

基于正交设计的黄池沟退水道弯道体型优化的数值模拟分析

谭立新¹, 他金城², 张杰¹, 王雯¹, 张宗孝¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810001)

摘要:为探求黄池沟退水道弯道的合理体型,采用正交设计与数值模拟相结合的方法研究了体型参数对弯道水流的影响。选取弯道宽度、弯道曲率半径、纵向坡度3个主要影响参数按正交试验设计,确定了9组正交试验方案,利用经水工模型试验结果验证的数学模型对正交试验方案进行模拟,分析了体型参数对弯道及下游陡坡段横向水位差的影响。结果表明,3个体型参数影响作用由大到小依次为纵向坡度、弯道宽度和弯道曲率半径;坡度为显著影响因素,且平坡最佳,弯道曲率半径和弯道宽度影响不显著,据此推荐合理体型参数为坡度取0,弯道宽度和弯道曲率半径采用原设计值。

关键词:体型参数;弯道水流;正交设计;数值模拟;黄池沟退水道弯道

中图分类号:TV651.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)05-0082-06

Numerical simulation of shape optimization for Huangchigou overflow bend channel based on orthogonal design// TAN Lixin¹, TA Jincheng², ZHANG Jie¹, WANG Wen¹, ZHANG Zongxiao¹(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. SPIC, Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810001, China)

Abstract: In order to explore the reasonable shape of the Huangchigou overflow bend channel, the influence of shape parameters on the flow was studied by means of orthogonal design and numerical simulation. Different parameter combinations were determined based on orthogonal experimental design for three shape parameters, including width of bend, radius of curvature and longitudinal slope. Nine sets of orthogonal experimental schemes were determined and simulated by the numerical model after validation by the experimental results from hydraulic model tests. The main factors affecting the water level difference in the bend sections and steep slopes were analyzed. The results show that the effect of the three shape parameters from the largest to the smallest is the longitudinal slope, bend width and the radius of curvature. The slope is a significant factor, and the flat slope is the best. The curvature radius and width of the bend have no significant impact. Therefore, a reasonable shape parameter is recommended that the slope is 0, and the original design values should be maintained for curvature radius and width of the bend.

Key words: shape parameters; bend flow; orthogonal design; numerical simulation; Huangchigou overflow bend channel

引汉济渭工程是陕西省大型水利工程,承担着重要的调水和输配水的任务,黄池沟配水枢纽是其中的重要组成部分。黄池沟配水枢纽中重要的泄水建筑物是由侧堰、侧槽段、弯道段、陡坡段和消能段组成的侧槽退水道^[1]。黄池沟侧槽退水道侧槽段后为弯道接陡坡段,初设方案为弯道与陡坡同坡度,但考虑到水流因受到离心力和冲击波影响,会形成较大的横向水位差,从而对弯道及其后的建筑物产生不利影响,因此拟将弯道设置成水平再衔接陡坡

段,以防止有坡度的弯道加快水流的流速,从而形成较大的横向水位差。此外,为解决黄池沟弯道其他体型参数是否对水流有较大影响及是否应进行优化的问题,需要研究黄池沟弯道体型参数对水流的影响。

弯道水流运动规律复杂,是水力学与河流动力学研究的重要课题。由于离心惯性力对弯道水流的影响,使得水面产生横比降和横向环流。许多学者对弯道水流水面横比降和弯道环流做了大量研究,

并运用于工程实际。例如:刁明军等^[2]对相关研究工作回顾和评述;哈岸英等^[3]在归纳分析的基础上,通过与试验资料的检验比较,总结给出水面横比降、环流流速垂线分布及环流流速沿程分布的计算公式。泄水建筑物中的弯道水流一般是弯道急流,相对于天然河道中弯道缓流而言,由于离心力和急流冲击波的共同作用,水面扰动大,变化更为复杂,水面超高加剧,流速断面分布更不均匀。急流冲击波水面振荡的圆弧中心角、水面超高和冲击波高的计算式是在一定的假定条件下给出的^[4],对于实际工程中遇到的复杂衔接和边界下的弯道急流需要具体分析。例如:吴宇峰等^[5]研究了利用斜槛控制弯道急流超高的原理;张靖等^[6]研究了透水斜槛参数对改善弯道水流的影响。

工程上除了要控制水面超高、消减急流冲击波,许多工程问题如弯道泥沙运动、河床变形、污染物输移等,还需要详细了解弯道水流的内部流动结构和紊流结构^[7-8]。试验往往受到场地、仪器和测量技术等限制,近年来计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)理论和计算方法更加丰富,数值模拟技术在弯道水流的应用上取得了快速发展,在揭示弯道水流内部流动结构和紊流结构方面发挥着重要作用。杨海波^[9]选用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和 VOF 模型,对不同弯道半径、底部坡度及弯道角度的弯道水流进行了数值模拟,计算结果与模型试验结果相符。许栋等^[10]采用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型封闭时均 N-S 方程对弯道水流进行模拟,将模拟结果与试验结果对比分析,发现使用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型模拟效果较好。高学平等^[11]采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和 VOF 模型,探讨某水库溢洪道弯道段的首端坎横向坡比、底部横向坡比、底部纵向坡降对弯道水面的影响。李民康等^[12]采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和 VOF 模型,结合拉格朗日粒子模型,对流凌条件下的弯道水力特性进行了数值模拟。更多研究表明, $k-\varepsilon$ 紊流模型结合 VOF 模型在模拟考虑自由水面变化的弯道急流时,效果良好^[13-14]。

数值模拟在研究泄水建筑物复杂流动中,不仅可以给出流动内部细节,与模型试验相比,还有成本低、易于变化方案的优点,适宜于体型参数影响的研究。利用正交设计合理安排试验方案,可以以较少的试验量,可靠有效地得到因素影响的主次顺序与合理的参数取值。正交设计与数值模拟结合,在研究流动参数影响及参数优化方面,可以发挥很好的作用。鉴于此,本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和 VOF 模型,基于正交设计对黄池沟退水道弯道体型参数进行数值模拟研究,以推荐合理参数。

1 正交试验方案

结合黄池沟工程实际,确定弯道宽度、弯道曲率半径、弯道纵向坡度为主要体型参数。以工程初设参数(弯道宽度 A 为 4.4 m、弯道曲率半径 B 为 22 m、弯道纵向坡度 C 为 16.73%)为基础,弯道宽度增减 0.3 m,曲率半径增减 3 m 以考虑弯道宽度、曲率半径增加和减小的影响,纵向坡度在初设基础上,考虑不同减小程度,减小为零度和一半。每个参数设置 3 个水平进行试验,如表 1 所示。不考虑 3 个因素之间的相互影响,选用 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验,得到试验方案如表 2 所示。

表 1 正交试验因素水平

水平	A/m	B/m	$C/\%$
1	4.7	25	16.73
2	4.4	22	8.37
3	4.1	19	0

表 2 正交试验方案

试验方案	A/m	B/m	$C/\%$
$A_1B_1C_1$	4.7	25	16.73
$A_1B_2C_2$	4.7	22	8.37
$A_1B_3C_3$	4.7	19	0
$A_2B_2C_3$	4.4	22	0
$A_2B_3C_1$	4.4	19	16.73
$A_2B_1C_2$	4.4	25	8.37
$A_3B_3C_2$	4.1	19	8.37
$A_3B_1C_3$	4.1	25	0
$A_3B_2C_1$	4.1	22	16.73

2 数学模型

选取 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型,并采用 VOF 模型处理自由水面。控制方程包括连续方程、动量方程和 $k-\varepsilon$ 紊流方程。计算区域从分水池中的进水口(设置在分水池上游 40 m 处),经分水池、侧堰、侧槽、弯道段至陡坡段出口,如图 1 所示。计算区域采用结构网格划分,整体网格数约 270 万,见图 2(a);对闸门处网格进行加密,如图 2(b)所示。

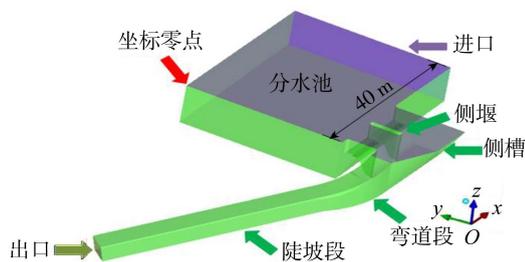


图 1 计算域

方程离散采用有限体积法,离散格式采用二阶迎风格式。由于采用 PISO 算法进行邻值调整和扭曲度调整可以明显减少收敛迭代次数,故本文压力

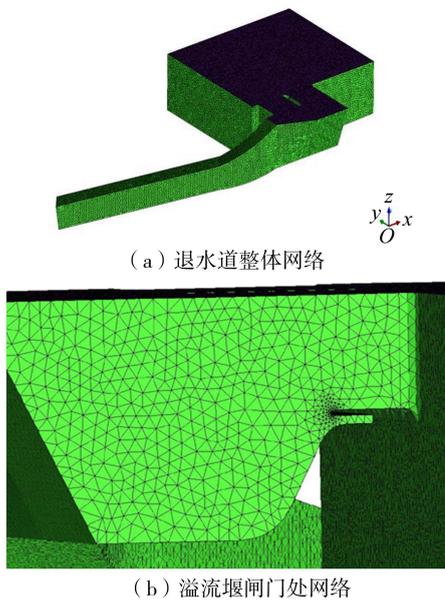


图2 计算网格

与速度耦合求解采用 PISO 算法。

进口处的水流采用质量入口边界条件,质量流量取设计最大工况值 70 000 kg/s;出口采用压力出口边界条件。自由液面采用压力入口边界条件;固壁边界设为无滑移边界条件,近壁面处使用标准壁面函数法处理。初始流场设置为:从入口到堰顶处充满水,下游其他区域为空气。

3 模型验证

选取对应的水工模型试验工况进行数值模拟,将实际观察到的水流流态和实测的侧堰段、侧槽段、弯道段、陡坡段的压强、流速及水面线与计算结果进行对比分析,来验证数值模型的适用性和可靠性。

图3~5依次为数值模拟与模型试验获得的退水道溢流堰与侧槽段、弯道段及陡坡段的水流流态对比,图中红色部分为水,绿色为自由水面。图3显示水流从分水池通过侧堰,在侧堰形成降水曲线;侧槽中由于侧槽墙壁的阻挡,在靠近墙壁侧水位壅高;水流在侧槽中翻滚碰撞,水面起伏明显。由图4可见,水流进入弯道后产生明显的降水曲线,水面有明显起伏。图5显示水流在陡坡段形成较为平稳的降水曲线,水深沿程下降,在陡坡末端基本稳定。数值模拟结果与水工模型试验的结果较为一致,符合实际。

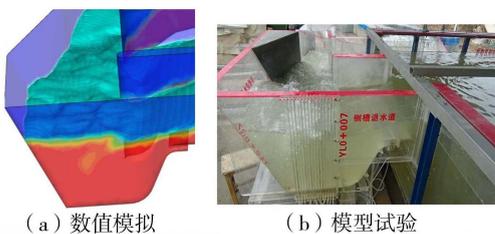
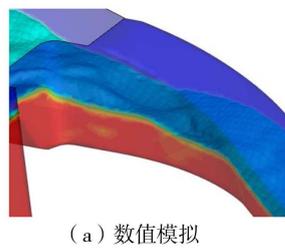
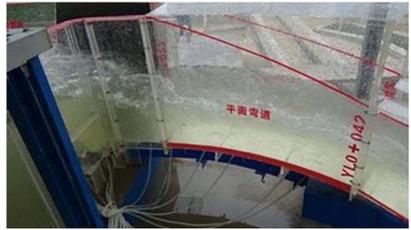


图3 退水道溢流堰、侧槽段水流流态对比

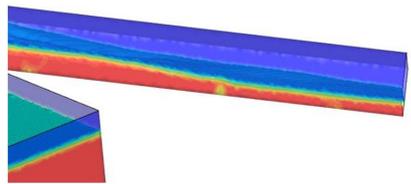


(a) 数值模拟



(b) 模型试验

图4 退水道弯道段水流流态对比



(a) 数值模拟



(b) 模型试验

图5 退水道陡坡段水流流态对比

图6为退水道沿中轴线11个压强测点(位于陡坡段,分别位于桩号 Y10+045.47、Y10+049.13、Y10+052.79、Y10+056.44、Y10+060.10、Y10+063.76、Y10+067.42、Y10+071.08、Y10+074.74、Y10+078.39、Y10+082.05)模拟值与试验值的对比(横轴以桩号 Y10+045.47 为 0 点)。由图6可知,模拟值与试验值吻合良好(最后一个压强测点计算与实测差别大,是由于试验中陡坡后存在消力池,而计算中做了简化的原因)。

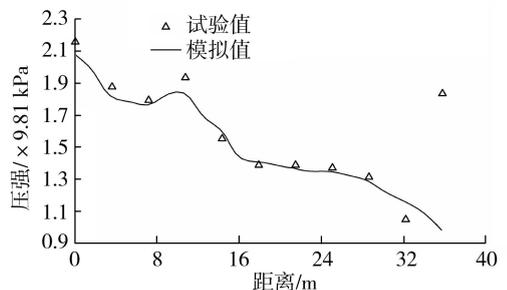


图6 退水道测点压强模拟值与试验值对比

图7为退水道6个流速监测面(分别位于桩号YL0+011.00、YL0+020.20、YL0+027.20、YL0+041.81、YL0+060.10、YL0+084.10)平均流速模拟值与试验值的对比(横轴以桩号YL+011.00为0点)。图8为溢流堰左右两孔和退水道5个流速监测面沿水深流速分布模拟值与试验值(实测值为中轴线上的值)的对比。模拟值与试验值吻合良好(图7最后一个流速测点差别大是由于试验中陡坡后接消力池,而计算中做了简化)。

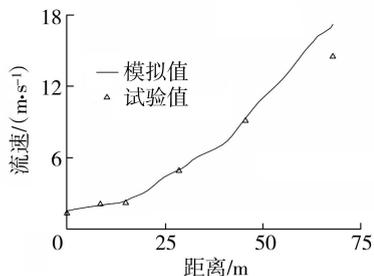


图7 退水道流速监测断面平均流速模拟值与试验值对比

图9为退水道11个水位监测点(位置同图6压强测点)模拟值与试验值对比。由图9可知,监测点水位的模拟值与试验值相符;同时试验测得的弯道出口断面横向水面差为0.45 m,数值计算得到的弯道出口断面横向水面差为0.47 m,误差在允许范围内。

综上所述,通过将数值模拟结果与水工模型试验观测的流态以及实测的压强、流速、水面线等水力参数的比较,表明本文使用的数学模型是合理的。

4 模拟结果与分析

结合工程实际,本文以水流的横向水位差判别流态,以弯道出口断面横向水面差 H_1 和陡坡出口断面横向水面差 H_2 作为正交试验评判指标。

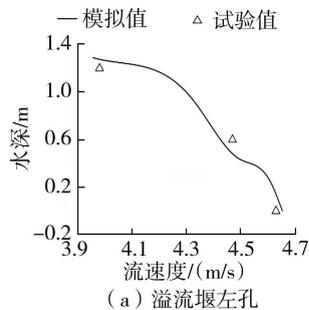
利用 Fluent 软件对9种试验工况进行模拟。当 $t=120$ s 时,水流达到稳定状态,由于水流是动态稳定的,选取稳定后3个时刻($t=120, 130, 140$ s)的数据进行分析,通过分析断面上这3个时刻的水气两相分布图,可以发现尽管水面存在波动,但不影响总体的趋势和规律,因此 H_1 和 H_2 取水流动态稳定后这3个时刻的平均值,结果见表3。

表3 各方案数值模拟结果

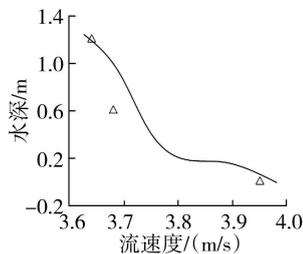
试验方案	H_1/m	H_2/m	试验方案	H_1/m	H_2/m
$A_1B_1C_1$	1.67	0.47	$A_2B_1C_2$	1.49	0.21
$A_1B_2C_2$	1.46	0.19	$A_3B_3C_2$	1.53	0.28
$A_1B_3C_3$	0.93	0.14	$A_3B_1C_3$	0.89	0.23
$A_2B_2C_3$	0.47	0.17	$A_3B_2C_1$	1.71	0.46
$A_2B_3C_1$	1.43	0.49			

4.1 极差分析

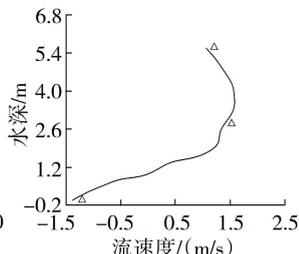
极差分析结果见表4,其中 k_{ij} 为试验因素 j 在



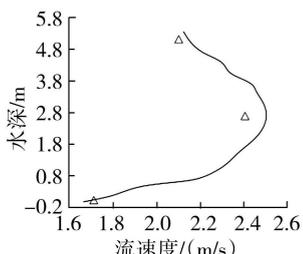
(a) 溢流堰左孔



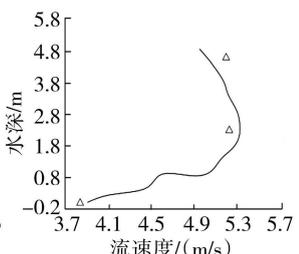
(b) 溢流堰右孔



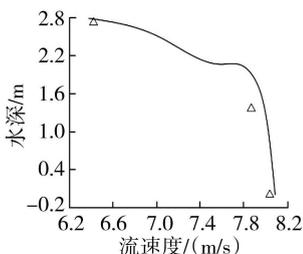
(c) YL0+011.00监测断面



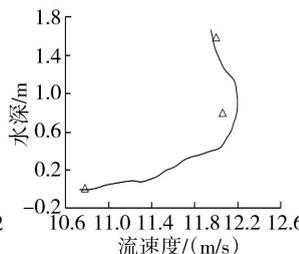
(d) YL0+020.20监测断面



(e) YL0+027.20监测断面



(f) YL0+041.81监测断面



(g) YL0+060.00监测断面

图8 退水道流速监测断面沿水深流速分布模拟值与试验值对比

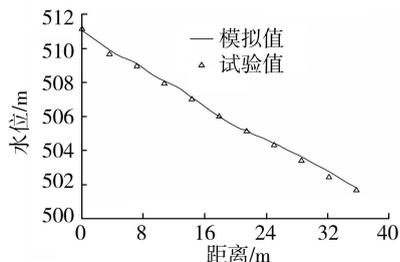


图9 退水道水位监测点水位模拟值与试验值对比

水平 i 下得到的试验结果的平均值,极差值 R_j 为因素 j 取不同水平时试验平均值的最大差值。

表4 极差分析结果

因素	k_{1j}		k_{2j}		k_{3j}		R_j	
	H_1	H_2	H_1	H_2	H_1	H_2	H_1	H_2
A	1.353	0.267	1.197	0.283	1.377	0.400	0.180	0.133
B	1.350	0.280	1.213	0.323	1.363	0.347	0.150	0.067
C	1.670	0.530	1.493	0.270	0.763	0.150	0.907	0.380

极差 R_j 值反映因素对试验结果指标的影响水平,用来判断因素的敏感性程度。极差值越大,因素对试验结果的影响越大。按极差值大小,对于指标 H_1 和 H_2 ,各因素影响从主到次的顺序为: C (弯道纵向坡度)、 A (弯道宽度)、 B (弯道曲率半径)。 C 为主要因素, A 、 B 为次要因素。

k_{ij} 值最小的水平为试验范围内因素的最优水平。对于指标 H_1 和 H_2 而言,最优组合分别为 $A_2B_2C_3$ 和 $A_1B_1C_3$ 。

4.2 方差分析

应用方差分析法来区分不同因素和误差对试验指标的影响,以定量分析不同因素影响的显著性。为了简化计算,将 H_1 和 H_2 试验值扩大 100 倍后进行计算分析。方差分析计算结果见表 5,其中 $F_j = V_j / V_{\text{误差}}$, V_j 为因素 j 的平均偏差平方和, $V_{\text{误差}}$ 为误差的平均偏差平方和。 F_j 用于定量直观分析各因素对试验指标影响的显著性,若 F_j 值接近 1,则表明改变因素 j 的水平对试验指标的影响与试验误差对指标的影响很接近,也表明该因素的影响不显著。而因素影响的显著性大小则通过比较 F_j 和临界值确定。对于给定的影响显著性水平 α ,在 F 分布表中找出临界值 $F_\alpha(f_i, f_\epsilon)$ 其中 f_i 为因素 i 的自由度, f_ϵ 为试验误差自由度。取 $\alpha = 0.01, 0.05, 0.10$,在 F 分布表上查询可知, $F_{0.01}(2, 2) = 99$ 、 $F_{0.05}(2, 2) = 19$ 、 $F_{0.10}(2, 2) = 9$ 。将计算所得 F_j 与之对比,以判断因素的显著性。判断标准为:①当 $F_j \geq F_{0.01}(2, 2)$ 时,表明因素变化对指标影响特别显著;②当 $F_{0.01}(2, 2) > F_j \geq F_{0.05}(2, 2)$ 时,表明因素变化对指标影响显著;③当 $F_{0.05}(2, 2) > F_j \geq F_{0.10}(2, 2)$ 时,表明因素水平的变化对指标有影响;④当 $F_{0.10}(2, 2) > F_j$ 时,表明因素水平的变化对指标无显著影响^[15]。

表 5 方差分析结果

因素	V_j		F_j	
	H_1	H_2	H_1	H_2
A	287.44	158.33	1.57	4.90
B	206.78	34.33	1.13	1.06
C	6930.78	1132.00	37.78	35.01
误差	183.44	32.33		

比较各因素的 F_j 与临界值 F_α 可知,因素 C 对指标 H_1 和 H_2 均有显著影响,因素 A 、 B 均无显著影响。

综上,较优条件可取 $A_2B_2C_3$ 、 $A_1B_1C_3$,因素 A (弯道宽度)和因素 B (弯道半径)影响不显著,不用再优化。从对下游影响而言,使弯道出口水面差最小的 $A_2B_2C_3$ 方案,对包含陡坡段在内的整个下游流态平稳有利;从施工来讲, $A_2B_2C_3$ 的弯道宽度为 4.4 m,更经济,且 A_2 、 B_2 是原设计方案参数,所以在 $A_2B_2C_3$

与 $A_1B_1C_3$ 两方案中,采用初设值 A_2 、 B_2 。故最终推荐方案为 $A_2B_2C_3$ 。

5 结论

a. 数值模拟与水工模型试验的流态、压强、流速分布和水位吻合较好,验证了数值模型的适用性。

b. 影响黄池沟退水道弯道体型指标的因素从主到次依次为坡度、弯道宽度和弯道曲率半径。弯道出口断面横向水面差最小的最优组合为 $A_2B_2C_3$,陡坡出口断面横向水面差最小的最优组合为 $A_1B_1C_3$ 。

c. 坡度为显著影响因素;弯道宽度和弯道曲率半径影响不显著,不用再优化。

d. 推荐方案为 $A_2B_2C_3$: 弯道宽度 4.4 m, 弯道半径 22 m, 平面转弯(坡度为 0)。

参考文献:

- [1] 他金城. 黄池沟配水枢纽分水侧槽退水道水工模型试验与数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [2] 刁明军, 杨海波, 李斌华, 等. 弯道水力学研究现状与进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2007, 33(3): 596-601. (DIAO Mingjun, YANG Haibo, LI Binhua, et al. A summary of the study and progress on hydraulics of curved flow [J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2007, 33(3): 596-601. (in Chinese))
- [3] 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 Anying, LIU Lei. Research status of water flow movement in open channel bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1462-1469. (in Chinese))
- [4] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [5] 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 superelevation control design of inclined sills in rapid bends [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2007, 26(3): 77-81. (in Chinese))
- [6] 张靖, 滕晓敏, 张庆华. 透水斜槛参数对溢洪道弯道水流改善效果的影响[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 25-31. (ZHANG Jing, TENG Xiaomin, ZHANG Qinghua, et al. Impact of permeable oblique sill parameters on bend flow improvement effect in a spillway [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 25-31. (in Chinese))
- [7] 杨飞, 傅旭东. 垂向基于谱方法的三维弯道水流模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(10): 914-920. (YANG Fei, FU Xudong. Vertical spectrum-based

- three-dimensional curved water flow model[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2018, 58 (10):914-920. (in Chinese))
- [8] 张炳昌,许栋,及春宁,等.大宽深比变曲率弯道水动力结构大涡模拟研究[J].水力发电学报,2019,38(6):77-91. (ZHANG Bingchang, XU Dong, JI Chunning, et al. Research on large eddy simulation of hydrodynamic structures with large width-to-depth ratio and variable curvature curves [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2019, 38(6):77-91. (in Chinese))
- [9] 杨海波.自由面弯道水流三维数值模拟与试验研究[D].成都:四川大学,2007.
- [10] 许栋,刘召平,乾爱国,等.弯曲河道中水流运动的三维数值模拟[J].水利学报,2010,41(12):1423-1431. (XU Dong, LIU Zhaoping, GAN Aiguo, et al. Three-dimensional numerical simulation of water flow in a curved channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (12):1423-1431. (in Chinese))
- [11] 高学平,井书光,贾来飞.溢洪道弯道水流影响因素研究[J].水力发电学报,2014,33(4):132-138. (GAO Xueping, JING Shuguang, JIA Laifei. Research on factors affecting water flow in spillway bends [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2014, 33 (4): 132-138. (in Chinese))
- [12] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等.流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J].水利水电科技进展,2021,41(3):41-49. (LI Minkang, JI Honglan, LUO Hongchun, et al.
- Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (3):41-49. (in Chinese))
- [13] 张岩,吴伊平,崔鹏义,等.丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):164-170. (ZHANG Yan, WU Yiping, CUI Pengyi, et al. Numerical simulation research on the influence of spur dike length on bend hydraulic characteristics [J]. Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering, 2019, 30 (1):164-170. (in Chinese))
- [14] 陈翠霞,张小峰,冯向珍,等.弯曲型及顺直型河道水流三维数值模拟[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(6):84-90. (CHEN Cuixia, ZHANG Xiaofeng, FENG Xiangzhen, et al. Three-dimensional numerical simulation of water flow in curved and straight channels [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(6):84-90. (in Chinese))
- [15] 王雯,顾中明,杨杰,等.基于正交设计的大坝深层抗滑稳定敏感性分析[J].西安理工大学学报,2018,34(3):321-325. (WANG Wen, GU Zhongming, YANG Jie, et al. Sensitivity analysis of deep dam anti-sliding stability based on orthogonal design [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34 (3): 321-325. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-23 编辑:雷燕)

(上接第9页)

- [18] JI Yongxing, YANG Fei, ZHANG Hanyun, et al. A siltation simulation and desiltation measurement study downstream of the Suzhou Creek Sluice, China [J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(6):781-793.
- [19] HORNER R W. The Thames tidal flood prevention scheme [J]. Long Range Planning, 1976, 9(5):78-83.
- [20] HORNER R W. The Thames Barrier [J]. IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews), 1987, 134 (9):752-760.
- [21] ABADIE L M, JACKSON L P, DE MURIETA E S, et al. Comparing urban coastal flood risk in 136 cities under two alternative sea-level projections: RCP 8.5 and an expert opinion-based high-end scenario [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 193:105249.
- [22] VAN DEN BRINK H W, DE GOEDEREN S. Recurrence intervals for the closure of the Dutch Maeslant surge barrier [J]. Ocean Science, 2017, 13(5):691-701.
- [23] WANG Jinhu, ZHANG Debin, ZHANG Weisheng, et al. Impacts of different dynamic factors on the saltwater intrusion in the northern branch of the Yangtze Estuary [J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(6):673-684.
- [24] JI Yongxing, LU Yongjin, LIU Xiaomei. An emergency preparedness plan (EPP) study of a water source reservoir in a tidal estuary [J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2012, 16(S1):82-90.
- [25] KOSTERIN N V, SHCHEKACHIKHIN V I. St. Petersburg flood protection barrier system: first years of operation [J]. Power Technology and Engineering, 2017, 51 (4): 371-376.
- [26] WANG Min, SHA Chenyan, WU Jian, et al. Bacterial community response to petroleum contamination in brackish tidal marsh sediments in the Yangtze River Estuary, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 99:160-167.
- [27] LI Chenxi, WU Kening, WU Jingyao. Environmental hazard in Shanghai, China: lessons learned from Huangpu River dead pigs incident [J]. Natural Hazards, 2017, 88 (2): 1269-1272.

(收稿日期:2023-03-06 编辑:俞云利)