

低拘束圧非排水繰返し载荷を受ける豊浦砂の力学挙動

Mechanical behavior of Toyoura sand subjected to undrained cyclic loading under low confining pressure

長田辰弥¹, 笹岡大路², 張鋒³

- 1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・社会工学専攻
- 2 株式会社トヨタマップマスター
- 3 名古屋工業大学・高度防災工学センター・cho.ho@nitech.ac.jp

概 要

地盤の液状化挙動を評価する場合、厳密な構成式に基づいた数値解析によって行うことが徐々に主流となっており、そのための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と言える^{1,2,3)}。数値解析の精度を向上するためには、室内要素試験による土の挙動をまず把握しなければならない。現在では、液状化に関する様々な研究がされているが、地盤のごく浅い部分の液状化に伴う地盤変化の予測の精度はまだ十分とはいえない。本研究では、地表面付近にある拘束圧の低い砂質地盤に着目し、動的三軸試験機を用いて初期拘束圧 10kPa から 20kPa という低拘束圧環境下での豊浦砂の繰返し非排水せん断試験を行い、その力学挙動を検証した。その結果、通常拘束圧環境下 ($p \geq 50kPa$) で得られた砂の三軸試験結果とは異なる力学挙動を示すことが確認された。

キーワード：繰返し三軸試験, 低拘束圧, 砂質土

1. はじめに

液状化のメカニズムに関する実験的・解析的研究が多くなされているが、すべての問題が解決されているわけではない。砂の力学挙動は極めて複雑であり、様々な排水条件と载荷過程で室内試験による実験的研究がなされてきたが、多くのメカニズムが明らかになってきたにもかかわらず、まだ解明されていないものもある。本論文では、非排水繰返し三軸試験を低拘束圧環境下 ($p=10kPa, 20kPa$) で実施し、拘束圧, 応力比の影響に着目し、砂の力学挙動を検証した。

現すために、高さ 10cm、直径 5cm の円柱の供試体を水中落下法で作成している。また、本試験は低拘束圧で行うため、実験結果に影響が出にくいラテックス製のメンブレンを使用している。

2. 室内動的三軸試験

2.1 試験概要

本研究では、繰返し荷重とその周期を制御することが可能な低拘束圧用動的三軸試験機を用いて非排水繰返しせん断を行った。周辺機器及び三軸室の概要を Fig.1, Photo1 に示す。本試験機は、横圧・背圧レギュレータを設置することで 1kPa ごとに空気圧をかけることができ、加えて横圧・背圧インジケータを取り付けることで 50kPa~0.05kPa の範囲で計測が可能になっている。試験に用いた試料は、Table1 に示すような物理特性を持つ豊浦砂を用いており、地中のごく浅い部分 (1~2m) を再

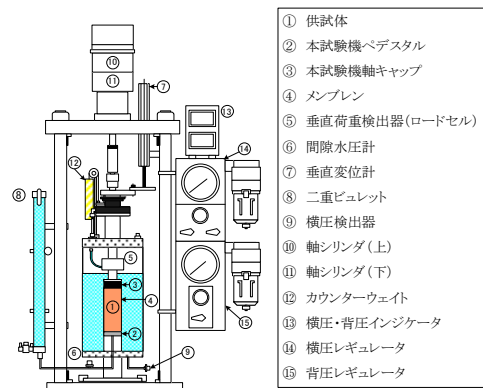


Fig.1 周辺機器及び三軸室の概要

Table1 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		



Photo1 動的三軸試験機の概観

2.2 試験結果

本研究の検討項目としては、メンブレンの違いによる影響、応力比の違いによる影響、初期拘束圧の違いによる影響、通常拘束圧との比較について行い、これより低拘束圧環境下の砂の液状化特性について検討していく。

2.2.1 メンブレンの違いによる影響

まず、メンブレンの違いによる影響を検証する。通常拘束圧での試験で使われていた天然ゴム（氷嚢）を用いたメンブレンと、本試験で使用したラテックス製のメンブレンの詳細を **Table2** に示す。また、氷嚢を用いた試験結果を **Fig.2** に、ラテックス製のメンブレンを用いた試験を **Fig.3** に、それぞれの試験条件を **Table3** に示す。いずれも左図が有効応力経路、右図が応力-軸ひずみ関係を示す。ここでの応力比は、偏差応力 q を初期拘束圧 σ_{m0} の2倍で除した値である。また、DA=5%,DA=10%はそれぞれ両振幅ひずみが5%,10%に達するまでの繰返し回数を言う。 e は間隙比である。

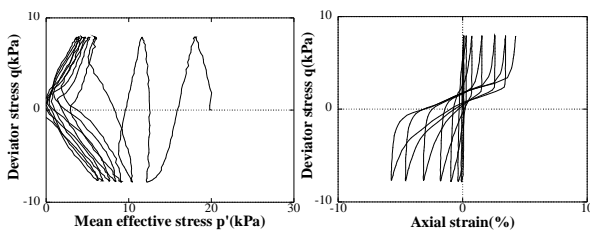


Fig.2 天然ゴム製のメンブレンを使った試験結果
(初期拘束圧=20kPa)

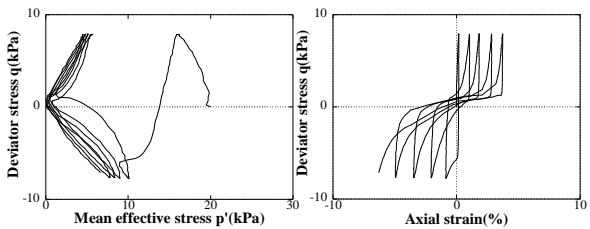


Fig.3 ラテックス製のメンブレンを使った試験結果
(初期拘束圧=20kPa)

Table.2 メンブレンの詳細

	メンブレン	
	天然ゴム (氷嚢)	ラテックス
厚さ	約 0.4mm	約 0.15mm
弾性係数 (GPa)	0.03-0.08	1.5×10^{-3}

Table3 Fig.2, Fig.3の試験結果

	天然ゴム(氷嚢)	ラテックス
応力比	0.2	0.2
初期拘束圧(kPa)	20	20
載荷周波数(Hz)	0.01	0.01
間隙比 e	0.86	0.84
DA=5%	5.1	2.7
DA=10%	7.3	4.7

まず、両条件の DA=5%,DA=10%に注目すると、全体的に氷嚢を使った場合の方が大きい値を示していることがわかる。また、**Fig.2, Fig.3** の有効応力経路を見ると、氷嚢を用いた場合、サイクリックモビリティの挙動に入った際すぐに有効応力が0になることはなく、数回の繰返し載荷を経て原点へと到達することが見て取れる。一方、ラテックス製のメンブレンを用いた場合にはこのような現象が見られず、低拘束圧の試験において氷嚢の過剰な拘束力により実験の精度に影響を及ぼすことがわかった。

2.2.2 応力比の違いによる影響

繰返し載荷応力比の違いによる影響を検証する。初期拘束圧 20kPa 行った試験結果を **Fig.4** に、試験条件を **Table4** に示す。左図が有効応力経路、右図が応力-軸ひずみ関係を示す。

Fig.4 の有効応力経路が示すように、間隙比が同様な緩い砂に異なる応力比のもとで繰返しせん断を行うと、いずれもサイクリックモビリティの挙動が見られるが、応力比が大きくなるにつれ、液状化に至るまでの繰返し載荷回数が少なくなる事が分かる。また、DA=5%,DA=10%の値に注目すると、全体的に応力比が大きくなるにつれて DA=5%,DA=10%の値が小さくなっていることが分かる。

加えて **Fig.5** に3ケースの結果を重ねたグラフを示す。まず、有効御応力経路を見ると、最初の圧縮側への載荷時の有効応力経路がほとんど同じところを通っていることがわかる。そして、応力比の増大にしたがい、その応力経路の延長上になるように有効応力が減少しているのが見て取れる。これより、この3ケースの再現性は高いと判断できる。また、応力-軸ひずみ関係を見ると、液状化発生後のひずみの進行が3ケースともほぼ同程度の増加率で進行しているのが分かる。これより、低拘束圧環境下での液状化後のひずみの進行速度は応力比によるものではなく、間隙比に依存するものではないかと考えられる。

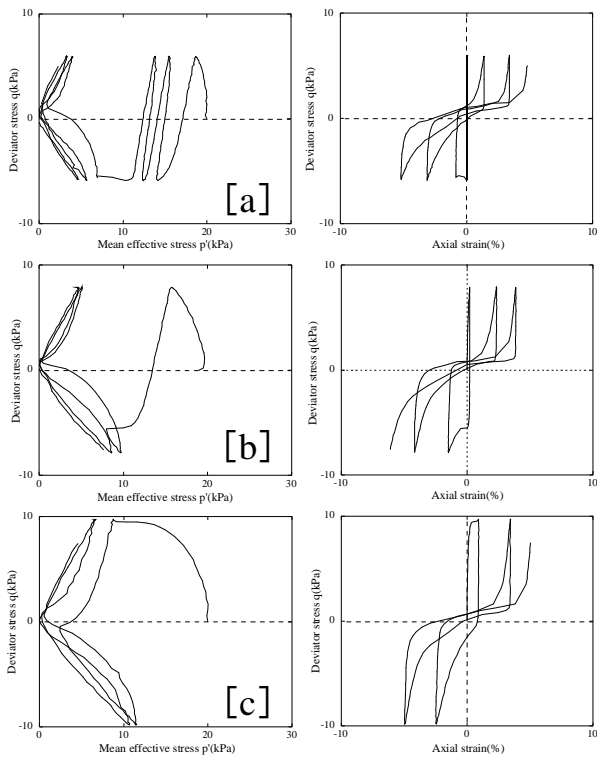


Fig.4 応力比の異なる試験結果 (初期拘束圧=20kPa)

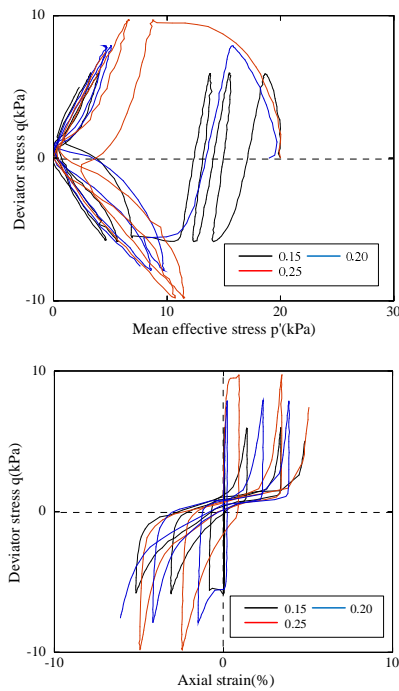


Fig.5 同一グラフにプロットした応力比の異なる試験結果 (初期拘束圧=20kPa)

Table4 Fig4の試験条件

	[a]	[b]	[c]
応力比	0.15	0.20	0.25
初期拘束圧(kPa)	20	20	20
载荷周波数(Hz)	0.01	0.01	0.01
間隙比 e	0.92	0.93	0.92
DA=5%	4.1	1.6	1.1
DA=10%	5.2	2.7	2.1

2.2.3 初期拘束圧の違いによる影響

次に、初期拘束圧の違いによる影響を検証する。初期拘束圧 10kPa で行った試験結果を Fig.6 に、試験条件を Table5 に示す。いずれも左図が有効応力経路、右図が応力-軸ひずみ関係を示す。

まず、DA=5%,DA=10%に注目すると、図 2 に示す 20kPa の結果と同様に全体的に応力比が大きくなるにつれて DA=5%,DA=10%の値が小さくなっている事が分かる。初期拘束圧 10kPa では、応力比 0.15 と 0.20 において DA=5%,DA=10%が同じ値をとってしまっているが、これは応力比 0.15 のケースのみ間隙比が少し小さい事が影響している可能性があるため、より間隙比の近いデータを取り検証する必要がある。また、有効応力経路に関しても、20kPa の結果と同様に応力比が大きいと液状化に至るまでの繰返し回数が少なくなる事が分かる。

初期拘束圧 10kPa と 20kPa の有効応力経路と応力-軸ひずみ関係を比較してみると、共に非常に似た形である事が分かる。液状化に至るまでの有効応力経路は応力比 0.15 では差が見られるものの、応力比 0.20, 0.25 ではほぼ同じであることが見て取れる。また、液状化後のひずみの進行も、初期拘束圧の大小にかかわらず、ほとんど変わらない事が分かる。このことから低拘束圧環境下では、初期拘束圧による影響はほとんど無いものだと考えられる。

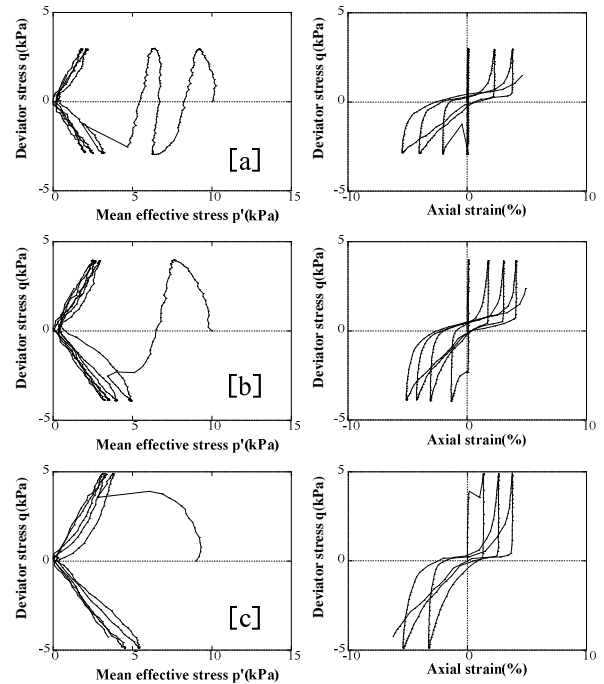


Fig.6 応力比の異なる試験結果 (初期拘束圧=10kPa)

Table5 Fig6の試験条件

	[a]	[b]	[c]
応力比	0.15	0.20	0.25
初期拘束圧(kPa)	10	10	10
载荷周波数(Hz)	0.01	0.01	0.01
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

2.2.4 通常拘束圧との比較

次に、通常拘束圧で行った試験結果との違いを検証する。初期拘束圧 98kPa で行った試験結果を Fig.7 に、試験条件を Table6 に示す。いずれも左図が有効応力経路、右図が応力-軸ひずみ関係を示す。

まず、98kPa の結果について、表の DA=5%、DA=10% に注目すると、低拘束圧環境下の結果と同様、全体的に応力比が大きくなるにつれて DA=5%、DA=10% の値が小さくなっている事が分かる。また、有効応力経路に関しても、20kPa の結果と同様に応力比が大きいと液状化に至るまでの繰返し回数が少なくなる事が分かる。

次に、初期拘束圧 98kPa と 20kPa の有効応力経路を比べてみると、応力比 0.20、0.25 のケースは通常拘束圧では最初の圧縮側の載荷ではほとんど有効応力が減少せず、引張側載荷で大きく有効応力が減少するのに対し、低拘束圧では最初の圧縮側載荷で大きく有効応力が減少している事が分かる。また、応力比 0.15 のケースでは明らかに低拘束圧での試験の方が液状化に至るまでの繰返し載荷回数が少ないことが見て取れる。また、応力-軸ひずみ関係を見ると、応力比 0.15 での最終的なひずみの出方はほぼ同様なものに対し、応力比 0.20、0.25 の場合、通常拘束圧での試験結果では圧縮側にひずみはほとんど発生していない。これまで行なっていた通常拘束圧での試験結果から、繰返し三軸試験では引張側にひずみが発生しやすく、初期拘束圧が大きいほどその傾向が顕著になる事がわかっている。

このことから、低拘束圧での試験では応力比 0.20、0.25 の場合でも圧縮ひずみが出やすい傾向が見られることがわかった。これは、初束圧が小さい場合には圧縮側の載荷によるひずみが発生しやすくなるのが原因だと考えられる。

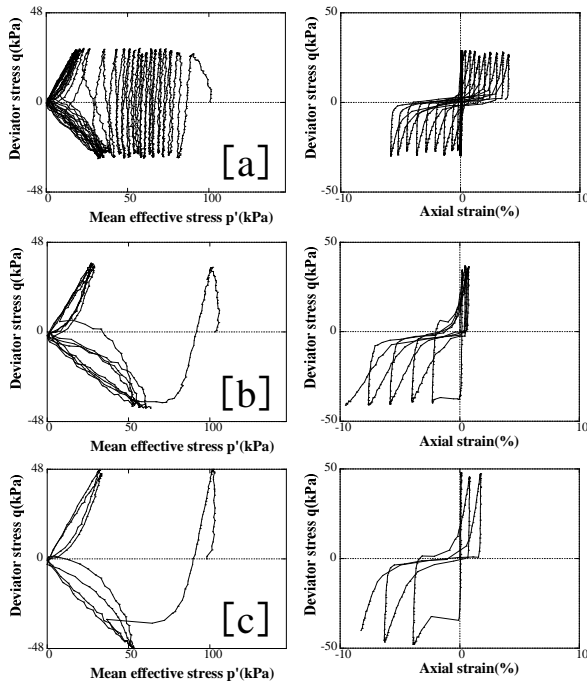


Fig.7 初期拘束圧98kPa での試験結果

Table6 Fig.7の試験条件

	[a]	[b]	[c]
応力比	0.15	0.20	0.25
初期拘束圧(kPa)	98	98	98
載荷周波数(Hz)	0.01	0.01	0.01
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

以上より、極端に拘束圧の小さい低拘束圧での試験では通常拘束圧での試験と異なり、引張側と圧縮側でほぼ均等にひずみが発生する結果は妥当だといえる。

3. まとめ

本論文では、動的三軸試験機を用いて、低拘束圧環境下の砂の非排水繰返し載荷挙動について検証した。緩い砂を対象にして試験を行い、全体の傾向としてどの試験においても有効応力が減少した後、サイクリックモビリティ現象が起こることが確認された。また、低拘束圧での実験ではメンブレンの剛性が試験結果に大きな影響を与えることも確認できた。

低拘束圧環境下において、載荷応力比が大きいほど速く液状化に至る傾向が見られたが、液状化に至った後のひずみの増加率はほとんど変わらないケースがあることが確認された。

また、初期拘束圧が小さいと、応力比が小さい場合は液状化に至るまでの繰返し載荷回数が減少する傾向に見られるが、全体的に有効応力経路や、応力-軸ひずみ関係にはさほど影響がないことが確認された。

通常拘束圧と比較すると、通常拘束圧と比べて低拘束圧では圧縮側にも引張り側と同等のひずみが発生し、最初の圧縮側の載荷で大きく有効応力が減少するという違いが見られた。

今後は、さらに小さい初期拘束圧での試験結果との比較、加えて中密 (e=0.76) の供試体でも同様の試験を行い、緩い供試体での試験結果と比較し、低拘束圧環境下の液状化挙動の検討を図りたい。

また、実験結果は全て3回以上行っているが、再現性を取るのが難しいため、今一度の実験を試みたい。

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., 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.