

Ⅲ - 11

粒状体の数値シミュレーション解析法に関する考察

東北大学 学生員 ○藤浪宏二
 東北大学 正 員 岸野佑次
 東北大学 正 員 京谷孝史

1. はじめに

粒状体モデルによるシミュレーション解析法として、粒状要素法¹⁾と個別要素法²⁾があるが、本研究では、非排水繰返し二軸せん断要素試験を行い、二つの解析法の比較検討を行った。

2. 粒状要素法と個別要素法

粒状要素法 (GEM) は、着目した粒子の移動ベクトル

$$\Delta X_G = (\Delta x, \Delta y, r \Delta \omega)_G$$

とこれに対応して生じる合力ベクトル

$$\Delta F_G = (\Delta f_x, \Delta f_y, \Delta m/r)_G$$

の間に成立する剛性関係式

$$\Delta F_G = S_G \Delta X_G \quad (1)$$

$$S_G = \sum_c T_c^t S_c T_c \quad (2)$$

$$T_c = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 1 \end{bmatrix}_c \quad (3)$$

(θ は法線方向と x 軸とのなす角度)

$$S_c = \begin{bmatrix} c_n & 0 \\ 0 & c_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

(c_n, c_t は、接線、法線方向のばね係数)

$\sum_c$: 全接点に関する和

より全体剛性関係式

$$\Delta F = S \Delta X \quad (5)$$

を構成し、これをもとに Newton-Raphson 法などを援用して逐次解析により粒子集合体の平衡位置を見出す静的方法である。この逐次計算の過程においては、Coulomb の摩擦則に支配される滑りや粒子間接触状態の変化が生じるので、 S を時々刻々修正する必要がある。GEM では ΔF_G には粒子間接触力および物体力のみが関与する。

これに対して、個別要素法 (DEM) は、 ΔF_G に粘性力を加えた上で運動方程式

$$\Delta F_G = M_G \Delta \ddot{X}_G \quad (6)$$

を構成し、これをもとに粒子位置・回転を数値積分により求める動的方法である。この方法では時間ステップのとり方が重要であり、とくに静的問題に適用する際には慣性力をできるだけ小さくするように工夫する必要がある。

3. 解析条件

境界の制御による異方性が生じないように図-1 に示すような円形領域のモデルを用い、ひずみ制御非排水繰返し二軸せん断要素試

験を行った。初期状態は、DEM 解析用に開発された PFC2D を用いて粒子を発生させた後、初期拘束圧が 2.0 kgf/cm^2 となるように収束させたものを用いた。非排水条件は体積一定条件で代用することとし、繰返し試験におけるせん断ひずみ (工学ひずみ) 振幅は $\pm 4\%$ とした。解析には表-1 に示すような諸定数を用い、GEM、DEM の両者の比較検討を行うため、表-2 に示すような解析を行った。DEM の解析は、PFC2D を用いて行い、GEM と同様に各載荷ステップにおいて静的平衡状態が保たれるように収束させながら載荷する方法 (DEM-1) と、収束させずに載荷する方法 (DEM-2、3) について検討を行った。

表-1 粒状体モデル諸定数

粒子半径	0.25 ~ 0.50 (cm)
単位体積重量	$2.86 \times 10^{-3} (\text{kgf/cm}^3)$
重力加速度	0 (cm/s^2)
法線方向ばね係数	1000 (kgf/cm)
接線方向ばね係数	700 (kgf/cm)
摩擦係数	$\tan 25^\circ$

表-2 解析の種類

モデル	手法	逐次解析増分	収束条件
モデルA 粒子数360	GEM	$ \Delta X_G _{\max} = 0.1 \text{ mm}$	$ \Delta F_G < 0.01$
	DEM	1 $\Delta t = 10^{-4} (\text{s})$	$ \Delta F_G < 0.01$
		2 $\Delta t = 10^{-4} (\text{s})$	×
		3 $\Delta t = 10^{-5} (\text{s})$	×
モデルB 粒子数380	GEM	$ \Delta X_G _{\max} = 0.1 \text{ mm}$	$ \Delta F_G < 0.01$
	DEM	1 $\Delta t = 10^{-4} (\text{s})$	$ \Delta F_G < 0.01$
		2 $\Delta t = 10^{-4} (\text{s})$	×

4. 解析結果および考察

図-2、図-3 にモデルAにおける GEM、DEM-1 による本試験の応力ひずみ曲線を示す。グラフの縦軸のせん断応力は $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ 、横軸のせん断ひずみは $\epsilon_x - \epsilon_y$ を表す。さらに、せん断ひずみが $+4\%$ および -4% のときのモデルAおよびモデルBのせん断応力の推移を図-4、図-5 に示す。

図-4、図-5 より、モデルAは、繰返しせん断を与えるにつれ、せん断応力の最大値は、

徐々に低下していくが、モデルBにはその傾向が見られない。さらに、モデルAでは、DEMの解析の手法によって解析結果が異なるのに対して、モデルBではDEMの手法に依らない。繰り返しせん断によるせん断応力の低下は、液状化のメカニズムの重要な一因として知られる内部の粒子の再配列によるものであるが、そのような再配列により粒子の微視的構造が大きく変化しているところで解析結果の違いが現われることがわかった。

図-2、図-3および図-4、図-5より、GEMとDEM-1を比較すると、DEMを静的な力の釣り合いを満たすようにして計算させた場合、粒子の再配列が生じる過程においても両者はよく一致することがわかる。

DEMにおいては、時間増分について次式を満たさなければならないという条件が知られている。

$$\Delta t \leq 2 \sqrt{\frac{m}{k}} = 1.051 \times 10^{-3} \quad (7)$$

DEM-2、DEM-3ともに(7)式を満たしているが、図-4に示されているように、時間増分により異なる結果が得られた。このことから、収束させずに載荷させる場合には時間増分をかなり細かくして計算を行う必要があると考えられる。

以上のようにDEMは工夫することにより、ほぼGEMの結果に一致するということがわかった。GEMとDEM-1の計算時間の比較では、DEMのほうの数倍早く収束したが、詳細についてはGEMの $|4X_G|_{max}$ の値やDEMの Δt の値を種々変化させ、その精度とともに、さらに検討を行う必要がある。

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, 土木学会論文誌, No.406, pp.97-106 (1989)
- 2) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65 (1979)

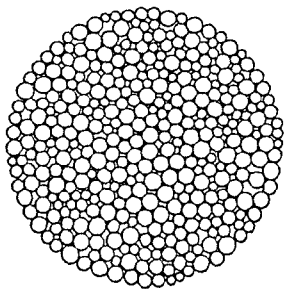


図-1 初期状態のパッキング

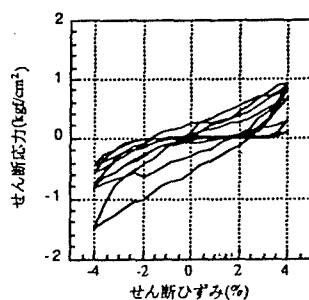


図-2 GEMによる応力ひずみ曲線 (モデルA)

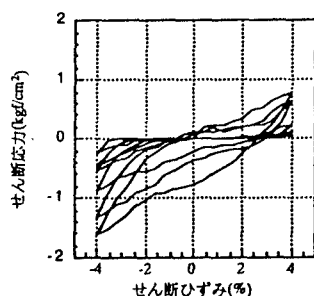


図-3 DEM-1による応力ひずみ曲線 (モデルA)

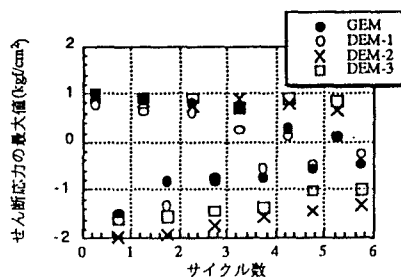


図-4 せん断応力の最大値 (モデルA)

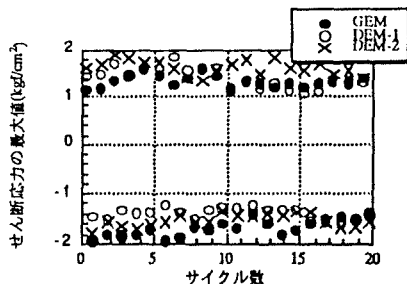


図-5 せん断応力の最大値 (モデルB)