

# 粒状固結体のせん断に伴う微視構造変化の解析

東北大学 学生会員 若竹 亮  
 フェロー 岸野 佑次  
 清水建設 正会員 郷家 光男

## 1. はじめに

地盤材料のように粒子からなる不均質な集合体における塑性挙動は複雑であり、残留強度状態などにおける構成則の定式化は大きな課題となっている。このような背景の下、材料を粒子の集合体である粒状体と捉え、微視的な力学挙動から巨視的な力学挙動を評価する「粒状体力学」が提唱され、そのシミュレーション試験の手段として岸野<sup>1)</sup>によって粒状要素法 (GEM) が提案された。

本研究では粒状固結体を対象とし、粒子間に引張抵抗と粘着力を導入した粒状要素法を用いて、残留強度状態における微視構造の変化について考察する。その際、粘着力の消失を剥離と称し、剥離接触点数の変化や、剥離面の方向分布について考察する。

## 2. 粒子間力学モデル

従来のモデルに加え、引張抵抗力  $P_T$ 、粘着力  $P_C$  を図-1 のように設定する。

1) 法線方向において、粒子間の接触力は圧縮、引張に関わらず変位に比例し、引張力が最大引張力を達すると引張抵抗は失われる。

2) 接線方向に対して、粒子間の接触力は変位に比例し、接触力が最大せん断力に達すると引張力は失われ、以降は Coulomb の摩擦則に従う。

本研究では粒径を 0.5 ~ 2.0mm、法線方向および、接線方向におけるバネ定数を  $k_n = 1400$ ,  $k_t = 1000$ 、摩擦係数を  $\mu = \tan 30^\circ = 0.577$ 、引張抵抗力  $P_T$  を粒径に応じた数値 4.2 ~ 67.2N、粘着力を接触力の法線方向成分  $P_n$  に応じた値  $P_C = \mu(P_n - P_T)$  とし、領域を球形とする粒状供試体に対して、初期拘束圧が 0.3, 1.0N/mm<sup>2</sup> の 2 通りの条件で、側圧一定の 3 軸圧縮シミュレーション試験を行う。

## 3. 剥離面の単位法線ベクトル $n$ の方向分布

剥離面の方向分布を調べるために、剥離面の単位法線ベクトル  $n$  に対する密度分布関数  $f(n)$  を用いる。密度分布関数  $f(n)$  は単位法線ベクトル  $n$  のテンソル積を基底関数として近似こととする。本研究では 2 個および 4 個の積を用いる。その際、係数は剥離面の単位法線ベクトル  $n$  の 2 個および 4 個の積の平均値  $N_{ij}$ ,  $N_{ijkl}$  を用いて表すことができる。<sup>2)</sup>

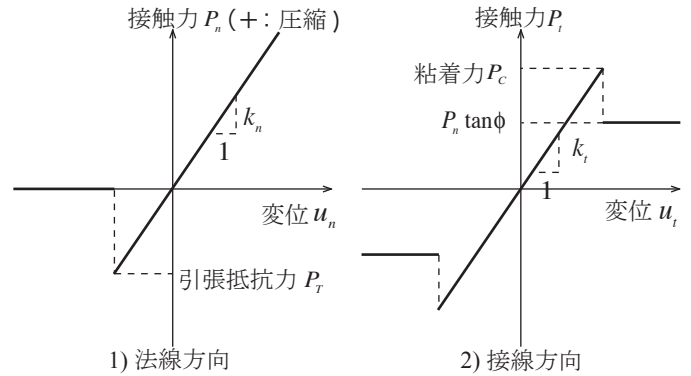


図-1 賦与した粒子間力学モデル

1)  $n$  の 2 個の積による近似

$$f(n) = b_{ij}n_i n_j \quad (1)$$

係数  $b_{ij}$  は 2 階のテンソルであり、 $N_{ij}$  により以下のように表すことができる。

$$b_{ij} = \frac{15}{8\pi}(N_{ij} - \frac{1}{5}\delta_{ij}) \quad (2)$$

2)  $n$  の 4 個の積による近似

$$f(n) = c_{ijkl}n_i n_j n_k n_l \quad (3)$$

係数  $c_{ijkl}$  は 4 階のテンソルであり、 $N_{ij}$  および  $N_{ijkl}$  により以下のように表すことができる。

$$c_{ijkl} = \frac{315}{32\pi}[N_{ijkl} - \frac{1}{9}(\delta_{ij}N_{kl} + \delta_{ik}N_{jl} + \delta_{il}N_{jk} + \delta_{jk}N_{il} + \delta_{jl}N_{ik} + \delta_{kl}N_{ij}) + \frac{1}{63}(\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})] \quad (4)$$

このようにして求めた  $f(n)$  を図化し、剥離面の分布特性について調べる。

## 4. 解析結果および考察

図-2 に初期拘束圧 0.3, 1.0N/mm<sup>2</sup> に対する応力-ひずみ曲線を示す。拘束圧が小さい場合は軟化が見られるが、拘束圧が大きい場合、ピーク強度は大きくなり、残留強度状態における応力の低下は見られない。また、拘束圧が大きい場合ダイレイタンスは小さい。

図-3, 4 は、2 種類の 3 軸圧縮試験に対する  $n$  の方向密度分布図を軸ひずみ  $\epsilon_z = 1.0, 1.5, 2.0\%$  の場合についてプロットしたものである。

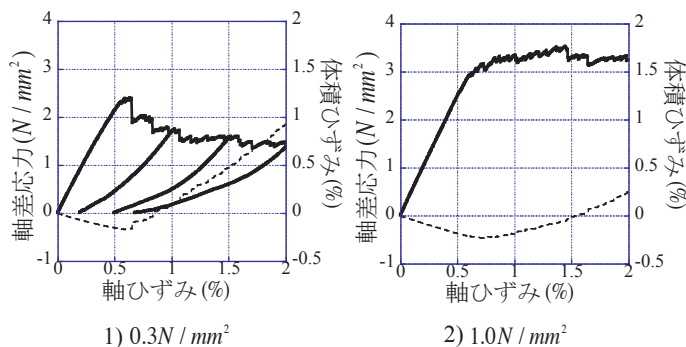


図-2 応力-ひずみ曲線

$n$ の方向密度分布図の全てに共通する性質は以下の通りである。

- $n$ の分布に卓越する方向が存在し、明確な異方性が見られる。
- その卓越する方向は载荷軸と直交する面から若干傾いた面上にある。
- 载荷が進むにつれて異方性の程度は弱まる。

これらのことから、剥離は最大圧縮方向ではほとんど起こらず、载荷軸に直交するある卓越した方向で起こっているといえる。

また、2階の方向密度分布図では断面は楕円となるのに対して、4階の方向密度分布では2つの卓越する方向が確認でき、その方向は2階の分布の卓越方向に一致しない。故に剥離面の分布の詳細な検討を行うにはより高階のテンソルを用いること必要である。

さらに、初期拘束圧  $0.3\text{N/mm}^2$  の結果に対して、軸ひずみ  $\epsilon_z = 1.0, 1.5, 2.0\%$  の時点で除荷試験を行った結果を図-2の1)に示す。せん断が進むにつれ、応力-ひずみ曲線の弾性部分における傾きが小さくなっているが、この原因は剥離の進行によるものである。剥離の生じた接触点の数と除荷直後の弾性係数  $E$  の関係を図-5に示す。同図より剥離接触点の数と弾性係数  $E$  の間には線形な関係があることがわかる。なお、除荷後の非線形性は粒子間の滑りに起因していると考えられる。

### 5. おわりに

本研究では剥離面の方向分布特性を解析することにより、微視力学的見地から粒状固結体の変形特性を考察した。その結果以下のような結論を得た。

- 1) 剥離面の分布を剥離面の密度分布関数  $f(n)$  を用いて調べた結果、剥離は载荷軸と直交するある卓越した方向で生じる。
- 2) 残留強度状態における载荷に伴い、剥離面の分布の異方

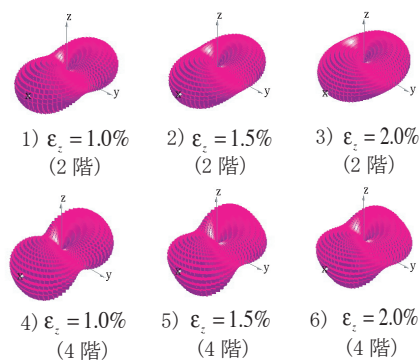


図-3 方向密度分布図 ( $0.3\text{N/mm}^2$ )

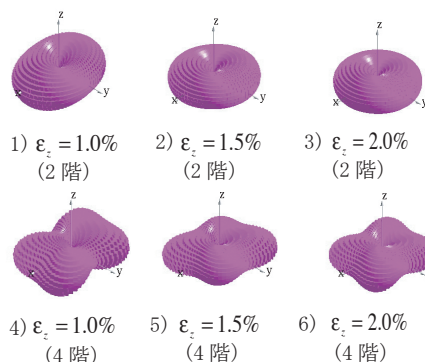


図-4 方向密度分布図 ( $1.0\text{N/mm}^2$ )

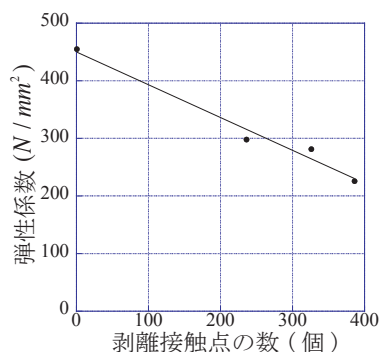


図-5 剥離接触点の数と弾性係数  $E$  の関係

性の程度は緩和される。

- 3) 剥離面の数と除荷に伴う弾性係数との間には線形な関係がある。

以上、粒状固結体の剥離の分布の解析方法と3軸圧縮を伴う剥離面の分布特性について示したが、今後これらの特性を弾塑性理論にどのように組み込むかが課題である。

### 参考文献

- 1) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文報告集，No.406/III-11, pp.97-106, 1989.
- 2) 鄒春躍，岸野佑次，京谷孝史：粒状体におけるエネルギー散逸機構の統計的表現，応用力学論文集，vol.9, pp.631-640, 2006