

DOI: 10.11779/CJGE201909020

# 循环荷载下平面变形超固结软土蠕变特征试验研究

李国维<sup>1, 2</sup>, 蒋俊豪<sup>1, 3</sup>, 侯宇宙<sup>1, 3</sup>, 吴建涛<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学道路与铁道工程科学研究所, 江苏 南京 210024;

3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 采用原状试样试验研究平面变形超固结软土在循环荷载下的变形特征。研究表明, 静力荷载试验应力状态平面变形条件下, 正常固结和超固结软黏土以固结变形为主要特征。循环荷载试验应力状态平面变形条件下, 正常固结和超固结软黏土以剪切变形为主要特征, 超固结软土侧向变形小于正常固结软土。饱和软黏土试样在循环荷载作用初期孔隙水压力不显示波动特征, 总体趋势为累计增大到峰值后连续下降, 与静荷载作用下的孔压变化特征类似。循环荷载长时间作用后, 孔隙压力呈现波动特征, 波动峰值随时间逐渐减小, 衰减过程与应力状态和应力历史有关。

**关键词:** 循环荷载; 超固结; 平面蠕变; 软土

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)09-1745-07

**作者简介:** 李国维(1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事软基路堤变形和高边坡稳定性等方面的教学与科研工作。E-mail: lgwnj@163.com。

## Experimental study on plane creep of overconsolidated clay under cyclic loading

LI Guo-wei<sup>1, 2</sup>, JIANG Jun-hao<sup>1, 3</sup>, HOU Yu-zhou<sup>1, 3</sup>, WU Jian-tao<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai

University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The experiment on the plane creep of overconsolidated clay under cyclic loading is studied by using undisturbed samples. The results show that the consolidation deformation is the main characteristic of the normally consolidated and overconsolidated clay under static loading and plane creeping. The shear deformation is the main characteristic of the normally consolidated and overconsolidated clay under cyclic loading and plane creeping. The lateral deformation of the overconsolidated soft clay is less than that of the normally consolidated soft clay. The pore water pressure of saturated soft clay samples does not fluctuate at the initial stage of cyclic loading. The general trend is that the pore water pressure increases to the peak value and then decreases continuously, which is similar to the variation characteristics of pore water pressure under static loading. After cyclic loading for a long time, the pore pressure presents a fluctuating feature. The peak value of fluctuation decreases with time. The attenuation process is related to stress state and stress history.

**Key words:** cyclic loading; overconsolidation; plane creep; clay

## 0 引言

中国东南沿海地区分布着深厚的软黏土地层。深厚软土地基的工后沉降问题给已建或在建公路、铁路和机场等基础设施带来一系列安全隐患。这些基础设施除承受静荷载作用外, 还承受交通荷载等长期往复循环作用, 使得沉降变形过程复杂化。实际工程中, 排水固结联合超载预压法处理软土地基, 以其造价优势被广泛使用, 为有效控制工后沉降, 施工过程中采用超载预压手段控制工后长期变形。

低路堤下软基浅层软土受交通荷载影响。某机场低路堤高速公路<sup>[1]</sup>经监测发现, 由车辆荷载引起的沉

降大约占其工后沉降 30%。大量研究<sup>[2-4]</sup>表明, 车辆荷载对于低路堤公路的竖向附加应力衰减快, 影响深度达到地基路堤底面以下 6~8 m。软土在循环荷载作用下的蠕变特性对于研究低路堤下浅层软基工后沉降具有重要意义。

循环荷载下软黏土的性状与应力历史相关。超固结土的应力历史通常采用超固结比描述。超固结比对土体轴变、孔压、应力-应变曲线、剪切模量等有显

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41272327); 江苏省自然科学基金项目(BK20111747); 高校业务费专项项目(2014B04914)

**收稿日期:** 2018-11-01

著影响<sup>[5]</sup>。大量研究<sup>[6-8]</sup>也发现超固结比对软土的塑性体积变形发展有较大影响。

中主应力系数对软土应变特性具有重大影响。试验证明<sup>[9-10]</sup>，软土应变的各向异性不受大主应力方向影响，受中主应力系数显著影响。低剪应力状态下，加载初期土样塑性结构一直处于剪缩状态，达到一定振次后，土样出现了塑性剪胀趋势，残余孔压减小至负值<sup>[11]</sup>。研究发现随着中主应力系数的增加，大主应变呈线性减少，塑性中主应变由膨胀到压缩的临界中主应力系数为 0.48<sup>[12]</sup>。

排水条件下软土动力特性相较于不排水条件更为复杂。实际工程中常采用排水固结法对软基进行处理，而以往的成果大多集中于不排水条件下软土累积应变研究，其循环振次少，难以反映实际工况中软基在车辆荷载长期作用下的工后沉降变化。

低路堤软基沉降受交通荷载影响，因此开展循环荷载作用下软黏土的蠕变特性研究显得尤为重要和迫切。本文通过平面变形超固结软土的蠕变试验，针对超固结软土在多循环、低频率和长时间重复荷载作用下的工况，研究排水条件下超固结软土在循环荷载下的长期变形特征，揭示蠕变机理和发现蠕变规律。

## 1 试验情况介绍

### 1.1 试验仪器

本试验使用平面应变三轴流变仪，试样的尺寸及受力方向如图 1 所示，在竖直方向（Z）和水平方向（X）对试样施加应力（ $\sigma_x$ ， $\sigma_z$ ），试样 Y 方向受到刚性限制无变形发生。加载过程中，X 方向上的应力  $\sigma_x$  和 Z 方向上的应力  $\sigma_z$  分别通过水囊和砝码施加。

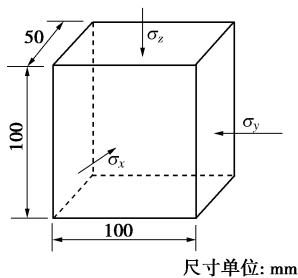


图 1 试样尺寸及受力方向

Fig. 1 Sample dimensions and stress conditions in tests

本流变仪可以对试样的体积排水量、轴向变形、Y 方向上的应力  $\sigma_y$ 、土体底部孔压和土体内部中心孔压进行实时监测。在本试验中，试样的侧向变形为

$$\varepsilon_x = \varepsilon_v - \varepsilon_z \quad (1)$$

式中，参数  $\varepsilon_v$ ， $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_z$  分别为体积应变、侧向应变和轴向应变。其中，体积应变通过排水量计算，轴向应变通过轴向位移量计算。

采用低频率多波形循环加荷系统施加循环荷载。该系统为自主研发，见图 2，原理是在加荷杠杆上施加循环荷载。可加载多种波形，加荷频率为 0.001~1 Hz，荷载大小为 0~100 N。



图 2 低频率多波形循环加荷系统

Fig. 2 Low frequency cyclic loading system

### 1.2 试验方案

本试验采用汕汾高速公路附近的原状均匀软黏土，取土深度为 4.15~4.3 m。土样的制取过程与文献<sup>[13]</sup>中的一致。土的物理参数按照《JTG E40—2017 公路土工试验规程》进行土工试验获得，基本物理试验参数见表 1。

表 1 土样物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil

| w/%                       | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $e$   | $G_s$ | $c/\text{kPa}$ |
|---------------------------|--------------------------------------|-------|-------|----------------|
| 84.3                      | 1.50                                 | 2.27  | 2.67  | 19.6           |
| $\varphi/(\text{^\circ})$ | $C_c$                                | $C_s$ | $I_L$ | $I_p$          |
| 22.4                      | 0.67                                 | 0.10  | 1.51  | 34             |

注： $C_c$ ， $C_s$  分别为压缩指数和回弹指数； $I_L$ ， $I_p$  分别为液性指数和塑性指数

表 2 为本试验方案，共分为 2 组，采用分级加载的方式施加固结荷载，待固结荷载对软土变形稳定后施加循环荷载。其中 1 组试验为正常固结土在循环荷载下的变形过程，2 组试验为超固结土在循环荷载下的变形过程，最大前期荷载为（75，150）kPa。本试验的主应力比均为 1/2，I、II 组试验所加载的循环荷载为 0.05 Hz 的半正弦波形，以模拟交通荷载对软黏土路基的影响。I、II 组试验分别采用不同围压力（ $\sigma_x$ ， $\sigma_z$ ）和不同大小的循环应力比 CSR，以及不同的循环荷载幅值模拟不同工况下软土受交通荷载的影响。以不同超固结剪应力比  $\text{OCR}_q$  来表征不同超固结剪应力比。为消除试样的初始差异性，在试验开始前，试样在（25，25）kPa 的应力下预固结 24 h。在每组超固结状态试验前，试样均卸荷至（25，25）kPa，直至回弹稳定。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 正常固结软黏土循环荷载下蠕变特征

定义循环应力比 CSR，

$$\text{CSR} = \sigma_d / 2p'_0 \quad (2)$$

式中,  $p'_0$  为前期有效体积应力, 
$$p'_0 = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z}{3}。$$

表 2 循环荷载下土样平面蠕变试验方案

| Table 2 Schemes of plane strain creep tests subjected to cyclic loading |                                                      |                     |           |          |                  |                                 |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------|-----------|----------|------------------|---------------------------------|
| 试验<br>阶段                                                                | 荷载等级                                                 |                     |           | 循环<br>次数 | 循环应<br>力比<br>CSR | 超固结剪<br>应力比<br>OCR <sub>q</sub> |
|                                                                         | 固结荷载<br>(σ <sub>x</sub> =0.5<br>σ <sub>z</sub> )/kPa | 循环荷载 σ <sub>d</sub> |           |          |                  |                                 |
|                                                                         |                                                      | 幅值<br>/kPa          | 频率<br>/Hz |          |                  |                                 |
| I - 1                                                                   | (37.5,75)                                            | 20                  | 0.05      | 30000    | 0.23             | 1                               |
|                                                                         | (50,100)                                             | 20                  | 0.05      | 30000    | 0.18             | 1                               |
|                                                                         | (75,150)                                             | 20                  | 0.05      | 30000    | 0.12             | 1                               |
| I - 2                                                                   | (37.5,75)                                            | 20                  | 0.05      | 30000    | 0.23             | 2.11                            |
|                                                                         | (50,100)                                             | 20                  | 0.05      | 30000    | 0.16             | 1.75                            |
|                                                                         | (75,150)                                             | 20                  | 0.05      | 30000    | 0.12             | 1.18                            |
| II - 1                                                                  | (37.5,75)                                            | 10                  | 0.05      | 30000    | 0.11             | 1                               |
|                                                                         | (50,100)                                             | 10                  | 0.05      | 30000    | 0.08             | 1                               |
|                                                                         | (75,150)                                             | 10                  | 0.05      | 30000    | 0.05             | 1                               |
| II - 2                                                                  | (37.5,75)                                            | 10                  | 0.05      | 30000    | 0.11             | 2.15                            |
|                                                                         | (50,100)                                             | 10                  | 0.05      | 30000    | 0.08             | 1.64                            |
|                                                                         | (75,150)                                             | 10                  | 0.05      | 30000    | 0.05             | 1.04                            |

图 3 (a) 为静荷载作用下的正常固结状态软土平面蠕变体积变形过程, 图 3 (b) 为循环荷载作用下的正常固结状态软土平面蠕变体积变形过程。图 3 (a) 的数据来自本课题组早期成果<sup>[13]</sup>, 采用的土样与本试验所用的土样相同。软土在静荷载和循环荷载下的平面蠕变体变曲线有相同的规律, 即体积变形在后期呈直线规律发展, 直线的斜率与应力状态无关。

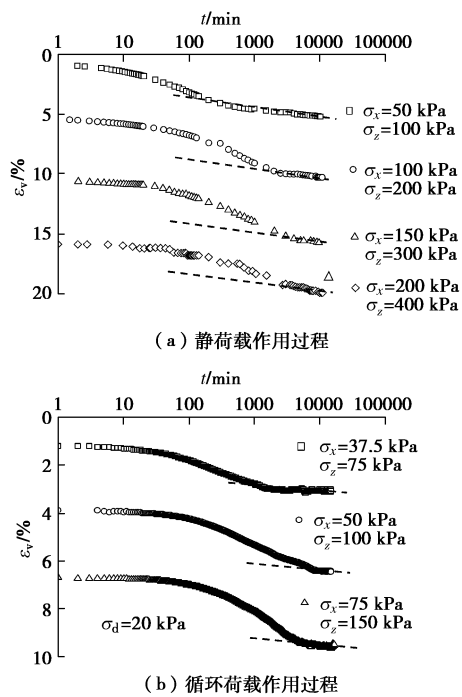


图 3 不同荷载作用下正常固结土体体积蠕变曲线

Fig. 3 Curves of volumetric creep for normally consolidated soils under different loads

图 4 (a) 为静荷载作用下的正常固结状态软土平面蠕变轴向变形过程, 图 4 (b) 为循环荷载作用下的正常固结状态软土平面蠕变轴向变形过程。如图 4 (a) 与图 4 (b) 所示, 软土在平面蠕变后期, 轴向变形都近似呈直线发展, 不同应力状态下的直线斜率有一定差别, CSR 越小, 直线斜率越大。

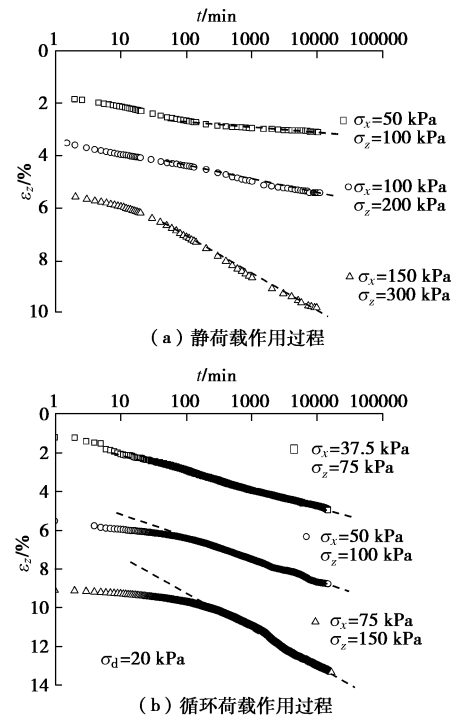


图 4 不同荷载作用下正常固结土体轴向变形曲线

Fig. 4 Curves of axial creep for normally consolidated soils under different loads

图 5 为静荷载和循环荷载作用下的正常固结土侧向变形曲线。在静荷载作用下, 试样加载初期侧向首先出现鼓胀变形, 鼓胀过后土体体积开始收缩, 并持续至蠕变结束, 最终总体都表现为收缩变形。循环荷载条件下侧向变形与静荷载条件下不同, 试样加载初期侧向出现鼓胀, 且持续出现鼓胀, 并持续至蠕变结束, 最终总体都表现为鼓胀变形。围压越小, 初始鼓胀越大; 加载后期, 侧向变形均出现鼓胀加速的趋势。

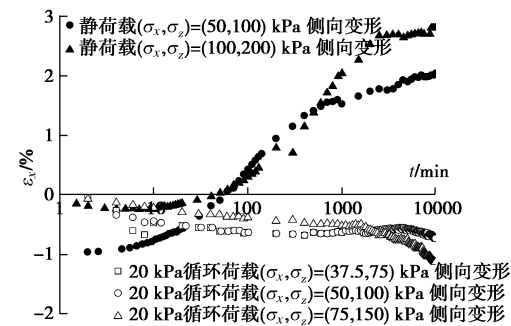


图 5 不同荷载作用下正常固结土体侧向变形曲线

Fig. 5 Curves of lateral strain for normally consolidated soils under different loads

综合图3~5,正常固结土在静荷载和循环荷载下的蠕变具有一定相似性,体积蠕变曲线和轴向蠕变曲线具有相同规律。软土在相同固结荷载 $(\sigma_x, \sigma_z) = (50, 100)$  kPa条件下,静荷载下试样的体积变形大于循环荷载下的体积变形,差值约为1.8%,轴向变形小于循环荷载下的轴向变形,差值约为0.7%。动荷载下产生了较小的体积变形,但产生较大的轴向变形。

综上,平面变形条件下,正常固结软土静荷载作用下试样的变形过程是以固结变形为主要特征,循环荷载条件下试样的变形过程是以剪切变形为主要特征。静荷载试验完成后试样两侧凹陷,循环荷载试验完成后试样两侧鼓胀,为上述试样两种变形特征的具体体现。

## 2.2 超固结软黏土循环荷载下蠕变特征

文献[14]采用剪应力反映土体变形的超固结状态,定义

$$OCR_q = \frac{q_c}{q_0} \quad (3)$$

式中  $OCR_q$  为以广义剪应力定义的平面变形条件下的超固结比,称之为超固结剪应力比; $q_c$  为前期广义剪应力; $q_0$  为当前广义剪应力。

图6(a)为静荷载作用下的超固结软土试样蠕变过程体积变形情况,图6(b)为循环荷载作用下的超固结软土试样蠕变过程体积变形情况。

图6(a)显示,静荷载作用下的超固结软土试样在蠕变全过程,体积呈收缩趋势,后期体变呈直线发展趋势,与正常固结软土的体变发展趋势类似。

图6(b)显示,循环荷载加载初期,超固结软土试样体变,超固结剪应力比  $OCR_q$  较大时表现为收缩趋势。后期蠕变过程体变表现为先收缩后膨胀,  $OCR_q$  值越大膨胀幅度越大。

由此,平面变形条件下,超固结软土试样在循环荷载作用下,体积变形总体表现为膨胀变形,超固结剪应力比  $OCR_q$  越大,体积膨胀幅度越大。

图7(a)为静荷载下的超固结软土试样的侧向变形过程,图7(b)为循环荷载下的超固结软土试样的侧向变形过程。

图7(b)显示,循环荷载作用下的超固结软土试样,在蠕变全过程表现为侧向鼓胀变形,在加荷初期侧向鼓胀微弱,蠕变过程早期侧向鼓胀缓慢,后期呈现侧向鼓胀变形加速发展趋势。

由此,平面变形条件下,超固结软土试样在循环荷载作用下,侧向变形总体表现为鼓胀变形,随时间呈连续发展趋势。

综上,平面变形条件下超固结软土试样的蠕变过程,静荷载作用下试样变形全过程体变总体表现为收

缩变形,侧向变形总体表现为凹陷特征。在循环荷载作用下体积变形总体表现为膨胀变形,侧向变形表现为鼓胀变形。循环荷载导致超固结软土试样发生了剪胀效应。超固结软土试样在循环荷载下的变形过程与正常固结软土试样具有相同的特征和规律。

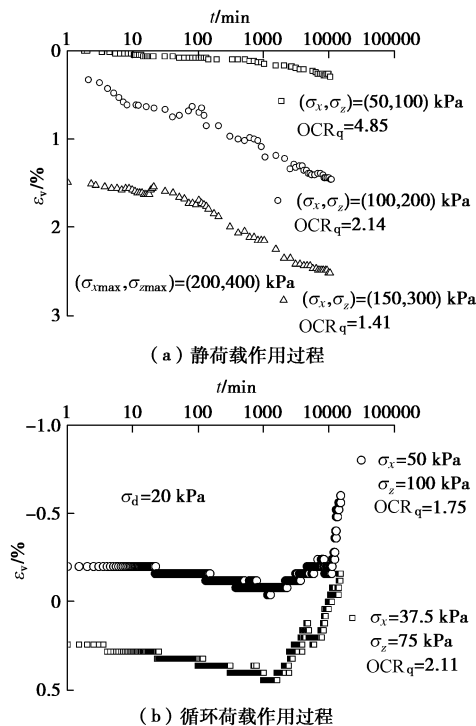


图6 不同荷载作用下超固结土体积蠕变曲线

Fig. 6 Curves of volumetric creep for overconsolidated soils under different loads

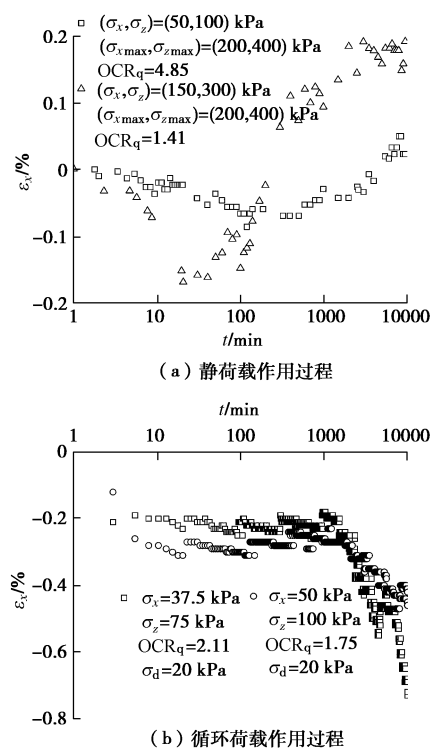


图7 不同荷载作用下超固结土侧向变形曲线

Fig. 7 Curves of lateral strain for overconsolidated soils under different loads

## 2.3 软土试样变形过程的应力状态

### (1) 静荷载下试样应力状态

图8为静荷载下的正常固结和超固结试样零变形方向的应力 $\sigma_y$ 变化过程, 荷载前期条件为 $(\sigma_x, \sigma_z)=(200, 400)$  kPa。

图8显示, 在试验荷载条件下, 试样超固结剪应力比 $OCR_q$ 越大, 变形后期的 $\sigma_y/\sigma_x$ 越大。正常固结状态下, 试样 $\sigma_y$ 在加载初期达到最大值, 其值小于 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 为小主应力。蠕变过程 $\sigma_y$ 逐渐减小趋于稳定。超固结状态下, 试样 $\sigma_y$ 在加载初期达到最大值, 其值大于 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 为中主应力。蠕变过程 $\sigma_y$ 逐渐减小趋于稳定; 当 $OCR_q=2.14$ 时,  $\sigma_y$ 衰减至 $\sigma_x$ 以下。

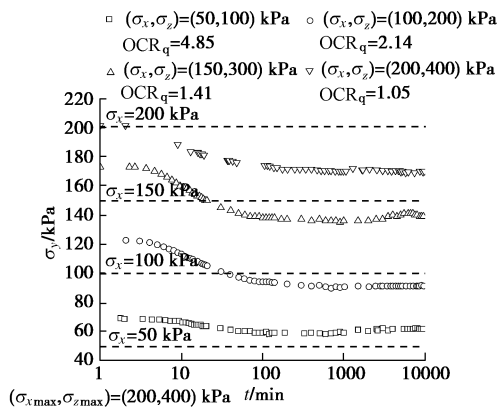


图8 静荷载作用下不同状态下 $\sigma_y$ 变化

Fig. 8 Variation of  $\sigma_y$  under different consolidation states subjected to static loading

由此, 静荷载下平面变形软土零变形方向的应力 $\sigma_y$ , 在正常固结状态下为小主应力, 在超固结状态下可能为中主应力或小主应力。蠕变过程中, 软土在正常固结和超固结状态下, 变形过程中零变形方向的主应力始终处于衰减趋势及至稳定状态。超固结剪应力比 $OCR_q$ 越大, 变形后期的 $\sigma_y/\sigma_x$ 越大。静荷载下试样的 $\sigma_y$ 为趋于稳定的特征, 和试样体积变形及侧向变形趋于稳定的特征相一致。

### (2) 循环荷载条件下试样应力状态

图9为正常固结试样循环荷载下 $\sigma_y$ 的变化过程, 固结荷载为 $(50, 100)$  kPa。

图9显示, 正常固结软土试样零变形方向主应力 $\sigma_y$ 处于振荡状态, 振荡峰值在加荷初期达到最大, 蠕变过程逐渐衰减。

试样变形全过程中 $\sigma_y$ 小于 $\sigma_x$ , 零变形方向的应力 $\sigma_y$ 为小主应力, 试样的侧向鼓胀变形发生在中主应力方向。

试样零变形方向的主应力 $\sigma_y$ , 缘于试样承担外荷载后的内外力平衡, 包括界面土压力、静水压力和超孔隙水压力, 其中界面土压力和静水压力是恒定的, 由此,  $\sigma_y$ 发生振荡是缘于试样内部超孔隙压力的周期

性变化, 加荷产生的超孔隙压力越大,  $\sigma_y$ 值越大。

图10为超固结软土试样循环荷载下 $\sigma_y$ 的变化过程, 固结荷载为 $(50, 100)$  kPa, 超固结剪应力比 $OCR_q$ 为1.75。

图10显示, 超固结软土试样零变形方向主应力 $\sigma_y$ 处于振荡状态, 振荡峰值在加荷初期达到最大, 蠕变过程先衰减后增大。

加荷初期 $\sigma_y$ 大于 $\sigma_x$ , 零变形方向的应力 $\sigma_y$ 为中主应力, 后期蠕变过程转化为小主应力, 试样的侧向鼓胀变形初期发生在试样的小主应力方向, 后期转为中主应力方向。试验循环荷载条件下, 振荡峰值后期呈增大趋势, 振荡幅值无明显衰减。

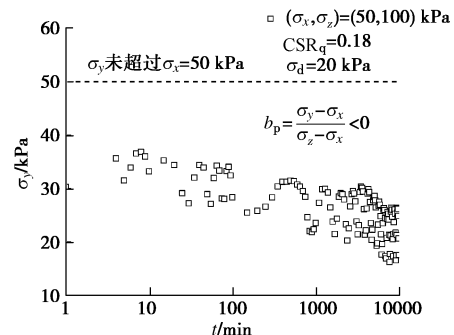


图9 正常固结土循环荷载作用下 $\sigma_y$ 变化

Fig. 9 Variation of  $\sigma_y$  of normally consolidated soils subjected to cyclic loading

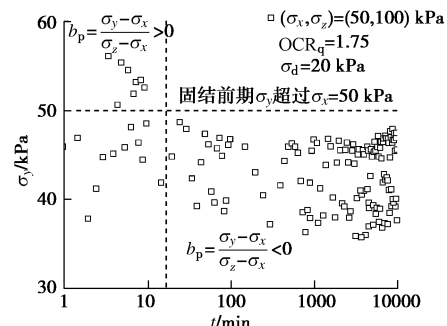


图10 超固结土循环荷载作用下 $\sigma_y$ 变化

Fig. 10 Variation of  $\sigma_y$  of overconsolidated soils subjected to cyclic loading

通过对比图9, 10, 可以发现 $\sigma_y$ 的变化对循环荷载作用下的软土特性影响较大。李广信等<sup>[15]</sup>认为当平面应变加载的土体接近破坏时, 土体零应变方向的主应力一般为中主应力; 在等应力比平面应变试验中, 当应力比 $k$ 较小时, 零应变方向主应力通常是小主应力; 并定义主应力次序转换参数 $b_p = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{\sigma_z - \sigma_x} < 0$

时, 零应变方向的主应力为小主应力, 当 $0 < b_p < 1$ 时, 零应变方向的主应力为中主应力。

综上, 循环荷载作用下软土试样发生侧向鼓胀变形, 正常固结状态下处于中主应力方向上, 超固结状态下变形早期处于小主应力方向上, 后期处于中主应



力方向上。由此,对于正常固结和超固结软土试样,若当前应力状态相同,由于超固结状态试样的侧向变形发生在小主应力方向上,因而试样早期变形量小于正常固结试样。随着超固结效应被循环荷载逐渐弱化,侧向变形方向的应力转化为中主应力,侧向变形量逐渐变大。循环荷载的影响随深度衰减,超固结状态的弱化效应相应减弱,侧向鼓胀变形的发展随深度加大渐趋停止。

## 2.4 循环荷载下软土孔隙水压力趋势

为综合反映荷载效应对试样孔隙压力的影响,定义归一化孔隙水压力为

$$u = \frac{u}{p'_0}, \quad (4)$$

式中,  $u$  为所测得到的孔隙水压力,  $p'_0$  为前期有效体积应力。

图 11 为试验结果的归一化孔隙水压力,试样中心孔隙水压力为  $u'_c$ , 试样底部孔隙水压力为  $u'_b$ 。

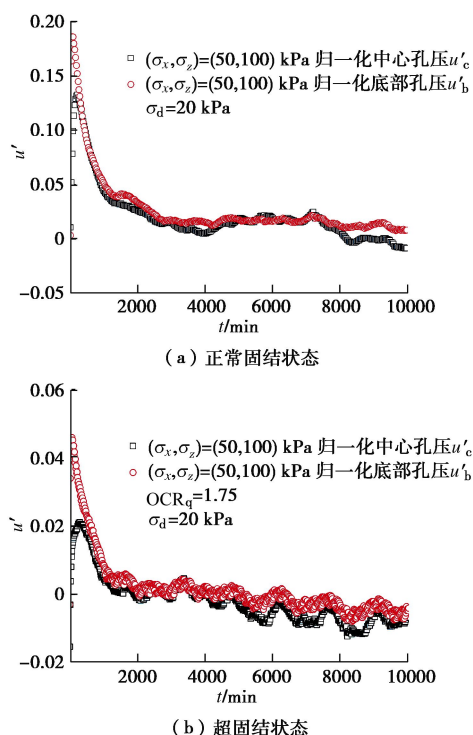


图 11 软土试样循环荷载下归一化孔压变化

Fig. 11 Variation of normalized pore pressure of normally consolidated soils

由于软土试样黏性大 ( $I_p=34$ ) 渗透性低,加荷瞬间孔隙压力未能及时传递至试样中心,及至中心位置孔隙压力上升到峰值时,试样底部孔隙压力已有部分消散,试样整体状态已发生了一定变化,因此,试样中心位置孔压并非最大孔隙压力值,本试验采用试样底部孔隙压力数据。

排水条件下孔压增长和消散同时发生,加载前期孔压增长速率大于消散速率,孔压表现为快速连续增

长趋势;当孔压增长速率等于孔压消散速率时孔压达到峰值;当孔压增长速率小于消散速率,孔压表现为连续快速下降趋势;及至试样排水和剪胀效应疏解了初始孔隙水压力后,孔隙水压力出现同步响应循环荷载的波动现象。波动孔压峰值小于初始孔压峰值,说明循环荷载改变了试样的结构状态。

孔压波动过程长时间存在,这一阶段试样中心孔压和底部孔压无显著差别,均同步响应循环荷载影响,孔压峰值呈缓慢衰减趋势,与试样的荷载条件和应力历史相关。孔压在零值上下波动时出现负孔压,导致软土土骨架承担的荷载逐渐增大,循环荷载对孔隙压力的影响逐渐降低,固结沉降停止发展,后续沉降来自土骨架蠕变变形和弹性变形。

图 12 为超固结软土试样循环荷载作用下的孔隙水压力波动消散过程。可以看出,超固结程度越高 ( $OCR_q$  大) 的试样,孔隙压力波动中心线斜率越大,孔隙压力的负值越大。这一现象与超固结土的剪胀性随超固结程度而增大相一致。也与超固结土的后期沉降小于正常固结土的现象相一致。超固结土在不同循环荷载幅值作用下,荷载幅值越大,试样孔压峰值越大。

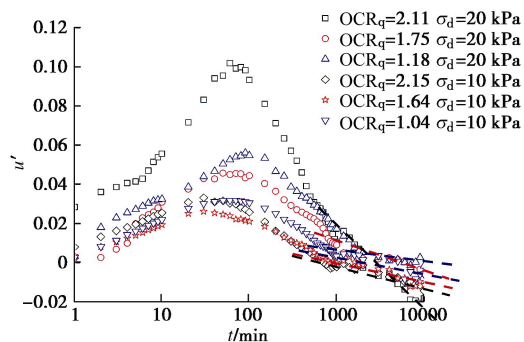


图 12 不同  $OCR_q$  条件下孔压变化

Fig. 12 Variation of pore pressure under different  $OCR_q$

综上,饱和软黏土试样在循环荷载作用初期,孔隙水压力不显示波动特征,总体趋势为累计增大到峰值后连续下降,与静荷载作用下的孔压变化特征类似。循环荷载长时间作用后,孔隙压力呈现波动特征,波动峰值随时间逐渐减小,变化趋势与应力状态和应力历史相关,超固结程度越高减小越快。孔隙压力波动过程中软土伴随剪胀发生,孔隙压力出现负值现象,由此导致固结沉降逐渐减小,循环荷载的沉降影响逐渐表现为土体固结的蠕变和弹性变形。

## 3 结 论

(1) 静力荷载试验应力状态平面变形条件下,正常固结软黏土以固结变形为主要特征。试样变形全过程总体表现为体积收缩,侧向变形总体表现为凹陷特

征, 体积应力在变形全过程发挥主导作用。静荷载下超固结软土具有和正常固结软土相同的变形特征。

(2) 循环荷载试验应力状态平面变形条件下, 正常固结软土以剪切变形为主要特征。试样变形全过程总体表现为体积膨胀, 侧向变形表现为鼓胀特征, 剪应力在变形全过程发挥主导作用。循环荷载下超固结软土具有和正常固结软土相同的变形特征。

(3) 循环荷载试验应力状态平面变形条件下, 超固结软土侧向变形小于正常固结软土。正常固结软土侧向变形始终处于中主应力方向上, 超固结软土侧向变形部分过程处于小主应力方向上, 由此决定相同应力状态下超固结软土侧向变形小于正常固结软土。

(4) 循环荷载长时间作用后, 孔隙压力呈现波动特征。循环荷载作用初期, 孔隙水压力总体趋势为累计增大到峰值后连续下降, 与静荷载作用下的孔压变化特征类似。循环荷载作用后期孔压波动峰值随时间逐渐减小, 变化趋势与应力状态和应力历史有关。孔压波动过程软土伴生剪胀效应, 导致固结沉降逐渐减小, 软土压缩变形逐渐过渡为土体骨架蠕变和弹性变形。

## 参考文献:

- [1] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. *Soils and Foundations*, 2003, **43**(1): 33 - 46.
- [2] HUANG C S, ZHANG J H, YI Z D. Research on vehicle overloading influenced to roadbed[J]. *Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China*, 2008: 2528 - 2533.
- [3] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(11): 907 - 916.
- [4] 仇敏玉, 俞亚南. 道路行车荷载影响深度分析[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(6): 1822 - 1826. (QIU Min-yu, YU Ya-nan. Analysis of influence depth for roads induced by vehicle load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(6): 1822 - 1826. (in Chinese))
- [5] SHI W J, WANG J, GUO L, et al. Undrained cyclic behavior of overconsolidated marine soft clay under a traffic-load-induced stress path[J]. *Marine Georesources Geotechnology*, 2018, **36**(1): 163 - 172.
- [6] GU C, WANG J, CAI Y Q. Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure[J]. *Soils and Foundations*, 2016, **56**(3): 427 - 439.
- [7] HU Ya-yuan. Long-term settlement of soft subsoil clay under rectangular or semi-sinusoidal repeated loading of low amplitude[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, **47**(11): 1259 - 1270.
- [8] 王 军, 蔡袁强, 高玉峰. 初始剪应力与频率对超固结软土变形试验研究[J]. *振动工程学报*, 2010, **23**(3): 260 - 268. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang, GAO Yu-feng. Deformation of overconsolidated soft clay considering initial shear stress and frequency[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2010, **23**(3): 260 - 268. (in Chinese))
- [9] WANG Yu-ke, GAO Yu-feng, GUO Lin, et al. Influence of intermediate principal stress and principal stress direction on drained behavior of natural soft clay[J]. *Int J Geomech*, 2018, **18**(1): 04017128.
- [10] WANG Yu-ke, ZHANG Jun-jing, MA Lu, et al. Anisotropic deformation characteristics of soft marine clay involved the change of b-values and stress direction[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, **35**(7): 954 - 960.
- [11] 颜瑞鹏. 静动三维应力状态下饱和软黏土变形及孔压研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. (XIE Rui-peng. Study on deformation and pore pressure of saturated soft clay under three-dimensional stress path[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese))
- [12] GU Chuan, GU Zhi-qiang, CAI Yuan-qiang, et al. Effects of cyclic intermediate principal stress on the deformation of saturated clay[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2018, **144**(8): 04018052.
- [13] 李国维, 周 洋, 阮玉胜, 等. 平面变形超固结软黏土蠕变特征[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(6): 1028 - 1034. (LI Guo-wei, ZHOU Yang, RUAN Yu-sheng, et al. Plane strain tests on creep behavior of over-consolidated clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(6): 1028 - 1034. (in Chinese))
- [14] 李国维, 黄 凯, 阮玉胜, 等. 主应力比对超固结软黏土平面蠕变的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(12): 2250 - 2258. (LI Guo-wei, HUANG Kai, RUAN Yu-sheng, et al. The effect of principal stress ratio on creep behavior of over-consolidated clay under plane strain[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(12): 2250 - 2258. (in Chinese))
- [15] 李广信, 张其光, 黄永男. 等应力比平面应变试验中主应力转换的研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(11): 1867 - 1872. (LI Guang-xin, ZHANG Qi-guang, HUANG Yong-nan. Study on transforming of principal stresses in constant stress ratio plane strain tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(11): 1867 - 1872. (in Chinese))