



砂质海岸海底结构物锚固承载力试验研究*

童家鹏, 程书凤, 尹纪富, 冒小丹, 洪国军

(中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 航道疏浚技术交通行业重点实验室, 上海 201028)

摘要: 针对砂质海岸海底结构物因锚固力过剩致使回收困难的问题, 开展海底结构物锚固承载力试验研究。搭建简易海底结构物试验装置模型, 模拟砂质海岸环境下的锚固-抬升及锚固-倾覆过程; 通过控制变量法改变锚固深度与结构物总质量, 采用高精度测量装置采集锚固承载力数据; 基于试验数据, 运用多元线性回归模型量化锚固深度、结构物总质量对承载力的影响规律。结果表明, 锚固深度和结构物总质量对垂向承载力和横向承载力均呈正向影响, 且大致呈线性关系, 回归模型拟合度良好, 其中垂向承载力回归模型拟合度 R^2 为 0.904, 横向承载力回归模型拟合度 R^2 为 0.974。在锚固设计中, 建议在确保结构物具备抗倾覆性能的基础上合理确定锚固深度与结构物总质量, 以平衡抗倾覆性能与易回收性。

关键词: 砂质海岸; 海底结构物; 锚固承载力; 垂向承载力; 横向承载力; 影响因素

中图分类号: U655.53; P754.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0056-08

Experiment on anchoring bearing capacity of subsea structure in sandy coast

TONG Jiapeng, CHENG Shufeng, YIN Jifu, MAO Xiaodan, HONG Guojun

(Key Laboratory of Waterway Dredging Technology of Ministry of Transport,

CCCC National Engineering Research Centre of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201028, China)

Abstract: To address the challenge of difficult recovery of subsea structures on sandy coasts caused by excessive anchoring force, the experimental research on the anchoring bearing capacity of subsea structures is conducted in this paper. A simplified experimental device model of subsea structures is built to simulate the anchoring-lifting and anchoring-overturning processes in a sandy coastal environment. The control variable method is adopted to adjust the anchoring depth and total mass of the structure, while high-precision measuring equipment is used to collect anchoring bearing capacity data. On the basis of the experimental data, a multiple linear regression model is applied to quantify the influence rule of anchoring depth and total structural mass on the bearing capacity. The results indicate that both anchoring depth and total structural mass have a positive impact on vertical and lateral bearing capacities, showing an approximately linear relationship. The regression models exhibit good fitting performance, with the coefficient of determination R^2 being 0.904 for the vertical bearing capacity model and 0.974 for the lateral bearing capacity model. In anchoring design, it is suggested that on the premise of ensuring the anti-overturning performance of the structure, the anchoring depth and total structural mass should be reasonably determined to balance anti-overturning performance and recoverability.

Keywords: sandy coast; subsea structure; anchoring bearing capacity; vertical bearing capacity; lateral bearing capacity; influencing factor

随着海洋开发的深入, 海底结构物的应用日益广泛^[1], 但其锚固问题在复杂多变的海底环境

中, 尤其是砂质海岸地区, 成为工程设计的关键难题。目前, 海底结构物的锚固方式主要有重力

收稿日期: 2025-09-18 录用日期: 2025-10-28

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3106205)

作者简介: 童家鹏(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为海岸工程结构。

锚、打入桩锚和吸力锚等,但这些方式在承载性能、施工难度、经济成本和可回收性等方面存在显著差异,难以同时满足结构物在服役期间的稳定性和服役期满后的易回收性要求。

近年来,国内外学者在海底结构物锚固及回收方面开展了大量研究。在锚固研究方面,学者们对不同锚固方式的承载性能进行了深入探讨,如李大勇等^[2]对比传统单桶吸力基础和裙式吸力基础的承载性能;顾培英等^[3]研究饱和粉砂土中锚杆的极限抗拔力;宋超等^[4]分析大直径钢管桩的承载力影响因素;蒋建平^[5]研究吸力式单桩在垂向和水平荷载共同作用下的承载特性;Ta等^[6]分析在不同上浮载荷影响下锚杆周围产生的孔隙压力、锚杆底部与土壤的分离程度以及破坏机制。在回收研究方面,学者们主要关注海底结构物的离底吸附力,如Vesic等^[7]揭示锚板吸附力的形成机制;Zhang等^[8]聚焦于软质海洋黏土海底的垫层地基,揭示出土体吸附力与土体固结程度及外载荷密切相关;李辉^[9]探究沉降和提升过程中结构物和土体之间的作用机理,研究土体固结和孔隙水渗流对吸附力的影响;李迎华等^[10]与祝闻崧等^[11]通过模拟海底结构物离底过程,探究离底吸附力的影响因素。

尽管已有研究取得了显著进展,但在实际工程中,部分海底结构物的锚固设计存在锚固力过剩问题,导致回收困难,耗费大量时间和资源。目前关于如何在确保结构物稳定锚固的同时实现其易于回收的平衡研究相对匮乏。鉴于此,本文旨在探索一种既能保证海底结构物稳定锚固又能实现易回收的新型锚固方案,以填补现有研究的空白,为海底结构物的锚固设计提供更具科学性和实用性的指导。

1 试验系统

试验通过搭建简易的海底结构物试验装置模型模拟海底结构物在砂质海岸上的锚固-抬升及锚固-倾覆过程,试验装置模型包括结构物模型、加载装置、测量装置、土体模型,见图1。

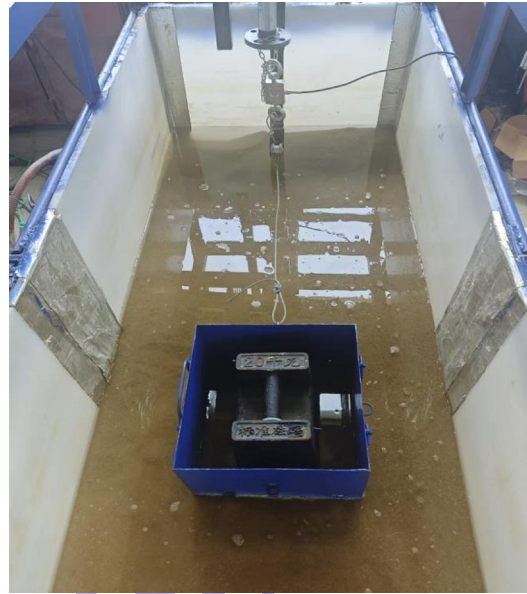


图1 试验装置模型

Fig.1 Test apparatus model

1.1 结构物模型

结构物模型为一个无盖铁盒,铁盒长300 mm、宽300 mm、高200 mm,质量为5 kg,内部可放置配载,通过改变配载质量模拟不同荷载下结构物的坐底情形,所放置的配载质量分别为5、10和20 kg。铁盒底部四角配有相同长度的锚固支腿,顶部焊有圆孔,用于连接加载装置。

1.2 加载装置

加载装置用于模拟海底结构物的离底和倾覆过程,采用控制箱控制丝杆升降机对模型进行海底结构物的离底和倾覆试验。丝杆升降机的升降杆最大行程为1 500 mm,升降速度为5 mm/s。

1.3 测量装置

测量装置为拉力传感器,其量程为0~100 kg,测量误差为量程的0.2%,采样频率为200 Hz,能够精准捕捉力的瞬时变化。

1.4 土体模型

本文试验通过在水槽内铺设砂土模拟砂质海岸土体,试验采用的水槽长2 000 mm、宽680 mm、高700 mm,采用的砂土粒径范围为0.2~3.0 mm,粒径级配见图2。土体内摩擦角为29°,颗粒形状不规则。

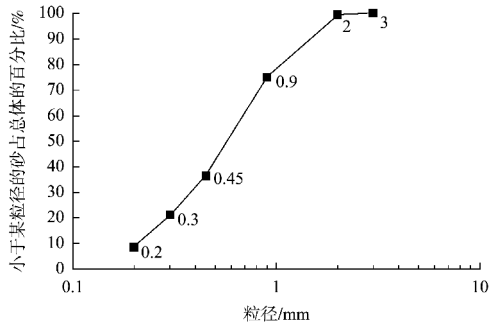


图 2 试验用砂粒径级配

Fig. 2 Particle size distribution of test sand

土体模型制作方法为：首先，将砂土在水槽内铺设平整，使铺设深度达到 250 mm；其次，向水槽内加水并使水位没过砂土 100 mm；然后静置 10 min 使砂土与水充分混合；最后将水位补充至没过砂土 100 mm。

2 试验方案和步骤

2.1 试验工况

试验设计 18 种工况用于研究锚固深度及结构物总质量对垂向承载力和横向承载力的影响，具体试验工况见表 1。

表 1 试验工况
Tab. 1 Test conditions

工况	锚固深度/mm	结构物总质量/kg	工况	锚固深度/mm	结构物总质量/kg
1	0	25	10	90	15
2	30	25	11	120	15
3	60	25	12	150	15
4	90	25	13	0	10
5	120	25	14	30	10
6	150	25	15	60	10
7	0	15	16	90	10
8	30	15	17	120	10
9	60	15	18	150	10

2.2 试验方案

试验流程分为结构物固定、结构物加载和下次试验前准备 3 个步骤。

2.2.1 结构物固定

进行结构物固定时，首先在结构物内部放置

配重块，使试验模型的质量与试验工况保持一致。其次，将结构物支腿完全埋入海岸中，使结构物底面完全与砂接触。最后，将结构物与拉力传感器相连。待固定完成后，静置 10 min，以模拟海底结构物的坐底场景。在本文试验中，结构物上部未覆土，以更直接地模拟海底结构物在砂质海岸环境中仅依靠自身结构及配重与砂土相互作用的锚固情况。

2.2.2 结构物加载

开启拉力传感器数据采集仪和丝杆升降机，操纵丝杆升降机以 5 mm/s 的速度进行加载，分别进行垂向加载(模拟结构物回收)和横向加载(模拟结构物抗倾覆)。

垂向加载：以恒定速率施加向上的拉力，直至锚固结构物完全离底或达到最大加载能力，记录垂向拉力-时间曲线。试验过程中的最大拉力为该工况的垂向承载力。

横向加载：以恒定速率施加水平拉力，直至锚固结构物发生明显倾覆或达到最大加载能力，记录横向拉力-时间曲线。试验过程中的最大拉力为该工况的横向承载力。

2.2.3 下次试验前的准备工作

在每次试验结束后，重新平整砂土，并适当加水补充试验过程中损失的水分，确保砂土状态与试验前保持一致，其后静置 10 min，使砂土与水充分混合，确保砂土状态与试验前保持一致。为确保试验结果的可靠性和可重复性，每种锚固方式至少进行 3 次重复试验，取平均值作为结果。同时，试验过程中严格控制砂土密实度、加载速率、加载方向等变量，确保试验条件的一致性。

3 试验结果分析

3.1 重复性验证

为验证试验方案和设备的稳定性以及可靠性，首先将对工况 1 进行重复性试验，两次试验测得的垂向拉力变化曲线见图 3。可以看出，两次试验

的垂向拉力变化曲线一致性较强, 最大承载力分别为 286 和 285 N, 基本相同。经验证, 本文的试验操作流程, 试验装置表现出良好的稳定性和可靠性, 适配于后续试验需求。

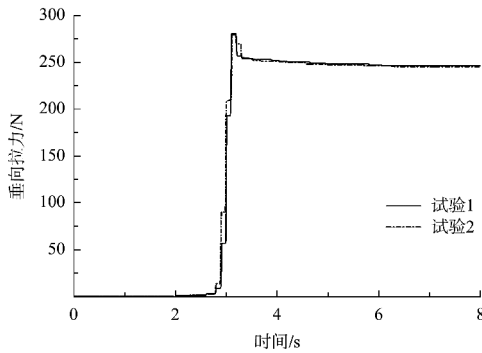
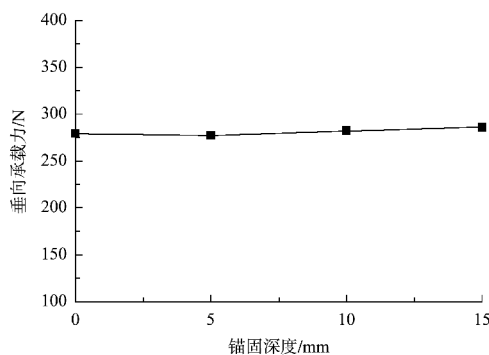


图 3 重复性验证结果

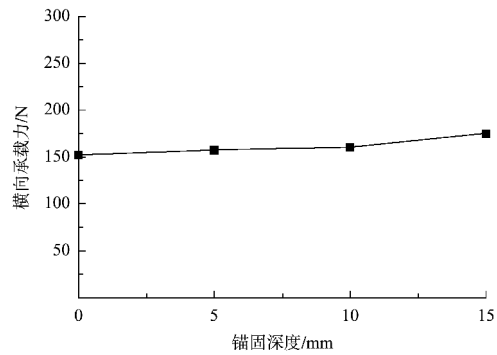
Fig. 3 Repeatability verification results

3.2 最小有效锚固深度验证

试验锚固深度 d 范围为 0~150 mm, 当 $d=0$ mm 时, 无实际锚固作用, 无法反映锚固支腿-砂土相互作用, 通过预试验对支腿埋入砂土最小有效深度进行验证, 选取锚固深度 d 为 0、5、10 及 15 mm 进行横向加载和垂向加载试验, 结构物总质量 25 kg, 不同锚固深度下的垂向承载力及横向承载力结果见图 4。与 d 为 0 mm 时对比, 当 d 为 5 和 10 mm 时, 垂向承载力与横向承载力变化较小, 当 $d=15$ mm 时, 虽然垂向承载力变化仍然较小, 但横向承载力出现明显变化, 故选取 $d=15$ mm 为最小有效锚固深度。



a) 垂向加载



b) 横向加载

图 4 最小有效锚固深度结果

Fig. 4 Results of minimum effective anchorage depth for lateral loading

3.3 结构物加载过程

3.3.1 垂向加载过程

工况 6 的垂向加载试验所得拉力曲线见图 5。为明确不同阶段的受力特性, 根据曲线形态将其划分为 4 个阶段。第 1 阶段为初始锚固阶段, 此阶段模拟结构物固定坐底的过程, 其垂向拉力为 0 N; 第 2 阶段为未离底阶段, 海底结构物在该阶段受到砂质土体的吸附作用, 垂向拉力迅速上升, 直至达到峰值; 第 3 阶段为离底临界阶段, 结构物与砂质土体的接触面开始分离, 水体逐渐渗透至底座下部与土体之间的空隙, 致使垂向拉力逐渐减小; 第 4 阶段为完全离底阶段, 此时结构物已完全脱离海岸, 垂向拉力主要由模型自身重力提供。

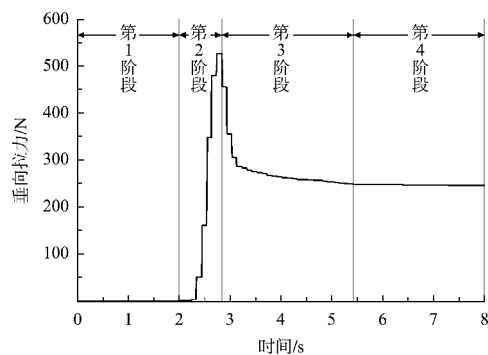


图 5 工况 6 的垂向加载拉力变化过程

Fig. 5 Tensile force variation process during vertical loading under work condition 6

3.3.2 横向加载过程

工况 6 的横向加载试验所得拉力曲线见图 6。为明确不同阶段的受力特性，根据曲线形态将其划分为 5 个阶段。第 1 阶段为初始锚固阶段，该阶段模拟结构物固定坐底的过程，横向拉力为 0 N；第 2 阶段为未倾覆阶段，海底结构物开始受到砂质土体的侧向阻力作用，横向拉力迅速上升，直至达到峰值；第 3 阶段为倾覆临界阶段，结构物与砂质土体的接触面开始分离，水体逐渐渗透至底座下部与土体之间的空隙，致使横向拉力逐渐减小；第 4 阶段为完全倾覆阶段，海底结构物在该阶段被拖动发生横移，在横移过程中，结构物前沿堆积砂石，导致横向拉力再次上升；第 5 阶段为稳定下降阶段，结构物继续移动，砂土被进一步扰动，松动并重新分布，减少了结构物与砂土之间的接触面积，削弱了砂土对结构物的阻力，从而使横向拉力再次下降。

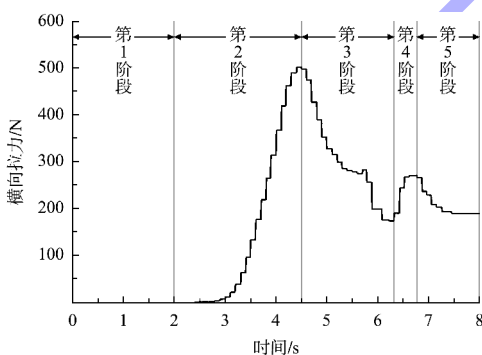


图 6 工况 6 的横向加载过程拉力变化
Fig. 6 Tensile force variation process during lateral loading under work condition 6

3.4 锚固深度对承载力的影响

本文选取 6 种锚固深度，分别为 15、30、60、90、120 和 150 mm，用以研究不同锚固深度对承载力的影响规律。

3.4.1 锚固深度对垂向承载力的影响

不同锚固深度下的垂向承载力见图 7。可以看出，锚固深度对垂向承载力存在显著影响，随着锚固深度的增加，垂向承载力呈现出先缓慢增加、后快速增加的规律。在初始阶段，当锚固深度较

小时，结构物与砂质土体之间的吸附力较小，垂向承载力主要由结构物和所加配载的重力提供。随着锚固深度的逐渐增加，结构物支腿插入砂质土体的深度增加，砂土对结构物的吸附力以及摩擦力逐渐增大，使得垂向承载力增大。此外，由图 7 还可看出，在不同结构物总质量下，随着锚固深度的增加，垂向承载力的增长趋势基本一致，且垂向承载力与锚固深度大致呈线性关系，锚固深度每增加 10 mm，垂向承载力平均增加 12.65 N。

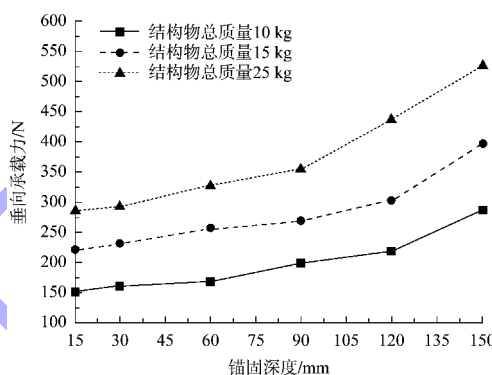


图 7 不同锚固深度下垂向承载力变化过程
Fig. 7 Variation of vertical bearing capacity under different anchoring depths

3.4.2 锚固深度对横向承载力的影响

不同锚固深度下的横向承载力见图 8。可以看出，锚固深度对横向承载力存在显著影响，随着锚固深度的增加，海底结构物的横向承载力呈现出明显的增长趋势。在锚固深度较小时，结构物支腿与砂质海岸的接触面积相对较小，砂土对结构物的侧向约束力有限，导致横向承载力较小。随着锚固深度的增加，锚固支腿插入砂质土体的深度增加，砂质土体与结构物支腿之间的摩擦力以及砂质土体对结构物的侧向阻力也随之增大，从而显著提高了横向承载力。此外，与垂向承载力类似，在不同结构物总质量下，随着锚固深度的增加，横向承载力的增加趋势基本一致，且横向承载力与锚固深度大致呈线性关系，锚固深度每增加 10 mm，横向承载力平均增加 20.50 N。

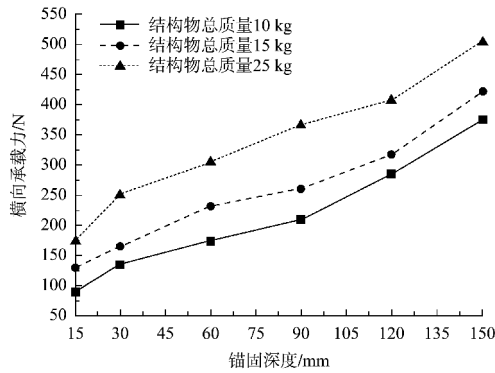


图 8 不同锚固深度下横向承载力变化过程

Fig. 8 Variation of lateral bearing capacity under different anchoring depths

3.5 结构物总质量对承载力的影响

本文选取 3 种结构物总质量, 分别为 10、15 和 25 kg, 用以研究不同结构物总质量对承载力的影响规律。

3.5.1 结构物总质量对垂向承载力的影响

不同结构物总质量下的垂向承载力见图 9。可以看出, 结构物总质量对垂向承载力存在显著影响, 垂向承载力随结构物总质量的增加而增大。当配载质量较小时, 结构总质量较小, 砂质土体在较小压力作用下密实度较低, 导致土体对结构物的吸附力也较小。随着配载质量的增大, 结构物总质量增加, 砂质土体的密实度相应提高, 土体对结构物的吸附作用更加明显, 从而提高了结构物的抗拔能力。此外, 由图 9 还可以看出, 在不同锚固深度下, 随着结构物总质量的增加, 垂向承载力的增加趋势基本相同, 垂向承载力与锚固深度之间大致呈线性关系, 结构物总质量每增加 1 kg, 垂向承载力平均增加 11.22 N。

3.5.2 结构物总质量对横向承载力的影响

不同结构物总质量下的横向承载力见图 10。可以看出, 结构物总质量对横向承载力存在显著影响, 随着结构物总质量的增加, 横向承载力呈现出单调递增的趋势。当配载质量较小时, 结构物总质量相对较小, 砂质土体对结构物的侧向约束能力较弱, 导致横向承载力相对较低。随着配载质量的逐渐增大, 结构物总质量增加, 砂质土体对结构物的侧向约束能力相对增强, 横向承载

力也随之增大。这个现象可归因于结构物总质量的增加使得结构物与砂质海岸之间的接触压力增大, 从而导致砂土对结构物的侧向阻力增加, 进而提高了结构物的横向承载能力。此外, 与垂向承载力类似, 在不同锚固深度下, 随着结构物总质量的增加, 横向承载力的增长趋势基本相同, 横向承载力与结构物总质量基本呈线性关系, 结构物总质量每增加 1 kg, 横向承载力平均增加 8.20 N。

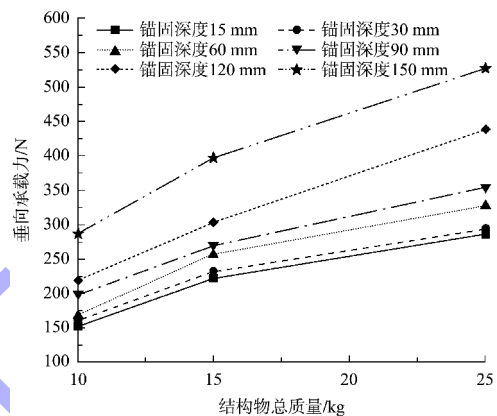


图 9 不同结构物总质量下垂向承载力变化

Fig. 9 Variation of vertical bearing capacity under different total mass of structures

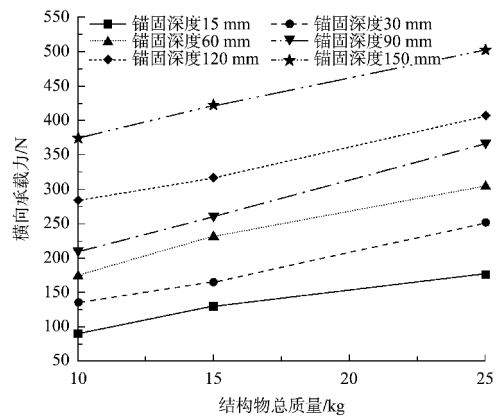


图 10 不同结构物总质量下横向承载力变化

Fig. 10 Variation of lateral bearing capacity under different total mass of structures

3.6 多元线性回归分析

为了定量分析锚固深度和结构物总质量对横向承载力及垂向承载力的影响, 采用多元线性回归方法进行分析。

3.6.1 垂向承载力多元线性回归分析

设垂向承载力为 F_v , 锚固深度为 d , 结构物

总质量为 m ，则建立如下回归模型：

$$F_v = a_1 + b_1 d + b_2 m \quad (1)$$

式中： a_1 为常数项； b_1 、 b_2 分别为锚固深度、结构物总质量的回归系数。

通过对试验数据进行回归分析，得到回归方程($R^2=0.904$)：

$$F_v = -2.15 + 1.26d + 11.22m \quad (2)$$

式中： F_v 为垂向承载力，N； d 为锚固深度，mm； m 为结构物总质量，kg。

3.6.2 横向承载力多元线性回归分析

设横向承载力为 F_h ，锚固深度为 d ，结构物总质量为 m ，则建立如下回归模型：

$$F_h = a_2 + b_3 d + b_4 m \quad (3)$$

式中： a_2 为常数项； b_3 、 b_4 分别为锚固深度、结构物总质量的回归系数。

通过对试验数据进行回归分析，得到回归方程($R^2=0.974$)：

$$F_h = -29.13 + 2.05d + 8.20m \quad (4)$$

式中： F_h 为横向承载力，N； d 为锚固深度，mm； m 为结构物总质量，kg。

3.6.3 回归方程适用条件

本文建立的垂向承载力回归方程与横向承载力回归方程，其有效性依赖于试验工况所限定的物理边界与力学条件，仅适用于满足以下参数范围的砂质海岸海底结构物锚固场景，超出该范围时，方程预测精度将因结构物-砂土相互作用机理的改变而显著降低。

1) 锚固深度与结构物尺寸关系。定义无量纲参数 p 为锚固深度 d 与结构物底面边长 L 的比值，即 $p=d/L$ ，用于量化锚固深度与结构物的适配关系，避免因尺寸效应导致侧向阻力主导机制偏离试验条件。试验有效锚固深度范围为 15~150 mm，推导出 p 的有效区间为 $0.05 \leq p \leq 0.5$ ，该区间确保结构物侧向阻力以支腿与砂土的接触摩擦作用为主导。当 $p > 0.5$ 时(即锚固深度过大或边长过小)，支腿插入深度超出砂质海床有效承载层，易诱发砂土剪切破坏，导致承载力与 d 的线性关联失效；当 $p < 0.05$ 时(即锚固深度过小或边长过

大)，结构物底部边缘应力集中效应凸显，侧向阻力转化为底部砂土整体推挤作用，与方程拟合的力学模型严重不符。

2) 结构物总质量与尺寸关系。定义单位面积荷载 q 为结构物总质量 m 与结构物底面面积 S 的比值，即 $q=m/S$ ，用于表征结构物对砂质海床的接触压应力水平，确保砂土处于充分压密且无剪切破坏的力学状态，与试验中吸附力、侧向阻力的形成机制一致。试验中结构物质量 5 kg，配载质量试验范围为 5~20 kg，吸附面积为 0.09 m²，推导出 q 的有效区间为 108.9~272.2 kPa。当 $q < 108.9$ kPa 时，砂土压密程度不足，结构物与砂土接触面孔隙水易快速渗透，导致垂向吸附力峰值降低，且侧向阻力因有效应力不足而偏小；当 $q > 272.2$ kPa 时，接触压应力超出砂质海床的抗剪强度限值，易引发砂土局部剪切破坏，使承载力与结构物总质量的线性增长关系断裂。对于更大尺寸的结构物，需要调整结构物总质量。

3.6.4 结构物锚固设计建议

根据上述试验结果和多元线性回归分析，提出以下海底结构物锚固设计建议。

1) 在确保结构物具备足够抗倾覆性能的基础上，应合理确定锚固深度与结构物总质量，以降低结构物回收时所需的垂向承载力，从而实现结构物的易回收性。

2) 对于抗倾覆性能要求较高的结构物，建议适当增加锚固深度与结构物总质量，以增强横向承载力。

3) 在设计过程中，应综合考量锚固深度与结构物总质量对承载力的相互影响，并借助回归模型进行优化设计，以实现最优的锚固效果。

4 结论

1) 本文借助多元线性回归分析，建立锚固深度与结构物总质量和承载力之间的定量关系模型，并定义回归方程的适用条件。垂向承载力回归模型为式(2)；横向承载力回归模型为式(4)。研究成果为砂质海岸海底结构物锚固参数的精细化设

计提供了可直接应用的计算模型。

2) 针对砂质海岸海底结构物“抗倾覆-易回收”的矛盾需求,本文提出锚固定量设计准则:确保结构物具备抗倾覆性能的基础上合理确定锚固深度与结构物总质量,以平衡抗倾覆性能与易回收性。对于抗倾覆要求高的结构物,适当增加锚固深度与结构物总质量。

参考文献:

- [1] 李健. 双层平板承力锚在海床土中的嵌入性能及承载力研究[D]. 聊城:聊城大学, 2024.
LI J. Analytical study on the embedding performance and bearing capacity of double-plate vertically loaded anchor in seabed soils[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2024.
- [2] 李大勇, 曹立雪, 高盟, 等. 水平荷载作用下裙式吸力基础承载性能研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(1): 67-73.
LI D Y, CAO L X, GAO M, et al. Bearing capacity of skirted suction caisson in sand under horizontal monotonic/cyclic loading [J]. The ocean engineering, 2013, 31(1): 67-73.
- [3] 顾培英, 朱建荣, 邓昌, 等. 饱和粉砂土中压力分散型预应力锚杆极限抗拔力试验研究[J]. 水运工程, 2009(2): 36-39.
GU P Y, ZHU J R, DENG C, et al. Test study on ultimate pull-out force of compression dispersive prestressed anchor in saturated mealy sand [J]. Port & waterway engineering, 2009(2): 36-39.
- [4] 宋超, 李志豪, 孙益振, 等. 大直径钢管桩承载力影响因素及现场试验分析[J]. 水运工程, 2025(3): 152-157.
SONG C, LI Z H, SUN Y Z, et al. Influencing factors and field test of bearing capacity of large diameter steel pipe piles [J]. Port & waterway engineering, 2025 (3): 152-157.
- [5] 蒋建平, 孙宏涛, 高嘉若. V-H 荷载作用下海洋平台吸力式桩桶桩土承载特性研究 [J]. 海洋工程, 2023, 41(6): 1-10.
JIANG J P, SUN H T, GAO JR. Study on bearing characteristics of suction pile and soil of offshore platform under V-H load [J]. The ocean engineering, 2023, 41(6): 1-10.
- [6] TA L D, SMALL J C, THORNE C P. Effect of pore pressure dissipation on the behaviour of anchors in clay [C]// Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference. Montréal: ISOPE, 1998: 497-504.
- [7] VESIC A S. Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1971, 97(9): 1183-1205.
- [8] ZHANG Q, FANG T Y, YE G L, et al. Effect of sitting time on the breakout force of mat foundation on soft marine clay seabed [J]. Ocean engineering, 2021, 234: 108770.
- [9] 李辉. 海洋中潜坐结构物吸附力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
LI H. Study on the adsorption capacity of submerged structures in the ocean [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [10] 李迎华, 潘子英, 李龙. 潜水器坐离底吸附力模型试验研究[C]//第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰 110 周年纪念大会文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2012: 542-549.
LI Y H, PAN Z Y, LI L. Research on model test for the ocean bottom embedment and breakout of the submersible[C]//The 11th National Congress on Hydrodynamics & 24th National Conference on Hydrodynamics and Commemoration of the 110th Anniversary of Zhou Peiyuan's Birth. Beijing: China Ocean Press, 2012: 542-549.
- [11] 祝闻崧, 郭力, 袁昱超. 海底结构物坐底吸附力试验及影响因素研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(S2): 147-155.
ZHU W S, GUO L, YUAN YC. Study of bottom-sitting adsorption tests of submarine structures and the influencing factors[J]. Chinese journal of ship research, 2024, 19(S2): 147-155.

(本文编辑 王聰)