DOI：10.16285/j.rsm.2016.0584

水平双向荷载耦合对饱和软黏土动力特性的影响

胡秀青[1,2,3]，张 艳[1,2,3]，符洪涛[1,2,3]，陈 琳[4]，罗 盼[4]，聂 勇[5]，王 军[1,2,3]

（1. 温州大学 建筑与土木工程学院，浙江 温州 325035；2. 温州大学 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室，浙江 温州 325035；
3. 温州大学 浙江省海涂围垦及其生态保护协同创新中心，浙江 温州 325035；4. 上海大学 土木工程系，上海 200072；
5. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：地震过程中剪切波可用大小和方向上相互耦合的水平两向剪切来模拟。以温州典型软黏土为对象，采用多向动单剪系统（VDDCSS）进行不排水应力控制的循环单剪试验，重点研究了水平双向耦合荷载作用下循环剪应力比（SSR）和相位差 θ 对饱和软黏土动力特性的影响，试验组数共计 19 组。试验结果表明：在单向循环剪切荷载作用下温州正常固结饱和软黏土的门槛循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$ 为 0.096，临界循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{limit}}$ 为 0.15；水平双向耦合荷载作用下，双向循环应力比 $SSR(SSR_x=SSR_y)$的提高以及循环次数 N 的增加会促进剪应变 γ 的增加和孔压 u 的发展；当 SSR 稍微大于 $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$ 时，θ 的增加也会阻碍 γ 和 u 发展，在临界循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{limit}}$ 附近，θ 的存在会急剧加快土样总应变和孔压的发展，当 $SSR>SSR_{x,\mathrm{limit}}$ 时，相位差 θ 的存在对土样总应变和孔压发展的影响基本可以忽略。

关 键 词：循环单剪；水平双向荷载；软黏土；变形；孔压

中图分类号：O 319.56 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 03－0839－09

Effect of horizontal bidirectional coupled loads on dynamic properties of saturated soft clay

HU Xiu-qing[1,2,3], ZHANG Yan[1,2,3], FU Hong-tao[1,2,3],CHEN Lin[4], LUO Pan[4], NIE Yong[5], WANG Jun[1,2,3]

(1. College of Architectural and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 2. The Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation of Zhejiang Province, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 3. Collaborative Innovation Center of Tideland Reclamation and Ecological Protection, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 4. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 5. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: During earthquakes, the shear wave can be simulated by the horizontal bidirectional shear stresses mutually coupled in magnitude and direction. To investigate the influence of cyclic shear stress ratio (SSR) and phase difference θ on dynamic characteristics of soft clay under bidirectional loading, 19 groups of undrained cyclic simple shear tests have been performed on typical Wenzhou soft clay by using multi-direction cyclic shear apparatus. The test results show that the threshold cyclic stress ratio $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$ for the typical Wenzhou soft clay under unidirection cyclic shear loading is 0.096 and the critical cyclic stress ratio $SSR_{x,\mathrm{limit}}$ is 0.15. Under the bidirectional cyclic shear loading, the increase of cyclic number N and the improvement of SSR will promote the development of shear strain γ and pore pressure u. When SSR is slightly larger than $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$, the increase of θ will decrease the development of γ and u. When SSR is between $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$ and $SSR_{x,\mathrm{limit}}$, shear strain γ and pore pressure u increase rapidly with the increase of θ . When SSR is larger than $SSR_{x,\mathrm{limit}}$, the effect of phase difference θ on the shear strain γ and pore pressure u can be ignored.

Keywords: cyclic simple shear; horizontal bidirectional load; soft clay; deformation; pore pressure

1 引 言

地震时，土层的大部分变形是由从下卧层向上传递的地震波引起的，通常将这种地震波假定为水平剪切波，见图 1（图中 X 为水平向的两个相互垂直的力）。地层深处不断的向上传播不同大小、方

收稿日期：2016-03-28
基金项目：国家自然科学基金项目（No.51478364）；浙江省自然科学基金（No.LR18E080001）；浙江省杰出青年基金（No.51622810）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51478364), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LR18E080001) and the National Funds for Distinguished Young Scientists of Zhejiang Province (51622810).
第一作者简介：胡秀青，女，1982 年生，博士，副教授，主要从事土动力学的研究工作。E-mail: 397012380@qq.com
通讯作者：符洪涛，男，1987 年生，硕士研究生，主要从事真空预压及电渗加固地基研究。E-mail: 549014949@qq.com

向、频率的剪切波，多个剪切波的耦合作用使土层遭受不同大小和频率的多向循环剪应力。表 1 给出了 2011 年 11 月 1 日新疆 6.0 级地震典型台站加速度记录分析结果，发现不同方向地震加速度的大小和持续时间是不同的，这间接证实了地震荷载的复杂性。当土体中的某一点在经受由一个方向传递过来的地震波时，另一个方向也会经受由其他方向折射过来的地震波。由于传递时间的不同，两个波形之间存在着一个初始的相位差，使得土体发生不同的变形。

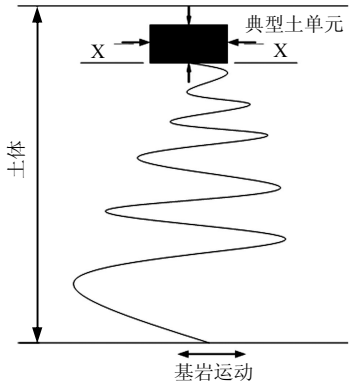


图 1 剪切波由基岩向覆盖土层传播
Fig.1 Shear wave propagation from bedrock to soil cover

表 1 地震加速度记录分析结果
Table 1 Results of seismic acceleration records

台站代码	峰值加速度/ (cm/s^2)		持时/ s	
	EW	NS	EW	NS
托海电站	40.96	−56.32	1.6	2.8
新源台	−28.20	−16.79	5.7	10.8
乌苏煤矿	6.48	−9. 34	6.7	9.5
库车	5.85	−9. 65	20.3	21.7

目前，已有学者利用循环单剪仪器对软黏土动力特性进行了研究。Seed[1]、Lee[2]等为研究地震荷载下黏性土强度，进行了不同类型黏土在循环荷载下的动力特性试验。Koutsoftas[3−4]、Rao[5]等针对 3 种不同的海洋黏土，研究了其强度特性。Ohara 等[6]研究了循环剪应变幅值、循环次数及频率对土样孔隙水压力的发展及震后沉降的影响。Vucetic[7−9]、Tan[10]等通过试验研究超固结比、应变幅值等对循环软化的影响，并提出了门槛值的概念。Yasuhara[11]和 Yildirim[12]等研究了正常固结土循环震动后的固结行为。Kodaka 等[13]研究了重塑黏土的循环剪切强度等特性。Mortezaie 等[14]研究了频率和轴向应力对黏土循环软化和孔压的影响。

另外，也有许多学者进行了地区典型黏土在循环荷载下的特性研究。Andersen[15−16]等利用循环三轴和单剪试验研究了德拉门黏土的动力特性。王军等[17−19]通过双向动三轴系统对双向循环作用下饱和软黏土的动力特性进行了一系列的研究。Lodde[20]、Díaz-Rodríguez 等[21]分别研究了旧金山海湾及墨西哥黏土的动力特性。Sitar 等[22]对特定海湾土进行了一系列应变控制的静力、循环单剪试验。Mc Carron 等[23]对波弗特海黏土进行了循环单剪试验。

以上研究发现，目前关于黏性土的动单剪试验，基本只考虑了一个水平方向的循环荷载，均未考虑地震荷载下水平两向剪应力相互耦合，剪应力的方向是不断变化这一实际情况。

基于此，为研究剪应力相互耦合对软黏土的动力特性，使用 GDS 循环单剪试验系统，对正常固结的温州原状软黏土进行了单、双向应力控制的不排水循环单剪试验，研究了土样的临界动荷载和水平两向循环剪应力耦合对温州软黏土变形、孔压的影响。

2 试验方案

2.1 试验仪器

使用英国 GDS 公司的多维动单剪试验系统（VDDCSS），如图 2 所示，其能较好地模拟现场条件，将不规则的地震剪应力简化为等效的周期剪应力并加到土样上进行剪切试验。使用圆柱形的试验土样，样品侧向通过低摩擦的约束环（表层涂有特氟龙材料，减小约束环间摩擦力，内径为 52.0 mm，厚度为 1.2 mm）支撑，以维持土样 K_0（K_0 为土的静止侧压系数，也是静止土压力系数）的状态。试样顶部与可移动的垂直作动器相连，试样底部与可移动的水平作动器相连。利用垂直和水平向作动器，可对试样底部施加任何形式的循环位移或循环应力。



图 2 VDDCSS 动态循环单剪试验系统
Fig.2 Variable directional dynamic cyclic simple shear system

2.2 试验土样及试样准备

试验用土为温州典型软黏土，表 2 为原状土的

基本物理参数，其中，ρ 为土体的密度，G_s 为土粒相对密度，w 为土样含水率；w_L 为土体的液限；w_p 为土体的塑限。试验前将土捣碎并风干，过 2 mm 筛，作为试验用土。过筛后的土粉加水搅拌成泥浆，利用大型固结仪进行固结。固结完成后，取出土样并削样，期间保证每个圆柱形土样的方向性。

表 2　软黏土基本物理参数

Table 2　Physical properties of test samples

ρ / (g/cm^3)	G_s	w/ %	w_L	w_p
1.59～1.62	2.70	59.2～62.3	76.3	40.9

削好的试样进行称重后，用直径为 50 mm 的橡胶模包裹后安装到仪器上，为保证密封性，用橡皮环勒住，见图 2。然后用金属约束环套住试样，保证试样不发生径向变形，允许其产生循环剪切引起的剪切变形。装好试样后，用无汽水进行饱和。试样为直径为 50 mm，高度为 25 mm 的扁圆柱体。

2.3　具体试验方案

饱和完成后，进行 K_0 固结，固结时间为 24 h。固结完成后，对试样进行剪切试验。开始剪切时，关闭排水阀，允许剪切过程中产生孔隙水压力。加载过程中，加载次数、轴向压力和孔压等数据由电脑采集处理。本研究所有试验都是不排水试验。试验过程中土样某一时间的变形如图 3 所示，剪切应变 γ 为水平位移 δ 与土样初始高度 H 的比值，即 $\gamma = \delta / H$ 。试验分两组进行：

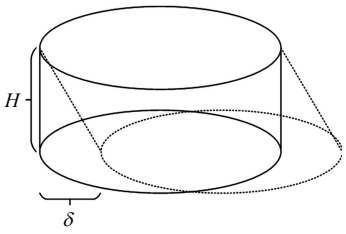


图 3　土样某一时间的变形

Fig.3　Typical deformation of specimen

本文定义循环剪应力比 SSR 为动剪应力 τ 与土样初始固结应力 σ_0 的比值。X 轴方向上的循环应力比 $SSR_x = \tau_x / \sigma_0$ ，Y 轴方向上的循环应力比 $SSR_y = \tau_y / \sigma_0$ 。

第 1 组试样做单向循环单剪试验。试样在不同循环剪应力比（SSR_x 分别为 0.100、0.110、0.125、0.150、0.160、0.175、0.200）下进行循环单剪试验，采用正弦波，频率为 0.1 Hz，具体试验方案见表 3。试验过程中土样的破坏标准根据 Sorian 等[24]对软黏土剪切特性的研究定为剪切应变 γ_x 达到 15%时认为土样发生破坏。

表 3　循环剪切试验的试验条件

Table 3　Test conditions used in cyclic simple shear tests

单向剪切试验		双向剪切试验		
编号	SSR_x	编号	SSR_x=SSR_y	θ / (°)
1	0.100	8	0.10	0
2	0.110	9	0.11	0
3	0.125	10	0.15	0
4	0.150	11	0.20	0
5	0.160	12	0.10	45
6	0.175	13	0.11	45
7	0.200	14	0.15	45
		15	0.20	45
		16	0.10	90
		17	0.11	90
		18	0.15	90
		19	0.20	90

第 2 组试样做水平双向耦合的循环单剪试验。X 向和 Y 向都施加相同循环剪应力比（$SSR_x = SSR_y$，为 0.10、0.11、0.15、0.20，见图 4）的循环剪应力，采用正弦波，频率为 0.1 Hz，具体试验方案见表 3。两方向加荷波形的相位差分别为 0°、45° 和 90°。图 4 和图 5 分别是双向循环单剪下的剪应力轨迹和循环剪应力波形。土样的破坏标准取 X 轴、Y 轴总应变 $\gamma_{总} = \sqrt{(\gamma_x^2 + \gamma_y^2)}$ 达到 15%时认为土样发生破坏。

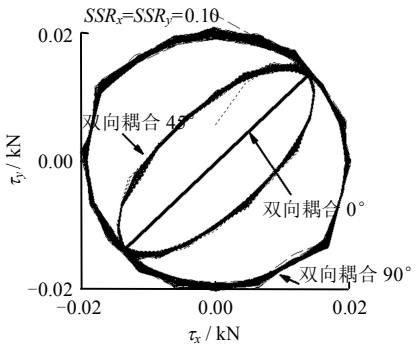


图 4　不同剪切方式下的剪应力轨迹和应力幅值大小

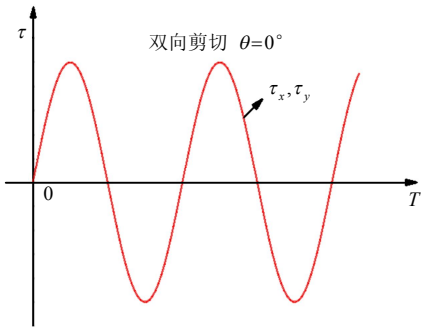
Fig.4　Typical cyclic shear stress orbits under different shear types

3　动单剪试验结果及分析

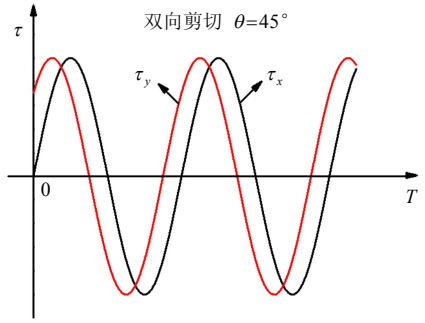
3.1　单向循环单剪试验结果及分析

软黏土在循环荷载作用下的临界动荷载水平主要分为门槛循环应力比和临界循环应力比。

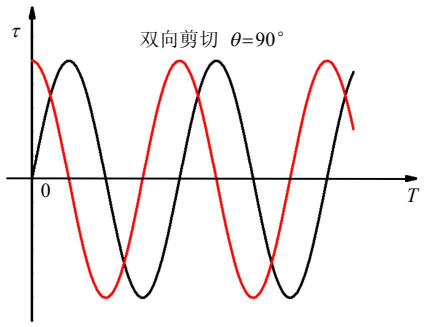
图 6 为单向循环剪切作用下，不同剪切次数下循环应力比与孔压比的关系曲线，从图 6 可以看出，随着循环次出 N 的不断增加，u / σ_0 随 SSR_x 线性增



(a) 双向剪切, $\theta=0°$



(b) 双向剪切, $\theta=45°$



(c) 双向剪切, $\theta=90°$

图 5 不同剪切方式下的循环剪切波示意图

Fig.5 Typical records of cyclic shear waves under different shear types

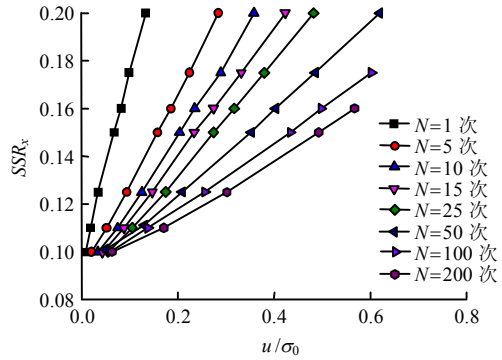


图 6 不同循环次数下 *SSR* 和 u/σ_0 的关系曲线

Fig.6 *SSR* vs. u/σ_0 at different N_s

加。值得一提的是，对于不同 N，几乎所有的表示 SSR_x 与 u/σ_0 变化关系的直线都交于同一点，这一点称为门槛循环应力比。若 SSR_x 低于此点则没有孔压生成。根据本文应力控制的循环单剪试验结果表明，频率为 0.1 Hz 时温州市饱和软黏土的门槛循环应力比为 0.096。门槛循环应力比最早由 Matsui 等[25]提出，王军[19]、周建[26]等也通过进行应力控制的三轴试验研究了杭州软黏土的门槛循环应力比。

临界循环应力比定义为不导致土体破坏的最大循环应力比。临界循环应力比的概念最早由 Larew 等[27]提出，后来的学者通过试验进一步证明了临界循环应力比的存在，如王军[19]、Sangrey[28]等。图 7 为单向循环剪切作用下，不同循环剪应力比 SSR_x 的条件下，试样剪应变 γ_x 随 N 的变化曲线。当 SSR_x=0.150 时，随着 N 的增加，γ_x 缓慢增加，不发生突变。当 SSR_x=0.160 时，γ_x 随着 N 的增加发展速度急剧加快。当 SSR_x>0.160 时，随着剪切的进行土样迅速破坏。

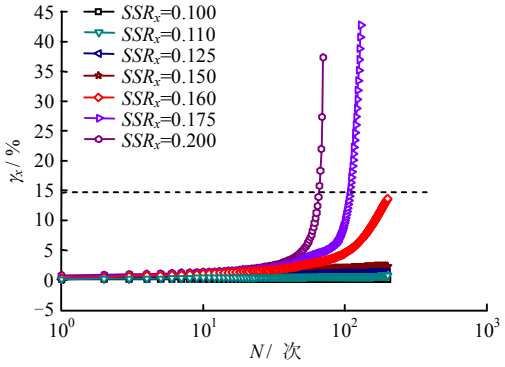


图 7 单向剪切下剪应变 γ_x 和循环次数 N 的关系曲线

Fig.7 γ_x vs. N in unidirectional shear

图 8 为单向循环剪切作用下，不同 *SSR* 的条件下，孔压比 u/σ_0 随 N 的变化曲线。从图中得到和应变发展类似的结果。当 SSR_x=0.150 时，随着 N 的增加，u/σ_0 缓慢增加，不发生突变，当 SSR_x=0.160 时，u/σ_0 随着 N 的增加发展速度急剧加快，最终

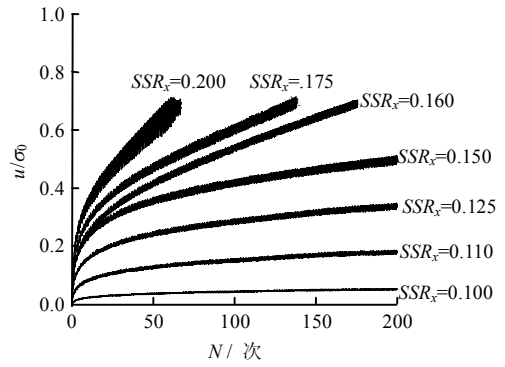


图 8 单向剪切下孔压比 u/σ_0 和循环次数 N 的关系曲线

Fig.8 u/σ_0 vs. N in unidirectional shear

在 N=177 时达到最大值。当 SSR_x>0.160 时，随着剪切的进行 u/σ_0 以更快的速度达到最大值。

综上所述，在本文的试验条件下，认为温州市正常固结饱和软黏土的临界循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{limit}}$ 为 0.150，门槛循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$ 为 0.096。

3.2　双向耦合剪切下剪应变的发展规律

图 9～11 为 SSR=0.150(SSR_x=SSR_y)时，不同相位差 θ 下饱和软黏土样在动单剪试验过程中的累积剪应变曲线。可以发现，考虑水平剪应力耦合下的剪应变发展特性与剪应力的耦合方式有关。当 X 轴

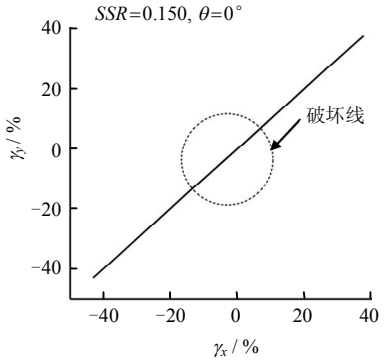


图 9　0° 双向剪切下 X 轴应变与 Y 轴应变的关系曲线
Fig.9　*X-Y* strain curve in bi-directional shear (0°)

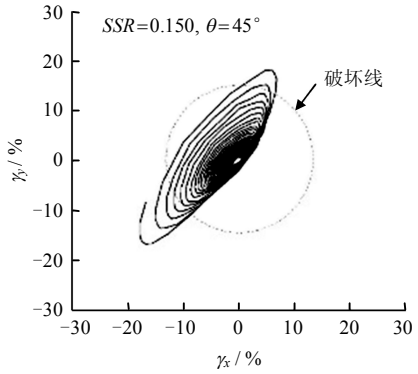


图 10　45° 双向剪切下 X 轴应变与 Y 轴应变的关系曲线
Fig.10　*X-Y* strain curve in bi-directional shear (45°)

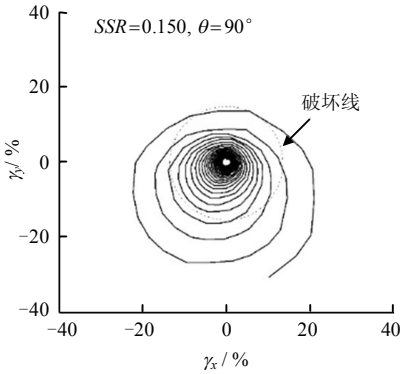


图 11　90° 双向剪切下 X 轴应变与 Y 轴应变的关系曲线
Fig.11　*X-Y* strain curve in bi-directional shear (90°)

应力与 Y 轴应力相位差为 0° 时，剪切轨迹为一条直线；当相位差为 45° 时，剪切轨迹不为直线，而变成了一个椭圆；当相位差为 90° 时，剪切轨迹变成一个圆形。当相位差为 0° 或 90° 时，X 轴与 Y 轴向应变变化较对称，但当相位差为 45° 时，X 轴在剪切过程中产生的负向应变较正向大，这是因为当 $\theta=45°$ 时一开始 Y 向的剪切力比 X 向的要大很多，X 向产生的正向应变受到 Y 向剪切力的耦合作用。

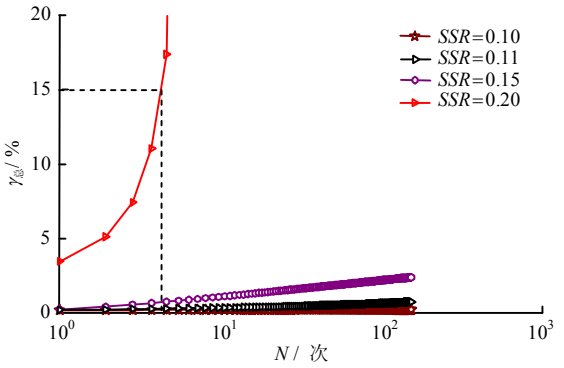
3.3　双向荷载耦合作用下循环应力比对土体总应变的影响

双向剪切过程中，不同相位差耦合作用下的土样在水平面内剪应变路径（图 3 中圆柱形土样底面的圆心在水平面内的轨迹线）包括直线、椭圆与圆，如图 9～11 所示。为了后面文章分析简洁，在此约定双向荷载耦合作用下 SSR=a（a 表示某一循环应力比的值）表示施加的双向荷载为 SSR_x=SSR_y=a。用 γ 来表示双向荷载耦合作用下的 X 轴与 Y 轴的总应变。其中，$\gamma_{总}=\sqrt{(\gamma_x^2+\gamma_y^2)}$，$\gamma_x=\delta_x/H$，$\gamma_y=\delta_y/H$，$H$ 为土样固结完成后的初始高度。

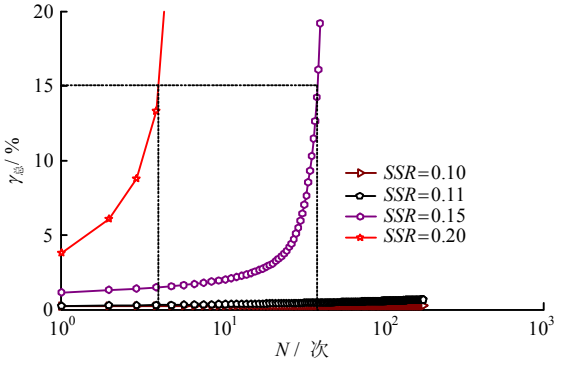
图 12 为不同耦合方式(θ 分别为 0°、45° 和 90°)下双向循环应力比对$\gamma_{总}$发展的影响曲线。由图可以看出，随着 N 的增加，$\gamma_{总}$逐渐增加；随着双向循环应力比的增加，应变发展加快。循环应力比越大，达到土样破坏时的应变所需循环周次越少。应变曲线在 θ 不同的情况下$\gamma_{总}$随 N 的发展基本类似，即随着双向循环应力比的增加发展加快。当 θ = 0°，SSR=0.20 时，γ_x 随着 N 的增加而产生较大的应变，随即土样发生破坏，但 SSR=0.15 时 γ_x 随 N 的增加变化不大。而当 $\theta=45°$ 和 $\theta=90°$ 时，SSR=0.15，γ_x 随着 N 的增加发展速度急剧加快直至土样破坏。在 SSR=0.15 单向作用时，随着 N 的增加，γ_x 缓慢增加，不发生突变。这说明双向加载作用对土样的破坏较单向作用时大，且在 $\theta=0°$～90° 时，相位差越大应变变化越快，从而土样越容易发生破坏。这主要是由于双向应力作用时，土体颗粒间相对变形增加，土体变得更为松散，颗粒接触点减少，导致应变加快。

3.4　双向荷载耦合作用下相位差对土体总应变的影响

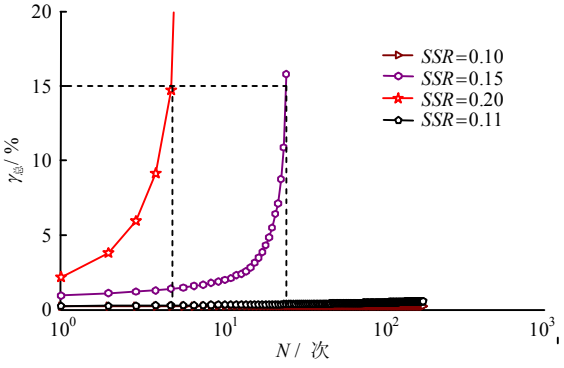
图 13 为 SSR=0.11 时，θ 对$\gamma_{总}$发展的影响曲线。当 SSR=0.11 时，随 θ 的增加，$\gamma_{总}$的发展速度逐渐减慢。$\theta=0°$ 时，$\gamma_{总}$的发展最快。这是由于当 SSR=0.11 时，土样在剪切下处于弹塑性变形前期阶段，剪切过程中土颗粒在不断的重新排列，单向剪切会造成



(a) $\theta=0°$



(b) $\theta=45°$



(c) $\theta=90°$

图 12 不同耦合方式下循环剪应力比和剪应变的关系曲线

Fig.12 Effect of *SSR* on $\gamma_{总}$ for different shear types

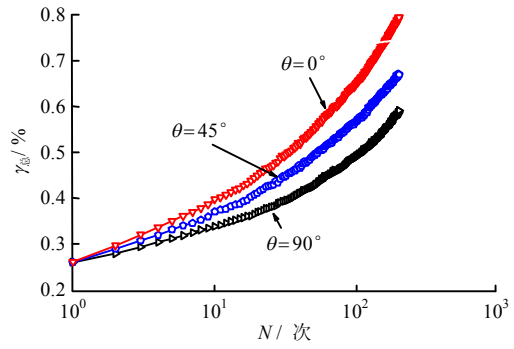


图 13 *SSR*=0.11 时 θ 对 $\gamma_{总}$ 的影响曲线

Fig.13 Effect of θ on $\gamma_{总}$ under *SSR*=0.11

土颗粒产生固定的序列。而 θ 的存在造成土样在剪切过程中土颗粒不会产生规则性排列是造成此现象的原因。

图 14 是 *SSR*=0.15 时，θ 对 $\gamma_{总}$ 发展的影响曲线。研究发现，当 *SSR*=0.15 时，随着 θ 的增加，$\gamma_{总}$ 的发展速度逐渐加快，在 θ 由 0° 变为 45° 的过程中，$\gamma_{总}$ 发展出现剧烈变化，$\theta=90°$ 时，$\gamma_{总}$ 的发展最快。饱和软黏土的临界循环应力比为 0.15，当 $\theta=0°$ 时，$\gamma_{总}$ 缓慢增加，不发生突变，这与上述单向循环结论一致。而当 $\theta=45°$ 时，$\gamma_{总}$ 发展较快，主要是受到 *X*、*Y* 向应力的耦合作用的影响。这与 *SSR*=0.11 时的结论相反。

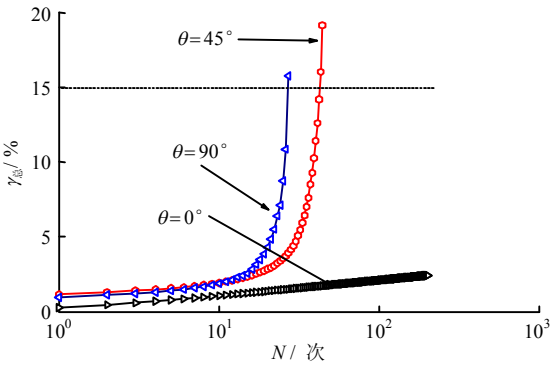


图 14 *SSR*=0.15 时 θ 对 $\gamma_{总}$ 的影响曲线

Fig.14 Effect of θ on $\gamma_{总}$ under *SSR*=0.15

图 15 是 *SSR*=0.20 时，θ 对 $\gamma_{总}$ 发展的影响曲线。研究发现，当 *SSR*=0.20 时，随着 θ 的增加，$\gamma_{总}$ 发展区别不大，这类似 *SSR*=0.11 时的情况。研究认为，*SSR*=0.20 时，土样很快到达塑性变形阶段，在此阶段，*SSR* 的大小起主导作用。

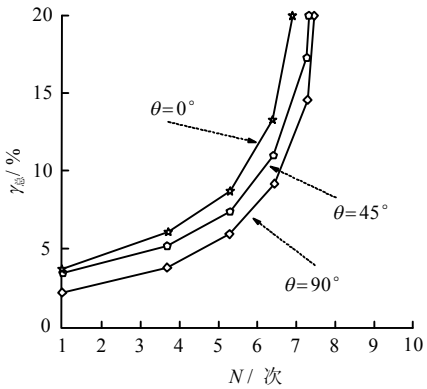


图 15 *SSR*=0.20 时 θ 和 $\gamma_{总}$ 的关系曲线

Fig.15 Effect of θ on $\gamma_{总}$ under *SSR*=0.20

3.5 双向荷载耦合作用下土样孔压比的发展规律

图 16～18 为 θ 分别为 0°、45° 和 90° 时，不同 *SSR* 情况下 u/σ_0 随 *N* 的变化曲线。整体来看，

u/σ_0 随着 *SSR* 的增加而迅速发展，规律与土应变规律基本相似，这里就不再赘述。下面，我们来讨论相同 *SSR* 的情况下 θ 对 u/σ_0 的影响。

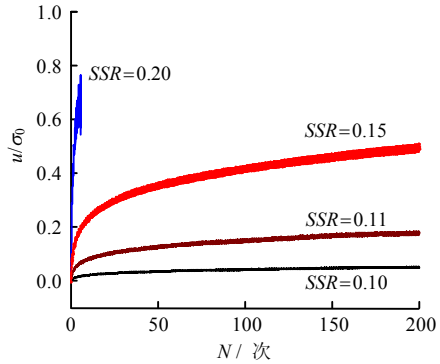


图 16　$\theta=0°$ 时不同 *SSR* 下 u/σ_0 和 *N* 的关系曲线
Fig.16　Effect of *SSR* on u/σ_0 and *N* under $\theta=0°$

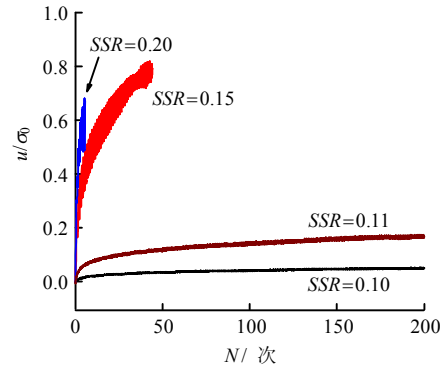


图 17　$\theta=45°$ 时不同 *SSR* 下 u/σ_0 和 *N* 的关系曲线
Fig.17　Effect of *SSR* on u/σ_0 and *N* under $\theta=45°$

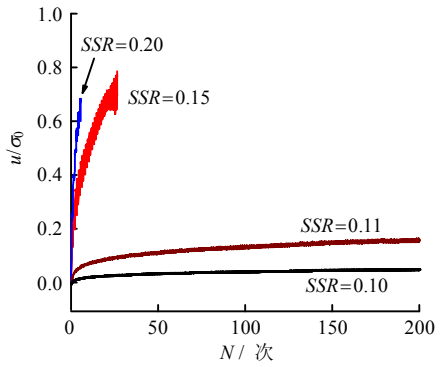
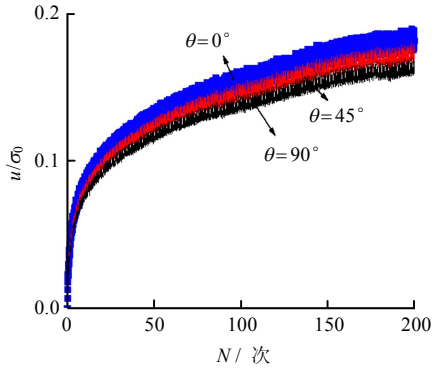
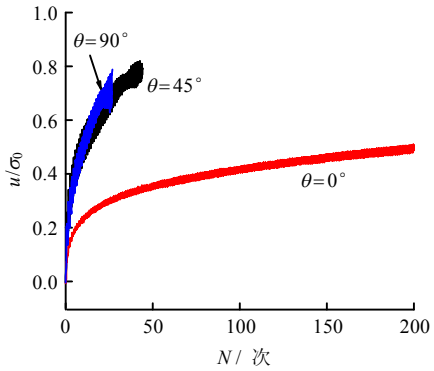


图 18　$\theta=90°$ 时不同 *SSR* 下 u/σ_0 和 *N* 的关系曲线
Fig.18　Effect of *SSR* on u/σ_0 and *N* under $\theta=90°$

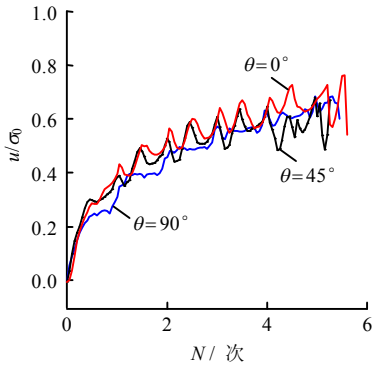
图 19 为不同 *SSR* 下 u/σ_0 的发展曲线。当 *SSR*=0.11 时，单向剪切下的 u/σ_0 缓慢增加。在相同 *SSR* 下，θ 的存在会略微减小 u/σ_0 的增加速率。当 *SSR*=0.15 时，随着 θ 的增加，u/σ_0 的发展速度逐渐加快。与总应变的发展类似，在 θ 由 0° 变为 45° 的过程中 u/σ_0 的发展出现剧烈变化。但是 $\theta=90°$ 时孔压的发展和 $\theta=45°$ 已无明显区别。当 *SSR*=0.20 时，不同 θ 条件下 u/σ_0 的发展速度区别不大。



(a) *SSR*=0.11



(b) *SSR*=0.15



(c) *SSR*=0.20

图 19　不同剪应力比下的孔压比发展曲线
Fig.19　Pore pressure ratio with different *SSR*

整体来说，u/σ_0 的发展过程中，*SSR* 起主导作用，土样随着 *SSR* 的增大，u/σ_0 发展更加迅速。同时，当 $SSR=SSR_{x,\mathrm{limit}}$ 时，θ 的增加会显著促进 u/σ_0 的发展。在较大 *SSR* 的情况下 θ 的影响基本可忽略。

4　结　论

（1）在单向循环单剪试验条件下，温州正常固结饱和软黏土的门槛循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{menkan}}$ 为 0.096，临界循环应力比 $SSR_{x,\mathrm{limit}}$ 为 0.15。

（2）考虑水平剪应力耦合下的剪应变发展特性和剪应力的耦合方式有关，随着相位差θ的增加，剪切轨迹逐渐由直线型变为椭圆形再变为圆形。

（3）当SSR略微超过$SSR_{x,\mathrm{menkan}}$时，相位差θ的存在会阻碍土样总应变和孔压的发展。

（4）在临界循环应力比附近，相位差θ的存在会急剧加快土样总应变和孔压的发展。

（5）当$SSR>SSR_{x,\mathrm{limit}}$时，相位差$\theta$的存在对土样总应变和孔压发展的影响基本可以忽略。

参 考 文 献

[1] SEED H B, CHAN C K. Clay strength under earthquake loading conditions[J]. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Division**, 1966, 92: 53－78.

[2] LEE K L, FOCHT JR J A. Strength of clay subjected to cyclic loading[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 1976, 1(3): 165－185.

[3] KOUTSOFTAS D C. Effect of cyclic loads on undrained strength of two marine clays[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 1978, 104: 609－620.

[4] KOUTSOFTAS D C, FISCHER J A. Dynamic properties of two marine clays[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1980, 106: 645－657.

[5] RAO G G M S N. Behavior of marine clay subjected to cyclic loading with sustained shear stress[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2007, 25(2): 81－96.

[6] OHARA S, MATSUDA H. Study on the settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear[J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(3): 103－113.

[7] VUCETIC M. Normalized behavior of offshore clay under uniform cyclic loading[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1988, 25(1): 33－41.

[8] VUCETIC M, DOBRY R. Degradation of marine clays under cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 114(2): 133－149.

[9] VUCETIC M. Cyclic threshold shear strains in soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(12): 2208－2228.

[10] TAN K, VUCETIC M. Behavior of medium and low plasticity clays under cyclic simple shear conditions[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Mexico City: [s. n.], 1989: 131－142.

[11] YASUHARA K, ANDERSEN K H. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading[J]. **Soils & Foundations**, 1991, 31(1): 83－94.

[12] YILDIRIM H, ERŞAN H. Settlements under consecutive series of cyclic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2007, 27(6): 577－585.

[13] KODAKA T, ITABASHI K, FUKUZAWA H, et al. Cyclic shear strength of clay under simple shear condition[C]//Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2010: 234－239.

[14] MORTEZAIE A R, VUCETIC M. Effect of frequency and vertical stress on cyclic degradation and pore water pressure in clay in the NGI simple shear device[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(10): 1727－1737.

[15] ANDERSEN K H. Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading[C]//Proceedings of BOSS. [S. l.]: [s. n], 1976, 76: 392－403.

[16] ANDERSEN K H, ROSENBRAND W F, BROWN S F, et al. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1980, 106(5): 499－529.

[17] 王军, 蔡袁强, 丁光亚, 等. 双向激振下饱和软黏土动模量与阻尼变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 423－432.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, DING Guang-ya, et al. Experimental research on changing rules of dynamic modulus and damping ratio of saturated soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 423－432.

[18] 王军, 蔡袁强, 海钧. 双向激振对饱和软黏土应力应变循环刚度软化的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1083－1091.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, HAI Jun. Stiffness degradation of saturated soft clay under the action of bidirectional cyclic loading[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(9): 1083－1091.

[19] 王军, 蔡袁强, 潘林有. 双向激振下饱和软黏土应变软化现象试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 178－185.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, PAN Lin-you. Degradation of stiffness of soft clay under bidirectional cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(2): 178－185.

[20] LODDE P F. Dynamic response of San Francisco Bay

mud[C]//Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics. [S. l.]: [s. n.], 1978: 940－959.

[21] DIAZ-RODRIGUEZ J A. Behavior of Mexico city clay subjected to undrained repeated loading[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1989, 26(1): 159－162.

[22] SITAR N, SALGADO R. Behavior of young bay mud from the marina district of San Francisco under static and cyclic simple shear[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1994, (8): A145－A153.

[23] MC CARRON W O, LAWRENCE J C, WERNER R J, et al. Cyclic direct simple shear testing of a Beaufort sea clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1995, 32(4): 584－600.

[24] SORIANO A, PATIÑO H, GONZÁLEZ J, et al. Cyclic behaviour of saturated sands subject to previous horizontal shear stresses[C]//Proceedings of the XVth European Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. Atenas: [s. n.], 2011: 12－15.

[25] MATSUI T, OHARA H, ITO T. Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division-ASCE**, 1980, 106(10): 1101－1120.

[26] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75－78.
ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(5): 75－78.

[27] LAREW H G, LEONARDS G A. A strength criterion for repeated loads[J]. **Highway Research Board Proceedings**, 1962, 41.

[28] SANGREY D A, CASTRO G, POULOS S J, et al. Cyclic loading of sands, silts and clays.[C]//Earthquake Engineering and Soil Dynamics. [S. l.]: [s. n.], 2014: 836－851.

上接第 814 页

[25] VUCETIC M, LACASSE S. Specimen size effect in simple shear test[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 1982, 108(12): 1567－1585.

[26] AMER M I, KOVACS W D, AGGOUR M S. Cyclic simple shear size effect[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 1987, 113(7): 693－707.

[27] 任东滨. 土工格室加筋橡胶砂垫层动力特性大尺寸循环单剪试验研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
REN Dong-bin. Large-scale cyclic simple shear experimental study on dynamic characteristics of geocell reinforcing rubber sand cushion[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.

[28] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Xi'an: The Publication of Xi'an Jiaotong University, 1988.

[29] 张海波, 管学茂, 勾密峰, 等. 橡胶集料对水泥砂浆孔结构的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(14): 126－129.
ZHANG Hai-bo, GUAN Xue-mao, GOU Mi-feng, et al. Influence of rubber aggregate on pore structure of cement mortar[J]. **Material Review**, 2013, 27(14): 126－129.