

Ⅲ-158

楕円微細構造体モデルによる異方性を有する粒状体の変形挙動解析

北海道大学工学部 正会員 ○前田 健一
北海道大学工学部 正会員 三浦 均也
北海道大学工学部 正会員 土岐 祥介

1 まえがき 著者等は、粒状体の構成単位として「楕円微細構造体」に着目し、‘Self-consistent Method’を援用することで構造体間の相互作用を考慮した二次元非線形解析モデル「楕円微細構造体モデル」を提案している¹⁻³⁾。

既報では、構造体の粒子間すべりに対する安定条件¹⁾と、マイクロポーラ弾性則を適用することで粒子回転の効果を考慮した変形解析を行うことで、構造体自身が粒状体に特徴的な力学特性を有することが示された²⁾。また、粒状体の非線形解析結果から以下のことが明らかになった³⁾。1)せん断に伴う応力誘導異方性は楕円構造体の安定条件に支配されて発現し、最大主応力方向に長軸を有する扁平な構造体が残存または復活することが示された。2)等方硬化は崩壊していた構造体が安定条件を満たし復活することが一要因であることが分かった。3)圧縮変形はせん断変形と同様に摩擦則に従うとともに、例へ、等方圧縮時においても局部的にせん断変形が生じることが示された。このことから、従来分離してモデル化されていた圧縮変形とせん断変形は楕円構造体のメカニズムに着目することで統一的に解釈できることが明らかにされた。

本報では、構造体の分布を異方にするによって異方構造を有する粒状体の純粋せん断時における変形解析を行っている。また、せん断に伴う構造変化から強度の異方性発現について検討している。

2 解析の概要 本節では、「楕円微細構造体モデル」の概要について記す（詳細は既報に詳しい³⁾）。

本モデルにおいては、粒状体中に潜在的に存在し得る様々な形状 κ_e 、向き α_e の楕円構造体（潜在的楕円構造体： r ）の占める楕円形状領域の面積割合 $f^{(r)}$ を決めることで初期構造が設定される。潜在的楕円構造体は安定条件（ $\phi_\mu > \phi_{cmax}$ ； ϕ_μ ：粒子間摩擦抵抗角、 ϕ_{cmax} ：粒子間最大動員摩擦角）を満たしたときに接点力を伝達可能な楕円構造体を形成する能力を有するもので、安定で残存する構造（Survivable Structure）と不安定で崩壊した構造（Dead Structure）とから成る。構造体の大きさに関わるパラメータは構成粒子直径 d と短軸半径 b であり、 b は全構造体の面積が等しいとすることで決定される。このように、本モデルの構成関係には、粒状体を特徴づける二つの長さの次元を持つパラメータを含むことになる。

粒状体の巨視的平均剛性および外的作用の各構造体への分担量は、‘Self-consistent method’を用いるとで算定される。ここでは、崩壊した構造体が占める楕円領域はどのような変形モードに対しても剛性をもたないものとし、この構造体が形成されていない領域には、応力は分担されず、変形が集中する。

外的作用に伴う各構造体の変形後に、その安定性を検討し構造状態を更新する。ただし、崩壊していた構造体については、平均応力下においてその安定性を検討し、安定な場合には楕円構造体として復活する。

以上の操作を繰返すことで粒状体の非線形解析を行う。

3 解析条件 本節では基本的な解析条件について記す。本報告では初期等方・異方構造条件について解析を行う。簡単で顕著な結果をえるために、各構造体の面積割合 $f^{(r)}$ を形状 κ_e 、方向 α_e の関数とし、 $0 \leq \kappa_e \leq 1$ の範囲では単調減少する以下の式で与えることにする³⁾。

$$f^{(r)} = A \cosh((\kappa_e - 1)\beta) \cdot g(\alpha_e) \quad (A \text{ は、} 1 = \sum_r f^{(r)} \text{ となるように決定する)} \quad \dots\dots (1)$$

$$g(\alpha_e) = \begin{cases} 1 & C_1 \leq \alpha_e \leq C_2 \\ 0 & C_1 \geq \alpha_e, \alpha_e \leq C_2 \end{cases} \quad \dots\dots (2)$$

$C_1 = 0$ 、 $C_2 = \pi$ のときのみ、構造は等方である。初期構造の異方性の主軸方向 α_{j0} ³⁾は $(C_1 + C_2)/2$ に一致することになる。ここでは、 $C_2 - C_1 = \pi/3$ とする。また、初期巨視的応力は、全潜在的楕円構造体における長さ比 d/b の平均 $(d/b)_{ave}$ と粒子間バネ定数 k_n で正規化されたものを用いる（ $\sigma_{ij0}^o = 0.0001 k_n (d/b)_{ave}$ ）。

バネ定数に関しては、本報では構造の変化のみに伴う変形挙動の非線形性を観察するために一定としている。ここで、 β の増加に伴い $(d/b)_{ave}$ は小さくなる。 k_t/k_n は粒子回転の影響が顕著な値として0.1とする。

4 解析結果 本節では異方性を有する粒状体（ $\phi_\mu = 20^\circ$ ）の純粋せん断時（ $\Delta\sigma_m = \Delta\tau_s = 0$ ， $\Delta\tau_p = 0$ ，最大主応力方向 $\alpha_\sigma = 90^\circ$ ）の変形挙動解析結果について検討する。

図1に等方および異方構造（ $\alpha_{f0} = 0^\circ \sim 90^\circ$ ）の場合の変形解析の結果を示す。図から分かるように異方性の主軸が最大応力方向に一致した場合（ $\alpha_{f0} = \alpha_\sigma$ ）が最も高い強度が発揮されており、最小主応力方向の場合（ $\alpha_{f0} = \alpha_\sigma - 90^\circ$ ）の4倍程度になっている。同様の傾向は砂の実験においても観察されている⁴⁾。図2(a, b)には、初期状態（ $\tau_m/\sigma_m = 0.0$ ）と $\tau_m/\sigma_m = 0.20$ の際の安定で残存する構造体の分布が、単体の構造体の安定条件上¹⁾に図示されている。せん断初期には $\kappa_e = 0.35$ よりも円形に近い構造は生き残ることができるが、せん断が進行するにしたがって扁平で、その方向 α_e が最大主応力方向（ $\alpha_\sigma = 90^\circ$ ）に向けた構造（ $|\alpha_e - \alpha_\sigma| \leq 60^\circ$ ）のみが残存または復活していることが分かる。また、図3との比較から、せん断に伴って残存する構造体が減少することで大きな変形を生じ破壊していることが分かる。このことは、図4(b)にみられるように、大きな変形を生じ発揮される強度も低い $\alpha_{f0} = 0^\circ$ の場合は他のケースに比べて残存する構造体がかなり少ないことから明らかである。

5 結 論 解析結果から粒状体の変形挙動に及ぼす固有異方性の影響は、楕円微細構造体のパッキングを異方的にすることで、表現可能であると思われる。また、粒状体の強度発現には、粒子接点力を伝達可能な楕円構造体の残存分布が支配的であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 前田・三浦(1992):土木工学会第47回年次学術講演会, pp.366-367, 2) 前田・三浦・土岐(1994):第29回土質工学研究発表会, pp.491-494, 3) 前田・三浦・土岐(1995):第30回土質工学研究発表会, [掲載予定] 4) Oda, M., et al.(1978):Soil and Foundations, Vol.18, No.1, pp.25-38.

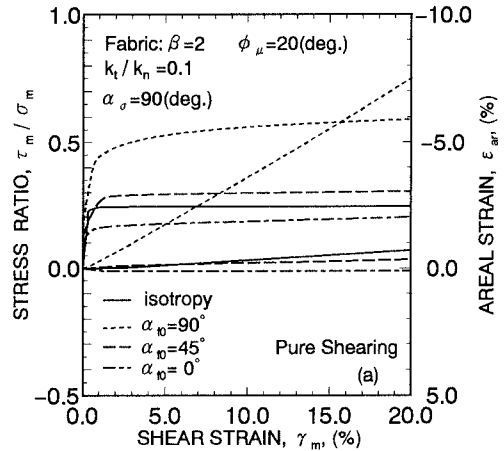


図1 純粋せん断時の変形挙動

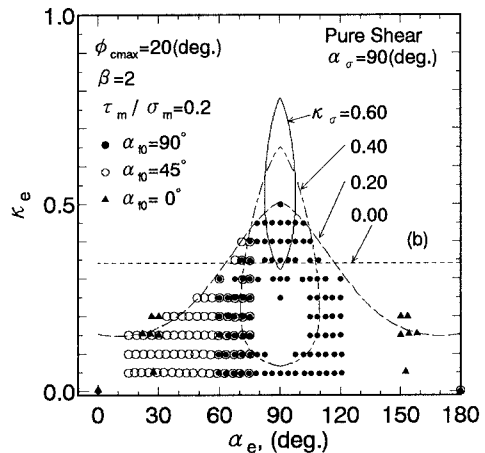
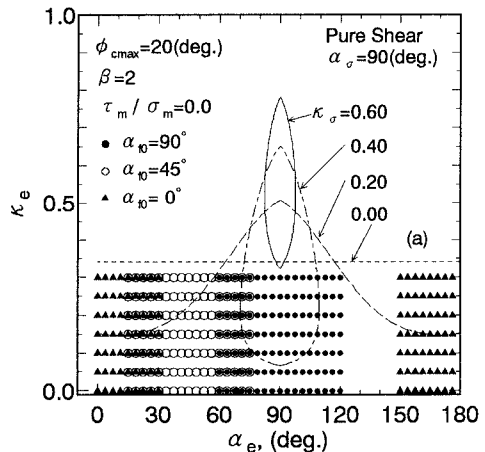


図2 (a, b) 安定な構造体の分布；
(a) せん断初期、(b) $\tau_m/\sigma_m = 0.20$