



基于 MIKE 3 模型计算航道工程 装舱溢流施工流失量

赵津京¹, 赵建豪¹, 邬德宇², 王天祥¹

(1. 中交 (天津) 生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461)

摘要: 装舱溢流施工后输挖泥沙工程量统计时会包含沉落到航道范围内的泥沙, 而落到航道范围外的泥沙无法确定, 因此项目验收时根据航道体积计算的输挖工程量会远小于挖泥船实际作业时的工程量。依托盘锦港荣兴港区 10 万吨级航道工程, 采用 MIKE 3 水动力数值模拟软件, 搭建工程区潮流泥沙模型, 计算出落到航道范围外的溢流泥沙流失量。结果表明, 本方法能计算出整个施工期的装舱溢流施工流失量, 对施工方统计实际施工量有重要意义。

关键词: 航道工程; 装舱溢流流失量; MIKE 3

中图分类号: U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0215-06

Calculating loss of loading overflow construction in channel engineering based on MIKE 3 model

ZHAO Jinjing¹, ZHAO Jianhao¹, WU Deyu², WANG Tianxiang¹

(1. CCCC (Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China;
2. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The statistics of loading overflow construction quantities can include the sand settling in the channel range, while the sand settling outside the channel range cannot be determined. Therefore, the dredging quantities calculated according to the channel volume are much smaller than the actual dredging quantities when the engineering is checked and accepted. Based on the 100,000-ton channel project of Rongxing port area of Panjin Port, we build the tidal current and sand model of the project area by MIKE 3 hydrodynamic numerical simulation software, and calculate the overflow sand loss outside the channel range. The results show that this method can calculate the loss of loading overflow construction in the whole construction period, and it is important for the construction party to count the actual dredging quantities.

Keywords: channel engineering; loss of overflow during loading; MIKE 3

装舱溢流施工法是耙吸挖泥船最主要的施工方法。为了增加装舱土方量, 一般待泥浆装满到调定舱容后, 需要采用一段时间溢流施工, 使得较粗的泥沙颗粒和土粒在泥舱内沉淀, 细颗粒泥沙会随同溢流出舱的水流排出舱外。从船舱溢流出的泥沙随着水流运动, 直至沉落到海床。施工后输挖泥沙工程量统计时主要包含沉落到航道范

围内的泥沙, 而落到航道范围外的泥沙无法确定, 故根据航道体积计算的输挖工程量一般远小于挖泥船实际作业时的工程量。施工方将航道外溢流泥沙量称为溢流泥沙流失量, 希望能确定每次航道疏挖施工引起的这部分溢流损失, 以得到准确的工程量。

目前学者均对耙吸挖泥船装舱溢流的物理模

型和理论进行研究，其中戴承礼等^[1]通过现场试验，分析装舱溢流施工对海底淤积、海水养殖、重金属污染等水域环境的影响；郭飞燕等^[2]根据固体颗粒沉降公式以及悬浮颗粒在动水输移中的扩散公式，以工程实例分析溢流施工工艺在航道疏浚工程中的适用性；Camp^[3]对沉淀池合理性设计进行研究，并建立相关模型；Miedema 等^[4]基于 Camp 模型开展泥舱沉积理论研究；Ooijens^[5]在 Camp 模型中引入动力学相关理论，并通过模型试验研究装舱过程中的流速和浓度等变化规律。

而针对装舱溢流的数值模拟研究，Miedema 等^[6]提出装舱过程的简化二维计算流体力学(CFD)模型；郝宇驰等^[7]基于非黏性泥沙冲淤的经验公式，利用 CFD 方法并建立二维沉积数学模型，对泥舱水力布置和装舱效率进行研究；张忱等^[8]通过装舱溢流物理模型，测量了装舱到溢流过程中装载量、流场分布等随时间的变化规律，并采用 CFD 方法分析装舱过程中泥沙沉积情况及舱内流场变化；张志勇等^[9]利用由雷诺平均(RANS)方程与泥沙经验公式建立的装舱溢流计算模型，对细沙和粗沙的装舱溢流过程进行数值模拟；崔鑫^[10]建立三维水沙数值模型，对耙吸船疏浚施工悬浮物扩散进行数值模拟。

综上所述，目前研究多基于理论分析和数值模拟等方法，开展溢流泥沙对装舱和外界水环境的影响分析，而对装舱溢流泥沙流失量与实际施工疏挖量的关联鲜有研究。本文以盘锦港荣兴港区 10 万吨级航道工程为例，采用 MIKE 3 水动力数值模拟软件，搭建泥沙溢流模型对溢流泥沙流失量进行研究及应用。

1 水动力与泥沙模型

1.1 水动力模型

MIKE 3 流体力学(FM)模型建立在 Boussinesq 和流体静压假定的三维不可压雷诺平均 N-S 方程的基础之上，其控制方程中的连续方程为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial(hw)}{\partial z} = hS \quad (1)$$

其中 x 和 y 方向上的水平动量方程分别为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} &= fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0}, \\ \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} &= -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0}, \\ \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中： t 为时间； x 、 y 和 z 为笛卡尔坐标系； η 为水面高度； d 为静水深； h 为总水深，其值为 η 与 d 之和； u 、 v 和 w 是 x 、 y 和 z 方向上的速度分量； f 为科里奥利参数，其值为 $2\Omega \sin \varphi$ ，其中 Ω 为旋转角速度， φ 为纬度； ρ 为水密度； S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 和 S_{yy} 为辐射应力张量的分量； v_t 为垂向湍流黏度(或涡黏)； p_a 为大气压强； ρ_0 为水的参考密度； S 为点源的流量大小； u_s 、 v_s 为 x 、 y 方向流入周围环境的水速度大小； F_u 、 F_v 为水平应力项，用压力梯度相关来描述。

1.2 泥沙模型

MIKE 3 泥输运(MT)模块基于水动力(HD)模块的水流计算结果，计算包括沉降和再悬浮之内的泥沙输运过程。MT 模块可将黏性泥沙和非黏性泥沙区别处理。

悬沙扩散方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} &= \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x + \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \\ \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y + \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \cdot \frac{1}{h} - S' \end{aligned} \quad (4)$$

式中： \bar{c} 为垂线平均含沙量； D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向上泥沙扩散系数； S' 为床沙侵蚀或淤积速率； Q_L 为泥沙输入源强； C_L 为泥沙输入源强中的含沙量。

泥沙沉降速度主要采用 Van Rijn 公式计算：

$$w_s = \begin{cases} \frac{(\rho_s - 1) gd^2}{18\nu} & (d < 100 \mu\text{m}) \\ \frac{10\nu}{d} \left\{ \left[1 + \frac{0.01(\rho_s - 1) gd^3}{\nu^2} \right]^{0.5} - 1 \right\} & (100 \mu\text{m} \leq d < 1000 \mu\text{m}) \\ 1.1 [(\rho_s - 1) gd]^{0.5} & (d \geq 1000 \mu\text{m}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: d 为中值粒径; ρ_s 为泥沙密度; ν 为运动黏滞系数。因黏性细颗粒泥沙的絮凝特性, 故实际中泥沙沉速应略大于计算得到的沉速。

2 潮流模型搭建和率定

2.1 潮流模型搭建

潮流模型采用 MIKE 3 HD 模块搭建, 为尽量消除边界效应, 模型范围包括整个渤海湾, 潮流边界定在深海水域且水深变化均匀的地方(图 1), 高程基准为平均海平面。地形文件使用非结构三角网格, 外海至工程区网格逐渐加密(图 2), 外海最大网格边长 8 km, 航道最小网格边长 20 m, 共 13 026 个节点、24 762 个网格单元, 垂向网格采用 Sigma 分层, 共计 3 层。潮流边界采用预报潮位数据, 从 MIKE 全球潮汐模型中提取边界处的潮汐数据。

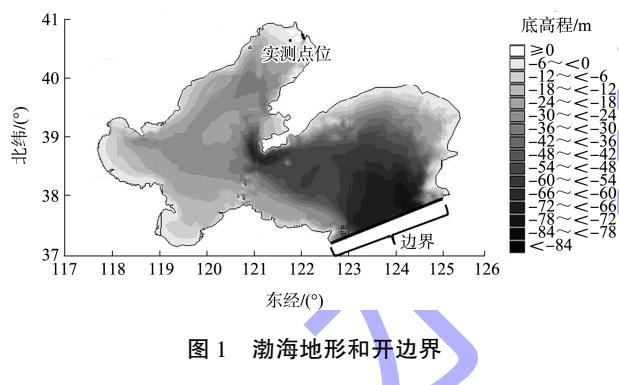


图 1 渤海地形和开边界

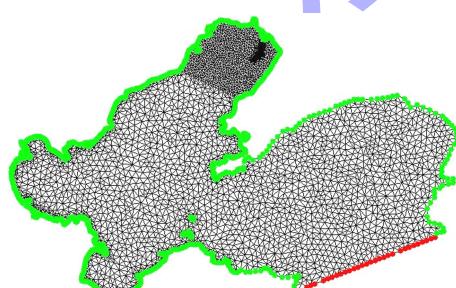


图 2 渤海网格

本海域潮流性质属于规则半日潮, 平均涨潮历时 350 min 左右, 平均落潮历时 400 min 左右,

平均落潮历时大于涨潮历时。涨、落潮平均流向为 NNW—SSE, 其余各测站涨、落潮平均流向为 NE—SW。根据实测资料统计分析工程区海域潮段平均流速, 涨、落潮段大潮流速分别为 0.42、0.39 m/s, 中潮流速均为 0.36 m/s, 小潮流速分别为 0.32、0.30 m/s, 各测站涨潮段平均流速基本大于落潮段平均流速。

通过现场施工数据, 耙吸挖泥船下耙启泵后 20 min 开始溢流, 溢流装舱时间为 30 min, 挖泥船轨迹从 A 点至 B 点, 见图 3。现场测得溢流流量为 7.5 m³/s, 溢流泥浆浓度为 1.1 kg/m³。涡黏函数采用 Smagorinsky 亚格子尺度模型, 系数取 0.28, 曼宁数取 32 m^{1/3}/s, 底部糙率取 1 mm。

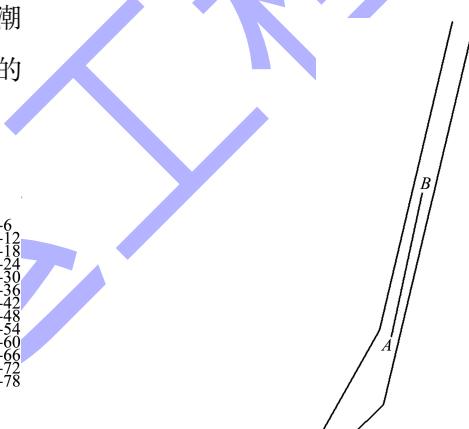


图 3 挖泥船施工轨迹

2.2 潮流模型验证

根据 2007 年 5 月的现场实测水文资料对潮流潮汐流场进行率定和验证, 结果见图 4、5。由图 4 可知, 计算潮位过程线与实测值基本一致; 本文潮流模型垂向分为表层、中层和低层共 3 层, 由图 5 可知, 通过数值模拟得到的 3 层的流速、流向与实测流速、流向数据基本吻合。表明本文建立的潮流数值模型验证结果与实测数据吻合较好, 能够反映所依托工程区域的实际水文情况, 以此用于研究装舱溢流施工泥沙的扩散规律及流失量。

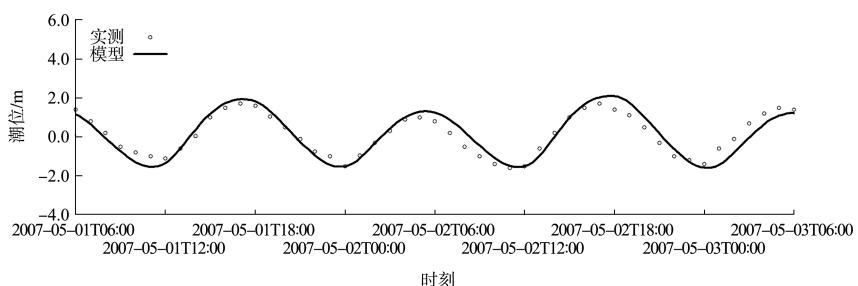


图 4 潮位率定结果

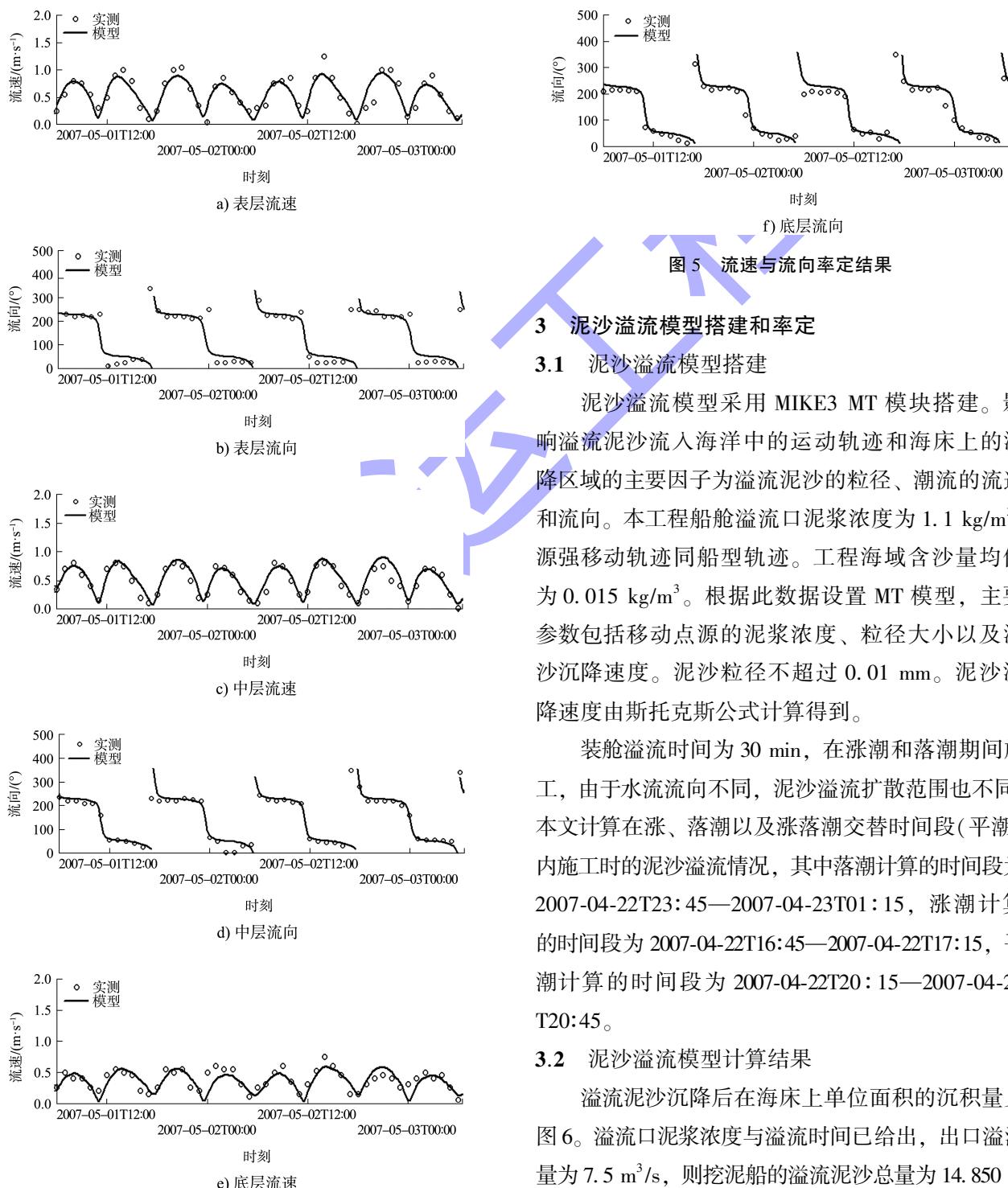


图 5 流速与流向率定结果

3 泥沙溢流模型搭建和率定

3.1 泥沙溢流模型搭建

泥沙溢流模型采用 MIKE3 MT 模块搭建。影响溢流泥沙流入海洋中的运动轨迹和海床上的沉降区域的主要因子为溢流泥沙的粒径、潮流的流速和流向。本工程船舱溢流口泥浆浓度为 1.1 kg/m^3 ，源强移动轨迹同船型轨迹。工程海域含沙量均值为 0.015 kg/m^3 。根据此数据设置 MT 模型，主要参数包括移动点源的泥浆浓度、粒径大小以及泥沙沉降速度。泥沙粒径不超过 0.01 mm 。泥沙沉降速度由斯托克斯公式计算得到。

装舱溢流时间为 30 min，在涨潮和落潮期间施工，由于水流流向不同，泥沙溢流扩散范围也不同。本文计算在涨、落潮以及涨落潮交替时间段（平潮）内施工时的泥沙溢流情况，其中落潮计算的时间段为 2007-04-22T23:45—2007-04-23T01:15，涨潮计算的时间段为 2007-04-22T16:45—2007-04-22T17:15，平潮计算的时间段为 2007-04-22T20:15—2007-04-22T20:45。

3.2 泥沙溢流模型计算结果

溢流泥沙沉降后在海床上单位面积的沉积量见图 6。溢流口泥浆浓度与溢流时间已给出，出口溢流量为 $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，则挖泥船的溢流泥沙总量为 14.850 t 。

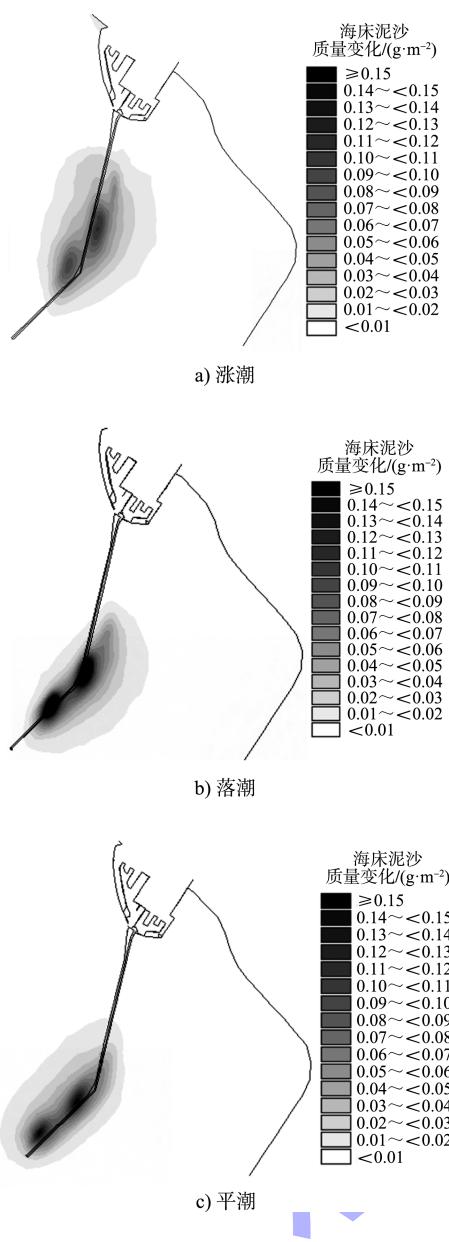


图 6 溢流泥沙在海床的沉积量

模型输出了每个计算网格的面积, 用某一计算网格的面积乘以该计算网格上单位面积底床上泥沙质量变化量, 得到该计算网格底床上的溢流泥沙沉降量。统计航道上所有网格的溢流泥沙沉降量之和, 得到溢流泥沙沉降到航道范围内的泥沙量见表 1。其中航道外溢流泥沙总量计算是用挖泥船的溢流泥沙总量减去航道范围内的溢流泥沙沉降量, 即为溢流泥沙流失量。悬浮泥沙的运动受水流流速、流向影响, 涨潮时流速较大, 泥沙运动快, 漂出航道的泥沙量最大, 沉积在航道内的泥沙量最少。总体上, 沉积在航道内的泥沙量

占总溢流泥沙量的 1/30~1/20。

表 1 不同工况下泥沙溢流量计算结果

计算工况	总溢流量/t	航道内溢流量/t	航道外溢流量/t
落潮	14.850	0.711	14.139
涨潮	14.850	0.456	14.394
平潮	14.850	0.595	14.255

选择涨潮、落潮、平潮或停潮各一个时间段, 计算 1 次溢流泥沙流失量, 然后求至少 3 次结果的平均值, 作为单次装舱溢流施工流失量; 将记录的挖泥船装舱溢流施工作业次数乘以单次装舱溢流施工流失量, 可以得到施工期间的全部装舱溢流施工流失量。

4 结论

1) 基于 MIKE 3 搭建的泥沙溢流模型能模拟挖泥船的溢流泥沙沉落在航道内外的分布情况, 并可计算出整个施工期的装舱溢流施工流失量, 对施工方掌握挖泥船施工效率、统计实际疏浚施工量有重要意义。

2) 通过挖泥船施工海域自然条件进行分析, 确定影响溢流泥沙流入海洋中的运动轨迹和海床上的沉降区域的主要因子为溢流泥沙的粒径、潮流的流速和流向。

3) 本文模型计算结果缺少对泥沙数据的验证, 包括航道内溢流泥沙总量、溢流过程中悬浮泥沙量变化等, 这主要是由于施工现场很难监测到这些参数。但泥沙粒径、浓度有实测资料, 泥沙沉降速度所用计算公式合理, 泥沙运动驱动力潮流的计算结果验证良好, 且 MIKE 3 软件本身设置参数少、计算精准度高。因此可认为泥沙计算结果可靠。待后续有现场泥沙资料时, 将进一步开展泥沙验证工作。

4) 本文计算的是单次装舱溢流施工流失量。施工方统计整个施工期间全部装舱溢流施工流失量, 可用记录的挖泥船装舱溢流施工作业次数乘以单次装舱溢流施工流失量, 即得到施工期间的全部装舱溢流施工流失量。

参考文献：

- [1] 戴承礼, 张家琪, 郑永恩, 等. 自航耙吸挖泥船装舱溢流施工对附近水域环境影响的试验分析[J]. 水运工程, 1997(10): 59-62.
- [2] 郭飞燕, 李军, 谢丽娜, 等. 装舱溢流施工在航道疏浚过程中的应用[J]. 水运工程, 2015(7): 187-189, 202.
- [3] CAMP T R. A study of the rational design of settling tanks[J]. Sewage works journal, 1936, 8(5): 742-758.
- [4] MIEDEMA S A, VLASBLOM W J. Theory for hopper sedimentation[C]// Western Dredging Association. Proceedings of the 29th Annual Texas A&M Dredging Seminar. Temecula: WEDA, 1996: 23-54.
- [5] OOIJENS S C. Adding dynamics to the camp model for the calculation of overflow losses[J]. Terra et aqua, 1999, 76: 12-21.
- [6] MIEDEMA S A, RHEE C V. A sensitivity analysis on the effects of dimensions and geometry of trailing suction hopper dredges[C]//World Organization of Dredging Associations. Proceedings of the World Dredging Conference XVIII. Bonsall: WODA, 2007: 39-52.
- [7] 郝宇驰, 洪国军, 王超. 耙吸挖泥船装舱溢流过程中非黏性泥沙沉积与冲刷的模拟[J]. 水运工程, 2012(12): 119-125.
- [8] 张忱, 洪国军. 自航耙吸挖泥船装舱溢流模型试验[C]//中国海洋工程学会. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 731-735.
- [9] 张志勇, 严娟. 疏浚工程施工耙吸船装舱效率分析[J]. 水电与新能源, 2022, 36(1): 23-27.
- [10] 崔鑫. 耙吸船疏浚施工悬浮物扩散的数值模拟[J]. 珠江水运, 2021(8): 58-61.

(本文编辑 王璁)

· 消息 ·**深中通道伶仃洋大桥全桥合龙**

近日, 二航局参建、公规院参与设计的深中通道伶仃洋大桥全桥合龙。伶仃洋大桥是深中通道关键控制性工程之一, 全长 2 826 m, 主跨 1 666 m, 主塔高 270 m, 通航净空高 76.5 m, 创下世界最大跨径全离岸海中悬索桥、世界最高桥面海中大桥、世界最大海中锚碇 3 项“世界之最”。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202305/t20230531_207413.html (2023-05-31)

引江济淮工程（安徽段）江淮沟通段蜀山船闸项目交工验收

近日, 四航局承建的引江济淮工程（安徽段）江淮沟通段蜀山船闸项目交工验收。蜀山船闸是安徽省内建设规模最大的船闸, 设计最大水头差 17.26 m, 设计最大船舶吨级为 2 000 吨级。项目建成后, 对当地畅通航运、促进灌溉、改善生态环境以及推动区域经济发展具有重要意义。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202305/t20230531_207394.html (2023-05-31)