

非排水繰返し载荷時における豊浦砂の力学挙動の数値シミュレーション

Numerical simulation of Toyoura sand subjected to cyclic load under undrained conventional triaxial test

山口健太郎¹, 陳英芝², 黒川正弘³, 笹岡大路¹, 張鋒⁴

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻

2 韓国建設技術研究院・基盤施設研究本部・地盤研究室

3 NEXCO 中日本

4 名古屋工業大学大学院・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻 E-mail : cho.ho@nitech.ac.jp

概要

地盤の液状化挙動を評価するために数値解析が用いられている。境界値問題の数値解析の精度を向上するためには室内要素試験結果の信頼性が求められている。本研究では、動的三軸試験機を用いて非排水繰返し試験を行うことにより、砂の非排水せん断時の力学挙動を検証した。また、過圧密・構造・異方性の概念を導入した弾塑性構成式を用いて、非排水繰返しせん断時試験と同条件の2次元及び3次元有限要素解析を行い、供試体の不均一性が砂の力学挙動に及ぼす影響を検証した。要素試験の結果より、初期間隙比・繰返し応力比・初期拘束圧の違いが供試体の平均的挙動に与える影響はあるが、载荷周波数による影響はないことが分かった。一方、数値解析の結果より、摩擦や初期不整などの要因が供試体に力学挙動の不均一性をもたらすが、供試体の平均的力学挙動にさほど影響をおよぼさないことも分かった。

キーワード：砂の非排水繰返し試験，構成式，過圧密，構造，有限要素解析

1. はじめに

近年では、地震時の地盤の挙動や液状化を評価するにあたって、数値解析によって正確に地盤の挙動を予測しようという考えが研究の主流となっており、地盤材料の変形挙動をより正確に表現できる構成式の提案が最も重要であると言える。本研究では、動的三軸試験機を用いて砂の繰返しせん断時の力学挙動を検証し、液状化時の砂の力学挙動の実験的解明を試みる。また、過圧密(Hashiguchi & Ueno, 1977)・構造(Asaoka et al, 1998)・異方性(Sekiguchi, 1977)の概念を導入した砂の弾塑性構成式(Zhang et al, 2007)に基づいた2次元及び3次元の有限要素解析を行い、供試体の内部に生じる応力状態や変形挙動を検証し、要素試験の結果と比較することにより本構成式に基づく有限要素解析の有用性を検証する。また、実際の土の供試体は物理的な制約条件により、内部の力学挙動が均一であることは不可能であるため、供試体の不均一性が変形及び破壊挙動特性にどのような影響を及ぼすかを有限要素解析によって検討する。

2. 室内動的三軸試験

2.1 試験概要

本試験では、繰返し荷重とその载荷周波数を制御できる動的三軸試験機を用いて非排水繰返しせん断試験を行った。試験に用いた土の試料は豊浦砂($e_{\max} = 0.975$, $e_{\min} = 0.613$, $\rho = 2.65\text{g/cm}^3$)である。供試体は高さ10cm, 直径5cmの円柱のものをを用いる。計測項目は垂直荷重, 垂直変位, 横圧(側圧), 間隙水圧と体積変化の5つである。周辺機器及び三軸室の概要は図1に示す。なお中密な砂は締め固め法で、緩い砂は水中落下法で供試体を作製した。

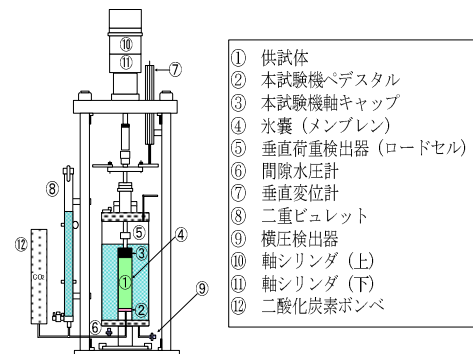


図1 三軸室及び周辺機器

2.2 試験結果

本研究では、初期間隙比、繰返し応力比、載荷周波数、初期拘束圧の影響について着目し、繰返しせん断時の力学挙動を検討した。

(1) 初期間隙比の影響

まず、初期間隙比の違いについて比較する。試験結果を図2に示す。なおグラフは左から有効応力経路、応力-ひずみ関係、軸ひずみの時刻歴である。共通する初期条件は図(a)中に示す。有効応力経路より、初期間隙比の値が大きい方が、サイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数が少なく非常に液状化しやすいことが分かる。応力-ひずみ関係及び軸ひずみの時刻歴を見ると、ゆるい供試体の場合は、載荷初期には伸張側に発達していた軸ひずみが、繰返し載荷が進むにつれて圧縮側にも発達し、供試体が圧縮と膨張を繰返ししながら、次第に剛性を失い、変形の度合いが大きくなっている。密な供試体では圧縮側へのひずみの進行は比較的小さい。

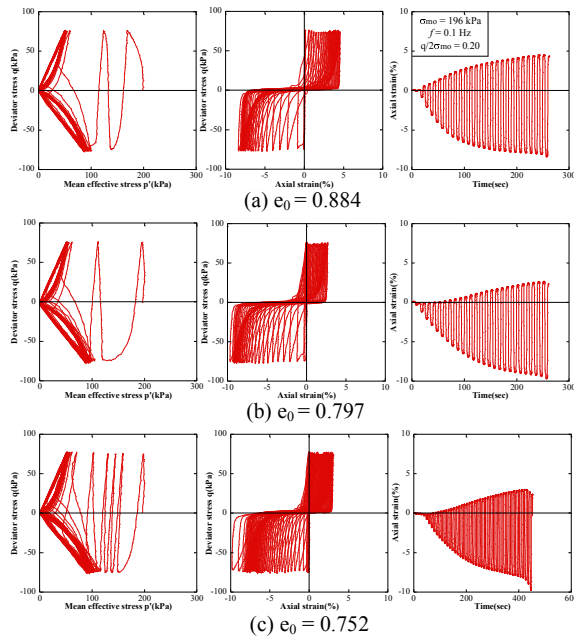


図1 初期間隙比の違いによる影響

(2) 繰返し応力比の影響

繰返し応力比の違いによる影響を比較する。試験結果を図3に示す。有効応力経路を見ると、繰返し応力比が小さい方がサイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数が多いことが分かる。このことから、繰返し応力比が0.15と非常に小さい場合は、他のケースと比べてもはるかに液状化しにくいことが分かる。それぞれのケースで有効応力経路は異なった挙動を示しているが、応力-ひずみ関係及び軸ひずみの時刻歴を見ると、液状化後の繰返し載荷回数の違いから若干の違いはあるが、繰返し応力比が変わっても、ほぼ同ような挙動を示していることがわかる。このことから、供試体の間隙比が同じであるのな

ら、繰返し応力比が異なっても変形挙動の違いはそれほど大きくないと言える。また、繰返し応力比が小さい程、軸ひずみが生じるのに時間がかかっていることが分かる。

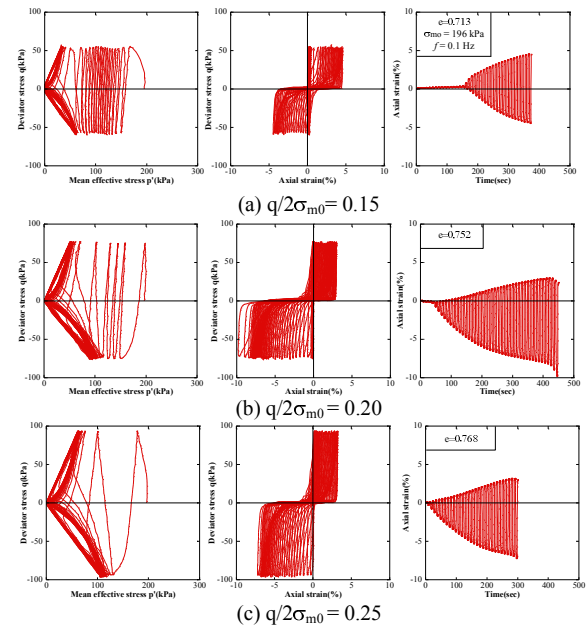


図2 繰返し応力比の違いによる影響

(3) 載荷周波数の影響

載荷周波数が与える影響について比較する。試験結果を図4に示す。図4に関しては、二酸化炭素で供試体内の空気を置換する方法で作製した非常にゆるい供試体を用いて行った実験結果を提示する。有効応力経路を見ると、液状化するまでの繰返し回数に大きな違いはないが、応力-ひずみ関係、軸ひずみの時刻歴を見ると、0.01Hzという遅い載荷周波数ではサイクリックモビリティに入ると、少ない載荷回数で急激に伸張側に変形が進行し軸ひずみが10%を大きく超えて実験を続けることが不可能になった。一方、比較的速い周波数で載荷すると、ひずみの蓄積が急激に大きくなることなく、徐々に進展していく。しかし、全体的挙動を見るかぎり、載荷周波数による影響が少ないと考えられる。

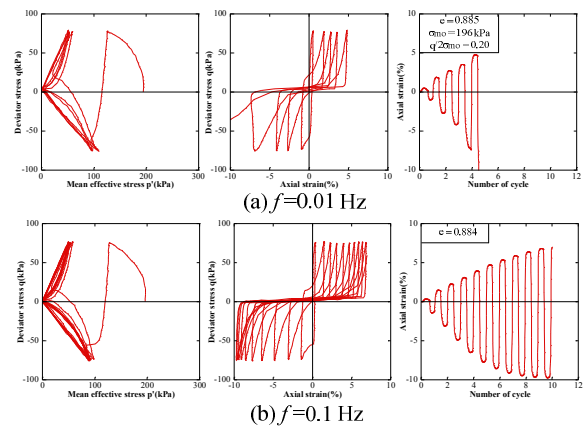


図3 載荷周波数の違いによる影響

(4) 初期拘束圧の影響

次に、初期拘束圧が与える影響について比較する。試験結果を図5に示す。有効応力経路を見ると、拘束圧が大きくなるにつれて、液状化に至るまでの繰り返し回数が増えることが分かる。の応力-ひずみ関係を見ると、ひずみの発生量の程度に大きな違いが表れ、特に(d)の拘束圧294kPaに関しては圧縮側のひずみがほとんど進行していないことが分かる。また、両ひずみ振幅が5%に達するまでの繰り返し回数は、196kPaでは14回、294kPaでは108回とその違いが顕著に表れた。拘束圧が高くなることで、圧縮側のひずみの発達が抑制され、結果としてひずみ振幅の増加が抑えられたものと考えられる。

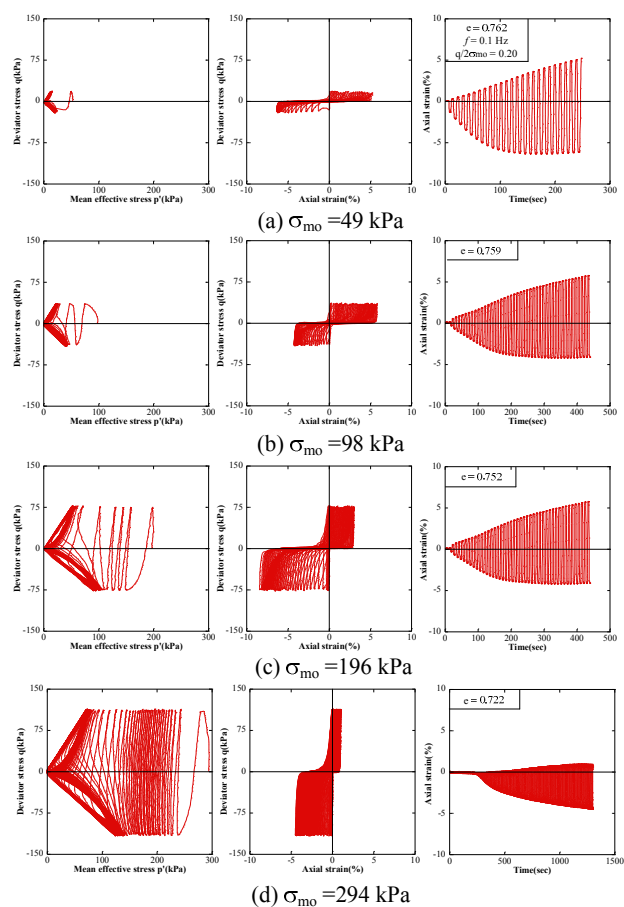


図4 初期拘束圧の違いによる影響

以上の比較検証により、本研究で行った非排水繰り返しせん断試験の結果の再現性及びほかの既存研究データとの一貫性があることがわかった。また、構成式を検証するための重要な基礎データを得ることも出来た。

3. 数値シミュレーション

3.1 数値解析の概要

過圧密・構造・異方性の概念を導入した砂の弾塑性構成式(Zhang et al, 2007)及び有限変形アルゴリズムに基づいた土-水連性境界値問題の支配方程式によって作られた解析

プログラム「DBLEAVES」(Ye, 2007)を用いて2次元及び3次元有限要素解析を行うことによって、境界値問題としての供試体の変形挙動を検証する。図5に解析メッシュ及び境界条件を、表1及び表2に決定した豊浦砂の材料パラメータ(Jin,2010)および要素シミュレーションにより決定された供試体の初期状態特性値(黒川,2010)を示す。

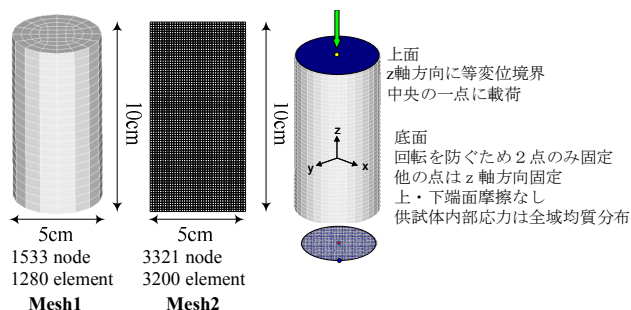


図5 解析メッシュ及び解析条件(Jin, 2010)

表1 豊浦砂の材料パラメータ

弾塑性及び発展則パラメータ	記号	値
破壊時の主応力比	σ_1/σ_3	3.29
ポアソン比	ν	0.3
間隙比 N ($p'=98\text{kPa}$ on $N.C.L$)	N	0.87
圧縮指数	λ	0.05
膨潤指数	κ	0.0064
過圧密劣化指数	m	0.01
構造劣化指数	a	0.5
異方性発展指数	br	1.5

表2 初期状態特性値

初期状態及び状態特性値	値
初期間隙比 e_0	0.705
初期拘束圧 p' (kPa)	196
初期構造 R^*	0.40
初期過圧密比 OCR	50.0
初期異方性 ζ	0.00

3.2 数値解析結果

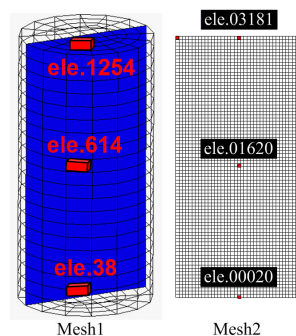


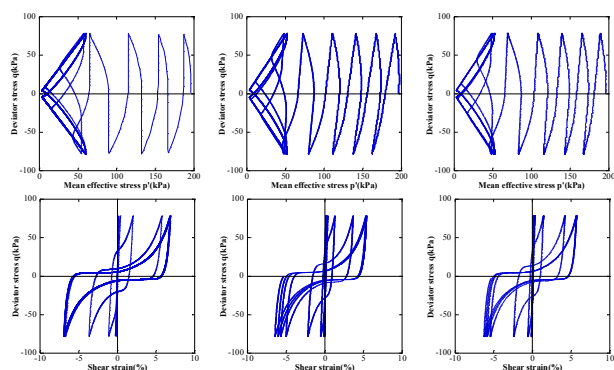
図6 出力する要素の位置

本項で行う数値解析は初期拘束圧196kPa、繰り返し応力比0.20、載荷周波数0.1Hz(動的解析)のもとで行った。解

析メッシュ中の応力の出力位置は図 7 に示す通りである。ただし初期の内部応力は均質であるため、供試体端面の摩擦を与える場合以外の結果については、メッシュ中央部の要素のみを出力するものとする。

(1) 解析手法の違い

解析手法の違いが解析結果に与える影響を検討する。非排水条件下での繰返しせん断試験をそれぞれ、要素シミュレーション、静的有限要素解析、動的有限要素解析で再現する。静的有限要素解析では慣性力と、それに付随する減衰効果を無視できるという特徴がある。解析には Mesh2 の 2 次元解析メッシュを使用する。図 8 に解析結果を示す。結果を見ると、全ての解析手法においてサイクリックモビリティの挙動を確認することが出来た。動的解析と静的解析の結果を比較すると、発生するせん断ひずみ、サイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数など、両解析手法の結果は概ね一致していると言える。また、これらの解析結果と要素シミュレーションの結果を比較すると、サイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数に若干の違いがあるものの、繰返し载荷に伴う有効応力の減少や、せん断ひずみの発生量にも大きな差がないことが分かる。

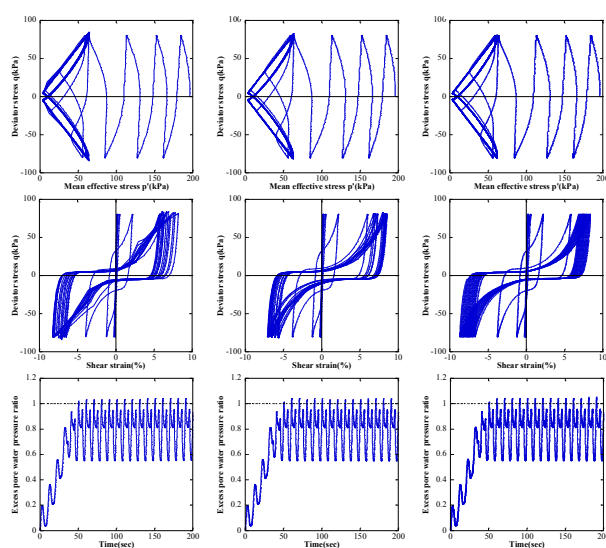


(a) 要素シミュレーション (b) 静的解析 (c) 動的解析

図8 解析手法の違いによる影響

(2) 計算時間増分の違い

計算時間増分の違いが解析結果に与える影響について検討する。解析メッシュは Mesh1 を使用し、前述の所定の初期条件下で、20 回の繰返し载荷の動的解析を行った。解析結果については図 9 に示す。解析結果のグラフのうち、有効応力経路及び応力 - ひずみ関係のグラフから、計算時間増分の違いは解析結果にある程度の違いを与えることが分かる。どのケースにおいてもサイクリックモビリティの挙動に至っているが、計算時間増分が 0.01sec/step 及び 0.005sec/step の場合には解析結果が若干荒くなっている。特に、0.01sec/step のケースでは有効応力経路と応力 - ひずみ関係のグラフに顕著な乱れが生じている。このことから動的解析を行う場合には、载荷周波数に応じて、適切な計算時間増分を選択することが重要であると考えられる。

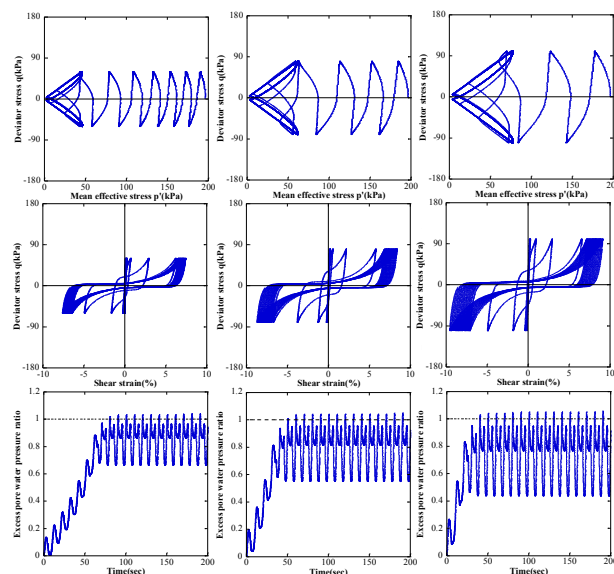


(a) $\Delta t=0.01\text{step/sec}$ (b) $\Delta t=0.005\text{step/sec}$ (c) $\Delta t=0.002\text{step/sec}$

図 9 時間増分の違いによる影響

(3) 繰返し応力比の影響

繰返し応力比の違いによる影響を検証する。解析メッシュは Mesh1 を使用するここでは 4 つの異なる繰返し応力比 0.15, 0.20, 0.25 でそれぞれ解析を行い、その結果を図 10 に示す。結果から、繰返し応力比が高ければ、より少ない繰返し回数でサイクリックモビリティに至り、また、より大きなせん断ひずみが生じており、砂の特性をよく表現できていることが分かる。しかしながら、圧縮側と伸長側にはほぼ同程度のひずみが発生しており、実験において伸長側の方がひずみの発生量が多いという結果と異なることから、この点に関しては今後構成式の改良が必要であるといえる。

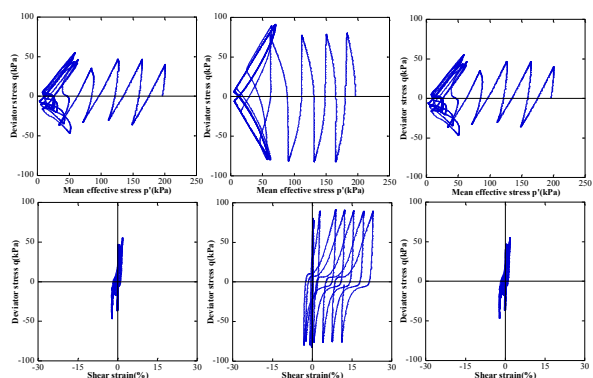


(a) $q/\sigma_{mo}=0.15$ (b) $q/\sigma_{mo}=0.20$ (c) $q/\sigma_{mo}=0.25$

図 10 繰返し応力比の違いによる影響

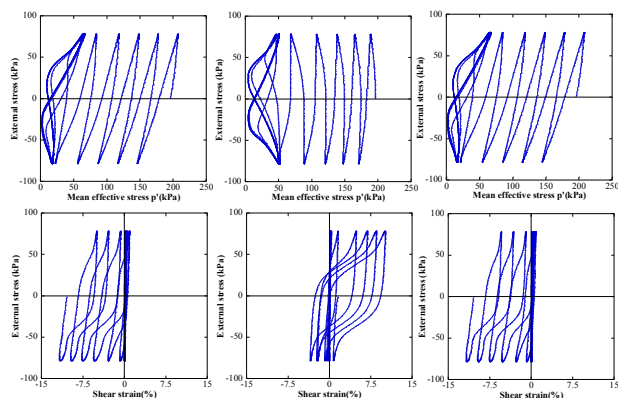
(4) 拘束条件の影響

Mesh1 を用いて供試体上下端面に摩擦を考慮した拘束条件を与え（供試体上部は x 軸方向固定，底部は x, y 軸方向固定），解析結果にどのような変化が生じるか検証を行った．その解析結果を図 11 に示す．拘束条件を与えたところ供試体の上下と中央部での挙動は大きな差異を示した．中央部の要素の挙動は摩擦のない場合の挙動と比較的に似ている．また，図 12 は上部，中央部および底部要素の平均結果を出力たものである．有効応力経路及び応力 - ひずみ関係は供試体上部要素と下部要素で比較的に似た挙動を示しており，また，せん断ひずみは伸張側に進展していることから，上部及び下部要素は膨張傾向にあることが分かる．また，中央部は摩擦なしの場合（図 8 及び図 9）と似た有効応力経路を示し，せん断ひずみは圧縮側に発生していることから圧縮傾向にあることが分かる．供試体に拘束条件を与えた場合，供試体の局所的な挙動が大きく異なることはあるが，供試体全体的な平均挙動は摩擦なし（理想状態）の状態と似た挙動を示すことが分かる．



(a) Element No.38 (b) Element No.614 (c) Element No.1254

図 11 上下端面の摩擦を考慮した解析結果（要素）



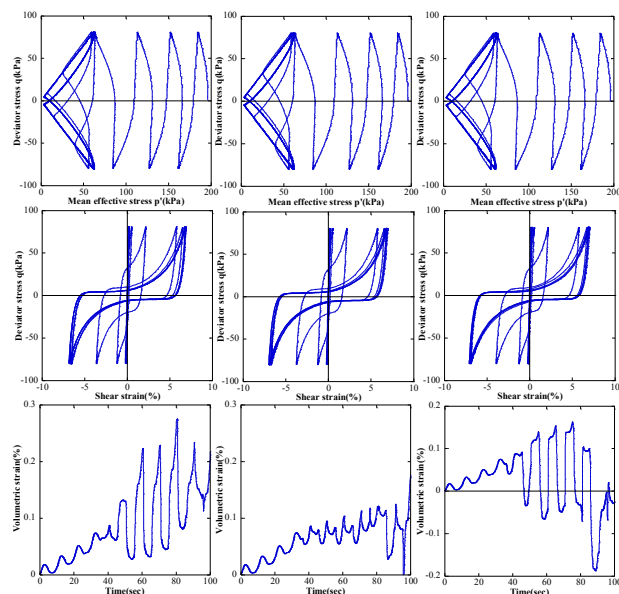
(a) Top layer (b) Middle layer (c) Bottom layer

図 12 上下端面の摩擦を考慮した解析結果（平均）

(5) 自重の影響

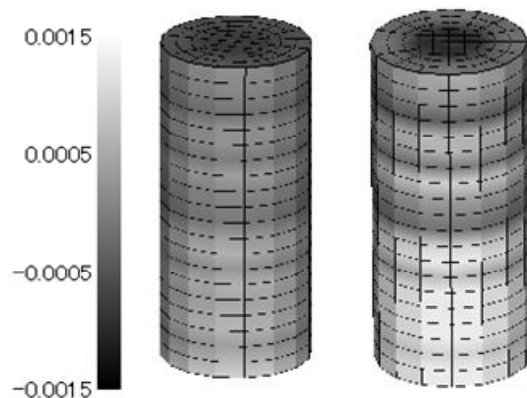
Mesh1 を用いて解析を行う際，供試体の自重の影響を考慮した場合，解析結果にどのような影響を与えるかを検証した．供試体の高さは 10cm と小さいので供試体自身の自

重は拘束圧拘束圧に比べればはるかに小さいので自重の影響については，通常無視されることが多い．しかし，非排水繰返しせん断を行う際，供試体を液状化させた直後に，しばしば下方に砂が堆積し，上方に水がたまる現象が確認されており，供試体自重の影響がどの程度あるのかを比較・検証した．その解析結果を図 13 に示す．3 次元での有限要素解析では，体積ひずみの時刻歴には若干の違いが見られるが，有効応力経路及び応力 - ひずみ関係にはそれほど大きな違いは見られなかった．また，体積ひずみの時刻歴は非常に小さな値を示しており，このことから供試体の自重を与える影響は大きくないと考えられる．ただし，体積ひずみの発展傾向から見ると，自重を考慮した場合には供試体上部では膨張傾向，中央部及び底部では圧縮傾向にあることが分かる．このことは図 14 に示した载荷終了後の体積ひずみの分布図より見て取れる．実験で観察された供試体下方に砂が堆積し，上方に水がたまる現象に一致している．一方，供試体の自重を考慮していないケースでは体積ひずみの分布は一様である．



(a) Element No.38 (b) Element No.614 (c) Element No.1254

図 13 供試体の自重による影響



(a)自重なし (b)自重あり

図 14 载荷終了後の体積ひずみの分布図

(6) 初期不整形の影響

最後に、Mesh2を用いて供試体の初期不整形の影響について検証する。上下端面の拘束に加えて、供試体の表面の水平座標を1mmずつ内側にずらし、表面に初期不整形を与えて、比較・検証を行った。その解析結果を図15に示す。有効応力経路及び応力-ひずみ関係のグラフより、初期不整形を与えても、供試体の挙動には大きな違いは見られなかった。また、図16の載荷終了時の軸ひずみの発生量及び分布にも大きな違いは見られなかった。よって供試体全体としては初期不整形による影響はさほど大きくないことが分かる。

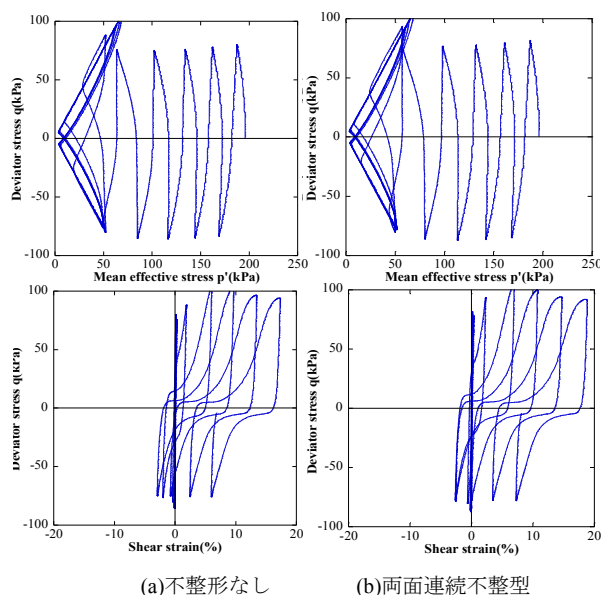


図15 初期不整形の影響（端面摩擦あり）

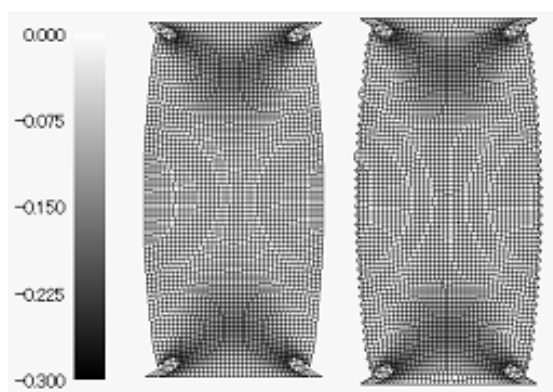


図16 載荷終了後の軸ひずみの分布

周波数の違いによる影響は見られなかった。また、土・水連成解析プログラム「DBLEABES」を用いて砂の非排水繰返しせん断時の力学挙動を境界値問題としてシミュレーションした。解析において、載荷周波数や摩擦、初期不整形などの要因は供試体の局所的な挙動に影響を及ぼすが、供試体全体の平均的な挙動にとさほど影響がないことが分かった。したがって、要素試験の不均一性があったとしても、その試験結果が構成式のパラメータの決定に使用されても差し支えないと言える。しかし、摩擦がない計算では圧縮側と伸長側にはほぼ同程度のひずみが発生しているのに対して、実験では伸長側のひずみが大きく発生していることから、今後構成式の改良が必要であると考えられる。

参考文献

1. Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (1998): Super loading yield surface concept for the saturated structured soils, Proc. of the Fourth European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering-NUMGE98, 232-242.
2. Hashiguchi, K. and Ueno, M. (1977): Elastoplastic constitutive laws of granular material, Constitutive Equations of Soils, Pro. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Spec. Ses. 9, Murayama, S. and Schofield, A. N. (eds.), Tokyo, JSSMFE, 73-82.
3. Jin Youngji (2010): Unified modeling of sand under different conditions and its applications and its application to numerical simulation of boundary value problem, Doctoral Dissertation, Nagoya Institute of Technology.
4. Sekiguchi, H. (1977): Rheological characteristics of clays, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech., Found. Eng., Tokyo, Vol.1, 289-292.
5. Ye Bin(2007): Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand.
6. Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K. (2007): Explanation of Cyclic Mobility of Soils: Approach by Stress-Induced Anisotropy, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, 635-648.
7. 黒川正弘 (2010) : 繰返し載荷を受ける砂の力学挙動の要素試験及び数値シミュレーション, 名古屋工業大学修士論文

4. まとめ

動的三軸試験機を用いて、砂の非排水繰返し特性を様々な初期条件で比較検証を行った。その結果、初期間隙比や繰返し応力比、初期拘束圧の違いにより液化化に至るまでの繰返し回数やひずみの進行速度に違いが表れたが、載荷