



不同开挖条件对山区挖入式码头 通航水流条件影响分析

许绍林¹, 倪志辉^{1,2}

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016)

摘要: 开挖进出港航道与港池将会改变河道原有的河床地形高程, 进而改变其原有的水动力条件及其泥沙冲淤状况, 对通航条件造成影响。以犍为孝姑码头为依托, 采用 Mike21 建立二维水沙数值模型, 分析开挖进出港航道和港池工程前后, 以及改变进港航道的深度、宽度、角度等之后的水流运动形态和泥沙淤积的情况。结果表明: 开挖进出港航道和港池后对原有的主航道整体水流和泥沙条件影响较小, 对船舶进出港的通航条件影响较小; 不同的开挖条件对进出港航道和港池的水沙条件影响不同, 不同开挖角度对孝姑码头的水沙影响较大, 30°布置形式更能满足孝姑码头的通航水流条件。

关键词: 挖入式码头; 进出港航道; 水流模型; 水流条件; 泥沙冲淤

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0056-08

Influence of different excavation conditions on navigable flow conditions for excavated wharf in mountainous area

XU Shaolin¹, NI Zhihui^{1,2}

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: Excavating channels for entering and leaving harbor and harbor basin can change the original riverbed topography and elevation, thereby altering its hydrodynamic conditions and sediment erosion and deposition, and affecting its navigation conditions. In response to this issue, we take Xiaogu Wharf in Qianwei as a basis, use Mike21 to build a two-dimensional numerical model of water and sediment, and analyze the water flow pattern and sediment accumulation before and after excavation of channels for entering and leaving harbor and harbor basin engineering, as well as after changing the depth, width, angle, etc. of the channel for entering harbor. The results show that excavation of channels for entering and leaving harbor and harbor basin has a relatively small impact on the overall water flow and sediment conditions of the original main channel, and a relatively small impact on the navigation conditions for ships entering and leaving harbor. Different excavation conditions have different impacts on the water and sediment conditions of channels for entering and leaving harbor and harbor basin. Different excavation angle conditions have a greater impact on the water and sediment conditions of Xiaogu Wharf, and the 30° layout can better meet the navigation flow conditions of Xiaogu Wharf.

Keywords: excavated wharf; channel for entering and leaving harbor; water flow model; water flow condition; sediment erosion and sedimentation

收稿日期: 2024-01-25

作者简介: 许绍林 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事港口与航道工程研究。

通讯作者: 倪志辉 (1980—), 男, 博士, 副研究员, 从事通航和行洪论证研究。E-mail: benny251@163.com

挖入式码头形式是我国内河广泛应用的码头布置形式^[1], 其建设对附近的水流流速、水位以及泥沙淤积等产生影响^[2-4]。针对挖入式码头的进出港航道和港池的水沙特性, 许多学者进行了大量研究, 如袁涛峰等^[5]、王剑楠等^[6]、王俊等^[7]等分析开挖港池对工程河段通航水流条件的影响, 并提出优化措施建议; 邵雨辰等^[8]分析顺岸挖入式码头建设对航道水流特性的影响, 得出其对航道通航条件影响不大、有利于河道行洪的结论; 王玲玲等^[9]分析挖入式码头工程港池内的水动力特征及其对工程河段行洪的影响; 谢岷等^[10]依托佛耳岩作业区二期港池航道工程, 考虑泥沙粒径、含沙量、沉速、流速及水深等因素, 探讨港池及航道的泥沙淤积量计算方法, 并分析港池及航道的稳定性。对于不同布置形式下的挖入式码头的水沙特性也有不少学者进行了研究分析, 如王峰等^[11]、刘云等^[12]分析不同河道平面形态以及不同挖入式港池布置形式对航道水流条件的影响; 崔程^[13]、唐福海^[14]采用三维水沙数学模型对不同布置形式下的港池的水沙运动特性与机理进行分析。但对于挖入式港池与航道, 开挖不同的深度、宽度和角度对通航水流影响的研究较少。

本文以犍为孝姑码头为背景, 采用二维水沙数学模型分析不同开挖条件下水流特性和泥沙淤积情况, 探究适宜孝姑码头的开挖条件, 旨在为山区内河挖入式码头港池航道的开挖和布置提供一定的理论依据和参考。

1 工程概况

码头位于岷江下游流域的乐山市犍为县孝姑镇永平村, 在岷江与马边河汇合口下游约 1.5 km, 岷江保证滩下游约 500 m 的左岸, 右岸为岷江主航道。码头前方水域多为滩地, 为了满足正常作业的需要, 对港池进行开挖, 形成挖入式码头, 港池的开挖区长 220 m, 宽 110 m, 开挖底高程为 304.8 m, 并在码头的上下游分别布置进出港通

道, 进港航道与主流夹角为 30°, 进出港航道宽度为 30 m。工程布置方案见图 1。



图 1 工程布置 (单位: m)

2 数学模型

2.1 模型建立

2.1.1 水流运动方程

二维水流连续方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

x 方向动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho_0}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

y 方向动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho_0}{\partial y} + \\ \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为沿 x 、 y 方向的平均流速; h 为总水深, 其值为静止水深 d 与水位 η 之和; f 为科氏力系数; p_a 为大气压强; ρ_0 为水的密度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yy} 为辐射应力分量; S 为源项; u_s 、 v_s 为源项 x 、 y 方向水流流速; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力项; τ_{bx} 、 τ_{by} 为 x 、 y 方向河床切应力; τ_{sx} 、 τ_{sy} 为 x 、 y 方向风剪应力, 取 0。

2.1.2 输沙方程

输沙方程为:

$$\frac{\partial(hS_L)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta h u S_L) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi h v S_L) \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\varepsilon_\xi C_\eta}{\sigma_s C_\xi} \frac{\partial(hS_L)}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\varepsilon_\eta C_\xi}{\sigma_s C_\eta} \frac{\partial(hS_L)}{\partial \eta} \right] \right\} + \alpha \omega_L (S_L^* - S_L) \quad (4)$$

式中: ξ 、 η 分别为正交曲线坐标系中的两个正交曲线坐标; C_ξ 、 C_η 为正交曲线坐标系中的拉梅系数; S_L 为泥沙的挟沙能力; S_L^* 为第 L 组泥沙的挟沙能力; ω_L 为第 L 组泥沙的沉速; K_0 为挟沙力系数, 对于工程河段, K_0 取 0.015; α 为含沙量恢复饱和系数, 冲刷时取 0.8, 淤积时取 0.1~0.15; ε_ξ 、 ε_η 为 η 、 ξ 方向的泥沙扩散系数; σ_s 为经验常数, 取 1.0。

2.1.3 河床变形方程

河床变形方程为:

$$\gamma' \frac{\partial Z_L}{\partial t} = \alpha_L \omega_L (S_L - S_L^*) \quad (5)$$

$$Z = \sum_{L=1}^{n_0} Z_L \quad (6)$$

式中: Z_L 为第 L 组泥沙冲淤厚度; Z 为河床总冲淤厚度; $\gamma' = \rho' g$, 其中 ρ' 为淤沙干密度, 取 1 050 kg/m³; α_L 为第 L 组泥沙含沙量恢复饱和系数。

2.1.4 计算网格范围

选取码头上游约 950 m 为模型上游边界, 码头下游约 1 750 m 为模型下游边界, 计算区域全长约 2.7 km。采用非结构化三角形网格进行离散, 为了能够更好地了解进出港航道及港池的水动力条件及泥沙淤积情况, 在进出港航道及港池工程河段进行局部加密, 见图 2。

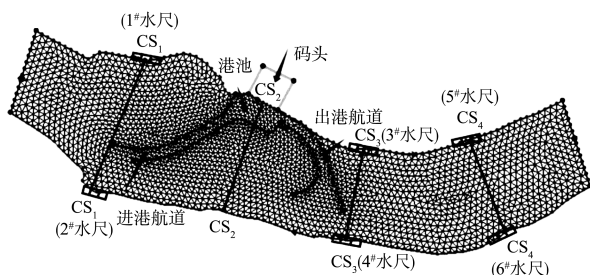


图2 计算模型网格

2.2 模型验证

2.2.1 水位验证

各水尺断面实测水位与计算水位对比见表 1, 从水位偏差值可见, 偏差值均在 0.03 m 以内, 模型与原型吻合程度较好。

表1 水位验证结果

水尺编号	实测水位/m	计算水位/m	差值/m
1#(左岸)	307.76	307.738	0.022
2#(右岸)	307.69	307.667	-0.023
3#(左岸)	306.85	306.865	0.015
4#(右岸)	306.83	306.803	-0.027
5#(左岸)	306.69	306.676	-0.014
6#(右岸)	306.71	306.725	0.015

2.2.2 流速验证

断面流速验证结果见表 2。可以看出, 数学模型结果与实测值者之间的流速大小和分布位置, 以及流速最大、最小值的位置大致相同, 流速误差均在 ±0.2 m/s 以内, 相对误差均在 10% 以内, 满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[15] 要求。

表2 流速验证结果

断面	距右岸/m	流速/(m·s ⁻¹)		
		实测值	计算值	差值
CS ₁	56	1.98	2.15	0.17
	111	2.49	2.31	-0.18
	186	3.30	3.13	-0.17
	265	2.19	2.32	0.13
CS ₂	26	2.95	2.83	-0.12
	73	2.88	3.02	0.14
	148	2.42	2.16	-0.16
CS ₃	181	2.13	2.34	0.21
	83	2.89	3.05	0.16
	105	2.96	2.79	-0.17
	151	2.23	2.34	0.11
CS ₄	187	2.01	2.27	0.26
	95	3.28	3.46	0.18
	117	3.35	3.25	-0.10
	181	2.38	2.22	-0.16
	242	2.14	2.26	0.12

2.2.3 泥沙验证

以 2019 年 6 月实测孝姑河段地形作为起始地形计算, 根据上游五通桥水文站的水文资料, 模

拟 2019 年 6—8 月的河床冲淤变化。除部分区域的地形变化有所偏差, 数学模型计算的结果与实测地形基本稳合, 变化值小于 0.1 m, 所建立的泥沙模型基本可靠。地形断面验证结果见图 3。

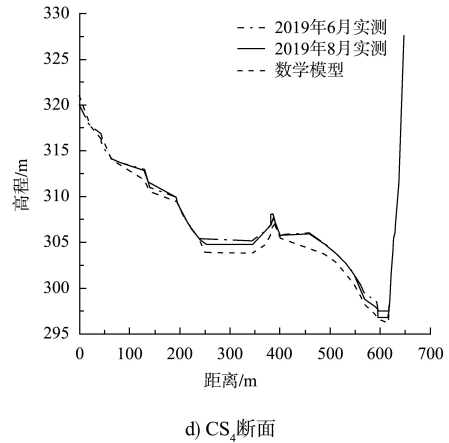
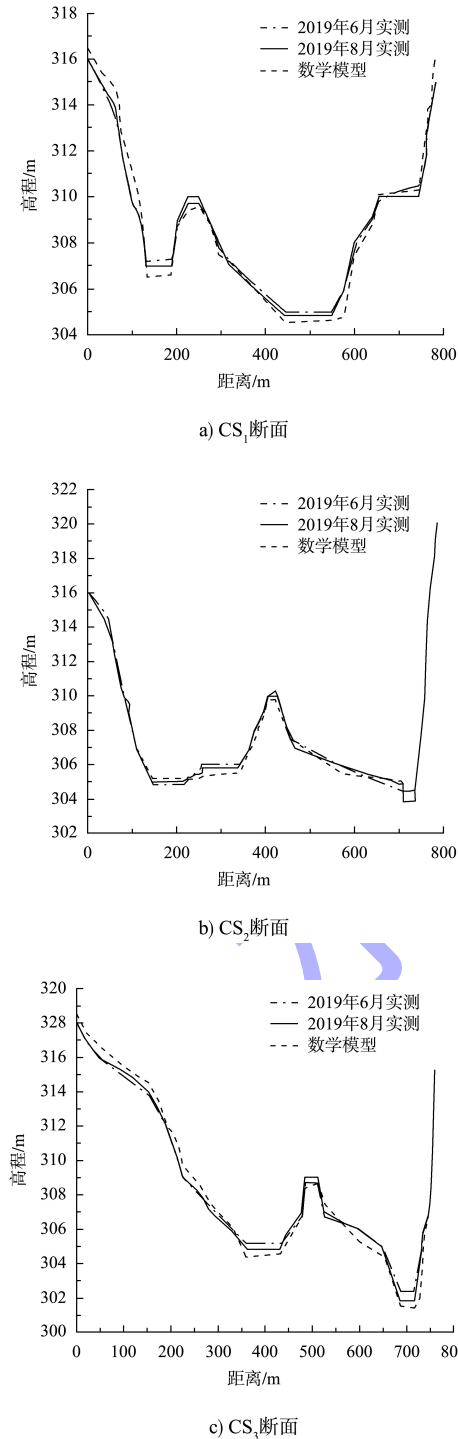


图 3 地形断面验证结果

3 港池航道开挖对水沙的影响

3.1 对水流的影响

综合考虑工程河段的通航与作业要求, 分别对枯水期平均流量 $Q=583 \text{ m}^3/\text{s}$ 、中水期平均流量 $Q=1900 \text{ m}^3/\text{s}$ 、洪水期平均流量 $Q=4534 \text{ m}^3/\text{s}$ 等工况进行模拟研究。

通过对比各个流量工况下港池航道开挖前后的流场。 $Q=1900 \text{ m}^3/\text{s}$ 下的港池航道开挖前后的流场见图 4。开挖后整体主航道的流速变幅较小, 平均变化幅度为 0.10 m/s, 最大变化幅度为 0.21~0.33 m/s, 最大变幅位于进港航道口门处下游约 100 m, 其原因是一部分主航道水流沿着进港航道进入港池, 流速在进港航道与主航道的连接口门处变为密集。进港航道整体流速在 0.37~2.36 m/s 范围内, 受到港区的坦化作用^[16], 沿着航道中心线向港池前沿方向逐渐减小。港池内部无回流、斜流等不良流态存在, 整体表面流速范围为 0.08~0.42 m/s, 整体流速较为平缓, 流态始终保持平顺状态, 水流沿出港航道汇入主航道, 其流速在 0.08~1.65 m/s, 呈增大的趋势。由此可见, 港池航道的开挖对河道整体的流场影响较小。



图4 $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{s}$ 工程前后流场对比

3.2 对通航条件的影响

进出港航道和港池的开挖，能够满足船舶航行和停泊作业的水深要求，且开挖工程实施后对主航道的通航水深影响较小。由于横流会使低速航行的大型船产生较大偏移，此次开挖方案的进港航道内部的平均横向流速为 0.329 m/s ，出港航道的平均横向流速为 0.298 m/s ，最大横向流速位置均在进出港航道口门处，最大横向流速分别为 0.413 和 0.312 m/s ，进出港航道和港池均无不良流态的产生。因此，开挖后能够满足船舶的正常通航要求。

3.3 对泥沙冲淤变化的影响

根据上游五通桥水文站的水文泥沙资料统计分析可知，该段泥沙中值粒径 0.023 mm ，最大粒径为 0.500 mm 。选取该河段中枯洪水期较为明显的2017年作为计算的代表年，并对其水沙过程进行概化处理，模拟计算开挖工程后的泥沙冲淤变化。

工程后泥沙淤积见图5，进港航道的泥沙沿程落淤，淤积范围在 $0.010 \sim 0.021 \text{ m}$ ，泥沙主要淤积在港池进口的前半段，最大淤积厚度范围为 0.043 m 。原有主航道及其他水域因水动力环境改变较小，其地形及泥沙淤积情况基本没有太大变化。

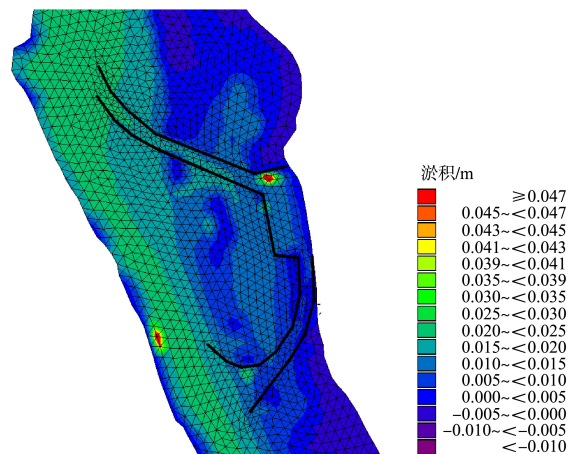


图5 工程后泥沙淤积情况

4 分析与讨论

港池航道开挖的深度、宽度以及角度布局对港池航道的水动力条件和泥沙淤积情况的变化都具有一定的影响^[17-18]。因此, 本文通过改变工程后开挖的深度、宽度和角度分析其影响规律。

4.1 开挖深度对水沙的影响

为研究开挖深度对港池航道内水流条件的影响, 分别将港池和进出港航道开挖至不同的底高程, 对比分析结果见图 6。可以看出, 不同开挖深度下, 表面流速以及横向流速从进港航道口门处到港池后方均呈现持续衰减的规律, 并且随着开挖深度的逐渐增加, 进港航道内的横向流速呈逐渐增大趋势, 而表面流速呈减小趋势。因此, 将进港航道开挖至指定深度, 对船舶安全通航进出港池更为有利。

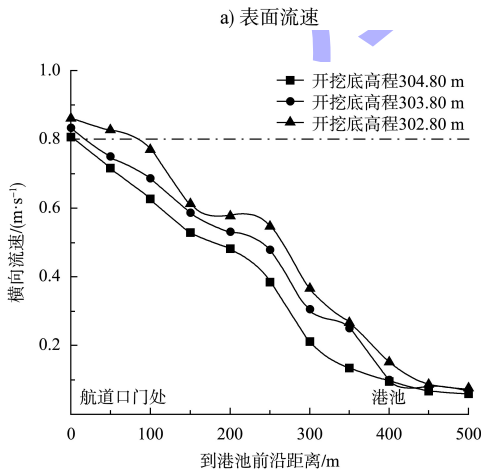
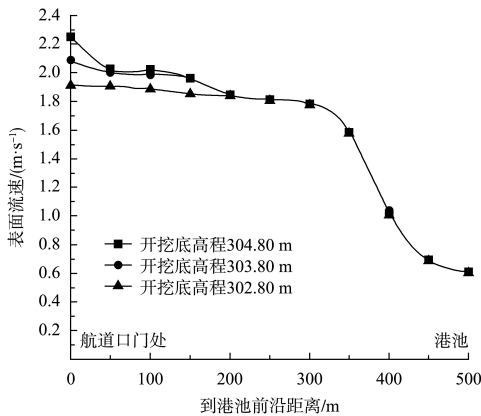


图 6 进港航道开挖深度对流速的影响

由于港池航道的开挖, 开挖后槽内流速减小, 水流挟沙力下降, 港池航道的泥沙沿程不断落淤。

淤积厚度与开挖深度的关系见图 7, 与其他开挖航道回淤特性类似, 进港航道的泥沙淤积厚度和开挖深度呈较强的线性正相关。因此, 航道开挖深度越大, 航道淤积越大。

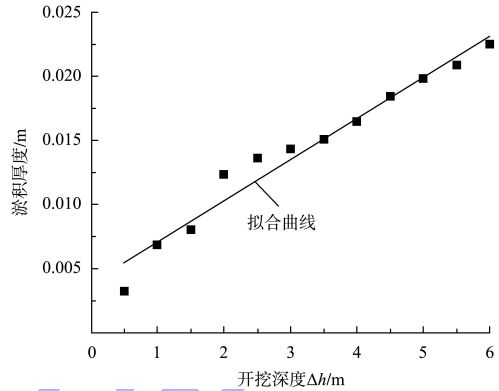
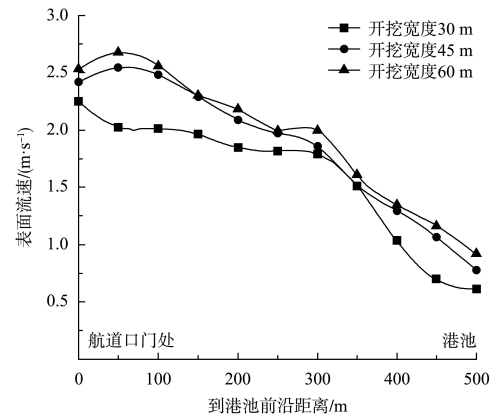


图 7 淤积厚度-开挖深度变化关系

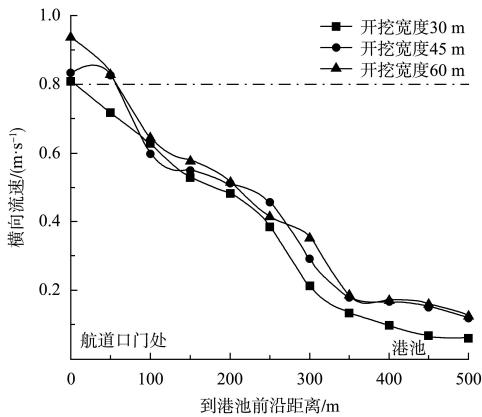
4.2 开挖宽度对水沙的影响

根据国际航运协会 PIANC 的建议, 当不允许船舶超越时, 航道宽度为设计船宽的 3~4 倍; 当允许船舶超越时, 为设计船宽的 6~7 倍^[19]。因此, 进出港航道的开挖宽度为 30~60 m, 本文数学模型分别计算 30、45、60 m 宽度的开挖方案。

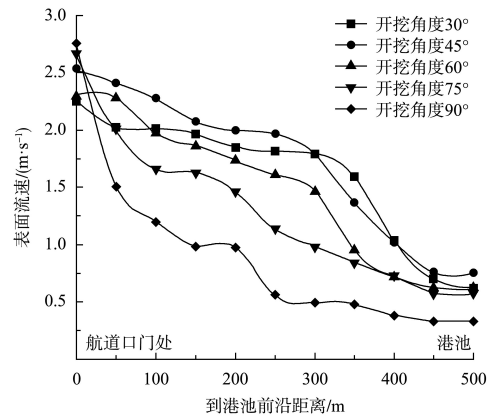
不同开挖宽度对比结果见图 8。可以看出, 沿着航道中心线, 流速从航道口门处到港池码头前沿呈逐渐减小的趋势。随着开挖宽度的增大, 航道内的表面流速也增大。同时, 航道内的横向流速也随着开挖宽度的增大而增大。因此, 将航道开挖至指定宽度, 能够改善通航条件以及减少泥沙淤积情况。



a) 表面流速



b) 横向流速



a) 表面流速

图8 进港航道开挖宽度对流速的影响

将不同开挖宽度对港池航道内的泥沙淤积情况进行对比,结果见图9。可以看出,开挖宽度与泥沙淤积厚度呈线性正相关,开挖宽度越大,泥沙淤积厚度越大。这是由于港池航道宽度,开挖后航道的过水断面增大,沿程进入航道的流量增大,航道内的表面流速增大,水流所挟带的泥沙因此也增大。

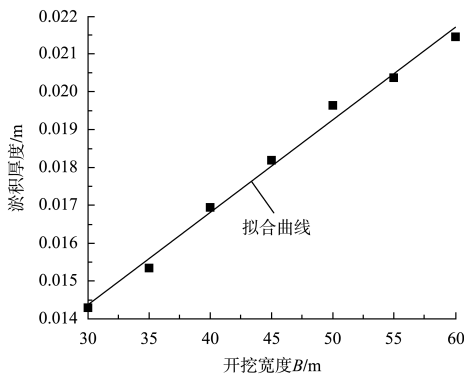
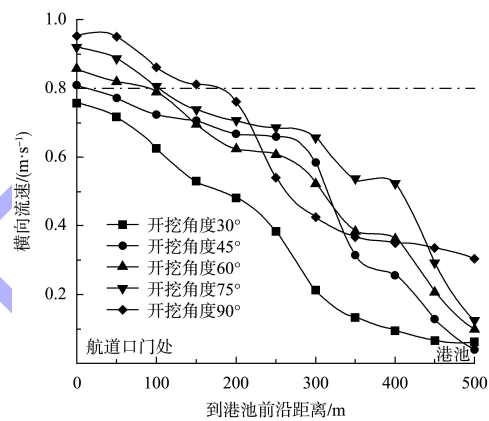


图9 淤积厚度-开挖宽度变化关系

4.3 开挖角度对水沙的影响

将进港航道的开挖角度从30°逐步旋转至90°,以研究不同角度布置下港池航道内水流条件影响规律,结果见图10。可以看出,随着开挖角度的增加,表面流速逐渐减小,横向流速逐渐增大。沿着进港航道中心线向港池前沿方向,横向流速和表面流速均呈现下降的趋势。



b) 横向流速

图10 进港航道开挖角度对流速的影响

在30°、45°、60°进港航道布置下,最大淤积位置均在港池与进港连接处;30°布置的最大淤积厚度为0.045 m,45°布置的最大淤积厚度为0.046 m,60°布置的最大淤积厚度为0.052 m;而在75°和90°进港航道布置下,港池航道淤积不明显,主要淤积在进港航道内,港池内部淤积较少,平均淤积厚度分别为0.015和0.014 m。在75°和90°的布置下,水流进入港池航道内较少,口门处的横向流速较大,对通航条件影响较大。

由上述各个开挖条件的变化可知,不同开挖角度对于孝姑的通航水流条件影响较大,其流速变化相较于其他开挖条件来说变化的幅度较大,而开挖角度30°布置形式下,其流速变化较为平缓且横向流速均小于要求,泥沙淤积情况也较小。因此,30°布置工况略优于其他布置工况。

5 结论

1) 通过对比分析开挖前后的通航水流条件, 结果表明: 开挖疏浚后对水动力条件参数的变化较小, 整体流态保持平顺, 变化区域主要在进出港航道的口门处区域, 不会产生回流等不良流态, 对通航水流条件不会产生明显的不利影响。

2) 主要冲刷区域在进港航道口门处, 落淤区主要在港池内部与航道内部。但由于水动力条件改变的有限, 因此对冲淤平衡影响有限, 其他区域地形基本不会有太大变化。

3) 通过改变港池航道不同的开挖深度、宽度和角度, 流速在不同的港池航道开挖条件下有着不同的变化: 流速随着开挖深度的增加、角度的增加逐渐减小, 随着开挖宽度的增加逐渐增大。而泥沙淤积量随着开挖深度的增加而增加, 随着开挖宽度的增加逐渐增大。不同开挖角度对孝姑码头的水沙影响较大, 30°布置形式下相对于其他开挖角度来说通航水流条件最优。

参考文献:

- [1] 韩时琳, 赵利平, 贺晖, 等. 我国内河挖入式港池现状分析[J]. 水运工程, 2003(4): 43-45.
- [2] 徐芳, 杨胜发, 付旭辉, 等. 码头工程对山区河道水流特性影响试验研究[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 454-458.
- [3] 吴国君. 码头工程建设对长江中游典型河段水流影响的数值模拟研究[J]. 水利水电快报, 2019, 40(9): 18-21, 47.
- [4] 叶成华, 朱本飞, 王云莉, 等. 大水位变幅水库回水变动区码头通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(7): 39-45.
- [5] 袁涛峰, 周卫东. 唐坊码头工程挖入式港池对航道的影响及对策研究[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(7): 257-259, 263.
- [6] 王剑楠, 李彬, 郑国栋, 等. 内河挖入式港池洪水演进数值模拟[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 43-47.
- [7] 王俊, 张世安, 吴嫡捷, 等. 口门布置对港池消波和环流的影响研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(12): 79-82, 102.
- [8] 邵雨辰, 王健, 池丽敏, 等. 顺岸挖入式码头前沿航道水流特性研究[J]. 江苏水利, 2018(3): 15-18.
- [9] 王玲玲, 徐雷诺. 周口港弯道码头工程水动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 134-139.
- [10] 谢岷, 倪志辉, 曾强, 等. 佛耳岩作业区二期工程港池及航道泥沙淤积量计算[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 99-102.
- [11] 王峰, 尤克诗, 刘云, 等. 钱塘江中上游山区河流挖入式港池布置及进出港通航水流条件[J]. 水运工程, 2020(7): 57-64.
- [12] 刘云, 尤克诗, 王峰, 等. 河道平面形态对挖入式港池布置及进港通航水流条件影响研究[J]. 水道港口, 2022, 43(5): 624-632.
- [13] 崔程. 不同河型挖入式港池三维水动力及泥沙落淤机理分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [14] 唐福海. 山区河流挖入式港池的水沙运动特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [15] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [16] 王剑楠, 李彬, 郑国栋, 等. 内河挖入式港池洪水演进数值模拟[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 43-47.
- [17] 刘远超, 陈国平, 吴月勇, 等. 港池开挖对施工期波浪条件的影响[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 157-161.
- [18] 王春玲, 武雅洁, 董启涛, 等. 日照豪迈码头港池布局对泥沙输移影响研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(7): 110-117.
- [19] PIANC. Harbor approach channels design guidelines: Report No. 121[R]. Brussels: PIANG, 2014.

(本文编辑 王璁)