

基于数值模拟的小浪底龙抬头式泄洪洞防洪安全分析

张春晋¹, 孙西欢^{2,3}, 李永业², 张学琴⁴, 张雪兰², 杨小妮^{2,5}, 李飞²

- (1. 黄河水利科学研究院水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003;
2. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024;
3. 晋中学院, 山西 晋中 030600; 4. 章丘黄河河务局, 山东 济南 250200;
5. 太原理工大学现代科技学院, 山西 孝义 032300)

摘要: 基于数值模拟, 从泄流能力、断面流速、洞顶余幅、测压管水头、空化数及挑流冲刷等方面对黄河小浪底水电站左岸 2 号龙抬头式泄洪洞进行了防洪安全分析, 并将模拟结果与 1 : 40 物理模型试验结果进行了对比, 结果表明, 模拟结果与试验结果一致, 采用数值模拟对龙抬头式泄洪洞进行防洪安全分析是可行的; 同时还针对龙抬头式泄洪洞运行中存在的安全问题提出了相应的解决措施。

关键词: 泄洪洞; 龙抬头式; 防洪安全; 数值模拟; 小浪底水电站

中图分类号: TV651.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)06-0068-07

Flood control safety analysis of Xiaolangdi Dam Ogee Spillway Tunnel based on numerical simulation//ZHANG Chunjin¹, SUN Xihuan^{2,3}, LI Yongye², ZHANG Xueqin⁴, ZHANG Xuelan², YANG Xiaoni^{2,5}, LI Fei² (1. Key Laboratory of Yellow River Sediment Research, MWR, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Water Resources and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Jinzhong University, Jinzhong 030600, China; 4. Zhangqiu Yellow River Bureau, Jinan 250200, China; 5. Polytechnic Institute, Taiyuan University of Technology, Xiaoyi 032300, China)

Abstract: Based on numerical simulation, the flood control safety of the No. 2 ogee spillway tunnel on the left bank of the Xiaolangdi Hydropower Station was analyzed from the aspects of discharge capacity, cross-sectional velocity, tunnel space, piezometric head, cavitation number and jet flow induced scouring. The simulated results were compared with a 1 : 40 physical model experiment. Meanwhile, corresponding measures were proposed to solve the common safety problems during the operation of the ogee spillway tunnel. The results show that the simulated results are basically consistent with the experimental results, which indicates that it is feasible to use numerical simulation to analyze the flood control safety for the ogee spillway tunnel.

Key words: spillway tunnel; ogee type; flood control safety; numerical simulation; Xiaolangdi Hydropower Station

黄河小浪底水电站左岸山体布置 3 条龙抬头式泄洪洞, 在保障水利工程安全方面发挥着不可替代的作用, 为此对该龙抬头式泄洪洞的泄流能力与安全稳定进行分析具有重要意义。黄河小浪底水电站龙抬头式泄洪洞属于高坝泄洪洞, 水头高、落差大, 形成的高速水流问题备受关注^[1]。近年来, 国外学者很少涉及高坝泄洪洞研究, 而国内学者却对高坝泄洪洞的水力学问题开展了大量工作。由于模型试验测量时产生的负压不符合重力相似, 为此采用数值模拟来弥补模型试验的不足^[2]。数值模拟凭借

成本低、效率高、灵活性强及数据量大等优势, 越来越受到广大研究人员的重视。郭军等^[3]和胡涛等^[4]对龙抬头式泄洪洞掺气减蚀问题进行分析。张春晋等^[2]和徐国宾等^[5]采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对高水头泄洪洞紊流流场进行仿真。陈瑞华等^[6]和张宏伟等^[7]对龙抬头式泄洪洞反弧段流场特性进行数值计算。范灵等^[8]和苏小丽等^[9]采用特征线法对龙抬头式泄洪洞闸门启闭时的水击问题进行仿真。上述成果表明龙抬头式泄洪洞水力特性的数值模拟已日臻成熟。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402404); 国家自然科学基金(51109155); 山西省自然科学基金(2015011067)

作者简介: 张春晋(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事流体力学及流体机械研究。E-mail: zhangchunjintyut@163.com

通信作者: 孙西欢(1960—), 男, 教授, 主要从事水工水力学研究。E-mail: sunxihuan@tyut.edu.cn

本文以黄河小浪底水电站左岸 2 号龙抬头式泄洪洞为例,采用商用 Fluent 12.0 软件对设计与校核洪水位条件下龙抬头式泄洪洞泄流能力、断面流速、洞顶余幅、测压管水头、空化数及挑流冲刷等特性进行防洪安全分析。同时阐述了龙抬头式泄洪洞存在的安全问题及解决措施。

1 物理模型试验

物理模型为正态模型,满足重力相似准则,比例尺为 1 : 40。进口段、洞身段及挑流段采用有机玻璃制作。边墙采用红砖砌筑。上游水库与冲刷段采用水泥砂浆面拉毛处理。结合伊兹巴申公式^[10],根据设计挑流水舌落点处强风化岩石抗冲流速,得到冲刷段选用的石料中值粒径为 12.5 mm。流量测量采用无侧收缩矩形薄壁堰。进口段分 3 层布置 9 个压强测点。洞身段距底板 1.0 cm 处布置 36 个压强测点。挑流段沿底板中轴线布置 8 个压强测点。洞身段设置 6 个流速测试断面。钢直尺测量测压管水头。采用 SW40 型日记式水位计量测水面高程,LS300-A 型便携式流速流量仪测定流速分布。

2 数值模拟

2.1 体型设计

龙抬头式泄洪洞位于小浪底水电站左岸山体,地质条件复杂。泄洪洞由进口段、洞身段及挑流段组成,如图 1 所示。进口段为深水式有压进口,进口段断面由 13.6 m×9.83 m(宽×高)渐变为 9.0 m×7.2 m,顶板与侧墙边界为 1/4 椭圆(椭圆方程为 $x^2/36+y^2/4=1$),底板高程为 490 m。洞身段由渥奇段、斜直段、反弧段及缓坡段组成,长度为 261 m。断面为 7.0 m×9.0 m 的城门洞型,拱形顶角为 130°。

渥奇段底板遵循 $y=x^2/260$,斜直段坡度为 1 : 2,反弧段半径为 30 m,缓坡段坡度为 1 : 100。挑流段长度为 30 m,呈对称布置。挑坎反弧半径为 40 m,底板遵循 $y=x^2/240+x/100$,挑射角为 25°。挑坎顶部高程为 468.39 m。下游河床为砂砾石动床,长度为 150 m。设计洪水位为 535.55 m,校核洪水位为 538.35 m。

2.2 几何模型

采用 Pro/E 5.0 软件建立龙抬头式泄洪洞的几何模型。几何模型由上游水库、进口段、洞身段、挑流段及冲刷段组成,长度为 540 m。上游水库底板高程为 490 m,冲刷段底板高程为 450 m。上游水库桩号为 D0-037 至 D0-007。进口段桩号为 D0-007 至 D0+029。洞身段桩号为 D0+029 至 D0+290。挑流段桩号为 D0+290 至 D0+320。冲刷段桩号为 D0+320 至 D0+470。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型可更好地处理旋流、高应变率流及流线弯曲程度较大的流动问题^[11-14]。为此,选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算。采用 PISO 算法耦合求解^[15]。控制方程采用全隐格式迭代求解,并设置合理的松弛因子^[16]。压力项采用 PRESTO 格式进行离散,动量方程、湍动能方程和湍流耗散率方程采用二阶迎风格式离散,雷诺应力项采用一阶迎风格式离散。时间步长为 $1\times10^{-5} \sim 1\times10^{-3}$ s。

龙抬头式泄洪洞水面线随时间发生变化,水面线的处理对于求解精度有较大影响。本文采用 VOF 法对水面线进行计算^[7]。为了解决空化问题,引入 Singhal 空化模型^[17],该模型由气泡动力学方程与气液两相守恒方程联合推导得出。

2.3 网格划分

采用 ICEM CFD 17.0 软件进行网格划分。为了提高网格划分效率,将计算域划分为 3 部分,即上

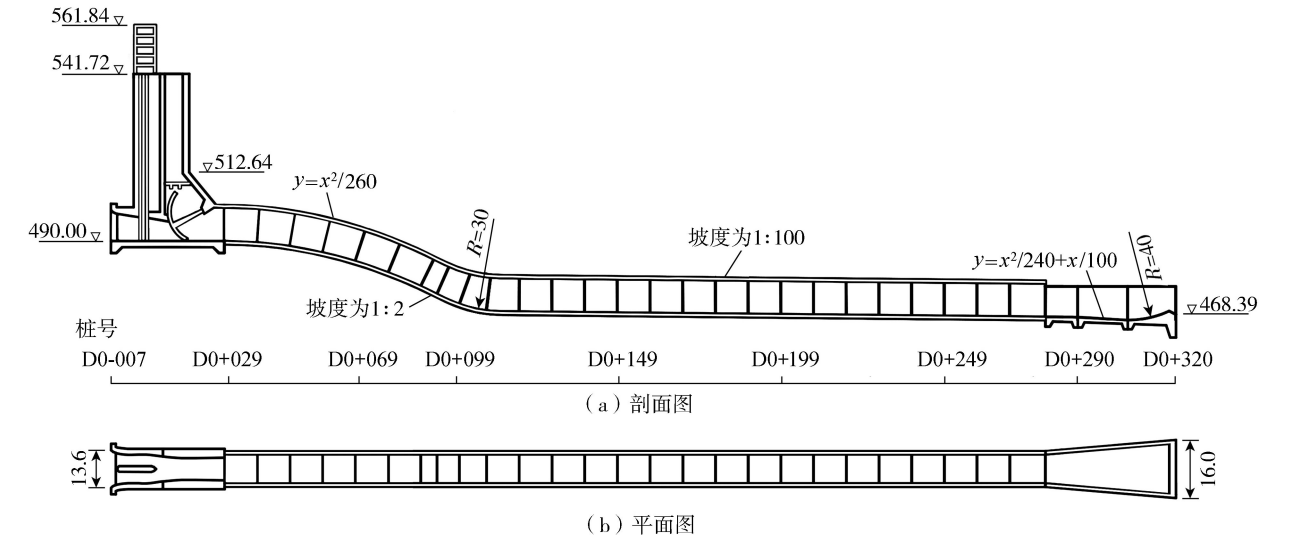


图 1 泄洪洞体型设计图(单位:m)

游水库、洞身段及冲刷段。由于洞身段体型不规则,采用较小的非结构化四面体网格加密,而上游水库和冲刷段体型规则,采用较大的结构化六面体网格加密。通过网格无关性检验可知,当网格数高于384 万时,网格数量对于断面平均流速影响可忽略不计。考虑计算时间与仿真精度,认为网格单元数为384 万时可满足网格无关性检验要求^[18]。

2.4 边界条件

上游水库进口采用压力进口边界,压力按照坝前特征水位计算。闸门室和上游水库上边界采用大气压进口边界。冲刷段出口采用自由出流边界。挑流段和冲刷段上边界采用大气压出口边界。壁面采用无滑移边界。近壁面区域采用标准壁面函数法^[11]处理。上游水库与进口段和挑流段与冲刷段之间的连接断面采用 Interface 边界,可实现内部不同流场数据的实时交换与调用。

3 数学模型验证与应用

3.1 泄流能力

泄流能力是龙抬头式泄洪洞体型设计的核心指标。泄流能力采用闸孔出流流量系数衡量,流量系数 m ^[19]可表达为

$$m = \frac{Q}{AB\sqrt{2gH_s}} \tag{1}$$

式中: Q 为流量; A 和 B 分别是有压段出口的宽和高; H_s 为工作闸门顶水头; g 为重力加速度。

图2 为流量系数模拟值与试验值对比。从图2 可见模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过0.34%。上游库区达到校核水位时, $m=0.6106$,该值略高于设计流量系数,表明泄洪洞泄流量已达到防洪要求。

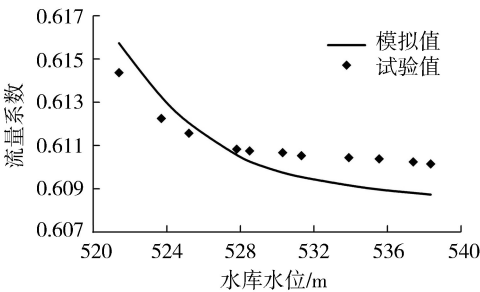


图2 流量系数模拟值与试验值对比

3.2 断面流速与洞顶余幅

图3 为中轴线水面线模拟值与试验值对比。从图3 可知:模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过1.09%;流体在离心力的作用下,造成反弧段流速增大,水深减小;流线在渥奇段发生弯曲,引起水流高度湍动,使得流体质点挟带空气进入流体,形成

掺气水流,水深增大;挑流段采用连续扩散结构使得断面增大,水深减小。

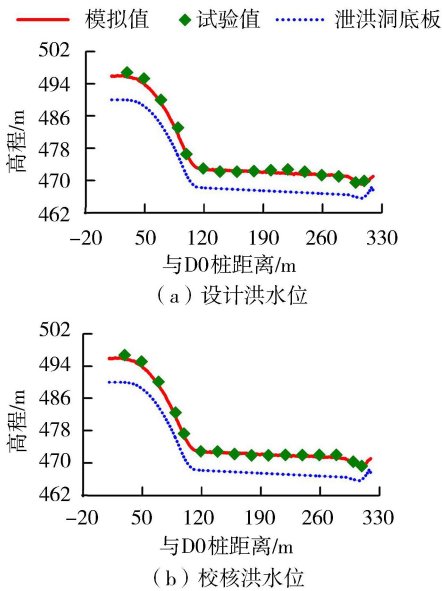


图3 中轴线水面线模拟值与试验值对比

图4 为龙抬头段与洞身水平段交接部位流态。从图4 可知:龙抬头段与洞身水平段交接处流态平稳,未出现明满流交替现象;反弧段上游引起流线弯曲,导致流体质点将空气挟带进入流体,形成掺气水流,而洞身水平段流态稳定。因此反弧段上游水深较大;反弧段下游受到离心力和重力作用,流速增加。

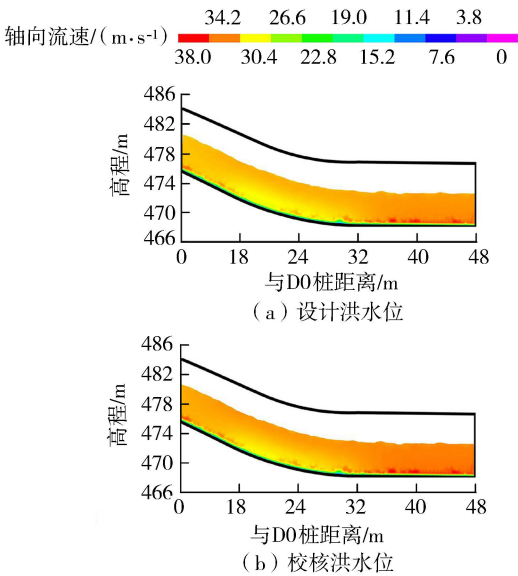


图4 龙抬头段与洞身水平段交接部位流态

图5 为断面流速分布云图,图中不同桩号处断面相同,边墙高度为6.3 m,宽度为7.0 m。从图5 可知:渥奇段水位高于缓坡段水位。渥奇段流线发生弯曲,使得流体形成掺气水流,水位升高。缓坡段流体湍流强度小,掺气量较少,导致水位较低;由于反弧段末端曲率半径趋于零,使得流体在离心力作用下对底板压力增大,引起水位降低,流速升高。在缓

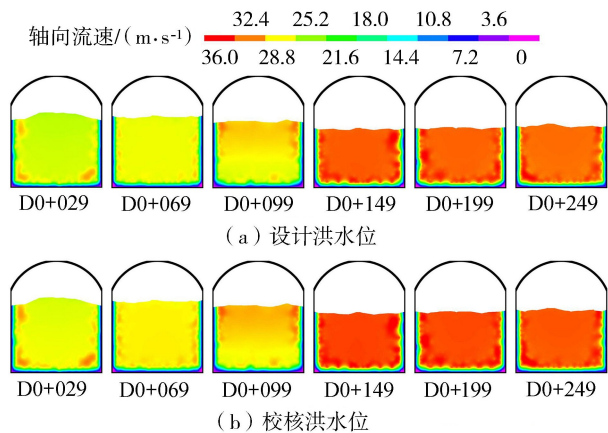


图5 不同桩号断面流速分布云图

坡段,流体对于底板的压强减小,使得该区域水位升高。因此,缓坡段水位随桩号升高;断面流速分布呈现近壁面流速低,而远离壁面流速均匀。由于流体具有黏滞性,使得近壁面形成了流速梯度变化明显的边界层。边界层引起泄流能力降低。为此,体型优化时需考虑边界层影响;根据设计规范,洞顶余幅不低于洞深的25%,可避免高速水流在洞内形成明满流交替的水流流态^[20]。经计算,断面洞顶余幅大于30%,说明洞顶余幅设计较为合理。

图6为中轴线流速模拟值与试验值对比。从图6可知:模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过5.84%;由于底板边界层厚度较小,仅对边界层以外流场的流速进行测量;中轴线处流速分布分为2部分,即紊流边界层和边界层外势流区。紊流边界层最外侧流速为0.99倍平均流速,通过计算,紊流边界层厚度为0.2~0.3m。边界层外势流区流速一致,而紊流边界层流速梯度变化大且呈斜直线分布。因此,流速分布存在明显的突变点或拐点,且距

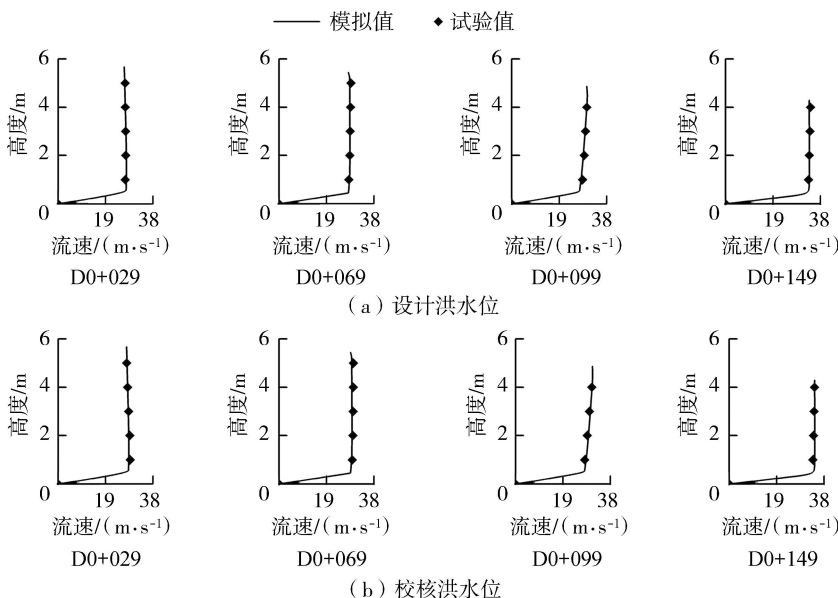


图6 不同桩号中轴线流速模拟值与试验值对比

泄洪洞底板约为0.2m。

3.3 测压管水头与空化数

空化数是判断洞内是否发生空化空蚀的重要指标^[3]。空化数^[5]可表达为

$$K = \frac{P_b + \gamma \left(10.33 - \frac{H}{900} \right) - P_v}{\gamma \frac{u_0^2}{2g}} \quad (2)$$

式中: u_0 为断面平均流速; γ 为流体容重; P_b 为相对压强; P_v 为饱和蒸汽压; H 为当地高程。依据饱和蒸汽压强表,水温20℃时,饱和蒸汽压(水头)为0.2384m。

图7与图8分别为测压管水头与空化数沿桩号模拟值与试验值对比。实际工程中,当空化数小于0.3时,洞内必然发生空化空蚀。当空化数在0.1~0.3之间,必须注意空化问题。

从图7和图8可知:模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过4.62%;由于渥奇段底板弯曲程度大,使得高速流体产生了边界层分离,导致近壁面压强降低。渥奇段沿桩号掺气程度减小,使得该区域流速升高。两者共同导致渥奇段空化数沿桩号降低。为此需在渥奇段进行补气,降低流体对壁面的汽蚀程度;挑流段反弧结构使得流体在惯性力作用下对底板的压强增大,使得该区域测压管水头升高;由于反弧段曲率半径为零,使得流体在离心力作用下断面流速和底板压强增大。反弧段下游压强较大,而缓坡段压强较小,使得反弧段下游区域底板压强急剧降低,加之流速变化小,引起反弧段下游附近流场发生空化空蚀,导致底板严重剥落与磨损。为此需对反弧段下游附近底板进行加固;由于渥奇段的底板沿桩号弯曲程度较大,使得流体在渥奇段无

◆ 试验值

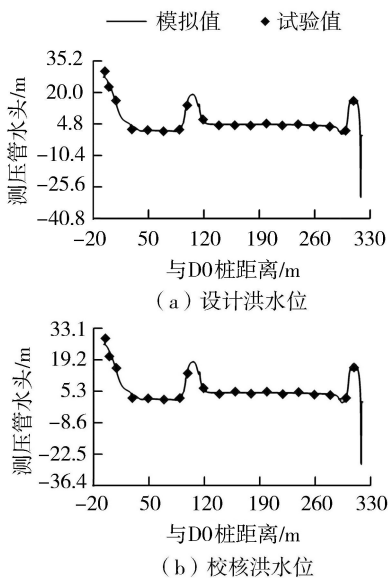


图7 测压管水头模拟值与试验值的对比

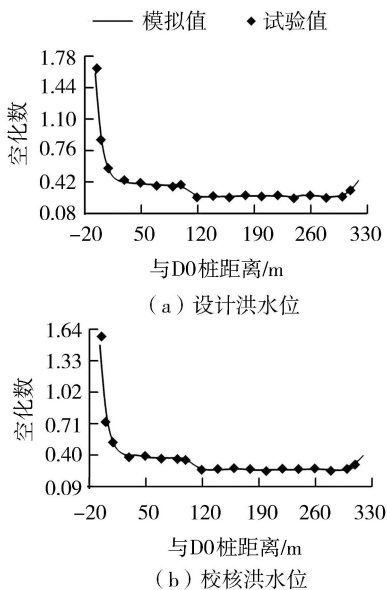


图8 空化数模拟值与试验值的对比

动能转化为压能,导致流体离开底板,并在底板近壁面形成空腔。随后下游流体随即填补空腔,形成漩涡损失,使得渥奇段底板测压管水头沿桩号降低。

3.4 挑流冲刷

表1为挑流射程模拟值与试验值对比。从表1可知:模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过0.73%;由于冲坑位置与挑坎距离较远,使得挑流冲坑不会危害到坝体安全。

表1 挑流射程模拟值与试验值对比

特征水位	模拟值/m	试验值/m	相对误差/%
设计洪水位	86.37	85.91	0.54
校核洪水位	97.38	96.74	0.66

根据泄洪洞下游砂卵石河床地质情况,结合冲坑深度经验公式可计算出冲坑深度模拟值,冲坑深度公式^[2]可表达为

$$t_s = 2.4q\left(\frac{\eta}{\omega} - \frac{2.5}{v_t}\right) \frac{\sin\beta}{1 - 0.175\cot\beta} - 0.75h_t \quad (3)$$

式中: t_s 为冲坑深度; h_t 为冲坑后的下游水深; β 为水舌的入射角; η 为流速脉动系数,取1.5~2.0; v_t 为水舌进入下游水面流速; ω 为河床颗粒水力粗度; q 为挑流段出口模拟计算的单宽流量。

图9为水舌宽度沿桩号模拟值与试验值对比。从图9可知模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过3.95%;挑流段结构为进口窄、出口宽,导致水舌宽度沿桩号增加;由于挑入空中的水舌失去了边界约束,在空气阻力作用下,发生掺气和分散,引起水舌在水平方向动能减小,导致水舌沿桩号向外侧扩散角度降低。

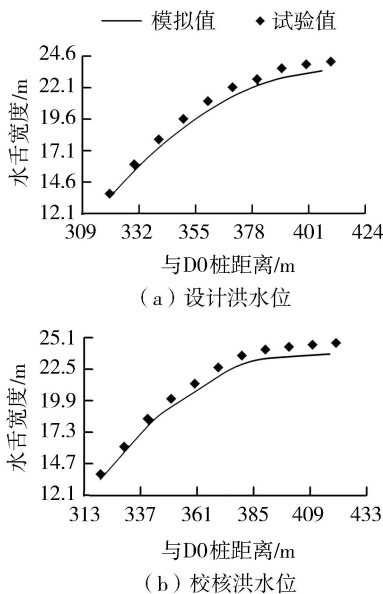


图9 水舌宽度模拟值与试验值的对比

根据《水工(常规)模型试验规程》,水工模型需连续冲刷2.0h,方可测量冲坑深度。模型试验冲坑深度可通过钢直尺直接测量。表2为冲坑深度模拟值与试验值对比。从表2可知:模拟值与试验值基本一致,相对误差不超过1.81%;对冲坑深度分析得到冲坑对左岸坡脚有掏空作用,需对左岸山体采取锚杆加固等措施或改变挑坎形式使得流体远离山体。

表2 冲坑深度模拟值与试验值对比

特征水位	模拟值/m	试验值/m	相对误差/%
设计洪水位	17.97	17.65	1.81
校核洪水位	26.08	25.84	0.93

4 安全分析

4.1 安全问题

龙抬头式泄洪洞防洪存在以下安全问题:校核洪水位泄流能力不足;洞顶余幅不足25%,造成明

满流交替,引起洞顶混凝土剥落和洞内补气不足;高坝泄洪洞底板发生空化空蚀,造成洞内混凝土表面剥蚀;反弧段流体在离心力作用下对底板压力增大,引起该区域下游附近底板发生空化空蚀;反弧段下游底板剥落的混凝土将堵塞下游过流通道;底板粗糙度较大,引起流体向四周扩散,增加了泄洪洞的不稳定性;雾化现象导致高强度降雨和局部山体滑坡;挑流将对岸坡山体起到冲刷与掏空作用。

4.2 解决措施

可采用“龙落尾”布置方式,将发生空化空蚀的位置布置在下游区域;提高洞顶高度,避免洞身内发生明满流交替;对易发生空化空蚀区域采用抗冲刷耐磨混凝土材料,提高混凝土耐久性;对渥奇段采用掺气减蚀措施;对冲刷山体岸坡锚杆加固,提高山体抗冲能力。

5 结 语

本文以黄河小浪底水电站 2 号龙抬头式泄洪洞作为研究对象,采用数值模拟对龙抬头式泄洪洞进行了防洪安全分析,同时探讨了龙抬头式泄洪洞存在的防洪安全问题及解决措施。研究表明采用数值模拟研究龙抬头式泄洪洞水力特性可行,可为今后龙抬头式泄洪洞泄洪能力与安全稳定性评估提供参考。

参考文献:

[1] 沙海飞,吴时强.泄洪洞有压段体型优化的三维数值模拟[J].水动力学研究与进展:A辑,2004,19(增刊1):942-947. (SHA Haifei, WU Shiqiang. 3D numerical simulation of spillway tunnel flow [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004, 19 (Supl): 942-947. (in Chinese))

[2] 张春晋,李永业,孙西欢.明流泄洪洞水力特性的二维数值模拟与试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(1):54-60. (ZHANG Chunjin, LI Yongye, SUN Xihuan. Two-dimensional numerical simulation and experimental research of hydraulic characteristics in spillway tunnel with free water surface [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33 (1): 54-60. (in Chinese))

[3] 郭军,张东,刘之平,等.大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J].水利学报,2006,41(10):1193-1198. (GUO Jun, ZHANG Dong, LIU Zhiping, et al. Achievements on hydraulic problems in large spillway tunnel with a high head and large discharge flow and its risk analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 41 (10): 1193-1198. (in Chinese))

[4] 胡涛,王均星,杜少磊.大流量泄洪洞掺气坎水力特性

数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(5):615-620. (HU Tao, WANG Junxing, DU Shaolei. Numerical simulation of hydraulic characteristics of aerators in spillway tunnel with large discharge [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47 (5): 615-620. (in Chinese))

[5] 徐国宾,章环境,刘昉,等.龙抬头泄洪洞水力特性的数值模拟[J].长江科学院院报,2015,32(1):84-87. (XU Guobin, ZHANG Huanjing, LIU Fang, et al. Numerical simulation on hydraulic characteristic of high head ogee spillway tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32 (1): 84-87. (in Chinese))

[6] 陈瑞华,杨吉健,马麟,等.小湾水电站泄洪洞洞身数值模拟[J].排灌机械工程学报,2017,35(6):488-494. (CHEN Ruihua, YANG Jijian, MA Lin, et al. Numerical simulation of tunnel of Xiaowan Hydropower Station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35 (6): 488-494. (in Chinese))

[7] 张宏伟,张东,吴一红,等.泄洪洞反弧连接段水流特性的三维数值分析[J].水动力学研究与进展:A辑,2008,19(3):261-268. (ZHANG Hongwei, ZHANG Dong, WU Yihong, et al. Numerical study on the hydraulic characteristics of water flow in the anti-arc of spillway tunnel [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 19 (3): 261-268. (in Chinese))

[8] 范灵,张宏伟,刘之平,等.明流泄洪洞布置形式对水力特性影响的数值研究[J].水力发电学报,2009,28(3):126-131. (FAN Ling, ZHANG Hongwei, LIU Zhiping, et al. Numerical study on hydraulic characteristic of free surface flow in spillway tunnel with different configuration [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28 (3): 126-131. (in Chinese))

[9] 苏小丽,刘韩生,范晓丹.泄洪洞工作闸门开启时水击数值模拟研究[J].人民黄河,2017,39(6):90-93. (SU Xiaoli, LIU Hansheng, FAN Xiaodan. Study on numerical simulation of water hammer in the opening process of working gate of spillway tunnel [J]. Yellow River, 2017, 39 (6): 90-93. (in Chinese))

[10] 南军虎,牛争鸣,洪镐,等.公伯峡水平旋流泄洪洞水力特性研究[J].水力发电学报,2013,32(3):101-107. (NAN Junhu, NIU Zhengming, HONG Di, et al. Study on hydraulic characteristics of horizontal spiral flow in the Gongboxia discharge tunnel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (3): 101-107. (in Chinese))

[11] 付士凤,郑源,梁晓玲,等.直叶H型潮流水轮机三维数值模拟[J].水利水电科技进展,2017,37(2):33-36. (FU Shifeng, ZHENG Yuan, LIANG Xiaoling, et al. Three-dimensional numerical simulation of H-type straight-blade tidal turbine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (2): 33-36. (in

- Chinese))
- [12] 杨帆,陈世杰,刘超,等. 贯流泵装置出水流道进口区压力及速度场分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(4):360-365. (YANG Fan, CHEN Shijie, LIU Chao, et al. Analysis on the unsteady pressure and velocity in the inlet region of outlet conduit of a tubular pumping system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(4):360-365. (in Chinese))
- [13] 徐存东,刘璐瑶,王国霞,等. 泵站直边正向前池流态模拟与泥沙淤积预防措施[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(5):398-405. (XU Cundong, LIU Luyao, WANG Guoxia, et al. Flow simulation of front inflows in the straight-edge forebay of pumpingstation and preventive measures of sediment deposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 398-405. (in Chinese))
- [14] 杨帆,高慧,刘超,等. 转速对贯流泵装置流道水力参数影响的数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6):551-557. (YANG Fan, GAO Hui, LIU Chao, et al. Numerical analysis of the effect of rotational speed on the hydraulic parameters for flow conduits of shaft extension tubular pumping system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(6):551-557. (in Chinese))
- [15] 张春晋,孙西欢,李永业,等. 螺旋流起旋器内部流场水力特性数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 53-62. (ZHANG Chunjin, SUN Xihuan, LI Yongye, et al. Numerical simulation and verification of hydraulic characteristics of internal flow field in spiral flow generator [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(1): 53-62. (in Chinese))
- [16] 刘昉,赵梦丽,冷东升,等. 不同底缘形式的平板闸门水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 46-50. (LIU Fang, ZHAO MengLi, LENG Dongsheng, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of plain gate with different types of bottom edges [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(5): 46-50. (in Chinese))
- [17] 资丹,王福军,陶然,等. 边界层网格尺度对泵站流场计算结果影响研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 139-149. (ZI Dan, WANG Fujun, TAO Ran, et al. Research for impacts of boundary layer grid scale on flow field simulation results in pumping station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 139-149. (in Chinese))
- [18] 张春晋,孙西欢,李永业,等. 流固耦合作用对筒装料管道车水力输送内部流场特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 299-307. (ZHANG Chunjin, SUN Xihuan, LI Yongye, et al. Effect of fluid-structure interaction on internal flow field characteristics of tube-contained raw material pipeline hydraulic transportation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(18): 299-307. (in Chinese))
- [19] 练继建,桑林瀚,缙文娟,等. 高拱坝表孔宽尾墩体型参数对泄流能力的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 1-7. (LIAN Jijian, SANG Linhan, GOU Wenjuan, et al. Effects of flaring gate piers with different shape parameters on discharge capacity of surface spillway in a high arch dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(3): 1-7. (in Chinese))
- [20] 冯建刚,钱向栋,张睿. 城市输水泵站前池流态及整流措施[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 77-83. (FENG Jiangang, QIAN Xiangdong, ZHANG Rui. Flow patterns and rectification measures in forebays of urban water pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(2): 77-83. (in Chinese))
- (收稿日期:2018-09-28 编辑:郑孝宇)
- +++++
- (上接第30页)
- [22] 赵东梁,韩梅,喻国良. 浮式植物体消浪效果的试验研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 53-57. (ZHAO Dongliang, HAN Mei, YU Guoliang. Experimental study on effectiveness of floating vegetation on wave dissipater [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 53-57. (in Chinese))
- [23] 蒋昌波,冯璐,陈杰,等. 植物对孤立波作用下直立堤局部冲刷影响实验研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(1): 104-112. (JIANG Changbo, FENG Lu, CHEN Jie, et al. Experimental study on the effect of coastal vegetation on local scour around a vertical breakwater subjected to solitary wave [J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(1): 104-112. (in Chinese))
- (收稿日期:2018-09-26 编辑:雷燕)

