

非排水繰り返し载荷を受ける豊浦砂の力学挙動の要素試験

Experimental study on Toyoura sand under cyclic loading

笹岡大路¹，山口健太郎²，張鋒³

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 静岡ガス

3 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・cho.ho@nitech.ac.jp

概 要

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。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砂の繰り返しせん断時の力学挙動、特に拘束圧依存性と繰り返し载荷速度の影響について、実験検証を行った。その結果、中密な砂の場合では、初期拘束圧が大きいほど液状化しにくいことがわかった。一方、緩い砂について、中密な砂とは全く異なる傾向が見られ、初期拘束圧が低いほど液状化しやすくなることが確認された。载荷周波数による影響については、初期拘束圧による影響と同様に、密度の異なる砂の载荷周波数の影響が全く異なっており、中密な砂では、载荷周波数が高いほど液状化しやすく、緩い砂においては逆な挙動が示された。

キーワード：繰り返し三軸試験，载荷速度，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り返し三軸試験を実施し、载荷速度、拘束圧の影響に着目し、砂の力学挙動を検証した。

2. 室内動的三軸試験

2.1 試験概要

本試験では、繰り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せん断試験を行った。試験に用いられ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であり、計測項目が鉛直荷重、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、写真1に示す。なお中密な砂は締固め法で、緩い砂は水中落下法で供試体を作成した。

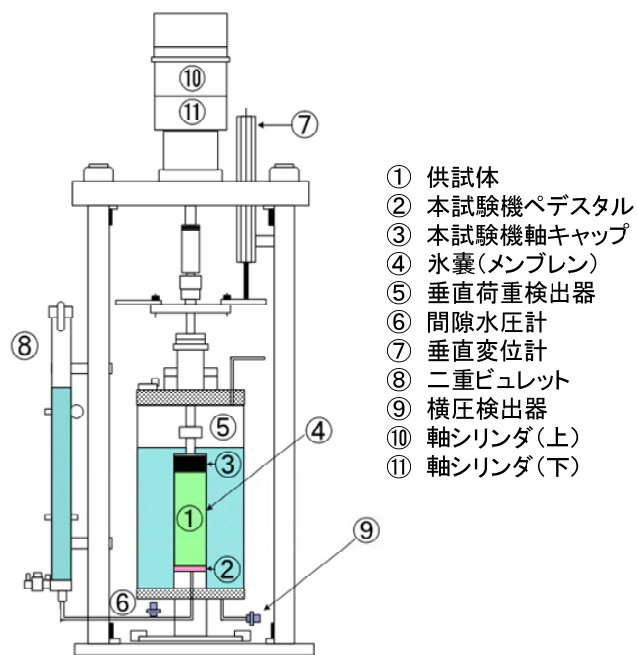


図1 三軸室及び周辺機器

2.2 試験結果

本研究では、初期拘束圧、载荷周波数の影響について着目し、繰り返しせん断時の力学挙動を検討した。

2.2.1 初期拘束圧の影響

初期拘束圧の違いについて比較する。中密な砂では ($e=0.72\sim 0.76$) を用いて繰返し応力比 $q/\sigma_{m0}=0.20$ 、載荷周波数 $f=0.1\text{Hz}$ の載荷条件下で実験を行った。一方、緩い砂 ($e=0.89\sim 0.97$) の場合には $q/\sigma_{m0}=0.20$ 、 $f=0.001\text{Hz}$ の載荷条件下で実験を行った。その結果を図2、図3に示す。なお、それぞれの試験条件を表1、表2に示す。グラフは左から有効応力径路、応力-ひずみ関係である。また、表の $N_c(\text{DA}=5\%)$ 及び $N_c(\text{DA}=10\%)$ は両振幅ひずみが5%、10%に達した時の繰返し載荷回数を示している。

図2に示すように、間隙比が同様な中密な砂に異なる拘束圧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が起こっているが、初期拘束圧が大きくなるにつれサイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数が多く、 $\text{DA}=5\%$ に至るまでの繰返し回数も多くなっていることが分かる。これは砂のような粒状体では拘束圧が高くなるほど、粒子同士のかみ合いが強くなり、せん断抵抗が強くなるからである。特に、拘束圧が 294kPa は実地盤では非常に深い位置であるため、この試験結果は妥当であると言える。

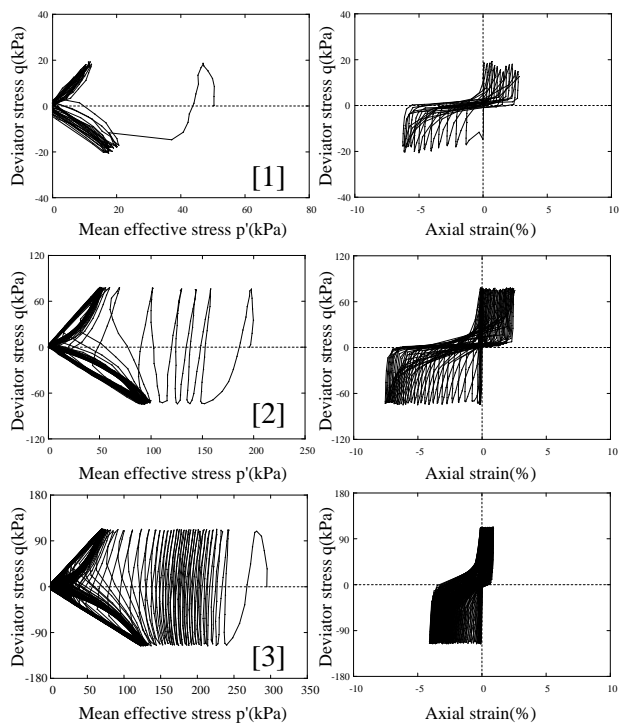


図2 拘束圧の違いによる影響 (中密な砂)

表1 試験条件 (図2に関する実験)

	[1]	[2]	[3]
間隙比 e	0.76	0.75	0.72
拘束圧	49	196	294
周波数	0.1	0.1	0.1
$N_c(\text{DA}=5\%)$	5.1	15.5	108.3
$N_c(\text{DA}=10\%)$	13	34	∞



写真1 三軸繰返し載荷装置

一方、図3の緩い砂について、中密な砂とは全く異なる傾向が見られた。すなわち、初期拘束圧が低い時に、サイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数や軸ひずみが5%、10%に達するまでの繰返し回数が多くなる傾向が見られた。緩い砂の場合、初期間隙比が同じ状態であっても、初期拘束圧が高いほど、砂の相対的間隙比 ($e-\ln p'$ 関係の空間で、現状態から限界状態線までの距離) が大きくなり、より圧縮しやすい状態にあるため、非排水せん断時、間隙水圧が発達しやすいことが原因と考えられる。この現象は非排水単調載荷^{1),2)}で見られた現象と似ている。したがって、非排水繰返し載荷時、砂の力学挙動に与える初期拘束圧の影響は砂の密度によって全く異なっていることがわかった。

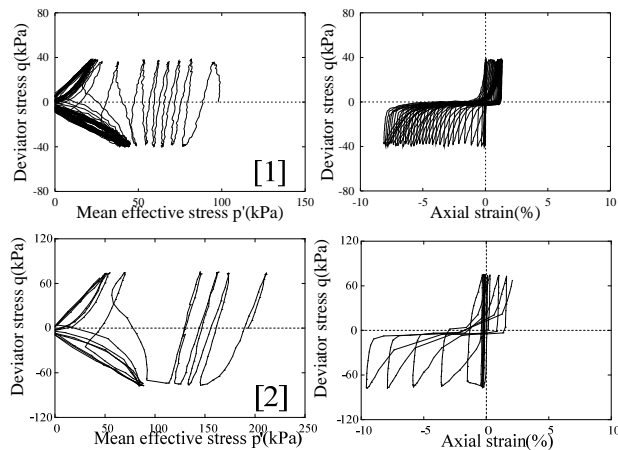


図3 拘束圧の違いによる影響(緩い砂, $e=0.92$)

表2 試験条件 (図3に関する実験)

	[1]	[2]
間隙比 e	0.97	0.89
拘束圧	98	196
周波数	0.1	0.1
$N_c(\text{DA}=5\%)$	14.5	5.6
$N_c(\text{DA}=10\%)$	33.4	7.6

2.2.2 載荷周波数による影響

次に、載荷周波数による影響を検証する。中密な砂を用いて繰返し応力比 $q/\sigma_{m0}=0.20$ の載荷条件下で実験を行った。その結果を図4、図5に示す。緩い砂の場合の結果を図6、図7に示す。なおそれぞれの試験条件を表3、表4、表5、表6に示す。

中密な砂において有効応力経路をみると、載荷周波数が大きいほどサイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数が多く、応力-ひずみ関係から載荷周波数が高いほど軸ひずみの発達に多くの繰返し回数を要している。

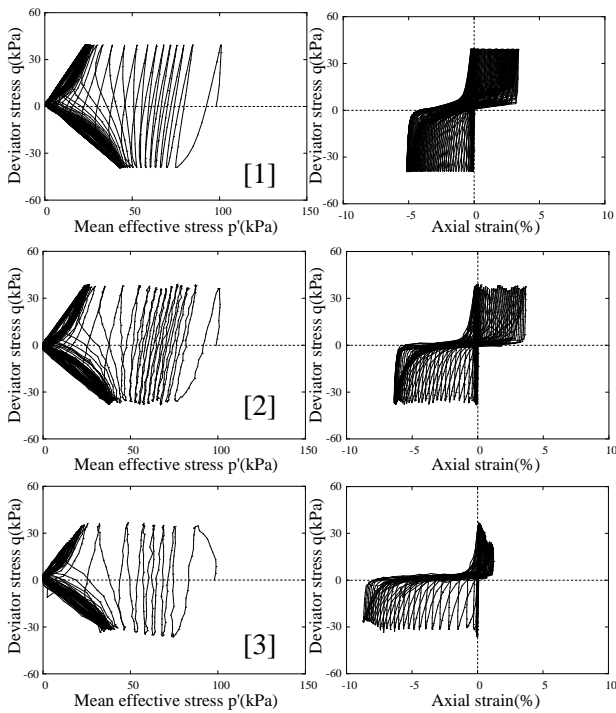


図4 載荷周波数による影響 (中密な砂,98kPa)

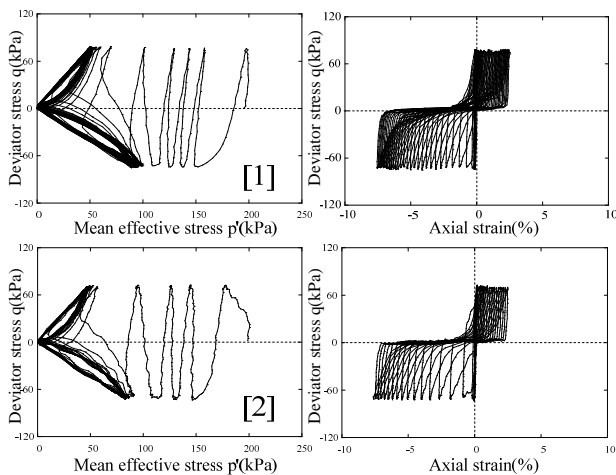


図5 載荷周波数による影響 (中密な砂,196kPa)

表3 試験条件 (図4に関する実験)

	[1]	[2]	[3]
間隙比 e	0.75	0.78	0.72
拘束圧	98	98	98
周波数	0.01	0.1	0.5
Nc(DA=5%)	32	25	14
Nc(DA=10%)	65.8	46	32

表4 試験条件 (図5に関する実験)

	[1]	[2]
間隙比 e	0.75	0.73
拘束圧	196	196
周波数	0.1	0.5
Nc(DA=5%)	16	9
Nc(DA=10%)	34	16

一方で緩い砂を見ると、載荷周波数が 0.5Hz と比較的高い場合はサイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数や軸ひずみが 5%,10%に達するまでの繰返し回数が著しく多くなる傾向が見られた。また、載荷周波数が大きいほど、初期載荷において立ち上がり大きい(有効応力の現象が小さい)ことが確認できる。以上のことから分かるように、載荷周波数がかかなり大きいことが明らかになった。さらに、初期拘束圧による影響と同様に、密度の異なる砂の載荷周波数の影響が全く異なっており、中密な砂においては、載荷周波数が高いほど液状化しやすく、緩い砂においては、逆な挙動が示された。この時間依存性に関する力学的解釈は今後の研究課題となる。

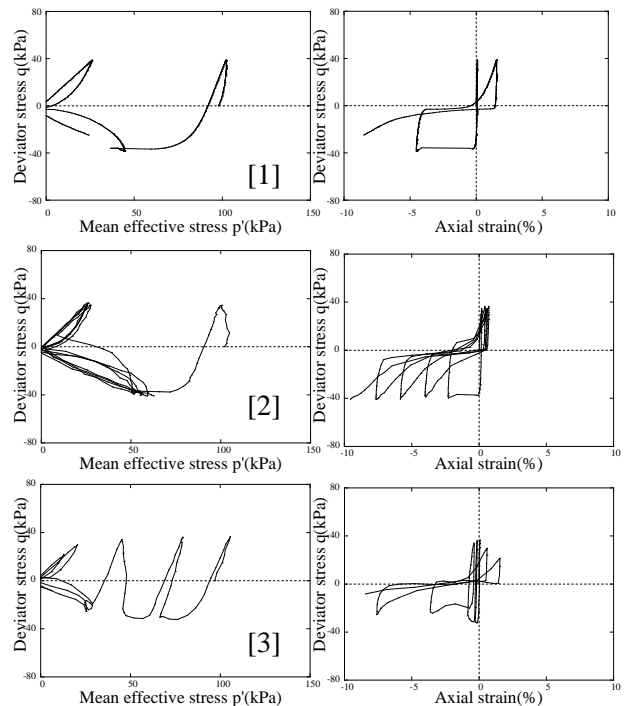


図6 載荷周波数による影響 (緩い砂,98kPa)

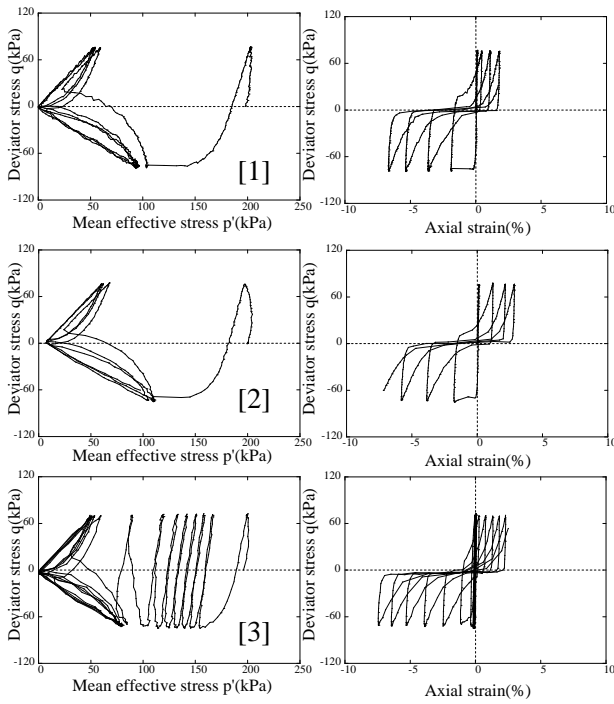


図 7 荷重周波数による影響 (緩い砂, 196kPa)

表 5 試験条件 (図 6 に関する実験)

	[1]	[2]	[3]
間隙比 e	0.92	0.93	0.94
拘束圧	98	98	98
周波数	0.001	0.01	0.5
$N_c(DA=5\%)$	1.0	2.5	3.8
$N_c(DA=10\%)$	1.5	4.7	4.8

表 6 試験条件 (図 7 に関する実験)

	[1]	[2]	[3]
間隙比 e	0.89	0.87	0.86
拘束圧	196	196	196
周波数	0.001	0.01	0.5
$N_c(DA=5\%)$	2.5	1.7	10.2
$N_c(DA=10\%)$	4.2	3.7	13.2

3. まとめ

本論文では非排水繰り返し三軸試験を実施し、荷重周波数、初期拘束圧の影響に着目し、その力学挙動を検証した。中密な砂の場合では、初期拘束圧が大きいほど液状化しにくいことがわかった。一方、緩い砂について、中密な砂とは全く異なる傾向が見られ、初期拘束圧が低いほど液状化しやすくなることが見られた。

荷重周波数による影響では、荷重周波数の影響がかなり大きいことが明らかになった。さらに、初期拘束圧による影響と同様に、密度の異なる砂の荷重周波数の影響が全く異なっており、中密な砂においては、荷重周波数が高いほど液状化しやすく、緩い砂においては、逆な挙動が示された。今後はその現象の合理的解釈を図りたい。

なお、実験はすべて、同じ条件下で 2 回以上実施していたが、同じ結果となっているため、実験の精度は十分あると考えられる。

参考文献

- 1) Ishihara, K. (1993): Liquefaction and flow failure during earthquake, The 33rd Rankine Lecture, Geotechnique.
- 2) Verdugo, R. and Ishihara, K. (1996): The steady state of sandy soils, Soils and Foundations, Vol.36, No.2, 81-91.