

DOI: 10.11779/CJGE2024S10001

抛锚对海底管道影响的离心模型试验研究

刘海成¹, 安晓宇^{1,2}, 王斐¹, 张宇亭^{*1}, 李建东¹, 边天奇^{1,2}, 元光宗^{1,2}

(1. 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; 2. 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: 锚击是影响海底管道安全运营的重要因素之一。采用天科院 TK-C500 土工离心机以及新开发的抛锚试验装置开展了抛锚离心模型试验, 测量了海底管道的受力变化, 分析了抛锚作业对浅埋海底管道的影响。试验结果表明, 落距对管道弯矩的变化有着普遍性的影响, 管道弯矩增量与落点的水平距离和管道埋深呈现明显的非线性特征。当 12.3 t 霍尔锚落在 $\phi 630$ 管道正上方时, 各种不同落距各种不同管道埋深工况, 管道弯矩增量都远大于其塑性屈服弯矩, 管道的安全运行已经受到了严重威胁。当落距小于 3.5 m、水平距离大于 1.4 m 时和当落距增大到 7 m、水平距离大于 2.8 m 时, 管道弯矩增量不会超过塑性屈服弯矩; 随着落距继续增大, 锚落于管道一定范围内时, 都将对管道安全运行产生严重威胁。

关键词: 土工离心模型试验; 霍尔锚; 抛锚; 海底管道

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0217-05

作者简介: 刘海成(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋水动力专业技术研究工作。E-mail: 85379533@qq.com。

Centrifugal model tests on influences of anchor dropping on offshore pipelines

LIU Haicheng¹, AN Xiaoyu^{1,2}, WANG Fei¹, ZHANG Yuting¹, LI Jiandong¹, BIAN Tianqi^{1,2}, YUAN Guangzong^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport

Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University,

Tianjin 300072, China)

Abstract: Anchoring is one of the important factors affecting the safe operation of submarine pipelines. The centrifugal model tests are carried out by using the TK-C500 geotechnical centrifuge and the newly developed anchor dropping test devices. The force changes of the submarine pipelines are measured, and the influences of the anchor dropping operation on the shallowly buried submarine pipelines are analyzed. The test results show that the dropping distance has a universal influence on the change of the bending moment of the pipelines, and the increment of the bending moment of the pipelines has obvious nonlinear characteristics with the horizontal distance of the dropping point and the buried depth of the pipelines. When the Hall anchor of 12.3 t falls directly above the pipelines with $\phi 630$, the bending moment increment of the pipelines is much larger than its plastic yield bending moment regardless of the different dropping distance or the buried depth of the pipelines, and the safe operation of the pipelines is seriously threatened. When the dropping distance is less than 3.5 m and the horizontal distance is greater than 1.4 m, and the dropping distance increases to 7 m and the horizontal distance is greater than 2.8 m, the increment of bending moment of the pipelines will not exceed the plastic yield bending moment. As the dropping distance continues to increase, when the anchor falls within a certain range of the pipelines, it will pose a serious threat to the safe operation of the pipelines.

Key words: geotechnical centrifugal model test; Hall anchor; anchor dropping; offshore pipeline

0 引言

海底管道是通过密闭的管道在海底连续地输送大量油(气)的管道, 是海上油(气)田开发生产系统的主要组成部分。铺在海床表面或浅埋在海床中的海底管道不仅受到海洋水文环境和海床运动、海底地形地貌变化的影响, 还受到过往船只抛锚所带来的外界

影响。随着海洋运输行业的日益发展, 各类船舶的意外抛锚作业越来越频繁, 严重威胁着海底管道的安全

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: 2024-04-29

*通信作者 (E-mail: tkszyt@163.com)

运行。

船锚与土和管道的碰撞过程，在考虑物体与管道接触的同时，还要考虑管道与土之间的相互作用问题，因此是一个高度非线性问题^[1]。对于海底管道碰撞问题，不仅要考虑坠物与管道的接触与摩擦，而且要考虑管土之间的相互作用，国内外学者对此进行了大量研究。在试验研究方面，Palmer 等^[2]采用足尺模型对海底管道进行了撞击试验研究，他将管道分别置于钢板和砂土上，分析在不同坠物质量和坠落速度下管道的凹陷损伤深度。雷震名等^[3]采用小比尺模型试验的方法研究了抛锚作业过程中海底管道的应力状态，并对其进行了损伤分析。通过绘制不同影响因素下管道变形的对比曲线，研究了覆盖石材、抛锚速度、埋深等因素对管道损伤的影响，并基于正交试验原理分析了不同影响因素对海底管道响应的敏感性。在数值模拟方面，孙翠梅^[4]等采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元动力分析软件研究了不同水深和铺设条件下海底管道受坠物锚击的损伤规律。王振宁^[5]建立锚-管道的有限元模型，分析了锚与海床接触的动态响应过程，得到在这个过程中锚与海床的能量变换情况，锚的速度和锚在海床中的位移变化，以及该过程中，埋在岩土中的管道的应力变化，变形情况。王彦頔等^[6]基于耦合欧拉-拉格朗日大变形有限元方法，揭示了锚在贯入海床过程中锚的受力、速度及贯入深度等随贯入时间的发展规律，并利用有限元模型分析了土体强度、初始触底速度等参数对抛锚贯入问题的影响。

目前对于管道的抛锚损伤研究手段，多集中在小比尺模型槽试验和数值模拟两种方法。小比尺模型槽试验中，土体的受力状态和冲击荷载的传递特性与实际有明显差别，可作为规律分析的手段。采用数值模拟分析如砂土、碎石保护层等非连续介质、非线性、各向异性结构和土的大变形问题时存在不少困难。另外，由于试验费用高、检测条件差等原因，能真实反映实际受力状态的原型试验较少。

离心模型试验具有比尺缩小、变形相似、应力应变和破坏机理相同的特点，是开展岩土工程土与结构相互作用研究最有效的方法。本文采用铝合金管模拟海底管道，采用丰浦砂模拟砂质海床，通过抛锚离心模型试验，研究了不同因素影响下，冲击荷载对海底管道的影响。从而为海底管道埋深的工程设计和防护措施提供技术参数。

1 试验设备及装置

1.1 土工离心机

试验采用交通运输部天津水运工程科学研究院的 TK-C500 大型土工离心机^[7]（图 1），离心机有效容量

为 500g·t，有效半径为 5 m，最大加速度为 250g，最大负载 5 t。模型箱内部尺寸 1000 mm×600 mm×1000 mm（长×宽×高），采用隔栅型高刚度铝合金侧壁，可以提高模型箱的整体刚度，减少离心机高速旋转中模型箱的变形，进而降低由于模型箱的变形引起的土体力学性质的改变。

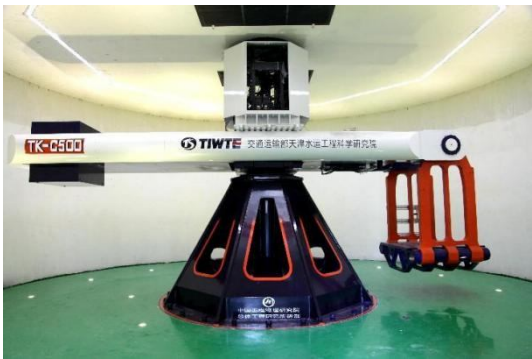


图 1 TK-C500 型土工离心机

Fig. 1 TK-C500 geotechnical centrifuge

1.2 抛锚试验装置

如图 2 所示为抛锚试验装置实物图，抛锚试验装置包括底板、液压作动器、差动位移传感器、托针和拨片等。试验前液压作动器将拨片拉至最后，将锚模型悬挂在托针上拨片前，启动离心机达到预设加速度后，驱动液压作动器以固定慢速用拨片将锚模型推离托针，实现自由落体状态，完成抛锚模拟。

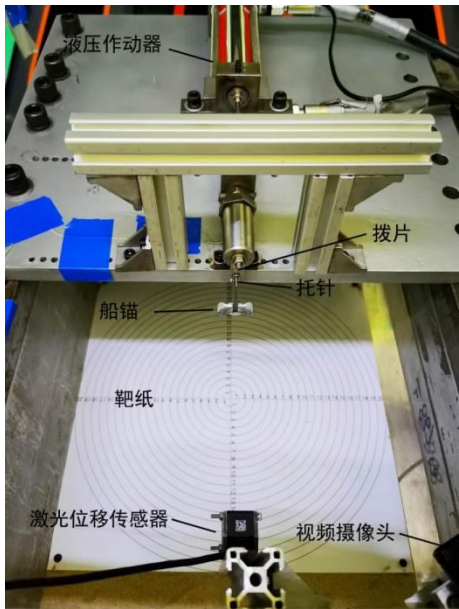


图 2 离心试验装置图

Fig. 2 Picture of centrifugal test devices

2 试验设计

2.1 试验比尺

试验设计离心加速度 70g，模型和原型参数之比

为 1 : 70, 根据离心试验基本原理和量纲分析方法选定相关参数如表 1 所示。

表 1 模型参量比例常数 (模型/原型)
Table 1 Ratios of similitude parameters

参量	比例常数	参量	比例常数
离心加速度	70	应变	1
线性尺度	1 : 70	位移	1 : 70
应力	1	密度	1
弹性模量	1	抗弯刚度	1 : 70 ⁴

2.2 结构模型

海底管道原型尺寸为 $\phi 630 \times 25$ mm, 材质为 X70 管线钢^[8], 抗拉强度 570 MPa, 屈服强度 600 MPa。隧道模型采用与 6061T6 铝合金材料模拟, 具体参数如表 2 所示, 模型如图 3 所示。

表 2 模型管道参数

Table 2 Parameters of model pipelines

类别	外径/mm	壁厚/mm	弹模/GPa	抗弯刚度/(N·mm ²)
原型	630	25	210	4.46×10^{11}
模型	9	1.5	69	1.86×10^4



图 3 管道模型

Fig. 3 Model of pipelines

在模型管道上以 50 mm 间距均匀布置 7 个弯矩测点, 每个测点布置 2 个应变片并组成半桥桥路。为保护应变片, 在应变片及接线端子处涂抹一层环氧树脂, 最后采用简支梁法标定弯矩和应变信号对应关系。

如图 4 所示为霍尔锚模型, 采用金属 3D 打印技术制作, 不锈钢材质, 尺寸约为 66 mm×44 mm×18 mm, 质量约 35.9 g, 对应原型锚重 12.3 t。



图 4 霍尔锚模型

Fig. 4 Model of Hall anchor

2.3 土体参数

地基采用日本丰浦砂进行模拟。日本丰浦砂由带

棱角的石英颗粒组成, 平均粒径 (D_{50}) 为 0.17 mm, 最大孔隙比 (e_{\max}) 为 0.977, 最小孔隙比 (e_{\min}) 为 0.597, 土粒相对质量密度 (G_s) 为 2.64, 极限状态的剪切摩擦角 (φ') 为 30°^[9]。基于 Jaky^[10]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 ($K_0 = 1 - \sin \varphi'$)。模型地基使用砂雨法进行制备, 砂雨法制模形成的土层密实度和落砂高度有关, 为保证模型土样的均匀性, 试验前预先进行砂雨法落距标定, 控制相对密实度 65%。

2.4 模型布置方案和试验工况

试验确定了霍尔锚底部距土面的距离 (落距)、管道埋深及落点与管道水平距离三个因素的变化为研究对象。如图 5 所示为模型试验布置图, 落距分别选取为 50, 100, 200 mm, 管道埋深分别为 10, 20, 30, 40 mm, 水平距离分别为 0, 20, 40 mm, 共计开展 36 个工况的离心模型试验。

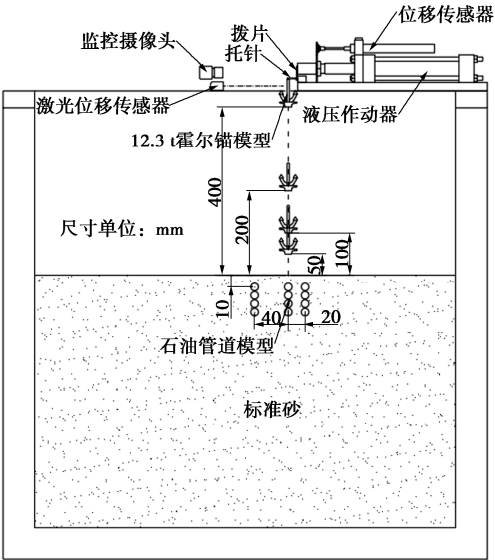


图 5 模型试验布置图

Fig. 5 Layout of model tests

3 试验结果分析

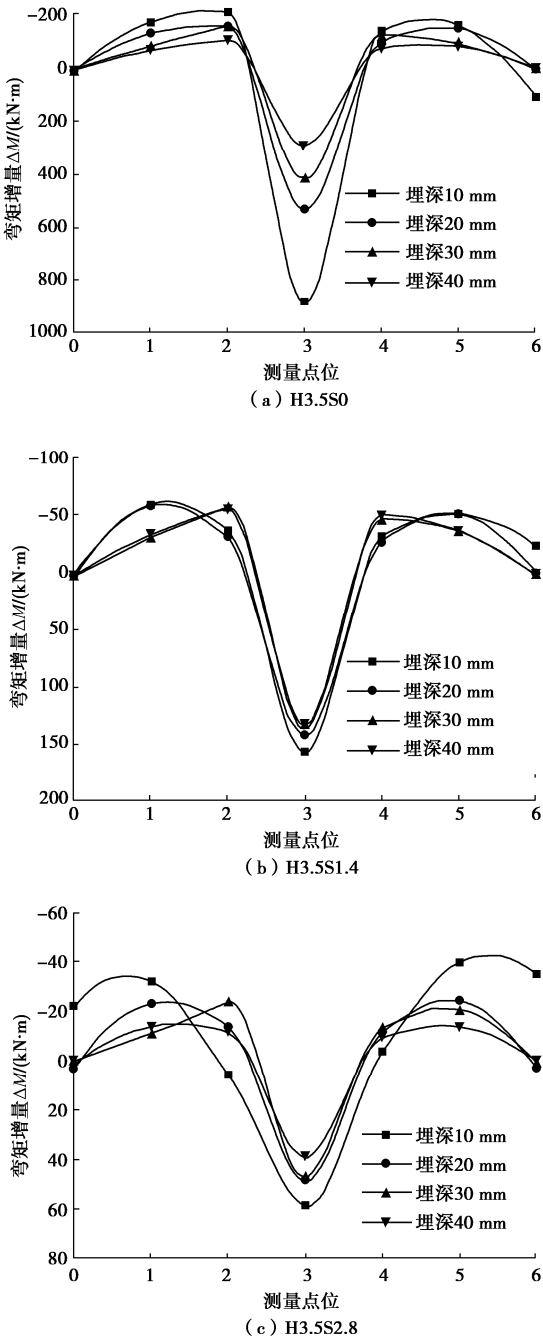
3.1 管道弯矩变化曲线

离心模型试验结果均换算为原型尺寸。图 6 给出了落距 7.0 m 时不同管道埋深、不同水平距离的管道弯矩变化图。从图 6 中可以看出, 管道弯矩曲线存在两个反弯点而呈驼峰形, 管道的中部受锚体的直接冲击向下弯曲, 弯矩变化最大。

从图 6 (a) 中可以看出, 当管道埋深 0.7 m 时, 管道中部的弯矩增量为 881.3 kN·m, 随着管道埋深的不断增加 (1.4~2.1 m), 中部的弯矩增量呈现明显减小的趋势, 约为埋深 0.7 m 时的 32.6%~60.3%。对比分析图 6 (a), (b), (c), 可以看出, 相同落距条件

下,随着落点与管道水平距离的不断增加,管道的弯矩变化量迅速减小,这意味着管道受抛锚影响的损伤程度迅速降低,其他落距弯矩变化规律亦是如此,表明离心模型试验的重复性很好。

注:图名的 H 代表落距, S 代表落点与管道的水平距离。



H-代表落距, S-代表落点与管道的水平距离

图 6 落距 7.0 m 时不同水平距离的管道弯矩变化

Fig. 6 Variation of bending moment of pipelines with different horizontal distances under falling distance of 7.0 m

3.2 中部弯矩增量变化

图 7 给出了不同落距 (3.5, 7.0, 14.0 m) 下的管

道中部弯矩增量变化。从图 7 中可以看出,管道中部弯矩增量与落点的水平距离和管道埋深呈现明显的非线性特征,落距对管道弯矩的变化有着普遍性的影响。当落点偏离管道正上方,且与管道有一定的水平距离时 (大于 $2D$),弯矩增量也迅速减小为正上方的 12.1%~20.3%,可见船锚的落点位置尤其关键。而管道埋深这个因素只有当落点在管道正上方时,才对弯矩增量有明显的影

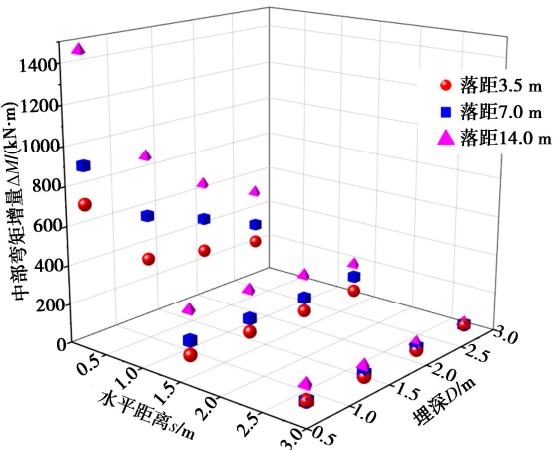


图 7 不同因素影响的管道中部弯矩增量

Fig. 7 Increment of bending moment in middle of pipelines affected by different factors

3.3 海底管道受力核算

通过试验中测得的最大弯矩变化量与海底管道的极限塑性弯矩进行对比,即可判断海底管道是否受到破坏。

M_p 为海底管道塑性弯矩^[11],其表达式为

$$M_p = \frac{1}{4} \sigma_y \cdot t^2 \quad (1)$$

式中: σ_y 为钢管的屈服应力 (MPa); t 为钢管的壁厚 (m)。本文所模拟的海底管道的原型尺寸为 $\phi 630 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,屈服应力为 600 MPa,经计算, $\phi 630$ 管道的塑性极限屈服弯矩为 93.75 kN·m。

通过分析图 7,可以得出:当 12.3 t 霍尔锚落在管道正上方时,各种不同落距和各种不同管道埋深工况,管道中部的弯矩增量都远大于 $\phi 630$ 管道的塑性屈服弯矩 93.75 kN·m,这就意味着管道已经出现了塑性破坏,管道的安全运行已经受到了严重威胁。

当落距小于 3.5 m 时,水平距离大于 1.4 m 时,管道弯矩增量不会超过塑性屈服弯矩,可认为管道是安全的;当落距增大到 7 m 时,水平距离大于 2.8 m 时,管道弯矩增量不会超过塑性屈服弯矩,可认为管道是安全的;随着落距继续增大,管道外一定范围内管道都不安全。

4 结 论

通过开展土工离心模型试验, 系统研究了不同因素影响下, 抛锚冲击荷载对海底管道的影响, 得出结论如下:

(1) 设计了抛锚离心模型试验装置, 通过模型试验测试结果, 直观地揭示了船锚落距、管道埋深及落点与管道水平距离三个因素对管线的影响。

(2) 试验数据表明, 对于海底管道的安全防护而言, 应努力避免船锚直接落于管道上方, 线路设计应尽量远离港口、锚地、避风区域及船舶航行密集区。

(3) 管道埋深不是影响管道受力变形的主要因素, 在工程设计时, 不必一味追求管道的深埋。可结合触底动能相关理论, 并参考各因素敏感性的大小来选取管道铺设的最佳方案, 以保证海底管道的安全运行。

参考文献:

- [1] 杨秀娟, 修宗祥, 闫相祯, 等. 海底管道受坠物撞击的三维仿真研究[J]. 振动与冲击, 2009, **28**(11): 47-50, 69, 202. (YANG Xiujuan, XIU Zongxiang, YAN Xiangzhen, et al. 3D simulation of submarine pipeline impacted by dropped objects[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, **28**(11): 47-50, 69, 202. (in Chinese))
- [2] PALMER A, TOUHEY M, SI H. Full-scale impact tests on pipelines[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, **32**(8): 1267-1283.
- [3] 雷震名, 谭红莹, 龚海潮, 等. 基于能量法的跨航道海底管线抗落锚实验研究[J]. 水道港口, 2015, **36**(3): 272-276. (LEI Zhenming, TAN Hongying, GONG Haichao, et al. Energy method-based experimental research on crossing sub-sea pipeline protection by rockfill against anchors[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, **36**(3): 272-276. (in Chinese))
- [4] 孙翠梅, 李效民, 郭海燕, 等. 不同水深和铺设条件下海底管道受坠物锚击损伤的研究[J]. 中国造船, 2018, **59**(4): 142-151. (SUN Cuimei, LI Xiaomin, GUO Haiyan, et al. Study on damage of submarine pipeline impacted by dropped objects under different water depth and laying conditions[J]. Ship Building of China, 2018, **59**(4): 142-151. (in Chinese))
- [5] 王振宁. 应急抛锚载荷作用下海底管道埋深数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016. (WANG Zhenning. Numerical Simulation Research of Submarine Pipeline Depth against Emergency Anchor Loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [6] 王彦颀, 任宇晓, 庄道坤, 等. 海床中落锚问题的模型试验和大变形有限元研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 202-207. (WANG Yandi, REN Yuxiao, ZHUANG Daokun, et al. Study on anchor dropping in seabed based on model tests and large deformation finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 202-207. (in Chinese))
- [7] 李建东, 张宇亭, 裴文斌. 土工离心机水平垂直双向振动台[J]. 水道港口, 2020, **41**(1): 107-112. (LI Jiandong, ZHANG Yuting, PEI Wenbin. Horizontal-vertical bi-axial shaker for geotechnical centrifuge[J]. Journal of waterway and Harbor, 2020, **41**(1): 107-112. (in Chinese))
- [8] 牛爱军, 毕宗岳, 张高兰. 海底管线用管线钢及钢管的研发与应用[J]. 焊管, 2019, **42**(6): 1-6. (NIU Aijun, BI Zongyue, ZHANG Gaolan. Development and application of pipeline steel and steel pipe for offshore pipeline in China[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, **42**(6): 1-6. (in Chinese))
- [9] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. Géotechnique, 1993, **43**(3): 351-451.
- [10] JÁKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal for the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, **7**: 355-358.
- [11] 宣 凯. 抛锚作业对海底管线损害研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012. (XUAN Kai. The Study on Anchoring Damage to Subsea Pipelines[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese))

(编校: 明经平)