

透水斜槛参数对溢洪道弯道水流改善效果的影响

张靖¹,滕晓敏²,张庆华¹

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022)

摘要:为研究溢洪道泄槽弯道布置不同透水斜槛的水流改善效果,进行室内水工模型试验,对不同透水斜槛方案的弯道水流改善效果进行分析比较。结果表明:弯道布置透水斜槛能够改善水流条件,提高弯道水面均匀度,减小横断面水面差;当透水斜槛较高、条数较多而流量又较小时,将出现弯道凸岸水面高于凹岸的现象;利用回归分析方法,建立了考虑透水槛高、斜槛条数及透水率等参数的弯道水面改善效果预测模型,可供工程设计参考。

关键词: 弯道水流;改善效果;透水斜槛;槛高;透水率

中图分类号:TV131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0025-07

Impact of permeable oblique sill parameters on bend flow improvement effect in a spillway//ZHANG Jing¹, TENG Xiaomin², ZHANG Qinghua¹(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian271018, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, Jinan250022, China)

Abstract: In order to investigate the improvement effect of the arrangement parameters of oblique sills at the bend flow in the spillway, indoor hydraulic model experiments were carried out. Improvement effect of water flow in the bend of each scheme were analyzed and compared. The results show that the arrangement of oblique sills can improve the bend flow condition, and improve the evenness of water surface meanwhile reduce the water surface difference in cross-sections. Furthermore, in the condition that the number of permeable oblique sills is higher with larger sill height and lower discharge, the water level at the convex bank is higher than that at the concave bank where maximum water surface difference appear. The regression analysis method was used to establish the prediction model of the improvement effect of the water surface in the bend considering the parameters of the permeable oblique sill, including the sill height, sill number and permeability rate, which can be used as a reference for engineering design.

Key words: bend flow; improvement effect; permeable oblique sill; sill height; permeability rate

在溢洪道弯道布置斜槛是改善弯道水流的工程措施之一,利用斜槛可以对弯道中流动的水流特性进行调整,比如消减冲击波,减小横断面上的水位差等。国内外对此进行了较多的研究,取得了较为丰富的研究成果。Knapp^[1]首次提出在弯道底部沿渠底横向设置与水流方向呈一定角度的斜墙(即斜槛)来调整弯道水流,用来降低弯道凹凸岸水面差;陈鑫荪^[2]为解决输水洞弯道急流中出现的冲击波,提出用多排斜槛迫使弯道内的高速水流转向,以此来抵消冲击波的形成;杨玲霞等^[3]对斜槛的形状进行改进,用梯形断面的斜槛来调节弯道水流中的水流运动与流场分布;吴宇峰等^[4]探讨了不同斜槛参数因素对导流效果的影响;张领护^[5]结合实际工程对弯道内布置不同条数的斜槛、不同斜槛布置角度的弯道水流调整效果进行了研究;魏明方等^[6]在凤

凰水库采用了导流墙与渠底抬高综合的方法,改善弯道各断面的动量分配,减小了因急流弯道而形成的冲击波作用;余雄杰等^[7]在凤凰水库溢洪道中泄槽弯道1/4、2/4、3/4处布置了3条角度为50°的斜槛,试验表明使用此方法可以明显改善弯道水流;周勤等^[8]用数值模拟方法对弯道采用斜槛结合斜底方案的水流改善效果进行了模拟和探讨;张洁^[9]在改善溢洪道弯道水流措施中,研究了在弯道均匀布置5条角度为45°的斜槛对弯道水流的改善效果;周星等^[10]以某核电站厂区山洪消能工程为例,探讨了斜槛的间距、角度等影响斜槛设计的因素,并根据试验结果提出了合理的斜槛设计方法;王鑫等^[11]比较了布置5道矩形与梯形斜槛的弯道流态调整效果,认为矩形斜槛优于梯形斜槛;Pagliara等^[12]通过物理模型试验,研究了堆石形成的斜槛的水流特性,

并对冲刷效果进行了研究;张婧等^[13]通过对不同形状结构体对河道水流在占宽度比、阻流面积比和阻流流量比等方面的影响进行了研究;滕晓敏等^[14-15]对溢洪道泄槽弯道布置透水斜槛的水流特性及水流改善效果进行了试验研究。

以上研究表明,斜槛是改善溢洪道弯道水流条件的有效工程措施之一。但由于不透水斜槛在高速水流情况下,斜槛背水一侧可能出现无水低压区,发生气化现象,从而造成对斜槛的破坏^[16]。因此,本文提出了透水斜槛,并对弯道水流改善效果进行了初步分析^[15]。在此基础上,分析槛高、斜槛透水率、斜槛条数对弯道水流改善效果的影响,为进一步研究透水斜槛及其工程应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验模型

试验模型主体为溢洪道泄槽,包括上下游直段和弯道段。模型泄槽采用矩形断面,净宽 $b = 500\text{ mm}$,弯道中心线半径 $R = 1\,200\text{ mm}$,中心角为 71.62° ,底坡为 0.02 。透水斜槛在弯道段等间距布置,斜槛轴线与弯道半径角度为 45° 。透水斜槛方案设计考虑的因素包括斜槛条数、槛高、斜槛透水率(斜槛透水孔面积与斜槛面积之比)等,试验方案见表 1,其中槛高 $h = 20\text{ mm}$ 、 30 mm 、 40 mm 分别为低槛、中槛、高槛方案,方案 16 弯道段不采用任何工程措施,为对比方案。图 1 为 5 条透水斜槛布置示意图。透水斜槛为矩形断面,长度为 710 mm (与弯道凹凸岸不连接),厚度为 10 mm ,采用圆形透水孔,透水孔径见表 1。

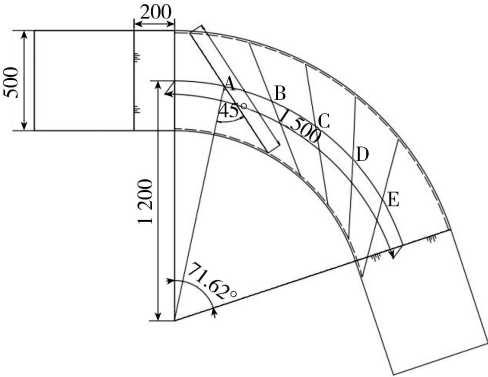


图 1 溢洪道弯道斜槛布置(单位:mm)

1.2 试验测量

a. 水位测量。模型段垂直水流方向设置 17 个测量横断面(图 2),其中弯道段均匀布置 13 个横断面,断面编号为 3—3、4—4、…、15—15。沿水流方向对称布置 5 条纵向测线(A—A、B—B、…、E—E),包括泄槽底板中心线、距中心线两侧 $1/4$ 槽宽处、左

右边墙处纵横断面的交点为水位测点。水位测量采用重庆华正水文仪器有限公司生产的 SX40-1 型数显水位测针。

表 1 透水斜槛试验方案

方案编号	斜槛条数	斜槛位置	槛高/mm	透水孔径/mm	透水率/%
1			20	12	27.9
2			20	14	37.9
3			20	16	49.5
4		5 道斜槛分别布置	30	14	25.3
5	5	在弯道 1/6、2/6、	30	16	33.0
6		3/6、4/6、5/6 圆弧处	30	18	41.8
7			40	10	19.3
8			40	12	27.9
9			40	14	37.9
10		4 道斜槛分别布置	20	12	27.9
11	4	在弯道 1/5、2/5、	30	18	41.8
12		3/5、4/5 圆弧处	40	14	37.9
13		3 道斜槛分别布置	20	12	27.9
14	3	在弯道 1/4、2/4、3/4	30	18	41.8
15		圆弧处	40	14	37.9
16	0				

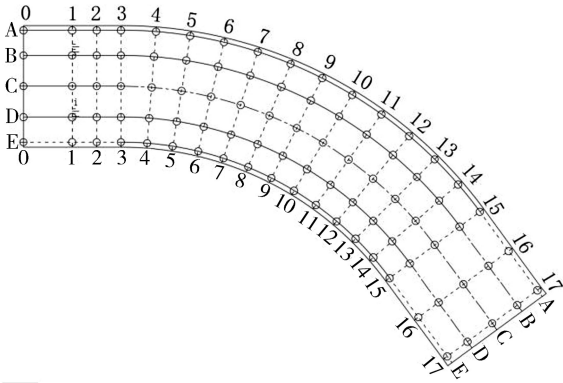


图 2 水位测点布置

b. 试验流量。每个试验方案的 5 种流量分别为 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $80\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $120\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $150\text{ m}^3/\text{h}$,试验流量满足溢洪道泄槽水流为急流的条件,即不设置斜槛时,溢洪道弯道开始处的弗劳德数 Fr 大于 1.0 。

2 结果与分析

2.1 分析指标

以弯道水面均匀度、弯道水面均匀度提高率、弯道横断面最大水面差及弯道横断面最大水面差减少率 4 个指标分析透水斜槛参数对弯道水流改善效果的影响^[13-15]。

弯道水面均匀度按下式计算:

$$f_{wj} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_{ji} - \bar{h}_j|}{n \bar{h}_j} \right) \times 100\% \tag{1}$$

$$f_w = \frac{\sum_{j=1}^m f_{wj}}{m} \tag{2}$$

式中: f_w 为弯道水面均匀度; f_{wj} 为第 j 个横断面水面均匀度; h_{ji} 为第 j 个横断面第 i 个测点的水深; $\bar{h}_j$ 为第 j 个横断面平均水深; n 为横断面水深测点数; m 为弯道横断面数。

弯道水面均匀度提高率按下式计算:

$$f_c = \frac{f_{ej}}{m} = \frac{\sum_{j=1}^m (f_{wej} - f_{wnj})}{mf_{wnj}} \times 100\% \tag{3}$$

式中: f_c 为弯道水面均匀度提高率; f_{ej} 为第 j 个横断面的水面均匀度提高率; f_{wej} 、 f_{wnj} 分别为有、无斜槛情况下第 j 个横断面水面均匀度。

弯道横断面最大水面差按下式计算:

$$\Delta h_m = \max |h_{j1} - h_{j2}| \tag{4}$$

式中: Δh_m 为弯道横断面凹凸岸最大水面差; h_{j1} 、 h_{j2} 分别为弯道第 j 个横断面处凹、凸岸水深。

弯道横断面最大水面差减少率按下式计算:

$$f_d = \frac{\Delta h_{mm} - \Delta h_{me}}{\Delta h_{mm}} \times 100\% \tag{5}$$

式中: f_d 为弯道横断面最大水面差减少率; Δh_{me} 、 Δh_{mm} 分别为有、无斜槛情况下弯道横断面最大水面差。

2.2 水面均匀度、水面均匀度提高率、最大水面差减少率影响分析

依据各方案5种流量下测量断面测点水深的试验结果,得到各试验方案的水面均匀度、水面均匀度提高率、最大水面差减少率,见表2。由表2可知:①各种透水斜槛条件下弯道水面均匀度均大于无斜槛条件,水面均匀度提高率及最大水面差减少率均大于0;②弯道布置透水斜槛后水面均匀度介于86.6%~94.4%之间,水面均匀度相比之前提高了16.9%~40.5%,最大水面差减少率超过25.9%。说明弯道布置透水斜槛能够改善弯道水流,使弯道水流更加均匀,因此弯道设置透水斜槛是可行的。

表2 不同斜槛条数、不同槛高下的水面改善效果

槛高/ mm	斜槛 条数	水面均匀度/%	水面均匀度 提高率/%	水面差减少率/%
20	3	86.6~89.4	16.9~31.8	25.9~53.7
	4	88.8~91.3	20.6~37.6	37.1~70.5
	5	87.3~90.8	17.6~36.0	37.6~67.8
30	3	90.7~92.4	23.3~38.4	43.2~60.3
	4	92.9~93.5	23.9~39.9	51.7~79.1
	5	92.6~94.7	24.9~40.2	65.5~82.5
40	3	92.0~93.2	24.1~39.1	54.8~68.1
	4	93.4~94.4	24.7~40.5	63.0~83.9
	5	92.1~94.4	24.1~39.5	75.5~86.8

2.2.1 斜槛条数的影响

依据表2可知:①最大水面差减少率随着弯道布置斜槛数量的增加而增加;②斜槛条数对均匀度和提高率影响较小,对水面差减少率影响较大。

2.2.2 槛高的影响

依据表2可知:①最大水面差减少率随着弯道布置槛高的增加,弯道水面改善效果指标增加。②槛高对均匀度和提高率影响较小,对水面差减少率影响较大。③不同的槛高,水面差减少率差别较大。虽然斜槛数量对弯道水面均匀度和提高率也有一定的影响,但当斜槛数量超过一定条数时,其影响并不大。由表2可知,4条和5条斜槛的弯道水面均匀度平均值分别为92.8%、93.2%,相差仅为0.4%,水面均匀度提高率平均值分别为30.8%、31.3%,相差仅为0.5%。

2.2.3 斜槛透水率的影响

表3为5条斜槛时不同透水率下的水面改善效果,表中各水面改善效果值均采用5种流量的平均值。由表3可知:透水率对弯道水面均匀度改善效果有一定影响,但不同槛高透水率的影响规律不一样,低槛(槛高20mm)条件下,透水率越低弯道水面改善效果越好;而中高槛(30mm、40mm)条件下,透水率大的相对较好,但不同透水率相同流量、槛高条件下,弯道水面均匀度及提高率值差别不大。低槛条件下透水率对水面改善效果影响较大,透水率越低越好;而中高槛不同透水率之间水面的改善效果差别不大。因此,就槛高和透水率而言,槛高是影响弯道水面改善效果的主要因素。

表3 5条斜槛不同透水率下的水面改善效果

槛高/ mm	透水 孔径/mm	透水率/ %	水面 均匀度/%	水面均匀度 提高率/%	水面差 减少率/%
20	12	27.9	90.5	27.7	57.7
	14	37.9	89.3	26.2	48.5
	16	49.5	88.5	25.1	44.0
30	14	25.3	93.6	31.9	77.9
	16	33.0	93.7	31.9	73.0
	18	41.8	94.1	32.5	74.8
40	10	19.1	93.0	30.9	83.2
	12	27.9	93.5	31.6	80.6
	14	37.9	93.6	31.7	78.7

2.2.4 Fr的影响

根据试验结果,绘制不同斜槛条数及槛高条件下, Fr 分别为1.35、1.28、1.23、1.22、1.19时的水面均匀度提高率,见图3。由图3可知,相同斜槛条数下,弯道水面均匀度提高率随来流的 Fr 增加而增加。由此说明,弯道来流的 Fr 对弯道水面改善效果有影响, Fr 越大,水流改善效果越明显。

2.3 弯道横断面最大水面差分析

2.3.1 斜槛透水率的影响

根据弯道布置5条斜槛的水深试验结果,绘出槛高分别为20mm、30mm、40mm,不同流量、不同斜槛透水率条件下,弯道横断面最大水面差如图4所示。

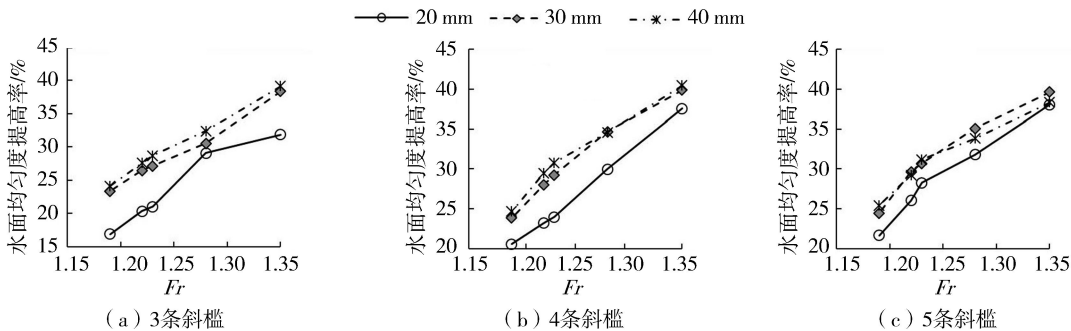


图3 不同斜槛条数及槛高下 Fr 对弯道水面均匀度提高率的影响

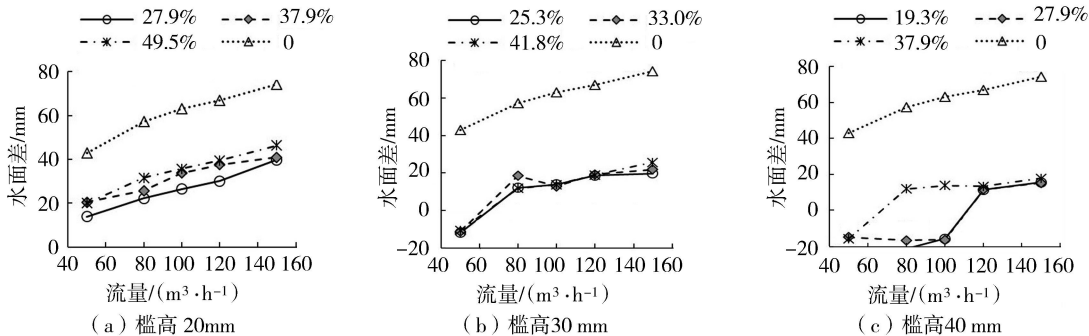


图4 不同流量、不同透水率下弯道段横断面最大水面差

由图4可知:①各种槛高和透水率情况下,弯道设置透水斜槛后的最大横断面水面差均小于弯道无斜槛情况;②除个别情况(槛高30 mm,流量80 m³/h)外,斜槛透水率最小的弯道横断面水面差最小,透水率最大的斜槛弯道横断面水面差最大;③不同透水率的弯道横断面最大水面差值差别较大(流量50 m³/h除外),不同透水率的弯道横断面最大水面差值相差不大;④最大水面差出现4处负值,即凸岸水面比凹岸高,而且槛高越大、流量越小,越容易出现这种情况。

上述分析说明:透水斜槛能够减少弯道横断面最大水面差。一般情况下,透水率越少弯道横断面最大水面差越小、减少率越大,但从最大水面差的数值看,低槛的不同透水率对水面差的影响较大,而中高槛条件下不同透水率之间的差别不大。另外,中高槛在小流量条件下,弯道横断面最大水面差可能出现负值,即在最大水面差断面凸岸水面比凹岸高。

2.3.2 槛高的影响

根据试验结果,得出弯道分别布置3条、4条、5条斜槛,槛高分别为20 mm、30 mm、40 mm条件下,弯道横断面最大水面差及减少率,如图5所示。

由图5可知:①各种斜槛条数及流量条件下,不同槛高对应的弯道横断面最大水面差有较大的差别,以槛高40 mm的水面差最小(除3条斜槛流量150 m³/h外),槛高20 mm的最大(除3条斜槛流量80 m³/h、100 m³/h外);②4条斜槛在流量50 m³/h、5条斜槛在流量50 m³/h、80 m³/h、100 m³/h时,弯道最大水面差为负值。说明当流量一定时,增加槛高和条数能够使凹凸岸水面改变,使凸岸水面高于凹岸水面。

上述分析说明,槛高对断面最大水面差有较大影响,相同流量条件下,槛高越大横断面最大水面差越小,而且当斜槛达到一定数量时,中高槛在小流量条件下,弯道横断面最大水面差可能出现负值,即最

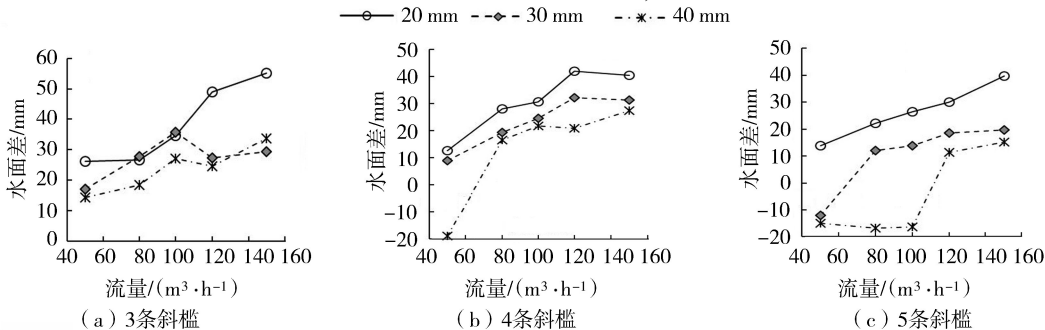


图5 不同斜槛条数及槛高下弯道段横断面最大水面差

大水面差所在断面的凸岸水面比凹岸高。

2.3.3 透水斜槛数量的影响

根据试验结果,得出弯道槛高分别为 20 mm、30 mm、40 mm,不同斜槛条数条件下弯道横断面最大水面差及减少率,如图 6 所示。由图 6 可知:①除个别情况外,5 条斜槛的弯道横断面最大水面差最小,3 条斜槛的最大,而且从水面差数值看差别较大;②当斜槛条数增加到一定数量时,最大水面差所在断面的凸岸水面高于凹岸。由此说明,弯道布置的斜槛数量对横断面最大水面差有影响,一般情况下斜槛数量越多,弯道横断面最大水面差越小,斜槛数量达到一定数量时,最大水面差断面的凸岸水面高于凹岸。

2.3.4 流量的影响

根据试验结果,绘制弯道分别布置 3 条、4 条、5 条斜槛,以及 50 m³/h、80 m³/h、100 m³/h、120 m³/h、150 m³/h 这 5 种流量下的弯道段最大水面差,如图 7 所示。由图 7 可知,相同斜槛条数、相同槛高和透水率条件下,弯道段横断面最大水面差随流量的增大而增大。

2.4 弯道水面改善效果预测模型

由上述分析可知,在弯道轴线半径、弯道底坡一定的条件下,弯道水面改善效果与斜槛的布置条数、槛高、透水率等因素有关。本文依据表 1 中不同参数透水斜槛得到 75 组弯道水面改善效果数据,利用回归分析方法,得到弯道水面均匀度、弯道水流均匀度提高率和弯道横断面最大水面差减少率预测模型如下:

f_w = 89.7475N^{0.03}S^{0.004}\left(\frac{\Delta h_z}{d}\right)^{-0.045} \tag{6}

f_c = 28.1627N^{0.15}S^{0.048}\left(\frac{\Delta h_z}{d}\right)^{-0.492} \tag{7}

f_d = 66.6863N^{0.547}S^{-0.126}\left(\frac{\Delta h_z}{d}\right)^{-0.593} \tag{8}

式中:f_w、f_c、f_d 分别为弯道水面均匀度、弯道水流均匀度提高率和弯道横断面最大水面差减少率;N 为弯道布置的斜槛条数;S 为斜槛透水率;d 为透水槛高;Δh_z 为弯道没有任何工程措施条件下的弯道横断面最大水面差。Δh_z 可按下式计算:

\Delta h_z = \frac{bv^2}{gR} \tag{9}

式中:b 为泄槽宽度;v 为断面平均流速;R 为弯道轴线半径;g 为重力加速度。

式(6)~(8)的相关系数 R 分别为 0.689、0.812、0.870,检验值 F 分别为 21.44、45.71、73.61,均满足回归检验要求。式(6)~(8)适用的斜槛条件如下:斜槛布置角度为 45°,斜槛长度近似按 l≈√2b 设计,透水率 0<S<50%,且斜槛在弯道内均匀布置。其他布置形式的斜槛可参考使用。另外,本试验得到无斜槛条件下,50 m³/h、80 m³/h、100 m³/h、120 m³/h、150 m³/h 这 5 种流量的弯道进口断面 Fr 分别为 1.35、1.28、1.23、1.22、1.19,均大于 1.0,因此,式(6)~(8)适用的水力条件如下:弯道无工程措施时弯道为急流。

弯道横断面最大水面差可按下式估算:

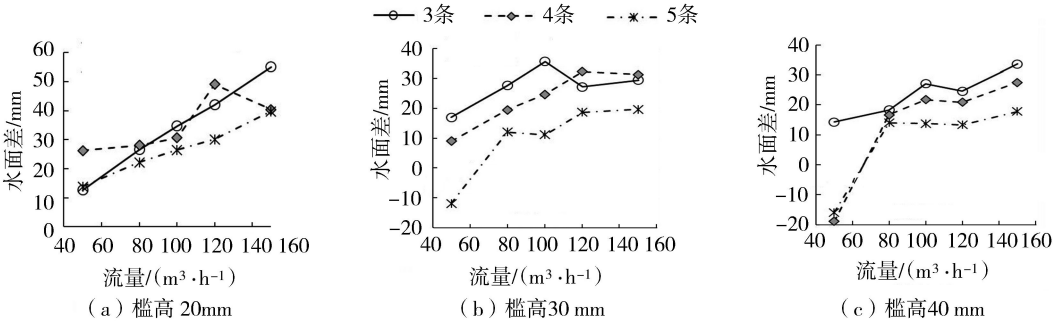


图 6 不同斜槛条数下弯道段横断面最大水面差

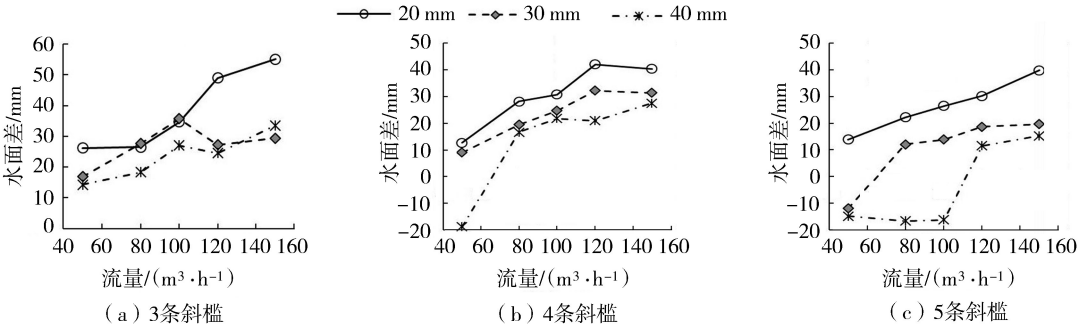


图 7 不同流量下弯道段横断面最大水面差

$$\Delta h_m = \Delta h_z(1 - f_d) \quad (10)$$

工程设计时,在弯道水面估算目标确定后,透水斜槛的初步尺寸可按照式(6)~(8)估算。例如,某溢洪道泄槽弯道段在没有工程措施时,按式(9)估算的横断面最大水面差为2.5 m,由此在弯道内沿轴线均匀布置45°的透水斜槛以改善弯道水流条件。改善目标为:弯道水面均匀度为90%左右,水面均匀度提高率为30%左右,最大水面差降低率为60%左右。利用式(1)~(3)经试算可知,方案1:弯道布置6条斜槛、槛高0.8 m、透水率为30%时,弯道水面均匀度为91.2%,水面均匀度提高率为24.8%,最大水面差降低率为58.9%;方案2:弯道布置5条斜槛、槛高1.0 m、透水率为30%时,弯道水面均匀度为91.6%,水面均匀度提高率为26.9%,最大水面差降低率为60.9%。上述两个方案的改善结果与目标值比较接近,均可作为透水斜槛的初步方案,最终可通过模型试验或综合分析确定。

3 结 论

a. 本试验弯道设置透水斜槛后,弯道水面均匀度平均为91.9%,提高率为29.5%,弯道横断面最大水面差减少率为63.9%。因此,弯道设置透水斜槛能够改善弯道水流条件,提高弯道水面均匀度,降低弯道横断面最大水面差。

b. 斜槛的高度、透水率、条数等参数对弯道水面改善效果有影响,其中槛高和布置条数影响较大,而不同透水率之间的改善效果相差不大。①槛高:在相同流量情况下,高槛比低槛水面改善效果好。从弯道水面均匀度提高率看,相同槛高条件下,流量越小,水流改善效果越好;槛高对弯道横断面最大水面差有较大影响,相同流量条件下,槛高越大横断面最大水面差越小,水面差减少率越大。当斜槛数量达到一定数量时,中高槛在小流量条件下,弯道横断面最大水面差可能出现负值,即在最大水面差断面凸岸水面比凹岸高。②斜槛透水率:低槛条件下透水率对水面改善效果影响较大,透水率越低越好;而中高槛不同透水率之间水面的改善效果差别不大。③斜槛条数:增加透水斜槛条数能够改善弯道水面效果,尤其在中低槛、大流量条件下更为明显;一般情况下斜槛数量越多,弯道横断面最大水面差越小,水面差减少率越大,斜槛数量达到一定数量时,最大水面差断面凸岸水面高于凹岸。④弯道来流的 Fr 对弯道水面改善效果有影响, Fr 越大水流改善效果越明显。

c. 利用回归分析得到的考虑透水斜槛参数的弯道水面改善效果预测模型简单实用,可用于初步确定透水斜槛布置及参数,供工程设计参考。

参考文献:

- [1] KNAPP R T. High-velocity flow in open channels: a symposium: design of channel curves for supercritical flow [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1): 296-325.
- [2] 陈鑫荪. 消除泄水建筑物弯道冲击波的措施[J]. 水利水电技术, 1984(6): 32-36. (CHEN Xinsun. Measures to eliminate shock wave in bend of discharge structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1984(6): 32-36. (in Chinese))
- [3] 杨玲霞, 张银华, 吴建平, 等. 改善弯道急流流态的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(7): 77-79. (YANG LingXia, ZHANG Yinhua, WU Jianping, et al. Experimental study on improving flow pattern at sault flexural reach of river [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(7): 77-79. (in Chinese))
- [4] 吴宇峰, 伍超, 李静. 斜槛在急流弯道控制超高的设计研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 77-81. (WU Yufeng, WU Chao, LI Jing. Research on sills for preventing freeboard in rapid flow curved channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 77-81. (in Chinese))
- [5] 张领护. 溢洪道弯道急流冲击波消减技术措施研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2004.
- [6] 魏明方, 宋天文, 龚爱民, 等. 凤凰水库弯道溢洪道流态控制设计[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(增刊2): 148-150. (WEI Mingfang, SONG Tianwen, GONG Aimin, et al. Flow pattern control design of Fenghuang reservoir bend spillway [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(Sup2): 148-150. (in Chinese))
- [7] 余雄杰, 邱勇, 宋天文. 凤凰水库溢洪道泄槽弯道水流试验研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(2): 91-93. (YU Xiongjie, QIU Yong, SONG Tianwen. Model test of water flow in bend chute of spillway in Fenghuang reservoir [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(2): 91-93. (in Chinese))
- [8] 周勤, 伍超. 陡坡弯道水流条件改善数值模拟研究[J]. 陕西水利, 2011(2): 94-96. (ZHOU Qin, WU Chao. Numerical simulation of flow condition improvement in steep bend [J]. Shanxi Water Resources, 2011(2): 94-96. (in Chinese))
- [9] 张洁. 重庆市隘口水库弯道溢洪道水流特性试验研究[J]. 四川水力发电, 2013, 32(3): 160-163. (ZHANG Jie. Experimental study on flow characteristics of Aikou reservoir bend spillway in Chongqing [J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(3): 160-163. (in Chinese))
- [10] 周星, 杨校礼, 高峰. 斜槛法在山区弯道河流消能设计中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 126-128. (ZHOU Xing, YANG Xiaoli, GAO Feng. Application of slopy ridge method in energy dissipation design of mountainous bend river [J]. Water Resources and Power,

2014,32(3):126-128. (in Chinese))

[11] 王鑫,张宗孝,严培,等.应用斜坎改善弯道流态的可行性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(1):197-204. (WANG Xin,ZHANG Zongxiao,YAN Pei et al. Feasibility of using oblique ridges to improve flow pattern of curved channel [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017,45(1):197-204. (in Chinese))

[12] PAGLIARA S, MAHMOUDI K S, PALERMO M, et al. Scour due to rock sills in straight and curved horizontal channels [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2016,10:12-20.

[13] 张婧,王东,何岸霞,等.不同绕流结构体对河道水流的影响[J].水利水电科技进展,2018,38(6):30-35. (ZHANG Jing,WANG Dong,HE Anxia,et al. Influence of different flow structures on river flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2018,38(6):30-35. (in Chinese))

[14] 滕晓敏,陈威,杨金孟,等.透水斜槛对溢洪道泄槽弯道

水流改善效果试验[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):176-183. (TENG Xiaomin, CHEN Wei, YANG Jinneng,et al. Model test of flow improvement effect of the permeable oblique sill on the bend in spillway chute [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(5):176-183. (in Chinese))

[15] 滕晓敏.溢洪道泄槽弯道布置透水斜槛水流特性实验研究[D].泰安:山东农业大学,2020.

[16] 傅灿,邱勇,周卫霞.斜槛法在消减弯道急流冲击波中的应用[J].陕西水利,2010(3):102-103. (FU Can, QIU Yong, ZHOU Weixia. Application of inclined sill method in reducing shock wave of sharp stream in bend [J]. Shan Xi Water Resource, 2010(3):102-103. (in Chinese))

[17] ZHANG Qinghua, DIAO Yanfang, ZHAI Xingtao, et al. Experimental study on improvement effect of guide wall to water flow in bend of spillway chute [J]. Water Science and Technology,2016,73(3):669-678.

(收稿日期:2021-03-10 编辑:骆超)

+++++

(上接第13页)

[5] 张晓可,刘凯,万安,等.安庆西江浮游动物群落结构及江豚生存状况评估[J].水生生物学报,2018,42(2):392-399. (ZHANG Xiaoke, LIU Kai, WAN An, et al. Community structure of zooplankton and its relationship with survivability of the Yangtze finless porpoise in Xijiang Oxbow, Anqing City [J]. Journal of Aquatic Biology, 2018,42(2):392-399. (in Chinese))

[6] BRIDGETTE F F, GREGORY W S, MEGAN M, et al. A modeling and field approach to identify essential fish habitat for juvenile bay whiff (citharichthys spilopterus) and southern flounder (paralicthys lethostigma) within the Aransas Bay Complex, TX[J]. Estuaries and Coasts, 2013,36(5):881-892.

[7] 易雨君,程曦,周静.栖息地适宜度评价方法研究进展[J].生态环境学报,2013,22(5):887-893. (YI Yujun, CHEN Xi, ZHOU Jing. Research progress in habitat suitability assessment methods [J]. Ecology and Environmental Sciences,2013,22(5):887-893. (in Chinese))

[8] SCHOENEBECK C W, STRAKOSH T R, GUY C S. Effect of block net use and time of sampling on backpack electrofishing catches in three kansas reservoirs[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2005,25:604-608.

[9] U. S. Department of Fish and Wildlife Service. Standards for the development of habitat suitability index models [R]. Washington D. C.: US Fish and Wildlife Service, 1981.

[10] 李磊,金菊良,梁忠民.核主成分分析的参数优化及其在水资源可持续利用综合评价中的应用[J].水利水电科技进展,2009,29(4):36-38,66. (LI Lei, JIN Juliang, LIANG Zhongmin. Parameters optimization of kernel

principal component analysis and its application in evaluation of water resources sustainable utilization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009,29(4):36-38,66. (in Chinese))

[11] 苏巍.海州湾海域鱼类群落多样性及其与环境因子的关系[D].青岛:中国海洋大学,2014.

[12] 李霞,朱万泽,舒树森,等.基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价[J].生态学报,2021(10):1-10. (LI Xia, ZHU Wanze, SHU Shumiao, et al. Soil quality assessment of grassland in dry and warm valley of Dadu River based on principal component analysis[J]. Acta Ecologica Sinica,2021(10):1-10. (in Chinese))

[13] 雷青松,涂志英,石迅雷,等.应用于鱼道设计的新疆木扎提河斑重唇鱼的游泳能力测试[J].水产学报,2020,44(10):1718-1727. (LEI Qingsong, TU Zhiying, SHI Xunlei, et al. Swimming ability of diptychus maculatus Steindachner in the Muzati River for fishway design[J]. Journal of Fisheries of China, 2020,44(10):1718-1727. (in Chinese))

[14] 赵睿智,赵红雪,邱小琮.黑河干流浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J].水生态学杂志,2020,41(6):81-88. (ZHAO Ruizhi, ZHAO Hongxue, QIU Xiacong. Relationship of zooplankton and water environmental factors in the main stem of Heihe River[J]. Chinese Journal of Ecology,2020,41(6):81-88. (in Chinese))

[15] 张云雷,薛莹,于华明,等.海州湾春季皮氏叫姑鱼栖息地适宜性研究[J].海洋学报,2018,40(6):83-91. (ZHANG Yunlei, XUE Ying, YU Huaming, et al. Study on the habitat suitability of johnius belangerii during spring in the Haizhou Bay, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018,40(6):83-91. (in Chinese))

(收稿日期:2021-02-10 编辑:骆超)