

# 初期繰返しせん断が豊浦砂の せん断剛性率の異方性と液状化特性に及ぼす影響

呉 杰祐<sup>1</sup>・清田 隆<sup>2</sup>・片桐 俊彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail: [dayo@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:dayo@iis.u-tokyo.ac.jp)

<sup>2</sup>正会員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail: [kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp)

<sup>3</sup>正会員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

E-mail: [toshi@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:toshi@iis.u-tokyo.ac.jp)

従来、液状化の検討は、N値やせん断波速度などのパラメータを利用して行われてきた。しかし、これまでの研究では、N値と相関の高い相対密度とせん断波速度、および液状化強度特性の関係を系統的に調査した例は少ない。そこで、本研究では、初期繰返しせん断履歴を与え、異なる微小せん断剛性率を有する豊浦砂の供試体を作成し、それらの液状化強度特性を三軸液状化試験より比較した。一方、地盤は構造異方性を有しているため、せん断波の伝播方向によって得られるせん断剛性率が異なると考えられる。実験結果より、液状化履歴により供試体の異方性の発達と構造の弱화가生じ、液状化強度も大きく低下する傾向が得られた。また、異なる相対密度を有する供試体において、間隙水圧とひずみの発達傾向を考察した。

**Key Words:** *liquefaction resistance, small strain shear moduli, repeated liquefaction, relative density, anisotropic*

## 1. はじめに

液状化簡易判定は、ボーリング調査時に実施される標準貫入試験結果 (N 値) や当該地盤の粒度特性を利用して行われてきた。(例えば、松尾&東, 1997<sup>1)</sup>、道路橋示方書, 2012<sup>2)</sup>)。しかし、近年の地震による液状化の発生状況を振り返ると、同等のN値、粒度特性であっても、液状化の程度に大きな差が生じていることが報告されている(松尾, 2004<sup>3)</sup> 国土交通省, 2011<sup>4)</sup>)。

一方、液状化強度特性と微小変形特性との間に良い相関があることは、多くの既往研究により報告されている。Tokimatsu & Hosaka (1986)<sup>5)</sup>は、液状化試験前に初期せん断履歴を与えることによって液状化強度が増加すること示したが、液状化強度と静的せん断剛性率に良い相関があることを示した。Yoshimi et al. (1989)<sup>6)</sup>は、凍結試料と乱された試料の液状化強

度とせん断剛性率を比較し、両者の関係を適切に表現できることを示した。

また、Wang et al. (2006)<sup>7)</sup>は、再構成試料に過圧密履歴や初期せん断履歴を与え、せん断波速度の値を不攪乱試料の値と同等となるよう調整することで、再構成試料と不攪乱試料の液状化強度が同程度になることを示した。更に、Kiyota et al., (2009)<sup>8)</sup>は再構成試料に排水せん断履歴を与え、微小せん断剛性率の値を凍結試料の値と同等となるよう調整することで、同様の結果を得た。

しかし、これまでの研究では、供試体密度と微小変形特性、および液状化強度特性の関係を系統的にまとめた例は少ない。呉ら(2016)<sup>9)</sup>は、相対密度一定条件 ( $D_r=50\%$ ) の豊浦砂供試体を用い、液状化試験前の排水繰返し載荷履歴や液状化履歴により、せん断剛性率と液状化強度も大きく変化することを示した。これは、排水せん断履歴や液状化履歴によ

り、土粒子間のかみ合わせ効果（土粒子構造）が変化したためだと考えられ、この傾向は動的微小せん断剛性率  $G_{dvH}$  に反映されることを確認した。また、 $D_r=50\%$  程度の豊浦砂供試体が等方圧密圧力 100kPa の条件下で有し得る微小せん断剛性率は  $G_{dvH}=83\sim 111\text{MPa}$  程度（最大 1.35 倍程度）、液状化強度は  $R_{L20}=0.10\sim 0.25$  程度（最大 2.5 倍程度）となることを示し、加藤ら(1984)<sup>10</sup>、Tatsuoka et al. (1986b,1988)<sup>11, 12</sup> が示した同程度の密度の豊浦砂の液状化強度の値は、本研究の示した液状化強度の上限・下限の範囲にあることを確認した。

一方、地盤は構造異方性を有しているため、せん断波の伝播方向によって得られるせん断剛性率が異なる可能性があり(山下ら, 2001<sup>13</sup>)、この異方性が液状化強度に影響を与えたと考えられる。本研究では、豊浦砂を対象として、微小変形特性に代表される地盤の構造異方性と液状化強度との関係を整理するため、供試体密度を一定となるように調整したうえで排水・非排水繰返し載荷履歴を与え、構造の異なる供試体の液状化強度特性を比較した。動的微小せん断剛性率は加速度計、ベンダーエレメントBEを用いて計測し、静的微小せん断剛性率はLDTを用いて計測した。

## 2. 試験方法

本研究は、三軸試験機を用いて実験を行った。供試体サイズは直径 75mm、高さ 150mm である。また、メンブレン厚さは 0.3mm である。実験試料は豊浦砂（最大間隙比  $e_{max}=0.922$ 、最小間隙比  $e_{min}=0.583$ 、土粒子密度  $\rho_s=2.654$ ）を用いた。供試体は、空中落下法により作成したが、密度は後述の排水・非排水繰返し履歴を与えた後の液状化実験実施時の相対密度  $D_r$  が 50%、75% になることを目標に調整した。

初期拘束圧 30kPa において二重負圧法により飽和させ、B 値が 0.95 以上であることを確認した後、 $p'_0 = 100\text{kPa}$  まで等方圧密を行った。圧密後、一定振幅（両振幅鉛直ひずみ  $\varepsilon_{v(DA)}=0.1\%$ ）の排水繰返し載荷履歴を所定回数供試体に与えた。これは、比較的小さな振幅の載荷履歴を与えることで、供試体に大きな体積変化を与えることなく、その土粒子構造にかみ合わせ効果を与えることを目的としたものである。その後、応力振幅一定の液状化試験（ひずみ速度 0.1%/min）を実施した。

一連の実験の過程では、再液状化試験も実施している。初回の液状化試験において  $\varepsilon_{v(DA)}=5\%$  に達した

後、繰返し載荷を止め、再圧密を行う。この際、鉛直ひずみは 0% に戻っていることを確認する。再圧密後は 10 分間程度放置し、再圧密による体積変化が安定したことを確認後、再液状化試験を実施した。なお、再液状化試験は 3 回実施した。

鉛直方向の弾性波速度  $V_{svH}$  の計測は、キャップ部分に取り付けたアクチュエータと供試体側面に取り付けた加速度計により図-1(a)に示す方法で実施した。また、 $V_{svH}$  より微小せん断剛性率  $G_{dvH}$  を算出した。

水平方向の弾性波速度  $V_{shH}$  と  $V_{shV}$  の計測は、供試体側面に取り付けたベンダーエレメント BE により実施した。図-1(b)に  $V_{shV}$  の計測方法を示す。試験中の直径の変化は、クリップゲージを用いて計測した。 $V_{shH}$  と  $V_{shV}$  より微小せん断剛性率  $G_{dHH}$  と  $G_{dHV}$  を算出した。

また、LDT を用いて、微小繰返し載荷の 10 回目の応力-ひずみ関係(図 2)から静的ヤング率  $E_s$  を得、静的微小せん断剛性率( $G_s=E_s/2(1+\nu)$ 、 $\nu$ :ポアソン比)を求めた。ポアソン比は、Hoque ら<sup>14</sup>)による豊浦砂の試験結果をもとに 0.17 とした。

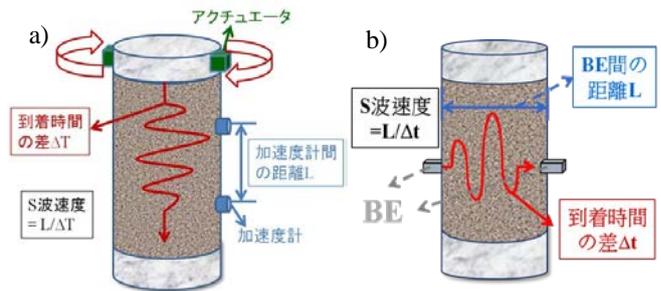


図1 せん断波速度計測概略図

a) 加速度計 ( $V_{svH}$  の計測)

b) ベンダーエレメント BE ( $V_{shH}$  と  $V_{shV}$  の計測)

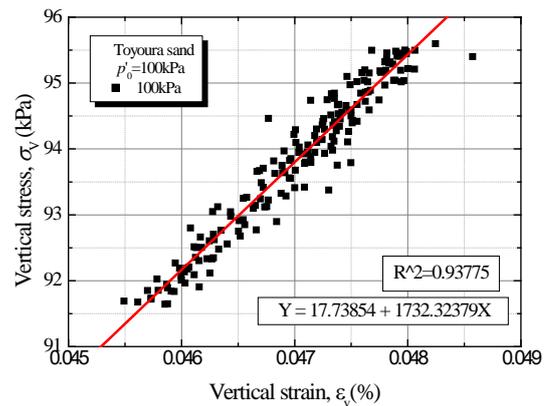


図2 微小繰返し載荷の応力-ひずみ関係

実験供試体の概要を表-1 に示す。本研究では、相対密度が 75% となるよう作成した。表-1 に示されている相対密度と微小せん断剛性率の値は、等方圧密後に所定の初期繰返しせん断を与える前と後のもの

であり、履歴後については、液状化試験もしくは再液状化試験が実施された直前の値であることに留意されたい。

表-1 液状化試験試料の概況

No.	応力履歴回数	$D_r$ (%)		$G_d$ (MPa)		CSR	$N_c$
		履歴前	履歴後	履歴前	履歴後		
1	1000	41.1	48.0	80.0	106.7	0.25	13
2	2000	37.9	47.8	89.1	110.6	0.25	18
3	2000	40.9	50.1	89.1	114.2	0.30	10
4	Re	44.4	53.7	86.4	79.3	0.11	8
5	0	75.5	-	137.4	-	0.2	57
6	0	72.4	-	*	-	0.25	28
7	0	72.9	-	132.3	-	0.3	18
8	Re	70.1	75.7	128.6	117.7	0.25	21
9	Re	69.8	74.8	121.6	112.4	0.3	9

(No.1~4 は呉ら(2016)<sup>9</sup>の試験データ)

Re:再液状化試験、CSR:非排水繰返し応力比

$N_c$ :両振幅鉛直ひずみが5%になるまでの繰返し回数、

\*No.6の試験では、加速度計の不具合により計測結果を得られていない

### 3. 動的計測による微小せん断剛性率

#### (1) 等方圧密過程における動的せん断剛性率の変化

等方圧密中および圧密後の排水繰返し载荷中に計測した微小せん断剛性率  $G$  について説明する。図3に、等方圧密過程における  $G$  の平均値と有効応力パラメータ  $(\sigma_v' \cdot \sigma_h)^{0.5}$  の関係を示す。有効応力の増加とともに  $G$  も増加しているが、動的計測手法によるせん断剛性率は静的手法のものより20~30%程度大きい値が得られた。動的せん断剛性率が静的せん断剛性率結果より大きい値を示す原因は、(堤ら, 2006<sup>15</sup>)の研究結果を示したように、動的計測手法では弾性波は土粒子構造の局所的に強い部分、静的せん断剛性率は、供試体全体の平均的な変形特性を表しているものと理解できる。

また、 $G_{dHH}$  は  $G_{dHV}$  と  $G_{dVH}$  より若干大きかった。堆積面に対して平行に伝播するせん断波から得られたせん断剛性率  $G_{dHH}$  は、他の方向での値( $G_{dHV}$ 、 $G_{dVH}$ )より高く、この傾向は既往研究(山下ら, 2001<sup>13</sup>)の結果と整合する。

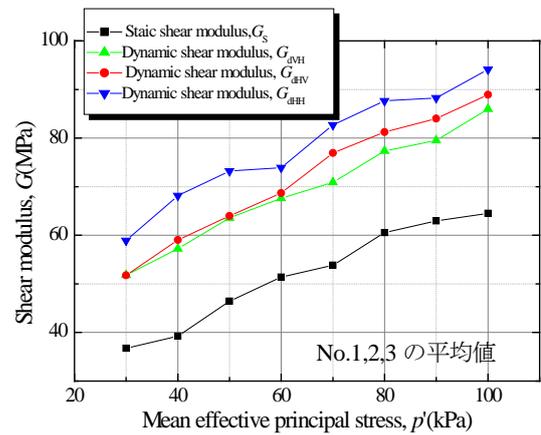


図-3 せん断剛性率の変化と有効応力の関係

#### (2) 排水繰返し载荷履歴における動的せん断剛性率の変化

図4に、等方圧密後の排水繰返し载荷回数とそれに伴う各微小せん断剛性率  $G$  の増加率の関係を示す。 $G_{dVH}$  と  $G_s$  において、鉛直ひずみ一定振幅の排水繰返し载荷を与えることで、その回数が増加するほど値も増加している。载荷履歴を与える前の  $G_0$  の値と比較すると、 $G_{dVH}$  の値は繰返し回数1000回では約1.3倍になった。 $G_s$  の値は繰返し回数1000回では約1.2倍になった。なお、繰返し履歴による供試体間隙比の変化は-0.02~-0.03程度( $D_r$ で5~7%の密度化)であった。また、排水繰返し载荷回数が200回を超えると、 $G$  の変化は非常に小さい結果となった。繰返し回数と  $G$  の変化は、繰返し変位(応力)振幅に依存するが、上記の結果は  $D_r$  が一定の条件で変化し得る土粒子構造の強化には限界が存在することを示唆している。一方、 $G_{dHV}$  と  $G_{dHH}$  においては、排水繰返し载荷回数に寄らず計測値の変化は小さかった。鉛直方向の排水繰返し载荷は地盤の構造異方性をより高めた可能性を示唆している。

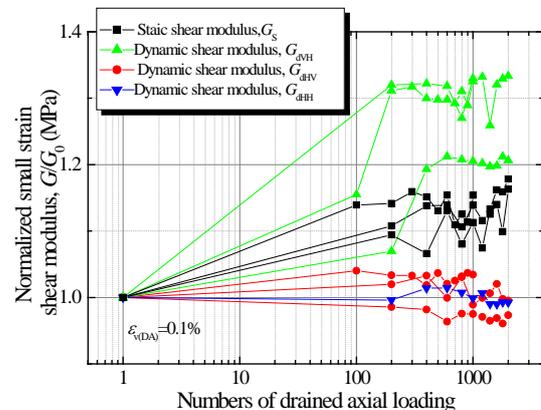


図-4 排水せん断履歴回数とせん断剛性率の変化率の関係

#### 4. 液状化試験

代表的な三軸液状化試験（非排水繰り返し載荷試験）の結果として、図-5、図-6にそれぞれ事前排水繰り返し載荷を1000回与えた $D_r=50\%$ の供試体と、繰り返し載荷を与えていない $D_r=75\%$ の供試体の有効応力経路と偏差応力-鉛直ひずみ関係を示す。

両実験の繰り返し応力比は同じ( $CSR=0.25$ )であり、異なる相対密度の実験結果において、1000回応力履歴を与えた $D_r=50\%$ の供試体(図-5)と応力履歴を与えていない $D_r=75\%$ の供試体(図-6)の $\varepsilon_{v(DA)}=5\%$ に達するまでの繰り返し回数は、概ね同じであった。非排水繰り返しせん断に伴う有効応力の低下の傾向は前者( $D_r=50\%$ )の方が後者( $D_r=75\%$ )より遅くなることが確認できた。しかし、前者( $D_r=50\%$ )の供試体における液状化後の繰り返し回数に対するひずみの発達程度は、後者( $D_r=75\%$ )の供試体より明らかに大きい事が分かった。これは液状化過程において、土粒子構造の安定化が壊れ、応力履歴により与えられた土粒子間のかみ合わせ効果が消失したことが原因だと考えられる。また、液状化後のひずみの発達は、相対密度に依存することが判る。

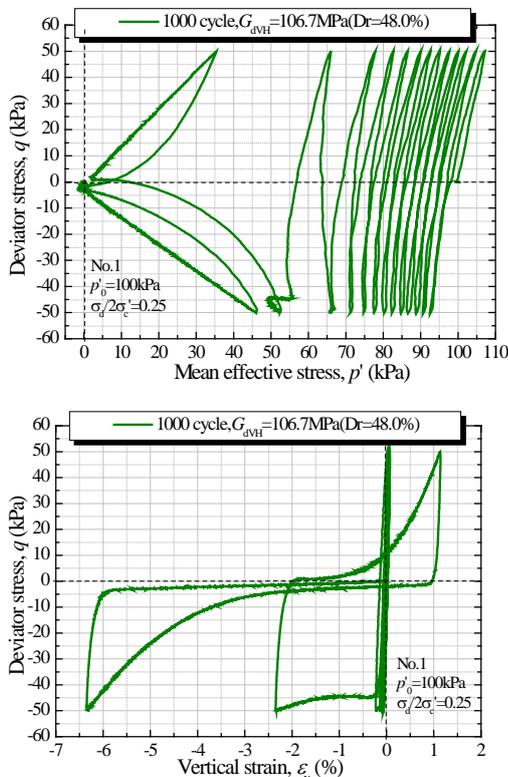


図-5 1000回応力履歴を与えた $D_r=50\%$ の試料の液状化試験結果(上)有効応力経路、(下)偏差応力-鉛直ひずみ関係 (呉ら(2016)<sup>9)</sup>より引用)

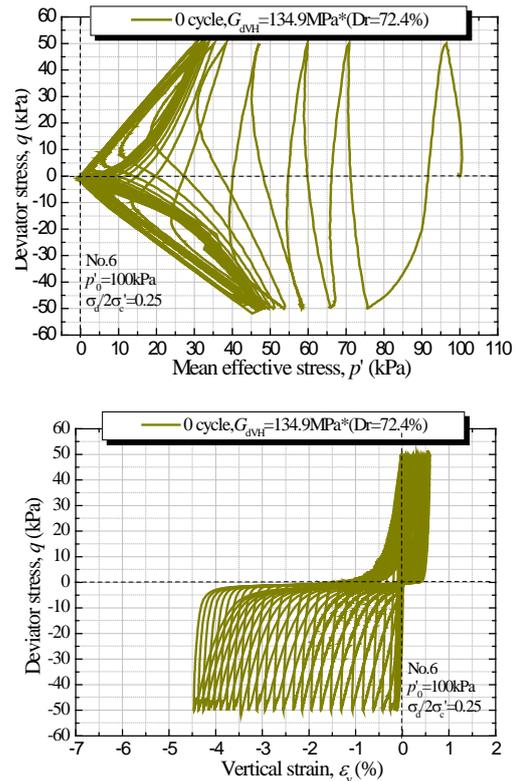


図-6 応力履歴のない $D_r=75\%$ の試料の液状化試験結果(上)有効応力経路、(下)偏差応力-鉛直ひずみ関係 \* : No. 5 と No. 7 の  $G_{dVH}$  平均値

#### 5. 再液状化試験

図-7に再液状化試験の結果をとりまとめた。再液状化試験において、相対密度と液状化強度を整理すると、相対密度だけでは説明できない液状化強度の大小関係が得られた(1:初回液状化試験、2-4:再液状化試験)。

図-8と図-9に代表的な再液状化試験の有効応力経路と偏差応力-鉛直ひずみ関係を示す。液状化履歴を受ける前後の非排水繰り返し載荷挙動と比較すると、液状化履歴を受けた場合、液状化抵抗が大きく低下した。また、繰り返し回数に対するひずみの増分は、1回目の液状化試験より再液状化試験の方が小さくなったことが判る。

1回目と2回目の液状化試験が実施された直前の供試体の様子を比較すると、2回目の供試体は1回目の液状化試験の影響により相対密度 $Dr$ が約10%程度増加したが、 $G_{dVH}$ の値は18MPa程度低下した。それに対応するように、2回目の液状化試験による両振幅鉛直ひずみ5%に達するまでの繰り返し回数 $N_c$ は、1回目と比較して大幅に低下した。同様に、 $G_{dVH}$ と $G_{dHH}$ の値も1回目の液状化により低下してい

るが、低下の程度は  $G_{dvH}$  より小さかった。これは、1 回目の液状化により供試体の異方性の発達および構造の弱が生じたことを示唆している。異方性が発達するほど、密度が増加するにもかかわらず、液状化抵抗は弱くなると考えられる。Yamada et al. (2010)<sup>16)</sup>は、液状化抵抗性にとって、異方性が相対密度より重要な要因であるのに対し、液状化中ひずみの変化にとっては、相対密度がより重要な要因であることを示したが、本研究でも同様の傾向が得られた。

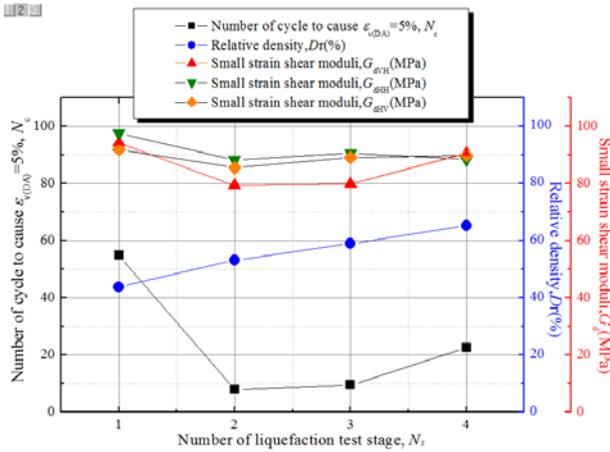


図-7 再液状化実験における両振幅鉛直ひずみが5%に達するまでの繰返し回数、相対密度とせん断波速度の変化(繰返し応力比  $R=0.11$ ) (呉ら(2016)<sup>9)</sup>に加筆)

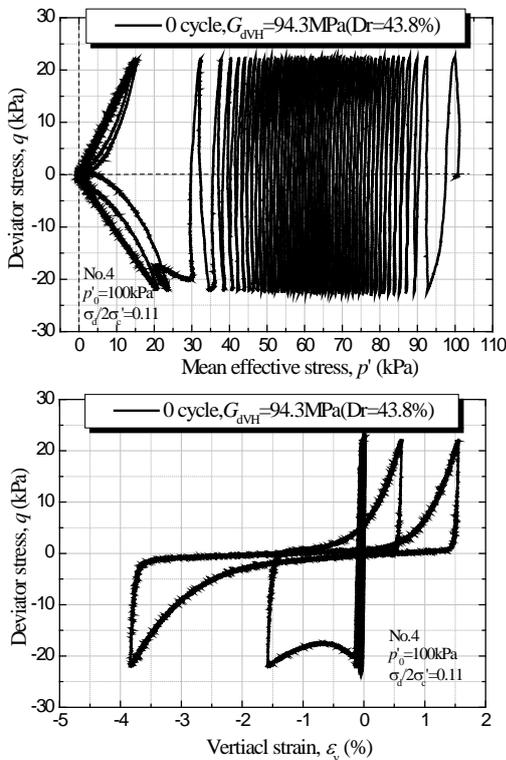


図-8 一回目の液状化試験結果(上)有効応力経路、(下)偏差応力-鉛直ひずみ関係

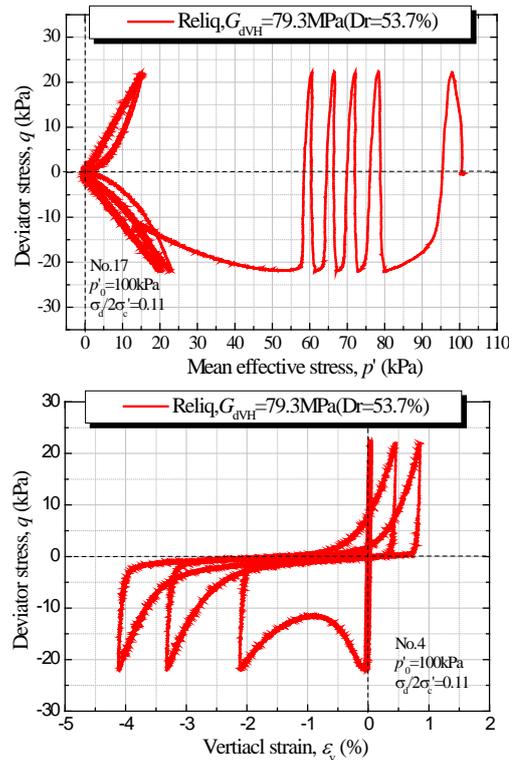


図-9 二回目の液状化試験(再液状化試験)結果(上)有効応力経路、(下)偏差応力-鉛直ひずみ関係

## 6. 間隙水圧と軸ひずみの推移

各試料の繰返し回数を両振幅鉛直ひずみ  $\epsilon_{v(DA)}=5\%$  に達した時の繰返し回数で正規化した値 ( $N_c/N_c(\epsilon_{v(DA)}=5\%)$ ) と、両振幅鉛直ひずみ  $\epsilon_{v(DA)}$  の関係を図-10 に示す。結果より、応力履歴を受けた  $D_r=50\%$  の供試体(No.1, No.2)と応力履歴を与えていない  $D_r=75\%$  の供試体(No.6, No.8)は異なる傾向を示した。再液状化試験(No.8)の場合、最初の段階で軸ひずみの発達は急に増加したが、その後繰返し回数増加に伴う軸ひずみの増分は小さくなった。また、応力履歴を与えていない  $D_r=75\%$  の供試体(No.6)の軸ひずみの増分は、液状化試験の初期段階では大きいものの、繰返し回数増加に伴う軸ひずみの増加傾向は、応力履歴を受けた  $D_r=50\%$  の供試体(No.1, No.2)ほど大きくない。

応力履歴を受けた  $D_r=50\%$  の供試体(No.1, No.2)では軸ひずみの増分は小さいが、遅い段階 ( $N_c/N_c(\epsilon_{v(DA)}=5\%)=0.9$ ) から軸ひずみが急に大きくなる。これは、排水繰返し载荷による土粒子構造の安定化が消失したことが原因だと考えられる。相対密度は液状化後のひずみの発達程度に影響を与えていると考えられる。

また、このような液状化挙動の違いは、排水繰返し载荷に伴う過剰間隙水圧の上昇傾向にも現れた。

各試料の繰返し回数を $\varepsilon_{v(DA)}=5\%$ に達した時の繰返し回数で正規化した( $N_c/N_c(\varepsilon_{v(DA)}=5\%)$ )値と、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ の関係を図-11に示す。応力履歴を受けた $D_r=50\%$ の供試体(No.1, No.2)では、土粒子構造の安定性により過剰間隙水圧は上昇しにくい傾向にあると言えるが、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c=95\%$ になると、軸ひずみの増分が急に大きくなった。一方、 $D_r=75\%$ の供試体(No.6, No.8)では、過剰間隙水圧比は初期段階( $N_c/N_c(\varepsilon_{v(DA)}=5\%)=0.4$ )で $\Delta u/\sigma'_c=95\%$ になった。その後繰返し回数増加に伴う軸ひずみの増分はほぼ一定になった。応力履歴を受けた $D_r=50\%$ の供試体(No.1, No.2)のような急激な増加傾向は見られなかった。

Seed. (1966)<sup>17)</sup>、柴田(1970)<sup>18)</sup>は、液状化時の過剰間隙水圧と軸ひずみの発達を支配する要因として密度を挙げた。一方、本研究の結果より、相対密度は液状化後のひずみの発達程度に影響を与え、微小変形特性に代表される土粒子構造は過剰間隙水圧の発達に大きく影響することが示された。

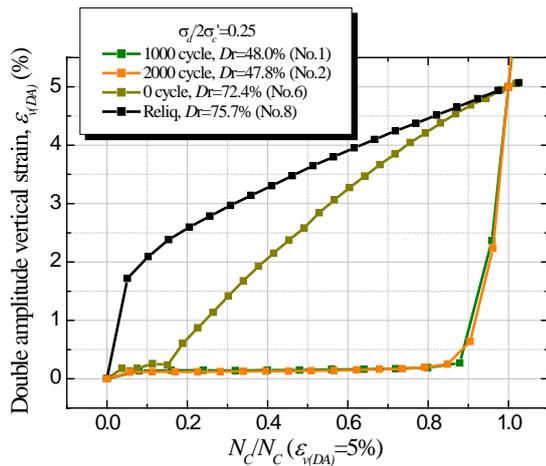


図 10 正規化した繰返し回数と両振幅鉛直ひずみの関係

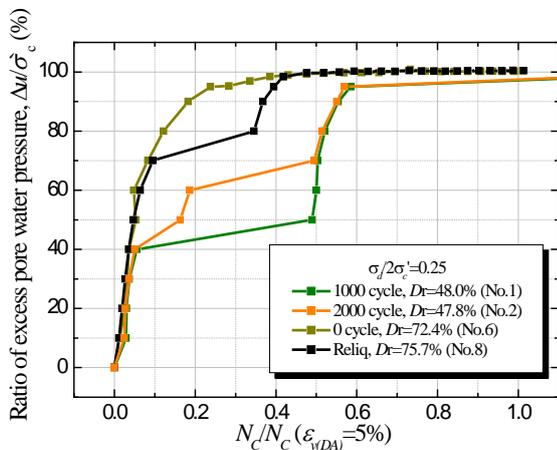


図 11 正規化した繰返し回数と間隙水圧比の関係

## 7. まとめ

本研究では、三軸試験機を用い、相対密度を 50%、75%程度に調整した豊浦砂の微小せん断剛性率と液状化強度特性を比較した。排水せん断履歴や液状化履歴を供試体に与えることで、供試体の土粒子構造の変化を表現した。

実験結果より、排水繰返し载荷回数の増加および液状化履歴により、せん断剛性率と液状化強度も大きく変化した。等方圧密後に排水繰返し载荷を与えることで、顕著な密度化が生じることなく  $G_{dHV}$  と  $G_{dHH}$  の値はほぼ一定であるのに対し、 $G_{dVH}$  と  $G_s$  が増加する傾向が確認され、液状化強度も増加した。これは鉛直方向の排水繰返し载荷を与えることにより、構造異方性が発達し、鉛直方向の土粒子構造が強くなるためと考えられる。一方、液状化履歴により供試体の微小変形特性の異方性の発達と構造の弱化が生じ、液状化強度も大きく低下する傾向が得られた。

一方、液状化中の過剰間隙水圧とひずみの発達に着目すると、過剰間隙水圧の増加に対しては微小変形特性に代表される土粒子構造の影響が大きく、液状化後のひずみの発達に対しては密度の影響が大きかった。

## 参考文献

- 1) 松尾修, 東拓生 : 液状化の判定法, 土木技術資料, 39(2), pp.20-25, 1997.
- 2) 社団法人日本道路協会 : 道路橋示方書 V.耐震設計編, 2012.
- 3) 松尾修 : 道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.1-20, 2004.
- 4) 国土交通省 : 液状化対策技術検討会議, 2011.
- 5) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. : Effect of sample disturbance on dynamic properties of sand, *Soils and Foundations*, 26(1), pp.53-63, 1986.
- 6) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. : Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples, *Soils and Foundations*, 29(1), pp.93-104, 1989.
- 7) Wang, J. H., Moran, K. and Baxter, D.P.C. : Correlation between cyclic resistance ratios of intact and reconstituted offshore saturated sands and silts with the same shear wave velocity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.1574-1580, 2006.

- 8) Kiyota, T., Koseki, J., Sato, T. and Kuwano, R. : Aging effects on small strain shear moduli and liquefaction properties of in-situ frozen and reconstituted soils, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.2, pp.259-27, 2009.
- 9) 呉杰祐、清田隆、片桐俊彦 : 排水・非排水繰返し載荷履歴が豊浦砂のせん断剛性率と液化強度に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72 No.4, pp.482-488, 2016
- 10) 加藤祐之, 龍岡文夫, プラダン・テージ・B・S : 標準豊浦砂の繰返し非排水三軸試験に及ぼす長期圧密と過圧密の影響, 砂質および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム発表論文集, pp.155-162, 1984.
- 11) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23-41, 1986b
- 12) Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M. and Pradhan, T<sub>EI</sub> B. S. : Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.119-131, 1988.
- 13) 山下聡, 喜多川俊介, 堀智仁, 鈴木輝之 : 堆積構造と応力の異方性が砂質土の初期せん断剛性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 694/ III-57, pp.319-329, 2001.
- 14) Hoque, E. and Tatsuoka, F. : Anisotropy in the elastic deformation of materials, *Soils and Foundations*, 38(1), 163-179, 1998.
- 15) 堤千花, 佐藤剛司, 古関潤一 : 動的および静的に求めた乾燥豊浦砂の弾性変形係数, 生産研究 58 巻 6 号, pp35-38, 2006
- 16) Yamada, S. and Takamori. T., Sato, K. : Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, *Soils and Foundations*, 50(1), 9-25, 2010
- 17) Seed, H.B., & K.L. Lee : Liquefaction of saturated sands during cyclic loading simple shear conditions, *Proc. ASCE*, Vol.92, No. SM 6, pp.105-134. 1966.
- 18) 柴田徹, 行友浩 : 飽和砂の繰返し載荷による液化現象の研究, 土木学会論文集, No. 180, pp. 83-89, 1996

## EFFECTS OF INITIAL CYCLIC LOADING ON ANISOTROPY OF SMALL STRAIN SHEAR MODULI AND LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF TOYOURA SAND

Chiehyu WU, Takashi KIYOTA and Toshihiko KATAGIRI

This study investigates the effects of initial cyclic loading history on anisotropy of small strain shear moduli and liquefaction properties of Toyoura sand. Specimens were subjected to isotropic consolidation up to 100 kPa, followed by drained cyclic loadings under triaxial condition with constant vertical strain double amplitude of 0.1%. In order to investigate variation of the small strain shear moduli and liquefaction resistance of the specimens caused by initial cyclic loading, a series of static and dynamic measurement methods were conducted. It was found that the small strain shear moduli of the specimen increase with increase in the number of drained cyclic loading history, and there is a good correlation between the small strain shear moduli and liquefaction resistance. In addition, the anisotropy of soil structure was developed due to the initial liquefaction, and re-liquefaction strength tends to decrease significantly. On the other hand, we discussed the development of strain and excess pore pressure of specimens with different relative density.