

开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性及优化布置研究

张文皎, 刘磊, 武彩萍, 吴腾, 罗立群, 胡能明

Study on hydraulic characteristics simulation and optimal layout of open-wide single chute spillway

ZHANG Wenjiao, LIU Lei, WU Caiping, WU Teng, LUO Liqun, HU Nengming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210609001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

竖缝式与仿自然结合鱼道水力特性及其优化

Hydraulic characteristics and optimization of fishway combined with vertical slot and nature-like section
水利水电工程学报. 2019(4): 9 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.002>

高水头船闸第二分流口自分流体型水力特性研究

Numerical study of hydraulic characteristics of self-difffluence structure in second diversion port of high-head lock
水利水电工程学报. 2017(6): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.001>

植被联合植筋带护坡水力特性模型试验

Model test on hydraulic characteristics of soil slopes with geotextile belts and vegetation
水利水电工程学报. 2021(3): 136 <https://doi.org/10.12170/20200830005>

崔家营枢纽下游流场模拟与鱼类水力特性偏好研究

Study on flow field simulation and fish hydraulic characteristics in the downstream of Cuijiaying hydroproject
水利水电工程学报. 2021(5): 40 <https://doi.org/10.12170/20201128001>

高水头船闸一字闸门水动力特性数值模拟

Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of single-leaf gate of high-head navigation lock
水利水电工程学报. 2017(1): 87 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.012>

土坝溃决跌坎水流水动力特性数值模拟

Numerical study of hydrodynamic characteristics of dam-break headcut flow
水利水电工程学报. 2017(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210609001

张文皎, 刘磊, 武彩萍, 等. 开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性及优化布置研究 [J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 25-34. (ZHANG Wenjiao, LIU Lei, WU Caiping, et al. Study on hydraulic characteristics simulation and optimal layout of open-wide single chute spillway[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 25-34. (in Chinese))

开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性及优化布置研究

张文皎¹, 刘磊^{2,3}, 武彩萍¹, 吴腾⁴, 罗立群¹, 胡能明⁵

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 5. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 开敞式宽大单泄槽溢洪道与一般溢洪道相比易发生水流流态复杂、掺气效果差等工程安全问题。以马来西亚 Baleh 水电工程为例, 采用 VOF 法与 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型对溢洪道流场进行三维数值模拟。计算分析了不同工况下溢洪道流态、流速、沿程压强等水力特性的分布规律。同时开展 1:50 物理模型试验, 对比分析数值模拟结果与模型试验结果发现, 两者基本一致, 验证了开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性数值模拟的准确性与可行性。进而利用紊流模型计算分析了溢洪道掺气坎的优化布置方案, 结果表明: 1#掺气坎抬高 20 cm 后, 坎后掺气空腔长度由 11.03 m 增大至 19.84 m, 消能率提高了 6.11%; 3#掺气坎沿泄槽陡坡上移 15 m 后, 挑流水舌冲击位置上移, 减轻了对挑流鼻坎段水流流态的影响。研究结果对同类工程的优化设计有一定的借鉴作用。

关键词: 溢洪道; 水力特性; 数值模拟; 物理模型; 优化布置

中图分类号: TV651.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2022)06-0025-10

开敞式宽大单泄槽溢洪道是一种重要的水利枢纽建筑物^[1], 没有纵向隔墙和横向拉梁, 只有两侧边墙, 节约了大量的钢筋混凝土, 但与一般溢洪道相比容易发生一些工程安全问题。如由于其宽度大, 需要的起挑流量大, 在泄洪中经常不起挑; 高速水流接触泄槽边壁时, 压力急剧变化, 水流流动状态较为复杂, 可能产生水翹等不良水力现象; 随着泄槽宽度的增大, 两侧掺气槽掺入的空气难以到达泄槽中间部位, 掺气效果较差, 可能存在掺气盲区, 这些问题都会影响建筑物的安全, 甚至引发工程事故。国内外学者对溢洪道进行了大量研究, 主要研究方法有数值模拟^[2]和物理模型^[3]试验。刘善均等^[4]通过物理模型试验, 对前置掺气坎阶梯溢洪道近壁面沿程掺气特性进行了研究; 张鲁鲁^[5]通过建立物理模型, 在台阶坡度恒定的条件下, 对 0.65、1.00 和 1.30 m 等 3 种台阶高度在不同水位下的水流流态、消能效率和掺气特性进行研究, 发现台阶高度越大, 消能率越高; Bayon 等^[6]采用 $k-\epsilon$ 紊流模型和流体体积法相结合的方法, 对锦屏一级水电站溢洪道的掺气和空化特性进行了数值模拟; 谭立新等^[7]利用 $k-\epsilon$ 紊流模型, 采用有限体积法离散控制方程, 对前置掺气坎阶梯溢洪道上掺气水流进行数值模拟, 发现掺气空腔和掺气浓度随着掺气坎坡度的增大而增大, 掺气浓度沿程降低, 一定距离后趋于稳定。然而, 目前对开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性的研究较少, 有必要对此类溢洪道水力特性开展深入研究。

本文依托典型的开敞式宽大单泄槽溢洪道工程——马来西亚 Baleh 溢洪道, 采用物理模型试验与三维数值模拟相结合的手段研究溢洪道沿程流速、流态、压强、掺气浓度、消能率等水力参数的分布规律, 验证数值模拟的准确性, 进而利用三维数值模拟开展溢洪道掺气坎体型优化布置研究, 以丰富开敞式宽大单泄槽溢洪道的研究成果, 为相关工程实践、优化设计提供借鉴。

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目 (2017YFC0405204); 国家自然科学基金资助项目 (51709124); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目 (HKY-JBYW-2020-18)

作者简介: 张文皎(1989—), 女, 河南临颖人, 高级工程师, 博士, 主要从事工程水力学方面的研究。

E-mail: wjzhang2006@163.com 通信作者: 刘磊(E-mail: liul.20b@igsnr.ac.cn)

1 工程概况

Baleh 水电工程位于马来西亚沙捞越省加帛镇巴勒河上,距巴勒河与普泰河交汇处上游约 3 km。枢纽包括混凝土面板堆石坝、溢洪道、进水口和压力钢管、低位运行洞等。溢洪道由引渠段、闸室段、泄槽段和挑流段组成,泄槽单槽宽度达到 88 m,5 孔全开(PMF)工况泄量 16 353.0 m³/s,是典型的开敞式大泄量溢洪道。溢洪道闸室段为无底坎宽顶堰,设 5 孔闸门,中间 3 孔净宽 14.9 m,两边孔净宽 14.45 m,闸底高程为 190 m。挑流段为差动式消能工,由 6 个低挑坎和 5 个高挑坎组成。在掺气坎两侧布置通气孔,1#掺气坎高 1.1 m,通气孔面积为 4.5 m²,2#掺气坎与 3#掺气坎高 2.5 m,通气孔面积 8.0 m²。掺气坎具体细部尺寸如图 1 所示,沿程布置位置如图 2 所示。

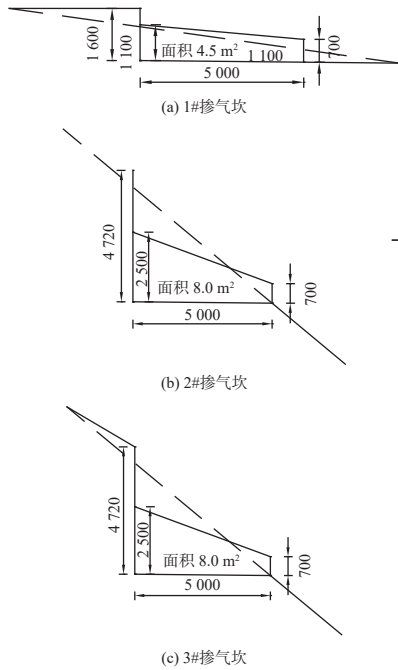


图 1 溢洪道掺气坎细部图(单位: mm)

Fig. 1 Detailed drawing of spillway aerator (unit: mm)

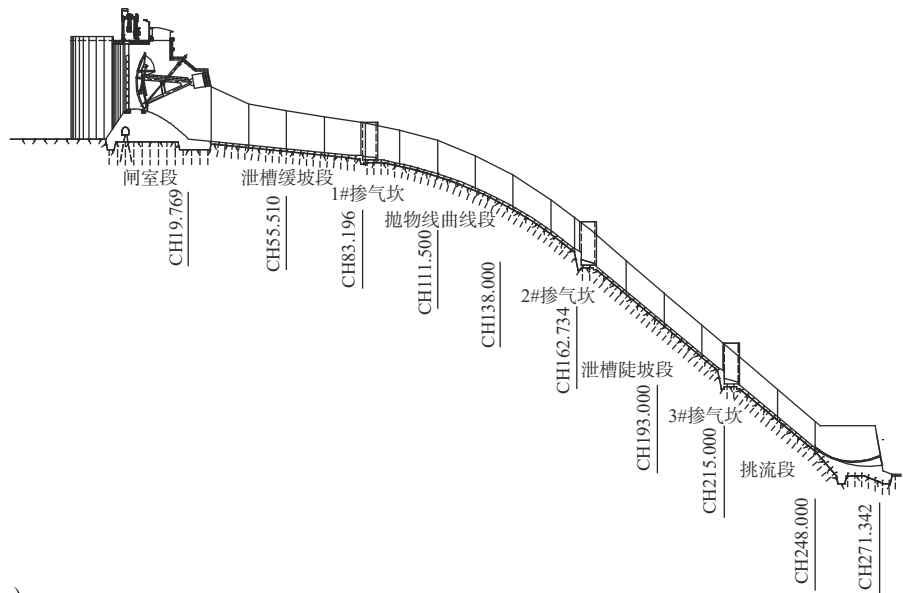


图 2 溢洪道整体布置

Fig. 2 Overall layout of spillway

2 研究方法

2.1 物理模型试验

物理模型为正态模型,满足重力相似准则,比尺为 1 : 50。主要模拟部分为溢洪道闸室、渡槽及挑流鼻坎,其中溢洪道闸室及挑流鼻坎选用有机玻璃制作。有机玻璃的糙率 n_m 位于 0.007~0.008,由模型比尺计算出原型的糙率系数 n_p 位于 0.013~0.015,基本满足混凝土糙率要求。溢洪道泄槽段用水泥砂浆粉面,表层采用石蜡抛光,石蜡糙率 $n_m=0.01$,由模型比尺计算出原型的糙率系数 $n_p=0.019$,基本满足混凝土糙率要求^[8]。

在模型中轴线上共布置了 66 个测压孔。沿程布置大概 20 个测量断面,每断面分别量测左、中、右 3 个位置的水面线位置。在溢洪道沿程布置 10 个断面,每断面分别量测左、中、右位置底部及表面流速。流速采用毕托管及旋桨流速仪测读,压力采用江苏东华 DH5902 型动态数据采集仪和北京威斯特中航 CYB90S 数字系列压力传感器量测,流态观测用人工描绘及摄像机录制结合进行。

2.2 三维紊流数值模拟

目前 CFD 技术^[9] 发展相对成熟, 运用 CFD 手段可以较准确地求解水流三维非定常流场, 其中 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型应用较为广泛。RNG $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型基本思想是利用重整化群理论修正 $k-\varepsilon$ 紊流模型^[10]。大量的数值模拟结果表明, RNG $k-\varepsilon$ 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动^[11]。本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对溢洪道进行数值模拟, 控制方程如下:

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: 有效黏性系数 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, 流体的时均应变率 $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; k 为紊动能; ρ 为流体密度; ε 为紊流耗散率; μ 为流体动力黏度; μ_t 为紊动黏度; α_k 和 α_ε 为有效普朗特数 (Prandtl); G_k 为平均速度梯度引起的紊动能 k 的产生项。RNG $k-\varepsilon$ 模型中的模型常数取值分别为: $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_\mu = 0.0845$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 。

VOF 方法的原理是定义函数 $\alpha_w(x, y, z, t)$ 和 $\alpha_a(x, y, z, t)$ 分别为代表计算区域内水和气体占计算单元体积分数, 在每个单元中, 水和气体的体积分数和为 1, 即 $\alpha_w + \alpha_a = 1$ 。

α_w 的空间梯度表示自由水面表面外法线方向, α_w 的控制方程如下:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \alpha_w)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中: u_i 为速度分量; x_i 为坐标分量; t 为时间。求解该连续方程即可追踪水气分界面位置。

本文选择 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型结合 VOF 法对 Baleh 水电工程溢洪道水力特性进行数值模拟。计算时, 采用 CVFEM 法进行控制方程离散, 具有较高的数值精度和数值稳定性^[12]; 选择对瞬态收敛较好的 PISO 法进行压力场和速度场的耦合计算^[13], 选用 PRESTO! 计算压力方程, 采用标准壁面函数法处理近壁区内的流动。

依据原型尺寸建立溢洪道三维几何模型, 模拟范围包括库区、闸室段、溢洪道段、下游河道 4 个部分(图 3)。计算区域长 623.78 m, 宽 88 m, 高 213.5 m。为了保证模拟计算的准确性并加快计算速度, 采用分块结构化网格进行网格划分, 对溢流面附近网格进行加密处理, 网格大小为 0.5~3.0 m, 共计单元网格 1 402 614 个, 节点 1 479 574 个。

在设定边界条件时, 根据上下游水位情况将库区进水口和下游河道出口设置为压力进出口; 掺气竖井和溢洪道上方边界为压力进口, 压力值为大气压; 其他边界设定为无滑移固壁边界^[14]。使用非恒定流模拟恒定流场计算得出相对稳定解, 时间步长取 0.01 s, 当进出口水流流量差与进口水流流量的比小于 0.1% 时认为流动达到稳定, 停止计算。

试验及数值模拟采取相同的工况, 具体工况如表 1 所示。

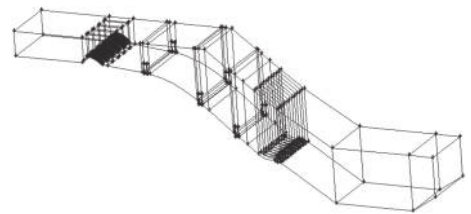


图 3 三维模型示意

Fig. 3 3D model sketch

表 1 试验及数值模拟工况

Tab. 1 Test and numerical simulation conditions					
组次	洪水频率/%	溢洪道泄水量/(m ³ ·s ⁻¹)	库水位/m	下游水位/m	溢洪道闸门
Z1	20	2 442.2	221.24	47.392	5孔局开
Z2	10	2 701.6	221.32	48.010	5孔局开
Z3	1	3 153.1	221.45	49.049	5孔局开
Z4	0.2	3 384.4	221.52	49.547	5孔局开
Z5	0.1	3 842.2	221.65	50.531	5孔局开
Z6	0.01	12 014.1	223.42	64.080	4孔全开, 关右孔
Z7	0.01	12 014.1	223.42	64.080	4孔全开, 关中孔
Z8	0.01	13 546.9	223.11	66.135	5孔全开
Z9	PMF	16 353.0	224.83	69.536	5孔全开

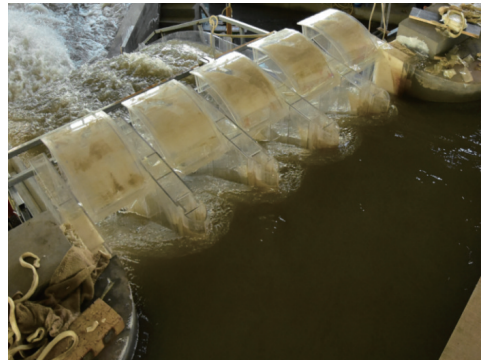
3 溢洪道水力特性分析

3.1 沿程水流流态

图 4 为闸门局开和闸门全开典型工况(Z5 和 Z8 工况)下的溢洪道水流流态对比。由图 4 可见:溢洪道运行过程中,闸室进流均匀平顺,有间歇性漏斗漩涡;水流出闸室后,在墩尾处均产生较高的水冠;水流进入泄槽后受两侧边墙收缩影响,槽内产生棱型冲击波,水面起伏较大。泄槽内冲击波经过调整逐渐消减,泄槽后段水流相对均匀平顺。在挑流段,下泄水流在挑流鼻坎作用下形成挑流水舌。通过对比分析,物理模型试验结果与数值模拟计算结果拟合度较好。



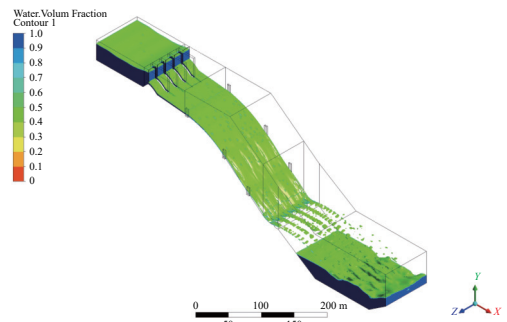
(a) Z5 工况闸室段物模流态



(b) Z8 工况闸室段物模流态



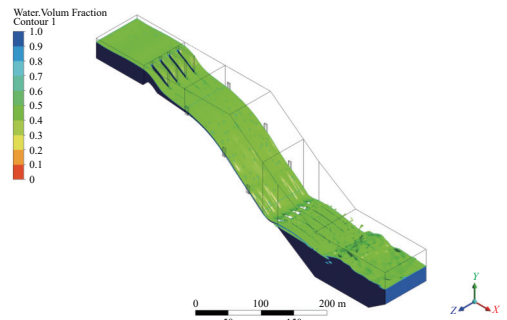
(c) Z5 工况物模流态



(d) Z5 工况数模流态



(e) Z8 工况物模流态



(f) Z8 工况数模流态

图 4 沿程流态模型试验与数值模拟对比

Fig. 4 Comparison of flow patterns between physical model and numerical model

3.2 沿程断面平均流速

物理模型试验沿程流速分布见图 5。从图 5 可见,局开工况下溢洪道水流流速沿程逐渐增加,在第 3 道

掺气坎(桩号 CH215.000)处达到最大;全开工况下,溢洪道流速沿程逐渐增大,其中 Z6 工况关闭右边孔,流态较差,水花较大,试验过程中部分流速数据无法采集。

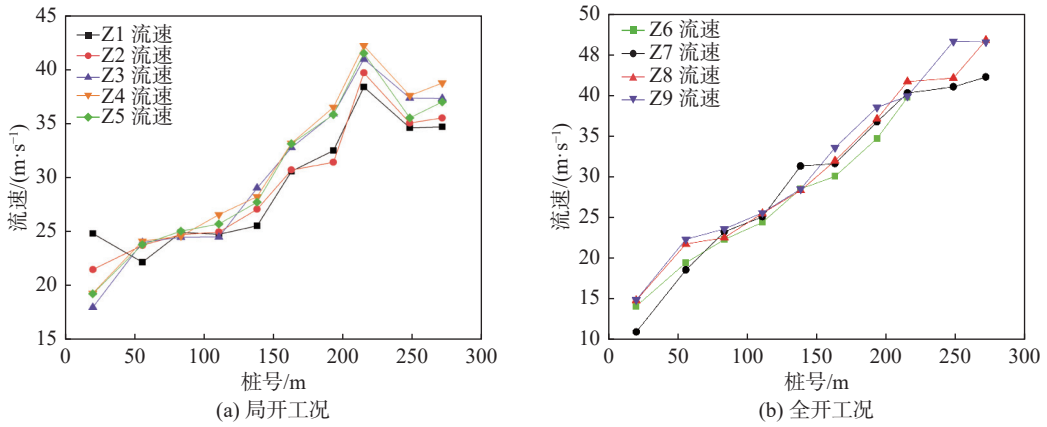


图 5 模型试验沿程流速
Fig. 5 Flow velocity of model test

图 6 为典型工况下溢洪道物理模型和数值模拟流速对比,溢洪道内沿水流方向,断面平均流速呈增大趋势,局开工况数值模拟与模型试验总体平均误差为 4.94 %,全开工况数值模拟与模型试验总体平均误差为 3.37 %,物理模型试验与数值模拟计算的分布规律基本一致,且拟合度较好。

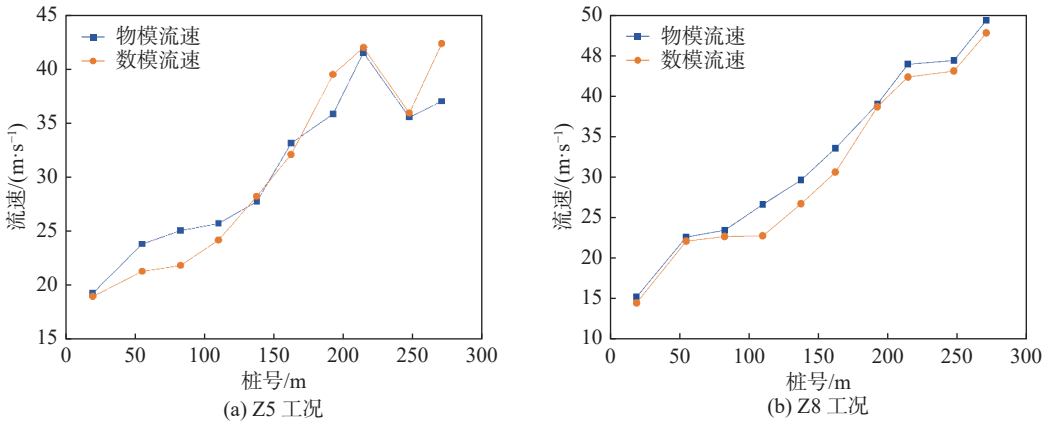


图 6 沿程流速模型试验与数值模拟对比
Fig. 6 Comparison between simulated and experimental flow velocities

3.3 底板压强分布

物理模型试验沿程底板中心线压强分布如图 7 所示,在闸门局开时,下堰面下段均存在负压,水流出闸室后对溢洪道泄槽缓坡段首段产生冲击,溢洪道缓坡段桩号 CH20.416 处产生较大的冲击压力,而后出现负压区;在缓坡段末端由于 1#掺气坎挑坎的存在,水流惯性力的作用,导致局部压强增大。局开工况下泄槽最大负压为 4.32 m 水柱,计算对应水流空化数为 0.212。

在闸门全开下,溢洪道闸室段因 Z7 工况关闭中孔,测压管布置于溢洪道中线,受库前静水压强影响闸室前段压强较大,而后因无水流通过压强接近于零。溢洪道泄槽缓坡段压强分布均匀,基本上光滑平顺,且为正压;在泄槽抛物线段由于水流受到离心力的作用,产生的动水压强导致静水压强产生较大变化,该段压强分布不均,存在负压;由于水流惯性力的影响,挑流段末端出现局部压强增大现象。

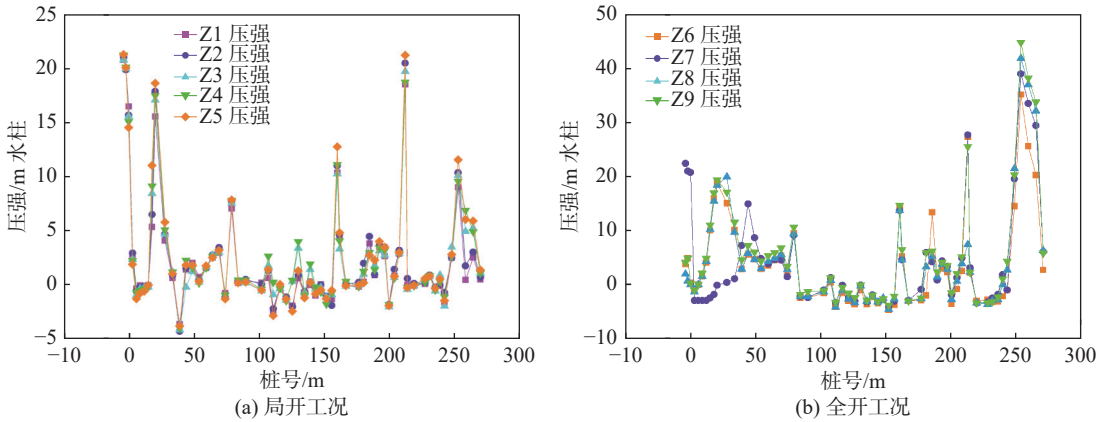


图 7 模型试验沿程压强
Fig. 7 Pressure of model test

图 8 为典型工况下溢洪道物理模型和数值模拟底板压强分布对比。由图 8 可见，局开、全开工况下数值模拟与模型试验总体误差偏小，物理模型和数值计算溢洪道沿程底板压强分布规律基本一致。

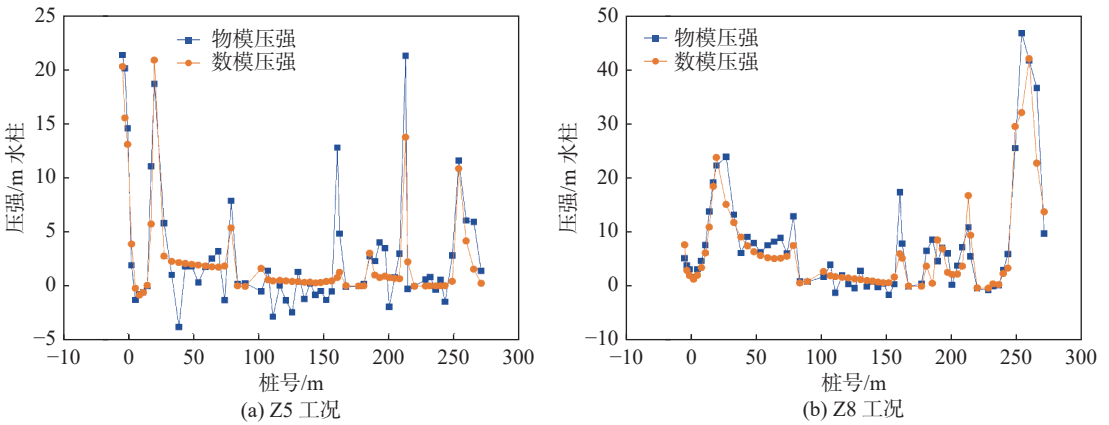


图 8 沿程底板压强模型试验与数值模拟对比
Fig. 8 Comparison of simulated and experimental pressure values

根据模型实测流速和压强值，按照规范公式推求溢洪道各部位的水流空化数。水流空化数 σ 按照下式计算：

$$\sigma = \frac{h_0 + h_a - h_v}{v_0^2 / (2g)} \quad (4)$$

式中： h_0 为来流参考断面时均压强； h_a 为大气压强； h_v 为水的汽化压强； v_0 为来流参考断面平均流速。

图 9 为水流空化数沿程分布，在闸门局开工况下，堰面下段均存在负压，试验量测到堰面最大负压为 1.3 m 水柱，计算对应水流空化数为 0.223。缓坡段试验量测到的最大负压为 4.32 m 水柱，计算对应水流空化数为 0.212。在溢洪道泄槽抛物线阶段，局部量测到的最大负压为 2.87 m 水柱，计算对应水流空化数为 0.207。在溢洪道陡槽段、反弧段及挑流鼻

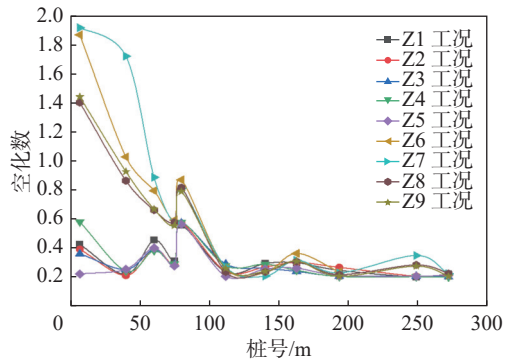


图 9 模型试验沿程空化数
Fig. 9 Flow cavitation number of model test

坎处的流速较大, 水流空化数 σ 偏小。闸门局开与全开工况水流空化数均大于 0.2, 发生空化空蚀的可能性不大。

3.4 消能率

为了衡量开敞式宽大单泄槽溢洪道的消能特性, 将两断面之间的能量损耗与初始断面总能量之比作为消能率^[5], 利用消能率的大小来反映溢洪道的消能效果。溢洪道泄槽段消能率计算式如下:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (5)$$

式中: η 为消能率; ΔE 为损耗能量; E_1 为断面 1 的总能量, $E_1 = H_1 + V_1^2 / (2g)$; E_2 为断面 2 的总能量, $E_2 = H_2 + V_2^2 / (2g)$; V_1 、 V_2 分别为断面 1 和断面 2 的平均流速; H_1 、 H_2 分别为断面 1 和断面 2 的位能; g 为重力加速度, 其中断面 1 取库区末段断面(CH0.000), 断面 2 为断面 1 下游泄槽断面。

根据物理模型和数值模拟结果计算泄槽段沿程消能率见图 10, 典型工况溢洪道泄槽段消能率计算结果如表 2 所示。可以看出, 模型试验与数值模拟得到的沿程消能率分布规律基本一致。同一工况下, 泄槽消能率沿程基本呈增大趋势, 在 3#掺气坎后(CH248.000)达到最大。随着单宽流量增大, 沿程水深增大, 消能率逐渐减小, 其原因为在大单宽流量下, 两侧掺气槽掺入的空气难以到达泄槽中部, 自由面掺入的空气难以到达泄槽底部, 掺气效果变差。掺气浓度采用中国水利水电科学研究院生产的电阻式 848 型掺气浓度仪测量。结果如表 3 所示, 1#掺气坎后 Z8 工况掺气浓度低于 5%。显然, 闸门局开工况泄槽沿程消能率普遍高于闸门全开工况的消能率, 如 Z8 工况 CH0.000 至 CH248.000 段消能率低于 40%, Z5 工况相同泄槽段消能率在 60% 以上。因此, 有必要通过调整 1#掺气坎体型提高底部掺气浓度, 增大其消能率, 从而降低泄槽发生空化空蚀破坏的可能性。

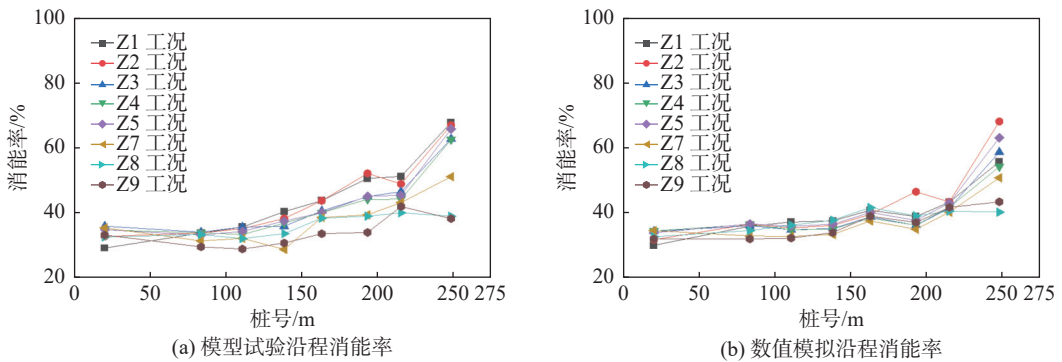


图 10 沿程消能率模拟值与试验值对比

Fig. 10 Comparison of simulated and experimental energy dissipation rates

表 2 沿程泄槽段消能率

Tab. 2 Energy dissipation rate of chute section along the ways

工况	断面1(CH0.000)			断面2(CH248.000)			总能差/m	消能率/%
	断面总能/m	平均水深/m	平均流速/(m·s ⁻¹)	断面总能/m	平均水深/m	平均流速/(m·s ⁻¹)		
Z5物模	221.72	31.65	1.18	75.96	1.75	35.55	145.76	65.74
Z5数模	221.26	31.20	1.09	82.00	6.37	35.94	139.26	62.94
Z8物模	223.48	33.11	2.69	136.45	3.13	49.23	87.03	38.94
Z8数模	222.91	32.59	2.50	133.55	7.93	47.67	89.36	40.08

表 3 掺气坎下游沿程掺气浓度物理模型量测结果
Tab. 3 Aeration concentration along downstream aerators

1#掺气槽			2#掺气槽			3#掺气槽		
桩号	掺气浓度/%		桩号	掺气浓度/%		桩号	掺气浓度/%	
	Z5工况	Z8工况		Z5工况	Z8工况		Z5工况	Z8工况
CH100.929	39.0	5.0	CH175.480	89.5	85.8	CH227.682	82.0	92.9
CH110.439	31.0	1.8	CH183.162	78.5	73.5	CH235.364	76.0	83.5
CH119.825	27.0	1.5	CH190.845	67.0	39.0	CH248.000	89.0	59.0
CH129.236	19.5	1.4	CH198.527	63.0	22.0	CH261.382	83.0	15.7

4 溢洪道掺气坎优化布置

大单宽流量下,全开工况随着流量增大,自由面掺入的空气难以到达泄槽底部,未能形成完整空腔,掺气效果变差,消能效果不佳。适当的增加坎高,有利于完整空腔的形成^[16],从而提高掺气浓度,增大消能率。优化方案中,为了使水体掺气更加充分,提高消能率,将 1#掺气坎抬高 20 cm。同时,在试验过程中,3#掺气坎起挑掺气水流冲击下游约 15 m 处的差动式挑流鼻坎,影响到挑流鼻坎段的水流流态,易对挑流鼻坎造成损害,故在优化方案中,保持 3#掺气坎尺寸与原设计一致,将 3#掺气坎沿泄槽陡坡上移 15 m(由桩号 CH215.000 m 上移至 CH203.477 m)。1#掺气坎优化体型布置如图 11 所示。

前文已通过流态、沿程压强、沿程断面流速与消能率的分析对比,验证了数值模拟的准确性和合理性,因此对掺气坎优化方案开展 Z8 万年一遇洪水工况下的溢洪道水流三维数值模拟计算。图 12 为优化前后低挑坎中线剖面溢洪道水面线分布,图中红色代表空气,蓝色代表水。表 4 为 Z8 工况下优化前后溢洪道泄槽消能率对比。空腔长度是衡量掺气减蚀效果的重要参数之一,1#掺气坎抬高 20 cm 后,掺气坎掺气空腔长度由 11.03 m 增大至 19.84 m,增大至 1.80 倍;优化后消能率提高了 6.11%,可见掺气坎优化后,水流掺气更加充分,减蚀及消能效果增强。另外,3#掺气坎沿泄槽陡坡上移 15 m 后,掺气坎挑起水流冲击位置上移,减轻了水流对挑流鼻坎段的影响。

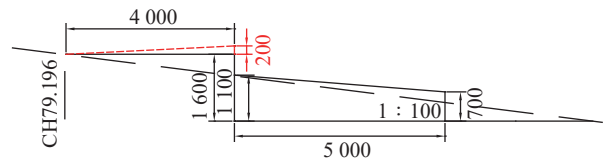


图 11 1#掺气坎优化体型示意(单位:mm)

Fig. 11 Schematic diagram of optimized shape of 1# aerator (unit: mm)

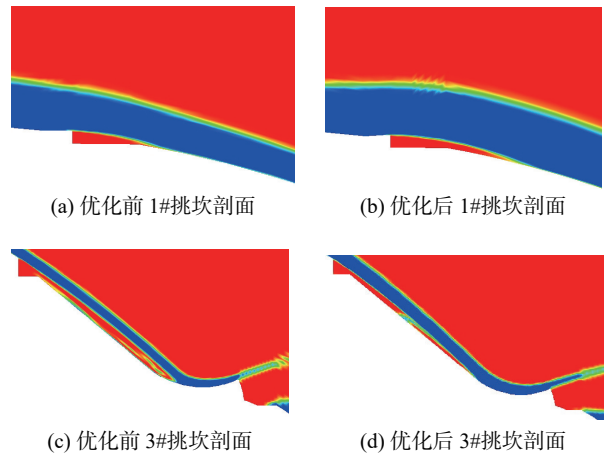


图 12 优化前后溢洪道水面线分布对比

Fig. 12 Comparison of spillway water surface profile distribution before and after optimization

表 4 优化前后沿程泄槽段消能率

Tab. 4 Energy dissipation rate of chute section before and after optimization

工况	断面1(CH0.000)			断面2(CH248.000)			总能差/m	消能率/%
	断面总能/m	平均水深/m	平均流速/(m·s ⁻¹)	断面总能/m	平均水深/m	平均流速/(m·s ⁻¹)		
Z8	222.91	32.59	2.50	133.55	7.93	47.67	89.36	40.08
Z8优化方案	223.59	33.20	2.77	120.32	4.77	45.55	103.27	46.19

5 结 语

(1)采用 VOF 法与 RNG $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型对溢洪道流场进行三维数值模拟,计算得到的沿程压强、流速大小、消能率等与物理模型试验结果进行对比,验证了数值模拟的准确性与可行性,为后续开展数值模拟计算与分析提供有力依据。

(2)闸门全开工况下,在泄槽抛物线段由于水流受到离心力的作用,产生的动水压强导致静水压强产生较大变化,该段压强分布不均,存在负压;由于水流惯性力的影响,挑流段末端出现局部压强增大现象。

(3)大单宽流量下,两侧掺气槽掺入的空气难以到达溢洪道泄槽中部,自由面掺入的空气难以到达泄槽底部,未能形成完整空腔,掺气浓度较低,消能效果较差,适当增加掺气坎坎高,掺气坎掺气空腔长度增大,掺气浓度提高,消能效果增加。

(4)结合物理模型与三维紊流数值模拟,在不同工况下研究了开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性,提出了溢洪道掺气坎优化体型方案,优化后消能效果得到显著提高。实例结果表明该方法稳定可靠,精确度高,是研究阶梯溢洪道水流运动规律的有效途径,对同类工程具有一定的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 王挺力. 册田水库溢洪道水力特性物理模型试验和三维数值模拟[D]. 山西: 太原理工大学, 2012. (WANG Tingli. Experiment and numerical simulation the hydraulic characteristics of Cetian reservoir spillway[D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [2] 秦亚斌, 张振华, 朱大勇. 某水电站溢洪道闸室堰体厚度优化分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 104-110. (QIN Yabin, ZHANG Zhenhua, ZHU Dayong. Optimization of weir thickness of spillway sluice chamber[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 104-110. (in Chinese))
- [3] 彭勇, 张建民, 许唯临, 等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 63-68. (PENG Yong, ZHANG Jianmin, XU Weilin, et al. Calculation of aerated water depth and energy dissipation rate of a pre-aerator stepped spillway[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 63-68. (in Chinese))
- [4] 刘善均, 朱利, 张法星, 等. 前置掺气坎阶梯溢洪道近壁掺气特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 401-406. (LIU Shanjun, ZHU Li, ZHANG Faxing, et al. Aeration characteristics for skimming flow along the pre-aerator stepped spillways[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 401-406. (in Chinese))
- [5] 张鲁鲁. 新疆某水电站溢洪道台阶段水工模型试验研究[J]. 西北水电, 2016(1): 80-82. (ZHANG Lulu. Study on hydraulic model tests on step section of spillway[J]. Northwest Hydropower, 2016(1): 80-82. (in Chinese))
- [6] BAYON A, TORO J P, BOMBARDELLI F A, et al. Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2018, 19: 137-149.
- [7] 谭立新, 李梅玲, 唐敏, 等. 前置掺气坎坡度对阶梯溢洪道掺气水流影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 150-155. (TAN Lixin, LI Meiling, TANG Min, et al. Numerical simulation of the influence of the slope of the front aerator on the aeration flow of the stepped spillway[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4): 150-155. (in Chinese))
- [8] 焦修明. 弧形闸门动力特性及流激振动研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (JIAO Xiuming. Research on dynamic characteristic and flow-induced vibration of radial gate[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [9] 刘彬, 忽彦鹏, 杨磊, 等. 基于VOF法陡坡排水隧洞三维数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 43-49. (LIU Bin, HU Yanpeng, YANG Lei, et al. 3D numerical simulation of long steep drainage tunnel based on VOF method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 43-49. (in Chinese))
- [10] 张文皎. 高坝泄洪诱发低频声波原型观测与机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2015. (ZHANG Wenjiao. Investigations on prototype observation and mechanisms of low frequency noise induced by high dam flood discharge[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese))
- [11] 杜金威, 王均星, 李辉成. 丹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. (DU

- Jinwei, WANG Junxing, LI Huicheng. Numerical simulation of the water flow in the stepped spillway of Yangshengguan reservoir[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(2): 110-116. (in Chinese))
- [12] 严波, 彭雄奇. 基于CVFEM/FDM的RTM非等温充模过程数值模拟[C]//第17届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 中国宇航学会, 中国航空学会, 中国复合材料学会, 2012: 626-630. (YAN Bo, PENG Xiongqi. Numerical simulation of non-isothermal mold filling process in RTM based on CVFEM/FDM[C]//Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials. Beijing: Chinese Society of Mechanics, Chinese Society of Astronautics, Chinese Society of Aeronautics, Chinese Society of Composites, 2012: 626-630. (in Chinese))
- [13] 李浩田, 别玉静, 顾太欧. 通气孔型式对超宽泄槽的掺气影响研究[J]. 东北水利水电, 2021, 39(4): 36-38. (LI Haotian, BIE Yujing, GU Taiou. Study effect of type vent on aeration of super-wide drainage chute[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2021, 39(4): 36-38. (in Chinese))
- [14] 高学平, 贾来飞, 宋慧芳, 等. 溢洪道掺气坎槽后掺气水流三维数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 90-96. (GAO Xueping, JIA Laifei, SONG Huifang, et al. Three dimensional numerical simulation of aerated flow downstream of aeration slot on spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 33(2): 90-96. (in Chinese))
- [15] 张靓, 杨具瑞, 陈玉壮. 前置掺气坎角度对溢流坝阶梯面消能特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 118-125. (ZHANG Liang, YANG Jurui, CHEN Yuzhuang. Impacts of pre-aerator angels on energy dissipation of stepped spillway[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 118-125. (in Chinese))
- [16] 白雪. 某水库台阶式溢洪道掺气坎优化试验研究[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(12): 65-67. (BAI Xue. Experimental study on optimization of aerator of stepped spillway in a reservoir[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(12): 65-67. (in Chinese))

Study on hydraulic characteristics simulation and optimal layout of open-wide single chute spillway

ZHANG Wenjiao¹, LIU Lei^{2,3}, WU Caiping¹, WU Teng⁴, LUO Liqun¹, HU Nengming⁵

(1. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Harbor Waterway and Coastal Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Yellow River Engineering Consulting Corporation Limited, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Compared with the general spillway, the open spillway with a wide single chute is prone to complicated flow pattern and poor aeration effect. Taking the Baleh Hydropower Project in Malaysia as an example, this study uses the VOF method and the RNG $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model to carry out a three-dimensional numerical simulation of the spillway flow field. The calculation and analysis of the distribution law of the hydraulic characteristics of the spillway were made under different working conditions, such as flow pattern, velocity, and pressure along the way. At the same time, a 1 : 50 physical model test was carried out. After comparative analysis, the model test results were basically consistent with the numerical simulation results, which verified the accuracy and feasibility of the numerical simulation of the hydraulic characteristics of the spillway with an open-wide single chute. Then the turbulence model was used to calculate and analyze the optimized layout of the spillway aeration sill in detail. The results show that: after the 1# aeration sill is raised by 20 cm, the length of the aeration cavity behind the sill increases from 11.03 m to 19.84 m, Energy dissipation rate increased by 6.11%; after 3# aeration sill moves up 15 m along the steep slope of the chute, the impact position of the tipping water tongue moves upward, reducing the impact on the flow pattern of the tipping nose sill section. The research results have a certain reference for the optimization design of similar projects.

Key words: spillway; hydraulic characteristics; numerical simulation; physical model; optimal layout