

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.088



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



砂土中拖曳锚安装行为的大比尺模型试验研究

李书兆¹, 易丛¹, 李辉¹, 孙国栋¹, 宋勇浩², 王栋²

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 中国海洋大学 海底建设与保护山东省工程研究中心, 山东 青岛 266100)

摘要: 目前多借助小比尺和离心机模型试验研究砂土中拖曳锚的安装行为, 大比尺模型试验极少, 而大比尺试验中模型锚的尺寸与土体应力水平更能反映原型条件。研发大比尺模型试验系统, 完成密实石英砂中某新型拖曳锚的6个安装试验, 所用模型锚的长度缩尺比例为1:2、质量为4.7 t。试验中实时记录锚眼处的抗拉力和土中拖曳锚的运动轨迹, 并探索拖曳锚的初始侧倾与锚柄-锚爪夹角对锚安装全过程的影响; 利用已有理论方法预测锚的安装行为, 预测结果与试验结果接近。结果表明: 各试验中模型锚的最大水平拖动距离为6.5 m, 对应抗拉力为1 500 kN、锚爪尖入土深度为2.4 m, 两者均有随锚拖动继续增加的潜力; 当锚的初始侧倾不超过20°时, 侧倾对抗拉力的发挥影响不大; 锚柄-锚爪夹角为32°时, 锚的抗拉力和入土深度均大于夹角为41°时的值。对于新型锚, 理论分析方法预测的拉重比可超过40, 其最大抗拉力和最终埋深与常见的多个商业锚型相近。

关键词: 拖曳锚; 安装行为; 大比尺模型试验; 抗拉力; 运动轨迹

中图分类号: P751; TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-07

Large-scale model test study on the installation behavior of drag anchors in sand

LI Shuzhao¹, YI Cong¹, LI Hui¹, SUN Guodong¹, SONG Yonghao², WANG Dong²

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd, Beijing 100028, P. R. China; 2. Shandong Engineering Research Center of Marine Exploration and Conservation, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, P. R. China)

Abstract: Internationally, studies on the installation behavior of drag anchors in sand predominantly rely on small-scale model tests, while large-scale model tests are rarely reported publically. However, both the size of model anchors and soil stress levels in large-scale model tests can better represent prototype conditions. A large-scale model test system was developed, and six installation tests of a novel drag anchor were conducted in dense quartz sand. The model anchor had a length scale ratio of 1:2 and a mass of 4.7 tons. During tests, the holding capacity at the anchor padeye and the motion trajectory of the model anchor in sand were recorded in real time, with investigations into the effects of the anchor initial side inclination and the fluke-shank angle on the entire

收稿日期: 2025-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(52394251、42025702)

作者简介: 李书兆(1985-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋岩土工程研究, E-mail: lishzh17@cnooc.com.cn。

王栋(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: dongwang@ouc.edu.cn。

Received: 2025-06-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52394251, 42025702)

Author brief: LI Shuzhao (1985-), PhD, senior engineer, main research interest: ocean geotechnical engineering technology, E-mail: lishzh17@cnooc.com.cn.

WANG Dong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: dongwang@ouc.edu.cn.

installation process. Meanwhile, the installation behavior of the anchor was predicted using the developed theoretical method, and the prediction results closely matched the experimental data. It was found that: among all six tests, the maximum horizontal drag distance of the model anchor was 6.5 meters, the corresponding holding capacity was 1 500 kN and embedment depth of the fluke tip was 2.4 meters, showing potential for continued growth with the drag distance. The influence of the initial side inclination of the anchor on the holding capacity is not significant when the inclination angle is less than 20° . When the fluke-shank angle is 32° , the holding capacity and anchor penetration depth are both greater than those when the angle is 41° . For the novel anchor, its anchor efficiency predicted by the theoretical method can exceed 40, and its maximum holding capacity and final embedment depth are similar to those of several common commercial anchor types.

Keywords: drag anchor; installation behavior; large-scale model test; holding capacity; trajectory

葡萄牙、法国和日本等国的多个深远海风电项目已采用大型拖曳锚进行漂浮式风机系泊^[1-3]。与常规的桩锚和吸力锚相比,拖曳锚的制造成本低、土层适用范围广,但在砂土中的安装就位存在相当程度的不确定性。拖曳锚在实际安装中,不仅需要达到预定的抗拉承载力,还应有足够的贯入深度^[4-6]。因此,学术界和工业界普遍关注拖曳锚在安装过程中抗拉力的发挥及其运动轨迹,并通过开展不同类型的模型试验研究其安装过程。

离心机和小比尺模型试验的成本低、难度小,是拖曳锚研究中最常用的两类试验。前者虽然能再现真实的土体应力水平,但模型锚的尺寸通常较小,例如 Dunnavant 等^[7]的模型锚质量仅为 15 g; O' Neill 等^[8-9]的模型锚质量不足 10 g,锚爪长 31 mm、宽 46 mm。如此小的模型很难再现原型锚的细部结构^[10-12],且可能存在砂土粒径效应问题^[13]。小比尺试验中模型锚的尺寸能够更大,文献^[14-16]中锚爪的长度为 200~300 mm、宽度达到 300~400 mm。然而,小比尺试验中土体的应力水平远低于原型,此时砂土的内摩擦角和剪胀角大于原型状态^[17-18]。与小比尺试验相比,大比尺试验中的模型锚尺寸和土体应力水平均接近原型,实际项目中也多根据现场开展的大比尺试验的结果来选择锚型:挪威 Gullfaks A 平台系泊项目^[19],根据质量为 3 t 的模型锚(长度比尺约为 1:2.4)的现场安装表现,决定在砂土地中采用原型质量为 40 t 的 MK5 锚,该原型锚的抗拉承载力可达 15 000 kN。但大比尺试验不仅成本高,而且公开报道的数据极少^[19-20]。

笔者开展密实石英砂中某新型拖曳锚的大比尺模型试验,模型锚的长度缩尺比例为 1:2、质量为 4.7 t。研发了拖曳锚的大比尺模型试验系统,在试验中实时记录锚的抗拉力、位置和姿态,并探索锚的初始侧倾和锚柄-锚爪夹角对安装过程中锚抗拉力和运动轨迹的影响。综合试验结果与理论方法^[21]的预测结果,分析新型锚在密砂中的安装行为。对

比新型锚的大比尺试验结果与其他形式拖曳锚的公开数据,进一步评估新型锚的应用潜力。

1 大比尺模型试验

1.1 模型锚和试验场地

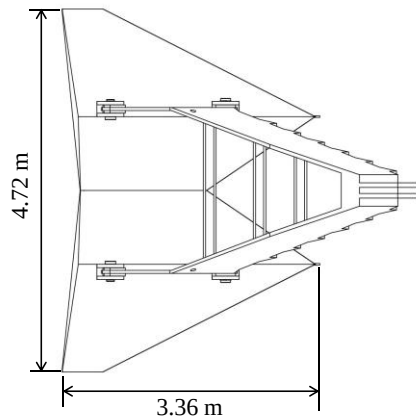
自行研发的某新型拖曳锚,质量达 38 t,按照 1:2 的缩尺比制作模型锚。模型锚的结构如图 1 所示:锚爪长度 L_f 为 3.36 m、宽度为 4.72 m,锚柄长度为 3.60 m。模型锚的整体材质为 Q235 碳钢,总质量约为 4.7 t。其锚柄和锚爪通过高强度销轴连接,锚柄-锚爪夹角可设置为 32° 、 41° 和 50° 。

根据已有的砂土中离心机和小比尺模型试验结果^[11,16],拖曳锚达到最大抗拉力时,其水平运动距离大约为 $4L_f \sim 5L_f$,贯入深度通常不超过 L_f 。对图 1 所示的大比尺锚,室内场地很难满足空间和土样厚度要求,因此选择青岛市黄岛区某处海滩作为试验场地。试验现场的砂土表面平整,利用挖掘机开挖两处深坑,发现深度 6 m 范围内都是均匀砂层。沿不同深度取样,相对密实度 D_r 变化不大,平均约为 59%,对应的天然密度为 1.67 g/cm^3 。进行三轴排水剪切试验,得到有效内摩擦角为 38° 、剪胀角为 10° 。

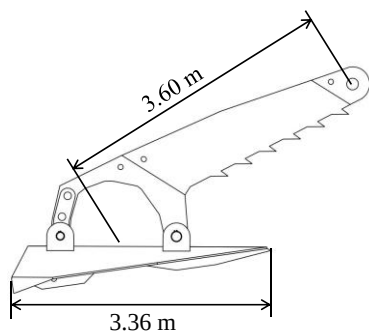
1.2 模型试验系统

大比尺试验系统主要由加载和测量部分组成,前者负责锚的拖动安装和回收,后者用于记录锚的抗拉力和运动数据。由于模型锚需要安装拉力远超 1 000 kN,常规小比尺模型试验方案和方法^[14,20]无法满足要求,必须根据拉力需求和场地条件开发大比尺试验系统。

拖动锚的加载部分如图 2 所示:吊车竖向提升锚链,提升速度控制在 $0.01 \sim 0.02 \text{ m/s}$ 之间。锚链经过自行制造的高强度滚筒,将竖向拉力转换为锚眼处的水平拉力。锚链总长度为 20 m,为标准规格的有档普通锚链,其链环的公称直径为 60 mm。滚筒与锚眼之间的锚链段接近水平,以模拟实际安装



(a) 俯视图



(b) 侧视图



(c) 实体锚

图 1 试验用大比尺模型锚

Fig. 1 Large-scale model anchor used in the tests

过程中锚链在土体表面的躺底段。堆放总质量为 420 t 的配重块压住滚筒,以保证锚链运动时滚筒保持静止,此时配重块的高度已达到 7 m。拖曳锚安装试验结束后,利用挖掘机移除锚上方土体,从后侧将锚拖出,然后回填砂土,并整平地面。

测量部分主要用于获取锚眼处的拉力和锚的运动数据。1)在锚眼处连接 3 000 kN 量程的拉力

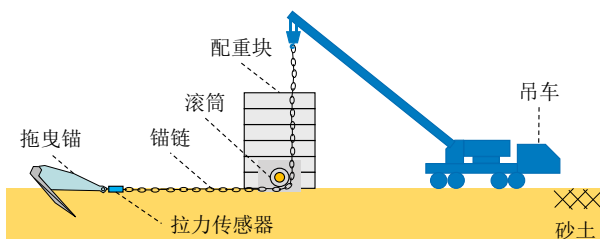


图 2 拖动锚的加载布置

Fig. 2 Loading arrangement of dragging anchor

传感器,拉力传感器通过两端的卸扣,分别连接锚眼卸扣和锚链。传感器会随着锚的运动进入土中。如果将拉力数据传送到地面再采集,信号线可能发生磨损或拉扯,从而造成数据丢失。因此,研发了图 3 所示的自容式数据采集盒,采集盒被固定到拉力传感器上,并通过信号线与拉力传感器连接。通过信号线,盒内的锂电池为拉力传感器供电,传感器将量测的数据传送到采集盒中的内存卡。试验结束后,取出内存卡,读取拉力数据。2)锚的运动数据包括水平运动距离、竖向贯入深度和姿态倾角,同时采用惯性测量单元(IMU)和人工测量两套方案。IMU 可测量三轴加速度和姿态倾角,加速度的二阶时间积分可得到位移。将 IMU 安装在锚爪顶面中心,并搭配自容式数据采集盒,即可实时记录该处的位移和倾角。IMU 入土后可能不正常工作,因此同时人工测量,步骤为:试验开始前将直径 10 mm 的尼龙绳一端固定在锚眼,另一端自由;每拖动约 0.5 m,竖直提起尼龙绳,量测锚眼的水平运动距离,并根据尼龙绳自由端距原始土面的高度确定锚眼入土深度;借助双轴水平仪,读取锚爪顶面的水平倾角。



图 3 自容式数据采集盒

Fig. 3 Self-contained data acquisition box

1.3 试验方案

利用上述试验系统,设计表 1 所示的 6 个大比尺模型试验,主要目的为:1)重复试验 1 和 2,验证试验系统的可靠性;2)实际安装中,锚从施工船下放到海底,很难保证锚完全无侧倾,人为设置锚的初始侧倾角度分别为 0° 、 10° 、 15° 和 20° ,以考察锚的初始侧倾对其安装过程的影响;3)以往经验^[19,22]表明,当锚柄-锚爪夹角为 50° 时,拖曳锚难以进入砂土深处,因此仅对 32° 和 41° 的夹角,对比大比尺锚的安装行为,以优选夹角。

2 大比尺试验结果分析

图 4 为 6 个大比尺模型试验结果,图中展示了锚眼拉力、锚眼和锚爪尖埋深、锚爪顶面水平倾角等随锚眼水平运动距离的变化。由于缺乏经验,试

表 1 模型试验方案

Table 1 Scheme of model tests

试验编号	锚柄-锚爪夹角/(°)	锚初始侧倾角度/(°)
1	32	0
2	32	0
3	32	10
4	32	15
5	32	20
6	41	0

验 1 中锚的初始位置过于靠近滚筒,锚眼水平运动 4 m 后被迫停止试验,此时激发的抗拉力仅有 917 kN。之后的试验中设置锚眼初始位置距离滚筒不小于 12 m。所有试验中,锚眼拉力大致随锚眼水平运动距离线性增加。当拉力达到 1 200~1 500 kN 时,图 2 中的配重块在砂土上出现整体滑动,出

于安全考虑,不得不停止试验。试验 3 中模型锚的水平拖动距离最大为 6.5 m,对应抗拉力为 1 500 kN、锚爪尖入土深度为 2.4 m。如图 6 所示,试验 1~试验 5 的抗拉力随着锚眼水平运动始终近似线性增加;试验 6 的抗拉力在锚眼水平运动 4 m 前与前者接近,此后增长更为缓慢。

试验 1 和试验 2 中模型锚均无初始侧倾,锚柄和锚爪夹角均为 32°。量测的锚眼抗拉力、锚的埋深和锚爪顶面水平倾角接近(图 4),证明了试验系统的可靠性和试验结果的可重复性。在整个试验过程中观察到:锚爪的水平倾角由初始的 36°~42°降低到 17°左右,并趋于定值;锚眼和锚爪尖的贯入趋势在锚眼水平运动约 1.5 m 后降低;而锚抗拉力始终稳定提升,并最终达到 1 430 kN。

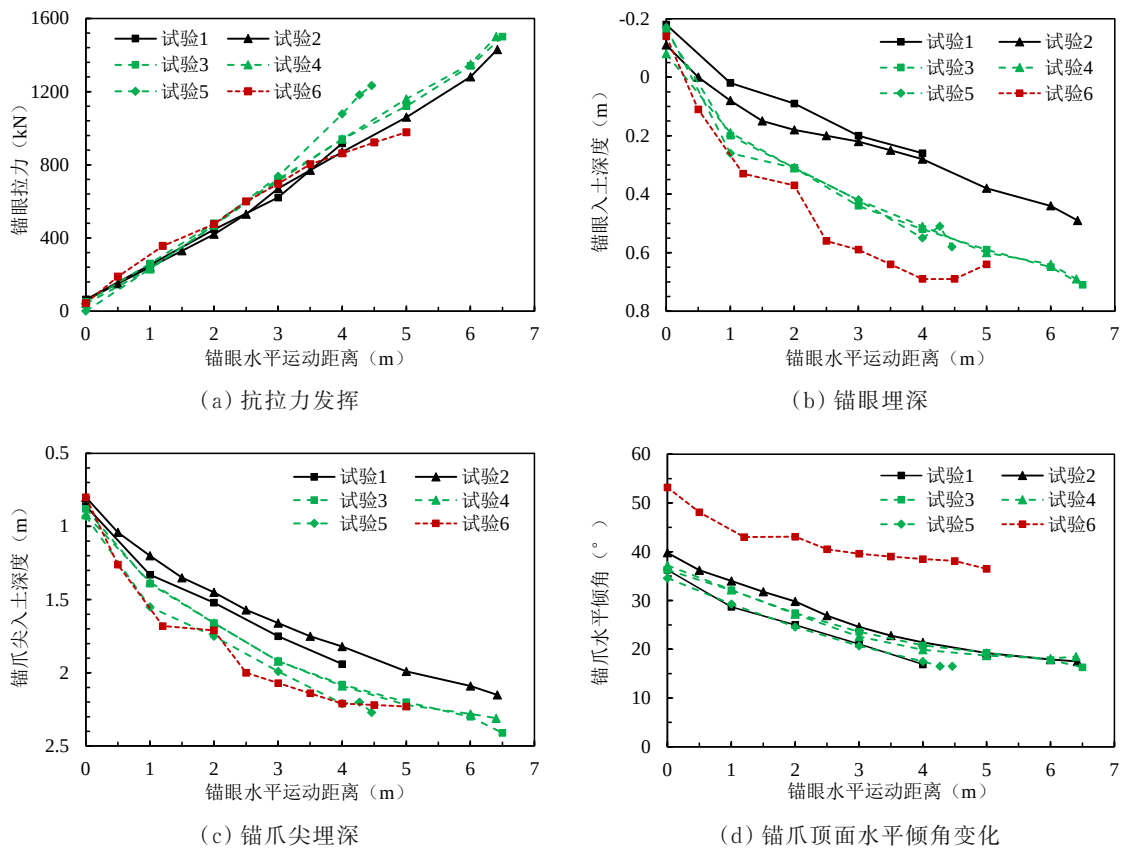


图 4 大比尺模型试验结果

Fig. 4 Results of the large-scale model tests

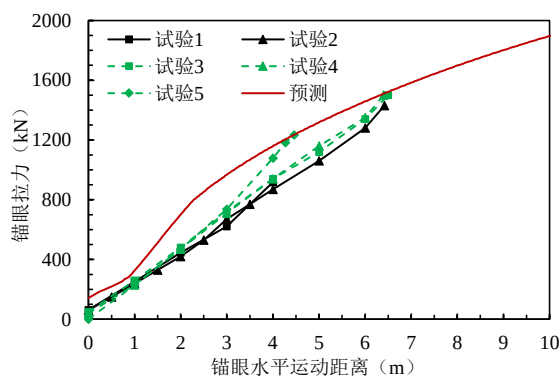
在试验 2~试验 5 中,锚的初始侧倾角度分别为 0°、10°、15°和 20°。比较各试验结果,发现:1)初始侧倾为 10°和 15°时的抗拉力、锚的埋深和锚爪水平倾角均接近;2)无初始侧倾时,量测的抗拉力或锚爪水平倾角与初始侧倾为 10°和 15°时的值差别不大,但锚眼和锚爪尖的埋深均低了 0.2 m;3)当初始侧倾增加到 20°时,锚眼埋深始终与 10°或 15°时接近,但锚眼水平运动 4.5 m 时的抗拉力甚至比后两种条

件高 17%,这可能包含试验误差。整体来说,尽管 20°以内的初始侧倾对锚的埋深和锚爪水平倾角有所影响,但抗拉力的发挥几乎不受影响。

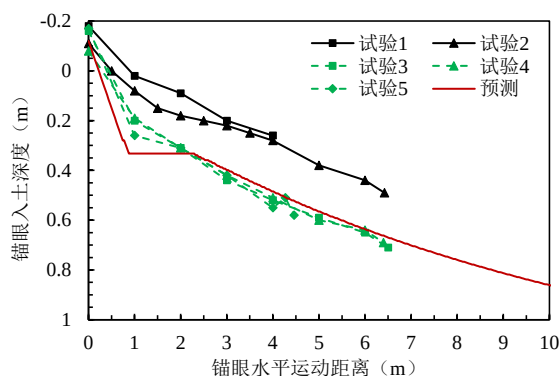
比较锚柄-锚爪夹角为 32°(试验 2)和 41°(试验 6)时的抗拉力及运动行为,可以看出:在锚眼水平运动距离小于 4 m 时,夹角 32°和 41°对应的抗拉力接近,但 41°时的锚眼和锚爪尖埋深更大;随着继续拖动,41°时的锚眼和锚爪尖埋深接近最大值,对应

抗拉力逐渐低于 32° 时,而后的锚眼和锚爪尖埋深仍保持增加。夹角 41° 的试验停止时,锚眼水平运动约 5 m,抗拉力为 980 kN,锚爪尖埋深稳定在约 2.2 m。夹角 32° 的锚,在锚眼水平运动 5 m 时,抗拉力为 1 060 kN,锚爪尖埋深约为 2 m;试验停止时的锚眼水平运动距离为 6.4 m,抗拉力达到 1 430 kN,锚爪尖深度达到 2.1 m。综上所述,在密实石英砂中,夹角 32° 锚发挥的抗拉力高于 41° 时,李达等^[16]的小比尺模型试验也建议砂土中的锚柄-锚爪夹角为 32° 。

基于李达等^[21]提出的理论方法,对无初始侧倾、锚柄-锚爪夹角为 32° 时的大比尺试验进行预测。如图 5 所示:预测的锚眼埋深变化与试验结果基本吻合,锚抗拉力的发挥曲线也与试验接近。根据理论预测结果,当锚眼水平运动距离为 10 m 时,模型锚的抗拉力可达到 1 900 kN、拉重比超过 40。



(a) 抗拉力发挥



(b) 锚眼埋深

图 5 预测与试验结果

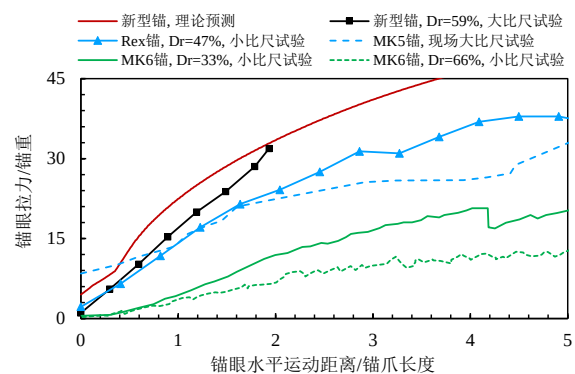
Fig. 5 Results of the prediction and test

3 不同锚型对比分析

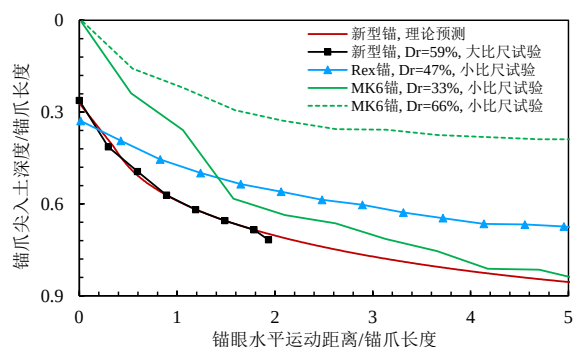
风电和油气开发项目中常用的商业拖曳锚型为 MK5 锚、MK6 锚和 Rex 锚。文献[19]报道的挪威现场砂土测试中, MK5 锚质量为 3 t、锚爪长 2.28 m,在拖动 20 m 后达到最大抗拉力 1500 kN。李达等^[16]在 D_r 为 47% 的中粗石英砂土中开展了 Rex 锚

的小比尺试验,模型锚质量为 3.04 kg,锚爪长 0.22 m。张友虎等^[23]在 D_r 分别为 33% 和 66% 的砂土中进行了 MK6 锚小比尺试验,模型锚质量为 11.86 kg、锚爪长约 0.32 m。利用锚眼水平运动距离与锚爪长度之比、抗拉力与锚重之比等无量纲表达,可比较不同类型拖曳锚的性能。

各拖曳锚型的试验结果见图 6。MK6 锚的小比尺试验中, MK6 锚在松砂中的锚爪尖贯入更深、抗拉力更大,拉重比最大约为 20;与 MK6 锚相比, Rex 锚在中密砂的埋深小,但拉重比能达到 35 以上。图 6 中, MK5 锚在大比尺测试中的拉重比发挥比 Rex 锚慢,但拉重比最终可达到 50;新型锚抗拉力发挥和贯入能力都较好,试验中拉重比达到了 32,预测拉重比不低于 40。尽管各试验的尺度和砂土样均有所不同,但仍能发现新型拖曳锚的抗拉力和贯入性能与这几类常见商业锚型接近。



(a) 归一化锚抗拉力



(b) 归一化锚爪尖贯入曲线

图 6 不同锚型结果对比

Fig. 6 Comparison of results of different anchor types

4 结论

开展某新型拖曳锚的 1:2 大比尺模型试验,考察砂土中锚的安装行为。模型锚质量 4.7 t、锚爪长度 3.36 m。研发大型试验系统,在密实沙滩中完成 6 个试验,着重探索锚的初始侧倾和锚柄-锚爪夹角对安装过程的影响。综合试验结果和理论预测,分

析了安装过程中新型锚抗拉力的发挥与运动轨迹,进而对比新型锚与几种商业拖曳锚的安装表现。主要结论如下:

1)通过6个试验证明了研发的大比尺模型试验系统的可靠性。各试验中模型锚的最大水平拖动距离为6.5 m,对应抗拉力为1 500 kN、锚爪尖入土深度为2.4 m,两者均有随锚拖动继续增加的潜力。

2)试验结果表明,20°以内的锚初始侧倾对抗拉力发挥的影响不大;锚柄-锚爪夹角为32°时,砂土中锚的抗拉力和埋深比均大于夹角为41°时。

3)提出的理论方法合理预测了砂土中锚的安装过程;预测新型锚的拉重比超过40,其抗拉能力和贯入性能达到最新的商业锚型水平。

参考文献

- [1] 康思伟, 张雨蓉, 栾辰宇, 等. 系泊锚在海上浮式风机中的应用[J]. 中国海洋平台, 2023, 38(3): 16-21.
KANG S W, ZHANG Y R, LUAN C Y, et al. Application of mooring anchors for offshore floating wind turbines [J]. China Offshore Platform, 2023, 38(3): 16-21. (in Chinese)
- [2] 代军, 李佳佳, 杨毅. 国内外漂浮式风电系泊系统技术发展研究[J]. 船舶工程, 2024, 46(11): 175-180.
DAI J, LI J J, YANG Y. Research on technological development of mooring system for floating wind turbines at home and abroad [J]. Ship Engineering, 2024, 46(11): 175-180. (in Chinese)
- [3] WU X N, HU Y, LI Y, et al. Foundations of offshore wind turbines: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 104: 379-393.
- [4] American Bureau of Shipping. ABS Guidance notes on design and installation of drag anchors and plate anchors [S]. Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2018.
- [5] Det Norske Veritas. Design and installation of fluke anchors: DNV-RP-E301 [S]. Oslo, Norway: DNV, 2021.
- [6] ZHANG W G, ZHOU Z F, PRADHAN D L, et al. Design considerations of drag anchors in cohesive soil for floating facilities in the South China Sea [J]. Marine Structures, 2022, 81: 103101.
- [7] DUNNAVANT T W, KWAN C T. Centrifuge modeling and parametric analyses of drag anchor behavior [C]//Offshore Technology Conference. May 3-6, 1993. Houston, Texas. OTC, 1993: OTC-7202-MS.
- [8] O'NEILL M P, RANDOLPH M F, HOUSE A R. The behaviour of drag anchors in layered soils [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1999, 9 (1): 73-78.
- [9] O'NEILL M, RANDOLPH M. Modelling drag anchors in a drum centrifuge [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2001, 1(2): 29-41.
- [10] LAI Y, CHEN C, YAN Z Z, et al. The installation behavior and capacity of piggy-backed anchors for offshore wind turbine [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 70: 103948.
- [11] LAI Y, CHEN C, PAN A H, et al. Centrifuge modeling and the modified limit equilibrium prediction for drag embedment anchor installation in sand [J]. Applied Ocean Research, 2025, 154: 104390.
- [12] 张炜, 李新仲, 李清平. 拖曳锚实验及形态优化研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(6): 43-46.
ZHANG W, LI X Z, LI Q P. Research on experiment and shape-optimization of drag anchors [J]. Ship Engineering, 2013, 35(6): 43-46. (in Chinese)
- [13] 杨俊杰, 柳飞, 丰泽康男, 等. 砂土地基承载力离心模型试验中的粒径效应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (4): 477-483.
YANG J J, LIU F, TOYOSAWA Y, et al. Particle size effects on bearing capacity of sandy ground in centrifugal tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 477-483. (in Chinese)
- [14] 张炜, 刘海笑. 拖曳锚嵌入机理及运动特性实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 581-586.
ZHANG W, LIU H X. Experimental research for embedment mechanism and kinematic characteristic of drag anchors [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(3): 581-586. (in Chinese)
- [15] 闫澍旺, 任宇晓, 孙立强, 等. 砂土中的拖锚模型试验及锚抓力计算方法研究[J]. 中国造船, 2016, 57(1): 103-115.
YAN S W, REN Y X, SUN L Q, et al. Model test and calculation of holding capacity of hall anchor in dragging process in sand [J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(1): 103-115. (in Chinese)
- [16] 李达, 李书兆, 宋勇浩, 等. 砂土中新型拖曳锚的小比尺模型试验[J/OL]. 海洋工程, 2024: 1-10. (2024-12-19). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20241219.0957.002.html>. LI D, LI S Z, SONG Y H, et al. Small scale model tests of new drag anchor in sand [J/OL]. The Ocean Engineering, 2024: 1-10. (2024-12-19). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20241219.0957.002.html>. (in Chinese)
- [17] GIAMPA J R, BRADSHAW A S. A simple method for assessing the peak friction angle of sand at very low confining pressures [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(4): 639-647.
- [18] CHAKRABORTY T, SALGADO R. Dilatancy and shear strength of sand at low confining pressures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer-

ing, 2010, 136(3): 527-532.

[19] Vryhof. Vryhof manual: The guide to anchoring [M]. The Netherlands: Vryhof, 2018: 34, 50-51.

[20] AUBENY C P, GILBERT R B, RANDALL R E, et al. The performance of drag embedment anchors (DEA) [R]. Texas A & M University, 2011.

[21] 李达, 李书兆, 孙国栋, 等. 砂土中拖曳锚运动轨迹及抗拉力的改进预测方法[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025: 1-8. (2025-08-14). [https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20250812002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.\(in Chinese\)](https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20250812002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.LI D, LI S Z, SUN G D, et al. A modified method predicting the trajectory and holding capacity of drag anchors in sand [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025: 1-8. (2025-08-14). <a href=)

[22] RANDOLPH M, GOURVENEC S. Offshore Geotechnical Engineering [M]. London: CRC Press, 2011.

[23] 张友虎, 王翔宇, 吴初恒. 砂土中拖曳锚安装特性试验研究[J/OL]. 东南大学学报(自然科学版), 2025: 1-11. (2025-04-21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1178.N.20250421.1343.002.html>.ZHANG Y H, WANG X Y, WU C H. Experimental study on characteristics of drag anchor installation in sand [J/OL]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025: 1-11. (2025-04-21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1178.N.20250421.1343.002.html>. (in Chinese)

(编辑 XXX)