

## 非排水繰返し载荷時における砂の力学挙動の数値解析

名古屋工業大学大学院 学生会員 陳 英彦  
 名古屋工業大学 正会員 張 鋒

## 1. はじめに

液状化を含んだ地震発生時の地盤と構造物の力学応答の把握・予測には数値計算が多く用いられている。本研究では地盤の数値計算の高精度に繋がる室内試験の結果に基づく構成パラメータの設定について検討する。これまで地盤の構成パラメータは、土が一樣に変形・破壊するとみなし、室内要素試験の結果を構成モデルの理論解と比較することにより設定されてきた。しかしながら、室内で実施する要素試験であっても、完全理想な物理条件下で土の供試体を載荷することは不可能であるため、不均一な変形・破壊の局所化を生じることが一般的である。そのため、要素試験における力学特性の不均一による地盤材料特性の評価（地盤材料パラメータの設定）への影響を検討する必要があると考えられる。これまで土供試体の不均一な変形・破壊挙動について静的・単調載荷試験による検討<sup>1)</sup>は行われてきたが、地震のような動的・繰返し載荷条件下ではほとんど議論されていない。

そこで本研究では、非排水繰返しせん断時の砂供試体の変形・破壊挙動の局所化に関する数値シミュレーションを実施し、不均一性の特性および発生原因の解明を試みると共に変形局所化が要素試験の精度に及ぼす影響および数値解析の有用性を検証する。また、本稿では供試体の不均一に影響を及ぼすと考えられる要因の内、拘束条件と載荷周波数の影響について述べる。

## 2. 解析条件

土の誘導異方性・密度・構造を統一的に考慮できる移動硬化型弾塑性モデル(Zhang et al, 2007<sup>2)</sup>)を導入したモデルと土・水連成境界値問題の支配方程式に基づくプログラム「DBLEAVES」(Ye et al, 2007<sup>3)</sup>)を用いて 3 次元の有限要素解析を行った。解析に動的三軸試験と同じ直径 5cm, 高さ 10cm の円柱形の要素数が異なるメッシュを 2 つ作製した(Fig.1)。

解析メッシュの境界はすべて非排水条件とする。荷重の載荷は供試体の上面の全点を z 軸方向に等変位境界と設定し、上面中央の一点に正弦波の荷重を 20 回繰返しすることで表現した(Fig.2)。初期状態は平均有効応力  $p^*=294\text{kPa}$  の等方応力とし、供試体内部は全域均質分布とした。載荷荷重は繰返しせん断応力比 0.15, 軸差応力 88.2kPa とし、1 ステップ当りの計算時間増分( $\Delta t$ )は 0.002sec とする。計算には従来の研究<sup>3)</sup>で設定した中密な豊浦砂を想定した材料パラ

メータ(Table1,2)を用いて解析を行った。

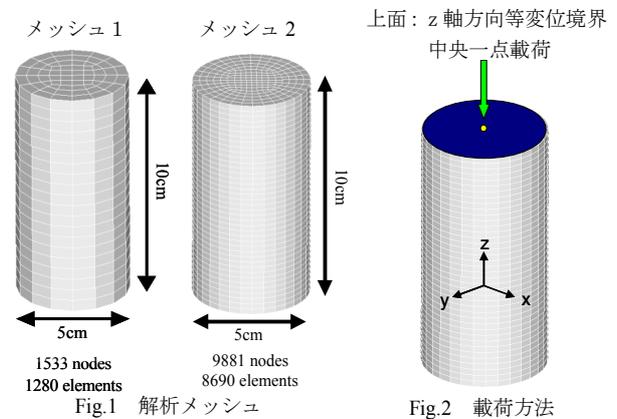


Table1 Material parameters

Compression index $\lambda$	0.05
Swelling index $\kappa$	0.0064
Critical state parameter $M$	1.3
Void ratio $N(p^*=98\text{kPa on N.C.L.})$	0.74
Poisson's ratio $\nu$	0.3
Degradation parameter of overconsolidation state $m$	0.1
Degradation parameter of structure $a$	2.2
Evolution parameter of anisotropy $b_s$	1.5

Table2 Initial conditions

Reference void ratio $e_r$	0.624
Reference mean effective stress $p_r^*$ (kPa)	294
Reference degree of structure $R_r^*$	0.8
Reference degree of overconsolidation $1/R_r$	5
Reference anisotropy $\zeta$	0

## 3. 数値解析結果

メッシュ 1 を用いて供試体の上・下端面と試験機との間に生じる摩擦を考慮した拘束条件の影響について検討する。Fig.3(a)は摩擦がない理想の状態を想定した解析結果であり、供試体中央に位置する要素の有効応力パスおよび応力-ひずみ関係を示している。このケースでは要素の位置に関係なくすべての要素において同様な結果を示しており、供試体は均一に挙動する。これに対して供試体の上・下端面を x, y 方向に完全固定とし摩擦を考慮すると要素の位置によって応力履歴は異なり不均一な挙動を示す(Fig.3(b), 他の要素の履歴は本稿では省略)。しかし、供試体中央部に位置する要素の平均値を用いて表してみると、応力-ひずみ関係は摩擦がない要素の結果に近づくことが分かる(Fig.3(c))。また、このような傾向は載荷終了時の体積ひずみの分布図(Fig.4)よりも確認できる。摩擦がないケース(Fig.4(a))では供試体内部が均一なひずみ分布を示しているのに対し、摩擦があるケース(Fig.4(b))では不均一な挙動がみられる。特に、上・下端面の境界付近に大きなひずみが発生している。また、細かいメッシュ(Fig.4(c))ではより解像度は高いが、荒いメッシュと同じ傾向を示す。従って、供試体と試験機の間が生じる摩擦を考慮すると、上・下端面付近は顕著な不均一性が見られるが、平均的な値から見るとさほど影響は大き

くないことが確認できた。

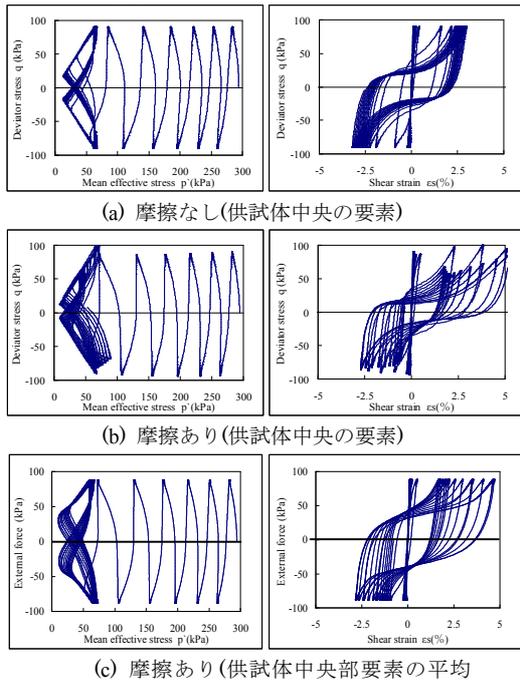


Fig.3 拘束条件の影響 ( $f=0.1\text{Hz}$ , メッシュ 1)

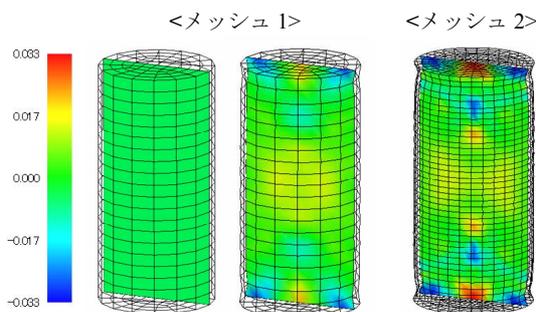


Fig.4 載荷終了時の体積ひずみ( $\epsilon_v$ )の分布図

続いて、載荷速度の影響について述べる。解析にはメッシュ 1 を用いた。供試体と試験機との摩擦があるとし、0.01Hz, 0.1Hz, 1.0Hz, 10.0Hz の 4 つの異なる載荷周波数の解析を行った。まず、0.1Hz の結果(Fig.3(b))と 1.0Hz の結果(Fig.5(b))を比較すると、1.0Hz の場合は有効応力経路がサイクリックモビリティに入った後、有効応力が原点に近づき完全液状化に至ることが分かる。そして応力-ひずみ関係をみると軸差応力  $q$  が徐々に減少している。これは周波数  $f$  が大きくなると加速度が増加し、間隙水の慣性力が大きくなるため、実際に供試体に作用する軸荷重が減少したと考えられる。また、同様な理由により、載荷速度が非常に速くなると発生するひずみの量が小さくなると共にさらに土骨格構造に作用する力が小さくなるため、サイクリックモビリティが生じないと考えられる(Fig.5(c))。また、載荷終了時の体積ひずみの分布図(メッシュ 2)より、載荷速度が非常に遅い 0.01Hz の結果(Fig.6(a))、大きなひずみが発生(Fig.5(a)でも確認できる)すると共に静的せん断試験で見られるようなせん断帯が鮮明に現れるが、

載荷速度が早くなるほど供試体に生じるひずみは小さくなる。

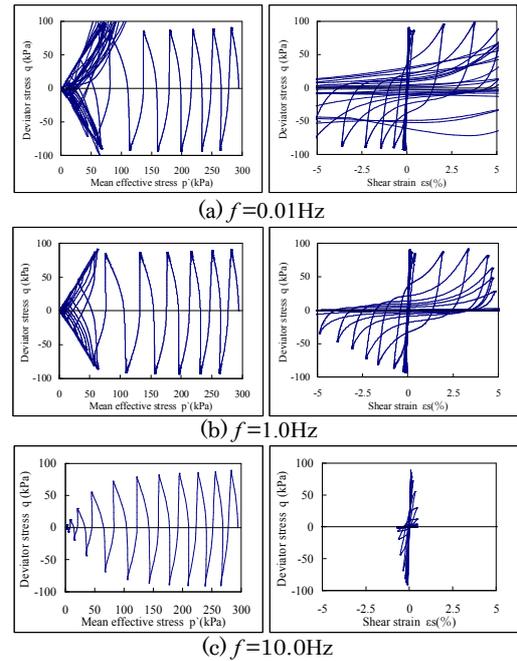


Fig.5 載荷速度の影響

(メッシュ 1, 摩擦考慮, 供試体中央の要素)

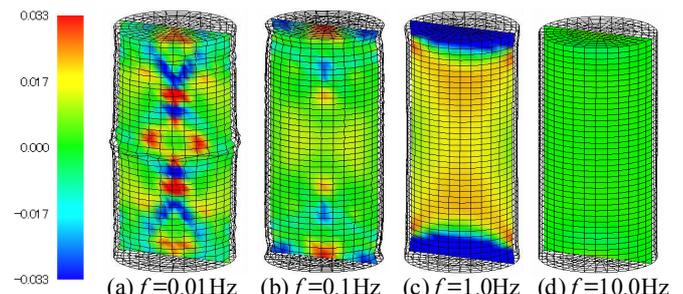


Fig.6 載荷終了時の体積ひずみ( $\epsilon_v$ )の分布図(メッシュ 2)

#### 4. まとめ

本研究では非排水繰返しせん断時の砂供試体の変形・破壊挙動の局所化に関する数値解析を実施した。実際の試験では排除できない供試体と試験機間に生じる摩擦の影響を考慮した結果、供試体内部に不均一な挙動が見られるが、供試体全体・平均値としてはその影響がさほど大きくないことが確認できた。また、試験では実施または計測が困難である高・低周波数での解析を行った結果、載荷速度が非常に遅くなると静的試験で見られる変形局所化によるせん断帯が現れた。

#### 参考文献

- 1) Higo, Y. (2003): Instability and Strain Localization Analysis of Water-Saturated Clay by Elasto-Viscoplastic Constitutive Models, 京都大学学位申請論文
- 2) Zhang et al. (2007): Explanation of cyclic mobility of soils: approach by stress-induced anisotropy, S&F, 47(4), 547-558
- 3) Ye Bin (2007): Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, 岐阜大学学位申請論文