

せん断履歴を受けた粒状供試体の変形特性

前橋工科大学 学生会員 ○久保 良弘

前橋工科大学 フェロー会員 岸野 佑次

1. はじめに

粒状体の巨視的な挙動は、粒状体内部の粒子の充填構造、接触状態、粒子間すべり面の分布などの微視的な力学特性の変化に応じて生じるので、粒状体の巨視的挙動のメカニズムを調べるためには、それらの微視的变化を捉えることが重要である。しかし、実際の試験においては材料内部の微視的な情報を抽出することは不可能であり、粒状体モデルのシミュレーション試験による検討が有効であると考えられる。本研究においては、とくに巨視的挙動の中の異方性に着目し、粒状要素法¹⁾を用いた粒状供試体モデルのシミュレーション解析により、あらかじめ与えた誘導異方性による力学特性の違いを調べるとともに、新たに定義した異方度をもとに、異方性に関する検討を行うことを目的とする。

2. 諸量の定義

粒状集合体における粒子一個当たりの接触点の数の平均値は配位数 (Coordination Number) と呼ばれている²⁾。配位数はスカラーであるが、接触面の方向分布を表現するために、配位数を第1不変量とする次の配位テンソルを定義する。

$$C_{ij} = \frac{1}{N} \sum_p \sum_c n_i n_j \quad (1)$$

ここに、 n_i は粒子間接触面の単位法線ベクトル、 \sum_c は各粒子の接触点に関する和、 \sum_p は粒状体を構成する全粒子に関する和、 N は粒子数を表す。 n_i は単位ベクトルであるから、 $C_{kk} \equiv C_{11} + C_{22} + C_{33}$ は配位数を表す。配位テンソルの偏差成分 $C'_{ij} \equiv C_{ij} - (C_{kk}/3)\delta_{ij}$ の絶対値

$$D = \sqrt{C'_{ij} C'_{ij}} \quad (2)$$

を異方度と称する。また、応力 σ_{ij} 、ひずみ ε_{ij} の偏差成分より、せん断応力、せん断ひずみをつぎのように定義する。

$$\tau = \sqrt{\sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} / 2 \quad (3), \quad \gamma = \sqrt{2\varepsilon'_{ij} \varepsilon'_{ij}} \quad (4)$$

応力比は平均応力 $\sigma_{kk}/3$ に対するせん断応力 τ の比とする。また、せん断ひずみ γ および体積ひずみ ε_{kk} は 100 倍し、%の単位で表すこととする。

3. 側圧一定3軸圧縮シミュレーション試験

粒状供試体は粒子数 892 (内、境界粒子数 207) の球形粒子からなる球状の集合体とし、境界粒子をひずみに適合した移動が生じるように制御した。載荷方法は、まず、粒状供試体モデルを等方応力 $\sigma_0 = 0.2 \text{ Pa}$ で等方的に圧縮し初期状態とする。この後の載荷は、全て x, y, z 軸を応力主軸とする側圧一定の3軸圧縮試験とする。人為的に誘導異方性を作り出すために、あらかじめ x 軸方向だけに載荷・除荷を与えることとした。その際、除荷開始の応力比を 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 の5ケースとし、除荷後応力比が 0 になった状態を改めて初期状態として x, y, z 方向に3軸圧縮試験を行った。載荷はせん断ひずみが 3% を超えるまで継続した。

4. 解析結果と考察

図-1 に、等方応力状態および除荷開始応力比 1.0 に対して x 方向の3軸圧縮試験を行った場合の応力比 (a, a') および体積ひずみ (b, b') とせん断ひずみの関係を示す。'が付されているグラフが除荷開始応力比 1.0 の場合の結果を示す。

まず、除荷開始応力比の違いにより誘導異方性どのように現れるかを示すために、各々の除荷開始応力比について、せん断ひずみが 1.0 となるときのせん断応力と異方度の値を求めた。その結果を図-2, 3 に示す。図中、除荷開始応力比 0 は等方応力状態から載荷試験を行った場合を意味する。

図-2 より除荷開始応力比が 0.8 までは3方向の載荷に対して、ほぼ同様の変形特性を示し、顕著な異方性はみられない。しかし、除荷開始応力比 0.9 辺りからこの傾向に変化がみられ、除荷開始応力比 1 の場合には、 x 軸方向と他の2方向の載荷の間に顕著な差異が生じている。このような誘導異方性はあらかじめ x 軸方向に載荷・除荷を与えたことにより生じたと考えられる。すなわち、 x 軸方向の圧縮により、粒子間の接触面分布が x 軸方向に卓越した構造に変化することにより、同方向には強い抵抗を示すためと考えられる。逆に直交方向の載荷に対しては、粒子間の接触面の数が減少し、抵抗力が低下することになると考えられる。同様の傾向は、図-3 に示した異方度についても見られる。

キーワード 粒状体, 粒状要素法, 異方性, 配位数, 異方度

連絡先 〒371-0816 前橋市上佐鳥町 460-1 TEL:027-265-7321 E-mail: kishino@maebashi-it.ac.jp

図4, 5 に, 等方応力状態, および, あらかじめ x 方向に
 荷重・除荷を経験した状態 (除荷開始応力比 1.0) に対する
 x, y 方向の荷重試験におけるせん断応力と異方向の関係を示
 す. 図4 よりわかるように, 等方応力状態から出発した場
 合, 2つの荷重試験結果は類似している. これは, 初期のパ
 ッキングが, 等方的な構造をもっていたためと考えられる.
 また, せん断応力と異方向の関係は, 原点を通る直線で表さ
 れることが注目される. これに対して, 荷重・除荷を経験し
 た場合の図5 では, 図4 と異なり, まず, 荷重出発点に異
 方向性が含まれていることがわかる. また, x 軸方向の再荷重
 に対してはせん断応力と異方向が初期異方向から出発して
 線形的に変化するのに対して, y 軸方向の荷重に対してはこの
 方向の荷重に馴染むまでの間異方向に殆ど変化が見られ
 ない. しかし, ある一定のせん断荷重が進んだ後には, 原点
 を通る直線に沿って変化することが注目される. このように
 異方向とせん断応力の関係を調べることで, 供試体が経
 験した荷重履歴を推定できることが注目される.

なお, 配位数そのものについてはスペースの関係でグラフ
 を省略するが, 等方応力状態からの荷重においてはひずみ
 3%までの荷重の間に, 配位数が5.5から4.5まで低下した.
 除荷後の再荷重においても除荷開始点が0.9までの場合, 若
 干低めの配位数から出発して同様の変化を示したが, 除荷開
 始点が1.0の場合, 荷重開始の配位数約4.2をほぼ維持する
 結果となった.

5. おわりに

本文で定義した配位テンソルの偏差成分は粒状体のせん
 断特性を表現する上で重要な役割を果すことがわかった. 今
 後, 種々の荷重経路について検討を進める必要がある.

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, 土木学会論文集, No./III-11,97-106,1989.
- 2) M. Oda, K. Iwashita(Eds.): Mechanics of Granular
 Materials- An introduction-, A.A.Balkema(1999).

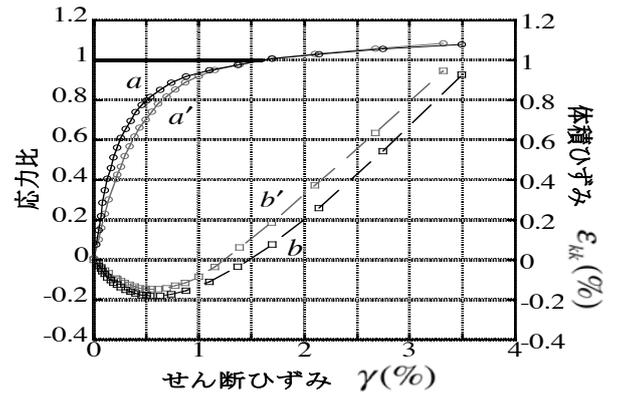


図-1 x 軸方向 3 軸圧縮試験

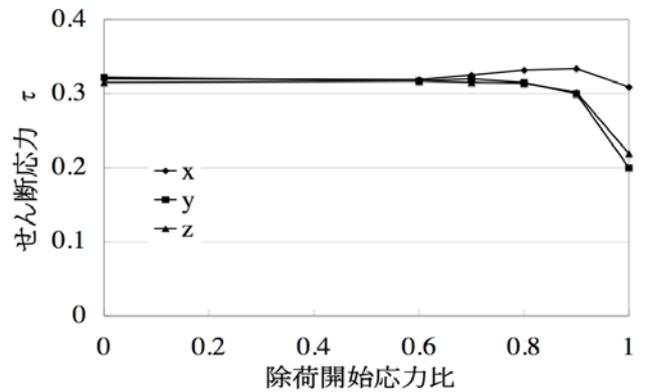


図-2 せん断ひずみ 1.0 に対応するせん断応力

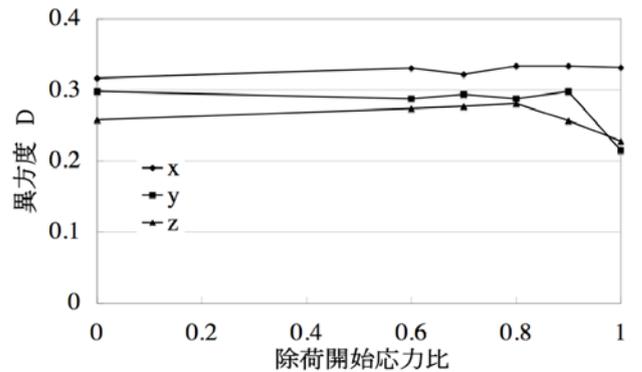


図-3 せん断ひずみ 1.0 に対応する異方向

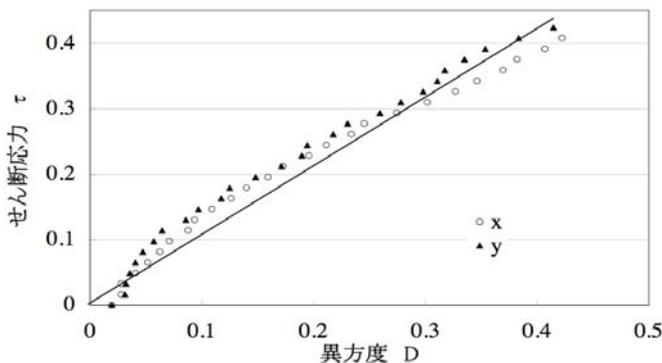


図-4 等方応力状態

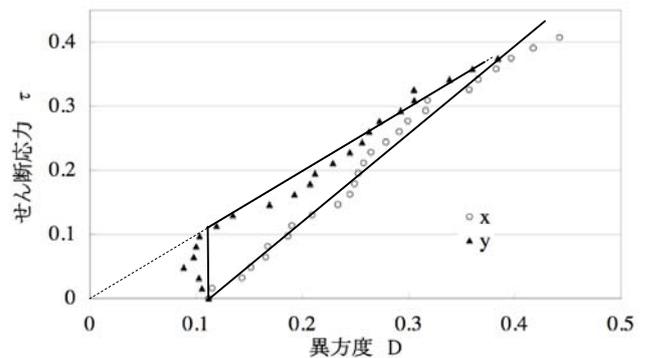


図-5 除荷開始応力比 1.0