

定体積下で繰り返し载荷を受ける粒状体の微視的構造変化の研究

埼玉大学大学院理工学研究科 学生 一場 勝幸
 埼玉大学工学部建設工学科 正会員 岩下 和義

はじめに

地震時に生じる砂地盤の液状化現象は構造物に多大な被害を及ぼすため、数多くの研究が行われている。液状化現象は土粒子のもつ粒状体としての性質により説明されているが、その微視的構造変化ははまだ十分に解明されているとは言えない。近年、粒状体の微視的構造を観察するために個別要素法 (DEM) が適用されている。Iwashita & Oda (2000)は、粒子接触点で接触力だけでなくモーメントも伝達される修正個別要素法(MDEM)により平面ひずみ圧縮試験の数値実験を行い粒状体に生じるせん断破壊の微視的変形メカニズムを調べ、ひずみ硬化時に最大主応力軸方向とほぼ平行に粒子が数珠つなぎに連なり応力を伝える‘柱構造’が形成されその間の間隙も同時に発達し微視的構造が異方化していくことを報告している。液状化の際にも柱構造と間隙の形成・変形が重要な役割を持つ可能性がある。本研究は MDEM を用いて定体積下での繰り返し荷重载荷試験を行い、粒状体が液状化する際に生じる微視的構造の変化を調べることを目的とする。

方法

供試体は円柱要素 15840 個 (半径 4,5,6mm の円柱を個数比 1:1:1 で混合) の集合体の四方を剛体壁で囲い、拘束圧 P_0 で等方圧密により間隙比 $e=0.232, 0.235$ の 2 種を作成した。要素間モーメントを制御するパラメータにより供試体の強度を設定する。上下拘束板に応力振幅 ΔP_0 を与え図 1 に示す境界条件で定体積を満たしながら繰り返し载荷試験を行った。载荷に従い粒子から側方の壁にかかる圧力 (側圧 σ_r) は P_0 から減少するので、変化分 $P_0 - \sigma_r$ を過剰間隙水圧 u_w とみなす。表 1 に解析に使用したパラメータを示す。

試験

図 2 に载荷中の過剰間隙水圧 u_w の変化と有効応力経路の 1 例を示す。载荷により過剰間隙水圧が発生し、有効応力が失われる液

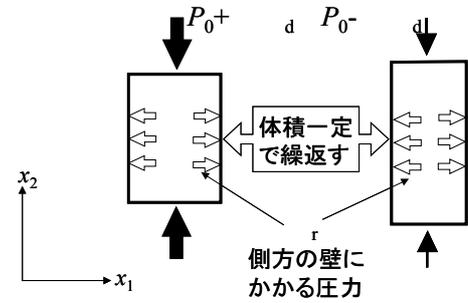


図 1 境界条件

表 1 数値計算パラメータ

| パラメータの種類 | パラメータの値 |
|---------------------------------|----------------------------------|
| 粒子数 | 15840 |
| 粒子の半径 | 4,5,6mm |
| 時間増分 (Δt) | 1.00×10^{-5} 秒 |
| 初期拘束圧 (P_0) | 1.32×10^5 Pa |
| 粒子間動摩擦係数 (q_d) | 0.488 |
| 壁・粒子間動摩擦係数 (wq_d) | 0.0 |
| 粘着力 (C) | 0.0 |
| 法線方向バネ定数 (k_n) | 1.00×10^8 N/m |
| 接線方向バネ定数 (k_s) | 1.00×10^7 N/m |
| ダッシュボットの係数 | 0.05 N sec/m |
| 接点での回転バネ定数 (k_r) | 7.00×10^2 Nm/rad |
| 接点での回転ダッシュボット定数 | 1.00×10^{-2} Nm sec/rad |
| 壁の x_2 軸方向変位量 ($zdsp$) | 5.00×10^{-5} m |
| 壁の変位の時刻間隔 ($nwall$) | 1:100 ステップ |
| 間隙比 (e) | 0.232 |
| 要素間モーメントのパラメータ | 2.5 |
| 繰り返し応力比 ($\Delta P_0 / 2P_0$) | 0.227 |

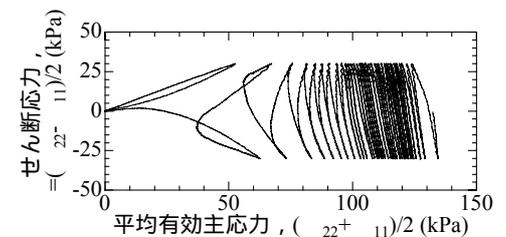
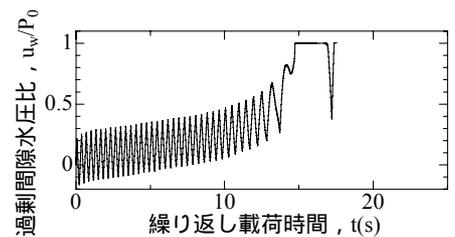


図 2 試験結果 (密詰め供試体)

キーワード：液状化、DEM、要素間モーメント、微視的構造

連絡先：埼玉大学大学院理工学研究科建設工学専攻振動研究室 Tel 048-858-3430

状化現象が再現されている。間隙比や ρ を変えた数値実験の結果、供試体の密度が高く密なほど液状化抵抗が大きくなり、さらに密な供試体の場合には载荷中にせん断強度が回復するサイクリックモビリティもあらわれ、本研究の手法で液状化現象を定性的に再現できることが確認された。以降図2の解析結果について構造の変化を調べるが、これ以外にもパラメータを変えた数値実験においても同様の結果が得られる。

図3に液状化直前の軸圧縮と軸伸張時の初期拘束圧 P_0 以上の圧縮応力を受ける粒子の分布を示す。それ以下の応力の粒子は表示していない。繰り返し载荷においてもそれぞれの最大主応力方向に粒子の柱構造が形成されることが確かめられた。

図4に微視的構造の異方性の発達を示す。構造の異方性を示す尺度としてファブリックテンソル F_{ij} (佐武 1982) の偏差成分の第二不変量 $\sqrt{2J_2}$ を用い、接触法線方向分布図とともに示した。载荷ごとの構造の変化はごく少ないが、载荷とともに少しずつ異方性が発達し、最大主応力方向を向く接触法線が増えている。

図5に繰り返し载荷による供試体全体での総接触点数の変化と、各载荷時における供試体の平均有効応力の3倍に相当する力より高い接触力が働く接触点数の変化を示す。間隙水圧の上昇に伴い総接触点数は減少し相対的に緩くなっていくが、高接触力の接触点数は増加しており、大きな接触力が作用する接触点は増えるが、それ以外の接触点は減っている。

考察

以上より微視的構造の変化として次のことが考えられる。载荷の最大主応力軸方向に柱構造が形成され、繰り返し载荷とともにそれを構成する強い接触点は増え、微視的構造の異方性が増していく。同時に弱い接触点は失われて、柱構造に囲まれた粒子：力の働かない隙間粒子が増え、一部の粒子のみが柱構造を形成し柱構造からなる網目状の微視的構造が荷重を支えるという不均質な構造になっていく。粒子の柱構造はその方向の荷重を支えるのには有効であるが、非常に異方的な構造であり、主応力軸方向が変わると不安定になりやすい。異方性が伸展するにつれ柱構造は弱体化し、载荷に伴い有効応力が減少することも柱構造の強度を低下させる。ついに载荷の反転の際に柱構造が崩壊し液状化に至る。

参考文献

- 1) Iwashita K. and Oda M., Rotational resistance at contacts in the shear banding process based on modified distinct element method, Power Technology, Vol.109, pp. 192-205, 2000.
- 2) Satake M., Fabric tensor in granular materials, IUTAM Symp. on Deformation and Failure of Granular Materials, eds: P.A. Vermeer & H.J.Luger, pp. 63-68, Balkema, 1982.

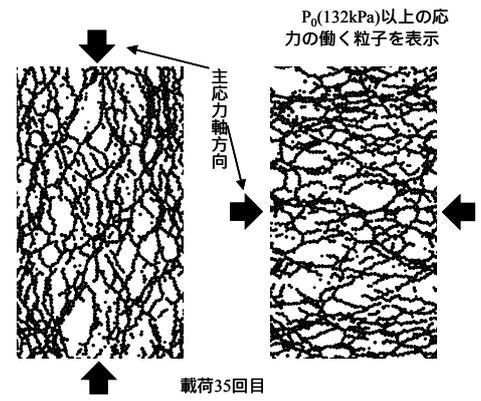


図3 载荷1回あたりの構造の変化

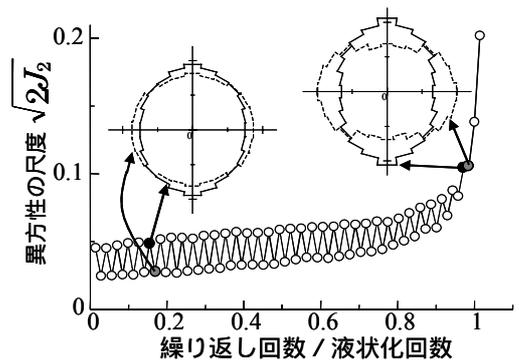


図4 異方性の発達

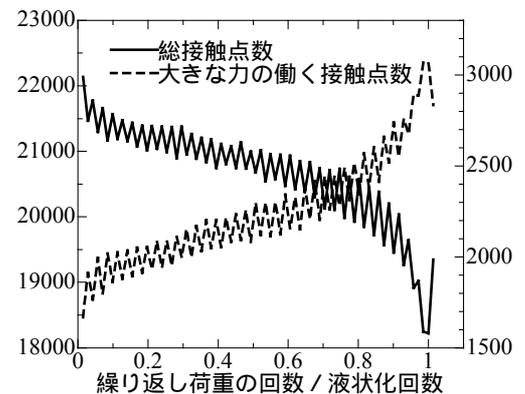


図5 接触点数の変化