

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0071

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. LI F Q, MU Z W, SUN D X, et al. Numerical simulations and experimental studies on hydraulic characteristics of new shape rough-strips[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 155-162. (in Chinese)

糙条新体型水力特性数值模拟与试验研究

李凡琦, 牧振伟, 孙德旭, 贾萍阳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 以往的溢洪道弯段消能导流措施多适用于宽深比(溢洪道宽度与平均水深之比)较小的弯道, 对于宽深比较大的弯段溢洪道消能导流问题研究较少。结合新疆“635”溢洪道整治工程, 在一般工程措施解决弯段溢洪道横向环流的基础上, 提出糙条辅助消能工的新体型。为深入探究糙条的水力特性及导流机理, 通过模型试验结合数值模拟的研究方法; 基于 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对弯段溢洪道 7 种工况进行数值模拟计算, 并与试验结果对比研究。结果表明: 针对大宽深比弯段溢洪道的消能导流问题, 糙条新体型有传统辅助消能工无法取代的优势, 且在解决弯道环流、降低水面横比降、缩短下游调整段距离的同时, 水面流态依然较传统型消能工优越。

关键词: 弯段溢洪道; 糙条新体型; 弯道环流; 水面结构; 床面动水压力; 流速分布

中图分类号: TV651.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical simulations and experimental studies on hydraulic characteristics of new shape rough-strips

LI Fanqi, MU Zhenwei, SUN Dexu, JIA Pingyang

(College of Hydraulic and Civil Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumchi 830052, China)

Abstract: The traditional energy dissipation and diversion measures of the curved spillway are mostly applicable to the curves with a smaller breadth-depth ratio (e. g. , the ratio of spillway breadth to average water depth), however, the problems of energy dissipation and diversion for the curved spillway with larges breadth-depth ratio have been reported in the literature. The new type of rough-strips energy dissipator was proposed in this study based on the general engineering measures to solve the transverse circulation in curved spillway and combination with 635 Spillway Regulation Project in Xinjiang. . In order to further explore the hydraulic characteristics and the diversion mechanism of the rough-strips, numerical simulations and experimental studies were used in this study, i. e. , numerical simulation on the seven working conditions of the bending based on the RNG $k-\epsilon$ turbulence model. The results showed that the new type of rough-strips had the advantages over the traditional auxiliary energy dissipator, which is not applicable to energy dissipation and the curved spillway with larges width to depth ratio. The flow patterns of water surface was also superior to that of traditional energy dissipator, while solving the circulation current in river bend, reducing the transverse slope of water surface and shortening the distance of downstream adjustment section.

Key words: curved spillway; new shape rough-strips; circulation current in river bend; the surface structure; the bottom dynamic water pressure; velocity distribution

收稿日期: 2018-11-14 修回日期: 2019-03-29 网络出版时间: 2019-04-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190403.1419.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51769037; 51469031); 新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目(XJEDU2017T004); 新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGR12017032)

作者简介: 李凡琦(1992—), 男, 安徽宿州人, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Lfqchn@163.com

通信作者: 牧振伟(1973—), 男(回族), 河南南阳人, 教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xjmzw@163.com

水流进入弯道,由于受到离心力和边壁的顶托作用,在一个断面系统内形成封闭状态的横向环流,并在纵向水流的冲击下形成顺主流方向呈螺旋状的复杂水流。由于流动问题的复杂性和多元性,弯道环流的研究一直是水力学及河流动力学领域相当棘手的重要课题^[1]。

现有的弯道消能导流措施多采用导流墩^[2]、导流栅^[3]、丁坝^[4]、悬栅^[5]等辅助消能工,试图在设定的距离内调整弯道流态和控制横向环流的产生。1976 年 Thompson J^[6]通过试验研究首次提出横向环流以来,诸多学者针对弯道横向环流进行了大量研究^[7-9]。并取得了丰硕的成果。数学模型方面,秦翠翠^[10]等,对现有的弯道环流模型进行了修正,使其更适用于弯曲度较大的连续弯道及天然河道水流横向演变的模拟。M. R. Bhajantri 等^[11]在二维有限体积模型的基础上,建立了溢洪道水动力模型,对弯道二维水流数值模型进行了优化。在多孔介质流、多相流模拟中,丁全林等^[12]采用三维多松弛 LBM 与 $k-\epsilon$ 稳流模型耦合的方法使模型更适用于复杂边界条件的弯道水流,通过该模型对 U 型弯道水流进行了数值模拟,并对比试验数据验证了该模型可靠性较高。试验研究方面,白音包力皋等^[3]以某电站进水管道为例,根据纵向流速分布沿横向的衰减与导流栅承担宽度(导流栅间距)增加一致的原理,并结合对弯道进口断面微元化处理的方法导出了每个导流栅所承担的水流动量公式,为弯道导流方面的分析提供了一种新的方法。理论研究方面,哈岸英^[13]通过对弯道水面横比降、横向环流垂线纵向分布及环流流速沿程分布方面,对比苏联学者罗索夫斯基^[14]、张红武^[15]、A J Odgaard^[16]、宋志尧等^[17]诸家公式在不同水力条件下的适用情况做了验证,认为张红武公式与实际最为相符,且能反应底层环流较表层环流衰减更快的真实性。在实际工程中,张建民等^[18]针对新疆卡群一级水电站泄水建筑物通过布置悬栅、悬板栅等辅助工程措施来改善弯道段水面横比降及遏制弯道环流的产生,根据悬栅、悬板栅“消、导”结合在弯道陡坡消能导流方面取得了较好的效果。

在溢洪道消能和导流方面,国内外虽然进行了大量研究,但对于宽深比较大的弯段溢洪道研究甚少。笔者结合新疆“635”溢洪道整治工程^[19],在糙条联合导流墩消能工的基础上,对糙条新体型及布置形式进行了优化。由于该体型是结合具体工程提出,目前对其研究较少,为探究其对水流的影响,针对该新体型进行了数值模拟计算,得到了其细部水

力特性,并与模型试验结果进行了对比分析。

1 试验设计

试验在 60°弯道模型中进行,整套模型系统分为自循环供水系统、矩形断面模型主体、水位流速测量系统;模型主体顺水流方向依次为进口直段、60°弯道段、出口调整段。模型沿程采用宽 B 为 50 cm 的矩形断面,进口直段长为 60 cm,可以满足水深及流速在进入弯道前的横向调整;60°弯道段采用 R/B 为 2.2 的薄壁弯道(R 为弯道中心线曲率半径),弯道边壁由 3 mm 有机玻璃热弯构成,可实现弯道转角的连续变化,出口段长 140 cm,可充分满足水流出弯后水深及流速的重分布;模型沿程坡度系数 i 为 0.025;模型沿程布置 51 个断面,每个断面布置 11 个测点,考虑边界对水流参数的影响,靠近两岸的测点取距离边壁 1 cm 的位置;由于溢洪道模型宽深比较大,沿程水深较浅,因此,采用毕托管对时均流速进行测量。沿程共设置 13 个测流断面,每个断面均匀选取 6 个测点,测点位置为 $2H_0/3$ 处(H_0 为测点处的水深)。试验模型结构及测点布置见图 1。

针对宽浅弯段溢洪道既要降低水面横比降,又要在弯道起到稳流的效果,鉴于二者要求,提出在弯道段布置糙条新体型。糙条主要布置在 60°弯道段并紧贴床面,断面形式采用矩形断面,糙条中心位置沿溢洪道中轴线依次布设,与横断面的夹角 θ 为 20°。考虑到糙条横跨整个弯道断面布置及水流进入弯道后不均匀分布等因素,糙条布置高度凸岸为 0.8、1.0、1.2 cm,对应凹岸高度为 1.6、2.0、2.4 cm。糙条具体布置示意图见图 2。

糙条布置间距及高度是反应水流特性的重要参数,试验首先通过控制糙条高度不变,改变糙条布置间距,观察糙条间距对水流结构的影响,其次控制最优糙条布置间距不变,改变糙条高度,进而揭示糙条高度对水流形态的影响规律,具体试验参数见表 1。

表 1 试验工况参数设定

Tab. 1 Parameter settings of experimental conditions

工况	流量/ ($L \cdot s^{-1}$)	糙条高度 h/cm	糙条间距 L/cm	糙条宽度 b/cm	L/B	R/B	是否布置 导流墩
1	22.5	—	—	—	—	2.2	否
2	22.5	1.6~0.8	18.0	2.7	0.44	2.2	是
3	22.5	1.6~0.8	14.0	2.7	0.28	2.2	否
4	22.5	1.6~0.8	18.0	2.7	0.36	2.2	否
5	22.5	1.6~0.8	22.0	2.7	0.44	2.2	否
6	22.5	2.0~1.0	18.0	2.7	0.36	2.2	否
7	22.5	2.4~1.2	18.0	2.7	0.36	2.2	否

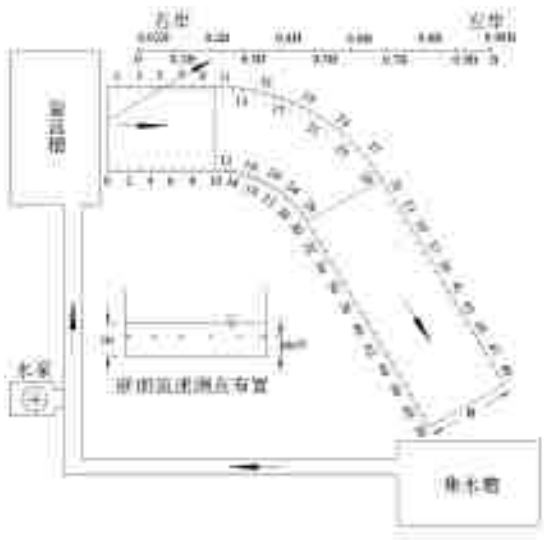


图1 试验模型结构及测点布置

Fig. 1 Test model structure and measure points

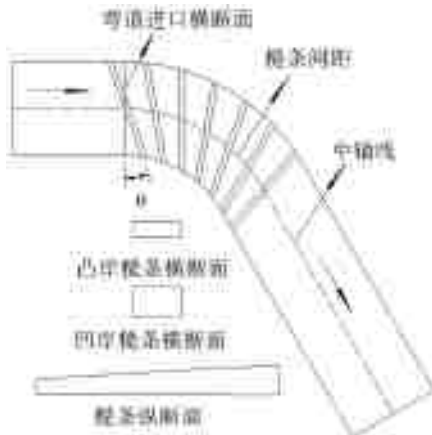


图2 糙条消能工新体型布置

Fig. 2 Schematic diagram of new rough-strips energy dissipater

是受到凹岸边壁的顶托作用,使水流强制改变流动方向,即便在凹岸边壁侧布置导墙,水流仍是在流至凹岸附近受导墙作用后才开始改变流动方向,因此,凹岸边壁附近布置导墙是不合理的,而且导流墩布置转角大于弯道边壁转角,使得水面跌宕幅度增加,表面流态恶化。鉴于以上问题,新体型应从导流能力及改善水面流态两个方面进行综合考虑,试验结果表明:整体增加凹凸岸糙条高度,便能很好的取代凹岸侧导墙的导流作用;通过改变糙条布置方式即按糙条中心位置沿溢洪道中轴线依次倾斜布置,这样布置的好处在于首根糙条的前半部分可以取代顺直段末端的导流墩,使得水流在进入弯道前便开始向凸岸流动,具体糙条布置方式见图3。

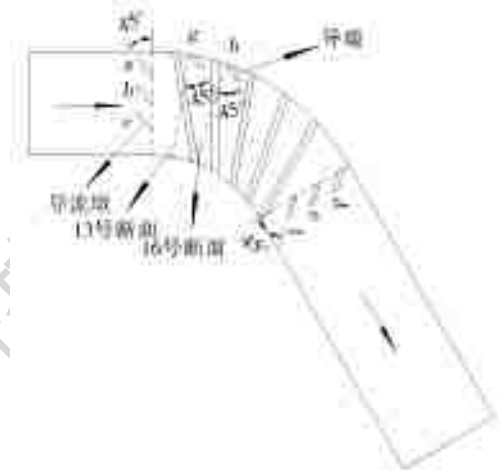


图3 导流墩联合糙条消能工布置方式

Fig. 3 Diagram of energy dissipation of diversion pier combined with rough-strips

2 模型试验研究成果

2.1 糙条体型及优化布置形式的提出

图3是“635”溢洪道整治工程导流墩联合糙条辅助消能工布置形式。通过合理的布置联合消能工,水流沿程分布基本均匀,凹凸岸最大水深相差0.75 m,两岸最大流速相差1.83 m/s;在无导流墩联合糙条工况,凹凸岸最大水深相差2.96 m,两岸最大流速相差11.9 m/s。对比发现,通过合理的布置联合能工在改善弯道横比降及流速分布方面是一种有效的工程措施。然而,在凹岸及弯道进口前沿布置导流墩及导墙虽能有效制约水流的离心作用,但水面结构较为紊乱,局部水流出现飞溅的现象,水流形态并不理想。

为解决这一问题,在导流墩联合糙条的基础上,优化了糙条辅助消能工的体型及布置形式。通过试验对水面结构进行观察观察,水流进入弯道后,主要

2.2 水面结构

图4是各工况的水面结构形态,图4(a)是无糙条工况,水流进入弯道后受离心力作用,明显可以看出大部分水流在凹岸壅高,凸岸在25号断面附近出现无水区,凹凸岸水流分布严重失调,水流出弯后受边壁顶托作用的影响,下游顺直段折冲水流明显,形成贯穿整个顺直段的冲击波。图4(b)是按照“635”工程布置方法布置的导流墩联合糙条辅助消能工后的水面结构形态,该工况虽然在弯道水流横向分布上得到了很好的分配,下游段折冲波也得到很好的改善,但该工况弯道段水面结构紊乱,水面沿横向和纵向均出现跌宕水流。图4(c)、4(d)、4(e)、是改变消能工布置间距得到的水面结构形态,对比图4(b)可以发现,随着布置间距的减小弯道段水面跌宕幅度明显降低,水面结构向稳定的趋势发展。图4(d)、4(f)、4(g)是不同糙条高度对应的水面形态,随着糙条高度的增加,在水流横向均匀分布上虽取得了良好的效果,但水面结构会逐次恶化,在实际

工程中,糙条的实际高度结合其对水流影响规律,应

根据实际情况综合判断。

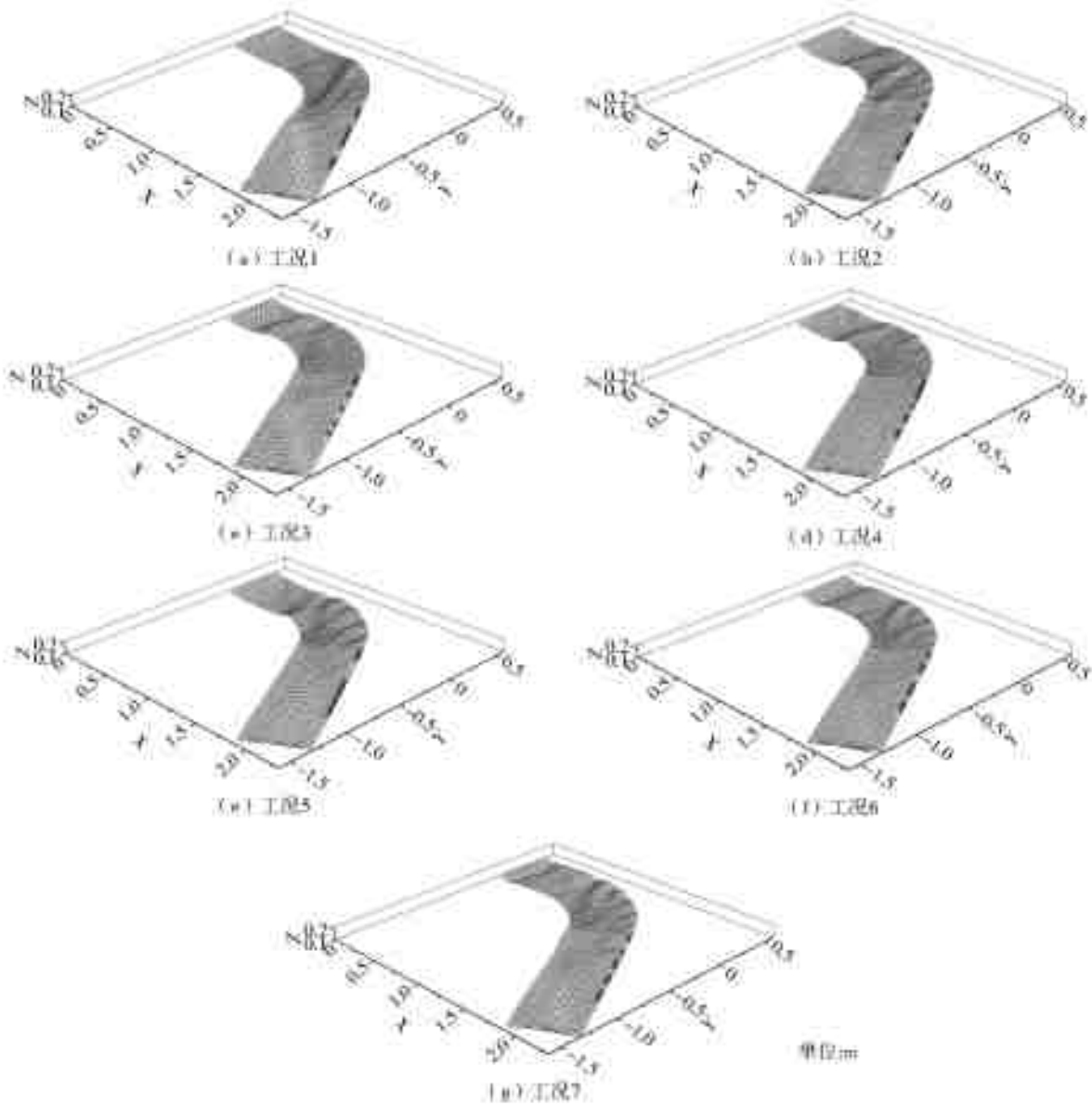


图 4 各工况弯道水面结构

Fig. 4 The curved surface structures of various working conditions

2.3 典型断面水面横比降及纵向流速分布

表 2 是根据实测数据得到的各工况典型断面水面横比降及沿程最大流速分布,对比 7 种工况可以发现,无论是“635”工程糙条布置形式,还是按照糙条新体型的方法布置,弯道段水面横比降均得到很大程度上的改善;弯道段流速在布置糙条后,纵向上流速基本稳定在 1.0~1.2 m/s。工况 3、4、5 是改变糙条布置间距得到的水面横比降及沿程最大流速,随着糙条间距的增加,改善水面横比降的程度有下降趋势,而对纵向流速的影响相对较小,综合对比 3 种工况,工况 4 的水力条件优于另外两种工况,即糙条间距为 18 cm 时的工况最优。工况 4、6、7 是控制糙条间距不变,改变凹凸岸糙条布置高度得到的

水面横比降及沿程最大流速,随着糙条高度的增加,观察弯道处所在断面水面横比降明显减小,在下游调整断面水面横比降反向增大,这说明糙条高度的增加可以促进糙条对弯道水流的导流作用,减小水面横比降,但也会加剧下游折冲波的衍生,使水面负横比降增大。

3 建立数学模型

3.1 控制方程

本文基于 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对弯段溢洪道进行数值计算,其连续方程、动量方程及 k 、 ϵ 方程如下。

连续性方程

表 2 典型断面水面横比降及沿程最大流速

Tab. 2 Typical section transverse slopes of water surface and along the maximum flow rate

典型断面 标号	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4		工况 5		工况 6		工况 7	
	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)	横比降/ %	最大流速/ (m·s ⁻¹)
5	1.89	1.01	1.97	1.129	2.21	1.04	2.15	1.07	2.49	1.04	0.61	0.87	1.39	0.82
10	0.02	1.16	0.66	0.919	-0.72	0.71	-1.58	1.02	-0.80	0.91	-1.72	0.79	-2.62	0.73
15	7.25	1.25	3.99	0.908	5.07	1.00	5.11	1.00	1.53	0.93	3.75	0.91	2.87	0.82
20	14.58	1.36	6.58	0.897	6.04	0.94	6.36	0.89	7.12	1.01	5.88	0.89	4.84	0.82
25	17.41	1.37	4.87	0.886	5.81	0.94	6.83	0.95	7.03	0.96	5.87	0.93	6.03	0.76
30	15.90	1.36	3.84	0.817	4.76	1.20	6.18	1.20	6.32	1.13	3.32	1.14	3.26	1.03
35	1.40	1.48	2.90	1.221	2.40	1.33	2.52	1.39	1.82	1.34	2.90	1.37	3.86	1.17
40	-5.38	1.55	-0.50	1.435	-3.02	1.48	-0.48	1.49	-1.38	1.46	-0.50	1.43	0.08	1.29
45	-4.58	1.62	-1.38	1.502	-1.94	1.49	-1.96	1.50	-1.10	1.48	-1.38	1.50	-1.90	1.46
50	-3.16	—	-1.36	—	-0.84	—	0.18	—	-0.38	—	-0.36	—	-0.68	—

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho B_i \quad (2)$$

k 方程

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

ε 方程

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \rho \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中:ρ 和 μ 分别表示体积分数平均密度和分子黏性系数;P 为压力;B_i 为单位体积的体积力;G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能;C_{1ε}、C_{2ε} 均为经验系数,本文取 C_{1ε} 为 1.44,C_{2ε} 为 1.68;μ = ρν_t 为黏性系数,其中 ν_t 为运动黏性系数,它可以由紊动能 k 和紊动耗散率 ε 求解

$$\nu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon}; C_{\mu} = 1.42 - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}; \eta = Sk/\epsilon; S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (5)$$

上述张量表达式中,i=1,2,3,即{x_i=x,y,z}, {u_i=u,v,w};j 为求和下标,方程中通用模型常数见表 3。

表 3 模型中采用的常数值

Tab. 3 Constants used in the model

常数	η ₀	β	C _μ	C _{2ε}	σ _k	σ _ε
常数值	4.38	0.012	0.085	1.68	0.717 9	0.717 9

3.2 网格无关性验证及网格划分

本文通过改变工况 4 的网格数量来进行网格无关性验证。采用三种不同网格数量分别为 25.78、44.28、59.14 万个对弯道进行模拟。网格尺寸分别设定为 0.30、0.45 和 0.60 cm,网格划分方式及模拟方法均相同,其中网格划分方式采用六面体结构化网格进行划分。三种网格数量的模拟水深(模型凸岸 0 号纵断面沿程水深)对比试验结果见图 5,网格数量在 25.78 万个时,模拟结果与实验值偏差较大,增加网格数量至 44.28 万个时,模拟结果与实验值基本吻合,继续增加网格数量至 59.14 万个,模拟结果与 44.28 万个时基本相同,因此,网格数量增加至 44.28 万个时可以满足网格无关性要求。

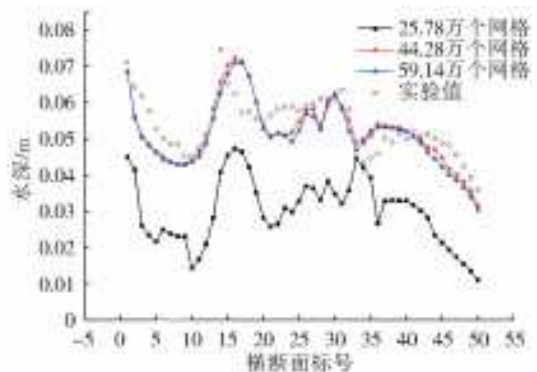


图 5 0 号断面不同网格数量模拟水深与实验结果对比
Fig. 5 Comparison of simulated water depth and experimental results with different number of meshes in section 0#

为更好的对水气二相流交界面进行捕捉,得到更加精确的水深,垂向上,靠近水面位置进行网格加密,首先通过均匀网格对 7 种工况进行计算,确定大致水深波动范围,根据该范围再对各工况采用 0.85 的比率进行网格加密,网格加密效果见图 6。



图 6 模型边墙近水面网格加密

Fig. 6 The model edge wall near the surface of the grid encryption

3.3 初始条件与边界条件

模拟下泄流量 $Q=15\text{ L/s}$, 计算初始时刻水深为 0.086 m , 进口流速为 3.48 m/s 。固壁采用标准壁函数法来处理, 速度与压力耦合方程组利用半隐式 SIMPLE 算法求解。进口边界条件分别为

$$\vec{V} = \frac{Q_m \vec{n}}{A}; k_{in} = 0.03 V_{in}^2; \epsilon_{in} = \frac{C_\mu k_{in}^{1.5}}{l_{in}} \quad (6)$$

式中: V_{in} 为进口流速 (m/s); l_{in} 是进口混合长度 (cm); Q 为来流流量 (L/s); A 为进口面积 (cm^2); \vec{n} 为进口边界面内法向量; ϵ_{in} 为进口紊动耗散率。出流边界上按紊流充分发展条件给定: 即 $\partial\phi/\partial n = 0, \phi = U, V, W, k, \epsilon$ 。固壁采用壁函数法来处理; 采用 VOF 法追踪模拟自由表面。

4 弯道糙条新体型水力特性数值模拟

4.1 模型验证

数学模型采用较为精确的试验数据进行验证, 通过对工况 4 进行数值模拟并与试验结果进行对比, 图 7、8 分别为 10 号纵断面模拟水深及 5 号纵断面模拟流速与试验值对比结果。结果显示, 水流在弯道进口处流速和水深均存在相应的误差, 这可能是由于在测量过程, 水流的波动带来的误差。整体观察, 水面线及轴线纵向流速与试验结果吻合良好, 说明本文采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型研究弯段溢洪道的水力特性是可信的。

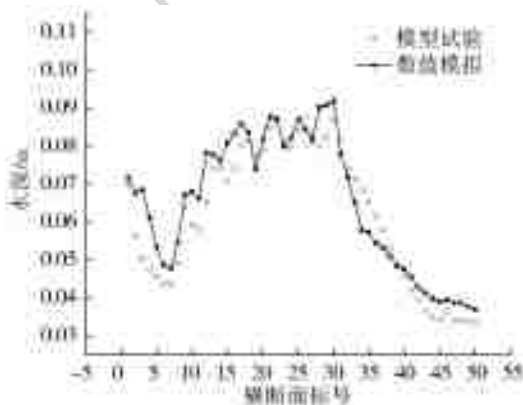


图 7 10 号纵断面模拟水深与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of simulated depth with observations at Section #10

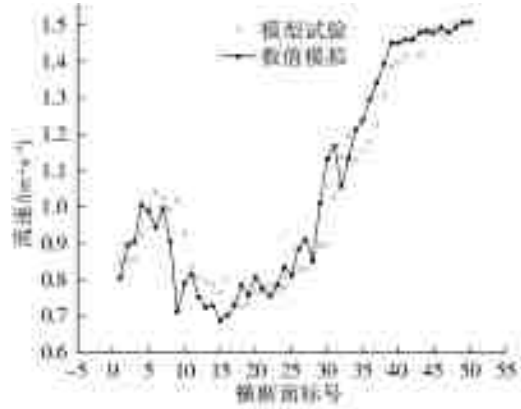


图 8 5 号纵断面模拟流速与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of simulated velocity with observations at Section #5

4.2 床面动水压力分布

床面动水压力是泄槽工程中重要的水力要素。图 9 是糙条新体型 6 种不同布置形式得到的弯道床面动水压力分布情况, 几种工况对比无糙条工况不难看出糙条新体型可以很好的平衡弯道段床面动水压力分布, 观察工况 3 至工况 5, 随着糙条间距布置参数 L/B 从 0.28 增长至 0.44 , 弯道段床面动水压力峰值分布逐次向凸岸偏移, 糙条间距的收缩对弯道段床面动水压力的均匀分布有促进作用。对比工况 4、6、7, 随着糙条高度从 1.6 cm 增长至 2.4 cm , 弯道段床面动水压力分布逐渐趋向均匀较无糙条工况相比, 最大绝对动水压力差从 $31\ 111\text{ Pa}$ 降低至 $8\ 889\text{ Pa}$ 。随着糙条高度的增加, 进口顺直段水深也随之增大, 在工况 7 糙条高度增至 2.4 cm 时, 进口顺直段及弯道段床面动水压力分布基本均匀, 从床面剪切力角度分析这对弯道床面受力是有利的。

4.3 沿程断面横向流速分布

图 10 是不同糙条布置形式沿程各断面瞬时流速分布, 观察工况 1 沿程断面流速分布情况, 在无糙条工况下断面流速分布极不均匀, 且在凸岸测, 出现无水区域。

工况 3 至工况 5 是控制糙条高度 $1.6\sim 0.8\text{ cm}$ 不变, 改变糙条间距得到的断面流速分布情况, 对比各工况典型断面流速分布可以看出纯粹的改变糙条间距并不能很好的调节流速重分布, 随着糙条间距的减小, 断面流速分布反而更加紊乱。观察工况 4、工况 6、工况 7, 结合水面结构及水面横比降的研究结果, 选取糙条间距为 18 cm , 改变糙条高度进一步研究糙条高度对流速重分布的影响, 随着糙条高度从 $1.6\sim 0.8\text{ cm}$ 增大到 $2.4\sim 1.2\text{ cm}$, 断面纵向流速分布逐渐趋于均匀, 值得一提的是, 糙条高度达到 $2.4\sim 1.2\text{ cm}$ 时, 断面纵向流速基本分布均匀,

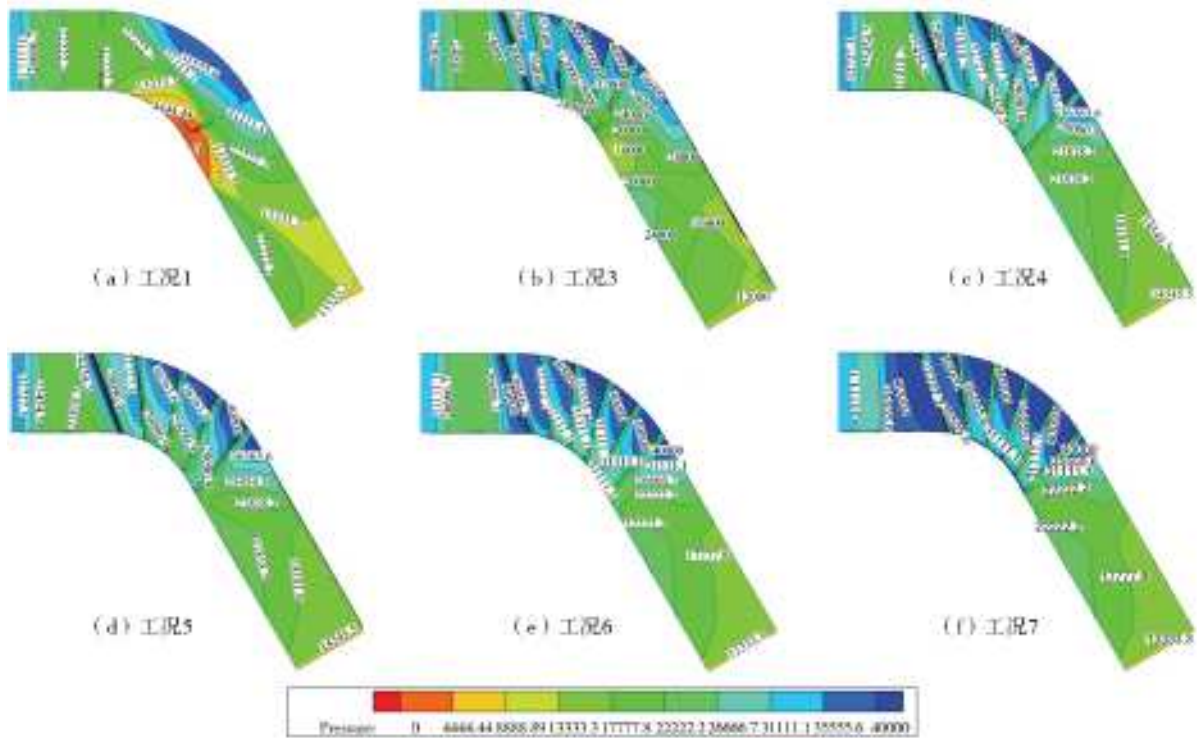


图9 不同糙条布置形式床面动水压力分布

Fig. 9 Dynamic water pressure distributions of bottom plate in different rough-strips layouts

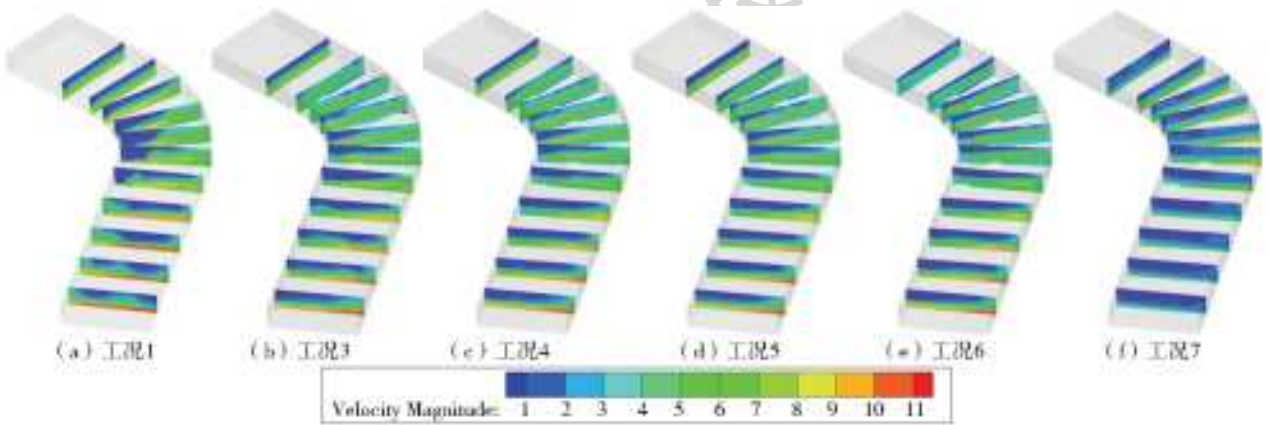


图10 不同糙条布置形式沿程流速分布

Fig. 10 Velocity distribution along different rough-strips layouts

且水流出弯后无折冲水流产生,糙条高度的逐渐增加使得进口顺直段水深逐次加深,仔细观察可以发现,糙条高度增至 2.4~1.2 cm 时,沿程流速值均不同程度的有所减小,从消能角度分析,合理的增加糙条高度对弯道消能防冲有一定的促进作用。

5 结论

通过对弯段溢洪道 7 种典型工况进行模型试验,并结合数值模拟对弯道布置糙条新体型进行深入研究,现得到以下主要结论。

(1)针对宽深比较大的弯段溢洪道横向环流问题,糙条新体型在解决弯道环流、降低水面横比降、改善水流流态方面比传统型辅助消能工的改善效果

更加优良。

(2)糙条新体型的布置方式对糙条的导流消能效果有明显的影 响,无论是糙条间距的减小,还是糙条凹凸岸高度的增加,对弯道段床面动水压力的均匀分布都有促进作用,其中,糙条高度增加至 2.4~1.2 cm 时,弯道床面动水压力分布基本均匀,较无糙条工况最大断面压差相比,床面绝对动水压力差降低 85.7%。

(3)下游段流速重分布的调整距离是溢洪道设计中必不可少的重要因素,合理的增加糙条高度不仅可以避免出弯处折冲水流的产生,还可以使断面流速分布沿程基本均匀,特别是 $L/B=0.36$,糙条高度为 2.4~1.2 cm 时,沿程断面流速分布基本均

匀,很大程度上缩减了下游调整段的距离。

参考文献(References):

- [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. (HA A Y, LIU L. Research situation of water flow in bend open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1462-1469. (in Chinese))
- [2] ZI D, WANG F J, YAO Z F, et al. Numerical simulation on rectifying flow in intake system of a pumping station connected with headrace pipe[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 49(3): 032004. DOI: 10.1088/1755-1315/49/3/032004.
- [3] 白音包力皋,孙东坡,李国庆.导流栅对弯道水流调整的研究[J].水利学报,2001(1):1-5. (BAI Y B L G, SUN D P, LI G Q. Adjustment of flow momentum in curved channel by using diversion grid[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (01): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2001.01.001.
- [4] 哈岸英,李国栋,杨兰,等.丁坝群间取水建筑物局部流场及其冲淤变形的试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(4):602-611. (HA A Y, LI G D, YANG L, et al. Local flow field and scour near the water intake project between spur dikes[J]. Journal of Basic Science and Engineering 2012, 20(4): 602-611. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2012.08.006.
- [5] 蒋建楠,牧振伟,位静静,等.悬栅消力池内水流冲刷过程中悬栅抗冲刷研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(2):156-162. (JIANG J N, MU Z W, WEI J J, et al. Anti-scouring ability of suspended bars during water scouring of suspended-bar stilling basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology. 2017, 15(2): 156-162. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.02.024.
- [6] THOMSON J. On the origin and winding of rivers in alluvial plains[J]. Royal Society of London, 1876, 25(3): 5-8. DOI: 10.1098/rspl.1876.0004.
- [7] ZHOU J Y, SHAO X J, WANG H, et al. Assessment of the predictive capability of RANS models in simulating meandering open channel flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(1): 40-51. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60714-X.
- [8] HEKMATZADEH A A, PAPARI S, AMIRI S M. Investigation of energy dissipation on various configurations of stepped spillways considering several RANS turbulence models[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2017. DOI: 10.1007/s40996-017-0085-9.
- [9] MOHAMMADZADEH-HABILI J, HEIDARPOUR M, SAMIEE S. Study of energy dissipation and downstream flow regime of labyrinth weirs[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2017. DOI: 10.1007/s40996-017-0088-6.
- [10] 秦翠翠,邵学军,周建银,等.环流修正模型对连续弯道水流模拟的适应性分析[J].清华大学学报,2016,56(12):1264-1270. (QIN C C, SHAO X J, ZHOU J Y, et al. Suitability of simulating flow in meandering channel by modified depth-averaged model[J]. Journal of Tsinghua University. 2016, 56(12): 1264-1270. (in Chinese))
- [11] BHAJANTRI M R, ELDHO T I, DEOLALIKAR P B. Hydrodynamic modelling of flow over a spillway using a two-dimensional finite volume-based numerical model[J]. Sadhana, 2006, 31(6): 743-754. DOI: 10.1007/bf02716893.
- [12] 丁全林,王玲玲,汪德耀,等.基于多松弛格子玻尔兹曼的弯道水流三维数值模拟[J].水科学进展,2012,23(4):523-528. (DING Q L, WANG L L, WANG D G, et al. Three dimensional numerical simulation of bend flow based on the multi-relaxation times lattice Boltzmann method[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(4): 523-528. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32.1309.P.20120614.2251.017.
- [13] 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. (HA A Y, LIU L. Research situation of water flow in bend open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1462-1469. (in Chinese))
- [14] 罗索福斯基,尹学良.弯道水流的研究[J].泥沙研究,1958,3(01):83-95. (ROSOVSKY И Л, YIN X L. Investigation of flow in bend channels[J]. Journal of Sediment Research, 1958, 3(1): 83-95. (in Chinese))
- [15] 张红武,吕昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社,1993. (ZHANG H W, LYU X. [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1993. (in Chinese))
- [16] ODGAARD A J. Meander flow model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(12): 1137-1149. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:11(1451).
- [17] 宋志尧.计算弯道环流的通用公式[J].泥沙研究,2003(4):19-23. (SONG Z Y. The universal formula on transverse circulation in channel bends[J]. Journal of Sediment Research, 2003(4): 19-23. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0468-155X.2003.04.004.
- [18] 张健民,王玉蓉,杨永全,等.过悬栅、悬板栅水流流场测试及消能分析[J].四川大学学报(工程科学版),2002(2):36-38. (ZHANG J M, WANG Y R, YANG Y Q, et al. Elimination of supercritical shock in slope-curve channel[J]. Advanced Engineering Sciences, 2002(2): 36-38. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-3087.2002.02.010
- [19] 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. (SUN J, CHEN X M. The regulation of spillway water flow by diversion pier and rough-strips[J]. Xinjiang Water Resources, 2001(6): 6-9. (in Chinese))