

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.083



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



砂土中拖曳锚运动轨迹及抗拉力的改进预测方法

李达¹, 李书兆¹, 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, 青岛 266100)

摘要: 拖曳锚拉重比高、制造成本低, 被广泛用于系泊海洋浮式平台, 但拖曳锚在砂土中安装时的入土深度和抗拉力预测经常存在不容忽视的误差。提出一种预测砂土中拖曳锚安装过程的改进方法, 该方法将整个安装过程分为若干增量步, 容许锚爪底面与砂土脱开。在每一增量步中, 建立锚和破坏土体的极限平衡方程, 得到实时抗拉力; 规定合理的拖曳锚运动方向, 基于最小拖锚拉力原则, 计算锚的水平位移、埋深与转动增量。对两种锚柄长度的拖曳锚开展小比尺模型试验, 砂样相对密实度为 47%, 实时量测锚的抗拉力和位置。试验中观察到, 在安装前期阶段, 锚爪底面就与砂样脱离接触, 此后锚的埋深仍随拉力的增加而增大, 证明了改进方法中采用脱开假定的合理性。对比锚运动轨迹和抗拉力的试验值与预测值, 验证了改进方法的合理性。试验与预测结果都表明, 当锚柄长度由 30 cm 增加至 36 cm 时, 虽然锚眼的贯入深度和锚体转动角度减小, 但最终抗拉力增加了 18%。

关键词: 拖曳锚; 砂土; 运动轨迹; 抗拉力; 模型试验; 极限平衡

中图分类号: TU476 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-08

A modified method predicting the trajectory and holding capacity of drag anchors in sand

LI Da¹, LI Shuzhao¹, 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, P. R. China)

Abstract: Drag anchors have the high anchor efficiency and low manufacturing cost, and are widely used for the mooring of offshore floating platforms. However, there are often non-negligible errors in the prediction of the anchor penetration and holding capacity when the drag anchor is installed in sand. A modified method was developed to predict the installation process of the drag anchor, which divides the whole installation process into several incremental steps and allows the bottom surface of the fluke to separate from sand. At each incremental step, the limit equilibrium equations of the anchor and soil in failure are established to obtain the holding capacity, and the increment of the horizontal displacement, burial depth and rotation were calculated, based on the principle of minimum force to drag the anchor, with a reasonable direction specified for the drag anchor

收稿日期: 2025-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(42025702、52394251)

作者简介: 李达(1979-), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋工程技术研究, E-mail: lida@cnooc.com.cn。

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

Received: 2025-05-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 42025702, 52394251)

Author brief: LI Da (1979-), principal engineer, main research interest: ocean engineering technology, E-mail: lida@cnooc.com.cn.

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

motion. Small-scale model tests were conducted on drag anchors with two types of the shank length, and the relative density of the sand sample was 47%. The holding capacity and position of the anchor were measured in real time. During the tests, it was observed that the bottom surface of the fluke already separated from the sand sample in the early stage of installation, and the burial depth of the anchor still increased with the increment of the holding capacity, which proved the rationality of the assumption of separation in the modified method. The rationality of the modified method was verified by comparing the measured values and predicted values of the anchor trajectory and holding capacity. Both the test results and calculation results indicate that, when the shank length increases from 30 cm to 36 cm, although the penetration depth of the anchor padeye and the rotation of the anchor body decrease, the final holding capacity still increases by 18%.

Keywords: drag anchor; sand; trajectory; holding capacity; model test; limit equilibrium

拖曳锚是航运和深海油气工程中常用的一类系泊锚基础^[1-2],具有拉重比(抗拉承载力与锚重之比)高、制造成本低、适用土层范围广等优点。近年来,拖曳锚被逐渐用于漂浮式风电开发^[3-4],例如位于葡萄牙的 Windfloat Atlantic 项目中,每个风机平台都使用 3 个大型拖曳锚系泊^[5]。拖动锚在拖动安装过程中的入土深度和抗拉力,不仅取决于海床土的类型和强度,也与锚的结构形式及在土中的倾斜姿态相关^[6-7]。拖曳锚在实际应用中的关键难点是运动轨迹和抗拉力的预测^[8-9]。

对于拖曳锚在砂土中的安装,如果进行原型测试或大比尺模型试验,需要约 500~2 000 kN 的拉力甚至更高^[6],难以普遍开展,多利用常规小比尺试验^[10-15]或离心机试验^[16-20]考察锚的安装行为。工业界总结试验结果或现场数据,给出了可预测锚最终埋深和拉力的经验图表或公式^[6],但几乎都是针对特定锚型,且预测精度难以满足实际设计需求。更有效的方式是结合模型试验与理论分析,构建适用不同拖曳锚几何形状和砂土密实度的分析方法。LeLievre 等^[7]构造了锚周围砂土的破坏模式,基于极限平衡分析,提出了抗拉力计算方法。然而,他们的计算需要假定埋深,因此既不能预测安装结束时锚的最终埋深,更不能给出最终抗拉力。Neubecker 等^[21-22]进一步完善 LeLievre 等^[7]的抗拉力分析,提出了整个安装过程中锚在土中运动轨迹的计算方法。该方法(以下简称为 NR 方法)在工程实践中得到广泛应用^[14, 23],也是挪威船级社规范 DNV-RP-E301 的推荐方法^[24]。NR 方法认为锚爪底面与砂土脱开后,锚进入水平运动状态,也就是达到最大埋深,但这与一些试验中观察到的现象有明显差别^[15, 20]。Lai 等^[20]沿用了 NR 方法的抗拉力分析,但允许锚在锚爪底面与砂土脱开后仍沿锚爪方向运动,并假定锚爪与锚眼拉力的方向变化相同,以此更新锚的运动姿态。目前还没有充分的试验结果证明这一假定的合理性。

为更加合理地预测砂土中拖曳锚的运动轨迹及抗拉力,笔者基于 NR 方法的分析框架,考虑锚爪底面与砂土脱开后锚的贯入运动,修正锚的抗拉力计算模型和增量运动假定,提出一种改进的预测方法。对两种锚柄长度的模型锚开展小比尺试验,以验证改进的预测方法,并考察锚柄长度对抗拉力的影响。

1 改进预测方法

1.1 NR 方法原理

NR 方法将砂土中的拖曳锚简化为图 1 所示,假定锚周围砂土的破坏场,分别建立锚和破坏土体的静力平衡^[21]。破坏土体的底边界为锚爪顶面,竖向和斜向(与竖向的夹角为 λ)边界分别从锚爪顶端两端延伸到土表面。锚和破坏土体的相互作用力为锚柄力 F_s 和锚爪顶面力 F_t ,锚承受的其他作用力包括锚重 W_a 、锚眼拉力 T_a 和锚爪底面力 F_{fb} ,破坏土体上的其他作用力为破坏土体自重 W_s 、来自两侧土的摩擦力 SF 和前方土的阻力 R 。上述各力的方向见图 1, φ 和 ψ 分别为砂土内摩擦角和剪胀角, δ 为锚-土接触面的摩擦角, θ_a 为锚眼拉力与水平方向的夹角, θ_{st} 为锚柄与锚爪间的夹角, β 为锚爪顶面与水平方向的夹角。

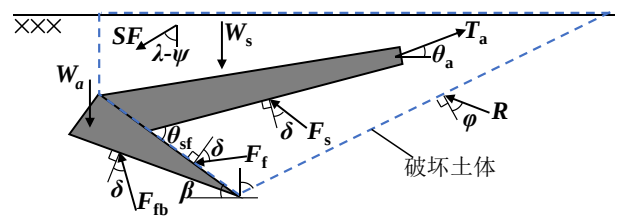


图 1 NR 方法中锚-土相互作用^[21]

Fig.1 The anchor - sand interaction in the NR method

锚抗拉力的极限平衡分析流程为:1)对给定的锚眼入土深度和锚爪水平倾角,假定破坏土体的 λ ; 2)由文献[21]中的公式计算 W_s 、 SF 和 F_s ,根据破坏土体的力平衡方程求解 R 和 F_t ; 3)耦合锚的力平衡

方程与锚链在砂土中的反悬链线方程^[25],求解 T_a 、 θ_a 和 F_b ;4)改变 λ ,重复上述步骤,得到的最小 T_a 为给定条件下的真实抗拉力,对应的 λ 为真实破坏面角度。

预测锚的运动轨迹时,将整个运动过程分解为若干增量步。在每一个增量步中,均以锚眼的水平和竖向位移增量 Δx 与 Δy 、锚体转动角度增量 $\Delta\theta$ 表示锚的运动。NR方法假定:1)极限平衡分析得到的 $F_b > 0$ 时,锚爪底面与砂土接触,锚持续贯入;否则,锚爪底面与砂土脱开,锚达到最大埋深;2)在保持贯入的增量步中,锚爪底面上某点沿锚爪底面的实时方向前进;该点在密砂中靠近锚爪尾部,在松砂中靠近锚爪尖,具体位置依赖经验;3)设定 Δx ,对所有满足规定运动方向的 Δy 和 $\Delta\theta$ 组合,分别计算锚的运动耗能,其中耗能最小的组合即为锚的位移增量。

1.2 改进的NR方法

NR方法中强制规定拖曳锚在锚爪底面与砂土脱开后,锚爪底面与砂土脱开后会停止贯入运动,目前仍缺少充分的试验证据证明其合理性,部分试验中有观察到相反现象^[15,20]。以下移除这一假定,并提出改进的NR方法。

在抗拉力分析中,当锚爪底面与砂土脱开后,图1中的 F_b 不再存在。这时需修正NR方法中锚和破坏土体上各作用力的求解步骤:1)仍按传统的NR方法计算 W_s 、 SF 和 F_s ,先将锚和破坏土体视为整体,由整体力平衡方程和土中锚链方程,求解 T_a 、 θ_a 和 R ;2)锚爪上的作用力仅有顶面处的 F_f ,此时 F_f 与锚爪顶面法向的夹角为 δ_f (图2(a)), δ_f 为未知量,根据锚的力平衡方程,求解 δ_f 和 F_f 。

$$\tan(\delta_f + \beta) = \frac{T_a \cos \theta_a - F_s \sin(\delta + \theta_{sf} - \beta)}{T_a \sin \theta_a + F_s \cos(\delta + \theta_{sf} - \beta) - W_a} \quad (1)$$

$$F_f = \frac{T_a \cos \theta_a - F_s \sin(\delta + \theta_{sf} - \beta)}{\sin(\delta_f + \beta)} \quad (2)$$

在运动轨迹分析中,锚爪底面与砂土整体脱开后,二者仅在锚爪尖附近保持接触,因此假定这时锚爪尖沿锚爪底面的方向贯入。拖曳锚为刚体,锚爪尖的增量位移可由锚眼处的 Δx 、 Δy 和 $\Delta\theta$ 确定,设定每个增量步中 $\Delta x = L_f/100$ 可保证计算效率和精度, Δy 和 $\Delta\theta$ 则应使锚爪尖的运动方向与锚爪底面平行。对所有满足要求的 Δy 和 $\Delta\theta$ 组合,假定锚上除 T_a 外的其他作用力不变,根据锚上各力做功总和为零来求解 T_a 。其中对应 T_a 最小的 Δy 和 $\Delta\theta$ 组合为锚的真实位移,因为它需要外界施加的拖锚拉

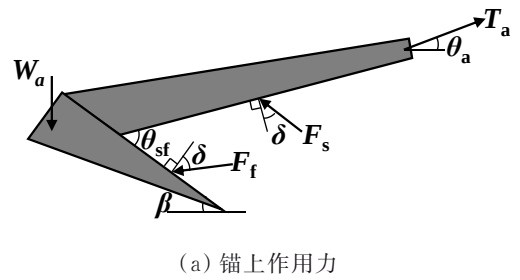
力最小。

计算锚上各力做功时,需先确定力的作用位置。 F_s 在锚柄上的作用点,沿锚爪顶面方向的投影为锚柄投影面积的中心点。 F_f 实际为锚爪顶面上土压力 p 的合力,假定 p 的大小随土体深度线性增加(图2(b)),则 F_f 的作用点位置可表示为

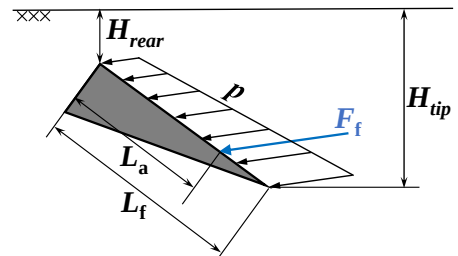
$$L_a = \frac{2H_{tip}^3 + H_{rear}^3 - 3H_{rear}H_{tip}^2}{3(H_{tip}^2 - H_{rear}^2)(H_{tip} - H_{rear})} \cdot L_f \quad (3)$$

式中: L_a 为 F_f 作用点与锚爪顶面尾点的距离; L_f 为锚爪长度; H_{rear} 为锚爪顶面尾点埋深; H_{tip} 为锚爪尖埋深。

改进的NR方法可预测锚爪底面脱开砂土后锚的运动轨迹和抗拉力。另外,利用易丛等^[26]提出的土隆发育模型,计算运动过程中砂土表面上土体隆起的体积,将土隆重量作为破坏土体自重 W_s 的一部分,从而考虑锚安装过程中土隆发育的贡献。



(a) 锚上作用力



(b) F_f 作用点位置

图2 锚上作用力的改进分析

Fig.2 Modified analysis of force on the anchor

2 小比尺模型试验

为验证改进NR方法的合理性,对某新型拖曳锚进行1:20的1g小比尺模型试验。小比尺模型试验装置和砂样均与李达等^[15]相同,设置土体表面处的拉力角度随锚的贯入由0°开始增加。设定拖动速度为1.5 mm/s,保证拖锚过程接近拟静力。砂样为中粗石英干砂样,其相对密实度为47%、密度为1.47 g/cm³。50 kPa围压下的三轴排水压缩试验测得砂样内摩擦角为35°、剪胀角为6°,但分析中取砂样内摩擦角为40°、剪胀角为10°,具体原因见文献^[15]。

2.1 试验设计

在 $1g$ 小比尺模型试验中,模型锚的长度比尺为 $1:20$,由于模型锚与原型锚的密度接近,因此重量缩尺比为 $1:8000$ 。模型锚 1(图 3(a))和模型锚 2(图 3(b))的锚爪相同,锚爪长度 L_f 为 28 cm、宽度为 43 cm。两个锚的锚柄长度分别为 36 cm 和 30 cm,总质量分别为 3.46 kg 和 3.06 kg。锚柄与锚爪间通过销轴连接,两者的夹角保持为 30° ,这也是易丛等^[26]建议用于砂土的优化夹角。

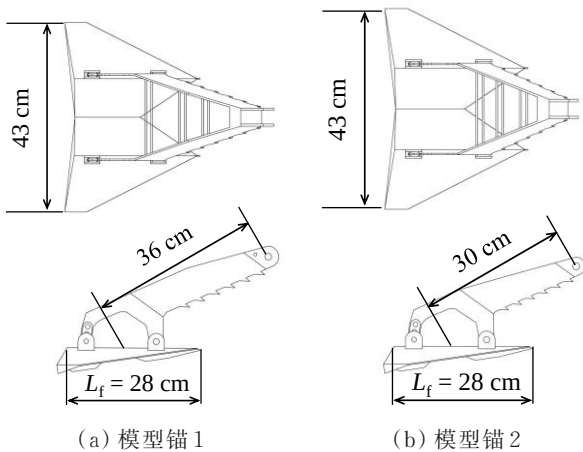


图 3 试验模型锚

Fig.3 Model anchors for test

试验中将锚放在砂土表面,使锚爪底面与砂土水平接触,然后对锚施加拖动位移。锚会向前倾倒,锚柄前端接触土体,锚爪尾端翘起而前端略微进入土中,如图 4(a)所示。上述操作模拟了实际工程中锚放置到海床后的受拉倾倒,而锚倾倒后的初始姿态(锚眼在土面上初始高度、锚爪顶面的初始水平倾角)在实际操作中会存在差异。因此,设置不同的初始姿态,对两种模型锚各自进行 4 个重复试验,考察锚初始姿态的不同对锚安装过程的影响,同时检验模型试验的可重复性,具体安排见表 1。

表 1 模型试验方案

Table 1 Scheme of model tests

试验编号	锚柄长度/ cm	锚眼在土面上初 始高度/cm	锚爪顶面的初始水 平倾角/(°)
1	36	1.5	36.7
2	36	1.2	33.6
3	36	1.5	34.6
4	36	2.0	38.1
5	30	1.5	33.7
6	30	1.5	32.6
7	30	1.5	33.3
8	30	1.3	33.5

2.2 试验结果

以模型锚 1 为例,观察到的安装过程如图 4 所示:随着模型锚逐步贯入砂土,锚上方的土体隆起逐渐发育,但在土隆将锚完全覆盖前,锚爪底面与砂土仅有很小面积保持接触。模型锚 2 的安装过程中也观察到类似现象,即传统 NR 方法的假定在表 1 所示试验中并不成立。



图 4 模型锚 1 的安装过程

Fig.4 Installation process of the model anchor 1

模型锚 1 和模型锚 2 的试验结果如图 5 所示。图 5(a)展示了抗拉力发挥过程,同一种锚的各试验值接近。为清晰展示结果,对锚 1 和锚 2 各选择两个试验,展示锚眼和锚爪尖的埋深变化(图 5(b)、(c)),以及锚爪顶面水平倾角的变化(图 5(d))。同一种锚的各试验曲线具有良好一致性,表明锚倾倒后初始姿态的差异对锚抗拉力发挥的影响不大,也证明了试验结果具有很好的可重复性。

3 验证与分析

3.1 模型试验结果分析

模型锚 1 和模型锚 2 的锚柄长度分别为 36 cm 和 30 cm,如图 5(a)所示,两种锚的抗拉力发挥在前期接近,但随着拖动距离的增加,锚 1 的抗拉力逐渐大于锚 2,两者的最终抗拉力分别约为 1280 N 和 1080 N。锚 1 的锚眼埋深小于锚 2,但二者的锚爪尖埋深差别不大(图 5(b)、(c))。两种锚的锚爪顶面水平倾角有明显差别,最终分别稳定在 14° 和 9° 左右。

图 6 更直观地展示了两种锚的运动轨迹。尽管模型锚 1 的锚眼埋深浅、锚爪水平倾角大,但因锚柄更长,使得锚爪的埋深与锚 2 接近。锚柄长度由 30 cm 增加到 36 cm,锚眼的贯入和转动减小,但最终抗拉力提升了 18%。从承载机理看,锚柄长度的增加会增大锚柄力 F_s ,即锚柄在土中的贯入阻力增加,造成锚的抗拉力提升,但贯入和转动受阻。

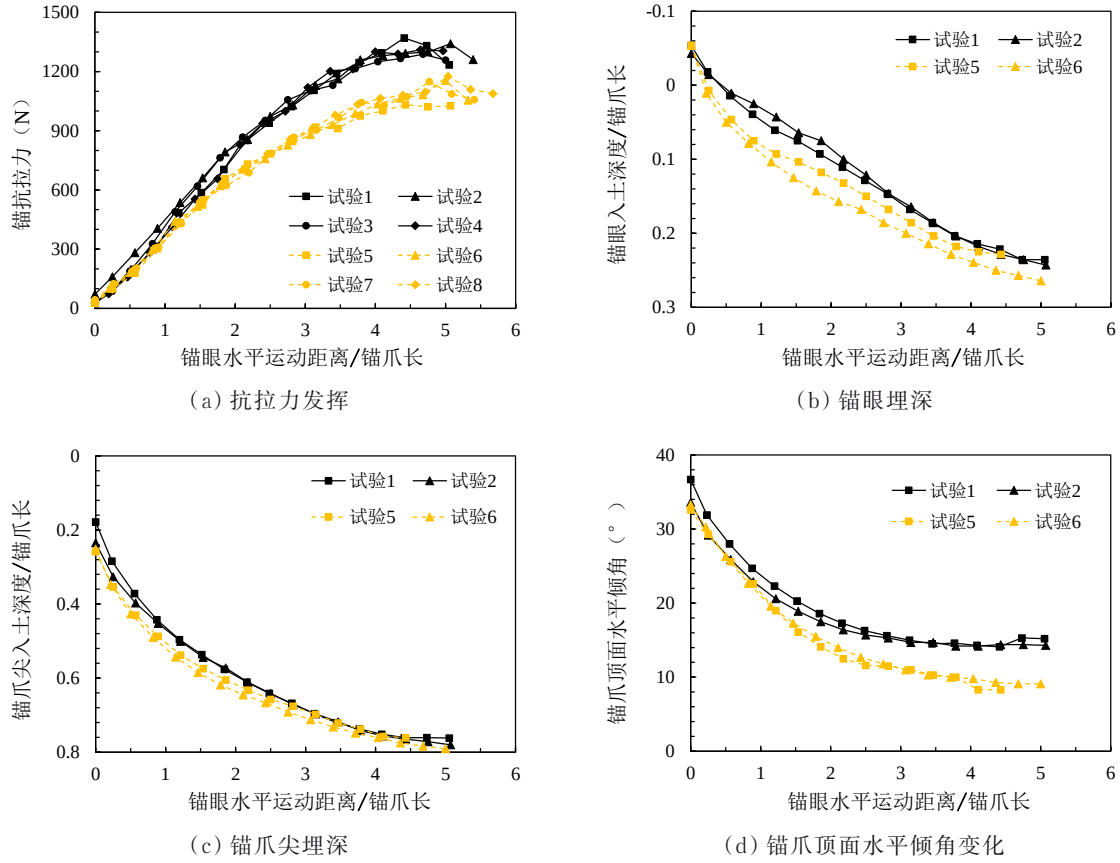


图5 模型试验结果

Fig.5 Results of the model tests

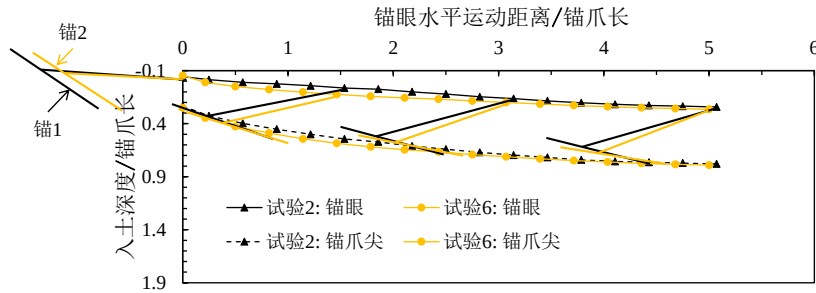


图6 锚1和锚2运动轨迹简图(水平与竖向为相同比例)

Fig.6 Sketch of the trajectories of the anchor 1 and anchor 2 (the same scale for horizontal and vertical)

3.2 运动假定检验

图4的试验现象表明,锚在锚爪底面与砂土脱开后仍持续贯入。利用试验记录的锚眼埋深、锚爪顶面水平倾角和土隆体积等,按无脱开(传统NR方法, F_b 存在)和脱开(改进NR方法, F_b 不存在)两种条件分别计算锚抗拉力,计算与试验结果的对比见图7。按无脱开计算的抗拉力低于试验值,且二者的差别随拖动距离增加而增大。允许脱开所得抗拉力在拖动前期稍高于试验值,但二者的差别随拖动距离增加而减小,拖动距离超过 L_t 后的计算值与试验值基本吻合。据此判断,锚爪底面在拖锚前期就与砂土基本脱开,在拖锚距离达到 L_t 后与砂土完全脱开,而锚始终进行贯入运动,这与改进NR方法

的假定相符合。

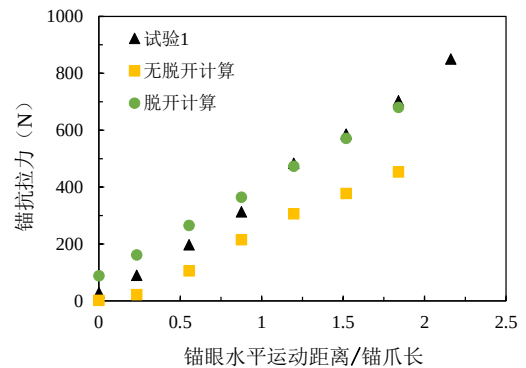


图7 锚抗拉力对比

Fig.7 Comparison of anchor holding capacity

对模型锚爪,其顶面和底面的楔形夹角约为 10° 。根据试验数据,绘制锚眼运动方向、锚爪尖运动方向和锚爪底面方向的变化曲线(图8),可见锚爪尖运动方向与锚爪底面方向大致接近,表明改进NR方法中对锚运动方向的假定合理。

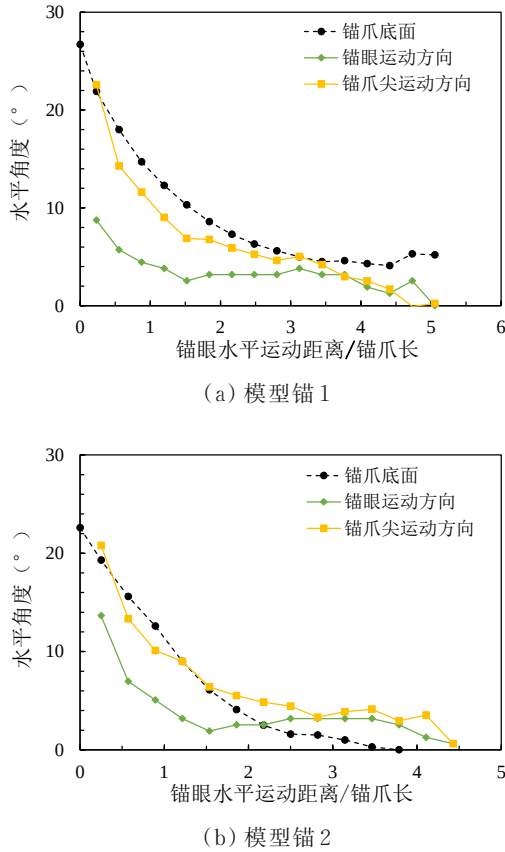


图 8 运动方向对比

Fig. 8 Comparison of the motion direction

试验中锚爪顶面和锚眼拉力的角度变化见图9,锚爪顶面的角度变化(即锚体转动)大于锚眼拉力角度变化。Lai等^[20]假定锚爪方向的变化等于锚眼拉力角度的变化,这与试验观察到的现象不一致。

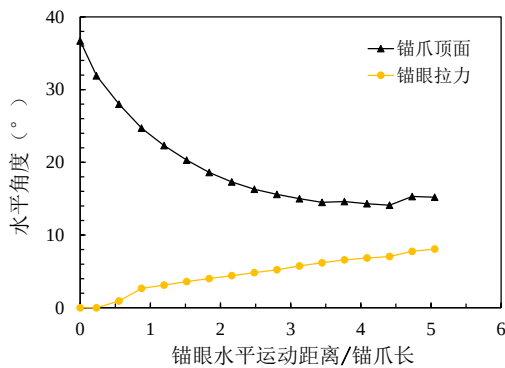


图 9 锚爪与锚眼拉力角度变化

Fig. 9 Variation of the fluke orientation and anchor force angle

3.3 预测结果对比

采用改进NR方法,对两种模型锚的试验结果进行预测,结果对比见图10。预测的锚抗拉力和运动轨迹接近试验结果,预测的抗拉力值在前期稍大但在后期与试验值接近。改进NR方法对模型锚1和模型锚2的试验结果均能进行较好预测,在试验和预测曲线中均观察到锚1和锚2间的锚爪顶面水平倾角差异。图10中也给出了传统NR方法的预测结果,当锚爪底面与砂土脱开后,传统NR方法明显低估了抗拉力和锚爪的贯入深度,改进NR方法的预测更准确。

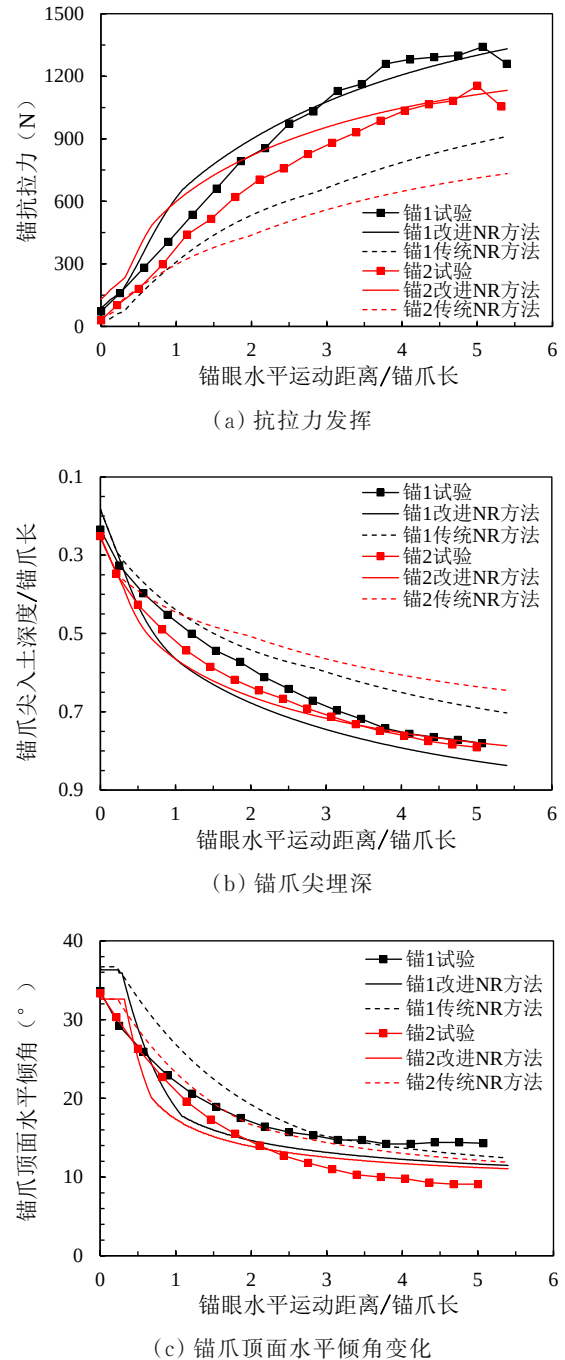


图 10 小比尺试验结果预测对比

Fig. 10 Comparison of predictions and small-scale model tests

为进一步验证改进 NR 方法的合理性,对两个公开发表的离心机试验进行预测。模型锚为 1:80 的 Vryhof Stevpris 锚,模型锚重 62 g,锚爪长度和宽度分别为 62 mm 和 53 mm,详细结构尺寸见文献[21]。两个试验分别考察密砂和松砂中的安装,密砂内摩擦角为 44° 、剪胀角为 5° 、有效重度为 10.5 kN/m^3 ,松砂内摩擦角为 40° 、剪胀角为 0° 、有效重度为 9.5 kN/m^3 。图 11 中试验曲线在中间段有骤降,原因是整个试验分为前后两段完成。改进 NR 方法与离心机试验结果对比见图 11,在密砂和松砂中的预测均与试验曲线接近,前期的预测抗拉力要比试验值稍大。这表明锚爪底面与砂土,在拖锚前期可能存在接触,但在后期脱离接触。

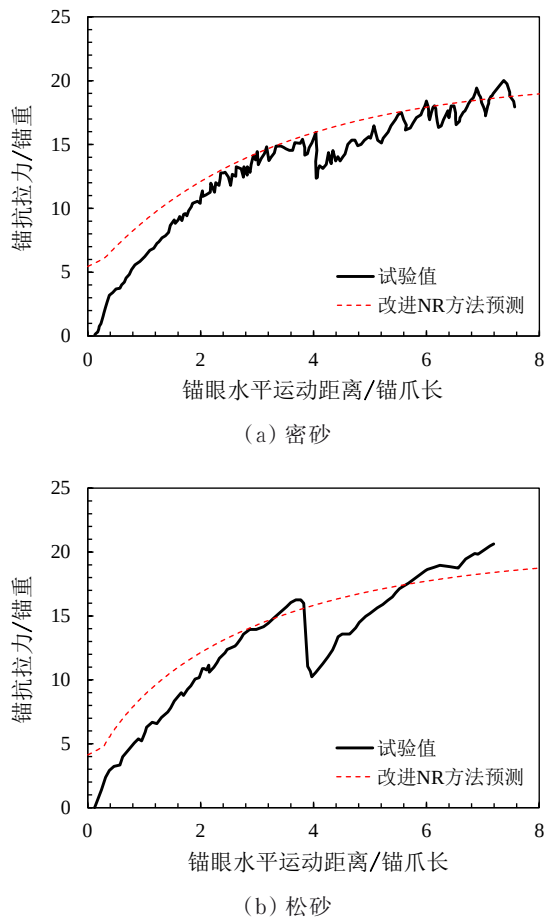


图 11 离心机试验结果预测对比

Fig.11 Comparison of predictions and centrifuge model tests

4 结论

针对砂土中拖曳锚的运动轨迹及抗拉力预测问题,基于 Neubecker 和 Randolph 的分析框架,考虑锚爪底面与砂土脱开后锚的贯入运动,修正锚抗拉力计算模型和增量运动假定,提出了锚运动轨迹和抗拉力的改进预测方法。通过两种锚柄长度的模型锚的小比尺试验,以及公开的离心机试验,检验

了改进方法的合理性。主要结论如下:

1) 试验中锚柄长度由 30 cm 增加至 36 cm 时,虽然锚眼的贯入深度和锚体转动角度减小,但最终抗拉力增加了 18%。锚柄长度的增加,会限制锚的贯入和转动,但也能适当提升抗拉力。

2) 试验结果表明,模型锚在锚爪底面与砂土脱开后仍能继续贯入,锚爪尖的运动方向大致平行于锚爪底面。

3) 提出了一种改进方法,能对锚爪底面与砂土脱开后锚的贯入过程进行分析,更合理地预测拖曳锚在砂土中的运动轨迹和抗拉力。

参考文献

- [1] GOURVENEC S, RANDOLPH M F. Offshore geotechnical engineering [M]. London: CRC Press, 2011: 315-317.
- [2] 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.
- [3] ABS. Guidance notes on design and installation of drag anchors and plate anchors [S]. Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2018.
- [4] 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.
- [5] ABSG Consulting Inc. Floating offshore wind turbine development assessment: Final report and technical summary: Tasker order 140M0120F002 [R]. ABS Group, 2021.
- [6] Vryhof. Vryhof manual: The guide to anchoring [M]. The Netherlands: Vryhof, 2018: 29, 50-51.
- [7] LELIEVRE B, TABATABAEE J. The performance of marine anchors with planar flukes in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4): 520-534.
- [8] LIU H X, LI Y, YANG H T, et al. Analytical study on the ultimate embedment depth of drag anchors [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(14/15): 1292-1306.
- [9] ZHANG W, LIU H X, LI X Z, et al. An analytical method for positioning drag anchors in seabed soils [J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(1): 49-64.
- [10] AUBENY C, GILBERT R, RANDALL R, et al. The performance of drag embedment anchors (DEA) [R]. Texas A & M University, 2011.
- [11] 张伟, 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 Sci-

- ence Edition), 2010, 40(3): 581-586. (in Chinese)
- [12] YAN S W, GUO B C, SUN L Q, et al. Analytical and experimental studies of dragging hall anchors through rock berm [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 529-538.
- [13] 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)
- [14] REN Y X, GUO W, WANG Y D, et al. Kinematic trajectory analysis of dragging hall anchor in sand [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 247: 110699.
- [15] 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)
- [16] DUNNAVANT T W, KWAN C T. Centrifuge modelling and parametric analyses of drag anchor behavior [C]//Offshore Technology Conference. May 3-6, 1993. Houston, Texas. OTC, 1993: OTC-7202-MS.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] O' NEILL M P, BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Drag anchor fluke-soil interaction in clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 78-94.
- [20] LAI Y, CHEN C, PAN A H, et al. Centrifuge modelling and the modified limit equilibrium prediction for drag embedment anchor installation in sand [J]. *Applied Ocean Research*, 2025, 154: 104390.
- [21] NEUBECKER S R, RANDOLPH M F. The static equilibrium of drag anchors in sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(4): 574-583.
- [22] NEUBECKER S R, RANDOLPH M F. The kinematic behaviour of drag anchors in sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(4): 584-594.
- [23] ASLKHALILI A, SHIRI H, ZENDEHBOUDI S. Reliability assessment of drag embedment anchors in sand and the effect of idealized anchor geometry [J]. *Safety in Extreme Environments*, 2020, 2(1): 37-55.
- [24] Det Norske Veritas. Design and installation of fluke anchors: DNV-RP-E301 [S]. Oslo, Norway: DNV, 2021.
- [25] NEUBECKER S R, RANDOLPH M F. Profile and frictional capacity of embedded anchor chains [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(11): 797-803.
- [26] 易丛, 李辉, 孙国栋, 等. 考虑土隆发育的砂土中拖曳锚安装预测[J/OL]. *海岸工程*, 2025: 1-8. (2025-07-14). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HAGC20250711001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. YI C, LI H, SUN G D, et al. Prediction of drag anchor installation in sand by considering accumulation of soil heave [J/OL]. *Coastal Engineering*, 2025: 1-8. (2025-07-14). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HAGC20250711001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)

(编辑 XXX)