

DEMによる密度・過圧密履歴が異なる粒状材料の 変形・破壊挙動と内部構造の変化の解析

Analyses of deformation-failure behaviors of granular materials with different densities and over-consolidation histories and changes in microstructures by DEM

桑原直範*・大野了悟**・前田健一***

Naonori KUWABARA, Ryougo OHNO and Kenichi MAEDA

*正会員, 工修, 中央復建(株) (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4丁目11番10号)

** 学生員, 大学院生, 名古屋工業大学大学院システムマネジメント工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

*** 正会員, 工博, 名古屋工業大学システムマネジメント工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Granular material shows non-linear deformation behaviors depending on density and over-consolidation histories. The evolution and collapse of microstructures formed in granular material control the macro behaviors. In this paper, the density and over-consolidation dependencies of deformation-failure behaviors were calculated by DEM in two-dimensional test. The geometric parameters such as fabric tensor described for stress-induced anisotropy and coordinate number, evolutions of stable microstructures and mobilization of rotation resistance around particles, were investigated. On the basis of analysis results, it was revealed that the collapse of stable structure during macro deformation induced the macro failure and the dependencies of density and over-consolidation were controlled by the mobilization of rotation resistance due to particle shape effects.

Key Words: density dependency, over-consolidation, anisotropy, rotation resistance

1. はじめに

粒状体の顕著な非線形変形挙動は、粒子形状、粒子の摩擦特性など個々の粒子が持つ性質および集合体としての密度や応力履歴に強く影響を受ける。また、粒子の接触関係によって形成される微細構造の形成・消滅に支配されると考えられる。

粒子形状は、ミクロには粒子接点での粒子間滑りに対する安定性や接点での変形性に影響する¹⁾。また、球形の粒状材料に比べて粒子形状が角張っている粒状材料の変形は、延性的であるとともに、拘束圧や密度変化の影響を受けやすいことが実験や数値解析で示されている¹⁻⁶⁾。応力比 $\sim$ ひずみ増分比関係も粒子間の摩擦係数が同じであっても、粒子形状が異なる場合には大きな違いがみられる¹⁻⁶⁾。しかし、マクロな変形・破壊挙動の密度依存性・拘束圧依存性・過圧密履歴依存性の発揮メカニズムに及ぼす粒子形状の影響については明確にはされていない。

一方、マクロな変形に伴って粒状材料の内部では粒子接点力を伝達する経路網が現れ微細構造を形成することが知られている⁷⁾。この微細構造が発達・消滅することで粒状材料の非線形性が生じることが、実験や解析^{8), 9)}によ

って示されている。微細構造の変化によって生じる応力誘導異方性や構造の消失を考慮した弾塑性力学モデルが提案されマクロな挙動を表現するための工夫がなされている^{10), 11)}。したがって、密度の違いや応力履歴を受ける粒状材料の変形に伴う内部構造の発展則とそのメカニズムを明らかにすることは重要な課題である。

本論文では、個別要素法 (DEM) を用いて、粒子形状が異なる2種類の粒状材料の変形・破壊挙動の密度依存・過圧密履歴依存性について二次元変形解析を行った。解析結果から、粒子の接触密度や異方性など内部の粒子接触状態を表す幾何学量や粒子接点の接触状態の安定性や粒子周りに動員される回転抵抗に着目してそれらとマクロな変形・破壊挙動との関連について検討する。

2. 解析手法と解析条件

本論文では、砂のような粒状材料を対象とし、マクロな変形に伴う供試体内部の幾何学特性、粒子間のすべりや回転を観察するために個別要素法¹²⁾ (Distinct Element Method) を用いる。

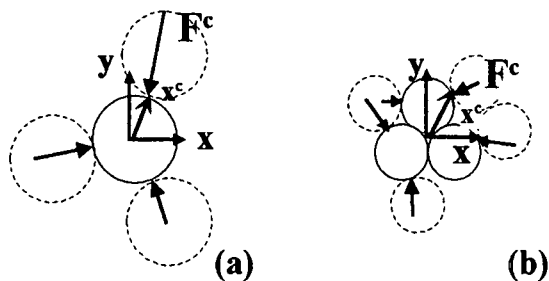


図-1 解析に用いた(a)円形粒子と(b)非円形粒子

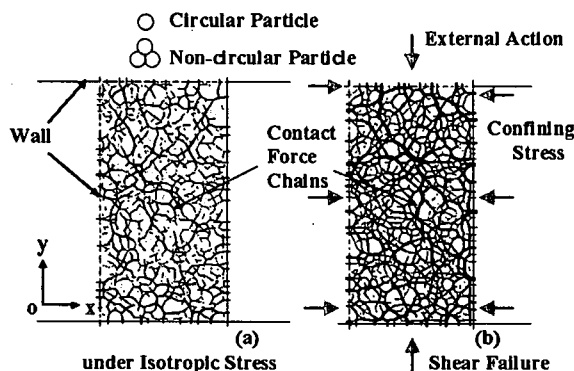


図-2 DEM 解析の供試体の様子: (a)等方圧縮時, (b)せん断破壊時

2.1 用いた DEM の概要

個別要素法 (DEM) 解析では粒子を剛体粒子と仮定し、要素物質の変形特性は要素間の接触点に弾性バネ、粘性ダッシュポットやスライダーを想定することで表現する。バネとダッシュポットは接触面法線方向 k_n と接線方向 k_t の両方に配し、接線方向にはクーロンの摩擦則に従うスライダーによって要素間の摩擦すべり (摩擦係数 $\tan \phi_\mu$) を考慮している。

本解析では、壁境界要素を用いて供試体のマクロな変形・応力を制御している。供試体にマクロな作用をもたらす壁の速度は、十分に小さなものとし静的条件下で制御した。粒子要素として、円形粒子と同径の3粒子を三角形状に連結させ1つの粒子とした非円形粒子の2種類の粒状体を用いた (図-1 参照)。また、非円形粒子の場合、円形粒子の集合体を作成した後、1円形粒子を、大きさのほぼ等

しい結合した3円形粒子に置き換えることで供試体を作成している。

図-2 に等方応力時とせん断破壊時の供試体の様子を示している。供試体の作成時には、無重力状態とし、パッキング初期には粒子同士が接触しない程度に緩く粒子を発生させ、その後、壁要素を移動させて所定の供試体作成時の拘束圧 ($\sigma_{c0} = k_n \times 5 \times 10^3$) になるようにする。その際の粒子間の摩擦係数を調整することで供試体の密度を調整した。例えば、摩擦係数 $\tan \phi_\mu = 0.0$ とした場合には密詰めとなり、 $\tan \phi_\mu = 1.0$ とした場合にはかなり緩詰めとなる。その後、同一の拘束圧の下で、一律に摩擦係数を $\tan \phi_\mu = 0.25$ に変換し安定な収束状態となってから、所定の圧密応力まで圧縮した。粒子を降らせて供試体を作成した場合には異方性が生じることが懸念される。また、振動によって密度調整する場合には計算時間の増大が考えられる。本論文では簡単のために上記の作成方法とした。

解析コードはプログラム PFC2D (Itasca 社製) を援用した。

2.2 解析パラメータ

用いた解析パラメータを表-1 に示す。粒子と壁の摩擦はなく、粒子-壁間の剛性は粒子間のものに等しくした。本研究では、内部構造の変化に伴う粒状体の非線型挙動を調べるためにバネは線形弾性としている。減衰定数は臨界減衰状態になるように設定した。また、粒子数を自由に变化させ、供試体の大きさは粒径との相対的大きさ (粒子数) の影響のみとするために、体積力としての重力は作用させない。したがって、粒子パッキングや発生する微細構造は境界応力によってのみ支配される。また、粒子数は約 4000 個である。

2.3 供試体内応力・ひずみの定義

二軸圧縮試験であるので、供試体の上下・左右の壁要素にはそれぞれの最大主応力 $\sigma_1 = \sigma_{yy}$ と最小主応力 $\sigma_2 = \sigma_{xx}$ が作用している。それぞれの直ひずみは、 ε_{yy} と ε_{xx} である。また、最大せん断応力と平均主応力は $\tau_m = (\sigma_{yy} - \sigma_{xx})/2$ 、 $\sigma_m = (\sigma_{yy} + \sigma_{xx})/2$ となる。本論文では応力は全て有効応力である。

粒子に作用する接点力を粒子が占める領域で平均化された応力 σ_{ij}^p ($i, j = x, y$) が定義できる¹³⁾。

$$\sigma_{ij}^p = -\left(1/V^p\right) \sum_{N_c} x_i^c F_j^c \quad (1)$$

ここで、 N_c : 着目した粒子の接点数、 V^p : 粒子面積、 x_i^c : 力の作用点、 F_i^c : 接点力である (図-1 参照)。一般性を持たせるために、物質要素 (この場合は粒子) の回転に自由度を加えたマイクロポーラ理論¹⁴⁾ を適用すると釣り合い式は次のようになる。

$$\sigma_{ij,i}^p = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_y}{\partial y} + (\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) = 0 \quad (3)$$

表-1 DEM 解析に用いたパラメータ

Parameters	Particle - Particle
Density (kg/m ³)	2700
Diameters (mm)	0.5-1.0
Normal Spring Coefficient k_n (kN/m/m)	5×10^8
Tangential Spring Coefficient k_t (kN/m/m)	5×10^7
Damping	Critical Damping
Resistant Friction Angle ϕ_μ (deg.)	$\tan \phi_\mu = 0.25$

式(3)は偶応力 m_x, m_y に関する釣合い式である。ここで、 m_x, m_y はそれぞれ x, y 面に働き、回転軸を紙面垂直方向にもつ偶応力である。式(1)から応力 σ_{ij}^p を算定した場合、せん断応力が非対称 $\sigma_{yx}^p \neq \sigma_{xy}^p$ となればこの不釣合いを打ち消すために粒子周りに偶応力が発生していることを、式(3)は意味している。本論文では、得られた解析結果がモーメントに関する完全な釣合い状態にあるとし、上記の偶応力がその時点における粒子の回転抵抗を代表する指標と考える。そこで、回転抵抗の発揮度を応力比の関数 $(\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) / \sigma_m^p$ で表すことにする。本計算モデルでは、使用モデルの接点自体に偶応力を伝達するメカニズムは有していない。よって、本論文では、粒子の回転抵抗発揮度が、釣合い状態にある非円形粒子の幾何学的配置や接点力ベクトルに依存して発現すると考える。図-3には本解析で用いた非円形粒子の3個の配置とそれに作用する接点力ベクトル方向の違いによる回転抵抗発揮度 $(\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) / \sigma_m^p$ の高低について簡単に模式的に示している。円形粒子では $(\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) / \sigma_m^p$ の値は0となる。しかし、非円形粒子は回転抵抗を有するので値が大きければ回転抵抗を発揮していることになる。

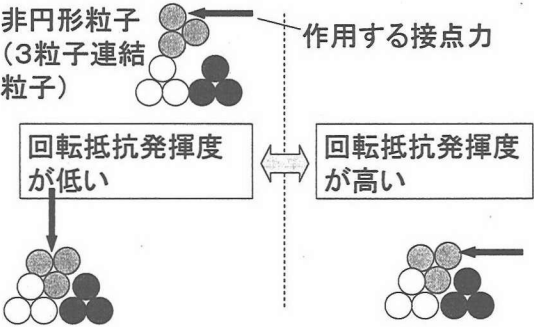


図-3 粒子の配置と接点力ベクトルとの違いによる回転抵抗発揮度の相違の例

2.4 安定な構造条件とファブリックテンソル

粒状材料内にはアーチング作用によって微細構造が形成される。ここで、微細構造単位について、重力(g ; 重力加速度)を有する二次元応力場 ($\sigma_{yy} = \sigma_1, \sigma_{xx} = \sigma_2$; いずれも主応力)において、接触面の接線方向のせん断力が全く発生せず、圧縮軸力(f_n)のみが働く最も安定な構造の形成条件について整理する⁹⁾。構造部材微小部分 ds の釣り合い式と解は以下になる。ここでは接点が稠密に連続的に並んでいると想定している。

$$\text{釣り合い式} \begin{cases} \frac{d}{ds} \left(f_n \frac{dx}{ds} \right) - \sigma_2 \frac{dy}{ds} = 0 \\ \frac{d}{ds} \left(f_n \frac{dy}{ds} \right) + \sigma_1 \frac{dx}{ds} + \rho g ds = 0 \end{cases} \quad (4)$$

解は以下になる。

1) 重力場のみの場合 ($g \neq 0, \sigma_1 = \sigma_2 = 0$)

$$y = a \cosh\left(\frac{x-b}{a}\right) - c \quad (\text{懸垂線}) \quad (5)$$

表-2 代表的幾何構造の最も安定な条件とファブリックテンソル主値の比 (F_1/F_2)

構造形状	最も安定な応力条件 (a, b は構造の長軸, 短軸の半径)	(F_1/F_2)	(F_1/F_2) と主応力比の関係
直線	$\sigma_1 \neq \sigma_2$	∞	—
円形	$\sigma_1 = \sigma_2$ (等方)	1	$(F_1/F_2) \equiv 1$
楕円形	$\sigma_1 / \sigma_2 = (a/b)^2$	$\equiv (a/b)^{1.53}$	$(F_1/F_2) \equiv (\sigma_1 / \sigma_2)^{0.77}$
ひし形	$\sigma_1 / \sigma_2 = (a/b)$	$\equiv (a/b)^2$	$(F_1/F_2) = (\sigma_1 / \sigma_2)^2$

(ただし、円形と楕円形状の構造の場合には接点が稠密に連続的に並んでいるとし、ひし形の場合には等粒径の4粒子によって構成されていると考えた場合)

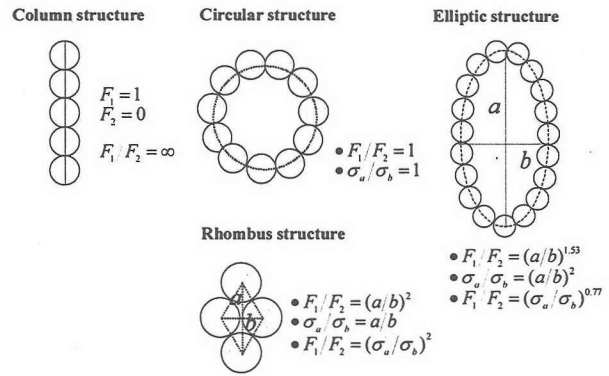


図-4 代表的な幾何構造の安定条件とファブリックテンソルの主値比 F_1/F_2

2) 二次元応力場 (例えば $g=0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2=0$)

$$y = (ax + b)^2 \quad (\text{放物線}) \quad (6)$$

または、

$$x = c \quad (\text{直線}) \quad (7)$$

3) 二次元応力場 ($g=0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0$)

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{(\sigma_1/\sigma_2) b^2} = 1 \quad (\text{楕円}) \quad (8)$$

この特別な場合として、

二次元等方応力場 ($g=0, \sigma_1 = \sigma_2 \neq 0$)

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (\text{円}) \quad (9)$$

ここで、a, b, c はいずれも幾何学条件から決まる定数である。二次元応力場で閉じた構造を考えると最も安定な構造は式(8)で与えられる楕円形状となる。したがって、アーチング(微細構造)の粒子間すべりに対して最も安定な条件は、その構造が置かれた応力空間の最大主応力方向 α_s と構造の長軸方向 α_{ms} とが一致した場合 ($\alpha_{ms} = \alpha_s$) であり、構造の形状については次式で与えられる(長軸半径 a、短軸半径 b)。

$$a/b = \sqrt{\sigma_1/\sigma_2}, \quad \alpha_{ms} = \alpha_s \quad (10)$$

より高い応力比下ほど、最大主応力方向に長軸が向いた、より扁平な異方性を有する構造ほど安定であるといえる。

一方、粒子の接触状態の異方性度合を示す指標としてファブリックテンソル¹⁵⁾を用いる。二次元のファブリックテンソル F_{ij} ($i, j = x, y$) は、次のようになる。

$$(F)_{ij} = \frac{1}{2M} \left(\begin{array}{cc} \sum \cos^2 \theta^{(k)} & \sum \cos \theta^{(k)} \sin \theta^{(k)} \\ \sum \sin \theta^{(k)} \cos \theta^{(k)} & \sum \sin^2 \theta^{(k)} \end{array} \right) \quad (11)$$

ここで、 k 番目の接点の接触面法線方向角を x 軸からとり $\theta^{(k)}$ とし、総接点を M 、主値を F_1, F_2 とする。主値の比 (F_1/F_2) が大きいほど、構造の異方性度合が高い。代表的な幾何構造の安定な応力条件とファブリックテンソル主値の比 (F_1/F_2) を表-2 に示す (図-4 参照)。

また、表-2 中の関係は、構造上のいずれの接点においてもせん断力が全く発生しない最も安定な応力状態を考えた場合である。したがって、たとえ接点が無数に並んでいても構造は安定である。しかし、実際には構成粒子数には限界があると考えられる。既報¹⁶⁻¹⁸⁾では、構造体単体に対して安定した応力状態にゆらぎを与え (主応力方向を 10deg. 程度回転させる)、その外乱によっても安定かどうかを検討した。その結果、安定な構成粒子数の限界は 7 ~ 10 程度であった。

3. 解析結果と考察

本節では、円形粒子と非円形粒子の供試体について等方圧縮と二軸圧縮試験を行なった結果を示す。せん断試験は正規圧密と過圧密の供試体について、側圧一定試験と定体積試験を実施した。円形粒子については密度依存性がほとんどみられなかった。本論文で検討する解析ケースを表-3 に示す。間隙比 e_0 は供試体作成時の平均主応力 $\sigma_{m0} = k_n \times 5 \times 10^3$ の下での間隙比である。また、せん断初期 (所定の圧密応力) の等方応力を σ_{m0} とする。

また、接触密度や異方性などの内部の粒子接触状態を表す幾何学量、粒子接点の接触状態の安定性や粒子周りに動員される回転抵抗に着目してマクロな変形・破壊挙動との関連について検討する。

3.1 マクロな変形・破壊挙動

まず、非円形粒子の等方圧縮と側圧一定せん断時の間隙比 e と平均主応力 σ_m との関係を図-5 に示す。

また、図-6, 7, 8 はそれぞれ非円形粒子のせん断挙動の密度依存性 ($\sigma_{m0} = k_n \times 10^4$)、緩詰め ($e_0 = 0.280$) と密詰め ($e_0 = 0.200$) の拘束圧依存性について示している。通常の実験で観測されるように緩詰めで拘束圧が高い方が破壊時の応力比が低く破壊に至るまでにひずみが多い。また、ダイレイタンスーは収縮傾向が強くなり延性的になっていることがわかる。

表-3 解析ケース

粒子形状	圧密	側圧一定	定体積
円形粒子	正規圧密	$e_0 = 0.163$	—
	過圧密	$\sigma_{m0} = k_n \times 10^4$	—
非円形粒子	正規圧密 (NC)	(Density) Dense: $e_0 = 0.200$ Medium: $e_0 = 0.230$ Loose: $e_0 = 0.280$ (Conf. Press.) $\sigma_{m0} = k_n \times 10^4$ $5 \times k_n \times 10^4$ $20 \times k_n \times 10^4$	(Density) Dense: $e_0 = 0.200$ Medium: $e_0 = 0.220$ Loose: $e_0 = 0.230$ $e_0 = 0.280$ (Conf. Press.) $\sigma_{m0} = k_n \times 10^4$
	過圧密 (OC)	$e_0 = 0.280$ $\sigma_{m0} = k_n \times 10^4$	—

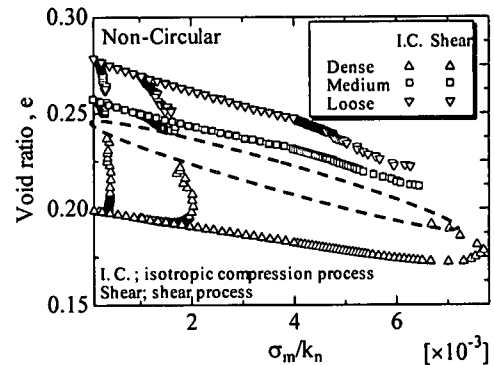


図-5 等方圧縮試験下の間隙比 e と平均主応力 σ_m ; 非円形粒子

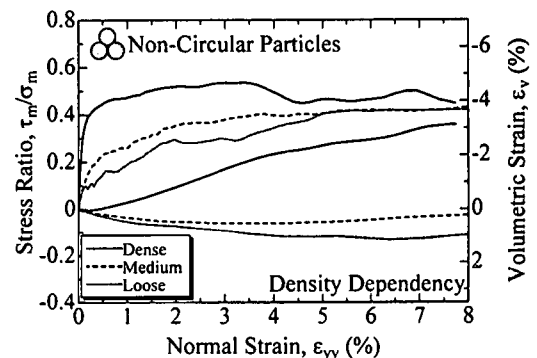


図-6 側圧一定下の変形・破壊挙動の密度依存性 ; 非円形粒子, 正規圧密

さらに、図-5 中の破線に示すように、十分せん断が進んだ限界状態を結んだ限界状態線が存在するようである。この領域よりも上方に位置する状態からせん断すると収縮傾向が強く、下方に位置する場合には膨張傾向が顕著である。

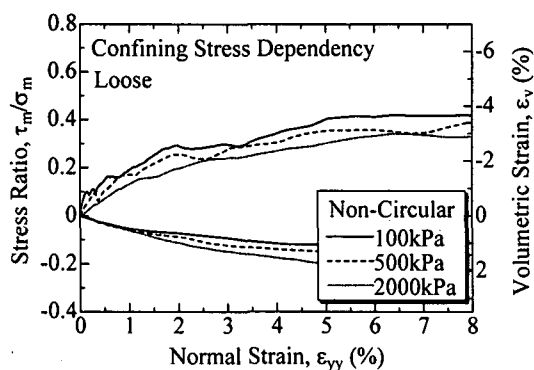


図-7 側圧一定下の変形・破壊挙動の拘束圧依存性；非円形粒子，正規圧密， $e_0=0.280$ （緩詰め）

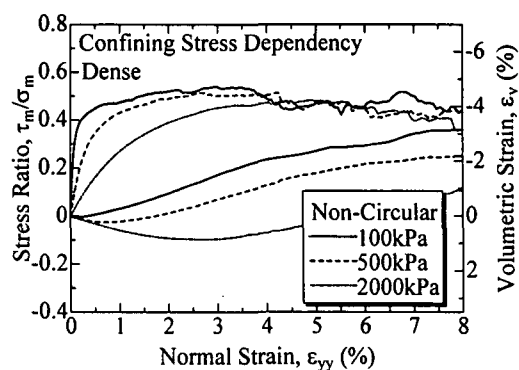
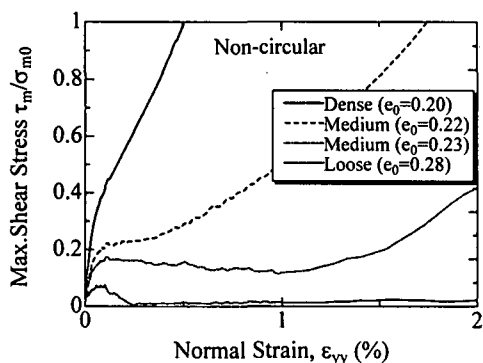
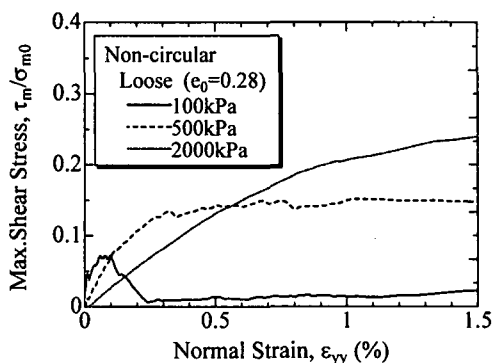


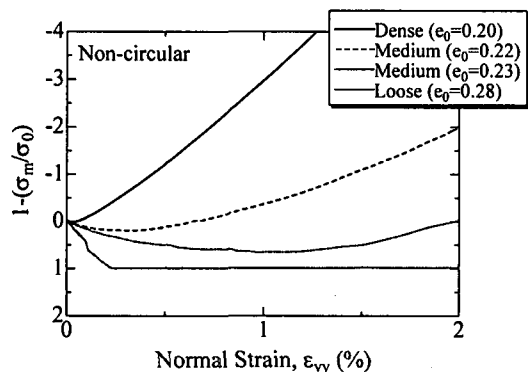
図-8 側圧一定下の変形・破壊挙動の拘束圧依存性；非円形粒子，正規圧密， $e_0=0.200$ （密詰め）



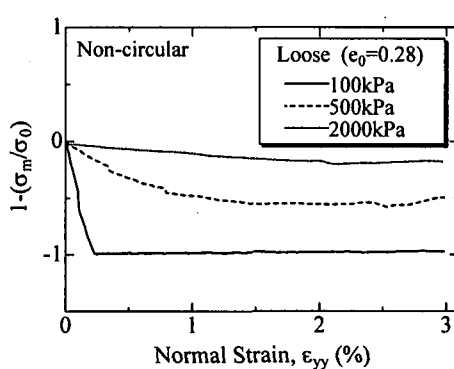
(a) 応力ひずみ関係



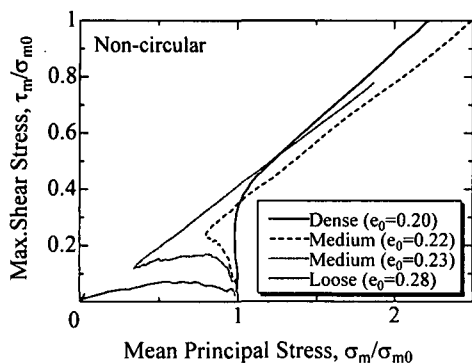
(a) 応力ひずみ関係



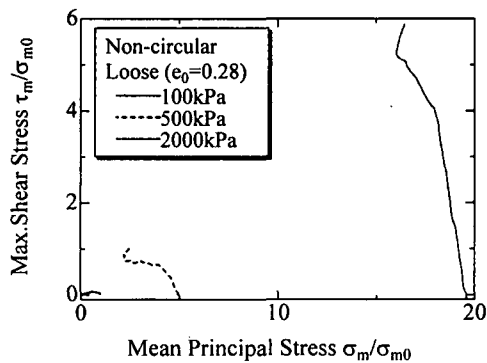
(b) 平均有効応力の変化



(b) 平均有効応力の変化



(c) 応力経路



(c) 応力経路

図-9 定体積下の変形・破壊挙動の密度依存性；非円形粒子，正規圧密

図-10 定体積下の変形・破壊挙動の拘束圧依存性；非円形粒子，正規圧密， $e_0=0.280$ （緩詰め）

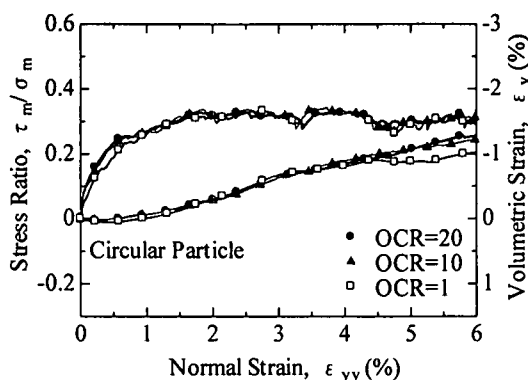


図-11 側圧一定下の変形・破壊挙動の過圧密比 (OCR) 依存性；円形粒子

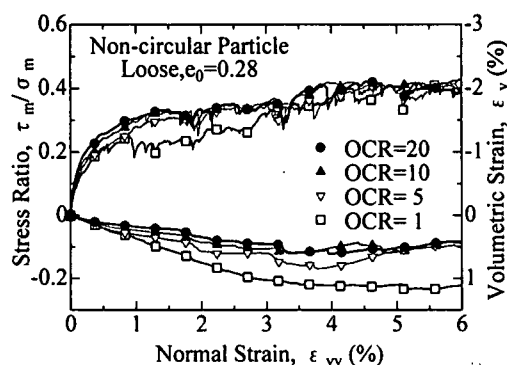


図-12 側圧一定下の変形・破壊挙動の過圧密比 (OCR) 依存性；非円形粒子, $e_0=0.280$ (緩詰め)

つぎに、図-9, 10 はそれぞれ、定体積下 (土の実験での非排水試験) のせん断挙動の密度依存性 ($\sigma_m = k_n \times 10^4$)、緩詰め ($e_0=0.280$) の拘束圧依存性について示している。十分な密詰め ($e_0=0.200$) の場合、ひずみの増加に伴い軟化を伴う流動的な変形を示す。このとき、平均主応力の関数 ($1 - \sigma_m / \sigma_m$) はほぼ 1 となり、液状化状態に至っている。一方、密度の増加に伴って変形挙動は非流動的となっている。砂の実験においても同様な結果が得られる¹⁹⁾。

さらに、図-11, 12 は側圧一定下でのせん断挙動の過圧密の影響をそれぞれ円形粒子と非円形粒子 (緩詰め $e_0=0.200$) の場合について示している。円形粒子では、過圧密比 OCR=20 であっても過圧密の影響がほとんど現れない。ガラスビーズやアルミ棒の実験でも同様の傾向がみられる。一方、非円形粒子の場合、過圧密履歴の影響によりせん断初期では剛性が高くなるが強度を発揮する時点では同じ強度になることが確認される。この傾向は実際の砂と同様^{20), 21)}であり非円形粒子を用いることにより砂の変形挙動が再現できるといえる。

したがって、非円形粒子の導入によって一般の粒状材料にみられるような変形・破壊挙動の密度依存・拘束圧依存性・過圧密履歴依存性の表現が可能になることがわかった。

3.2 マクロな変形に伴う内部の幾何学量の変化

図-13, 14, 15 はそれぞれ等方圧縮時、側圧一定下と定体積下のせん断過程における配位数 N_c (一粒子当りの平均接点数)²²⁾の変化を示している。密詰めでは等方応力下で $N_c=4$ である。等方圧縮時には平均主応力 σ_m の増加に伴い配位数 N_c は増加している。一方、せん断時にはせん断に伴い $N_c=2.5$ 程度まで低下している。特に、図-9 と図-15 の両図から、緩詰め供試体のように液状化に至るような場合には N_c がほぼ 2.5 程度になっている。また、剛性を十分に保持するか剛性を回復するときの N_c は 2.7~3 程度であることがわかる。

ここで、 $N_c=2$ の場合、平均的に、ある粒子が含まれる粒子間の接触経路は一曲線状 (一本道状) となるため、その構造は置かれた応力条件や幾何条件のわずかな変化に対しても脆弱になると考えられる。一方、 $N_c=4$ の場合の接触経路は四方に分岐し交差した密な曲線群 (網状) となることが容易に想像できる。このとき極めて構造は安定と考えられる。配位数は構造の発達限界や発生条件を支配する幾何学量であり、おおよそ $N_c=2.5$ 付近にしきい値があるといえる。既報¹⁾においても接触構造が供試体の端部から端部まで繋がった時に、供試体全体がせん断に対する耐力を発現し、内部の幾何構造が自己相似性を有することが指摘されている。

つぎに、主応力比 σ_1 / σ_2 の変化に伴う異方性の発達度合をファブリックテンソルの主値比 F_1 / F_2 で示したのが図-16, 17 である (ひずみ軟化過程のプロットは除いている)。異方性の主軸方向は最大主応力方向と一致していることを確認している。主応力比の増加に伴い、主値比 F_1 / F_2 は増加し異方性が発達している。これらの関係は、粒子形状、密度、拘束圧、過圧密比に関係なく図中に破線で示した次式のべき関数で近似できるようである。

$$F_1 / F_2 = (\sigma_1 / \sigma_2)^{0.5} \quad (12)$$

このような関係は、摩擦則に基づく考察からも導かれ²³⁾、修正応力の変換にも用いられる¹⁰⁾。異方性の発達則は弾塑性構成則のモデル化に重要な役割を果たしている。式(11)ではべき数が 0.5 であり、表-2 に示した最も安定な構造 (構造の主軸と構造に作用する応力の主軸が一致している構造) に対する関係式のべき数 (楕円形状: 0.77、ひし形: 2) に比べ小さくなっている。これは、仮に供試体内に発達する構造がひし形状や楕円形状のものであるとすると、供試体内の不均質性に起因する内部の応力状態の乱れが生じ、必ずしもマクロな最大主応力方向にのみ構造の主軸が発達する必要がないためと考えることもできる。

以上のことから、せん断に伴い異方性が最大主応力方向に誘導されつつも、配位数の減少による接触構造の脆弱化によって破壊が生じると考えられる。

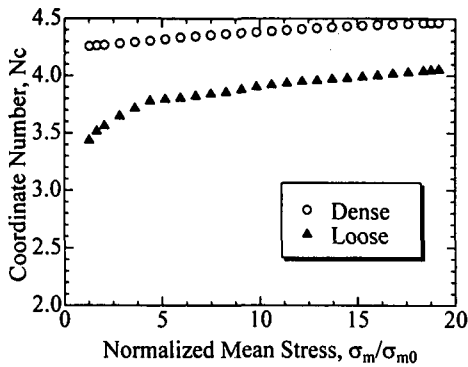


図-13 等方圧縮過程の配位数 N_c の変化; 非円形粒子, 図-5 参照, $\sigma_m = k_n \times 10^4$

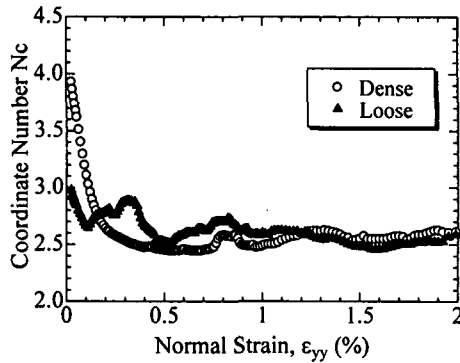


図-14 側圧一定下せん断過程の配位数 N_c の変化に及ぼす密度の影響; 非円形粒子, 図-6 参照

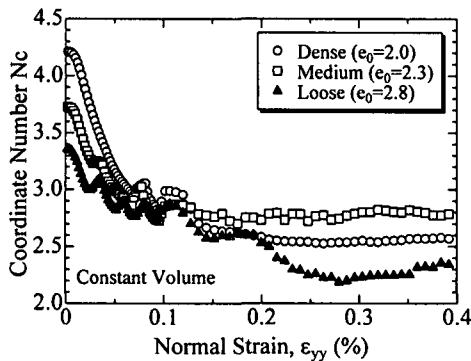


図-15 定体積下せん断過程の配位数 N_c の変化に及ぼす密度の影響; 非円形粒子, 図-9 参照

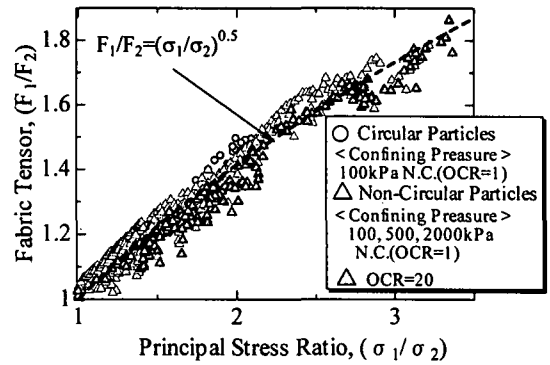


図-16 側圧一定下の異方性の変化; ファブリックテンソルの主値比 F_1/F_2 と主応力比 σ_1/σ_2

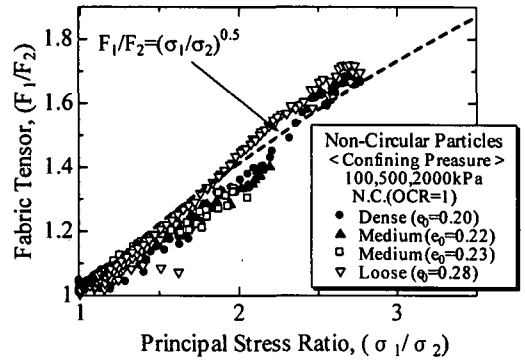


図-17 定体積下の異方性の変化; ファブリックテンソルの主値比 F_1/F_2 と主応力比 σ_1/σ_2

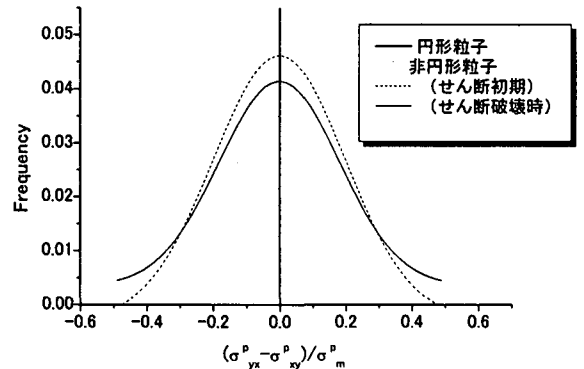


図-18 せん断過程における供試体内の回転抵抗発揮度分布の遷移; 分布曲線は平均値を0とする正規分布

3.3 マクロな変形に伴う回転抵抗発揮度の変化

粒子形状がどのようにせん断変形挙動とその密度・過圧密依存性に影響するかを調べる。

ここでは、2.3 節で導入した粒子周りの回転抵抗発揮度 ($\sigma_{yx}^p - \sigma_{yy}^p$) / σ_m^p に着目する。それぞれの粒子について調べ、回転抵抗発揮度と粒子数の頻度分布をせん断過程で調べた結果が図-18 である。せん断のどの過程においても回転抵抗を発揮しておりその形状は平均値0の正規分布で近似して良いと考えられる。そこで、この標準偏差を供試

体全体の回転抵抗発揮度とする。

回転抵抗発揮度が等方圧縮・除荷時においてどの程度発揮しているのか調べた結果が図-19 である。調べた供試体は緩詰、中詰、密詰の非円形粒子である。緩い供試体の方が高い回転抵抗発揮度を示している。緩詰めで一般的に高位な構造を有した供試体を作成するには粒子が角張っていて粒子周りの回転抵抗発揮度が必要であるといえる。等方圧縮・除荷時では緩詰、中詰ともに圧縮過程では回転抵抗発揮度が小さくなるが、密詰においては回転抵抗発揮度が大きくなる傾向がある。また、除荷過程ではどの供試体

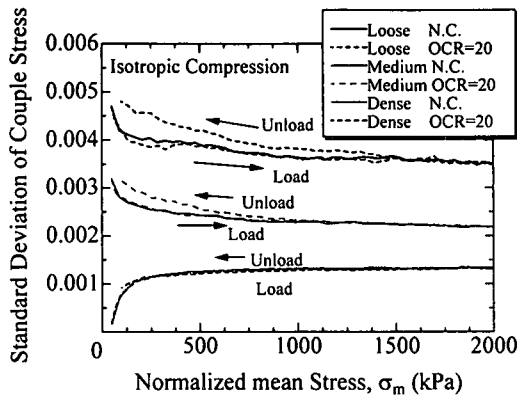


図-19 等方圧縮・除荷時における回転抵抗発揮度($\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p$)/ σ_m^p の標準偏差の遷移

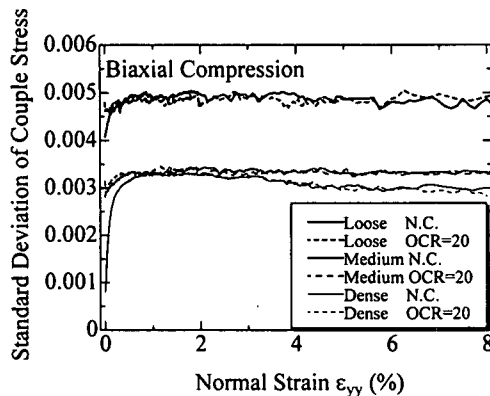


図-20 せん断過程における回転抵抗発揮度 ($\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p$)/ σ_m^p の標準偏差の遷移

も圧縮過程に比べ大きな値を示している。

つぎに、せん断過程での発揮度の遷移を図-20に示す。図-6を参考にする、供試体内の回転抵抗発揮度の標準偏差は、圧縮過程では顕著に増加し、膨張過程ではほぼ一定値を保つか、もしくは、なだらかに減少することがみとれる。したがって、圧縮過程では粒子間のひっかかりのような不安定な接触状態が壊れるとともにインターロッキング現象が卓越するものと予想される。

一方、過圧密履歴を受けた供試体の回転抵抗発揮度が正規圧密のものに比べて大きくなっている。したがって、せん断初期では過圧密の回転抵抗発揮度が大きくなる。しかし、せん断が進むにつれその差は解消され正規圧密のものと同じ値になることがわかる。このことから、過圧密履歴を受けた供試体内ではせん断初期において回転抵抗発揮度が高いだけマクロな剛性が高くなるが、せん断が進むにつれ回転抵抗発揮度が解消されることにより、破壊時では正規圧密の供試体と同じ強度になると考えられる。よって、過圧密履歴による砂のような粒状材料の変形・破壊挙動への影響は、粒子形状に起因する回転抵抗発揮度が重要な役割を果たしていると考えられる。

3.4 構造の安定度と回転抵抗発揮度の変化

さらに、粒子間のすべりに対する安定性と回転抵抗発揮度の関係を調べる。ここでは、粒子間すべりの危険度 $1/F_s = \tan \phi / \tan \phi_\mu$ (粒子間に動員される摩擦角 ϕ_μ ; 粒子

の物理摩擦角 ϕ_μ)を用いて考察する。着目した粒子の各接点に動員される $\tan \phi / \tan \phi_\mu$ の最大値をその粒子の危険度 $1/F_s$ とする。既報¹⁾では、等方圧縮時においても局所的には接点にせん断力が発生し、粒子間すべりが生じるとともに安定な接触状態にある粒子数の割合が増加することを明らかにした。

図-21は円形粒子のせん断過程における、危険度 $1/F_s$ と回転抵抗発揮度($\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p$)/ σ_m^p に関する粒子数の頻度分布の遷移を示したものである。円形粒子なので回転抵抗を発揮している粒子は存在せず、すべりに対する危険度 $1/F_s$ のみが遷移していることがわかる。また、せん断初期では安定な粒子接点の割合が多いが、せん断が進むにつれ危険度の高い ($1/F_s$ が大きい) 接触状態にある粒子の割合が増えていることがわかる。つまり、せん断破壊は粒子間の安定な接触構造が消失することにより生じると考えられる。

また、図-22に示すように非円形粒子の場合にも同様の傾向が見られるが、安定性の高い ($1/F_s$ が小さい) 接触構造が消失するとともに、危険度が高く ($1/F_s$ が大きく) なった粒子ほど回転抵抗が発揮されている。非円形粒子の場合、構造が消失しながらも回転抵抗を発揮するため、粘り強い砂らしい変形挙動をすると考えられる。

つぎに、非円形粒子の密詰め、緩詰め供試体のせん断初期における危険度 $1/F_s$ と回転抵抗発揮度の頻度分布をそれぞれ図-23(a, b)に示す。密詰めはせん断初期において安定な接触構造が多いが、緩詰めはせん断初期から危険度が高い ($1/F_s$ が大きい) 構造の割合が高くなっている (図-22(c)の破壊時の図に類似している)。また、せん断が進むにつれ緩詰め、密詰めともに安定な構造の消失が円形粒子と同様に確認された。つまり、密度による変形挙動の違いはせん断初期の安定な構造の割合の差に起因するといえる。

4. まとめ

本論文では、個別要素法を用いて、粒子形状が異なる粒状材料の変形・破壊挙動の密度依存・過圧密履歴依存性について、二次元変形解析を行った。マクロな変形に伴う内部の構造変化を考察した主な結果は以下のようである。

- 1) 個別要素法に非円形粒子を導入することで、円形粒子と比較して¹⁾、圧縮変形や破壊ひずみが大きくなり延性で粘りのある挙動が再現可能であることが確かめられた。変形・破壊挙動の密度・拘束圧・過圧密依存性には粒子形状の果たす役割が大きいことがわかった。
- 2) 粒子周りに発生する回転抵抗発揮度を定義し調べた。その結果、緩詰めの高位な構造の生成や過圧密効果発現には回転抵抗の発生が必要とわかった。
- 3) せん断に伴って安定な接触構造の割合と配位数が減少し、破壊は安定な構造の消失に起因することがわかった。また、配位数が3以下で2.5近くなると流動的変形が生じることがわかった。

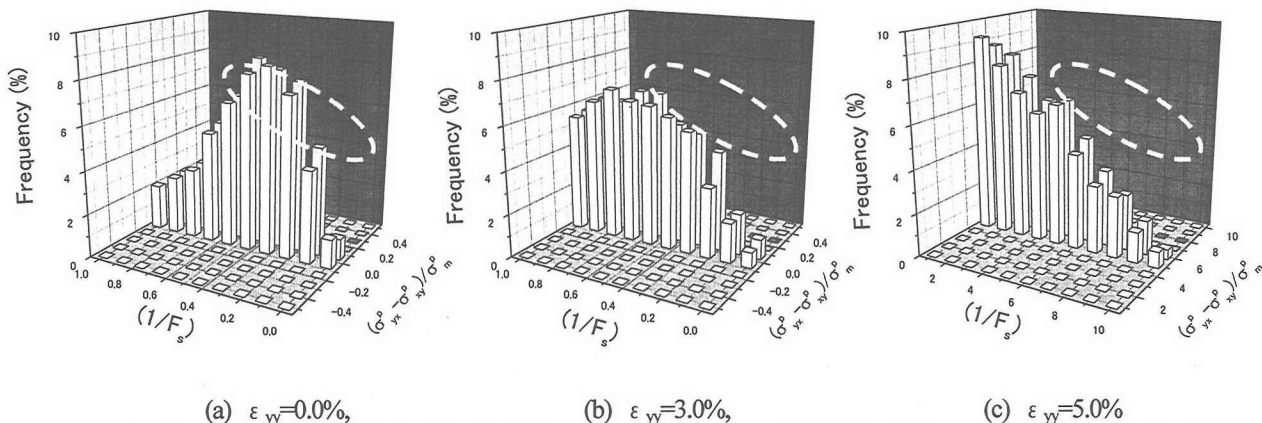


図-21 せん断過程での粒子当りの接触関係の危険度 $1/F_s = \tan \phi_c / \tan \phi_\mu$ 、回転抵抗発揮度 $(\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) / \sigma_m^p$ とその存在割合の遷移; 円形粒子, 正規圧密 (図-11 参照)

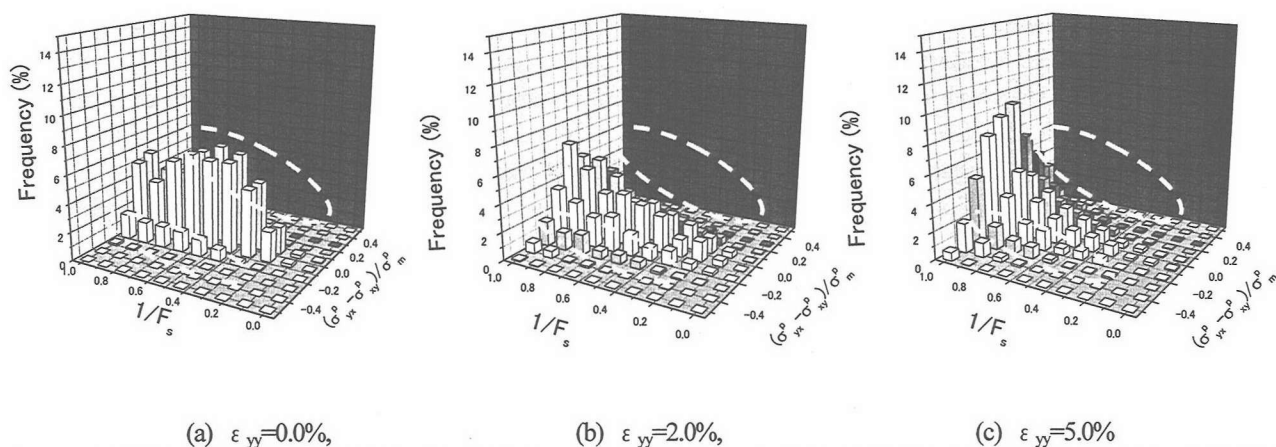


図-22 せん断過程での粒子当りの接触関係の危険度 $1/F_s = \tan \phi_c / \tan \phi_\mu$ 、回転抵抗発揮度 $(\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) / \sigma_m^p$ とその存在割合の遷移; 非円形粒子, 正規圧密 (図-6 参照), $e_0 = 0.200$ (密詰め)

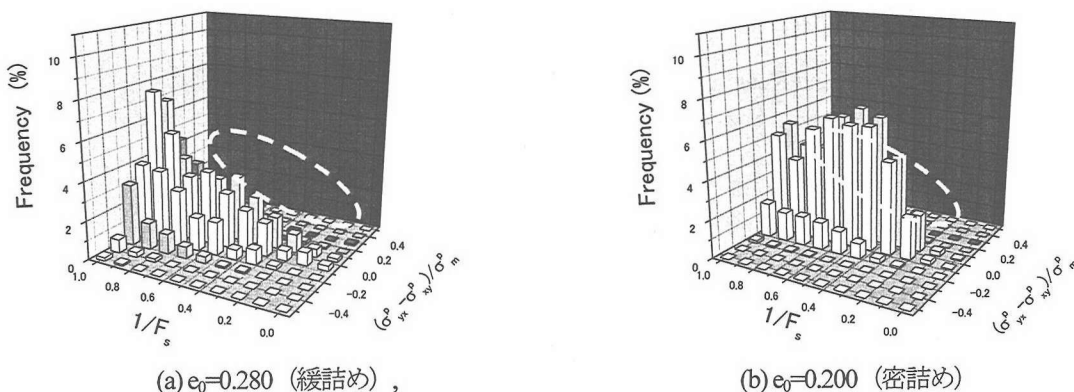


図-23 せん断初期 ($\varepsilon_{yy} = 0.0\%$) での粒子当りの接触関係の危険度 $1/F_s = \tan \phi_c / \tan \phi_\mu$ 、回転抵抗発揮度 $(\sigma_{yx}^p - \sigma_{xy}^p) / \sigma_m^p$ とその存在割合に及ぼす密度の影響; 非円形粒子, 正規圧密 (図-6 参照)

- 4) せん断に伴い誘導される異方性は式(12)で示される主応力比のべき関数で表されることが明らかになった。
- 5) 安定な接触構造の減少とともに発揮される回転抵抗発揮度が高くなる傾向があり、両者は連動しているこ

- とが明らかになった。回転抵抗が非円形粒子の挙動の粘り (インターロッキング) をもたらすと考えられる。
- 6) 緩詰めの方が密詰めに比べせん断初期から安定な接触構造は失われているために剛性や強度が低いといえる。また、過圧密効果は回転抵抗発揮度に支配され

ることがわかった。せん断初期では過圧密の供試体内の方が高い回転抵抗発揮度を有するため、過圧密の供試体の方がより高い剛性を示すといえる。しかし、せん断の進行に伴い安定な接触構造の消失効果が、回転抵抗発揮度の増加による過圧密の効果を上回るため、破壊付近の挙動の差異がなくなると考えられる。

謝辞

本研究に用いた装置の一部は文部科学省科学研究費若手(B)13750470 の補助によっており、記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 桑原直範・前田健一; 個別要素法解析による粒子特性が異なる粒状体中の微細構造の発達・消滅過程の考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.469-480, 2000.
- 2) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S.: Physical characteristics of sands with different primary properties, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.3., pp.53-64, 1997.
- 3) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S.: Mechanical characteristics of sands with different primary properties, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.4., pp.159-172, 1998.
- 4) Maeda, K. and Miura, K.: Confining stress dependency of mechanical properties of sands, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.1., pp.53-68, 1999.
- 5) Maeda, K. and Miura, K.: Relative density dependency of mechanical properties of sands, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.1., pp.69-80, 1999.
- 6) 吉村優治・小川正二: 砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.187-196, 1994
- 7) Oda, M., Nemat-Nasser, S. and Konishi, J.: Stress-induced anisotropy in granular masses, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.3, pp.85-97, 1985.
- 8) 岩下和義・小田匡寛: 粒子接点での転がり抵抗を考慮した個別要素法によるせん断帯の微視的変形機構, 土木学会応用力学論文集, Vol.2, pp.401-412, 1999.
- 9) Maeda, K., Miura, K. and Toki, S.: Mechanical properties of elliptic microstructure formed in granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.2, pp.1-13, 1995.
- 10) Teruo Nakai and Yasuji Mihara ; A new mechanical quantity for soils and its application to elastoplastic Constitutive Models, *Soils And Foundations* Vol.24, No.2, pp.82-94, 1984.
- 11) 浅岡顕・中野正樹・野田利弘: 「構造」を持った過圧密土の弾塑性挙動, 土木学会応用力学論文集, Vol.3, pp.335-342, 2000.
- 12) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulation Progressive, Large Scale Movement in Blocky rocksystem, Symp. ISRM, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 13) M. Oda and K. Iwashita: *An Introduction Mechanics of Granular Materials*, A.A.BALKEMA, 1999.
- 14) 大南正瑛 編: マイクロメカニクス入門, オーム社, pp.29-54, 1980.
- 15) Satake, M.: Fabric tensor in granular materials, IU-TAM-Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, pp.63-68, 1982.
- 16) 前田健一・三浦均也: 楕円微細構造に着目した粒状体の非線形解析, 土木学会応用力学論文集 Vol.1, pp.507-518, 1998.
- 17) 前田健一・三浦均也: 楕円微細構造体に着目した初期構造の異なる粒状体の非線形変形挙動, 土木学会応用力学論文集, Vol.2, pp.439-447, 1999.
- 18) 桑原直範・川戸貞幸・前田健一: 粒状性材料のせん断帯内部における微細構造の発生・消滅過程の考察, 第50回理論応用力学講演会, pp.509-510, 2001.
- 19) Ishihara, K.: *Soil behavior in earthquake geotechnics*, Oxford Science Publications.
- 20) Ishihara, K. and Okada, S.: Yielding of overconsolidated sand and liquefaction model under cyclic stresses, *Soil and Foundations*, Vol..18, No.1, pp.52-72, 1978.
- 21) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressure, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.30-48, 1984.
- 22) 粒状体の力学, 土質工学会, pp.56-60, 1993.
- 23) 佐武正雄; 粒状体における誘導異方性と修正応力について, 第33回地盤工学研究発表会, pp549-550, 1998.

(2002年4月19日 受付)