

低拘束圧条件下における密度の異なる豊浦砂試料の要素試験と その数値シミュレーション

Elemental tests on Toyoura sand with different densities under lower confining pressure and its numerical simulation

白井勇有¹, 細谷旭弘², 顧淋淋¹, 岩井裕正¹, 張鋒¹

1 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

2 株式会社大林組（旧所属：名古屋工業大学・大学院・創成シミュレーション工学専攻）

概 要

地盤の液状化挙動を正確に予測するため、精巧な構成式に基づいた数値解析の研究が必要不可欠である。本研究では、実験および数値解析のどちらにおいても十分に議論がされていない低拘束圧条件下 ($\sigma_{m0} \leq 49\text{kPa}$) の密度の異なる豊浦砂試料に着目し、液状化特性を含めた砂の力学特性を把握するための排水・非排水単調載荷試験および繰返し三軸試験を実施した。また、過圧密・構造・応力誘導異方性を統一的に表現可能な弾塑性構成式 Cyclic Mobility model を用いて実験結果の再現解析を行い、低拘束圧条件下における砂の力学挙動の表現を試みた。さらに、拘束圧が非常に小さい場合、高さ 100mm の供試体の自重の影響を、境界値問題として考え、土・水連成有限要素解析プログラム DBLEAVES を用いてその影響を検証した。

キーワード：砂質土、拘束圧、液状化

1. はじめに

地震被害の 1 つである地盤の液状化対策を施すために、地震時および地震後の地盤挙動を正確に予測することが重要な課題である。液状化のメカニズムを把握するための要素・模型試験や数値解析は以前から数多く実施されてきた。近年では、液状化を表現する各種要素試験や液状化も含めた弾塑性構成式の提案、有限要素法による数値解析手法の開発が多くなされている。しかし、繰返し載荷による地盤の変形挙動は極めて複雑であり、それを数値解析で精度よく表現することはまだ十分とは程遠い。繰返し載荷または単調載荷による地盤内の挙動を精度よく表現するために必要な条件の 1 つとして、まず、各種拘束圧条件下における砂の力学挙動を実験的に把握することが求められている。さらに、その実験結果に基づき、数値解析では、種々の拘束圧条件における砂の力学挙動を統一的に再現可能であるモデルの構築が必要とされる。その中で本研究グループはこれまで種々の境界条件および応力条件下で低拘束圧～中拘束圧領域の砂の液状化挙動の解明に努めてきたが、低拘束圧条件の場合メンブレンの張力が実験結果に影響することを突き止めた¹⁾。そこで本稿では、厚さ 0.20mm より薄い 0.15mm のラテックス製のメンブレンを用いて砂質土の非排水繰返し三軸試験及び排水・非排水変

位制御単調載荷三軸試験を低拘束圧環境下で実施し、メンブレンの影響を考察し、液状化挙動及び力学挙動を正確に把握することに努めた。また、試験結果に基づき、過圧密・構造・応力誘導異方性の概念を導入した砂の弾塑性構成式 Cyclic Mobility model²⁾の要素シミュレーション、低拘束圧環境下において供試体が受ける自重の影響を考慮するために土・水連成有限要素解析プログラム DBLEAVES³⁾を用いて実験結果の再現を試みた。

2. 排水・非排水単調載荷三軸試験

2.1 試験概要

本試験では、緩い砂及び中密な砂を対象に動的・静的制御切り替え可能な三軸試験機を用いて排水・非排水単調載荷三軸試験を行った。実験には豊浦砂を試料とした直径 50mm、高さ 10mm の円柱供試体を使用した。表 1 に豊浦砂の物理特性を示す。供試体は水中落下法で作製し、突固めなしの緩詰供試体と 3 層に分けて 15 回ずつ突固めた中密供試体を用意し、それぞれ初期拘束圧を 5kPa, 10kPa, 20kPa の 3 種類として実験を行った。載荷速度は全試験統一し圧縮方向に 0.04%/min とした。また、メンブレンの余分の補強効果をできるだけ減らすために、本試験では非常に柔らかい厚さ 0.15mm のラテックスメンブレンを用いた。

表1 豊浦砂の物理特性

土粒子の比重 G_s	2.65	最大間隙比 e_{max}	0.975
最大粒径 (mm)	0.425	最小間隙比 e_{min}	0.609
最小粒径 (mm)	0.102	均等係数 U_c	1.65

2.2 試験結果

2.2.1 排水試験結果

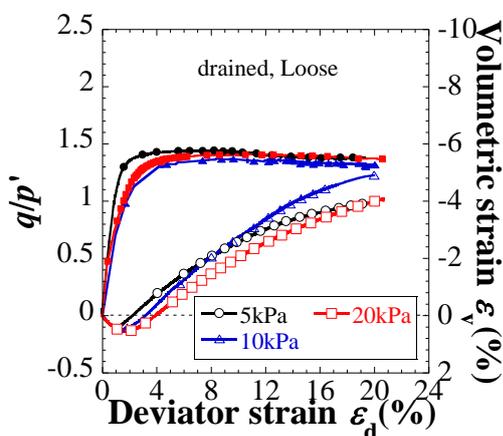
排水単調載荷三軸試験の結果を図1, 試験条件を表2に示す。なお, グラフの縦軸は軸差応力 q を初期平均有効応力 p' で除した応力-ひずみ関係である。

図1は, 排水条件における応力-ひずみ関係の試験結果である。(a)の緩詰, (b)の中密どちらにおいても全ての拘束圧において軸差応力, 体積ひずみ共にほぼ同じになっており, その後軸差応力の増減が安定したため供試体が限界状態に達したと考えられる。また, 体積ひずみは一度圧縮し, その後膨張しており, 共に正のダイレイタンスーを示していることがわかった。これは以下のことが原因であると考えられる。排水条件の緩詰は通常拘束圧条件下では, 本来圧縮していく負のダイレイタンスーを示すが, 本研究では拘束圧が小さい低拘束圧条件下であるため同程度の間隙比でも砂が過圧密のような状態となり, 砂が密の挙動を示したことが原因ではないかと考えた。そして, 体積変化の変化量がほぼ同じであることから, 初期拘束圧の違いによる体積変化量の有意な差はないと考えられる。

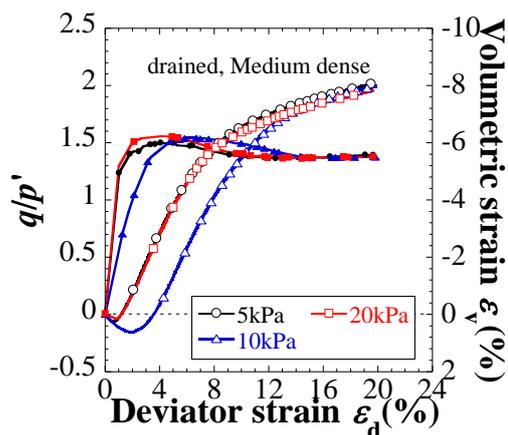
次に, 図1(a)の緩詰と(b)の中密の応力-ひずみ関係の図を比較すると, 緩詰は軸差応力が上昇し, その後安定する一方中密では, 軸差応力が最大値まで増加した後減少し, 緩い砂と同じ応力値で安定するピーク強度を示す結果となった。

表2 図1の試験条件

Sample	Loose			Medium dense		
	σ'_{m0} (kPa)	e_0	Dr (%)	σ'_{m0} (kPa)	e_0	Dr (%)
σ'_{m0} (kPa)	5	10	20	5	10	20
e_0	0.90	0.85	0.90	0.74	0.76	0.73
Dr (%)	20	35	21	66	60	67



(a) 緩詰



(b) 中密

図1 排水単調三軸試験結果

2.2.2 非排水試験結果

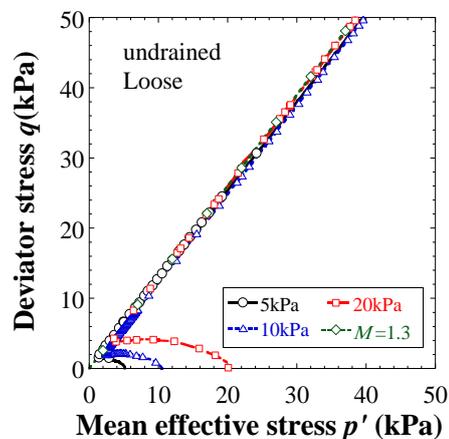
非排水単調載荷三軸試験の結果を図2 (有効応力経路: (a)(b), 試験条件を表3に示す。なお, 限界状態の応力比を $M=q/p'=1.3$ として図2(a)(b)にプロットしている。

図2より, (a)の緩詰, (b)の中密のどちらにおいても全ての拘束圧において非排水条件のため載荷直後から有効応力が減少し, やがて限界状態となり, その後は有効応力が増加に転ずることがわかった。

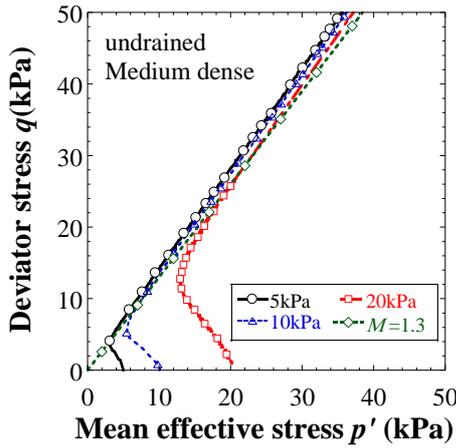
次に, 図(a)の緩詰と(b)の中密の図を比較すると, 同じ初期拘束圧では中密の試験ケースよりも緩詰の試験ケースの方が載荷直後から限界状態に達するまでの平均有効応力の減少量が大きいことがわかる更に, 拘束圧が大きく, 初期間隙比が小さい, つまり中密の方が圧縮強度は大きくなることがわかった。

表3 図2の試験条件

Sample	Loose			Medium dense		
	σ'_{m0} (kPa)	e_0	Dr (%)	σ'_{m0} (kPa)	e_0	Dr (%)
σ'_{m0} (kPa)	5	10	20	5	10	20
e_0	0.90	0.89	0.85	0.73	0.73	0.73
Dr (%)	21	24	35	69	67	67



(a) 有効応力経路 (緩詰)



(b) 有効応力経路 (中密)
図2 非排水単調三軸試験結果

3. 非排水繰返し三軸試験

3.1 試験概要

緩詰供試体および中密供試体を対象に、単調三軸試験と同様の初期拘束圧 (5kPa, 10kPa, 20kPa), 異なる繰返し応力比 ($q/2\sigma'_{m0}=0.15, 0.20, 0.25$) において非排水繰返し三軸試験を行った。なお、動的載荷周波数は全ての試験ケースで 0.01Hz の正弦波を与えた。また、表 4 の $DA=5\%$, $DA=10\%$ は供試体の両振幅ひずみが 5%, 10% に達するまでの繰返し載荷回数である。両振幅ひずみが 10% に達するか、繰返し載荷回数が 200 回に達した場合、試験終了としている。厚さ 0.15mm のメンブレンを今回用いて行った試験を行うことで低拘束圧環境下における正確な豊浦砂の力学挙動、液状化特性の把握に努めた。なお、本稿では、初期拘束圧 $\sigma'_{m0}=5, 20\text{kPa}$, 繰返し応力比 $q/2\sigma'_{m0}=0.20$ における緩詰と中密な砂の試験結果のみ記載する。

表4 試験条件

供試体	緩詰			中密		
σ'_{m0} (kPa)	5	10	20	5	10	20
e_0	0.86	0.85	0.90	0.74	0.74	0.73
Dr (%)	31	35	31	65	64	67
$DA=5\%$	1.36	0.61	0.61	5.14	2.59	3.17
$DA=10\%$	3.30	0.64	0.62	—	6.05	5.03

3.2 試験結果

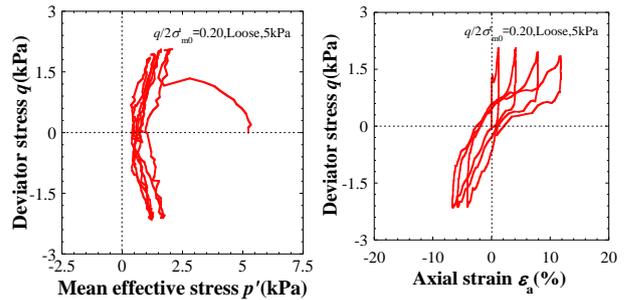
図 3~図 6 の(a)に有効応力経路, (b)に応力-ひずみ関係を示す。

まず、緩詰の試験結果について考察する。図 3(a)(b)より、初期拘束圧 5kPa では、有効応力経路において液状化後の剛性の回復がわずかに圧縮方向に偏っており、応力-ひずみ関係においても圧縮方向に偏って軸ひずみが発達するということがわかった。また、軸差応力が増減を繰返すサイクリックモビリティの挙動を一度も示さずに液状化するということがわかった。一方、図 4(a)より、初期拘束圧

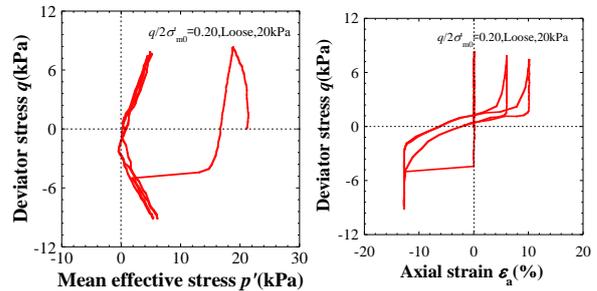
が 20kPa の有効応力経路に着目すると、サイクリックモビリティの挙動を一度示してから伸張側で急激に有効応力が減少し、液状化することがわかった。また、図 4(b)より、応力-ひずみ関係ではどちらの初期拘束圧条件でも軸ひずみが圧縮方向、伸張方向の両方に発達し、初期拘束圧 5kPa よりも軸ひずみの発達が大きいということがわかった。さらに表 4 より、初期拘束圧が大きい 20kPa の方が $DA=5\%$, $DA=10\%$ の値は小さくなるということがわかった。

次に、中密な砂の試験結果について考察する。図 5, 6(a)の有効応力経路の図に着目すると、初期拘束圧 5kPa, 20kPa は両方共伸張方向において平均有効応力が急激に減少して、液状化するということがわかった。また、図 5, 6(b)に着目すると、初期拘束圧が大きい 20kPa は軸ひずみの発達が大きいということがわかった。

以上より、低拘束圧条件では、拘束圧が小さいほど軸ひずみの発達が小さい。また、図 3(a)より、拘束圧が極端に低い 5kPa の場合は軸ひずみが圧縮側に発達していることは何えるが、それはメンブレンの影響が原因と考えられる。また、表 4 より、初期拘束圧が小さいほど DA の値が大きくなる傾向は緩詰、中密供試体を問わず概ね見られるが、試験ケースを増やしてさらなる検証が必要である。



(a) 有効応力経路 (b) 応力-ひずみ関係
図3 試験結果 (緩詰・ $\sigma'_{m0}=5\text{kPa}$)



(a) 有効応力経路 (b) 応力-ひずみ関係
図4 試験結果 (緩詰・ $\sigma'_{m0}=20\text{kPa}$)

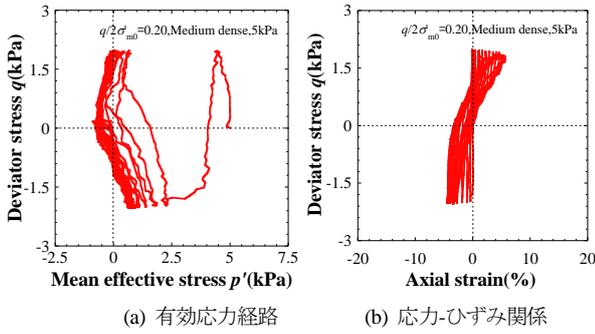


図5 試験結果 (中密・ $\sigma'_{m0} = 5\text{kPa}$)

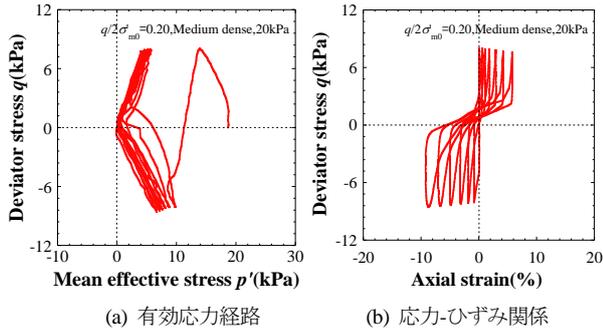


図6 試験結果 (中密・ $\sigma'_{m0} = 20\text{kPa}$)

4. 要素シミュレーション

本章では、Cyclic Mobility model²⁾を用いて動的および静的三軸試験を要素シミュレーションで表現した結果について述べる。既往の研究より、低拘束圧において要素シミュレーションを実施し、緩い砂の軸ひずみの過剰な発達を抑えるために、過圧密の発展則 R に新たなフィッティングパラメータ (α_1 , α_2) を導入した¹⁾。その際、 α_1 , α_2 も含めた全てのパラメータを統一 ($\alpha_1=1.0$, $\alpha_2=1.5$) して解析を行った。その結果、解析結果を定性的に実験値に近づけることはできたが、定量的にはまだ困難であった。そこで本稿では、 α_1 , α_2 の感度分析を実施した。解析に使用した材料パラメータを表5に示す。材料パラメータは通常拘束圧 ($\sigma'_{m0}=196\text{kPa}$) の要素試験結果からトライ&エラーにより決定したものである。過圧密の発展則 R は以下の式より導出した。

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \ln \left(\frac{M^2 - \zeta^2 + \eta^2}{M^2 - \zeta^2} \right) + \ln R^* - \ln R - \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} + \frac{1}{R^*} dR^* - \frac{1}{R} dR - \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} d\varepsilon_v^p = 0 \quad (2)$$

$$dR = -\frac{(1+e_0)mM}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{(p/p_0)^2}{(p/p_0)^2 + 1} \right\}^2 \ln R \left\| d\varepsilon_{ij}^p \right\| + \left[R \frac{\eta}{M} \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} \right] \quad (3)$$

フィッティングパラメータ (α_1 , α_2) を以下のように加える。

$$dR = -\frac{(1+e_0)mM}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{(p/p_0)^2}{(p/p_0)^2 + 1} \right\}^2 \left\| \ln R \right\|^{\alpha_2} \left\| d\varepsilon_{ij}^p \right\| + \left[R \frac{\eta}{M} \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} \right] \alpha_1 \quad (4)$$

表5 材料パラメータ

Material Parameters	Toyoura Sand
Compression index λ	0.050
Swelling index κ	0.0064
Stress ratio at critical state M	1.300
Void ratio N ($p'=5\text{kPa}$ on N.C.L)	1.02
Poisson's ratio ν	0.300
Degradation parameter of overconsolidation state m	0.010
Degradation parameter of structure a	0.500
Evolution parameter of anisotropy b_r	1.500
Fitting parameter α_1	variable
Fitting parameter α_2	variable

4.1 解析結果

状態変数を表6および表7、感度分析結果を表8、解析結果を図7~図9 ((1): 非排水繰返し三軸試験(2): 排水・非排水単調試験) に示す。状態変数は Asaoka⁴⁾ および Hashiguchi⁵⁾ より、非常に緩い砂から振動圧縮、等方圧密を要素シミュレーションで実施して間隙比を算定した。その後、実験の間隙比に近い値を解析に使用した。なお、繰返し応力比は全て 0.20 であり、本稿では緩詰の解析結果のみ掲載する。

図7(1)より、拘束圧 5kPa の場合、液状化に至るまでの繰返し载荷回数が多く、軸ひずみが伸張方向に大きく発達する。図7(2)より、排水条件では、限界状態の到達が試験の結果よりも速いため、軸差応力のピークの発現および体積膨張が小さい。また、非排水条件では载荷初期における有効応力の減少経路が急勾配である。単調三軸試験におけるこれらの傾向は拘束圧が 10kPa (図8(2)) および 20kPa (図9(2)) の場合でも同様である。拘束圧 10kPa の場合、図8(1)より、液状化に至るまでの繰返し载荷回数は多いが、軸ひずみは定量的および定性的に表現できている。これは拘束圧が 20kPa の場合 (図9(1)) においても同様である。なお、本稿には記載してないが、中密な砂でも繰返しおよび単調三軸試験の解析結果は緩詰と同様の傾向を示した。

続いてパラメータ α_1 , α_2 について考察する。表8から、非排水繰返し三軸試験では α_1 の値を変えても解析結果に有意な差が無いということがわかった。 α_2 の値を大きくした方が解析結果の有効応力経路のサイクリックモビリティの挙動が少し多くなり、応力-ひずみ関係において、軸ひずみの過剰な発達を防ぐことができるとことがわかった。また、緩詰で拘束圧が大きいほど α_2 の値も大きくなる傾向が得られた。単調三軸試験においては、排水条件によらず α_1 , α_2 の値に一意的な関係は得られなかった。

以上より、 α_1 , α_2 の値を試験条件毎に変えて感度分析を行うことにより、 α_1 , α_2 の特性を把握することができた。しかし、試験条件によらず統一的に表現可能な構成式を提案するためにさらなる改良が必要である。

表6 状態変数(Loose)

σ'_{m0} (kPa)	e	R_0^*	OCR ($1/R_0$)	ζ_0	Specimen
5	0.865	0.285	122.127	0.0769	Loose
10	0.832	0.288	116.813	0.00869	
20	0.879	0.212	24.652	0.00102	

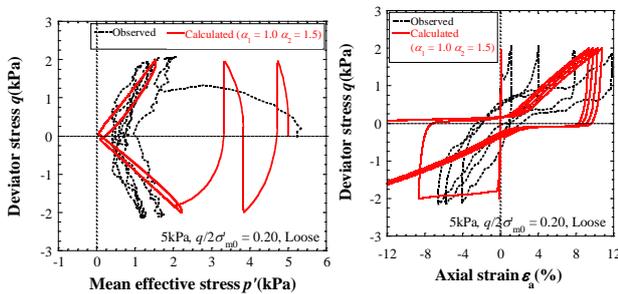
表7 状態変数(Medium dense)

σ_{m0} (kPa)	e	R_0^*	OCR ($1/R_0$)	ζ_0	Specimen
5	0.745	0.422	1308.49	0.0258	Medium dense
10	0.766	0.365	412.218	0.00938	
20	0.742	0.366	327.439	0.00214	

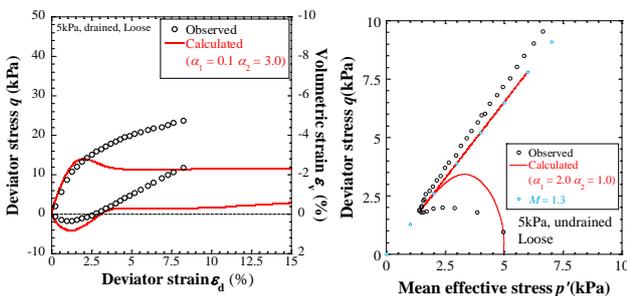
表8 感度分析結果

σ_{m0}	Load	Load		
		Lo, CCU	Lo, MCU	Lo, MCD
5kPa	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_1=2.0$	$\alpha_1=0.1$
	$\alpha_2=1.5$	$\alpha_2=1.0$	$\alpha_2=1.0$	$\alpha_2=3.0$
10kPa	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_2=2.0$	$\alpha_1=0.1$
	$\alpha_2=2.0$	$\alpha_2=1.0$	$\alpha_2=1.0$	$\alpha_2=3.0$
20kPa	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_1=1.0$	$\alpha_1=2.0$
	$\alpha_2=4.0$	$\alpha_2=1.0$	$\alpha_2=1.0$	$\alpha_2=5.0$

(*Lo :緩い砂, CCU :非排水繰返し三軸試験, MCU :非排水単調載荷三軸試験, MCD :排水単調載荷三軸試験)

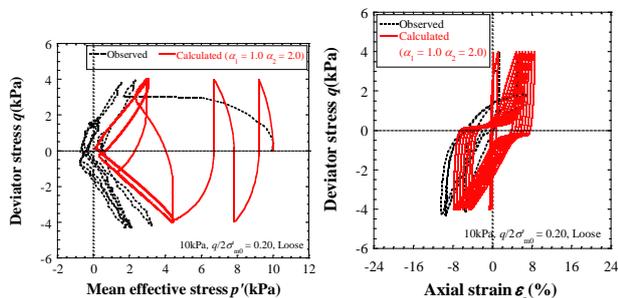


(1)Cyclic loading

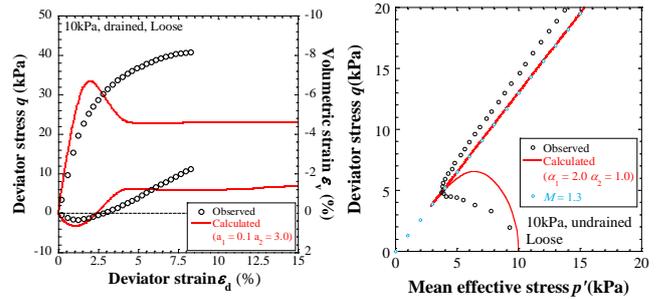


(2)Monotonic loading (left: drained, right: undrained)

図7 解析結果 ($\sigma_{m0}=5$ kPa, Loose)

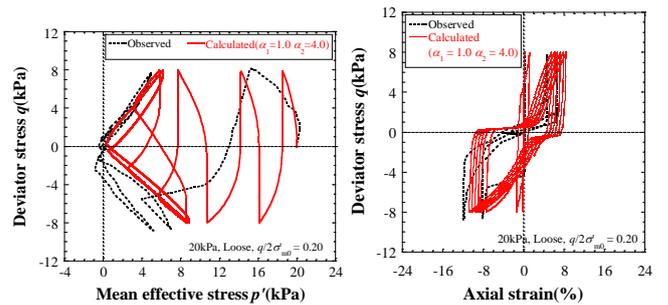


(1)Cyclic loading

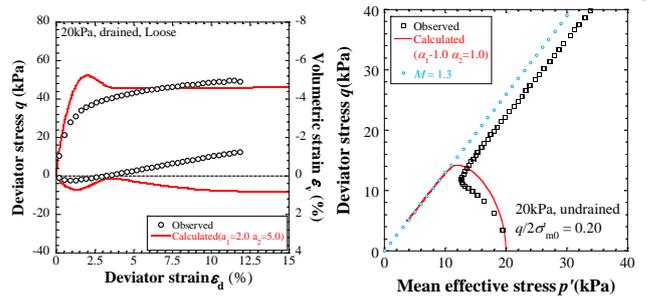


(2)Monotonic loading (left: drained, right: undrained)

図8 解析結果 ($\sigma_{m0}=10$ kPa, Loose)



(1)Cyclic loading



(2)Monotonic loading (left: drained, right: undrained)

図9 解析結果 ($\sigma_{m0}=20$ kPa, Loose)

5. 有限要素解析

拘束圧が 5kPa の低拘束圧条件において、供試体はそれ自身の自重により拘束圧の不均一性が生じてしまう。供試体上部と下部の差は 1kPa で、その 1kPa は拘束圧 5kPa の 20% にあたりとても大きい。そこで、拘束圧 5kPa の自重の影響を検証するために DBLEAVES³)を用いて実施した単調圧縮および繰返し三軸試験の有限要素解析について述べる。

5.1 解析条件

使用した材料パラメータおよび状態変数は表 5, 6, 7 と同様の数値を用いた。また、供試体上面の全ての節点に対して等変位境界を設け、供試体底面の全ての節点を鉛直方向に対して固定した。さらに、供試体の回転を抑制するため、2D は底面の中央 1 節点、3D は底面中央 1 節点および底面端 1 節点を全ての方向に対して固定した。また、上面、

底面および側面の摩擦は考慮せず，計算時間間隔は，1ステップあたり繰返し载荷は0.01秒，単調载荷は3.0秒である。繰返し载荷は繰返し応力比0.20および载荷周波数0.01Hz，単調载荷は圧縮方向に载荷速度0.04%/minで，軸ひずみが20%に達するまで実施した。排水条件は，繰返し三軸試験は非排水，単調三軸圧縮試験は排水・非排水の状態で解析を実施した。

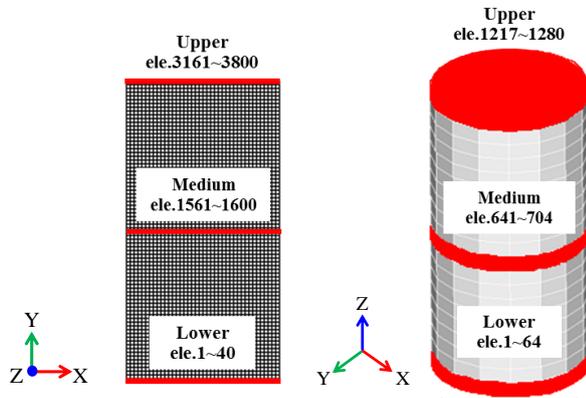
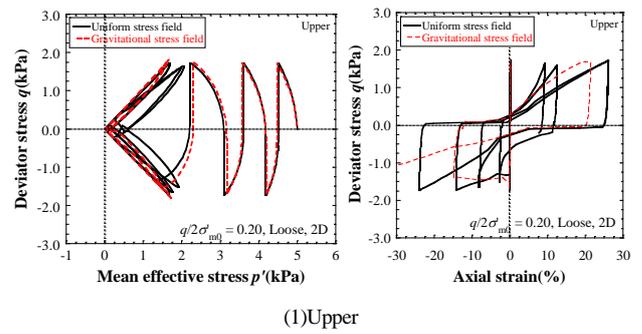
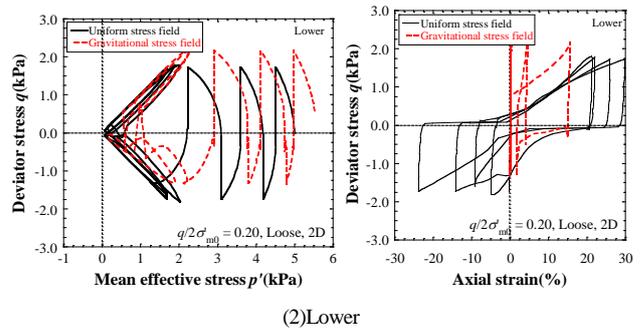


図10 二次元解析および三次元解析メッシュ



(1)Upper



(2)Lower

図11 解析結果 (Loose, 2D)

5.2 解析結果

本節では，解析結果について述べる。解析結果は図10に示す断面の要素データを平均化したものである。

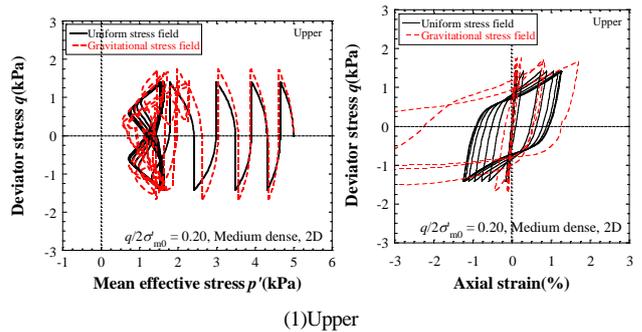
5.2.1 非排水繰返し三軸試験の解析結果

緩詰の断面平均の解析結果を図11，中密なものを図12，それぞれの全体の要素データを平均化して比較した場合のものを図13に示す。図11，12の(1)，(2)はそれぞれ上端部・下端部の断面平均の有効応力経路，応力-ひずみ関係を示し，図13(1)(2)はそれぞれ緩詰，中密供試体における応力-ひずみ関係を示す。

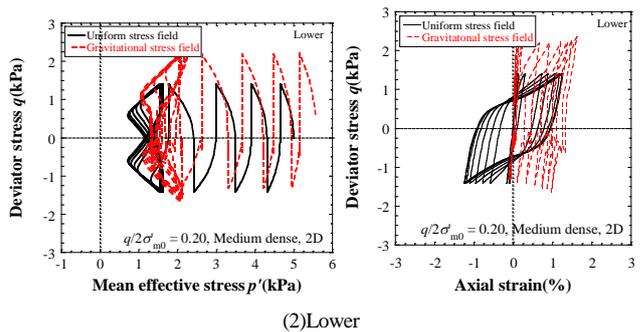
まず，緩詰供試体の解析結果について考察する。図11(1)(2)より，自重を考慮した場合，供試体下部ほど有効応力の減少量が小さい。また，供試体上部では圧縮方向と伸張方向共に軸ひずみが発生するのに対して，供試体下部では主に圧縮方向に集中する。これらの傾向は図12(1)(2)に示す中密な砂の場合でも同様である。

次に，全ての要素データを平均化した場合について考察する。図13(1)(2)より，軸ひずみの発達は定性的に同様の傾向を示すが，定量的には差が見られた。

以上より，繰返し三軸試験において，自重を考慮した場合，供試体の位置により有効応力経路および軸ひずみの発達が異なることがわかった。



(1)Upper



(2)Lower

図12 解析結果 (Medium dense, 2D)

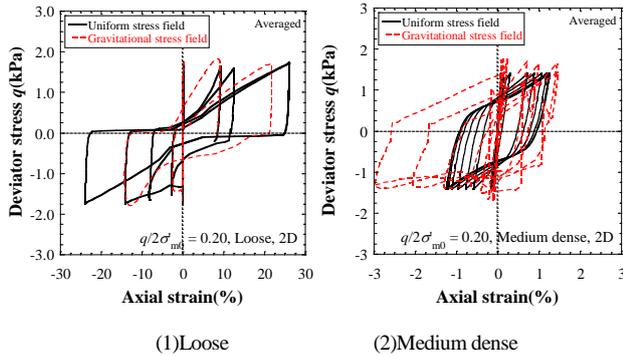


図13 平均化した解析結果

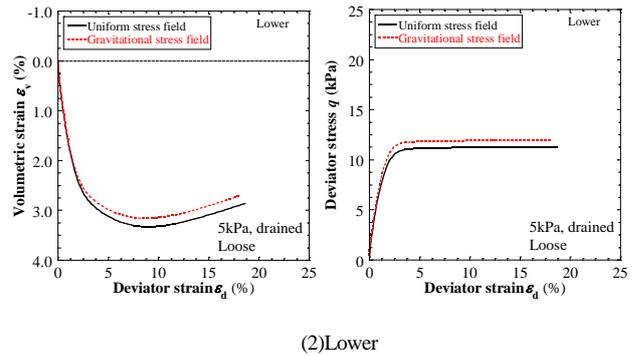


図14 解析結果 (Loose, drained, 3D)

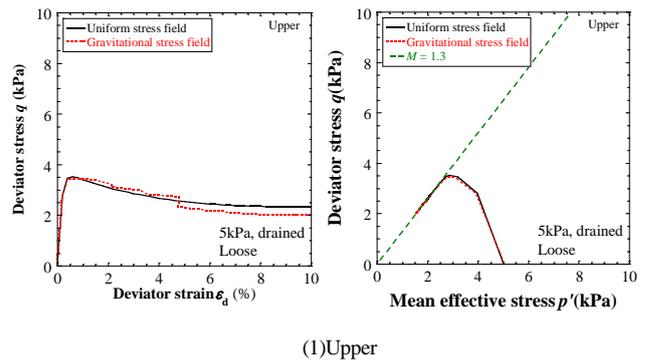
5.2.2 排水・非排水単調載荷三軸試験の解析結果

解析結果を図 14(1)(2)および図 15(1)(2)に示す。図 14 の (1), (2)はそれぞれ排水条件で緩詰の上端部・下端部の断面平均の体積ひずみ-軸ひずみ関係, 応力-ひずみ関係を示し, 図 15(1)(2)はそれぞれ非排水条件で緩詰の上端部・下端部の応力-ひずみ関係と有効応力経路を示す。

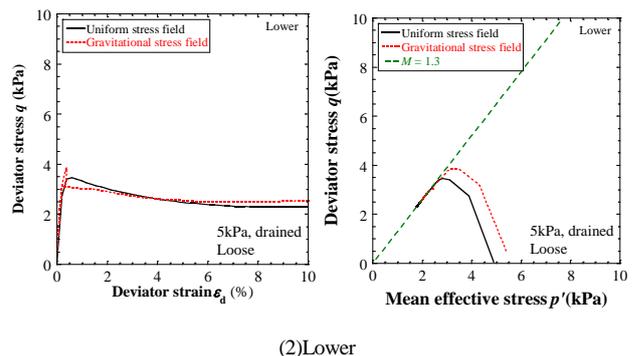
まず, 排水条件の解析結果について考察する。図 14(1)(2)より, 自重を考慮した場合と考慮しない場合を比較すると, 供試体上部および下部のどちらにおいても軸差応力のピーク, 応力-ひずみ関係および体積膨張-軸差ひずみ関係において差は見られない。

次に, 非排水条件について考察する。図 15(1)(2)より自重を考慮する場合と考慮しない場合を比較すると, 供試体上部および下部のどちらにおいても応力-ひずみ関係において同様の傾向を示す。また, 有効応力経路において供試体下部ほど荷初期の平均有効応力に違いが見られるが, 限界状態到達後は同様の挙動を示す。なお, 本稿では掲載していないが, 排水および非排水条件におけるこれらの傾向は中密な砂の場合でも同様である。

以上より, 単調載荷三軸試験の解析結果において自重を考慮した場合と考慮しない場合を比較すると, 供試体の位置によらず力学挙動に定量的および定性的に大きな差は見られないことがわかった。



(1)Upper



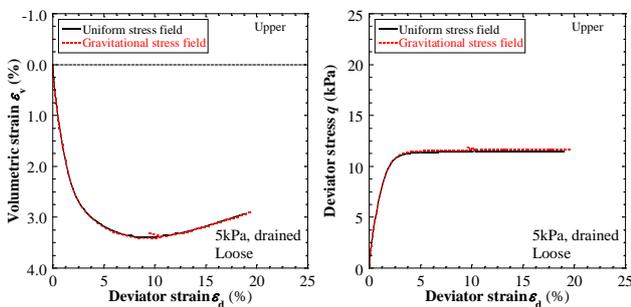
(2)Lower

図15 解析結果 (Loose, undrained, 3D)

6. 結論

本稿では, 十分に議論がされていない低拘束圧条件下の密度の異なる豊浦砂の排水・非排水単調載荷試験および繰返し三軸試験を実施した。また, 弾塑性構成式 Cyclic Mobility model を用いて実験結果の再現解析を行い, 砂の力学挙動の表現を試みた。さらに, 拘束圧が 5kPa の場合の供試体自重の影響を, 境界値問題として捉え, 土・水連成有限要素解析プログラム DBLEAVES を用いてその影響を検証した。

1) 排水条件の単調載荷三軸試験より, 緩い砂においても正のダイレイタンスを確認した。これより, 同じ間隙比において拘束圧が小さいほど砂がより密な挙動を示すことが考えられる。また, 軸ひずみが 20%でも体積膨張し続けていることから, 限界状態にはまだ到達していないと考えられるため, 今後せん断レンジを増やして検



(1)Upper

証していきたい。

- 2) 非排水繰返し三軸試験より、拘束圧が小さいほど両振幅ひずみの発達に要する載荷回数が多くなる傾向が得られた。
- 3) Cyclic Mobility model の発展則に新しいフィッティングパラメータ (α_1 , α_2) を導入し、感度分析を行った。その結果、繰返し三軸試験では α_2 の値が解析結果に大きな影響を与えることがわかった。また、単調載荷三軸試験では試験条件によらず試験結果よりも早く限界状態に達するため、限界状態の挙動は表現することができなかった。
- 4) 有限要素解析を用いた結果、非排水繰返し三軸試験では供試体の位置により、軸ひずみの発達度合いに多少の違いがあったため、全ての要素の平均値を要素データとみなして比較すると定量的には差があるが、定性的に有意な差は見られなかった。また、排水・非排水単調載荷三軸試験は緩詰供試体と中密供試体のどちらも供試体の位置によらず有意な差はなかった。以上より、拘束圧 5kPa における三軸試験は要素試験とみなすことができる。

参 考 文 献

- 1) 細谷旭弘：低拘束圧環境下の砂の力学特性に関する研究，第 26 回中部地盤工学シンポジウム，2014.
- 2) Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K.: Explanation of cyclic mobility of soils: approach by stress-induced anisotropy, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, pp635-648, 2007.
- 3) Ye, B., Ye, G., Zhang, F. and Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, Soils and Foundations, Vol.47, No.3, pp547-558, 2007.
- 4) Asaoka A: Consolidation of clay and compaction of sand, Keynote lecture, Proc. of the 12th Asian Regional Conference of Int. Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Singapore, Leung et al. (eds), Vol.2, 2003.
- 5) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, Int. J. of Solids and Structures, Vol.25, 917-945, 1989.