吴曲楠,刘润,张海洋,等.筒型桩靴在饱和砂土中的贯入阻力研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1183-1190.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2018.06.1183

WU Qunan,LIU Run,Zhang Haiyang, et al.Bucket Spudcan Penetration Resistance in Saturated Sand[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1183-1190.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1183

筒型桩靴在饱和砂土中的贯入阻力研究

吴曲楠,刘 润,张海洋,王宇飞

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点试验室, 天津 300072)

摘要: 桩靴贯入阻力的准确预测是自升式钻井平台安全作业的前提。通过小比尺模型试验,研究饱和砂土中桩靴贯入速度对筒型桩靴插桩性能的影响,并基于地基承载力理论提出筒型桩靴贯入阻力的计算方法,进而采用 CEL 有限元方法模拟筒型桩靴的贯入过程,并与试验结果进行比较。研究发现:当模型试验中桩靴贯入速度在 0.1~0.3 mm/s 时,桩靴的贯入可看作是准静态过程,此时 贯入阻力变化不大,采用基于地基承载力理论中的 Hansen 公式和 Vesic 公式可较为准确地计算出 对应某一深度的贯入阻力;CEL 有限元方法可有效模拟筒型桩靴的贯入过程,当桩靴的贯入速度 为 0.1~0.3 mm/s 时,数值模拟结果与试验结果吻合较好。

关键词:筒型桩靴;贯入速度;贯入阻力;模型试验;CEL

中图分类号: TU476 **文献标志码:**A **文章编号:** 1000-0844(2018)06-1183-08 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1183

Bucket Spudcan Penetration Resistance in Saturated Sand

WU Qu'nan, LIU Run, ZHANG Haiyang, WANG Yufei

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The accurate prediction of spudcan penetration resistance plays an important role in the safety of work on Jack-up drilling platforms. In this work, by carrying out small-scale model tests, the influence of penetration speed on the pile-penetration performance of bucket spudcans in saturated sand was studied, and a computational formula for calculating the bucket spudcan penetration resistance was developed based on the bearing capacity of the ground. Subsequently, the penetration process of the bucket spudcan was simulated by the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) finite element method, and the results were compared with test results. The investigation results showed that, when the penetration speed of the spudcan is $0.1 \sim 0.3$ mm/s in the model test, the penetration process of the bucket spudcan can be regarded as a quasi-static process, and the penetration resistance varies little. The penetration resistance of the bucket spudcan at a certain depth can be calculated accurately by using the Hansen and Vesic formulas. The CEL finite element method can simulate the bucket spudcan penetration process exactly, and the simulation results were in good agreement with the test results when the penetration speed of the spudcan was $0.1 \sim 0.3$ mm/s.

Keywords: Bucket spudcan; penetration speed; penetration resistance; model test; CEL

收稿日期:2017-08-20

第一作者简介:吴曲楠(1993一),硕士研究生,主要从事海洋土力学方面研究。E-mail:qnwu2014@163.com。

0 引言

自升式钻井平台机动性好,可重复使用,对水深 适应性强,在各类可移动式钻井平台中占据主导地 位。平台主要由上部结构、升降装置和底部带有大 直径桩靴基础的桩腿组成,平台工作时需要将桩靴 基础插入到海底以下一定深度来为自身提供足够的 支撑力。传统的桩靴基础形式一般为倒锥形结构, 其底面具有一定坡度,有利于桩靴在硬度较大的海 床地基中进行插桩作业,并且可起到固定作用,保证 平台在水平方向上的稳定性。传统的倒锥形桩靴结 构如图1所示。



图 1 倒锥形桩靴 Fig.1 Inverted cone spudcan

近年来,随着自升式钻井平台在海洋工程中的 应用范围越来越广,传统的倒锥形桩靴抵抗波浪、 洋流和风等环境荷载的能力受到了挑战,承载力 高、稳定性好且穿刺风险低的筒型桩靴基础逐渐受 到关注^[1]。但现有研究多集中在倒锥形桩靴的插 桩性能上: Craig 等^[2]采用离心机试验分析了倒锥 形桩靴在均质黏土、砂土及上砂下黏双层地基中的 贯入过程,并基于 Hansen 承载力理论提出了倒锥 形桩靴在均质砂土中的插桩阻力计算公式;Tho 等^[3]利用 CEL 有限元法模拟了倒锥形桩靴的连续 贯入过程,并通过与 Craig 离心机模型试验结果的 对比验证了 CEL 方法的可行性,研究中还讨论了 网格密度和贯入速度等对贯入阻力的影响。目前 关于简型桩靴的研究多集中在其承载性能上:Cassidy 等^[4]开展了正常固结黏土中倒锥形桩靴和筒 型桩靴承载力对比的离心机模型试验,证明了复合 加载条件下(V-M-H)筒型桩靴的承载性能优于倒 锥形桩靴;张浦阳等53利用数值模拟,发现相近尺 寸下的筒型桩靴可以将倒锥形桩靴在静荷载作用

下的水平和弯矩承载能力提高 10% 以上,动荷载 作用下的水平承载力增长 20% 以上,同时筒壁可 以增加基础的有效埋置深度,提高平台基础的固定 度和整体刚度; Hossain 等^[6]通过离心机模型试验 和大变形有限元分析方法,发现在均质软黏土上覆 中密砂的土质条件下,筒型桩靴可以有效降低贯入 过程中的穿刺破坏风险。

由以上分析可知,筒型桩靴的承载性能优于传 统的倒锥形桩靴,并且可降低桩腿发生"穿刺"破坏 的风险,但目前关于筒型桩靴插桩性能的研究较少。 因此本文通过开展饱和砂土中的小比尺模型试验, 研究不同速度条件下筒型桩靴的插桩性能,并基于 地基承载力公式提出筒型桩靴插桩阻力的计算方 法;随后采用 CEL 有限元方法对桩靴的连续贯入过 程进行模拟,并与试验结果进行对比。

1 筒型桩靴的模型试验

1.1 试验准备与桩靴模型

试验在长×宽×高=1.5 m×1.5 m×1.5 m的 模型槽中进行。槽底先填埋 0.3 m厚的碎石垫层 (粒径在 5~20 mm 间),然后将底部打孔并包有一 层土工布的 PVC 管(直径为 0.25 m)插入碎石垫层 中作为排水井和观测井,试验过程中监测井内水位 的变化,以保证水面不低于填土高度,填土处于饱和 状态。试验用土为渤海海砂,颗粒级配曲线如图 2 所示,土中粒径小于 0.075 mm 的细颗粒含量为 9.3%,不均匀系数 C_u 为 4.04,曲率系数 C_c 为 1.06, 为级配不良的细砂。当砂土中存在粒径小于 0.075 mm 的细颗粒且含有水分时,砂土一般会具有黏聚 力^[7]。在对本次试验用土进行多次固结排水剪试验 后确认其具有较小的黏聚力。具体土性指标参数列 于表 1。



Fig.2 Grain size distribution curve of test soil

表 1 试验用土参数 Table 1 Parameters of soil used in tests

土粒比重	最大干密度 ρ_{dmax}	最小干密度 ρ_{dmin}	容重γ	含水率	孔隙比	相对密	饱和度	黏聚力	内摩擦角
G_s	$/(g \cdot cm^{-3})$	$/(g \cdot cm^{-3})$	$/(kN \cdot m^{-3})$	w/%	е	实度 D _r	S _r	c/kPa	$arphi/(\degree)$
2.65	1.86	1.35	20.4	16.56	0.51	0.83	0.85	4.7	37

接着分层填土,按质量控制分四次、每次 0.3 m 厚填入试验用砂土。每层填完后,向槽内缓慢注入 一定体积的水,并使用振捣棒进行充分振捣,以保证 试验土体均匀饱和。随后对填埋土体进行轻型动力 触探试验,并控制每层土的锤击数相近,以保证试验 土体具有相近的密实度。动力触探试验如图 3 所示。



图 3 轻型动力触探试验 Fig.3 The light dynamic penetration test

筒型桩靴模型的几何尺寸如图 4 所示。桩靴高 径比为1:3,壁厚与直径之比为1:20。为保证插 桩过程中加载装置和桩靴之间有良好的同心度,筒 型桩靴顶部的中心位置设计有一个直径为 30 mm 的圆孔。试验前将该圆孔与加载杆连接,确保桩靴 在贯入过程中均匀受力。



图 4 简型桩靴几何尺寸图 Fig.4 Dimension of the bucket spudcan model

1.2 试验装置

试验装置由加载及定位系统和测量系统组成, 如图 5 所示。加载及定位系统主要由模型槽、电动 缸、伺服系统、工字钢、滑动导轨和导轨滑块等组成, 测量系统主要由拉压力传感器、位移传感器、加载控



Fig.5 Schematic diagram of model test

制器、动态数据采集仪和计算机等组成。试验装置 可准确模拟自升式钻井平台桩靴的插桩过程,实时 记录桩靴的贯入深度和插桩阻力,并可对桩靴贯入 速度进行调节。

1.3 试验过程

首先利用滑动导轨对桩靴进行定位并用螺栓固 定后调试试验仪器,通过程序控制桩靴以试验要求的 恒定速度贯入土体。与此同时,对不同时刻桩靴的贯 入深度及阻力等数据进行采集。当桩靴贯入至预定 深度后停止贯入,通过程序控制将桩靴以恒定速度拔 出土体,结束试验。将设备拔除,对土体重新进行翻 填、振捣和养护,以保证每次试验土体参数相近。

实际工程中的插桩过程是一个连续的动态过程,插桩速率不可避免地会对桩靴贯入阻力造成影响。因此为研究筒型桩靴在不同贯入速度条件下的插桩性能,分别进行贯入速度为 0.1 mm/s、0.2 mm/s、0.3 mm/s、0.6 mm/s 及 1 mm/s 的桩靴贯入试验。试验规定以筒型桩靴最大横截面的下端为贯入起点,当贯入深度 h 达到一倍桩靴高度(4 cm)时,停止贯入,如图 6 所示。



Fig.6 Schematic diagram of bucket spudcan penetration

1.4 试验结果

不同贯入速度条件下筒型桩靴的贯入阻力 F 与贯入深度 h 之间的关系如图 7 所示。桩靴贯入深 度 h 达到 4 cm 时,插桩阻力 F_{max}与贯入速度 v 之 间的关系如图 8 所示。

由图 7 可以看出,随着贯入深度的增加,筒型桩 靴的插桩阻力不断增大,插桩阻力曲线上未出现明 显的转折点。同时可以看出,在同一插桩深度下,贯 入速度大的筒型桩靴受到的插桩阻力也越大,尤其 当贯入速度大于 0.3 mm/s 后,贯入速度对插桩阻 力的影响更为显著。由图 8 可知,在桩靴插深为 4 cm 处,当贯入速度由 0.1 mm/s 提高到 0.3 mm/s 时,筒型桩靴的插桩阻力变化不大,仅由 7.220 kN 增长到 7.746 kN,增长了约 7.3%。但当贯入速度 由 0.3 mm/s 提高到 1 mm/s 时,可能由于土体中的 超孔隙水压力未来得及消散,插桩阻力随贯入速度 的提高呈线性增长,筒型桩靴的插桩阻力由 7.746 kN 增长到 18.435 kN,增长了约 140%。







由上述试验结果可以看出,在模型中当桩靴贯入 速度在 0.1~0.3 mm/s时,插桩速率对贯入阻力的影 响不大,可以将筒型桩靴的贯入过程看作是基础埋深 逐渐增大的准静态过程;但当贯入速度超过 0.3 mm/ s后,由于超孔隙水压力、土体应变率效应等因素的影 响,插桩速率对贯入阻力影响显著,贯入阻力随插桩 速率的提高基本上呈线性增长。下面将基于地基承 载力理论提出适用于筒型桩靴贯入阻力的计算公式, 并将理论计算结果与不同速度条件下插桩阻力的试 验值进行比较,来验证理论计算公式的可靠性。

2 确定桩靴的贯入阻力

2.1 贯入阻力的计算方法

自升式钻井平台具有较大直径的桩靴基础,在

1187

砂土中入泥深度相对较浅,明显具有浅基础的基本 特点,因此浅基础经典土力学承载力公式常用来计 算传统倒锥形桩靴在某一深度处的插桩阻力^[8]。段 忠毅等^[9]推荐采用 Terzaghi 和 Peck 公式来计算桩 靴在砂土中的贯入阻力,美国的 SNAME 规范推荐 采用基于 Hansen 和 Vesic 的承载力公式来计算桩 靴在砂土中的贯入阻力^[10],但公式中均未考虑砂性 土中的黏粒对桩靴贯入阻力起到的贡献作用。由于 本次试验中土体含有一定数量的细颗粒,经过多次 三轴固结排水剪试验测得土体具有 4.7 kPa 的黏聚 力,因此在下文的理论计算中考虑黏聚力对贯入阻 力的影响。

常用的地基极限承载力公式有 Terzaghi 公式、 Hansen 公式和 Vesic 公式。Terzaghi 公式考虑了 基底摩擦和土体自重,并将基底以上两侧的土体用 均布荷载来代替,但公式未考虑基底以上土体的抗 剪强度。对于圆形浅基础地基极限承载力,太沙基 (Terzaghi)建议按下列公式计算:

$$p_{\rm u} = 1.2 c N_{\rm c} + q N_{\rm q} + 0.4 \gamma B N_{\gamma}$$
 (1)

式中: p_u 为地基土单位面积所能够承担的最大荷载,kPa;c为土体的黏聚力,kPa;q为基底水平面上的超载, $kPa,q = \gamma d$,其中 γ 是土体容重, kN/m^3 ,d是基础的埋置深度,m;B为基础宽度,即圆形基础 直径, $m;N_c$ 、 N_q 、 N_γ 为承载力系数,视具体的计算条件和计算方法所依据理论的不同而不同,可查太沙基承载力系数表。

Hansen 和 Vesic 等又在前人研究的基础上考 虑了倾斜荷载、基础形状、埋置深度、地面倾斜及基 础底面倾斜等因素对地基极限承载力的影响,并考 虑了基底以上土体的抗剪强度^[11],对各项承载力系 数 N_e、N_g、N_y进行了修正。加修正后的地基极限 承载力公式为:

$$p_{u} = cN_{c}s_{c}d_{c}i_{c}g_{c}b_{c} + qN_{q}s_{q}d_{q}i_{q}g_{q}b_{q} + 0.5\gamma BN_{\gamma}s_{\gamma}d_{\gamma}i_{\gamma}g_{\gamma}b_{\gamma}$$
(2)

式中: i_{e} 、 i_{q} 、 i_{γ} 为荷载倾斜修正系数,中心荷载作用 下取为1; g_{e} 、 g_{q} 、 g_{γ} 为地面倾斜修正系数, b_{e} 、 b_{q} 、 b_{γ} 为基底倾斜修正系数,当地面和基底水平时都取为 1; s_{e} 、 s_{q} 、 s_{γ} 为形状修正系数, d_{e} 、 d_{q} 、 d_{γ} 为埋深修正 系数, N_{e} 、 N_{q} 、 N_{γ} 为承载力系数,可根据汉森(Hansen)、维西克(Vesic)承载力系数表求得。

由于模型试验中桩靴的贯入深度较浅,插桩过 程中并未发现明显的土体回淤现象,所以理论计算 中不考虑回淤土体的自重。筒型桩靴较传统的倒锥 形桩靴具有一定长度的裙板,当筒盖底部接触到土 面以后,筒内土体会在上覆荷载的作用下与筒型桩 靴形成一个整体,因此它的贯入阻力 F 应该由端部 阻力 F_b和筒壁外摩阻力 F_f 两部分组成,具体计算 公式如下:

$$F = F_{\rm b} + F_{\rm f} = p_{\rm u}A + f_{\rm s}A_{\rm f}$$
 (3)

$$f_{s} = \frac{1}{2} K \gamma d \tan \delta \tag{4}$$

式中: f_s 为简外壁与土体之间的平均摩擦力;K为 侧压力系数,一般取为 $0.8^{[12]}$; δ 为简外壁与土体之 间的外摩擦角,与土体内摩擦角 φ 有关,根据经验 一般在 $0.5\varphi \sim 0.8\varphi$ 之间,本文计算取为 0.65φ ;A为简型桩靴横截面积, m^2 ; A_f 为简壁外侧面积, m^2 。 其他字母含义同上。

2.2 与试验结果的对比分析

对于倒锥形桩靴,一般取其最大横截面下端的 贯入深度作为基础的有效埋置深度^[13],而对具有裙 板的筒型桩靴来说,筒壁会对其内部土体起到"紧 箍"作用,使筒内土体与桩靴基础成为一个整体,在 上覆荷载作用下共同向下运动^[14],因此取筒壁底端 到土面的距离作为基础的有效埋置深度比较合理。 在上述模型试验中,当筒盖底部的贯入深度达到 4 cm时,筒型桩靴的有效埋置深度应取为 7.4 cm, 此时筒型桩靴插桩阻力的理论计算结果如表 2 所列。

	表 2	理论计		
Table 2	The the	eoretical	calculation	result

	承载力理论计算结界	į	模型试验结果					
Terzaghi 公式 /kN	Hansen 公式 /kN	Vesic 公式 /kN	0.1 mm/s /kN	0.2 mm/s /kN	0.3 mm/s /kN	0.6 mm/s /kN	1 mm/s /kN	
5.34	7.53	7.84	7.22	7.48	7.75	12.58	18.44	

由表2可以看出,由于 Hansen 公式和 Vesic 公 式考虑了基础底部以上土体的抗剪强度,并对各项 承载力系数进行了修正,因此其计算结果比 Terzaghi 公式计算结果要大。同时发现当模型试验中的 贯入速度在 0.1~0.3 mm/s 时,基于 Hansen 公式 和 Vesic 公式的筒型桩靴插桩阻力计算结果与试验 结果较为接近。贯入深度为 4 cm 时,三种基于地基 承载力公式的插桩阻力计算值与不同贯入速度条件





从图 9 可以看出,当桩靴贯入速度在 0.1~0.3 mm/s 时,除 Terzaghi 公式计算结果过于偏小外, 基于 Hansen 公式和 Vesic 公式计算得到的筒型桩 靴插桩阻力与试验结果误差在 10%以内,证明此时 自升式钻井平台的插桩过程可以看作是基础埋深逐 渐增大的准静态过程,此时使用基于极限平衡法的 地基极限承载力理论来计算筒型桩靴插桩阻力是可 行的。但当贯入速度大于 0.3 mm/s 时,由于动力 效应的影响,用地基极限承载力公式计算得到的插 桩阻力都明显偏小,与试验结果偏差较大,传统的地 基极限承载力理论不再适合用来评估桩靴的插桩 阻力。

3 CEL 法模拟桩靴的贯入过程

基于传统的地基承载力理论可以较为准确地计 算出筒型桩靴在某一贯入深度处的插桩阻力,但实 际工程中的插桩过程是一个连续的动态过程,是地 基土在荷载作用下发生连续塑性破坏的过程^[15],因 此有必要利用数值模拟的手段对筒型桩靴的连续贯 入过程进行模拟。

桩靴贯入过程会对周围土体产生巨大的挤压和 扰动,在有限元分析中属于典型的大变形问题[16], 数值计算过程中常出现网格变形过大、收敛困难等 情况。CEL 有限元法采用网格固定而材料可以在 网格中自由流动的方式建立模型,能够有效解决有 关大变形和材料破坏等诸多问题[17],因此采用 CEL 有限元方法对筒型桩靴的贯入过程进行模拟。按照 模型试验实际情况建立 CEL 有限元模型,考虑到研 究问题的对称性,取试验模型的四分之一圆柱建立 计算模型。土体采用欧拉网格单元(EC3D8R)进行 模拟,桩靴采用离散刚体单元(R3D4)进行模拟。为 消除边界影响,土体计算区域沿径向取6倍桩靴直 径,沿深度方向取 10 倍桩靴高度,并在泥面上设置 高度为 0.2 m 的空腔。建模中,将土体视为理想弹 塑性模型,满足 Mohr-Coulomb 屈服准则,土质参数 按表1取值。CEL有限元模型如图10所示,其中 红色部分代表空腔,蓝色部分代表欧拉土体,灰色部 分代表桩靴。



为保证桩靴贯入土体的过程为准静态过程,实际工程中的插桩速率大概在厘米每秒甚至毫米每秒的量级^[18],但在数值模拟中过慢的加载速度会严重

影响计算效率,取与试验中相同的贯入速度作为插 桩速率进行计算明显不切实际,然而过快的加载速 度又会使惯性效应在数值模拟中占据主导地位,导 致计算结果失真。因此为研究 CEL 法中贯入速度 对插桩阻力的影响,分别建立贯入速度为 0.2 cm/s、 1 cm/s、2 cm/s、20 cm/s 及 50 cm/s 的桩靴插桩模 型进行计算,计算结果如图 11 所示。



图 11 有限元模拟结果 Fig.11 Finite element simulation results

由图 11 可以看出,在 CEL 有限元模拟中,当桩 靴贯入速度由 0.2 cm/s 增大为 20 cm/s 时插桩阻 力曲线差异不大,意味着此时数值模拟中的动力效 应可以忽略,筒型桩靴的贯入过程可以看作是准静 态的过程,但当贯入速度提高到 50 cm/s 时插桩阻 力曲线明显发生震荡,并开始偏离贯入速度较低时 的数值计算结果。

当贯入速度在 0.2~20 cm/s 时,插桩阻力几乎 不受贯入速度的影响,因此任意选取其中一个贯入 速度的插桩阻力曲线作为数值模拟结果的代表,与 模型试验中贯入速度为 0.1~0.3 mm/s 的结果进行 比较,来验证 CEL 有限元方法的可靠性(图 12)。

由图 12 可以看出,数值模拟曲线与三种贯入速 度条件下的插桩阻力试验结果吻合较好,整体误差 范围在 10%以内,并且随着模型试验中贯入速度的 减小,插桩阻力与数值模拟结果更为接近。当贯入 深度超过 1 cm 后,数值模拟曲线与贯入速度为 0.1 mm/s 的试验结果几乎完全吻合,证明 CEL 有限元 方法可以有效模拟筒型桩靴的贯入过程。

4 结论

开展饱和砂土中的小比尺模型试验,并基于地 基极限承载力理论和 CEL 有限元方法,对筒型桩靴



的插桩性能进行了研究,主要结论如下:

Fig.12 Comparison between finite element simulation results and test results

(1) 在模型试验中,当桩靴的贯入速度为 0.1~ 0.3 mm/s 时,筒型桩靴的贯入过程可看作是基础埋 深逐渐增大的准静态过程,采用基于 Hansen 和 Vesic 承载力公式的计算方法可得到较为准确的桩 靴贯入阻力。当桩靴贯入速度大于 0.3 mm/s 时, 桩靴的插桩阻力随贯入速度的提高呈线性增长,此 时传统的地基承载力公式不再适合用来计算桩靴的 贯入阻力。

(2) 在模型试验中,插桩阻力随桩靴贯入速度 的提高而增长,但在 CEL 有限元模拟中,桩靴贯入 速度对插桩阻力几乎没有影响,并且数值模拟结果 与贯入速度为 0.1~0.3 mm/s 时的模型试验结果接 近,误差范围在 10%以内,证明 CEL 有限元方法可 有效模拟筒型桩靴的准静态贯入过程。

(3)在筒型桩靴贯入过程中,筒壁对筒内土体 起到"紧箍"作用,使筒内土体与桩靴基础成为整体, 在荷载作用下两者协同向下运动,因此取筒壁底端 到土面的距离作为筒型桩靴基础的有效埋置深度符 合实际情况。

参考文献(References)

[1] 张浦阳.海上自升式钻井平台插/拔桩机理及新型桩靴静/动承载力研究[D].天津:天津大学,2008.

ZHANG Puyang.Study on Mechanism for Spudcan During Preloading and Extracting of Offshore Jack-up Drilling Platform and Bearing Capacity of Improved Spudcan in Static and Cycling Loads[D].Tianjin.Tianjin University,2008.

[2] CRAIG W H, CHUA K. Deep Penetration of Spudcan Founda-

tions on Sand and Clay[J].Geotechnique,1990,40(4):541-556.

- [3] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian Finiteelement Technique for Analysis of Jack-up Spudcan Penetration[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 12(1): 64-73.
- [4] CASSIDY M J, BYRNE B W, RANDOLPH M F.A Comparison of the Combined Load Behaviour of Spudcan and Caisson Foundations on Soft Normally Consolidated Clay[J].Geotechnique,2004,54(2):91-106.
- [5] 张浦阳,丁红岩.海上自升式钻井平台新型筒型桩靴承载力
 [J].石油勘探与开发,2011,38(2):237-242.
 ZHANG Puyang, DING Hongyan. Bearing Capacity of the Bucket Spudcan Foundation for Offshore Jack-up Drilling Platforms[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011,38 (2):237-242.
- [6] HOSSAIN M S.HU Y.EKAPUTRA D.Skirted Foundation to Mitigate Spudcan Punch-through on Sand-over-clay [J]. Géotechnique, 2014, 64(4): 333-340.
- [7] 王玉锁,陈炜韬,王明年.砂土质隧道围岩黏聚力影响因素的试验研究[J].水文地质工程地质,2006,33(6):48-51.
 WANG Yusuo, CHEN Weitao, WANG Mingnian. Test Research for Influencing Factors of the Cohesive Strength of Sand Soil Tunnel Surrounding Rock[J]. Hydrogeology & Engineer-
- [8] 付丽娜.自升式钻井船桩靴承载能力研究[D].天津:天津大学, 2008.

ing Geology, 2006, 33(6), 48-51.

FU Lina.Research on Bearing Capacity of Spud Foundation for Jack-up Self-elevating Drilling Platform[D].Tianjin:Tianjin U-niversity,2008.

[9] 段忠毅,王家祥.带桩靴自升式桩基钻井平台插桩深度的计算 方法[J].中国海上油气:工程,1998,10(4):20-24.
DUAN Zhongyi, WANG Jiaxiang. Analysis of Calculating Method of the Plug-in Depth of Pile-based Drilling Platform
[J].China Offshore Oil and Gas (Engineering).1998,10(4): 20-24.

- [10] SNAME. Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-up Units[S]. New Jersey: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2002.
- [11] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社, 1994.

CHEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin.Soil Mechanics[M].Beijing:Tsinghua University Press, 1994.

- [12] 刘梅梅,练继建,杨敏,等.宽浅式筒型基础竖向承载力研究
 [J].岩土工程学报,2015,37(2):379-384.
 LIU Meimei,LIAN Jijian, YANG Min, et al. Vertical Bearing Capacity of Wide-shallow Bucket Foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2):379-384.
- [13] 郑静,范庆来,王忠涛.纺锤形桩靴基础贯入过程 Eulerian-Lagrangian 耦合有限元法的模拟[J].工业建筑,2013,43(12): 104-108.

ZHENG Jing, FAN Qinglai, WANG Zhongtao. Penetration Process Simulation of Spudcan Foundation by CEL[J].Industrial Construction, 2013, 43(12):104-108.

- [14] 闫澍旺,霍知亮,孙立强,等.海上风电机组筒型基础工作及承载特性研究[J].岩土力学,2013,34(7):2036-2042.
 YAN Shuwang, HUO Zhiliang, SUN Liqiang, et al. Study of Working Mechanism and Bearing Capacity Behavior of Bucket Foundation for Offshore Wing Turbine[J].Rock and Soil Mechanics,2013,34(7):2036-2042.
- [15] 王楠,吴建政,徐永臣,等.单一地层平台插桩地基土破坏模式 及插桩深度有限元分析[J].海岸工程,2012,31(4):20-28.
 WANG Nan, WU Jianzheng, XU Yongchen, et al. Failure Mode of Foundation Soils and Finite Element Limit Analysis of Penetration Depth for Jack-up Rig Footing Penetration on Single Stratum[J].Coastal Engineering,2012,31(4):20-28.
- [16] 郭绍曾,刘润,洪兆徽,等.插桩过程对临近平台桩基础的影响研究[J].地震工程学报,2015,37(2):446-452.
 GUO Shaozeng,LIU Run, HONG Zhaohui, et al. Influence of Spudcan Penetration on Pile Foundation near a Platform[J].
 China Earthquake Engineering Journal,2015,37(2):446-452.
- [17] 闫澍旺,霍知亮,岩土工程下沉贯入数值模拟方法研究进展
 [J].力学与实践,2016,38(3):237-249.
 YAN Shuwang, HUO Zhiliang. Advance in Numerical Simulation Methods for Penetration in Geotechnical Engineering[J].
 Mechanics in Engineering,2016,38(3):237-249.
- [18] 周龙,刘润,郭绍曾,等. 桩靴连续贯入过程的动态模拟方法研究[J]. 地震工程学报,2015,37(2):460-466.
 ZHOU Long, LIU Run, GUO Shaozeng, et al. A Dynamic Simulation Method for Continuous Spudcan Penetration[J].
 China Earthquake Engineering Journal,2015,37(2):460-466.