

水流作用下管汇结构周围局部冲刷试验研究^{*}

付 健,赵 林^{*}

(中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100)

摘 要:水下生产系统的管汇结构是海底油气资源开采的关键设备之一,近年来得到了广泛的应用。放置在海床上的管汇改变了海床泥沙沉积物的输移能力,由此导致结构基础周围冲淤变化。如果结构物周围冲刷深度过大,将会影响结构的正常使用。为预测管汇结构在水流作用下的冲刷形态与冲刷深度,本文通过水槽物理模型试验和分析手段,对恒定流作用下水下生产系统的管汇结构周围的局部冲淤形态及形成机理进行了分析。采用声学多普勒测速仪(ADV)对结构周围流场进行了精确测量,利用测量结果分析了流速分布规律及对结构物周围局部冲刷的影响。得出影响低矮结构物周围局部冲刷的主要水流结构为结构物尖角处的水流加速,马蹄形漩涡的影响较小。对研究低矮结构物周围局部冲刷的影响因素具有重要意义。

关键词:管汇结构;局部冲刷;冲刷机理;恒定流

中图分类号: TV143.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.02.003

近年来,随着经济的不断发展,人们对油气资源的开采逐渐从陆地移向海洋。水下生产系统以其显著的优势得到广泛应用。在水流作用下,放置在海底上的管汇等低矮结构改变了海床原来的水动力条件,变化的流场对结构周围的泥沙沉积物引起扰动,产生局部冲刷。如果冲刷坑过深,基础产生的不均匀沉降会影响管汇的正常使用,甚至会引起结构安全问题导致一系列问题。目前对于低矮的海洋结构物的局部冲刷研究相对较少,局部冲刷机理没有充分的认识。因此开展这方面的研究对完善海洋低矮结构物局部冲刷理论与防护工程设计都具有重要意义。本文通过波流水槽的试验,对海流作用下管汇(低矮结构物)周围局部冲刷与流场结构进行研究。

1 试验条件

1.1 管汇结构

水下管汇结构主要由管汇模块支撑结构和基础组成,有些情况还需设置保护性结构。支撑结构向管汇的管线和设备提供支撑,并为管汇对掉落物、水下机器人冲击等意外荷载

^{*} 收稿日期:2015-09-10

作者简介:付 健(1990-),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail:fujian_ouc@163.com

^{*} 通讯作者:赵 林(1964-),男,副教授,硕士,主要从事水文学与海岸动力学方面研究。E-mail:ouc_qingdao@163.com

(陈 靖 编辑)

提供有限防护^[1]。基础为管汇系统提供支撑,并安装到海底。防沉板是基础的一种形式,它具有结构简单、安装方便、重量轻等优点。为增大防沉板能力和稳定性,减小外形尺寸,通常为防沉板增加裙板^[2]。此次试验采用的管汇结构形式如图 1 所示。

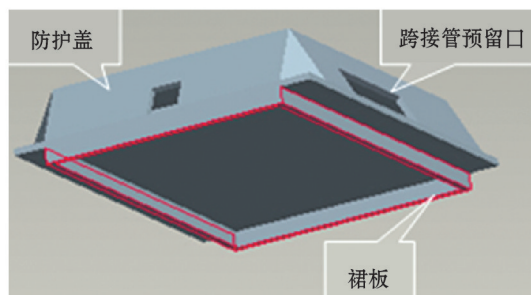


图 1 管汇结构

Fig. 1 PLEM Structure

1.2 试验条件

试验的目的是为了研究管汇基础结构周围流场的变化以及局部冲刷地形。海底管汇周围的局部冲刷研究在波浪潮流水槽中进行,水槽宽 3 m,长 60 m,在水槽中部铺设厚度为 0.2 m 的沙床,沙床两侧为 1:10 的缓坡,两侧为透明的玻璃,用于观察泥沙的起动情况。实验过程中,采用 ADV 流速仪来测量结构周围的流场变化,采用水下摄像机对结构局部冲刷地形变化进行录像观测。根据 Sumer^[3]得出的垂直细长柱时间尺度公式,本次冲刷试验的持续时间为 5 h,局部冲刷能够达到平衡状态。图 2 为水槽试验区域模型布置。冲刷达到平衡状态以后,将水槽的水缓慢放掉,并且把结构取出,采用全站仪进行地形的精细测量。



图 2 试验区域布置(m)

Fig. 2 Layout of the experimental area (m)

2 分析方法

试验中,泥沙中值粒径 $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$,水深为 1 m,水流平均流速为 0.44 m/s。临界希尔兹参数计算经验公式^[4]:

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02D_*)], \quad (1)$$

式中, $D_* = [g(s-1)/\nu^2]^{1/3} d_{50}$, $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,为水的运动黏度。

由表面摩擦力定义的希尔兹数:

$$\theta_s = \frac{\tau_s}{\rho g (s-1) d_{50}} = \frac{U_{fs}^2}{\rho g (s-1) d_{50}}, \quad (2)$$

式中, τ_s 为床面剪切应力; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; s 为泥沙比重; 摩阻流 $U_{fs}^2 = (\tau_s/\rho)^{1/2}$ 。

测量沙纹上的剪切应力非常困难, 因此采用平坦床面的经验公式计算:

$$\tau_s = \rho C_D \bar{U}^2, \quad (3)$$

式中, 对数关系 $C_D = \{k/[\ln(Z_{0s}/h + 1)]\}^2$; 粗糙高度 $Z_{0s} = d_{50}/12$; h 为水深。希尔兹参数 θ_s 是用来判断试验是动床冲刷试验或是清水冲刷试验。

根据上述公式进行计算, 将本次试验参数列于表 1。试验中希尔兹参数 θ_s 大于临界希尔兹参数 θ_{cr} , 因此为动床冲刷试验。

表 1 相关的试验参数

Table 1 Relevant parameters used in the experiment

试验参数	数 值
泥沙中值粒径/mm	0.2
比重/s	2.67
水深 h/m	1
平均流速/m · s ⁻¹	0.44
临界希尔兹参数希尔兹参数	0.098 9

3 管汇结构周围的局部冲刷

3.1 管汇周围流场结构

在未放置结构物时, 利用 ADV 流速仪测量床面以上 2 cm 的流速, 此时的流速为 0.34 m/s。测量管汇周围流场时, 在沙床上铺设铁皮防止泥沙冲刷改变流场。利用 ADV 对结构周围流场进行测量, 测量断面与床面的距离为 2 cm, 水平方向上进行 3 组测量, 测量点水平断面布置如图 3。其中, 断面 1, 2, 3 为迎流面; 断面 4, 5, 6 为背流面, 断面 7, 8, 9 为左侧测量断面, 断面 10, 11, 12 为右侧测量断面。各组断面与结构的距离分别为 25, 15 和 5 cm。采用 Matlab 程序对采集的三维流速数据进行了过滤等处理。图 4 为流速测量装置, 此装置为 XYZ 坐标行车, 能够准确控制 3 个方向的移动距离。

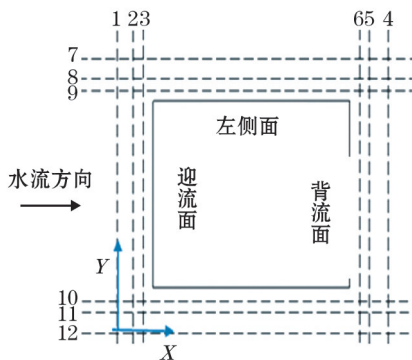


图 3 流速测量断面布置图

Fig. 3 Layout of the flow velocity measurement section



图 4 流速测量装置

Fig. 4 The device for flow velocity measurement

图 5、图 6 分别为迎流面的顺流向、横流向流速曲线。由图可知:迎流面的两个尖角处的水流流速较未放置结构物时明显增加,最大值为 0.4 m/s 。迎流面中央处的水流由于受结构物的阻滞,流速降低。在结构物尖角位置横流方向流速增大,最大流速为 0.15 m/s 。因此,顺流向与横流向流速的增大导致了结构尖角处首先产生冲刷。

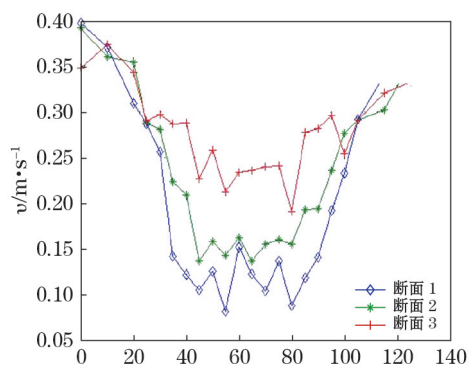


图 5 迎流面顺流向流速

Fig. 5 Streamwise velocity at the incident flow side

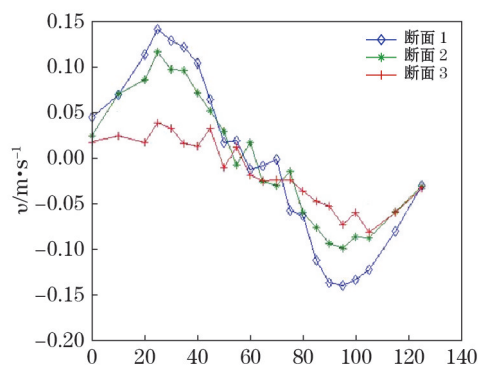


图 6 迎流面横流向流速

Fig. 6 Cross flow velocity at the incident flow side

图 7、图 8 分别为背流面的顺流向、垂流向流速曲线。背流面顺流方向的流速同样在尖角处较无结构物的海床流速增加,在背流面中部区域顺流向流速出现负值,表明该区域出现尾涡。垂直方向的水流在尖角位置方向向下,在中间区域方向向上,流速较小。尖角位置向下的水流与顺流向流速的增加导致了尾部尖角位置泥沙被带走,后部尾涡的出现导致尖角位置带走的泥沙在后部沉积下来,因此尾涡区域出现淤积现象。

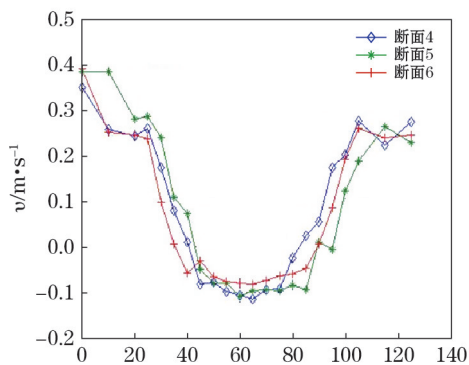


图 7 背流面顺流向流速

Fig. 7 Streamwise velocity at the dorsal flow side

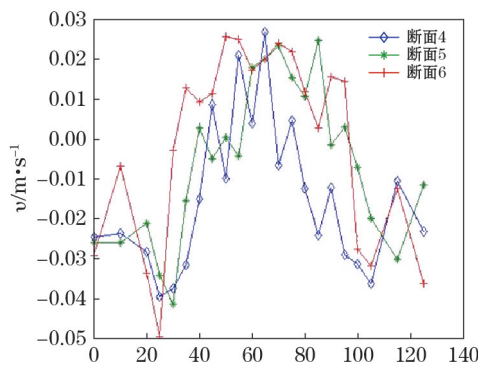


图 8 背流面垂向流速

Fig. 8 Vertical velocity at the dorsal flow side

图 9、图 10 分别为左侧面顺流向、垂流向流速曲线。结构两侧产生的淤积与两侧的流场密切相关。侧面顺流向流速越靠近结构物越小,最内侧的断面 10 在中间位置流速突然减小与管汇在侧面的跨接管预留口有关。侧面顺流向流速减小且竖直方向向下的水流使结构在尖角位置搬运的泥沙在两侧得以沉积。

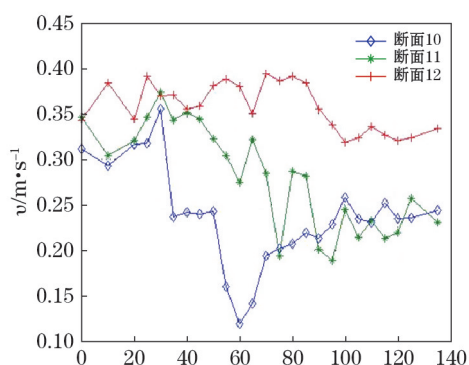


图9 左侧面顺流向流速

Fig. 9 Streamwise velocity at the left side

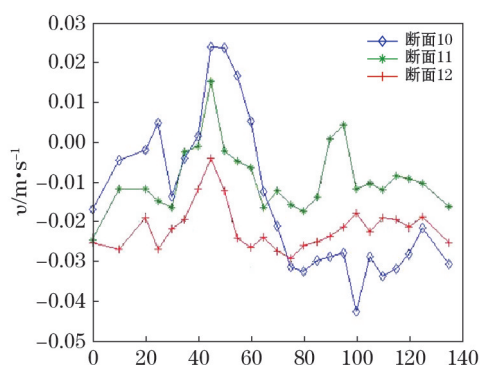


图10 左侧面垂向流速

Fig. 10 Vertical velocity at the left side

3.2 管汇周围冲淤形态

图11~12为管汇基础结构在水流作用条件下的局部冲刷地形变化。由图可知,结构物周围的局部冲刷大致沿中轴线呈对称分布。最大冲刷深度发生在管汇基础结构的迎流面的两个尖角,最大冲刷深度为3 cm,迎流面中间位置冲刷深度较小。在试验过程中,通过水下摄像机的录像可知,冲刷首先发生在迎流面的尖角位置,然后逐步向中间扩展,与墩式结构的冲刷坑首先在墩前产生不同。

结构的两侧产生淤积,淤积范围宽度约为20 cm。其中,结构中部的淤积高度较高,淤积厚度为2 cm以上。结构的背流面尖角也产生了轻微的冲刷,范围较小,冲刷深度为1 cm。在结构的背流面中部有轻微的淤积现象,这与结构后部形成的尾涡有关。

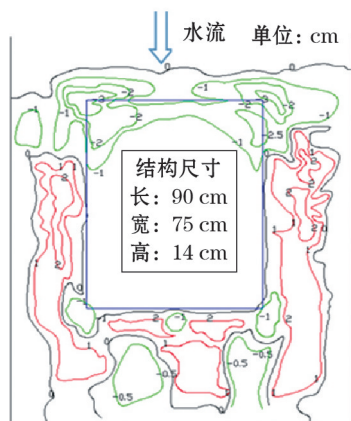


图11 局部冲刷等高线图

Fig. 11 Contours of the depth caused by the local scouring



图12 冲淤地形照片

Fig. 12 A photo showing the seabed topography caused by scouring and silting

3.3 局部冲刷分析

导致管汇等低矮结构物周围局部冲刷机理十分复杂,根据现有的模型试验与理论分析结论,结构物周围的3种水流结构对其局部冲刷产生影响,分别为1)结构物尖角位置

的水流加速;2)结构物迎流面的马蹄形漩涡;3)结构物后部的尾涡及脱落^[5]。Sumer 和 Fredsøe^[6]指出对于墩式结构物的局部冲刷主要是由于迎流面的马蹄形漩涡导致,冲刷首先在墩柱前开始,并且冲刷深度最大。

在本试验中,通过对采集得到的流场数据进行分析,得知结构前部并没有产生马蹄形漩涡。后部虽然形成了尾涡,但是尾涡并没有脱落,由结构物后部的冲淤形态也能得到验证。所以,对于管汇等低矮结构物周围的局部冲刷主要的影响水流结构为迎流面尖角处的水流加速。

4 结 语

通过物理模型试验,对恒定流作用下海底管汇基础周围局部冲刷形态和最大冲刷深度进行了研究。

1)利用测量结果分析了管汇等低矮结构物三维流速分布规律及对局部冲刷的影响,对于深入研究低矮结构物的冲刷及复杂边界流场理论具有重要的参考价值。

2)通过对冲淤地形与周围流场的分析,指出影响管汇等低矮结构物的冲刷机理是迎流面尖角的水流流速的增大,结构物前部的马蹄形漩涡与后部漩涡脱落对局部冲刷并没有影响。

本试验没有进行低矮结构物的长宽比对水流结构的影响以及迎流面水流加速的定量分析与研究,因此,今后的工作还应进行一系列的试验来探讨这些问题,使研究成果更具实用价值。

参考文献:

- [1] 王玮,孙丽萍,白勇. 水下油气生产系统[J]. 中国海洋平台,2009,24(6):41-45.
- [2] 谭越,刘明. 水下生产系统防沉板基础分析[J]. 船海工程,2012,41(4):133-141.
- [3] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTIANSEN N. Scour around a vertical pile in waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1992, 118 (1):15-31.
- [4] ZHAO M, ZHU X S, CHENG L. Experimental study of local scour around subsea caissons in steady currents[J]. Coastal Engineering, 2012, 60:30-40.
- [5] SOULASBY R L, WHITEHOUSE R J S W. Threshold of sediment motion in coastal environments[C]// Proceedings of 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference. Christchurch New Zealand: University of Canterbury, 1997.
- [6] SUMER B M, FREDSE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. Singapore: World Scientific, 2002.

Experimental Study of Local Scouring Around PLEM Structure Under the Action of Current

FU Jian, ZHAO Lin

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: PLEM structure of subsea production system is one of the critical equipment for oil and gas exploration in the sea and has been widely used in recent years. The PLEM placed on the seabed can cause the change of bottom sediment transport capacity, thus leading to the change of erosion and deposition around the base of the structure. To predict the depth and forms of the scouring around the PLEM structure under the action of current, the forms and formation mechanism of local scouring around the PLEM structure under constant current are analyzed by flume physical model experiments. The flow field around the structure is accurately measured with acoustic doppler velocimeter (ADV). The results thus obtained are used to analyze the distributions of flow velocity and their influence on the local scouring around the structure. The conclusion thus obtained is that the horseshoe vortex plays less important role than the flow velocity acceleration at the sharp corners of the structure. It could be significant for studying the influence factors of local scouring around low vertical structures.

Key words: PLEM structure; local scouring; scouring mechanism; constant current