

# 粒子移動予測法による粒状体のせん断時の応力～ひずみ関係の推定

松岡 元<sup>1</sup>・山本修一<sup>2</sup><sup>1</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)<sup>2</sup>正会員 (株) 大林組 技術研究所 数値解析研究室 (〒204 東京都清瀬市下清戸4丁目640番地)

2種径アルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験のDEMシミュレーション結果から、粒状体のせん断挙動を支配する粒子構造の変化の微視的メカニズムを調べた。そして、そのメカニズムに基づいて、初期(等方応力時)の粒子配置からせん断時に刻々変化する粒子構造、さらには応力～ひずみ関係を予測する方法(粒子移動予測法と呼ぶ)を示し、粒子移動予測法によって推定された応力～ひずみ関係をDEMシミュレーション結果と比較して、粒子移動予測法が粒状体のせん断の主要なメカニズムを妥当に評価していることを示した。

**Key Words :** granular material, soil structure, dilatancy, distinct element method, biaxial compression test

## 1. はじめに

コンピュータの発達とともに、粒状体のマイクロメカニクスの研究ツールとして、個別要素法(DEM)<sup>1)</sup>が用いられるようになってきた。個別要素解析は実験では計測が困難な粒子の変位、粒子接点角、粒子間力、モーピライズされる粒子間摩擦角等を容易に定量的に知ることができるというメリットがある。

筆者らは、アルミ丸棒積層体の一面せん断試験結果および二軸圧縮試験結果とそれらの個別要素法によるシミュレーション解析結果とを定量的に比較して、個別要素法が粒状体挙動の微視的なメカニズムを研究するツールとして有効であることを示した。そして、二軸圧縮試験シミュレーションの結果から、マクロ量であるモーピライズ面上のせん断・垂直応力比および垂直・せん断ひずみ増分比とミクロ量である粒子構造(平均粒子接点角)との関係を明らかにした<sup>2)</sup>。また、粒子構造の変化を支配すると考えられる粒子接点角の変化量(ミクロ量)とせん断ひずみ(マクロ量)との関係を示した<sup>3)</sup>。

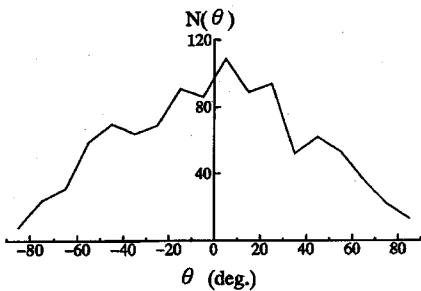
本研究では、応力～ひずみ関係を支配する粒子構造の変化の微視的メカニズムについて考察し、そのメカニズムと前記のミクロ量とマクロ量の関係に基づいて、初期(等方応力時)の粒子配置からせん断時の応力～ひずみ関係を予測することを試みた。本論文の前段では、応力～ひずみ関係と粒子構造との間の密接な関係について考

察し、粒子構造(平均粒子接点角)とその変化が応力～ひずみ関係を支配することを示した。また、せん断中の粒子の滑動(すべり)・転動(ころがり)、粒子接点の発生・消滅について考察し、応力～ひずみ関係を支配する粒子構造の変化の微視的メカニズムを明らかにした。本論文後段では、それらのメカニズムに基づいて、初期(等方応力時)の粒子配置からせん断時に刻々変化する粒子構造を予測する方法(粒子移動予測法と呼ぶ)を示した。そして、粒子移動予測法によって得られた粒子構造の変化とそれにに基づいて推定された応力～ひずみ関係をDEM解析結果と比較して、粒子移動予測法が粒状体のせん断の主要なメカニズムを妥当に評価していることを示した。

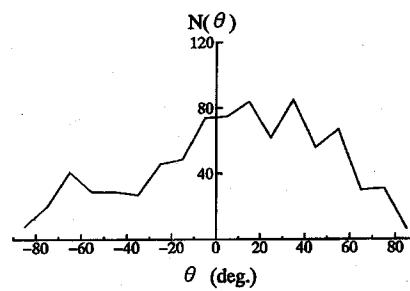
なお、本論文のデータはすべて2種径アルミ丸棒積層体( $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 9\text{mm}$ 、混合重量比3:2、粒子数約850個)の二軸圧縮試験のDEMシミュレーション結果<sup>2,3)</sup>に基づくものである。

## 2. モーピライズ面上の応力～ひずみ関係と粒子構造の変化

粒状体がせん断応力を受けると、粒子構造が変化することはよく知られている。図-1は、2種径アルミ丸棒積層体( $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 9\text{mm}$ 、混合重量比3:2、粒子数849個)の二軸圧縮試験のDEMシミュレーション結果<sup>2)</sup>



(a) at initial hydrostatic stress condition



(b) at peak stress ratio

図-1 モービライズド面における粒子接点角の度数分布N(θ)

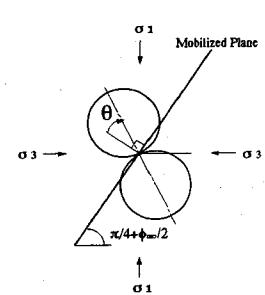


図-2 粒子接点角θ

から得られたモービライズド面（最大主応力面と角 $(\pi/4 + \phi_{mo}/2)$ を成す面）上の全ての粒子接点の接点角の度数分布 $N(\theta)$ を示している。ここに、 $\theta$ は図-2に示されるモービライズド面上の粒子接点角で、モービライズド面のせん断応力方向に対して反対方向回りを正としている（ $\sigma_1, \sigma_3$ はそれぞれ最大、最小主応力、 $\tan \phi_{mo} = (\sqrt{\sigma_1/\sigma_3} - \sqrt{\sigma_3/\sigma_1})/2$ ）。なお、モービライズド面上の粒子接点とは、接触する2粒子の粒子中心を結ぶ線分がモービライズド面と交差するものである。また、モービライズド面は、最大主応力面と角 $(\pi/4 + \phi_{mo}/2)$ を成す複数の平行面を供試体全体に一様に設定している（間隔は10mm、数は44本）。図-1より、「せん断によって粒子構造が変化して、せん断に抵抗しやすい（ $\theta$ が正の）粒子接点の度数が相対的に増加する」ということがわかる。

筆者らは、このモービライズド面上の粒子接点角の度数分布の変化を粒状体のせん断抵抗やダイレタンシー特性を支配する微視的要因として考察し、下記の関係を示し、その妥当性をDEM解析の結果に基づいて検証している<sup>2,4</sup>。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \tan(\bar{\theta}_s + \bar{\phi}_{mu}) \quad (1)$$

$$-\frac{d\epsilon_N^*}{dy^*} = \tan \bar{\theta}, \quad (2)$$

ここに、 $\tau/\sigma_N$ はモービライズド面上のせん断・垂直応力比 $(\tau/\sigma_N = \tan \phi_{mo})$ である。また、 $\bar{\theta}$ はモービライズド面上の粒子接点角の平均値（平均粒子接点角）である。ただし、主要な構造骨格（skeleton）を成すと考えられる平均粒子間力以上の力を伝達する接点を対象とした平均粒子接点角である<sup>2</sup>。 $\bar{\phi}_{mu}$ はそれらの接点でモービライズされている粒子間摩擦角の平均値（モービライズ面上のせん断力に抵抗する方向に粒子間摩擦がモービライズされる場合を正とした平均値）である。 $d\epsilon_N^*$ および $dy^*$ は、粒子の平均的な滑動方向が主ひずみ増分ベ

クトル $d\epsilon = (d\epsilon_1, d\epsilon_3)$ の方向と一致するという考察に基づいて導入されたモービライズド面上のひずみ増分相当量（ひずみ増分とは異なる）で、次式で示される主ひずみ増分ベクトル $d\epsilon = (d\epsilon_1, d\epsilon_3)$ のモービライズド面に垂直な成分および平行な成分である<sup>5</sup>。

$$d\epsilon_N^* = d\epsilon_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{mo}}{2}\right) + d\epsilon_3 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{mo}}{2}\right) \quad (3)$$

$$dy^* = d\epsilon_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{mo}}{2}\right) - d\epsilon_3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{mo}}{2}\right) \quad (4)$$

ここで、特徴的なことは、マクロ量であるせん断・垂直応力比 $(\tau/\sigma_N)$ とひずみ増分相当量の比 $(-d\epsilon_N^*/dy^*)$ がともに粒子構造を代表するミクロ量である平均粒子接点角 $\bar{\theta}$ と関係づけられることである。

図-3はモービライズド面上のせん断ひずみ $\gamma$ と平均粒子接点角 $\bar{\theta}_s$ との関係を示している<sup>4</sup>。また、図-4はモービライズド面上のせん断ひずみ $\gamma$ とせん断・垂直応力比 $(\tau/\sigma_N)$ の関係を示している。ここに、せん断ひずみ $\gamma$ は、式(6)で表されるせん断ひずみ増分 $dy$ から算定している。モービライズド面上の垂直ひずみ増分 $d\epsilon_N$ およびせん断ひずみ増分 $dy$ は、主応力方向と主ひずみ増分方向が一致するとすれば次式で表される。

$$d\epsilon_N = \frac{d\epsilon_1 + d\epsilon_3}{2} + \frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_3}{2} \cos\left[2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{mo}}{2}\right)\right]$$

$$= \frac{d\epsilon_1 + d\epsilon_3}{2} - \frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_3}{2} \sin\phi_{mo} \quad (5)$$

$$dy = (d\epsilon_1 - d\epsilon_3) \sin\left\{2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{mo}}{2}\right)\right\} \\ = (d\epsilon_1 - d\epsilon_3) \cos\phi_{mo} \quad (6)$$

図-3より、 $\bar{\theta}_s$ はせん断ひずみ $\gamma$ の増加とともに増加し、やがてピークに至って減少に転ずるのが見られる。また、この $\gamma$ ～ $\bar{\theta}_s$ 関係は図-4の $\gamma$ ～ $\tau/\sigma_N$ 関係と類似していることがわかる。このことは、式(1)からも明か

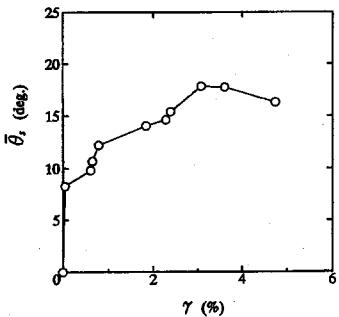


図-3 モービライズド面上の平均粒子接点角  $\bar{\theta}_s$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係

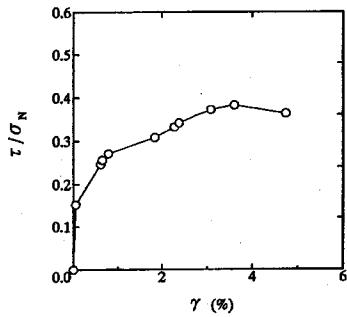


図-4 モービライズド面上のせん断・垂直応力比 ( $\tau/\sigma_N$ ) とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係

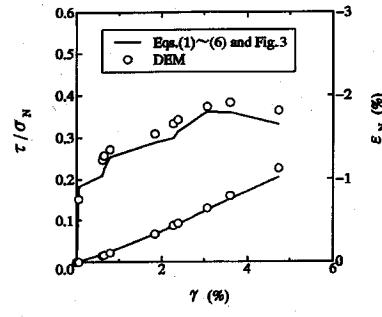
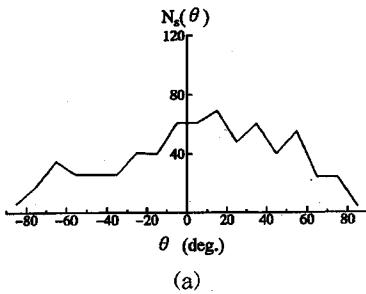
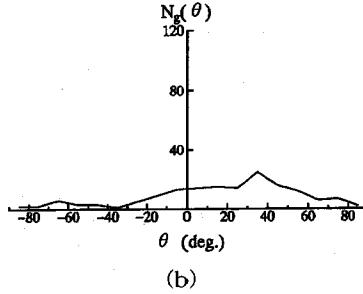


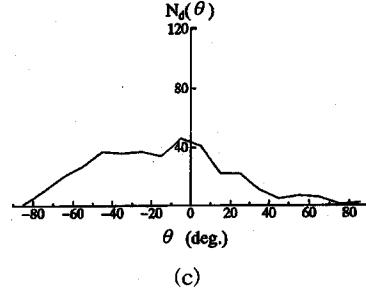
図-5 モービライズド面上の  $\tau/\sigma_N \sim \gamma \sim \varepsilon_N$  関係: 式(1)～式(6)と図-3からの計算値(実線)とDEM(プロット)の比較



(a)



(b)



(c)

図-6 モービライズド面上の(a)定常接点の度数分布  $N_s(\theta)$ ; (b)発生接点の度数分布  $N_g(\theta)$ ; (c)消滅接点の度数分布  $N_d(\theta)$

なように、 $\bar{\theta}_s$  がせん断抵抗 ( $\tau/\sigma_N$ ) の主要な要因の 1 つであることを意味している。図-5 は、図-3 の  $\gamma \sim \bar{\theta}_s$  関係と式(1)～式(6)を用いて以下に示す手順によって計算されたモービライズド面上の応力比 ( $\tau/\sigma_N$ ) ～せん断ひずみ  $\gamma$  ～垂直ひずみ  $\varepsilon_N$  関係(実線)を DEM 解析結果(プロット)と比較して示したものである。

- 1) 式(1)の  $\bar{\phi}_{mo}$  は DEM 解析の結果から得られた値 ( $\bar{\phi}_{mo} = 2^\circ$ )<sup>2)</sup> を用いることで既知とする。
- 2)  $\gamma \sim \bar{\theta}_s$  関係(図-3)が与えられているので、式(1)より  $\tau/\sigma_N (= \tan \phi_{mo}) \sim \gamma$  関係が得られる。
- 3) 式(2)～(4)より  $d\varepsilon_N^*$ ,  $d\gamma^*$  を消去すれば主ひずみ増分  $d\varepsilon_1$  と  $d\varepsilon_3$  の間の関係式が得られる。その関係式と式(6)を連立して解くことによって主ひずみ増分  $d\varepsilon_1$  と  $d\varepsilon_3$  がそれぞれ既知量  $d\gamma$ ,  $\phi_{mo}$ ,  $\bar{\theta}_s$  で表わされる。
- 4) したがって、式(5)より  $d\varepsilon_N$  が既知量  $d\gamma$ ,  $\phi_{mo}$ ,  $\bar{\theta}_s$  で表わされ、 $\gamma \sim \varepsilon_N$  関係が得られる。

図-5 より、 $\bar{\phi}_{mo}$  が推定できるならば式(1)～式(6)と  $\gamma \sim \bar{\theta}_s$  関係から応力比 ( $\tau/\sigma_N$ ) ～せん断ひずみ  $\gamma$  ～垂直ひずみ  $\varepsilon_N$  関係が十分な精度で予測できることがわかる。言い替えれば、粒状体のせん断時の応力～ひずみ関係を支配するのは、平均粒子接点角  $\bar{\theta}_s$  (式(1),(2)) とせ

ん断に伴う粒子構造の変化 ( $\gamma \sim \bar{\theta}_s$  関係) であるといえる。

なお、モービライズされる粒子間摩擦角の絶対値の平均は  $7 \sim 9^\circ$  (粒子間摩擦角  $\phi = 16^\circ$  の約 4 ～ 6 割) と決して小さくはないが、粒子間摩擦のモービライズされる方向は必ずしもモービライズ面上のせん断に抵抗する方向だけではないので、モービライズされる粒子間摩擦の正負を考えた平均値  $\bar{\phi}_{mo}$  の値は  $2^\circ$  程度となっている<sup>2)</sup>ことを付記しておく。

### 3. 粒子構造の変化の微視的メカニズム

図-6 は粒子構造が図-1 のように変化する間の

- (a) 接触し続ける接点(定常接点と呼ぶ<sup>④)</sup>の度数分布  $N_s(\theta)$
- (b) 接触していない粒子が接触して、新たに発生した接点(発生接点と呼ぶ<sup>④)</sup>の度数分布  $N_g(\theta)$
- (c) 接触していた粒子が離れて消滅した接点(消滅接点と呼ぶ<sup>④)</sup>の度数分布  $N_d(\theta)$

を示している(図-1 と同様に、モービライズ面上の全ての接点を対象としている)。なお、定常接点と発生

接点の接点角 $\theta$ は現接点角（主応力比ピーク時の接点角）で表わし、消滅接点の接点角 $\theta$ は等方圧密時（接触していた時）の接点角で表している。図-6より、発生接点はせん断に抵抗しやすい $\theta$ の正の方向に集中し、消滅接点は反対に $\theta$ の負の方向に集中することがわかり、興味深い。これらの図から、図-1のような粒子構造の変化は、粒子接点の異方的な発生・消滅による接点度数の増減と、定常接点の滑動・転動による接点角自身の変化によるものであるといえる。筆者らはすでに、接点角 $\theta$ を成す任意の定常接点の接点角の変化量 $\xi$ が平均的には次式で近似されることを明らかにしている<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned}\xi &= \gamma \frac{(\tau/\sigma_N)_\theta}{(\tau/\sigma_N)_{\theta=0}} \\ &= \gamma \frac{\cos \phi_{mo} \cos(2\theta - \phi_{mo})}{1 + \sin \phi_{mo} \sin(2\theta - \phi_{mo})} \quad (7)\end{aligned}$$

ここに、 $(\tau/\sigma_N)_\theta$ は粒子接点角 $\theta$ の粒子接平面のマクロなせん断・垂直応力比で、 $(\tau/\sigma_N)_{\theta=0}$ は $\theta=0$ の接点の粒子接平面（モーピライズド面）のマクロなせん断・垂直応力比である。図-7に等方応力時から主応力比ピーク時までの間の定常接点の接点角の変化量 $\xi$ の分布をDEM解析結果（プロット）と式(7)（実線）とを比較して示す（解析結果は、モーピライズド面上の全ての粒子接点を対象として得られたものである）。図中の下部に示す挿し絵は、モーピライズド面上の粒子がその接点角に応じてどの方向にどの程度の滑動・転動が起こるか（ベクトルで示す）を、グラフ横軸の接点角 $\theta$ と対応させて描いた模式図である。式(7)および図-7の意味するところは、定常接点の粒子接点角の変化量 $\xi$ の分布は粒子接平面のマクロなせん断・垂直応力比 $(\tau/\sigma_N)$ の分布に比例し、モーピライズド面を接平面とする接点（ $\theta=0$ の接点）の接点角の変化量はモーピライズド面上のせん断ひずみ $\gamma$ に等しいということである。

図-8(b)はDEM解析結果から得られたモーピライズド面上の接点の発生・消滅の一例を示している。このように、粒子接点の発生・消滅の様子を数百接点について一点一点調べた結果、接点の発生・消滅の主要なメカニズムは図-9のように単純化して考えることができる。すなわち、

- 1) 定常接点の滑動・転動によって、新たな接点が発生したり他の接点が消滅する。
- 2) 1つの粒子が複数の接点を有する場合には、contact normal が最大主応力方向に最も近い接点が定常接点になりやすい。したがって、contact normal が最大主応力方向に近い接点は消滅にくく、反対に、contact normal が最小主応力方向に近い接点は消滅しやすい。

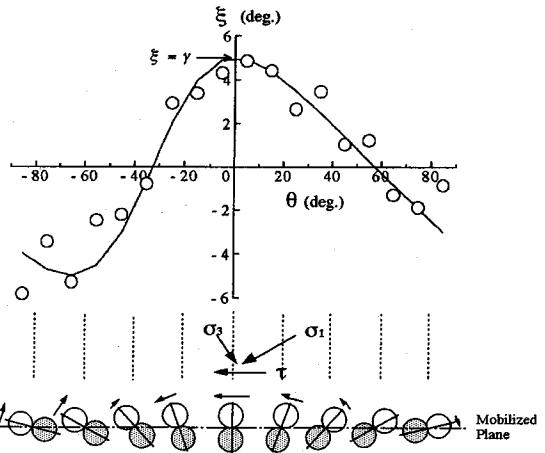


図-7 モーピライズ面上の粒子接点の接点角の変化量 $\xi$ の分布

これらのことと、図-7、式(7)の接点角の変化法則を考え合わせれば、発生接点が $\theta$ の正の方向に集中し消滅接点が $\theta$ の負の方向に集中すること（図-6参照）は当然のこととして理解される。

#### 4. 粒子移動予測法によるせん断ひずみ～平均粒子接点角関係

前述の粒子構造の変化（接点角の変化、接点の発生・消滅）のメカニズムに基づき、2次元粒状体の初期（等方応力時）の粒子配置が与えられたとき実際に粒子を移動させて粒子接点角を変化させることによって、せん断時に刻々変化する平均粒子接点角を予測すること（粒子移動予測法と呼ぶ）を試みる。初期粒子配置として、DEMによる2種径アルミ丸棒積層体（Φ5mm, 9mm、混合重量比3:2、初期間隙比 $e=0.21$ 、粒子間摩擦角 $\phi_\mu=16^\circ$ ）の二軸圧縮試験シミュレーション<sup>2)</sup>での初期粒子配置を用いることによって、DEM解析で得られた平均粒子接点角の変化と比較する。

図-10に粒子移動予測法の概略フローを示す。モーピライズド面はせん断とともに最大主応力面との成す角が $45^\circ \rightarrow 55^\circ$ 程度変化するが、ここでは簡単のためモーピライズド面を $50^\circ$ 面に固定して考えている。したがって、式(7)から、接点角の変化量 $\xi$ の増分 $\Delta\xi$ は

$$\Delta\xi = \Delta\gamma \frac{\cos \phi_{mo} \cos(2\theta - \phi_{mo})}{1 + \sin \phi_{mo} \sin(2\theta - \phi_{mo})} \quad (\phi_{mo} = 10^\circ) \quad (8)$$

ここに、 $\Delta\gamma$ はモーピライズド面上のせん断ひずみ増分である。なお、モーピライズド面は供試体全体に一様に設定している（間隔は10mm、数は44本）。また、対象とする粒子接点はモーピライズド面上の全ての接点で

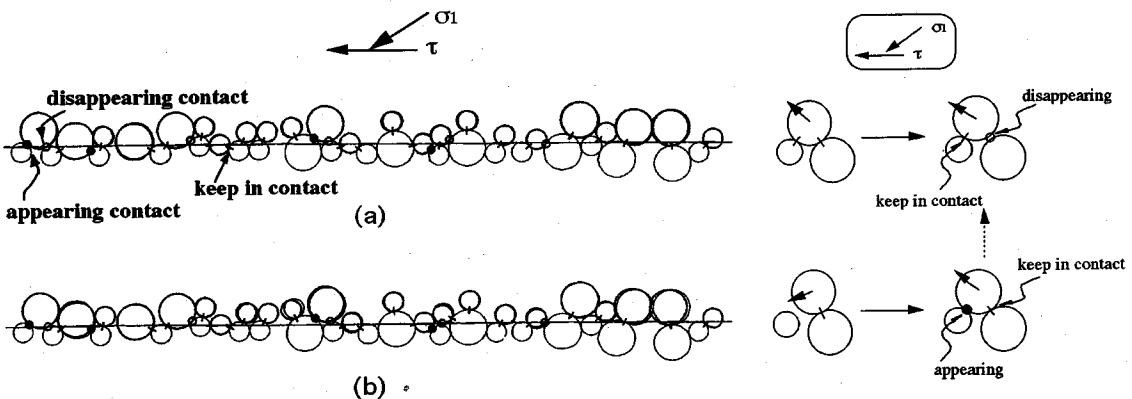


図-8 モービライズド面上の粒子接点の発生と消滅 ( $\gamma=4.8\%$ 時)：  
(a)粒子移動予測法と(b)DEM解析結果の比較

図-9 粒子接点の発生・消滅のメカニズム

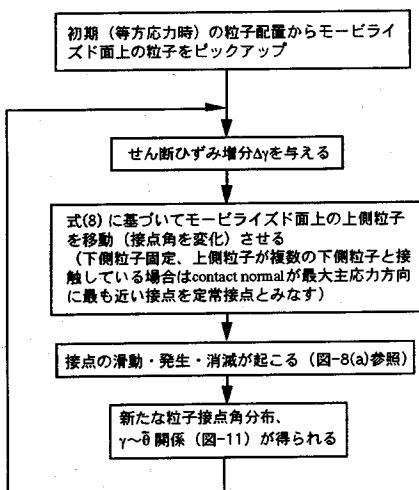


図-10 粒子移動予測法の概略フロー

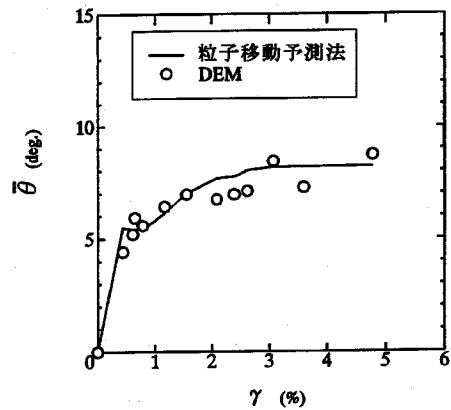


図-11  $\gamma \sim \bar{\theta}$  関係の粒子移動予測法（実線）DEM（プロット）の比較

ある。

粒子移動予測法によるモービライズド面上の接点の発生・消滅の様子の一例をDEM解析結果と比較して、図-8に示す。また、図-11に粒子移動予測法によって得られたモービライズド面上の全接点の平均粒子接点角 $\bar{\theta}$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係（実線）をDEM解析で得られた実際の $\gamma \sim \bar{\theta}$ 関係（プロット）と比較して示す。図-8は接点の発生・消滅に関して、粒子移動予測法とDEM解析結果との対応が比較的良好であるが、粒子移動予測法では、平均的な接点角の変化量（式(8)）を一点一点の接点に適用していること、また、モービライズド面の下側粒子を固定していることから、発生・消滅接点の場所は実際（DEM解析結果）とは必ずしも完全に一致するものではない。しかし、図-11において $\gamma \sim \bar{\theta}$

関係がDEM解析結果とよく対応していることからもわかるように、粒子移動予測法により平均的にどの方向の接点がどの程度発生・消滅するかを予測することができる。すなわち、粒子移動予測法はせん断中の粒子接点角の変化および接点の発生・消滅の主要なメカニズムを妥当に評価しているといえる。そして、粒子移動予測法により、粒子接点角の変化および接点の発生・消滅の結果としての平均粒子接点角の変化（粒子構造の変化）を予測することができる。

## 5. 粒子移動予測法による応力～ひずみ関係

図-12に、前記のDEM解析（初期隙比 $\epsilon=0.21$ 、粒子間摩擦角 $\phi_u=16^\circ$ ）の結果から得られた、

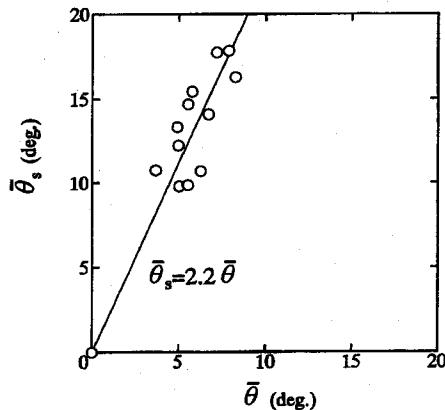


図-12  $\bar{\theta}_s \sim \bar{\theta}$  関係

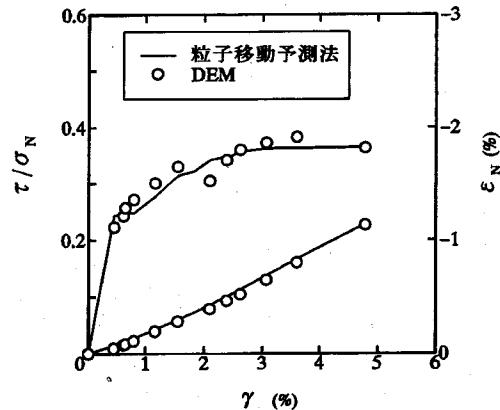


図-13  $\tau/\sigma_N \sim \gamma \sim \varepsilon_N$  関係の粒子移動予測法（実線）とDEM（プロット）の比較 ( $e=0.21$ ,  $\phi_\mu=16^\circ$ )

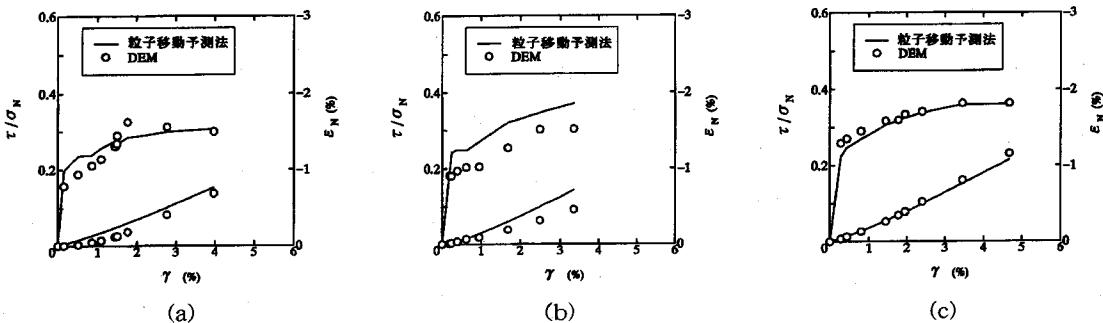


図-14  $\tau/\sigma_N \sim \gamma \sim \varepsilon_N$  関係の粒子移動予測法（実線）とDEM（プロット）の比較：(a)粒子間摩擦角  $\phi_\mu$  が小さい場合 ( $e=0.21$ ,  $\phi_\mu=10^\circ$ ) ; (b)初期隙比  $e$  が大きい場合 ; (c)初期粒子配置が異なる場合 ( $e=0.21$ ,  $\phi_\mu=16^\circ$ )

モービライズド面上のすべての接点の平均接点角  $\bar{\theta}$  と主要な構造骨格（skeleton）を成すと考えられる接点の平均粒子接点角  $\bar{\theta}_s$  の関係を示す。図より、 $\bar{\theta}$  と  $\bar{\theta}_s$  が比例関係にあり、本解析の場合、 $\bar{\theta}_s = 2.2 \bar{\theta}$  が成立するのがわかる。この関係は同じ粒度分布（ $\phi = 5\text{mm}$ ,  $9\text{mm}$ , 混合重量比3:2）の場合には初期隙比  $e$  や粒子間摩擦角  $\phi_\mu$  が異なる場合にもほとんど変わらないことを確認している。そこで、図-13に、粒子移動予測法で得られた  $\gamma \sim \bar{\theta}$  関係（図-11の実線）と式(1)～式(6)を用いて、前記（2節）と同様の方法で計算されるモービライズド面上の  $\tau/\sigma_N \sim \gamma \sim \varepsilon_N$  関係（実線）をDEM解析結果（プロット）と比較して示す。また、図-14には、図-13のケースと比べて(a)粒子間摩擦角  $\phi_\mu$  が小さい場合 ( $e=0.21$ ,  $\phi_\mu=10^\circ$ )、(b)初期隙比  $e$  が大きい場合 ( $e=0.25$ ,  $\phi_\mu=16^\circ$ ) および(c)初期粒子配置が全く異なる場合 ( $e=0.21$ ,  $\phi_\mu=16^\circ$ )について、同様の方法で得られた  $\tau/\sigma_N \sim \gamma \sim \varepsilon_N$  関係を示す。なお、

図-14(b)の解析ケースは、図-13の解析ケースにおいて、初期隙比を大きくするために等方圧密後に粒子間力を伝達していない浮遊粒子の一部を解析上消去した後でせん断したものである。図-13, 14より、粒子移動予測法に基づいて推定した  $\tau/\sigma_N \sim \gamma \sim \varepsilon_N$  関係が実際のDEM解析結果とよく対応することから、 $\bar{\theta}_{s,mo}$  と  $\bar{\theta}_s \sim \bar{\theta}$  関係の比例係数がわかれば、初期粒子配置が与えられたとき粒子移動予測法により応力～ひずみ関係を予測することできる。このことは、粒状体のせん断の主要なメカニズムが式(1)～(7)および図-9で表されることを意味している。

## 6. まとめ

2種径アルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験のDEMシミュレーション結果から、粒状体のせん断挙動を支配する粒子構造の変化の微視的メカニズムを調べた。そし

て、そのメカニズムに基づいて、初期（等方応力時）の粒子配置からせん断時に刻々変化する粒子構造、さらには応力～ひずみ関係を予測する方法（粒子移動予測法）を示し、粒子移動予測法によって推定された応力～ひずみ関係をDEMシミュレーション結果と比較して、粒子移動予測法が粒状体のせん断の主要なメカニズムを妥当に評価しているかどうかを調べた。主な結論をまとめると以下の通りである。

- (1) 粒状体のせん断時の粒子構造とその変化は、応力～ひずみ関係を支配する。そして、モーピライズド面上の平均粒子接点角は応力～ひずみ関係を支配する重要な粒子構造指標といえる。
- (2) せん断に伴う粒子構造の変化は、定常接点の滑動・転動による接点角の変化と、接点の発生・消滅によるものである。
- (3) 接点の発生・消滅のメカニズムは図-9で示されるように単純化して考えることができる。すなわち、定常接点の接点角が変化する（本文中の式(7)で表される）ことによって新たな接点の発生と他の接点の消滅が起こると考えられる。このとき、1つの粒子が複数の接点を有する場合には、contact normalが最大主応力方向に最も近い接点が定常接点になりやすい。したがって、contact normalが最大主応力方向に近い接点は消滅にくく、逆にcontact normalが最小主応力方向に近い接点は消

滅しやすい。

- (4) 以上の粒状体のせん断の微視的メカニズムに基づく粒子移動予測法によって、初期粒子配置からせん断に伴う粒子構造の変化と応力～ひずみ関係を予測することができる。したがって、粒子移動予測法は粒状体のせん断の主要なメカニズムを妥当に評価しているといえる。

**謝辞：**本研究を行うにあたって（株）大林組技術研究所の表佑太郎博士に数々のご助力を頂いた。記して感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 2) 松岡元, 山本修一:個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.167-175, 1994.
- 3) 山本修一, 松岡元: DEMによる粒状体のせん断ひずみと粒子接点角の変化量の関係, 第29回土質工学研究発表会, pp. 507-510, 1994.
- 4) Matsuoka, H.: A microscopic study on shear mechanism of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 1, pp. 29-43, 1974.
- 5) 中井照夫: 土の変形強度特性と地盤の変形解析への適用に関する研究, 京都大学学位論文, pp.14-15, 1980.
- 6) Matsuoka, H. and Takeda, K.: A stress-strain relationship for granular materials derived from microscopic shear mechanism, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.3, pp.45-58, 1980.

(1994.7.22受付)

## PREDICTION OF STRESS-STRAIN RELATION FOR GRANULAR MATERIALS UNDER SHEAR BY "PREDICTIVE METHOD FOR PARTICLE MOVEMENT"

Hajime MATSUOKA and Syuichi YAMAMOTO

The mechanism of fabric changes which controls shear behavior of granular materials was investigated numerically at microscopic level by DEM. For that purpose, several biaxial compression tests on granular assemblies were simulated. Based on the mechanism of fabric changes, a method called "predictive method for particle movement" was proposed. The new method predicts fabric changes and stress-strain relations under shear using the geometrical data for the particles at initial hydrostatic stress condition. Fabric changes and stress-strain relations by the newly proposed method were compared with the numerical results obtained by DEM. The investigation made clear that the method properly takes account of the main mechanism of fabric changes and can accurately predict the stress-strain relation for granular materials.