

桩靴在黏土中不连续加载穿刺现象的实验研究

黎之奇[†], 徐文祥

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为解决自升式平台在南海等软黏土区域作业时出现的穿刺问题,对平台桩靴在黏土中加载时出现的穿刺现象进行实验验证,并对穿刺机理和解决方案进行探索.以某大桩靴自升式平台的实际加载过程为原型,设计一套不连续加载的单桩模型插桩实验装置,通过力加载的方式模拟自升式平台预压载过程,分析插桩时的冲桩处理对穿刺风险的消除效果.研究表明:黏土层中不连续加载能够形成穿刺现象,并且减小加载速率在一定程度上可以降低穿刺风险;通过在加载过程中进行冲桩作业,能有效减少穿刺的发生.因此在实际工程中可通过选择合适的加载速率,并在加载过程中进行冲桩操作来降低穿刺风险,保证作业安全.

关键词:海洋平台;黏土;桩靴;穿刺;冲桩

中图分类号:TU411

文献标志码:A

Experimental Study on Punch-through Phenomenon of Spud-can in Clay under Discontinuous Loading

LI Zhiqi[†], XU Wenxiang

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to solve the punch-through problem of the Jack-up platform in the soft clay area such as the South China Sea, the punch-through phenomenon of the Jack-up platform when penetrating in clay was verified by experiment, and the mechanism and solution for the punch-through were explored. In this paper, an experimental set for single leg penetration test under discontinuous loading was designed to simulate the preloading process of a real Jack-up platform with large spud-can, and a series experiments were performed to investigate the effect of the water jetting process for eliminating the risk of punch-through. The results show that the punch-through can occur in the clay layer under discontinuous loading, and the risk of the punch-through can be mitigated by reducing the loading rate or performing water jetting process. Thus, the present investigation is beneficial for safety operation of the jack-up platform in practice.

Key words: marine platform; clay; spud-can; punch-through; water jetting

* 收稿日期:2018-10-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0303700), National Key Research and Development Plan of China (2016YFC0303700)

作者简介:黎之奇(1963—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: zqlee@hnu.edu.cn

自升式海上石油钻井平台因其定位能力强、作业灵活、可移动性能好、价格低廉等特点,在近海油气勘探开发中发挥着重要作用.据统计,全球自升式钻井平台约占移动式钻井装置总数的二分之一,为石油勘探开发做出了巨大贡献^[1].海上自升式钻井平台作业分为几步进行,先经过拖航、就位、放桩、插桩、预压、升船,然后才可以进行正常作业.其中在预压过程中,桩腿在船舱压载水等荷载作用下继续下沉,桩靴插入海底泥面以下,平台船体却在上升,而实际作业时通常采取分级加载方式,即平台所需的全部压载水会分多次注入,各次之间会使压载重量维持一段时间不变,确认安全后才可以继续注水进行下一步的压载,因此预压载为一个“加载-暂停观察-继续加载”的不连续加载过程.

由于海底状况复杂,插桩穿刺一直是自升式平台的潜在安全隐患.穿刺是指预料之外的单个桩腿突然下沉,一般发生在上硬下软的地层中.桩靴插桩到硬土层时可能暂时稳定,然而由于持续加压及下伏软土层的影响,平台桩腿会突然穿透上硬土层并进入下伏软土层而快速下沉,形成穿刺事故,最终可能导致船体严重倾斜,造成结构和装置的损坏,甚至威胁到人员安全^[2].据MSL公司统计,穿刺事故占自升式平台总事故的比例高达53%^[3],而其中超过90%的事故发生在亚洲^[4].国内外学者对穿刺现象展开了广泛的研究, Lee等人^[5-6]在上层砂土下层黏土的土层中开展了一系列离心机实验,提出了将桩靴及下部砂土等效为一个截锥体基础的新穿刺模型,并发现测得的最大贯入阻力发展趋势高度相似; Hossain等人^[7-8]在上层硬黏土下层软黏土以及多层土的土层情况中进行了大量离心机实验,研究了桩靴贯入时孔穴的形成、土体流动模式及穿刺发生位置.殷齐麟等^[9]运用RITSS大变形数值计算方法模拟层状地基插桩,分析可插桩过程土体变形机理.曹式敬等人^[10]和戴兵等人^[11]对平台穿刺计算方法进行了讨论,对桩基承载力计算公式进行了归纳和修正.这些穿刺研究主要集中于上硬下软土层及成层土的连续加载过程,缺乏对桩靴在单一土层不连续贯入的研究.

为了获得更大的地基承载力,提高在超软地层井位的作业能力,新型平台通常都配有面积较大的桩靴,也称“大桩靴”设计.大桩靴在提高软地层适应性的同时,能在较浅的地层获得足够的稳定性,从而降低穿刺风险.但在实际作业中发现,在黏土层中预压载时也会发生穿刺事故.2004年,印尼Belida B

wellhead platform (WHP)插桩时发生了穿刺事故^[12],后来重新进行地质调查,发现在预压载过程中,黏土层产生了“人工硬层”导致了穿刺.2017年,南海某大桩靴自升式钻井平台在黏土层预压载时发生了穿刺现象,穿刺深度近4 m,对平台结构造成了严重损伤.因此,对黏土层地基承载力的研究有助于了解黏土中穿刺的机理,对于保障生产安全,减少财产损失具有重要的意义.

对于黏土中的穿刺问题,国内外的研究较少. Barbosa-Cruz^[13]通过离心机实验发现,黏土中的穿刺现象是由不连续加载过程中土体固结所造成的,固结程度较小也能引起穿刺. Bienen等人^[14]在Barbosa-Cruz的基础上通过离心机实验研究了固结时间,固结深度对穿刺机理的影响,发现固结后孔隙比减小,不排水抗剪强度增加,承载力急剧增加;固结时间越长,承载力提高越多.赵明华等人^[15]对软黏土中沉桩以及随后的固结过程进行了模拟,研究了不同因素对固结完成后桩侧土体不排水抗剪强度的影响.以上研究有的虽然通过离心机不连续加载分析了黏土穿刺问题,但都是通过位移加载至固结深度后停止加载,等待固结时间后重新加载,与实际作业分级加载方式有所出入.

综上所述,目前对穿刺现象的研究主要集中在上硬下软的成层土中,现有黏土层中穿刺的研究主要采用位移加载,不能很好地模拟平台预加载方式,而且现有规范^[16]中预判穿刺的承载力公式大多基于圆饼形桩靴提出,虽然具有较好的通用性,但是对于采用方形大桩靴的适用性有待商榷.本文以某方形大桩靴自升式平台为原型,运用模型实验系统研究了黏土层中不连续加载的穿刺现象,分析了穿刺产生的机理和影响因素及降低穿刺风险的方法.对于完善黏土层穿刺研究和指导工程实际具有重要意义.

1 插桩模型实验

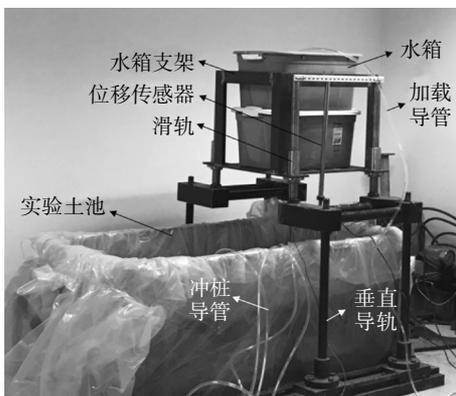
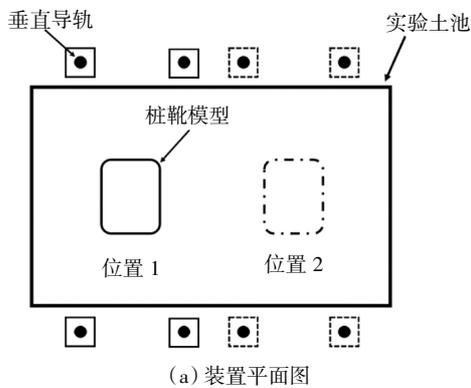
1.1 模型实验系统

实验在土池中进行,实验系统如图1(a)所示,土池两侧设有垂直导轨系统,便于调整加载系统的位置,同时也是对整个上部测量系统起到承载的作用.实验分为冲桩和非冲桩两类,首先,在图1(a)中位置1处进行不连续压载实验,测量压载过程中的承载力-位移曲线.然后,将整个系统移动到位置2处进行相同的压载实验,但在压载过程中进行冲桩操作,测量承载力-位移曲线.对比两种工况以及不

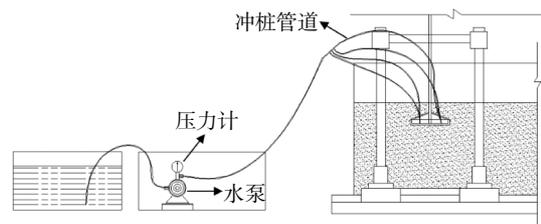
同压载速率下的承载力-位移曲线。

进行缩尺实验时,根据相似性分析,1g重力加速度环境下模型试验长度、位移、应力、时间等均为原型的 $1/N^{0.7}$ (N 为试验模型缩尺比),应变和重度系数等参数与原型比例为1,流量与原型比例为 $1/N^2$ 。

插桩实验加载系统如图1(b)所示,该系统的上部由水箱注水进行垂直方向载荷的持续加载,竖直导轨配合滚动轴承用于水箱垂直移动;在自升式平台桩靴模型上面安装位移传感器和力传感器,用来测量桩靴在实验中的载荷和入泥深度等相关数据。另外,在桩靴底部布置冲桩孔,并按照实验设计配备相应的模拟冲桩系统,通过水泵控制冲桩水压,对桩靴以下土体进行冲刷,使其处于不排水状态,冲桩示意图如图2(a)、2(b)所示。插桩位置详图如图2(c)所示,插桩位置距水平边界 $1.2d$ (d 为实验桩靴最大截面边界方向长度),距竖向边界 $1d$,由于存在一定的边界效应,将导致实验结果会稍有偏大^[18],但左右两个插桩位置完全对称,并且边界条件保持一致,因此实验的对比结果仍具有合理性。尺寸效应即为地基承载力系数 N ,随基础宽度的增大而减小,与基础埋深和大小等因素相关^[19],本实验存在一定的尺寸效应,但桩靴尺寸、插桩位置和深度都是一定的,其结果仍具有参考性。



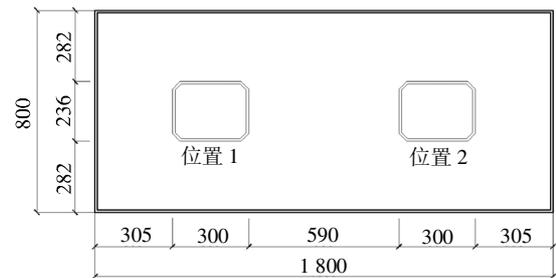
(b) 实验装置图
图1 插桩实验系统



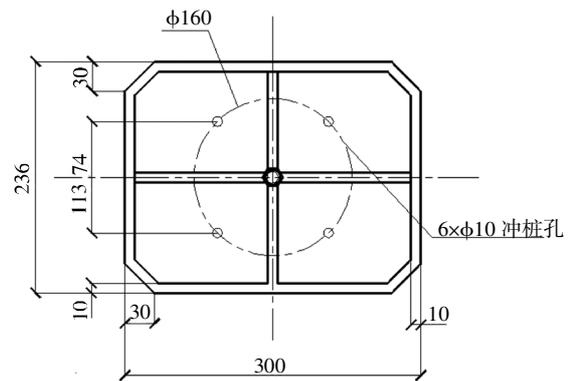
(a) 冲桩实验装置



(b) 冲桩实物图



(c) 土箱尺寸图(单位:mm)



(d) 桩靴尺寸图(单位:mm)

图2 实验装置详图

Fig.2 Detail of experimental device

实验所用的桩靴模型以某自升式平台大桩靴为原型,模型如图2(d)所示,制作比例为1:75,平台桩靴模型长300mm,宽236mm,桩底至桩腿顶面高600mm,桩靴底部设有4个冲桩孔。实验的动态数据采集采用DH5923动态信号测试分析系统,该仪器共有32个测量通道,每个通道接口均为7芯航空

Fig.1 Experiment set up for penetration test

接头,能够输出最高为 24 V 的桥路电压.冲桩系统如图 2(a)所示,主体为 XQm 型水泵,其排量范围为 0~25 L/min,最大扬程为 20 m,额定功率为 0.125 kW.原位测量系统采用 SZB-1.0 型便携式十字剪切仪,该仪器包括 1 只扭力计、6 根延长杆、4 只不同的十字板头、1 只板头杆和 3 只辅助扳手,用于测定饱和黏土的原位不排水强度.其中板头尺寸如表 1 所示,由于土层厚度一定,板头越高在深度方向取点就越少,B 板头虽然高度较小可测点位多,但量程过大不够精确,D 板头可测点位又过少,考虑到精确度和土层厚度,最终实验选用 C 号板头进行测量.在实验前,分别对两个桩靴加载点的前、后、左、右、中心 5 个点进行不排水剪切强度测量,取其平均值,从而得到抗剪强度随深度的拟合曲线.

表 1 十字剪切仪板头尺寸

Tab.1 Head size of the vane shear

编号	板头尺寸/(mm×mm)	量程/kPa	板头系数
A(标准)	20 × 40	0~130	1
B	16 × 32	0~260	2
C	25.4 × 50.8	0~65	0.5
D(选购)	50.8 × 101.6	0~8.125	0.062 5

1.2 实验方案及实施

实验分为 2 类(冲桩和非冲桩)共 6 种工况,如表 2 所示.每种工况均分为四级加载,每级加载分为加载和观察两个过程.参考实际平台预压载时加载和观察的时间,将实验的观察时间设定为 30 min,通过改变每级加载的速率来观察土体的穿刺情况.在同一级加载速率下还设置了冲桩对比工况,目的是考察在插桩过程中进行冲桩操作对土体承载力以及穿刺现象的影响.冲桩工况下冲桩作业伴随整个加载过程,且冲桩压力保持一定,对桩靴底部土体进行持续冲刷.

实验黏土的主要参数如表 3 所示,实验前先将黏土进行晾晒处理,碾碎直径大于 10 mm 的黏土块,之后把黏土倒入土箱中,逐层加水搅拌,然后让黏土静置固结一段时间,配置一定初始含水率的饱和黏土(实验土层厚度为 35 cm);配好土后安装桩靴模型与加载装置,安装传感器.通过控制配重对桩靴分级压载,先通过控制加载管道流量达到不同的加载速率,加载配重至 50 kg,停止加载并静置 30

min,第一级加载完成;然后按之前的加载速率继续加载,将配重加至 100 kg,静置 30 min 后完成第二级加载;最后依次将配重加至 150 kg 和 200 kg,完成整个不连续的四级加载流程,并记录全过程的承载力和位移等数据.在位置 1 完成正常插桩实验后,拔出桩靴,将加载实验装置移到位置 2 进行冲桩对比实验.冲桩工况参考了实际平台冲桩操作,首先将冲桩管线与桩靴连接紧密,之后开启水泵观察桩靴冲桩孔是否堵塞,若出现堵塞情况则加大水泵输出,冲开后 4 个孔均能顺利冲桩,然后将冲桩压力控制在 7.2 kPa(与实际比例为 1:75),同样记录全过程的承载力和位移等数据.实验前使用十字板剪切仪对不同点位的原位土进行了测试,最后取平均值得到的土体不排水抗剪强度如图 3 所示.

表 2 实验加载方案

Tab.2 Loading schemes

实验编号	每级加载重量/kg	每级加载时间/h	观察时间/min	加载速率/(kg·h ⁻¹)	压载级数	是否冲桩	冲桩压力/kPa
T1	50	1.5	30	33	4	否	—
T2	50	2.5	30	20	4	否	—
T3	50	3.5	30	14	4	否	—
T4	50	1.5	30	33	4	是	7.2
T5	50	2.5	30	20	4	是	7.2
T6	50	3.5	30	14	4	是	7.2

表 3 实验黏土主要参数

Tab.3 Main parameters of the clay

含水率/%	有效重度/(kN·m ⁻³)	液限/%	塑限/%	不排水强度随深度变化率/(kPa·m ⁻¹)
26.8	7.8	51	25	25

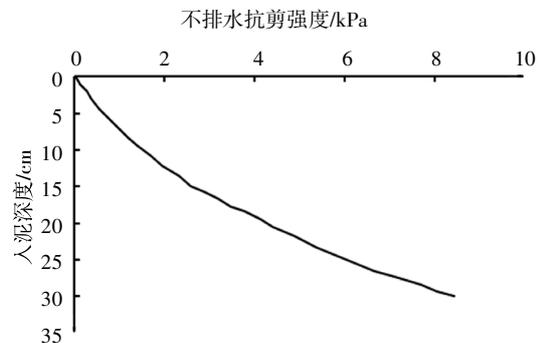


图 3 实测不排水抗剪强度曲线

Fig.3 Measured profile of the undrained shear strength

2 模型实验结果与分析

2.1 不连续加载穿刺现象的产生

加载过程中,在每级加载中间会有 30 min 的观察期,土体的固结就发生在此观察期内.从图 4(a)可以看出,T1 实验中在第一次观察期过后重新加载时,发生了快速下沉,下沉深度为 5mm,由于插桩深度较浅,且土层厚度较小,可认为是一次下沉深度较小的穿刺现象,其相对土层厚度的穿刺深度为 1.4%.从图 4(b)局部放大图中可以看出,在发生穿刺前,随着重新加载时荷载的增加,桩靴的入泥深度在一定时间内保持不变,这说明在停止加载时土体产生固结,从而在桩靴底部形成局部硬层,分析其原因可能是在加载过程中,底部土体孔隙水压持续上升,由于土体来不及排水,荷载由孔隙水和土体共同承担;在静置过程中土体有充分时间排水,因此孔隙水压减小,桩靴局部土体的有效应力增加,土体发生再次固结,在局部形成硬化层,再次加压时荷载超过硬化层的承载力后出现穿刺现象.

2.2 加载速率对穿刺的影响

对比图 4(a)和图 4(c)、图 4(d)可以看出,T1 在第一次和第三次观察期后都发生了穿刺现象.而 T2 与 T3 实验仅在第一次观察期后发生了一次穿刺,可以看到加载速率降低后,穿刺风险有了明显降低.其原因可能是因为加载速度较快时,桩靴底部土体的固结速率较高,上部快速形成的硬土层阻碍了下部软土层的进一步排水,因而最终形成的硬土层较薄,抗剪强度较低.已有研究表明,上硬土层抗剪强度减小时,穿刺风险随之增大^[20].

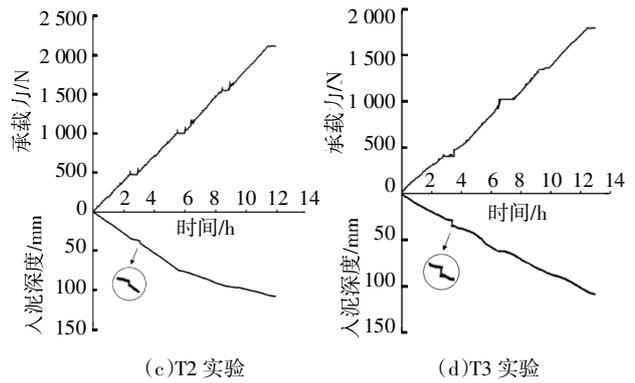
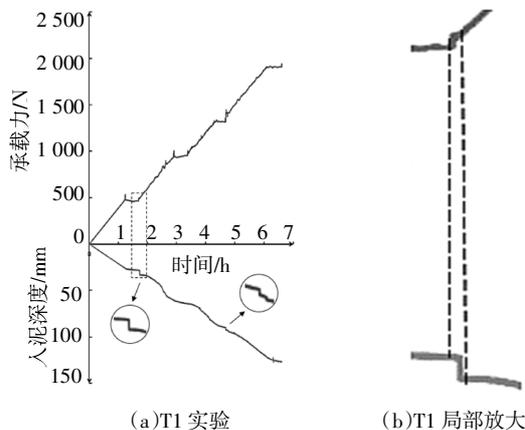


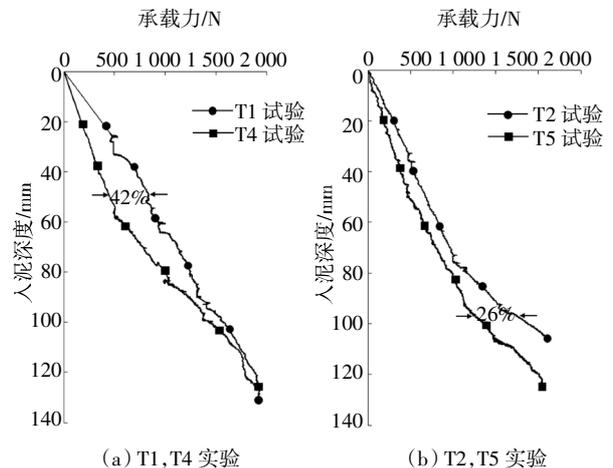
图 4 承载力、入泥深度与时间关系曲线

Fig.4 Bearing capacity, penetration depth versus penetration time

2.3 加载时冲桩对穿刺的影响

冲桩是以大量海水对桩腿下面的土壤进行喷冲,以消除土壤对结构物吸附力的操作,冲桩一般用于解决钻井平台拔桩困难等问题^[21],能有效减小拔桩阻力,而本实验将冲桩应用在插桩过程中,对比正常工况研究冲桩对桩靴地基承载力的影响,并观察冲桩工况下的穿刺情况.从图 5(a)(b)(c)均可以看出,在插桩过程中进行冲桩,土体的承载力有明显降低,其中 T4 工况中土体承载力下降幅度最大(42%).图 6 表明在冲桩工况下 3 种加载速率均未出现穿刺现象.冲桩对桩靴底部土体的作用,一是在桩靴底部形成一层“水膜”,二是当冲桩压力较大时喷冲作用会破坏底部土体的整体性,避免硬土层的形成,这两种作用都有效地阻碍了土体的固结和局部硬层的形成,规避了相应的穿刺风险.

实验结果表明,在预压载时冲桩能够有效降低穿刺风险.在工程中遇到穿刺风险较高的地层可以采用冲桩的方式,保证作业安全.



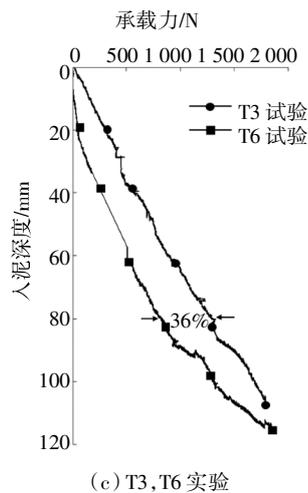


图5 承载力与入泥深度关系曲线

Fig.5 Bearing capacity versus penetration depth

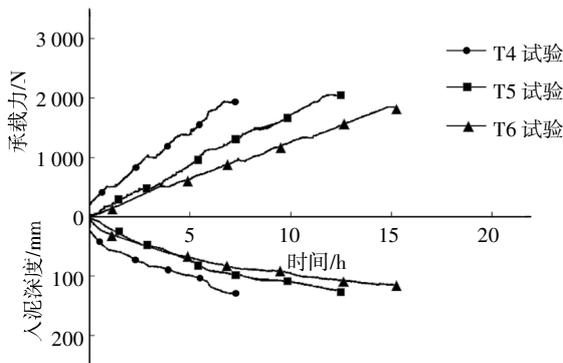


图6 冲桩工况下承载力、入泥深度与时间关系曲线

Fig.6 Bearing capacity, penetration depth versus penetration time in jetting test

2.4 施工建议

大桩靴平台在软黏土层中插桩作业时,在不影响工期的情况下尽可能降低压载的速率,避免由于加载过快引起的穿刺事故.并且在遇到穿刺风险较高的黏土区域,可考虑在插桩时进行冲桩处理,在冲桩初期可增大泵压直到桩靴底部孔都冲开,然后降低至一定的压力保证能正常冲桩即可,维持冲桩状态至插桩结束,可在一定程度上降低穿刺风险.

3 结论

1)本文针对某大桩靴自升式平台在黏土层发生的穿刺事故,通过模拟实际平台的加载方式,设计了一整套包括加载装置、测量装置和冲桩装置的实验

系统,完成了桩靴在黏土中的插桩实验,验证了实验系统的有效性.

2)以正常压载方式进行加载时(T1~T3)均出现了微小的穿刺现象,并且在较高的加载速率下(T1)出现了多次穿刺,表明平台在黏土层中插桩时会出现穿刺现象,并且穿刺风险随加载速率的提高而增加.

3)实验结果表明,在插桩过程中进行冲桩操作,能大幅度降低地基承载力,最高可达42%,并有效降低穿刺风险.

参考文献

- [1] 陈宏.自升式钻井平台的最新进展[J].中国海洋平台,2008,23(5):1—7.
CHEN H. The latest development of jack-up drilling platform [J]. China Offshore Platform, 2008, 23(5): 1—7. (In Chinese)
- [2] 胡知辉,赵军,宋林松,等.复杂地层条件下自升式钻井平台插桩穿刺分析[J].中国海上油气,2011,23(5):344—348.
HU Z H, ZHAO J, SONG L S, *et al.* Analysis on punch-through during the jack-up unit preloading in complex stratum [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(5): 344—348. (In Chinese)
- [3] DIER A, CARROLL B, ABOLFATHI S. Guidelines for Jack-up rigs with particular reference to foundation integrity [R]. Ireland: MSL Engineering Limited, 2004: 7—14.
- [4] TEH K L, LEUNG C F, CHOW Y K. Prediction of punch-through for spudcan penetration in sand overlying clay [C]// Offshore Technology Conference. Houston, Texas: OTC, 2009: 1468—1481.
- [5] LEE K K, CASSIDY M J, RANDOLPH M F. Bearing capacity on sand overlying clay soils: experimental and finite-element investigation of potential punch-through failure [J]. Géotechnique, 2013, 63(15): 1271—1284.
- [6] LEE K K, RANDOLPH M F, CASSIDY M J. Bearing capacity on sand overlying clay soils: a simplified conceptual model [J]. Géotechnique, 2013, 63(15): 1285—1297.
- [7] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: centrifuge tests [J]. Géotechnique, 2010, 60(3): 157—170.
- [8] HOSSAIN M S. Experimental investigation of spudcan penetration in multi-layer clays with interbedded sand layers [J]. Géotechnique, 2014, 64(4): 258—277.
- [9] 殷齐麟,董胜,樊敦秋.复杂地层中自升式平台插桩的数值模拟[J].工程力学,2016,33(9):204—211.
YIN Q L, DONG S, FAN D Q. Numerical simulation of penetration

- of Jack-up platform in complex foundation soils [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(9): 204—211. (In Chinese)
- [10] 曹式敬, 宋林松, 黎剑波, 等. 自升式平台穿刺计算方法探讨[J]. *海洋石油*, 2011, 31(1): 86—89.
CAO S J, SONG L S, LI J B, *et al.* Discussion on punch-through calculation method of jackup [J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(1): 86—89. (In Chinese)
- [11] 戴兵, 段梦兰, 宋林松, 等. 自升式钻井平台穿刺分析[J]. *科技导报*, 2010, 28(17): 63—66.
DAI B, DUAN M L, SONG L S, *et al.* Investigation of the punch-through in Jack-up rigs [J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(17): 63—66. (In Chinese)
- [12] BRENNAN R, DIANA H, STONOR R. Installing jackups in punch-through sensitive clays [C]// *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: OTC, 2006: 1524—1550.
- [13] BARBOSE-CRUZ. Partial consolidation and breakthrough of shallow foundations in soft soil [D]. Perth: School of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia, 2007: 1—7.
- [14] BIENEN B, CASSIDY M J. Set up and resulting punch-through risk of jack-up spudcans during installation [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(12): 2048—2059.
- [15] 赵明华, 占鑫杰, 邹新军. 饱和软黏土中沉桩以及随后固结过程的数值模拟[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(2): 1—8.
ZHAO M H, ZHAN X J, ZOU X J. Numerical simulation of pile installation and subsequent consolidation in clay [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(2): 1—8. (In Chinese)
- [16] SNAME. Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units, technical and research bulletin 5-5a [S]. New Jersey: SONA Engineers, 2008: 64.
- [17] 高攀, 段梦兰, 赵良美, 等. 大比尺自升式平台插拔桩试验系统研制及验证[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(6): 108—114.
GAO P, DUAN M L, ZHAO L M, *et al.* Development and validation of a large-scale model test system for spudcan penetration and extraction [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(6): 108—114. (In Chinese)
- [18] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(3): 80—86.
XU G M, ZHANG W M. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(3): 80—86. (In Chinese)
- [19] 柳飞. 模型试验中地基材料粒径与基础尺寸效应研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学环境科学与工程学院, 2010: 61—67.
LIU F. Study on the particle size effect and scale effect in model test [D]. Qingdao: College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, 2010: 61—67. (In Chinese)
- [20] 林一, 胡安康, 蒋玮, 等. 层状地基中自升式钻井平台插桩穿刺风险分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(6): 754—761.
LIN Y, HU A K, JANG W, *et al.* Risk analysis of punch through for a jack-up drilling unit in layered soil [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(6): 754—761. (In Chinese)
- [21] KOHAN O, BIENEN B, GAUDIN C, *et al.* The effect of water jetting on spudcan extraction from deep embedment in soft clay [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 97: 90—99.