

长期循环荷载作用下海洋饱和粉砂的弱化特性

李 帅^{1,2}, 黄茂松^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了研究海洋饱和粉砂在长期循环荷载作用下的弱化特性, 对原状饱和粉砂进行了一系列不同固结条件下不排水单调和循环加载三轴试验, 并在循环加载过程中通过弯曲元测试土体剪切波速. 主要分析固结方式、动应力比以及循环次数对饱和粉砂循环弱化特性的影响. 试验结果表明, 在相同的固结条件下, 随循环次数的增加和动应力比的提高, 土体的强度和刚度衰减显著, 在相同的动应力比作用下, 偏压固结相对于等压固结减缓了土体的循环弱化. 利用动偏应力水平对海洋饱和粉砂循环荷载作用下强度和刚度的弱化特性进行了描述.

关键词: 偏压固结; 刚度; 强度; 循环弱化; 动偏应力水平
中图分类号: TU 441 **文献标识码:** A

Degradation Characteristics of Saturated Marine Silty Sand Under Long-term Cyclic Loading

LI Shuai^{1,2}, HUANG Maosong^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the long term cyclic degradation characteristics of saturated marine silty sand, a series of monotonic and cyclic undrained triaxial tests were conducted on isotropically and anisotropically consolidated natural undisturbed saturated silty sand with the shear wave measured by bender element system during cyclic loading. The influences of consolidation mode, cyclic stress ratio and cyclic number on the reduction of stiffness and strength of saturated sand were mainly analyzed. The experimental results show that under the same consolidated condition the undrained strength and stiffness of saturated sand markedly reduce with the increase of the cyclic stress ratio and the progressive number of cycles. On the other hand, anisotropic consolidation decelerates the degradation of stiffness under the same cyclic

stress ratio. The dynamic deviatoric stress level is used to describe the reduction of stiffness and strength of saturated marine silty sand under cyclic loading.

Key words: anisotropic consolidation; stiffness; strength; cyclic degradation; dynamic deviatoric stress level

随着人类对海洋资源的开发, 近海构筑物大量兴建, 这类构筑物受波浪荷载长期作用. 波浪荷载是一种典型的循环荷载, 因此近海构筑物桩基础的设计需要更深入研究海洋饱和砂土在长期循环荷载作用下的弱化特性. 以往的研究集中于循环荷载作用下动应变、动孔压、动强度、动刚度及液化特性^[1-5], 而对于长期循环荷载作用后砂土刚度和不排水抗剪强度的衰减特性较少涉及, 因此有必要对循环荷载作用后的土体进行单调加载, 研究其循环荷载作用后的弱化特性.

在建的上海东海大桥海上风电场示范工程为中国第一个真正意义上的海上风电场, 位于东海大桥东侧 1~4 km 海域, 距离岸线 8~13 km, 风机地基基础处于海洋环境中, 海浪和风荷载作用引起水平向循环荷载, 风机工作组为动力设备, 工作时引起竖向循环荷载, 因而风机桩基础除了要承担上部机构自重产生的恒载之外, 还要长期承担一定幅值的循环荷载作用, 势必对风机地基基础的强度和稳定提出了超乎寻常的要求. 为研究风机桩基础在长期往复荷载作用下承载力的退化特性, 本文对海洋饱和粉砂开展了一系列不同固结条件下不排水单调和循环加载三轴试验, 并结合弯曲元测试, 分析固结静偏应力和动应力比对循环荷载作用后土体刚度和不排水抗剪强度的弱化特性的影响, 并提出海洋饱和粉砂不排水长期循环弱化特性的合理描述.

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50825803)

第一作者: 李 帅(1980—), 女, 博士生, 主要研究方向为土动力学与桩基工程. E-mail: lishuaipurple@163.com

通讯作者: 黄茂松(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土动力学与软土基础工程. E-mail: mshuang@tongji.edu.cn

1 试验试样及试验方法

1.1 试验试样

试验土样取自东海大桥海上风电场工程所处海域,为第⑦₂₋₁层粉砂,为保证试验结果的可比性,土样基本取于同一深度,颗粒分析曲线见图 1. 该砂样的曲率系数 C_c 为 1.45,不均匀系数 C_u 为 3.98,试验砂样的主要物理参数见表 1.

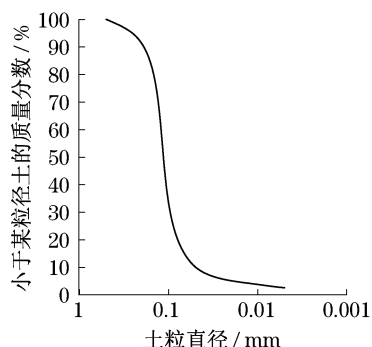


图 1 试验原状砂样的颗粒分析曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of undisturbed sand samples

表 1 砂样的主要物理参数

Tab.1 Major parameters of sand samples

重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对密度 G_s	含水量 w / %	饱和度 S_r / %	孔隙比 e
19.4	2.68	24.7	98.6	0.679

试样为圆柱体,静三轴试验试样直径为 $D = 39.1 \text{ mm}$,高度为 $H = 80 \text{ mm}$,动三轴试验试样直径为 $D = 70.0 \text{ mm}$,高度为 $H = 140 \text{ mm}$.

1.2 试验方法

采用同济大学引进的英国 GDS(Global Digital Systems)土体多功能三轴试验仪,完成等压固结、偏压固结、单调加载试验和循环加载试验. 结合 GDS 弯曲元测试系统进行剪切波速测试,该系统是将发射弯曲元固定在土样帽上,插入土样上端,接收弯曲元固定在压力室底部,插入土样下端,在发射端激发源波形,产生的剪切波通过土体传播到接收弯曲元,在同一个图上看到发射波形及从接收器采集的结果,用图解法找出离开源波形的点和达到接收器的点,得到剪切波速在土样中的传播时间,输入土样高度同时计算出剪切波速,进而得到剪切模量.

静三轴试验,平均有效固结应力 p'_0 分别为 114, 228 和 457 kPa,进行等压固结和偏压固结,偏压固结比为 0.7(从而模拟土体的 K_0 固结状态),固结完成后进行不排水单调加载.

动三轴试验,平均有效固结应力分别为 114 和

228 kPa,进行等压固结和偏压固结(偏压固结比为 0.7),采用应力控制不排水单向循环加载,加载波形由伺服系统生成,选用正弦波. 由于本课题为长期循环荷载作用,故加载次数取为 5 000 次,动应力比 $\eta_d = q_d / p'_0$,分别为 0.10, 0.20 和 0.40(q_d 为动偏应力),振动频率为 $f = 1 \text{ Hz}$. 为了准确测量剪切模量随循环次数的变化规律,固结完成后以及每 1 000 次循环结束后进行弯曲元测试,尽可能快速测试,以免时间效应对剪切模量造成影响. 为了研究循环加载后土体强度的衰减,循环加载结束后进行不排水单调加载.

单调加载试验均以应变控制,考虑到不同加载速率对试样的影响,加载速率均选择为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 试验结果分析

2.1 不同固结条件下饱和粉砂刚度的循环弱化

通过循环加载时土体剪切模量的变化,研究饱和粉砂刚度的循环弱化特性. 在循环加载试验过程中进行弯曲元测试,得到土样的剪切波速 V_s 和初始剪切模量 G_{\max} .

为了研究剪切模量的衰减规律,引入第 N 次循环的剪切模量 $G_{\max N}$ 与第一次循环的剪切模量 $G_{\max 1}$ 之比^[4]. 图 2 为 $p'_0 = 114 \text{ kPa}$ 时,不同动应力比条件下,剪切模量的衰减和循环次数的关系. 在循环荷载作用初期,剪切模量的衰减趋势明显,但随着循环次数的增加,衰减速率逐渐减小,并最终达到相对稳定状态. 在相同的循环次数下,随着动应力比的升高,剪切模量的衰减加剧,这主要是由于动应力比的升高,循环应变迅速增加,导致土颗粒间的破坏和软化更加严重,使得模量衰减幅度增大.

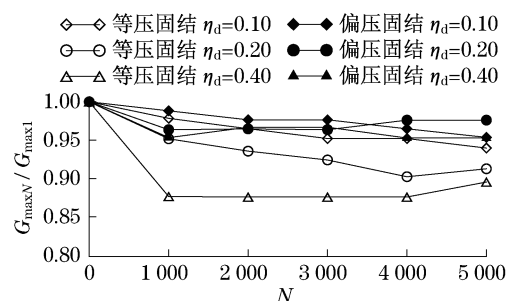


图 2 剪切模量随循环次数的衰减($p'_0 = 114 \text{ kPa}$)

Fig.2 Normalized shear modulus degradation with N at $p'_0 = 114 \text{ kPa}$

不同的固结条件下,土样作用动应力比相同的循环荷载,剪切模量的衰减规律如图 3 所示. 有效固结压力相同,偏压固结的剪切模量衰减幅度小于等

压固结的剪切模量衰减.

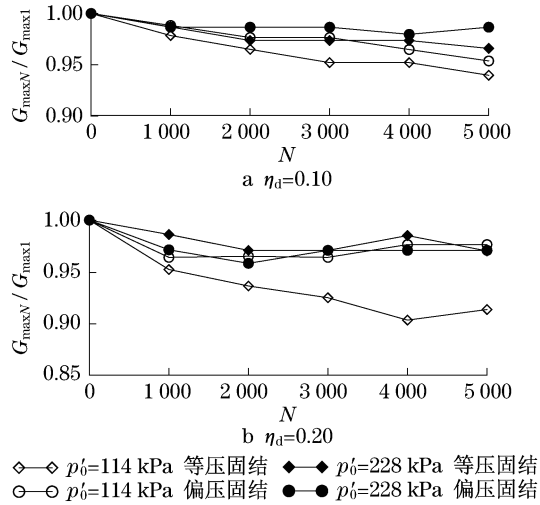


图3 不同固结条件下剪切模量的衰减

Fig.3 Normalized shear modulus degradation for different consolidation conditions

2.2 循环荷载作用后不排水抗剪强度的衰减

不同平均有效固结应力下,等压固结和偏压固结的不排水静三轴试验结果见图4,图中 q 为偏应力,

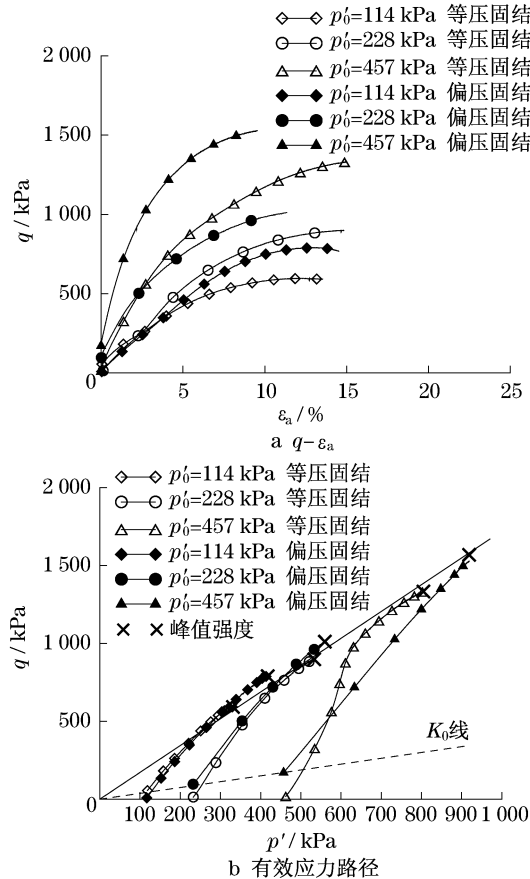


图4 不同固结条件下不排水静三轴试验结果对比

Fig.4 Comparison of undrained monotonic triaxial tests under different consolidation conditions

ϵ_a 为轴向应变, p' 为平均有效应力.

在相同的平均有效固结应力下,偏压固结时的峰值偏应力比等压固结时的高,试验所得不同固结条件下应力路径及峰值强度如图4所示,通过拟合可以估算出不同围压下峰值强度值(表2).

图5给出了在不同固结条件下,未经循环荷载作用与不同动应力比的循环荷载作用后,不排水三轴试验曲线的对比.

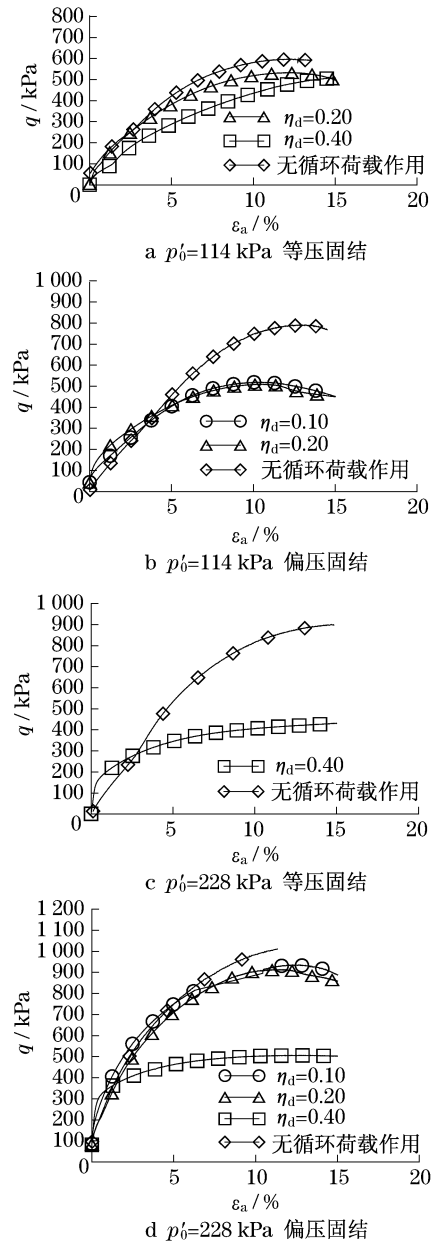


图5 循环荷载作用后不排水三轴试验结果对比

Fig.5 Comparison of undrained monotonic triaxial tests after cyclic loading

在相同固结条件下,循环荷载作用后,饱和粉砂的峰值应力均有不同程度降低,这一趋势随动应力

比的增大而更加显著;另一方面,动应力比和平均有效固结应力一致,偏压固结的峰值应力减少程度弱于等压固结,如图 5 所示.

2.3 强度和刚度弱化特性的合理描述

Hyodo 等^[3]提出用 q_d/p'_0 来反应土体的动力特性,但是该值没有考虑静偏应力 q_s 对土体动力特性产生的显著影响.为了更好地分析循环荷载作用下饱和砂土刚度和强度弱化特性,本文采用动偏应力水平 D_d 的概念,综合考虑有效固结应力、动偏应力和静偏应力的影响,定义如下:

$$D_d = q_d/q_{ult} \quad (1)$$

式中: q_{ult} 为峰值强度(耦合了有效固结应力和固结静偏应力的影响).

各试样的动偏应力水平如表 2 所示.

表 2 循环三轴试样的动偏应力水平

Tab.2 Dynamic deviatoric stress level of samples

p'_0/kPa	q_s/kPa	q_d/kPa	q_{ult}/kPa	η_d	D_d
114	0	11.4	560.68	0.1	0.020
114	0	22.8	560.68	0.2	0.040
114	0	45.6	560.68	0.4	0.080
114	42.86	11.4	800.36	0.1	0.014
114	42.86	22.8	800.36	0.2	0.028
114	42.86	45.6	800.36	0.4	0.056
228	0	22.8	850.64	0.1	0.027
228	0	45.6	850.64	0.2	0.054
228	0	91.2	850.64	0.4	0.108
228	85.72	22.8	1 100.89	0.1	0.021
228	85.72	45.6	1 100.89	0.2	0.042
228	85.72	91.2	1 100.89	0.4	0.084

Idriss 等^[6]首次提出软化指数 δ_d 的概念,定义为第 N 次循环的剪切模量 G_N 与第一次循环的剪切模量 G_1 之比,并建立了软化指数与循环次数之间关系的指数表达式:

$$\delta_d = N^{-d} \quad (2)$$

式中: d 为软化参数. Yasuhara 等^[7]通过与 Idriss 等类似的方法针对粉土进行研究,发现 G_N/G_1 与 $\lg N$ 的线性关系,建立了软化指数与循环次数之间关系的半对数表达式:

$$\delta_d = 1 - d \lg N \quad (3)$$

借鉴 Yasuhara 等的方法对本文的试验结果进行分析,发现土体的刚度软化规律可以用下式表达:

$$\delta_d = 1 - d \ln N \quad (4)$$

软化参数 d 与动偏应力水平 D_d 的关系如图 6 所示.可以看出,通过考虑各因素的耦合作用,软化参数 d 随动偏应力水平 D_d 增大表现出单调增大的规律,由此可见, D_d 适合于海洋饱和粉砂刚度循环弱化特性的描述.

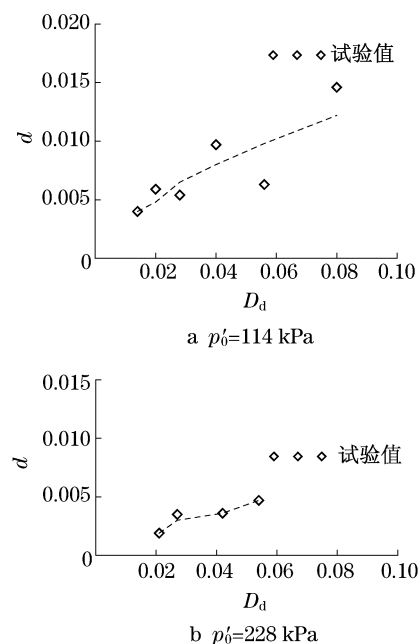


图 6 软化参数与动偏应力水平关系

Fig.6 Relationship between degradation parameter and dynamic deviatoric stress level

不排水循环荷载作用后,海洋饱和粉砂的不排水抗剪强度降低,为了研究其受循环荷载作用后的抗剪强度衰减,引入了循环荷载作用后土体的抗剪强度的衰减量与未受循环荷载作用的抗剪强度的比值 Δ .

用动偏应力水平 D_d 来描述循环荷载作用 5 000 次后不排水抗剪强度的衰减.抗剪强度衰减量与动偏应力水平的关系如图 7 所示, Δ 与动偏应力水平

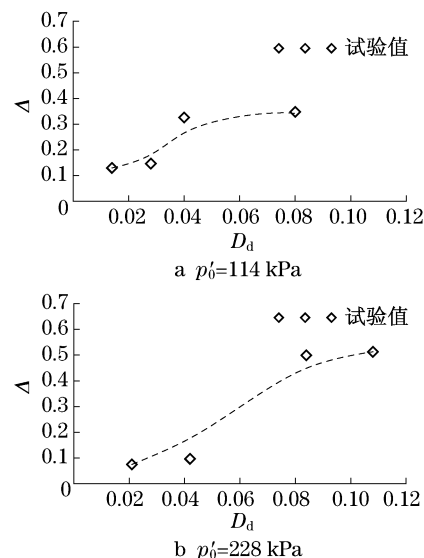


图 7 抗剪强度衰减量与动偏应力水平关系

Fig.7 Relationship between undrained shear strength degradation and dynamic deviatoric stress level

(下转第 68 页)