

弯段溢洪道导流墩联合糙条消能工水力特性试验研究

孙德旭, 牧振伟, 李凡琦, 贾萍阳, 张红红

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 由于弯道离心力与边墙的作用, 导致溢洪道内产生水面超高、横向冲击波等问题。为了充分体现加设导流墩糙条后对溢洪道内水力特性影响, 通过对曲率半径与底宽比值为 2.2 的 60° 弯段溢洪道试验研究, 得到了不同试验方案下溢洪道各典型横断面的水深与水流动力轴线分布规律。结果表明: 导流墩布设位置和个数均可以一定程度地改善溢洪道内水面结构形态, 单一形式导流墩对弯道内水面结构改善效果不如导流墩和糙条联合布置形式; 5 组试验方案最大水面差及最大水深在 1/5 ~ 2/5 弯道横断面和 4/5 弯道横断面相邻上下游位置发生频率较大, 且导流墩糙条联合方案的水流动力轴线更趋向于弯道中轴线; 相比同类消能工, 导流墩糙条联合形式布置在弯道内更加节约工程造价, 且施工较方便, 可为实际工程设计提供理论参考依据。

关键词: 弯段溢洪道; 水力特性; 导流墩; 糙条; 横向环流; 水流动力轴线

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0166-06

Experimental study on hydraulic characteristics of diversion pier combined with rough-strips energy dissipator in the bend spillway

SUN Dexu, MU Zhenwei, LI Fanqi, JIA Pingyang, ZHANG Honghong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Due to the effects of bend centrifugal force and abutment wall, many problems in spillway, such as water surface superelevation, transverse shock waves happen. In order to fully embody the influence of added diversion pier and rough-strip on the hydraulic characteristics of the spillway, we studied a 60° bend spillway with a 2.2 ratio of curvature radius to bottom width, and got water depth and flow dynamic axis distribution of typical cross sections of spillway in different experimental schemes. The results indicated that the location of diversion piers and numbers can improve the structure and figure of water surface in spillway to some extent, and the improvement effect of single diversion pier to water surface structure in bend was no better than the combined form of diversion pier and rough-strips. The incidence of largest water surface difference and largest water depth is larger in neighboring upstream and downstream positions of 1/5 ~ 2/5 cross section of curve and 4/5 cross section of curve, and the flow dynamic axis of combined scheme of diversion pier and strips was prone to the bend axis. Compared to other energy dissipators of the same type, the combined form of diversion pier and strips position in bend is more economical in saving construction's cost and making construction convenient, which provides theoretical referential evidence for practical construction design.

Key words: bend spillway; hydraulic characteristics; diversion pier; rough-strip; transverse circulation; flow dynamic axis

1 研究背景

溢洪道是水库主要泄水建筑物之一。从水力学

观点看, 溢洪道轴线宜取直线、等宽对称布置, 从而保证水流顺畅下泄。而在实际工程中, 由于施工条件、地形等方面的原因, 不得不采用转弯或变宽布

收稿日期: 2018-09-21; 修回日期: 2018-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769037), 新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目(XJEDU2017T004)

作者简介: 孙德旭(1992-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学。

通讯作者: 牧振伟(1973-), 男, 河南南阳人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水力学及河流动力学研究。

置,所以在平面上布置成圆弧形状的弯道形式^[1-2]。当水流进入弯道后,由于受到离心力作用,在整个断面内形成封闭状态的横向环流,致使弯道内产生了水面超高、横向冲击波等问题^[3]。其形态与演变密切关系到防洪、水利开发、航道治理等,是水力学及河流动力学领域相当棘手的重要课题。

弯道的研究一直备受众多学者关注。谢谦城等^[4]通过对连续弯段水流特性研究,发现纵向垂直平均流速对河床演变的影响;邱秀云等^[5]采用消能栅和导流消能板新措施,通过消、导结合的方法,成功解决了大底坡急流弯道水流流态的问题;魏祖涛等^[6]通过模型试验研究,分析了实际工程可通过加糙来稳定弯道及其下游流态;白兆亮等^[7]、徐乐等^[8]通过枢纽工程模型试验,给出实际工程达到良好引水稳流效果的指导建议;王田田等^[9]对溢洪道泄槽弯道段设置导流墙对水流特性影响做了实验研究。孙娟等^[10]、李锦艳等^[11-12]对“635”水库多弯段溢洪道内加设导流墩糙条等辅助消能工做了试验研究;以上方法均可以用来消减弯道环流及冲击波,改善溢洪道内水流流态。本文借助物理模型试验方法,通过在溢洪道弯道段布设不同形式的辅助消能工,分析弯道设置单一导流墩和导流墩糙条联合布设形式对水面结构改善效果、凹凸岸水面差及水流动力轴线的影 响,进而阐明弯段溢洪道导流墩、糙条对水流结构的影响。

2 试验概况

2.1 模型装置

新疆引额济克“635”水库溢洪道有5个弯道段,当溢洪道下泄流量为 $800\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时,凹凸岸水深及流速相差较大,两弯道之间的顺直段无法满足水流流出弯道后纵向流速分布至正常所需要的调整段长度。为了解决弯道水流飞溅紊乱问题,孙娟等^[10]、李锦艳等^[11]等通过模型试验研究了应用于“635”水库多弯段溢洪道糙条和导流墩联合运用的组合方式,研究成果已经过“635”水库溢洪道实际工程验证。

为深入研究导流墩与糙条消能工对弯段溢洪道水力特性的影响,参考“635”工程,试验设计模型类似原型工程,依据重力相似准则,长度比尺为50,对布置不同形式消能工的 60° 弯段溢洪道进行模型试验研究。

试验模型分为矩形床面模型和导流墩、糙条模型,均由亚克力有机玻璃板制作而成。溢洪道模型

断面宽度 $B = 500\text{ mm}$,弯道段采用 $R/B = 2.2$ 的薄壁弯道(R 为弯道中心线曲率半径),为避免来流对弯道水流的影响,模型上游进口段布置长度 $L_1 = 600\text{ mm}$ 过渡直段,进口段后接中心角为 60° 弯道段,弯道末端接长度 $L_2 = 1\ 400\text{ mm}$ 出口直线段,使得水流能够平顺下泄,模型沿程底坡系数 $i = 0.025$ 。导流墩模型为长方体,其长宽高分别为:200、13.2、64 mm;糙条为贯穿凹凸岸的“梯形”长方体,宽为30 mm,高度从24 mm渐变为12 mm。整个模型试验装置系统包括稳流前池(池内设置调流板)、进口段、弯道段、下游调整段、量水堰、地下水库、水泵。模型平面布置图如图1(模型平面布置及导流墩标号位置图)所示。

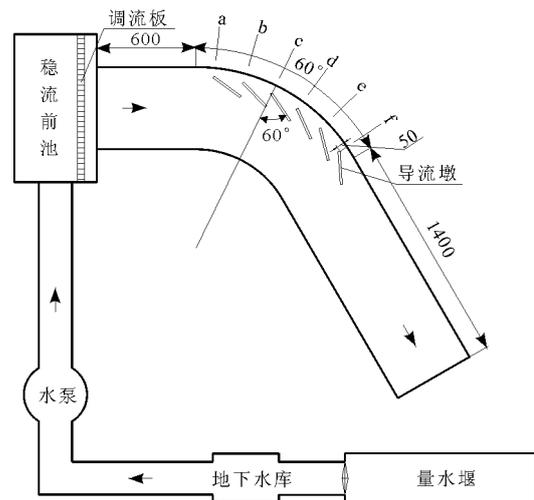


图1 模型平面布置及导流墩标号位置图(单位:mm)

2.2 测量断面

定义横断面为垂直来流方向,纵断面为顺水流方向。

横断面进口段编号为0~5共6个断面,断面间隔距离为 $0.2 L_1$;横断面弯道段编号为6~15共10个断面,沿弯道段径向方向每隔 6° 布置一个断面;横断面出口段编号为16~25共10个断面,断面间隔距离为 $0.1 L_2$,总共26个断面。

纵断面从弯道凸岸(右岸)至凹岸(左岸)分为0~10号共11个纵断面,断面间距为 $0.1 B$ 。沿水平面方向共布置了286个测点。试验测量要素包括水深测量与流速测量。

水深量测采用精度为 0.01 mm 的测针进行测量,3次读数取其平均值;流速测量采用毕托管,量测点位置距底板床面 $1/3$ 水深处,记此流速为该断面垂向平均流速。水深、流速网格测量断面如图2(横、纵断面网格测点布置图)所示。

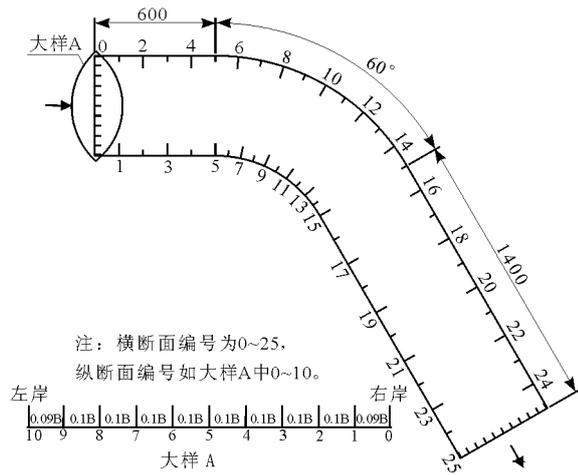


图2 横、纵断面网格测点布置图(单位:mm)

2.3 试验方案

试验依据导流墩、糙条在溢洪道内的摆放位置不同,针对弯段溢洪道内有无导流墩与糙条、单一导流墩布设位置不同、单一形式导流墩数量不同、导流与糙条联合布置4种条件,设置了共5种试验方案。详细试验方案说明如表1所示。

经放水试验观测,原方案(无导流墩和糙条)在小流量下溢洪道内水流变化较平缓,且加设导流墩未能淹没溢洪道内辅助消能工,导致水流在导流墩前后呈现明显“分割”现象,本文控制恒定流量 $Q = 23 \text{ L/s}$,导流墩与轴向半径夹角为 60° ,糙条与轴向半径夹角为 22° 。此时,上述5种试验工况下的水位均在导流墩与糙条以上(即淹没导流墩与糙条)。

表1 试验方案说明

试验方案	说明
1	导流墩分别布设在 a、c、e 断面,与左岸(凹岸)间距均为 50mm
2	导流墩分别布设在 b、c、d、e、f 断面,与左岸间距均为 50mm
3	导流墩分别布设在 a、b、c、d、e、f 断面,与左岸间距均为 50mm
4	导流墩分别布设在 b、d、f 断面,对应左岸间距分别为 50mm、100mm、100mm
5	导流墩分别布设在 b、d 断面,对应左岸间距分别为 50mm、100mm,糙条加设在弯段以及下游连接段进口,其间距为 220mm

注:弯道段内导流墩布设起始标号位置为 6° ,沿轴向水流方向每 10° 布置一根导流墩,用标号 a、b、c、d、e、f 分别代表导流墩的布设断面位置;导流墩与左岸间距是指其上游迎水面与边墙的距离,导流墩标号位置图见图1。

3 试验结果与分析

3.1 典型断面水面结构改善效果分析

由于弯道横向环流作用,弯道表层水流由凸岸流向凹岸,底层水流则由凹岸指向凸岸。考虑到溢洪道弯曲的边墙对水流的扰动而产生的冲击波,冲击波会在水体表面形成水波,使得水面变化极其复杂。为了反映加设单一导流墩布置形式和导流墩与糙条联合布设形式对弯道水流的改善效果,本文引入横向水面差降低率 α 和断面水流均匀度 β 两个计算公式^[13]来分析水面结构的改善效果。

$$\alpha = \frac{\Delta H_0 - \Delta H_1}{\Delta H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为同一断面凹凸岸横向水面差降低率,%; ΔH_0 为无导流墩和糙条情况下凹凸岸水面差,cm; ΔH_1 为加设导流墩和糙条情况下凹凸岸水面差,cm。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n |H_i - H_0|}{nH_0} \quad (2)$$

式中: β 为横断面水流均匀度; H_i 为断面某一测点水深,cm; H_0 为某一横断面平均水深,cm; n 为水深测量点数。

可以看出,水面差降低率 α 值越大,横断面水流均匀度 β 值越小,导流墩和糙条对水流改善效果越好;选取弯道段 6[#]横断面、10[#]横断面(近似作为弯顶横断面)、14[#]横断面及 20[#]横断面为研究对象,对比原方案与5组试验方案,分别计算断面的 α 与 β 值,计算结果见表2(典型断面凹凸岸横向水面差降低率)、表3(典型横断面水流均匀度)所示。

表2 典型断面凹凸岸横向水面差降低率 α %

横断面号	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
6 [#]	-180.77	-356.40	207.69	-291.03	-289.74
10 [#]	79.56	93.63	60.49	70.92	84.50
14 [#]	38.06	73.09	60.92	77.03	96.74
20 [#]	131.23	112.64	121.19	162.08	134.95

由表2典型断面凹凸岸横向水面差降低率可以看出:当水流刚进弯段进口处(横断面6[#])时,5组试

验方案的 α 值均出现较大偏差。其原因是:原方案中水流刚由前面直线型进口段流经弯道进口,水流受凹凸岸水面差引起的侧压力与弯道形成的离心力作用,而侧压力的方向与离心力方向相反,且二者的合力方向即为水流的方向。此时凹凸岸水面差值较小,继而侧压力较小,水流主要受弯道离心力作用,水流进入弯道进口时(6#横断面),主流位置仍然处于弯道半径中轴线位置,故横向水面相对较平缓。无论在弯道内增设单一形式的导流墩或导流墩和糙条联合形式,在弯道进口凹岸附近位置,水深均被抬高,此时凹凸岸水面差比原方案大,所以经计算所得 α 值为负值。水流流经弯顶断面至弯道出口断面后,从横断面 10#、横断面 14#可以看出,5 种试验方案均能较好地改善溢洪道内水流结构形态。当水流出弯段后,由于边墙对水流的扰动影响,使得下游调整段内出现冲击波,继而在水体表面形成水波。观测到横断面 20#横向凹凸岸水面差为负值,即此时水深凹岸低、凸岸高。而在 5 种试验方案下横向凹凸岸水面差 α 均为正值,其计算值均大于 100%。综合各典型横断面的水面差的降低率,方案 5 优于方案 1~4。

分析表 3 典型横断面水流均匀度,各试验方案与原方案相比,除横断面 6#的 β 值大于原方案,其余各断面 β 值均小于原方案。说明在弯道进口段的水面结构改善效果较差,而在其余横断面的水流调整效果较好。计算方案 5 与原方案水流均匀度改善百分比可看出:在溢洪道弯道段内可以达到 89% 以上水面结构改善效果,方案 5 优于其它试验方案。

表 3 典型横断面水流均匀度 β

横断面号	原方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
6#	0.045	0.208	0.215	0.082	0.195	0.177
10#	0.485	0.103	0.061	0.110	0.106	0.053
14#	0.539	0.288	0.232	0.248	0.147	0.019
20#	0.233	0.111	0.078	0.076	0.133	0.072

综上所述,方案 5 比其他试验方案效果更好。即在本文试验因素条件下,导流墩布设位置和个数均可以一定程度地改善溢洪道内水面结构形态;单一形式导流墩布设于溢洪道凹岸处,其对弯道内水面结构改善效果不如导流墩和糙条联合布置形式。可为实际工程设计提供经验依据。

3.2 弯道段横断面最大水面差和最大水深位置比较

3.2.1 试验方案横断面凹凸岸最大水面差 根据

实测有无导流墩和糙条条件下,溢洪道弯道段各横断面凹凸岸最大水面差,经计算,取原方案和 5 种试验方案各个横断面凹凸岸最大水面差的最大值,结果见图 3。

由图 3 可以看到,各试验方案横断面凹凸岸最大水面差较原方案有明显降低。即说明单一导流墩布设和导流墩、糙条联合布设形式均能一定程度地降低横断面凹凸岸的最大水面差。对比分析各试验方案,方案 1~4 对横断面凹凸岸最大水面差降低效果不如方案 5。对比原方案,方案 5 横断面凹凸岸最大水面差由 8.8 cm 降至 3.6 cm,降低率达到 59%。

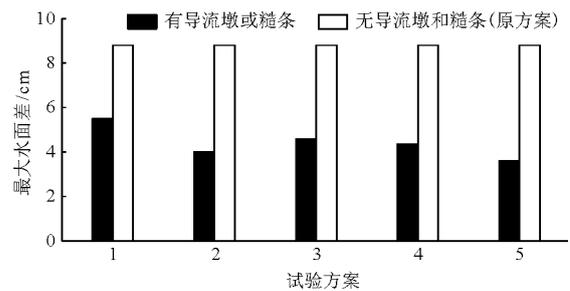


图 3 各方案弯道横断面凹凸岸最大水面差

3.2.2 最大水面差及最大水深发生的位置 绘制不同试验方案溢洪道弯道段凹凸岸水深沿程变化曲线图,如图 4 所示:原试验方案溢洪道弯道段凹凸岸水深变化符合弯道水流基本运动规律,即凹岸水深大、凸岸水深浅。随着水流在弯道中运动,凹凸岸水面差逐渐增大,在横断面 14#位置达到最大值,此时凸岸水深几乎为零。最大水深位置发生在横断面 9#,即 2/5 弯道横断面。方案 1~4 为单一导流墩形式,观察此 4 种方案对凹凸岸水深影响,其最大水面差位置依次为横断面 14#、横断面 13#、横断面 13#和横断面 9#。最大水深发生位置依次为横断面 8#、横断面 13#、横断面 7#和横断面 13#。同理,由方案 5 导流墩糙条联合布置形式对最大水面差及最大水深发生位置影响,依次发生在横断面 7#和横断面 12#位置。5 组不同方案对比原试验方案可知,弯道横断面凹凸岸最大水面差及最大水深发生的位置都有所不同。说明在导流墩及糙条作用下,弯道段水流受到“前导”、“后消”作用,逼迫底层水流向弯道凸岸运动,表层水流指向凹岸,从而改变了原泄槽内水流的运动轨迹。记录最大水面差和最大水深发生位置的频率,1/5~2/5 弯道横断面和 4/5 弯道横断面相邻上下游位置可作为此类弯道水流流态问题较关键的研究断面。

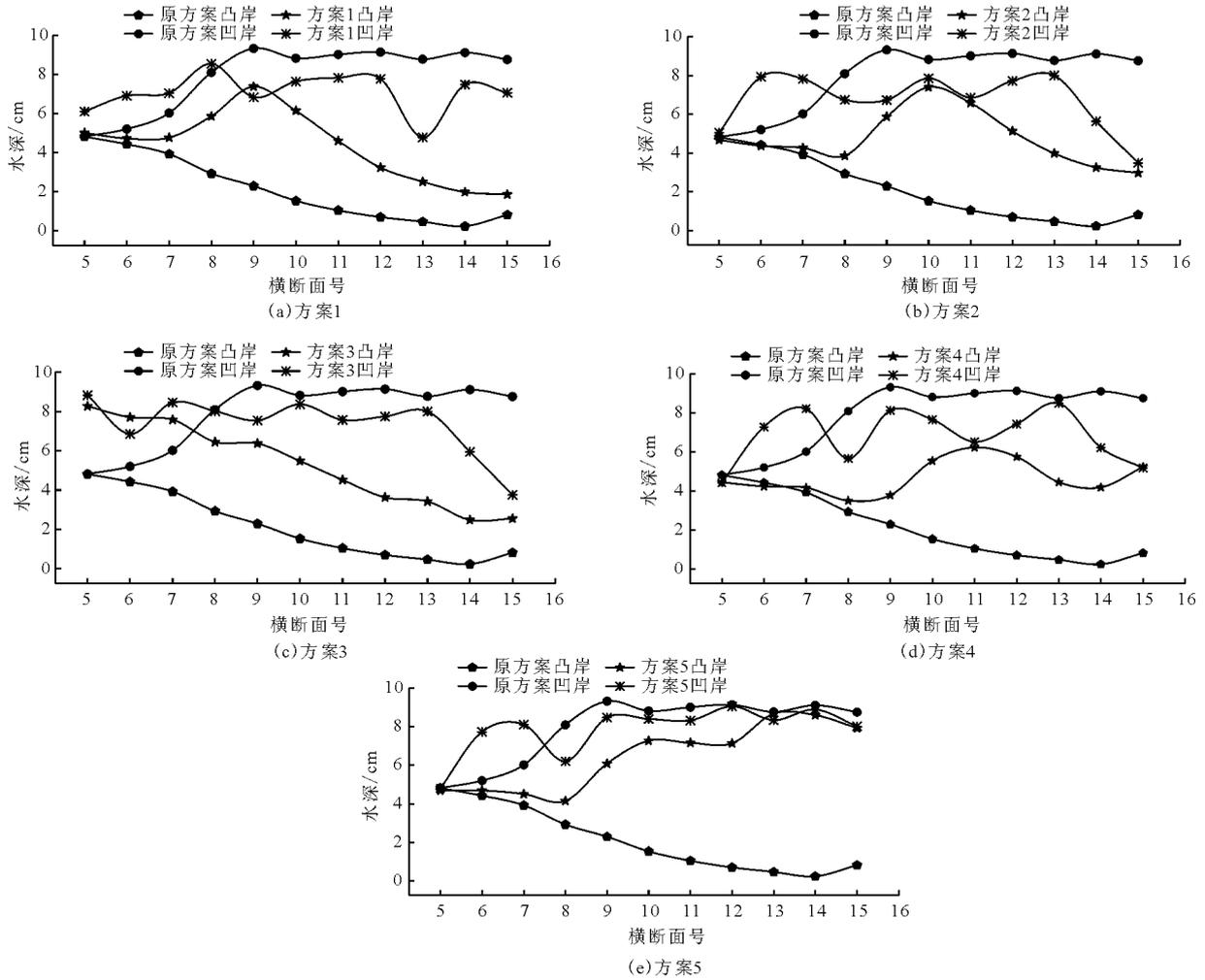


图4 不同试验方案弯道段横断面凹凸岸沿程水深变化

3.3 沿程水流动力轴线

水流动力轴线为各横断面最大纵向水深平均流速所在点连线的水平投影,又称为主流线^[14-15]。根据测量结果得到不同试验方案的水流动力轴线,如图5所示。

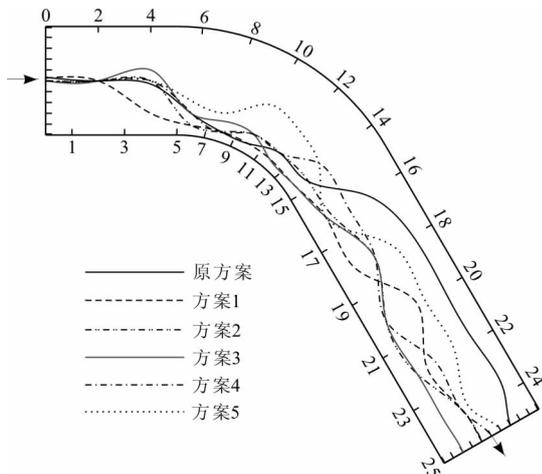


图5 各方案水流动力轴线沿程变化图

从图5各方案动力轴线的位置变化可以明显看出:由于水流进入弯道后受到离心力的作用,其动力轴线在整个弯道段均呈现向凸岸偏移的趋势。然而不同试验方案对应的水流动力轴线向凸岸偏移的位置不同。方案1~4弯道段的水流动力轴线位置较原方案变化不大,而方案5的动力轴线有向弯道中轴线偏移的趋势,表现在上游进口段的动力轴线变化幅度较平缓,但在下游调整段内,5组方案水流动力轴线与原方案相比,原方案动力轴线主要位于距凹岸 $0.2B$ 附近位置,各方案动力轴线则主要集中在距离凸岸 $0.2B \sim 0.6B$ 范围内。说明加设导流墩或导流墩和糙条联合布置形式均能较好地调整水流从弯道段流出以后的主流位置,使得水流向弯道中轴线位置偏移。不同试验工况下,观察整个模型中水流动力轴线位置变化,方案5优于其他方案。即糙条联合导流墩辅助消能工布设形式对整体水流动力轴线有更好的调整效果。

4 结 论

本文通过对 $R/B = 2.2$ 的 60° 弯段溢洪道进行模型试验,得出如下主要结论:

(1)通过布置单一导流墩与糙条联合导流墩辅助消能工对比研究发现,联合辅助消能工能够更好地制约弯道环流的产生、改善水面流态、降低水面横比降,并能够有效地避免下游调整段冲击波的形成。

(2)通过对不同试验方案横断面凹凸岸最大水深及最大水面差发生频率分析,得到加设辅助消能工后溢洪道 $1/5 \sim 2/5$ 弯道横断面和 $4/5$ 弯道横断面相邻上下游位置发生频率较大,且在糙条联合导流墩辅助消能工试验方案下横断面最大水面差降低率到了 59%。因此,大流量情况下宽浅溢洪道 $1/5 \sim 2/5$ 弯道横断面和 $4/5$ 弯道横断面相邻上下游位置可作为此类弯道较关键的断面研究位置。

(3)对比原方案,5组试验工况下的沿程水流动力轴线由原方案下距离凹岸 $0.2B$ 附近位置向距离凸岸 $0.2B \sim 0.6B$ 范围内偏移,且糙条联合导流墩辅助消能工能够更好地调整水流趋于弯道中轴线位置;相比同类辅助消能工,糙条联合导流墩辅助消能工布置在弯道内更加节约工程造价,且施工较方便,可为实际工程设计提供理论参考依据。

参考文献:

[1] 哈岸英,刘磊.明渠弯道水流运动规律研究现状[J].水利学报,2011,42(12):1462-1469.
[2] 张红武,吕昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社,1993.

[3] 周勤,伍超,赵元弘,等.“S”型溢洪道水流特性试验与数值模拟研究[J].水力发电学报,2005,24(3):78-82.
[4] 谢谦城,苗伟波,戴文鸿,等.水沙变化条件下黄河下游连续弯段水流特性研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):157-161+168.
[5] 邱秀云,侯杰,孙涛,等.一种消除陡坡弯道急流冲击波的新措施[J].水力发电,1998(11):18-20+64.
[6] 魏祖涛,侍克斌,陈成林,等.溢洪道加糙对水流流态影响的试验研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(5):76-78.
[7] 白兆亮,李琳,王苗,等.某渠首工程整体水工模型试验研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):164-168.
[8] 徐乐,牧振伟,蒋健楠,等.新疆盖孜河塔什米里克引水枢纽引水防沙试验研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):162-168.
[9] 王田田,常倩,张庆华,等.导流墙对弯道横断面水面差影响实验[J].南水北调与水利科技,2016,14(6):148-153+164.
[10] 孙娟,陈晓梅.导流墩和糙条对溢洪道弯道水流的调整作用[J].新疆水利,2001(6):6-9.
[11] 李锦艳,牧振伟,李新.多弯段溢洪道加设导流墩糙条后水流三维数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):91-95.
[12] 李锦艳.多弯段溢洪道糙条对水流消能导流作用研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
[13] 翟兴涛.溢洪道泄槽不同弯道条件与导流墙布置方案水流特性试验研究[D].泰安:山东农业大学,2014.
[14] 王博.连续弯道水流及床面变形的试验研究[D].北京:清华大学,2008.
[15] 马森,李国栋,宁健.小宽深比条件下弯道水流特性的试验研究[J].工程科学与技术,2017,49(6):38-46.