

## DEMによりモデル化された破砕性材料の限界圧力

山口大学工学部	正会員	中田 幸男
舞鶴工業高等専門学校	正会員	加登 文学
山口大学大学院	正会員	兵動 正幸
山口大学工学部	正会員	村田 秀一

## 1. はじめに

破砕を伴うような拘束圧域をふくむ土の弾塑性挙動を、カムクレイが基礎におく限界状態の概念に照らしあわす研究が活発に行われている(Miura, et al, 1984, Yasufuku, et. al, 1991, Coop, 1999, McDowell, et. al, 2002)。ここでは、粒子破砕現象をとりいれた個別要素法シミュレーション結果にもとづいて、限界状態の平均有効主応力を、ある間隙比における正規圧密線と限界状態線の圧力比として表し検討する。

## 2. DEM 破砕性材料の限界状態

本研究でもちいる個別要素法は、従来多くの研究者が用いているものと基本的には同様である。ここでのシミュレーションに対する特長は、球要素のかたまりとして、土粒子を表現することであり、球要素間に 4N の結合強度を与えている。この結合は、引張力およびせん断力に対して有効に作用し、その強度をいずれかが超えて以降は、その作用を失う。さらに、結合を付与されていない球要素間には、すべりモデルが適用される。これは球要素間の接点でのせん断力に、摩擦係数 0.5 のクーロン規準に基づいて限界を与えるもので、限界を超えた接点ではすべりが生じることを表すものである。粒子間接点にはせん断方向および垂直方向に剛性が与えられる。いずれの方向にも同じ剛性が与

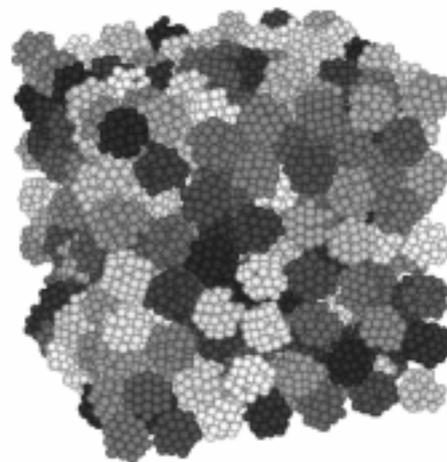


図1 モデル化された破砕性土の集合体

えられ、 $k=2, 4, 8, 16 \times 10^6$  N/m のいずれかが与えられた。土粒子となる球要素のかたまりは、初期に重なりを 0 にするためや、出来るかぎりかたまり内に間隙を作らないために、規則的かつ球形に配列される。その後、土粒子が本来有している形状や強度の不均一性を表すために、各々の球要素を 20% の確率で取り去った。コンピュータの計算時間の関係で、1 かたまり最大 57 要素、228 接点 (= 228 結合強度) となるように設定し、平均では 45.7 要素、146.4 接点となった。このような形で設定した DEM 粒子は、結果として実際の砂の単粒子強度特性と類似の傾向を与えることが確認されている(Cheng, et al., 2003)。上述した破砕性土粒子としての球要素のかたまりに対する通常の等方圧縮試験や三軸試験などの力学試験をシミュレーションするために、複数作成し集合体化させた。このときの様子は図 1 に示すとおりである。この後、上下の境界面の変位速度が 0.05m/sec となるように等方圧縮および、所定の拘束圧に達した後の三軸圧縮試験が行われた(Cheng, et al., 2004)。図 2 は粒子間接点に  $4 \times 10^6$  N/m の剛性をもつ DEM 破砕性材料の定体積圧縮試験の結果について、図 (a) に有効応力経路を、図 (b) に間隙比と  $\log p'$  との関係を示している。これらの図から、5MPa や 10MPa の結果では、擬似変相状態や変相状態の挙動が認められ、せん断後半では明確な正のダイランシー増分の発生が認められること、一方 20MPa や 40MPa の結果では、せん断中おおむね負のダイランシー挙動のみを示していること、などがわかる。加えて、 $e-\log p'$  関係から個別要素法によりモデル化された破砕性材料についても、実際の破砕性土と同様、限界状態線が等方圧縮曲線から左におおよそ平行移動した位置に存在していることが認められる。

キーワード 破砕性土、DEM、限界状態線、正規圧縮線、カムクレイモデル

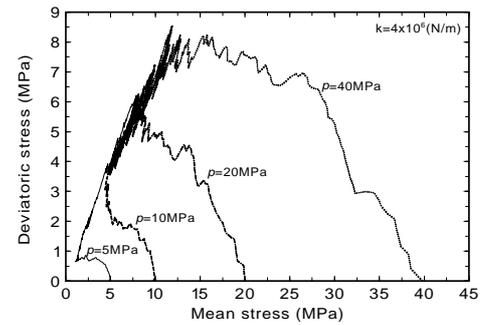
連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 nakata@yamaguchi-u.ac.jp

### 3. 限界圧力と土粒子の剛性、 /

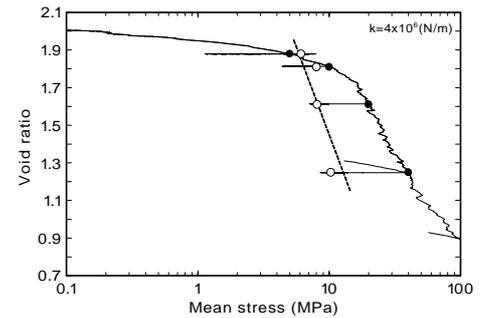
さて、この DEM 破砕性材料の結果について、 $p'_{NC}=20\text{MPa}$  の  $p'_{cs}/p'_{NC}$  と粒子の変形係数  $E$  の関係を示したものが図3である。ここで粒子の変形係数は、単粒子破砕シミュレーションにおける荷重  $F$  - 変位  $d$  関係の勾配から、 $E= F/(d \cdot d_0)$  として定義した。ここで  $d_0$  は、その数値実験に供した粒子の初期高さである。また、 $p'_{cs}/p'_{NC}$  は、正規圧縮線と限界状態線との隔たりをしめすもので、ある間隙比における正規圧縮線と限界状態線の比で表すものである。図中には、実際の砂質土で得られた関係も示されている。実際の砂質材料であっても、DEM 破砕性材料においても、粒子の変形係数が増加するとともに  $p'_{cs}/p'_{NC}$  の値が減少していることがわかる。つまり、土粒子が軟らかく破砕性材料とよばれる材料の正規圧縮曲線と限界状態線の隔たりは、シリカ系のような硬い材料の隔たりに比べ近いことがわかる。これは、粒子の変形係数が巨視的な材料特性の重要な要素となることを示唆している。また、この粒子の変形係数には弾性波探査などから得られる弾性係数が密接に関係する可能性もあり、これらのデータの蓄積は工学的意義が高いといえる。また、DEM 破砕性材料および前述した実際の砂質土の  $p'_{cs}/p'_{NC}$  と / の関係を示したものが図4である。破砕性材料に対する  $p'_{cs}/p'_{NC}$  の値は、カムクレイモデルの  $p'_{cs}/p'_{NC}$  と / の関係より上側に位置し、逆に破砕を示しにくいシリカの値は、カムクレイのその関係より下側に位置している。それと対応するように、DEM 破砕性材料の結果も、粒子の変形係数の大きなものほど、カムクレイのその関係から下方に離れるように位置していることがわかる。つまり、破砕性材料、見方を変えると粒子の変形係数の小さな材料ほど、 $p'_{cs}/p'_{NC}$  の値、つまり限界状態線が正規圧縮曲線に相対的に近いことを意味している。この点についてこれまで十分な議論はなされてはいないが、破砕性材料の弾塑性挙動を論じる上で重要な点と考える。

#### 参考文献

- Miura, N., Murata, H. and Yasufuku, N. (1984) "Stress-strain characteristics of sand in particle-crushing region", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.1, pp.77-89.
- Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M. (1991) "Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.95-101.
- Coop, M.R. (1999) "The influence of particle breakage and state on the behaviour of sands", *Proceeding of International workshop on Soil Crushability*, pp.19-57.
- McDowell, G.R., Nakata, Y. and Hyodo, M. (2002) "On the hardening of sands", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp. 349-358.
- Cheng, Y.P., Nakata, Y. and Bolton, M.D. (2003) "Discrete element simulation for crushable soils", *Geotechnique*, Vol.53, No.7, pp.631-641.
- Cheng, Y.P., Bolton, M.D. and Nakata, Y. (2004) "Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM", *Geotechnique*, Vol.54, No.2.



(a) 有効応力経路



(b) 間隙比と  $\log p'$  との関係

図2 DEMによる定体積圧縮試験結果

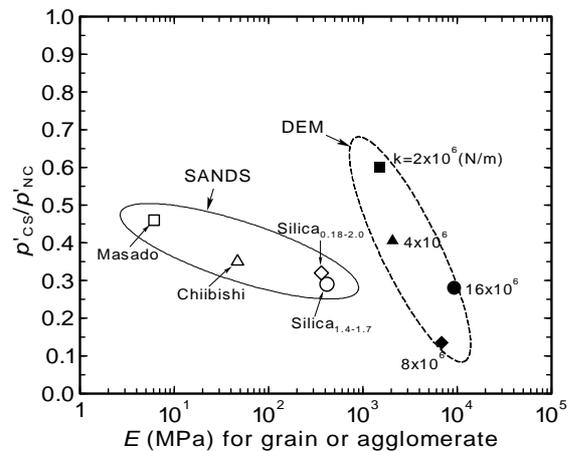


図3  $p'_{cs}/p'_{NC}$  と変形係数  $E$  との関係

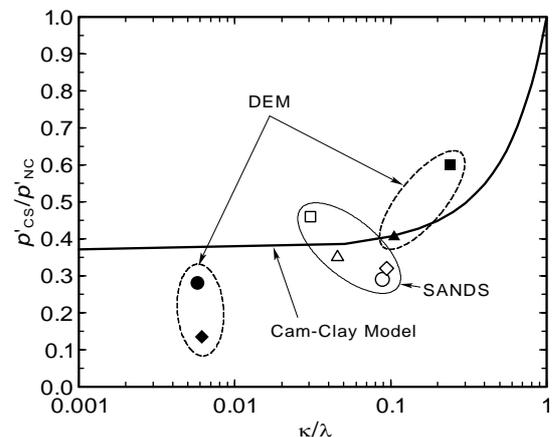


図4  $p'_{cs}/p'_{NC}$  と  $\kappa/\lambda$  との関係