

III-224 サイクリックモビリティ現象の個別要素法解析

宇都宮大学工学部 正会員 上野 勝利  
 北海道大学工学部 正会員 三浦 均也  
 同 正会員 土岐 祥介

1. はじめに 非排水繰返しせん断変形を受ける中密な飽和砂に見られるサイクリックモビリティ現象<sup>1)</sup>の個別要素法によるシミュレーションを行った。用いた解析手法はCundall & Strack(1979)<sup>2)</sup>が提唱した個別要素法を参考に、粒状体のせん断変形を適切にシミュレートするために筆者らが開発したもので、周期的な平行四辺形の境界によって粒状体マシンの変形を制御することによって、真の等面積条件を保ち任意の応力・変形状態を粒状体マシんに与えることが可能である<sup>3)4)</sup>。解析手法の数式的な扱いは文献3)に詳しい。本報告では、サイクリックモビリティ現象をしめす粒状体の剛性と、円盤要素の接触状態の変化特性をしめしている。

2. 用いたパラメータの定義 粒状体マシンの応力、接触状態および剛性は、式1にしめすテンソル式によって定義される。ここで、 $\sigma_{ij}$ ; 応力テンソル,  $C_{ij}$ ; コアネーションテンソル,  $G_{ijkl}$ ; 剛性テンソル,  $n_i, t_i$ ; 接触面の法線、接線方向ベクトル,  $f_i$ ; 接点力ベクトル,  $k_n, k_t$ ; 法線方向、接線方向のばね定数,  $A$ ; 周期的な境界に囲まれた領域の面積,  $r$ ; 円盤要素の半径,  $N, n_c$ ; 全円盤要素数と1要素あたりの接点数である。粒状体の変形を図1と式2に示す等方変形と、主軸の方向が互いに45°異なる純粋せん断・単純せん断変形の3つのモードによって表現すると便利である。この時の各々の変形モードに対応する接触状態と剛性のパラメータを式4に示す。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{1}{A} \sum \sum r n_i f_j \\ C_{ij} &= \frac{1}{\sum \sum n_c} \sum \sum n_i n_j \\ G_{ijkl} &= \frac{1}{A} \sum \sum r^2 n_i n_k \{ (n_j k_n) n_l + (t_j k_t) t_l \} \end{aligned} \quad \text{式-1}$$

3. 解析条件 用いた粒状体マシンは、表1に示す特性を持つ、半径の異なる3種の円盤要素から構成されている。円盤要素を解析領域の4倍の範囲にランダムに配置し、 $\sigma_{mo}=20000(\text{dyn/cm}^2)$ となるまで等方に圧縮し初期間隙比 $e_o=0.166$ のマシンを作成した。そして接点力の作用していない全円盤要素の半径を一律に縮小することによって初期間隙比を調整し、 $e_o = 0.190 \sim 0.240$ の粒状体マシンを得ている。図2(a,b)は、初期の $e_o=0.166, 0.220$ の粒状体マシンの接点力の状態を示している。その後、解析領域の面積を一定に保ち( $\varepsilon_{ar}=0$ )、応力制御で振幅 $8000(\text{dyn/cm}^2)$ 、周期 $7.20(\text{sec})$ の正弦波のせん断応力を10サイクルの荷重した。解析は純粋せん断応力を与えるP-cyclicテストと単純せん断応力を与えるS-cyclicテストの2種を行っている。

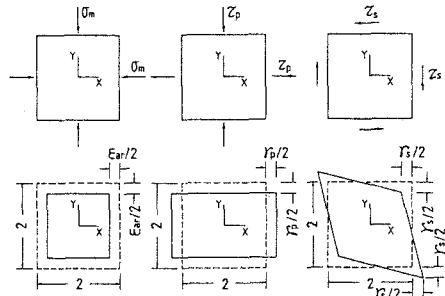


図-1

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2}, & \Delta \epsilon_{ar} &= \Delta \epsilon_y + \Delta \epsilon_x \\ \tau_p &= \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}, & \Delta \gamma_p &= \Delta \epsilon_y - \Delta \epsilon_x \\ \tau_s &= \tau_{yx}, & \Delta \gamma_s &= \Delta \gamma_{yx} \end{aligned} \quad \text{式-2}$$

4. 解析結果

図3に $e_o=0.220$ マシンのP-cyclicテストから得られた応力経路と応力ひずみ関係を示す。4サイクル以降では、粒状体の剛性が荷重と共に消失・回復するサイクリックモビリティ現象がみられ、本解析手法は拘束流れ変形を適切にシミュレートしている。図4(a,b,c,d)は各々の初期間隙比 $e_o$ に対する7~10サイクル間に見られた $(u/\sigma_{mo})_{max}$ と、円盤要素の平均線速度の最大値 $(|V_{ave})_{max}$ 、各

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{C_y + C_x}{2}, & G_m &= \frac{G_{xxxx} + G_{yyyy} + 2G_{xyxy}}{4} \\ C_p &= \frac{C_y - C_x}{2}, & G_p &= \frac{G_{xxxx} + G_{yyyy} - 2G_{xyxy}}{4} \\ C_s &= C_{yz}, & G_s &= \frac{G_{xyyz} + G_{yyxz}}{2} \end{aligned} \quad \text{式-3}$$

表-1

radius, $r$ , (cm)	1.000	0.707	0.500
the number of discs	20	40	80
specific gravity	2.00		
spring coeff. in normal, $k_n$	$1.0 \times 10^7 \text{ dyn/cm}$		
damping ratio in normal, $\eta_n$	0.7		
spring coeff. in tangential, $k_t$	$0.5 \times 10^7 \text{ dyn/cm}$		
damping ratio in tangential, $\eta_t$	0.7		
coeff. of friction, $\tan \phi_\mu$	0.5		

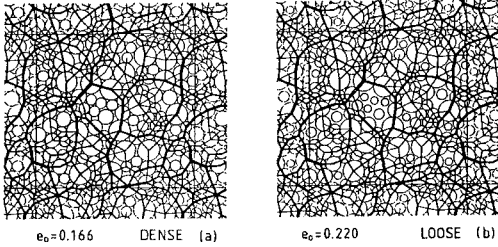


図-2(a, b)

変形モードの正規化剛性 $G_p/\sigma_{mo}$ 、 $G_s/\sigma_{mo}$ の最大・最小値を整理したものである。 $e_0$ が0.220以上では $(u/\sigma_{mo})_{max}$ はほぼ1に近い値となっている。また、 $e_0=0.20$ を境にして載荷応力と変形モードの同一なせん断剛性はほぼ0となっており、剛性の一時的な消失とその後の回復を伴うサイクリックレバティ現象が見られた。一方、載荷応力とモードの異なるせん断剛性は有効拘束圧と接点数の増減に伴い変動するが、ある程度の値を保持していた。

$e_0=0.220$ のP-cyclicテストでの接触状態の変化を図5に示す。接点数を表す $C_m$ は、せん断応力の方向が反転する際にほぼ1程度まで減少し、再載荷と共に再び回復している。また $C_p$ の値は載荷応力に応じて大きく変化している。一方、 $C_s$ の値は7サイクル以降においてもほとんど変化していない。図示しないがS-cyclicテストでは $C_s$ が大きく変化し $C_p$ はほぼ一定であった。以上のようにサイクリックレバティ時においても載荷応力と主軸の方向が $45^\circ$ 異なるモードの剛性と接触状態はさほど変化せず、純粋せん断変形と単純せん断変形は互いに独立に扱えようである。

【参考文献】

- 1)Castro, G. (1974): Jour. of ASCE, Vol. 101, GT6, pp. 551-569.
- 2)Cundall, P.A. & Strack, O.D.L. (1974): Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
- 3)三浦、土岐、上野(1989):第24回土質工学研究発表会, pp. 467-470.
- 4)三浦、上野、土岐(1989):土木学会第44回年次学術講演会, pp. 504-505.

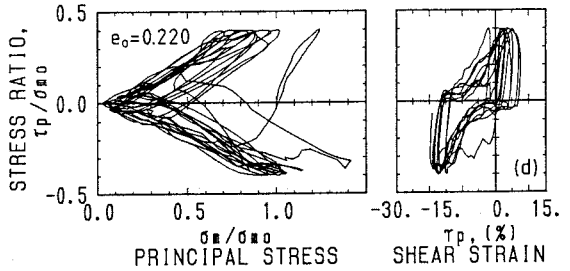


図-3

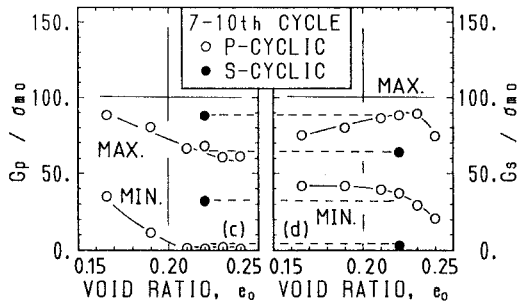
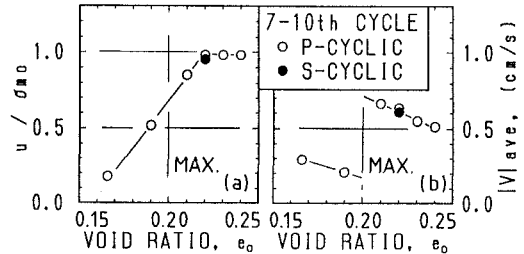


図-4(a, b, c, d)

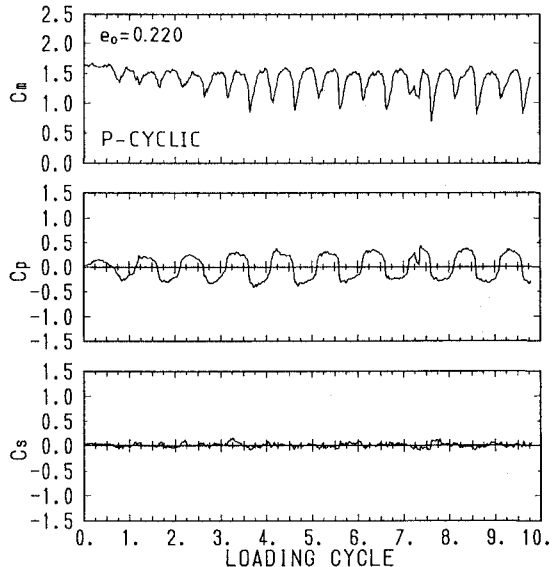


図-5