

Ⅲ—37

主軸回転時における粒状体の力学特性の離散モデル解析

東北大学 学生員 ○小西重幸
東北大学 正 員 岸野佑次

1. はじめに

地震力のような動的な繰り返し载荷を与えた場合には、主要素には主応力軸の回転を伴うような荷重が作用することになる。実際の構造物地盤系の変形を考察する場合には、このような複雑な応力状態にも適用できる構成則を定める必要がある。従来から、主応力軸回転の影響に関する実験は行われてきたが、通常の連続体力学のアプローチでは取扱いの困難な問題の一つである。本文においては、DEMを参考に著者の一人が提案した粒状要素法¹⁾を用いて、主応力軸回転を考慮したシミュレーション解析を行った。

2. 主軸回転シミュレーション解析の概要

(1) 粒状要素法の概要

粒状要素法は、粒状集合体に対する離散的平衡条件式を直接的に解くための解析手法である¹⁾。このため、要素位置データ及び要素間力学特性に基づいて剛性行列を構成して解析を進める。剛性行列は、粒子移動や回転に伴って時々刻々と変化するので、これを逐次改定しながら解析を進める必要がある。接触する粒子間に法線バネ（定数 k_n ）及び接線バネ（定数 k_t ）を設定し、粒状集合体に弾性特性を付与する。また、法線方向の引っ張りに対する粘着力は0とする。接線方向のすべりに対してはクーロンの摩擦則（摩擦角 ϕ ）を仮定する。

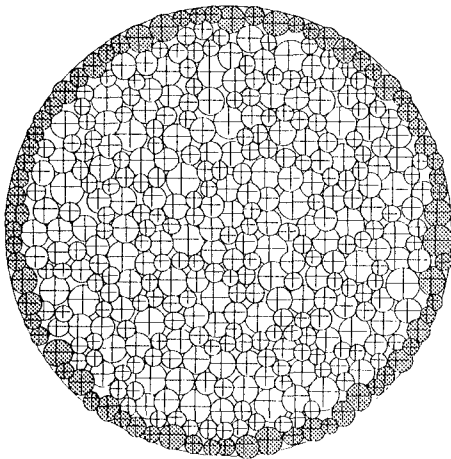


図-1 初期パッキング

(2) シミュレーション解析における制御²⁾

主応力軸の回転を与える粒状体モデルの初期状態は図-1に示すように円形境界内におかれた円形粒子の集

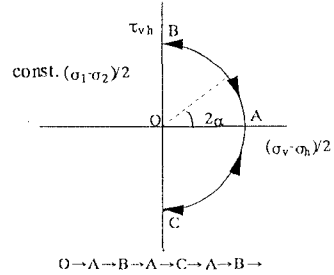


図-2 主軸回転時の応力制御経路

合体とする。次に、この解析における応力制御の経路を図-2に示す。この粒状体モデル外縁部の影を施した粒子にまず等方的に 3.0 kgf/cm の拘束圧を与え、その後応力差 $(\sigma_v - \sigma_h)/2 = 1.0$ kgf/cm を与え、これを初期状態とする(O→A)。ここに σ_v は鉛直方向応力、 σ_h は水平方向応力である。この応力状態から出発して主軸回転を与える。その際、最大せん断応力 $((\sigma_1 - \sigma_2)/2, \sigma_1, \sigma_2$:主応力)は、一定値 1.0kgf/cmに保ち、 $(\sigma_v - \sigma_h)/2$ と τ_{vh} の2成分を変化させる。ここで主軸方向 α は-45度から+45度の間で連続的に変化させ、その時有効応力の鉛直成分 σ_v' 、水平成分 σ_h' は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\sigma_v' &= \frac{\sigma_1' + \sigma_2'}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \\ \sigma_h' &= \frac{\sigma_1' + \sigma_2'}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha\end{aligned}\quad (1)$$

主軸回転シミュレーションの各ステップにおける制御法は、以下のように行う。

図-1の粒状体モデル外縁部のn番目の粒子の変形前後の位置ベクトルをそれぞれ X_0^n 、 X^n とすると、両者の間には常に斉一次変換

$$X^n = AX_0^n \quad (2)$$

が成立するように制御する。ここに、Aは変換行列であり、非排水の条件より $A_{11} + A_{22} = 2$ とする。上記2つの応力制御成分については外縁部粒子に作用する接触力より応力を算定し、これが各ステップにおける目標値となるように逐次Aの偏差成分を変化させて平衡状態を求める。

(3) 配位テンソルについて

配位テンソルは、トレースが配位数となる構造テンソルであり、次式で与えられる。

$$C_{ij} = (\sum_c (\sum_n n_i n_j)) / N \quad (3)$$

ここに、 n_i は接触点における単位法線ベクトル、Nは粒子数であり、 $\sum_c$ は各粒子の接触点に関する和、 $\sum_n$ は領域内の粒子に関する和を表す。配位テンソルの主値

表-1

粒径	D	1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0 cm
粒子数		395
粒子間 バネ定数	法線方向 k_n 接線方向 k_t	1000 kgf/cm 700 kgf/cm
粒子間摩擦角	ϕ	20°
初期拘束圧	鉛直方向 水平方向	3.5 kgf/cm 2.5 kgf/cm
主軸回転の振幅		45°
1ステップ当たりの 主軸回転角		3°

3. 解析結果及び考察

表-1のデータに基づいて行った解析について考察する。

(1) 有効応力について

図-3に有効応力と主軸方向の関係を示す。主軸回転に伴い、間隙圧が発生し有効応力が初期の半分程度になっているのがわかる。ただし今回のパッキングはある程度密であり、拘束圧も比較的大きかったために3サイクル目以降では、有効応力の低下が見られない。

(2) ひずみについて

図-4に鉛直方向ひずみ及び水平方向ひずみ主応力軸方向の関係を示す。主軸回転を行うと各サイクルごとに残留ひずみが生じているのがわかる。また、残留ひずみは最初に主軸を回転させた方(正方向)で大きく、反対側ではほとんど生じていない。これは初期の主軸回転による変位によって誘導された異方性であると考えられる。ここで、非排水条件であるのでx方向とy方向のひずみの和は0となるはずであるが計算中の誤差のため若干左右の対称性が失われている。

(3) 配位テンソルについて

図-5に主軸回転に伴う配位テンソルの主値の変化を示す。横軸は主軸回転のサイクルを示すが、 C_1 , C_2 の差として現れる粒子配列の誘導異方性が主として C_2 、すなわち最小主応力の方向の接触点密度の変化に支配されているのが特徴的である。また、主軸回転角度増分の正負が入れ替わるところで C_1 , C_2 共に急激な増減が見られるが、これは構造変化を伴う不安定な現象が生じていると考えられる。

4. あとがき

ここでは、主軸回転の振幅を45度とした場合のみ記したが、今後振幅の異なった場合との比較を行いたい。また、配位テンソルなどに基づくより詳細な検討を行い、主軸回転に伴う諸特性のマイクロメカニズムについて調べる必要があると考えられる。

(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No.406/III-11,pp97-106,1989
- 2)Ishihara,K and Towhata,I:Sand response to cyclic rotation of principal stress direction as induced by wave loads, Soils and Foundations Vol.23, No4, pp111--26,1983.

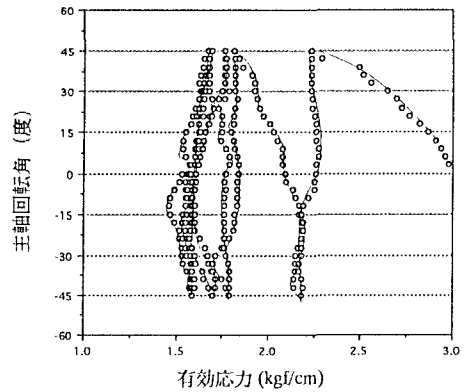


図-3 有効応力-主軸回転角

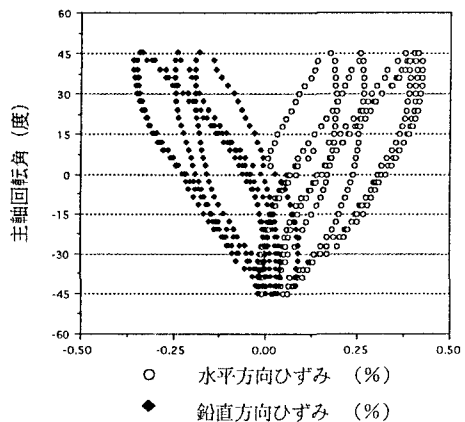


図-4 ひずみ-主軸回転角

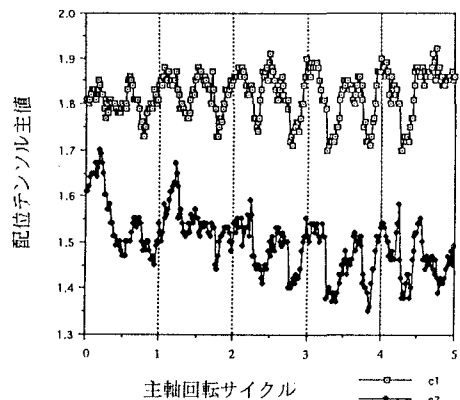


図-5 主軸回転サイクル-配位テンソル