

文章编号:1001-4500(2007)04-0007-05

海底管线冲刷问题研究综述

韩艳, 拾兵

(中国海洋大学, 青岛 266100)

摘要:综述国内外学者通过物理实验、理论分析与数值模拟等方法探索海底管线冲刷问题的成果,为该领域的进一步研究提供参考。

关键词:海底管线;波浪;海床;冲刷

中图分类号:P756

文献标识码:A

1 引言

波浪作用下海底管线周围海床的冲刷是波浪、管道和海床三者间的动力耦合作用问题,由于受流动、地形、土质等多种环境因素的影响,冲刷现象十分复杂。从流体力学的角度看,波浪中管线的冲刷涉及非定常往复运动中的旋涡分离流动,因为产生床面冲蚀,床面边界处于动态变化之中,边界的改变以及床质进入水体,都会使绕管线的旋涡分离流动与固壁平板床有所不同;如果考虑悬空管线的涡激振动反过来对流动及泥沙运输的影响,则更复杂了。由于此问题的交叉性,目前多是在合理的简化条件下进行一些冲刷机理研究和一般规律性的研究。

2 研究现状

海底管线附近海床冲刷问题涉及流体动力学、计算流体力学、泥沙运动学、工程地质学等多学科。目前,有关海底管线的研究多局限于管道的腐蚀破坏或波浪场中管道的受力分析,对于海底管线附近海床冲刷的研究不多,且以试验研究为主。

2.1 室内试验研究

根据试验研究条件及侧重点不同,可分为以下几类。

2.1.1 以研究波浪单独作用下海底管线受冲刷机理的试验

大连理工大学李玉成、陈兵等(1996)^[1,2]针对波浪作用下海底管线上的升力、水平力等进行了模型试验研究,通过试验分析波浪场中管线周围的流场特性及其对管线受力的影响,为近海管线设计提供了必要的依据。天津大学秦崇仁等(1995)^[3]利用波浪水槽,针对不同水深、不同波要素、不同管径和泥沙粒径等对管道附近冲刷的影响进行了模型试验,初步得到了冲刷发生的临界波浪条件及稳定后冲刷坑的深度和范围。Y. M. Chiew(1989,1993)^[4]研究了波浪作用下,管道上安装阻流板(Spoiler)对冲刷深度、幅度及冲刷发展速度的影响。A. V. Kumar et al. (2003)^[5]研究了波浪作用下,黏性土中管线周围的冲刷。实验结果表明,黏性土的稠度指数 I_c 对冲刷深度有较大影响($I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P}$, 其中 w 、 w_L 、 w_P 分别是黏性土的天然含水量、液限和塑限, I_c 越小,土体越稀,越接近流动状态, $I_c < 0$ 时土处于流动状态。)

A. Vijaya kumar, S. Neelamani, S. Narasimha Rao(2004)^[5]通过实验测量了随机波浪作用下黏土中海

收稿日期:2007-01-23

基金项目:国家自然科学基金(50479029)。

作者简介:韩艳(1982-),女,硕士生。

底管线所受的波压力和升力;波高、波陡、水深、埋深、土壤黏稠系数等各种不同参数对波压力和升力的影响。围绕管线周围3个位置(沿圆周每隔 120°)测量波压力,发现波压力和升力在高黏稠指数的土壤中小于低黏稠指数的土壤,刚好埋置的管线($e/D = 1.0$)的升力仅是裸置在海床上的($e/D = 0.0$)的60%。实验还测量了不同黏稠指数的黏土中海底管线(裸露、部分埋置和完全埋置)分别在规则流和随机流作用下的波压力和升力。对比了黏性土和砂土的冲刷深度,对于 I_c 为0.23和0.17的黏性土,在 $KC = 8.2$ 情况下的 S/D 分别为0.34和0.42;而相同 KC 数下砂土中的 S/D 则为0.67。B. M. Sumer和J. Fredsoe^[7]研究结果表明黏性土比非黏性土减小了埋置管线所受的压力。E. Cevik&Y. Yuksel(1999)^[8]在前人试验的基础上更进一步研究了坡度为1/5和1/10的底床上管线周围的冲刷情况,得到了用修正厄塞尔数 U_{RP} 表示的平衡冲刷深度(管道与床面初始间距为0):

$$S/D = 0.042 \times U_{RP}^{0.41}$$

式中: $U_{RP} = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2}$,其中, H 为波高; L 为波长; d 为水深; D 为管径。

将倾斜底坡条件下的冲深与水平底坡条件下的冲深比较后发现,相同的环境条件下,前者几乎是后者的两倍。造成这个结果的原因可能是,由于坡度的影响,使得浅水波在行进过程中发生破碎,致使波能迅速释放,被倾翻的水体强烈冲刷底床,导致较大的冲刷深度。

2.1.2 以研究单向流作用下海底管线受冲刷机理的试验

中国科学院力学研究所的杨兵、高福平和吴应湘(2006)^[9]对单向水流作用下近壁管道横向涡激振动进行了实验模拟,重点探讨了管道与壁面间隙比(e/D)对管道涡激振动幅值和涡激振动频率响应特性的影响规律。Y. M. Chiew(1989、1993)^[10]根据不同的研究目的,设计了3种类型的实验,对单向流作用下冲刷起动的机理和冲刷的发展过程进行了探讨。B. L. Jensen et al. (1990)^[11]在长10m、宽0.3m、高0.3m的水槽内,采用一系列不能发生形变的固壁平衡冲刷床面(称冻结冲刷床)模拟了单向流作用下冲刷发展过程各个阶段管道周围的流场特性和管道的受力情况,为数值模拟工作奠定了试验基础。B. M. Sumer等(1988—2001)^[12-16]对波、流作用下管线周围海床冲刷问题做了大量的研究,在冲刷的起动、冲刷发展的影响因素、冲刷后管道的自埋等方面进行了详尽的探讨,这些的成果为后人在这一领域进行进一步的探索提供了许多有价值的帮助

2.1.3 以研究振荡流对海底管线冲刷机理的试验

羊皓平(2001)^[17]通过系统的多种床面下的流动显示实验和水动力测量实验,分析了冲刷引起的流场特性和水动力特性的变化,探讨了管线振荡绕流中冲刷问题的机理。中科院力学所浦群、李坤、高福平等(1999—2001)^[18-20]研究了振荡流对砂床、淤泥床的冲刷,作者认为,对浅水重力波而言,在海底处波浪水质点主要沿水平方向做周期性振荡,因此,用振荡流来代替波浪模拟管道附近床面的冲刷过程。试验采用抽气式U型振荡流水槽产生周期性的水体振荡,在水槽底部中间部位-长0.6m、宽0.2m、深0.035m的土槽中放置饱和土样和试验管道,通过摄像机和监测器监测冲刷的起动和初期发展,并在水动力加载结束后取出土槽测量床面的冲刷深度。对实验数据进行了仔细的分析,拟合得到了无因次参数 e/D 和 KC 数之间的关系: $(e/D)_{cr} = 2.2 \lg KC - B$,然后,又进一步得到了最大平衡冲深 S 与 KC 数的拟合关系式: $S/D = A \times KC^m$ 。式中: e 是初始时管道底离床面的悬空高度; S 是平衡时最大冲刷深度(见图); D 为试验管道直径; KC 即无因次冲刷参数; A 为与管道初始位置有关的常数; m 、 B 为与床质有关的常数。

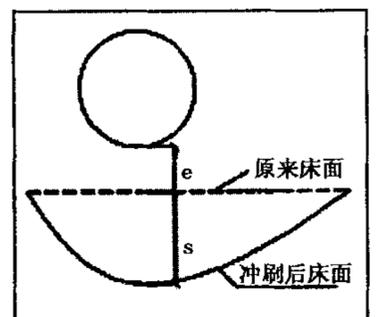


图 冲刷参数示意图

2.2 理论分析与数值模拟

海底管线下海床冲刷理论推导和数学模型的建立,目前仍不完善。D. Myrhaug & H. Rue(2003)^[21]在Sumer等(1990)得到的平衡冲刷深度拟合公式的基础上,推导了随机波浪作用下,管道底部冲刷坑的深度和宽度,以及桩周围冲刷坑的深度公式。Y. M. Chiew(1991)^[22]给出了一个估算单向流作用下平衡冲

刷深度的迭代公式,该法计算得到的结果与实验结果吻合良好。杨兵、高福平和吴应湘(2006)^[23]应用量纲分析方法对海流、管道与海床之间的动力耦合作用进行了分析,确定了在实验模拟中应遵循的相似准则。在此基础上,研制了一套能模拟海流、海床与海底管道之间相互作用的实验模拟装置。阎通(1999)^[24]等根据埕北海域水下三角洲的工程地质条件和水动力条件,分析了海底管线在两种铺设方式(埋置在一定土层深度处和裸露在海底下)的冲刷稳定性,推算了管线的出露时间及可能的冲刷深度。冯秀丽(2000)^[25]根据大型物理模型试验结果,研究了波、流单独作用以及波流共同作用下桩柱周围粉土的冲刷,推出了桩柱周围最大冲刷深度的计算公式,通过野外实测资料验证,认为该计算式可行。

数值模拟方面,由于紊流剪切流、泥沙输送、床面变化之间复杂的相互作用,即使是对于二维的、床面由均匀无黏性沙构成的理想情况,该领域的进展还是面临很多困难。目前的成果资料,以流单独作用下的研究居多。Van Beek and Wind(1990)^[26]采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型结合沉积物浓度扩散和底床变形连续方程对悬移质输沙进行了数值研究,虽然数值模拟结果在总体趋势上与实测资料比较吻合,但是管线后方底床形态与实测资料存在本质上的差异。B. Brors(1999)^[27]的模型,包括基于 $k-\epsilon$ 紊流模型的流动模块和基于全沙输送方程的沉积物输移模块,针对固壁上管线周围的流场,模型得到的结果与实验结果相当一致,但是在冲刷计算过程中,该模型无法模拟漩涡的泄放,Brors 建议将网格进一步细化来预测漩涡泄放现象。Li and Cheng(1999)^[28]提出了一个基于势流理论的数学模型来模拟单向流作用下近海管线底部的冲刷,与经验公式计算结果比较后,认为该模型用于清水冲刷条件下冲刷深度的预测是可行的。Li and Cheng(2001)^[29]采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)模型求解了曲线坐标系统中,管线周围的紊动流场,并通过迭代得到最终冲刷剖面,将结果与 Mao (1986), Sumer et al. (1988), Kjeldsen(1973)的实验结果比较后, Li and Cheng 认为该模型可用于预测近海管线周围局部冲刷的总特征。陈兵(2002)^[30]等用三维有限元方法模拟了管线悬空段肩部的三维流动情况,为进一步研究海底管线周围局部冲刷沿管线轴向发展打下了初步基础。K. Y. LAM, Q. X. WANG, Z. ZONG(2002)^[31]分析了海流作用下的近床海底管线非线性流结构的相互作用。Hua Li, J. Q. Cheng, T. Y. Ng, Jun Chen, K. Y. Lam(2003)^[32]用 Hermite-Cloud 方法来分析在海流作用下的近床海底管线非线性流结构的相互作用。吕林等(2003)^[33]基于黏性流体理论采用 New $k-\epsilon$ 模型对复杂底床形态下海底管线附近流场进行了模拟,并在流场基础上计算了底床边界上的壁面剪应力,然后结合泥沙起动剪应力标准对其进行了冲刷稳定判别。Gheng and Li(2003)^[34]耦合了流体流动模型和海床形态模型,模拟下沉管道周围的局部冲刷,其中流体流动模型采用 Smagorinsky subgrid scale(SGS)模型,冲刷过程中海床形态变化通过沉积物输送方程,以及泥沙连续方程计算得到,模型计算结果表明:下沉管道引起的冲刷深度比固定管道大,且下沉速度越小,冲刷深度越大;当管道中线位于初始床面位置处时,冲刷深度达到最大值。李玉成等(2004)^[35]建立了模拟海底管线附近海床冲刷的数学模型,通过与 Mao (1986)的实验结果对比,表明该数学模型能比较准确地模拟出冲刷平衡剖面形态,并揭示了冲刷发生机制。Smith & Foster(2005)^[36]利用计算流体动力学软件 FLOW-3D,分别采用模型和 LES 模型,模拟了冻结冲刷床面(即不能发生形变的固壁平衡冲刷床面)上固定管道周围的流场,并与 Jensen et al. (1990)的实验结果对比,结果表明流场模拟的结果与试验结果吻合良好。Liang et al. 对海流单独作用下管线周围的流场和管线底部的冲刷情况进行了模拟。Liang and Cheng(2005)^[37-39]发展了一个波浪作用下近海管线下局部冲刷的垂向二维数值模型,利用正弦形式的振荡流代替波浪,通过 $k-\epsilon$ 模型求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程,泥沙输移模块考虑了悬移质和推移质,模型结果与 Sumer et al. (1990)的实验结果吻合很好。杨兵、高福平和吴应湘(2005)^[40]对海流作用下铺设于砂质海床上的海底管道悬空进行了数值模拟。求解不可压缩流体的 $N-S$ 方程,分析了海流作用下管道周围的流场特性,研究了管道两侧的压力分布特性和海床表面剪应力的分布特点。在管道绕流流场分析的基础上,通过对土体渗流方程的求解,得到了管道周围砂质海床内的渗流场,以及渗流水力梯度场的分布情况。与海床表面剪应力计算结果进行比较分析发现,管道下方渗流出口处土体的流土渗透破坏将诱导管道发生悬空。

3 结语

国内外许多专家通过物理实验、理论分析和数值模拟等方法对海底波浪、管道和海床间的相互作用问题进行了研究,但由于问题的复杂性,目前多是研究单独波浪作用或单向流作用下海底管线受冲刷的一些机理研究和一般规律性,对波、流、可动海床、管线等多相耦合,以及局域强化水流的弱化研究相对较少。今后应将波浪、海流、管道、可动海床作为一个复杂的动力系统,研究波浪和海流联合作用下管线冲刷的非稳定形态及其极值深度,为进一步强化海底管线安全防范措施提供科学依据。

参考文献

- [1] 李玉成,陈兵等.波浪对海底管线作用的物理模型实验及数值模拟研究[J].海洋通报,1996,15(4):58—65.
- [2] 李玉成,陈兵,J L J Marchal.波浪作用下海底管线的物理模型实验研究[J].海洋通报,1996,15(5):68—73.
- [3] 秦崇仁等.波浪作用下海底裸置管道周围的冲刷[J].港工技术,1995(3):7—12.
- [4] Y M Chiew. Effect of spoilers on wave-induced scour at submarine pipelines[A]. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE,1993,119(4):417—428.
- [5] A Vi jaya Kumar,S Neelamani,S Narasimha Rao. Wave pressures and uplift forces on and scour around submarine pipeline in clayey soil [J]. Ocean Engineering, 2003,30:271—295.
- [6] A Vijaya kumar, S Neelamani,S Narasimha Rao. Wave interaction with a submarine pipeline in clayey soil due to random waves [J]. Department of Ocean Engineering, IIT Madras, Chennai—36, India ,2005.
- [7] B M Sumer,J Fredsoe. Scour below pipelines in waves[J]. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1990,116(3):307—323.
- [8] E Cevik,Y Yuksel. Scour under submarine pipelines in waves In shoaling conditions[J]. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1999,125(1):9—19.
- [9] 杨兵,高福平,吴应湘.单向水流作用下近壁管道横向涡激振动实验研究[J].中国海上油气(工程)2006,18(1):52—57.
- [10] Y. M. Chiew, Mechanics of local scour around submarine pipeline[J]. J. Hydraulic,ASCE, 1989,116(4):515—529.
- [11] B L Jensen, B M Sumer et al. Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current [J]. J. offshore mechanics and arctic engineering, ASME, 1990,112:206—213.
- [12] B M Sumer,J Fredsoe. Onset of scour below a pipeline exposed to waves [J]. International J. offshore and polar engineering, 1991,1(3):189—194.
- [13] B M Sumer, H R Jensen, Y Mao et al. Effect of lee-wake on scour below pipelines in current[J]. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1988,114(5):599—614.
- [14] B M Sumer,J Fredsoe. wave scour around structures[J]. Advances in Coastal and Ocean Engineering,1997(4):191—248.
- [15] B. M. Sumer et al. ,Scour around coastal structures: a summary of recent research[J]. Coastal Engineering, 2001,44:153—190.
- [16] B M Sumer et al. Onset of scour below pipelines and self-burial[J]. Coastal Engineering, 2001,42:313—335.
- [17] 羊皓平.振荡流中的冲蚀及其对管线所受水动力特性的影响[D].中科院力学所硕士学位论文,2001.
- [18] 浦群,李坤.管线振荡绕流对砂床的冲蚀[J].力学学报,1999,31(6):677—681.
- [19] 浦群,李坤.圆柱振荡绕流对淤泥床的冲蚀[J].空气动力学学报,2000,18(增刊):27—31.
- [20] Pu Qun, Li Kun, Gao Fuping. Scour of the seabed under a pipeline in oscillating Flow[J]. China ocean engineering, 2001,15(1):129—137.
- [21] Dag Myrhaug, Havard Rue. Scour below pipelines and vertical piles in random waves[J]. Coastal Engineering, 2003,48:227—242.
- [22] Y. M. Chiew, Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines[J]. J. Hydraulic,ASCE, 1991,117(4):452—

- 466.
- [23] 杨兵,高福平,吴应湘.海流-管道-海床之间动力相互作用的量纲分析及实验模拟装置研制[J].船舶力学,2006,10(3):130-141.
- [24] 阎通,李萍,李广雪.埋北海域海底管线冲刷稳定性研究[J].青岛海洋大学学报,1999,19, No. 4, 721-726.
- [25] 冯秀丽,海洋水动力条件下粉土响应模型[D].青岛海洋大学博士学位论文,2000.
- [26] F A Van Beek, H G Wind. Numerical modeling of erosion and Sedimentation around offshore pipelines[J]. Coastal Engineering, 1990, 14: 107-128.
- [27] B Brors. Numerical modeling of flow and scour at pipelines[J]. J. Hydraulic, ASCE, 1999, 125(5): 511-523.
- [28] Fangjun Li, Liang Cheng. Numerical model local scour under offshore pipeline[J]. J. Hydraulic, ASCE, 1999, 125(4): 400-406.
- [29] Fang jun Li, Liang Cheng. Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents[J]. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 2001, 127, (2): 106-111.
- [30] 陈兵,李玉成,程亮.绕海底管线悬空段肩部的三维湍流结构的数值研究 [J]. 中国造船, 2002, 43(特刊): 330-335.
- [31] K Y Lam, Q X Wang, Z Zong. A nonlinear fluid-structure interaction analysis of a near-bed submarine pipeline in a current[J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16(8): 177-1191.
- [32] Hua Li, J Q Cheng, T Y Ng, Jun Chen, K Y Lam. A meshless Hermite-Cloud method for nonlinear fluid-structure analysis of near-bed submarine pipelines under current[J]. Engineering Structures, 2004, 26(4): 531-542.
- [33] 吕林,李玉成.海底管线附近底床侵蚀稳定性的湍流数值模拟判别[J].中国造船,2003,44(特刊):340-348.
- [34] Liang Cheng, Fangjun Li. Modeling of local scour below a sagging pipeline[J]. Coastal Engineering Journal, JSCE, 2003, 45(2): 189-210.
- [35] 李玉成,吕林.海底管线附近底床侵蚀平衡剖面的湍流数值模拟[J].中国造船,2004,45(特刊):209-216.
- [36] H D Smith, D L Foster. Modeling of flow around a cylinder over a scoured bed [J]. J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE 2005, 131(1): 14-24.
- [37] Dongfang Liang, Liang Cheng. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents, Part I: Flow simulation[J]. Coastal engineering, 2005, 52: 25-42.
- [38] Dongfang Liang, Liang Cheng, Fangjun Li. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents, Part II: Scour simulation[J]. Coastal engineering, 2005, 52: 43-62.
- [39] Dongfang Liang, Liang Cheng. Numerical modele for wave-induced scour below a submarine pipeline[J]. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 2005, 131(5): 193-202.
- [40] 杨兵,高福平,吴应湘,周柳燕,张运斋.海流引起海底管道悬空的数值模拟[J].中国造船,2005,46(B11):221-226.

SUMMARIZE ABOUT SOUR AROUND SUBMARINE PIPELINE

HAN Yan, SHI Bing

(Ocean university of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: This paper reviews the research results on the problem of submarine pipeline scouring home and abroad, which the researchers got by physical experimentations, theoretical analyses and numerical emulations. It is hoped to provide references for further researches.

Key words: submarine pipeline, wave, seabed, scour