

Ⅲ－10

粒状体の静的挙動解析における各種解析法の比較

東北大学 学生員 ○山田耕一郎

東北大学大学院工学研究科 正会員 岸野 佑次

東北大学大学院工学研究科 正会員 金子 賢治

1. はじめに

粒状体のシミュレーション手法として、個別要素法（DEM）¹⁾ や粒状要素法（GEM）²⁾ 等がある。従来、個別要素法はアルゴリズムの問題により応力制御を正確に行うことは困難であった。本研究では、その問題を改善したとされるKuhnによる個別要素法³⁾、従来の個別要素法、粒状要素法を用いて、応力制御による側圧一定2軸圧縮試験およびプローブ試験を行い、各解析法の比較・検討をする。

2. 解析法

1) 粒状要素法

粒状要素法においては着目した粒子の移動ベクトル

$$\Delta X_G = (\Delta x, \Delta y, r\Delta w)_G \quad (1)$$

とこれに対応して生じる合力ベクトル

$$\Delta F_G = (\Delta f_x, \Delta f_y, \Delta m / r)_G \quad (2)$$

より、要素剛性方程式

$$\Delta F_G = S_G \Delta X_G \quad (3)$$

を構成する。ここに、 $S_G = \sum C S_C T_C$ は要素剛性マトリクスであり、 T_C は座標変換マトリクス、 S_C は仮想バネ剛性マトリクスである。さらに、式(3)を解析領域の全粒子について式(3)を重ね合わせた全体剛性関係式

$$\Delta F = S \Delta X \quad (4)$$

を任意の境界条件の下で逐次解析することにより粒子集合体の平衡位置を見出す方法である。ここに、 ΔF は全粒子の合力ベクトル、 ΔX は全粒子の移動ベクトル、 S は全体剛性マトリクスである。この逐次計算過程においては、Coulombの摩擦則に支配される滑りや接触状態の変化が生じるので、 S は時々刻々修正する必要がある。粒状要素法では ΔF_G には粒子間接触力粒子間接触状態および物体力のみが関与する。

2) 従来の個別要素法(DEM-1)

ΔF_G に粘性項を加えた運動方程式

$$\Delta F_G = M_G \Delta \ddot{X}_G \quad (5)$$

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。この方法では時間ステップのとり方が重要であり、とくに静的問題を追うような際には慣性力ができるだけ小さくなるように工夫する必要がある。

3) Kuhnの個別要素法(DEM-2)

応力制御に関して、時間ステップ毎に収束判定値以下で静的平衡状態が保たれるように以下のような収束条件を設けている。

$$\Psi = \sum_{n=1}^3 |\sigma_n^a - \sigma_n^l| / \sum_{n=1}^3 |\sigma_n^l| \quad (6)$$

σ_n^a は各ステップ毎に与える応力であり、 σ_n^l は粒子間の接触から算出される応力である。 n は応力テンソルの各成分を表している。パラメータ Ψ が許容値以下になるまで収束計算を行うが、この時、あらかじめ定めておいた仮想の剛性マトリクスを用いる。

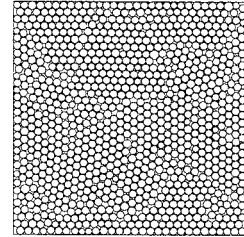


図-1 初期パッキングモデル

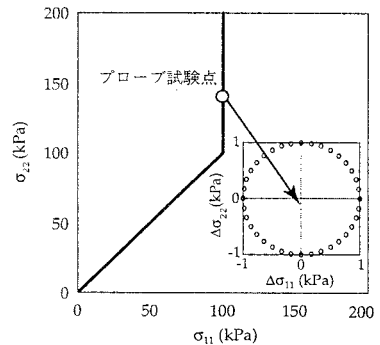


図-2 荷重経路とプローブ試験点

3. 解析条件

本研究における解析は、全て周期境界条件の下での応力制御で行った。また、ユニットセルは粒子を1000個含む粒状体モデルを用いた。粒径は0.10～0.15cmに統一し、粒径の大小の分布がほぼ均一になるようにした。初期パッキングモデルを図-1に示す。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、粒状要素法により初期拘束圧が100kPaとなるように生成したものである。粒子間のばね定数は、法線方向200kN/mおよび接線方向140kN/mとし、粒子間摩擦角は15°とした。

図-2に示すように等方圧縮状態から σ_{11} を一定とし、 σ_{22} が200kPaまでの荷重を行った。 σ_{22} の値は、応力のピークよりも手前である。DEM-1,DEM-2に関しては、時間増分 Δt を変えた時の結果の相違を検討するため、 $\Delta t=0.001, 0.0001$ の場合でそれぞれ解析を行った。

プローブ試験点を図-2に示す。この点はほぼ弾性的な挙動を示す点であり、 σ_{22} の値は140kPaである。プローブ試験点において、図-2に示す10°毎合計36方向について応力増分の大きさ $|\Delta \sigma| = 1\text{kPa}$ として荷重・除荷を行った。

4. 解析結果

応力比 σ_r と最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ との関係を図-3に示す。各パラメータは ε_1 , ε_2 を主ひずみ, σ_1 , σ_2 を主応力として次式で表される。

$$\gamma_{\max} = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2| \times 100(\%), \quad \sigma_r = q / p$$

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2, \quad q = |\sigma_1 - \sigma_2| / 2$$

図-3より, DEM-1, DEM-2は, Δt の値に関わらず, 応力のピーク値に近づくにつれて, 応力制御の精度が低くなり, 指定した σ_{22} の値の手前で解析が途中で止まるという結果になった。ここで, 図-3の応力比0.19~0.20の曲線部分を拡大して図-4に示す。図-4(a)は $\Delta t=0.001$ の場合, 図-4(b)は $\Delta t=0.0001$ の場合をそれぞれ粒状要素法の結果と併せて示した。図-4(a), (b)より, 個別要素法においては, 時間増分を小さくすると粒状要素法と類似した静的な挙動を示していることが分かる。

応力増分, 弾性ひずみ, 塑性ひずみをそれぞれ図-5, 図

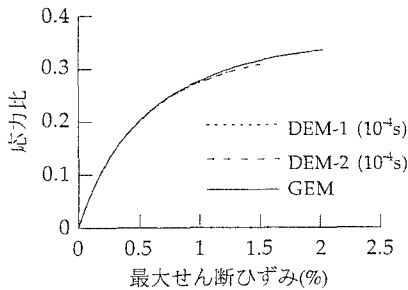
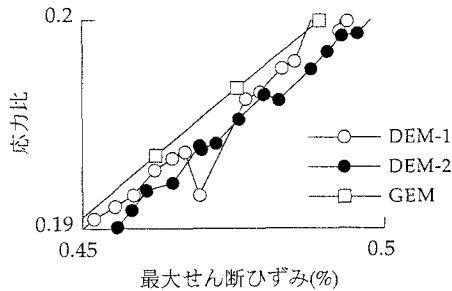
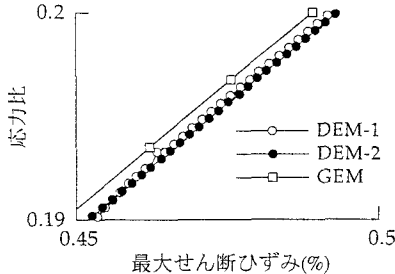


図-3 応力ひずみ曲線



(a) $\Delta t=0.001$



(b) $\Delta t=0.0001$

図-4 応力ひずみ関係拡大図

-6, 図-7に示す。これらを比較すると, 特に塑性ひずみに関しては, 図-7より, 各解析法の結果が一致していないことが分かる。なお, これらを評価するために評価パラメータを定義して検討を行っているが, 紙面の関係上省略する。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. : A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, Vol.29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 2) 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, pp. 97-106, 1989.
- 3) Kuhn M. R. and Mitchell, J. K. : Modelling of soil creep with the discrete element method, *Engineering computations*, Vol. 9, pp. 277-287, 1992.

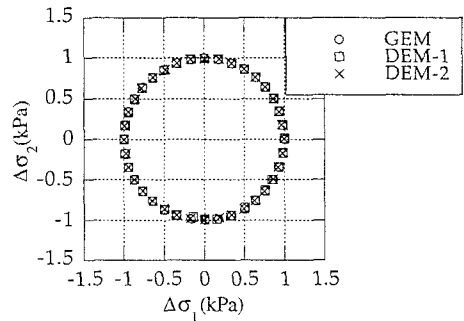


図-5 応力増分

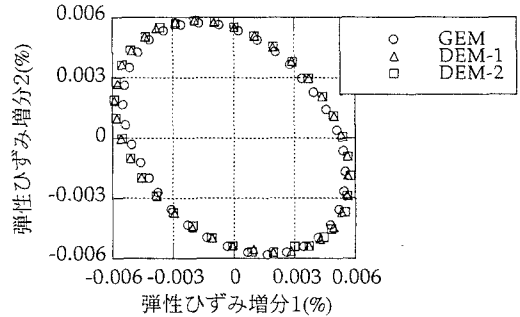


図-6 弾性ひずみ増分

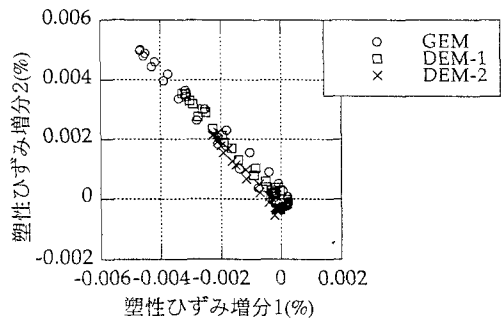


図-7 塑性ひずみ増分