Ⅲ－7　シミュレーションによる主軸回転を受ける粒状体の液状化解析

東北大学大学院　学生員　○土倉　泰
東北大学工学部　正　員　佐武正雄
東北大学工学部　正　員　岸野佑次

1．まえがき：本研究は主応力方向の回転時の液状化現象を微視的に考察するために，シミュレーションを用いて，主応力値を一定として主応力方向を繰り返し回転させた場合の粒状体の非排水条件下での挙動を解析したものである．本文においては，主ひずみ，主ひずみ増分，構造の主軸の3者の方向と，主応力方向，主応力増分方向との関連を中心に調べた結果を示す．

2．解析方法：ここでは2次元のモデルを考える．解析する粒状体モデルはその境界に粒子を楕円状に配置したものである．図-1に破線で示すのが領域の境界で，太い線で描いた粒子が境界に配置した粒子である．図中，粒子間に描く矩形には接触力の大きさに比例した幅と接触2粒子の半径の和に等しい長さを与えている．シミュレーションは，所定の応力状態を満たすように境界を動かすことにより失われる所の，接触力と鉛直方向（y方向）下向きに作用する重力とによる各内部粒子の力の釣り合い状態を逐次計算により求めていくものである．詳細については文献[1)]を参照されたい．本解析では非排水状態を想定し，水の体積弾性係数k_wを用いて間隙水圧p_wを(1)式で算定する．

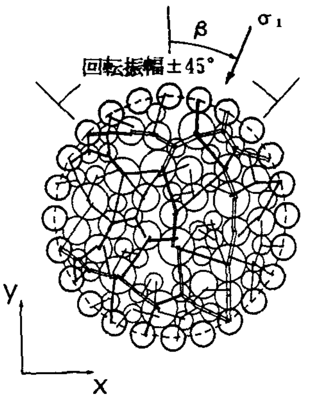

図-1解析する粒状体モデル

$$p_w = k_w \frac{\triangle V}{V_0} \tag{1}$$

$\triangle V$：水部分の面積変化，V_0：初期の水部分の面積

境界は(2)式に基いて算定される変位勾配テンソル$\triangle e_{ij}$によって均等に動かす[2)]．ただし，$\triangle e_{ij}$は反対称成分を含まないものとする．

$$\triangle \sigma_{ij} = K_{ijkl} \triangle e_{kl} \tag{2}$$

$$K_{ijkl} = \frac{1}{A} \Sigma_B \; x_i \; k_{jk} x_l + k_w \frac{V}{V_0} \; \delta_{ij} \delta_{kl} \tag{3}$$

V：水部分の面積，A：粒状体領域の面積
k_{ij}：着目している境界粒子の剛性行列
δ_{ij}：Kronecker のデルタ，Σ_B：境界粒子についての和

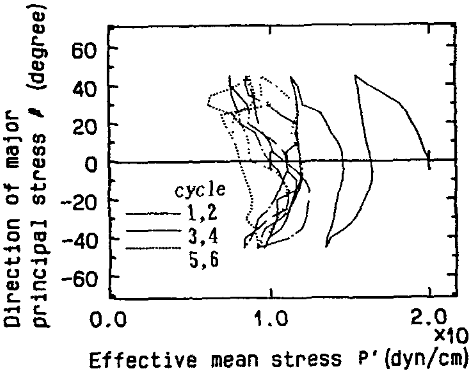

図-2　σ_1の方向と有効応力の関係

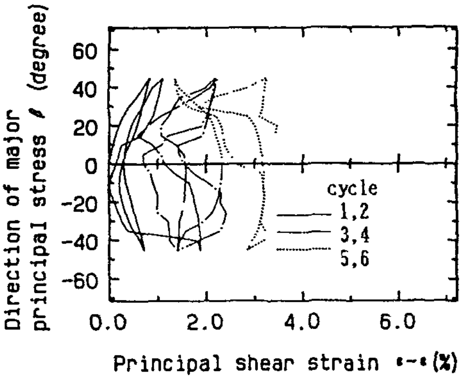

図-3　σ_1の方向と主せん断ひずみの関係

解析に用いる定数は粒子の単位体積重量1.6g/cm²，粒子間バネ定数k_n, k_t= 1.2×10⁸，8.0×10⁷dyn/cm，粒子間摩擦角25°，水の体積弾性係数k_w= 1.0 ×10¹⁰dyn/cm² である．粒子直径は6,9,12mm（面積比1:1:1）で内部粒子数61，境界粒子を合わせると85である．まず等方圧状態(2.0×10⁵dyn/cm)のモデルを排水条件で最大主応力方向を鉛直方向とし主応力差6.0×10⁴ dyn/cmまで拘束圧一定でせん断してこれを初期状態とする．図-1は初期状態で間隙比0.30である．次に非排

水条件のもと主応力値を一定に保ったまま主応力の方向を 5° ずつ回転し鉛直方向を中心に振幅角度を45° とした両振りの繰り返し回転を行う.

3．解析結果とその考察：

3－1．有効応力とひずみ 図-2, 図-3に σ_1 の方向と平均有効応力, せん断ひずみとの関係を示す. 主応力方向の回転により有効応力P' が減少し, 主せん断ひずみが増大している. P' がある程度減少すると応力円は破壊包絡線に接しそれ以上のP' の減少は起こらずに, 主せん断ひずみが増大する.

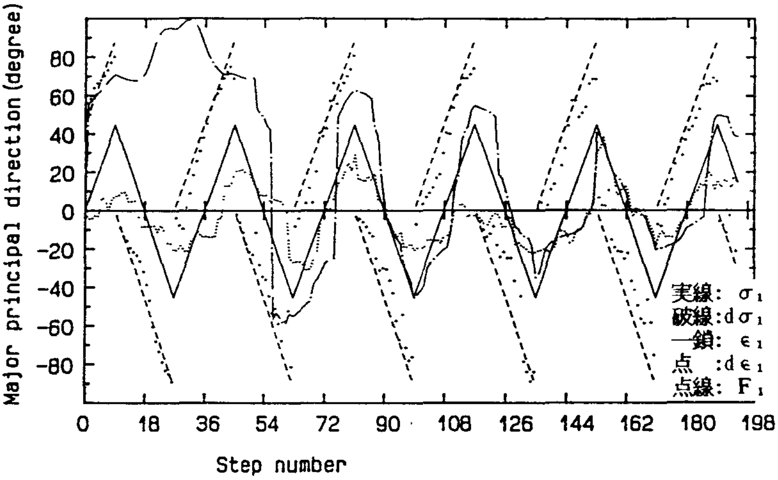

図-4 ステップと各種の主値の方向

3－2．各種主値の方向：図-4は解析のステップと, 図-1の σ_1 に関するβと同様に鉛直軸からのずれ角として表した各種主値の方向との関係を示す. 実線は σ_1 の方向, 破線が $d\sigma_1$ の方向で, 回転の向きの反転時に $d\sigma_1$ の方向は95° の急激な変化を示すことになる. 一点鎖線で示す ϵ_1 の方向は最終的に σ_1 の方向に一致して変化するようになる. この状態を液状化といえよう. 図中に点で示すのは $d\epsilon_1$ の方向である. $d\epsilon_1$ の方向はσ_1 の方向と一致せず, $d\sigma_1$ の方向に偏っている. すなわち共軸性は成り立っていない. 図-5には $d\epsilon_1$ とσ_1 との方向の差を示す. 松岡ら[3] は主応力方向の連続的回転時にこの差が30° になることを報告しているが, 回転方向の反転を含む本解析においてもおおよそその程度の差となる.

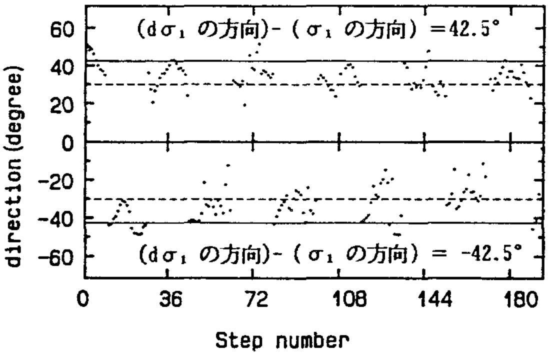

図-5 ステップ～ ($d\epsilon_1$ の方向)-(σ_1 の方向)

3－3．構造の主軸方向の変化：本解析では円形粒子を用いているが, 重力の影響と予め加えた鉛直方向へのせん断履歴によって構造が若干の方向性を持っている. そこで (4)式のファブリックテンソルF_{ij}からその最大主値F_1 の方向を調べた.

$$F_{ij}=\frac{1}{N}\Sigma_G(\Sigma_C\ n_i\ n_j) \quad (4)$$

Σ_G ：粒子についての和
Σ_C ：各粒子の接触点についての和
n_i ：接触点の単位法線ベクトル
N ：領域内の粒子数

図-6の点線がF_1 の方向を示しているが, 徐々にσ_1 の方向に一致していく傾向にある. また間隙圧の上昇の顕著な1,2cycleにおいてF_1 の方向がσ_1 の方向に追随するように変化していくのが特徴的である.

4．あとがき：解析結果の有効応力やひずみの大きさの図において, 曲線が滑らかになっていないのは解析の対象としたモデルの粒子数が少ないためと考えられる. その点も含め今後詳細な検討を加えたい.

参考文献
1)岸野：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, 土木学会論文報告集 (投稿中)
2)荒木, 佐武, 岸野(1987): 任意方向荷重を受ける粒状体モデルのシミュレーション解析, 土木学会年次講演会, pp.256-257
3)松岡, 榊原(1987):A Constitutive Model for Sands and Clays Evaluating Principal Stress Rotation, Soils and Foundations,Vol.27,No.4,pp.73-88