

東北大学大学院 学生員 ○土倉 泰
東北大学工学部 正 員 佐武 正雄
東北大学工学部 正 員 岸野 佑次

1. まえがき

従来より粒状体の堆積構造による異方性が変形特性に与える影響の大きいことが指摘されているが、その機構は未だ明らかにされていない。そこで、粒状体を粒子レベルでシミュレーションする解析法¹⁾を用い、同一の堆積粒状体に相異なる方向からせん断力を加えその力学的挙動を調べた。本文においては、粒子間接点の接触法線方向分布を接触力の大きさに着目して2つのグループに分けることによって考察を進め、2種のファブリックテンソルを導入した。解析の結果、個々のグループに関するファブリックテンソルの異方度の変化が異方粒状体の構造変化特性を把握する上で有効であることがわかった。

2. 解析方法

まず3種類の径の円形粒子群を重力によって堆積させる。そしてその粒状体から任意に領域を取り出す。取り出した領域を図-1に示す。この領域に対して、鉛直軸からの角度 β を $0, 30, 60, 90^\circ$ とする4方向から载荷する。载荷は応力制御によるが、既に提案されている境界形状を楕円群に拘束した制御方法²⁾を応用している。すなわちせん断力を加えるに先立ち領域粒子を境界粒子と内部粒子に分け、所期の応力状態を得るように境界粒子に一樣な変形に適合した変位を与えるのである。図-1で斜線を施した粒子は境界粒子である。なお粒子間バネ定数は法線方向 $6 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ 、接線方向 $4 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ 、粒子間摩擦角 30° 、粒子密度は 1.6 g/cm^3 、平均応力は $2 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ で一定とした。

3. 解析結果とその考察

図-2上は4方向からの载荷による応力～ひずみ関係を示している。 $0, 30^\circ$ 方向と $60, 90^\circ$ 方向の間に際立った強度の差が見られる。また体積ひずみの出方に特徴があり、 $0, 30^\circ$ 方向では密詰めの、 $60, 90^\circ$ 方向では緩詰めの傾向を示している。一方、図-2下は散逸エネルギーの累積を示す。変形後期に $0, 30^\circ$ 方向で傾きが大きくなるのに対し $60, 90^\circ$ 方向では傾きが小さくなっている。図-3は外枠において初期状態と $\beta = 0^\circ$ 载荷のA点における粒状体中の全接触法線の頻度図である。2つを比べるとA点において载荷軸と直交する方向にある接点が少ない傾向が伺われる。同図には内側に全接触力の平均よりも大きな接触力の働く接点の分布を示した。この内側の接触法線分布が接触点の载荷方向への集中を極めてよく

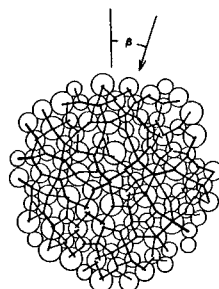


図-1 初期状態

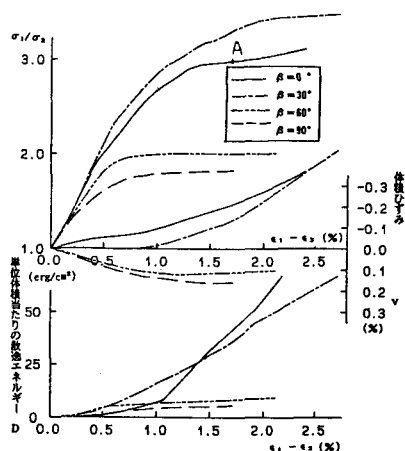
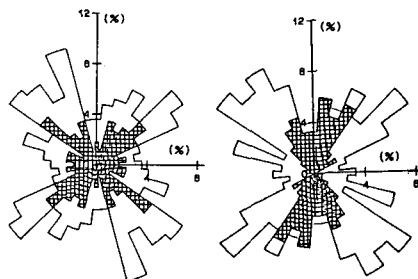


図-2 応力～ひずみ関係と散逸エネルギー



(a) 初期 (b) A点

図-3 接触法線分布

表わしている。これは単に幾何学的な接触法線の分布よりも力の大きさという力学的な要素を含めた接触法線分布を考えたほうが粒状体の構造変化特性をとらえやすいことを意味していると思われる。

4. ファブリックテンソルの算定とその考察

いまファブリックテンソルを接触法線 n_i のダイアッド積をとり全接触法線数 N で除することによって、

$$F_{ij} = \frac{\sum n_i n_j}{N}$$

と定義するものとする。

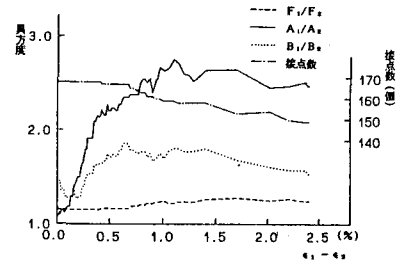
前項の考察に基づき、接点を各状態における全接触力の中央値を基準としてそれより接触力の大きいものと小さいものの2つのグループに分けて考えることとする。この場合にそれぞれのグループ中でのファブリックテンソルを次のように与える。

$$A_{ij} = \frac{\sum_A n_i n_j}{N}, \quad B_{ij} = \frac{\sum_B n_i n_j}{N}$$

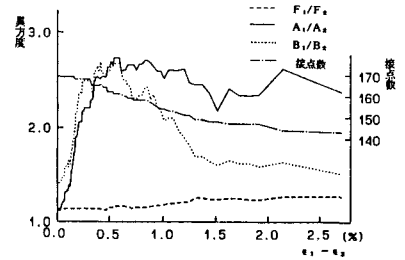
ただし、 A は接触力の大きいグループを表わし、 B は小さいほうを表わす。3つのテンソルの間には $F_{ij} = A_{ij} + B_{ij}$ の関係が成り立つ。テンソルの主値の比 $A_1/A_2, B_1/B_2$ を異方度として図-4に示す。破線は F_1/F_2 なる異方度であるが、これが顕著な変化を示さないのに対して A_1/A_2 は σ_1/σ_2 に対応した変化を示している。また、図中に一点鎖線で示す接触点数の減少に伴い B_1/B_2 は小さくなる、すなわち等方化に向かうことがわかる。AおよびBの異方度はある限界値をもつが、それらの値はそれぞれ初期状態における載荷方向の接点および載荷方向に直交する接点の頻度が高いほど大きな値を示す傾向にある。そして A_1/A_2 の限界値は異方粒状体の強度に対応しているようである。さらに $\beta = 0, 30^\circ$ では A_1/A_2 の値が σ_1/σ_2 の増加に対応しきれなくなる点が注目される。 $\beta = 0^\circ$ では $\epsilon_1 - \epsilon_2$ が 1.0%、 $\beta = 30^\circ$ では 0.8% 付近である。図-2を参照するとその時点以降 $\epsilon_1 - \epsilon_2 \sim D$ 曲線の傾きが大きくなっている。そしてその変化の割合は B_1/B_2 のピーク値の小さい $\beta = 0^\circ$ の方で大きい。このことは粒状体の散逸機構が B_{ij} と関連のあることを示唆しているものと考えられる。

5. あとがき

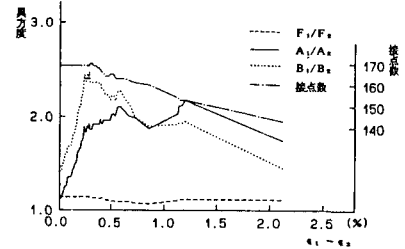
粒状体の構造を表わすとされている接触法線分布を接触力の大きさに応じて2つのグループに分けて考えると異方粒状体の構造変化特性をとらえられることがわかった。この考え方は従来の有効接触角分布などに比べて複雑な粒状体の力学挙動を微視的な観点から定量的に把握する際に役立つのではないと思われる。



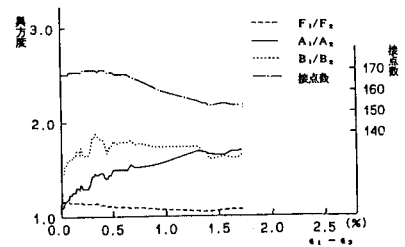
(a) $\beta = 0^\circ$



(b) $\beta = 30^\circ$



(c) $\beta = 60^\circ$



(d) $\beta = 90^\circ$

図-4 ファブリックテンソルの異方度

参考文献

- 1) Kishino: Disc Model Analysis of Granular Media, Micromechanics of Granular Materials, 1987
- 2) 荒木, 佐武, 岸野: 任意方向荷重を受ける粒状体モデルのシミュレーション解析, 土木学会年講(1987)