

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0097

郝铭,李国栋.柴坪水电站溢流坝下游河床冲刷试验[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):165-171. HAO M,LI G D. Erosion test on riverbed downstream spillway dam of Chaiping hydropower station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(4):165-171. (in Chinese)

柴坪水电站溢流坝下游河床冲刷试验

郝 铭,李国栋

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048)

摘要:柴坪水电站坝址距离河床弯道较近,地质条件相对较差,大坝采用的消能方式为面流消能,使得水电站下泄水流流态比较复杂,下游河床冲刷剧烈,因此需要对水电站进行整体水工模型试验,证明水电站设计能够满足工程运行要求。研究发现溢流坝下泄水流的主流偏向右岸,对水电站下游右岸河床产生严重冲刷,对大坝的稳定性与工程安全运行造成影响,需要对水电站体型进行优化。研究采用在水电站右导墙处增加贴角,延长溢流坝左边孔左闸墩,同时去掉溢流坝左侧导墙的方式,迫使溢流坝下泄水流主流偏向河道中间。优化方案使下游河床冲刷减弱,降低了河床冲刷对大坝整体稳定性的影响,满足水电站工程运行要求,可以为类似工程提供设计参考。

关键词:水电站;水工模型试验;模型优化;面流消能;河床冲刷

中图分类号:TV131.6 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Erosion test on riverbed downstream spillway dam of Chaiping hydropower station

HAO Ming, LI Guodong

(State Key Laboratory of Ecological and Water Conservancy in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The dam of Chaiping hydropower station is located close to the riverbed curve and has relatively poor geological conditions. The energy dissipation mode for the dam is surface flow energy dissipation, which complicates the discharge flow state of the hydropower station. The downstream riverbed suffers from violent erosion. Therefore, it is necessary to carry out overall hydraulic model test of the hydropower station to prove that the hydropower station design can meet the engineering operation requirements. This study found that the main stream of the discharge flow from the spillway dam is biased to the right bank, and has seriously eroded the riverbed on the right bank downstream the hydropower station. This affects the stability of the dam and the safe operation of the project. It is necessary to optimize the shape of the hydropower station. In this study, we increased the angle of the right guide wall of the hydropower station, extended the left pier of the left side of the spillway dam, and removed the left guide wall of the overflow dam, so as to force the main stream of the discharge flow to the middle of the channel. The optimization scheme can abate the erosion of the downstream riverbed, reduce the impact of riverbed erosion on the overall stability of the dam, meet the operational requirements of the hydropower project, and provide design reference for similar projects.

Key words: hydropower station; hydraulic model test; model optimization; surface flow energy dissipation; river bed erosion

收稿日期:2019-01-19 修回日期:2019-05-31 网络出版时间:2019-06-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190606.1614.008.html>

基金项目:陕西省水利厅科技计划项目(2017slkj-17);陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM5201)

作者简介:郝铭(1995—),男,吉林四平人,主要从事水利工程方面研究。E-mail:haoming310436485@qq.com

通信作者:李国栋(1967—),男,陕西西乡人,教授,主要从事计算流体力学和多相流体力学方面研究。E-mail:gldli2008@xaut.edu.cn

泄水建筑物的消能与防冲问题处理不当会直接对大坝整体的稳定与安全造成影响^[1-2]。溢流坝在重力坝枢纽中是最为重要的泄水建筑物,用于将规划库容所不能容纳的绝大部分洪水经由坝顶泄向下游,以此来保证大坝安全^[3]。河道中水利枢纽的建立,使水流流场特性发生改变,溢流坝下泄水流具有的能量比下游河道中水流的正常比能大得多,因此其对下游河床产生冲刷破坏也更加明显^[4]。

面流消能工具有施工方便,工程量小和总投资少等特点,经常被用于低水头水利工程^[5],其消能机理主要是利用低水头水利枢纽上下游水位差较小,溢流坝下泄水流与下游水面在溢流坝出口附近形成面滚及底部漩滚,以此来达到对下泄水流消能的目的^[6-7]。

但是面流消能的水流流态比较复杂,在固定上游水位和来流流量条件下,河道中水流流态将会随着下游水位的抬高而发生改变。不同水流流态具有不同的水力结构,同时也会对下游河床造成不同程度冲刷^[8]。因此,溢流坝下泄水流对下游河床冲刷是一个需要正视的问题^[9-10]。

本文对柴坪水电站进行整体水工模型试验,得到不同洪水频率下水电站下游河床冲刷情况,对水电站体型进行优化,减弱下游河床冲刷,降低对大坝整体稳定性的影响,使水电站满足工程运行要求。

1 工程概况

1.1 拦河枢纽主要建筑物

柴坪水电站坝址位于梅子沟口上游 400.0 m 的河道弯道处,水电站布置形式从左岸至右岸依次为左岸非溢流坝段、泄水冲沙闸坝段、厂房坝段、右岸非溢流坝段,详情如下。

(1)左岸非溢流坝段为左岸接头重力坝,坝顶长度 49.85 m,坝顶宽度 3.0 m,坝顶高程 413.0 m,最低坝基 389.7 m,最大坝高 23.3 m。(2)泄水冲沙闸坝段布置在主河床,紧邻厂房坝段,坝顶长度 64.50 m,共 4 孔,单孔净宽 13.00 m,总净宽 52.00 m。闸底(堰顶)高程 398.5 m,坝基高程 389.70~386.5 m,坝高 23.3~26.5 m,堰顶以下实体坝高 9.8~13.0 m。(3)厂房坝段布置在主河床右侧,坝顶长度 22 m,顺河向长度 34 m,厂区地面高程 406.35 m。(4)右岸非溢流坝段为厂房与岸坡接头重力坝段,坝顶长度为 35.6 m,坝顶宽度 3.0 m,坝顶高程 413.0 m,最大坝高 28.0 m。

1.2 区域地质条件

(1)左坝肩为基岩边坡,岩性为白云岩夹板岩和

二云石英片岩夹灰岩。岩体强风化层厚约 8~12 m,属软弱岩,破碎,岩体质量级别为 V 级,弱风化层属较坚硬岩,较完整,岩体质量级别为 III 级。(2)河漫滩处地形较平坦,上部为卵石层,层厚 10.2~13 m。下部为白云岩夹板岩,岩体强风化层厚约 3~3.5 m,岩体破碎,强风化层属软弱岩,破碎,岩体质量级别为 V 级,弱风化层属较坚硬岩,较完整,岩体质量级别为 III 级。(3)右坝肩为基岩边坡,岩性为白云岩夹板岩,岩体完整性较好。岩体强风化层厚约 1~1.5 m,强风化层属软弱岩,破碎,岩体质量级别为 V 级,弱风化层属较坚硬岩,较完整,岩体质量级别为 III 级。

主要存在不良地质现象有表层岩体风化卸荷强烈,基岩边坡变形现象常见;在地形较陡处可见到崩塌和岩体倾倒变形现象;在沟口处常会发现泥石参杂的洪积物,多呈扇形分布,厚度较大;有洪积锥或泥石流、崩塌体、危岩体等。

由于柴坪水电站坝址距离河床弯道较近,地质条件相对较差,大坝采用的消能方式为面流消能,水电站下泄水流流态比较复杂,对下游河床的冲刷有较大影响。因此需要进行水电站整体水工模型试验,证明水电站设计能够满足工程运行要求。

2 模型设计与制作

2.1 试验模型设计

水工试验模型按照重力相似准则设计,采用正态几何模型^[11-13]。其中,模型比尺 $\lambda_L = 75$ 。相应的流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 48\,713.93$,流速比尺 $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 8.660\,3$,时间比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{0.5} = 8.660\,3$,压强比尺 $\lambda_p = \lambda_L = 75$,糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 2.053\,6$ 。地形制作按模板法,上游取原型长度 383.00 m,下游取原型长度 450.00 m,河道两岸用水泥砂浆抹面。溢流坝用有机玻璃制作,河床按模型沙级配铺设。

2.2 河床散粒体与模型沙的选择

试验按动床底沙模型设计,即在溢流坝上下游的河床中铺设试验沙。试验沙按层铺设,在河床高程 388.00 m 以下为岩石,试验沙按散粒体模拟,在高程 388.00 m 以上为砂卵石,按砂卵石级配模拟。其中,岩石散粒体粒径的选取范围采用水工模型试验规范建议公式进行计算^[13]

$$d = [v / (5 \sim 7)]^2 \quad (1)$$

式中: v 为抗冲流速; d 为散粒体直径。

通过地质勘探得到柴坪水电站坝址处综合抗冲流速为 $v = 4.00 \sim 4.50$ m/s,砂卵石中值粒径为 $d_{50} = 16.60$ mm。利用公式(1)求得散粒体直径为 $0.327 \sim$

0.810 m,换算成模型散粒体直径为 4.28 ~10.80 mm。

为使得水工模型试验接近水电站实际工程,模型试验采用非均匀散粒体和非均匀河床沙粒。对非均匀散粒体和非均匀河床沙粒进行级配分析得到,水工模型试验采用的散粒体中,直径在 0.327 m 以上占 81.70%,直径在 0.81 m 以上占 6.00%,基本满足粒径为 $d=0.327 \sim 0.810$ m 的要求。水工模型试验实际采用的河床沙粒径级配换算成原型中值粒径为 $d_{50}=16.54$ mm,而原型砂卵石中值粒径为 $d_{50}=16.60$ mm。因此,水工模型试验采用的散粒体和河床沙粒径基本满足要求。

3 原方案的试验研究

以设计单位给出的水文条件为水工模型试验依据,在不同洪水频率下通过控制来流流量和下游水位进行水工模型试验。试验时间严格控制在 2.0 h,在试验过程中观察水流流态是否满足面流流态

要求,并且对溢流坝坝面水面线高程以及溢流坝下游河道沿程水面线高程通过测针进行测量。

3.1 原方案不同洪水频率下水流流态

柴坪水电站距离河床弯道较近,河道中水流在左右两岸存在水位差,而且水工模型河道较宽,受试验条件限制,在试验过程中,对溢流坝下游河道左右两岸的水面线高程进行测量。将测量得到的左右两岸对应水面线高程数据进行平均来代表溢流坝下游河道沿程水面线高程。水电站沿程水面线高程具体情况见图 1。

由图 1 可以发现不同洪水频率下水面线高程变化趋势基本相同,在溢流坝前半段水面线高程沿程减小,而在溢流坝后半段水面线高程呈上升趋势,这主要是因为溢流坝下泄水流的水跃跃首均在溢流坝闸墩出口附近。从溢流坝出口向下游河道水面线高程沿程先升高后降低,这主要是因为溢流坝出口附近为水跃区,水面旋滚,使得水深沿程增加,在水跃区以后水面线高程沿程有波动但总体呈现下降趋势。

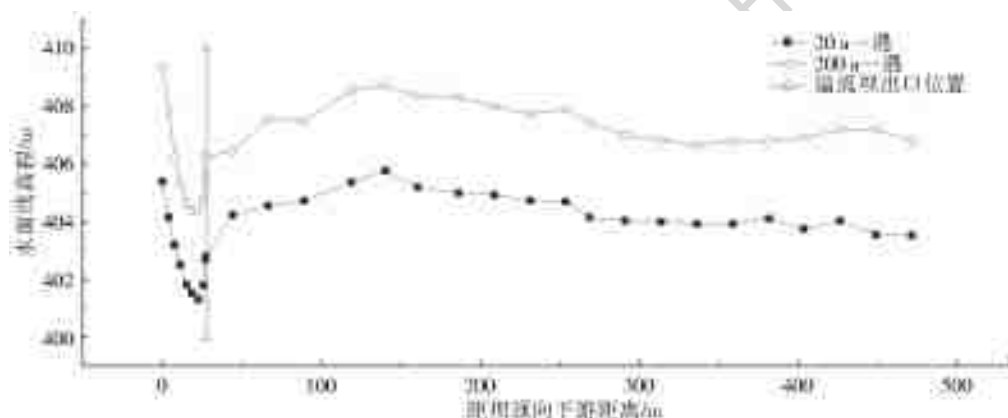


图 1 原方案沿程水面线高程

Fig. 1 Elevation of the water surface line along the river in the original scheme

在水工模型试验过程中对水流流态进行观察,发现在 200 a 一遇洪水频率下,从溢流坝出口至下游 52.50 m 下泄水流主流沿左导墙流动,在 52.50 m 以后水流开始与左导墙有所分离,形成一个小的回流区。由于右导墙和防洪墙全部被水流淹没,在水电站下游与右岸之间整个区域形成一个大的回流区,而此回流在防洪墙处和右导墙处形成落差,迫使水流向左岸偏移,在右导墙附近的回流和溢流坝左四孔的主流之间形成较大的水位差。

3.2 原方案不同洪水频率下下游河床冲刷情况

通过水工模型试验可以看出,在两次洪水频率下下游河床冲刷形态基本相似,最大冲坑位置均位于左四孔右导墙附近,见图 2。下游河床冲刷形态基本可以分为两个部分,一部分为溢流坝出口向下游至最大冲深点以前,河床冲刷后高程沿程下降,另

一部分为最大冲深点以后,河床冲刷后高程沿程增加,这种冲刷形态是由于面流流态特性所致。在最大冲深点以前,面流流态的水跃区下部有回流存在,此回流将一部分泥沙带到溢流坝后堆积起来,在冲坑与溢流坝出口之间形成护坡,保护溢流坝出口附近免于冲刷,在最大冲深点以后,主流将冲出的泥沙带入下游淤积起来。利用水准仪以及刻度尺对下游河床冲刷后的具体高程进行测量,冲刷后河床高程见图 3 和 4。

对图 2、3 和 4 进行对比分析,可以发现在溢流坝左岸河床均为泥沙堆积,在溢流坝右岸河床均为冲刷,并且冲刷深度随着来流量的增大而增大,对大坝整体稳定性造成影响。这主要是因为通过水电站的下泄水流流态并未对称,在溢流坝下游左岸与右岸均有回流区存在,并且水电站后尾水渠中存在泥沙堆积较高的问题。



图 2 原方案 200 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷情况
Fig. 2 The erosion of downstream riverbed in the original scheme at 200-year flood frequency

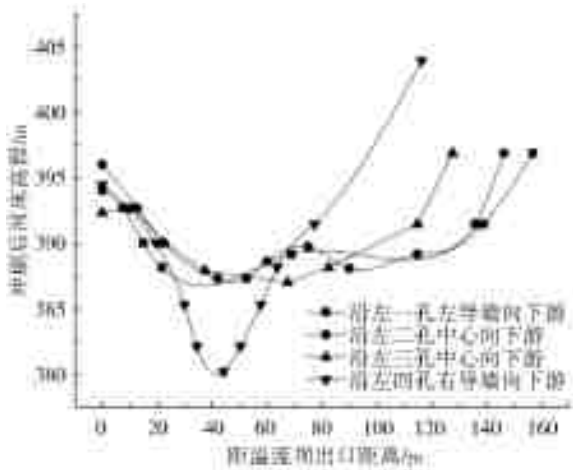


图 3 原方案 20 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷情况
Fig. 3 The erosion of downstream riverbed in the original scheme at 20-year flood frequency

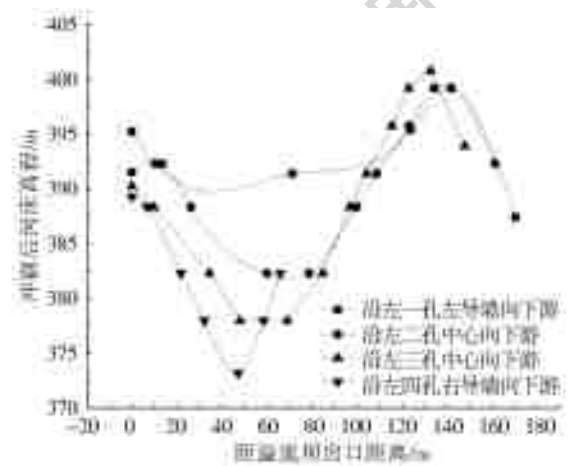


图 4 原方案 200 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷情况
Fig. 4 The erosion of downstream riverbed in the original scheme at 200-year flood frequency

不同洪水频率下下游河床冲刷最深点的具体情况见表 1, 20 a 一遇洪水频率下下游河床最大冲深点高程为 380.23 m, 低于 388.00 m 基岩面 7.77 m, 200 a 一遇洪水频率下下游河床最大冲深点高程为

373.19 m, 低于 388.00 m 基岩面 14.81 m。

表 1 最大冲深点具体情况

Tab. 1 Details on the maximum penetration point

洪水频率	距溢流坝出口距离/m	距右岸导墙向左距离/m	高程/m	冲深/m	距离/冲深
20 a 一遇洪水	44.25	6.00	380.23	7.77	5.69
200 a 一遇洪水	47.25	8.00	373.19	14.81	3.19

4 优化方案的试验研究

原方案水工模型试验中观察到溢流坝下泄水流主流偏向右岸, 右岸河床产生较大冲刷。为使主流回归河道中间, 以减轻右岸冲刷, 决定将左导墙去掉, 恢复原地形, 在右导墙末端加 1:3 的贴角, 贴角高度为 0.50 m, 同时溢流坝左边孔左闸墩向下游延长 2.50 m, 相应模型长度为 3.33 cm, 用以改善水流流态。对于水电站后尾水渠中有泥沙堆积问题, 考虑到下泄水流在水电站下游与右岸之间整个范围内形成回流区, 在此回流作用下可以将尾水渠附近泥沙带走, 故决定将右岸尾水渠斜坡段以后的平台全部去掉, 恢复为原地形。

根据原方案河床冲刷存在的问题, 重新对水电站地质情况进行详细勘察, 发现水电站右岸岩石节理较左岸好, 抗冲流速应该比原方案的综合抗冲流速大。右岸散粒体抗冲流速应由原来的 4.00~4.50 m/s 提高为 5.50~6.00 m/s, 左岸的抗冲流速维持在 4.00~4.50 m/s 不变, 对模型散粒体重新进行粒径筛选。为此, 在优化方案试验中按照最新数据对岩石抗冲流速进行调整, 即溢流坝下游右岸抗冲流速按照 5.50 m/s~6.00 m/s 计算散粒体, 散粒体原型直径变为 0.617 m~1.440 m, 左岸维持原散粒体直径不变, 在右岸和左岸之间采用二者平均值。

优化方案采用与原方案相同的来流流量和水位条件重新进行水工模型试验, 并且在原方案水面线高程量测位置对优化方案水面线高程进行测量。

4.1 优化方案不同洪水频率下水流流态

优化方案沿程水面线高程见图 5。通过与图 1 对比可以看出, 优化方案水面线高程沿程变化趋势与原方案基本相似。水流流态不同点在于由于优化方案左岸导墙去掉恢复为原地形, 在左岸闸墩出口至下游有一大的回流区存在, 此回流不断挤压溢流坝左一孔下泄水流, 使得在左一孔溢流坝出口附近泥沙冲走较多, 右岸水电站后尾水渠末端由于改为动床, 也形成回流区。

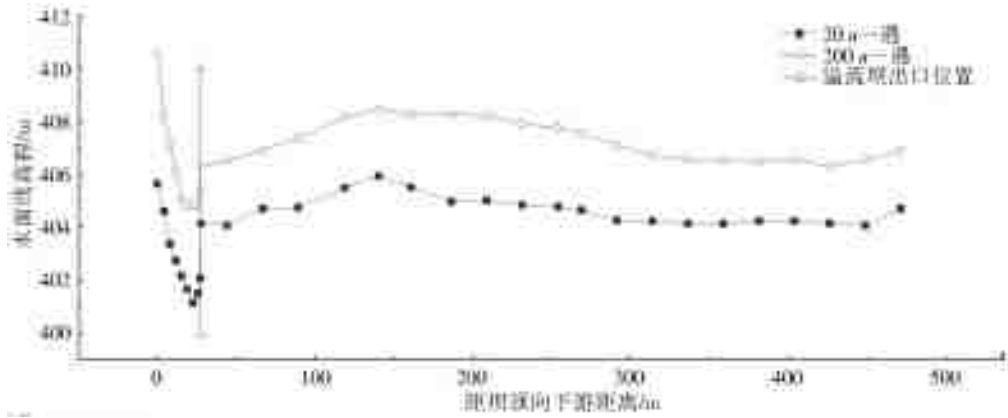


图5 优化方案沿程水面线高程

Fig. 5 Elevation of the water surface line along the river in the optimization scheme

4.2 优化方案不同洪水频率下下游河床冲刷情况

通过对优化方案进行水工模型试验可以看出,两次洪水频率下水电站下游河床冲刷形态同样基本相似,见图6。关于水电站下游河床冲刷后具体高程见图7和8。



图6 优化方案200 a一遇洪水频率下下游河床冲刷情况

Fig. 6 The erosion of downstream riverbed in the optimization scheme at 200-year flood frequency

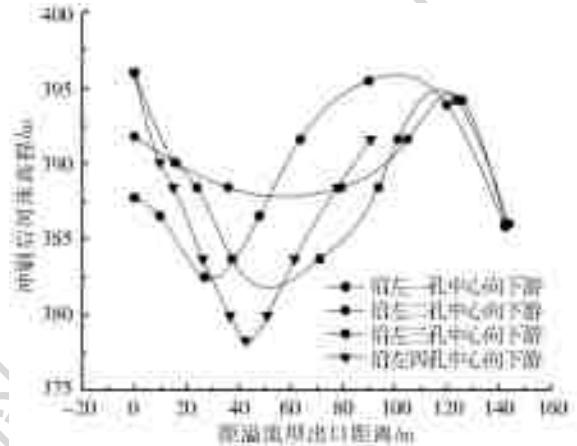


图8 优化方案200 a一遇洪水频率下下游河床冲刷情况

Fig. 8 The erosion of downstream riverbed in the optimization scheme at 200-year flood frequency

通过对图6、7和8对比分析可以看出,下游河床冲刷形态在最大冲深点和溢流坝之间形成护坡,最大冲深点以后泥沙逐渐堆积,与原方案下游河床冲刷形态基本相同。不同点在于左岸做成动床以后,在左岸形成回流,该回流对溢流坝左一孔下泄水流流态产生较大影响,使得左一孔下游河床产生冲刷,但下游河床冲刷最深点依然位于左四孔右导墙末端附近。对优化方案水电站下游河床冲刷后高程进行量测得出:20 a一遇洪水频率下,左一孔中心向下游河床冲刷最深点高程为384.76 m,低于388.00 m基岩面3.24 m;200 a一遇洪水频率下,左一孔中心向下游河床冲刷最深点高程为382.49 m,低于388.00 m基岩面5.51 m。20 a一遇洪水频率下,左四孔中心向下游河床冲刷最深点高程为384.61 m,低于388.00 m基岩面3.39 m;200 a一遇洪水频率下,左四孔中心向下游河床冲刷最深点高程为378.29 m,低于388.00 m基岩面9.71 m。其中,关于左四孔下游最大冲深点具体情况见表2。通过对比原方案与优化方案下游河床最大冲深点高程可以看出,优化方案最大冲深点高程显著提高,冲刷

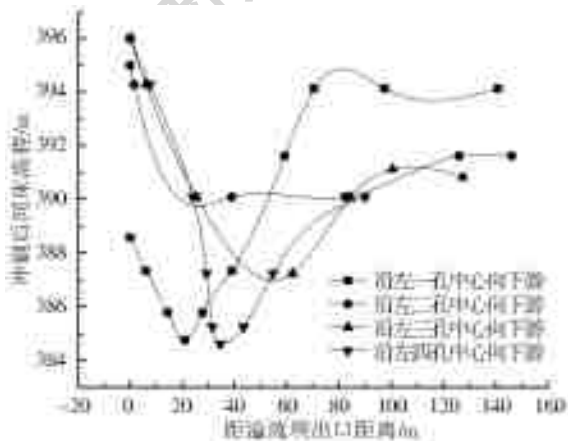


图7 优化方案20 a一遇洪水频率下下游河床冲刷情况

Fig. 7 The erosion of downstream riverbed in the optimization scheme at 20-year flood frequency

减弱。

表 2 左四孔中心向下游冲刷最深点具体情况

Tab. 2 Details on the deepest erosion point by flow from the center of the fourth hole from left

洪水频率	距溢流坝出口距离/m	距右岸导墙向左距离/m	高程/m	冲深/m	距离/冲深
20 a 一遇	34.50	8.00	384.61	3.39	10.18
200 a 一遇	42.75	8.00	378.29	9.71	4.40

在优化方案水工模型试验过程中还观察到,试验初始时水电站尾水渠下游河床略高于尾水渠斜坡段末端,在水流作用下导致高于尾水渠斜坡段末端的部分泥沙被带入尾水渠内,但是当河床高程低于电站尾水渠末端后,并未发现泥沙再进入水电站后尾水渠,并且在右岸回流区作用下,将之前进入尾水渠的泥沙带走,解决了尾水渠泥沙堆积问题。

为确定下游冲坑深度是否稳定,对优化方案进行了 4.0 h(20 a 一遇洪水频率下水流条件 2.0 h, 200 a 一遇洪水频率下水流条件 2.0 h)的冲刷试验。同时对下游河床冲刷后最深点进行测量,最大冲深点高程为 378.02 m,位置依然在左四孔右导墙附近。对比只进行 200 a 一遇洪水频率的河床冲刷后高程 378.29 m,虽有一些误差,但基本可以判断出 2.0 h 的水工模型试验可以满足下游冲坑稳定所需时间要求。

在试验过程中,判断河床是否满足抗冲刷要求的依据为“距离/冲深”,即冲刷最深点距溢流坝出口距离与冲刷深度的比值越大,说明下游河床冲刷形态对大坝稳定的影响越小。对比表 1 和表 2 中数据可以看出,原方案 20 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷最深点距溢流坝出口距离与冲刷深度的比值为 5.69,原方案 200 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷最深点距溢流坝出口距离与冲刷深度的比值为 3.19。优化方案 20 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷最深点距溢流坝出口距离与冲刷深度的比值为 10.18,优化方案 200 a 一遇洪水频率下下游河床冲刷最深点距溢流坝出口距离与冲刷深度的比值为 4.40。优化方案在两次洪水频率下的“距离/冲深”较原方案有显著提高。

5 结 论

本文通过对柴坪水电站进行整体水工模型试验,获取不同洪水频率下水电站下游河床冲刷情况。研究结果表明:由于水电站距离河床弯道较近,溢流坝下泄水流主流偏向右岸,导致下游河床冲刷形态

主要表现为左岸泥沙堆积,右岸泥沙冲刷,冲刷最深点的位置均位于左四孔右导墙末端附近,并且冲刷深度随着洪水频率的减小而增大,同时存在尾水渠后泥沙堆积过高问题。

为了将主流逼向河道中间,以减轻右岸河床的冲刷,在右导墙处增加贴角,延长溢流坝左边孔左闸墩,同时去掉溢流坝左侧导墙的方式对水电站进行体型优化。优化方案试验结果可以看出,下游河床冲刷形态有所改善,河床最大冲深点位置虽仍然在左四孔右导墙末端附近,但河床最大冲深点高程较原方案有显著提高,冲刷程度减弱,降低了河床冲刷形态对大坝整体稳定性的影响,能够满足水电站工程安全运行需要。同时利用溢流坝下泄水流在右岸存在回流区的现象解决了尾水渠后泥沙堆积过高问题,可以为类似工程提供设计参考。

参考文献(References):

- [1] 陈晨. 翁养水库溢流坝段消能措施优化初探[J]. 水利建设与管理. 2018(12):10-13. (CHEN C. Preliminary study on optimization of energy dissipation measures for overflow dam section of Wengyang reservoir[J]. Water conservancy construction and management. 2018(12):10-13. (in Chinese))
- [2] 胡明. 低水头、大单宽流量泄洪消能形式试验研究[J]. 水力发电学报. 2013(5):158-162. (HU M. Experimental study on the form of low-head, large single-wide flow discharge and energy dissipation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2013(5):158-162. (in Chinese))
- [3] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社. 2009. (LIN J Y. Hydraulic building[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 尚艳萍. 跌坎型底流消能工设计理论与方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学. 2012. (SHANG Y P. Research on the theory and method of design of drop-out underflow energy dissipator[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 2012(in Chinese))
- [5] 吕宏兴. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社, 2002. (LYU H X. Hydraulics[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002. (in Chinese))
- [6] 张柱, 赵伟, 崔少军, 等. 不同掺气条件下底板水流脉动压强特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 170-175. (ZHANG Z, ZHAO W, CUI S J, et al. Study on pulsating pressure characteristics of floor water flow under different helium conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1):170-175. (in Chinese))

- [7] 杨宇. 底流消能工水流结构区气体迁移扩散试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017. (YANG Y. Experimental study on gas migration and diffusion of water flow structure in underflow energy dissipator. [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [8] 张格. 异型宽尾墩的水力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (ZHANG G. Study on hydraulic characteristics of shaped wide-tailed pier[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [9] 孙伦. 新疆某水电站拦河枢纽下游消能防冲试验研究. [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017. (SUN L. Experimental study on energy dissipation and erosion prevention of the downstream of a hydropower station in Xinjiang [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017. (in Chinese))
- [10] 徐振坤, 郭毅. 中低水头枢纽坝下局部冲刷问题的初探[J]. 中国水运, 2016(10): 172-175. (XU Z K, GUO Y. Preliminary study on local scour under the dam of medium and low head[J]. China Water Transport, 2016(10): 172-175(in Chinese))
- [11] 陈娟, 潘秀华, 张正扬. 平原地区人工景观湖水力模型试验与研究[J]. 江苏水利, 2018(10): 34-40. (CHEN J, PAN X H, ZHANG Z Y. Experimental and research on hydrodynamic model of artificial landscape lake in plain area[J]. Jiangsu Water Conservancy 2018(10): 34-40(in Chinese))
- [12] 李国栋, 李珊珊, 牛争鸣. 表孔、底孔联合泄洪流场数值模拟与冲刷趋势分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3): 26-34. (LI G D, LI S S, NIU Z M. Numerical simulation of surface outlet and bottom outlet joint flood discharge energy dissipation and scour trend analysis[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 2016, 48(3): 26-34. (in Chinese))
- [13] 南京水利科学研究所, 水利水电科学研究院. 水工模型试验(第二版)[M]. 水利电力出版社 1985: 339-340. (Nanjing Hydraulic Research Institute, Institute of Water Resources and Hydropower Research. Hydraulic Model Test (Second Edition)s[M]. Water Resources and Electric Power Press, 1985: 339-340. (in Chinese))

(上接第 164 页)

- [38] 高庆龙. 基于空间分布的建筑节能气象参数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. (GAO Q L. Research on weather data for building energy efficient based on the space distribution[D]. Xian: Xi'an Architecture & Technology University, 2011. (in Chinese))
- [39] 翁笃鸣, 孙治安. 中国可能太阳直接辐射的气候计算及其分布特征[J]. 南京气象学院学报, 1987, 10(1): 9-19. (WEN D M, SUN Z A. Research on weather data for building energy efficient based on the space distribution[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1987, 10(1): 9-19. (in Chinese)) DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1987.01.02.
- [40] KYLE BUICK. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981. (KYLE B. Effect of solar radiation on the bridge structure[M]. Beijing: China Railway Press, 1981. (in Chinese))
- [41] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(9): 2388-2409. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:9(2388).
- [42] VITALIANI R, SAETTA A, SCOTTA R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 446-457. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:3(446).
- [43] MOORTY S, ROEDER C W. Temperature dependent bridge movements[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(4): 1090-1105. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:4(1090).