Ⅲ－５　粒状体モデルによる変形局所化の解析とその考察

東北大学工学部　学生員　○松井　淳
同　上　学生員　末吉　守
同　上　正員　岸野佑次

1.はじめに

地盤における変形局所化の問題は、従来より多くの研究者によって研究されてきた古典的問題であるが、現在再び微視的な観点から詳細な研究が進みつつある。本論文においては、粒状体の準静的挙動のシミュレーションを行うために開発された粒状要素法(1)を用いて粒状体におけるせん断帯の発生のシミュレーションを行い、Vardoulakis ら(2)が再考した Coulomb の式との比較を行ったものである。

2.解析方法

このシミュレーションに用いた粒状体モデルを図－１に示す。図－１は接触力分布を示す。粒子数は１００個、粒径は８，１０mmの２種類、面積比は１：１とした。法線および接線方向の粒子間バネ剛性は1×10^{8}および7×10^{7}dyn/cm、粒子間摩擦角は５０°上辺との摩擦角は７５°、下辺の境界は０°とした。水平応力はゴム膜を介した応力制御を想定し、水平応力2.25×10^{5} dyn/cmを一定に保つことにした。また、鉛直方向は変位制御により載荷し、各ステップ毎に与えた垂直変位増分は供試体の高さの０．１％とした。

このシミュレーションにおける特徴は、横壁に剛体を用いず三軸圧縮試験と同様に粒子の自由な移動をなるべく妨げないように工夫していることである。そのためにあらかじめ最外端の粒子を識別し、個々の粒子の各々に直接水平応力を加えるようにした。

3.解析結果

応力比がピークを迎えるまではほとんど変位はなくピーク直後から図－２のような変位が始まった。一見して、変位の方向がある線をはさんで大きな変化を示しているのがわかる。この線を形成する粒子の挙動をより詳しく調べるために粒子

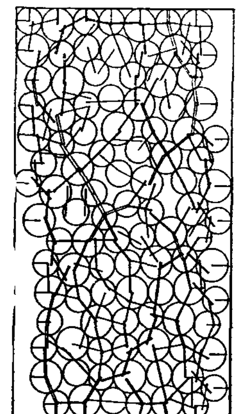

図１　用いた粒状体モデル
（γ＝５％）

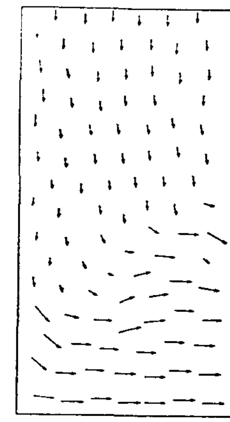

図２　変位ベクトル図
（γ＝０～５％）

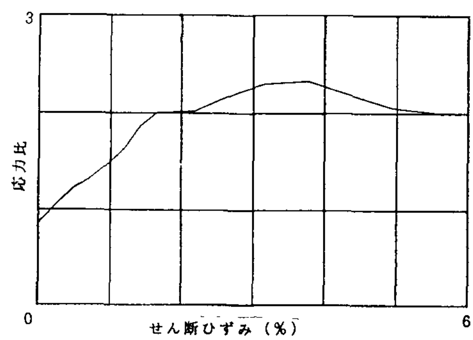

図３　応力－ひずみ関係

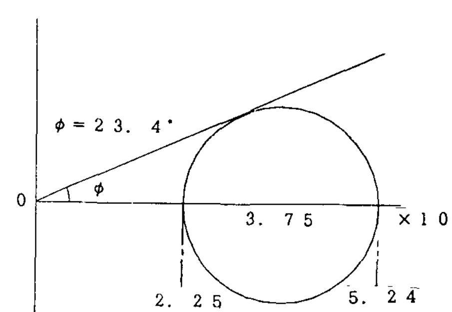

図　４　モールの円

の回転を図－５に表示した。この図から変位が大きく変化する線上では粒子の回転が非常に大きいことが分かる。

4. Coulomb の式との比較

Vardoulakis ら[2]は、粘性のない乾燥した砂のすべり角としてよく知られている Coulomb の式

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi_P}{2} \qquad (1)$$

を次のような仮定から導き出した。図－６のような２つの剛体間の相対微小変位により、厚さ２ｄのせん断帯が生じるとするとき、せん断帯内部の変位勾配を

$$u_{i,j} = -\frac{1}{d}\, u_i n_j \qquad (2)$$

（u_i：変位ベクトル、n_j：せん断面に立てた単位法線ベクトル）

と仮定する。また、構成則に非共軸的自由度をもたせることとする。さらに、上下の載荷盤を平行に二軸圧縮し、応力比がピークになるときせん断帯が発生するものと仮定する。これらの条件から変位に関する斉次方程式が得られ、この固有条件として式（１）が得られる。

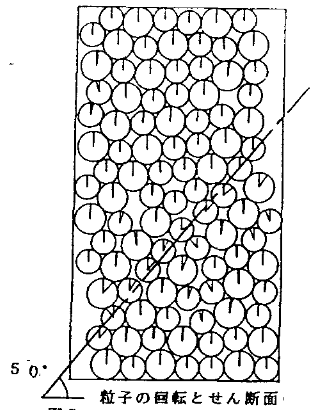

図５　粒子の回転とせん断面
（γ＝０～５％）

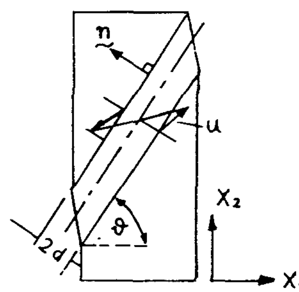

図　６　変形パターンの仮定

いま、前述のシミュレーション結果をもとに描いたピーク状態のモールの応力円を図－４に示す。この状態において、せん断帯が生じると仮定され、モールの円に接する破壊線をもとに摩擦角が$\phi=$２３．４°と求められる。理論式にこの値を代入すると

$$\theta = 45^\circ + 23.4^\circ / 2 = 56.7^\circ \qquad (1)$$

と算出される。図－５におけるせん断帯の角度は約５０°でありシミュレーションの方が若干小さめの値であるが、上部および下部がそれぞれ剛体的に変位していることなど、定性的に良い一致を見ている。本シミュレーションにおけるせん断帯の幅ｄはほぼ粒子径程度となったが、これは用いた粒状体モデルがほぼ等粒径で規則配列に近いためと考えられる。

5. あとがき

粒子数が少なく、粒径も二種類としたので内部の変形状態が拘束され、理論には必ずしも適合していないと考えられる。今後、粒子数を増やすと共に種々のパッキングについて同様の解析を行いたいと考えている。

＜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 Vol.406/Ⅲ-11, pp.97～106 (1989)

（２）Vardoulakis et.al : Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.2, 99～128 (1978)