

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201909017

不同剪切速率下吸力基础-黏土界面剪切特性研究*

李大勇^{1,2}, 张雨坤¹, 高玉峰³, 房兆晓¹

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 3. 河海大学土木交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用GDS界面剪切仪, 开展不同剪切速率下吸力基础-黏土界面剪切试验, 研究了沉贯过程中基础沉贯速率对吸力基础-黏土界面剪切特性的影响, 分析了不同剪切速率、不同沉贯深度下的界面剪切特性。试验结果表明, 吸力基础-黏土界面的抗剪强度随着法向应力的增加而增大, 但随着剪切速率的增加而减小; 界面峰值强度对应的剪切位移均在1 mm以内, 且随着法向应力的增加而增大; 界面凝聚力与剪切速率呈正相关, 界面摩擦角则相反。在沉贯速率1.0~1.2 cm/min范围内, 界面凝聚力增加幅度最大。摩擦系数在0.27~0.34变化, 且随着沉贯速率的减小而增大, 随沉贯深度的增加呈现减小趋势。

关键词: 剪切速率; 吸力基础; 黏土; 界面剪切; 抗剪强度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0231-06

Shear Behavior of Suction Foundation-Clay Interface under Different Shear Rates

LI Dayong^{1,2}, ZHANG Yukun¹, GAO Yufeng³, FANG Zhaoxiao¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Shear tests of suction foundation-clay interface at different shear rates were carried out by using a GDS interface shear tester to explore the installation process. This study is focused on the effect of foundation penetration rate on shear characteristics of suction foundation-clay interface during the penetration process, and the shear characteristics of interface at different shear rates and penetration depths. Test results show that the shear strength of the suction foundation-clay interface increases with the increase in normal stress, but decreases with the increase in shear rate. Moreover, the shear displacement corresponding to the peak strength of the interface is within 1mm and increases with the increase in the normal stress. The interface cohesion increases with the increase in shear rate, while the interface friction angle is opposite. Furthermore, in the shear rate range of 1.0-1.2 cm/min, the increase in interface cohesion becomes the largest. The friction coefficient varies from 0.27 to 0.34, and

* 收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51890910)、山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2015TDJH104)资助

作者简介: 李大勇(1971—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事海洋岩土工程方面的研究。E-mail: ldy@upc.edu.cn

通讯作者: 张雨坤(1987—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事海洋岩土力学方面的研究。E-mail: phic007@163.com

increases with the decrease in shear rate and decreases with the increase in penetration depth.

Keywords: shear rate; bucket foundation; clay; interface shear; shear strength

引言

吸力基础目前广泛应用于海上风电、海上采油平台等海洋工程的基础。其沉贯过程分为两部分,首先依靠自重作用下沉至海床一定位置,内部形成封闭水体,然后通过基础顶部抽水孔,将内部水体抽出,使基础内外形成压差(即吸力),基础在吸力的持续作用下沉贯至预定位置^[1]。沉贯过程中,基础侧壁与土体之间的摩阻力是基础沉贯阻力的主要组成部分,其量值受土体性质、沉贯速率、沉贯深度的影响。因此研究桶-土之间的界面剪切特性,对明确吸力基础侧摩阻力分布以及沉贯吸力值的确定具有重要意义。

国内外学者对海洋工程基础与土体的相互作用进行了很多研究。郭聚坤等^[2]将室内直剪仪进行改进,用钢板和混凝土板代替上部剪切盒,研究了不同含水率、不同固结时间下海洋黏土与钢桩、混凝土桩界面的相互作用,指出含水率是影响界面黏聚力和摩擦角的因素,二者均随着含水率的增加而减小,而固结时间对界面摩擦角的影响较小,不同固结时间条件下,摩擦角的变化范围为 $20^{\circ}\sim 23^{\circ}$ 。王永洪等^[3]采用横刚度直剪仪,对不同含水率下的黏土与混凝土界面进行剪切试验,得出界面抗剪强度随含水率的增大而减小的结论。闫澎旺等^[4]通过大型直剪仪,分别研究了细砂、中砂、粗砂、软黏土与钢桩的剪切特性,并提出“抗剪糙度”的概念。孔令伟等^[5]、王永洪等^[6]分别对钢管桩、混凝土桩在剪切速率影响下的桩-黏土界面力学特性进行了探讨。赵刚等^[7]探究了桩土界面抗剪强度和温度循环的关系以及桩与土体界面摩擦系数随温度变化的规律,认为界面抗剪强度与温度循环次数呈负相关,但界面摩擦系数随温度循环次数的增加基本不变。M.Samanta等^[8]通过剪切试验,探究了不同粗糙度、不同粒径下砂土和钢、混凝土界面剪切特性的变化,认为砂-钢、砂-混凝土界面的摩擦系数均随着法向应力的增加而减小,且摩擦系数的变化范围为 $0.33\sim 0.83$ 。A.Taha等^[9]采用剪切试验,从钢的粗糙度、黏土的固结比、黏土的干密度、黏土的含盐量4个方面探究了加拿大地区的海洋黏土与钢的界面力学特性。R.Ishikura等^[10]通过环剪试验探究了高岭土与混凝土的界面剪切特

性,建立了粗糙度与黏土粒径之间的联系。

目前研究中多探讨含水率、固结时间、粗糙度等因素对海洋工程基础与土体界面力学特性的影响,但对不同剪切速率下海洋工程与土体界面力学特性变化规律的研究较少。为了深入研究实际工程中海洋平台吸力基础的沉贯速率对吸力基础-土体界面剪切特性的影响,本文以胜利油田埕北井组采油平台吸力基础^[11]的沉贯过程为例,研究不同沉贯速率下吸力基础沉贯过程中基础-土体之间的相互作用,分析随沉贯深度的增加摩擦系数的变化。

1 试验土样及试验方案

1.1 试验仪器

试验仪器为GDS界面剪切仪(图1),该仪器能够进行结构与土体的界面剪切试验。试验过程中,施加的法向应力由压力杆传递到试样,最大为5 kN。剪切过程中,压力杆(图2)固定不动,剪切面积恒定,可以避免直剪试验中由于上下剪切盒错动造成的接触面面积减小的情况。通过控制底部步进电机的扭转,来控制结构与土体的剪切。试样外部配置压力室,可以使试样依次进行反压饱和试验、固结试验和剪切试验。



图1 GDS界面剪切试验仪
Fig.1 GDS interface shear apparatus



图2 轴向压力杆
Fig.2 Axial pressure bar

1.2 试验土样

试验所用黏土取自黄岛沿海地区,呈灰黑色,

通过室内试验测得黏土的物理力学性质见表1。将土样烘干、碾碎,过0.1 mm孔径筛,取其中细粒部分作为本次试验用土。参照《土工试验方法标准》^[12],制取干密度为1.67 g/cm³的土样(图3),采用真空饱和和法使试样完全饱和。

表1 黏土的物理力学性质

Table 1 Physical properties of clay

土样名称	含水率/%	孔隙比	液限	塑限	比重
淤泥质软黏土	47.95	1.13	37.2	17.1	2.72



图3 土样

Fig.3 Soil sample

1.3 工程背景与试验方案

胜利油田埕北井组吸力基础实际高度4.4 m,依据朗肯土压力理论算出海床以下1、2、3、4、5 m处的土体所受竖向压力作为固结压力,桶体所受侧向土压力作为剪切时法向应力,具体设置见表2。结合该工程吸力基础沉贯速率以及天津港北大防波堤工程^[13]吸力基础的沉贯速率,设置试验剪切速率为0.1、0.5、1.0、1.2 cm/min。

表2 固结、剪切时法向应力设置

Table 2 Setting of the normal stress during consolidation and shearing

深度/m	固结阶段/kPa	剪切阶段/kPa
1	115	90
2	142	110
3	168	130
4	194	150
5	220	170

2 试验结果与分析

2.1 不同剪切速率下的剪应力-剪切位移曲线

吸力基础与黏土界面剪应力-剪切位移关系曲线如图4所示。可知0.5~1.2 cm/min时,在较短的剪切位移内,剪应力迅速达到峰值强度,随着剪

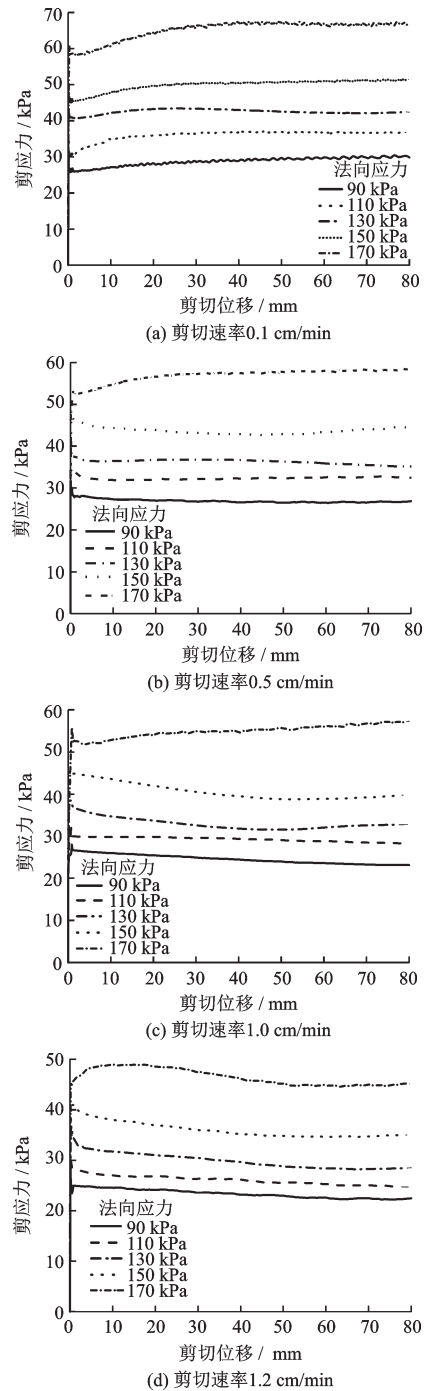


图4 不同剪切速率下基础-黏土的剪应力-剪切位移关系
Fig.4 Shear stress-shear displacement relationship at the foundation and clay interface under different shear rates

切位移的增加,剪应力逐渐减小,之后趋于稳定,出现应变软化现象;剪切速率为0.1 cm/min时,剪应力在达到峰值强度后缓慢增加,最后趋于稳定。这是因为,当剪切速率过小时,剪切时间较长,土颗粒间进行了重新排列,土样产生了充分的固结,导致剪阻力增大。

相同剪切速率下,剪应力峰值强度、峰值对应的剪切位移均随着法向应力的增加而增大,且峰值对应的剪切位移均在1 mm以内。法向应力由90 kPa增加至170 kPa时,各剪切速率下的峰值强度分别提高了17.06%、19.11%、14.33%和14.06%。这是由于,随着法向应力增加,界面附近土体被压实,土颗粒间摩擦阻力增大,界面抗剪强度提高。

2.2 界面抗剪强度指标变化规律

将试验数据进行线性拟合,得到不同剪切速率下抗剪强度与法向应力的关系,以及界面抗剪强度指标,分别如图5和表3所示。可以看出峰值抗剪强度与法向应力的关系符合摩尔-库伦强度准则。由图5可知,随着法向应力的增加,界面抗剪强度增大,当剪切速率为0.1 cm/min时,抗剪强度的增大率大于剪切速率为0.5~1.2 cm/min时的抗剪强度增大率,这说明剪切速率较小时,法向应力对界面抗剪强度的影响较大。

同一法向应力下,随着剪切速率的增加,界面抗剪强度减小。当法向应力为170 kPa时,界面抗剪强度相较其他法向应力时随剪切速率的变化幅度最大;相邻剪切速率间,抗剪强度分别减少了2.36%、6.41%、9.25%,这说明剪切速率的变化对界面抗剪强度的影响较小,而法向应力才是影响抗剪强度变化的主要因素。

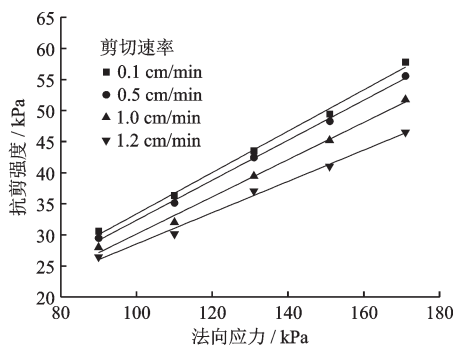


图5 界面抗剪强度与法向应力关系

Fig.5 Relationship between shear strength of the interface and normal stress

由表3可知,随着剪切速率的增加,界面凝聚力逐渐增大,界面摩擦角逐渐减小。剪切速率由1.0 cm/min增加到1.2 cm/min时,剪应力达到峰值抗剪强度的界面黏聚力增长幅度最大,为220%。剪应力达到峰值抗剪强度时的界面摩擦角在14°~19°变化,变化幅度较小,说明剪切速率的变化对界面摩擦角影响不大,对界面黏聚力的影响较大,其中较大的剪切速率对剪应力达到峰值抗剪强度时的界面黏聚力影响更显著。

表3 不同剪切速率下基础-黏土界面抗剪强度指标
Table 3 Shear strength parameters of the interface between the foundation and clay at different shear rates

剪切速率/(cm·min ⁻¹)	界面黏聚力/kPa	界面摩擦角/(°)
0.1	0.11	18.40
0.5	0.38	17.85
1.0	1.05	16.65
1.2	3.36	14.13

2.3 摩擦系数变化规律

结合表2中法向应力与切入海床深度的对应关系,得出摩擦系数与深度和剪切速率的关系曲线,如图6、图7所示。可以看出,随着吸力基础沉贯深度的增加,桶-土之间摩擦系数总体呈现减小趋势。同一深度时,摩擦系数随着剪切速率的减小而增大,这与峰值强度的变化规律一致。深度为1、2、3、4、5 m时,相邻剪切速率间的最大变化率分别为5.6%、8.9%、7.1%、9.2%和11.09%,且最大变化率出现在剪切速率0.21~1.2 cm/min。说明剪切速率较大时,对摩擦系数的影响较大。这是因为剪切速率小时,钢板能与黏土颗粒进行充分的接触,黏土颗粒的运动形式为滚动,而剪切速率大时,黏土颗

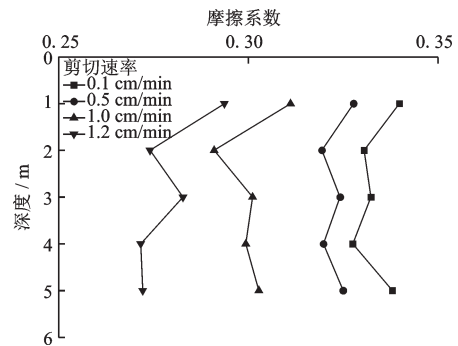


图6 摩擦系数与深度的关系曲线

Fig.6 Curves of friction coefficient versus embedded depth

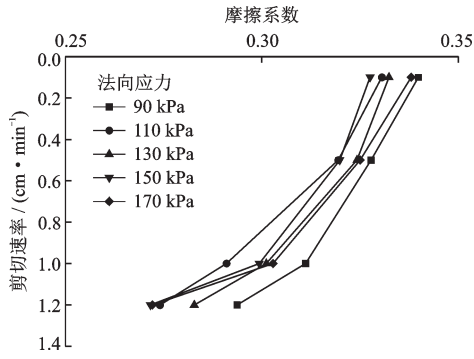


图7 摩擦系数与剪切速率的关系曲线

Fig.7 Curves of friction coefficient versus shear rate

粒的运动形式为滑动,无法与钢板充分接触,导致剪切速率大时,摩擦系数小。

2.4 剪切前后含水率变化规律

剪切前统一控制含水率为26%,剪切后测量土样含水率,得到含水率、含水率变化量与法向应力的关系曲线,如图8、图9所示。可以看出,剪切前后含水率的变化量随法向应力的增加呈增加趋势,这是因为随着法向应力的增加,土体固结过程中被压实,孔隙水排出,导致土样整体含水率降低。从图

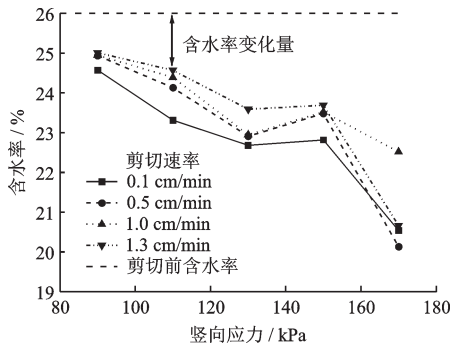


图8 含水率与法向压力的关系曲线

Fig.8 Curves of water content versus normal pressure

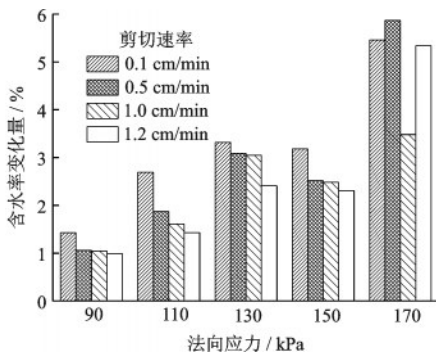


图9 含水率变化量与法向压力的关系

Fig.9 Relationship between variation of water content and normal pressure

中还可看出,随着剪切速率的增加,含水率的变化量呈降低趋势,这说明剪切速率增大时,孔隙水来不及排出,导致剪切前后含水率变化较小。

3 结论

(1)吸力基础与黏土界面的抗剪强度受到剪切速率影响。在剪切速率为0.1 cm/min时,剪应力达到峰值后缓慢增加,最后达到稳定值;在剪切速率0.5~1.2 cm/min内,剪应力-剪切位移关系曲线呈应变软化趋势。

(2)剪切速率相同时,界面抗剪强度随着法向应力的增加而增大。同一法向应力下,界面抗剪强度随着剪切速率的增加而减小。相邻剪切速率间,抗剪强度的最大变化幅度为9.25%。界面抗剪强度受到剪切速率和法向应力影响,但法向应力对其影响更大。

(3)界面凝聚力随着剪切速率的增加逐渐增大,界面摩擦角随着剪切速率的增加逐渐减小,摩擦角的变化范围为14°~19°。剪切速率对界面凝聚力的影响更显著,且在剪切速率1.0~1.2 cm/min内,界面凝聚力更容易受到剪切速率影响。摩擦系数随着沉贯深度的增加整体有减小趋势,但随着剪切速率的减小而增大。

参考文献:

[1] 李大勇,冯凌云,郭彦雪,等.裙式吸力基础水平承载数值分析[J].岩土工程学报,2013,35(增1):33-38.
Li D Y, Feng L Y, Guo Y X, et al. Numerical analysis of lateral bearing behaviors of skirted suction caissons [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup1): 33-38. (in Chinese)

[2] 郭聚坤,寇海磊,许泓霖,等.桩-海洋黏土界面剪切性状试验研究[J].长江科学院院报,2019,36(4):104-108,117.
Guo J K, Kou H L, Xu H L, et al. Study on interface shear behavior between pile and marine clay [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(4): 104-108, 117. (in Chinese)

[3] 王永洪,张明义,白晓宇,等.不同含水率状态下黏土-混凝土界面剪切特性室内试验研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):118-123.
Wang Y H, Zhang M Y, Bai X Y, et al. Laboratory ex-

- perimental study on shear behavior of clayey soil-concrete interface under different moisture conditions [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(1): 118-123. (in Chinese)
- [4] 闫澍旺,林澍,贾沼霖,等.海洋土与钢桩界面剪切强度的大型直剪试验研究[J].*岩土工程学报*,2018,40(3):495-501.
Yan S W, Lin S, Jia Z L, et al. Large-scale direct shear tests on shear strength of interface between marine soil and steel piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(3): 495-501. (in Chinese)
- [5] 孔令伟,熊春发,郭爱国,等.海积软黏土的强度特性与桩土界面剪切速率效应[J].*岩土工程学报*,2017,39(增2):13-16.
Kong L W, Xiong C F, Guo A G, et al. Effects of shear rate on strength properties and pile-soil interface of marine soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(Sup2): 13-16. (in Chinese)
- [6] 王永洪,张明义,白晓宇,等.剪切速率对黏性土混凝土界面抗剪强度影响的试验研究[J].*土木与环境工程学报(中英文)*,2019,41(1):48-54.
Wang Y H, Zhang M Y, Bai X Y, et al. Experimental research on effect of shear rate on shear strength of clayey soil-concrete interface[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 48-54. (in Chinese)
- [7] 赵刚,李驰,斯日古楞.温度循环下桩土界面特性及桩侧摩阻力数值模拟[J].*防灾减灾工程学报*,2017,37(4):546-550,564.
Zhao G, Li C, Si R G L. Friction characteristics of pile-soil interface under temperature cycles and numerical simulation of shaft resistance [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(4): 546-550,564. (in Chinese)
- [8] Samanta M, Punetha P, Sharma M. Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2018, 14(4): 387-398.
- [9] Taha A, Fall M. Shear behavior of sensitive marine clay-steel interfaces [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(6): 969-980.
- [10] Ishikura R, Aritma W, Yasufuku N. Interface friction between soft clay and construction material considering the correlation between surface roughness and soil particle size [J]. *New Advances in Geotechnical Engineering*, 2018:99-104.
- [11] 朱儒弟.我国首座可移动吸力基础采油平台在胜利油田海域安装成功[J].*海岸工程*,1999(4):28.
Zhu R D. China's first movable barrel foundation oil production platform successfully installed in Shengli oilfield sea area [J]. *Coastal Engineering*, 1999(4): 28. (in Chinese)
- [12] 土工试验标准方法:GB/T50123—1999[S].北京:中国计划出版社,1999.
Standard for soil test method: GB/T50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 袁中立,秦延龙,唐海燕.浅海吸力基础平台[M].北京:石油工业出版社,2010:184.
Yuan Z L, Qin Y L, Tang H Y. Shallow sea suction foundation platform [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 184. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)