

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.002

钟亮, 许光祥, 何艳军. 倒顺坝坝头绕流特性及其在航道整治中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 9-17. (ZHONG Liang, XU Guang-xiang, HE Yan-jun. Circumfluence characteristics of reversing longitudinal dike head and its application to waterway regulation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 9-17.)

倒顺坝坝头绕流特性及其在航道整治中的应用

钟 亮^{1,2}, 许光祥^{1,2}, 何艳军³

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 倒顺坝是山区河流航道整治中较为常用的一种建筑物,其坝头绕流特性对航道通航水流条件影响明显。应用平面二维水流数学模型研究了倒顺坝坝头绕流特性,获得了绕流区长度、宽度及转点合流速随倒顺坝几何参数及来流条件的变化规律,建立了相应的计算式,并将其应用于长江猪儿碛浅滩航道整治方案设计中。为此,探讨了猪儿碛浅滩的碍航特性和滩险成因,提出了整治方案。对方案整治效果的分析表明,方案实施后航道尺度满足设计要求,流速增值及消滩判数均符合设计预期目标,航槽内流态较好,无回流、斜流和横流等碍航流态,说明本文建立的倒顺坝绕流特性参数计算式可为航道整治方案设计提供较好的技术支撑。

关 键 词: 倒顺坝; 绕流特性; 浅滩; 航道整治; 数值模拟

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)02-0009-09

航道整治是在航道整体规划基础上,通过疏浚、炸礁和修建整治建筑物等手段来调整水流结构、稳定河势形态及改善航行条件的工程措施。航道整治建筑物按形式可分为丁坝、顺坝、锁坝、平顺护坡、导堤、鱼嘴及溪口导石拦石建筑物等,顺坝是坝根与河岸(或洲滩)相接,坝身与整治线基本重合或平行的整治建筑物^[1],其作用有修正枯水岸线、增大航槽流速、改善水流流态、保持航槽稳定等。倒顺坝又称洲头顺坝或碛头坝,是山区航道整治中较为常用的一种顺坝形式。为充分发挥束水攻沙之作用,整治建筑物常靠近航槽布置,由于水流流经倒顺坝坝头时将产生绕流作用,如与航槽过于邻近,将使航槽内出现斜流、横流等不良流态,影响船舶安全通行。可见,坝头绕流特性直接关乎航道整治效果。然而,以往关于坝头绕流特性的研究一般都集中在丁坝,倒顺坝或顺坝鲜有涉及。比如,张柏山等^[2]利用流动显示和片光源技术研究了绕丁坝流动结构,发现丁坝上游会形成马蹄涡,头部会形成卡门涡;潘军峰等^[3]对丁坝绕流及局部冲刷坑二维数值模拟的结果表明,丁坝坝头处流速和涡量较大,是形成冲坑的主要原因;李冰冻等^[4]探讨了单丁坝绕流的流动特性,认为丁坝对水流的影响集中在丁坝上下游局部区域,横向存在水力坡度,丁坝坝头附近局部区域水流流动复杂;周宜林等^[5]研究认为,非淹没丁坝对水流运动影响较大,从防止坝头局部冲刷和护岸角度出发,挑角120°丁坝(下挑)的效果最好;C. Hinterberger等^[6]对浅水中等间距丁坝的绕流问题进行了大涡模拟(large eddy simulation, LES),探讨了物质交换过程;A. McCoy等^[7]研究了丁坝群作用下的绕流流速分布、紊动能及紊动强度分布问题;白静等^[8]采用动态亚格子模式和浸没边界法,开展了非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟(LES),探讨了二次流动结构、紊动强度和涡量分布等问题;彭静等^[9]认为,淹没丁坝群水流中,绕丁坝的近场流动具有强三维非恒定特性,坝头分离区流动加速并伴有二次回流;于守兵等^[10-11]探讨了淹没和

收稿日期: 2014-09-10

基金项目: 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(cstc2012jjA00020);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ120403)

作者简介: 钟 亮(1980-),男,江西赣州人,副教授,博士,主要从事航道整治理论与技术研究。

E-mail: zlcqjtu@163.com

非淹没丁坝端坡对附近水流结构的调整作用。

由于倒顺坝平面布置形式与丁坝不同,其坝头绕流特性势必有别。为充分认识倒顺坝坝头绕流特性,增强航道整治方案设计的针对性,提高航道整治效果,本文拟应用平面二维水流数学模型,对倒顺坝坝头绕流特性进行研究,探讨绕流范围和转点水力要素随坝体几何参数及来流条件的变化规律,建立相应的计算式,并将该研究成果应用于长江猪儿碛浅滩航道整治方案的设计之中,通过整治效果检验其可行性。

1 平面二维水流数学模型及其验证

1.1 模型建立及求解

(1) 控制方程 对水平运动尺度远大于垂直运动尺度,且垂向流速及加速度可忽略的流动,可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:

$$\text{水流连续方程: } \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

$$x \text{ 方向水流运动方程: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{un^2g}{h^{4/3}}\sqrt{u^2+v^2} = v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$y \text{ 方向水流运动方程: } \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{vn^2g}{h^{4/3}}\sqrt{u^2+v^2} = v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: z 为水位; h 为水深; t 为时间; u 和 v 分别为沿 x 和 y 方向的流速; n 为曼宁糙率系数; g 为重力加速度; v_t 为涡流黏性系数,采用零方程模型确定, $v_t = (0.6 \pm 0.3)u_*h$, u_* 为摩阻流速,当遇急弯或断面急剧变化时 v_t 取大值。当水流为恒定流时,各式中的时间导数项取为0。

(2) 边界条件 在进口断面给定流量条件,并参考文献[12]将入流流量转化为流速分布 $V_i = (Q/A) \times (B/A)^{2/3}h_i^{2/3}$,此处 h_i 为第 i 个点水深, Q 为断面流量, B 为水面宽度, A 为过水面积;在出口断面给定水位条件。

(3) 方程离散与求解 浅水方程的离散包括时间离散和空间离散,时间离散采用差分法,空间离散采用有限单元法。应用有限元 Galerkin 加权余量法将模型方程离散成非线性代数方程,利用 Newton-Raphson 迭代法求解,离散区域内采用六节点三角形等参单元。

1.2 模型验证

分别采用水槽试验资料和长江猪儿碛河段实测水流资料对模型进行了验证,简要介绍如下。

1.2.1 水槽试验资料 采用两部分水槽试验资料^[13]进行了流速分布验证。①非正交淹没丁坝水槽试验资料:水槽长 25 m,宽 1.6 m,在水槽一侧布置了 1 条下挑丁坝,挑角 45°,坝长 0.85 m,纵横向投影长 0.60 m,进口流量 0.046 5 m³/s,出口水深 0.093 5 m,糙率 0.011。②正交淹没丁坝群水槽试验资料:水槽长 30 m,宽 1.6 m,沿水槽一侧布置 5 条正交丁坝,长 0.40 m,高 0.06 m,进口流量 0.066 5 m³/s,出口水深 0.086 m,糙率 0.010 2。

水槽试验资料的流速分布验证结果表明,计算值和实测值吻合较好,流速分布形态基本一致。

1.2.2 河道实测资料 长江猪儿碛河段实测资料包括:①实测地形资料(2011 年 9 月,1:2 000 地形测图);②实测枯水、中水及洪水水面线资料;③实测枯水、中水及洪水流速流向资料。

选取长江谢家碛至朝天门大桥(长约 10 km)、嘉陵江河口至黄花园大桥(长约 2 km)为计算河段,全长约 12 km,共剖分为 22 445 个单元,45 760 个节点,网格边长平均约 30 m,并对整治区域的网格进行局部加密处理。由实测水面线资料率定得到本河段各级流量下的综合糙率为 0.026~0.041,且枯水糙率大,洪水糙率小。各级流量的水位、流速和流向验证^[14]结果表明,计算水位与实测水位吻合较好,偏差在±0.10 m 以内;流速大小及分布与实测资料较为一致,差值多在±0.10 m/s 内且不超过±5%;数模计算的流场流向与浮标迹线走向基本一致。

(续表)

工况号	Fr	d/m	$\alpha/^\circ$	L/m	L_x/m	L_y/m	$U_y/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$U_m/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\theta/^\circ$	备 注
18	0.390	90	30	100	302.9	46.3	0	0	0	随 d 变化
19	0.390	100	30	100	266.6	31.8	0	0	0	
20	0.390	110	30	100	218.4	10.8	0	0	0	
21	0.390	50	5	100	351.4	95.0	0.10	2.08	2.73	随 α 变化
22	0.390	50	10	100	361.3	95.9	0.23	2.82	4.60	
23	0.390	50	20	100	379.0	65.1	0.41	2.70	8.76	
24	0.390	50	30	100	380.9	80.9	0.63	2.96	12.34	
25	0.390	50	40	100	383.8	81.1	0.82	2.96	16.04	
26	0.390	50	50	100	383.0	95.1	0.95	3.73	14.80	
27	0.390	50	60	100	384.4	101.4	0.67	2.54	15.30	
28	0.390	50	70	100	387.9	95.9	0.32	2.40	7.75	
29	0.390	50	80	100	387.3	100.5	0.71	2.48	16.77	
30	0.390	50	90	100	391.0	105.9	0.56	2.25	14.41	
31	0.390	50	30	20	383.5	95.8	0.47	2.28	11.95	随 L 变化
32	0.390	50	30	30	382.4	85.5	0.52	2.48	12.16	
33	0.390	50	30	40	380.2	86.0	0.54	2.58	12.20	
34	0.390	50	30	50	381.9	90.5	0.56	2.65	12.22	
35	0.390	50	30	80	383.3	80.2	0.61	2.85	12.31	
36	0.390	50	30	100	384.0	80.2	0.63	2.96	12.34	
37	0.390	50	30	120	384.3	75.0	0.65	3.02	12.38	
38	0.390	50	30	150	386.9	70.1	0.67	3.12	12.40	
39	0.390	50	30	180	384.9	70.4	0.69	3.20	12.44	
40	0.390	50	30	200	385.7	71.9	0.69	3.22	12.44	
41	0.492	40	10	150	386.7	6.1	0.22	2.69	4.73	综合计算 式率定
42	0.492	60	15	120	373.2	50.8	0.33	2.78	6.84	
43	0.492	80	60	80	316.8	57.0	0.91	2.74	19.35	
44	0.492	100	25	80	224.7	15.5	0.46	2.61	10.19	
45	0.492	120	40	60	66.7	6.5	0.42	2.33	10.37	
46	0.319	40	20	50	408.7	105.8	0.31	2.07	8.69	
47	0.319	60	25	40	368.8	80.1	0.40	2.17	10.67	
48	0.319	80	50	60	322.4	65.7	0.32	2.14	8.71	
49	0.319	100	20	80	219.6	6.4	0.33	2.18	8.65	
50	0.319	120	15	100	219.7	5.0	0.24	2.12	6.58	
51	0.229	40	30	40	408.8	105.3	0.26	1.76	8.30	
52	0.229	60	35	50	342.0	96.3	0.45	2.37	11.04	
53	0.229	80	20	60	325.9	65.4	0.25	1.69	8.56	
54	0.229	100	45	70	255.3	35.7	0.47	1.70	16.21	
55	0.229	120	30	80	255.8	6.9	0.39	1.88	11.92	
56	0.174	40	40	90	408.3	101.2	0.44	1.79	14.37	
57	0.174	60	45	120	369.9	91.8	0.13	1.57	4.64	
58	0.174	80	35	100	332.9	66.6	0.16	1.35	6.66	
59	0.174	100	30	80	250.3	36.2	0.16	1.43	6.57	
60	0.174	120	20	60	341.1	15.9	0.23	1.58	8.26	

2.3 结果分析

根据表1单因素变化工况(工况1~40)统计结果,获得了绕流长度 L_x ,绕流宽度 L_y 及转点处合流速 U_m 随各影响因素的变化规律,具体为:① L_x 随 Fr 呈幂函数递减,随 α 呈对数函数递增,随 d 呈2次函数递减;② L_y 随 d 和 L 均呈2次函数递减,随 α 呈对数函数递增;③ U_m 随 Fr 呈对数函数递增,随 L 呈2次函数递增。同时,对上述变化规律拟合了具体的关系式。

在此基础上,结合表1多因素变化工况(工况41~60)统计结果,拟合了 L_x , L_y 及 U_m 无量纲化的综合计算式(公式中的挑角 α 采用弧度值),并对计算式进行了验证(见图2)。结果表明,计算值与试验值(数模结果)吻合较好,计算式可供后文方案设计参考。

$$\text{绕流区长度: } L_x/d = 0.0534Fr^{-0.0364}(\ln\alpha + 53.9818)[(d/L)^2 - 3.7378(d/L) + 4.1189] \quad (4)$$

$$\text{绕流区宽度: } L_y/d = 0.2176(\ln\alpha + 3.6775)[(d/L)^2 - 3.6187(d/L) + 3.4096] \quad (5)$$

$$\text{转点处合流速: } U_m/\sqrt{gd} = 0.0078(\ln Fr + 3.3041)[(d/L)^2 - 3.9009(d/L) + 7.4233] \quad (6)$$

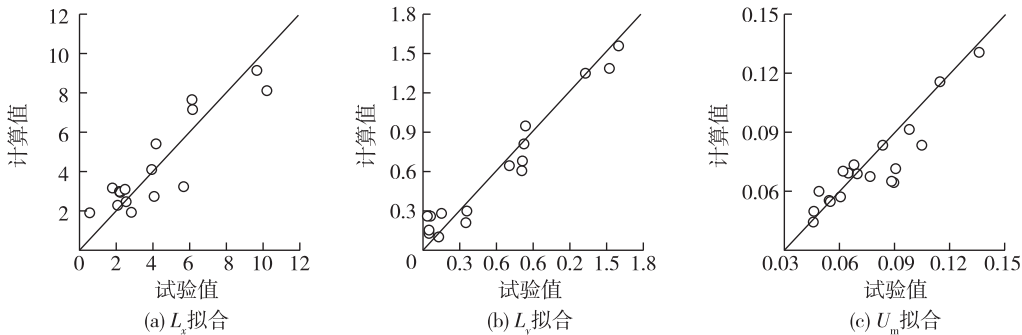


图2 计算式拟合效果检验

Fig. 2 Verification of fitted values by formulas

3 工程应用

前文对倒顺坝坝头绕流特性进行了分析,建立了坝头绕流长度和宽度等计算式。下面将以长江猪儿碛滩航道整治工程为例,应用这些成果进行航道整治方案设计,并分析其整治效果。

3.1 航道现状及滩险成因

猪儿碛滩段航道里程663.5~661.0 km,其中661.6 km处最浅(见图3)。滩段上游左侧是珊瑚坝尾,右侧为石板坡长江大桥主跨下的主河槽;进口左岸是龙碛子基岩石盘,右岸为南滨路;滩段中部左岸是长滨路和大量码头、趸船,右岸为低矮的老鹳碛大边滩;鸡翅膀石梁斜卧出口右岸,挑流明显;再往下为月亮碛河段。工程河段规划航道等级为内河I级,航道尺度为3.5 m×150 m×1 000 m(设计水位下航深×航宽×弯曲半径),但从图3可见,航槽内满足150 m设计航宽的3.5 m等深线并不贯通,形成碍航浅滩。滩险成因主要有3个方面:①滩段河势展宽,水流分散减弱了输沙能力;②边滩低矮散乱,航槽集中冲刷历时不长;③猪儿碛航槽位于凸岸,且处于主输沙带,航槽易出浅碍航。

3.2 整治方案

进行枯水整治,采用综合历时保证率为98%的水位作为滩段设计水位,设计流量为 $Q_{\text{寸滩}} = Q_{\text{朱沱}} + Q_{\text{北碚}} = 2\,380 + 350 = 2\,730 \text{ m}^3/\text{s}$,整治流量选用第三造床流量($Q_{\text{寸滩}} = 5\,520 + 1\,680 = 7\,200 \text{ m}^3/\text{s}$),整治水位2.3~3.1 m,整治线宽度360~430 m。

根据滩险特性和整治目标,充分优化后形成了整治方案(见图3),在月亮碛附近走右深槽,上段设计航槽走向与目前航槽基本一致,在石板坡长江大桥处紧靠右,出桥后经龙碛子,至储奇门段居左,后再经鸡翅膀,出鸡翅膀后,沿右岸深槽而下。因此,需对猪儿碛进行疏浚,对龙碛子、鸡翅膀和玄坛庙进行炸礁。猪儿碛疏浚挖

至 $-4.2 \sim -4.0$ m(以当地设计最低通航水位为零点,高程 $156.8 \sim 158.1$ m,吴淞高程),龙碛子炸礁至 -4.1 m(高程 $157.6 \sim 158.2$ m),鸡翅膀炸礁至 -4.0 m(高程 156.9 m),玄坛庙炸礁至 -4.0 m(高程 156.7 m)。

炸礁和疏浚的同时,在右岸布置了整治建筑物,具体为:滩段进口采用 Z1#和 Z2#丁坝提高航槽冲刷能力,中部充分利用鸡翅膀石梁(高程约 $162 \sim 169$ m)这一“天然顺坝”,通过 Z3#坝延长鸡翅膀,形成倒顺坝,增加其左侧航槽的冲刷能力,弥补因开挖引起的航槽流速减小,同时采用 Z4#坝封堵鸡翅膀缺口以增加猪儿碛段航槽分流量和航槽流速。其中,Z1#~Z4#坝的整治水位分别为 $3.0, 3.0, 3.1$ 和 2.3 m,坝长分别为 $151.7, 251.2, 676.4$ 和 140 m。

为使 Z3#倒顺坝修建后航槽内的水流条件较好,减小绕流范围和避免斜流、横流等碍航流态,在方案设计时,采用了前文研究结果,结合实际地形情况,确定倒顺坝坝头和转点分别距设计航槽 152 和 90 m,勾头段长 150 m,顺坝段长 526.4 m,挑角 22.5° 。由式(5)计算可得, $L_y/d=0.954 < 1.0$,说明从转点起计的绕流宽度 L_y 小于转点距航槽距离 d ,坝头绕流将不会进入航槽,航槽内水流夹角小于 5° ,船舶通行水流条件良好。

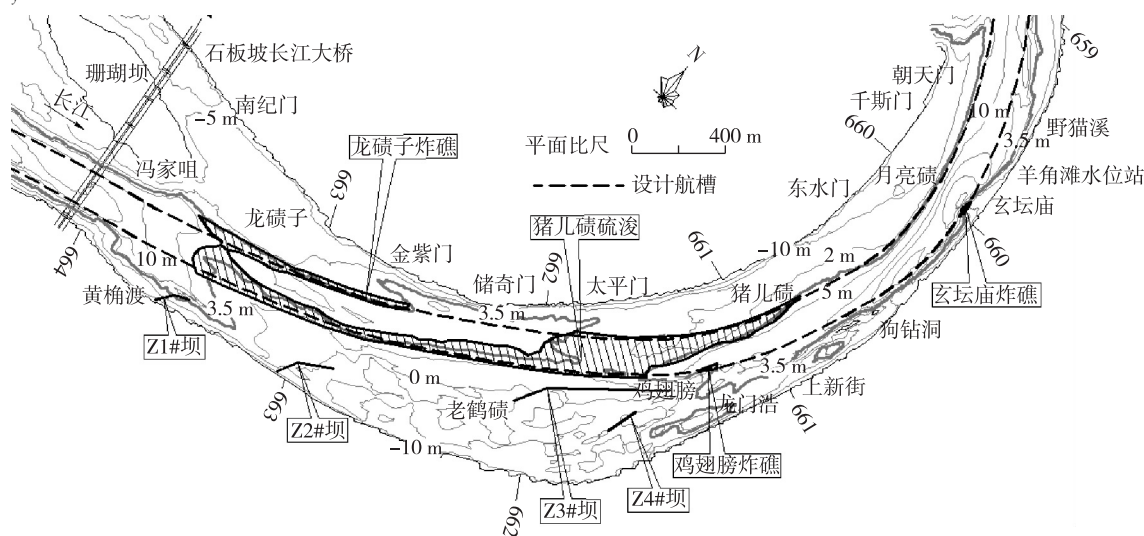


图 3 长江猪儿碛河段河势及整治方案平面布置

Fig. 3 River regime of Zhuerqi reach and plane layout of the regulation scheme

3.3 整治效果分析

为分析整治前后航槽内水流条件变化情况,在整治区附近布置了统计分析断面,断面与设计航槽正交,沿航中线间距 150 m(约 1 倍代表船型船长),航槽内沿宽度每 15 m布置一个流速统计点。结合工程河段实际情况和航道整治目标,对整治效果提出以下要求:①设计流量下航道尺度满足规划要求;②整治流量下航槽内各统计断面流速较整治前增加 $0.2 \sim 0.5$ m/s,以加强消落期泥沙冲刷;③整治后不能成为急滩,即消滩判数 $E = 155J + V^2/2g < 0.8$, J 为水面比降, V 采用表面流速;④航槽内不出现较强回流、斜流、横流等碍航流态;⑤整治方案具有可实施性,工程量尽量小。对照上述要求,下面对整治效果进行分析。

(1)航道尺度 整治结果显示,经猪儿碛疏浚和龙碛子、鸡翅膀及玄坛庙炸礁后,航槽内的 3.5 m等深线完全贯通,航宽 150 m,弯曲半径不小于 1000 m,航道尺度满足规划要求。

(2)局部流态 在 Z3#倒顺坝的导流、顺流和束流作用下,水流与航槽走向较为一致,坝头绕流未进入航槽区,航槽内水流夹角很小,无回流、斜流、横流等碍航流态(见图 4,流量 $Q_{寸滩}$ 分别为 2730 和 4000 m³/s),通航水流条件较好。

此外,分析了多种来流条件下(坝头断面 $Fr = 0.052 \sim 0.598$)整治方案 Z3#倒顺坝的坝头绕流情况,采用式(4)~(6)计算了绕流参数,图 5 给出了绕流参数计算值与数模试验值之间的对比,可见,绕流区长度 L_x/d 随 Fr 的增大而减小,转点处合流速 $U_m/(gd)^{1/2}$ 随 Fr 的增大而增大,且计算值和试验值吻合较好; L_y/d 随 Fr

的增大总体上稍有减小,最大值小于1,且基本在式(5)计算值上下波动。 L_y/d 随 Fr 的变化规律与式(5)略有不同,主要有两方面的原因:一是式(5)基于概化河槽非淹没资料所建立,与天然河道边界情况有所不同,对于两岸顺直的概化河槽,水流接近一元流, α 和 L 是 L_y/d 的主要影响因素,而 Fr 作用相对较小,但在实际河流中,受河宽变化和两岸边界不规则性的影响,水流呈现三元流特性, Fr 的作用将更为明显;二是在 Fr 增大的过程中,倒顺坝将逐渐由非淹没状态过渡到淹没状态,淹没倒顺坝坝头和坝顶同时存在水流分离现象,其强弱随淹没程度 $\sigma_s = \Delta h/h$ (Δh 为坝顶以上水深, h 为断面平均水深)而变化,非淹没状态时 $\sigma_s = 0$,坝顶不溢流,坝头绕流较强,淹没状态时 $\sigma_s > 0$,坝顶溢流作用增强,坝头绕流减弱;将式(5)应用于天然河道时需注意 L_y/d 的上述变化规律。

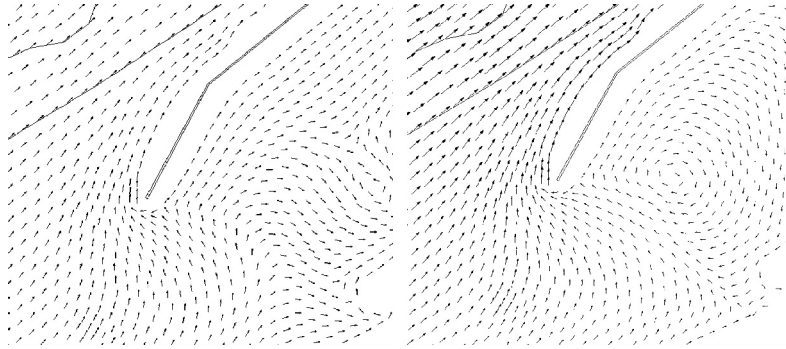


图4 Z3#坝坝头附近局部流态

Fig. 4 Local flow patterns near Z3# dike head

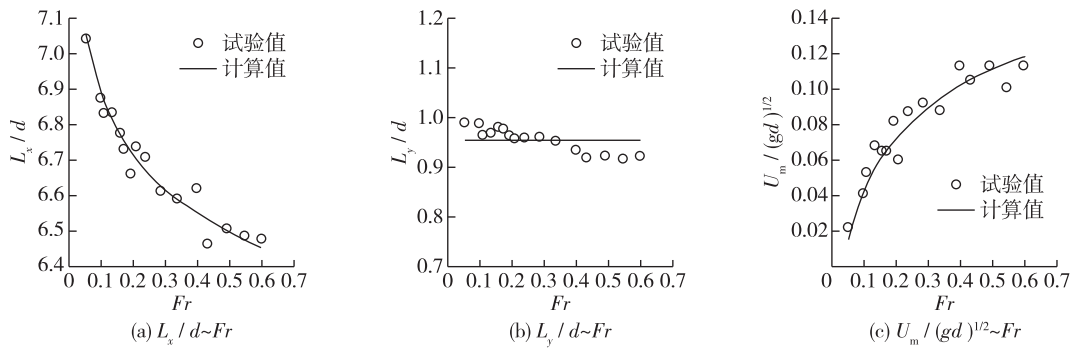


图5 绕流参数对比

Fig. 5 Comparison between circumfluence parameters

(3)主流流速及消滩判数 研究表明,整治流量下,整治区方案实施前流速 1.72~2.70 m/s,方案实施后流速 1.87~3.31 m/s,流速增值 0.02~0.61 m/s,有利于消落期航槽淤沙冲刷;方案实施前消滩判数 0.16~0.48,实施后消滩判数 0.17~0.61,较方案前变化不大,且小于工程河段急滩临界消滩判数 0.80,说明整治后没有成为急滩。

(4)对周边环境影响 整治方案的提出进行了广泛实地调研,充分考虑了周边环境因素,方案实施对附近码头、桥梁、取水设施、堤防工程等建筑设施无不利影响,对城市防洪和景观生态等基本没有影响。整治方案工程量较小,具有可实施性。

4 结 语

(1)采用水槽试验资料和长江猪儿碛河段实测资料,对平面二维水流数学模型进行了水位和流速分布

等验证,计算结果与实测结果吻合较好,表明该模型可用于绕流特性及整治方案研究。

(2)通过概化河槽方案,采用单因素和多因素分析法,对倒顺坝坝头绕流特性进行了研究,获得了绕流区长度 L_x ,宽度 L_y 及转点合流速 U_m 随倒顺坝几何参数及来流条件的变化规律,建立了相应的计算式。

(3)将建立的倒顺坝坝头绕流参数计算公式应用于长江猪儿碛浅滩航道整治方案的设计中,对整治方案的效果分析表明,方案实施后的航道尺度满足规划要求,方案区航槽内流速增值 $0.02 \sim 0.61 \text{ m/s}$,消滩判数 $0.17 \sim 0.61$,均满足预期目标;航槽内流态较好,无回流、斜流和横流等碍航流态,坝头绕流参数计算值与数模试验值基本一致,说明计算式可为航道整治方案设计提供较好的技术支撑。

(4)需要指出,本文倒顺坝坝头绕流参数计算式是基于长江猪儿碛河段概化顺直等宽河槽资料建立的,主要适用于非淹没条件,重点考虑了坝头断面水流弗劳德数 Fr ,距航槽距离 d ,勾头长度 L 和挑角 α 等因素的影响,没有考虑泥沙冲淤变化,由于天然河道边界条件远比概化河槽复杂,来流条件非恒定,流态具有三维特性,坝头局部存在泥沙冲淤变化,因此,今后仍有必要采用更多实测资料验证、修正与完善计算式。

参 考 文 献:

- [1] 周冠伦, 荣天富, 刘书伦, 等. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 926-961. (ZHOU Guan-lun, RONG Tian-fu, LIU Shu-lun, et al. Waterway engineering handbook[M]. Beijing: People's Communication Press, 2004: 926-961. (in Chinese))
- [2] 张柏山, 吕志咏, 祝立国. 绕丁坝流动结构实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 585-588. (ZHANG Bai-shan, LV Zhi-yong, ZHU Li-guo. Experimental study on flow construction over spur-dikes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 585-588. (in Chinese))
- [3] 潘军峰, 冯民权, 郑邦民, 等. 丁坝绕流及局部冲刷坑二维数值模拟[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2005, 37(1): 15-18. (PAN Jun-feng, FENG Min-quan, ZHENG Bang-min, et al. Two-dimensional numerical simulation of spur dike circumfluence and local scour hole[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2005, 37(1): 15-18. (in Chinese))
- [4] 李冰冻, 李嘉, 李克锋. 丁坝水流的水槽试验及数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展:A 辑, 2013, 28(2): 176-183. (LI Bing-dong, LI Jia, LI Ke-feng. Flume experiment and numerical simulation of flow around a spur dike[J]. Journal of Hydrodynamics (SerA), 2013, 28(2): 176-183. (in Chinese))
- [5] 周宜林, 道上正规, 桧谷治. 非淹没丁坝附近三维水流运动特性的研究[J]. 水利学报, 2004(8): 46-53. (ZHOU Yi-lin, MICHIE Masanori, HINOKIDANI Osamu. A study of flow characteristics around the non-submerged spur-dikes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(8): 46-53. (in Chinese))
- [6] HINTERBERGER C, FROELICH J, RODI W. Three-dimensional and depth-averaged large-eddy simulations of some shallow water flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(8): 857-872.
- [7] MCCOY A, CONSTANTINESCU G, WEBER L J. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(2): 157-172.
- [8] 白静, 方红卫, 何国建. 非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究[J]. 力学学报, 2013, 45(2): 151-157. (BAI Jing, FANG Hong-wei, HE Guo-jian. A study of non-submerged groin turbulence flow in a shallow open channel by LES[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2): 151-157. (in Chinese))
- [9] 彭静, 河原能久. 丁坝群近体流动结构的可视化实验研究[J]. 水利学报, 2000(3): 42-45. (PENG Jing, YOSHIHISA Kawahara. Visualization of flow structure around submerged spur dikes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(3): 42-45. (in Chinese))
- [10] 于守兵, 陈志昌, 韩玉芳. 淹没丁坝端坡对附近水流结构的调整作用[J]. 水动力学研究与进展:A 辑, 2012, 27(1): 39-46. (YU Shou-bing, CHEN Zhi-chang, HAN Yu-fang. Impact of head slope of submerged spur dike on near flow structure [J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2012, 27(1): 39-46. (in Chinese))
- [11] 于守兵, 陈志昌, 韩玉芳. 非淹没丁坝端坡对附近水流结构的调整作用[J]. 水利水运工程学报, 2012(3): 44-49. (YU Shou-bing, CHEN Zhi-chang, HAN Yu-fang. Impacts of head slope of non-submerged spur dike on flow structure[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(3): 44-49. (in Chinese))

- [12] 陆永军. 松花江三姓浅滩航道整治的二维数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 1998(2): 26-35. (LU Yong-jun. 2-D numerical simulation of waterway regulation of Sanxin shoal on the Songhua River[J]. Journal of Sediment Research, 1998(2): 26-35. (in Chinese))
- [13] 李国斌, 韩信. 天然河道淹没丁坝群水深平均平面二维数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(2): 230-237. (LI Guo-bin, HAN Xin. A 2-D depth-averaged model for flows in river with submerged groins[J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2001, 16(2): 230-237. (in Chinese))
- [14] 钟亮, 许光祥. 长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程工可阶段数学模型研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学, 2014. (ZHONG Liang, XU Guang-xiang. Research report on a mathematical model for the feasibility study stage waterway regulation engineering from Jiulongpo to Chaotianmen in the upper reaches of the Yangtze River [R]. Chongqing: Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

Circumfluence characteristics of reversing longitudinal dike head and its application to waterway regulation

ZHONG Liang^{1,2}, XU Guang-xiang^{1,2}, HE Yan-jun³

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: The reversing longitudinal dike is widely applied to the mountainous waterway regulation works, and the circumfluence characteristics near the reversing longitudinal dike head have great influence on navigation flow conditions. In this paper, the circumfluence characteristics near the reversing longitudinal dike head are discussed with the adoption of a 2-D flow mathematical model; the circumfluence parameters, such as the length and width of circumfluence area and the flow velocity at the turning point, are obtained; and the relationships between the circumfluence parameters, the geometry parameters of the reversing longitudinal dike and the inlet flow conditions are established including the corresponding calculation formulas. The calculated results are applied to the regulation scheme design for the Zhuerqi shallow shoal in the Yangtze River. The navigation hindering characteristics and the formation causes of the Zhuerqi shallow shoal are discussed, and the regulation schemes are proposed. Analysis of the simulated regulation schemes shows that after implementation of the regulation works, the channel scales meet the design requirements, the increasing in flow velocity and hydraulic index are in line with the expected design targets, the flow pattern in the channel is good, and there are no navigation hindering flow such as the backflow, oblique flow and cross flow, which indicates that the calculation formulas for the circumfluence characteristic parameters developed in this paper can provide an effective technical support for the regulation scheme design in the future.

Key words: reversing longitudinal dike; circumfluence characteristics; shallow shoal; waterway regulation; numerical simulation