

1. まえがき：粒状要素法¹⁾は粒状体の準静的挙動を調べるために考案されたシミュレーション法である。個別要素法と類似の手法であるが、各粒子の動きを算定する際に剛性行列が用いられ、与えられた境界条件のもとで粒状体の力の釣合状態が得られるまで繰り返し計算がなされる点で個別要素法とは異なっている。この方法を用いて行う計算を、実験を補う研究手段として明確に位置付けるためには、実験の再現性や適用条件を吟味しておくことが肝要である。そこで、アルミ丸棒積層体を対象として行われた一面せん断試験²⁾の粒状要素法による再現を試みた。

2. パラメーターと計算方法の詳細の設定：計算は2次元モデルを用いて行った。接触力と接触剛性はHertzの接触理論^{3),4)}にしたがって各接点ごとに算定した。計算に必要となる材料定数は、アルミ丸棒のヤング率、ポアソン比、摩擦角の $7.2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, 0.34, 16° と箱および上板のヤング率、ポアソン比、摩擦角の $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, 0.28, 16° 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求めた。初期配置における接触力はすべて十分小さな値となるように、2円の重なり量(これで接触力を算定する)が大きい場合には実際に重なっていても余分な重なり量は差し引いた値を用いて接触力を算定した。実験と同じ上載圧 0.5 kgf/cm^2 を作用させて力の釣合状態を求めた後、下箱を水平方向に動かしてせん断を与えた。上載圧 σ は上板に作用する鉛直方向の力の和を下箱底面の長さで割った値とし、せん断応力 τ は下箱に作用する水平方向の力の和を下箱底面の長さで割った値とした。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。計算は全体剛性行列を用いて行った。上板や下箱を動かす中で新たな円の重なりができる(新しい接触が生じる)場合には、そこで算定される接触力が十分小さな値となるまで全体の変形増分を線形に戻す計算を組み入れた。下箱の移動方法については次のような考察のもとに従来の計算法(常に力の釣合状態を求める)とは異なる工夫を施した。実験では箱を押し続けている。計算をこれと対応させるためには箱を動かし続ける必要がある。そこで、応力制御を採用し、さらに一定の応力比 τ/σ のもとでの箱の変位(水平方向変位)の増分には限界値を設けた。すなわち、力の釣合状態が得られていなくとも箱の変位増分が限界値に達したときには制御する応力を次段階のものに移すこととした。箱の変位増分の限界値は、せん断応力増分を水平変位増分で割った値が実験の初期に得られているその約1/10となるように定めた。ここで、与える応力増分は応力比 τ/σ の増分で表した場合におよそ 6.5×10^{-3} で一定とした。また、各粒子に作用する不釣合力が 0.01 kgf 未満となるときを力の釣合状態とみなした。 0.5 kgf/cm^2 の上載圧が作用するもとの接触力のほとんどが 0.1 kgf を超えるので、この値は十分小さいと判断した。

3. 計算結果：図-1は粒子の配置を描いたもので、(a)はせん断前、(b)は下箱が 0.8 cm 移動した後

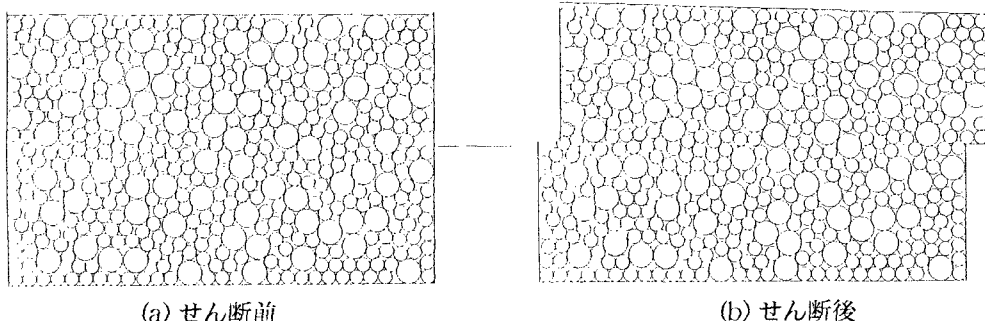


図-1 粒子の配置

の状態である。図-2は下箱の水平方向変位に対する応力比と上板の鉛直方向変位の変化を表しており、図中の□印と◆印は実験で得られている値である。計算結果は実験をよく再現しているといえよう。ところで、箱の変位増分に限界値を設けず、常に力の釣合状態を求める従来法による計算も行った。その結果を図-2と同様に示したのが図-3である。途中で計算結果がとぎれているのは、この応力比で水平方向変位が0.8cmとなっても釣合状態が得られなかったためである。この図より、従来の計算法では初期の変形に関しては実験を良好に再現できるが、強度は小さくなることがわかる。ここで、粒状体の構造について数量化するために、構造の異方度 Π_D を次のように定義する。

$$F = 0.5 \times \sum nn / M \quad (1)$$

$$\Pi_D = -0.5 \times [(\text{tr} F_D)^2 - \text{tr} F_D^2] \quad (2)$$

ここに、 F はファブリックテンソルで、接触法線ベクトル n のダイアド積の平均である。 M は接触点数、 $\sum$ は全接触点についての和を表す。 F_D は F の偏差部分であり、 tr はテンソルのトレースを表す。異方度 Π_D は F_D の2次不変量に相当する。図-4は異方度の変化を調べた結果である。箱の変位増分に限界値を設けた場合の計算結果を実線で示し、従来法による計算結果を○印で示す。水平変位0.12cm以降において実線の異方度が○印のそれよりも大きくなる。これは従来法による計算で接触構造の変化が十分生じていないことを表している。図-3で差が生じる部分と対応している。

4. あとがき：粒状要素法でアルミ丸棒積層体の一面せん断試験の再現を試みた。下箱の移動法を工夫すれば実験の再現が可能であるが、従来の計算法通りに常に力の釣合を求めると強度が小さくなることがわかった。この原因は実験で変位～応力比関係のピーク以前に準静的にとらえられない変形段階があるためと考えられる。この段階に入ると従来法では接触構造の変化が十分に進まないことを把握した。なお、別の粒子配置による計算で同様の議論ができることを確認している。

参考文献：1) 岸野：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.406/Ⅲ-11，pp.97-106，1989。2) 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の結果-，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。3) Mindlin：Compliance of elastic bodies in contact，J. Appl. mech.，pp.259-268，1949。4) Young：Roark's formulas for stress and strain，McGraw-Hill Book Company，pp.650-651，1989。

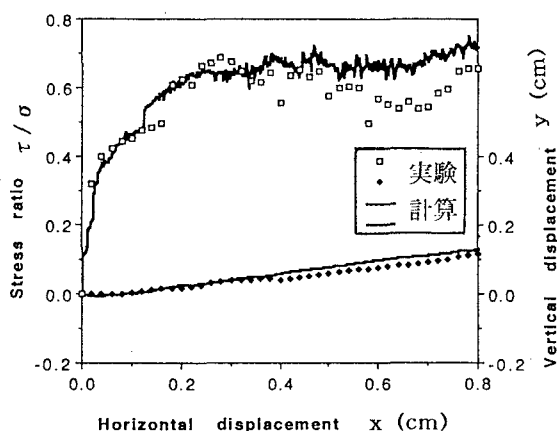


図-2 応力比～変位 (釣合満たさない状態含む)

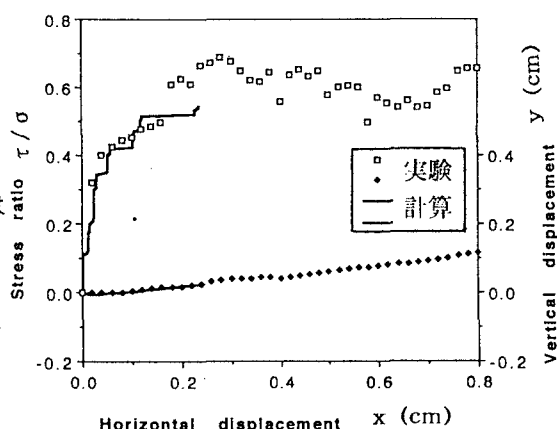


図-3 応力比～変位 (すべて釣合条件を満足)

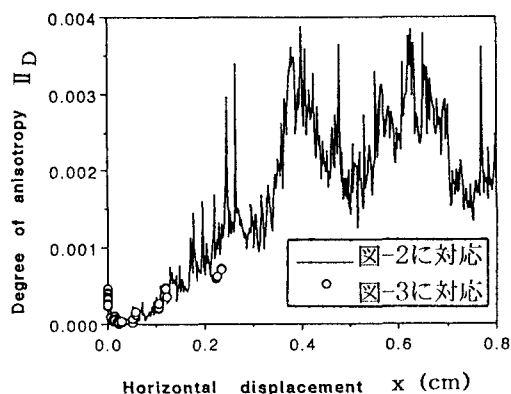


図-4 異方度の変化