

# 变围压循环荷载作用下 珠江三角洲软土动力特性试验研究\*

刘帅<sup>1,2</sup>, 高志华<sup>1</sup>, 胡波<sup>1,2</sup>, 余颂<sup>3</sup>, 赵永峰<sup>3</sup>, 阎晓玲<sup>2,4</sup>, 黄珏皓<sup>2,5</sup>

1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710064
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 / 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071
3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050
4. 武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023
5. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 列车循环荷载作用下软土地基产生较大沉降。以往动三轴试验模拟列车循环荷载时主要分析循环偏应力对软土动力特性的影响, 而较少考虑循环围压的作用。基于此, 采用 GDS 动三轴试验系统对珠江入海口饱和软土开展了一系列不排水变围压循环三轴试验, 分析循环偏应力和循环围压耦合效应对饱和软土累积轴向应变、孔压以及阻尼比的影响。结果表明: 累积轴向应变和归一化阻尼比随循环围压的增大而减小, 最大孔压和最小孔压均随循环围压的增大而增大。当循环加载次数  $N=1\ 000$ , 应力路径斜率  $\eta=0.33$  增长至  $\eta=1.00$ 、 $2.00$  时, 累积轴向应变  $\varepsilon_p=4.04\%$  下降至  $\varepsilon_p=3.52\%$ 、 $2.45\%$ , 归一化阻尼比  $\lambda_v/\lambda_1=0.253$  相应变化为  $\lambda_v/\lambda_1=0.269$ 、 $0.217$ , 最大孔压由  $u_{\max}=60.55\text{ kPa}$  分别增长至  $u_{\max}=79.25$  和  $104.51\text{ kPa}$ , 最小孔压由  $u_{\min}=58.69\text{ kPa}$  分别增长至  $u_{\min}=71.12$  和  $80.90\text{ kPa}$ 。在此基础上, 建立了饱和软土累积轴向应变计算模型, 并进行了验证。

**关键词:** 软土; 动三轴试验; 累积轴向应变; 孔压; 阻尼比; 珠江三角洲

**中图分类号:** TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)04-0131-08

## Experimental study on dynamic characteristics of soft soil in Pearl River Delta under cyclic confining pressure

LIU Shuai<sup>1,2</sup>, GAO Zhihua<sup>1</sup>, HU Bo<sup>1,2</sup>, YU Song<sup>3</sup>, ZHAO Yongfeng<sup>3</sup>, YAN Xiaoling<sup>2,4</sup>, HUANG Juehao<sup>2,5</sup>

1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering / Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China
3. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China
4. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Large settlements of soft soil foundation occur under cyclic loading. The influence of cyclic deviatoric stress on the dynamic characteristics of soft soil has been previously analyzed using dynamic triaxial tests, while the effect of cyclic confining pressure has rarely been considered. In this study, a series of undrained dynamic triaxial tests with variable confining pressure were conducted for saturated

\* 收稿日期: 2022-11-01 录用日期: 2022-12-08 网络首发日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51909259)

作者简介: 刘帅(1996年生), 男; 研究方向: 土体动力特性; E-mail: ls128057@163.com

通信作者: 黄珏皓(1991年生), 男; 研究方向: 软土动力特性和本构关系; E-mail: jhhuang@whrsm.ac.cn

soft soil from the Pearl River Delta using GDS dynamic triaxial test system. The coupling effects of cyclic deviatoric stress and confining pressure on the cumulative axial strain, pore pressure, and damping ratio were analyzed. The results show that the cumulative axial strain and normalized damping ratio decrease with the increase of the cyclic confining pressure, while the maximum and minimum pore pressures increase with the increase of the cyclic confining pressure. When the number of cycles  $N=1\ 000$  and the stress path  $\eta$  increased from 0.33 to 1.00 and 2.00, the accumulated axial strain  $\varepsilon_p$  decreased from 4.04% to 3.52% and 2.45%, the normalized damping ratio  $\lambda_N/\lambda_1$  from 0.253 to 0.269 and 0.217, the maximum pore pressure  $u_{\max}$  increased from 60.55 kPa to 79.25 kPa and 104.51 kPa, and the minimum pore pressure  $u_{\min}$  increased from 58.69 kPa to 71.12 kPa and 80.90 kPa. Furthermore, a model for predicting the accumulated axial strain of saturated soft soil is established and verified. These results are helpful to deepen the understanding of the mechanical properties of soft clay under cyclic loading.

**Key words:** soft soil; dynamic triaxial test; accumulated axial strain; excess pore water pressure; damping ratio; the Pearl River Delta

我国东南沿海地区,软土地基在交通循环荷载长期作用下易产生较大沉降(乔峰等,2019;郭林,2013),严重威胁交通设施的安全运行。因此,有必要对交通荷载作用下的软土动力特性进行研究,为设计施工提供技术支持和科学指导。

目前,众多学者对循环荷载作用下软土动力特性进行了大量研究。郑刚等(2013)等以天津地区饱和黏土为研究对象,经过一系列动力试验,对比分析了振动频率对原状土和重塑土的动强度、动孔压和弹性模量的影响。雷华阳等(2021)分析了间歇性循环荷载作用下时,固结条件、动应力比以及频率对天津地区饱和黏土累积塑性应变和孔隙水压力的影响;Miao et al.(2020)研究了排水条件加载波形对软土动力特性的影响,发现在一定的循环加载次数下,在正弦波加载波形下试样的轴向应变率大于三角波或方形加载波形下试样的轴向应变率。这些研究主要分析了轴向循环荷载下土体动力特性,而循环围压对软土动力特性的影响也不容忽视(施明雄,2008)。Gu et al.(2012)采用变围压不排水三轴试验研究了土体的力学性质,模拟了地震和交通荷载,发现超孔压、累积应变以及有效应力路径受循环围压影响显著,认为变围压三轴试验更适合模拟交通荷载;Sun et al.(2015b)以温州软黏土为研究对象,开展了部分排水双向循环三轴试验,发现应力路径斜率每增加1,将导致永久体应变增加59%;Cai et al.(2013)通过对比部分排水条件下变围压和常围压三轴试验的结果,发现循环围压显著促进了永久体应变和永久轴向应变的发展,认为常

围压动三轴试验可能低估了交通荷载引起的软土变形;黄珏皓等(2021)基于试验结果得出了宁波超固结软黏土和正常固结软黏土对应累积轴向应变比与超固结比的关系曲线,发现该应变比随超固结比的增大迅速衰减。

另外,为获得饱和软黏土在长期循环荷载作用下的累积应变,国内外学者通常采用经验拟合法,通过建立应变模型,预估循环荷载作用下饱和软黏土的长期累积变形。Monismith et al.(1975)提出的指数累计轴向应变拟合模型,因其能够简洁描述循环荷载下土体累积塑性应变的能力而得到了众多学者的广泛应用。然而,当循环加载次数较大时,该指数模型所预估的累积应变值较大,与实际测量值不符(陈颖平,2007)。进而许多学者对该指数模型进行了修正,Chai et al.(2002)、张勇等(2009)引入初始静偏应力、动偏应力以及固结围压对指数模型进行改进;Ren et al.(2018)在 Monismith 模型(Monismith et al., 1975)和 Hardin-Drnevich 模型(Hardin et al., 1972)基础上,提出了一种计算低循环应力条件下累积塑性变形的模型。

已有研究成果显示,变围压循环荷载作用下珠江入海口软土动力特性的研究较少,且未涉及到阻尼比的分析。针对上述不足,本文以珠江三角洲地区饱和软黏土为研究对象,通过变围压动三轴试验,研究不排水条件下循环应力比和循环围压对土体累积轴向应变、孔压以及阻尼比的影响,并建立一个累积轴向应变模型,为该地区的类似工程的设计施工提供参考。

## 1 试验土样和方案

### 1.1 试验土样

试验土样取自珠江入海口,取土埋深26.0~29.0 m。根据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》,获得试验土样基本物理力学参数如表1所示,粒径分布曲线如图1所示。

### 1.2 试验方案

为消除土体结构性对试验结果的影响,根据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》制备重塑试样,具体方法如下:首先,将试样放入塑料袋中,去除试样内部的杂质,然后将塑料袋密封,进行反复揉搓,最后将重塑后的土样制备成直径38 mm,高76 mm的圆柱形试样。待重塑试验制备完成后,采用真空饱和与反压饱和相结合的联合饱和方式对重塑试样进行饱和。其中反压饱和过程中,施加在试样上的反压和围压分别为100、120 kPa。当孔压系数 $B$ 检测结果值大于0.95时,认为试样饱和完成。之后,对试样进行各向同性固结,由于试样土体的渗透系数小,超孔隙水压力消散缓慢,当试样排水量小于 $100 \text{ mm}^3/\text{h}$ 时认为固结完成(Sun et al., 2015b)。最后,关闭排水阀门,在不排水条件下向试样施加循环荷载开展动

力加载试验。

为了尽可能地真实模拟交通荷载,对试样同时施加循环偏应力和循环围压,循环偏应力和循环围压均采用半正弦波,且相位差为0(Cai et al., 2013; Sun et al., 2020)。由于频率的增加不仅会导致循环围压波形的不稳定,而且还会使围压控制器的橡胶密封圈产生磨损和疲劳,导致设备漏水,同时为了获得较为真实的孔隙水压力,本次试验中加载频率采用0.1 Hz。此外,较多的循环次数也会磨损轴向加载系统的橡胶密封圈,导致设备漏水,故本试验循环加载次数确定为1 000次。采用循环应力比(CSR)和应力路径斜率( $\eta$ )来表示循环偏应力和循环围压的幅值(Cai et al., 2013; Sakai et al., 2003),其表达式为

$$\eta = p^{\text{ampl}}/q^{\text{ampl}} = 1/3 + \sigma_3^{\text{ampl}}/q^{\text{ampl}},$$

$$\text{CSR} = q^{\text{ampl}}/2p'_0 = q^{\text{ampl}}/2\sigma'_3,$$

其中

$$p^{\text{ampl}} = (\sigma_1^{\text{ampl}} + 2\sigma_3^{\text{ampl}})/3,$$

$$q^{\text{ampl}} = \sigma_1^{\text{ampl}} - \sigma_3^{\text{ampl}},$$

式中 $p^{\text{ampl}}$ 表示循环平均主应力幅值, $q^{\text{ampl}}$ 表示循环偏应力幅值, $\sigma_1^{\text{ampl}}$ 表示轴向应力幅值, $\sigma_3^{\text{ampl}}$ 表示循环围压幅值, $p'_0$ 表示固结完成之后的平均有效正应力, $\sigma'_3$ 表示固结完成之后的有效固结围压。

表1 土样的物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical properties of soil samples

比重	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率/%	液限/%	塑限/%	孔隙比	渗透系数/( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )
2.72	1.76	45.48	47.21	20.87	1.26	$4.10\times 10^{-4}$

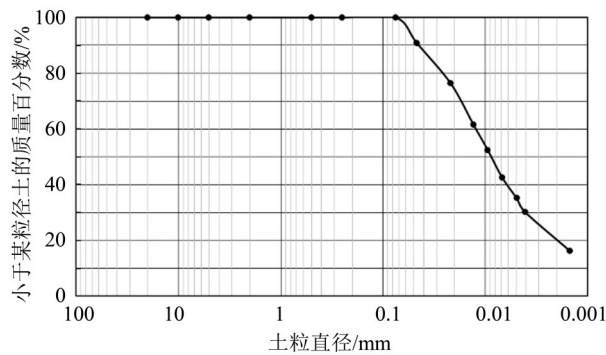


图1 颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

本文试验拟定循环应力比 $\text{CSR} = 0.20$ 、 $0.30$ 、 $0.35$ ,对其分别进行应力路径斜率 $\eta=1.00$ 的变围压动三轴试验,此外,当 $\text{CSR} = 0.35$ 时,另进行 $\eta = 0.33$ 常围压动三轴试验和 $\eta = 2.00$ 的变围压动三轴试验。总计5组试验。在整个动三轴试验过程中,有效围压恒为100 kPa。

## 2 试验结果分析

### 2.1 累积轴向应变发展

在不同循环应力比作用下,累积轴向应变随循环加载次数的增加均呈现先快速增长,后增速变缓,最终趋于稳定的趋势。在相同循环加载次数下,循环应力比越大,其所对应的累积轴向应变也越大(如图2)。 $N = 1\ 000$ 时, $\text{CSR} = 0.20$ 、 $0.30$ 、 $0.35$ 所对应的 $\varepsilon_p = 1.08\%$ 、 $1.99\%$ 、 $3.52\%$ 。

不同应力路径斜率下,累积塑性应变随循环加载次数的发展与不同循环应力比作用下的相似。当循环加载次数相同时,累积轴向应变随应力路径斜率的增大而减小(图3)。当 $N = 1\ 000$ 时, $\eta = 0.33$ 、 $1.00$ 、 $2.00$ 所对应的 $\varepsilon_p = 4.04\%$ 、 $3.52\%$ 、 $2.45\%$ ,变围压试验 $\eta = 1.00$ 、 $2.00$ 时的累计轴向应变相对于常围压试验 $\eta = 0.33$ 时的累积轴向应变,分别降低了12.87%、39.36%。由此可以发现,变

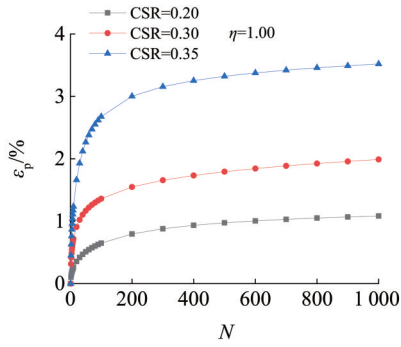


图2 不同CSR下累积轴向应变随循环加载次数的变化曲线

Fig. 2 Variation of accumulated axial strain with the number of cycles with different CSRs

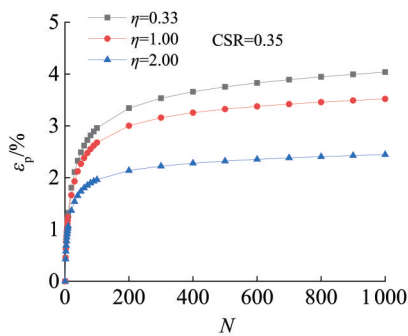


图3 不同η下累积轴向应变随循环加载次数的变化曲线

Fig. 3 Variation of accumulated axial strain with the number of cycles with different η-values

围压条件下试样的累积轴向应变小于常围压条件下试样的累积轴向应变。

## 2.2 孔压变化

在相同循环应力比作用下,最大孔压 $u_{\max}$ 和最小孔压 $u_{\min}$ 随循环加载次数的变化趋势一致。不同循环应力比作用下, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环加载次数的变化规律不同(图4)。CSR = 0.20,  $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环加载次数的增加急剧增长, $N = 70$ 时开始缓慢下降, $N = 200$ 时则趋于稳定,此时 $u_{\max} = 58.31$  kPa,  $u_{\min} = 26.43$  kPa; CSR = 0.30时, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环加载次数的增加快速增长,然后增长速率逐渐变缓并趋于稳定,此时 $u_{\max} = 81.17$  kPa,  $u_{\min} = 72.78$  kPa;当CSR = 0.35时, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环加载次数的增加先快速增长,后增长变缓, $N = 500$ 时开始略有下降,最终趋于稳定,此时 $u_{\max} = 79.25$  kPa,  $u_{\min} = 71.12$  kPa。同时,由图4还可以看出,相同循环加载次数下, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环应力比的增大而增大。

随着循环加载次数的增加,不同应力路径斜率下的 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 基本呈现先迅速增长后缓慢增长并逐步趋于稳定的趋势,并且当循环加载次数相

同时, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 均随应力路径斜率的增大而增大(图5)。当 $N = 1000$ , $\eta = 0.33$ 、1.00和2.00所对应的 $u_{\max} = 60.55$ 、79.25和104.51 kPa, $u_{\min} = 58.69$ 、71.12和80.90 kPa,其 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 的差值分别为1.86、8.13和30.61 kPa。由图5还可以看出,随应力路径斜率的增大, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 的变化范围也越大。

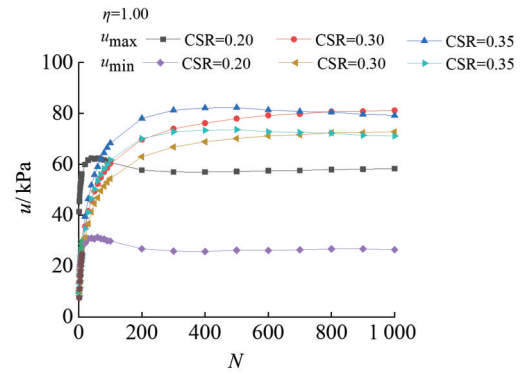
图4 不同CSR下 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环加载次数的变化曲线

Fig. 4 Variation of maximum and minimum excess pore water pressure with the number of cycles with different CSRs

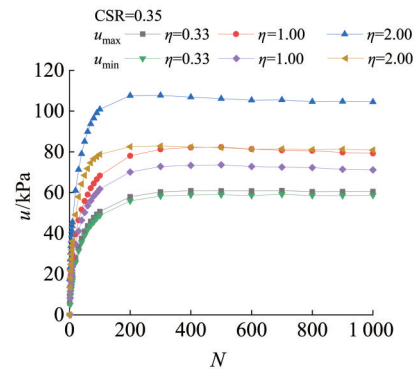
图5 不同η下 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 随循环加载次数的变化曲线

Fig. 5 Variation of maximum and minimum excess pore water pressures with the number of cycles with different η-values

## 2.3 阻尼比变化

阻尼比作为土体动力特性重要参数之一,反映了土体在循环荷载作用下变形过程中由于内阻而造成的能量损失(吕程伟等,2019)。土体阻尼比的确定方法(Lin et al., 2018),如图6所示。

循环加载次数为 $N$ 时的土体阻尼比

$$\lambda_N = A_{\text{loop}} / \pi A_{\text{triangle}}, \quad (1)$$

其中 $\lambda_1$ 是 $N = 1$ 时的阻尼比; $A_{\text{loop}}$ 表示滞回圈区域的面积,反映一个循环加载周期内所损失的能量; $A_{\text{triangle}}$ 表示三角形ABC的面积,反映一个循环加载周期内的总能量。

随着应力路径斜率的增加,滞回圈的形状变

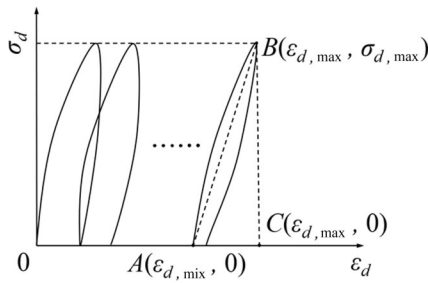


图6 阻尼比的计算

Fig. 6 Calculation of damping ratio

得更加扁平,  $A_{loop}$  和  $A_{triangle}$  均逐渐减少(图7)。根据试验结果, 结合式(1)可以得到滞回圈的面积和施加在试样上的总能量。当  $N = 100$  时,  $\eta = 0.33$  增加至  $\eta = 2.00$ , 相应地  $A_{loop} = 6.56 \text{ J/m}^3$  下降至  $A_{loop} = 3.88 \text{ J/m}^3$ ,  $A_{triangle} = 12.46 \text{ J/m}^3$  下降至  $A_{triangle} = 9.02 \text{ J/m}^3$ , 相应的阻尼比从 0.168 下降至 0.137。另外, 当应力路径斜率相同时,  $A_{loop}$  随 CSR 的增加而增加, 如图 8 所示。当  $N = 100$ , CSR = 0.20 增加至 CSR = 0.35 时,  $A_{loop}$  从 0.41  $\text{J/m}^3$  增长至 7.07  $\text{J/m}^3$ ,  $A_{triangle}$  从 2.15  $\text{J/m}^3$  增长至 13.10  $\text{J/m}^3$ , 相应的阻尼比从 0.061 增长到 0.172。综上可知, 在较高的循环围压下, 试样所耗散的能量较少。

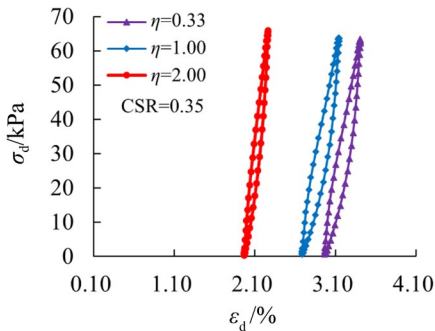


图7 不同应力路径斜率下滞回圈的变化

Fig. 7 Variations of hysteresis loops with different  $\eta$ -values

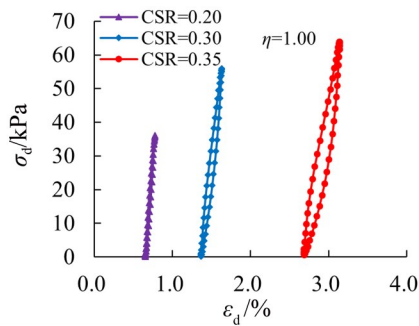


图8 不同循环应力比下滞回圈的变化

Fig. 8 Variations of hysteresis loops with different CSR

不同循环应力比作用下, 归一化阻尼比随循环加载次数的变化规律一致, 即归一化阻尼比随循环加载次数的增加先迅速下降, 而后缓慢减少并趋于稳定(如图9)。  $N=1000$ , CSR = 0.20、0.30 和 0.35 所对应的  $\lambda_N/\lambda_1 = 0.092$ 、0.228 和 0.269。此外, 还可以看出, 在相同的循环加载次数下, 归一化阻尼比随循环应力比的增大而增大。

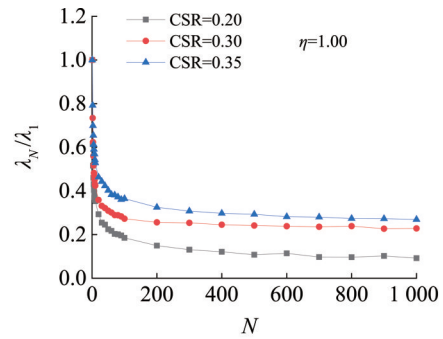


图9 归一化阻尼比随循环加载次数的变化曲线

Fig. 9 Variation of normalised damping ratio with the number of cycles

累积轴向应变结果表明, 累积轴向应变随循环加载次数的增加而增加, 试样变得更加密实, 则有必要研究归一化阻尼比  $\lambda_N/\lambda_1$  与累积轴向应变  $\epsilon_p$  之间的关系。在不同循环应力比下, 土体的归一化阻尼比均随累积轴向应变的增长而降低, 并且随着循环应力比的增加, 归一化阻尼比下降的速率越慢, 其变化曲线如图 10 所示。当  $N=1000$  时, CSR = 0.20、0.30、0.35 时,  $\lambda_N/\lambda_1$  分别下降了 90.8%、77.2%、73.1%。可见, 循环应力比对阻尼比的发展有显著的影响。

不同应力路径斜率下试样的归一化阻尼比均随累积轴向应变的增加而减小(图 11)。在相同试验条件下, 当应力路径斜率较小时 ( $\eta = 0.33$ 、

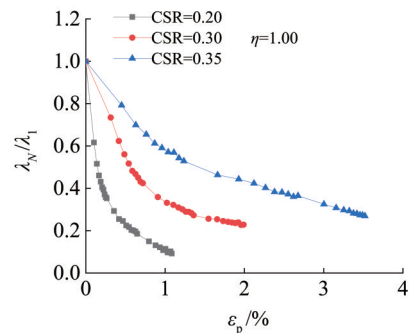


图10 不同CSR归一化阻尼比随累积轴向应变的变化曲线

Fig. 10 Variation of normalised damping ratio with accumulated axial strain with different CSRs

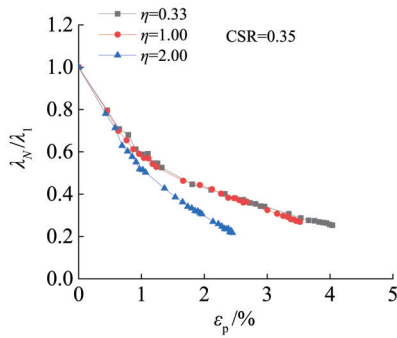


图 11 不同  $\eta$  下归一化阻尼比随累积轴向应变的变化曲线

Fig. 11 Variation of normalised damping ratio with accumulated axial strain with different  $\eta$ -values

1.00), 对应的归一化阻尼比随应力路径斜率变化曲线基本重合, 当应力路径斜率增大到一定值时 ( $\eta=2.00$ ), 归一化阻尼比则随累积应变的增大显著衰减。当循环加载次数相同时, 应力路径斜率  $\eta=1.00$  下的归一化阻尼比略小于  $\eta=0.33$  下的归一化阻尼比, 而应力路径斜率  $\eta=2.00$  下的归一化阻尼比最小。当试验结束时, 即  $N=1000$  时,  $\eta=0.33、1.00、2.00$  所对应的  $\lambda_N/\lambda_1=0.253、0.269、0.217$ 。

2.4 累积轴向应变模型的确定及验证

采用 Monismith et al.(1975)提出的指数模型对试样的累计轴向应变进行拟合, 得到

$$\varepsilon_p = aN^b, \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_p$  为累计轴向应变,  $N$  为循环加载次数,  $a、b$  为与试验条件和土体性质相关的两个常数。

采用式(2)对图 2 不同循环应力比作用下累积轴向应变随循环加载次数的变化曲线进行拟合, 拟合参数见表 2, 拟合曲线如图 12 所示。从图 12 和表 2 可以看出, 式(2)对累积轴向应变随循环加载次数的变化曲线的拟合结果比较理想,  $a$  和  $b$  随着循环应力比的变化而变化。

表 2 轴向累积应变模型拟合参数

CSR	$a$	$b$	$R^2$
0.20	0.145	0.302	0.973
0.30	0.424	0.233	0.954
0.35	0.781	0.233	0.917

图 13(a)、(b) 分别为拟合参数  $a、b$  与循环应力比的关系曲线。从图 13(a) 中可以看出, 通过回归分析, 参数  $a$  与循环应力比的关系可用指数函数进行拟合。其表达式为

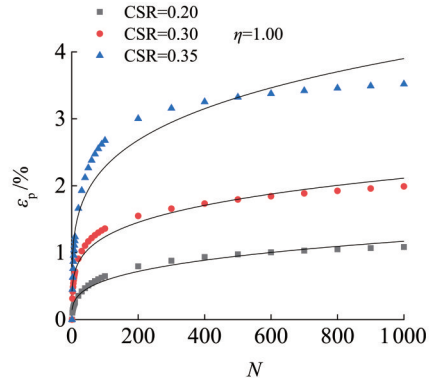


图 12 轴向累积应变试验值及拟合线

Fig. 12 Comparison between predicted and experimental results

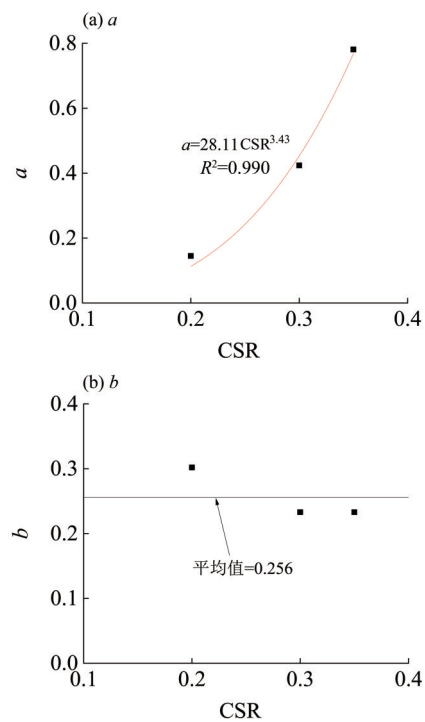


图 13 拟合参数与循环应力比关系曲线

Fig. 13 Relationships between fitting parameters and cyclic stress ratios

$$a = 28.11CSR^{3.43}. \quad (3)$$

从图 13(b) 中可以看出, 计算出参数  $b$  的标准差为 0.0325, 表明参数  $b$  随循环应力比变化的离散程度较低, 则取不同循环应力比下  $b$  的平均值作为式(2)中的取值, 即  $b=0.256$ 。

综上可得, 当应力路径斜率  $\eta=1.00$ , 试样累计轴向应变的计算模型为

$$\varepsilon_{p, \eta=1.00} = 28.11CSR^{3.43} N^{0.256}. \quad (4)$$

为研究循环围压对累积轴向应变的影响, 以常围压 ( $\eta=0.33$ ) 下的累积轴向应变为横坐标, 以变围压 ( $\eta=1.00, 2.00$ ) 下的累积轴向应变为纵坐标, 分别得到变围压累积轴向应变  $\varepsilon_{p, \eta=1.00}、\varepsilon_{p, \eta=2.00}$  和常

围压累积轴向应变  $\varepsilon_{p,\eta=0.33}$  的关系曲线(如图14)。从图14可以看出, 试验点呈现良好的线性分布关系, 故采用通过原点的直线分别对图14(a)、(b)中的试验点进行拟合, 拟合曲线的表达式分别为:

$$\varepsilon_{p,\eta=1.00} = 0.893\varepsilon_{p,\eta=0.33}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{p,\eta=2.00} = 0.648\varepsilon_{p,\eta=0.33}. \quad (6)$$

根据式(5)和(6), 可得变围压(VCP)和常围压(CCP)条件下试样的累积轴向应变的比值  $\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP}$  与应力路径斜率  $\eta$  的关系曲线(图15)。拟合可得  $\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP}$  与应力路径斜率  $\eta$  的关系

$$\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP} = -0.204(\eta - 1/3) + 1. \quad (7)$$

结合式(4)和(7), 可得到不排水变围压循环荷载作用条件下试样的累积轴向应变计算模型表达式, 即

$$\varepsilon_{p,VCP} = 32.53CSR^{3.43}N^{0.256}[-2.04(\eta - 1/3) + 1]. \quad (8)$$

为验证不排水变围压条件下黏土累积轴向应变计算模型的实用性, 以式(8)所计算出的累积轴向应变值为横坐标, 以试验所得的实测值为纵坐标, 得到试验结果和模型计算结果的对比图(图16)。由图16看出, 模型计算结果基本在预估范围之内, 表明式(8)能够较为准确地预估不排水变围压循环荷载作用条件下试样的累积轴向应变值。

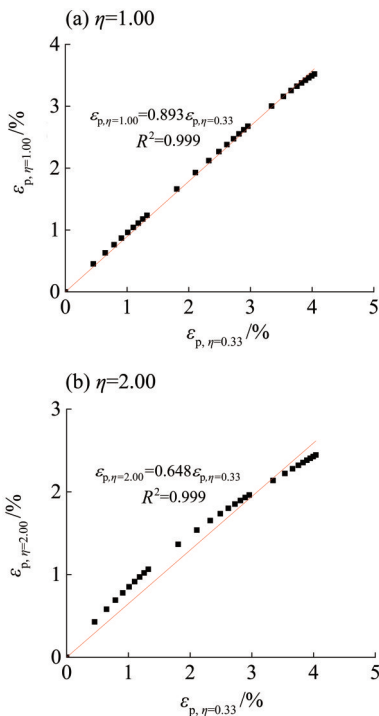


图14 变围压下永久轴向应变同恒定围压下轴向累积应变的关系曲线

Fig. 14 Relationships between accumulated axial strains under VCP versus cumulative axial strains under CCP

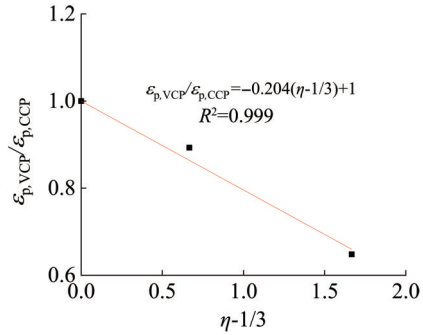


图15  $\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP}$  与  $\eta$  的关系曲线

Fig. 15 Relationship between  $\varepsilon_{p,VCP}/\varepsilon_{p,CCP}$  and  $\eta$

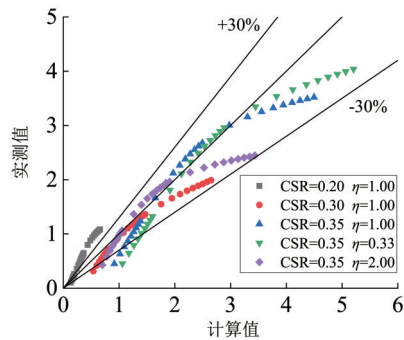


图16 试验结果和模型计算结果对比

Fig. 16 Comparison between experimental and calculated results

### 3 结论

本文利用GDS动三轴试验系统, 对珠江入海口饱和软土开展不排水变围压动三轴试验, 分析了在循环荷载作用下累积轴向应变、孔压以及阻尼比的变化规律, 建立了累积轴向应变模型。得到如下结论:

1) 不同循环应力比和应力路径斜率下, 随循环加载次数的增加, 累积轴向应变均呈现先快速增长, 后增速变缓, 最终趋于稳定的趋势。在相同循环加载次数下, 累积轴向应变随循环应力比的增大而增大, 随应力路径斜率的增大而减小; 当  $N=1\ 000$  时,  $CSR=0.20、0.30、0.35$  所对应的  $\varepsilon_p=1.08\%、1.99\%、3.52\%$ ,  $\eta=0.33、1.00、2.00$  所对应的  $\varepsilon_p=4.04\%、3.52\%、2.45\%$ 。

2) 不同循环应力比作用下, 最大孔压和最小孔压随循环加载次数的增加先迅速增长后增长缓慢并逐步趋于稳定。在不同应力路径斜率下, 最大和最小孔压随循环加载次数的增加先迅速增长后增长缓慢并逐步趋于稳定, 且均随应力路径斜率的增大而增大; 当  $N=1\ 000$ ,  $\eta=0.33、1.00$  和  $2.00$  对应的  $u_{max}=60.55、79.25$  和  $104.51$  kPa,  $u_{min}=$

58.69、71.12 和 80.90 kPa。

3) 归一化阻尼比随累积轴向应变的增长而降低, 在相同循环加载次数下, 归一化阻尼比随循环应力比的增大而增大, 随循环围压的增大而减小; 在  $N=1\ 000$  时,  $CSR=0.20$ 、 $0.30$ 、 $0.35$  所对应的  $\lambda_N/\lambda_1=0.092$ 、 $0.228$ 、 $0.269$ ,  $\eta=0.33$ 、 $1.00$ 、

$2.00$  所对应的  $\lambda_N/\lambda_1=0.253$ 、 $0.269$ 、 $0.217$ 。

4) 建立了不排水变围压条件下饱和黏土的累积轴向应变模型并进行了验证。验证结果表明, 本文所建立的应变模型能够较为准确地预估不排水变围压循环荷载作用下试样的累积轴向应变。

#### 参考文献:

- 陈颖平, 2007. 循环荷载作用下结构性软黏土特性的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 郭林, 2013. 复杂应力路径下饱和软黏土静动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部, 2000. 土工试验方法标准: GB/T50123-1999[S]. 北京: 中国计划出版社.
- 黄珏皓, 王应武, 陈健, 等, 2021. 变围压循环荷载作用下超固结软黏土变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 43(S2): 245-248.
- 雷华阳, 杨晓楠, 许英刚, 等, 2021. 间歇性循环荷载条件下饱和重塑黏土的动力特性试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 54(8): 799-806.
- 吕程伟, 吴立, 彭国东, 2019. 武汉软黏土动力特性试验研究[J]. 建筑结构, 49(S2): 884-887.
- 乔峰, 薄景山, 王亮, 等, 2019. 中国软土及其动力学特性研究的概况[J]. 世界地震工程, 35(4): 150-161.
- 施明雄, 2008. 多向振动下砂土动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 张勇, 孔令伟, 郭爱国, 等, 2009. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 30(6): 1542-1548.
- 郑刚, 霍海峰, 雷华阳, 等, 2013. 振动频率对饱和黏土动力特性的影响[J]. 天津大学学报, 46(1): 38-43.
- CAI Y Q, GU C, WANG J, et al, 2013. One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: Comparison between constant and variable confining pressure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(5): 797-809.
- CHAI J C, MIURA N, 2002. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(11): 907-916.
- GU C, WANG J, CAI Y Q, et al, 2012. Undrained cyclic triaxial behavior of saturated clays under variable confining pressure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 40: 118-128.
- HARDIN B O, DRNEVICH V P, 1972. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects [J]. Soil Mech Found Div, 98(6): 603-624.
- LIN B, ZHANG F, FENG D C, et al, 2018. Dynamic shear modulus and damping ratio of thawed saturated clay under long-term cyclic loading [J]. Cold Regions Science and Technology, 145: 93-105.
- MIAO Y H, SHENG R Y, YIN J, et al, 2020. Dynamic characteristics of saturated soft clays under cyclic loading in drained condition [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 24(2): 443-450.
- MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R, 1975. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. Transport Research Record, 537: 1-17.
- REN X W, XU Q, TENG J D, et al, 2018. A novel model for the cumulative plastic strain of soft marine clay under long-term low cyclic loads [J]. Ocean Engineering, 149: 194-204.
- SAKAI A, SAMANG L, MIURA N, 2003. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay [J]. Soils and Foundations, 43(1): 33-46.
- SUN L, CAI Y Q, GU C, et al, 2015a. Cyclic deformation behaviour of natural  $K_0$ -consolidated soft clay under different stress paths [J]. Journal of Central South University, 22: 4828-4836.
- SUN L, GU C, WANG P, 2015b. Effects of cyclic confining pressure on the deformation characteristics of natural soft clay [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 78: 99-109.
- SUN Q, DONG Q Y, CAI Y Q, et al, 2020. Modeling permanent strains of granular soil under cyclic loading with variable confining pressure [J]. Acta Geotechnica, 15(6): 1409-1421.