

马豪, 牧振伟, 张红红. 糙条对溢洪道连续弯段水流特性的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 196-208. MA H, MU Z W, ZHANG H H. Influence of rough strip energy dissipator on continuous bend spillway flow characteristics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 196-208. (in Chinese)

糙条对溢洪道连续弯段水流特性的影响

马豪^{1,2}, 牧振伟^{1,2}, 张红红^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究溢洪道连续弯段水流特性及糙条消能工水力学特性, 通过开展 27 组正交模型试验, 结合消能率和超高变异系数筛选最优工况, 采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型与体积分数法(volume of fluid, VOF)对布设糙条和不布设糙条的溢洪道进行水流特性数值模拟对比研究。结果表明: 糙条的布设使溢洪道沿程水深增加且变化剧烈; 糙条能够抑制菱形波和折冲水流的产生, 通过改善两弯段流态使水面均匀性提升 38.0% 和 44.7%; 布设糙条后, 两弯段纵向流速均值被降低了 45.16% 和 44.83%, 各断面凹岸纵向流速的最大值沿水深下移; 糙条的存在加剧了水流紊动, 使两弯段纵向紊动强度均值增加了 117.98% 和 71.05%, 纵向紊动强度集中在凹岸衰减、凸岸增强, 且各断面凹岸的最大值沿水深上移; 糙条增大了床面动水压力, 减小了两岸压力差, 对压力分布形式有显著改善效果, 有助于保护底板和边壁不易被冲蚀。研究成果可为溢洪道连续弯段设计及安全运行提供参考。

关键词: 糙条消能工; 溢洪道连续弯段; 超高变异系数; 水面均匀性

中图分类号: TV651.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0020

受离心惯性力作用, 水流在弯段容易产生不均匀横比降, 导致断面水深和流量分布不均, 影响下游水流的消能与衔接, 严重时可能影响溢洪道甚至大坝主体的安全运行^[1-3]。由于流动问题的复杂性, 对溢洪道弯段水流特性进行研究具有重要意义。

早在 1870 年, Thompson 在试验中发现弯段水流同时存在纵向和横向流动、转弯处水流流态较差、水深分布不平衡等现象。自此, 学者们^[4-6]对这一问题的研究颇受关注, 物理模型试验与数值模拟一直是研究溢洪道弯段水流特性的重要手段。模型试验方面: 滕晓敏等^[7]分析了透水斜槛对溢洪道泄槽弯段水流的改善效果, 发现就弯段横断面水面均匀度改善效果而言, 透水率与流量对其影响不大; 王田田等^[8]研究了导流墙对弯段横断面凹凸岸水深差的变化规律, 结果发现导流墙的设置与否与弯段横断面凹凸岸最大水面横比降发生位置直接相关; 王均星等^[9]对具有复杂边界条件的溢洪道内水流的流态进行研究, 发现在泄槽的恰当位置增设贴底横坎可破坏水流冲击波的迭合; 白玉川等^[10]围绕低坡度

临界急弯下的基岩弯曲河道洪水水流特性展开研究, 得出在洪水流量下凸岸出现水流分离、凹岸出现双环流、弯段内出现流速下沉等现象; 王文娥等^[11]利用多普勒声学流速仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)探索了宽窄相间河道水流的紊动特性, 结果表明纵向紊动强度和横向紊动强度在宽窄相间河道中具有一定相关性, 最大紊动强度值均出现在 0.2 倍水深处; 王虹等^[12]采用电磁流速仪在概化的连续急变弯段模型中进行弯段流场研究, 得出了固体边壁的影响会加强纵向紊动强度而减弱横向紊动强度的结论; 傅灿等^[13]在弯段底部垂直布置 4 道斜槛, 成功解决了水流在陡槽弯段产生不对称冲击波、水流分布极不均匀等问题。数值模拟方面: Pradhan 等^[14]对 2 个连续弯段(光滑和粗糙)进行了纵向流速分布的深入研究, 发现由弯曲效应引起的阻力对光滑渠道中弯段顶点和过渡段处一定深度以上的流速影响较粗糙的渠道更大; Yan 等^[15]研究了强弯曲河道边坡对水流的影响, 发现弯段边坡对二次流单元的数量、位置和强度均有影响; 李

收稿日期: 2023-06-21 修回日期: 2023-11-16 网络出版时间: 2023-12-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231227.1402.002>

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: 马豪(1999—), 男(回族), 新疆伊宁人, 主要从事工程水力学方面的研究。E-mail: 1491716355@qq.com

通信作者: 牧振伟(1973—), 男(回族), 河南南阳人, 教授, 主要从事水力学与河流动力学方面的研究。E-mail: xjmwz@163.com

凡琦等^[16]利用气液两相流模型结合 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对溢洪道弯段糙条消能工前后涡流演化规律展开研究,结果表明涡流在糙条前主要以多股漩渦并存的形式相互制约,在糙条后漩渦形式较为单一;李凡琦等^[17]发现在大宽深比溢洪道弯段的消能导流问题方面,糙条要优于传统辅助消能工;李登松等^[18]提出在曲线型溢洪道内布置局部超高阶梯的方法,解决了大流速、高弗劳德数急流条件下出现的恶劣流态;周刚等^[19]通过数值试验对比定量评估了传统二维模型和两种二次流修正方法,最终推荐连续弯段水流模拟中优选 Delft3D 模型的二次流修正方法;马森等^[20]分析了小宽深比对弯段水流运动规律的影响,发现随着宽深比的增大,纵向紊动强度沿水深分布依次增强,与之相应的波动发生位置依次提前;Yarahmadi 等^[21]通过电磁速度计测量安装和不安装三角叶片的 90°弯段速度分量,发现三角叶片可降低上下游外岸附近的床层剪切应力,有利于保护河岸侵蚀和形态变化。

由于侧重点不同,以上对弯段水流问题的研究以单弯段溢洪道及相同曲率的多弯段溢洪道为主。糙条消能工应用于单弯段的研究已有部分成果^[5,16-17,22],但针对溢洪道连续弯段的研究相对匮乏。然而,自然界河流以及部分溢洪道以非对称多弯段形式呈现^[23-24]。鉴于此,为拓宽非对称溢洪道连续弯段糙条消能工的研究体系,观察糙条在不同弯段中的水力学特性,参照小南海水库“S”型溢洪道^[25]设计概化模型进行研究,将最优工况与其对应的不布设糙条溢洪道为研究对象,探索弯段水流特性及糙条消能工水力学特性。

1 物理模型试验

1.1 物理模型设计

试验整体由模型主体和自循环供水系统两部分组成。供水系统保证了试验用水的循环:水泵抽水至溢流箱,流经模型主体后由三角形薄壁堰测量,最后流向地下水库;模型主体由有机玻璃板拼接而成,依次包括:长度 X_1 为 60 cm 的进口直段、转角 γ 为 40°的 1 号弯段、长度 X_2 为 50 cm 的过渡段、转角 β 为 50°的 2 号弯段和长度 X_3 为 140 cm 的出口直段 5 部分。全程采用矩形断面,沿程纵向坡降 $i=0.02$,横向坡比为 0,溢洪道内外边壁采用柔韧度良好的 3 mm 厚有机玻璃板。模型平面布置见图 1(a)。

利用精度为 0.1 mm 的测针进行水深量测,模型

沿程共布设 41 个量测断面,每个断面从左岸到右岸均匀分成 A、B、C、D、E 5 个测点,为减小边壁对测量结果的干扰,A、E 点取距离边壁 1 cm 处进行量测;因试验流速较小,采用毕托管量测时均流速,沿程共选取 21 个流速测量断面,每个断面选取 A、C、E 3 个流速测点。横向上,A、E 两点同样选取距离边壁 1 cm 处,垂向上测点位置为 $2H/3$ 处(H 为测点断面处的水深);下泄流量采用 90°三角形薄壁堰进行测量。物理模型及量测设备见图 1(b)。

1.2 消能工设计

糙条消能工体型由弯段水流特征设计,具有适应性强、整流效果好、造价经济等优势,常被用来调整溢洪道弯段流态不稳定的问题。水流翻越糙条时会形成多个小区域的旋流,糙条以此起到削减水流能量的作用;糙条倾斜布置会将凹岸过高水流导向凸岸,从而实现减小水面横比降的目的。糙条消能工导流及消能效果见图 2。

糙条消能工主要在两个弯段紧贴床面并沿中轴线依次布置,糙条布设角度为糙条所在横截面与糙条间的夹角 θ 。糙条布置成 $h_{s1} > h_{s2}$ (h_{s1} 为凹岸处糙条高度, h_{s2} 为凸岸处糙条高度, s 取 a、b,分别代表 1 号弯段、2 号弯段),糙条横断面为矩形,纵断面为梯形,具体布置形式见图 3。

1.3 评价指标选择

1.3.1 消能率

为量化糙条消能工对溢洪道弯段水流能量的耗散大小,采用消能率 η 进行衡量。试验分别选取两弯段进口前断面与出弯断面为过水断面进行计算(断面 5、断面 17、断面 19、断面 33),过水断面单位重量水体的总机械能计算公式为

$$E_1 = z_1 + h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \quad (1)$$

$$E_2 = z_2 + h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \quad (2)$$

消能率计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式(1)~(3)中: E_1 、 E_2 分别为上、下游过水断面单位质量水体的总机械能,m; z_1 、 z_2 分别为上、下游过水断面的位置水头,m; h_1 、 h_2 分别为上、下游过水断面的平均水深,m; α 为动能修正系数,取 1.0; v_1 、 v_2 分别为上、下游过水断面的平均流速,m/s; η 为消能率,%; g 为重力加速度,m/s²。

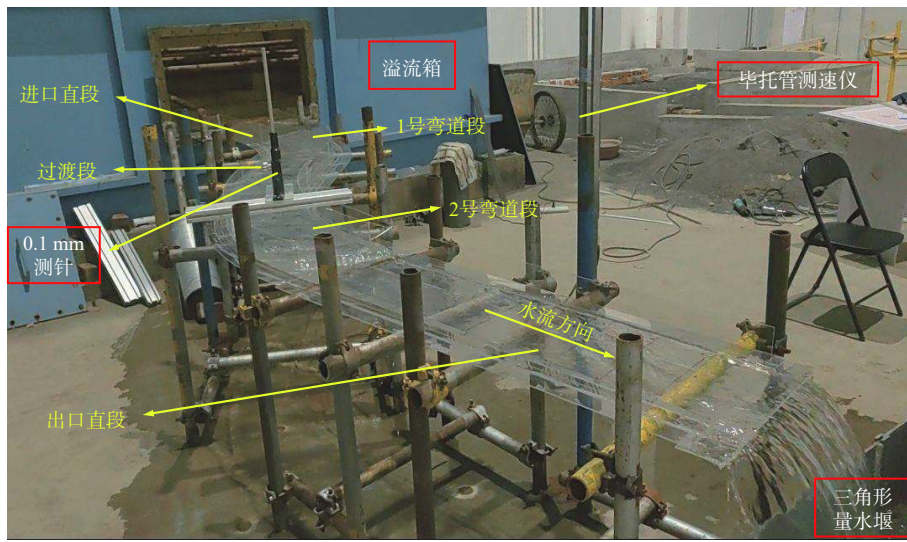
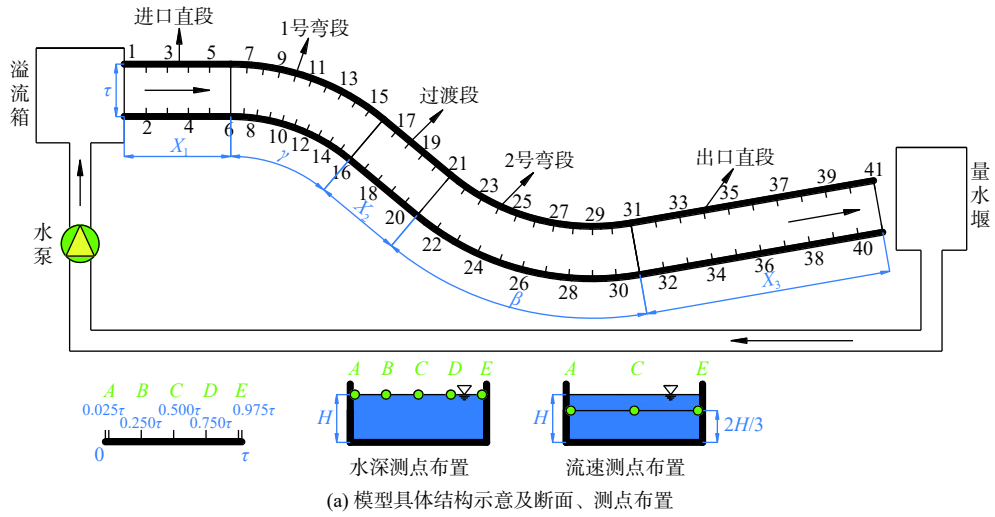


图 1 模型结构与现场布置

Fig. 1 Model structure and site layout

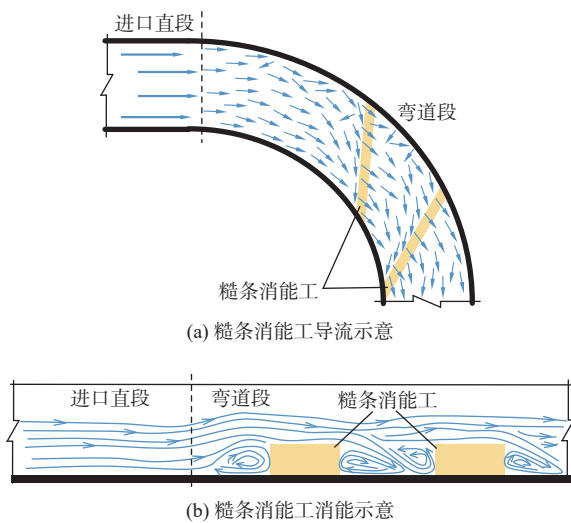


图 2 糙条消能工效果

Fig. 2 Effect of the rough strip energy dissipator

1.3.2 超高变异系数

利用超高变异系数 C_V 来衡量溢洪道弯段布置

糙条消能工的导流效果^[22]。根据定义, 超高变异系数为无量纲数, 消除了计算参数是绝对值而普适性低的弊端, 排除了单位不同对结果变异程度的影响。它反映的是断面平均水深离散化程度的大小, 能较形象且客观地反映糙条对弯段流态的改善程度。超高变异系数越小, 导流效果越好, 即水深和流速越趋近于均匀化水平, 可表示为

$$C_{V_m} = \frac{\sigma_m}{\mu_m} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \sqrt{E\{[\Delta y_{mj} - E(\Delta y_{mj})]^2\}} \quad (5)$$

$$\mu_m = E(\Delta y_{mj}) \quad (6)$$

$$\Delta y_{mj} = k \frac{v_{mj}^2 B_m}{g R_m} \quad (7)$$

式中: C_V 表示超高变异系数; σ 表示各计算断面横向水面超高的标准差, m ; μ 为各计算断面横向水面超高的平均值, m ; Δy 表示弯段凹岸水面高于此断

面平均水深处的水平水面超高值, m ; v 为平均流速, m/s ; B 表示明槽水面宽度, m ; R 表示弯段中心半径, m ;

m 表示第 m 个工况; j 表示第 j 个计算断面; k 为超高系数, 梯形和矩形明槽的简单圆曲线式弯段, 取 $k=0.5$ 。

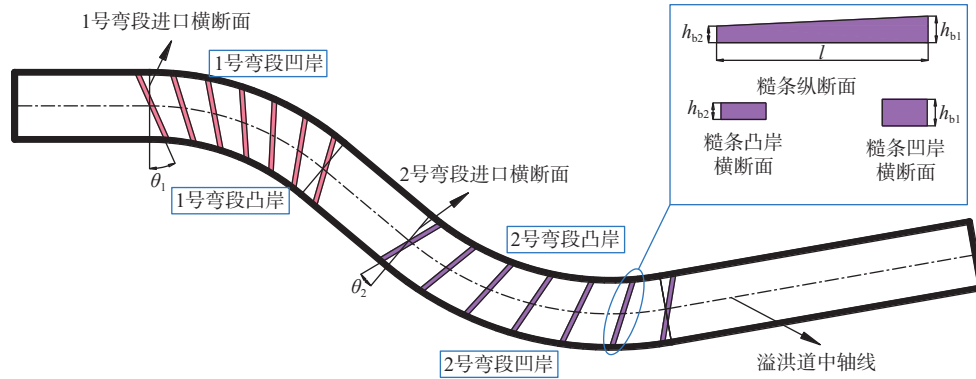


图3 糙条消能工布置形式

Fig. 3 The layout of the rough strip energy dissipator

1.4 最优工况筛选

溢洪道连续弯段糙条消能工对水流特性的影响因素众多, 各影响因素之间又相互牵连, 为使所选因素具有均匀性和代表性并合理减少试验数目, 选取 $L_{27}(3^{13})$ 正交表进行设计。分别选取 1 号弯段糙条消能工高度 $h_{a1}-h_{a2}$ 、2 号弯段糙条消能工高度

$h_{b1}-h_{b2}$ 、糙条间距 ΔL 、糙条倾斜角度 θ (θ_1 、 θ_2 分别为 1 号弯段、2 号弯段糙条倾斜角度)、弯段曲率半径 R (R_1 、 R_2 分别为 1 号弯段、2 号弯段曲率半径)、溢洪道宽度 T 和下泄流量 Q 等 9 个因素进行模型试验, 正交试验参数见表 1。

表 1 正交试验参数

Tab. 1 Orthogonal test parameters

试验号	$(h_{a1}-h_{a2})/cm$	$(h_{b1}-h_{b2})/cm$	$\Delta L/cm$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	R_1/cm	R_2/cm	T/cm	$Q/(L \cdot s^{-1})$
1	1.2-0.6	2.0-1.0	1/6(γ, β)	20	18	100	120	30	6.00
2	1.2-0.6	2.0-1.0	1/6(γ, β)	20	22	110	130	35	6.50
3	1.2-0.6	2.0-1.0	1/6(γ, β)	20	26	120	140	40	7.00
4	1.2-0.6	2.4-1.2	1/7(γ, β)	24	18	100	120	35	6.50
5	1.2-0.6	2.4-1.2	1/7(γ, β)	24	22	110	130	40	7.00
6	1.2-0.6	2.4-1.2	1/7(γ, β)	24	26	120	140	30	6.00
7	1.2-0.6	2.8-1.4	1/8(γ, β)	28	18	100	120	40	7.00
8	1.2-0.6	2.8-1.4	1/8(γ, β)	28	22	110	130	30	6.00
9	1.2-0.6	2.8-1.4	1/8(γ, β)	28	26	120	140	35	6.50
10	1.6-0.8	2.0-1.0	1/6(γ, β)	28	18	110	140	30	6.50
11	1.6-0.8	2.0-1.0	1/7(γ, β)	28	22	120	120	35	7.00
12	1.6-0.8	2.0-1.0	1/8(γ, β)	28	26	100	130	40	6.00
13	1.6-0.8	2.4-1.2	1/6(γ, β)	20	18	110	140	35	7.00
14	1.6-0.8	2.4-1.2	1/7(γ, β)	20	22	120	120	40	6.00
15	1.6-0.8	2.4-1.2	1/8(γ, β)	20	26	100	130	30	6.50
16	1.6-0.8	2.8-1.4	1/6(γ, β)	24	18	110	140	40	6.00
17	1.6-0.8	2.8-1.4	1/7(γ, β)	24	22	120	120	30	6.50
18	1.6-0.8	2.8-1.4	1/8(γ, β)	24	26	100	130	35	7.00
19	2.0-1.0	2.0-1.0	1/8(γ, β)	24	18	120	130	30	7.00
20	2.0-1.0	2.0-1.0	1/8(γ, β)	24	22	100	140	35	6.00
21	2.0-1.0	2.0-1.0	1/8(γ, β)	24	26	110	120	40	6.50
22	2.0-1.0	2.4-1.2	1/6(γ, β)	28	18	120	130	35	6.00

表 1(续)
Tab. 1 (Continued)

试验号	$(h_{a1}-h_{a2})/cm$	$(h_{b1}-h_{b2})/cm$	$\Delta L/cm$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	R_1/cm	R_2/cm	T/cm	$Q/(L\cdot s^{-1})$
23	2.0-1.0	2.4-1.2	1/6(γ, β)	28	22	100	140	40	6.50
24	2.0-1.0	2.4-1.2	1/6(γ, β)	28	26	110	120	30	7.00
25	2.0-1.0	2.8-1.4	1/7(γ, β)	20	18	120	130	40	6.50
26	2.0-1.0	2.8-1.4	1/7(γ, β)	20	22	100	140	30	7.00
27	2.0-1.0	2.8-1.4	1/7(γ, β)	20	26	110	120	35	6.00

注: 间距 ΔL 为等分弯段转角所转化的相邻两根糙条之间的距离。

图 4 为最优工况筛选图。从图 4 可以看出, 第 3 组试验 1 号弯段消能率最大, 但其 2 号弯段消能率却低于第 8、第 9 及第 12 组等诸多试验方案, 第 25 组试验 2 号弯段消能率最大, 而 1 号弯段消能率仅为 14.82%。同样, 超高变异系数的分布也存在这种矛盾, 使得最优工况的筛选具有不确定性。为避

免此类矛盾, 以 27 组试验的消能率及超高变异系数均值为临界点进行筛选, 1 号、2 号弯段消能率和超高变异系数的均值分别为 15.01%、41.94% 和 0.29、0.68。由图 4 可知, 只有第 12 组试验方案的两弯段消能率高于平均值, 同时超高变异系数低于平均值, 即认为此工况评价效果为最优。

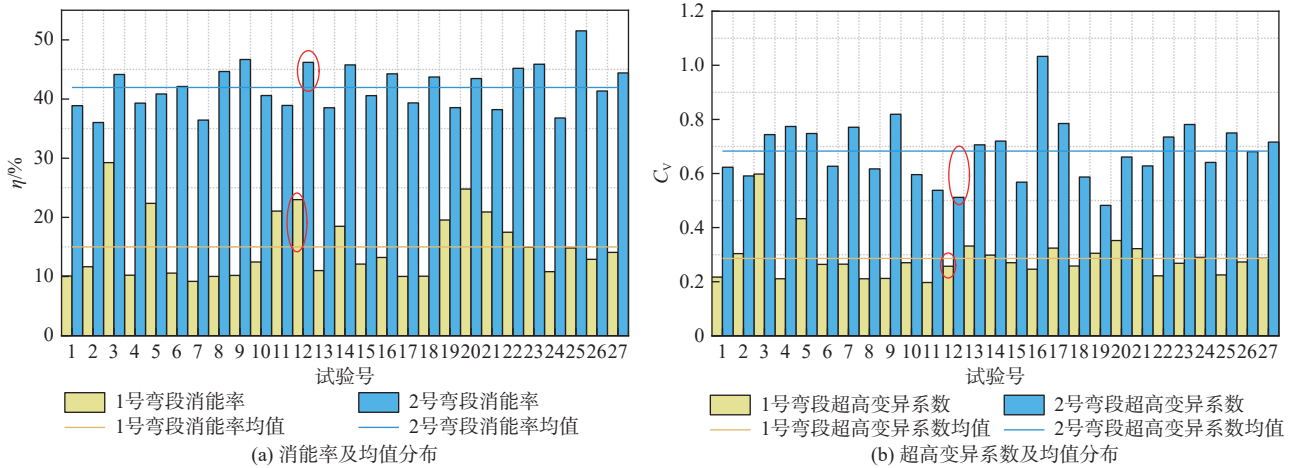


图 4 最优工况筛选

Fig. 4 Optimal operating condition screening diagram

为深入探究糙条对溢洪道连续弯段水流特性的影响, 以第 12 组试验方案为基础, 与其未布置糙条但工程参数相同的溢洪道流场进行水流特性对比

分析。第 12 组试验方案 1 号、2 号弯段长度分别为 0.64 m、1.06 m, 其余各因素及水平见表 2。

表 2 第 12 组试验各因素参数及水平

Tab. 2 Factors and levels of the 12th group of experimental schemes

参数	$(h_{a1}-h_{a2})/cm$	$(h_{b1}-h_{b2})/cm$	$\Delta L/cm$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	R_1/cm	R_2/cm	T/cm	$Q/(L\cdot s^{-1})$
参数值	1.6-0.8	2.0-1.0	1/8(γ, β)	28	26	100	130	40	6.00

2 数值模拟

2.1 数值模型与计算方法

RNG $k-\epsilon$ 湍流模型有较好的计算精度, 可以更好地处理高应变率及弯段的流动^[26], 且与 VOF 法结合计算的可靠性已被充分证实^[27], 故采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流数学模型结合 VOF 法进行数值模拟; 采用有限体积法对控制方程进行离散, 方程中各项离

散方法采用一阶迎风格式; 压强-速度耦合采用 SIMPLE 算法。时间步长设置为 0.001 s, 各项物理量残差标准设置为 1‰。在计算过程中, 当迭代残差曲线低于设置残差标准且进口与出口流量差小于 5‰时, 认为计算收敛。

2.2 边界条件

溢洪道入口分为空气入口和水流入其中, 空气

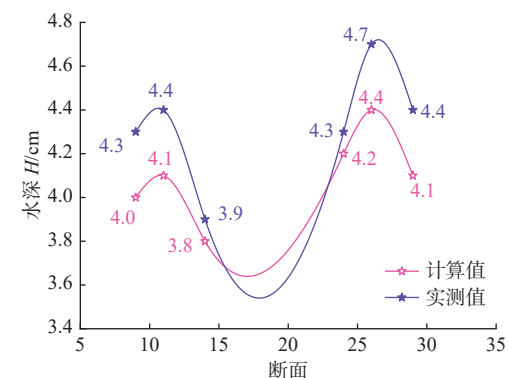
入口采用标准大气压入口边界,水流入口采用速度入口边界,根据物理模型试验得出入口流速为0.616 m/s;水面设置为自由边界;溢洪道出口采用标准大气压出口边界;所有固壁边界采用无滑移标准壁面函数进行处理。

2.3 网格划分

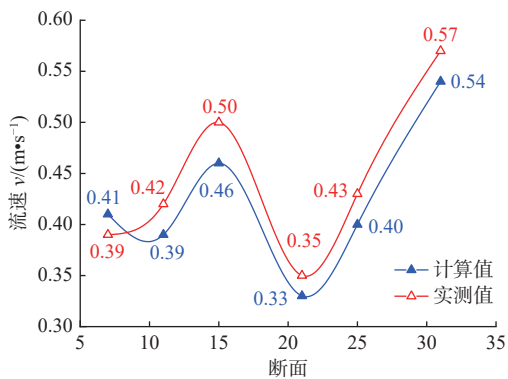
进口段和出口段的网格尺寸设定为0.01 m,重点研究区域为溢洪道弯段部分,故对弯段及糙条所在区域进行网格加密处理,此处的网格尺寸设定为0.008 m,比较不同数量网格条件下的计算结果,进行网格无关性验证,最终确定网格数量为635 881个。

2.4 模型验证

为验证数值模拟的准确性,选取两弯段弯顶附近的断面进行计算值与实测值水深验证,即第12组试验方案的断面9、断面11、断面14、断面24、断面26和断面29;选取两弯段进口、弯顶及出口断面进行流速验证,即断面7、断面11、断面15、断面21、断面25和断面31。图5为两弯段水深、流速的计算值与实测值对比图,两者吻合效果良好,水深验证最小相对误差为2.33%,最大相对误差为7.91%;流速验证最小相对误差为4.88%,最大相对误差为8.00%。这表明数值模拟的计算结果是准确可靠的。



(a) 水深验证



(b) 流速验证

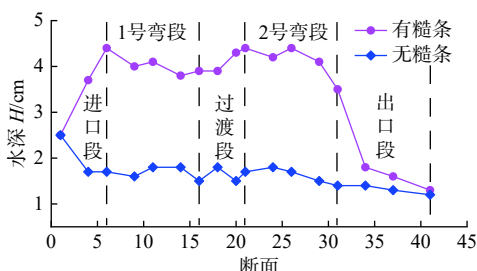
图5 水深和流速数值模拟结果验证

Fig. 5 Verification of numerical simulation results

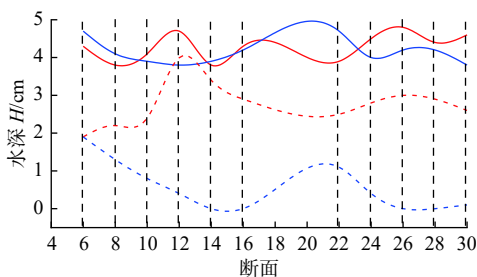
3 结果与分析

3.1 水深沿程变化对比

溢洪道连续弯段沿程水深变化对比见图6(a)。从图6(a)可以看出:有糙条溢洪道水深沿程变化幅度较大,水流自进口段流入后受到1号弯段第一根糙条的阻挡作用出现壅水现象,受前后两根糙条挤压所用,在过渡段出现水深极大值,与1号弯段相比,2号弯段经糙条影响水深变化更为剧烈、变化幅度更大;无糙条溢洪道中,沿程水深变化相对平稳,弯段横断面凹凸岸虽出现极不平衡的水深差,但各断面平均水深差别不大。



(a) 沿程水深变化



(b) 两岸水深变化

图6 溢洪道沿程及两岸水深变化对比

Fig. 6 Comparison of water depth changes along the spillway and on both sides

加设糙条前后,凹凸两岸水深变化对比见图6(b)。无糙条溢洪道凹岸水深始终大于凸岸水深;断面12为两岸水深差最大断面,是由水流大量聚集在凹岸导致凸岸露底所致。反观有糙条溢洪道:两岸水深较大者交替出现,且均在4 cm上下浮动;相比无糙条溢洪道,两岸水深差明显较小。

溢洪道弯段水面流态见图7。由图7(a)可以发现:水流在1号弯段进口处形成菱形波,在2号弯段形成折冲水流;两弯段水深在凹岸增加、在凸岸减小,导致两弯段凸岸出现无水现象。加设糙条后,弯段水面结构变化见图7(b):糙条减小了弯段离心力对水流的影响,改善了“水深在凹岸增加,在凸岸

减小”的现象;显著降低了弯段整体的水面波动,消除了无糙条溢洪道中的菱形波和折冲水流;水面结构呈现波浪形,水面流态趋于稳定。

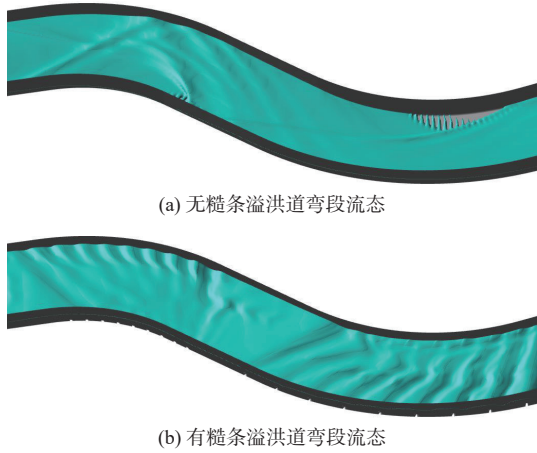


图 7 溢洪道弯段流态对比

Fig. 7 Flow comparison of spillway bend section

利用横截面水面均匀性来观察糙条消能工对水流结构的改善效果,水面均匀性越接近 100%,表示此截面水流分布越平稳。布设糙条和不布设糙条溢洪道两弯段水面均匀性见图 8,其中,1号弯段取截面 6 至 16 进行对比,2号弯段取截面 21 至 31 进行对比。横截面水面均匀性计算公式^[28]为

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (8)$$

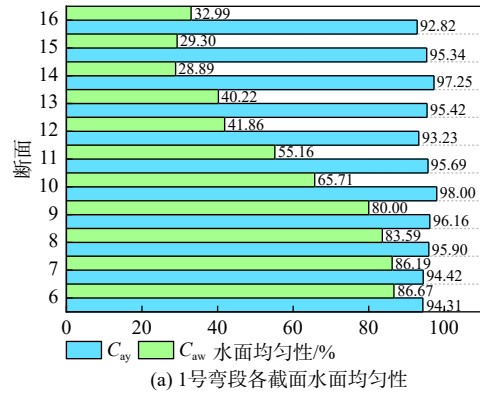
$$\Delta\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{n} \quad (9)$$

$$C_{ai} = \left[1 - \frac{\Delta\bar{h}}{\bar{h}} \right] \times 100\% \quad (10)$$

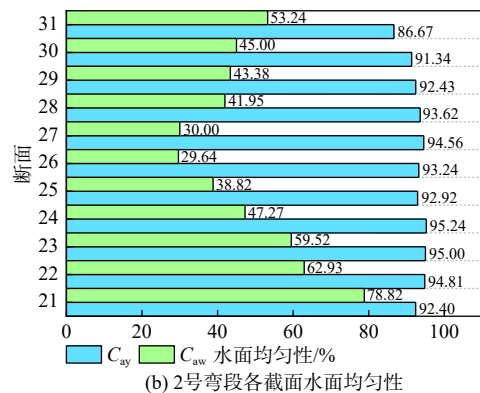
式中: h_i 为横截面测点处的水深, cm; \bar{h} 为横截面均匀水深, cm; n 为测点个数; $\Delta\bar{h}$ 为横截面各测点的平均水深差, cm; C_{ai} 为横截面水面均匀性, 其中 i 取 y 、 w (C_{ay} 表示有糙条溢洪道水面均匀性; C_{aw} 表示无糙条溢洪道水面均匀性), %。

由图 8 可知: 1 号、2 号弯段布设和不布设糙条溢洪道中水面均匀性的极差分别为 5.18%、8.57% 和 57.78%、49.18%, 经糙条整流, 1 号、2 号弯段水面均匀性的平均值分别提升了 38.0% 和 44.7%。可以看出, 设有糙条溢洪道的弯段水面均匀性分布更加均匀且普遍高于无糙条溢洪道。在无糙条溢洪道 1 号弯段水面分布最差部分(露底现象), 出现在弯段后半段, 而其在 2 号弯段主要分布在弯顶部分处, 可见 2 号弯段露底现象发生位置提前。糙条的置入不仅弥补了露底断面处的水面均匀性, 而且实

现了连续断面之间水流的平稳过渡, 这说明糙条消能工能够大幅提升弯段水面均匀性, 改善溢洪道弯段水流流态。



(a) 1号弯段各截面水面均匀性



(b) 2号弯段各截面水面均匀性

图 8 水面均匀性

Fig. 8 Water surface uniformity

3.2 典型断面流速变化对比

断面流速分布是弯段水流分析评价的重要指标, 选取两弯段进口、弯顶及出口断面流速云图进行分析, 即断面 6、断面 11、断面 16、断面 21、断面 26 和断面 31, 流速变化见图 9。无糙条溢洪道各断面流速分布形式差别不大, 均是较大流速贯穿整个断面分布。布设糙条溢洪道各断面流速明显小于无糙条溢洪道; 流速最大值在断面 11、断面 16、断面 26, 断面 31 分布形式大致相同(弯顶断面流速最大值在中间位置, 出口断面流速最大值在凹岸处), 且流速沿程均有不同程度的变化, 表明糙条可使流速进行重分布, 可尽快使动能在横断面上重分配。

溢洪道连续弯段纵向流速(水流流动方向)相对于横向和垂向流速更能反映流道主要流动趋势。图 10 为典型断面纵向流速 u 沿垂线分布图。无糙条溢洪道 1 号、2 号弯段流速均值分别为 0.62 m/s、0.58 m/s, 主流线由弯段中心线流经弯顶断面后逐渐偏向出口断面凹岸处, 2 号弯段较 1 号弯段流速梯度更明显。有糙条溢洪道 1 号、2 号弯段流速均值分别为 0.34 m/s、0.32 m/s, 较无糙条溢洪道分别降

低了45.16%和44.83%,露底现象消失,凸岸流速沿垂线不变的情况也随之改变。经糙条影响,各断面凹岸纵向流速最大值均沿水深下移。

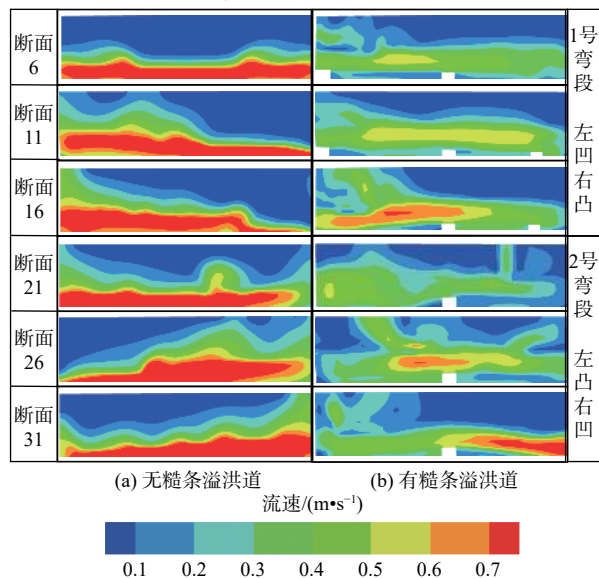


图9 典型断面流速分布

Fig. 9 Velocity distribution in typical sections

对比图10(a)中流速在布置糙条前后的变化情况:水流翻越1号弯段最后一根糙条后,重力势能转换为动能,导致出口断面中轴线处流速由无糙条溢洪道的最小变为最大;弯顶断面在凸岸临底部分流速为负值,表明此处形成了纵向环流,导致流速自上而下逐渐减小;不同于无糙条溢洪道,主流线为弯段中心线,减轻了对凹岸的冲刷;水流与糙条撞击后,部分发生回流,与来流混掺形成小涡旋,局部发生纵向涡流,导致向中轴线过渡过程中,流速紊动程度更为剧烈。

从图10(b)可以看出:布置糙条溢洪道2号弯段流速沿程逐渐增大;进口断面中轴线临底部分发生回流,这是因为过渡段处形成壅水,底部水流动能过小,不易形成能量转换所导致;由于2号弯段糙条布置间距大于1号弯段,水流结构有较好的发展空间,弯顶与出口断面也有形成环流的趋势,表明在此段糙条影响下,水流克服黏滞力形成上升流,更易发展成纵向环流与复杂的三维流动。

3.3 纵向紊动强度分布

紊动强度是明渠紊流中以脉动流速反映紊动强弱的一个重要特征值,由于在纵向分布复杂且变化明显,本文仅讨论纵向紊动强度沿垂线分布规律。每条测线均匀取5个测点,每个测点取多次提取的平均值。脉动流速的计算如式(11),据其定义,其值有正有负,故由脉动流速的均方根进行紊动强度大小计算^[29],如式(12)。

$$u' = u_f - \bar{u} \quad (11)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\sum_{f=1}^n (u_f - \bar{u})^2}{N}} \quad (12)$$

式(11)和(12)中: u' 为脉动流速, m/s; u_f 为该测点纵向瞬时流速, m/s; \bar{u} 为时均流速, m/s; ζ 为纵向紊动强度, m/s; N 为该测点采样所统计的个数。

各典型断面纵向紊动强度 σ 沿垂线分布情况见图11。无糙条溢洪道1号、2号弯段纵向紊动强度均值分别为 8.9×10^{-4} m/s、 7.6×10^{-4} m/s;水流进入弯段时冲刷凹岸,使凹岸部分受边壁磨阻及切应力影响,产生较大流速梯度使紊动强度突变,这种影响逐渐传递至中轴线处;2号弯段紊动强度沿垂线变化程度比1号弯段缓和且沿程逐渐增强直至流出弯段。然而,布置糙条溢洪道1号、2号弯段纵向紊动强度均值分别为 1.94×10^{-3} m/s、 1.3×10^{-3} m/s,较无糙条溢洪道分别增加了117.98%、71.05%;受糙条影响,各断面凹岸纵向紊动强度最大值均沿水深上移。

由图11(a)中布置糙条溢洪道可知:紊动强度起初在断面中轴线附近最强,向两侧壁面减弱,直至流经出口断面,其最大值移动至凹岸,沿断面凸岸方向逐渐减弱;中轴线处紊动强度大小的跨度范围增加较明显,这是因为主流线为弯段中心线,水流与糙条撞击后,加剧了水分子的紊乱程度,从而导致自上而下紊动强度大小差异较大。

由图11(b)可以看出:布置糙条后,2号弯段凹岸最大紊动强度由出口断面处前移至弯顶断面,使得弯顶断面水流紊乱程度较大;各断面紊动强度沿水深分布规律与无糙条溢洪道相比恰好相反;出口断面凸岸在 $z/H=0.25$ 处紊动强度发生突变,这是由于此垂线临底部分纵向流速过小,沿垂线产生较大的流速梯度所导致。

纵向紊动强度平均值及变化率(加设糙条前后,纵向紊动强度大小的增强或衰减程度)见图12。加设糙条消能工后,绝大部分断面纵向紊动强度在无糙条溢洪道基础上增强,而衰减的比率仅为33.33%,且衰减现象发生在凹岸侧的占比为83.33%,表明纵向紊动强度多在凹岸处衰减;因改善凸岸露底现象使纵向紊动强度变化率为100%外,在断面11和断面31凸岸处,其增强程度也较明显,分别为89.02%和91.04%,可见纵向紊动强度多在凸岸处增强;变化率的极大值均发生在2号弯段,分别为断面21凹岸(衰减极大值)和断面31凸岸处(增强极大值)。

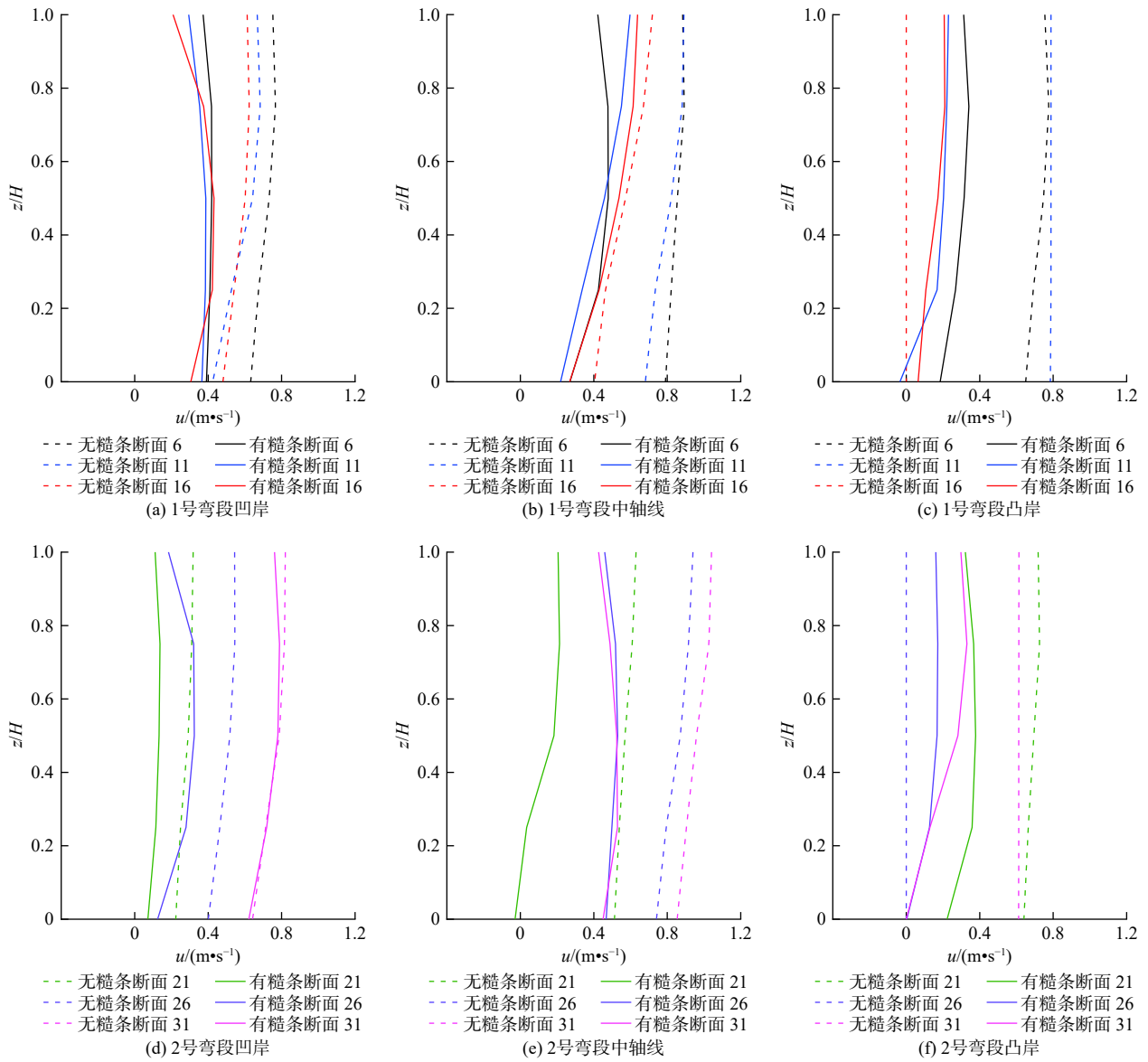
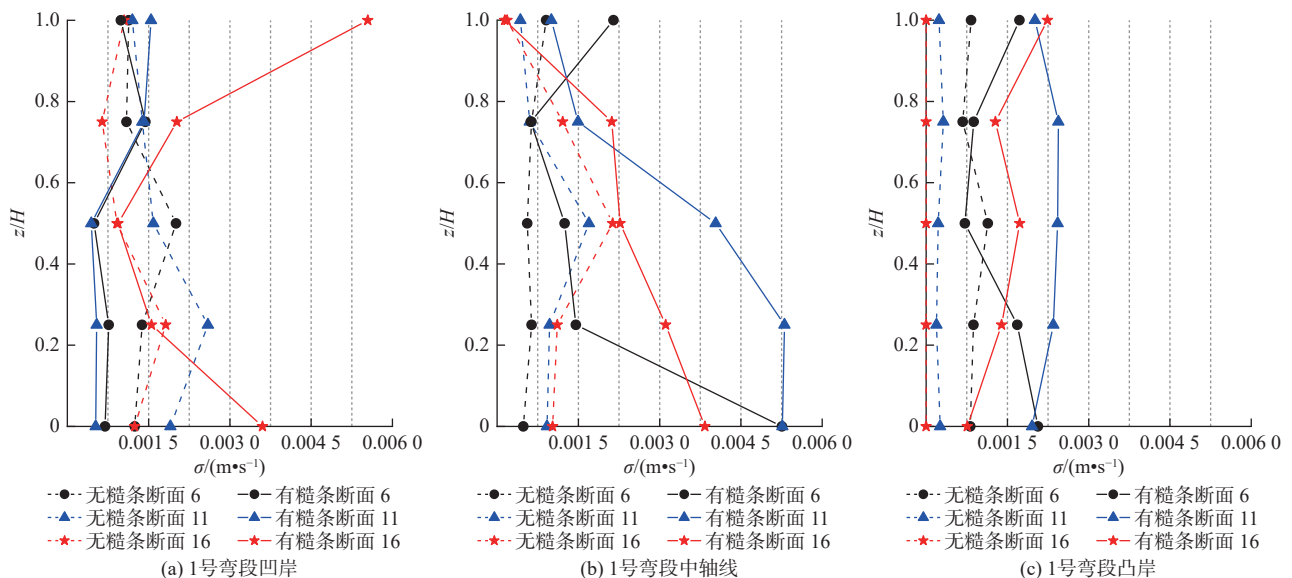


图 10 纵向流速沿垂线分布

Fig. 10 Longitudinal velocity distribution along the vertical line



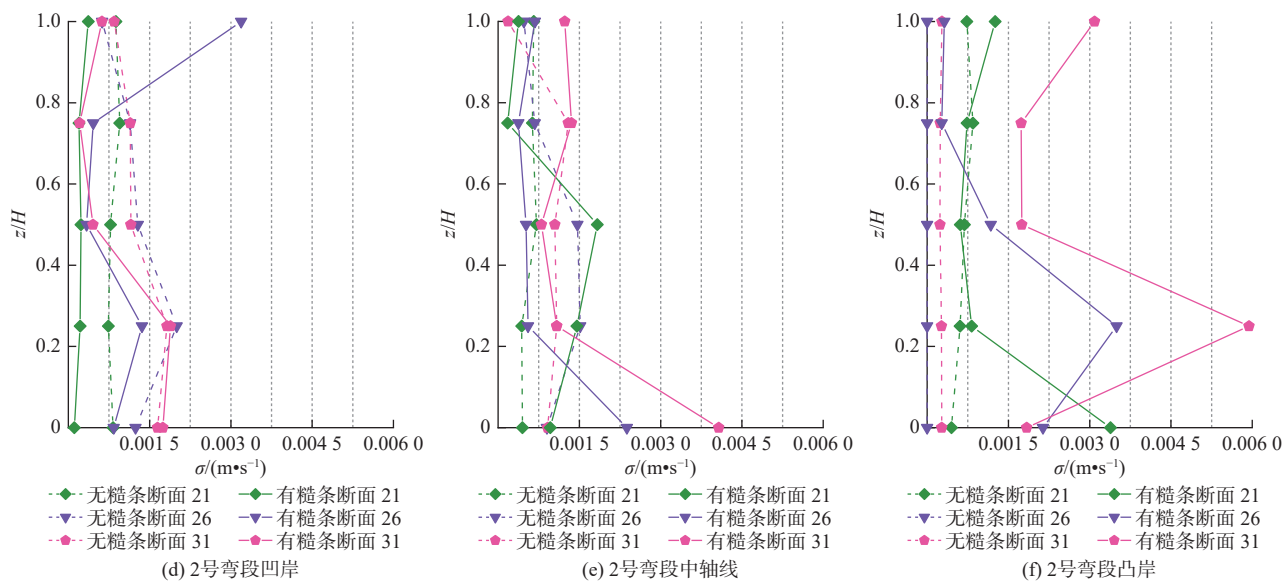


图 11 纵向紊动强度沿垂线分布

Fig. 11 Distribution of longitudinal turbulence intensity along the vertical line

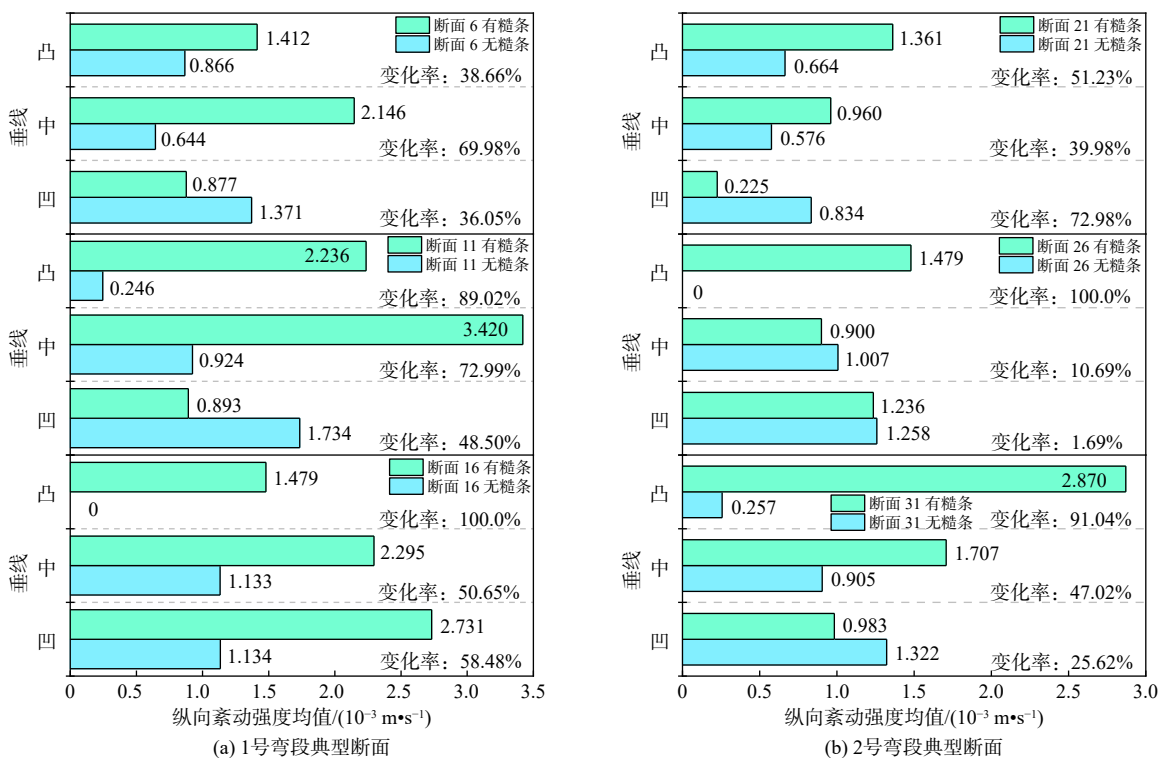


图 12 典型断面纵向紊动强度均值及变化率

Fig. 12 The mean values and changing rates of longitudinal turbulence intensity in typical sections

3.4 床面动水压力分布

床面动水压力是指水流在流动过程中垂向作用于床面的压力,是泄水建筑物一项重要水力参数,对底板稳定性起着重要作用。较差的分布形式或较大的压力差会使溢洪道底板受到大剪切力,严重时会对工程安全造成威胁。溢洪道底板所受床面动水压力见图 13。

由图 13(a)可知:无糙条溢洪道床面动水压力在顺直进口段呈对称分布,沿中心线逐渐衰减,形成两岸大、中间小的“三角形压力差”;两弯段凹岸处压力突增,至凸岸部分形成多层次压力差;过渡段呈现压力斜向递增现象;2号弯段弯顶处的压力峰值较1号弯段小;两弯段凸岸处均出现无水现象,故压力分布形式和大小类似;水流在2号弯段凹岸

出口处与边壁撞击后形成折冲水流,导致出口直段左岸至右岸压力逐渐下降。由图 13(b)可知:虽然床面动水压力整体较无糙条溢洪道大,但每两部分的衔接处压力差较小且有压力过渡,这对溢洪道连续弯段整体来说是有益的;进口直段水流逐渐壅水

至弯段前导致压力随之上涨;两弯段两岸压力差虽然相差不大,但在凹岸至凸岸过渡过程中,2号弯段压力分布更均匀且高压区所占面积大于1号弯段;过渡段呈现出压力逐渐增强的梯级分布;出口直段压力分布明显较无糙条溢洪道更均匀。

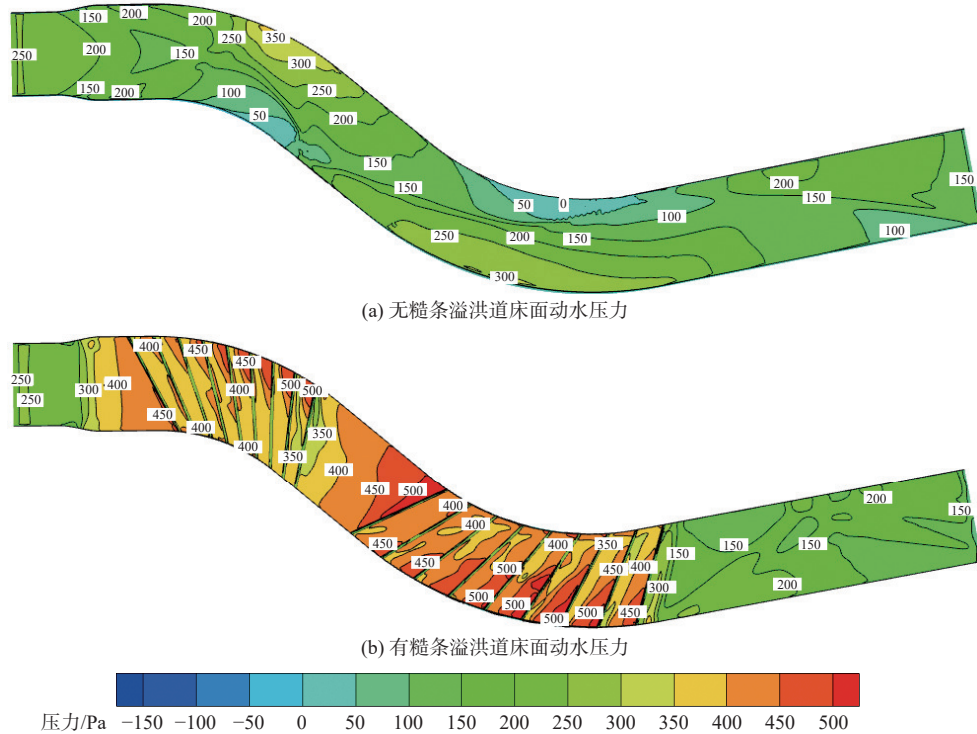


图 13 床面动水压力沿程分布

Fig. 13 Distribution of dynamic water pressure along the bed surface

4 结论

通过正交试验,经消能率与超高变异系数的筛选后,选取整流与消能效果均最佳的工况进行布置糙条与不布置糙条溢洪道水流特性对比研究,得出以下结论:

布置糙条后,改变了溢洪道沿程水深较均匀分布形式,2号弯段水深及纵向流速变化幅度较1号弯段大。糙条能有效抑制菱形波及折冲水流的产生,使弯段水面均匀性更高,同时弥补了无糙条溢洪道水流无法实现沿程平稳过渡的缺陷。

糙条使流速进行重分布,大幅减缓了弯段纵向流速。通过修正1号弯段主流线位置使导流效果更好,2号弯段回流现象较1号弯段前移且更易形成纵向环流,糙条使凹岸纵向流速最大值沿水深下移。

弯段水流因糙条的布置而加剧紊动,纵向紊动强度沿垂线分布呈现出与无糙条溢洪道相反的规律。其最大值在凹岸沿水深上移,且纵向紊动强度

在凹岸处衰减、凸岸处增强,变化率极大部分均发生在2号弯段。

糙条改善了溢洪道连续弯段床面动水压力的分布形式,减小了两岸压力差,保护溢洪道底板及边墙不易被冲蚀。

研究表明,糙条消能工可以有效改善弯段水流特征,对工程参数不同的弯段所表现出的糙条水力学特性有所差异,研究成果可为工程设计及保护溢洪道安全运行提供理论参考。后续将从微观角度入手,探究糙条在不同工程参数弯段所展现出不同水力学特性的原因及形成机理。

参考文献:

- [1] KOSKINAS A, TEGOS A, TSIRA P, et al. Insights into the Oroville dam 2017 Spillway incident[J]. *Geosciences*, 2019, 9(1): 37. DOI: [10.3390/geosciences9010037](https://doi.org/10.3390/geosciences9010037).
- [2] 李学海, 陈素红, 渠立光. 溢洪道底板水毁事故形成机理及预防措施[C]//第17届全国结构工程学术会

- 议论文集(第Ⅲ册).北京:《工程力学》杂志社,2008:358-361.
- [3] 王海军,张凡,李会平.溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究[J].*水资源与水工程学报*,2018,29(5):128-132. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.05.20.
- [4] 张红武,吕昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社.1993.
- [5] ZHANG H, MU Z W, FAN F, et al. Analysis of effects of rough strip energy dissipator on hydraulic property of bend flow[J]. *Geofluids*, 2022, 4260540. DOI: 10.1155/2022/4260540.
- [6] DASH S S, KHATUA K K. Sinuosity dependency on stage discharge in meandering channels[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2016, 142(9): 04016030. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001037.
- [7] 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):171-178. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0140.
- [8] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.06.025.
- [9] 王均星,邹鹏飞,李泽.陡弯束窄型溢洪道内水流的流态控制研究[J].*武汉大学学报(工学版)*,2003(4):15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8844.2003.04.004.
- [10] 白玉川,李彬,徐海珏,等.基岩弯曲河段洪水水流结构的试验研究[J].*水科学进展*,2022,33(1):102-110. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.01.010.
- [11] 王文娥,廖伟,漆力健.宽窄相间河道水流紊动特性试验研究[J].*水科学进展*,2020,31(3):394-403. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.009.
- [12] 王虹,王连接,邵学军,等.连续弯道水流紊动特性试验研究[J].*力学学报*,2013,45(4):525-533. DOI: 10.6052/0459-1879-12-345.
- [13] 傅灿,邱勇,余雄杰,等.一种改善溢洪道陡槽弯道水流流态的措施研究[J].*南水北调与水利科技*,2010,8(1):49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.012.
- [14] PRADHAN A, KUMAR KHATUA K, SANKALP S. Variation of velocity distribution in rough meandering channels[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018; 1-12. DOI: 10.1155/2018/1569271.
- [15] YAN X, RENNIE C D, MOHAMMADIAN A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2020, 20: 1491-1510. DOI: 10.1007/s10652-020-09751-9.
- [16] 李凡琦,牧振伟,贾萍阳,等.弯段溢洪道糙条水面结构及涡流演化分析[J].*水电能源科学*,2018,36(8):85-89.
- [17] 李凡琦,牧振伟,孙德旭,等.糙条新体型水力特性数值模拟与试验研究[J].*南水北调与水利科技*,2019,17(3):155-162. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0071.
- [18] 李登松,杨庆,范鹏源,等.曲线型局部超高阶梯溢洪道的水力特性[J].*工程科学与技术*,2018,50(4):82-88. DOI: 10.15961/j.jsuese.201700586.
- [19] 周刚,姚仕明,秦翠翠,等.连续弯道水流模拟中二次流修正效果评价[J].*水科学进展*,2016,27(2):266-279. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.02.012.
- [20] 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. DOI: 10.15961/j.jsuese.201700298.
- [21] YARAHMADI M B, BEJESTAN M S, PAGLIARA S. An experimental study on the secondary flows and bed shear stress at a 90-degree mild bend with and without triangular vanes[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2020, 33: 1-9. DOI: 10.1016/j.jher.2020.10.001.
- [22] 樊帆.溢洪道弯段糙条消能工布置参数优化研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [23] 戈向阳,夏军强,周美蓉,等.黄河下游游荡段非均匀悬沙输移特点[J].*水力发电学报*,2021,40(4):14-24. DOI: 10.11660/slfdx.20210402.
- [24] 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.
- [25] 周勤.“S”型溢洪道试验与数值模拟研究[D].成都:四川大学,2005.
- [26] 王福军.计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:124-125.
- [27] 杜金威,王均星,李辉成.阳升观台阶溢洪道水流数值模拟研究[J].*武汉大学学报(工学版)*,2020,53(2):110-116. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2020-02-003.
- [28] ZHANG Q, DIAO Y, ZHAI X, 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. DOI: 10.2166/wst.2015.523.
- [29] 廖伟,张维乐,王文娥,等.臂坡对堰槽组合设施紊流结构影响试验研究[J].*水科学进展*,2023,34(3):465-479. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.01.

Influence of rough strip energy dissipator on continuous bend spillway flow characteristics

MA Hao^{1,2}, MU Zhenwei^{1,2}, ZHANG Honghong^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: Most spillways in engineering projects included several curved sections, and the water flow in the curved sections was affected by inertial and centrifugal forces, causing the water flow to gather on the concave bank and jeopardizing the spillway's security. The rough strip energy dissipators could effectively improve this phenomenon, making it important to study the flow characteristics of continuous curved spillways and the hydraulic characteristics of the rough strip energy dissipators.

To explore the flow characteristics of continuous curved spillways and the hydraulic characteristics of the rough strip energy dissipators, 27 sets of orthogonal model tests were carried out. The optimal working conditions were selected by the energy dissipation rate and ultra-high variation coefficient, and the RNG $k-\varepsilon$ turbulent flow model and volume of fluid method were combined to compare the flow characteristics of the spillway with and without the rough strip energy dissipators.

The results showed that the water depth along the path increased and changed sharply due to the rough strip energy dissipators. The rough strip energy dissipators could inhibit the generation of rhomboid wave and fold flow, by improving the flow pattern in the two curved sections to enhance the water surface uniformity by 38% and 44.7%. The average longitudinal velocity in the two curved sections was reduced by 45.16% and 44.83% by the rough strip energy dissipators, and the maximum longitudinal velocity of the concave banks in the two sections moved downward along the water depth. The turbulent flow in the two curved sections intensified due to the influence of the rough strip energy dissipators, causing the average longitudinal turbulent intensity to increase by 117.98% and 71.05%, respectively. The longitudinal turbulent intensity mostly attenuated on the concave bank and increased on the convex bank, the maximum longitudinal turbulent intensity of each section of the concave bank moved upward along the water depth. The rough strip energy dissipators also increased the hydrodynamic pressure of the bed surface, reduced the pressure difference between the two sides, significantly improved the pressure distribution form, and protected the bottom plate and the side wall from erosion.

Based on the research results, it could be concluded that from the perspective of water level, velocity, turbulence intensity, and hydrodynamic pressure of the bed surface, adding the rough strip energy dissipators at the bottom of the spillway continuous bend could stabilize the flow, reduce the energy and reduce the erosion of water flow on the concave bank. The research results could provide a reference for the design and safe operation of similar spillway continuous bends.

Key words: rough strip energy dissipator; continuous curved spillway; ultra-high variation coefficient; water surface uniformity