

文章编号: 1000-4750(2008)03-0206-05

单向海流载荷下海底管道局部冲刷试验研究

*杨 兵, 高福平, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 采用量纲分析法建立了海底管道局部冲刷的相似准则, 利用模型实验研究了管道局部冲刷的物理过程, 以及极限平衡冲刷深度的影响因素。实验观测发现, 对于初始嵌入深度较小的管道而言, 局部冲刷一般可分为管道悬空、间隙冲刷、尾迹冲刷和平衡冲刷四个特征阶段。在亚临界流动范围内, 管道极限平衡冲刷深度与雷诺数的相关性较小。在清水冲刷条件下, 无量纲极限平衡冲刷深度随希尔兹数的增加而增大; 在所研究的初始间隙比范围内($-0.25 < e_0/D < 0.55$), 极限平衡冲刷深度与初始间隙比之间大致呈线性递减关系。

关键词: 海底管道; 局部冲刷; 单向海流; 砂质海床; 冲刷深度

中图分类号: TV149.2 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL STUDY ON LOCAL SCOUR OF SANDY SEABED UNDER SUBMARINE PIPELINE IN UNIDIRECTIONAL CURRENTS

*YANG Bing, GAO Fu-ping, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The similarity rules for modeling local scour of the under submarine pipeline are established by means of dimensional analytical method. The physical phenomenon of the local scour of the pipeline was modeled in a unidirectional flow flume. The experimental observation indicates that the process of the local scour around the pipeline with an initial embedment mainly includes four characteristic stages: (1) suspension of pipeline, (2) tunnel erosion, (3) lee-wake erosion and (4) equilibrium scouring stages. In the subcritical flow regime, there exists low correlativity between the equilibrium scour depth and Reynolds number. In the case of clear-water scour, the equilibrium scour depth increases with increasing Shields number, and descends linearly with increasing initial gap-diameter ratio in the examined range of initial gap-diameter ratios ($-0.25 < e_0/D < 0.55$).

Key words: local scour; submarine pipeline; unidirectional ocean current; sandy seabed; scour depth

海底直铺管道容易受到波浪和海流等环境载荷的影响。而在不同海域, 海底管道所受环境载荷会有所差异。在海流载荷作用下, 海底管道下方砂质海床局部冲刷时有发生。例如, 1999 年胜利油田对渤海湾埕岛海域投产仅 1 年多的 15 条管道进行检测时, 发现 8 条管道出现悬跨^[1]; 前苏联乌发白河上的 1 条输油管道由于冲刷悬空而发生断裂^[2]; 我国东海平湖油田输油管道在 2000 年也发生了断裂事故^[3]。管道事故不仅会造成巨大的经济

损失, 油气泄漏还导致了海洋环境污染。

多年来, 海底管道局部冲刷问题受到了管道设计人员和科研工作者的广泛关注^[4-6]。海流载荷下海底管道局部冲刷是海流、管道和海床三者之间复杂的“流-固-土”耦合作用问题。鉴于此问题的复杂性, 模型试验是探索其机理的最可靠研究手段^[7]。许多研究者在模型试验分析的基础上提出了预测管道极限平衡冲刷深度的经验公式, 但已有工作大多针对管道与海床之间具有初始间隙或

收稿日期: 2006-08-30; 修改日期: 2007-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50509022, 10532070); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-YW-L02)

作者简介: *杨 兵(1976—), 男, 四川蓬溪人, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋工程中的流固土耦合分析(E-mail: byang@imech.ac.cn);

高福平(1973—), 男, 山东淄博人, 副研究员, 博士, 主要从事岩土力学和海洋工程力学研究(E-mail: fpgao@imech.ac.cn);

吴应湘(1956—), 男, 四川仪陇人, 研究员, 博士, 主要从事海洋工程力学和应用流体力学研究(E-mail: yxwu@imech.ac.cn).

间隙为零的情况^[8-12]。实际上,海底管道铺设后一般会产生初始沉降。然而目前关于具有初始嵌入深度的管道发生悬空和冲刷的研究还很少,初始间隙比对极限平衡冲刷深度影响的研究也不够深入。

本文将在量纲分析的基础上设计模型试验,研究单向海流载荷下海底管道底部砂质海床地基的局部冲刷特性:观测分析具有初始嵌入深度的管道发生局部冲刷的物理过程和冲蚀剖面特征,并对极限平衡冲刷深度进行参量研究。

1 相似分析

单向海流引起的海底管道底部砂质海床地基的局部冲刷是海流、管道和海床之间的动力耦合作用问题。砂质海床上管道的极限平衡冲刷深度(S_m)与海流、管道和海床的特征参量相关,可表示为:

$$S_m = f(\rho, \mu, U, D, \kappa, \rho_s, d_{50}, n, Dr, Cu, g, e_0) \quad (1)$$

式中各符号的物理含义和量纲如表 1 所示。

表 1 单向海流载荷下管道局部冲刷的主要影响参量

Table 1 Main influential parameters for local scour of a submarine pipeline in unidirectional ocean currents

物理量	符号	量纲
流体密度	ρ	ML ⁻³
流体动力粘性系数	μ	ML ⁻¹ T ⁻¹
海流速度	U	LT ⁻¹
管道外径	D	L
管道表面相对粗糙度	κ	1
砂粒密度	ρ_s	ML ⁻³
砂土床平均粒径	d_{50}	L
砂土孔隙率	n	1
砂土相对密度	Dr	1
砂土不均匀系数	Cu	1
重力加速度	g	LT ⁻²
管道与海床的初始间距	e_0	L

根据量纲分析原理,式(1)可表示为如下无量纲形式:

$$S_m/D = f'(Re, \kappa, \rho_s/\rho, d_{50}/D, n, Dr, Cu, \theta, e_0/D) \quad (2)$$

式中,雷诺数(Re)表征流体惯性力与粘性力之比:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3)$$

希尔兹数(θ)为泥沙运输的控制参量,表征床面流体剪切力与砂粒水下重量之比:

$$\theta = \frac{U_f^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_{50}} \quad (4)$$

其中, U_f 为非扰动床面摩擦速度,可利用 Colebrook-White 公式进行估算^[12]。

由相似理论可知,模型与原型中所有相似参数相等时称模型与原型完全相似,而部分相似参数相等时称模型与原型部分相似。一般而言,模型试验中实现模型与原型的完全相似是比较困难的,甚至有时是不可能的;通常情况下,只能满足主要无量纲参数的相似^[13]。本试验中,管道直径的缩尺不大,约为 1/10-1/5。试验雷诺数大小为 10³-10⁴量级,而原型雷诺数大小一般为 10⁵量级或更高。当 300 < Re < 3×10⁵时,管道尾迹流动进入亚临界区,此时管道壁面上的边界层为层流,而管道尾流已转变为湍流^[14]。在亚临界区内,管道绕流特性的变化较小,试验管道与原型管道的绕流特性接近,可放宽对雷诺数相似的要求。本文仅考虑光滑管道,即 $\kappa \approx 0$,试验用砂为标准石英砂,流体介质为水,因此 ρ_s/ρ 为定值,满足相似要求。对于结构物局部冲刷的海床模拟,需保证采用同一类型的海床土体(如砂土)进行试验模拟,可适当放宽无量纲参数 d_{50}/D 的相似性限制,但应避免模型试验中的土体特性与原型海床差异过大。

2 试验设备及方法

试验在宽 0.5m、高 0.6m、长 19m 的单向流水槽中进行。水槽侧壁用玻璃镶嵌而成,便于试验观测。试验水深为 0.3 m,在此水深下水槽可提供的最大流速为 0.6m/s。试验土体为中等密实度的均匀标准石英砂,采用砂雨法制备0.15 m厚的饱和砂土样,用刮砂器刮平砂土表面。在砂面上放置不同间隙比的试验管道,使管道轴线垂直于水流方向以模拟二维冲刷,试验布置见图 1。砂土平均粒径 $d_{50}=0.38\text{mm}$,砂土不均匀系数 $Cu=1.46$,砂土相对密度 $Dr=0.4$,砂土的孔隙率 $n=0.42$ 。模型管道直径分别取为 0.032m、0.040m 和 0.050m。采用

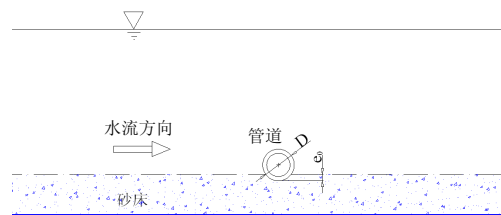


图 1 单向流作用下管道局部冲刷试验布置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup for local scour of a pipeline in currents

微型旋浆流速仪测量水流速度。在恒定流速下，用数码摄像机透过玻璃侧壁记录管道局部冲刷的物理过程。当冲刷稳定后，采用探针沿水流方向逐点测量冲刷坑的位置坐标，从而得到冲刷剖面形态。

3 试验结果分析与讨论

3.1 冲刷现象描述

对初始嵌入深度较小的固定管道下方砂质海床的局部冲刷进行观测发现，管道局部冲刷一般经历管道悬空、间隙冲刷、尾迹冲刷和平衡冲刷 4 个阶段。

1) 管道悬空阶段。管道悬空阶段是指管道底部砂床在某一位置开始出现失稳点到管道与砂床间形成一道连通间隙所处的时段。当水流速度逐渐增加到某一值时，管道底部砂土某一处或几处首先发生冲蚀破坏而形成间隙(见图 2(a))；随后，间隙沿管道轴线方向发展，最后在管道底部形成一道连通间隙(见图 2(b))。管道两侧压差在砂床内部诱导的渗流是造成管道悬空的主要因素^[15-17]。对于管道与海床初始间隙不小于零的情况，此阶段不存在。

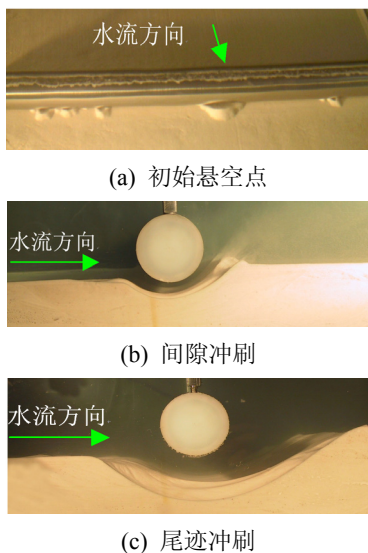


图 2 单向流作用下初始嵌入管道局部冲刷的典型特征
Fig.2 Typical characteristics of the local scour around the pipe with initial embedment in a unidirectional flow

2) 间隙冲刷阶段。当管道与砂床间隙较小时，间隙内水流速度是来流速度的数倍^[18]，相应的床面剪应力也增大很多，从而使间隙内泥砂输运量大大增加，管道与砂床间隙快速增长。在间隙冲刷时，管道下游一侧部分砂粒快速向后喷射

(见图 2(b))。

3) 尾迹冲刷阶段。管道与砂床间隙达到一定值时，管道尾迹区将出现明显的涡脱落现象。在尾迹涡作用下，管道下游床面冲刷程度将大大增加，此时尾迹涡是冲刷的主要动力。在尾迹冲刷过程中，尾迹区内可观察到周期性的泥砂运移。从图 2(c)可看出，最大冲刷深度发生在管道尾迹流一侧。

4) 平衡冲刷阶段。当尾迹冲刷发展到一定程度，床面冲刷形态几乎不再发生变化，此时即进入平衡冲刷阶段。对于清水冲刷而言，平衡阶段的管道下方砂粒不再出现输移现象。

图 3 给出了 $e_0/D = 0$ 时管道下方最低点与砂床表面间的垂直距离(e_t)随时间变化情况以及 Mao (1986)^[19]的试验结果。由图 3 可见，在一定水流速度下，管道与砂床表面间隙随时间的发展呈负指数规律变化，即在前期增长较快，而在后期却增长缓慢，逐渐达到极限平衡状态。

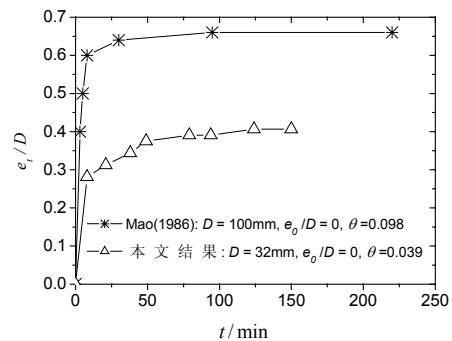


图 3 管道与砂床间隙随时间的发展

Fig.3 Time development of the scour gap beneath the pipe

3.2 冲刷剖面特征

图 4 给出了 4 种间隙比下管道底部砂床的冲刷剖面形态。试验中的希尔兹数 $\theta=0.039$ ，即此时砂质海床冲刷为清水冲刷。从图 4 可发现，4 种间隙比对应的最大冲刷点位置均出现在管道下游；

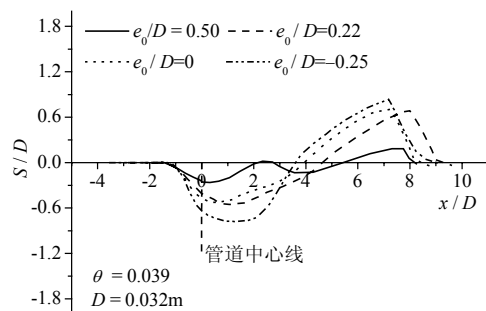


图 4 不同初始间隙比下管道局部冲刷剖面形态

Fig.4 Scour profile for the pipe with various initial gap ratios

随初始间隙比减小, 极限平衡冲刷深度有增大趋势。

3.3 极限平衡冲刷深度的影响因素分析

由式(2)可知, 无量纲极限平衡冲刷深度与雷诺数等多个参量相关。本文主要讨论雷诺数(Re)、希尔兹数(θ)、初始间隙比(e_0/D)对极限平衡冲刷深度的影响。

1) 雷诺数的影响。

图 5 给出了 3 种初始间隙比时($e_0/D = -0.25$, $e_0/D = 0$, $e_0/D = 0.22$), 极限平衡冲刷深度随雷诺数的变化情况。 Re 的取值范围为 $8.16 \times 10^3 - 1.28 \times 10^4$, 管道绕流处于亚临界区。从图 5 可看出, 在给定初始间隙比的情况下, 在亚临界区内雷诺数的变化对极限平衡冲刷深度的影响不明显; 但在给定雷诺数时, 极限平衡冲刷深度随管道初始间隙比的增大呈减小趋势。

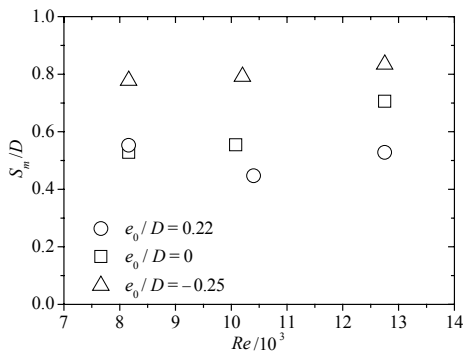


图 5 极限平衡冲刷深度随雷诺数的变化
Fig.5 Variation of equilibrium scour depth with Re

2) 希尔兹数的影响。

由希尔兹数的物理意义可知, 希尔兹数是控制泥砂起动的主要参数, 只有当希尔兹数超过泥砂起动的临界希尔兹数 θ_{cr} 时, 泥砂颗粒才沿床面移动。 θ_{cr} 是砂土颗粒雷诺数的函数^[12]。一般而言, 当 $\theta < \theta_{cr}$ 时, 结构局部冲刷属于清水冲刷, 而当 $\theta > \theta_{cr}$ 时, 结构局部冲刷属于动床冲刷。图 6 给出了本文得到的无量纲极限平衡冲刷深度随希尔兹数变化的试验结果以及 Mao (1986)^[19]得到的试验结果。可以看出, 在清水冲刷条件下, S_m/D 随 θ 增加而增大; 本文结果与 Mao (1986)^[19]的试验结果吻合得较好。

3) 初始间隙比的影响。

图 7 给出了本文在清水冲刷条件下, 无量纲极限平衡冲刷深度随初始间隙比的变化情况。试验中, 希尔兹数 $\theta = 0.039$, 初始间隙比的变化范围

为 $-0.25 < e_0/D < 0.55$ 。从图 7 可看出, 极限平衡冲刷深度随初始间隙比的增大而减小, 且在所考虑的初始间隙比范围内二者大致呈线性关系:

$$S_m/D = 0.63 - 0.69 e_0/D \quad (5)$$

式(5)是在亚临界流动区清水冲刷条件下获得的。

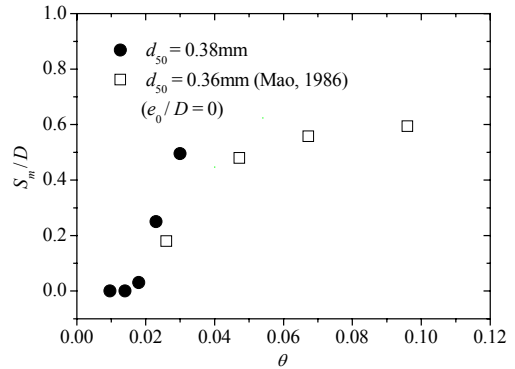


图 6 极限平衡冲刷深度随希尔兹数的变化
Fig.6 Variation of equilibrium scour depth with Shields number

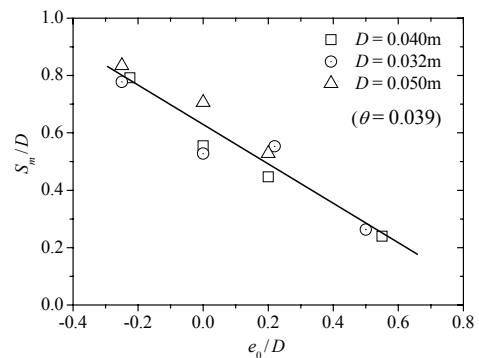


图 7 极限平衡冲刷深度随初始间隙比的变化
Fig.7 Variation of equilibrium scour depth with initial gap ratio

4 结论

(1) 对于初始嵌入深度较小的海底管道而言, 单向海流引起的局部冲刷通常分为 4 个阶段: 管道悬空、间隙冲刷、尾迹冲刷和平衡冲刷。

(2) 管道极限平衡冲刷状态下最大冲刷位置处于管道下游一侧。随着管道与砂床之间初始间隙的缩小, 极限平衡冲刷深度有增大趋势。

(3) 在管道绕流处于亚临界范围, 极限平衡冲刷深度与雷诺数的相关性较小。在清水冲刷条件下, 极限平衡冲刷深度随希尔兹数的增加而增大; 而在 $-0.25 < e_0/D < 0.55$ 范围内极限平衡冲刷深度随初始间隙比呈线性递减关系变化。

参考文献:

[1] 胡洪勤. 埭岛海域海底冲刷与海底管道悬空[J]. 中国

- 造船, 2002, 43(增刊): 252—255.
- Hu Hongqin. The sea floor scour and subsea pipeline suspension in the Chengdao area [J]. *Shipbuilding of China*, 2002, 43(Supplement): 252—255. (in Chinese)
- [2] 李振林, 东朝莉, 袁亚雷, 董守平. 流动显示技术用于胜利埕岛油田海底管道淘空对策的研究[J]. *流体力学试验与测量*, 2003, 17(3): 49—52.
- Li Zhenlin, Dong Zhaoli, Yuan Yalei, Dong Shouping. Study of scouring of submarine pipelines in the Shengli Chengdao oil field by flow visualizing [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2003, 17(3): 49—52. (in Chinese)
- [3] 李宁. 我国海洋石油油气储运回顾与展望[J]. *油气储运*, 2003, 22(9): 30—32.
- Li Ning. Retrospection and prospect upon storage and transportation of gas and oil in offshore oil of China [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2003, 22(9): 30—32. (in Chinese)
- [4] Gao F P, Yang B, Wu Y X, Yan S M. Steady currents induced seabed scour around a vibrating pipeline [J]. *Applied Ocean Research*, 2006, 28(5): 291—298.
- [5] 李玉成, 吕林. 海底管道附近底床侵蚀平衡剖面的湍流数值模拟[J]. *中国造船*, 2004, 45(增刊): 209—216.
- Li Yucheng, Lu Lin. Numerical simulation of moving scour boundary around submarine pipelines based on turbulence model [J]. *Shipbuilding of China*, 2004, 45(Supplement): 209—216.
- [6] Li Y C, Lu L. Numerical simulation of moving scour boundary and turbulence flow around submarine pipelines [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, 17(4): 404—411.
- [7] Chakrabati K. *Offshore structure modeling* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1994.
- [8] Kjeldsen S P. Local scours near offshore pipelines [C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. Iceland: University of Iceland, 1973: 308—331.
- [9] Bijker E W, Leeuwestein W. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents [C]// Dennes B. *Seabed Mechanics*. London: Graham and Trotman, 1984, 235—242.
- [10] Ibrahim A, Nalluri C. Scour prediction around marine pipelines [C]// Chong J, Maeda H. *Proceedings of 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Tokyo, Japan, 1986, 679—684.
- [11] Moncada M A T, Aguirre-Pe J. Scour below pipeline in river crossings [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(9): 953—958.
- [12] Sumer B M, Fredsoe J. *The mechanics of scour in the marine environment* [M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2002.
- [13] 惠遇甲, 王桂仙. *河工模型试验* [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Hui Yujia, Wang Guixian. *Model tests in river engineering* [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)
- [14] Sumer B M, Fredsoe J. *Hydrodynamics around cylindrical structures* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997.
- [15] 杨兵, 高福平, 吴应湘. 海流引起海底管道悬空的数值模拟[J]. *中国造船*, 2005, 46(增刊): 221—226.
- Yang Bing, Gao Fuping, Wu Yingxiang. Numerical study of the occurrence of pipeline spanning under the influence of steady current [J]. *Shipbuilding of China*, 2005, 46(Supplement): 221—226. (in Chinese)
- [16] Chiew Y M. Mechanics of local scour around submarine pipelines [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1990, 116(4): 515—529.
- [17] Sumer B M, Truelsen C, Sichmann T, Fredsoe T. Onset of scour below pipelines and self-burial [J]. *Coastal Engineering*, 2000, 42(4): 313—335.
- [18] Jensen B L. Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed [C]// Chung J. *Proceedings of the 7th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Houston Texas, 1988: 39—48.
- [19] Mao Y. *The interaction between a pipeline and an erodible bed* [D]. Denmark: The Technology University of Denmark, 1986.