

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.015

罗勇,周志勇,王新,等.大型油轮压载水舱泥沙淤积试验研究[J].水利水运工程学报,2016(3):114-118.(LUO Yong, ZHOU Zhi-yong, WANG Xin, et al. Experimental studies on sedimentation in VLCC ballast tanks [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 114-118.)

大型油轮压载水舱泥沙淤积试验研究

罗勇¹,周志勇²,王新¹,李晓峰²

(1.南京水利科学研究院,江苏南京 210029;2.上海船舶研究设计院,上海 201203)

摘要:大型油轮进入多沙水域,停泊港口置换压载舱水时,舱内泥沙沉积于压载水舱底部,很难清淤。将压载水舱分隔为边舱和底舱,以边舱作为泥沙沉淀舱,泥沙沉淀后较清水体流入底舱,是治理压载水舱泥沙淤积的一种新方法。以舟山地区多沙水域为背景,建立了大型油轮压载水舱边舱正态水沙模型,提出了压载水舱不同结构形式下的压舱水流动方法,通过多组次试验,分析了油轮压载水舱泥沙的淤积过程和沉积规律,优选了压载水舱泥沙落淤最佳结构方案。研究表明:通过油轮压载水舱边舱沉淀泥沙的方法,能使压载水中约80%的泥沙落淤,仅20%左右泥沙进入底舱。该模型试验为国内首次大比尺船舶压载水舱泥沙淤积试验,可为大型油轮、船舶压载水舱泥沙治理提供新的途径。

关键词:压载水舱;泥沙淤积;大型油轮;舟山水域

中图分类号:TV145+3

文献标志码:A

文章编号:1009-640X(2016)03-0114-05

我国已成为世界第二石油消费大国,大量进口原油由大型油轮运至宁波舟山沿线港口,卸油后需注入压载舱水。受长江口大量排沙输出外海和周边水沙环境的影响,沿线港口水体含沙量高,遇到风浪天时,底层含沙量可达 5 kg/m^3 以上。对于进出沿线港口的大型油轮,带入大量泥沙沉积于压载舱,每航次都要沉淀几十甚至上百吨淤泥。曾估计一艘新油轮经30个月运营后,将聚集成宽60 m、长约250 m、高0.8 m的淤沙堆积层,约12 000 t淤泥,由此引发系列船舶不可控制风险^[1-3]。为了解决油轮压载水舱泥沙淤积问题,南京水利科学研究院和上海船舶研究设计院在2012年共同进行了大型油轮压载水舱泥沙淤积试验研究。在分析论证宁波舟山水域典型泥沙沉积特性的基础上,按照几何相似、水流泥沙运动相似,泥沙冲淤变化相似的条件进行制模、选沙和试验。

1 模型设计和制造

1.1 模型设计

根据要求建立比尺为1:8的正态模型^[4-5],满足几何相似,模型压载水舱长6.4 m,宽0.42 m,高2.7 m。模型还须满足水流运动相似,泥沙运动相似条件。

$$\text{重力相似: } \lambda_V = \lambda_H^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{阻力相似: } \lambda_n = \lambda_H^{2/3} / \lambda_L^{1/2} = \lambda_H^{1/6} \quad (2)$$

$$\text{泥沙沉降相似: } \lambda_\omega = \lambda_H^{3/2} / \lambda_L \quad (3)$$

$$\text{泥沙悬浮相似: } \lambda_\omega = \lambda_V = \lambda_H^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{含沙量和挟沙能力相似: } \lambda_S = \lambda_{S^*} = \lambda_{\gamma_s} / \lambda_{\gamma_s - \gamma} \quad (5)$$

$$\text{泥沙起动和扬动相似: } \lambda_{V_c} = \lambda_V, \lambda_{V_f} = \lambda_V \quad (6)$$

收稿日期:2015-05-19

作者简介:罗勇(1960—),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事水工物理模型试验研究。E-mail: yluo@nhri.cn

原型泥沙一般中值粒径^[6] $d_{50}=0.008\text{ mm}$,近底 $d_{50}=0.03\text{ mm}$,因取压载舱水在有盐分的海域,泥沙颗粒细,发生絮凝,泥沙絮凝沉速 ω_f 和絮凝当量粒径 $d_f^{[7-8]}$ 为:

$$\omega_f = 0.0974d_{50}^{0.18}, \quad d_f = 0.0421d_{50}^{0.09} \quad (7)$$

试验选取100目木粉为模型沙^[9-11],沉速 $\omega=0.0172\text{ cm/s}$,与要求的 0.0164 cm/s 符合。原型沙未沉实,床面泥沙密度 1.1 t/m^3 左右时,起动流速约为 0.20 m/s ,模型沙起动流速 $0.04\sim 0.06\text{ m/s}$,要求值 $\lambda_{V_c} = \lambda_V = 2.828$ 即 $v_{c_m} = 0.07\text{ m/s}$,木粉沙起动即扬动,原型浮泥起动后则悬扬也相似。

泥沙冲淤相似:

$$\lambda_{i_2} = \lambda_{\gamma_0} / \lambda_S \lambda_{i_1}, \quad \lambda_S = \lambda_{\gamma_s} / \lambda_{\gamma_s - \gamma} \quad (8)$$

根据设计要求,VLCC每年运行9~10个航次,每次从边舱溢流 5800 m^3 海水至底舱,压载舱水泵注水流量 $1500\text{ m}^3/\text{h}$,即1次水泵运转时间为 3.867 h ,1年以10航次计算共计 38.67 h ,模型冲淤时间1年为 1.58 h ,2年 3.16 h 。2年试验加上边舱1次充满水的时间是 4.03 h 。

1.2 模型制造

模型压载水舱侧壁用20mm有机玻璃制造,以利试验观测和摄影;舱底板用不锈钢板制成,模型压载水舱高2.7m,压载水舱由横向、竖向隔板分隔为36个小水舱(见图1),压载水舱泥沙模型试验整体布置如图2。小水舱竖向均开有2个过流孔,横向开有1个过流孔。底层为第1层,从左向右编号为小水舱对应排列,底层1-1舱为进水舱,顶层4-1舱为出水舱,每个分隔舱均装有取水孔,便于试验时取水测量含沙量。为了保证进入模型的含沙量和出沙沉淀量的数值准确,模型自建水流循环系统,包括浑水调节水库1座,出沙沉淀1库和沉淀2库各1座。压载水注入模型前,调节好入舱水流的含沙量,未调准确前回浑水调节水库,调节好水流流量及含沙量后进行试验,并使连续注入的压舱水保持固定流量和含沙量。

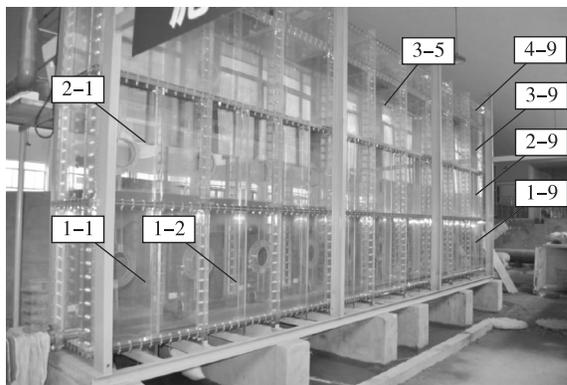


图1 压载舱水箱结构

Fig.1 Ballast water tank structure

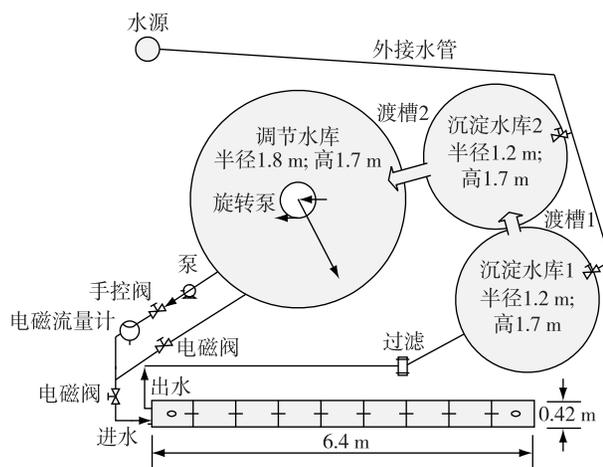


图2 压载舱泥沙模型试验布置

Fig.2 Layout of ballast tank sediment model

2 压载水舱泥沙淤积试验

2.1 试验准备和数据获取

选取3个模型沙样品分别置于钵体,放入烘箱以 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干2h,分别测取烘干前后钵体重和沙重,得3个含水量值,取其平均为 1.77% ,因含水量小,一般不校正。模型沙干密度用容积法测量,取值 0.326 g/cm^3 (0.326 t/m^3);装沙滤袋经过多次比较试验,选用 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 细孔滤袋;湿沙含水量经多组次、多批次湿沙烘干称重比较,甩干湿沙的含水量为 51.1% 。配置相关试验仪器,如电磁流量计、光电测沙仪等。

2.2 试验方案

根据模型设计和油轮压载舱结构,共进行4组方案试验^[12]。不同试验组次的区别在于当从1-1舱注入

一定流量压舱水时,在水流大小、方向均固定的情况下,舱内分隔舱底板开孔位置、大小、开孔为开启或闭合的不同。方案 1,所有水舱分隔底板都开通;方案 2,2-2,2-6,3-2,3-6,4-2,4-6 舱底板闭合,其余开通;方案 3,在方案 2 基础上,多加 3-1,3-3,3-4,3-5 舱闭合,其余开通;方案 4,在方案 1 基础上,2-1,3-1,4-1,2-9,3-9,4-9 舱底板开通,其余小舱为关闭的延长水流流路方案。方案 1 是油轮压载舱基本结构形式,方案 2~4 是以泥沙尽可能在舱内落淤为目的的水流行进方案。以方案 3 为例,各小舱开孔布置如图 3。

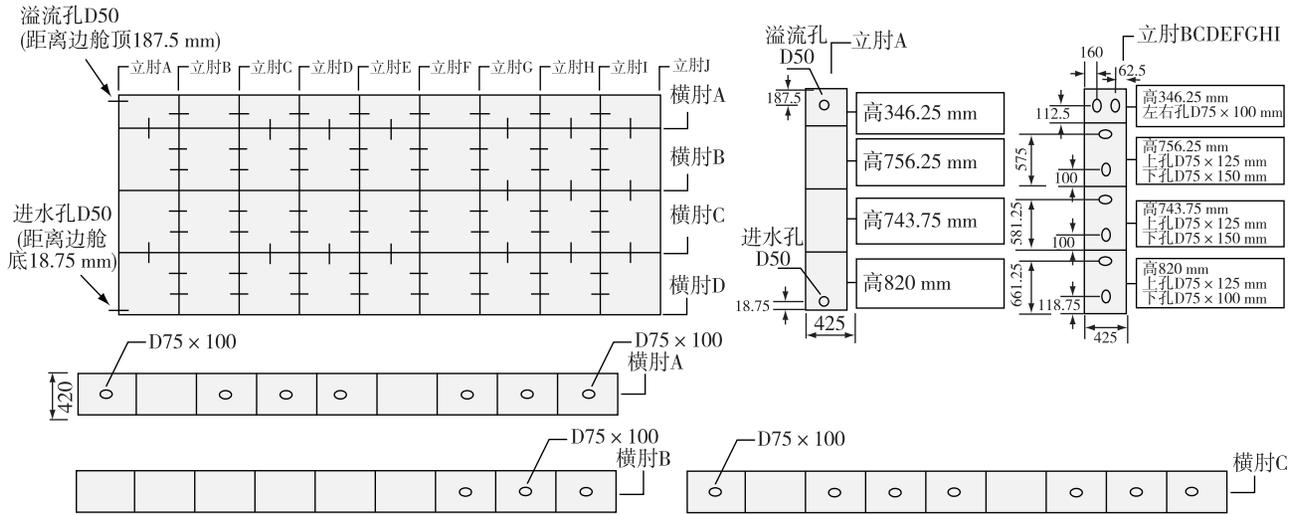


图 3 压载水舱试验方案(单位:mm)

Fig. 3 Ballast tank testing schemes (unit: mm)

压载舱竖向隔板均开有 2 个过水孔,压舱水从压载舱第 1 层 1-1 舱注入,从 1-1,1-3,1-4,1-5,1-7,1-8,1-9 舱经过横向隔舱底板进入第 2 层,从 2-7,2-8,2-9 舱进入第 3 层,从 3-1,3-3,3-4,3-5,3-7,3-8,3-9 舱进入第 4 层,最终从 4-1 舱流出。每次试验时,实测 1-1 舱进水管和 4-1 舱出水管的含沙量进行比较,试验结束,舱内浑水经 36~48 h 澄清,仔细排去淤积沙层以上的清水,开舱获取各小舱淤积泥沙以及 2 个沉淀库的泥沙,用 0.5 μm 滤袋过滤甩干,并在烘箱烘干称重,取得各舱泥沙淤积量。

2.3 试验结果分析

4 组方案试验后边舱各部分泥沙淤积情况,横向以第 1 层 1-1~1-9 舱,纵向 1-1~4-1 舱,泥沙淤积逐次减少,各组次以 1-2 舱泥沙落淤最多,4 层中以第 1 层泥沙所占比例最大(表 1),可以认为在设定进口流量 1 500 m³/h 条件下,其水动力不足以把随压舱水带入的泥沙更多地推至高层,大部分泥沙沉积在舱内,尤其是水舱内的第 1 层。模型压载舱进入含沙水流后,水流浑浊,受入口高流速及船舱自身隔板阻挡的影响,水流极其混乱,过舱水孔的水流为射流,射流两侧为回旋流,因每个隔板有 2 个过水孔,位置在竖隔板中间,因而既有左右迂回流,又有上下回旋流,回流大小和位置随时都在变化,优选延长水流流路的方案,让泥沙多淤积,但试验中发现,因过舱水流集中,淤积于舱底的泥沙又被冲动荡起。4 组方案试验结果比较见表 1,各方案原型淤积泥沙厚度及淤积量比较见表 2。

表 1 泥沙淤积量分布试验结果比较

Tab. 1 Comparison of test results of four schemes

方案	留舱/%	出舱/%	分层比例/%			
			1 层	2 层	3 层	4 层
1	80.51	19.49	61.46	29.04	7.55	1.95
2	80.00	20.00	61.33	27.82	8.50	2.35
3	87.38	12.61	64.16	26.13	6.56	3.15
4	80.46	19.54	71.99	17.59	9.33	1.09

表2 各方案原型淤积泥沙厚度及淤积量比较

Tab. 2 Comparison between thickness and amount of sediment deposition of prototype programs

方案	层别	最大淤积舱			全层平均淤厚/m	淤积量/m ³	总淤积量/m ³
		舱名	最大淤厚/m	平均淤厚/m			
1	1层	1-2	0.680	0.453	0.212	36.88	60.01
	2层	2-1	0.704	0.282	0.100	17.43	
	3层	3-7	/	0.079	0.026	4.54	
	4层	4-7	/	0.016	0.007	1.16	
2	1层	1-2	0.640	0.431	0.223	38.76	63.26
	2层	2-1	0.464	0.273	0.101	17.55	
	3层	3-1	/	0.101	0.031	5.39	
	4层	4-1	/	0.017	0.009	1.56	
3	1层	1-2	0.544	0.539	0.254	44.15	68.74
	2层	2-1	0.360	0.307	0.103	17.90	
	3层	3-7	/	0.029	0.026	4.52	
	4层	4-7	/	0.018	0.012	2.17	
4	1层	1-2	0.656	0.495	0.263	45.71	63.44
	2层	2-7	/	0.076	0.064	11.12	
	3层	3-1	/	0.051	0.034	5.91	
	4层	4-9	/	0.006	0.004	0.70	

3 结 语

(1)大型油轮压载水舱的泥沙淤积是我国多沙河口海岸中交通运输发展后遇到的特殊问题,采用压载水舱边舱作为泥沙沉淀舱,把沉淀后的清水送至压载舱底舱的方法效果明显。试验结果表明,方案1~4中80%以上的泥沙能够留在边舱内,从水舱淤沙和出沙效果看,方案3最优,船舱留沙达87%,出沙仅占13%。

(2)本试验是依照天然海水含沙量约 1.0 kg/m^3 注入压载水而形成的2年结果,舟山区域含沙量变化较大,大小潮,春秋季节都不同,若含沙量大于 1.0 kg/m^3 ,淤积量与含沙量会呈比例增加。

(3)压载舱1、2层的淤沙占总淤积沙量的90%,若在置换压载舱水同时,采用搅动水流方法冲动压载舱淤积泥沙,可使水舱泥沙随压载水排出舱外,此项试验研究有待在工程实践中不断完善。

参 考 文 献:

- [1] 李玉平. 防泥沙型船开发迫在眉睫[J]. 中国船检, 2010(2): 46-48. (LI Yu-ping. To develop anti-sediment vessel form is critical[J]. China Ship Survey, 2010(2): 46-48. (in Chinese))
- [2] 李伟. 环长江口区域港口船舶压载舱淤泥对策浅析[J]. 船海工程, 2009(8): 20-24. (LI Wei. Investigation to solutions on removing silt in vessel ballast tanks[J]. Ship & Ocean Engineering, 2009(8): 20-24. (in Chinese))
- [3] 姜伟. VLCC压载舱淤泥控制操作[J]. 世界海运, 2012(12): 32-35. (JIANG Wei. VLCC ballast tank sludge control operation[J]. World Shipping, 2012(12): 32-35. (in Chinese))
- [4] 窦国仁. 全沙模型相似律及设计实例[M]//窦国仁论文集. 北京: 中国水利电力出版社, 2003. (DOU Guo-ren. A similarity theory concerning the design of total sediment transport models with reference to a particular project[M]//Memoir of DOU Guo-ren. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [5] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Mechanics of sediment transport [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))

- [6] 朱立俊. 梅山水道抗超强台风渔业避风锚地工程潮流泥沙物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011. (ZHU Li-jun. Tidal current and sediment physical model for Meishan waterway[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))
- [7] 严恺. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002. (YAN Kai. Coastal engineering[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 罗肇森. 河口治理与大风骤淤[M]. 北京: 海洋出版社, 2009. (LUO Zhao-sen. Estuarine regulation and gale rapid siltation [M]. Beijing: China Ocean Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 孙林云. 天津北疆发电厂供水系统数学和物理模型试验研究总报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (SUN Lin-yun. Research of numerical and physical model of water supply system at the Tianjin Beijiang power plant[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [10] 张金善. 大、小洋山建港总体规划中的水流泥沙问题[J]. 海洋工程, 2004(8): 56-60. (ZHANG Jin-shan. A study of current and sediment in the general layout of Yangshan harbor[J]. The Ocean Engineering, 2004(8): 56-60. (in Chinese))
- [11] 谢鉴衡. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1980. (XIE Jian-heng. River sediment engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1980. (in Chinese))
- [12] 罗勇. 大型油轮压载水舱泥沙淤积规律试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (LUO Yong. Experimental research of VLCC ballast tanks silt[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))

Experimental studies on sedimentation in VLCC ballast tanks

LUO Yong¹, ZHOU Zhi-yong², WANG Xin¹, LI Xiao-feng²

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China*)

Abstract: It is difficult to dredge silted sediment on the bottom of ballast tanks after VLCC (very large crude carrier) enters and anchors in harbors for replacement of ballast water in turbid waters. A new way of governing silt in the VLCC replacement of water ballast tanks is to separate the ballast tanks into the side ballast tanks and the bottom ballast tanks, and the side ballast tanks are taken as the main sediment deposition cabins instead of the bottom of the ballast tanks, so that the water inflowing the bottom ballast tanks will contain less silt. In this paper, a normality model is established for water sediment in VLCC side ballast tanks based on studies of high sediment concentration in the Zhoushan coastal waters, Zhejiang Province, China. The regular pattern of ballast water flowing into the different ballast tanks is also constructed. Tests on four schemes are made and the best structure design of the ballast tank sediment silt preferably among the four test designs is selected. The ballast tanks sediment deposition processes and laws are obtained from experiments. The analysis results of experiments show that 80% of sediment deposition occurs in the side ballast tank, and only about 20% of sediment enters the bottom ballast tanks. This is the first large scale model study of VLCC ballast tank sedimentation in China, and the model studies have provided a new way in controlling sedimentation in VLCC ballast tanks. The experimental results can be widely applied to deal with sediment depositions in the other large ship ballast tanks.

Key words: ballast tanks; sedimentation; VLCC (very large crude carrier); Zhoushan coastal waters