

DOI: 10.11779/CJGE201910017

粉土界面恒刚度循环剪切试验研究

王 腾, 张 哲

(中国石油大学(华东)船舶与海洋工程系, 山东 青岛 266580)

摘要: 竖向循环荷载作用下桩土界面的作用机理是研究桩土摩擦疲劳的关键。针对循环荷载作用下桩-粉土界面的剪切性能, 使用改进的剪切试验装置在恒刚度条件下进行循环剪切试验, 研究循环次数、累积位移和法向刚度对其摩擦疲劳性能、循环后单调剪切性能的影响。试验结果表明, 粉土在循环剪切过程中, 法向应力和剪应力在初始10个循环内随循环数增加快速衰减, 随着循环进行, 逐渐趋于稳定; 单次循环内在剪切位移方向变化时, 土体呈现表现出剪缩-剪胀-剪缩交替现象, 总体变形呈现剪缩的趋势; 循环荷载作用下, 粉土界面的法向应力和剪应力随法向刚度增大衰减速率增大, 达到稳定的累积循环位移越小; 粉土循环后的单调剪切、法向应力恢复的单调剪切的剪应力比小于首次单调剪切试验值, 且法向应力恢复的循环后剪切试验的剪胀程度较小, 表明循环剪切过程中界面处粉土颗粒棱角破碎, 颗粒变得光滑。在对试验数据分析的基础上, 提出了与累积位移、法向刚度和初始应力相关的无量纲累积位移, 建立了法向应力和界面摩擦角随累积位移的衰减方程。

关键词: 摩擦疲劳; 循环剪切; 循环后剪切; 粉土; 恒刚度; 累积位移

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1921-07

作者简介: 王 腾(1973—), 男, 山东海阳人, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程方面研究工作。E-mail: wteng73@upc.edu.cn。

Experimental studies on cyclic shear behavior of steel-silt interface under constant normal stiffness

WANG Teng, ZHANG Zhe

(Department of Offshore Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The friction mechanism of pile-soil interface under vertical cyclic loading is the key to study the friction fatigue of piles. In order to study the cyclic shear behavior of pile-silt interface, cyclic shear tests are carried out under constant normal stiffness (CNS) using a modified shear test device. The effects of cycle numbers, cumulative displacement and normal stiffness on the friction fatigue performance and post-cyclic monotonic shear behavior are studied. The results show that the normal and shear stresses decrease rapidly in the initial 10 cycles and gradually become stable with the cycle. The soil exhibits shearing contraction, dilatation and contraction alternating phenomenon with the shear displacement direction changing in a single cycle, and the overall deformation shows a tendency of shearing contraction. The higher normal stiffness results in higher reduction rate of the normal and shear stresses in the shear interface, and the cumulative cyclic displacement for cyclic stability is smaller. The shear stress ratios from the post-cyclic monotonic and post-cyclic monotonic shear tests with the same initial normal stress are lower than those from the initial monotonic shear tests, and the post-cyclic monotonic shears from the same initial normal stress tests have low shear dilation degree, which indicates that the soil sample experiences particle crushing and soil particles become smooth due to the cyclic shearing effect. Based on the analysis of experimental data, the dimensionless cumulative displacement related to the cumulative displacement, normal stiffness and initial normal stress is proposed. The attenuation equation for the normal stress and interface friction angle with cumulative displacement is established.

Key words: friction fatigue; cyclic shear; post-cyclic shear; silt; constant normal stiffness; cumulative displacement

0 引言

海洋结构物的桩基础在大的风暴荷载作用下常常承受竖向循环荷载的作用, 因而桩土界面可能出现抗力退化现象, 降低桩基的竖向承载力。Lehane等^[1-2]、

White等^[3-4]、Jardine等^[5]、俞峰等^[6]通过模型试验及足尺试验, 发现了这种规律特性, 此特性被 Heerema^[7]

称为摩擦疲劳。这种桩侧摩阻力的退化现象是桩侧附近土体在循环剪切作用下的颗粒破碎, 导致径向收缩, 法向应力退化引起的。Jardine 等^[8]、Carneiro 等^[9]考虑到剪切界面土体体积的变化, 桩土界面剪切特性可以通过恒刚度剪切试验来模拟^[10]。因而, 刘俊伟等^[11]、Airey 等^[12]、Mortara 等^[13]和 Pra 等^[14]利用恒刚度条件下的直剪仪, 研究循环次数和法向刚度对循环和循环后的影响, 从而进一步研究桩的侧摩阻力退化。近年来对桩土界面摩擦疲劳的机理研究大部分研究只是集中于砂土, 而对粉土的摩擦疲劳研究较少。

本论文针对埕岛油田的黄河粉土中的桩基, 研究风暴循环荷载及风暴后桩-粉土界面的摩擦阻力退化特性, 为竖向循环荷载下粉土中桩基的设计提供理论基础。

1 试验理论基础与方案

1.1 桩土相互作用机理

导管架海洋平台在大的风暴荷载作用下产生的倾覆弯矩由桩基的竖向承载力抵抗。循环荷载下桩土界面剪切特性可以通过恒刚度界面剪切试验 (CNS) 进行研究。CNS 试验中, 法向应力会随着法向位移的变化而变化。Lehane 等^[15]提出了恒刚度剪切试验中法向应力和法向位移之间的关系式:

$$\Delta\sigma_n = -k \cdot \Delta u \quad , \quad (1)$$

式中, Δu 为法向位移的变化量, $\Delta\sigma_n$ 为法向应力变化量。图 1 给出了传统恒刚度试验的理论示意图。

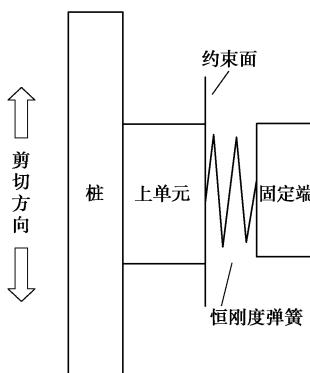


图 1 桩土界面恒刚度剪切试验示意图

Fig. 1 Schematic of constant normal stiffness shear tests on pile-soil interface

通过假定土体变形区域内体积变化是线弹性膨胀的, Johnston 等^[16]提出了土弹簧刚度为

$$k=4G/D \quad , \quad (2)$$

式中, G 为土体剪切模量, D 为桩径。

1.2 粉土基本参数

本文针对埕岛油田的黄河粉土进行研究, 粉土的粒径分布较为均匀 (集中在 0.05~0.075 mm); 具有较高的圆度和孔隙度, 颗粒间咬合作用较差。由于粉

土的渗透性能较差, 粉土孔隙水压力的生成和消散特性不同于砂土, 摩擦疲劳现象有待研究。根据平台所处位置的地质勘察报告中给出 10~20 m 深度范围内为典型的黄河粉土, 试验选用 15 m 处的粉土为研究对象, 其初始内摩擦角 $\varphi=39^\circ$, 土体饱和密度 $\rho=15.79$ kN/m³。为了考虑安装过程的挤土效应, 根据圆孔扩张理论^[17]计算得到现场桩径 $D=1.4$ m, 壁厚 0.038 m 时桩侧的法向应力 σ_v 近似取值为 350 kPa。考虑桩侧土施工过程中的扰动, 采用试验土样为扰动粉土制备的土样。图 2 给出了其粒径分布曲线。

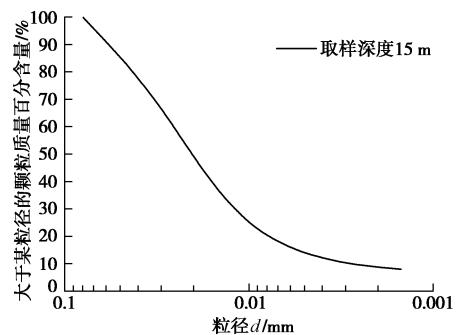


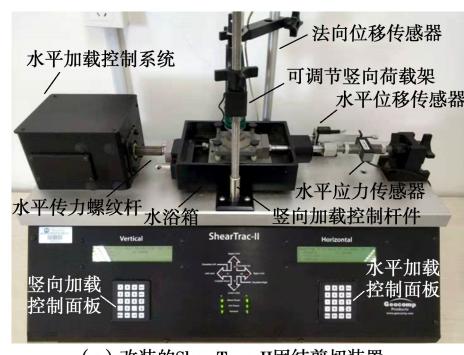
图 2 取样深度为 15 m 的黄河粉土粒径分布曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curve of Yellow River silt at depth of 15 m

1.3 试验装置及方案

试验采用改装的 Geocomp ShearTrac-II 固结剪切设备进行恒刚度条件下的单调剪切和循环剪切试验, 试验设备如图 3 (a) 所示。通过在上剪切盒与荷载架之间增加弹簧模块, 可以控制实现恒刚度边界条件, 如图 3 (b) 所示。剪切盒直径为 63.5 mm, CNS 试验的剪切幅值为 1.2 mm, 循环后单调剪切幅值为 6.5 mm。所有试验皆为位移控制, 其中剪切速率为 6.67 mm/min。试验用钢板为现场钢桩取样, 其表面粗糙度 $R_{CLA} \approx 6 \mu\text{m}$ 的粗糙钢板。

为研究现场桩周土体刚度的影响, 结合公式 (2) 取刚度为 77.5, 154.8 以及 247.7 kPa/mm 的弹簧在 350 kPa 的法向应力下进行恒刚度试验研究。试验研究包括了循环剪切试验和循环后单调剪切试验, 以研究循环退化对其静抗剪强度的影响 (表 1)。



(a) 改装的ShearTrac-II固结剪切装置

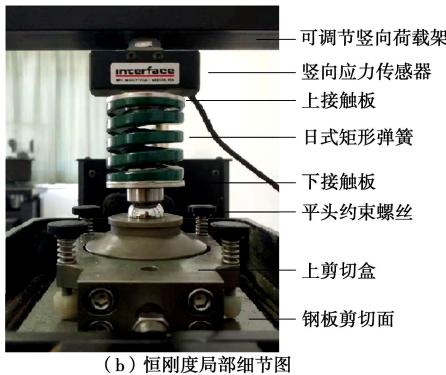


图3 改装的恒刚度 Geocomp ShearTrac-II 剪切试验装置

Fig. 3 Modified Geocomp ShearTrac-II shearing device under constant stiffness conditions

表1 剪切试验类型

Table 1 Specific test content of model shear tests

试验项目	加载 类型及编号	恒刚度 $(\text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1})$
循环剪切	循环 (C)	77.5, 154.8, 247.7
首次单调剪切	单调 (M)	154.8, 247.7
循环后剪切	单调 (PM)	154.8, 247.7
循环后恢复法向 应力剪切	单调 (PMR)	154.8, 247.7

2 试验结果与分析

2.1 不同循环次数的剪切性能

图4给出了粉土在初始法向应力为350 kPa, 法向刚度为154.8 kPa/mm条件下, 法向应力、剪应力和应力比随循环次数变化的关系曲线。从图4(a)与图4(b)中可见, 粉土的法向应力和剪应力随循环次数的增加不断衰减, 衰减较大的阶段出现在前10次循环内, 50次循环后降为115 kPa; 剪应力则在首次循环内抗剪强度达到峰值, 之后由380 kPa逐渐降低, 其中在10次循环内出现了较大幅度的衰减, 摩擦疲劳现象较为显著。图4同时也给出了相同位置处砂土的循环剪切试验结果, 从图中可以看出, 砂土的法向应力和剪应力衰减快于粉土, 这可能是循环剪切过程中的砂土颗粒破碎程度较大引起法向应力显著降低。

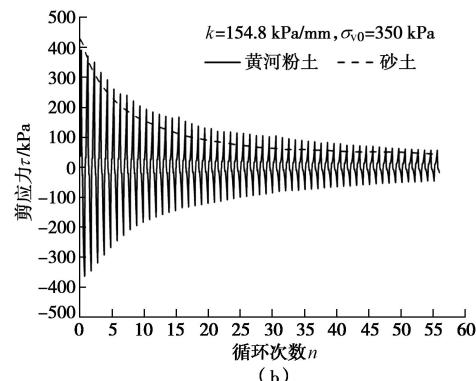
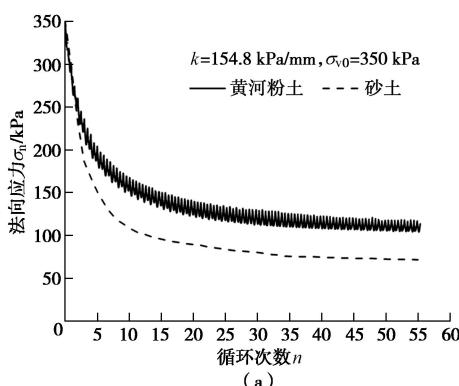
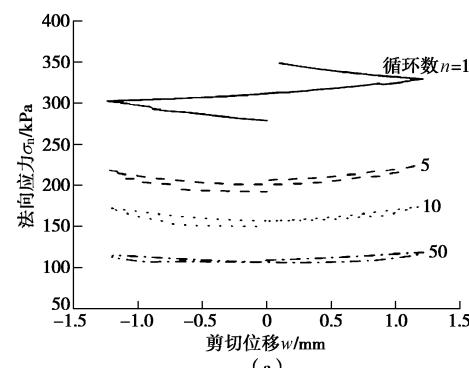
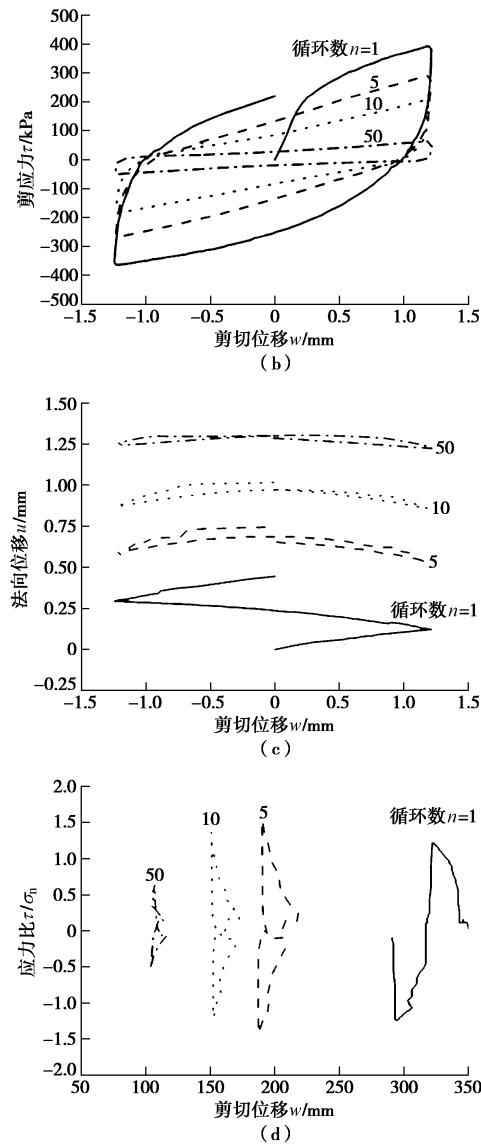


图4 法向应力、剪应力随循环次数的变化规律 ($\sigma_{v0}=350 \text{ kPa}$, $k=154.8 \text{ kPa/mm}$)

Fig. 4 Variation of normal stress and shear stress with cycles ($\sigma_{v0}=350 \text{ kPa}$, $k=154.8 \text{ kPa/mm}$)

图5给出了初始法向应力 $\sigma_{v0}=350 \text{ kPa}$ 下法向刚度 $k=154.8 \text{ kPa/mm}$ 时不同循环数时粉土界面的循环剪切特性。从图5(a)可知当循环数 $n=1$ 时, 法向应力由350 kPa下降为277 kPa, 循环数 $n=50$ 时, 法向应力的退化量则很小, 基本维持在115 kPa, 法向应力的衰减主要发生在前5个循环内, 且这种衰减与图5(c)所示的土体体积变化规律一致。图5(b)中, 单次循环内, 剪应力与循环剪切位移的变化关系曲线形成滞回圈, $n=1$ 时, 滞回圈面积最大, 耗散能量多; 随着循环数的增长, 滞回圈的面积不断减小, 剪应力退化幅值逐渐降低, 当 $n=50$ 时, 滞回圈面积最小且最大剪应力为首次循环内的1/6左右。土体随着剪切过程产生的压缩变形如图5(c)所示, 本文规定土体剪缩为正。由图5(c)可见, 单次循环内土体表现出剪缩—剪胀—剪缩交替出现的现象, 总体呈剪缩的变化规律。随着循环次数的增加, 单次循环内的土体剪缩量不断减小且趋于稳定值。图5(d)中, 给出了无量纲的应力比随法向应力的变化关系。可以看出, 首次循环内, 法向应力降低值较大, 随循环次数增大, 应力比出现了增大—减小—再增大的变化趋势。



图 5 不同循环数时粉土界面的循环剪切特性($\sigma_{v0}=350$ kPa) $k=154.8$ kPa/mm)Fig. 5 Cyclic shear behavior in different cycles ($\sigma_{v0}=350$ kPa,
 $k=154.8$ kPa/mm)

2.2 不同法向刚度的循环剪切性能

图 6 给出了不同刚度条件下粉土-钢板界面 CNS 试验结果。图 6 (a) 中给出了 3 种法向刚度对土体法向应力随累积位移退化特性的影响。累积位移为 255 mm 时, $k=77.5$ kPa/mm 时, 法向应力循环退化为初始值的 71.4% 左右; $k=247.7$ kPa 时, 法向应力的下降幅度最大, 为初始法向应力的 20.5%。说明恒刚度条件下时, 法向应力的退化速率随法向刚度的增大而增大。从图 6 (b) 中可以看出, 刚度越大初始循环内的最大剪应力越小, 且剪应力的退化速率随法向刚度的增大而增大, 趋于稳定累积位移越小, 法向刚度越大, 摩擦疲劳越显著。Poulos^[18]将这种剪应力随循环进行而不断退化的过程归结为由于土体剪缩导致的法向有效应力的降低, 最终导致剪应力的衰减。图 6 (c) 给出

了循环过程中, 土体体积变化与累积位移之间的关系。从图中可以看出, 试验结束时 3 种法向刚度对应的压缩量分别为 1.38, 1.25, 1.15 mm, 且随法向刚度的增大, 土体压缩量增大的速率越快, 从而导致图 6 (a), (c) 中的法向应力和剪应力快速衰减。这与 Fakharian 等^[19]恒刚度砂土界面剪切试验结果较为一致。

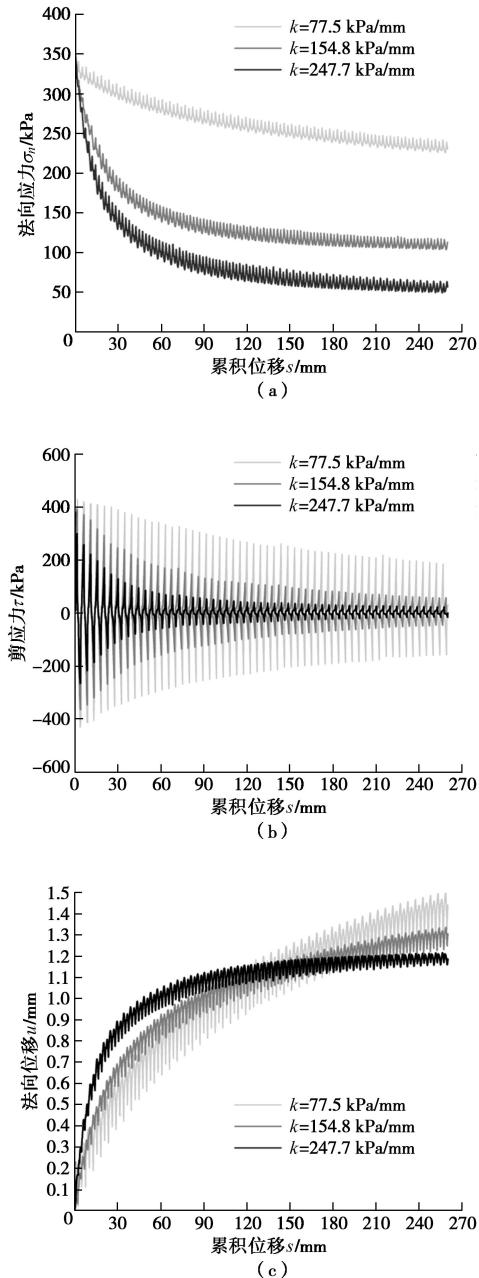


图 6 法向刚度对土体法向应力、剪应力和法向位移特性的影响

Fig. 6 Effects of normal stiffness on soil degradation characteristics
of normal stress, shear stress and normal displacement

2.3 循环后的单调剪切试验分析

为了考虑循环剪切过程对粉土循环后单调剪切性能的影响, 设计了单调剪切 (M) 试验, 循环后的单调剪切 (PM) 试验以及恢复初始法向应力的循环后单调剪切 (PMR) 试验, 试验结果如图 7 所示。循环

后的 PM 试验峰值剪应力远小于 M 试验; 循环后法向应力恢复的 PMR 剪切强度较之 M 试验略有下降。从图 7(a)可以看出, PM 呈现剪胀性能, 这是由于循环剪切过程中土样变得密实, 且在较小的法向应力作用下, 竖向约束小, 因而剪胀效果较大; 而 M、PMR 试验与 PM 相比, 由于法向应力较大, 竖向约束大, 初始出现剪缩, 当剪切位移超过 1 mm 后也出现剪胀性能, 且刚度越大对土体的约束作用越强, 剪胀效果越小。从图 7(b)可以看出, PM 试验的应力比远小于 M 试验值, 表明循环剪切对循环后剪切强度影响显著, 循环剪切过程中土样压缩变得密实, 见图 7(c)所示。从图 7(b)还可以看出, 相同法向应力下, PMR 的剪切应力比小于 M 试验值。其原因可能是循环过程中的界面处颗粒棱角破碎, 颗粒变得光滑, 从而导致的较低的剪应力和剪胀程度, 如图 7(a)所示。这与 Alshibli 等^[20]和 Alsaled 等^[21]研究发现颗粒棱角角度降低导致的内摩擦角降低结论一致。

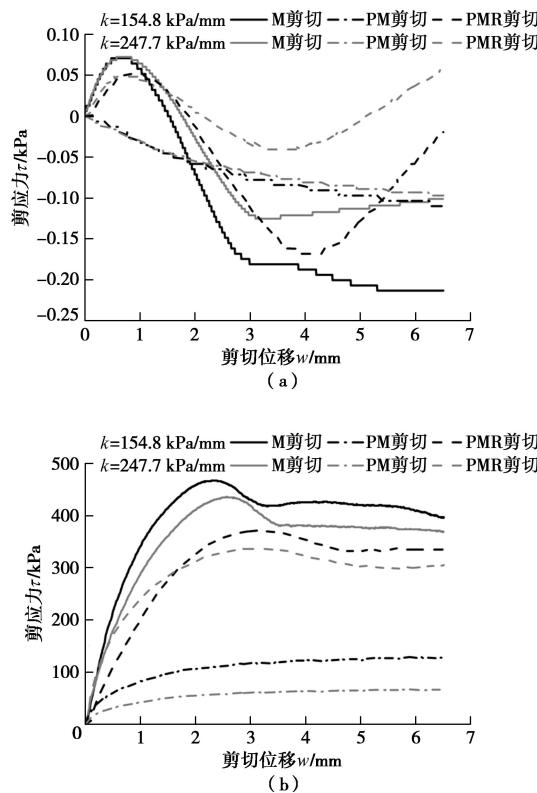


图 7 法向刚度对循环后单调剪切性能的影响

Fig. 7 Effects of normal stiffness on post-cyclic monotonic shear performance

3 粉土界面摩擦疲劳分析

API 规范^[22]中给出砂土中桩基侧摩阻力 τ_s 为

$$\tau_s = \sigma'_n \tan \delta = K \sigma_{v0} \tan \delta , \quad (3)$$

式中, σ'_n 为作用在桩身的法向有效应力, σ_{v0} 为原位有效应力, $K = \sigma'_n / \sigma_{v0}$ 为水平压力系数, δ 为桩土界

面摩擦角。很多文献针对桩基摩擦疲劳机理进行了研究^[1-5], 发现砂土桩身水平应力随桩端通过高度 h 增加逐渐衰减, 给出给定深度处的侧摩阻力的随无量纲位移 h/D 的退化规律, 如图 8 所示。

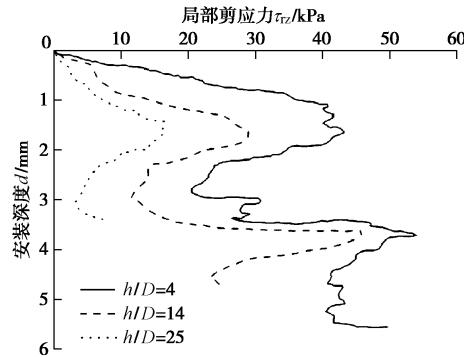


图 8 桩基安装过程中的摩擦疲劳现象

Fig. 8 Friction fatigue phenomena in pile foundation installation

Randolph 等^[23]总结了上述试验研究, 提出了一个指数衰减公式来描述摩擦疲劳现象:

$$\beta = \tau_s / \sigma'_n = \beta_{\min} + (\beta_{\max} - \beta_{\min}) e^{-\mu h/D} , \quad (4)$$

式中, μ 为退化系数, h 为桩端以上高度。本文以此基础, 定义与累积位移、法向刚度和初始应力相关的无量纲累积位移参数 $s/(\sigma_{v0}/k)$, 对试验数据拟合, 如图 9 所示, 建立了界面摩擦角和法向应力随累积位移的衰减方程:

$$\delta = \delta_{\min} + (\delta_{\max} - \delta_{\min}) e^{-\mu_1 s/(\sigma_{v0}/k)} , \quad (5)$$

$$K = K_{\min} + (1 - K_{\min}) e^{-\mu_2 s/(\sigma_{v0}/k)} , \quad (6)$$

式中, μ_1 , μ_2 分别为界面摩擦角和法向应力的衰减系数, δ_{\min} 为稳定状态界面摩擦角, K_{\min} 为稳定状态最小水平压力系数。

表 2 给出了拟合方程及拟合得到的相应参数。拟合的数据见表 2 和图 9 的曲线所示, 其中拟合得到界面摩擦角、法向应力衰减系数 $\mu_1=0.015$, $\mu_2=0.07$ 与刚度无关, 表明无量纲累积位移能合理反映累积位移和刚度的综合影响。从表 2 和图 9 中可以看出, 刚度越大, 循环剪切过程中的稳定状态界面摩擦角 δ_{\min} 越小, 稳定状态最小水平压力系数 K_{\min} 越小。将式(5)、(6)代入式(3)就得到循环剪切过程中剪应力随累积位移 $s/(\sigma_{v0}/k)$ 的实时变化, 结合 API 规范^[22]中的设计方法可以计算桩基在循环剪切作用下的桩侧摩阻力的退化特性。

表 2 拟合曲线求得参数

Table 2 Parameter of fitting curves

参数	刚度/(kPa·mm ⁻¹)		
	77.5	154.8	247.7
δ_{\min}	41.3	25.5	15.3
δ_{\max}	58.2	57.4	57.5
K_{\min}	0.67	0.31	0.17

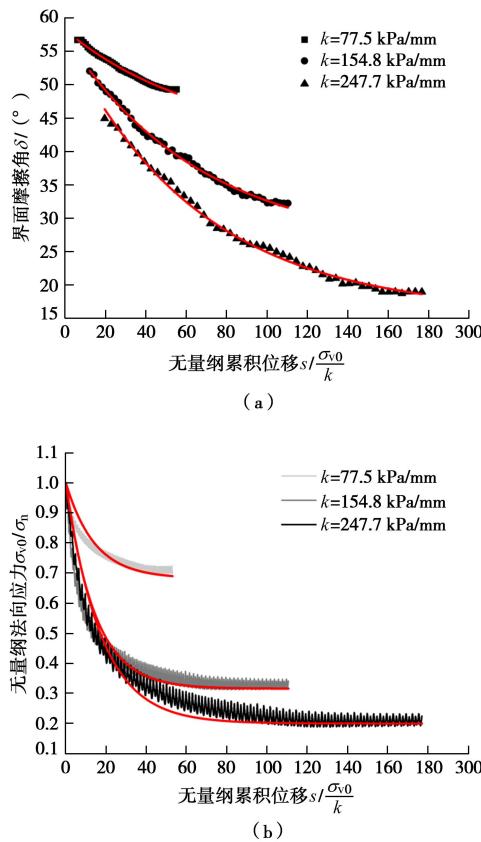


图 9 界面摩擦角和法向应力随无量纲累积位移变化

Fig. 9 Variation of interface friction angle and normal stress with dimensionless cumulative displacement

4 结 论

本文针对埕岛油田的黄河粉土进行了恒刚度条件下钢-粉土界面循环剪切试验和循环后剪切试验研究。主要得到以下 4 点结论。

(1) 循环荷载作用下, 粉土界面的法向应力、剪应力随循环数增加而降低, 土体表现出剪缩—剪胀—剪缩交替性能, 总体呈剪缩趋势。并且, 界面法向应力和剪应力随法向刚度增大衰减速率增大, 达到稳定的累积循环位移减小。

(2) 粉土循环后的单调剪切的应力比远小于初次单调剪切试验值, 表明循环剪切对循环后剪切强度影响显著; 法向应力恢复的单调剪切试验剪胀程度和剪应力比小于首次单调剪切试验值, 表明循环剪切导致界面处粉土颗粒棱角破碎, 颗粒变得光滑。

(3) 提出了与累积位移、法向刚度和初始应力相关的无量纲累积位移 $s/(\sigma_{v0}/k)$, 建立了界面摩擦角随无量纲累积位移的衰减方程。

(4) 建立了桩土界面法向应力随累积位移的衰减方程, 其中稳定状态最小水平压力系数 K_{min} 随刚度增大而减小。

参考文献:

- [1] LEHANE B, JARDINE R J. The behavior of a displacement pile in Bothkennar clay[C]// Predictive Soil Mechanics. London, 1993.
- [2] LEHANE B M. Experimental investigations of pile behaviour using instrumented field piles[D]. London: The University of London, 1992.
- [3] WHITE D J, LEHANE B M. Friction fatigue on displacement piles in sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(10): 645 – 658.
- [4] WHITE D J, BOLTON M D. Comparing CPT and pile base resistance in sand[J]. Geotechnical Engineering, 2005, 158(1): 3 – 14.
- [5] JARDINE R J, LEHANE B M, BOND A J, et al. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 119(1): 19 – 35.
- [6] 俞峰, 谭国焕, 杨峻, 等. 粗粒土中预制桩的静压施工残余应力[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1526 – 1536. (YU Feng, THAM L G, YANG Jun, et al. Post-installation residual stress in performed piles jacked into granular soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1526 – 1536. (in Chinese))
- [7] HEEREMA E P. Predicting pile drive ability: heather as an illustration of the friction fatigue theory[J]. Ground Engineering, 1980, 13(2): 15 – 37.
- [8] JARDINE R J, CHOW F C, MATSUMOTO T, et al. A new design procedure for driven piles and its application to two Japanese clays[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2008, 38(1): 207 – 219.
- [9] CARNEIRO D, WHITE D J, DANZIGER F A B, et al. A novel approach for time-dependent axial soil resistance in the analysis of subsea pipelines[J]. Computers & Geotechnics, 2015, 69(10): 641 – 651.
- [10] BOULON M, FORAY P. Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand[C]// Numerical Method in Offshore Piling. Nantes, 1986.
- [11] 刘俊伟, 张忠苗, 俞峰, 等. 基于恒刚度剪切试验的预制桩侧阻退化估计[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 725 – 729. (LIU Jun-wei, ZHANG Zhong-miao, YU Feng, et al. Estimation of friction fatigue for preformed piles based on constant normal stiffness shear test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 725 – 729. (in Chinese))
- [12] AIREY D W, AL DOURI, Poulos H G. Estimation of pile

- friction degradation from shearbox tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, **15**(4): 388 – 392.
- [13] MORTARA G, MANGIOLA A, Ghionna V N. Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behavior from sand-steel interface direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(7): 739 – 752
- [14] PRA AI S, BOULON M. Soil–structure cyclic direct shear tests: a new interpretation of the direct shear experiment and its application to a series of cyclic tests[J]. Acta Geotechnica, 2017, **12**(1): 107 – 127.
- [15] LEHANE B M, WHITE D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(4): 1039 – 1052.
- [16] JOHNSTON I W, LAM T S K, WILLIAMS A F. Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock[J]. Géotechnique, 1987, **37**(1): 83 – 89.
- [17] 贾尚华, 赵春风, 赵 程. 砂土中柱孔扩张问题的扩孔压力与扩孔半径分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 182 – 188. (JIA Shang-hua, ZHAO Chun-feng, ZHAO Cheng. Analysis of expanded radius and internal expanding pressure of cylindrical hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics
- and Engineering, 2015, **34**(1): 182 – 188. (in Chinese))
- [18] POULOS H G. Pile behavior-theory and application[J]. Géotechnique, 1989, **39**(3): 365 – 415
- [19] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(12): 1096 – 1105.
- [20] ALSHIBLI K A, ALSALEH M I. Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, **18**(1): 36 – 45.
- [21] ALSALEH M I, ALSHIBLI K A, VOYIADJIS G Z. Influence of micromaterial heterogeneity on strain localization in granular materials[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, **6**(4): 248 – 259.
- [22] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms (API RP2A)[M]. 22nd ed. Washington D C: Official Press of US, 2014.
- [23] RANDOLPH M F, DOLWIN R, BECK R. Design of driven piles in sand[J]. Géotechnique, 1994, **44**(3): 427 – 448.

标准摘录：信息与文献 参考文献著录规则（GB/T 7714—2015） 文献类型和载体的标识代码

表1 文献类型和标识代码

参考文献类型	文献类型标识代码
普通图书	M
会议录	C
汇编	G
报纸	N
期刊	J
学位论文	D
报告	R
标准	S
专利	P
数据库	DB
计算机程序	CP
电子公告	EB
档案	A
舆图	CM
数据集	DS
其他	Z

表2 电子资源载体和标识代码

电子资源的载体类型	载体类型标识代码
磁带 (magnetic tape)	MT
磁盘 (disk)	DK
光盘 (CD-ROM)	CD
联机网络 (online)	OL