

海流作用下海底管道侧向失稳特征的试验研究

闫术明, 高福平, 吴应湘
(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要

对海流载荷下管道在砂质海床上侧向失稳的物理过程进行了试验模拟, 分析了管道侧向失稳的典型特征。水动力试验发现, 管道侧向失稳经历了三个特征时间: ①砂粒起动, ②管道轻微侧向位移, ③管道侧向失稳。利用机械加载装置分别研究了两端自由和防滚两种端部约束条件下管道在侧向失稳过程中的侧向土阻力及管道沉降特征。实验发现, 随着管道水平位移的增加, 侧向土阻力逐渐增加并最终达到极限值; 而端部约束条件对极限侧向土阻力及其与管道沉降量之间的关系影响较大。两种模型试验结果具有较好的对比性, 海流引起的局部冲刷可降低管道侧向稳定性。

关键词: 海流; 海底管道; 失稳特征; 侧向稳定性; 侧向土阻力

1 引言

海洋油气资源开发已逐渐由浅海走向深海, 波浪对海底管道在位稳定性的影响逐渐减弱, 而海流则成为重点考虑的海洋环境载荷之一。合理分析海流作用下海底管道侧向稳定性对深水管道设计与施工具有重要意义。

迄今, 国内外研究者大多侧重于研究波浪作用下海底管道的侧向稳定性^[1-5], 而关于海流作用下海底管道侧向稳定性的研究却较少^[6, 7]。在海流引起的管道侧向失稳过程中, 管道沉降深度和侧向土阻力将随着管道水平位移而发生变化。对上述变化规律的揭示, 将有助于进一步建立合理描述管道侧向失稳的管土相互作用模型。本文将采用水动力和机械加载的试验方法, 模拟海流载荷下管道侧向失稳的物理过程, 进一步分析管道侧向失稳的典型特征。

2 管道侧向失稳过程的水动力试验模拟

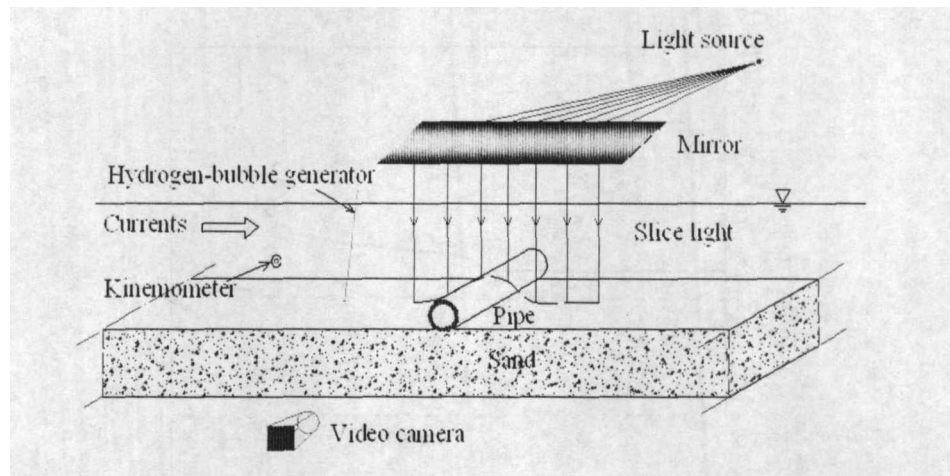
2.1 水动力模拟装置及方法

水动力试验是在单向流水槽中进行的。水槽长 19.0m, 宽 0.5m, 高 0.6m, 试验水深 0.4m, 试验段(见图 1)布置在水槽中间位置。水槽底部铺设 15 cm 厚的石英砂。试验管道为光滑的不锈钢管, 直接铺设于饱和砂床上, 水流方向垂直于管道轴线。基于相似理论, 通过改变模型管道的水下重量(W_s)可模拟大尺寸实际管道的相应水下重量条件下的侧向稳定性^[7]。模型管道直径 $D = 0.05$ m, 长度 $L = 0.47$ m。

试验土样采用中砂, 平均粒径 $d_{50} = 0.38$ mm, 有效粒径 $d_{10} = 0.30$ mm, 不均匀系数 $C_u = 1.46$, 浮容重 $\gamma' = 9.3$ kN/m³, 初始孔隙比 $e_0 = 0.73$, 相对密实度 $D_r = 0.40$ 。为了使试验结果具有可比性, 每次试验均严格控制砂的密实度, 并且利用刮砂器刮平砂床表面。

为了观测管道两侧砂粒起动和床面变化过程, 试验中采用片光源和反射镜等设备进行砂粒起动的显示; 利用数码摄像机记录砂床冲蚀过程, 同时也记录了管道的侧向失稳过程(见图 1)。

基金项目: 中国科学院“十一·五”知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-YW-L02)

图1 模拟管道侧向稳定性的水动力加载试验示意图^[7]

2.2 管道失稳过程的试验观测及描述

模型管道直接放置于砂床上, 产生一定的初始沉降量(见图 2、图 3)。试验时, 逐渐增加水流速度, 直至管道发生侧向失稳。同时, 利用流速仪记录水流速度。图 4 给出了单向水流作用下, 管道发生侧向失稳的典型过程。

通过观察发现, 砂质海床上管道侧向失稳一般经历了三个特征时间: $t = t_s$: 管道两侧砂粒起动; $t = t_r$: 管道轻微侧向位移; $t = t_b$: 管道侧向失稳。

(1) $t = t_s$: 管道两侧砂粒起动

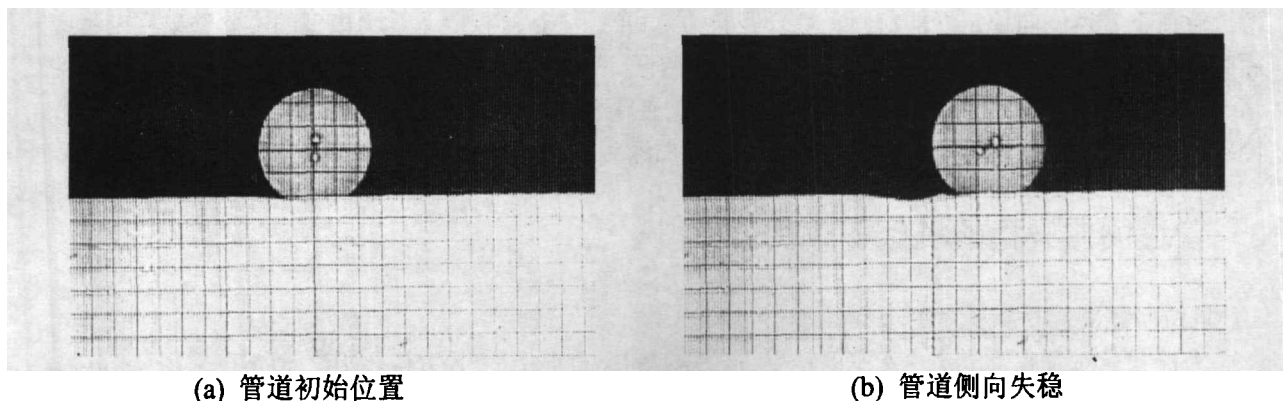
当水流速度增加到一定数值时, 管道附近砂床在水流作用下会产生局部冲刷。流动显示表明, 管道结构附近床面砂粒起动是管道尾迹涡与砂床相互作用的结果。局部冲刷首先发生在管道后方约 3~5 倍管径的位置; 随着水流速度的增加, 冲刷区域逐渐扩大。在局部冲刷过程中, 管道前方砂床表面的砂粒随着水流朝着管道方向运动, 管道后方砂床表面砂粒随水流远离管道作推移质运动。

(2) $t = t_r$: 管道轻微侧向位移

当水流速度增加到一定数值时, 管道挤压下方土体产生轻微的侧向位移, 然后管道保持静止不动, 并且可以维持一段时间(如图 3, 图 4 所示)。

(3) $t = t_b$: 管道侧向失稳

当水流速度增加到足够大, 管道突然产生较大的水平位移而侧向失稳(如图 3, 图 4 所示)。试验发现, 即使对于较大水下重量的管道, 从“管道轻微侧向位移”到“管道失稳”也是在很短的时间内发生的。



(a) 管道初始位置

(b) 管道侧向失稳

图2 海流作用下管道侧向失稳($D = 0.050 \text{ m}$, 管道水下重量 $W_s = 7.096 \text{ N/m}$)

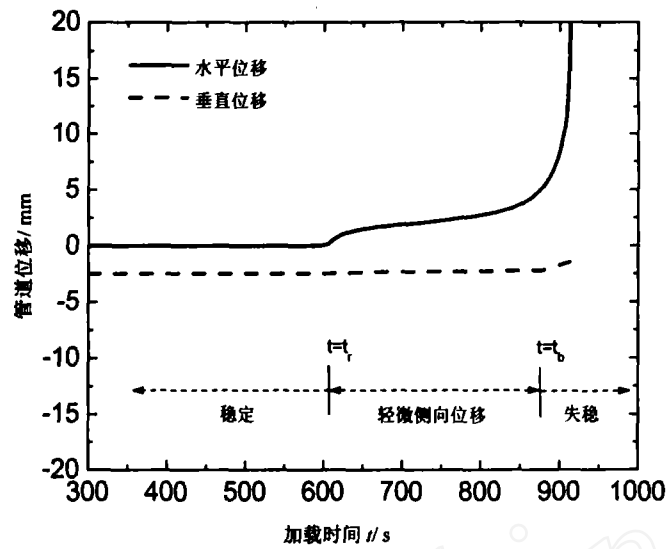


图3 海流作用下管道侧向失稳的典型位移时间曲线

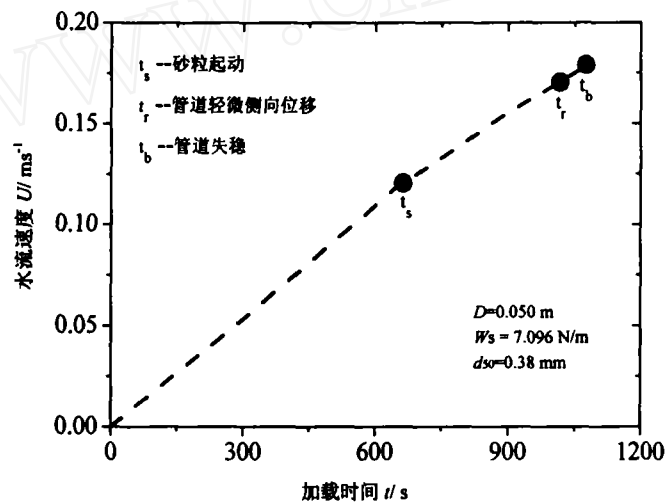


图4 单向水流作用下管道侧向失稳的典型过程

通过以上水动力模型实验,模拟了单向海流载荷引起管道在砂质海床上发生侧向失稳的典型过程,这较好地反映了“海流—管道—海床”三者之间的流固土耦合作用。基于相似理论,可获得描述海流载荷下管道侧向稳定性的流固土耦合经验关系式^[7]。上述小尺寸水动力模型的实验结果在工程应用时,需要现场实验或较大尺寸室内模型实验的验证。下文将进一步介绍大尺寸机械加载模型实验的情况。在接近于现场管道尺寸的机械加载实验中,便于测量分析管道侧向失稳过程中管道嵌入深度和侧向土阻力随着管道水平位移的变化规律,这将加深对管道侧向失稳物理过程的认识。

3 管道侧向失稳的机械加载试验模拟

3.1 机械加载试验设备及方法

海流载荷对海底管道产生水平的拖曳力(F_D)和竖直向上的升力(F_L)作用。通常可采用 Morison 方程计算海底管道受到的拖曳力和升力:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho D U^2 \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho D U^2 \quad (2)$$

式中 ρ 为海水密度, U 为海流速度, C_D 为拖曳力系数, C_L 为升力系数。拖曳力和升力系数由试验确定^[6]。可以看出, 拖曳力和升力对海底管道的共同作用可以用一个与海流方向成一定角度 (θ) 的合力代替, 因此模型试验中只须要调整角度 θ 对管道施加斜拉力就可以模拟海流对管道的作用力。根据式(1)和式(2), 并参考文献[6]给出的拖曳力和升力系数, 确定所施加斜拉力的角度变化范围为 $\theta \approx 52^\circ \sim 54^\circ$ (见图 5)。

设计加工了机械加载试验装置, 如图 5 所示。试验槽长 2.0 m, 宽 0.5 m, 高 0.6 m, 槽内装有 0.3 m 深的饱和砂土以模拟砂质海床。通过步进电机驱动的拉力装置对管道施加斜拉力, 模拟海流对管道的拖曳力和升力。利用位移传感器分别测量管道运动产生的水平位移和沉降量, 拉力传感器测量管道所受的斜拉力。在试验过程中, 利用数码摄像机记录管道的运动过程。

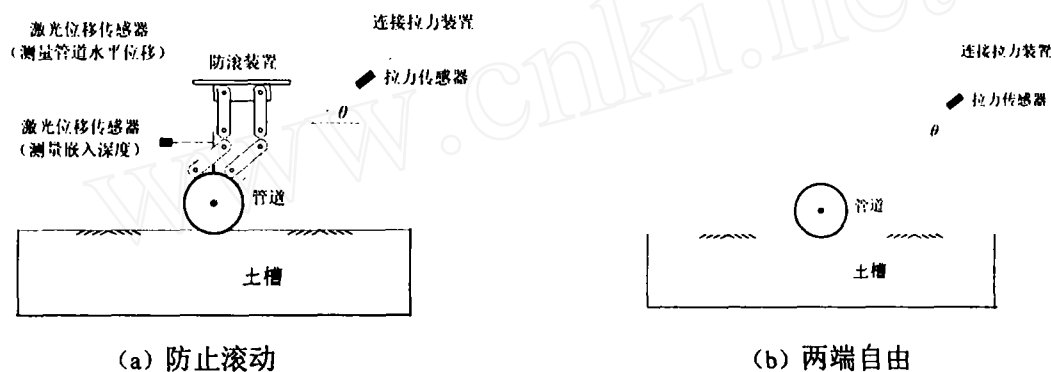


图 5 机械加载试验装置示意图

机械加载试验用砂土与水动力试验相同, 砂土特性见 2.1 节。为了使试验结果具有可比性, 每次试验均严格控制砂的密实度, 并使水槽中砂面水平模拟水平海床。

模型管道参数如下: 直径 $D = 0.20$ m, 长度 $L = 0.48$ m, 单位长度水下重量 $W_s = 0.39$ kN/m, 表面相对粗糙度 $\kappa = 5.3 \times 10^{-4}$ 。分别对以下两种管道两端约束条件的管道侧向失稳进行了研究:

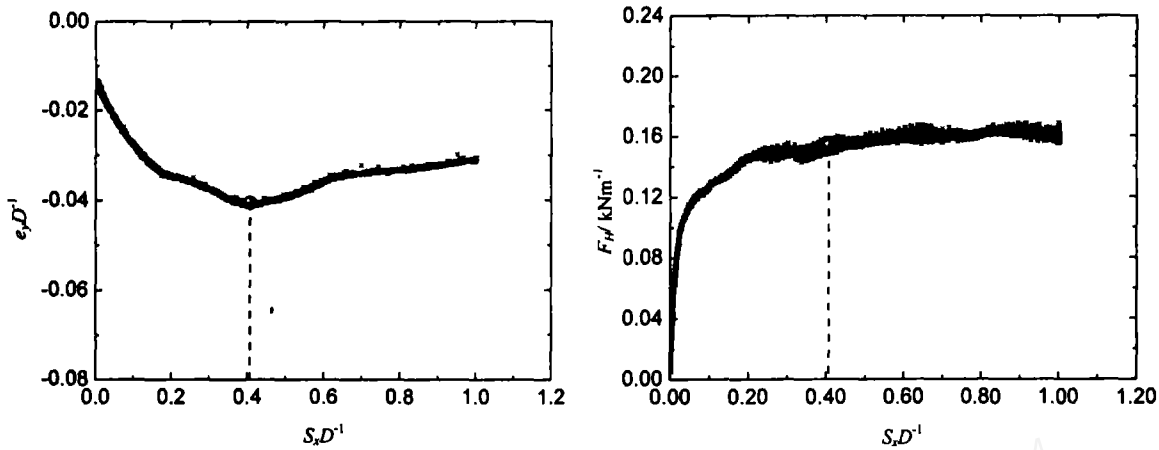
(1) 防滚条件 —— 设计制作了防滚装置 (如图 5), 该装置是一个双平行四边形机构, 使管道在运动过程中, 只能作水平和垂直方向的平动, 而不发生转动。

(2) 自由条件 —— 管道直接放置于水平砂床上, 管道不受端部约束。与上文所述水动力试验的管道端部条件相同。

3.2 防滚条件下管道侧向土阻力及沉降特征

当带有防滚装置的管道与砂床刚接触时, 释放管道使其产生初始沉降量, 同时触发激光位移传感器测量管道在土体中的初始沉降量。当管道产生稳定的初始沉降量之后, 通过拉力装置对管道施加斜拉力, 管道在防滚装置的约束下只发生水平和垂直方向的平动, 同时测量斜拉力、管道运动过程的水平位移和沉降深度, 并利用摄像机记录管道的运动过程。

图 6 给出了防滚管道的沉降深度和侧向土阻力随着管道水平位移的变化情况。从图 6 (a)可以看出, 随着水平位移的增大, 管道沉降深度先逐渐增加而后逐渐减少, 在水平位移达 $S_x \approx 0.42D$ 时, 嵌入深度达到最大值。由于管道的圆形断面特点以及自重作用, 管道刚开始运动时, 管道挤压并推动前方土体使得管道沉降深度增大; 而当斜拉力增加到一定数值时, 管道沉降深度并不持续增加, 而是逐渐变小。从图 6 (b)可见, 随着管道水平位移增加, 管道推动前方部分土体运动并产生一定的土体堆积, 管道侧向土阻力逐渐增加; 在管道嵌入深度处于最大时, 管道侧向土阻力达到极限值。防滚管道的侧向土阻力主要包括滑动摩擦阻力和被动土压力。



(a) 嵌入深度与水平位移的关系

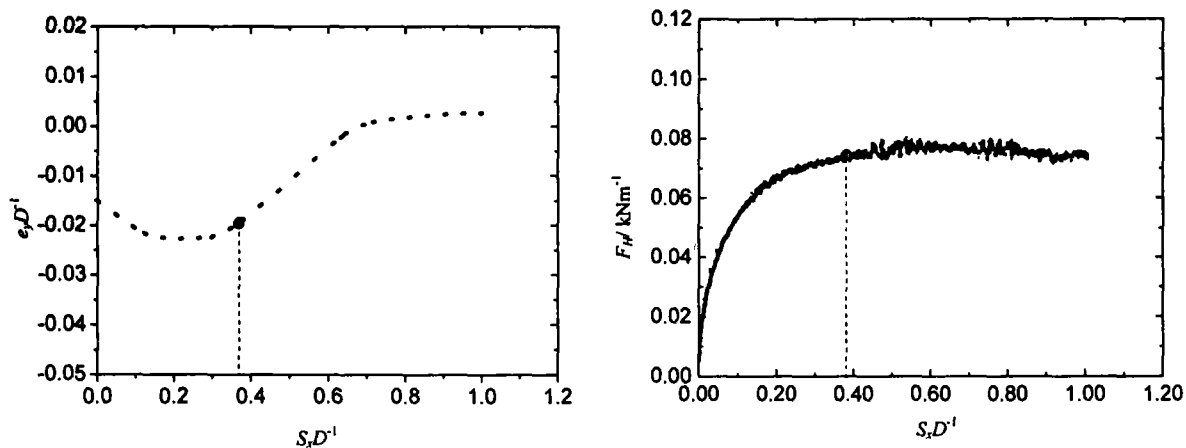
(b) 侧向土阻力与水平位移的关系

图6 防滚条件下管道侧向土阻力及沉降特征($D=0.20\text{ m}$, $W_S=0.39\text{ kN/m}$, $\kappa=5.3\times 10^{-4}$)

3.3 两端自由条件下的管道侧向土阻力及沉降特征

与上述防滚管道试验步骤类似,当两端自由的模型管道与砂床刚接触时,释放管道使其产生初始沉降量,同时触发激光位移传感器测量管道在土体中的初始沉降量。随后,通过拉力装置对管道施加斜拉力,同时采用拉力传感器测量斜拉力。管道的动态沉降和水平位移则利用数码摄像机进行记录。

图7给出了两端自由条件下的管道嵌入深度和侧向土阻力随着管道水平位移的变化情况。从图7(a)给出的管道动态沉降与水平位移之间的关系可以看出,管道沉降量随着水平位移先增加而后逐渐减少。从图7(b)给出的两端自由管道的侧向土阻力与水平位移之间的关系曲线可以看出,侧向土阻力随着水平位移的增加而增加,最终达到极限值,这与防滚条件下的趋势类似。自由管道失稳过程中的最大沉降量低于防滚管道(见图6(a)和图7(a));其极限侧向土阻力也明显小于防滚管道的情况(见图6(b)和图7(b))。与防滚管道不同,自由管道的极限侧向土阻力大致发生在运动轨迹曲线斜率最大的位置。在两端自由条件下,管道失稳时的侧向土阻力主要为滚动摩擦力;而在防滚条件下,管道侧向土阻力则为滑动摩擦阻力和被动土压力之和。



(a) 嵌入深度与水平位移的关系

(b) 侧向土阻力与水平位移的关系

图7 自由条件下管道侧向土阻力及沉降特征($D=0.20\text{ m}$, $W_S=0.39\text{ kN/m}$, $\kappa=5.3\times 10^{-4}$)

4 水动力试验与机械加载试验管道侧向稳定性的对比

基于相似理论和水动力实验测试结果,文献[7]得到了采用无量纲参数 Fr 和 G 描述海流载荷下光滑管道侧向稳定性的流固土耦合经验关系。 $Fr (=U/\sqrt{gD})$ 为 Froude 数, $G (=W_s/\gamma'D)$ 为无量纲单位长度管道水下重量。为了将机械加载试验与水动力加载试验进行对比分析,根据式(1)和式(2)将机械加载试验的结果转化为 Fr 与 G 之间的经验关系。图 8 给出了机械加载试验与水动力加载试验的对比情况。可以看出,两者有着较好的可比性;在相同的无量纲水下重量条件下,机械加载试验管道比水动力试验管道更稳定。机械加载试验未能反映海流对管道附近海床土体的局部冲刷作用。在水动力试验中,局部冲刷降低了管道的侧向稳定性。

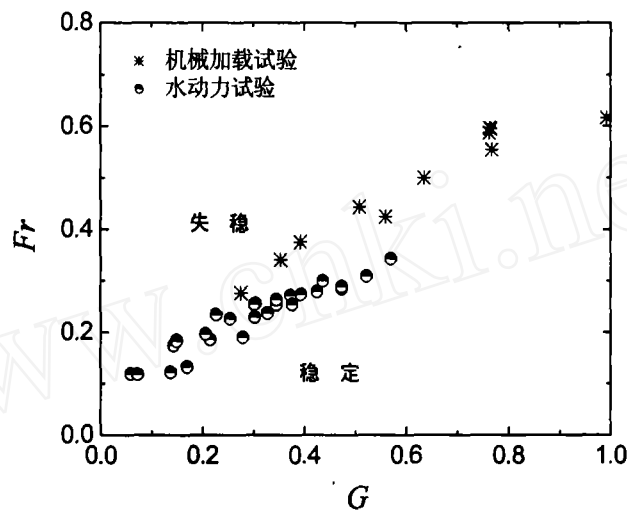


图 8 管道侧向稳定性水动力试验和机械加载试验结果的对比

5 结语

采用水动力加载试验和机械加载试验,对海底管道侧向失稳特征进行了试验模拟研究。在单向水流作用下管道侧向失稳过程中,存在砂粒起动、管道轻微侧向位移和管道侧向失稳三个特征时间。机械加载试验发现,随着管道水平位移的逐渐增大,管道沉降量先增加而后逐渐减少并趋于稳定;而侧向土阻力逐渐增大并最终达到极限值。两端自由管道失稳时的最大沉降量和极限侧向土阻力均明显小于防滚管道的情况。管道在防滚条件下的极限侧向土阻力一般出现在沉降量最大处;而在两端自由条件下管道极限侧向土阻力大致发生在运动轨迹曲线斜率最大的位置。可见,管道端部条件对其侧向稳定性的影响较大。两端自由的管道侧向失稳时,土阻力主要来源于滚动摩擦力;然而在防滚条件下,管道侧向土阻力则为滑动摩擦阻力和被动土压力之和。对比机械加载试验和水动力加载试验得到的描述管道侧向稳定性的流固土耦合经验关系式可以看出,两者有着较好的可比性;在无量纲水下重量相同的条件下,机械加载试验中管道比水动力试验管道更加稳定。机械加载试验未能模拟管道附近土体的局部冲刷,局部冲刷可降低海流作用下管道的侧向稳定性。

·参考文献:

- [1] WAGNER D A, MUFF J D, BRENNODDEN H and SVEGGEN O. Pipe-soil interaction model [A]. Proceeding of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference[C], OTC 5504, Houston, 1987.
- [2] BRENNODDEN H, LIENG J T, SOTBERG T and VERLEY R L P. An energy-based pipe-soil interaction model [A]. Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference[C], OTC 6057, Houston, 1989.
- [3] PALMER A C, STEENFELT J S and JACOBSEN V. Lateral resistance of marine pipelines on sand [A]. Proceeding of 20th Annual Offshore Technology Conference[C], OTC 5853, Houston, 1988.
- [4] 高福平, 顾小芸, 吴应湘. 考虑‘波-管-土’耦合作用的海底管道在位稳定性分析方法 [J]. 海洋工程, 2005, 23(1): 6-12.
- [5] GAO F P, GU X Y, JENG D S. Physical modeling of untrenched submarine pipeline instability [J]. Ocean Engineering, 2003, 30 (10): 1283-1304.
- [6] JONES W T. On-bottom pipeline stability in steady water currents [J]. Journal of Petroleum Technology, 1978, 30: 475-484.
- [7] GAO F P, YAN S M, YANG B and WU Y X. Ocean currents-induced pipeline lateral stability on sandy seabed [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(10): 1086-1092.

Characteristics of Pipeline Losing Lateral Stability under Ocean Currents

YAN Shu-ming, GAO Fu-ping, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract

The physical process of pipeline losing lateral stability is modeled experimentally with hydrodynamic tests and mechanical-actuator loading tests. Based on the experimental results, the typical characteristics of pipeline losing lateral stability are analyzed. The hydrodynamic experiments indicate that, there usually exist three characteristic times in the process of pipeline losing lateral stability, i.e. ① onset of local scour around the pipe, ② slight lateral displacement of the pipe, ③ breakout of the pipe. The lateral soil resistance and the settlement of the pipes with two kinds of constraint conditions are investigated respectively by mechanical-actuator loading method. With the increase of horizontal displacements of the pipe, the lateral soil resistance increases continuously and finally reaches a maximum value. The constraint conditions have much influence on ultimate lateral soil resistance and its relationship with pipe settlements. The comparison between the two types of tests shows that their results are comparable, and the local scour may reduce the pipeline lateral stability in the examined Froude range.

Key words: ocean currents; submarine pipeline; characteristics for losing stability; lateral stability; lateral soil resistance

作者简介

闫术明 男, 1980年生, 博士研究生。主要从事海洋工程力学研究工作。