

砂土中桩靴贯入深度对自升式风电安装船水平承载特性影响的试验研究

王凯¹, 武宗豪¹, 韩若朗¹, 乐丛欢^{2,✉}, 麦志辉³, 吴韩⁴

(1. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082;

2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

3. 广东精细海洋工程股份有限公司, 广东 佛山 528000;

4. 广东联塑精钢科技有限公司, 广东 佛山 528226)

摘要: [目的] 自升式风电安装船作为海上风电开发中的重要施工设备, 研究其在位状态下的承载性能对于保障风电安装船作业安全尤为重要。[方法] 文章以自升式安装船为研究对象, 结合室内模型试验和有限元法开展了均质砂土中4种不同的桩靴贯入深度下的水平承载性能以及周围土压力变化规律研究。[结果] 研究表明: 随着贯入深度的增加, 自升式安装船的水平承载力呈近似线性增长趋势, 贯入深度为10 cm较贯入深度4 cm水平承载力增加了38.02%, 其对应的水平位移同样呈现增加的趋势, 在水平荷载作用下, 桩靴的承载模式表现为临载侧桩靴受压, 背载侧桩靴受拉。桩靴表面同侧土压力变化规律一致, 当贯入深度为10 cm时, 临载侧桩靴底的土压力变化最大值为38.37 kPa, 较贯入深度为4 cm时增大了126.2%。且临载侧桩靴下表面和背载侧桩靴上表面的土压力变化较大。[结论] 水平荷载作用下自升式安装船的受力模式为拉压模式, 且砂土中桩靴贯入深度的增加, 能显著提高水平承载性能, 为保障风电安装船的安全和作业能力, 需保障桩靴的贯入足够的深度。

关键词: 砂土; 自升式安装船; 贯入深度; 水平承载特性; 有限元模型

中图分类号: TK89; U661.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0001-10

开放科学(资源服务)二维码:



Model Test Study on the Influence of the Spudcan Penetration Depth on the Horizontal Bearing Characteristics of Jack-Up Vessel for Wind Turbine Installation in Sandy Soil

WANG Kai¹, WU Zonghao¹, HAN Ruolang¹, LE Conghuan^{2,✉}, MAI Zhihui³, WU Han⁴

(1. School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

3. Guangdong Keen Offshore Engineering Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China;

4. Guangdong Lesso Keen Science and Technology Co., Ltd., Foshan 528226, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] As an important construction equipment in the development of offshore wind power, studying the bearing performance of the jack-up vessel for wind turbine installation in the in-situ state to ensure its operation safety is of great significance. [Method] In this paper, taking the jack-up installation vessel as the research object, the horizontal bearing performance of the jack-up installation vessel and the variation law of the surrounding earth pressure at four different penetration depths of spudcans in homogeneous sandy soil were studied by combining with the indoor model tests and finite element method. [Result] The results show that with the

收稿日期: 2023-05-15 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 广东省促进经济发展专项基金“海上风电综合利用平台研制及示范应用”(粤自然资源合[2022]23号); 广东省基础与应用基础研究基金委, 海上风电联合基金项目-重点项目“海上漂浮式风电与海洋牧场融合关键技术及其生物适应性研究”(2022B1515250005)

increasing of the penetration depth, the horizontal bearing capacity of the jack-up installation vessel is on an approximate linear growth trend. The penetration depth of 10 cm led to an increase of the horizontal bearing capacity by 38.02% compared with 4 cm penetration depth, and the corresponding horizontal displacement also show an increasing trend. Under the action of horizontal loads, the bearing mode of spudcans is characterized by compression of spudcans on the loading side and tension of spudcans on the non-loading-side. The pressure change law of the soil on the surface of spudcans is the same. At the penetration depth of 10 cm, the maximum variation in soil pressure at the bottom of spudcans on the loading side is 38.37 kPa, which increased by 126.2% compared to the penetration depth of 4 cm. In addition, significant variations in soil pressure are observed on the lower surface of the loading-side spudcans and the upper surface of the non-loading-side spudcans. **[Conclusion]** Under the action of horizontal load, the force mode of the jack-up installation vessel is the tension-compression mode, and increasing the penetration depth of spudcans in sandy soil can significantly enhance the horizontal bearing capacity. Therefore, in order to ensure the safety and operational capability of the wind turbine installation vessel, it is necessary to ensure sufficient penetration depth of spudcans.

Key words: sandy soil; jack-up installation vessel; penetration depth; horizontal bearing characteristics; finite element model

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着国内海上风电场建设进程的提速,对专业风电安装船的需求日益提高。目前,海上风电安装船多采用自升式安装船^[1]。自升式安装船结构与自升式钻井平台类似,多采用三腿或四腿型自升式桩腿结构,通过液压升降系统实现自升式安装船升降。近年来,海上风电逐渐由浅海走向深远海,风电机组容量不断提升,加上较为恶劣的海上作业环境,对风电安装船作业状态下的吊装能力、作业水深和承载性能提出了更高的要求^[2-3]。新一代的风电安装船已具备了运输、自航、自升、起重、动力定位等集成功能^[4]。

自升式安装船每根桩腿下方设置有独立桩靴,大尺寸的桩靴可以增加海床的支承面积从而减少桩腿的贯入深度。目前国内外学者对自升式平台桩靴开展了一系列的研究^[5-7],多集中于插拔桩过程分析^[8-9]、二次插桩时的滑移荷载分析^[10-12]以及插拔桩对邻近基础的影响方面^[13-15]。另外,在桩靴的承载性能上取得了一定的研究成果。Zhang 等^[16]基于自升式安装船在插桩后土体完全回流的假定,建立了均质黏土地基中桩靴基础的复合承载力包络面预测公式;Wang 等^[17]通过有限元的方法分析了单一荷载和复合荷载作用下桩靴承载力,重点分析了桩靴埋深和土体不均匀性对承载力的影响;陈洋彬等^[18]通过有限元分析了弱超固结粘土中桩靴贯入形成的上部孔洞对承载力的影响,提出了考虑孔洞影响的桩靴复合承载力包络面预测公式。现有的研究成果多基

于独立桩靴或是传统的自升式钻井平台^[19],对于自升式安装船,尤其是自升式安装船整体承载性能的相关研究较少。

风电安装船在进行安装作业时受风浪流等环境因素的影响较大,而海上风机安装对精度的要求较高,因此安装船在位状态下的水平承载性能是评估风电安装船安全和作业能力的重要因素之一。文章基于室内土槽试验,研究对自升式安装船的水平承载性能,重点分析桩靴贯入深度对安装船水平承载力和桩靴周围土压力变化的影响规律。

1 模型试验

1.1 试验模型

试验在长×宽×高=2 m×2 m×1 m 的模型试验土槽中进行,自升式安装船试验模型由上部船体、桩腿以及桩靴 3 个部分组成。试验模型尺寸具体参数如表 1 所示。

表 1 自升式安装船试验模型尺寸

Tab. 1 Specific dimensions of the test model of the jack-up installation vessel

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
船体型长	945	桩靴高度	30
船体型宽	433	桩靴宽度	118
船体型深	76	桩靴长度	129
桩腿长度	867	桩靴中心圆孔直径	4

自升式安装船模型实物如图1所示, 为保证每次试验土样达到充分饱和状态, 土箱内部设置进排水系统。如图2所示, 水流从土体底部灌入渗流而上直到淹没整个土体并达到指定的水深, 为减小对土体扰动, 进水过程中尽量减小水流速度。图3为桩靴结构示意图, 图3(a)为桩靴实物模型图, 图3(b)为桩靴的尺寸示意图。

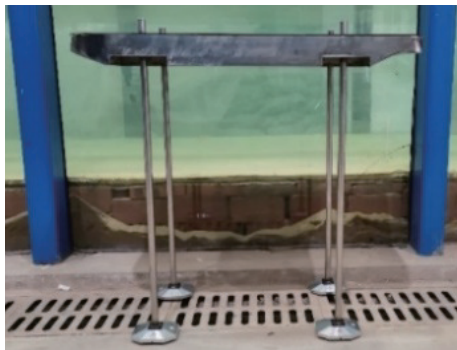


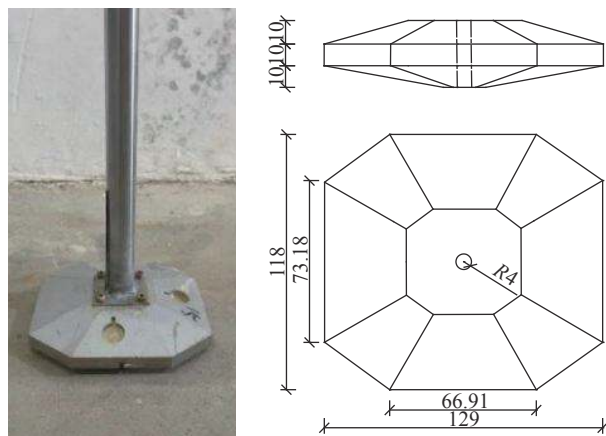
图1 自升式安装船试验模型

Fig. 1 Test model of jack-up installation vessel



图2 土槽内部进排水系统

Fig. 2 Water inlet and drainage system inside the soil box



(a) 桩靴模型

(b) 桩靴模型尺寸(单位: mm)

图3 桩靴结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spudcan structure

1.2 土质参数

本次试验采用福建标准砂, 通过一系列室内土工试验得到基本砂土参数, 如表2所示, 颗粒级配曲线如图4所示。

表2 砂土参数

Tab. 2 Parameters of the sandy soil

参数	数值
相对密实度	0.58
弹性模量/MPa	18
粘聚力/kPa	13.2
内摩擦角/(°)	32.5
最大干密度/[g·(cm) ⁻³]	1.50
最小干密度/[g·(cm) ⁻³]	1.28
比重/%	2.42
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	0.039

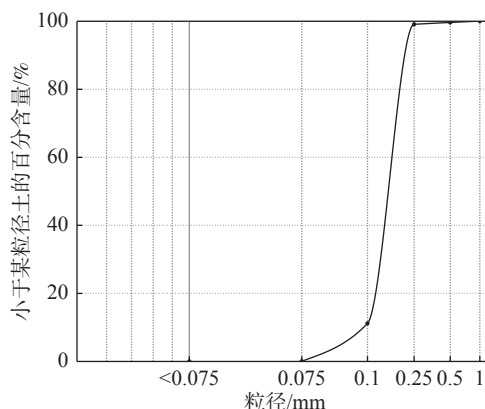


图4 砂土颗粒级配曲线

Fig. 4 Gradation curve of sandy soil particles

筛分试验采用 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm 和 0.075 mm 的细筛对试验砂土开展了筛分试验。将各粒组含量百分比绘成如图4所示级配曲线, 通过级配曲线判定该试验用土为砂土。由级配曲线可知, 试验砂土 $D_{10}=0.09$ mm, $D_{30}=0.15$ mm, $D_{60}=0.175$ mm, 通过公式(1)和公式(2)分别计算得到砂土的不均匀系数为 1.94, 曲率系数为 1.43, 由此判定试验砂土为级配连续性较好的均质砂土。

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.175}{0.09} = 1.94 \quad (1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} = \frac{0.15^2}{0.175 \times 0.09} = 1.43 \quad (2)$$

1.3 仪器布置

图5为试验加载测量装置布置情况, 试验过程

通过水平推杆在重心位置施加水平方向的外荷载,直至模型倾覆达到极限状态,在加载过程中,通过船体顶部的倾角仪读数确保各工况下模型的加载角度相同。

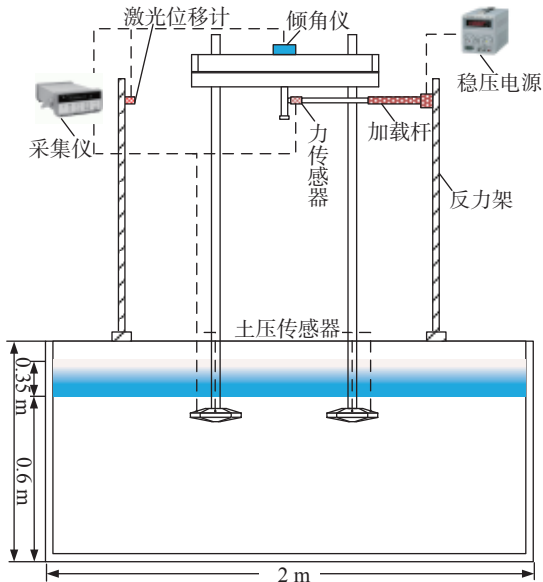


图 5 试验加载测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test loading and measurement device

采集设备采用威肯德 WKD3840 应变采集仪,采样频率为 10 Hz。用到的传感器主要有:

- 1) 土压力盒: 用于测量桩靴表面不同位置的土压力分布,量程为 0~50 kPa。
- 2) 激光位移传感器: 用于测量模型加载过程中的位移,量程为 ± 200 mm。
- 3) 拉线位移传感器: 测量静力触探试验中桩靴的贯入深度,量程为 0~500 mm。
- 4) 倾角仪: 用于确认在加载初始阶段自升式安装船的水平度,灵敏度为 0.01°。
- 5) 力传感器: 量程 0~300 kg,精度 0.03%,用于测量加载过程中的水平荷载。

为监测自升式安装船在水平荷载作用下桩靴周围土压力变化,在桩靴模型表面对称布置了 16 个土压力盒,具体布置以及测点编号如图 6 所示,依次将桩靴命名为 A、B、C、D 号桩靴,其中 1 号和 3 号位于同侧,2 号和 4 号位于同侧,每个桩靴上嵌有 X-1、X-2、X-3、X-4(X 为桩靴编号)4 个土压计,其中, X-1 和 X-2 位于底部, X-3 和 X-4 位于顶部。由于自升式安装船具有对称性,文章仅对 A 号和 B 号桩靴表面土压力进行对比分析。

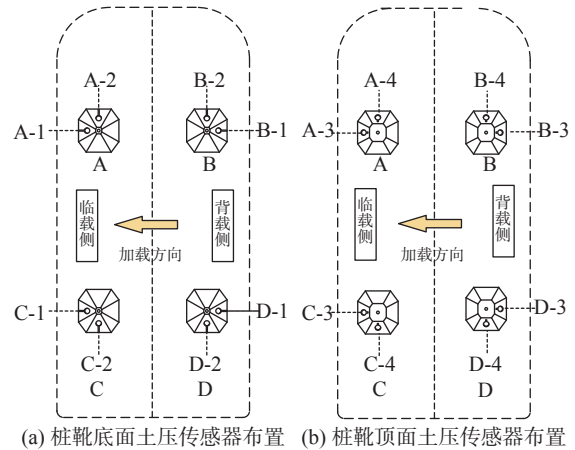


图 6 桩靴表面土压计布置

Fig. 6 Layout of the soil pressure gauge on the spudcan surface

1.4 试验方案

为研究桩靴在不同的贯入深度下自升式安装船的极限水平承载力以及桩靴周围土压力的分布情况,设置了 4 种不同的贯入深度工况,如表 3 和图 7 所示。首先进行试验用土制备养护,采用落砂法将砂土均匀地洒落在土槽内,后续试验展开前需要对土槽内的砂土进行翻动,确保每次试验砂土的密实度保持相同。砂土平整后从注水管内向土槽内自下而上注水,使得水从砂土下部逐渐渗透直至越过砂土表面,注水结束后对砂土进行超过 24 h 的静置养护,得到完全饱和的试验砂土。为了确保每次试验的砂

表 3 试验工况

Tab. 3 Test conditions

工况	贯入深度/cm
1	4
2	6
3	8
4	10

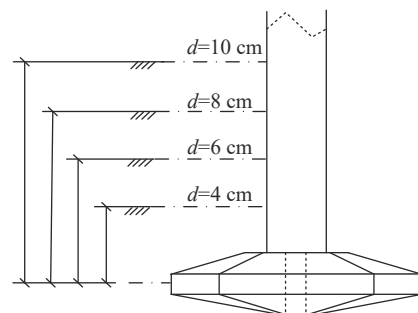


图 7 桩靴贯入深度示意图

Fig. 7 Schematic diagram of spudcan penetration depth

土相对密实度在允许的误差范围内, 试验前需要对砂土进行 CPT 测试。

试验过程中通过水平加载杆沿船体横向进行加载, 加载速度为 0.27 mm/s, 加载点设置在模型重心位置, 试验过程中监测倾角仪读数, 当安装船产生了 10° 倾角时, 模型基本失稳, 终止加载。

1.5 有限元模型

1.5.1 有限元模型

文章采用 ABAQUS 有限元软件建立自升式安装船的三维有限元模型, 如图 8 所示, 模型与试验采取 1:1 的比例建立。地基土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 其参数设置与物理模型试验保持一致。地基土体采用长×宽×高=2 m×2 m×1 m 的长方体, 可以忽略边界条件对试验的限制, 土体底面和侧面分别施加全固定约束和水平约束, 设置桩靴与土体的接触时选择刚度大的桩体作为主面、土体作为从面, 桩靴与四周土体的接触方式设置为摩擦接触, 基础面砂土与桩靴的摩擦系数根据参考值 0.25~0.45, 选择设定为摩擦系数为 0.3。

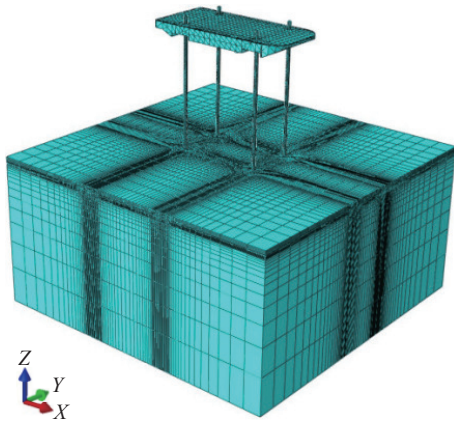


图 8 计算模型图

Fig. 8 Diagram of the calculation model

1.5.2 承载力标准

采用位移控制法来对自升式安装船进行水平加载, 加载点与试验相同均位于船体模型下方 8 cm 处, 水平加载直至基础处于极限状态。

文章参考 Villalobos^[20] 的极限承载力确定方法来计算有限元结果。如图 9 所示, 在位移荷载曲线弹性阶段起点和塑性阶段终点处分别作切线交于一点, 然后过交点作 1 条水平直线与曲线相交于一点, 则水平直线与曲线的交点即为基础极限状态对应的点, 其对应的荷载即为自升式安装船的极限承载力。

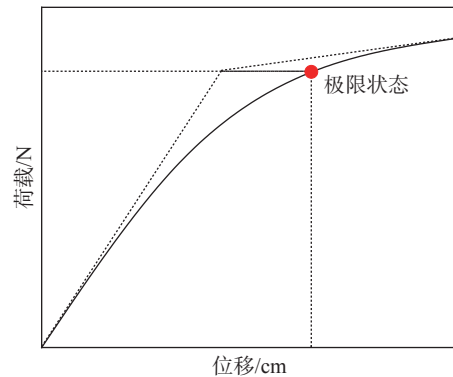


图 9 极限承载力确定标准

Fig. 9 Standard for determining the ultimate bearing capacity

2 试验结果与讨论

2.1 水平承载力

图 10 为不同贯入深度下的自升式安装船的位移荷载曲线, 图 11 和图 12 分别为不同贯入深度下

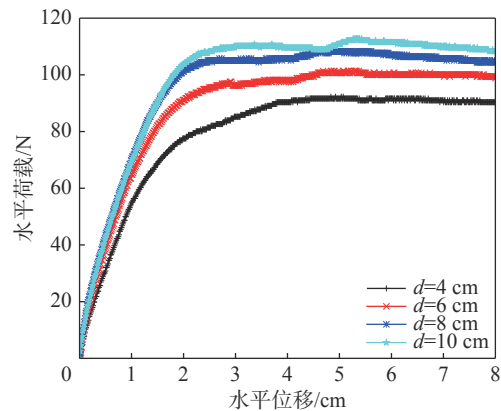


图 10 不同贯入深度下位移荷载曲线

Fig. 10 Displacement-load curve at different penetration depths

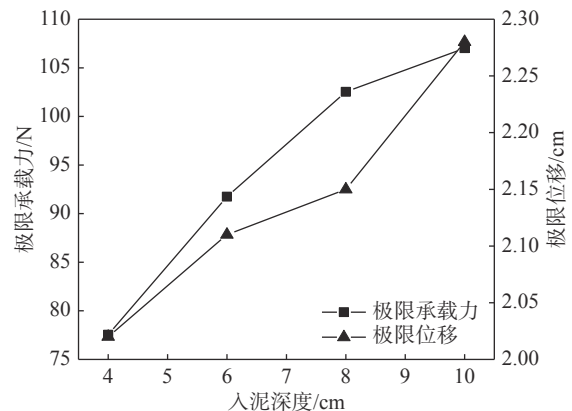


图 11 不同贯入深度下的水平承载力及其对应的极限位移
Fig. 11 Horizontal bearing capacity and its corresponding ultimate displacement at different penetration depths

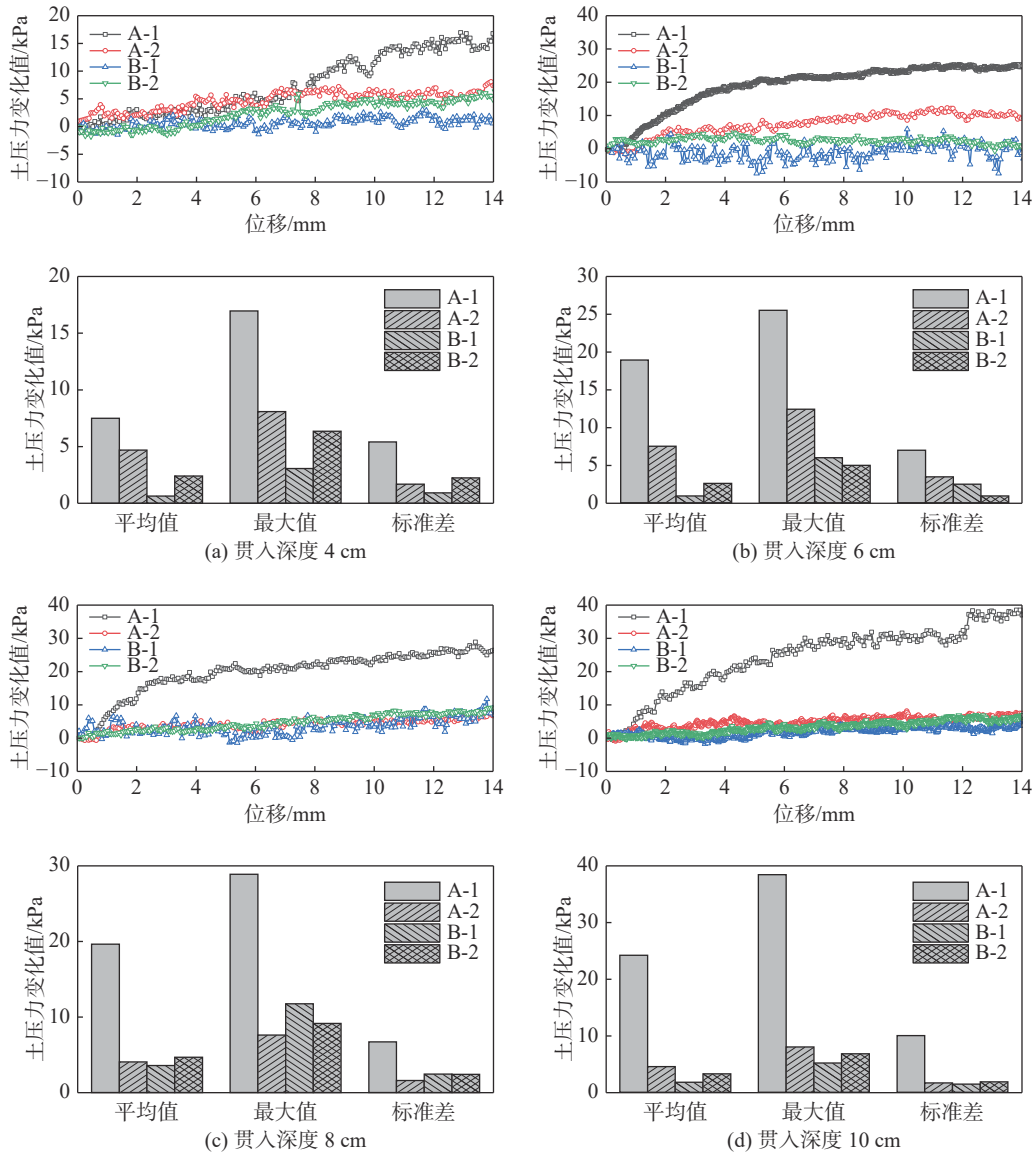


图 12 不同贯入深度下桩靴底部周围土压力变化

Fig. 12 Changes of soil pressure around the bottom of the spudcan at different penetration depths

的极限承载力和极限承载力对应位移的对比结果。由图可知,自升式安装船在砂土中的水平极限承载力随桩靴贯入深度的增大呈增长的趋势,与贯入深度为 4 cm 相比,贯入深度为 6 cm、8 cm、10 cm 时的水平极限承载力分别增加 18.31%、32.23%、38.02%。极限承载力对应的水平位移同样呈现增加的趋势,当贯入深度为 6 cm、8 cm、10 cm 时,较贯入深度为 4 cm 时的水平极限承载力对应的水平位移分别增加 4.46%、6.44% 和 12.87%。

2.2 土压力变化

2.2.1 桩靴底部土压力变化

图 12 为桩靴不同贯入深度下, A 和 B 桩靴底部

土压力分布随模型重心水平位移变化的曲线及相应的统计值。其中 A-1 和 A-2 测点位于临载侧桩靴 A 的底部, B-1 和 B-2 测点位于背载侧桩靴 B 的底部,背载侧桩靴的 B-1 测点和 B-2 测点的土压力变化幅值要小于临载侧桩靴 A-1 和 A-2 测点。随着水平位移(荷载)的增加,位于临载侧桩靴外边缘 A-1 测点土压力变化幅值明显大于其他测点,而位于背载侧桩靴外边缘的 B-1 测点土压力变化幅值最小。

图 13 为不同桩靴贯入深度下, A 和 B 桩靴底部各测点的土压力变化对比图。由图可知, A-1 测点的土压力变化明显大于其余几个测点,且随着贯入深度的增大, A-1 测点土压力变化呈现明显的增大的趋

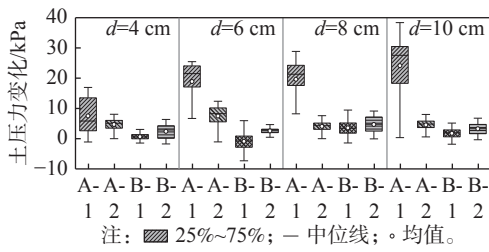


图 13 不同贯入深度下桩靴底部周围土压力变化对比
Fig. 13 Comparison of soil pressure changes around the bottom of the spudcan at different penetration depths

势,其余各测点土压力的变化趋势不明显。当贯入深度为 10 cm 时, A-1 测点的土压力变化最大值为 38.37 kPa,较贯入深度为 4 cm 时增大了 126.2%;当

贯入深度为 4 m 时在水平荷载作用下背载侧桩靴 B-1 和 B-2 测点土压力均出现了负值,即此时的桩靴 B 处于受拉状态,桩靴底部和土体出现了大范围的脱开;当贯入深度为 6 m 时仅 B-1 测点土压力出现了负值说明此时桩靴 B 也处于受拉状态,但此时的桩靴底部与土体的脱开面积明显减小。随着贯入深度的增加,测点 B-1 的土压力基本大于 0,桩靴底部与土体尚未发生脱开。

2.2.2 桩靴顶部土压力变化

图 14 为不同贯入深度下桩靴顶面土压力最大值随重心水平位移的变化曲线及其统计结果。其中, A-3 和 A-4 测点位于临载侧桩靴的顶部, B-3 和 B-4

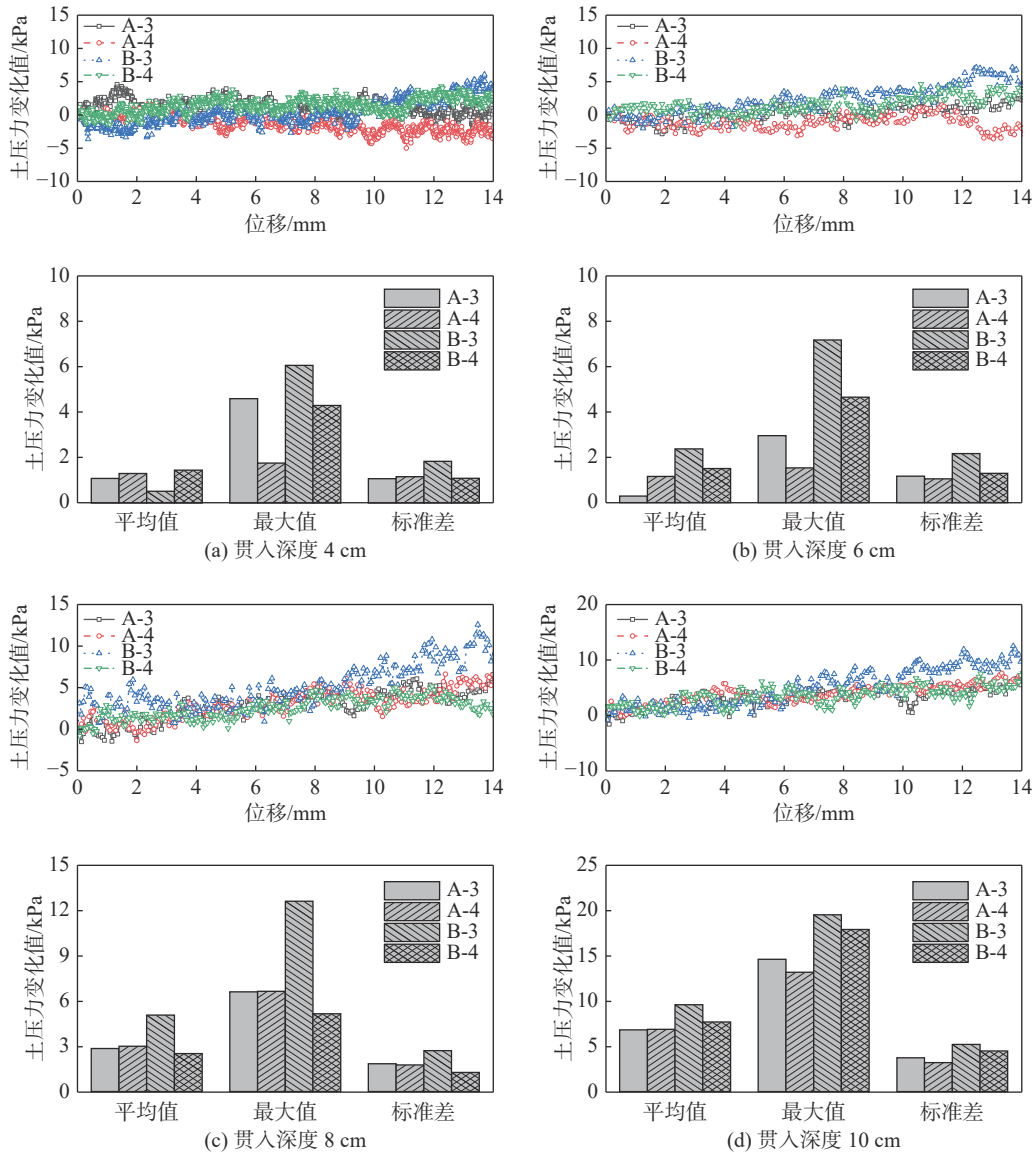


图 14 不同贯入深度下桩靴顶部周围土压力变化
Fig. 14 Changes of soil pressure around the top of the spudcan at different penetration depths

测点位于背载侧桩靴的顶部,在水平荷载的作用下,位于临载侧桩靴上表面的 A-3 测点和 A-4 测点所测得的土压力变化值较小,而位于背载侧桩靴顶部的 B-3 测点和 B-4 测点所测得的土压力变化略大。当桩靴贯入深度为 4 cm 时,水平承载力及与其对应的位移较小,桩靴底部各土压力测点的变化值也较小。

图 15 为不同贯入深度下桩靴顶部土压力变化的对比图。由图可知,在相同工况下,背载侧桩靴上表面的 B-3 测点所测得的土压力变化值略大于其余测点,且当贯入深度为 10 cm 时,土压力变化最大值为 19.49 kPa,较贯入深度为 4 cm 时增加 221%,贯入深度对临载侧桩靴顶部土压力的影响较大。

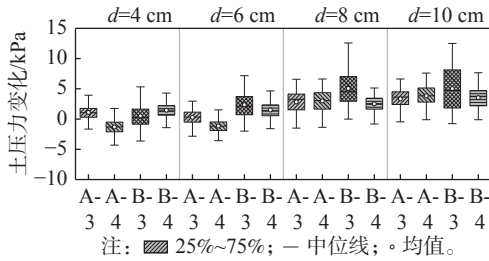


图 15 不同贯入深度下桩靴顶部周围土压力变化对比
Fig. 15 Comparison of soil pressure changes around the top of the spudcan at different penetration depths

2.3 有限元计算

2.3.1 承载力验证

对不同工况的有限元模型进行水平加载后,得到加载点位移与对应的水平荷载的荷载-位移曲线,有限元与试验结果的对比图如图 16 所示,整体上看二者趋势相近,对于 4 组不同贯入深度下的水平极限承载力,二者最大误差为 6.07%,平均误差为 2.70%,通过以上对比可以验证试验结果的可靠性。

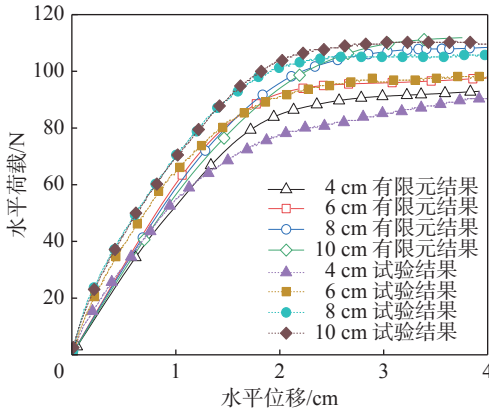
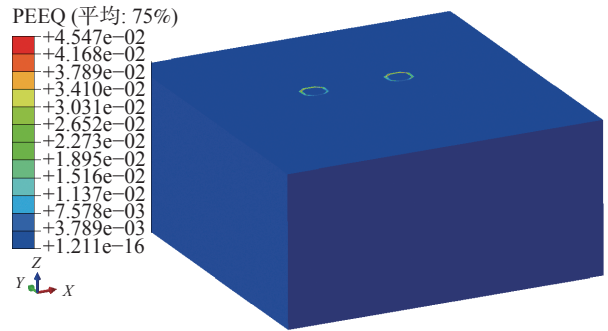


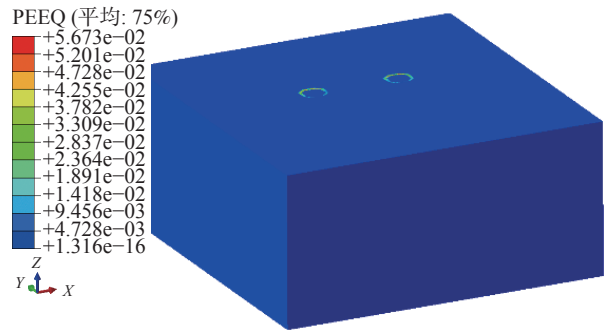
图 16 有限元结果与物理试验结果的对比
Fig. 16 Comparison of FE results with physical test results

2.3.2 等效塑性应变云图

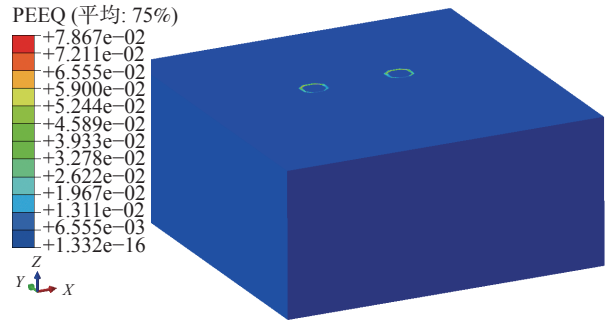
图 17 为在位移加载方式下不同贯入深度对应



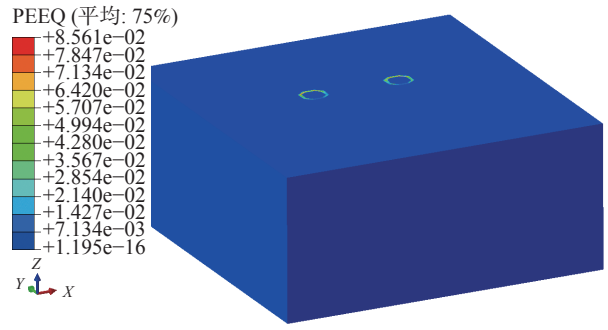
(a) 贯入深度 4 cm



(b) 贯入深度 6 cm



(c) 贯入深度 8 cm



(d) 贯入深度 10 cm

图 17 不同贯入深度下地基土体等效塑性应变云图

Fig. 17 Equivalent plastic strain nephogram of foundation soil at different penetration depths

的地基土体等效塑性应变云图。由上图可知,不同贯入深度的自升式安装船对地基土体的作用规律类似,桩靴底部土体的形变主要集中在桩靴受压一侧。随着贯入深度的增大,土体的塑性应变逐渐增大,和试验的土压力变化相吻合。

3 结论

针对自升式安装船在均质砂土中的水平承载力以及荷载作用下的桩靴周围土压力变化情况开展了土槽试验,探讨了桩靴不同的贯入深度对基础承载力的影响规律,并分析了桩靴上、下表面周围土压力分布以及变化规律,得到主要结论如下:

1)自升式安装船的水平承载力随着贯入深度的增加呈现增加的趋势,贯入深度为10 cm较贯入深度为4 cm时的水平承载力增加38.02%;当贯入深度为6 cm、8 cm、10 cm时,较贯入深度为4 cm时的水平极限承载力对应的水平位移分别为增加4.46%、6.44%和12.87%。

2)随着贯入深度的增大,桩靴各测点所测得的土压变化的最大值呈现增大的趋势。当贯入深度为10 cm时,临载侧桩靴底部A-1测点的土压力变化最大值为38.37 kPa,较贯入深度为4 cm时增大了126.2%;相同工况下,位于临载侧桩靴底部外边缘的土压力变化值更大,且试验过程中土压力变化范围在0~50 kPa之间。从土压力变化情况可知,自升式安装船在水平荷载作用下,其承载模式表现为临载侧桩靴受压,背载侧桩靴受拉。当贯入深度较浅时,背载侧桩靴与底部土体发生脱开,但随着贯入深度的增加,其脱开面积逐渐减小。

参考文献:

- [1] 郭凯,张秀琦,曹斌,等.海上风力发电可靠性影响因素分析及提升方法[J].*内蒙古电力技术*,2022,40(5):16-21. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0075.
GUO K, ZHANG X Q, CAO B, et al. Analysis of factors affecting reliability of offshore wind power and improvement methods [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2022, 40(5): 16-21. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0075.
- [2] 张力,黄钺,王洪庆,等.海上风电嵌岩桩水平承载力特性数值模拟研究[J].*南方能源建设*,2021,8(3):34-43. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.005.
ZHANG L, HUANG Y, WANG H Q, et al. Numerical simulation research on the horizontal bearing capacity of rock-socketed piles for offshore wind turbines [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 34-43. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.005.
- [3] 张强,葛畅,沈晓雷,等.竹根沙海域单桩基础竖向承载力特性数值模拟研究[J].*南方能源建设*,2021,8(3):44-50. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.006.
ZHANG Q, GE C, SHEN X L, et al. Numerical simulation research on the vertical bearing capacity of the single pile foundation in Zhugensha sea area [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 44-50. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.006.
- [4] 张海亚,郑晨.海上风电安装船的发展趋势研究[J].*船舶工程*,2016,38(1):1-7,30. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2016.01.001.
ZHANG H Y, ZHENG C. Developing trend analysis of wind turbine installation vessel [J]. *Ship engineering*, 2016, 38(1): 1-7,30. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2016.01.001.
- [5] 黄瑛.自升式平台插拔桩及二次插桩数值分析[D].大连:大连理工大学,2018.
HUANG Y. Numerical study of the penetration and extraction and the reinstallation of spudcans of jack-ups [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [6] 刘阳.自升式平台滑移问题及对平台结构影响分析[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
LIU Y. Jack-up sliding and its influence on platform structure [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [7] 刘智慧.钻孔法减弱自升式平台滑移和穿刺风险的研究[D].上海:上海海事大学,2021.
LIU Z H. Investigation on perforation drilling to mitigate on the sliding risk during spudcan installation close to footprints and punch-through potential in sand overlying soft clay [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2021.
- [8] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. SS: Jack-up rig technology-new mechanism-based design approach for spudcan foundations on stiff-over-soft clay [C]//Anon. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 4-7, 2009. Houston: OTC, 2019. DOI: 10.4043/19907-MS.
- [9] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Effect of strain rate and strain softening on the penetration resistance of spudcan foundations on clay [J]. *International journal of geomechanics*, 2009, 9(3): 122-132. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:3(122).
- [10] GAUDIN C, CASSIDY M J, BIENEN B, et al. Recent contributions of geotechnical centrifuge modelling to the understanding of jack-up spudcan behaviour [J]. *Ocean engineering*, 2011, 38(7): 900-914.
- [11] HU P, WANG D, CASSIDY M J, et al. Predicting the resistance profile of a spudcan penetrating sand overlying clay [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2014, 51(10): 1151-1164. DOI:

- 10.1139/cgj-2013-0374.
- [12] HOSSAIN M S, STAINFORTH R. Perforation drilling for easing spudcan-footprint interaction issues [J]. *Ocean engineering*, 2016, 113: 308-318. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.01.002).
- [13] 郭东, 王建华, 范怡飞. 桩靴贯入黏土层时邻近桩挤土压力分析 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(11): 2061-2070. DOI: [10.11779/CJGE201911011](https://doi.org/10.11779/CJGE201911011).
GUO D, WANG J H, FAN Y F. Soil pressures on pile shaft due to spudcan penetration in clay [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2019, 41(11): 2061-2070. DOI: [10.11779/CJGE201911011](https://doi.org/10.11779/CJGE201911011).
- [14] 范怡飞, 王建华. 考虑桩靴贯入对邻近群桩效应影响的分析方法 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2360-2368. DOI: [10.16285/j.rsm.2019.1713](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1713).
FAN Y F, WANG J H. Method to analyze the effect of spudcan penetration on an adjacent pile group [J]. *Rock and soil mechanics*, 2020, 41(7): 2360-2368. DOI: [10.16285/j.rsm.2019.1713](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1713).
- [15] 姬海波, 王建华, 范怡飞. 桩靴贯入与拔出引起的邻近桩附加及残余荷载分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(5): 732-740. DOI: [10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.007](https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.007).
JI H B, WANG J H, FAN Y F. Analysis of additional and residual loads of an adjacent pile induced by spudcan penetration and extraction [J]. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2020, 40(5): 732-740. DOI: [10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.007](https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.007).
- [16] ZHANG Y H, BIENEN B, CASSIDY M J, et al. The undrained bearing capacity of a spudcan foundation under combined loading in soft clay [J]. *Marine structures*, 2011, 24(4): 459-477. DOI: [10.1016/j.marstruc.2011.06.002](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.06.002).
- [17] WANG L Z, SHU H, LI L L, et al. Undrained bearing capacity of spudcan under combined loading [J]. *China ocean engineering*, 2011, 25(1): 15-30. DOI: [10.1007/s13344-011-0002-0](https://doi.org/10.1007/s13344-011-0002-0).
- [18] 陈洋彬, 郑敬宾, 王栋. 弱超固结黏土中桩靴贯入形成孔洞对承载力影响 [J]. *海洋工程*, 2021, 39(1): 112-120,170. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2021.01.012](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2021.01.012).
CHEN Y B, ZHENG J B, WANG D. Effect of cavity on the bearing capacity of spudcan foundation in lightly overconsolidated clay [J]. *The ocean engineering*, 2021, 39(1): 112-120,170. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2021.01.012](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2021.01.012).
- [19] MIRZADEH J, KIMIAEI M, CASSIDY M J. Performance of an example jack-up platform under directional random ocean waves [J]. *Applied ocean research*, 2016, 54: 87-100. DOI: [10.1016/j.apor.2015.10.002](https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.10.002).
- [20] VILLALOBOS JARA F A. Model testing of foundations for offshore wind turbines [D]. Oxford: University of Oxford, 2006.

作者简介:



王凯

王凯 (第一作者)

1983-, 男, 副教授, 博士, 主要从事海工油气平台和海上风电的研究工作(e-mail) wangkai25@mail.sysu.edu.cn。

武宗豪

2000-, 男, 机械专业硕士, 主要从事海上漂浮式风电研究(e-mail) wuzh226@mail2.sysu.edu.cn。

韩若朗

1999-, 男, 力学专业硕士, 主要从事海上漂浮式风电研究(e-mail) hanrlang@mail2.sysu.edu.cn。



乐从欢

乐从欢 (通信作者)

1983-, 女, 副研究员, 博士, 主要从事海上风电方面的研究工作(e-mail) leconghuan@163.com。

麦志辉

1972-, 男, 高级工程师, 主要从事海洋工程装备的研发(e-mail) jy_maizhahui@163.com。

吴韩

1980-, 男, 工程师, 主要从事海洋工程装备的制造(e-mail) wuhan@lesso.com。

(编辑 孙舒)