

# 循环荷载后饱和海相软黏土不排水静力试验研究

蒋敏敏<sup>1,2</sup>, 蔡正银<sup>1</sup>, 曹 培<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 通过静、动三轴试验,研究了波浪循环荷载作用对饱和海相软黏土不排水静力特性的影响. 试验结果表明:循环荷载作用后,饱和海相软黏土不排水剪在  $q \sim p'$  平面上的应力路径与超固结土相似,循环应力幅值比越大,土体表现的超固结性越强. 循环荷载的作用会导致不排水剪阶段孔压的降低,孔压系数表现出超固结土的性质,正常固结土、超固结土和由循环荷载作用导致的似超固结土在不排水剪破坏时的孔压系数均随着平均有效应力比值  $p'/p_c'$  的增大而增大. 此外,循环荷载作用会导致软黏土不排水强度发生变化,当循环荷载后孔压比值  $u_{pe}/\sigma'_{1c}$  小于 0.175 或循环荷载后弱化指数大于 0.70 时,不排水强度降低;当循环荷载后孔压比值  $u_{pe}/\sigma'_{1c}$  介于 0.175 ~ 0.256 或弱化指数介于 0.54 ~ 0.70 时,循环荷载后不排水强度略有增大.

**关 键 词:** 饱和海相软黏土; 循环后不排水试验; 有效应力路径; 孔压; 不排水强度

**中图分类号:** TU411

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2010)02-0079-06

波浪荷载的作用对海相软黏土力学性质的影响是离岸工程中的一个重要问题. 波浪循环荷载作用会引起土体中孔压上升、结构性发生变化,并导致土体强度和模量等的变化. Andersen 等<sup>[1]</sup>通过静、动三轴和动单剪试验研究了波浪循环荷载对 Drammen 黏土静力特性的影响,试验结果表明正常固结土在循环荷载作用后表现出似超固结性质,不同超固结比的土体在 1 000 次循环荷载作用后,当循环应变幅值小于  $\pm 3\%$  时,不排水强度的折减小于 25%. Yasuhara 等<sup>[2-3]</sup>通过动三轴试验分析了循环荷载对 Ariake 黏土静强度的影响,通过假定似超固结土与超固结土具有相同的性质,建立了循环荷载后强度变化的公式. Hyde 等<sup>[4]</sup>总结了多位研究者对粉质黏土、黏土和海相黏土在循环荷载后不排水试验的结果,发现不同土类在不同形式的循环荷载作用后土体强度的变化具有较大差异,相当一部分研究认为循环荷载后土体的静强度会降低,而部分研究认为循环荷载对土体静强度不产生影响或甚至会增大.

近年来随着我国深水防波堤、海洋平台、人工岛等离岸工程构筑物的大规模兴建,对海洋土在波浪荷载作用下的研究显得尤为重要. 本文通过静、动三轴试验来研究波浪循环荷载对天津港海相软黏土不排水应力路径、孔压和强度等方面性质的影响.

## 1 试 验 概 况

波浪荷载与地震、交通等动荷载相比具有以下主要特点:周期较长,波浪荷载周期通常达 5 ~ 20 s;荷载持续时间较长,一次大波浪期持续时间达数小时至数十小时;在大波浪荷载作用前已经经受多次小波浪荷载的作用<sup>[5-6]</sup>. 本文中的试验分为静三轴和动三轴试验,静三轴试验为固结不排水剪试验,动三轴试验步骤为:①土体固结;②在不排水条件下施加轴向循环荷载;③循环荷载后立即进行不排水剪. 试验方案见表 1,试验 1 ~ 9 为动三轴试验,试验 10 ~ 15 为静三轴试验. 动三轴试验过程中偏应力  $q$  与时间关系示意图见图 1,可以

收稿日期: 2009-05-21

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200632800003-06)

作者简介: 蒋敏敏(1981-),男,江苏大丰人,博士研究生,主要从事海岸岩土工程方面的研究.

E-mail: jiang\_mm@hotmail.com

看到偏应力方向未发生变化,循环荷载均为单向荷载<sup>[2]</sup>.根据天津港工程区域波浪荷载特性,在动三轴试验中的循环荷载次数和周期分别为 3 000 次和 8 s.循环荷载为正弦波,施加方式为荷载控制方式,不排水剪为应变控制方式.

试验均在 GDS 电机控制三轴试验系统上进行,试样尺寸为直径 39.1 mm,高度 80 mm,从压力室底座施加轴力和轴向变形,可施加正弦波、三角波、方波和自定义波等波形,位移精度达 0.07%,轴力精度达 0.1%.

试验土体为天津港近岸浅层的原状淤泥质黏土,是天津港区域一种典型的软土,各项物理力学指标平均值如下:土粒密度为 2.75 g/cm<sup>3</sup>,含水量为 62.6%,液限为 42%,塑性指数为 18.5,干密度为 1.01 g/cm<sup>3</sup>,灵敏度为 4.

表 1 静、动三轴试验方案

Tab. 1 Experimental schemes of static and cyclic triaxial tests

| 试验<br>编号 | 试验方式 | 竖向固结应力<br>$\sigma'_{1c}/\text{kPa}$ | 侧向固结应力<br>$\sigma'_{3c}/\text{kPa}$ | 循环应力幅值<br>$\sigma_{cy}/\text{kPa}$ | $R_{oc}$ | 周期<br>$T/\text{s}$ | 循环次数<br>$N/\text{次}$ |
|----------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------|--------------------|----------------------|
| 1        | 动三轴  | 100                                 | 50                                  | 10.00                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 2        |      | 100                                 | 50                                  | 15.00                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 3        |      | 100                                 | 50                                  | 17.50                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 4        |      | 150                                 | 75                                  | 15.00                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 5        |      | 150                                 | 75                                  | 22.50                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 6        |      | 150                                 | 75                                  | 26.25                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 7        |      | 200                                 | 100                                 | 20.00                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 8        |      | 200                                 | 100                                 | 30.00                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 9        |      | 200                                 | 100                                 | 35.00                              | 1        | 8                  | 3 000                |
| 10       | 静三轴  | 100                                 | 50                                  | —                                  | 1        | —                  | —                    |
| 11       |      | 150                                 | 75                                  | —                                  | 1        | —                  | —                    |
| 12       |      | 200                                 | 100                                 | —                                  | 1        | —                  | —                    |
| 13       |      | 100                                 | 50                                  | —                                  | 2        | —                  | —                    |
| 14       |      | 150                                 | 75                                  | —                                  | 2        | —                  | —                    |
| 15       |      | 200                                 | 100                                 | —                                  | 2        | —                  | —                    |

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力路径分析

不排水循环荷载的作用在  $e \sim \lg p'$  平面上路径为  $\overrightarrow{AB}$ , 见图 2. 对超固结土来说,  $e \sim \lg p'$  平面上的路径为  $\overrightarrow{ACB}$ . Matsui 和 Yasuhara 等<sup>[2,7]</sup> 认为土样从  $A \rightarrow B$  后与从  $A \rightarrow C \rightarrow B$  后会表现出相似的力学性质, 即循环荷载作用从  $A \rightarrow B$  后土样表现出似超固结的性质.

将循环荷载阶段的单向循环应力幅值  $\sigma_{cy}$  与竖向固结应力  $\sigma'_{1c}$  的比值定义为循环应力幅值比. 图 3 为各组试验的有效应力路径, 其中 A 和 E 为正常固结、超固结比为 2 的静三轴试验的结果, B, C, D 分别为循环应力幅值比为 0.100, 0.150 和 0.175 的动三轴试验的结果, B, C, D 下方的数值为循环荷载后孔压  $u_{pc}$  与  $\sigma'_{1c}$  的比值,  $p'_c$  为初始平均有效固结应力. 从各组试验结果可见, 循环荷载后不排水剪的有效应力路径向左侧偏移, 表现出超固结土的性质. 循环应

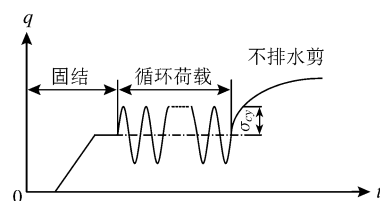


图 1 动三轴试验偏应力与时间关系

Fig. 1 Deviator stress in cyclic triaxial tests

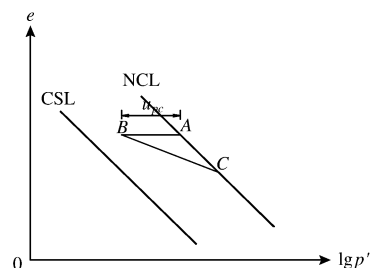


图 2 孔隙比与有效固结应力关系

Fig. 2 Schematic of void ratio and effective consolidation stress relation

力幅值比越大, 循环荷载后孔压比值  $u_{pc}/\sigma'_{lc}$  越大, 不排水剪阶段表现出的超固结性越强, 上述 3 种循环应力幅值比的循环荷载作用后, 土体表现出弱超固结性质。

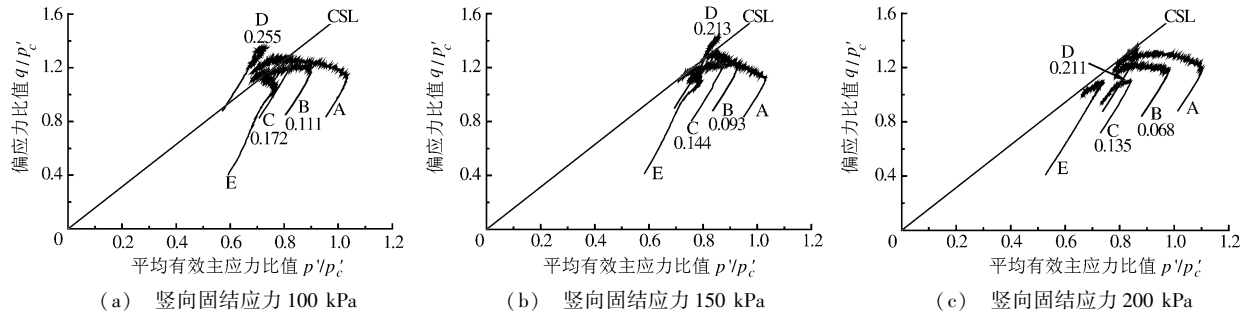


图3 不同应力历史条件的有效应力路径

Fig.3 Effective stress path with different stress history

## 2.2 孔压结果及分析

根据 Ladd 和 Vucetic 等<sup>[8-9]</sup>的研究, 可将三轴试验的孔压结果对竖向固结应力  $\sigma'_{lc}$  进行归一化处理和分析。本文将孔压分为循环荷载后产生的孔压  $u_{pc}$  和不排水剪阶段产生的孔压  $u_{us}$  两部分。各循环应力幅值比和正常固结、超固结比等于 2 的不排水剪的孔压比值结果  $u_{us}/\sigma'_{lc}$  见图 4, 其中 A ~ E 线的意义与图 3 相同 (B, C, D 右侧数值为各组循环三轴试验的  $u_{pc}/\sigma'_{lc}$  值)。由图 4 可见, 循环应力幅值比越大, 循环荷载后孔压比值  $u_{pc}/\sigma'_{lc}$  越大, 不排水剪阶段的孔压比值  $u_{us}/\sigma'_{lc}$  越小, 土体表现的超固结性越强; 循环应力幅值比  $\sigma_{cy}/\sigma'_{lc}$  在 0 ~ 0.175 之间, 土体表现出弱超固结的性质。不排水剪的孔压系数为:  $A = u_{us}/\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ , 其中  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  为偏应力增量。各组试验孔压系数结果见图 5, 其中 A ~ E 线的意义与图 3 相同。

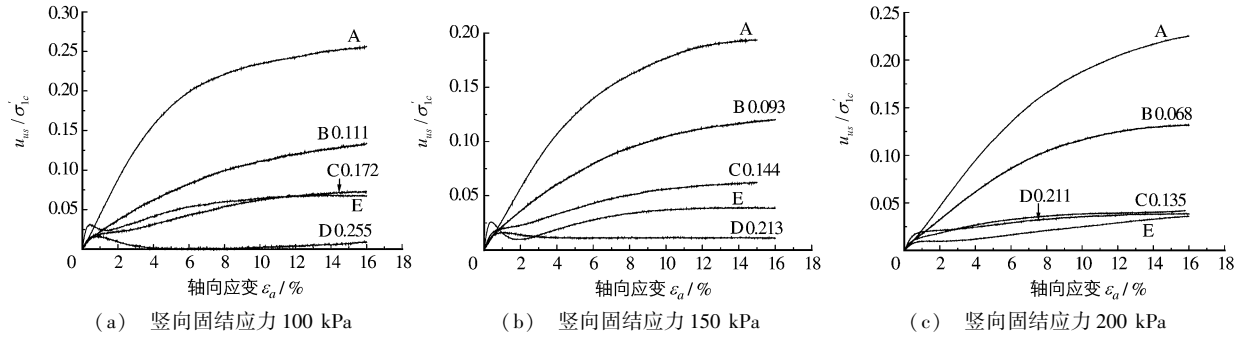


图4 不排水剪孔压比值与轴向应变关系

Fig.4 Normalized excess pore pressure with axial strain in undrained shear tests

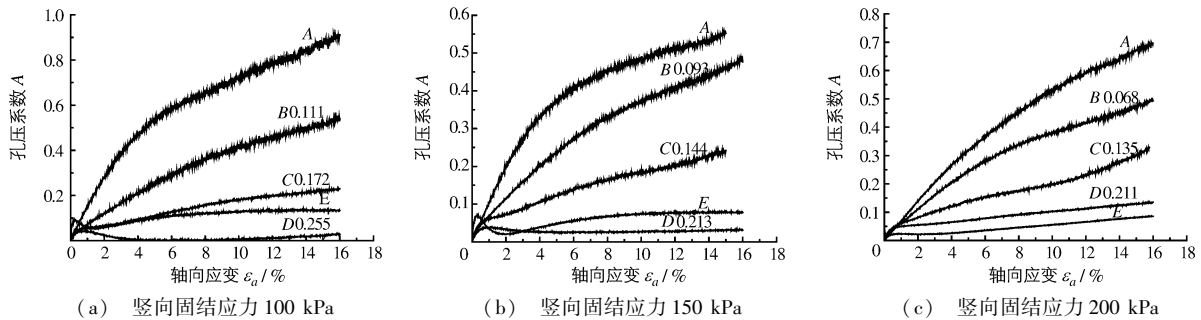


图5 孔压系数与轴向应变关系

Fig.5 Pore pressure coefficients with axial strain

剪切破坏时的孔压系数  $A_f$  结果见表 2。由图 5 可见,循环应力幅值比越大,循环荷载后孔压比值  $u_{pc}/\sigma'_{1c}$  越大,不排水剪阶段的孔压系数越小,土体表现的超固结性越强。正常固结土孔压系数  $A_f$  在 0.55 ~ 0.87 之间,超固结比  $R_{oc}=2$  的土体的孔压系数  $A_f$  在 0.079 ~ 0.134 之间,不同循环荷载后不排水剪孔压系数  $A_f$  在 0.022 ~ 0.520 之间。从孔压系数的结果可见,循环荷载后土体不排水剪孔压系数比正常固结土低,表现出超固结黏土的性质<sup>[10]</sup>,且循环应力幅值比越大,循环荷载后孔压比值  $u_{pc}/\sigma'_{1c}$  越大,孔压系数  $A_f$  越低。不排水剪破坏时孔压系数  $A_f$  与平均有效应力比值  $p'_i/p'_c$  的关系见图 6,其中  $p'_i$  为不排水剪开始时的平均有效应力。由图 6 可见,循环荷载后不排水剪孔压系数  $A_f$  与正常固结和超固结土不排水剪的孔压系数  $A_f$  均随着平均有效应力比值  $p'_i/p'_c$  增大而增大。

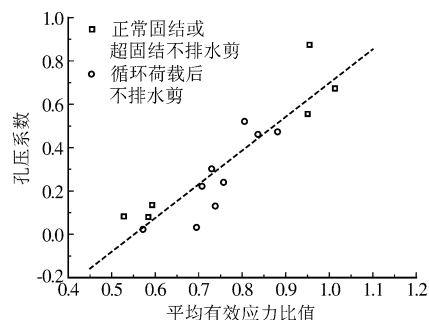


图 6 孔压系数  $A_f$  与平均有效应力比值关系

Fig. 6 Pore pressure coefficient  $A_f$  with normalized mean effective stress

表 2 各组试验剪切破坏时孔压系数

Tab. 2 Pore pressure coefficients under failure

| 竖向固结应力 $\sigma'_{1c}$ / kPa | 荷载条件                             | $A_f$ | 竖向固结应力 $\sigma'_{1c}$ / kPa | 荷载条件                             | $A_f$ |
|-----------------------------|----------------------------------|-------|-----------------------------|----------------------------------|-------|
| 100                         | $R_{oc}=1$                       | 0.874 | 200                         | $R_{oc}=1$                       | 0.671 |
|                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.1$   | 0.520 |                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.1$   | 0.472 |
|                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.15$  | 0.221 |                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.15$  | 0.301 |
|                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.175$ | 0.022 |                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.175$ | 0.129 |
|                             | $R_{oc}=2$                       | 0.134 |                             | $R_{oc}=2$                       | 0.081 |
| 150                         | $R_{oc}=1$                       | 0.554 |                             |                                  |       |
|                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.1$   | 0.461 |                             |                                  |       |
|                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.15$  | 0.239 |                             |                                  |       |
|                             | $\sigma_{cy}/\sigma'_{1c}=0.175$ | 0.031 |                             |                                  |       |
|                             | $R_{oc}=2$                       | 0.079 |                             |                                  |       |

### 2.3 强度结果及分析

图 7 为剪切破坏时的偏应力比值  $q_{f,cy}/q_{f,NC}$  与循环荷载后孔压比值及循环荷载后弱化指数的关系,其中  $q_{f,cy}$  为循环荷载后不排水剪破坏时的偏应力,  $q_{f,NC}$  为正常固结土不排水剪破坏时的偏应力。图中虚线为  $q_{f,cy}/q_{f,NC}=1.0$ ,实线为超固结比等于 2 的土体强度与正常固结土强度的比值,  $q_{f,oc}/q_{f,NC}=0.86$ 。

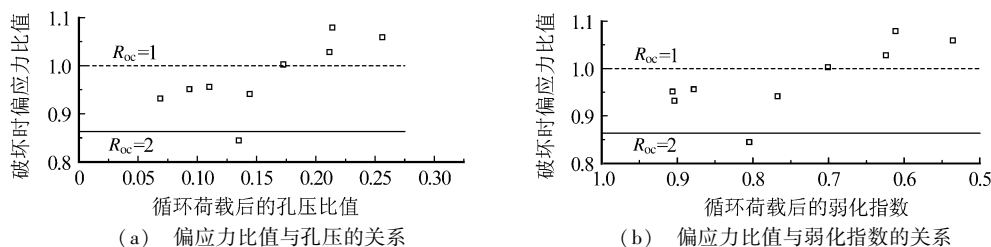


图 7 剪切破坏偏应力比值与循环荷载后孔压及弱化指数的关系

Fig. 7 Normalized deviator stress under failure in undrained shear tests with normalized pore pressure and degradation index after cyclic loading

由图 7(a) 可见,当循环荷载后的孔压比值  $u_{pc}/\sigma'_{1c}$  小于 0.175 时,循环荷载后不排水强度总体上略有降低,循环荷载后强度  $q_{f,cy}/q_{f,NC}$  大多介于正常固结土和  $R_{oc}=2$  的超固结土之间,  $q_{f,cy}/q_{f,NC}$  最小值为 0.84;循环荷载后的孔压比值  $u_{pc}/\sigma'_{1c}$  介于 0.175 ~ 0.256 时,循环荷载后不排水强度总体略有增大,  $q_{f,cy}/q_{f,NC}$  最大值

为1.08. 弱化指数 $\delta$ 是循环荷载作用过程中第 $N$ 次动模量 $E_{cy,N}$ 与第1次动模量 $E_{cy,1}$ 的比值<sup>[11]</sup>,图7(b)为循环荷载后的弱化指数 $\delta_{pc}$ 与 $q_{f,cy}/q_{f,NC}$ 的关系. 弱化指数 $\delta_{pc}>0.70$ 时循环荷载后不排水强度会有所减小,而弱化指数 $\delta_{pc}$ 介于0.54~0.70时循环荷载后不排水强度会略有增大.

骆亚生<sup>[12]</sup>对非饱和黄土动力试验的研究表明:土体变形初期,损伤是影响土体结构的主导因素;变形达到一定阶段时愈合因素慢慢上升为主导因素,土体次生结构强度抑制了损伤因素对土体结构的继续削弱,土体结构随变形表现出恢复趋势. 本文的试验结果表明,当变形较小时,即 $u_{pc}/\sigma'_{1c}<0.175$ 或 $\delta_{pc}>0.70$ 时,土体强度会略有降低;变形至一定程度时,即 $u_{pc}/\sigma'_{1c}$ 介于0.175~0.256或 $\delta_{pc}$ 介于0.54~0.70时,土体强度会略有增大.

### 3 结 语

本文根据静、动三轴试验分析了循环荷载对饱和海相软黏土静力特性的影响,得到以下主要结论:

(1)循环荷载后不排水剪在 $q \sim p'$ 平面上的有效应力路径向左侧移动,表现出超固结土性质,循环应力幅值比越大,土体表现的超固结性越强.

(2)循环荷载的作用会导致不排水剪阶段的孔压降低,循环荷载后孔压系数表现出超固结土的性质,正常固结土、超固结土和由循环荷载导致的似超固结土的孔压系数 $A_f$ 均随着平均有效应力比值 $p'_i/p'_c$ 增大而增大.

(3)循环荷载的作用会导致不排水强度发生变化,当循环荷载后孔压比值 $u_{pc}/\sigma'_{1c}<0.175$ 或循环荷载后弱化指数 $\delta_{pc}>0.70$ 时,不排水强度总体上会降低,当循环荷载后孔压比值 $u_{pc}/\sigma'_{1c}$ 介于0.175~0.256时或循环荷载后弱化指数 $\delta_{pc}$ 介于0.54~0.70时,不排水强度会略有增大.

### 参 考 文 献:

- [1] ANDERSEN K H, POOL J H, BROWN S F, et al. Cyclic and static laboratory tests on drammen clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980, 106(GT5): 499-529.
- [2] YASUHARA K, HIRAO K, HYDE A F L. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 100-116.
- [3] YASUHARA K. Postcyclic undrained strength for cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(11): 1961-1979.
- [4] HYDE A F L, WARD S J. The effect of cyclic loading on the undrained shear strength of a silty clay[J]. Marine Geotechnology, 1986, 6(3): 299-314.
- [5] 钱寿易, 楼志刚, 杜金声. 海洋波浪作用下土动力特性的研究现状和发展[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 16-23. (QIAN Shou-yi, LOU Zhi-gang, DU Jin-sheng. State-of-the-art of dynamic characteristics of soil under ocean wave loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 16-23. (in Chinese))
- [6] O'REILLY M P, BROWN S F. Cyclic loading of soils: from theory to design[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1991.
- [7] MATSUI T, ABE N. Behavior of clay on cyclic-stress-strain history[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1981: 261-264.
- [8] LADD C C, FOOTT R. New design procedure for stability of soft clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100(GT7): 763-786.
- [9] VUCETIC M, DOBRY R. Degradation of marine clays under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1988, 114(2): 133-149.
- [10] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 102-107. (YIN Zong-ze. Principal theory of geotechnical engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007: 102-107. (in Chinese))
- [11] IDRIS I M, DOBRY R D, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical

Engineering Division, ASCE, 1978, 104(GT12): 1427-1447.

- [12] 骆亚生. 非饱和黄土在动、静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003. (LUO Ya-sheng. Variation of characteristics of soil structure and structural constitutive relation of unsaturated loess under static and dynamic stress conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese))

## Experimental study of post-cyclic undrained static behavior of saturated soft marine clay

JIANG Min-min<sup>1,2</sup>, CAI Zheng-yin<sup>1</sup>, CAO Pei<sup>1</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Department of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China*)

**Abstract:** Post-cyclic undrained static behavior of saturated soft marine clay is studied through static and cyclic triaxial tests. Test results indicate that post-cyclic undrained shear effective stress path in  $q \sim p'$  plane is similar to over-consolidated clay; the larger the cyclic stress ratio during cyclic load, the heavier the over-consolidated property. Post-cyclic undrained shear pore pressure which is lower than normally consolidated clay, pore pressure coefficient after cyclic load which is similar to over-consolidated clay, pore pressure coefficient under failure in normally consolidated clay, over consolidated clay after cyclic load all increase with normalized mean effective stress  $p'_i/p'_c$ . Cyclic load affects post-cyclic undrained shear strength, when normalized pore pressure after cyclic load  $u_{pc}/\sigma'_{1c}$  is smaller than 0.175 or degradation index larger than 0.70, post-cyclic undrained shear strength decreases after cyclic load, when normalized pore pressure  $u_{pc}/\sigma'_{1c}$  is between 0.175 and 0.256 or degradation index is between 0.54 and 0.70, and post-cyclic undrained shear strength increase slightly after cyclic load.

**Key words:** saturated soft marine clay; post-cyclic undrained shear test; effective stress path; pore pressure; undrained strength