



复杂心滩通航河段不同角度磧首坝对 航道条件的影响*

刘海婷, 付旭辉, 宋丹丹, 龚明正, 刘夏忆

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心 重庆交通大学水利水运工程教育部重点试验室, 重庆 400074)

摘要: 长江上游河段多为基岩和卵砾石河床, 常见心滩、浅滩及边滩等复杂边界碍航河段。由于工程实际需要及航道整治要求, 经常存在采砂坑、开挖航槽、修筑磧坝等改变局部河道边界的情况。以长江上游占磧子河段为例, 建立向右偏转 0° 、 5° 、 10° 磧首导流坝数学模型, 分析表明: 0° 磧坝引起的水位壅高流速增幅和分流比变化均较小, 对占磧子浅滩影响较小; 5° 磧坝对主槽分流比和航道通航水深及流速的优化更加明显, 通航效果更优; 10° 磧坝对主槽通航条件的改善明显, 对流场改变较大, 引起了明显的河势演变。为长江上游复杂通航河段航道整治工程的设计和 research 提供参考。

关键词: 二维水流数学模型; 复杂心滩河段; 磧首坝; 水流条件; 通航条件

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0123-06

Effects of first moraine dam with different angles on navigation condition in complex diara navigable river

LIU Hai-ting, FU Xu-hui, SONG Dan-dan, GONG Ming-zheng, LIU Xia-yi

(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Due to the bedrock and gravel bed of the upper reaches of the Yangtze River, the navigation-obstructing reaches are common with the diara, shoal and beach, which are of complicated boundaries. To meet the needs of the actual project and waterway regulation, there always exists a sandpit, excavation of navigation channel, the construction of the moraine dam and other ways to change the local river boundary. Taking Zhanqizi reach for example, we establish the mathematical model of the first moraine diversion dams which turn right to 0° , 5° , 10° respectively. The result show that the 0° moraine dam causes smaller stage rise and diversion ratio change, and it has less influence on shoals of moraine son; the 5° moraine dam has an obvious effect on the optimization of the main channel split ratio an water-ways navigable depth and flow rate, and the navigation effect is better ; and the 10° moraine dam has a remarkable effect on improving the navigation condition on the main channel, and it changes greatly the flow field, and thus causes significant river changes. The research result may serve as reference for providing a reference for the design and research of the regulation engineering of complicated navigable channel on the upper reaches of the Yangtze River

Keywords: 2D flow mathematical model; complex diara river; head moraine dam; flow condition; navigation condition

收稿日期: 2015-10-12

*基金项目: 重庆市教委资助项目 (KJ1400319); 重庆交通大学研究生教育创新基金项目 (20140112)

作者简介: 刘海婷 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究水利工程及河流动力学。

目前长江河段存在着大量的采砂、修建码头、开挖航槽等工程,这些工程会导致天然河流航道边界的改变,航道边界的改变必然对河流的流态、通航条件等造成一定的影响,因此有必要通过二维数学模型进行水流条件和通航条件影响分析。

数值模拟是研究复杂河段河道流动特性的一种重要手段。国内外已经有很多利用有限差分、有限元、有限体积、边界元等离散方法对复杂河段进行数值计算的研究^[1]。根据数模的计算结果,可以分析预测拟建方案对工程河段水流条件及航道条件的影响趋势^[2]。不论对于顺直河道或者复式游荡型河道,水位-流量关系的预测是河道风险管理以及洪水损失评估的基础,是进行洪水预报和制定合理经济的分洪措施方案的前提。李大鸣等^[3]考虑上、下游洪水边界的控制条件及糙率随河道流量变化的调整,提出了河道二维水流数学模型的计

算方法。叶如意等^[4]利用平面二维水动力学模型对曹娥江至宁波的引水工程进行模拟,同时对模型进行验证和优化。为了更深入地探讨复杂心滩^[5]、边滩河段^[6]边界条件改变对水流特性及通航条件的影响,在前人研究^[7-9]的基础上,以长江占碛子河段为研究对象,通过平面二维数学模型模拟复杂河道的水流运动特性及河床演变规律。

占碛子河段位于重庆主城河段上游与江津衔接处,长江右岸中三坝附近,紧邻大中坝心滩,下距綦江河口约 2.1 km。该河段整体弯曲,平面形态近似于“C”字型,边界条件复杂。上游黄阡至观音岩为一接近 90°急弯;中段略微顺直,有大中坝心滩将河道分为左右两槽,左侧为主槽,入口有占碛子浅滩,上下游分别中三坝、小中坝边滩等分布;下游綦江河口至红眼碛又为急弯。该河段河势见图 1。

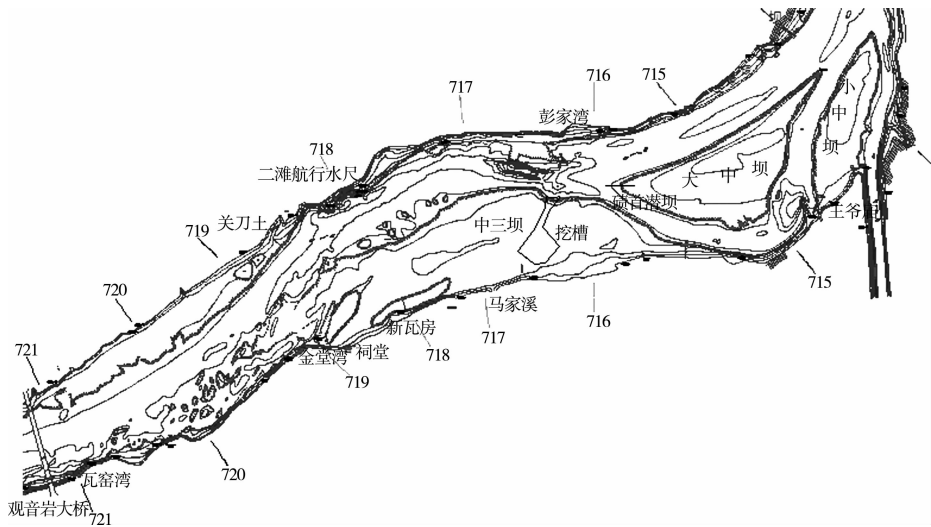


图 1 占碛子河段河势

由于研究河段分布有中三坝边滩、大中坝心滩和占碛子浅滩,水流和航道条件复杂,因此工程方案是否合理、是否对工程河段的航道条件造成明显影响,需要通过数学模型计算和河演分析的研究综合确定。故本文主要采用二维水流数学模型的方法计算分析。

1 数学模型

1.1 模型建立

采用沿水深平均的封闭浅水方程组描述二维

水流运动,基本控制方程为:

水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间; u 、 v 分别为沿 x 、 y 方向的流速; h 为水深; η 为床面高程; g 为重力加速度; ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xy} 是紊动黏性系数, 取为 $\alpha u_* h$, $\alpha = 3 \sim 5$, n 为糙率系数; u_* 为摩阻流速。

1.2 边界条件

边界条件的给法为: 进口边界给定流量, 出口边界给定水位。对于岸边界采用无滑移条件, 即岸边流速为零。

1.3 求解方法

在对控制方程的差分离散和求解过程中, 本模型采用了如下几项技术和方法:

1) 在利用控制体积法(或称有限体积法)离散通用方程时, 为解决压力梯度项和连续方程离散的困难, 采用交错网格的方法。

2) 离散中对流-扩散项采用幂函数格式。

3) 由通用方程及各控制方程可见, 各方程的主要差别在源项上。源项通常是因变量的函数, 为加快计算收敛, 对各方程源项进行负坡线性化处理。

4) 差分方程的求解采用三对角矩阵算法(TDMA)逐行求解。

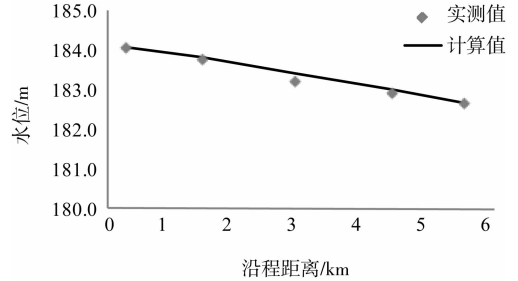
5) 数值计算采用 Patankar 和 Spalding 提出的 SIMPLEC 法。为避免由计算机截断误差引起的发散, 在数值计算中采用了欠松弛技术。其收敛标准是: 连续方程的剩余质量源与入口质量流之比小于 0.5%。

2 模型验证

根据心滩所处位置和修筑碛坝后可能引起的洪水影响范围, 并考虑计算需要的进出口长度, 选取计算区域为: 进口位于上游黄阡附近(航道里程 727 km), 出口位于下游猫跳附近(航道里程 712 km), 总长约 15.6 km。模型生成三角网格进行计算, 其中中三坝至大中坝河段进行了加密。在长 15.6 km、平均宽 0.8 km 的计算范围内布置 42 588 个节点。

2.1 水位验证

验证了流量为 15 300 m³/s 时各水尺断面左右岸水位的实测值和计算值, 二者符合程度较高, 且水面线走势吻合较好(图 2)。



注: 吴淞高程, $Q=15\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

图 2 水位验证

2.2 流速验证

应用已建立的水流数学模型, 以流量为 15 300 m³/s 进行断面流速验证(图 3)。从图 4 可见, 流速的大小和分布以及最大值、最小值的位置均与实测资料较为一致。

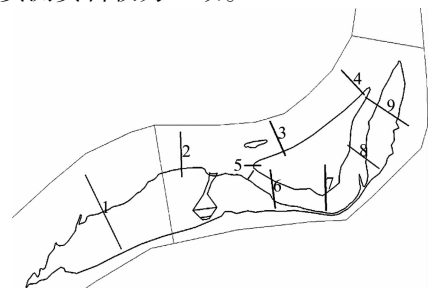
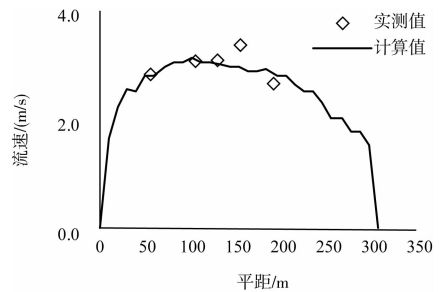
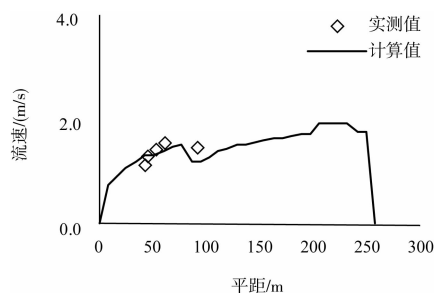


图 3 流速验证断面布置



a) 4#测流断面



b) 5#测流断面

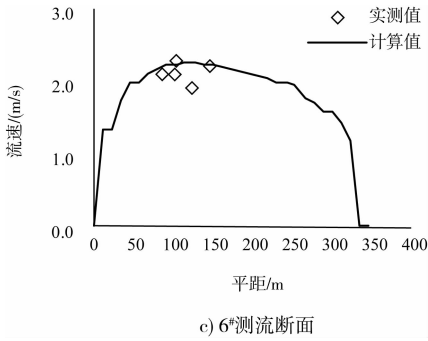


图4 占碛子河段典型断面流速验证 ($Q = 15\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$)

2.3 大中坝分流比验证

工程河段有大中坝心滩将河段分为左右两槽, 其分流比对计算结果和航道条件影响较大, 因此专门对大中坝的分流比进行验证。根据实测 $15\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下主、支槽流量和分流比与模型计算值比较, 数模计算的分流比误差在 0.11% 以内,

基本与天然条件分流比相同(表1)。

表1 洪水分流比验证 ($Q = 15\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$)

项目	主槽流量/(m^3/s)	支槽流量/(m^3/s)	主槽分流比
实测值	10 141	5 159	0.663
计算值	10 130	5 170	0.662
相对误差%	-0.11	0.21	-0.11

3 水流条件影响分析

3.1 水位影响

由于碛首坝导流作用, 一般表现为坝上游河段及坝前水位壅高、工程下游河段水位降低, 这种水位壅高或降低将在上游或下游一定范围内逐渐消失。数模计算成果表明, 计算河段的水位变化主要表现在潜坝左侧主槽的水位壅高、潜坝右侧副槽的水位降低(表2)。

表2 研究河段最大水位比降变化值

流量/(m^3/s)	工程前沿水位/m	0°碛坝		5°碛坝		10°碛坝	
		水位/m	比降/‰	水位/m	比降/‰	水位/m	比降/‰
2 230	175.90	0.04	0.04	0.05	0.04	0.14	0.18
3 250	177.30	0.05	0.04	0.06	0.04	0.17	0.41
15 300	183.82	0.09	0.04	0.09	0.06	0.07	0.39
37 100	192.34	0.10	0.06	0.10	0.06	0.04	0.08

3.2 流速影响

表3为工程方案实施前后近岸(中三坝碛翅前沿30m范围内)流速的变化情况。可以看出, 0°碛坝和5°碛坝实施后, 近岸流速增幅为0.03~

0.05 m/s, 影响较小; 而10°碛坝实施后, 枯水期流速变化较大, 近岸流速变幅达到0.10~0.11 m/s, 而中洪水期, 锁坝淹没, 不同方案对近岸流速的影响幅度降为0.05~0.06 m/s。

表3 研究河段近岸流速变化

流量/(m^3/s)	方案前	0°碛坝		5°碛坝		10°碛坝		m/s
		0°碛坝	最大变幅	5°碛坝	最大变幅	10°碛坝	最大变幅	
2 230	0.30~1.21	0.28~1.21	0.05	0.30~1.24	0.05	0.28~1.20	0.10	
3 250	0.42~1.34	0.42~1.34	0.05	0.41~1.34	0.05	0.38~1.28	0.11	
15 300	1.54~2.68	1.57~2.65	0.03	1.57~2.65	0.03	1.57~2.66	0.05	
37 100	1.74~2.78	1.73~2.78	0.04	1.73~2.78	0.04	1.72~2.79	0.06	

4 通航条件影响分析

4.1 航道水深影响

工程河段大中坝心滩的左侧主槽有占碛子浅滩, 在设计通航流量条件下, 滩顶水深约为1.6m, 航线在大中坝左侧主槽的占碛子两侧航行。根据

数模计算结果, 修建碛首坝后, 大中坝附近航道范围内, 通航水深略有增加, 其中在航道最浅处0°碛坝变幅约0.01m, 5°碛坝水深增幅为0.02m, 10°碛坝由于将流量全部归入主槽, 水深增幅达到0.10m, 优化了工程河段内通航水深(表4)。

表4 研究河段航道范围设计通航流量下最低水深

工况	最小水深/m	最大变幅/m
方案前	2.59	
0°碛坝	2.60	0.01
5°碛坝	2.61	0.02
10°碛坝	2.69	0.10

4.2 航道水位比降影响

数学模型统计了占碛子浅滩附近 3 km 范围内上下行航线上的水位比降变化, 最大变幅见表 5。

表5 研究河段航道范围水位比降变化

流量/(m ³ /s)	水位变幅/m			比降变幅/‰		
	0°碛坝	5°碛坝	10°碛坝	0°碛坝	5°碛坝	10°碛坝
2 230	-0.02 ~ 0.01	-0.02 ~ 0.01	-0.04 ~ 0.14	-0.03 ~ 0.06	-0.05 ~ 0.04	-0.06 ~ 0.18
3 250	-0.01 ~ 0.01	-0.02 ~ 0.04	-0.02 ~ 0.16	-0.03 ~ 0.07	-0.03 ~ 0.04	-0.08 ~ 0.19
15 300	-0.01 ~ 0.01	-0.01 ~ 0.02	-0.01 ~ 0.06	-0.01 ~ 0.04	-0.02 ~ 0.06	-0.03 ~ 0.09
37 100	-0.01 ~ 0.02	-0.01 ~ 0.02	-0.01 ~ 0.04	-0.01 ~ 0.06	-0.02 ~ 0.06	-0.03 ~ 0.08

4.3 航道流速影响

数学模型统计该河段上、下行航线范围内的流速变化见图 5。可以看出, 工程中 0°碛坝和 5°碛坝引起的航道范围内流速变化较小, 变幅基本在 ±0.05 m/s 范围内, 最大变幅 0.09 m/s, 基本不会对工程河段航道条件造成明显不利影响; 10°碛坝在枯水期引起的航道范围内流速变化较大, 枯水期最大变幅基本在 ±0.20 m/s 范围内, 最大变幅达 0.31 m/s, 但是航线内最大流速范围变化不大。

4.4 对占碛子浅滩影响

根据数学模型计算成果, 0°碛坝和 5°碛坝实施后, 占碛子附近水位变幅基本在 ±0.01 m 范围内, 流速略有增加, 增幅基本在 -0.01 ~ 0.05 m/s 范围内, 占碛子所在的主槽流量略有增长。比较分析表明, 0°碛坝引起的水位壅高流速增幅和分流比变化均较小, 对占碛子浅滩影响较小; 5°碛坝对主槽分流比和航道通航水深和流速的优化更加明显, 通航效果更优。10°碛坝实施后, 占碛子附近水位变幅基本在 ±0.10 m 范围内, 流速增加较大, 增幅基本在 -0.03 ~ 0.10 m/s, 占碛

可以看出, 航线范围内 0°碛坝和 5°碛坝造成水位最大变幅为 -0.02 ~ 0.02 m, 最大比降变幅为 -0.05‰ ~ 0.06‰, 对航道范围内的水位比降影响较小; 而 10°碛坝由于枯水期堵塞支槽, 造成的航道水位最大变幅为 -0.04 ~ 0.16 m, 相应的比降变幅为 -0.08‰ ~ 0.19‰, 而中洪水期, 航道范围内水位变幅降为 -0.01 ~ 0.06 m, 相应比降变幅降为 -0.03‰ ~ 0.09‰。

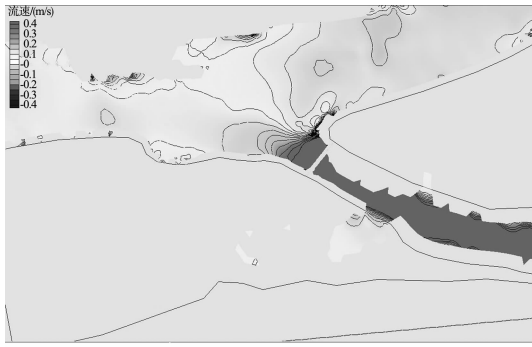
子所在的主槽流量略有增长, 可能会引起河势演变。总体而言, 占碛子浅滩附近水位、流速等水流条件没有明显变化, 不会影响占碛子浅滩附近的泥沙冲淤能力, 基本不会造成占碛子浅滩的明显变化。



a) 0°碛坝



b) 5°碛坝



c) 10° 碛坝

图5 不同角度碛首坝流速变化等值线

4.5 河段的河床演变

二维水流数学模型研究了不同碛坝下该河段的水流条件和通航能力的影响, 0° 碛坝和 5° 碛坝引起的水位雍高流速增幅和分流比变化均较小, 而且不会对占碛子浅滩造成明显不利影响。相对而言, 10° 碛坝对工程河段水流影响略大, 流速增大, 可能引起泥沙淤积, 航道尺度(水深)减小, 且会产生横流, 引起航行轨迹增宽, 船舶操纵困难。

5 结论

长江右岸中三坝附近的占碛子河段, 该河道总体弯曲, 上游紧邻大中坝心滩, 下游右岸有綦江入汇, 河势复杂。在弯道环流、边滩挑流、心滩分流和支流入汇的叠加作用下, 水流条件复杂, 河道条件的变化对水流结构和河床演变趋势的影响难以预测。二维水流数学模型能较好地研究不同碛坝作用下, 对该河段的水流条件和通航能力

的影响。分析表明, 0° 碛坝引起的水位雍高流速增幅和分流比变化均较小, 对占碛子浅滩影响较小; 5° 碛坝对主槽分流比和航道通航水深和流速的优化更加明显, 通航效果更优; 10° 碛坝对主槽通航条件的改善明显, 对流场改变较大, 引起了明显的河势演变。

参考文献:

- [1] 余利仁. 正交贴体坐标系的生成[J]. 河海大学学报, 1988(5): 81-88.
- [2] 周建军. 平面二维不恒定流及河床变形数值模拟方法研究[D]. 北京: 水利水电科学研究院, 1988.
- [3] 李大鸣, 陈虹, 李世森. 河道洪水演进的二维水流数学模型[J]. 天津大学学报, 1998, 31(4): 439-446.
- [4] 叶如意, 王攀, 曹娥江至宁波引水工程平面二维水流数值模拟[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 24-28.
- [5] 陆永军, 张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与发展: A 辑, 1993 (3): 35-46.
- [6] 李健. 河道采砂影响的数值模拟研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2008.
- [7] 李义天, 谢鉴衡. 冲击平原河流平面流动的数值模拟[J]. 水利学报, 1986(11): 11-17.
- [8] 王秀红, 曹民雄, 马爱兴, 等. 乌江沙陀电站变动回水区航道整治二维水流数学模型研究[J]. 水运工程, 2012(11): 156-160.
- [9] 张鹏, 胡江. 三峡库区急流滩代表船舶自航上滩水力指标研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012(4): 877-880.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中国港湾签署仰光外海引航站项目合同

3月24日, 中国港湾与缅甸港务局在缅甸签署仰光外海引航站项目合同, 项目总造价约为2 000 万美元。

此引航站是仰光河的第一座引航站, 拟建设地点位于仰光河口外约 20 n mile 处, 主要工程内容包括航站楼、栈桥和储油罐平台建设。整个引航站主体结构可供 1 500 t 油轮靠泊。

(来源: 中国港湾)