## 同等の供試体密度とせん断波速度を有する 不攪乱試料と再構成試料の液状化強度特性

梅原 由貴1·清田 隆2·柳浦 良行3

<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: umehara1@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

<sup>3</sup>正会員 基礎地盤コンサルタンツ株式会社(〒136-8577 東京都江東区亀戸 1-5-7) E-mail: yagiura.yoshiyuki@kiso.co.jp

本研究では、非排水繰り返し三軸試験により、同等の密度とせん断波速度をもつ不攪乱試料と再構成試料の液状化強度特性を比較した。千葉市にてジェルプッシュサンプリングを行い、品質の良い沖積砂質不攪乱試料を採取した。再構成試料は試験後の不攪乱試料を用いて、乾燥突き固め法と湿潤突き固め法により不攪乱試料と同等の密度になるように作成した。せん断波速度は供試体上部の加振機と側面の加速度計を用いて等方圧密中に測定し、再構成試料のせん断波速度が不攪乱試料と同等であることを確認した。試験結果より、同等の密度とせん断波速度を持つにも関わらず、不攪乱試料と再構成試料の液状化強度や繰り返し載荷中の挙動には違いがあった。年代効果によって生じるセメンテーション効果や供試体の構造異方性の違いが影響した可能性がある。

**Key Words:** liquefaction resistance, shear wave velocity, small strain shear moduli, remolded sample, undisturbed sample

#### 1. はじめに

重要構造物の設計時など、地盤の詳細な液状化強度評価が必要な場合には、原位置で採取した不攪乱試料を用いた室内試験結果が用いられる。しかし、不攪乱試料は採取時に乱れてしまい、実地盤と異なる液状化強度を示す可能性がかねてから指摘されてきた。例えば吉見(1994)  $^{11}$ は、実務で一般的に用いられるチューブサンプリング試料と、乱れが少ないとされる凍結サンプリング試料の液状化強度を比較した。この結果から、 $N_{1}$  値が低い地盤においてはチューブサンプリング試料は凍結試料より強度が大きくなり、 $N_{1}$  値が高い地盤においては強度が小さくなったことを示し、これはチューブサンプリング試料の乱れの影響であるとした。

凍結サンプリング手法は高価であるため、実務で頻繁に用いることは難しい、そこで、不攪乱試料の乱れの影響を補正する方法として、試料に過圧密履歴や繰り返しせん断履歴等を与えることで微小せん断剛性率  $G_{\rm d}$  やせん断波速度  $V_{\rm s}$  を増加させ、原位置の値にそろえてから液状化試験を行う手法が提案されている  $^{2}$ . 既往の研究

でも、例えば、Tokimatsu et al. (1989)<sup>3</sup>は、チューブサンプリング試料にせん断履歴を加えることにより凍結試料と等しい液状化強度が得られることを示している.

一方,2011年の東北地方太平洋沖地震で顕著な液状化被害が発生した東京湾岸の埋立地盤のN値は低く,このような地盤では,前述のように不攪乱試料の液状化強度は採取時の乱れにより実際よりも高くなることが予想される $^{1}$ .この場合,実験供試体の $^{1}$   $G_{d}$  も原位置よりも高くなると予想されるため,上記手法のように不攪乱試料に応力履歴を与えて $^{1}$   $G_{d}$  を増加させる方法では乱れを補正することができず,再構成試料の利用が必要と考えられる.また,前述のように不攪乱試料の $^{1}$   $G_{d}$  を合わせることで液状化強度が評価できるのであれば, $^{1}$   $G_{d}$  を合わせた再構成試料でも強度が評価できる可能性がある.

 $G_d$  をあわせた再構成試料による液状化強度の評価については、既往研究がある(例えば Tokimatsu & Hosaka (1986)  $^4$  )一方で、微小変形特性の観点から大ひずみにかかわる液状化抵抗を推定することは困難だという見解もある(例えば吉見&福武 (2005) $^5$  ). Wang et al. (2006) $^6$  は、密度と  $V_c$  が等しい不攪乱試料と再構成試料の液状

化挙動を調べ、軸ひずみ両振幅 5%で定義した液状化強度は不攪乱試料と再構成試料で一致するものの、過剰間隙水圧の上昇傾向が異なることや、軸ひずみ両振幅 6%以上のひずみ領域では不攪乱試料と再構成試料の挙動が一致しないことを示している。液状化に至るまでの載荷回数だけでなく、試験中の挙動も含め、再構成試料による液状化強度評価についてのさらなる検討が必要だと考えられる。

そこで本研究では、再構成試料を用いた液状化強度評価について検討することを目的とし、乱れの少ない不攪乱試料と、それと同等の密度とせん断波速度をもつ再構成試料を用いて非排水繰り返し三軸試験を行い、液状化挙動を比較した.

### 2. 原位置試験

2011 年の地震で液状化被害のあった千葉市美浜区にてジェルプッシュサンプリングを行って不撹乱試料を採取した. 同地点にて標準貫入試験, PS 検層(サスペンション法), 密度検層を行った(Umehara et al.  $(2015)^{7}$ ). このうち,深度 15m 付近の沖積砂質土層から採取した不攪乱試料を検討に用いた. 表-1 に研究対象深度, N値, PS 検層による  $V_s$ , 密度検層による飽和密度  $\rho_{st}$ の測定結果を示す.

表-1 対象地盤の原位置調査結果

深度(GL-m)	14.5-15.5		
N値	10		
N <sub>1</sub> 値	7		
$V_{\rm s}$ (m/s)	174.0		
$ ho_{ m sat}({ m g/cm^3})$	1.819		

#### 3. 試料の作成と室内試験

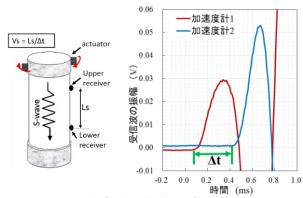
不攪乱試料と再構成試料の供試体サイズは,直径 50mm,高さ 100mm である.再構成試料は,三軸試験後の不攪乱試料を炉乾燥させた後,乾燥突き固め法と湿潤突き固め法の 2 種類の供試体作成方法で作成した.突き固めは供試体を 5 層に分けて行った.湿潤突き固め時の含水比は 5%程度である.各試料の密度と  $V_s$  については,まず不攪乱試料の密度と  $V_s$  が原位置と同等であることを確認した後,その不攪乱試料と同等の密度と  $V_s$  になるように再構成試料を作成した.今回の再構成試料については,突き固めで密度を不攪乱試料にあわせた供試体が,不攪乱試料とほぼ同等の  $V_s$ を示した.このため,  $V_s$ 

を調整するために応力履歴をかける等の工程は行っていない.

作成した試料は三軸試験装置にセットされ、拘束圧 20kPa で二重負圧法により飽和し、B 値が 0.96 以上であることを確認した. 背圧は 200kPa である. 原位置有効上載圧である拘束圧 141kPa まで等方圧密を行ったのち、非排水繰り返し三軸試験を周波数 0.1Hz にて行い液状化特性を調べた.

また,等方圧密は段階的に拘束圧を上げ,それぞれの 拘束圧において  $V_s$  を測定した. $V_s$  の測定手法を図-1 に 示す.キャップに設置した加振機から 1kHz の sin 波を供 試体に入力し,供試体側面のメンブレンに接着した加速 度計 2 台で受信した.受信波の例を図-1 に示す.この 2台の到達時刻の差(図-1 の $\Delta$ t)で加速度計間の距離を 割ることによって  $V_s$  を算出し, $G_d$  を得た( $G_d = \rho_s V_s^2$ ).

なお、 $V_s$ や  $G_d$ は応力状態に依存し、 $(\sigma_v' \sigma_h')^{05}$ と相関が良いことが既往研究で確認されている  $^8$ . このため、等方応力状態である室内試験で得た  $V_s$ を異方応力状態の原位置調査結果と比較する際には、原位置と等しい応力状態 $(\sigma_v' \sigma_h')^{05}$ のときの  $V_s$ を用いた(本研究では $(\sigma_v' \sigma_h')^{05} = 100$ kPa,  $K_0 = 0.5$ と仮定した).



**図-1** V<sub>s</sub>測定機構(左)と波形例(右)

#### 4. 微小変形特性

表-2 に原位置試験と室内試験の各試料の  $\rho_{\text{st}}$ ,  $V_{\text{s}}$ ,  $G_{\text{d}}$  の値を示す。室内試験結果は $(\sigma_{\text{v}}', \sigma_{\text{h}}')^{0.5} = 100$ kPa における計測値である。また,非排水繰り返し載荷時の繰り返し応力比 CSR,軸ひずみ両振幅  $\varepsilon_{\text{v(DA)}} = 5$ %に達した時の繰り返し載荷回数  $N_{\text{c}}$ ,過剰間隙水圧比  $\Delta_{\text{d}}/\sigma' = 95$ %に達した時の繰り返し載荷回数  $N_{\text{c}}$ 'も示した。繰り返し載荷は拘束圧 141kPa で行っていることに留意されたい。各試料の粒径加積曲線を図-2 に示す。

不攪乱試料 (以下 GP) の結果を見ると、GP1 は、 $\rho_{st}$ 、 $V_{s}$   $G_{d}$  ともに原位置試験とほぼ同等の値となった.  $V_{s}$  の変化率は 1%程度である. 一般に、不攪乱試料の品質は

原位置試験と室内試験で測定された  $V_s$  の比較により評価される 4が,これに基づくと今回用いた GP は品質が良く,採取時の乱れを受けていないと考えられる.一方,GP2 については同深度から採取したものの GP1 と細粒

分含有率が 4%程度異なる試料であった. このため、今回の再構成試料作成は GP1 の実験後試料で行うこととし、以後 GP2 の試験結果は参考値とすることとした. 乾燥突き固め法で作成した再構成試料 (以下 RS-D) については、3供試体 RS-D1, RS-D2, RS-D3 いずれも  $\rho_{\rm st}$  は GP1 とほとんどかわらず、GP1 との  $V_{\rm s}$  の違いは最大で 6%程度と、大きな差はない.

湿潤突き固め法で作成した再構成試料(以下 RS-W)についても、 $\rho_{sa}$ は GP1 とほとんどかわらず、 $V_s$ の違いは 2%程度であった.

#### 5. 液状化強度特性

GP, RS-D, RS-W の非排水繰り返し三軸試験から得た液状化強度曲線を図-3 に示す.繰り返し回数 20 回で定義した強度  $R_{L20}$ は GPが 0.22,RS-D は 0.16 程度となり,密度や  $V_s$ がほぼ同じであるにも関わらず,やや異なる  $R_{L20}$ が得られた. RS-W1 については 1 供試体のみであるため液状化強度曲線を描けないが,同程度の応力比を与えた GP1, RS-D2 の試験結果を比較すると,液状化に対する抵抗が最も低い結果となった.

応力比がほぼ等しい3試験(GP1, RS-D2, RS-W1)について、軸ひずみ両振幅5%に至るまでの有効応力経路、応力ひずみ関係を図-4に示す。また、試験中の過剰間隙水圧とひずみの発達過程を図-5、図-6に、過剰間隙水圧比95%に達した時の載荷回数で正規化した載荷回数と過剰間隙水圧比の関係を図-7に、軸ひずみ両振幅5%に達した時の載荷回数で正規化した載荷回数と両振幅軸ひずみの関係を図-8に、過剰間隙水圧比と両振幅軸ひずみの関係を図-9に示した。

図-4 の有効応力経路や図-5 の水圧の発達過程より、GP1、RS-D2、RS-W1 いずれも繰り返し載荷 1 回目の圧縮側の載荷で生じる間隙水圧はほぼ等しいか RS-W1 がやや少ない程度であった. しかし、繰り返し載荷 1 回目の伸長側の載荷から過剰間隙水圧の発達に差が生じ、RS-W1、RS-D2、GP1の順に大きくなった. 特に伸長方向の強度に差があることで水圧発達の差が生まれた可能性がある. また、図-7 より、過剰間隙水圧比 95%に達する載荷回数がそれぞれ異なることには留意が必要ではあるが、水圧の発達傾向は RS-W1、RS-D2 のほうが GP1 よりも急激であることがわかる. このように再構成試料の水圧上昇が不攪乱試料よりも急激であるという傾向は Wang et al. (2006) のでも確認されている.

表-2 各試料の密度と微小変形特性

	$ ho_{\rm sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>s</sub> (m/s)	G <sub>d</sub> (MPa)	CSR	N <sub>c</sub> (回)	<i>N</i> <sub>c</sub> ' (旦)
原位置	1.819	174.0	55.1	-	-	-
GP1	1.812	172.1	53.6	0.213	23	18
GP2	1.725	*	*	0.239	9	10
RS-D1	1.803	171.5	53.0	0.243	4	5
RS-D2	1.806	179.4	58.1	0.201	7	7
RS-D3	1.813	182.6	60.5	0.173	16	16
RS-W1	1.810	168.6	51.5	0.202	3	4

 $N_{\rm c}$ :  $\epsilon_{\rm V(DA)}$ =5%のときの繰り返し載荷回数

 $N_{c}$ ':  $\Delta u \sigma$ '=95%のときの繰り返し載荷回数

\*: 計測不能

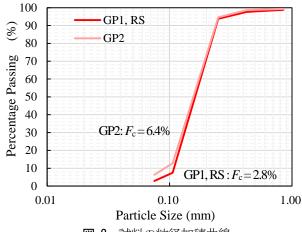


図-2 試料の粒径加積曲線

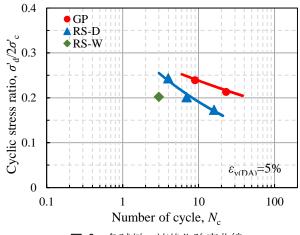
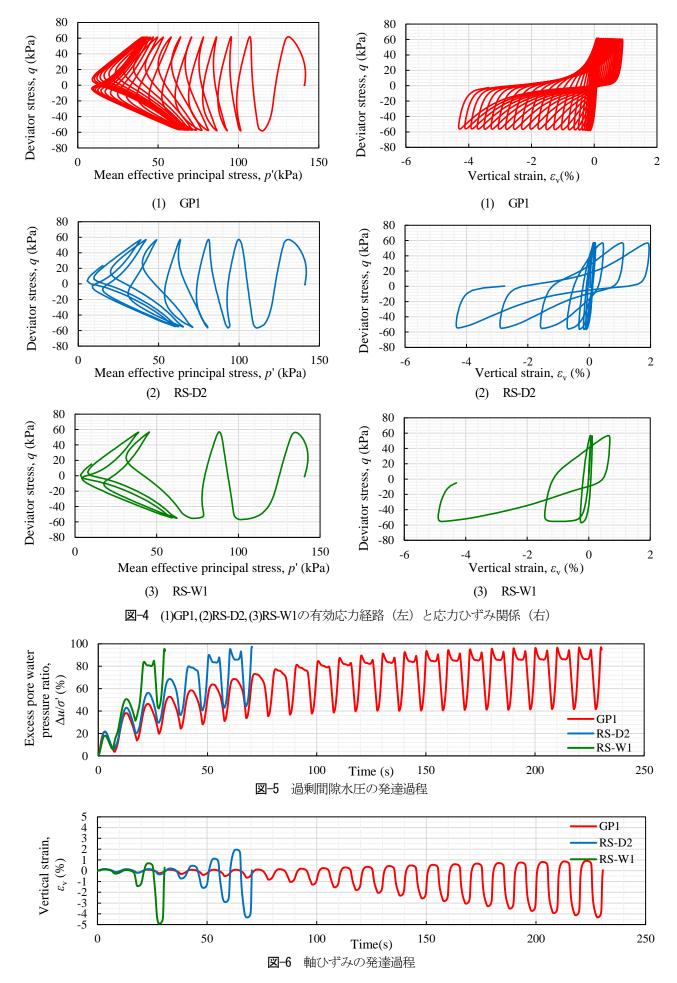


図-3 各試料の液状化強度曲線

一方, 図-4 の応力ひずみ関係や図-6 のひずみの発達 過程より, 圧縮側の軸ひずみに関して GP1, RS-W1 は 1%程度であるのに対し RS-D2 は 2%程度であった. ま た, 図-8 より, GP1 はひずみの発達がゆるやかなのに 対し, RS では一度ひずみがではじめると急激に発達が 進む傾向があった. 図-9 から, GP1 は水圧が発達して



もひずみの発達がおさえられていることがわかる. RS は GP よりも水圧, ひずみともに一度発生し始めたら急速に発達するという特徴がみられた.

#### 6. 考察

本研究の実験結果より、同じ密度、 $V_s$ であっても不攪乱試料と再構成試料の液状化強度や液状化に至るまでの挙動は異なることが示された。この理由としては、以下の2つが考えられる。

第1の理由として、年代効果の影響が考えられる。本研究ではこの影響の有無を確かめるために、既往研究  $^9$  にならい GP, RS-D を作成、飽和したのちに拘束圧を OkPa にし一軸排水圧縮試験を行った。粘着力をもたない試料であれば一軸強度は発揮されないはずであるが、GP は一軸圧縮強度  $q_u = 4kPa$  程度を発揮した( $\mathbf{Z}$ -10)。一方,RS-D は一軸強度を発揮しなかった。

Kiyota et al. (2009) %は、年代効果が土粒子同士のかみ合わせにより発揮される場合に限り、再構成試料に応力履歴を与えることで原位置の液状化強度や液状化強度特性を適切に評価できることを示している。これらのことから、本研究で用いた沖積 GP は鉱物の化学反応によるセメンテーション効果を有し、セメンテーション効果を持たない RS とは異なる挙動を示したと考えられる。また、図-4 から図-9 で見られた、GP1 が伸長方向に強かったり、ひずみや水圧の発達が緩やかで粘り強いという傾向は、このセメンテーション効果のためではないかと考えられる。

第2の理由として、供試体の構造異方性の違いが考えられる。図-11 は GP1, RS-D2, RS-W1 の等方圧密中の体積ひずみ  $\epsilon_{vol}$  とせん断ひずみ  $\gamma$  (=  $\epsilon_{v}$  -  $\epsilon_{h}$  )の関係である。GP1 のせん断ひずみは圧密にともなって負に発達しており、RS-W1 はせん断ひずみの発達がほとんどなく、RS-D2 は正のせん断ひずみを生じていた。これは供試体の構造異方性の違いを示していると考えられる。供試体の構造異方性の違いが液状化強度に影響を及ぼすことは、Tatsuoka (1986)  $^{10}$ 等によって示されており、今回も図-11のような異方性の違いが液状化強度に影響した可能性がある。

本研究では  $V_s$  を図-1 のように鉛直方向にしか計測していないが、水平方向に伝搬する  $V_s$  の値も計測することで(例えば山下ら(2001)  $^{11}$ )液状化強度に及ぼす異方性の影響を評価できる可能性がある.

一方,本研究で作成した RS-W1 の強度が RS-D2 の強度よりも小さくなった点については、さらにデータ数を増やした検討や他の供試体作成方法との比較が必要である.

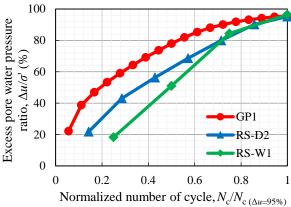


図-7 正規化した載荷回数と過剰間隙水圧比の関係

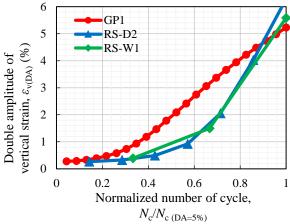


図-8 正規化した載荷回数と両振幅軸ひずみの関係

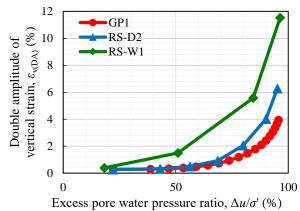


図-9 過剰間隙水圧と両振幅軸ひずみの関係

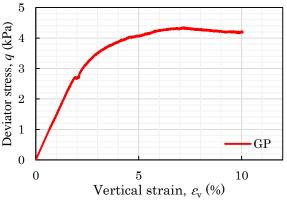
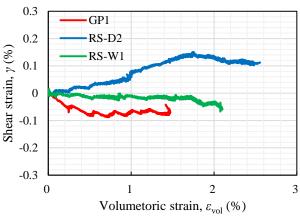


図-10 飽和後の不攪乱試料の一軸試験結果



図−11 等方圧密中の体積ひずみとせん断ひずみの関係

#### 7. まとめ

本研究では、乱れの少ない不攪乱試料と同等の密度とせん断波速度  $V_s$ をもつ再構成試料と不攪乱試料の液状化挙動について、非排水繰り返し三軸試験により検討した。

その結果、密度と  $V_s$ が同じ再構成試料を使用しても不攪乱試料とは異なった液状化強度や挙動が得られた. この理由として、試料が持つ構造異方性の違いや年代効果によるセメンテーション効果等が、今回測定した鉛直方向の  $V_s$  だけでは評価できなかった可能性があげられる.

これらのことから、再構成試料によって実地盤の液状化強度を評価する場合、地盤種別によっては密度と鉛直方向の  $V_s$  を原位置と合わせるだけでは十分ではない可能性がある。セメンテーション効果が少ないと考えられる埋立地盤への適用に限定したり、水平方向の  $V_s$  も比較する等の工夫が必要だと考えられる.

#### 参考文献

- 1) 吉見吉昭: 砂の乱さない試料の液状化抵抗~N値~ 相対密度関係, 土と基礎, Vol.42, No.4, pp.63-67, 1994.
- 2) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, pp. 744-746, 丸善出版, 2009.
- Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.93-104, 1989.
- 4) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y.: Effects of sample disturbance on dynamic properties of sand, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.53-64, 1986.
- 5) 吉見吉昭, 福武毅芳: 地盤液状化の物理と評価・対策 技術, 技報堂出版, 2005.
- 6) J. H. Wang, K. Moran and C. D. P. Baxter: Correlation between cyclic Resistance ratios og intact and reconstituted offshore saturated sands and silts with the same shear wave velocity, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.132, No.12, pp.1574-1580, 2006.
- Umehara, Y., Chiaro, G., Kiyota, T., Hosono, Y., Yagiura, Y. and Chiba, H.: Effectiveness of Gel-Push sampling technique to retrieve undisturbed sandy specimens for liquefaction test, 6<sup>th</sup> International conference on earthquake geotechnical engineering, 2015.
- 8) 佐藤剛司, 永山浩, 川上定弘, 古関潤一: 豊浦砂の非排水繰り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, pp.136-137, 1999.
- Kiyota, T., Koseki, J., Sato, T. and Tsutsumi, Y.: Effects of sample disturbance on small strain characteristics and liquefaction properties of Holocene and Pleistocene sandy soils, Soils and Foundations, Vol.49, No.4, pp.509-523, 2009.
- 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, 1986.
- 11) 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, 694(3-57), pp.319-329, 2001.

(?受付)

# LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF UNDISTURBED AND REMOLDED SAMPLES WITH THE SAME DENSITY AND SHEAR WAVE VELOCITY

#### Yuki UMEHARA, Takashi KIYOTA and Yoshiyuki YAGIURA

In order to investigate the liquefaction characteristics of undisturbed and remolded samples which have the same specimen density and shear wave velocity, a series of undrained cyclic triaxial tests was performed. The high quality undisturbed samples were collected from alluvial sandy layer in Chiba City by Gel-Push sampling method. The remolded samples were prepared by dry tamping method and wet tamping method to adjust the specimen dencities at the same level as that of the undisturbed sample. The shear wave velocity, measured by trigger and accelerometer method during isotropic consolidation, of the remolded samples was confirmed to be almost the same as that of the undisturbed sample. The test results show that even though the same specimen density and shear wave velocity, the liquefaction resistance and the behavior during cyclic loading were different between the undisturbed samples and the remolded samples. The reasons for the difference may be caused by a cementation effect acting on the soil particles by aging and/or an inherent anisotropy of the specimens.