

III-215

繰返し荷重を受ける粒状体変形の個別要素法解析

北海道大学工学部 正会員 三浦 均也
同 学生員 上野 勝利
同 正会員 土岐 祥介

1. まえがき 筆者らは個別要素法に基づいて砂のような粒状体の二次元変形挙動をシミュレートできる解析手法を開発した¹⁾。本報告では、粒子集合体に主応力軸固定条件で繰返してせん断応力を作用させた時の変形挙動を排水および非排水条件でシミュレーションしている。また、最大せん断応力 τ_m を一定に保ちながら主応力軸が回転するという条件においても粒状体の変形挙動をシミュレートしている。

2. 解析手法の概要 図1および式(1)に示す応力・ひずみのパラメータを採用している。

開発したシミュレーション手法では、従来の解析手法^{2, 3, 4)}に対して次の2点に改良を加えている。1) 平行四辺形領域を上下左右に数並べて集合状態の連続性を保ち、円盤要素集合体の境界による好ましくない影響を除去している。図2が示すように円盤要素A, B, C, Dは境界を挟んで互いに接触している。このような配列にすることにより、応力やひずみの主軸方向の制御を容易にしている。2) 領域の変形にあわせて、全ての円盤要素の移動量を指定している（図3）。その結果、個々の要素の運動が安定し、計算の収束性が良くなっている。円盤要素の運動や接触に関する数式表現、および上記2点を改善するための数式的な取扱は前報¹⁾に詳しい。変形挙動の計算間隔は0.001秒とし、また剛性が低くなり変形速度が大きくなる状況において円盤要素加速度の影響を抑制するためにひずみ速度は5%/sec以下に強制的に抑えている。

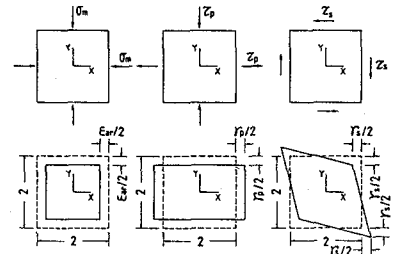


Fig.1

$$\begin{aligned} \sigma_m &= (\sigma_x + \sigma_y)/2 = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 & \epsilon_{ax} &= \epsilon_y + \epsilon_x = \epsilon_1 + \epsilon_2 \\ \tau_p &= (\sigma_y - \sigma_x)/2 & \gamma_p &= \epsilon_y - \epsilon_x \\ \tau_s &= \tau_{xy} = \tau_{yx} & \gamma_s &= \gamma_{xy} = \gamma_{yx} \\ \tau_m &= (\tau_p^2 + \tau_s^2)^{1/2} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 & \gamma_m &= (\gamma_p^2 + \gamma_s^2)^{1/2} = \epsilon_1 - \epsilon_2 \\ \tau_m/\sigma_m &= (\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_1 + \sigma_2) = \sin \phi_m \end{aligned}$$

Equ.1

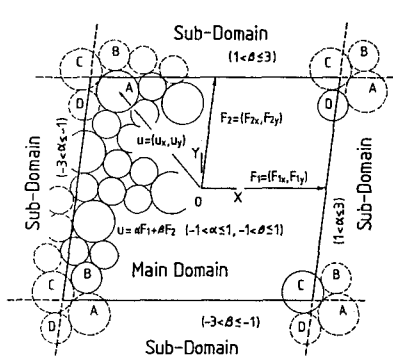


Fig.2

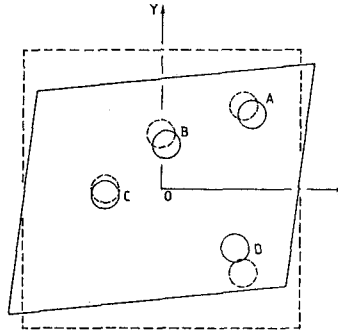


Fig.3

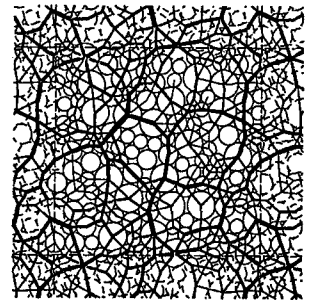


Fig.4

3. シミュレーション条件 シミュレーションのために準備した円盤要素集合体は、円盤要素を広い領域にランダムに配置した後、 $\sigma_m = 2 \times 10^4 \text{ dyn/cm}^2$ になるまで領域を圧縮している。このときの、粒子集合状態と接点力の伝達状態を図4に示している¹⁾。このときの間隙比は0.166とかなり密な状態にあるので、初期状態において力を伝達していない粒子の直径を小さくすることによって、間

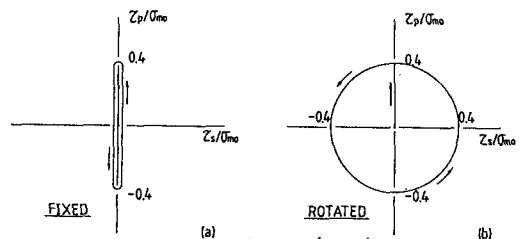


Fig.5(a-b)

隙比 e_0 が 0.333 の大きい状態も作り出している。このような集合体に排水あるいは非排水条件で図 5 (a), (b) に示す 2 タイプの繰返し応力を周期 7.2 秒振幅、 $\tau_m = 8 \times 10^3 \text{ dyn/cm}^2$ のサイン波形で 10 回与えている。シミュレーションを行ったケースを表 1 に示している。

Table 1

隙隙比 e_0	繰返し荷重	
	主応力軸固定 (Fixed)	主応力軸回転 (Rotated)
0.166	○	○
0.333	◎	○

○:排水, ◎:排水、非排水

4. シミュレーション結果 図 6 (a), (b) には非排水条件で主応力軸固定載荷した場合の応力・ひずみ関係を示している。隙隙比が小さいケースでは平均主応力 σ_m の減少が見られず、応力・ひずみ関係は周期的に変化しているだけである。隙隙比が大きいと σ_m の減少は顕著になり、応力が零となる初期液化化が達成されている。その後は、せん断変形量が大きくサイクリックビロリティー現象がみられる。円盤要素は最初ランダムに配置し等方的に圧縮しているが、要素数が十分に大きくないので構造は全体として異方的になっているため¹⁾、せん断変形は負の γ_p 方向に偏っている。

図 7 には排水を許して載荷した場合を示しているが、このケースでは σ_m を一定に保つために面積の変化を許しているため、図示のような面積ひずみ ε_{ar} の変化が観測されている。隙隙比は図 6 (b) のケースと同じであるが σ_m の減少が無いので、せん断ひずみ振幅は半分程度である。

図 8 (a), (b) は非排水条件で主応力軸の回転を受けたときの応力・ひずみ関係を示している。隙隙比が小さいケースでは、平均主応力 σ_m が上昇している。発生するひずみ量も小さく液化化に向かう傾向は見られない。一方、隙隙比が大きくなると σ_m の減少は著しく、主応力軸固定の場合（図 6 (b)）のように初期液化化には至っていないが、同等あるいはそれ以上のせん断ひずみの発生が認められる。

5. まとめ 以上示したシミュレーション結果が示すように、開発したシミュレーション手法は、砂などの粒状体が繰返し応力を受けたときに示す液化化現象をリアルにシミュレートできることが分かった。

【参考文献】

- 1) 三浦, 土岐, 上野 (1989): 第 24 回土質工学研究発表会
- 2) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979): Geotech. Vol. 29, No. 1.
- 3) Kishino, Y. (1988): Micromechanics and Granular Materials, Elsevier.
- 4) 岩崎, 澤田, プラザン (1988): 土の非排水繰返し試験に関するシミュレーション。

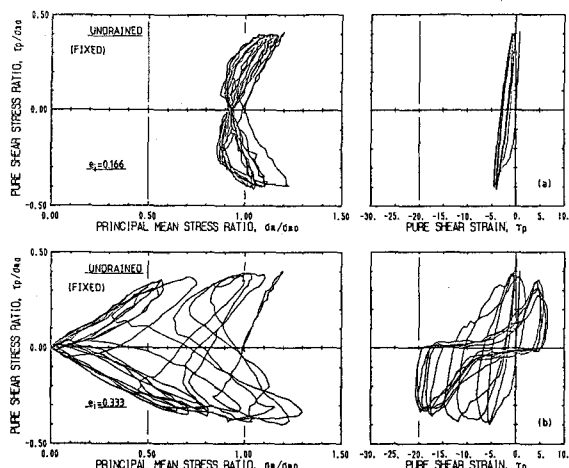


Fig. 6(a-b)

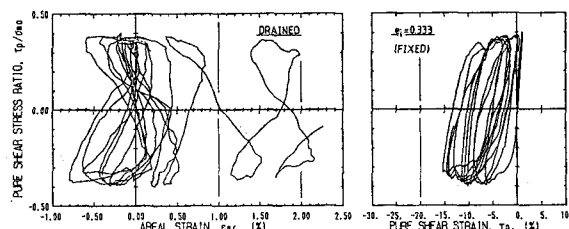


Fig. 7

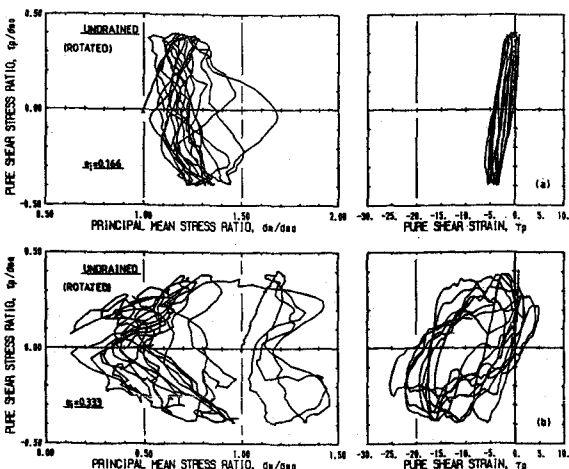


Fig. 8(a-b)