# 排水・非排水繰返し載荷履歴が豊浦砂の せん断剛性率と液状化強度に及ぼす影響

呉 杰祐1·清田 隆2·片桐 俊彦3

<sup>1</sup>学生会員 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

 <sup>2</sup>国際会員 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
<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

液状化発生の予測に向けて、標準貫入試験によるN値やせん断波速度等のパラメータと液状化強度との関係 がこれまでにも検討されてきた。しかし、これらの相関は必ずしも良いとはいえない。そこで本研究では、 相対密度を一定とした供試体の微小せん断剛性率と液状化強度の相関性を検討するために、三軸試験機を 用いて一連の動的微小変形計測と液状化試験を行った。供試体の密度を変えることなく土粒子構造を変化 させるために、あらかじめ排水せん断履歴や液状化履歴を供試体に与えた。排水せん断履歴回数が増加す るほど動的せん断剛性率と液状化強度の値が上昇することを確認した。また、液状化履歴を受けた供試体 ではせん断剛性率と液状化強度の値は低下する傾向も確認した。これらの実験結果を基に、本研究では相 対密度50%の豊浦砂供試体が有し得るせん断剛性率と液状化強度の上限・下限を見出した。

# *Key Words:* dynamic shear moduli, liquefaction resistance, compression strength, drained vertical loading history

# 1.はじめに

社会基盤施設や一般構造物の耐震設計において、地震時の地盤の液状化の検討は重要である。液状化発生予測は、 標準貫入試験によって得られるN値により、液状化抵抗性 を推定することで、その予測がよく行われている(例えば、 松尾&村田,1997)<sup>1)</sup>、道路橋示方書,2002<sup>2)</sup>。しかし、現状 では同じN値や粒度を持つ地盤においても、液状化抵抗性 が異なる場合がある(松尾,2004)<sup>3</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、既に多くの既往研究により報告されている。 Tokimatsu & Hosaka (1986)<sup>4)</sup>は、凍結サンプリングによって 採取された不攪乱試料と、密度調整された再構成試料によ る一連の実験結果を基に、不攪乱試料の液状化強度は再構 成試料よりも大きくなることを示すとともに、液状化強度 は微小せん断剛性率と良い相関があることを示した。更に、 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、再構 成試料の液状化強度が凍結試料と同等の値を示すことを示 した。 また、Kiyota et al. (2009)<sup>5</sup>は、沖積地盤や埋立地盤の年代 効果にはセメンテーションよりもインターロッキングの効 果が主要であるとし、Tokimatsu & Hosaka (1986)の手法によ り、原位置の液状化強度特性を適切に評価できることを示 した。しかし、既往研究においてはせん断剛性率(S 波速 度)と液状化強度の関係範囲が大きいため(例えば、Andrus et al., 2003)<sup>6</sup>、せん断剛性率(S 波速度)のみで精度の高い 液状化予測は難しい可能性もある。

これまでの研究では、一定の相対密度で異なる構造を有 する砂質土のせん断剛性率と液状化強度特性の関係をまと めた例は少ない。高精度な液状化予測手法の開発に向けた 研究の一環として、本研究では三軸試験機を用い、同一の 密度(*D*<sub>r</sub>=50%)で異なるせん断剛性率(*G*<sub>d</sub>)を有する供試体を、 排水繰返し載荷履歴や再液状化試験により作成し、それら の液状化強度とせん断剛性率との関係を検討した。

### 2. 試験方法

本研究は、せん断剛性率と液状化特性の関係を把握するために三軸試験機を用いて実験を行った。本研究の供試体

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  $e_{max} = 0.957$ 、最小間隙比  $e_{min} = 0.611$ 、土粒子密度 $\rho_s = 2.656$ ) を用いた。想定の密度になるように高さを決定し、空中落 下法により供試体を作成した。

初期平均有効主応力 p'o= 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'o = 100kPa まで等方圧密を行った。圧密後、一定振幅(両振 幅軸ひずみ 0.1%)の排水繰返し載荷履歴(0回・100回・ 1000回・2000回・3000回)を異なる供試体に与えた。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。また一連の実験の過程では、再液状化試験も 実施している。

実験中において弾性波速度を計測し、密度と微小せん断 剛性率の考察を行っている。弾性波速度を計測するため、 試料においてキャップ部分に取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を用いた動的計測手法を用 いることで、式(1)より弾性波速度を求めた。また、以下 の式(2)より動的せん断剛性率 *G*<sub>d</sub> を算出した。測定概要を 図1に、実際に取り付けた様子を写真1に示す。

$$V_{\rm s} = {\rm L}/\Delta {\rm T} \tag{1}$$

L: 加速度計間の距離 [m] ΔT:到着時間の差 [s]

 $G_{\rm d} = \rho_{\rm sat} V_{\rm s}^2$ 

(2)

 $V_{\rm s}$ :せん断波伝搬速度 [m/s] $\rho_{\rm sat}$ :試料飽和密度  $[g/cm^3]$ 

実験供試体の概要を表1に示す。本研究では、相対密度 が50%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排水繰り 返し載荷履歴を受けた後のものであり、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。



図1 せん断波速度計測概略図



写真1 計測状況

#### 表1 液状化試験試料の概況

液状化試験							
No.	S	$D_{\rm r}(\%)$	G <sub>d</sub> (MPa)	R	Nc		
1	0	48.2	-	0.11	26		
2	0	49.8	87.3	0.13	12		
3	0	51.3	88.3	0.15	5.5		
4	0	53.9	92.4	0.17	3		
5	100	47.6	-	0.15	49		
6	100	49.6	100.8	0.20	3.5		
7	1000	51.3	104.8	0.15	76		
8	1000	52.4	111.3	0.20	30		
9	1000	50.3	110.2	0.22	27		
10	1000	48.0	106.7	0.25	13		
11	2000	47.9	110.6	0.22	36		
12	2000	47.8	110.6	0.25	18		
13	2000	50.1	114.2	0.30	10		
14	2000	50.0	-	0.35	4		
15	3000	56.6	112.4	0.25	17		
15	Reliq	54.7	87.9	0.10	20		
16	Reliq	53.7	79.3	0.11	8		
17	Reliq	48.1	82.5	0.13	3.5		
18	Reliq	50.1	84.4	0.15	3		

\*S:応力履歴回数、D<sub>r</sub>:相対密度、G<sub>d</sub>:せん断剛性率、R:非排 水繰返し応力比、Nc:両振幅軸ひずみが 5%になるまでの繰 返し回数、Reliq:再液状化試験

\*\*相対密度とせん断剛性率は応力履歴を与えた後の値 \*\*\*No.1,5,14のせん断剛性率は計測されていない

#### 動的計測による微小せん断剛性率

### 3.1等方圧密過程における動的せん断剛性率の変化

ここでは、等方圧密中に加速度計を用いて算出した微小 せん断剛性率  $G_d/f(e)$  について説明する。本研究では、間隙 比関数は、Handin & Richart (1963)<sup>7)</sup>を用いた。 図2 に各供 試体の等方圧密過程における  $G_d/f(e)$ と有効応力パラメータ  $(\sigma_v' \cdot \sigma_h')^{0.5}$ の関係を示す。なお、この応力関数は、異なる有 効応力状態のせん断剛性率を適切に表現できるものとして、 佐藤ら (1999)<sup>8)</sup> が示したものである。有効応力の増加とと もに微小せん断剛性率も増加しており、一般的な認識と整 合する 関係 が得られている。 最終等方 圧密応力で  $(\sigma'_0=100kPa)$ 供試体の  $G_d$ の値は圧密前  $(\sigma'_0=30kPa)$ のそれ と比べて、約 1.7~1.8 倍になった。



### 3.2 排水繰返し載荷履歴における動的せん断剛性率の変化

**図3**および表2に等方圧密後に実施した排水繰返し載荷 回数とそれに伴う G<sub>d</sub>/f(e)の増加率の関係を示す。

鉛直ひずみ一定振幅の繰り返し排水せん断を与えること で、その回数が増加するほど $G_d/f(e)$ が増加することを確認 した。排水繰返し載荷を与える前の $G_d/f(e)$ の値は、排水繰 返し載荷履歴を 100 回与えた供試体のそれと比べて、約 1.15 倍になり、排水繰返し載荷履歴を 1000 回与えた場合の 供試体では、約 1.3 倍になった。排水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。このため、繰り返し載荷後の微小せん断剛性率 の増加は、密度化ではなく、土粒子間のかみ合わせ効果が 発達したためだと考えられる。一方、排水繰返し載荷履歴 が 200 回を超えると、 $G_d/f(e)$ の増加は鈍くなった。ある密 度の砂地盤において発達し得る土粒子のかみ合わせ効果に は限界が存在する可能性を示唆している。



# 表2 排水せん断履歴における動的せん断剛性率の増加率

液状化試験							
			せん断剛性率の増加比				
No.	S	$D_{\rm r}(\%)$	$G_{\rm d}(100 \ \square)/$	$G_{\rm d}(1000 \ \square)/$			
			$G_{\rm d}(0 \square)$	$G_{\rm d}(0 \square)$			
5	100	47.6	-	-			
6	100	49.6	1.16	-			
7	1000	51.3	1.12	1.26			
8	1000	52.4	1.13	1.27			
9	1000	50.3	1.14	1.28			
10	1000	48.0	1.11	1.27			
11	2000	47.9	-	1.29			
12	2000	47.8	-	1.3			
13	2000	50.1	-	1.28			
14	2000	50.0	-	-			
15	3000	56.6	-	1.27			

\*相対密度とせん断剛性率は応力履歴を与えた後の値

### 4. 液状化試験

代表的な非排水繰り返し載荷試験(液状化試験)結果と して、図4、図5にそれぞれ繰り返し載荷を与えていない 試料(No.3)と、事前排水繰り返し載荷を1000回を与えた 供試体(No.7)の有効応力経路と偏差応カー軸ひずみ関係を 示す。



図4 応力履歴のない試料の液状化試験結果 上)有効応力経路、下)偏差応カー軸ひずみ関係



図5 応力履歴1000回を受けた試料の液状化試験結果 上)有効応力経路、下)偏差応カー軸ひずみ関係

両実験の応力比振幅は同じ(R=0.15)であり、供試体相対 密度の差はほとんどない。繰返し載荷履歴を1000回与える ことにより、非排水繰返し載荷に伴う有効応力の低下の傾 向が遅くなることが確認できた。また、この傾向は偏差応 カー軸ひずみひずみ関係にも見受けられ、軸ひずみ5%に なるまでの繰返し回数も増加し、G<sub>d</sub>の増加により液状化強 度も増加することがわかった。

## 5. 再液状化試験

図6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(0:液状化実験、1-3:再液状化実験)。



図 6 再液状化実験における両振幅軸ひずみが 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)

液状化試験と再液状化試験直前の供試体の様子を比較す ると、後者は相対密度が高いが( $D_r$ :43.8%→53.2%)、 $G_d$ の値 は低い( $G_d$ :85.4MPa→67.4MPa)。それに対応するように、再 液状化試験による両振幅軸ひずみ 5%に達するまでの繰り 返し回数も低下した(Nc:55→8)。本研究では、この液状化 履歴を受けた試料(第一回再液状試験)の結果を基に、  $D_r$ =50%の供試体の液状化強度とせん断波剛性率の下限値 とみなした。

#### 6.考察

同一の相対密度を持つ供試体においても、排水繰返し載 荷履歴が多いほど同じ応力比振幅における軸ひずみ両振幅 ε<sub>v(DA)</sub>=5%になるまでの繰り返し回数も増加することが分 かった。これは、排水せん断履歴を与えることにより、土 粒子間のかみ合わせ効果が発達したためだと考えられる。 供試体圧密後、排水繰り返し載荷を与えることで密度を大 幅に変えることなく土粒子構造が安定することで、液状化 強度が増加する傾向が確認された。

また、図7に排水繰返し履歴の有無による液状化強度曲線の違いを示す。排水繰返し履歴回数を100回・1000回・2000回与えた供試体による液状化試験により、排水繰り返し履歴があると液状化強度が上昇する傾向が確認された。応力履歴0回、100回、1000回および2000回の液状化強度 $R_{L20}$ の値は0.12、0.16、0.23および0.25となった。また、非排水繰返し載荷(再液状化試験)を与えることより、液状化強度が低下し、 $R_{L20}$ の値は0.10となった。また、図8に示すように、液状化強度とせん断剛性率の間には良い相関があることも確認された。 $D_r$ が同じ50%程度の豊浦砂供試体であるが、液状化強度が2.5倍程度異なることが判る。



図7 排水繰返しせん断履歴有無による液状化強度曲線



図8 動的せん断剛性率 G<sub>d</sub> と液状化強度 R<sub>L20</sub>の関係

なお、表2および図7に示すとおり、3000回の排水繰返 し載荷履歴を有する供試体の液状化抵抗は、2000回の試 験結果とほぼ同様の液状化抵抗とせん断剛性率が得られた。 このことより、本研究では2000回の載荷履歴を有する供 試体の液状化強度とせん断剛性率の値を、相対密度50%の 豊浦砂が有し得る値の上限値であるとみなした。

#### 7. まとめ

本研究では、三軸試験機を用い、相対密度を50%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。

結果より、排水繰り返し載荷回数の増加および液状化履 歴と共に、せん断剛性率と液状化強度も大きく変化した。 **D**<sub>r</sub>が同じ50%程度の豊浦砂供試体であるが、せん断剛性率は3割程度、液状化強度は2.5倍程度も変化することが確認された。また、豊浦砂の **D**<sub>r</sub>が50%の供試体が有し得るせん断剛性率と液状化強度の上限・下限値を示した。

#### 参考文献

1) 松尾修 (2004): 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, 1-20

 2) 社団法人日本道路協会 (2002): 道路橋示方書 V. 耐震設計編.

3) 松尾修, 東拓生 (1997): 液状化の判定法, *土木技術資* 料, 39(2), 20-25

4) Tokimatsu,K. and Hosaka, Y. (1986): Effect of sample disturbance on dynamic properties of sand, *Soils and Foundations*, 26(1), pp.53-63

5) Kiyota, T. Koseki, J. Sato, T. Kuwano, R. (2009): 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

6) Andrus, R.D., Stokoe II, K.H, Chung, R.M. and Juang, C.H. (2003): Guidelines of evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurement and simplified procedure

7) Hardin, B. O. and Richart, F.E. (1963): Elastic wave velocities of granular soils, *Journal of ASCE*, 89(1), 33-65.

8) 佐藤剛司, 永山浩, 川上定弘, 古関潤一 (1999): 豊浦 砂の非排水繰返し三軸試験中のせん断剛性率と応力状態の 関係, *土木学会第54 回年次学術講演会Ⅲ*, 136-137