

CS1-6(Ⅲ) 剛性行列に基づく粒状体の変形局所化の解析

(財)電力中央研究所 正員 ○松井 淳
東北大学 工学部 正員 岸野 佑次

1. はじめに

地盤材料におけるせん断帯などの発生のメカニズムには土粒子の粒度分布や、粒子形状が大きく関わっており、微視力学的立場からのアプローチが必要であると思われる。粒状要素法¹⁾は、このような解析に適したシミュレーション解析法であり、本研究では、まず、この方法を用いて載荷試験を行うとともに、粒子間接触剛性に基づく固有値解析²⁾によって、粒状体の変形局所化について考察した。

2. 解析方法

本シミュレーションで用いた粒状体モデルとその初期接触力分布を図-1に示す。また、表-1に、解析で用いた諸定数を示す。境界条件は、上下方向については、変位制御とし、下辺はすべりを拘束し、上辺の摩擦は0とした。水平方向については、三軸圧縮試験機のメンブレンによる拘束を想定し、鉛直方向を2000等分した各レベル毎に最外端の粒子を識別し、これにそのレベルの拘束圧を作用させる応力制御とした。

3. 固有値解析

固有値解析に用いる剛性行列は、粒子間及び粒子上下境界間に設けた法線方向及び接線方向ばねに基づくものであり、各粒子の変位及び回転の3自由度に対応させて構成されている。さらに、載荷試験に合わせて、上辺の上下方向の移動を自由度の一つとした。従って、剛性行列の元は、粒子数 $\times 3 + 1$ となる。粒子間のすべりや、不安定な接触数の粒子の処理については参考文献²⁾を参照のこと。

次に、実際の変位場と、固有モードの相関を調べるために、次のようにして固有値展開を行った。

$$(d) = [A] (\alpha) \quad (1)$$

ここに (d) : 変位ベクトル

[A] : 各固有モードの成分を列に並べた行列

(α) : 固有モード係数

式(1)の両辺に左側から[A]の転置を掛けることによって固有モード係数(α)を求めることができる。

4. 解析結果と考察

図-2に単調載荷試験を行ったときの応力比と鉛直ひずみの関係を示す。同図において応力比が急激に低下している荷重ステップ(鉛直ひずみが0.74%から0.75%に変化するとき)の粒子配列について剛性行列を作成し、3.に述べた固有値解析を行った。計算された固有値を法線方向のばね定数で除して無次元化し、両対数座標にプロットしたものが図-3である。これから横軸の値が1以下のものが200個以上存在することが観察され、0に極めて近い固有値が多数存在することがわかる。

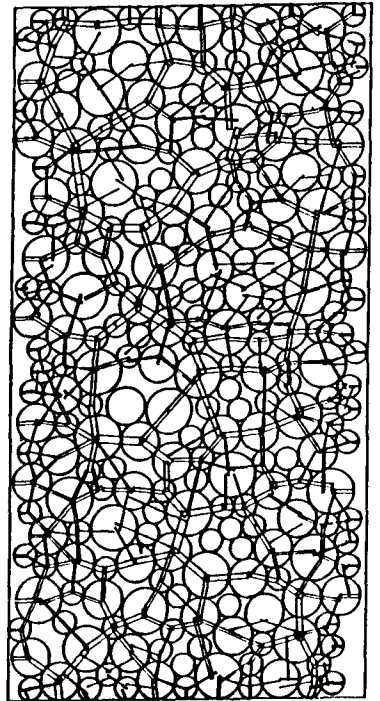


図-1 初期状態における接触力分布

表-1 解析に用いた定数

粒子数	244 個
粒径	0.6, 0.9, 1.2 cm
面積比	1:1:1
単位体積重量	0.0015 kgf/cm
法線方向ばね定数	
粒子間	1000 kgf/cm
粒子境界間	2000 kgf/cm
接線方向ばね定数	
粒子間	700 kgf/cm
粒子境界間	1400 kgf/cm
摩擦係数	
粒子間	$\tan 25^\circ$
粒子境界間 (上部)	$\tan 0^\circ$
粒子境界間 (下部)	∞ (拘束)
拘束圧 (水平応力)	2.0 kgf/cm
鉛直ひずみ増分	0.01 %

このことから、一般に粒状体における分岐を伴う変形は、単一の最小固有値モードのみに支配されるのではなく、複数の固有モードの線形結合に支配されることができると考えることができる。これは粒状体の変形機構の複雑さの一因と考えることができよう。固有値の小さい順に10の固有モードに基づく展開を行って得られた変位モードを図-5に示す。実際の変位（図-4）と比較してみると、非常によく類

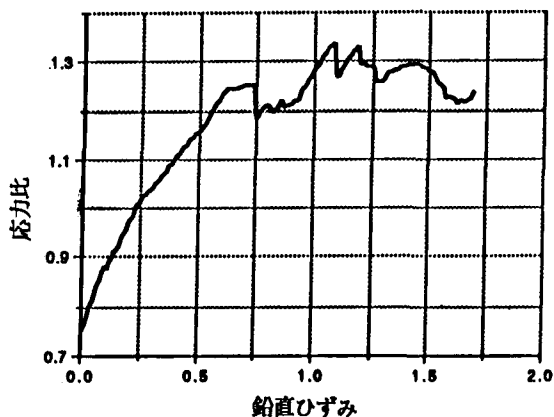


図-2 応力比—鉛直ひずみ曲線

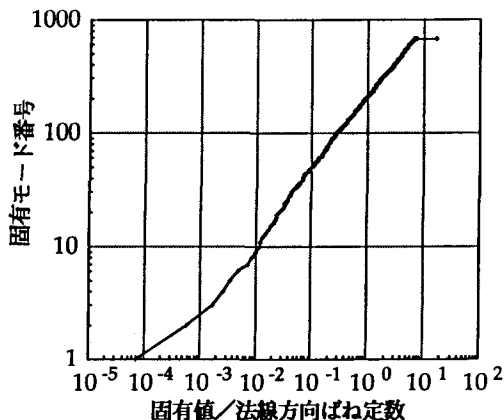


図-3 固有値の分布

似していることがわかる。このように、本論文で提唱している固有値解析を行えば実際の変位モードは低次の固有値に対応した固有モード10個程度を考慮すれば良いということが出来る。また、粒子の回転に関しては、局所化が起きる箇所の近傍において卓越した回転が生じていることが従来より観察されているが、本シミュレーションにおいても同様な現象が再現されている（紙面の関係上図は割愛しました）。また、固有モードにおける回転の成分を変位成分と同様に固有値展開してみると実際の回転と非常によく類似した回転分布が得られ、回転に関しても固有値解析法の有用性が確かめられた。

5. あとがき

本文においては、粒状要素法により行った解析を通して、粒状体の不均一な変形は、剛性行列の低次固有値に対応するわずかな固有モードの線形結合によって精度よく表現できることがわかり、固有値解析法の有用性が確かめられた。今後、さらに定数や境界条件を変えて解析を進め、考察を深めたいと考えている。

< 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) 松井 淳，岸野佑次：粒状体における変形局所化の微視力学的解析，東北支部講演会(1992)

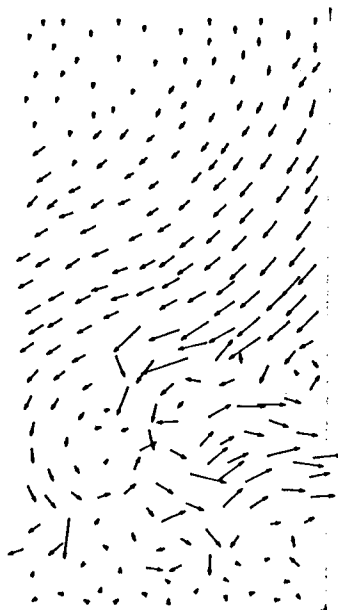


図-4 変位ベクトル図

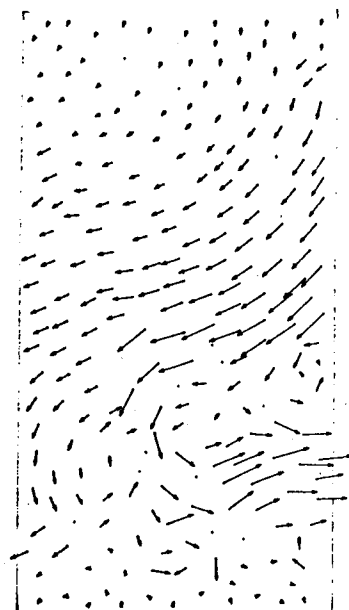


図-5 固有モード図