

# 低拘束圧環境下の砂の力学特性に関する研究

## Research on mechanical behavior of sand under lower confining pressure

細谷旭弘<sup>1</sup>, 長田辰弥<sup>2</sup>, 張鋒<sup>3</sup>

1 名古屋工業大学・大学院・創成シミュレーション工学専攻

2 名古屋市役所

3 名古屋工業大学・大学院・創成シミュレーション工学専攻・cho.ho@nitech.ac.jp

### 概要

地盤の液状化挙動を適切に評価するために、要素試験によってあらゆる拘束圧における土の力学挙動を把握し、数値解析を行う必要がある。現在、通常拘束圧（49kPa 以上）での要素試験が数多く実施されてきたが、低拘束圧条件下での試験はまだ十分とは言えない。本稿では、静的・動的三軸試験機を用いて初期拘束圧 5kPa から 20kPa という低拘束圧条件下における密度の異なる排水・非排水変位制御単調圧縮試験、及び非排水繰返し載荷試験を行い、砂の力学挙動を検証した。排水・非排水条件下で単調圧縮試験を行った結果、緩い状態においても通常拘束圧下での中密砂と類似する挙動が確認された。また、砂の粗密状態を判断する要因として、間隙比だけでなく、拘束圧にも依存することがわかった。さらに、これらの実験結果に基づき、過圧密・構造・異方性を統一的に考慮する弾塑性構成式 Cyclic Mobility (CM) モデルの改良を試みる

キーワード：繰返し三軸試験，砂質土，液状化

### 1. はじめに

地震時における地盤の挙動や液状化を評価するために、要素試験だけでなく、精巧な構成式に基づいた数値解析を用いることも重要と考えられる。しかしながら、液状化被害は表層地盤で発生したものが多く、現状では低拘束圧環境下における土の室内要素試験のデータがあるもの十分とはいえないため、従来の構成式では表層地盤の力学挙動を正確に評価できない可能性がある。そのため、地盤材料の変形特性を精度よく表現するためには、要素試験によって低拘束圧環境下（初期拘束圧 49kPa 以下）を含めた種々の拘束圧における土の力学挙動を正確に把握しなければならない。本研究では、要素試験、及び構成式の研究で未だ十分に議論されてない低拘束圧状態における砂地盤の力学特性に着目し、非排水繰返し三軸試験および排水・非排水変位制御三軸圧縮試験を実施した。また、この試験結果を受け、構成式の改良による低拘束圧環境下の砂の力学挙動の解釈を試みる。

### 2. 試験概要

本研究では、静的・動的三軸試験機を用いて非排水繰返し載荷試験、及び排水・非排水変位制御三軸圧縮試験を行った。試験機の概要を Figure.1 に示す。低拘束圧条件下で

の試験を行うにあたり、本試験機では側圧・背圧の制御に電気制御レギュレータを用いることで、圧力が 0.5kPa の単位で制御可能である。また、ロードセルも初期拘束圧の大きさに合わせて変更することで、低拘束圧条件下でも精度の良い計測（1/1000）が可能になっている。試験には Table.1 に示す物理特性を持つ豊浦砂を用いた直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体を使用している。供試体は水中落下法によって作製し、緩詰めの状態（ $Dr=20\sim40\%$ 程度）と、3層に分けて 15 回突き固めた中密な状態（ $Dr=50\sim70\%$ 程度）とした。また、本試験は低拘束圧で行うため、ラテックス製のメンブレン（厚さ 0.20mm）を使用している。

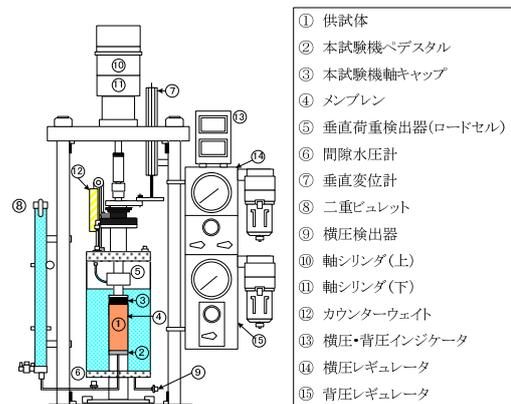


Figure 1 周辺機器及び三軸室の概要

Table 1 豊浦砂の物理特性

土粒子の比重 $G_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.65	均等係数	1.37
最大粒径 (mm)	0.425	最大密度 $\rho_{\max}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.647
最小粒径 (mm)	0.102	最小密度 $\rho_{\min}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.347
60%粒径 (mm)	0.281	最大間隙比 $e_{\max}$	0.975
30%粒径 (mm)	0.241	最小間隙比 $e_{\min}$	0.613
10%粒径 (mm)	0.206		

### 3. 試験結果

本稿では、非排水繰返し三軸試験、及び排水・非排水条件下における変位制御単調載荷三軸圧縮試験を行い、低拘束圧条件下における豊浦砂の液状化特性を含めた力学挙動を検証した。

#### 3.1 非排水繰返し三軸試験

緩い砂 ( $e=0.77\sim 0.93$  程度)、及び中密な砂 ( $e=0.67\sim 0.76$  程度)を対象に、種々の初期拘束圧 ( $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$ ,  $10\text{kPa}$ ,  $20\text{kPa}$ )、異なる応力比 ( $q/2\sigma_{m0}=0.15$ ,  $0.20$ ,  $0.25$ )において非排水繰返し三軸試験を行った。ここでの応力比は、偏差応力  $q$  を初期拘束圧  $\sigma_{m0}$  の2倍で除した値である。なお、載荷周波数は全試験で  $0.01\text{Hz}$  としている。

##### 3.1.1 緩い砂における試験結果

緩い砂における試験条件等を Table.2~Table.4、試験結果を Figure.2~Figure.4 に示す。ここで、試験条件にある  $DA=5\%$ 、 $DA=10\%$  は、それぞれ両振幅ひずみ幅が  $5\%$ 、 $10\%$  に至るまでの繰返し載荷回数を示す。また、試験結果のうち、[a]を有効応力経路、[b]を偏差応力~軸ひずみ関係としている。これらの図は見やすくするために、偏差応力  $q$  及び有効応力  $p'$  を初期拘束圧  $\sigma_{m0}$  で除し、同一グラフにプロットしたものである。

まず、各初期拘束での[a]の図より、低拘束圧であっても通常拘束圧と同様に、載荷するたびに有効応力が減少し、サイクリックモビリティ挙動を伴った液状化が確認できた。

次に、応力比の違いによる影響に着目すると、どの初期拘束圧においても応力比が小さくなるほど  $DA=5\%$ 、 $10\%$  の値が増えていることがわかる。これは、応力比が小さくなるほど供試体に対して働く応力が小さくなり、軸ひずみが発生しづらくなるためだと考えられる。初期拘束圧  $5\text{kPa}$  では、 $DA=5\%$ 、 $10\%$  まで至らない場合があり、(α)、(β)における[a]の図を見てみると、有効応力が原点を通らず液状化し、(β)における[b]の図を見てみると、軸ひずみが圧縮側に偏る結果となった。本来ならば、有効応力が原点を通り液状化するのだが、応力が非常に小さいため、メンブレンの引張に対する抵抗力が無視できなくなり、原点を通らない結果となった。

続いて、初期拘束圧の違いによる影響に着目すると、初期拘束圧  $5\text{kPa}$  では、 $DA=5\%$ 、 $10\%$  の値が他の低拘束圧より少し大きくなっている。これは、同じ間隙比において、

初期拘束圧が小さくなるほど砂が密な状態となるためだと考えられる。この現象は後ほどの静的載荷でも見られる。また、同じ応力比における各初期拘束圧の[a]の図を見てみると、同じ応力比では、初期拘束圧が小さくなるほど、載荷初期における有効応力減少幅が大きくなることが確認できた。

Table 2 緩い砂,  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$  における試験条件

	(α)	(β)	(γ)
Stress ratio $q/2\sigma_{m0}$	0.15	0.20	0.25
Initial void ratio $e$	0.77	0.79	0.85
$DA=5\%$	—	2.18	1.64
$DA=10\%$	—	—	2.24

Table 3 緩い砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$  における試験条件

	(α)	(β)	(γ)
Stress ratio $q/2\sigma_{m0}$	0.15	0.20	0.25
Initial void ratio $e$	0.88	0.91	0.91
$DA=5\%$	2.64	2.07	1.07
$DA=10\%$	4.12	4.12	2.69

Table 4 緩い砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$  における試験条件

	(α)	(β)	(γ)
Stress ratio $q/2\sigma_{m0}$	0.15	0.20	0.25
Initial void ratio $e$	0.85	0.84	0.92
$DA=5\%$	5.09	2.66	1.06
$DA=10\%$	7.11	4.71	2.15

##### 3.1.2 中密な砂における試験結果

中密な砂における試験条件等を Table.5~Table.7 に示す。試験結果を同じく Figure.2~Figure.4 に示す。

まず、各初期拘束圧における[a]の図より、中密な砂においても緩い砂と同様に、繰返し載荷とともに有効応力が減少し、サイクリックモビリティ挙動を伴った液状化が確認できた。しかし、初期拘束圧  $20\text{kPa}$ 、応力比  $0.15$  では液状化が発生しなかった。Table.6 を見てみると、初期拘束圧  $5\text{kPa}$  では、どの応力比においても  $DA=10\%$  は得られなかった。また、中密な砂においては、有効応力が原点を越えて液状化していることがわかる。これはメンブレンの引張り拘束力がもたらした結果と考えられる。

次に、応力比の違いによる影響に着目してみると、初期拘束圧  $5\text{kPa}$  以外では、応力比が小さくなるほど  $DA=5\%$ 、 $10\%$  の値が大きくなることわかる (Table.7, Table.8)。これは先ほど述べたように、応力比が小さいほど、供試体に働く応力が小さくなるためだと考えられる。

続いて、初期拘束圧の違いによる影響に着目してみると、初期拘束圧が大きくなるほど、 $DA=5\%$ 、 $10\%$  の値が大きくなっていることがわかる。また、初期拘束圧が小さくなるほど、載荷初期における有効応力減少幅が大きいことがわかる。

Table 5 中密な砂,  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$  における試験条件

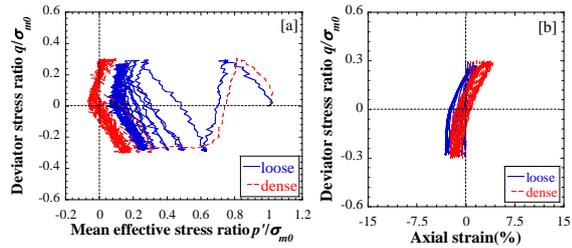
	( $\alpha$ )	( $\beta$ )	( $\gamma$ )
Stress ratio $q/2\sigma_{m0}$	0.15	0.20	0.25
Initial void ratio $e$	0.70	0.71	0.67
DA=5%	6.28	6.21	7.14
DA=10%	—	—	—

Table 6 中密な砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$  における試験条件

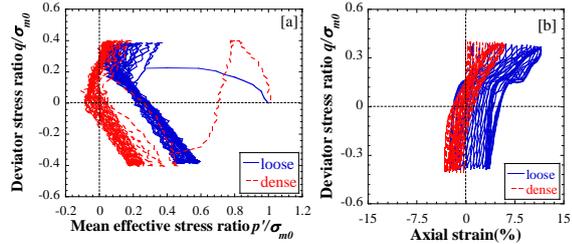
	( $\alpha$ )	( $\beta$ )	( $\gamma$ )
Stress ratio $q/2\sigma_{m0}$	0.15	0.20	0.25
Initial void ratio $e$	0.72	0.73	0.76
DA=5%	25.7	10.23	5.67
DA=10%	33.26	21.21	16.22

Table 7 中密な砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$  における試験条件

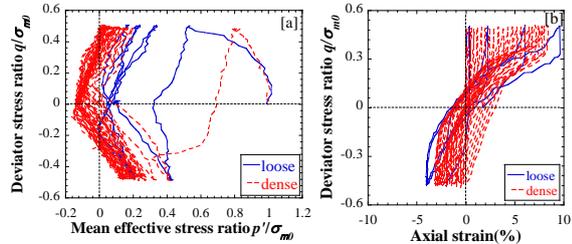
	( $\alpha$ )	( $\beta$ )	( $\gamma$ )
Stress ratio $q/2\sigma_{m0}$	0.15	0.20	0.25
Initial void ratio $e$	0.70	0.73	0.76
DA=5%	—	34.89	6.20
DA=10%	—	45.5	16.4



( $\alpha$ ) 応力比0.15

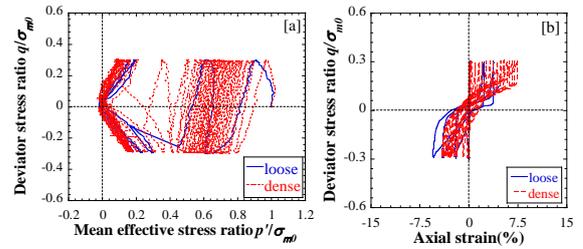


( $\beta$ ) 応力比0.20

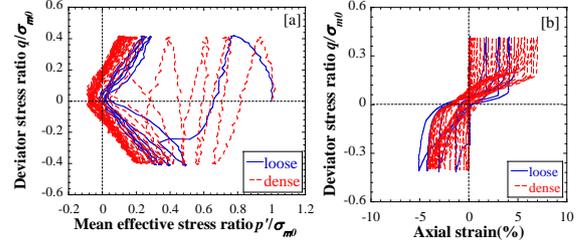


( $\gamma$ ) 応力比0.25

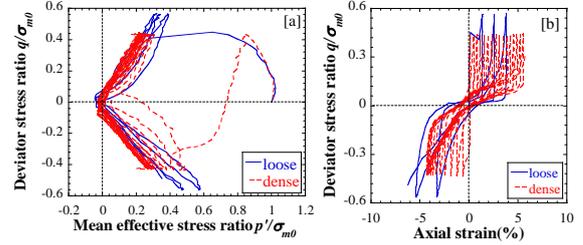
Figure 2  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$  における繰返し三軸試験結果



( $\alpha$ ) 応力比0.15

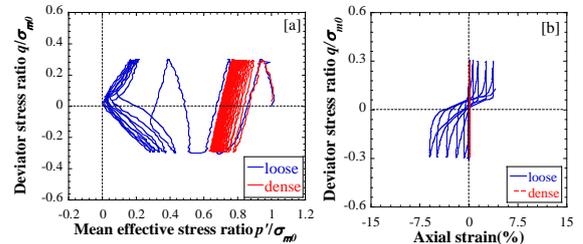


( $\beta$ ) 応力比0.20

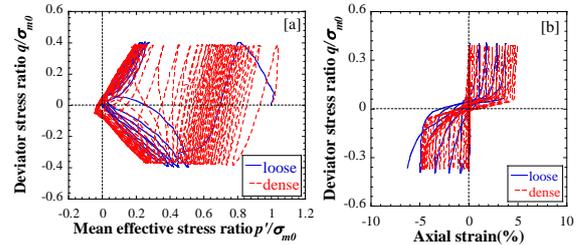


( $\gamma$ ) 応力比0.25

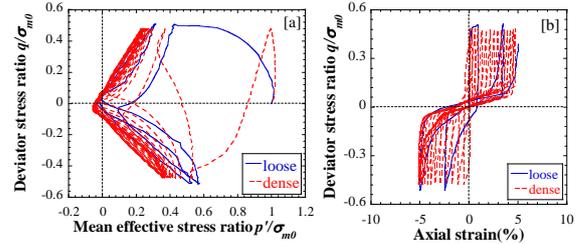
Figure 3  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$  における繰返し三軸試験結果



( $\alpha$ ) 応力比0.15



( $\beta$ ) 応力比0.20



( $\gamma$ ) 応力比0.25

Figure 4  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$  における繰返し三軸試験結果

### 3.2 排水・非排水単調載荷三軸圧縮試験

緩い砂 ( $e=0.83\sim0.91$  程度), 及び中密な砂 ( $e=0.71\sim0.77$  程度) を対象に, 種々の初期拘束圧 ( $\sigma_{m0}=5\text{kPa}, 10\text{kPa}, 20\text{kPa}$ ), 排水・非排水条件において三軸圧縮試験を行った. なお, 載荷変位速度は全試験で  $0.04\text{mm/min}$  としている.

#### 3.2.1 排水条件における試験結果

試験条件を Table.8, 応力比~偏差ひずみ関係の試験結果を Figure.5 に示す.

まず, この図をより, 中密な砂だけでなく, 緩い砂においても通常拘束圧の密な砂における特徴であるダイレイタンシーの発生が確認できた.

次に, 初期拘束圧の違いによる影響に着目してみると, 初期拘束圧が小さいほど, 応力比  $q/p'$  が大きく, 供試体が膨張していることがわかる. この現象は緩い砂, 中密な砂どちらも確認できる. これより, 非排水繰返し三軸試験でも述べたように, 同じ間隙比において, 初期拘束圧が小さいほど砂が密な状態になることがわかる.

続いて, 初期間隙比の違いによる影響に着目してみると, 中密な砂の方が緩い砂より応力比  $q/p'$  が大きく, せん断膨張がより顕著であることがわかる. これは, 中密な砂の方が緩い砂より間隙比が小さいため妥当である.

Table 8 排水条件における試験条件

	(1)		(2)		(3)	
	5kPa		10kPa		20kPa	
Confining stress $\sigma_{m0}$	5kPa		10kPa		20kPa	
Sand Conditions	loose	dense	loose	dense	loose	dense
Initial void ratio $e$	0.85	0.72	0.84	0.73	0.91	0.77

#### 3.2.2 非排水条件における試験結果

試験条件を Table.9, 有効応力経路の試験結果を Figure.6 に示す.

まず, この図をより, 緩い砂と中密な砂はいずれの場合においても, せん断初期に有効応力は減少するがやがて増加に転じ, 限界状態におけるせん断応力比ラインに沿って上昇し, 通常拘束圧における密な砂の挙動を示す.

次に, 初期拘束圧の違いによる影響に着目してみると, 初期拘束圧が大きいほど有効応力の曲線がゆるやかになっていることがわかる.

続いて, 初期間隙比の違いによる影響に着目してみると, 中密な砂の方が緩い砂より有効応力の減少が早く終わり, その後, 限界状態におけるせん断応力比ラインに沿って上昇していることがわかる.

Table 9 非排水条件における試験条件

	(1)		(2)		(3)	
	5kPa		10kPa		20kPa	
Confining stress $\sigma_{m0}$	5kPa		10kPa		20kPa	
Sand Conditions	loose	dense	loose	dense	loose	dense
Initial void ratio $e$	0.83	0.71	0.89	0.73	0.89	0.76

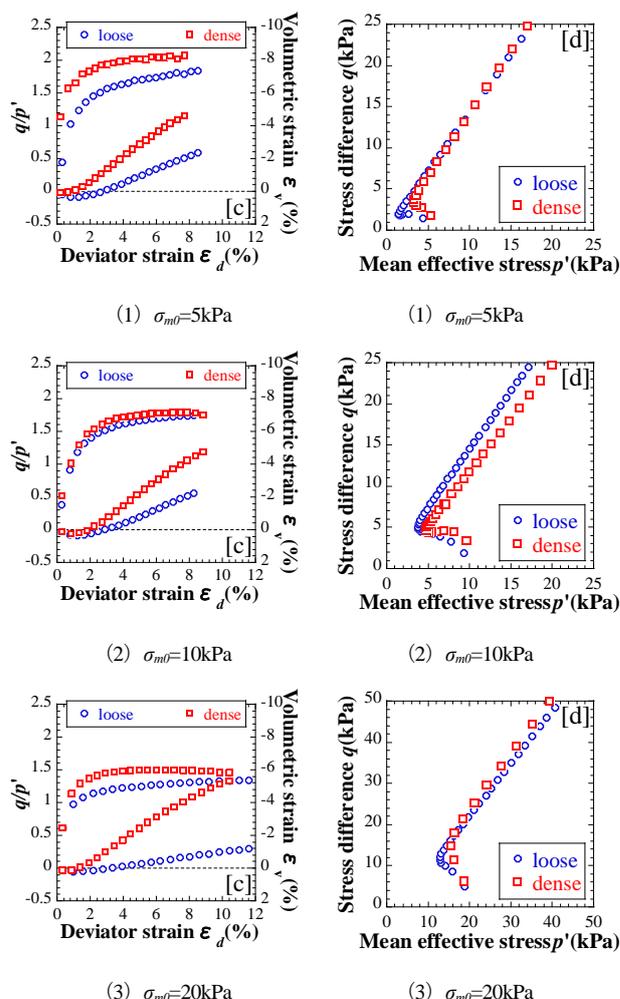


Figure 5 排水条件における試験結果

Figure 6 非排水条件における試験結果

## 4. 要素シミュレーション

低拘束圧環境下での試験結果に基づき, CM モデルによる要素シミュレーションを行い, モデルの改良を試みる. 良い構成式の条件としてパラメータを変えること無く, 種々の力学特性を表現できるかが重要であるため, 従来使われてきた材料パラメータを変えること無く解析を行う. 解析に用いた材料パラメータを Table.10 に示す.

Table 10 材料パラメータ

Material Parameters	Toyoura Sand
Compression index $\lambda$	0.05
Swelling index $\kappa$	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 $\nu$	0.300
Degradation parameters of over consolidation state $m$	0.010
Degradation parameters of structure $a$	0.500
Evolution parameters of anisotropy $b_r$	1.500

#### 4.1 新たな発展則の提案

従来の構成式による解析結果では、軸ひずみの発達が過大に評価されているため、過圧密の発展則  $R$  に新しくパラメータ  $\tau$  を導入し、その値を変化させることで解析結果にどのような影響を与えるかを検証した ( $\tau=1$  は従来通り)。変更した発展則は次式で表す。

$$dR = U \left\| d\varepsilon_{ij}^p \right\| + \left[ R \frac{\eta}{M} \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} \right] \quad (1)$$

$$U = -\frac{mM}{C_p} \left\{ \frac{(p/p_0)^2}{(p/p_0)^2 + 1} \right\} (-\ln R)^{\tau} \quad (2)$$

##### 4.1.1 パラメータ $\tau$ の導入と解析結果

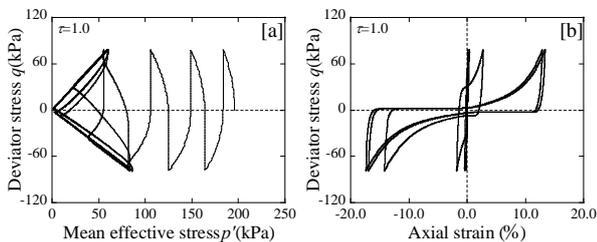
初期拘束圧 196kPa における  $\tau$  の値を変化させた砂の非排水繰返し三軸試験解析結果を Figure.7 に、状態変数を Table.11 に示す。(このとき、応力比  $q/2\sigma_{m0}=0.20$ )

Figure.7 の[a]の図より、 $\tau$  の値が大きくなるほど液状化に至るまでの繰返し載荷回数が多くなり、液状化後のサイクリックモビリティ挙動時に応力経路が原点から離れていくことが確認できた。また、[b]の図より、 $\tau$  の値が大きくなるほど軸ひずみの発達が小さくなることわかる。

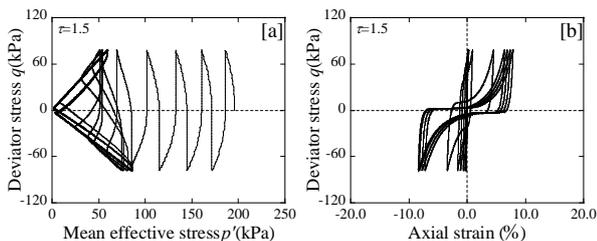
以上より、パラメータ  $\tau$  を導入することで、液状化に至るまでの繰返し載荷回数や軸ひずみの発達速度の抑制など、定量的な表現を行えることが確認できた。

Table 11  $\sigma_{m0}=196\text{kPa}$  における  $\tau$  を変えた繰返し三軸試験の状態変数

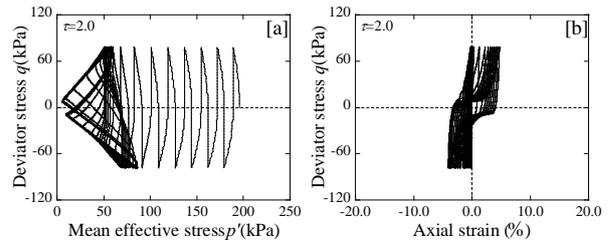
State variables	(i)	(ii)	(iii)
Degradation parameter of over consolidation state $\tau$	1.0	1.5	2.0
Initial void ratio $e_0$	0.732	0.732	0.732
Initial degree of structure $R_0^*$	0.149	0.149	0.149
Initial degree of over consolidation OCR	73.40	73.40	73.40
Initial anisotropy $\zeta_0$	0.00595	0.00595	0.00595



(i)  $\tau=1.0$



(ii)  $\tau=1.5$



(iii)  $\tau=2.0$

Figure 7  $\sigma_{m0}=196\text{kPa}$  における  $\tau$  を変えた繰返し三軸試験解析結果

#### 4.2 新たな発展則を導入した要素シミュレーション

本節では、新たな発展則を導入した構成式での要素シミュレーションを行い、実際にどの程度構成式が改善できたのか、また問題点・課題を挙げ、今後の方針について示す。なお、Table.10 の値に加え、 $\tau=1.5$  も用いた。

##### 4.2.1 低拘束圧における非排水繰返し三軸試験の表現

非排水繰返し三軸試験における状態変数を Table.12, Table.13, 解析結果を Figure.8~Figure.13 に示す。

まず、緩い砂における解析結果を検討していく。Figure.8~Figure.10 の[a]の図より、従来の構成式での解析結果 (図中では示していないが) よりも軸ひずみの発生が大幅に抑制されているのがわかる。これより、緩い砂での解析結果においても初期拘束圧の違いによる粗密状態の変化が評価できるようになったと言える。

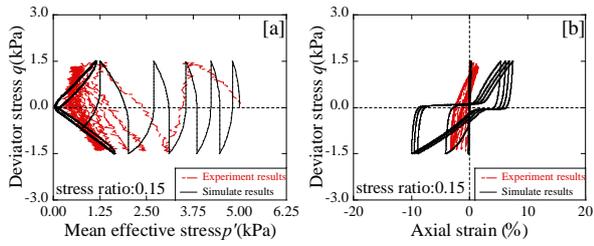
次に、中密な砂における解析結果を検討する。Figure.11~Figure.13 の[b]の図より、初期拘束圧 20kPa では実験値を定性的にも定量的にもよく表現できていることがわかる。しかし、初期拘束圧 5kPa, 10kPa では過剰に軸ひずみを抑制してしまい、実験値よりも小さくなってしまった。また、[a]の図を見ていると、初期拘束圧が小さいほど過圧密比が大きくなる影響でサイクリックモビリティ挙動時に応力経路が原点を通りにくくなっていることが確認できる。

Table 12 緩い砂における非排水繰返し三軸試験解析の状態変数

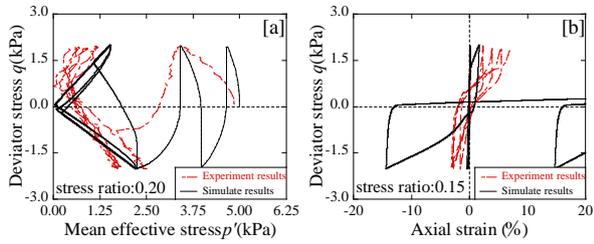
State variables	( $\alpha$ )	( $\beta$ )	( $\gamma$ )
Initial mean effective stress $\sigma_{m0}$	5.0	10.0	20.0
Initial void ratio $e_0$	0.91	0.89	0.89
Initial degree of structure $R_0^*$	0.292	0.293	0.233
Initial degree of over consolidation OCR	33.6	33.2	18.4
Initial anisotropy $\zeta_0$	1.34E-02	1.24E-03	9.63E-05

Table 13 中密な砂における非排水繰返し三軸試験解析の状態変数

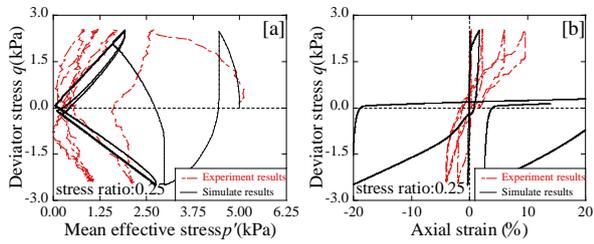
State variables	( $\alpha$ )	( $\beta$ )	( $\gamma$ )
Initial mean effective stress $\sigma_{m0}$	5.0	10.0	20.0
Initial void ratio $e_0$	0.75	0.74	0.74
Initial degree of structure $R_0^*$	0.621	0.621	0.538
Initial degree of over consolidation OCR	608.1	498.7	216.3
Initial anisotropy $\zeta_0$	1.15E-02	2.06E-03	2.15E-04



(α) 応力比0.15

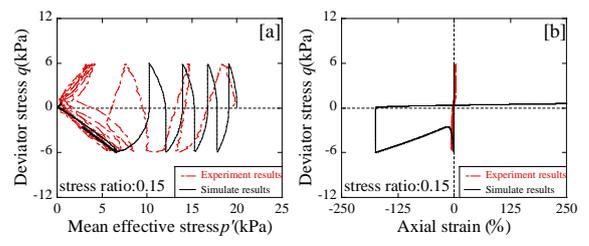


(β) 応力比0.20

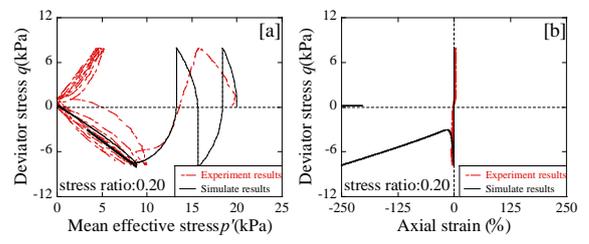


(γ) 応力比0.25

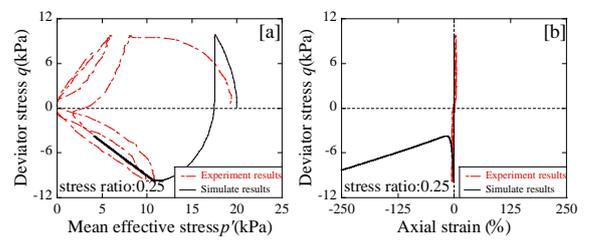
Figure 8 緩い砂,  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$ における繰返し三軸試験解析結果



(α) 応力比0.15

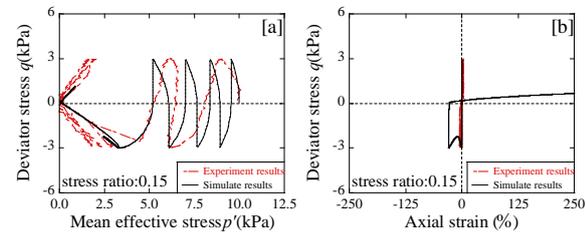


(β) 応力比0.20

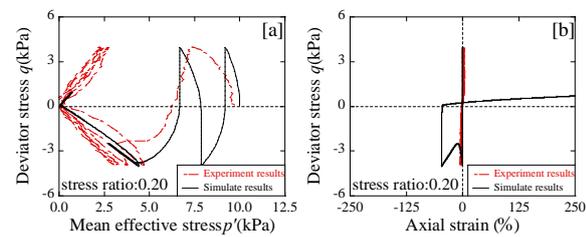


(γ) 応力比0.25

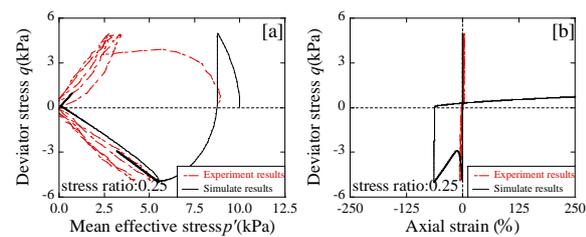
Figure 10 緩い砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$ における繰返し三軸試験解析結果



(α) 応力比0.15

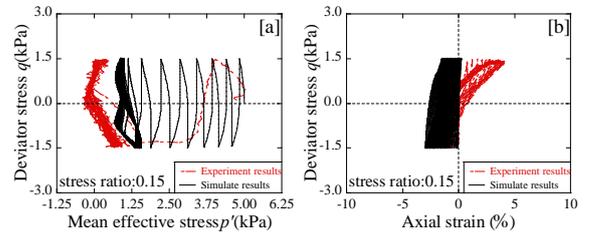


(β) 応力比0.20

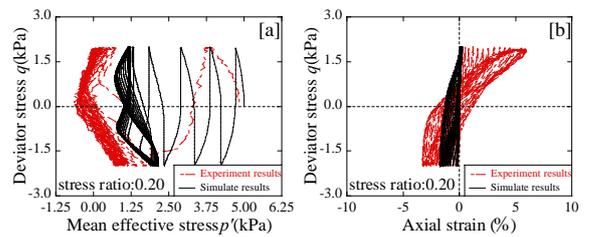


(γ) 応力比0.25

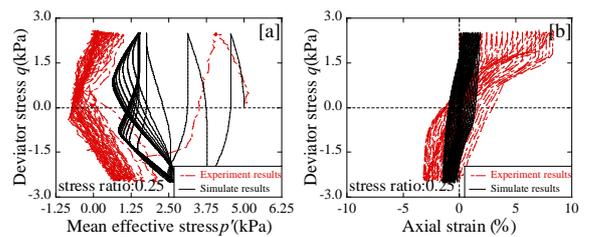
Figure 9 緩い砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$ における繰返し三軸試験解析結果



(α) 応力比0.15

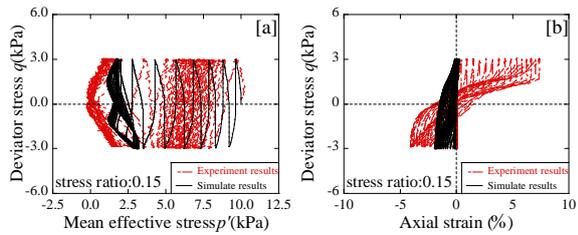


(β) 応力比0.20

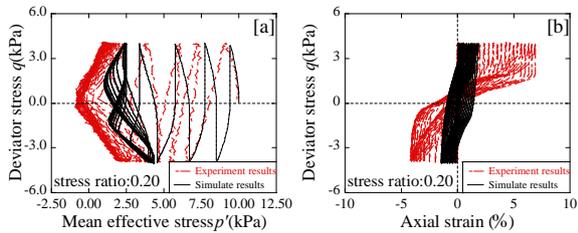


(γ) 応力比0.25

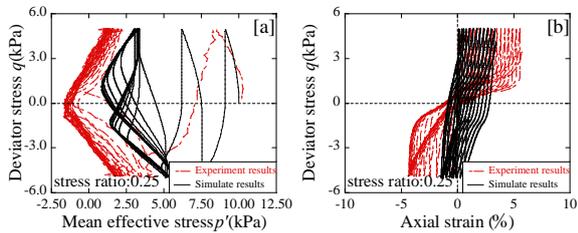
Figure 11 中密な砂,  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$ における繰返し三軸試験解析結果



(α) 応力比0.15

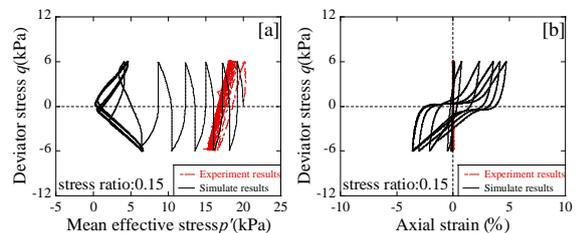


(β) 応力比0.20

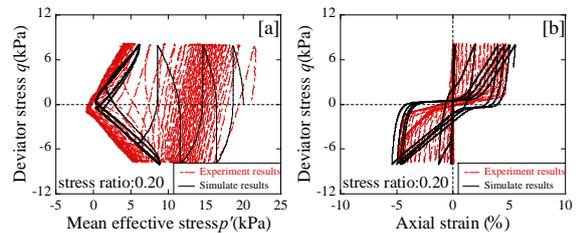


(γ) 応力比0.25

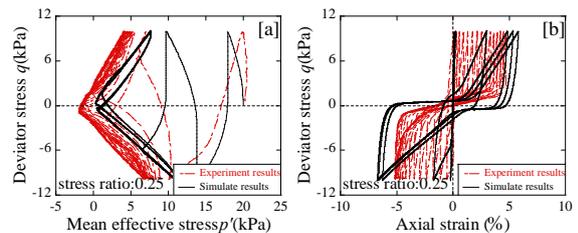
Figure 12 中密な砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$  における繰返し三軸試験解析結果



(α) 応力比0.15



(β) 応力比0.20



(γ) 応力比0.25

Figure 13 中密な砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$  における繰返し三軸試験解析結果

#### 4.2.2 低拘束圧における単調荷重三軸圧縮試験の表現

三軸圧縮試験における解析の状態変数を Table.14, Table.15 解析結果を Figure.14~Figure.17 に示す.

まず, 排水三軸圧縮試験の解析結果について検討する. 緩い砂に着目すると, Figure.14 の[c-1]の図より, 拘束圧の違いによる降伏応力の違いが定性的に表現できており, [c-2]の図より, 正のダイレイタンシーの表現ができていないまでも, 従来の構成式での解析結果よりも負のダイレイタンシーが発生しておらず, 実験値に近づいていることがわかる. これは, 中密な砂においても同様である.

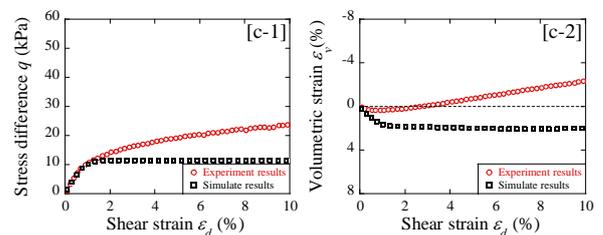
次に, 非排水三軸圧縮試験の解析結果について検討する. 緩い砂に着目すると, Figure.16 より, 初期拘束圧が小さくなるほど限界状態に達するまでの力学挙動だけでなく, 限界状態後の力学挙動もよく表現できていることがわかる. また, 中密な砂に着目すると, Figure.17 より, 有効応力経路が定性的にも定量的にもよく表現できていることがわかる.

Table 14 緩い砂での排水・非排水三軸圧縮試験解析の状態変数

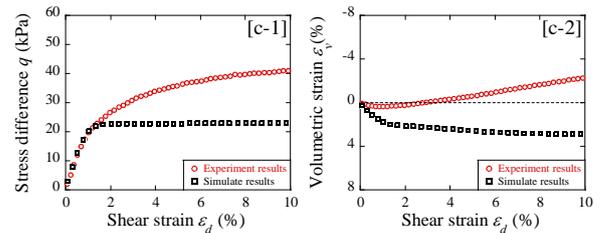
State variables	(1)	(2)	(3)
Initial mean effective stress $\sigma_{m0}$	5.0	10.0	20.0
Initial void ratio $e_0$	0.86	0.88	0.90
Initial degree of structure $R_0^*$	0.255	0.198	0.147
Initial degree of over consolidation OCR	154.05	62.67	24.08
Initial anisotropy $\zeta_0$	2.60E-02	5.89E-04	2.71E-04

Table 15 中密な砂での排水・非排水三軸圧縮試験解析の状態変数

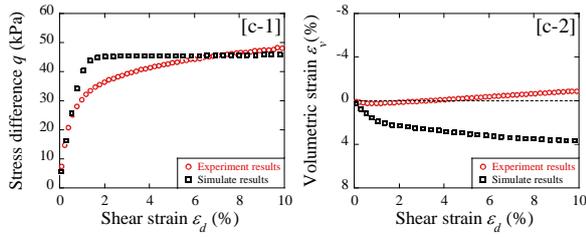
State variables	(1)	(2)	(3)
Initial mean effective stress $\sigma_{m0}$	5.0	10.0	20.0
Initial void ratio $e_0$	0.75	0.73	0.76
Initial degree of structure $R_0^*$	0.427	0.427	0.311
Initial degree of over consolidation OCR	1119.18	828.71	237.42
Initial anisotropy $\zeta_0$	1.56E-02	9.66E-04	2.83E-04



(1)  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$

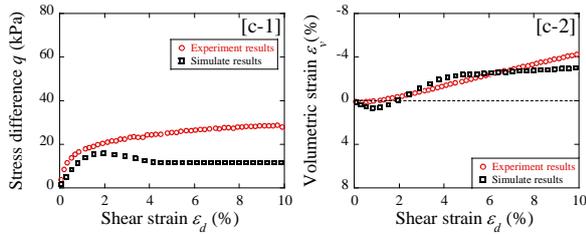


(2)  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$

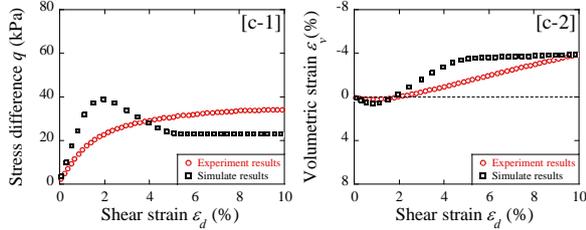


(3)  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$

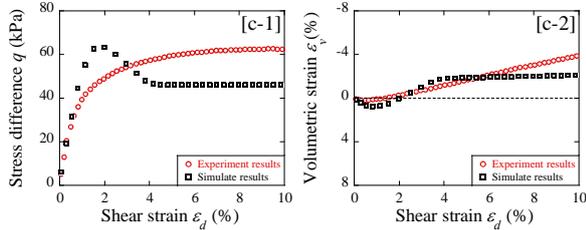
Figure 14 緩い砂, 排水条件での三軸圧縮試験解析結果



(1)  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$

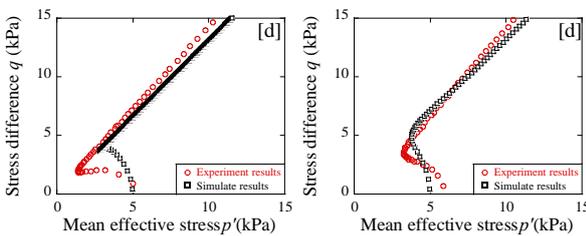


(2)  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$

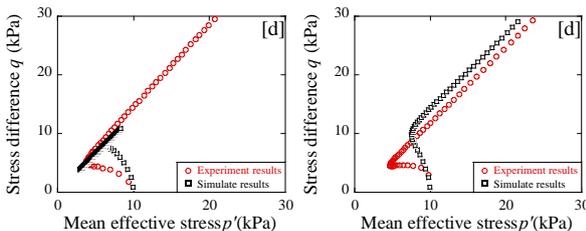


(3)  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$

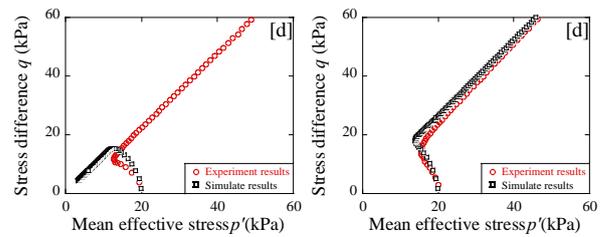
Figure 15 中密な砂, 排水条件での三軸圧縮試験解析結果



(1)  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$



(2)  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$



(3)  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$

Figure 16 緩い砂, 非排水条件 Figure 17 中密な砂, 非排水条件  
三軸圧縮試験解析結果

## 5. まとめ

- 1) 排水・非排水三軸圧縮試験を行った結果, 緩い砂においても通常拘束圧や中密な砂と同様にダイレイタンスの発生が確認できた. これは, 砂の粗密状態を判断する際, 間隙比だけでなく, 拘束圧も関わっていることがわかった.
- 2) 非排水繰返し三軸試験を行った結果, 緩い砂においては, メンブレンの引張に対する抵抗力が働き, 軸ひずみが圧縮側に偏ることが確認できた. 中密な砂においては, 初期拘束圧が小さいと負の有効応力(約1kPa)が発生することがわかり, 薄いメンブレンでもその影響を完全に無くすることができない.
- 3) CM モデルの過圧密状態変数  $R$  の発展則に新しいパラメータ  $\tau$  を加え, その影響を検証した. その結果,  $\tau$  の値が大きいほど液状化に至るまでの繰返し載荷回数が多くなり, サイクリックモビリティ挙動時にせん断ひずみを抑えることが確認でき, 構成式のパフォーマンスを改善した.
- 4) 例えば,  $\tau$  の値を調整することで, 非排水繰返し三軸試験の解析では緩い砂においても軸ひずみの発達速度が抑えられ, 実験値に近づけることが可能となった. 排水・非排水三軸圧縮試験の解析では, 従来の構成式での解析結果よりも実験値に近づき, 定性的にも定量的にも改善された. しかし, 初期拘束圧が小さいほど載荷初期の有効応力減少幅が大きいことや初期拘束圧の違いによる液状化に至るまでの繰返し載荷回数の変化等, 低拘束圧特有の力学挙動がまだうまく説明できていないため, 表現できるようにさらなる研究を進めていきたい.

## 参考文献

- 1) Ye, B. (2007): Experiment and Numerical Simulation of Repeated Liquefaction -Consolidation of Sand, Doctoral Dissertation, Gifu University.
- 2) Zhang, F., Ye, B. and Ye, G. L. (2011) : Unified description of sand behavior, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, Vol.5, No.2, 121-150.
- 3) 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.