しない場合

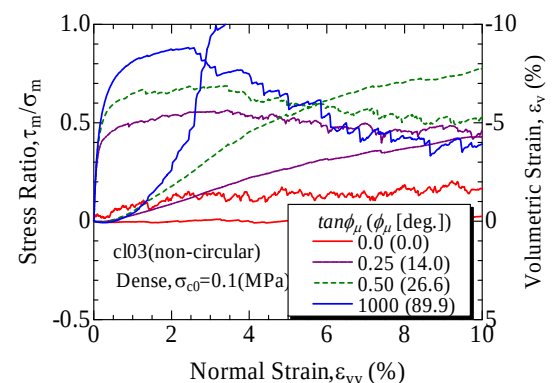


図-3 粒子間摩擦の異なる変形・破壊挙動(非円形): 粒子回転を拘束しない場合

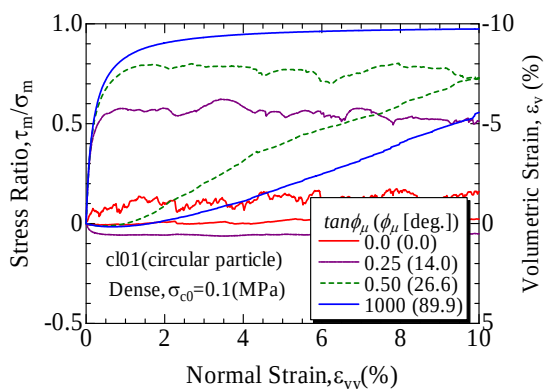


図4 粒子の回転を拘束した変形・破壊挙動(円形): 粒子回転を完全に拘束した場合(粒子間相対変位はすべりに支配される)

図-2, 3 は粒子回転を特に拘束しない粒状材料の挙動を円形, 非円形粒子の場合についてそれぞれ示している。粒子形状によってせん断初期の間隙比は同じに設定されている。いずれも粒子間摩擦係数 $\tan \phi_\mu$ が大きいほど、破壊時の膨張度合いは高く強度も高い。一方、残留強度には $\tan \phi_\mu$ の影響は見られない。また、円形よりも非円形の方が高い強度を示している。ただし、 $\tan \phi_\mu = 0$ であっても低いながらも強度を有するとともに、 $\tan \phi_\mu = 1000$ の場合では必ずしも強度は極端に大きいわけではない。

つぎに、図-4 は円形粒子について回転を拘束した場合の結果を示している。破壊強度と残留強度の両者ともが $\tan \phi_\mu$ のともに高くなり、 $\tan \phi_\mu = 1000$ の場合には破壊強度も 1 近い値を示している。

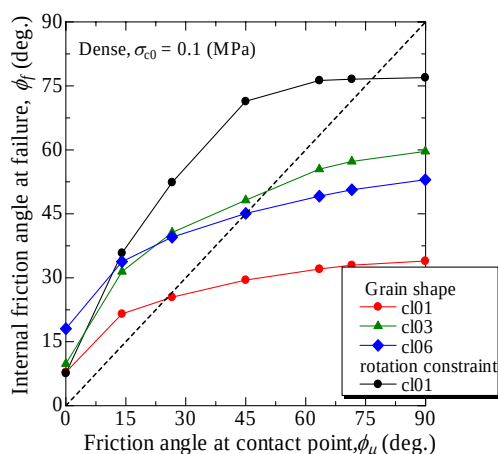


図5 粒子回転効果が異なる場合の破壊内部摩擦角と粒子間摩擦角の関係

破壊時の内部摩擦 ϕ_i と粒子間摩擦角 ϕ_μ の関係を整理した結果を図-5 には示す。回転を拘束しない円形粒子の場合、 $\phi_\mu < 30^\circ$ では $\phi_i > \phi_\mu$ である。しかし、 $\phi_\mu > 30^\circ$ では ϕ_μ による ϕ_i の増加率は極端に低下し、 $\phi_i < \phi_\mu$ の関係となり ϕ_i は 35° 程度に収斂してしまう。また、 ϕ_μ による ϕ_i の増加率の低

下程度は、回転抵抗が発揮され得る非円形粒子の方が弱まり、粒子自体の回転が拘束され場合にはほとんどの ϕ_μ で $\phi_i > \phi_\mu$ となる。以上のことから、粒状材料の破壊には粒子間すべりの影響もあるが粒子回転の効果が大きく、回転の拘束が強度を増加させることが分かった。

以上のことを説明するには、図-6 のような柱状の粒子構造の座屈現象³⁾を検討することが妥当とおもわれる。円形粒子からなる柱の場合、接点は引っ張りに対して抵抗できないことに加え、接する二つの粒子間で接点の一つしかないために、座屈のような大きな変形が生じると耐力を全く失ってしまう。しかし、非円形の場合には接する粒子間で接点は複数となるために、一つの粒子が座屈によって引っ張りによって離れたとしても他の接点が耐力を低下させつつも柱を支えることが可能である。

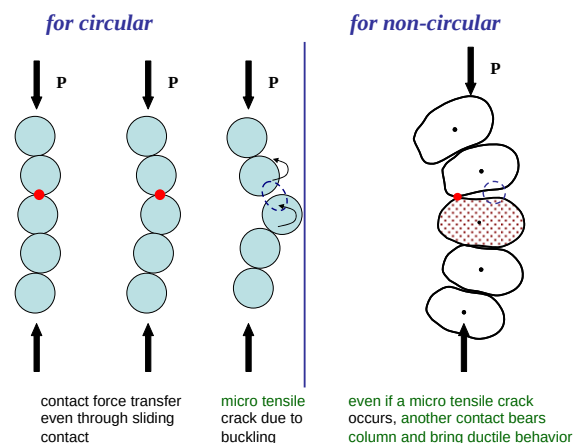


図6 粒子骨格構造の座屈と回転抵抗に関する概念

4. おわりに

本数値実験から粒状材料の変形・破壊挙動は粒子間のすべりだけでなく、粒子構造の座屈的崩壊する際に粒子間に引っ張り抵抗がないことが原因であると考えられる。したがって、粒状材料の補強はこの引っ張り抵抗を加え座屈を抑制することが効率的と考えられる。今後は、粒子構造の座屈抑制の観点から土の補強メカニズムについて検討する。

参考文献：

- 1) K. MAEDA and H. Hirabayashi: Influence of grain properties on macro behaviors of granular media by DEM, Journal of applied mechanics, Vol.9, pp.623-630, 2006.
- 2) E. Ibraim, D. Muir WOOD, K. Maeda and H. Hirabayashi: Fibre-reinforced granular soils behaviour: Numerical approach, IS-Yamaguchi, Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media, pp.443-448, 2006.
- 3) Oda, M. and Iwashita, K.: An Introduction mechanics of granular materials, Rotterdam, BALKEMA, 1999.