

环翼式桥墩最优挡板形状试验

陈艳梅¹, 牟献友¹, 成兰艳², 张志澍¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 巴彦淖尔市临河区水务局, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:为研究环翼式桥墩的最优挡板形状,基于桥墩局部冲刷机理,进行了不同流量和不同环翼式挡板形状下的环翼式桥墩局部防冲刷水工模型试验。在环翼式挡板延伸长度为45 mm、位置在水深的1/3处,研究了不同流量、不同挡板形状的桥墩最大冲刷深度、三维时均流速及纵向和垂向紊动强度。结果表明:与无挡板相比,挡板前端和尾端宽度都为45 mm时水流垂向流速减小程度最大;纵向、垂向紊动强度减小程度最大;最大冲刷深度可减小57.6%,防冲刷效果明显。

关键词:环翼式桥墩;挡板形状;冲刷深度;时均流速;紊动强度

中图分类号:TV131.6

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2014)03-0024-06

Experimental research on optimal shape of the baffle of ring-wing bridge piers//CHEN Yanmei¹, MOU Xianyou¹, CHENG Lanyan², ZHANG Zhishu¹ (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China; 2. Linhe Water Authority of Bayannaoer, Bayannaoer 015000, China)

Abstract: Based on the principle of local scour at bridge piers, a series of hydraulic model tests with different flow and different shapes of the baffle of ring-wing aiming to determine their optimal shape were performed. By doing so, the maximum scour depth of piers, the three-dimensional time average velocity, the lengthways, and the vertical turbulence intensity were studied considering the development lengths of the baffle of a ring-wing pier at 45 mm and the distance between baffle and riverbed at approximately 1/3 of the water depth. The results show that when compared with a scenario without baffles, the decreases of vertical flow velocities, the lengthways, and the vertical turbulence intensity are maximum. Additionally, the results show that the maximum scour depth could be reduced by 57.6% when both the front width and the tail width of baffle are 45mm.

Key words: ring-wing pier; baffle shape; scour depth; time average velocity; turbulence intensity

我国河流众多,流域面积大于100 km²的有5万多条,大于1 000 km²的有1 500多条^[1]。在河流治理中,泥沙问题增加了河流整治的危害性和复杂性。水流、泥沙和河床边界三者共同影响河流的变化规律。河道中桥墩的冲刷包括自然演变冲刷、一般冲刷和局部冲刷^[2]。桥墩附近水流与泥沙相互作用,河床不断被冲刷与推变,由此构成了河床的自然演变冲刷^[3];设置桥墩后,通过桥孔的急流被桥墩压缩引起过流流速增大,水流挟沙力也增大,水流冲刷桥墩上下游河床的泥沙,形成桥墩附近河床面的冲刷,称为一般冲刷^[4];由于桥墩阻流产生的水流冲击和漩涡流作用,在桥墩周围形成了局部河床变形,称为桥墩的局部冲刷^[5]。桥墩的最大冲刷深度^[6]是在假定这3种冲刷相继发生的基础上,3

种冲刷叠加之后的结果。

近年来,随着跨江大桥的建设,由桥梁失稳带来的灾害越来越多,在引起桥梁失稳的众多因素中,桥墩局部冲刷是主要原因。另外,在桥墩基础施工过程中,施工围堰周围也会发生冲刷,其冲刷现象类似于桥墩附近的冲刷^[7]。研究桥墩局部冲刷具有重要的现实意义,如陕西省户县横跨沔河的东西大桥,3根桥柱周边被水流冲击得伤痕累累,1个桥墩开始倾斜,桥墩下部混凝土构造物经水冲刷裸露出一个个编织袋;位于甘肃省天祝县的华干路大桥突然垮塌,造成经济损失约300万元,调查发现大桥上下游的采砂厂在大桥上下河床采砂,造成河床下降,桥墩基础外露达1 m多,桥墩基础被洪水冲刷成空洞。张万锋等^[8]初步研究了不同数量挡板组成的环翼

基金项目:国家自然科学基金(51369022);内蒙古自治区自然科学基金(2013MS0719)

作者简介:陈艳梅(1987—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事工程水力学研究。E-mail:yanmeichensun@163.com

通信作者:牟献友(1969—),男(蒙古族),内蒙古赤峰人,教授,博士,主要从事工程水力学及水工建筑物研究。E-mail:mouxianyou@163.com

式桥墩的防冲效果,认为挡板数量对桥墩局部冲刷的影响并不大。成兰艳等^[9-10]研究了环翼式桥墩单一挡板的防冲效果,确定了环翼式挡板的最佳位置和最佳尺寸。本文在上述基础上研究环翼式桥墩不同挡板形状的防冲效果并确定了最优挡板形状。

1 试验原理与内容

1.1 试验原理

冲刷的问题最终都可归结为水、沙相互作用的问题。局部冲刷由桥墩周围的紊流漩涡(马蹄形漩涡)引起。桥墩处水流主要包括下潜水流、墩前涌流、墩基冲击水流、墩后上冲水流、墩后尾漩涡水流,其中下潜水流在冲刷时占主导作用,也是冲刷的主要原因^[9]。环翼式挡板可阻挡下潜水流,改变其大小和方向,迫使下潜水流向两侧分流,从而减小水流对桥墩的冲刷能量,削弱漩涡淘蚀,起到防护的作用^[10]。本文根据上述原理,通过改变下潜水流达到防护局部冲刷的目的。

1.2 试验内容

模型试验时,测量了环翼式桥墩不同流量、不同挡板形状共 12 个工况下各测点的三维瞬时流速及冲坑深度,研究了挡板形状对最大冲坑深度的影响以及桥墩周围时均流速和紊动强度的变化规律,在此基础上确定环翼式挡板的最佳形状。

2 试验装置及试验方案

2.1 试验材料及装置

试验在内蒙古农业大学水利水电实验室完成。试验中使用的动床材料为均匀沙,平均粒径为 0.55 mm,桥墩模型由 PVC 饮水管制成,挡板用 PVC 板制作,3 种规格的半圆形挡板分别用 N1、N2 和 N3 表示,挡板内径均为 45 mm,板前端宽度均为 45 mm,板尾端宽度分别为 45 mm、23 mm 和 0 mm,见图 1。

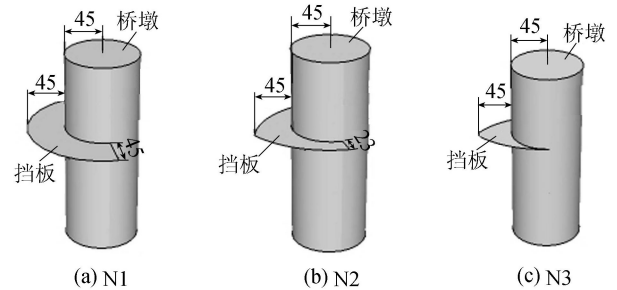


图 1 环翼式桥墩外形设计参数(单位:mm)

试验水槽为 2000 cm×50 cm×90 cm(长×宽×高)的玻璃水槽,底坡坡降为 0.124%,试验时水温为 18~20℃,水的密度为 998.255 kg/m³,运动黏滞系数为 1.046 6×10⁻⁶ m²/s。桥墩所在的冲刷段铺沙长度为

500 cm,厚度为 21 cm。每次试验前将沙床面铺平,并放水浸泡 2 h 直至冲刷稳定,以此来提高试验数据的准确性。试验时,流量采用 IFM4080K 型电磁流量计测量,通过上游的流量调节阀控制流量,通过下游的闸门控制水深,水位采用 JS-B 型精密水位仪测量,流速采用小威龙 Vertric+ 型流速仪测量。试验系统布置同文献[9]。

2.2 试验方案

本试验分别采用 70 m³/s、90 m³/s 和 110 m³/s 3 种流速以及无挡板和 N1 挡板、N2 挡板、N3 挡板这 4 种情况两两组合为 12 个工况,每个工况水深均为 12 cm。试验各断面测点布置同文献[9],即每个工况 4 个断面,每个断面有 7 条测线,每条测线布置 5 个测点,共 140 个测点,见图 2。测量不同工况下各测点的三维瞬时流速及冲坑深度。将 3 种挡板形状的测量结果与无挡板时的结果进行比较,研究桥墩周围时均流速的变化规律及挡板形状对冲坑深度和桥墩局部冲刷的影响。

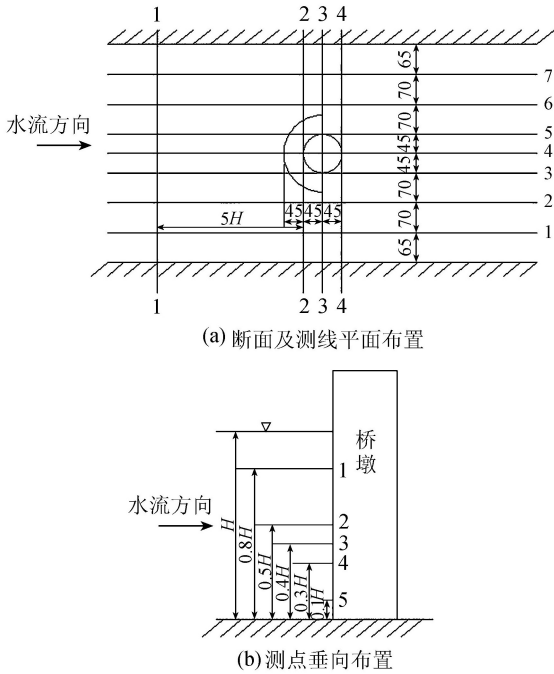


图 2 各断面测点布置示意图(单位:mm)

3 试验结果及分析

3.1 挡板形状对冲坑深度的影响

环翼式挡板延伸长度为 45 mm,挡板位置定在水深的 1/3 处,研究 N1、N2、N3 这 3 种挡板在不同流量下桥墩的最大冲刷深度。本试验测得的最大冲坑深度(也就是前文提及的最大冲刷深度),是自然演变冲刷、一般冲刷、局部冲刷叠加的结果,是冲坑最深处到最初沙床面的距离。

表 1 为不同流量、不同挡板形状时的最大冲坑深

度。由表 1 可以得出:①与无挡板相比,无论哪种形状,有挡板时的最大冲坑深度都明显减小。②当流量为 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 时,3 种挡板形状下的最大冲坑深度与无挡板相比平均减小率为 51.5%;当流量为 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 时,与无挡板相比平均减小率为 50.5%;当流量为 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 时,与无挡板相比平均减小率为 45.0%。③当流量为 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 时,均是 N1 挡板的最大冲坑深度最小,表明 N1 挡板减小最大冲坑深度的效果最优。④最大冲坑深度随环翼式挡板侧面延伸长度的减小而增大。在实际工程中,为达到节省材料、减少投资的目的,可以仅在桥墩迎水面增加环翼式挡板。

表 1 不同流量、不同挡板形状时的最大冲坑深度

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	挡板形状	最大冲坑 深度/cm	与无挡板相比 减小率/%
70	无挡板	16.5	
70	N1	7.0	57.6
70	N2	8.0	51.5
70	N3	9.0	45.5
90	无挡板	17.5	
90	N1	8.0	54.3
90	N2	8.5	51.4
90	N3	9.5	45.7
110	无挡板	18.0	
110	N1	9.7	46.1
110	N2	10.0	44.4
110	N3	10.0	44.4

3.2 挡板形状对流速分布的影响

桥梁建成后,除了河床的自然演变,桥墩干扰水流和泥沙运动引起的一般冲刷和局部冲刷交织在一起,冲刷过程非常复杂^[11]。在桥墩上增加环翼式挡板之后,变化最大的就是桥墩附近水流的流速。因

此,要了解环翼式桥墩减小最大冲刷深度的原因,必须分析桥墩附近水流的三维时均流速。本试验测得 5 个断面的流速,这里仅分析流量为 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 时 2—2 断面的流速分布。

图 3~5 分别为不同挡板形状时的纵向、横向、垂向时均流速分布。图中测线位置零点为桥墩中心,纵向为顺水流方向,横向为垂直水槽壁方向,垂向为铅垂方向。

由图 3 可以看出:无论有无环翼式挡板,无论挡板是哪种形状,纵向流速都呈深“V”形分布,都是以水槽轴线呈轴对称分布,极大值都出现在水表面靠近水槽边壁处,极小值都出现在水槽轴线靠近河床底部处,这是因为水流遇到环翼式挡板后被迫向两侧分流,而且环翼式挡板阻挡了下潜水流。

由图 4 可以看出:①无论有无环翼式挡板,无论挡板是哪种形状,横向流速都近似呈左右相近的“V”形分布,都是以桥墩中心线呈中心对称分布。②无挡板时,极大值出现在水槽轴线近水表面处,极小值出现在 2、6 测线的靠近河床底部。加挡板后,极大值出现在靠近水槽轴线的两条测线(3、5 测线)的近水表面处,极小值出现在水槽边壁的近水底部。③与无挡板相比,横向流速极大值、极小值都有不同程度的减小,但变化不大。

由图 5 可以看出:①无挡板时,垂向流速呈宽倒“U”形分布,极小值出现在靠近水槽边壁的水表面处,极大值出现在水槽轴线靠近河床底部。②增加挡板后,垂向流速在挡板所在水深即 $1/3$ 水深处有拐点,出现这个现象的原因是环翼式挡板阻挡下潜水流,导致垂向流速在挡板上聚集,所以垂向流速增

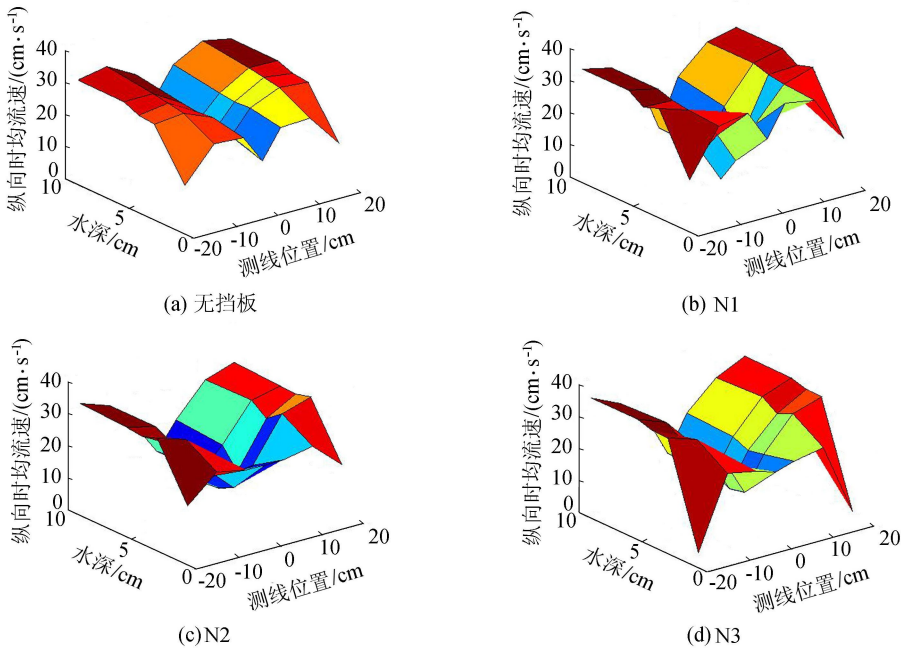


图 3 不同挡板形状时纵向时均流速分布

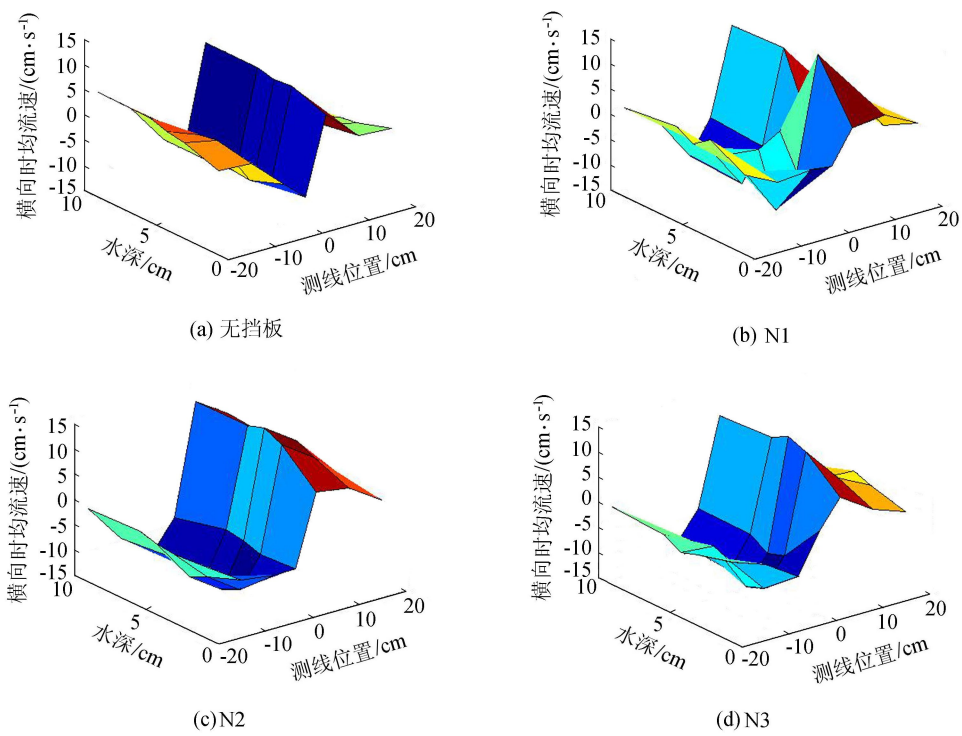


图4 不同挡板形状横向时均流速分布

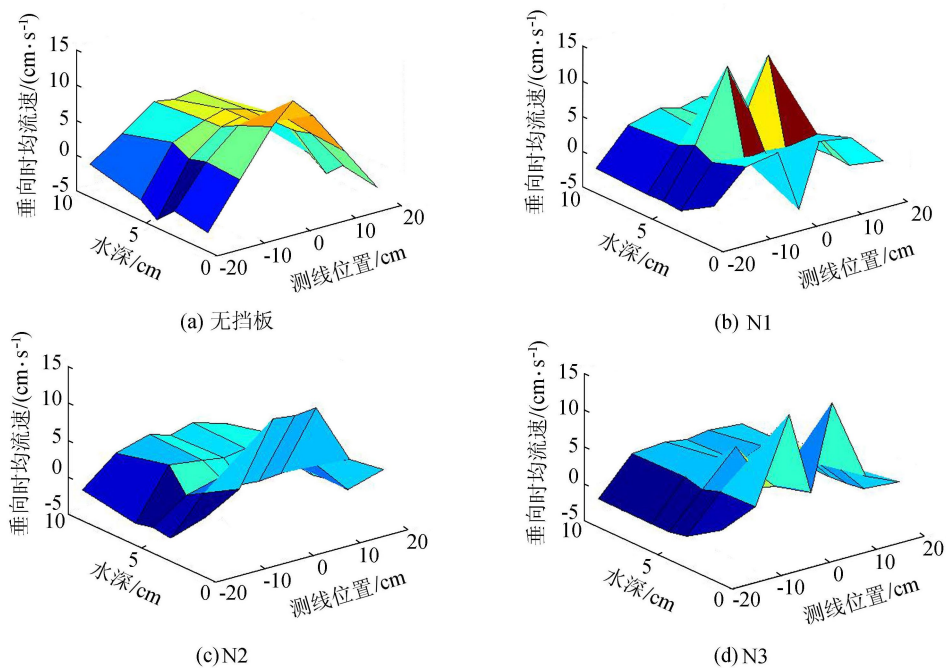


图5 不同挡板形状时垂向时均流速分布

大,但是靠近河床底部的垂向流速明显减小,减小程度 N3 挡板最小,N1 挡板最大。

3.3 紊动强度分析

紊流是水流不稳定运动的一种状态,它们的位置、流速、形态都在时刻发生着变化。紊流的瞬时特性是不规则、无法描述的,但它的平均特性,如时间平均、空间平均、统计平均等却遵循一定的规律^[12]。某点上瞬时流速随时间发生波动的现象,就是流速的脉动。紊动强度是衡量水流所具有的紊动能量的重

要指标^[13],用于表征脉动幅度的大小,其表达式为

$$T_u = \sqrt{u'^2} / \bar{u} \quad (1)$$

$$T_v = \sqrt{v'^2} / \bar{v} \quad (2)$$

$$T_w = \sqrt{w'^2} / \bar{w} \quad (3)$$

式中: T_u 、 T_v 、 T_w 分别为纵向、横向、垂向紊动强度; u' 、 v' 、 w' 分别为纵向、横向、垂向脉动流速; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ 分别为纵向、横向、垂向时均流速。

在试验过程中,观察到水流的横向紊动强度变化比较小,所以只需研究纵向、垂向的紊动强度。表2和表3分别为不同挡板形状各测线水流的纵向紊动强度和垂向紊动强度。

表 2 不同挡板形状各测线水流的纵向紊动强度

挡板形状	测点高度与水深 的比值	纵向紊动强度			
		测线 1	测线 2	测线 3	测线 4
无挡板	0.1	0.442	0.127	0.097	0.244
	0.3	0.089	0.080	0.087	0.118
	0.4	0.081	0.086	0.084	0.109
	0.5	0.064	0.060	0.078	0.104
	0.8	0.065	0.062	0.073	0.097
N1	0.1	3.410	0.072	0.100	0.196
	0.3	0.679	0.070	0.115	0.231
	0.4	0.987	0.069	0.567	2.086
	0.5	0.655	0.054	0.096	0.240
	0.8	0.685	0.053	0.093	0.214
N2	0.1	0.322	0.134	0.153	0.115
	0.3	0.068	0.101	0.125	0.165
	0.4	0.185	0.118	0.221	0.242
	0.5	0.084	0.169	0.153	0.154
	0.8	0.088	0.074	0.126	0.161
N3	0.1	0.787	0.238	0.120	0.247
	0.3	0.060	0.463	0.102	0.147
	0.4	0.067	0.331	0.119	0.212
	0.5	0.047	0.482	0.091	0.139
	0.8	0.044	0.679	0.086	0.130

表 3 不同挡板形状各测线水流的垂向紊动强度

挡板形状	测点高度与水深 的比值	垂向紊动强度			
		测线 1	测线 2	测线 3	测线 4
无挡板	0.1	2.864	1.151	0.271	0.328
	0.3	1.099	0.844	0.278	0.522
	0.4	0.848	0.890	0.341	0.301
	0.5	0.846	0.613	0.360	0.332
	0.8	1.854	1.288	0.372	0.449
N1	0.1	3.421	0.505	0.992	1.404
	0.3	0.686	0.741	1.032	1.052
	0.4	0.992	0.462	0.894	1.011
	0.5	0.653	0.623	0.649	0.722
	0.8	0.681	0.713	0.664	0.819
N2	0.1	1.823	0.825	0.354	0.244
	0.3	0.798	1.150	0.966	1.145
	0.4	0.889	3.589	1.156	4.595
	0.5	0.808	0.539	0.623	0.730
	0.8	1.211	1.260	0.642	0.787
N3	0.1	2.318	0.885	0.243	2.281
	0.3	1.337	0.572	0.462	0.886
	0.4	1.201	0.923	0.328	2.655
	0.5	0.915	0.620	0.488	0.561
	0.8	0.853	0.638	0.686	0.644

由表2可知:①无论是否加环翼式挡板,靠近水槽边壁的测线1水流的纵向紊动强度基本都是随着水深的增加逐渐减小,但是与无挡板相比,加挡板后测线1的纵向紊动强度整体呈增大趋势,这是因为水流受到环翼式挡板阻挡后向两边扩散,水流紊动

加强。②无论是否加挡板,测线2、3水流的纵向紊动强度受测点高度与水深比值的影响都不大,唯有N3时,测线2水流的纵向紊动强度稍有增加。这是因为,与无挡板相比,水流被挡板阻挡后发生扩散,测线2恰好位于水流扩散区,N1、N2、N3挡板都破坏了原来的水流方向与大小,但是随后紊动强度又都有不同程度的恢复,N3恢复最小。③不加挡板时,测线4水流的纵向紊动强度随着水深的增加一直减小;挡板形状为N2、N3时,在测点高度与水深比值为0.4处有极大值,原因是挡板位于1/3水深处,挡板阻挡下降水流,挡板处流速迅速增大,至测点高度与水深比值为0.4处,纵向紊动强度增大到最大值。④除个别测点外,有挡板时测线4测点水流的纵向紊动强度相比无挡板时呈增大趋势。

由表3可知:①与无挡板相比,测线1、2近水表面处水流的垂向紊动强度减小,测线3、4近水表面处水流的垂向紊动强度增大,这说明桥墩近处垂向紊动强度大。②从整体来看,挡板形状为N1时,仅测线1水流在近水表面处的垂向紊动强度比较大,而其他两种挡板形状及无挡板的工况下,整体垂向紊动强度浮动较大,也就是说,挡板形状为N1的水流比其他工况的水流平稳。

4 结 语

环翼式挡板形状为N1时,最大冲刷深度最大可减小57.6%。增加挡板后,垂向流速在挡板所在处有拐点。挡板形状为N1时,测点高度与水深比值为0.4处纵向紊动强度有极大值,整体垂向紊动强度浮动不大,水流比其他工况的水流更平稳。分析最大冲坑深度、三维时均流速、纵向紊动强度、垂向紊动强度得出环翼式桥墩的最优挡板形状为N1。

参考文献:

[1] 王兴奎,邵学军,李丹勋. 河流动力学基础[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

[2] 李奇,王义刚,谢锐才. 桥墩局部冲刷公式研究进展[J]. 水利水电科技进展,2009,29(2):85-88 (LI Qi, WANG Yigang, XIE Ruicai. The research development of the formulae of local scour around bridge piers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009,29(2):85-88. (in Chinese))

[3] 钱宁. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992.

[4] 蒋焕章. 桥墩局部冲刷防护试验研究[J]. 公路,1994(9):1-8. (JIANG Huanzhang. Experimental research on protection of pier against local scour[J]. Highway, 1994(9):1-8. (in Chinese))

- [5] 徐国平. 桥墩局部冲刷机理的探讨[D]. 西安: 西安公路交通大学, 1989.
 - [6] 高冬光. 桥位设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
 - [7] 房世龙, 陈红, 王岗. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (4): 84-89. (FANG Shilong, CHEN Hong, WANG Gang. Properties of protection engineering against local scouring around piers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (4): 84-89. (in Chinese))
 - [8] 张万锋, 文恒, 牟献友, 等. 环翼式桥(闸) 墩防冲刷实验研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2011, 32 (3): 226-229. (ZHANG Wanfeng, WEN Heng, MOU Xianyou, et al. Experimental research on scouring and protective of bridge pier (brake) with wing-ring baffles [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2011, 32 (3): 226-229. (in Chinese))
 - [9] 成兰艳, 牟献友, 文恒, 等. 环翼式桥墩局部冲刷防护试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (3): 14-18. (CHENG Lanyan, MOU Xianyou, WEN Heng, et al. Experimental research on protection of ring-wing pier against local scour [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (3): 14-18. (in Chinese))
 - [10] 成兰艳, 郝拉柱, 牟献友, 等. 环翼式桥墩环翼式挡板最佳延伸长度试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (2): 32-36. (CHENG Lanyan, HAO Lazhu, MOU Xianyou, et al. Experimental research on optimal development lengths of ring-wing baffle of ring-wing pier [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (2): 32-36. (in Chinese))
 - [11] 马奎. 桥墩局部冲刷机理分析及防护建议[J]. 中国高新技术企业, 2010, 32 (15): 16-17. (MA Kui. The mechanism analysis and protecting recommendation of pier against local scour[J]. China Hi-Tech Enterprises, 2010, 32 (15): 16-17. (in Chinese))
 - [12] 王兴奎, 邵学军, 李丹勋. 河流动力学基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
 - [13] 房世龙. 局部冲刷坑形成影响桥墩附近流场特性的试验研究[J]. 水运工程, 2009 (11): 143-152. (FANG Shilong. Experiment study on the influence of local scour pit on flow field around piers [J]. Port & Waterway Engineering, 2009 (11): 143-152. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013 - 05 - 09 编辑: 骆超)
- +++++
- (上接第 23 页)
- [7] 刘亚坤. 冲击波与收缩式消能工若干问题的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
 - [8] 宁利中, 戴振霖. 窄缝挑坎收缩段急流冲击波及控制水深的计算[J]. 西安理工大学学报, 1992, 8 (3): 197-240, 215. (NING Lizhong, DAI zhenlin. Calculations of shock waves and controlling water depth in region of contraction on slit-type flip bucket [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1992, 8 (3): 197-240. (in Chinese))
 - [9] 黄智敏, 翁情达. 窄缝挑坎收缩段急流冲击波特性的探讨[J]. 水利水电技术, 1989 (8): 11-15. (HUANG Zhimin, WENG Qingda. Discussions on characteristics of shock waves on slit-type flip bucket [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989 (8): 11-15. (in Chinese))
 - [10] 刘宣烈, 张文周. 空气阻力对挑流水舌的影响[J]. 天津大学学报, 1982 (2): 67-77. (LIU Xuanlie, ZHANG Wenzhou. Effect of air resistance to a trajectory jet [J]. Journal of Tianjin University, 1982 (2): 67-77. (in Chinese))
 - [11] 刘宣烈, 刘钧, 姚仲达, 等. 空中掺气水舌运动轨迹及射距[J]. 天津大学学报, 1989 (2): 23-30. (LIU Xuanlie, LIU Jun, YAO Zhongda, et al. The moving orbit and the horizontal length of aerated jet flow in open air [J]. Journal of Tianjin University, 1989 (2): 23-30. (in Chinese))
 - [12] 宁利中. 挑流水舌挑距及其影响因素概述[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15 (3): 35-39. (NING Lizhong. Discussion on the horizontal length of jet flow and its factors of influence [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2004, 15 (3): 35-39. (in Chinese))
 - [13] 刘宣烈, 刘钧. 三元空中水舌掺气扩散的试验研究[J]. 水利学报, 1989, 17 (11): 10-17. (LIU Xuanlie, LIU Jun. Experimental study on the diffusion and aeration of three-dimensional jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 17 (11): 10-17. (in Chinese))
 - [14] 傅佩芬. 溢流拱坝挑流水舌入水宽度计算[J]. 四川水力发电, 2000, 19 (增刊 1): 70-71. (FU Peifen. The calculation of the jet width of overflow arch dams [J]. Sichuan Hydropower, 2000, 19 (Supl): 70-71. (in Chinese))
 - [15] 吴文平, 张彦法. 窄缝挑流水舌的运动扩散规律及应用[J]. 水力发电学报, 1989 (4): 71-76. (WU Wenping, ZHANG Yanfa. The theory and appliance of jet diffusion for slit-type flip bucket [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1989 (4): 71-76. (in Chinese))
 - [16] 张叶林, 邓军, 刘军, 等. 丹达河水电站窄缝消能研究[J]. 人民黄河, 2011, 33 (6): 126-131. (ZHANG Yelin, DENG Jun, LIU Jun, et al. Research on slit-type energy dissipaters of Dandahe Hydropower Station [J]. Yellow River, 2011, 33 (6): 126-131. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013 - 09 - 09 编辑: 骆超)