

東北大学工学部 学生員〇佐藤 春浩  
 同上 正員 佐武 正雄  
 同上 正員 岸野 佑次

1. まえがき 近年、粒状体力学の微視的なアプローチとして、粒子レベルのモデル実験や解析がたく行われるようになってきた。例えば、粒状体2次元モデルの光弾性実験は、粒状体の変形機構を考察する上で有用なものである<sup>1)</sup>。また、カンドールモデルによるシミュレーション解析は実験に代るものとしてしばしば用いられている。計算機によるシミュレーション解析は、例えば、間隙水圧を考慮することや、載荷の際の応力経路を自由に選ぶことが可能なことなど、構成式を微視的な立場から考察する上で非常に有用なものであると考えられる。ところで、カンドールモデルにおいては、運動方程式における粘性定数を定める必要があることや時間のファクターが解析結果に影響を与えることなどの難点があるものと考えられる。着者は静的な変形を生じる粒状体モデルに対する新しいシミュレーション解析を応用して液状化解析を試みた。本文はこの解析の概要と考察について述べたものである。

2. 液状化のシミュレーション解析の概要 本解析で用いた解析法的基本的なアルゴリズムについては参考文献3に記述しているのでここでは省略する。間隙水圧を考慮するためには以下のような方法を用いれば良い。いま、図-1に示すような領域に応力 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ が作用している状態での釣合いを考える。初期状態での間隙水圧を $0$ とし、このときの体積を $V_0$ とする。初期状態からの体積減少量を $\Delta V$ とすれば、間隙水圧は  $p_w = k \Delta V / V_0 \dots (1)$  ( $k$ は水の体積弾性係数)で表わされる。また、境界に接している粒子の接触力法線方向成分を $P_n$ とおけば、逐次計算のある段階における各境界A, B, Cの応力は、 $P_n$ および $P_n$ より以下のように計算される。

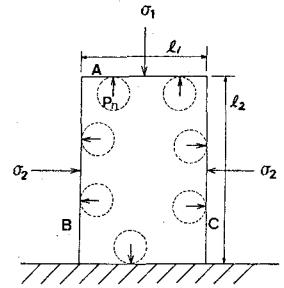


図-1 境界に作用する応力

$$t_A = \frac{1}{l_1} (\sum P_n)_A + P_w, \quad t_B = \frac{1}{l_2} (\sum P_n)_B + P_w, \quad t_C = \frac{1}{l_2} (\sum P_n)_C + P_w \dots (2)$$

従って、釣合状態を見出すためには、境界A, B, Cをそれぞれ応力の不釣合分  $\sigma_1 - t_A$ ,  $\sigma_2 - t_B$ ,  $\sigma_2 - t_C$  に応じて動かせば良いことになる。

液状化の解析を行うに当たっては、まず排水状態で所定の等方圧力を作用させ圧密を起す必要がある。このためには、②式の $P_n$ を $0$ 、境界応力を $\sigma_1 = \sigma_2$ として載荷を行えば良い。このようにして得られた状態を間隙水圧 $0$ の飽和状態と見て、繰返し載荷の初期状態とする。以後、載荷は非排水条件、応力制御で行い、一定の応力振幅( $\sigma_a$ )で両振りの二軸圧縮伸張を繰返す。その際、平均応力 $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ は一定に保ち、 $\sigma_1$ と $\sigma_2$ には、位相差 $90^\circ$ の応力増分を与えることとする。なお、本文の解析例においては、逐次計算の各応力段階における収束を、不釣合解消のための粒子移動量により判定して計算を進めた。

3. 結果及び考察 上記の方法により、図-4, 図-5に示すような2種類の配列について解析を行った例について記す。解析に用いた定数は表-1の通りである。水の体積弾性率は計算の都合上小さめにとっている。図-2の(a), (b)はそれぞれ、No.1, No.2の有効応力経路を示したものである。横軸は平均主応力  $P = (\sigma_1' + \sigma_2')/2$ , 縦軸は軸差応力  $q = \sigma_1' - \sigma_2'$ を表している。No.1では各サイクルごとに有効応力の減少がみられ、

表-1 解析に用いた定数

	No.1	No.2
法線方向ばね定数 $k_n$ (dyn/cm <sup>2</sup> )		$1.0 \times 10^7$
接線方向ばね定数 $k_t$ (dyn/cm <sup>2</sup> )		$3.0 \times 10^6$
粒子間摩擦角 $\psi$	$15^\circ$	$5^\circ$
壁面摩擦角 $\psi'$		$5^\circ$
粒子密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		1.5
初期拘束圧 $\sigma_1'$ (dyn/cm <sup>2</sup> )		$1.0 \times 10^5$
初期間隙比 $e_0$	0.35	0.33
応力振幅 $\sigma_a$ (dyn/cm <sup>2</sup> )	$2.8 \times 10^4$	$4.5 \times 10^4$
水体積弾性係数 $k$ (dyn/cm <sup>2</sup> )		$2.35 \times 10^6$

5 サイクルめで初期拘束圧の40%に低下しているが、No.2ではわずか1サイクルで初期拘束圧の30%に低下しているのがわかる。図2(a)では矢印をつけた部分で急激な有効応力の減少がみられるが、この原因としては粒子の個数が少いために、粒子のわずかな動きが有効応力の変化に非常に大きく左右するためであると考えられる。図2(b)では、応力振幅が大きいため、最初の1サイクルで有効応力が大きく減少したと考えられる。No.1の配列については、異なる応力振幅の場合についても解析を行った。応力振幅が小さい場合には1サイクルめで有効応力の減少がみられたが、2サイクル以後は、有効

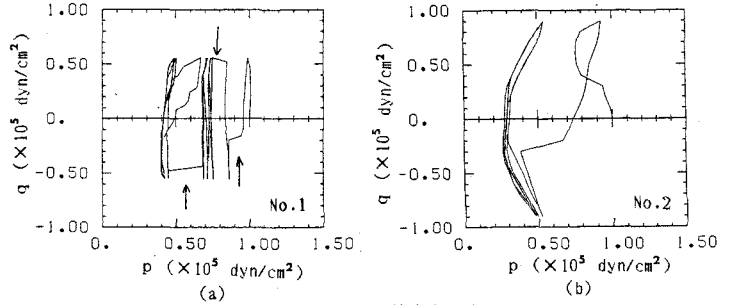


図-2 有効応力経路

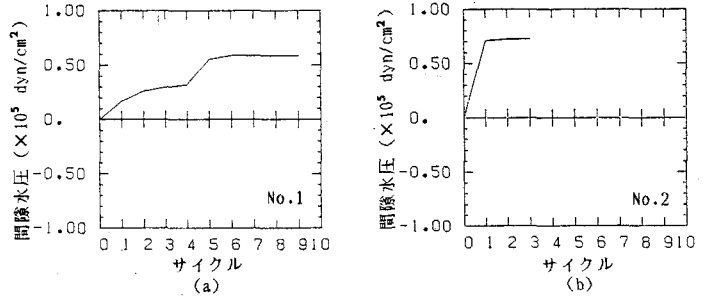


図-3 間隙水圧

応力の減少はみられなかった。応力振幅が大きい場合には、1サイクルめの鉛直応力が最大となる付近でやや大きな有効応力の減少がみられたが、それ以後の減少はみられなかった。後者の原因としては、1サイクルめの変形により、粒子配列の安定な状態が大きく変化したことが考えられる。図-3は各サイクルにおける間隙水圧をプロットしたものである。これらの図は、上述の有効応力の変化に対応した間隙水圧の変化を良く表している。図-4、図-5に、No.1、No.2の初期状態(a)及び典型的な変形状態(b)における粒子の位置と粒子間力の分布を示す。両ケースともに(a)よりも(b)のほうが粒子間力が全体的に小さく、有効応力が小さいことに対応している。

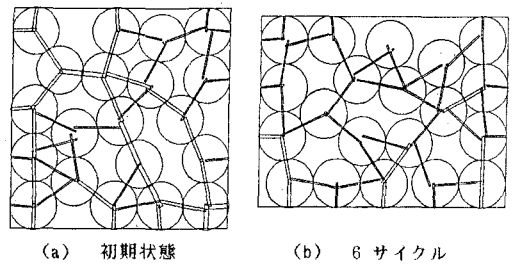


図-4 接触力の分布 (No.1)

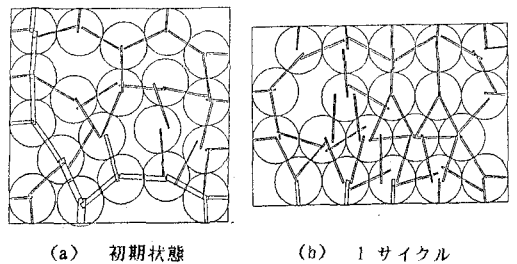


図-5 接触力の分布 (No.2)

4. あとがき 以上、新しい粒状体のシミュレーション解析法を液状化の解析に適用した例を示した。ここに記した例は粒子数も少なく、充分なものではないが、間隙水圧の発生をシミュレートすることが可能であることを示すことができた。

本解析方法は、同一の試料について複数の応力経路の載荷シミュレーションが可能であり、今後、粒子数を増やすことなどにより、粒状体の構成式を考察する上で、有用な情報を提供することが期待される。

参考文献

- 1) 石塚, 佐武, 新関: 光弾性実験による粒状体の単純せん断変形機構の解析, 第25回年譜概要集 III (1980), 33-34
- 2) P. A. Cundall & O. D. L. STRACK: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29, No. 1 (1979), 47-65
- 3) 廖, 佐武, 岸野: 新しい粒状体解析モデルによるシミュレーションの考察, 昭和60年度東北支部発表会概要集 (1986)