

波浪荷载作用后软黏土静强度弱化及软基加固研究

刘 功 勋^{1,2}, 栾 茂 田^{*1}, 郭 莹¹, 王 忠 涛¹, 贺 林¹

(1. 大连理工大学 土木工程学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司 中交疏浚技术重点实验室, 上海 200120)

摘要: 利用土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪, 针对取自于长江口的海洋原状饱和淤泥质软黏土, 在不固结不排水条件下, 分别进行了动三轴、45°线耦合以及圆耦合等多种复杂循环剪切试验及循环荷载作用后静三轴试验; 通过室内试验模拟堆载预压加固软基, 并针对加固后土体进行了上述系列试验. 结果表明, 对应相同循环剪切次数, 双向耦合大于单向循环剪切产生的应变与孔压增量, 双向循环荷载作用后静强度衰减更加明显; 而对于双向耦合循环剪切, 圆耦合循环剪切大于 45°线耦合循环剪切产生的应变与孔压增量, 且剪切后静强度衰减更加显著. 土体经过加固处理后, 循环剪切产生的应变明显变小, 而且循环应变要较累积应变表现得更为突出; 孔压的累积效应要比循环效应更加显著, 并且循环荷载作用后静强度衰减程度明显降低, 表明土体经加固处理后抵抗循环荷载弱化能力得到极大增强. 长江口导堤的重建工程证明了试验结果的可靠性并说明了该研究具有的重要工程应用价值.

关键词: 饱和黏土; 波浪荷载; 复杂循环剪切; 强度弱化; 加固处理

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A

0 引 言

迄今为止, 与砂土液化问题研究相比, 对软黏土强度弱化的研究要少得多. 由于软土地基强度弱化会导致严重的工程问题, 揭示软土强度弱化机理和发展经济有效的地基加固措施, 是亟待解决的问题. 目前, 针对波浪等循环荷载作用下软黏土强度弱化的研究得出了不同的结论^[1~7]: 一些学者通过试验发现, 前期循环荷载历史对后期静强度没有显著影响. 也有一些研究表明, 在循环荷载作用下, 伴随孔压上升, 有效应力减小, 软黏土的不排水抗剪强度会发生不同程度的弱化. 因此, 有必要对此进行更深入的研究. 波浪荷载作用下实际土体处于竖向与扭转向双向耦合循环剪切状态, 而目前绝大多数学者在研究波浪荷载作用下土体强度弱化问题时所使用的试验设备, 使得土体处于单向循环剪切状态, 不能反映土体的实际受力状况. 对于沿海地区的软弱地基土, 预先施加荷载进

行预压是一种行之有效的地基加固方法, 进行堆载的同时打设竖向排水体能加速土体固结^[8~10]. 此外, 一些学者针对真空与堆载预压以及真空-堆载联合预压加固软基进行了室内试验研究^[11~13], 并对加固机理进行了较为深入的论述.

本文针对加固前后长江口的海洋原状饱和淤泥质软黏土, 分别进行动三轴、45°线耦合以及圆耦合等复杂循环剪切试验及循环荷载作用后静三轴试验来研究不同模式循环荷载作用对软黏土静强度弱化的影响, 并通过对加固前后试验结果的对比分析来揭示加固措施的有效性.

1 试验条件与试验方法

1.1 试验装置

本项研究所使用的仪器为大连理工大学开发研制的土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪^[14].

1.2 试样制备

试验用土为上海地区长江口原状淤泥质软黏土,土样基本物理性质指标见表 1.

表 1 原状淤泥质软黏土物理性质指标
Tab.1 Physical properties of undisturbed silt soft clay

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	G_s	$w_p/\%$	$w_l/\%$	I_p	$S_r/\%$
1.69	47.4	2.74	21.6	41.4	20.3	>95
~	~	~	~	~	~	
1.74	52.1	2.75	26.0	48.6	23.3	

试验所用试样为如图 1 所示的空心圆柱状试样,其中左侧为切削后软黏土试样,右侧为橡胶模型,试样内、外径与高度分别为 30、70 与 100 mm.

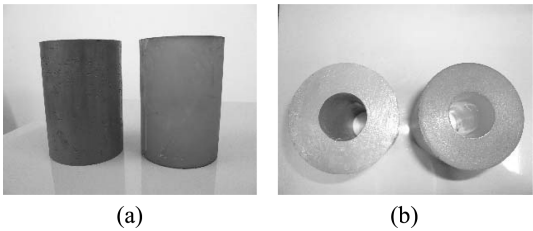


图 1 空心圆柱试样与橡胶模型对比
Fig.1 Comparison between hollow cylindrical specimen and rubber model

1.3 试样饱和与试验内容

首先,将试样置于抽气缸内抽真空 2 h;然后,徐徐注入蒸馏水并没过试样,再静置 12 h.土样经此方法饱和后其饱和度均大于 98%.

试样经上述方法进行饱和后,在不固结不排水条件下,进行静三轴试验,确定土的静强度;然后,分别进行动三轴、45°线耦合、圆耦合循环剪切以及循环荷载作用后静三轴试验,并与未经历循环荷载作用的静三轴试验结果进行对比分析来研究上海地区饱和软黏土经历不同模式循环剪切作用后强度的弱化特性.通过室内试验模拟堆载预压加固软基,土体经过加固处理后,在不排水条件下,进行与上述同样的试验,并与加固前试验结果进行对比分析.为了消除原状土的不均匀性对试验结果的影响,每组最少做 2 个土样的平行试验.最后,以长江口导堤的修建过程为例,来证明试验结果的可靠性.

1.4 循环荷载模式^[15~18]

本文定义大主应力方向角 α 为大主应力方向

与竖向之间的夹角;振动初始主应力方向角 α_{d0} 为单元体上大主应力方向循环交替变化过程中振动开始时刻的大主应力方向与竖直方向的夹角.分别用以下公式表示:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{\vartheta}}{\sigma_z - \sigma_{\theta}}$$
$$\alpha_{d0} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_d}{\sigma_d}$$

(1)

式中: τ_{ϑ} 、 σ_z 和 σ_{θ} 分别为试样上的剪应力、竖向应力和总平均环向应力; σ_d 、 τ_d 分别为竖向和水平向循环动应力.

循环荷载的施加均采用应力控制方式,在不排水条件下进行,频率采用 0.1 Hz.循环耦合试验中的轴向荷载 W 和扭矩 M_t 均采用简谐形式.试验采用以下不同循环荷载模式.

① 模式 1:仅偏差正应力 $(\sigma_z - \sigma_{\theta})/2$ 发生循环变化,此时 α 在 0° 和 90° 之间交替突变,而 α_{d0} 为 0° ,在 $\tau_{\vartheta} - (\sigma_z - \sigma_{\theta})/2$ 应力平面内实测的应力路径大致为一条水平直线.

② 模式 2:控制剪应力 τ_{ϑ} 与偏差正应力 $(\sigma_z - \sigma_{\theta})/2$ 两者幅值相等、相位相同,此时 α 在 22.5° 和 -67.5° 之间交替突变,而 α_{d0} 为 22.5° ,在 $\tau_{\vartheta} - (\sigma_z - \sigma_{\theta})/2$ 应力平面内实测的应力路径大致为一条倾角为 $2\alpha_{d0} = 45^\circ$ 的倾斜直线.

③ 模式 3:控制剪应力 τ_{ϑ} 与偏差正应力 $(\sigma_z - \sigma_{\theta})/2$ 的幅值保持相同、两者相位差保持为 90° ,此时 α 在 0° 和 180° 之间连续旋转,在 $\tau_{\vartheta} - (\sigma_z - \sigma_{\theta})/2$ 应力平面内实测的应力路径大致为圆形.

2 不固结不排水条件下试验结果

在不固结不排水条件下,循环荷载采用分级方式施加,各级荷载均循环 15 次,第一级荷载幅值大小为 9.1 kPa,之后每级荷载幅值增量 $\Delta\sigma_d = 2\Delta\tau_d = 0.65$ kPa.本文分别进行了动三轴、45°线耦合以及圆耦合循环剪切试验,并待土样内部孔压平衡后,进行静三轴试验,静三轴试验以轴向应变达到 10%认为试样破坏.

2.1 循环荷载作用下应变特性对比分析

图 2 绘制了不同循环荷载模式作用下应变时程曲线,表 2 对循环荷载作用下产生的应变进行了汇总.其中,累积应变为每组试验循环剪切产生的累积应变的最大值;循环应变为每组试验最后

一次循环剪切产生的应变最大值与最小值之差。

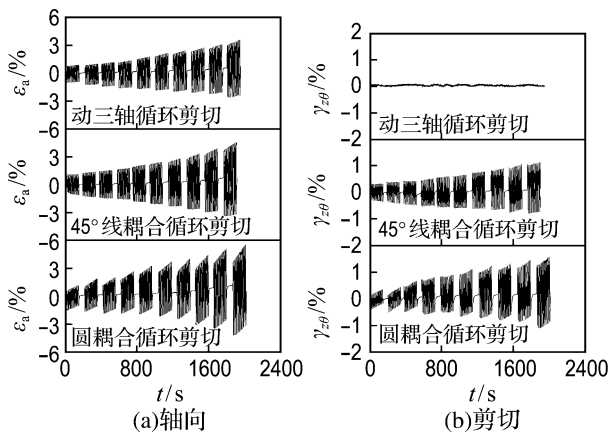


图 2 循环荷载作用下应变时程曲线
Fig. 2 Time history curves of strain under cyclic loadings

表 2 循环荷载作用下应变汇总表
Tab. 2 Summary table of the strains under cyclic loadings

	动三轴循环剪切		45°线耦合循环剪切		圆耦合循环剪切	
	累积 应变/%	循环 应变/%	累积 应变/%	循环 应变/%	累积 应变/%	循环 应变/%
轴向	0.57	5.92	0.71	7.72	1.12	8.68
剪切	0.02	0.10	0.11	1.86	0.18	2.50

由图 2 并结合表 2 可知,不同循环剪切模式下产生的应变均以循环应变为主,同时伴随着累积应变的产生;对应于相同的循环次数,产生的剪应变明显小于竖向应变;双向耦合循环剪切产生的应变要大于单向循环剪切产生的应变,而对于双向耦合循环剪切,圆耦合循环剪切要大于 45°线耦合循环剪切产生的应变,圆耦合循环剪切过程中 α 在 0° 和 180° 之间连续变化,主应力轴发生连续旋转,而 45°线耦合循环剪切过程中 α 在 22.5° 和 -67.5° 之间交替突变,主应力轴并未发生连续旋转,说明主应力轴连续旋转使得土体产生更大的变形。

2.2 循环荷载作用下孔压特性对比分析

本研究分别用累积孔压增量比 $\Delta u_a/\sigma_3$ 和循环孔压增量比 $\Delta u_c/\sigma_3$ 来表征循环荷载作用下孔压的累积效应与循环效应,分别定义如下:

$$\Delta u_a/\sigma_3 = (u_a - u_0)/\sigma_3 \tag{2}$$

式中: Δu_a 为累积孔压增量; u_a 和 u_0 分别为累积孔压和初始孔压。

$$\Delta u_c/\sigma_3 = [(u_{\max} - u_0) - (u_{\min} - u_0)]/\sigma_3 =$$

$$(u_{\max} - u_{\min})/\sigma_3 \tag{3}$$

式中: Δu_c 为循环孔压增量,为单次循环的孔压最大值与最小值之差; $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 分别为单次循环的孔压最大值与最小值。

图 3 绘制了不同循环剪切模式下孔压增量比时程曲线,其结果汇总于表 3。其中,累积孔压增量比为每组试验循环剪切产生的累积孔压增量比的最大值;循环孔压增量比为每组试验最后一次循环剪切产生的孔压增量比最大值与最小值之差。

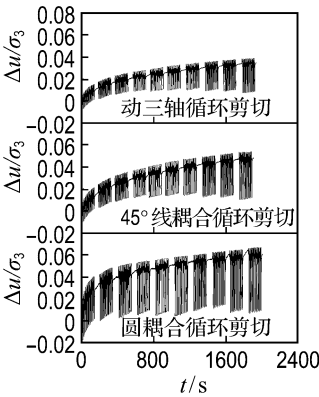


图 3 循环荷载作用下孔压增量比时程曲线
Fig. 3 Time history curves of pore water pressure incremental ratio under cyclic loadings

图 3 与表 3 表明,3 种不同循环剪切模式下产生的累积孔压增量与循环孔压增量差异明显:双向耦合循环剪切产生的孔压增量大于单向循环剪切产生的孔压增量,而圆耦合循环剪切大于 45°线耦合循环剪切产生的孔压增量。此外,由图 3 与表 3 可以发现,3 种不同循环剪切模式下产生的累积孔压增量均十分有限。

表 3 循环荷载作用下孔压增量比汇总表
Tab. 3 Summary table of the pore water pressure incremental ratios under cyclic loadings

动三轴循环剪切		45°线耦合循环剪切		圆耦合循环剪切	
$\Delta u_a/\sigma_3$	$\Delta u_c/\sigma_3$	$\Delta u_a/\sigma_3$	$\Delta u_c/\sigma_3$	$\Delta u_a/\sigma_3$	$\Delta u_c/\sigma_3$
0.034	0.030	0.047	0.042	0.060	0.058

2.3 循环荷载作用后静强度弱化特性

图 4 分别绘制了未经历循环荷载与经历循环荷载作用后由不排水静三轴试验得到的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$ 关系曲线,循环荷载作用后静强度弱化情

况见表 4。

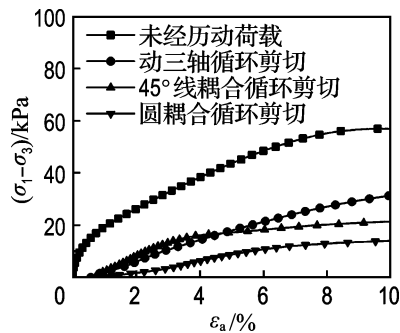


图 4 循环荷载作用后 $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_a$ 关系曲线

Fig. 4 Relation curves between $(\sigma_1-\sigma_3)$ and ϵ_a after cyclic loadings

表 4 循环荷载作用后静强度

Tab. 4 Static shear strengths after cyclic loadings

未经循环荷载	动三轴循环剪切		45°线耦合循环剪切		圆耦合循环剪切	
	静强度/kPa	相对衰减/%	静强度/kPa	相对衰减/%	静强度/kPa	相对衰减/%
	28.50	44.91	10.70	62.46	7.02	75.37

通过对图 4 以及表 4 对比分析可知,循环荷载作用后土的静强度均有不同程度的衰减;对于 3 种不同循环剪切模式,循环荷载作用后土的静强度的衰减程度差异显著。作者认为这可以从孔压的发展变化得以揭示:以上关于孔压特性的研究表明,双向耦合循环剪切产生的孔压增量大于单向循环剪切产生的孔压增量,而对于双向耦合循环剪切,圆耦合循环剪切大于 45°线耦合循环剪切产生的孔压增量。累积孔压增量越大,由饱和土有效应力原理可知,在总应力保持不变的情况下,累积孔隙水压力越大,作用于土骨架的有效应力越小,土体抵抗外荷载的能力越弱。此外,循环孔压增量变化越大,土颗粒之间孔隙体积变化越大,从而对土体的扰动越大,进而削弱土体抵抗外荷载的能力。目前,很多学者在研究波浪等循环荷载作用后土的静强度衰减特性时都是基于动三轴试验,土体处于单向剪切状态,而波浪荷载作用下实际土体处于竖向与扭转向双向耦合循环剪切状态,这在工程设计时应引起足够的重视。

3 土体加固前后试验结果对比分析

参照吴桂芬等^[11~13]模拟堆载预压室内试验

方法,首先将试样分别在 150 kPa 的围压下固结稳定,再产生 80 kPa 的竖向荷载,竖向荷载作为预压荷载。需指出和说明的是,堆载预压时,一次性施加 80 kPa 的竖向应力,试样易发生破坏,所以预压时应分级施加荷载,一次施加 20 kPa 的竖向应力。此外,在空心试样内外壁等间距粘贴若干滤纸条来加速固结排水过程。待变形与排水量基本稳定后,在不排水条件下,进行静三轴试验,确定加固后土的静强度;然后,分别进行动三轴、45°线耦合、圆耦合循环剪切以及循环荷载作用后静三轴试验。循环荷载的施加方式及破坏标准与不固结不排水试验相同。

3.1 土体加固前后应变特性对比分析

土体经加固处理后,不同模式循环荷载作用下应变时程曲线如图 5 所示,表 5 对循环荷载作用下产生的应变进行了汇总。由图 5 结合表 5 并与土体加固前试验结果对比可知,土体经加固处理后,在循环剪切过程中,轴向应变的累积效应要

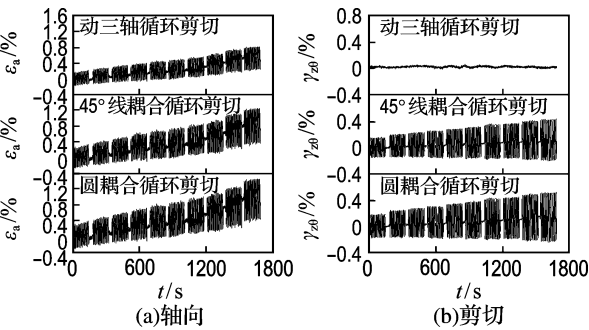


图 5 土体加固后循环荷载作用下应变时程曲线

Fig. 5 Time history curves of strain under cyclic loadings after soil reinforcement

表 5 土体加固后循环荷载作用下应变汇总表

Tab. 5 Summary table of the strains under cyclic loadings after soil reinforcement

	动三轴循环剪切		45°线耦合循环剪切		圆耦合循环剪切	
	累积应变/%	循环应变/%	累积应变/%	循环应变/%	累积应变/%	循环应变/%
轴向	0.54	0.60	0.84	0.90	0.99	1.05
剪切	0.01	0.03	0.09	0.63	0.13	0.75

比循环效应明显,而剪应变的循环效应要比累积效应更加明显;加固后循环剪切产生的应变,无论是轴向应变还是剪应变,都比加固前的要小,而且

循环应变表现得更为突出。

3.2 土体加固前后孔压特性对比分析

土体经加固处理后,不同模式循环荷载作用下孔压增量比时程曲线如图 6 所示,表 6 汇总了不同循环荷载模式作用下孔压增量比。由图 6 结合表 6 并与土体加固前试验结果对比可知,随着循环次数的增加,孔压发生累积增长;在循环剪切过程中,孔压累积效应要比循环效应更加明显,这与土体加固前孔压发展状况相反。

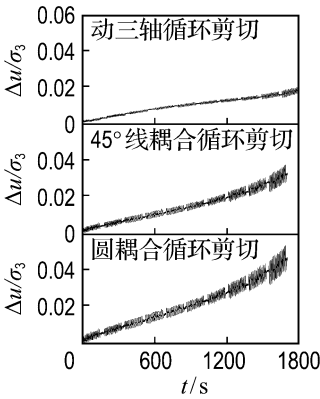


图 6 土体加固后循环荷载作用下孔压增量比时程曲线

Fig. 6 Time history curves of pore water pressure incremental ratio under cyclic loadings after soil reinforcement

表 6 土体加固后循环荷载作用下孔压增量比汇总表

Tab. 6 Summary table of pore water pressure incremental ratios under cyclic loadings after soil reinforcement

动三轴循环剪切		45°线耦合循环剪切		圆耦合循环剪切	
$\Delta u_a/\sigma_3$	$\Delta u_c/\sigma_3$	$\Delta u_a/\sigma_3$	$\Delta u_c/\sigma_3$	$\Delta u_a/\sigma_3$	$\Delta u_c/\sigma_3$
0.017	0.004	0.032	0.009	0.042	0.014

3.3 土体加固前后静强度弱化特性对比分析

通过试验测定了加固后未经历循环荷载作用与分别经历动三轴、45°线耦合、圆耦合循环剪切后土的不排水静强度,结果如表 7 所示。由表 7 可以看出,不同模式循环荷载作用后土的静强度衰减存在一定差异,双向耦合循环剪切后静强度衰减程度明显高于单向循环剪切,而 45°线耦合与圆耦合循环剪切后静强度衰减差别并不十分明

显。由表 4 与表 7 对比发现,加固后土体抗弱化能力明显增强,经历 150 次圆耦合循环剪切后,静强度只衰减了 8.90%,要远远小于加固前土的静强度衰减。加固后地基土的强度以及抗弱化能力均明显增强,这是由于在饱和软土地基上施加荷载后,孔隙水被排除,随着超静水压力的逐渐消散,有效应力逐渐提高,孔隙体积逐渐减小,地基发生固结变形,土体变得越来越密实。

表 7 土体加固后循环荷载作用下静强度衰减

Tab. 7 Degradation of static shear strength under cyclic loadings after soil reinforcement

未经循环荷载	圆耦合循环剪切		动三轴循环剪切		45°线耦合循环剪切	
	静强度/kPa	相对衰减/%	静强度/kPa	相对衰减/%	静强度/kPa	相对衰减/%
67.95	64.28	5.40	62.64	7.81	61.90	8.90

4 工程实例

长江口导堤建设工程是迄今为止我国最大的水运工程项目。地基土表层为 2.0 m 厚的粉土层,下层大约是 60 m 厚的软黏土层。为防止表层地基土受到冲刷,在地表面放置一层土工布,上面是 2 m 高的碎石基床垫层。由于地基承载力相对较低,导堤的沉箱做成中空的一半圆形状,以减少基础的重力,而且半圆形结构的另一个优点是波浪的合力方向总是通过结构物的圆心,这样可以大大改善结构物的承载条件。

然而,2002 年 12 月的一次强风暴期间,已经安装好的沉箱发生了很大的沉降和侧移。经多方考查与论证认为,周期性作用的波浪荷载经沉箱、基床传递给地基后,引起近表层土(主要是淤泥质软黏土)强度的弱化,导致承载力降低,这是地基破坏、沉箱表现出剧烈沉陷的根本性原因。

对此,为了保证导堤的安全重建,采用了排水板加堆载预压的方法对地基进行了加固处理。导堤重建工作于 2003 年 12 月竣工,之后曾几次强风暴席卷该地区,有些甚至比 2002 年 12 月的风暴还要猛烈,但重建后的导堤没有受到任何损坏,由此说明加固后的土体抗弱化能力得到了极大的增强。

5 结 论

(1) 对应相同循环剪切次数, 不同模式循环剪切产生的应变差异显著, 双向耦合循环剪切要大于单向循环剪切产生的应变, 而圆耦合要大于 45°线耦合循环剪切产生的应变. 土体经加固处理后, 循环剪切产生的应变, 无论是轴向应变还是剪切应变, 都比加固前循环剪切产生的应变要小, 而且循环应变表现得更为突出.

(2) 对应相同循环剪切次数, 不同模式循环剪切产生的孔压增量差异也十分明显: 双向耦合大于单向循环剪切产生的孔压增量, 而圆耦合要大于 45°线耦合循环剪切产生的孔压增量. 加固后土体在循环剪切过程中, 孔压的累积效应要比循环效应更加明显, 这与未经加固土体试验结果反映的规律相反.

(3) 经历圆耦合循环荷载作用后, 土的静强度衰减程度更加显著, 表明针对不同的循环剪切模式, 循环荷载作用后土的静强度衰减规律差异明显, 在工程设计时应引起足够的重视.

(4) 排水板加堆载预压方法是一种有效加固软土地基的方法. 室内实验室模拟与工程实例说明, 运用该方法加固处理后的软基, 抵抗循环荷载弱化的能力得到了极大的增强.

参考文献:

- [1] 王淑云, 楼志刚. 原状和重塑海洋粘土经历动载后的静强度衰减[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1):20-27
- [2] 闫澍旺, 侯晋芳, 刘 润, 等. 长江口导堤在波浪荷载作用下的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增 1):3245-3249
- [3] KOUTSOFTAS D C. Effects of cyclic loads on undrained strength of two marine clays [J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1978, **104**(5):609-620
- [4] ANDERSEN K H, POOL J H, BROW S F, *et al.* Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay [J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1980, **106**(5):499-529
- [5] YASUHARA K. Postcyclic undrained strength for cohesive soils [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, **120**(11):1961-1979
- [6] MATSUI T, BAHR M A, ABE N. Estimation of shear characteristics degradation and stress-strain relationship of saturated clays after cyclic loading [J]. **Soils and Foundations**, 1992, **32**(1):161-172
- [7] HICHER P Y, LADE P V. Rotation of principal directions in K_0 -consolidated clay [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1987, **113**(7):774-788
- [8] 朱向荣, 李 振, 王金昌. 舟山国家石油储备基地堆载预压加固效果分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(4):881-886
- [9] 谢新宇, 朱向荣, 潘秋元, 等. 舟山机场场道软基超载预压加固效果分析[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(3):60-65, 91
- [10] 潘秋元, 朱向荣, 谢康和. 关于砂井地基超载预压的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(2):1-12
- [11] 吴桂芬, 高玉峰, 魏代现, 等. 真空和堆载两种预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增):95-98
- [12] 刘汉龙, 李 豪, 彭 勃, 等. 真空-堆载联合预压加固软基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1):145-149
- [13] 闫澍旺, 陈 环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, **8**(2):35-43
- [14] 栾茂田, 郭 莹, 李木国, 等. 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, **43**(5):670-675
- (LUAN Mao-tian, GUO Ying, LI Mu-guo, *et al.* Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2003, **43**(5):670-675)
- [15] 栾茂田, 许成顺, 郭 莹, 等. 静力与动力组合应力条件下饱和松砂变形特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(3):81-93
- [16] 何 杨, 栾茂田, 张振东, 等. 排水循环剪切条件下砂土体变特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, **48**(2):246-252
- (HE Yang, LUAN Mao-tian, ZHANG Zhen-dong, *et al.* Experimental study of volumetric strain characteristics of sand subjected to drained cyclic shearing [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2008, **48**(2):246-252)

- [17] 郭莹,栾茂田,何杨,等. 主应力方向循环变化对饱和松砂不排水动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4):403-409
- [18] 栾茂田,齐剑峰,聂影,等. 循环应力下饱和黏土剪切变形特性试验研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(1):43-49

Study of degradation of static shear strength of soft clay after wave loading and consolidation of soft foundation

LIU Gong-xun^{1,2}, LUAN Mao-tian^{*1}, GUO Ying¹, WANG Zhong-tao¹, HE Lin¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Key Laboratory of Dredging Technology of CCGRP, Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. of CCGRP, Shanghai 200120, China)

Abstract: The soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus was employed to perform experimental tests of the undisturbed saturated marine silt soft clay in the Yangtze estuary. Under unconsolidated-undrained conditions, the dynamic triaxial, 45° line coupling as well as circle coupling complex cyclic shear tests and the static triaxial tests after cyclic loadings were carried out. The laboratory tests were carried out to simulate the consolidation treatment of soft foundation with the preloading method. Likewise, a series of above-mentioned tests were carried out. The experimental results show that, corresponding to the same number of cyclic shear, the strain and pore water pressure increment caused by bidirectional coupling cyclic shear are larger than those caused by monodirectional cyclic shear and the degradation degree of static shear strength after bidirectional cyclic loadings become more evident. As for bidirectional coupling cyclic shear, the strain and pore water pressure increment caused by circle coupling cyclic shear are larger than those caused by 45° line coupling cyclic shear and the degradation degree of static shear strength after circle coupling cyclic shear is more significant. For the soils after consolidation treatment, the strains caused by cyclic shear become smaller evidently and the cyclic strains are more significant than the cumulative one. The cumulative effect is more remarkable than the cyclical effect on the pore water pressure. The shear strengths after cyclic loadings are not reduced so remarkably, which indicates that the cyclic loading resistance is enhanced greatly after consolidation. The reconstruction project of the guide dike in Yangtze estuary verifies the reliability of the test results and shows that this study has important value for engineering application.

Key words: saturated clay; wave loading; complex cyclic shear; degradation of strength; consolidation treatment