

DOI: 10.11779/CJGE2024S10005

# 霍尔锚拖曳运动状态离心模型试验与数值模拟研究

安晓宇<sup>1,3</sup>, 王斐<sup>2</sup>, 纪文栋<sup>1</sup>, 张宇亭<sup>\*2</sup>, 刘现鹏<sup>2</sup>, 李建东<sup>2</sup>, 元光宗<sup>2,3</sup>, 边天奇<sup>2,3</sup>

(1. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100044; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456;  
3. 天津大学水利工程仿真和安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 对于平铺或浅埋在海床中的海底管道和电缆, 意外的拖锚作业是影响其安全运营的重要因素之一。由于锚在土中的拖动过程中时刻发生着土的大变形和破坏, 涉及材料非线性、几何非线性及接触非线性等诸多力学问题, 通过解析的研究手段很难准确地分析拖锚过程。采用离心模型试验和数值分析相结合的手段展开拖锚研究, 测试和计算了不同重量的船锚在不同类型海床上的运动趋势、拖曳力发展规律、入土深度等。结果表明, 在低强度的黏性土海床上拖锚, 极有可能会产生一种假抓底现象; 在中高强度的黏性土海床上拖锚, 锚的拖动过程可以分为土台形成阶段、锚爪楔入阶段和运动稳定阶段三个阶段; 在无黏性土和黏性土海床上, 达到稳定阶段时拖动的距离分别是锚长的 4 倍和 1.27~1.96 倍; 对于质量大于 6 t 的霍尔锚, 无论在黏性土海床还是非黏性土海床上, 锚爪的入土深度均大于 1 m, 拖锚作业很有可能会对海管或海缆造成直接损坏, 需要引起重视。

**关键词:** 霍尔锚; 拖锚; 土工离心模型试验; 数值模拟; 入土深度

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0117-05

作者简介: 安晓宇(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程技术研究工作。E-mail: axyuser@163.com。

## Centrifugal model tests and numerical simulations of dragging motion state of Hall anchor

AN Xiaoyu<sup>1,3</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, JI Wendong<sup>1</sup>, ZHANG Yuting<sup>2</sup>, LIU Xianpeng<sup>2</sup>, LI Jiandong<sup>2</sup>, YUAN Guangzong<sup>2,3</sup>,  
BIAN Tianqi<sup>2,3</sup>

(1. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. National Engineering Research Center of Port Hydraulic  
Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China; 3. State Key  
Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** For the submarine pipelines and cables laid flat or shallowly buried in the seabed, the accidental anchor dragging operation is one of the important factors affecting their safe operation. Due to the large deformation and failure of soil during the dragging process of the anchor in the soil, it involves many mechanical problems such as material nonlinearity, geometric nonlinearity and contact nonlinearity. It is difficult to accurately analyze the dragging process through the analytical research methods. In this paper, the centrifugal model tests and numerical analysis are used to study the dragging anchor. The motion trend, the development law of drag force and the penetration depth of anchors with different weights on different types of seabed are tested and calculated. The results show that the dragging anchor in low-strength cohesive soil is likely to produce a false bottom grabbing phenomenon. For the anchors are dragged on the medium- and high-strength cohesive soil seabed, the dragging process of the anchors can be divided into three stages: soil platform formation, anchor claw wedge and motion stability. On the non-cohesive soil and cohesive soil seabeds, the drag distance at the stability stage is 4 and 1.27~1.96 times the anchor length, respectively. For the Hall anchor with the weight greater than 6 t, whether on the cohesive soil seabed or the non-cohesive soil seabed, the penetration depth of the anchor claw is greater than 1 m, and the dragging operation is likely to cause direct damage to the submarine pipelines or cables, which needs attention.

**Key words:** Hall anchor; dragging anchor; geotechnical centrifugal model test; numerical simulation; penetration depth of anchor

## 0 引言

近些年, 国内外发生了多起海管海缆受损事故, 这些事故发生的最主要原因是船舶意外锚泊作业<sup>[1]</sup>。主要表现在两个方面: 一是船舶的随意抛锚直接撞击海

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目  
(TKS20230107)

收稿日期: 2024-05-01

\*通信作者 (E-mail: tkszyt@163.com)

床表面或浅埋的海管海缆，抛锚产生的巨大冲击力造成结构损伤；二是船的拖锚作业使船锚与海管海缆发生接触而造成破坏。

针对上述问题，部分学者采用  $1g$  模型试验和数值模拟的方法对拖锚作业进行了研究。任宇晓等<sup>[2]</sup>研究了拖锚过程锚的运动特性和姿态变化，给出了锚的入土深度随水平位移的关系。闫澍旺等<sup>[3]</sup>研究了锚的姿态、运动轨迹和锚抓力的变化规律，确定了锚在砂土中的抓力系数。其他学者采用数值模拟的方法对拖锚作业的拖曳力发展规律、入土深度等内容开展研究<sup>[4-5]</sup>。总的来看，学者大多采用  $1g$  模型试验的结果对数值模型进行验证，可以做规律性的研究。土工离心机是用离心力模拟重力，在超重力场条件下，利用小比例尺模型，揭示原型岩土工程的应力和变形规律，所得到的结果可以直接反映工程实际问题<sup>[6]</sup>。

本文采用了离心模型试验和数值分析相结合的手段展开拖锚研究，设计了不同类型海床的离心模型试验和数值模型，研究了不同重量的船锚在不同类型海床上的拖锚运动趋势、拖曳力发展规律、入土深度等，成果可为管道埋深和防护方案设计提供必要支撑。

## 1 试验设备及装置

### 1.1 土工离心机

试验采用天科院的 TK-C500 型土工离心机，有效容量为  $500g\cdot t$ ，最大加速度为  $250g$ ，试验模型箱内部尺寸为  $1.0\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 。如图 1 所示为拖锚试验装置示意图，由液压作动器、拉力计和钢丝绳等部件组成，试验时通过控制液压作动器的顶推，实现拖锚的模拟。

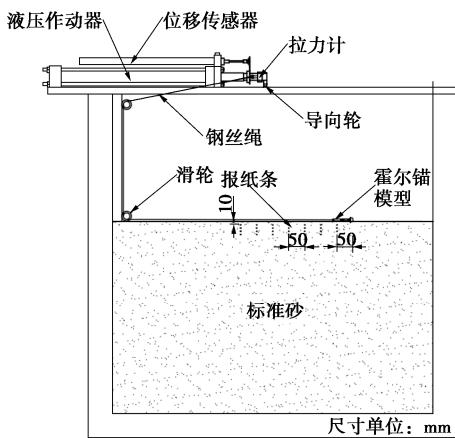


图 1 离心试验装置图

Fig. 1 Picture of centrifugal test devices

### 1.2 试验方案

试验离心加速度  $70g$ ，模型和原型的参数相似比为  $1:70$ 。参照《霍尔锚》标准规范<sup>[7]</sup>缩尺并采用金属 3D 打印制作霍尔锚模型，不锈钢材质，质量分别为  $18.4\text{ g}$ 、 $35.9\text{ g}$  和  $68.2\text{ g}$ ， $70g$  条件下对应原型质量分别为  $6\text{ t}$ 、 $12.3\text{ t}$  和  $23.4\text{ t}$ ，锚爪与锚柄最大翻转角度为  $40^\circ$ 。

### 1.3 土体参数

本文对无黏性土（日本丰浦砂）和黏性土（马来西亚高岭土）两种具有代表性的海床土开展试验研究。

无黏性土选用日本丰浦砂，平均粒径 ( $D_{50}$ ) 为  $0.17\text{ mm}$ ，土粒相对质量密度 ( $G_s$ ) 为  $2.64$ ，极限状态的剪切摩擦角 ( $\varphi'$ ) 为  $30^\circ$ 。基于 Jáky<sup>[8]</sup>提出的土体静止侧压力系数 ( $K_0$ ) 估算公式，日本丰浦砂的  $K_0$  值为  $0.5$ 。模型海床使用砂雨法进行制备，控制相对密实度  $65\%$ 。

黏性土选用马来西亚高岭土，室内试验测得材料的液限 ( $w_L$ ) 为  $65\%$  和塑限 ( $w_p$ ) 为  $38\%$ ，渗透系数  $k$  约为  $1.65\times 10^{-8}\text{ m/s}$ 。在真空环境下按  $1.5$  倍液限制作高岭土浆体，随后缓慢倒入模型箱中并进行一维固结，制备出不同强度的海床模型。最后在  $70g$  下进行一维固结，形成不排水抗剪强度  $S_u$  沿深度变化的系数为  $1.55$ 。

### 1.4 测量方案

由于砂是散体状态，且锚模型很小，在高离心场下无法动态直接监测拖锚过程中的锚爪尖端深度（入土深度），只能通过间接的方法对入土深度进行测量。试验中在砂层中埋设 4 层纸格栅，表层埋深  $10\text{ mm}$ ，各层间隔  $10\text{ mm}$ ，每层纸格栅沿水平方向设有 7 道纸条，纸条宽度  $5\text{ mm}$ ，间距  $50\text{ mm}$ ，试验完成后通过判断纸条的断裂情况来分析入土深度。为了降低纸条的刚度，在铺设纸格栅后，对纸格栅表面进行喷水软化。

由于在黏性土固结过程中无法将纸格栅或其他参考物埋入土中，黏性土海床试验的贯入深度在试验结束后进行直接测量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 入土深度

#### (1) 无黏性土海床

离心模型试验结果均换算为原型尺寸。图 2 为  $12.3\text{ t}$  霍尔锚拖锚试验后取出的纸格栅照片。

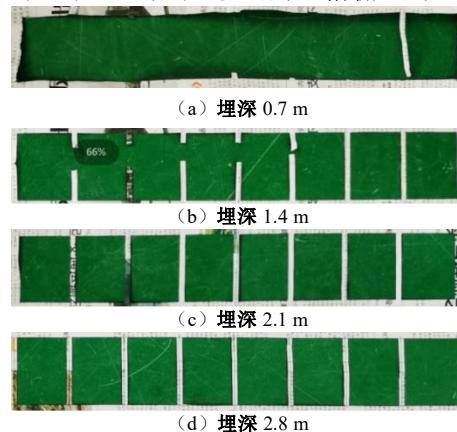


图 2 不同深度处纸格栅的断裂情况

Fig. 2 Fracture conditions of paper grids at different depths

对纸格栅的断裂情况进行整理分析, 绘制不同质量霍尔锚的入土过程如图 3 所示。从图 3 可以看出, 无黏性土海床上 6 t、12.3 t 和 23.4 t 霍尔锚的入土深度分别大于 0.7 m、大于 1.4 m 和大于 2.1 mm。

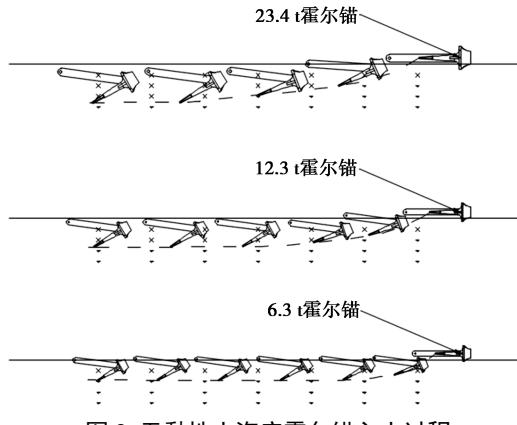


图 3 无黏性土海床霍尔锚入土过程

Fig. 3 Process of penetration of Hall anchor in cohesionless soil seabed

## (2) 黏性土海床

如图 4 (a) 为 12.3 t 霍尔锚在强度为 10 kPa 的黏性土海床中运动稳定后开挖的照片, 经测量锚爪的入土深度为 2.18 m。图 4(b) 为 23.4 t 霍尔锚在强度 5 kPa 黏性土海床中运动稳定后开挖的照片, 经测量锚冠底部的入土深度为 2.67 m。



图 4 不同霍尔锚在不同强度海床中的开挖照片

Fig. 4 Excavation photos of different Hall anchors in seabed with different strength

对比分析图 4 (a), (b), 显示船锚在不同强度的黏性土海床的入土过程存在明显不同。如图 5 所示, 当海床土为低强度黏性土时, 锚主要靠自由下落的动能贯穿软黏土, 锚冠前部的土体强度较低, 所形成的土台无法迫使锚冠带动锚爪整体下翻, 锚爪难以下翻楔入。这就说明, 当海床和河床的表层淤泥较厚时, 抛锚作业可能产生假抓底现象, 当遇到极端风浪天气, 容易发生走锚事故。而当海床为中高强度的黏性土时, 船锚入土过程与无黏性土(砂质)海床类似(如图 3), 抛锚初段锚冠前侧土体拱起土台, 锚冠在前方土台的阻挡下, 锚爪顺势下翻楔入土中。

## 2.2 拖曳力发展规律

将试验中所测得的拉力传感器数据进行处理, 获得不同类型(无黏性土和强度为 20 kPa 黏性土)海床的拖锚拖曳力变化曲线, 并绘于图 6 和图 7 中。从图

中可以看出, 拖曳力随着拖动距离的增加不断增大, 最后趋于稳定, 且锚重越大拖曳力越大。



图 5 船锚在低强度黏性土海床的入土过程

Fig. 5 Penetration process of anchor in low-strength cohesive soil seabed

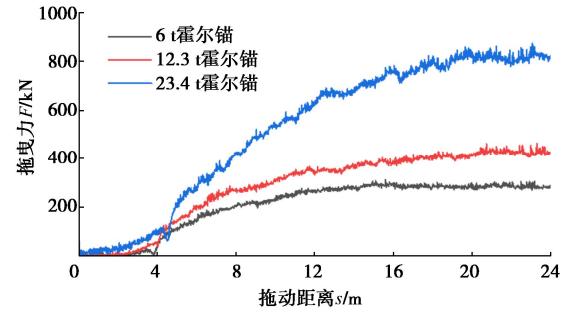


图 6 无黏性土海床拖曳力曲线

Fig. 6 Curves of drag force in cohesionless soil seabed

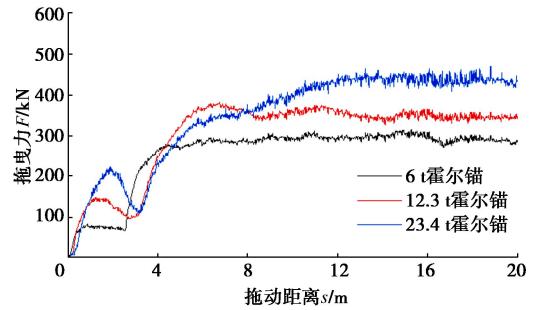


图 7 黏性土海床拖曳力曲线

Fig. 7 Curves of drag force in cohesive soil seabed

总结来看, 霍尔锚从拖动开始, 锚冠前部的土体不断积累, 致使拖曳力不断增加; 随着土台的形成迫使锚爪下翻楔入土中, 随着下翻的角度不断增加, 锚冠前部逐渐越过土台, 拖曳力呈现下降的趋势; 随着锚爪的继续下楔, 拖曳力开始逐渐增大; 当锚体楔入土中并到达一定深度后, 拖曳力趋于稳定。

对比图 6 和图 7, 黏性土和无黏性土海床在拖锚起动阶段(包括锚冠前部土台的形成和锚爪的下翻两个过程)的拖曳力发展趋势有所不同。无黏性土海床土台的形成对拖曳力发展的总体发展趋势影响相对较小, 在锚爪下翻阶段初期拖曳力存在比较微弱的降低, 随着锚爪的继续楔入, 拖曳力迅速增大到稍高于原始曲线走势。黏性土海床土台的形成对拖曳力影响较大, 存在明显的上升和下降段。同时, 在黏性土海床中, 不同重量的锚在起动阶段的拖曳力发展趋势也不尽相同, 图中表明随着锚重的加大, 锚冠前方的土台影响越来越大, 造成土台的形成阶段拖曳力不断增大。

对船锚的拖动距离  $s$  与锚长  $L$  进行归一化处理( $s/L$ ), 图 8 为拖曳力在拖锚起动阶段衰减到最低时

和达到最终稳定阶段时  $s/L$  与锚质量的对应关系。可以看出,对于无黏性土海床而言,船锚拖动约 1 倍锚长后锚爪开始下翻,拖动到 4 倍锚长后拖曳力达到稳定阶段,表明入土深度趋于稳定。对于黏性土海床而言,船锚拖动约 0.6~0.7 倍锚长后锚爪开始下翻,拖动到 1.27~1.96 倍锚长后拖曳力达到稳定阶段,当然锚质量越大达到稳定端时拖动距离相对越长。

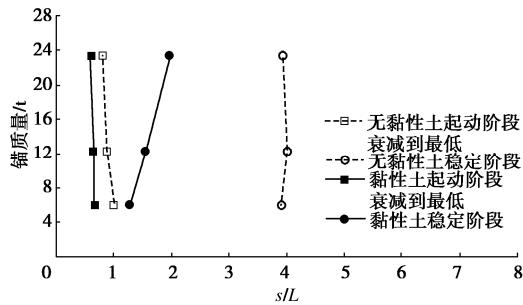


图 8 不同阶段锚质量与  $s/L$  对应关系

Fig. 8 Corresponding relationship between anchor weight and  $s/L$  at different stages

### 3 数值模拟

#### 3.1 数值模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型,通过 CEL 方法模拟拖锚过程。土体模型将区域划分为材料流动区和材料填满区两部分,流动区厚度 5 m,保证土体大变形过程中的流动。数值模型尺寸为 70 m×50 m×25 m(长×宽×高),土体模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型,模型参数如表 1 所示。

表 1 海床土体有限元模型参数

Table 1 Parameters of finite element model for seabed soil

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量 $E$	泊松 比 $\nu$	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa
黏土	1750	500Su	0.48	0	5/10/15/20
砂	1950	8 MPa	0.3	33	0

霍尔锚模型参照《霍尔锚》标准规范<sup>[17]</sup>进行建模。各部件间采用铰接方式连接,锚柄和锚爪的最大偏转角度为  $40^{\circ}$ ,锚质量分别为 6 t、12.3 t 和 23.4 t。经过拖锚速度敏感性分析确定拖锚速度为 1.25 m/s。

网格划分时,在锚体影响较为剧烈的范围内,适当加密网格,模型下部网格划分较为稀疏。锚的网格尺寸为 0.1 m,拖锚区域欧拉体网格尺寸为 0.1 m。

#### 3.2 模拟结果

##### (1) 运动过程分析

霍尔锚在黏性土海床中的运动过程可以分为三个阶段:

a) 土台形成阶段。随着拖动距离的不断增加,锚冠前部土体不断累积形成土台,土台的形成和锚爪的

自重共同促使锚爪下翻并楔入土体,如图 9 (a) 所示。

b) 锚爪楔入阶段。锚爪不断向下楔入土体,如图 9 (b) 所示。

c) 运动稳定阶段。随着锚爪的不断楔入,整个锚体进入土体,随着拖锚距离的不断增大,入土深度不再增加,达到运动稳定阶段,如图 9 (c) 所示。

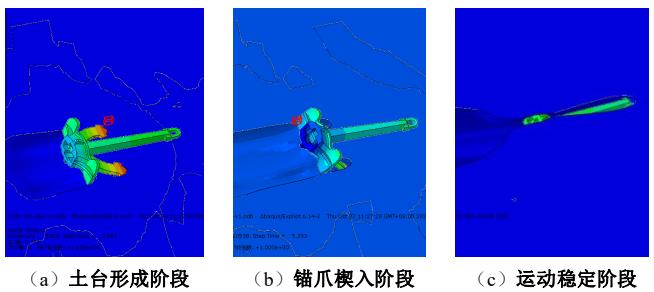


图 9 霍尔锚在黏性土海床中的运动过程

Fig. 9 Motion process of Hall anchor in cohesive soil seabed

##### (2) 入土深度

图 10~12 分别给出了 6 t、12.3 t 和 23.4 t 霍尔锚在拖锚过程中的入土深度曲线。对比可以看出,船锚在运动一段距离后,入土深度迅速增大并趋于稳定,但是重锚(23.4 t)还会在自重作用下有继续向下运动的趋势。对于 6 t 的霍尔锚,船锚的入土深度基本在 0.8~1.0 m 范围内;而 12.3 t 和 23.4 t 霍尔锚,除了低强度黏性土,入土深度则与土强度呈反比关系。

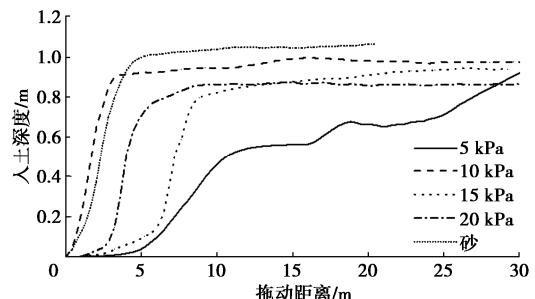


图 10 6 t 霍尔锚入土深度曲线

Fig. 10 Curves of penetration depth of Hall anchor of 6 t

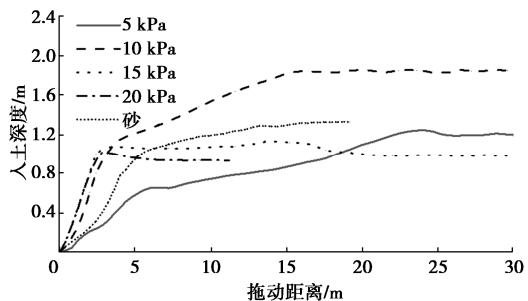


图 11 12.3 t 霍尔锚入土深度曲线

Fig. 11 Curves of penetration depth of Hall anchor of 12.3 t

当海床土体强度较小时(强度 5 kPa),船锚在土中的最低点是锚冠底角,而非锚爪尖部。从三幅图中可以看出,在低强度黏性土中拖锚,锚爪无法有效下楔,导致船锚无法在短距离内达到稳定,往往需要拖

动 5~6 倍的锚长才能达到稳定状态, 这与中高强度海床的船锚的入土深度发展规律完全不同。表 2 列出了模型试验和数值模拟得到的不同质量霍尔锚在不同海床中的入土深度最大值。

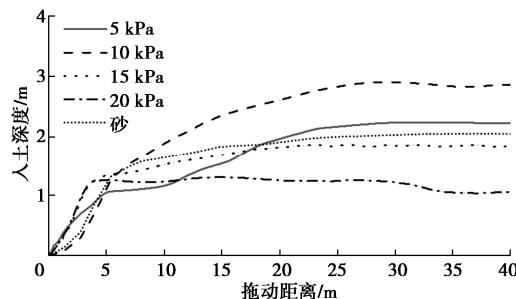


图 12 23.4 t 霍尔锚入土深度曲线

Fig. 12 Curves of penetration depth of Hall anchor of 23.4 t

表 2 入土深度统计表

Table 2 Statistical table of penetration depth of anchors

锚质量/ t	10 kPa 黏性土		20 kPa 黏性土		无黏性土	
	试验值/ m	计算值/ m	试验 值/m	计算值/ m	试验值/ m	计算值/ m
6	1.53	1.30	—	0.87	>0.70	1.06
12.3	2.18	1.86	—	1.01	>1.40	1.33
23.4	—	2.91	—	1.31	>2.10	2.02

对比分析表 3 中的数据, 可以看出, 数值计算结果与试验结果较为接近, 计算结果整体略小于试验值, 这是因为网格划分不够细而导致的网格单元整体刚度偏大, 最后造成锚爪下切深度不足, 入土深度偏小。如计算条件允许, 可适当加密网格。

## 4 结 论

本文针对 6 t、12.3 t 和 23.4 t 霍尔锚, 开展了在黏性土和非黏性土海床中拖锚过程的离心试验和数值模拟计算。得到结论如下:

(1) 在强度较弱的黏性土海床上拖锚, 锚主要靠自由下落的动能贯穿软黏土, 锚爪难以下翻楔入, 不能提供有效的锚抓力。在低强度黏性土中抛锚, 极有可能会产生一种假抓底现象, 易出现破土走锚现象。

(2) 在中高强度的黏性土海床上拖锚, 锚的拖动过程可以分为土台形成阶段、锚爪楔入阶段和运动稳定阶段。在无黏性土海床上, 拖动 4 倍锚长后拖曳力达到稳定阶段; 在黏性土海床上, 拖动到 1.27~1.96 倍锚长后拖曳力达到稳定阶段。

(3) 针对 6 t、12.3 t 和 23.4 t 霍尔锚, 无论在黏性土海床还是非黏性土海床, 锚爪的入土深度均大于 1 m, 拖锚作业可能会对海床下海缆或海管造成直接损坏。

## 参考文献:

- [1] 李海学, 朱青春, 魏颂珂. 船舶锚泊作业对海底管道安全风险分析[J]. 石油工程建设, 2023, 49(5): 47-50.(LI Haixue, ZHU Qingchun, WEI Songke. Analysis of safety risk of submarine pipelines in ship anchoring operations[J]. Petroleum Engineering Construction, 2023, 49(5): 47-50. (in Chinese))
- [2] 任宇晓, 闫澍旺, 闫 玥, 等. 基于 CEL 方法对拖锚过程的数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1573-1578. (REN Yuxiao, YAN Shuwang, YAN Yue, et al. Numerical analysis on dragging anchors in soil based on CEL[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1573-1578. (in Chinese))
- [3] 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 Shuwang, REN Yuxiao, SUN Liqiang, 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))
- [4] 孙 倩, 周 宏, 周沛林. 应急抛锚状态下拖锚对海管的撞击损伤[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2018, 23(4): 279-286. (SUN Qian, ZHOU Hong, ZHOU Peilin. Study on the collision damage of submarine pipelines by towing anchor under emergency anchorage[J]. Journal of Jimei University(Natural Science), 2018, 23(4): 279-286. (in Chinese))
- [5] 池 寅, 时豫川, 吴海洋, 等. 砂质海床中船锚运动全过程数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(6): 807-814. (CHI Yin, SHI Yuchuan, WU Haiyang, et al. Numerical simulation of whole movement process of an anchor in sandy seabed[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(6): 807-814. (in Chinese))
- [6] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1-3, 7. (BAO Chenggang, RAO Xibao. Principle of the geotechnical centrifuge model test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1-3, 7. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国船舶行业标准. 霍尔锚: GB/T 546—2016[S]. 2016. (PRC Shipbuilding Industry Standard. Hall anchor: GB/T 546—2016[S]. 2016. (in Chinese))
- [8] JÁKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal for the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, 7: 355-358.

(编校: 明经平)