

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.007

吸力桩深水油气建井贯入过程垂直度控制研究

张明贺,杨进,李甲豪,傅超,朱国惊,王佳康

(中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院)

摘要: 针对桩体非竖直安装易导致浅层土体失稳、井口倾覆等事故的问题,通过理论分析和模拟试验相结合的方法,对不同直径和安装深度的吸力桩进行了垂直度控制研究,提出了根据吸力桩结构尺寸和地层土体性质进行吸力桩深水油气建井垂直度控制的计算方法,并采用模拟试验进行了验证。结果表明:吸力桩直径、吸力桩下入深度、海底土层性质是影响吸力桩垂直度控制的主要因素;其他条件相同的工况下,吸力桩直径越小、下入深度越浅,对井口垂直度的控制要求越高;为了确保深水水下井口稳定,吸力桩井口倾角应不超过 6° 。

关键词: 吸力桩;深水油气井;水下井口;垂直度控制;模拟试验

Research on verticality control during suction pile penetration for deepwater oil and gas well construction

Zhang Minghe, Yang Jin, Li Jiahao, Fu Chao, Zhu Guojing, Wang Jiakang

(College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing))

Abstract: To address the problem that non-vertical installation of suction pile can easily lead to shallow soil instability and wellhead overturning, a study on verticality control of suction piles with different diameters and installation depths was conducted through a combination of theoretical analysis and simulation tests. A calculation method for verticality control of suction piles in deepwater oil and gas well construction was proposed based on the structural dimensions of the suction pile and the properties of the formation soil and was validated through simulation tests. The results show that the diameter of the suction pile, the penetration depth of the suction pile, and the properties of the seabed soil are the main factors affecting the verticality control of the suction pile. Under the same other conditions, a smaller diameter of the suction pile and a shallower penetration depth pose higher verticality control requirements on the wellhead. To ensure the stability of the deepwater seabed wellhead, the inclination angle of the suction pile wellhead shall not exceed 6° .

Key words: suction pile; deepwater oil and gas well; subsea wellhead; verticality control; simulation experiment

吸力桩技术作为一种新型深水油气建井技术,在挪威等国率先应用,并逐渐推广至全球^[1-2]。我国 2020 年在南海神狐海域的天然气水合物试采中,首次采用大直径吸力桩(直径 6.5 m,贯入深度 12 m,质量 96 t)结合表层建井、浅部定向造斜及动力导向技术,实现了日产量 2.87 万 m^3 (持续 30 d)的突破^[3]。然而,国内吸力桩设计仍处于起步阶段,缺乏系统的理论指导,导致设计偏保守,增加了制作、运输及安装成本。因此,优化吸力桩结构尺寸(如直径、长径比)以匹配地层参数和井口载荷,成为深水油气开发降本增效的关键。

现有研究主要围绕桩-土相互作用机理,针对不同荷载工况下的基础稳定性开展分析^[4-6]。在竖向承载特性方面,刘梅等^[7]通过试验与数值模拟证实,长径比显著影响基础的竖向承载力,其失效模式主要表现为大位移冲剪破坏。在水平承载特性方面,金书成等^[8]研究表明,长径比是控制水平极限承载力的关键参数,失稳时主要表现为桩-土挤压分离。

为提高基础性能,李大勇等^[9]和 Kan 等^[10]分别采用了裙式结构和宽浅式裙结构,并证实此类优化设计可显著提升水平承载力和抗弯性能。然而,增大基础尺寸虽能改善力学性能,但会显著增加施工成本,需进行综合优化。此外,海底土体参数作为影响基础稳定性的根本因素,其与吸力桩在下入过程中的相互作用机制仍需深入研究,尤其是针对非竖直安装工况。

基金项目: 中国石油大学(北京)科研基金项目(2462026XKBH002);国家重点研发计划项目(2022YFC2806110);国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点支持项目(U22B20126)

作者简介: 张明贺(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事海洋油气钻采研究。E-mail:Zmh@cup.edu.cn

通信作者: 杨进(1966—),男,教授,博士,主要从事石油工程和海洋油气工程研究。E-mail:yjin@cup.edu.cn

在吸力桩基础稳定性方面,刘书杰等^[11]和李舒展等^[12]针对深水吸力桩井口稳定性分别开展了物理模拟试验和数值模拟研究,提出了吸力桩基础稳定性计算和校核方法,证明了吸力桩基础在提高深水井口水平和竖直承载力方面的显著优势。刘书杰等^[13]和马文冠等^[14]分别针对单桩和复合型吸力桩基础安装过程承载力特性开展了模拟试验研究,提出可通过重力安装和吸力安装两个关键过程实现吸力桩的贯入,其中重力安装会产生较大的倾角,需要严格控制。季一帆等^[15-16]通过离心试验模拟非竖直状态下吸力桩基础的极限承载力,研究表明,倾斜程度对吸力桩基础的承载力影响显著,安装初期倾斜会产生偏心载荷,严重影响基础稳定性,导致安装倾角不断增大,诱发倾覆风险。

桩体结构参数、土体特性、安装工艺等是影响垂直度控制的关键参数,目前通过高精度监测方法,如采用“牛眼”气泡水平仪、水下机器人等,都可以实时调整井口倾角。但目前关于吸力桩基础在下入和回收过程中的垂直度控制及极限倾角设计仍缺乏系统的理论指导,本文通过理论分析与模型试验相结合的方法,综合考虑地层土体特性^[17-18]和吸力桩结构尺寸参数^[7,19-23],建立了非竖直工况下的贯入阻力计算模型,提出了倾斜条件下的基础失效模式判别准则,并结合模拟试验探讨了不同工况下吸力桩的承载特性及极限倾角,以期对深水吸力桩建井的垂直度控制提供参考。

1 吸力桩深水油气建井优势

目前南海深水油气建井方式主要采用喷射法,将表层导管作为水下井口的主要持力结构贯入海底浅层泥线以下 60~100 m,通过表层导管与周围土体的侧向摩擦力来提供水下井口结构的竖向载荷^[24]。采用喷射法建立水下井口对表层导管贯入深度设计有较高的要求,同时海底浅层土体性质差异也给表层导管的喷射安装带来了挑战^[25-26]。

吸力桩海底建井方法的主要优势为安装高效便捷,浅层土体参数适应性强,承载力高,抗弯性能强,井身结构优化空间大,作业可重复等。吸力桩安装无需大型设备,其通过泵吸排水形成负压使桩体自主下沉,省去传统打桩所需的巨型锤击设备,从而缩短了工期;该安装过程可精准控制且负压下沉过程可实时监测;此外,吸力桩通常采用薄壁钢筒结构,材料用量较传统桩基减少 30%~50%,且其承载能力强,通过桩体内外土体共同作用提供抗压、抗拔及抗侧向载荷能力,尤其适合承受深水复杂动态环境荷载;吸力桩技术适用水深范围广,可灵活应用于几十米至上千米的海水深度范围,适应未来深水、超深水油气勘探开发及作业需求^[27-28]。

2 吸力桩深水油气建井垂直度控制方法

2.1 吸力桩井口倾角的影响

如果贯入过程非竖直,桩体轴线与竖直方向存在倾角(图 1),其贯入阻力及动力分布将与垂直贯入时显著不同。基于静力平衡原理,建立吸力桩在非竖直条件下的受力平衡方程:

$$PS + G\cos\beta = F + N \tag{1}$$

$$G\sin\beta = W \tag{2}$$

式中: P 为桩体抽吸贯入产生的压差, kPa ; S 为桩体上端部面积, m^2 ; G 为桩体重力, kN ; β 为井口倾角, $(^\circ)$; F 为桩-土侧向摩擦力, kN ; N 为土体对吸力桩下端面的支撑力, kN ; W 为土体对吸力桩侧面的支撑力, kN 。

分析发现,在重力贯入阶段 $P=0$,若存在井口倾角 β ,则重力一部分作为倾斜下入的动力($G\cos\beta$),一部分用于对周围地层施加压力($G\sin\beta$)。吸力桩基础重力贯入阶段动力降低,同时由于桩-土间的压力增大,导致贯入阻力增大,使得该阶段的贯入深度降低。重力贯入阶段如果不控制井口倾角,倾角可能会在重力作用下增大,影响后续贯入过程。

在抽吸贯入过程中,压差 P 作用在吸力桩基础上端部,压力方向与吸力桩轴线方向相同。若桩体发生

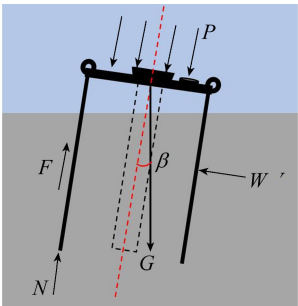


图 1 吸力桩基础井口倾角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wellhead inclination angle of a suction pile foundation

旋转,则旋转中心位于轴线倾斜方向一侧,不会增加桩体的倾角,相反会有一定的回拉作用,这主要取决于桩体直径、贯入深度、压差和土体性质等因素。

在吸力桩下入到预定深度后,承担上部井口系统载荷,若存在井口倾角 β (图 2),在水平环境载荷 H 作用下,其水平方向的受力平衡方程可表示为:

$$H = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) G_1 \sin \beta \tag{3}$$

式中: W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为桩体内壁、钻井管柱内壁、钻井管柱外壁、桩体外壁与周围土体作用产生的侧面支撑力, kN; G_1 为上部井口系统载荷, kN。

如果吸力桩基础非竖直安装,会导致井口载荷在筒壁与周围土体间产生附加压力作用,如果井口所受水平载荷较大,会产生平台井口失稳、倾覆的危险。由于地层土体各个方向压力相同,土体对吸力桩基础的支撑力求法与上述方法相同。

如果井口倾角过大,地层对吸力桩基础提供的水平分力降低,对侧壁土体施加的额外压力增加,会使得地层土体性质改变,增加浅层土体失稳及井口倾覆的风险。在设计过程中极限倾角的理论计算对工程安全有重要指导意义。

2.2 吸力桩井口极限倾角控制

吸力桩井口非竖直安装对井口稳定性构成较大威胁,针对上述分析,本文提出考虑土体性质、桩体尺寸、竖向载荷等条件下的极限倾角计算方法。

吸力桩水下井口重力安装阶段,井口倾角控制是建井的关键,此时基础下入地层深度浅,地层浅部松软土体难以有效限制和固定吸力桩基础(图 3)。此时根据下入动力与下入阻力的关系:

$$G \cos \beta = F + N \tag{4}$$

$$G \sin \beta \leq W \tag{5}$$

可得到重力贯入阶段允许倾角的极限值 β_1 :

$$\beta_1 \leq \arcsin \frac{W}{G} \tag{6}$$

分析发现在抽吸压差产生的压力垂直于吸力桩基础上端面时,压差全部转化为下入的动力,不会增大井口倾角,在此不做考虑。

当吸力桩贯入至预定深度后(图 4),其极限倾角的确定需综合校核上部井口系统重力载荷与环境最大水平载荷。

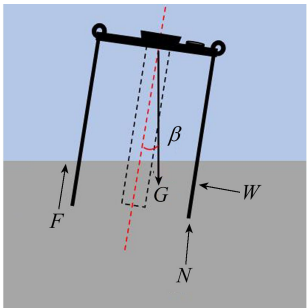


图 3 重力下入阶段的极限倾角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultimate inclination angle during gravity penetration stage

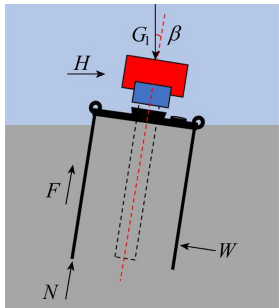


图 4 吸力桩贯入至预定深度后的极限倾角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ultimate inclination angle after suction pile penetrates to preset depth

由于吸力桩基础在小倾角工况下完全贯入海底地层后,能够提供充足的竖向承载力,极易满足式(7)的竖向平衡要求,因此竖向承载通常不作为确定极限倾角的控制条件。

$$G_1 \cos \beta \leq F + N \tag{7}$$

考虑在水平环境载荷条件下基础稳定性的要求,需满足:

$$F\cos\beta + G_1\sin\beta \leqslant W$$

(8)

解得:

$$\beta_2 \leqslant \arcsin \frac{W}{\sqrt{F^2 + G_1^2}} - \arccos \frac{F}{\sqrt{F^2 + G_1^2}}$$

(9)

则极限倾角为 β_1 和 β_2 最小值:

$$\beta = \min(\beta_1, \beta_2)$$

(10)

上述分析方法均考虑土体性质、桩体尺寸、井口载荷等,其中土体性质和桩体尺寸参数体现在侧向摩擦力 F 、土体对吸力桩下端面的支撑力 N 和土体对吸力桩侧面的支撑力 W 的分析计算中。

根据上述计算方法,在贯入过程中如果发现井口倾角出现增大的趋势或接近极限倾角,需要采取措施对倾角进行控制,可以采取水下机器人向桩内反向注水加压后上提桩体进行重新贯入,或者在贯入过程中利用水下机器人对吸力桩施加与井口倾角方向相反的拉力进行矫正。

2.3 旋转控制方法及措施

若吸力桩在贯入过程中出现旋转的情况,则需要进行吸力桩上提,并再次重新贯入。一般认为在吸力桩贯入过程中,没有安装井口工具,不会出现旋转的极限条件。如果地层中土体出现较大性质差异或出现局部贯入障碍,则可能出现旋转情况。

由于局部土体性质差异,导致旋转中心位于桩体下部与硬地层或硬石块的边缘,发生旋转倾覆会带来井口安装失败的严重后果。在重力贯入过程中,如果桩体由于地层硬度差异产生旋转,则需要减小重力贯入过程的速度,桩体下边缘与地层充分接触,保证贯入速度均匀,直至贯入地层硬度差异较小的深度后,适当增大重力贯入速度,或增加桩体上提次数,反复调整井口倾角,直至完成重力贯入过程。

在抽吸贯入过程中,如果出现了地层硬度差异,由于已贯入地层一定深度,周围土体对桩体旋转阻碍增大,此时需要控制抽吸压力,保证桩体以均匀的速度贯入地层。若井口倾角明显增大,则需要打压上提,并在水下机器人辅助控制井口倾角的条件下再次抽吸贯入^[17-20]。

3 模拟试验

3.1 试验原理与装置

采用室内模拟试验的方式来探索吸力桩基础在水平载荷作用下的位移失效破坏与初始井口倾角的关系。模拟试验装置示意图如图 5 所示。

在吸力桩下入到位后,可以模拟井口在水平载荷设计条件下的承载力和位移关系,通过带有滑轨的定滑轮组合可以调节滑轮位置,以确保井口受水平载荷作用(图 5),同时可以测量吸力桩水平载荷和位移的关系。

用于水下井口安装的吸力桩直径为 6 m、长 12 m,为了探索安装过程垂直度及稳定性,试验模型长度设置为 40 cm,与实际尺寸比为 1 : 30。试验中土体性质参数参考深水海底土质参数配置,土体基本参数如下:含水率 20.2%,相对密实度 0.667,土体比重 2.65,液限 25.6%,塑限 16.9%,液性指数 0.38,塑性指数 8.7。

3.2 试验过程与结果

吸力桩模型的直径采用 20、25、30、40 cm,贯入深度均为 40 cm,分别模拟长径比为 2.0、1.6、1.3、1.0 条件下的井口稳定性。分别测量模型井口倾角为 2°、4°、6°、8°、10°、12°、14°、16°、18°时,在拉力作用下产生 1 cm 位移的水平拉力(水平拉力方向与吸力桩基础倾斜方向相同),此时认为井口发生旋转破坏,水平承载力急剧降低。最大水平拉力与不同直径吸力桩模型井口倾角的变化关系如图 6 所示。

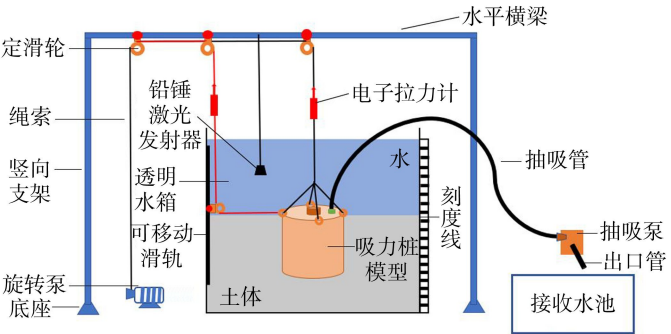


图 5 模拟试验装置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

通过分析发现,不同直径的吸力桩模型,井口发生 1 cm 位移条件下最大水平拉力随井口倾角的变化趋势相近:初始阶段最大水平拉力几乎不发生变化,随后加速下降,最后又趋于平缓。井口倾角小于 6°时,最大水平拉力变化幅度较小,在井口倾角约为 10°时,最大水平拉力降低幅度最大。随着吸力桩模型直径的增大,初始水平段变长,由于直径的增大导致倾角对水平承载力影响降低,同时水平拉力降低速率最大处的倾角也随之增大。研究发现,增大吸力桩模型的直径可以增强井口抵抗水平载荷的能力,降低垂直度控制要求。

在井口倾角约为 10°时,井口的水平载荷抵抗能力降低超过 10%,此时已难以满足深水建井的安全要求,所以设计时井口倾角要小于 10°,为了增加安全系数,不超过 6°为最佳,此时相对安全系数为 1.66。

为了验证试验数据的准确性,选取井口倾角为 10°的不同直径吸力桩模型的最大水平拉力测试数据进行验证,结果如图 7 所示。

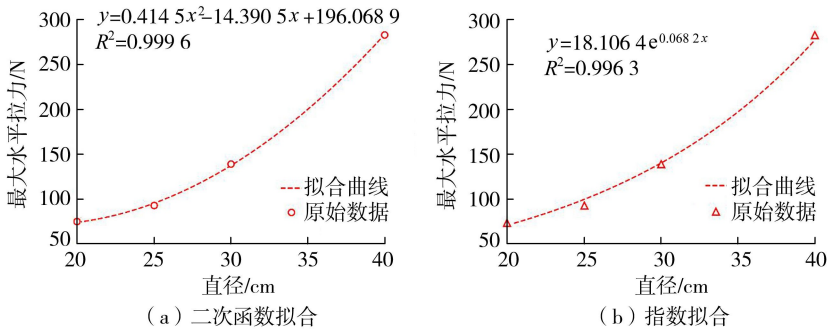


图 7 不同直径吸力桩模型井口 10°倾角下的最大水平拉力变化规律拟合

Fig. 7 Fitting of variation law of maximum horizontal pulling force for suction pile models with different diameters at an welhead inclination angle of 10°

采用拟合方法对试验的 4 个数据点进行拟合,分析发现采用二次函数和指数拟合方法可以满足较高的精度要求,其中二次函数拟合的决定系数更接近 1,为 0.9996(图 7(a))。从理论分析来看,吸力桩井口的承载力主要与管-土的接触面积正相关,接触面积又与吸力桩半径平方正相关,在直径较小时二次函数和指数函数的变化规律相似,所以可以解释此处指数拟合关系同样具有较高的精度,随着直径的增大,指数拟合的误差会逐渐增大。

选取吸力桩模型井口倾角为 0°、12°、18°的水平承载力曲线上具有变化特点的 3 组数据进行二次函数拟合验证,结果如图 8 所示,3 组数据拟合结果都满足精度要求,再次验证了理论分析和试验数据的准确性。

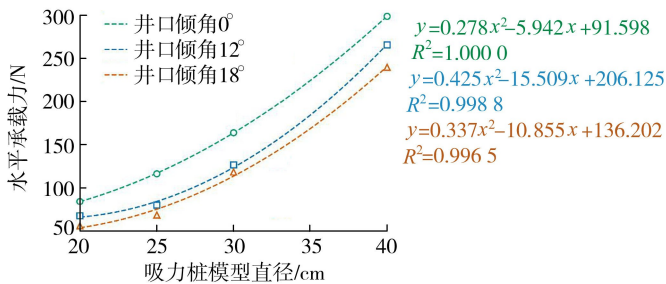


图 8 不同模型井口倾角下的水平承载力拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of horizontal bearing capacity for the model at different wellhead inclination angles

4 结 论

a. 构建了深水吸力桩井口安装过程中井口倾角的理论计算模型,地层土体性质、吸力桩直径和吸力桩的安装深度是影响井口垂直度控制的主要因素。提出了初始井口倾角和井口载荷条件下的吸力桩极限安装倾角的理论计算方法,并给出了针对地层非均质性等特殊情况下吸力桩发生旋转的控制方法和措施。

b. 通过模拟试验得出井口抵抗水平载荷的能力随井口倾角的增大而降低的变化规律,井口倾角小于 6° 时水平承载力变化不大,倾角约为 10° 时水平承载力下降最快,降低约10%。吸力桩深水油气建井的垂直度控制原则为井口倾角小于 6° 。

c. 井口水平承载力随吸力桩直径呈二次函数关系变化,验证了理论模型的正确性。该结论是基于小比尺模型试验得到的,虽然与实际工程会存在一定的差别,但是其普遍规律对于实际工程仍具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] Sivertsen T, Strand H. New well foundation concept, as used at a norwegian sea well[C]//SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-149584-MS.

[2] Mathis W, Strand H, Hollinger G. Case history: how to enable the horizontal development of shallow reservoirs[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2017: SPE-184667-MS.

[3] 天工. 我国海域天然气水合物第二轮试采成功[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 103. (Tian Gong. The second round of successful trial he second round of successful trial production of natural gas hydrate in China's sea area[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 103. (in Chinese))

[4] 周松望, 王建华. 组合桶形基础水平循环承载力模型试验[J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 106-111. (Zhou Songwang, Wang Jianhua. Model tests on bearing capacities of combined bucket foundations under lateral cyclic loads [J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(1): 106-111. (in Chinese))

[5] 张继生, 王军磊, 李浩然, 等. 海上浮式风机纵摇及其抑制研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 103-110. (Zhang Jisheng, Wang Junlei, Li Haoran, et al. Research progress on pitching and its suppression of floating offshore wind turbines[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 103-110. (in Chinese))

[6] 韦芳芳, 包淑珉, 邵盛, 等. 砂土中螺旋桩在斜拉荷载作用下的承载性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 77-83. (Wei Fangfang, Bao Shumin, Shao Sheng, et al. Bearing performance of helical piles in sand under oblique tensile load [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 77-83. (in Chinese))

[7] 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. (in Chinese))

[8] 金书成, 张永涛, 杨炎华, 等. 饱和砂土地基中吸力式桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 221-227. (Jin Shucheng, Zhang Yongtao, Yang Yanhua, et al. Research on horizontal ultimate bearing capacity of suction bucket foundation in saturated sand ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 221-227. (in Chinese))

[9] 李大勇, 冯凌云, 张雨坤, 等. 饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验: 承载力及变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2030-2037. (Li Dayong, Feng Lingyun, Zhang Yukun, et al. Model tests on lateral bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2030-2037. (in Chinese))

[10] Kan Changbin, Yang Jin, Yu, Xiacong, et al. Load bearing characteristics study on novel deepwater composite drilling conductor by simulation and experimental methods [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171: 289-301.

[11] 刘书杰, 黄熠, 张明贺, 等. 深水吸力桩井口稳定性研究[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 132-140. (Liu Shujie, Huang Yi, Zhang Minghe, et al. Study on the subsea wellhead stability of suction bucket foundation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 132-140. (in Chinese))

[12] 李舒展, 杨进, 朱国倬, 等. 深水钻井井口吸力桩稳定性计算和校核方法[J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(1): 13-24. (Li Shuzhan, Yang Jin, Zhu Guojing, et al. Stability calculation and verification method for conductor suction piles in deepwater drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(1): 13-24. (in Chinese))

[13] 刘书杰, 黄熠, 刘和兴, 等. 深水吸力桩建井过程及承载力特性的试验研究[J]. 石油机械, 2022, 50(3): 32-41. (Liu Shujie, Huang Yi, Liu Hexing, et al. Experimental study on well construction process and bearing capacity characteristics of deepwater suction pile [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(3): 32-41. (in Chinese))

[14] 马文冠, 邱旭, 刘鑫, 等. 海上风电桩-桶复合基础吸力安装特性研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 522-528. (Ma Wenguan, Qiu Xu, Liu Xin, et al. Research on installation characteristics of suction pile-bucket composite foundation for offshore wind turbines [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2025, 46(2): 522-528. (in Chinese))

[15] 季一帆, 谢立全, 黄文财. 倾斜状态下的吸力式基础极限承载力离心试验模拟[J]. 海洋科学前沿, 2019, 6(4): 128-135.

(Ji Yifan,Xie Liquan,Huang Wencai. The centrifuge experiments on maximum bearing capacity of the suction bucket under the state of inclination[J]. Advances in Marine Sciences,2019,6(4):128-135. (in Chinese))

[16] Zhang Puyang,Pang Yabo,Xu Yunlong,et al. Risk control in integrated leveling of multi-compartment bucket foundation with offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering,2025,337:121920.

[17] 严驰,李亚坡,袁中立. 土性参数对桶形基础竖向地基承载力影响的敏感性分析[J]. 水运工程,2009(1):155-160. (Yan Chi,Li Yapo, Yuan Zhongli. Sensitivity analysis of the effect of soil parameters on the vertical bearing capacity of bucket foundation[J]. Port & Waterway Engineering,2009(1):155-160. (in Chinese))

[18] 贺瑞,朱元张,张继生,等. 地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):66-76. (He Rui,Zhu Yuanzhang, Zhang Jisheng, et al. Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):66-76. (in Chinese))

[19] 刘同芳,吴跃东,周云峰,等. 基于透明黏土的取土器贯入扰动变形试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):77-83. (Liu Tongfang, Wu Yuedong, Zhou Yunfeng, et al. Experimental study on disturbance deformation of soil sampler penetration based on transparent clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):77-83. (in Chinese))

[20] 贺瑞,金煜,吉吉,等. 海上风机大直径嵌岩单桩非线性动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):121-130. (He Rui, Jin Yu, Ji Ji, et al. Nonlinear dynamic characteristics of large diameter rock-socketed monopile for offshore wind turbine[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(1):121-130. (in Chinese))

[21] 刘振纹,王建华,秦崇仁,等. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):691-695. (Liu Zhenwen, Wang Janhua, Qin Chongren, et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(6):691-695. (in Chinese))

[22] 曹卫平,李贺,陶鹏. 水平荷载-扭矩耦合作用下斜桩承载变形特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):44-49. (Cao Weiping, Li He, Tao Peng. Numerical simulation of bearing and deformation behavior of batter piles under combined horizontal load and torque[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):44-49. (in Chinese))

[23] Liu Haoyuan,Kaynia A M. Monopile responses to monotonic and cyclic loading in undrainedsand using 3D FE with SANISAND-MSu[J]. Water Science and Engineering,2022,15(1):69-77.

[24] 李文轩,曹永勇. 海上筒型基础的筒壁土压力计算[J]. 水利水运工程学报,2018(3):65-70. (Li Wenxuan,Cao Yongyong. Earth pressure calculation for bucket wall of offshore bucket foundation[J]. Hydro-Science and Engineering,2018(3):65-70. (in Chinese))

[25] 杨进. 深水油气井表层导管下入深度计算方法[J]. 石油学报,2019,40(11):1396-1406. (Yang Jin. Calculation method of surface conductor setting depth in deepwater oil and gas wells [J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(11):1396-1406. (in Chinese))

[26] 张辉,高德利,唐海雄,等. 深水导管喷射安装过程中管柱力学分析[J]. 石油学报,2010,31(3):516-520. (Zhang Hui,Gao Deli,Tang Haixiong, et al. Tubular mechanics in jetting operation of conductor under deepwater condition [J]. Acta Petrolei Sinica,2010,31(3):516-520. (in Chinese))

[27] 管志川,苏堪华,苏义脑. 深水钻井导管和表层套管横向承载能力分析[J]. 石油学报,2009,30(2):285-290. (Guan Zhichuan,Su Kanhua,Su Yinao. Analysis on lateral load-bearing capacity of conductor and surface casing for deepwater drilling [J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(2):285-290. (in Chinese))

[28] 陈国明,李家仪,畅元江,等. 深水油气水下井口系统疲劳损伤影响因素[J]. 石油学报,2019,40(增刊2):141-151. (Chen Guoming, Li Jiayi,Chang Yuanjiang, et al. Influencing factors for fatigue damage of underwater wellhead system of deepwater oil and gas [J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(S2):141-151. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-10 编辑:熊水斌)