

DEM を用いた粒状材料の変形・破壊挙動に及ぼす粒度分布の影響

名古屋工業大学 学生員 ○平林大輝

名古屋工業大学 正会員 前田健一

1. はじめに 著者らは土石流のマクロな流動挙動と流れ中に生じる粒子集合体の力学挙動との関係について事例解析や対策効果も含め調べている^{1), 2)}。本報告では、この研究の一環として DEM を用いて広範な粒度を有する粒状材料の変形・破壊挙動について調べ、内部構造にも着目しながら考察した。

2. 解析手法および解析パラメータ 解析には2次元個別要素法 (Distinct Element Method: DEM) を用いた。本報告では円形粒子のみ用い、図-1 に示すような重量分布で正規分布の粒度を4種類作成した。最大粒径 $D_{\max}=100\text{mm}$ のもとで最小粒径 $D_{\min}$ を変化させた。粒度の指標として粒径比 $R_D = D_{\max} / D_{\min}$ ($=2, 5, 10, 20$) を用いた。また、粒子特性と応力条件にのみ依存した構造を観察するために、無重力下において等方圧縮、側圧一定のせん断 (ひずみ制御) の二軸圧縮試験を実施した。壁要素 (摩擦なし) を用いて応力・ひずみを制御している。供試体の様子を図-2 に示す。最大主応力方向を y 方向とし、直ひずみ ε_{xx} と ε_{yy} 、体積ひずみ ε_v 、平均主応力 σ_m と最大せん断応力 τ_m を用いて整理する。解析パラメータは既報³⁾に詳しい。

試料の物理特性として最大・最小間隙比 ($e_{\max}$ と $e_{\min}$) 及び間隙比幅 ($e_{\max} - e_{\min}$) を以下の方法で算定し、粒度との関係を図-3 に示す。供試体の壁要素境界で囲まれた四角領域に適当な間隙率 (間隙比) n_g (e_g) になるように粒子 (発生時の粒子間摩擦係数 $\tan \phi_{\mu g}$) を発生させる。発生時には粒径を十分に小さくし、発生後に壁要素を固定したまま全粒子を目標とするサイズまで等方的に拡大する (‘発生時パッキング’)。その後、等方圧縮応力 $\sigma_{m0}=0.05$ (MPa) にする。さらに同応力下で全粒子の摩擦係数を試験で用いる値 $\tan \phi_{\mu}$ (本報告では 0.25) にし供試体を安定させた後 (‘初期パッキング’), 圧密応力 σ_{mc} まで圧縮、せん断する。ここでは、 $n_g=0.40$ ($e_g=0.67$) (発生時パッキングの状態ではどの粒子もお互いに接触状態にない), $\tan \phi_{\mu g}=1.00$ として最も緩い供試体を作成した ($\tan \phi_{\mu g}$ の値を変化させることで密度調整が可能である)。一方、 $n_g=0.10$ ($e_g=0.11$), $\tan \phi_{\mu g}=0$ とすれば粒子は押し込められたようになり供試体は密詰めとなる。この二つの初期パッキング時における間隙比をそれぞれ $e_{\max}, e_{\min}$ とした。図-3 から分かるように粒度が良いほうが $e_{\max}, e_{\min}$ は小さく締め易く、 R_D が小さく平均粒径が小さくなると ($e_{\max} - e_{\min}$) は若干大きくなるようである。同様な傾向は実際の砂でも得られている⁴⁾。

3. 解析結果および考察 図-4, 図-5 は最も密な試料と緩い試料の変形・破壊挙動を示している。密度状態が同じであれば粒度が異なるもののほぼ同じ挙動を示していることは興味深い現象である。砂の実験においても粒度分布の影響は粒子形状など他の粒子特性に比べると大きくないという結果⁵⁾が得られておりこの結果と合致する。また、粒度の影響について構造の発展・消失という概念で説明できるという報告⁶⁾もある。さらに比体積 $v=(1+e) \sim \sigma_m$ 関係 (図-6) も調べた。拘束圧・密度依存性が再現され、密と緩の供試体で差が見られるもののほぼユニークな限界状態線の存在が確認できる。図-7 にはそれぞれの粒度について限界状態線を最も近似度が高い直線で近似し整理した。近似直線の切片項 (a_0) は粒度の影響を強く反映し、傾度項 (a_1) は R_D が大きく粒度良いもののほど若干小さくなるようである。

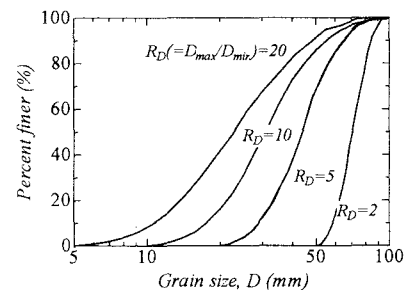
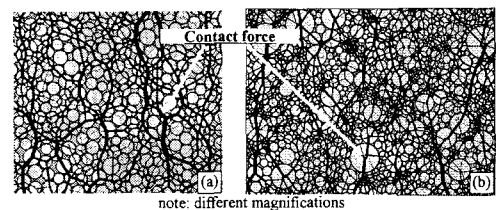
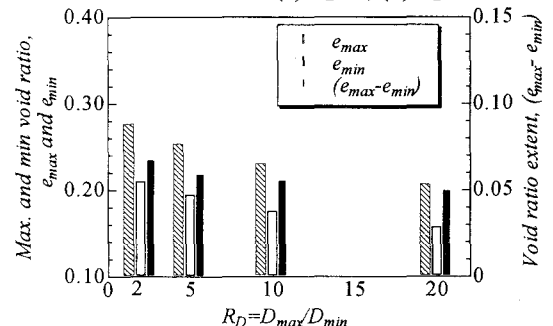


図-1 計算に用いた試料の粒度分布

図-2 供試体の様子: (a) $R_D=2$, (b) $R_D=20$ 図-3 供試体の最大・最小間隙比 $e_{\max}$ と $e_{\min}$

内部構造について調べるために、せん断初期における1粒子当たりの接点数（配位数） N_c^p の頻度分布および接点力 f_c の大きさの累積頻度をそれぞれ図-8および図-9に示す。粒度の良い（ R_D が大きい）もののほど分布の分散は大きく最大値は大きい、最頻値は小さくゼロ配位数の頻度が高くなる。これに対応して、粒度が良いと接点力の分散は小さく最大値は小さいが、 f_c がゼロで力を伝えず全体の剛性に貢献していない接点の割合が高くなる。さらに平均配位数 N_c^{ave} のせん断過程に伴う変化を図-10に示す。ここで、 N_c^{ave} は接点力伝達経路網の安定性を意味する³⁾と考えられる。密詰め、緩詰め供試体ではそれぞれの供試体で空隙比が異なるにもかかわらず N_c^{ave} はほぼ等しく、このことが図-4、5のような現象の理由と考えられる。また密詰めではせん断とともに N_c^{ave} が減少し構造の安定性が低下している。図-11に N_c^{ave} と σ_m との関係を示す。比体積と同様、限界状態線が存在している（同様な傾向を粒子形状が異なる試料についても得ている⁷⁾）。応力誘導異方性の発展則³⁾の観察については紙面の制約から省略する。

4. おわりに 通常砂はその粒度が良いほど良い材料と考えられているが、本解析結果では、粒度の影響がほとんどなかった。これは接点伝達経路網（内部構造）の安定性を示す配位数（粒子接点密度）が接点力の分散によって粒度に関わらずほぼ等しいことが理由と考えられる。

参考文献：

- 1) 平林・前田・菅井：第40回地盤工学研究発表会講演集，pp.2353-2354，2005。
- 2) 中谷・前田・菅井・筒井・杉井：砂防学会誌，Vol.58，No.4，pp.35-40，2005。
- 3) 桑原・大野・前田：土木学会応用力学論文集，Vol.5，pp.431-440，2002。
- 4) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S.: S&F, Vol.37, No.3., pp.53-64, 1997。
- 5) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S.: S&F, Vol.38, No.4., pp.159-172, 1998。
- 6) 中野ら：第39回地盤工学研究発表会講演集，pp.483-484，2002。
- 7) 大村・櫻井・前田：第40回地盤工学研究発表会講演集，pp.923-924，2005。

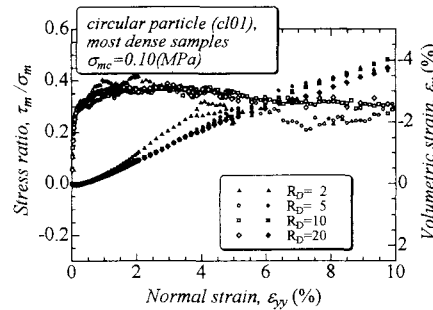


図-4 最も密な試料の変形破壊挙動

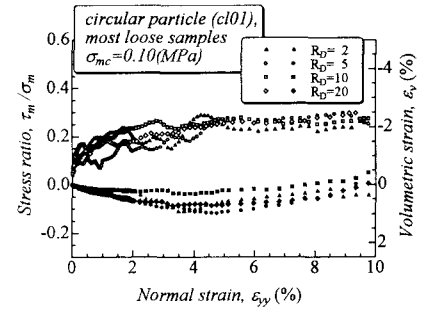


図-5 最も緩い試料の変形破壊挙動

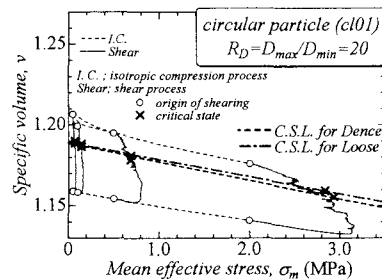


図-6 比体積 v と平均有効主応力 σ_m の関係: $R_D=20$

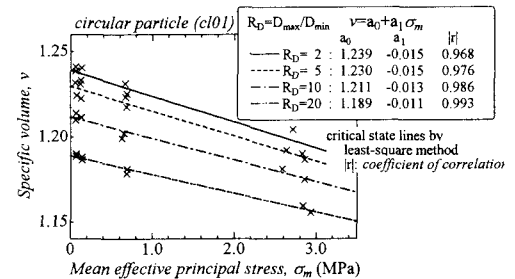


図-7 限界状態（近似）線の特性に及ぼす粒度の影響

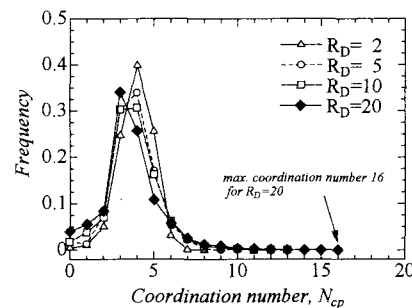


図-8 せん断初期における配位数の頻度分布

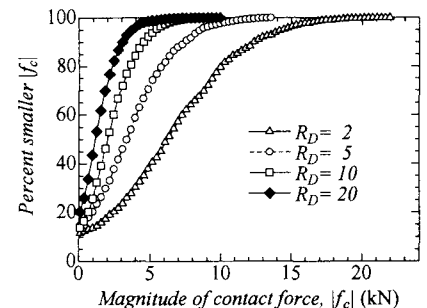


図-9 せん断初期における接点力の累積頻度分布

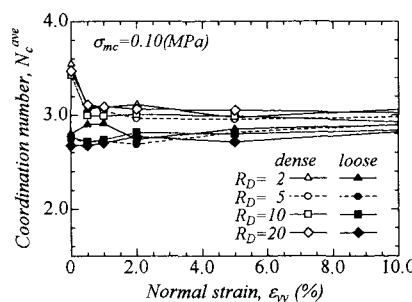


図-10 平均配位数（構造の安定性）の変化に及ぼす粒度の影響

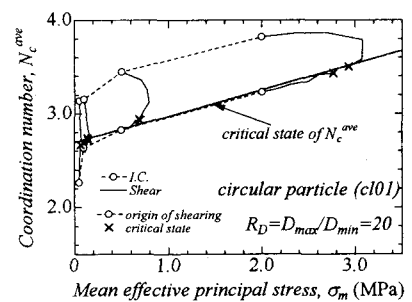


図-11 平均配位数（構造の安定性）と平均有効主応力 σ_m 関係: $R_D=20$