

Ⅲ - A28

粒状要素法によるアルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験のシミュレーション

前橋工科大学 正会員 土倉 泰

1. まえがき：粒状体のせん断変形のメカニズムを調べるモデル実験としてアルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験が行われることがある。これを粒状要素法でシミュレートし、粒状体がせん断された場合に生じる接触構造の変化の様子を詳細に調べたいと考えた。本文では実験と同じ粒子配置を初期状態として計算を行い、せん断変形にともなう生じるファブリックテンソルの変化の様子を調べた結果について述べる。

2. 計算方法：実際に行われたアルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験の条件をできる限り合わせた計算を2次元で行った。接触力と接触剛性はHertzの接触理論^{2,3)}に基づいて各々の接触点ごとに算定した。計算に用いた材料定数は、アルミ丸棒の密度 2700kg/m^3 、ヤング率 $7.1 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、ポアソン比 0.34、摩擦角 16° 、鉄製載荷板のヤング率 $2.1 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ 、ポアソン比 0.28、アルミ丸棒と鉄製載荷板の間の摩擦角 10° である。粒子の初期配置は実験でのせん断前の写真をトレースして決定した。決定した初期配置に接触理論を適用した結果、円が比較的大きく重なった部分に大きな接触力が算定されて不自然であったため、その部分では必要以上の重なり量を見捨てた計算を行った。鉛直方向応力は上板に作用する鉛直方向の力の和を2つの側壁間の距離で割った値とし、水平方向応力は2つの側壁に作用する水平方向の力の和を側壁の長さで割った値とした。実験と同じように鉛直方向、水平方向応力を $4.9 \times 10^4\text{N/m}^2$ とした状態を求めた後、水平方向応力は一定として鉛直方向応力を増加させてせん断した。図-1に示すのはせん断前の状態である。円粒子は849個存在する。なお、上板は上下に動くだけでなく、作用するモーメントに応じて中心点のまわりに回転するものとした。計算には全体剛性行列を用いた。また、変形によって新たな円の重なりができた場合には、その重なり量に応じて算定される接触力が十分小さな値となるように全体の变形増分を線形に戻す計算を組み入れた。計算で与えた鉛直方向の応力増分は $1.8 \times 10^2\text{N}$ 、逐次解析の終了条件として設定した各粒子の力の釣り合いの精度は $8 \times 10^{-2}\text{N}$ である。ところで、実験では必ずしも常に力の釣り合い状態を追っているとは限らないので、与えられた応力増分に対するひずみ増分に限界値を設けた。実験で求められた鉛直方向ひずみ～応力比の関係の初期勾配の1/10に相当する変形を考え、それ以上の変形量に達した場合には逐次解析を途中で打ち切る計算を行った⁴⁾。

3. 計算結果とその解析：図-2、図-3とも実験結果と計算結果を比較して示している。図-2は応力比 σ_1/σ_2 と鉛直・水平方向ひずみ ε_1 、 ε_2 との関係で、図-3は ε_1 と体積ひずみ ε_v の関係である。なお、体積ひずみは膨張を正として表示した。これらの図より計算結果はほぼ妥当であると判断した。そこで、ファブリックテンソルを用いて計算結果から得られる接触状況の変化について調べた。ファブリックテンソル $\mathbf{M}$ は以下のように定義する。

$$\mathbf{M} = \frac{1}{N_p} \sum \mathbf{l} \mathbf{l} \quad (1)$$

ここに、 N_p は粒子の総数、 $\sum$ は全接触点についての和、 $\mathbf{l}$ は

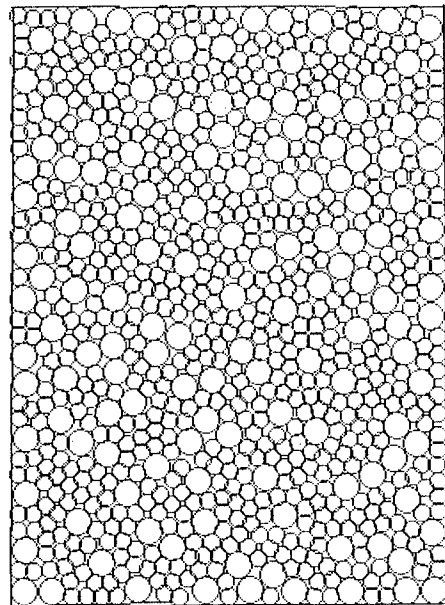


図-1 せん断前の粒子の配置

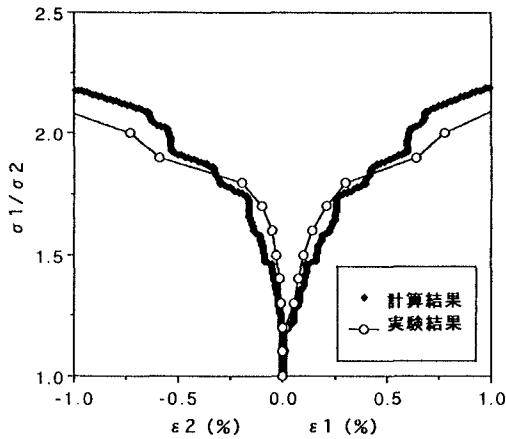


図-2 応力比と鉛直・水平方向ひずみの関係

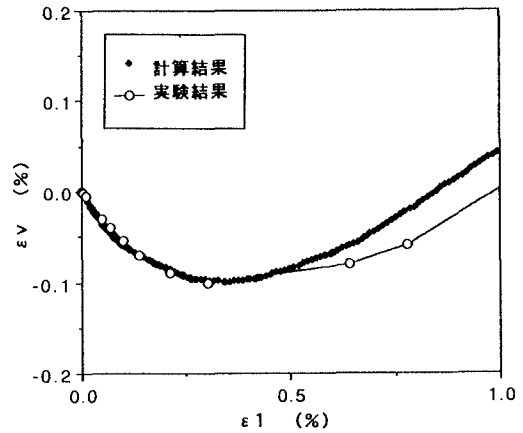


図-3 体積ひずみの変化

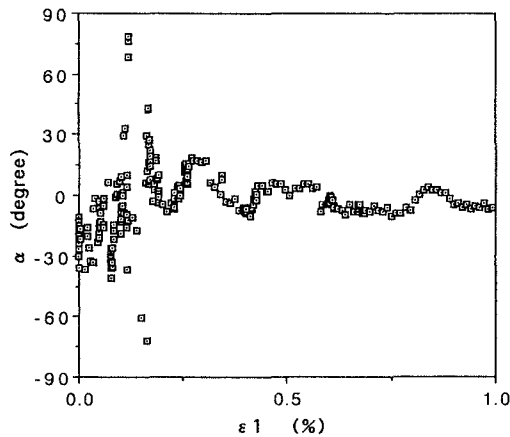


図-4 M_1 方向と σ_1 方向のずれ角の変化

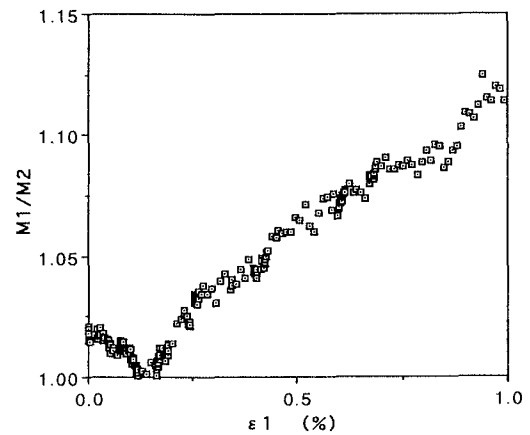


図-5 M_1/M_2 の変化

接触する2円の中心を結ぶベクトルを表す。なお、ここで行った計算では接触点数が0あるいは1の粒子およびそれに対応した接触点は計算の対象から除外した。図-4は ϵ_1 の変化にともなう $\mathbf{M}$ の最大主値 M_1 の方向と σ_1 の方向（鉛直方向）とのなす角 α の変化である。せん断初期にはばらつくが、せん断が進むと両方向はほぼ一致することがわかる。図-5は ϵ_1 の変化にともなう $\mathbf{M}$ の最大主値と最小主値の比 M_1/M_2 の変化を示す。変形の初期を除くと M_1/M_2 の値はせん断によって増大していくことがわかる。これはせん断によって接触点の法線方向分布が1つの方向に集中していくことを表している。

4. あとがき：粒状要素法によるアルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験のシミュレーションを実験と同様の条件で行った。計算結果は実験結果とほぼ一致することを確認した上で、せん断にともなってファブリックテンソルの最大主値の方向が σ_1 方向に一致していく様子や主値の比が増大していく様子をとらえた。今後、さらに詳細に接触構造の変化について調べてみたいと考えている。

参考文献：1)松岡：アルミ丸棒積層体の要素試験結果と支持力試験結果—DEMのためのブラインドテスト結果—、地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.17-24,1994.2)

Mindlin: Compliance of elastic bodies in contact, J. Appl. mech., pp.259-268, 1949.3)Young: Roark's formulas for stress and strain, McGraw-Hill Book Company, pp.650-651, 1989. 4)土倉：粒状要素法を用いたアルミ丸棒積層体の一面せん断試験の再現、第32回地盤工学研究発表会、1997。