

# 低拘束圧における豊浦砂の力学挙動の実験的研究

## Experimental research on the mechanical behavior of Toyoura sand under low confining pressure

長田辰弥<sup>1</sup>, 加藤守人<sup>2</sup>, 森河由紀弘<sup>1</sup>, 張鋒<sup>3</sup>

1 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻

2 青葉工業株式会社

3 名古屋工業大学・高度防災工学センター・E-mail : cho.ho@nitech.ac.jp

### 概要

液状化のメカニズムに関する実験的・解析的研究が数多くなされており、液状化を表現する各種要素試験やそれに基づく構成式の提案、数値解析手法の開発も徐々に増えている。しかし、土の力学挙動、特に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ためには、種々の拘束圧における土の力学挙動を正確に把握することが必要不可欠である。そこで、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（地表面付近の応力状態）における砂地盤の力学特性に着目し、静的・動的三軸試験を実施した。実験では、種々の拘束圧の下、応力振幅や載荷速度などが砂の力学挙動に与える影響について、非排水繰返し載荷試験および排水・非排水変位制御単調圧縮試験で検証した。

キーワード：繰返し三軸試験、低拘束圧、砂質土

### 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徐々に増えてきている。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。本稿では、初期拘束圧が 5kPa から 20kPa という低拘束圧条件下での砂の非排水繰返し載荷試験、及び排水・非排水変位制御単調圧縮試験を行い、砂の力学挙動を検証した。

### 2. 試験概要

本研究では、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・非排水変位制御単調圧縮試験を行った。試験機の概要を Fig. 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・背圧の制御にレギュレータを用いることで、載荷圧力が 1kPa の単位で制御可能になっている。また、ロードセルの定格容量も小さいもの (0.1kN) を使用しており、低拘束圧条件下でも精度の良い計測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成し、緩詰め状態 ( $Dr=20\sim30\%$ 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、通常のものより柔らかいラテックス製のメンブレン (厚さ 0.15mm) を使用している。

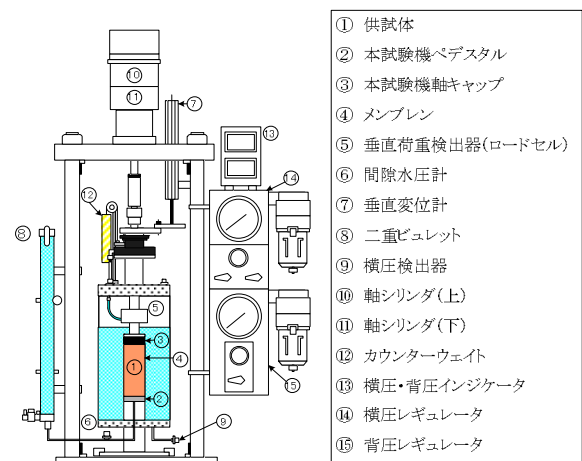


Fig. 1 周辺機器及び三軸室の概要

Table. 1 豊浦砂の物理特性

土粒子の比重 $G_s(g/cm^3)$	2.65	均等係数	1.37
最大粒径 (mm)	0.425	最大密度 $\rho_{max}(g/cm^3)$	1.647
最小粒径 (mm)	0.102	最小密度 $\rho_{min}(g/cm^3)$	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、緩い砂や中密な砂を用いて非排水繰返し載荷試験を行うことにより、初期拘束圧の影響と初期間隙比の影響を調べるとともに、排水条件下、及び非排水条件下における変位制御単調圧縮試験を行った。

#### 3.1 非排水繰返し載荷試験

##### 3.1.1 緩い砂における非排水繰返し載荷試験

間隙比が  $e=0.79\sim 0.93$  程度の緩い砂を対象に、種々の初期拘束圧 (98kPa, 20kPa, 10kPa, 5kPa) の条件下で、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載荷試験を行った。試験条件等を Table. 2~Table. 5 に示す。ここでの応力比は、偏差応力  $q$  を初期拘束圧  $p_0$  の2倍で除した値であり、また表中の DA=5%, DA=10% はそれぞれ両振幅ひずみが 5%, 10% に至るまでの繰返し回数を示す。なお、載荷周波数は全試験で 0.01Hz としている。

Table. 2 試験条件 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=98\text{kPa}$ )

	(i)	(ii)	(iii)
初期拘束圧 (kPa)	98	98	98
応力比	0.15	0.20	0.25
間隙比 $e$	0.93	0.93	0.91
DA=5%	19.5	2.5	1.6
DA=10%	23.5	4.7	2.7

Table. 3 試験条件 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$ )

	(i)	(ii)	(iii)
初期拘束圧 (kPa)	20	20	20
応力比	0.15	0.20	0.25
間隙比 $e$	0.85	0.84	0.92
DA=5%	5.1	2.7	1.1
DA=10%	7.1	4.7	2.2

Table. 4 試験条件 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$ )

	(i)	(ii)	(iii)
初期拘束圧 (kPa)	10	10	10
応力比	0.15	0.20	0.25
間隙比 $e$	0.88	0.91	0.91
DA=5%	2.6	2.1	1.1
DA=10%	4.1	4.1	2.7

Table. 5 試験条件 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$ )

	(i)	(ii)	(iii)
初期拘束圧 (kPa)	5	5	5
応力比	0.15	0.20	0.25
間隙比 $e$	0.84	0.87	0.79
DA=5%	3.3	1.1	1.7
DA=10%	×	2.7	4.2

Fig. 2~Fig. 5 に異なる初期拘束圧における非排水繰返し載荷試験結果を示す ([a]: 有効応力経路, [b]: 偏差応力~軸ひずみ)。[a] 図に示す有効応力経路より、低拘束圧条件下であっても通常拘束圧 ( $\sigma_{m0}=98\text{kPa}$ ) と同様に、繰返し載荷により有効応力が減少し、サイクリックモビリティを伴った液状化現象が確認できた。

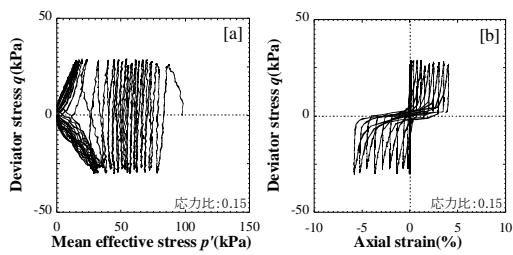
せん断応力比に着目すると、全てのケースにおいてせん断応力比が大きくなるにつれて、液状化 ( $p'=0$ ) に至るまでの繰返し載荷回数や、Table. 2~Table. 5 に示す DA=5%, DA=10% までの繰返し載荷回数が減少する傾向にある。

ここで、Fig. 5(i) ( $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$ ,  $q/2\sigma_{m0}=0.15$ ) に示す [a] 図: 有効応力経路に着目すると、繰返し載荷に伴い平均有効応力が減少するものの液状化 ( $p'=0$ ) には至っていない。また、[b] 図: 軸ひずみ~偏差応力関係においても、軸ひずみは 5% 以上発達せず、同じループを描いていることが分かる。これについては、二つの原因が考えられる。一つ目は、初期拘束圧がもともと小さい故に、有効応力が小さくなるにつれて、メンブレンの剛性が土の剛性に比べ、相対的に無視できない程大きくなってしまったため、メンブレンのご剛性が影響したと考えられる。二つ目は、緩い砂においても、拘束圧が非常に小さいため、砂が密な状態になっていることも事実であり(後ほどの静的載荷でこの現象が再度確認できる)、砂の本来の特性であることも考えられる。今後試験の数を増やしてこの現象を確認する必要がある。

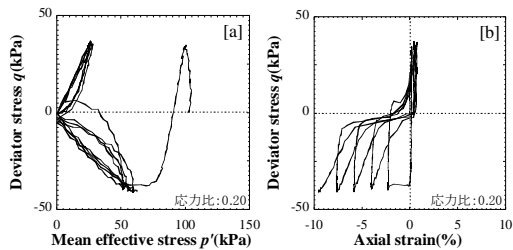
次に初期拘束圧の違いに着目すると、Fig. 2 (通常拘束圧)、Fig. 3 (低拘束圧) に示す [a] 図: 有効応力経路より、初期拘束圧が低拘束圧 (20kPa) の場合、載荷初期における有効応力減少幅が大きい傾向にある。また、Table. 2, Table. 3 に示すように応力比 0.15 においては液状化に至るまでの繰返し載荷回数 (DA=5%, DA=10%) までの繰返し載荷回数が格段に小さくなっている。

Fig. 3~Fig. 5 の [a] 図より、低拘束圧条件下 (5kPa~20kPa) の場合、初期拘束圧に因らず有効応力経路に大きな違いは見られなかった。これは、通常拘束圧と比較して結果の違いが顕著であることとは異なり、初期拘束圧が低拘束圧の範囲 (5kPa~20kPa) では、初期拘束圧が有効応力経路に及ぼす影響は小さいことが確認された。

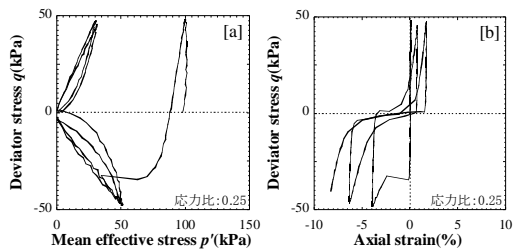
Fig. 2 [b], Fig. 5 [b] 図の軸ひずみ~偏差応力関係を比較すると、初期拘束圧 98kPa では応力比 0.20, 0.25 において三軸圧縮側にひずみが出にくく、伸張側のひずみが大きく発生している傾向にあるが、初期拘束圧 5kPa の場合では伸張側のひずみが出にくく、圧縮側のひずみが大きく発生している傾向にあることも確認された。



(i) 応力比0.15

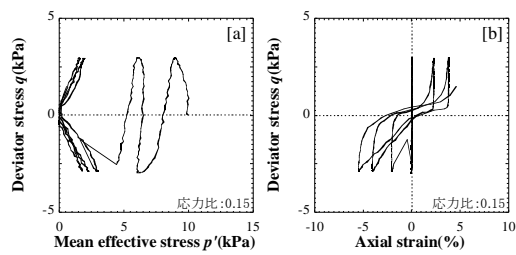


(ii) 応力比0.20

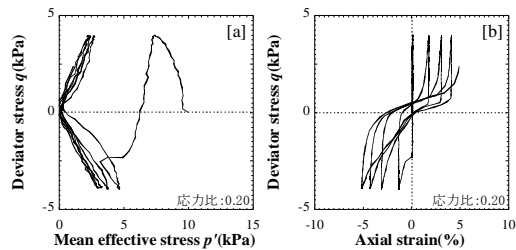


(iii) 応力比0.25

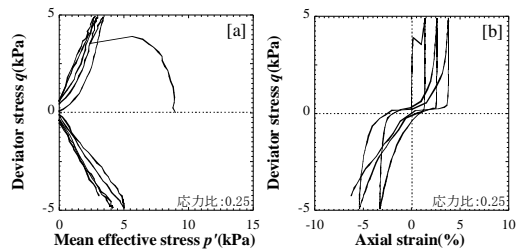
Fig. 2 非排水繰返し載荷試験 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=98\text{kPa}$ )



(i) 応力比0.15

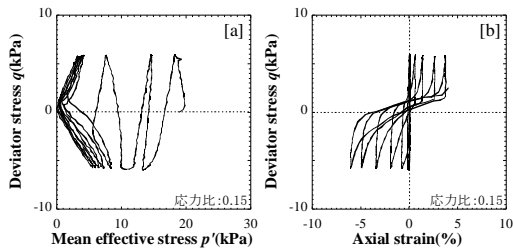


(ii) 応力比0.20

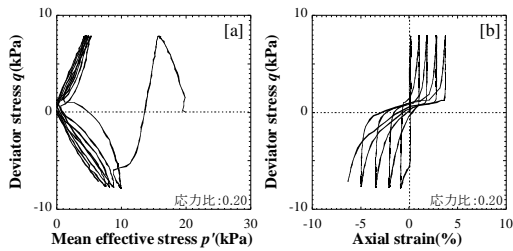


(iii) 応力比0.25

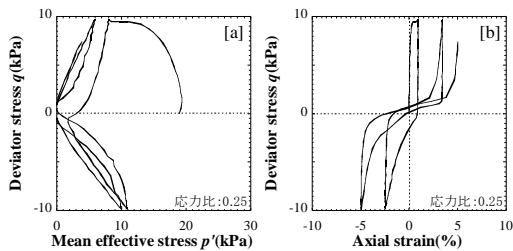
Fig. 4 非排水繰返し載荷試験 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$ )



(i) 応力比0.15

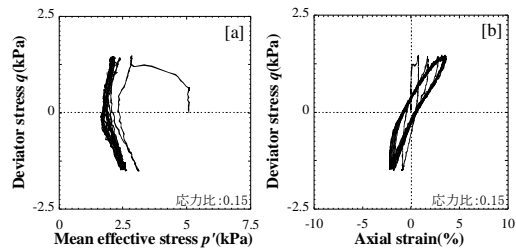


(ii) 応力比0.20

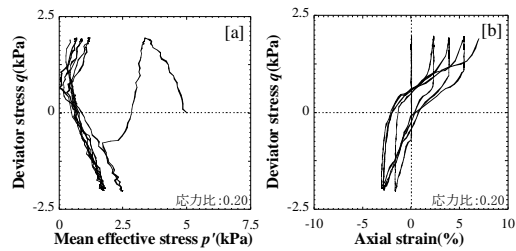


(iii) 応力比0.25

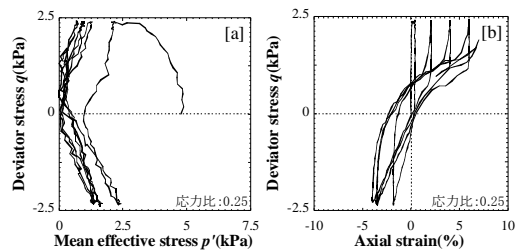
Fig. 3 非排水繰返し載荷試験 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$ )



(i) 応力比0.15



(ii) 応力比0.20



(iii) 応力比0.25

Fig. 5 非排水繰返し載荷試験 (緩い砂,  $\sigma_{m0}=5\text{kPa}$ )

### 3.1.2 中密な砂における非排水繰返し载荷試験

間隙比が  $e=0.73\sim 0.76$  程度の中密な砂を対象に、種々の初期拘束圧 (20kPa, 10kPa) の条件下で、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载荷試験を行った。試験条件等を Table. 6~Table. 7 に示す。

Table. 6 試験条件 (中密な砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$ )

	(i)	(ii)	(iii)
初期拘束圧 (kPa)	20	20	20
応力比	0.15	0.20	0.25
間隙比 $e$	0.74	0.73	0.76
DA=5%	×	34.9	6.2
DA=10%	×	45.5	16.4

Table. 7 試験条件 (中密な砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$ )

	(i)	(ii)	(iii)
初期拘束圧 (kPa)	10	10	10
応力比	0.15	0.20	0.25
間隙比 $e$	0.75	0.75	0.76
DA=5%	×	×	5.7
DA=10%	×	×	16.2

Fig. 6~Fig. 7 に異なる初期拘束圧における非排水繰返し载荷試験結果を示す。[a] 図に示す有効応力経路より、中密な砂であっても緩い砂と同様に、繰返し载荷により有効応力が減少し、サイクリックモビリティを伴った液状化現象が確認できた。また、応力比が小さい場合は有効応力が減少しきらず、液状化に至っていないことが分かる。

初期拘束圧の違いに着目すると、中密な砂においては初期拘束圧が小さいほどサイクリックモビリティを伴う液状化が発生しにくくなる現象が確認された (特に応力比 0.20 の場合)。これは、同じ間隙比のもとで、拘束圧が小さければ砂がより密な状態であることが原因と考えられる。ただし、Table. 6~Table. 7 に示す DA=5%, DA=10% の値や Fig. 6(iii)~Fig. 7(iii) より、初期拘束圧の影響が少ないケースもあるため、更なる検証が必要だと考えられる。

次に初期間隙比の違いに着目し、Fig. 3(iii) と Fig. 6 (iii) に示す初期拘束圧 20kPa, 応力比 0.25 における初期間隙比の影響を比較した。比較図を Fig. 8, Table. 8 に示す。ここで、(a)図は有効応力経路の無次元量、(b)図は偏差応力の無次元量と軸ひずみの関係を示す。(a)図から、初期間隙比が大きいほど载荷初期における有効応力減少幅が大きいことがわかる。また、Table. 8 に示す DA=5%, DA=10% の値から、初期間隙比が大きいほどひずみが発達しやすく、サイクリックモビリティを伴う液状化が発生しやすいことがわかる。しかし、Fig. 8(a)に示す中密な砂の非排水繰返し载荷試験において、サイクリックモビリティに入ると時には有効応力の値がマイナスになることが数回の同様の実験で確認されている。その解釈は現段階ではまだできていないが、今後さらなる実験を重ねてその再現性を確認し、解釈できるように研究していきたい。

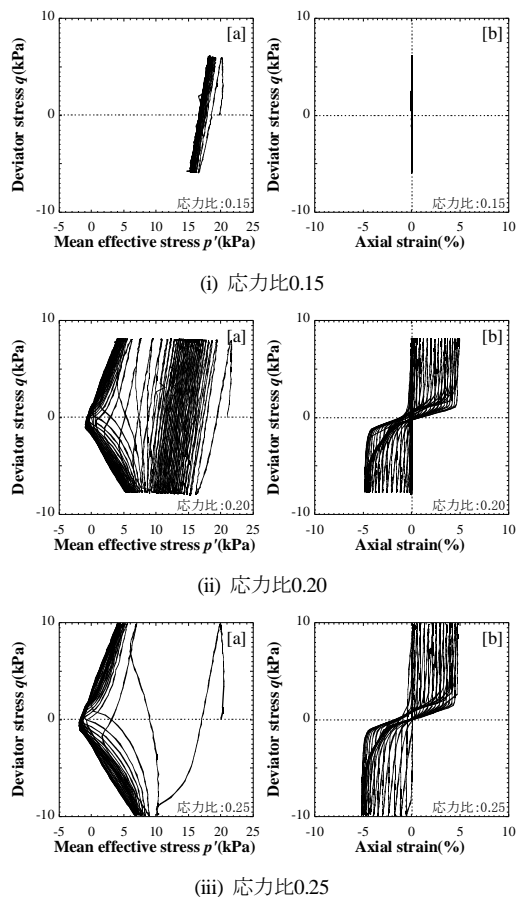


Fig. 6 非排水繰返し载荷試験 (中密な砂,  $\sigma_{m0}=20\text{kPa}$ )

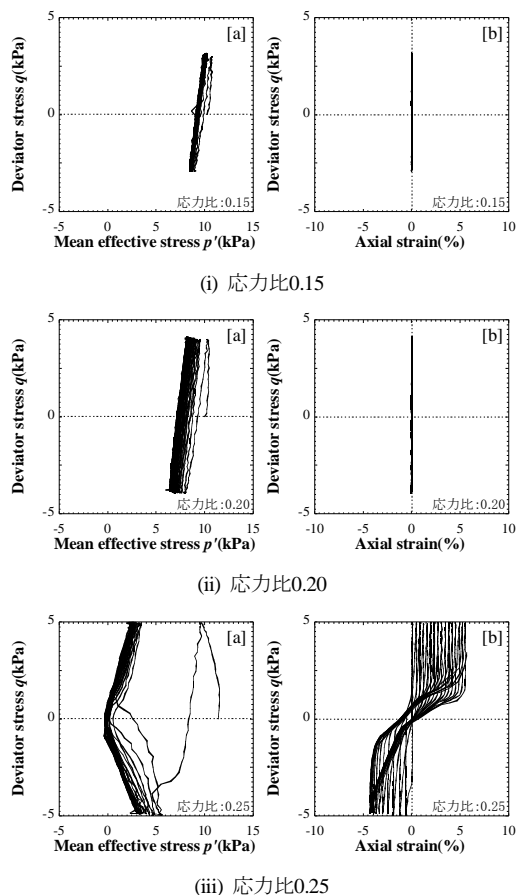
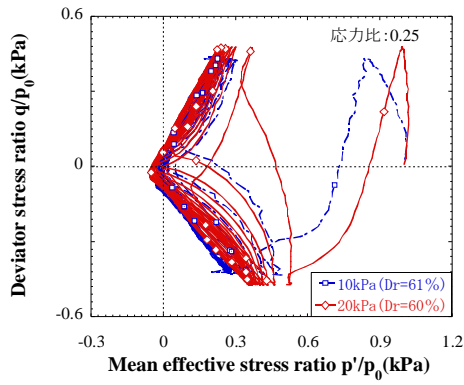
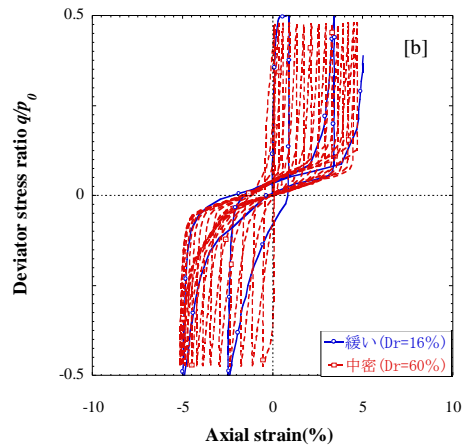


Fig. 7 非排水繰返し载荷試験 (中密な砂,  $\sigma_{m0}=10\text{kPa}$ )



(a) 有効応力経路



(b) 偏差応力～軸ひずみ関係

Fig. 8 初期拘束圧20kPaでの初期間隙比の異なる試験結果

Table. 8 試験条件 (初期間隙比の影響)

間隙比 e	0.92	0.76
DA=5%	1.1	6.2
DA=10%	2.2	16.4

### 3.2 変位制御単調圧縮試験

緩い砂、及び中密な砂の異なる初期拘束圧での排水・非排水単調載荷試験（変位制御）を行った。載荷条件は全試験において載荷変位速度を0.04%/minとした。以下に試験の考察を述べる。

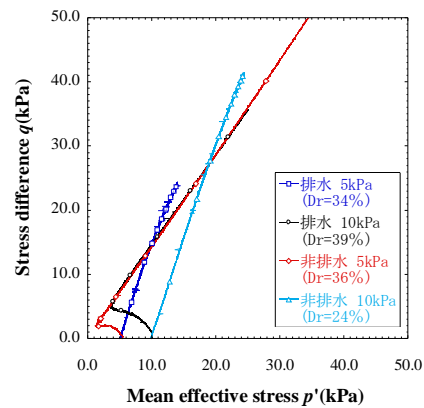
#### 3.2.1 初期拘束圧の影響

試験条件、試験結果を Fig. 9, Table. 9 に示す。ここで、Fig. 9(a) 図は有効応力経路（排水・非排水条件）、Fig. 9(b) 図は応力比～偏差ひずみ関係（排水条件）を示す。Fig. 9(a) より、非排水条件下では有効応力が一旦減少するが、限界状態に達すると限界状態線に沿って有効応力が上昇することが確認され、通常拘束圧条件下における中密な砂の挙動を示し、砂の緩い・密な状態を判断する際、間隙比だけでなく拘束圧も判断の要因となることを示している。また、排水条件下での応力経路では、有効応力（応力比）の上昇が非排水試験における限界状態線に到達した後も止まらず、定常状態に達していない（せん断ひずみが10%未満）

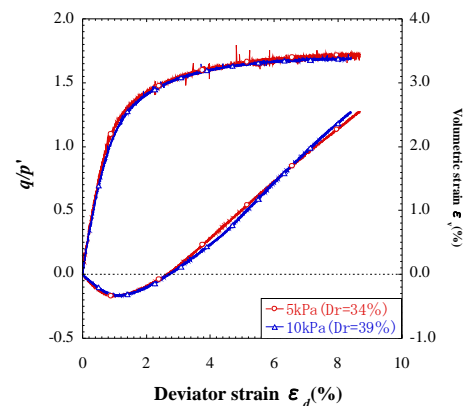
と考えられる。また、緩詰めにも関わらず明確に正のダイレイタンスが発生していることから、非排水条件下と同様に、低拘束圧条件下では排水条件下においても緩い砂が通常拘束圧での密な砂に近い挙動を示すことを確認された。ただし、現段階では供試体の相対密度に多少バラツキが存在するため、今後は再現性を取るために種々の条件による試験を重ねていく必要がある。

Table. 9 試験条件 (初期拘束圧の影響)

初期拘束圧 (kPa)	5kPa		10kPa	
	排水	非排水	排水	非排水
相対密度 (%)	34	39	36	24



(a) 有効応力経路 (排水・非排水条件)



(b) 応力比～偏差ひずみ関係 (排水条件)

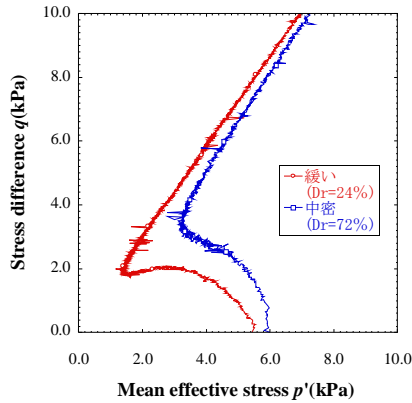
Fig. 9 緩い砂での初期拘束圧の異なる単調圧縮試験結果

#### 3.2.2 初期間隙比の影響

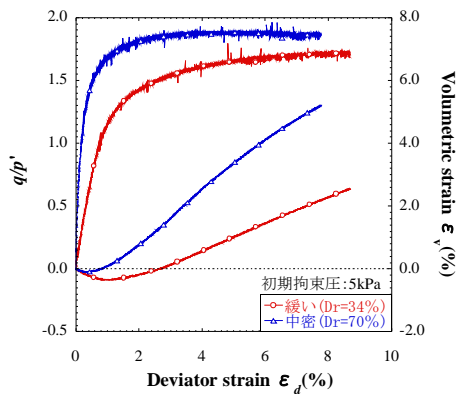
試験条件、試験結果を Table. 10, Fig. 10 に示す。ここで、Fig. 10(a) 図は有効応力経路（非排水条件）、Fig. 10(b) 図は応力比・体積ひずみと偏差ひずみの関係を示す。Fig. 10(a) の有効応力経路より、中密な砂では緩い砂よりも早く有効応力の減少が止まり、その後限界状態線に沿って有効応力が上昇していることが確認できる。また、Fig. 10(b) より中密な砂では、緩い砂よりも早くピーク強度発生しており、正のダイレイタンスもより大きく出ていることが分かる。この傾向は、通常拘束圧条件下と同様の傾向であるため、低拘束圧条件下でも密度変化によって通常拘束圧条件下と同様の傾向を示すことが分かる。

Table. 10 試験条件（初期間隙比の影響）

排水条件	(a)		(b)	
初期拘束圧(kPa)	5		5	
試料	緩	中密	緩	中密
相対密度 (%)	24	72	34	70



(a) 有効応力経路（非排水条件）



(b) 応力比～偏歪ひずみ関係（排水条件）

Fig. 10 初期拘束圧5kPaでの初期間隙比の異なる単調載荷試験結果

#### 4. まとめ

- 1) 緩い砂、及び密な砂を用いた非排水繰返し載荷試験を行った結果、初期拘束圧が 10kPa 以下の低拘束圧条件下においても、通常拘束圧と同様にサイクリックモビリティを伴った液状化現象が確認できた。
- 2) 通常拘束圧条件下と低拘束圧条件下での試験結果を比較した場合、砂の密度に因らず初期拘束圧が小さいほど載荷初期における有効応力の減少幅が大きくなる傾向が見られた。しかし、同じ低拘束圧条件下では（5～20kPa）、初期拘束圧が砂の挙動に与える影響が少ないことが分かった。
- 3) 非排水繰返し載荷試験を行った結果、初期間隙比が大きくなるとひずみが発達しやすく、載荷初期における有効応力減少幅が大きくなる傾向が見られた。
- 4) 全試験を通して、初期拘束圧 5kPa では三軸伸張側のひずみが発達しにくくなる傾向が見られ、中密な砂においては、サイクリックモビリティ挙動時に有効応力の値が原点付近でマイナスとなる結果が得られた。

- 5) 排水・非排水条件下での単調圧縮試験を行った結果、拘束圧に因らずに比較的精度の良い試験結果が得られ、試験の再現性を確認できたと同時に、砂の緩い・密な状態を判断する際、間隙比だけでなく拘束圧も判断の要因となることを確認することができた。

#### 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., 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.
- 3) 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.