

楼庄子水库溢洪洞体型优化试验研究

张军, 刘景瑞

(新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 针对楼庄子水库工程溢洪洞原方案存在的问题,采用物理水工模型试验方法,对原挑流鼻坎提出了横向扩散和竖向扩散两种消能方案,通过对比分析挑坎水舌形态和下游河道冲淤形态,最终认为横向扩散消能方案优于竖向扩散方案。进一步分析了挑坎横向扩散方案的扩散角、挑距、冲淤形态等特性规律,确定适度扩散角舌形鼻坎方案为推荐方案。试验结果表明:舌形挑流鼻坎形成的水舌连续光滑、扩散充分,入水范围增大而单宽流量减小,下游河道冲淤明显减轻。试验结果可为同类工程优化结构形式及设计应用提供参考。

关键词: 溢洪洞; 泄流能力; 舌形鼻坎; 冲淤; 溢洪洞体型优化

中图分类号: TV135.23; TV131.61

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0143-05

Experimental study on spillway hole shape optimization of Louzhuangzi Reservoir

ZHANG Jun, LIU Jingrui

(Xinjiang Scientific Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China)

Abstract: To solve the problem of original discharge tunnel of Louzhuangzi Reservoir Project, the lateral energy dissipation and vertical energy dissipation schemes were proposed for the original picking nose scheme, using the physical hydraulic model test method. By comparing the water tongue morphology and downstream river channel scouring and silting form, the lateral diffusion energy dissipation scheme was found better than the vertical diffusion scheme. Furthering analysis the characteristics of the diffusion angle, the pitch, the scouring and silting morphology of the lateral diffusion scheme resulted the recommended scheme is the moderate diffusion angle tongue-shaped nasal ridge scheme. The results showed that the tongue-type jet buckets can form a water tongue that is continuous and smooth, and the diffusion is sufficient. In addition, it increased the water inlet area and reduced the single width flow and the downstream river channel erosion. The results can provide reference for the optimization of structural forms and design applications of similar projects.

Key words: spillway hole; discharge capacity; jet bucket with tongue-type; scouring and silting; spillway hole shape optimization

1 研究背景

随着西北地区水利工程建设的快速发展,中高坝数量不断增加,高速水流问题与工程运行安全息息相关。水利工作者尤其关注泄洪建筑物的消能防冲设施。依据泄水建筑物高流速水力学理论,挑流鼻坎的形式直接影响挑流水舌形态,挑流水舌形态是决定下游冲刷的关键。为了验证挑流鼻坎的合理性、经济性,通常采用水工模型试验进行验证,且已获得良好的研究成果^[1-2]。

国内中高坝泄洪建筑物的挑流消能工有宽尾墩形式^[3-7]、窄缝挑坎形式^[8-9]、扭鼻坎形式^[10-11]、斜鼻坎形式^[12-14]、燕尾挑坎形式^[15]、舌形鼻坎形式^[16-18]等。张东明等^[16]对舌形挑坎和短边墙挑坎的水舌流态进行了数值模拟,提出不同挑坎体型的水舌空中扩散规律;王均星等^[17]通过龙开口水电站模型试验得出大差动-舌形挑坎方案消能防冲效果较优,其挑坎水舌纵、横向均有扩散,扩散效果较好;陈小威等^[18]通过长溢庙水库溢洪洞模型试验验证了舌形鼻坎横向扩散水流分布均匀,有效解决了下

收稿日期:2018-12-02; 修回日期:2019-05-05

基金项目:天山青年计划项目(QN2016BS0753)

作者简介:张军(1981-),男,四川资中人,博士,高级工程师,注册土木工程师(水工结构),主要从事水利水电工程设计及工程泥沙处理研究工作。

游河床冲刷问题。针对楼庄子水库工程砂、泥岩互层软岩的地质特性,为减小下游冲刷,保证出口右岸边坡安全,并验证溢洪洞布置和出口消能工体型的合理性和可能性,通过水工模型试验分析了原设计溢洪洞布置存在的问题,提出了溢洪洞进口、出口优化形体及舌形挑流鼻坎消能工方案,且验证了其优越性。目前,将舌形挑坎运用到实际工程的经验较少,本工程取得良好的模型试验结果,可为同类工程的设计提供参考。

2 工程概况

楼庄子水库位于新疆头屯河上游,为“十三五”期间重点水利工程,其主要任务是灌溉、下游防洪和城市供水等。水库总库容为 $7\,374 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

溢洪洞轴线采用直线布置,利用右岸山体上下游洪沟布置进、出水口。基岩为中侏罗统灰绿色砂岩泥岩互层,为软岩,洞身围岩类别主要为IV类。进口WES堰控制段宽6.0 m,顶高程1 391.0 m,正常运行时采用弧形工作闸门挡水。隧洞段断面(城门洞形)尺寸由6.0 m×6.0 m(宽×高)渐变为5.0 m×6.0 m(宽×高),纵坡 $i = 0.02$ 。泄槽(陡槽)段断面为5.0 m×5.0 m。原设计方案泄槽末端设挑流消能连续鼻坎,鼻坎长18.5 m,宽5.0 m,挑角为30°,下游连接混凝土护坦。挑流鼻坎下游为洪沟,为使下泄的小流量洪水顺利排入河道,对洪沟对岸进行了开挖处理。

3 研究方法

根据重力相似准则设计试验模型^[3-7],采用正态模型,模型几何比尺为1:40。模型水库两岸山体地形和下游河道由水泥砂浆拉毛制作而成,溢洪洞进口段用水泥砂浆制成,溢洪洞建筑物用有机玻璃制作。

为了揭示泄洪消能冲淤规律,下游河床采用动床模拟方法,天然河床部分及溢洪洞出口泄洪渠部分的河床质均采用散粒体进行模拟。试验的2种特征工况为:(1)工况1,设计洪水位,库水位1 397.41 m;下泄流量 $246.6 \text{ m}^3/\text{s}$;(2)工况2,校核洪水位,库水位1 397.63 m,下泄流量 $256.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4 试验结果与分析

4.1 溢洪洞原设计方案试验结果与分析

4.1.1 泄流能力试验结果分析 首先对原设计方案溢洪洞的泄流能力进行试验测试,对校核洪水位

及设计洪水位闸门全开时的溢洪洞进出口水力特性及下游河道水流流态和冲淤形态进行了观测,泄流能力设计值与试验值对比见表1。

表1 原设计方案溢洪洞泄流能力设计值与试验值比较

工况	库水位/ m	设计值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	试验值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	差值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1397.41	246.6	184.68	-61.92
2	1397.63	256.0	192.45	-63.55

由表1可见,溢洪洞模型实测泄量小于设计泄量,在设计和校核水位时,两者差值为61.92~63.55 m^3/s ,占相应设计泄量的25.11%~24.82%。为进一步分析泄流能力不足的原因,试验中在堰宽不变的条件下,将校核洪水位提高至1 399.05 m,以满足设计流量 $256 \text{ m}^3/\text{s}$ 的要求。试验结果表明溢洪洞WES堰泄洪过流能力不足,不符合设计要求,为水库大坝安全运行带来隐患。

4.1.2 挑流水舌特性结果分析 将库水位提高至1 399.05 m,溢洪洞下泄流量达到设计要求泄量 $256 \text{ m}^3/\text{s}$,对水舌形态与挑距进行了观测分析。

原方案溢洪洞校核泄量工况水舌形态见图1。试验中观测到,校核洪水位对应水舌最大挑射距离为92 m,入水最大宽度为14.95 m,水舌入水位置靠近右岸,水舌扩散后右侧部分冲砸河床右岸边坡。试验结果表明,原方案挑坎纵向不能形成窄缝水舌,横向也未拉开扩散,导致入水集中,且冲砸岸坡。



图1 原方案溢洪洞校核泄量工况水舌形态

4.2 溢洪洞优化方案试验结果与分析

由于本工程泄洪建筑物、引水建筑物均集中平行布置在右岸,出口布置紧凑,因此,针对溢洪洞原方案存在的问题,考虑从枢纽布置角度对溢洪洞轴线平面位置、进出口结构体型尺寸等方面进行优化调整。为解决水舌冲砸河床右岸边坡的问题,初拟将溢洪洞出口轴线向河床移动20 m。为了使溢洪洞泄量满足设计要求,且减少进口石方开挖量,初拟

维持进口溢流堰堰宽 6.0 m 不变,而将 WES 堰顶高程降低 1.5 m,即从原设计堰顶高程 1 391.0 m 下降至 1 389.5 m。再通过模型试验进一步验证优化后溢洪洞方案进口过流能力及出口水舌特性,探寻下游河道冲淤形态规律。

4.2.1 泄流能力试验结果分析 针对优化后溢洪洞进口泄洪过流能力进行试验测定,对校核洪水位及设计洪水位闸门全开时的溢洪洞进出口水力特性及下游河道水流流态和冲淤形态进行了观测,泄流能力设计值与试验值对比见表 2。

表 2 优化方案溢洪洞设计值与试验值比较

工况	库水位/ m	设计值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	试验值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	差值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1397.41	246.6	283.03	36.43
2	1397.63	256.0	295.40	39.40

由表 2 可见,优化方案溢洪洞模型实测过流能力大于设计过流能力,差值为 36.43 ~ 39.4 m^3/s ,设计泄量余幅 14.77% ~ 15.39%,试验结果表明:在溢流堰宽为 6 m 条件下,堰高降低 1.5 m,进口泄流能力满足设计要求,且有一定余幅,具有一定的安全系数。

4.2.2 优化轴线方案出口水舌特性分析 试验针

对调整溢洪洞轴线后的优化布置方案出口挑流水舌特性进行试验分析,溢洪洞优化布置方案水舌流态及冲淤形态见图 2。

由图 2(a)可知,水舌最大挑距为 66.8 m,入水集中,冲砸河床,不影响河床右岸边坡安全。试验结果表明:溢洪洞轴线向河床偏移 20 m 是合适的,保证了右岸边坡的安全,但水舌消能不充分、入水集中,冲砸软岩河床。

由图 2(b)可见,下游河道冲坑底高程为 1 305.40 m,原河床高程为 1 318.0 m,则冲坑深度为 12.6 m,淤积体顶高程为 1 320.30 m,淤积物范围较大,分布形状为扇形。试验结果表明:溢洪洞出口水舌消能不充分,冲砸河床严重,将导致下游河道的严重冲淤,影响下游行洪安全。

4.3 鼻坎体型优化试验结果与分析

针对原设计溢洪洞方案及优化溢洪洞轴线方案出口水舌均扩散不充分、冲砸河床严重、下游河道严重冲淤的问题,试验对鼻坎体型进行了优化。体型优化主要从枢纽布置特点、消能区地形特征及溢洪洞水力条件进行竖向及横向扩散消能试验。

4.3.1 竖向扩散消能优化试验结果分析 首先采用窄缝式鼻坎进行竖向扩散消能试验,试验进行了竖向扩散方案 1 及方案 2 两个体型方案测试,试验结果见图 3。



(a) 水舌流态



(b) 下游冲淤形态

图 2 溢洪洞优化布置方案水舌流态及冲淤形态



(a) 方案1水舌流态



(b) 方案2水舌流态

图 3 竖向扩散方案水舌流态

由图3(a)可见,鼻坎竖向扩散方案1出口宽1.6 m时,水舌基本具有窄缝水舌的形态,但水翅较严重,水舌上部部分水流过早塌落,水舌形状不理想。结果表明:挑流鼻坎出口宽1.6 m不能形成完整的窄缝水舌,竖向扩散不充分。由图3(b)可见,将鼻坎竖向扩散方案2出口宽调整为3.2 m时,虽然水翅有所减弱但水舌纵向拉开不明显,水舌形状亦不理想。结果表明:挑流鼻坎出口宽3.2 m不能形成窄缝水舌,竖向扩散不充分。通过对窄缝鼻坎断面的佛汝德数分析表明:溢洪洞校核洪水位的佛汝德数为4.28,通常能够形成良好窄缝水舌的佛汝德数范围为4.81~10.32^[21],而本工程窄缝式鼻坎佛汝德数小于正常范围的最小值,这是

不能形成良好窄缝水舌形态的主要原因。

4.3.2 横向扩散消能优化试验结果分析 竖向扩散消能效果不佳,则考虑试验鼻坎体型修改为横向扩散消能体型。由于溢洪洞出口下游河道消能区宽度有限,因此,挑坎只能适度扩散,确保不影响河床右岸边坡稳定安全。试验先将鼻坎两侧边墙进行了两个角度的扩散,随后在大扩散角的基础上将两侧边墙缩短,同时将鼻坎底板末端做成舌形,其分别为横向扩散方案1、横向扩散方案2和横向扩散方案3。为了进一步验证舌形鼻坎的合理性,试验对横向扩散方案3的水舌形态和下游河道冲淤形态进行观测分析。各横向扩散方案试验结果见图4。

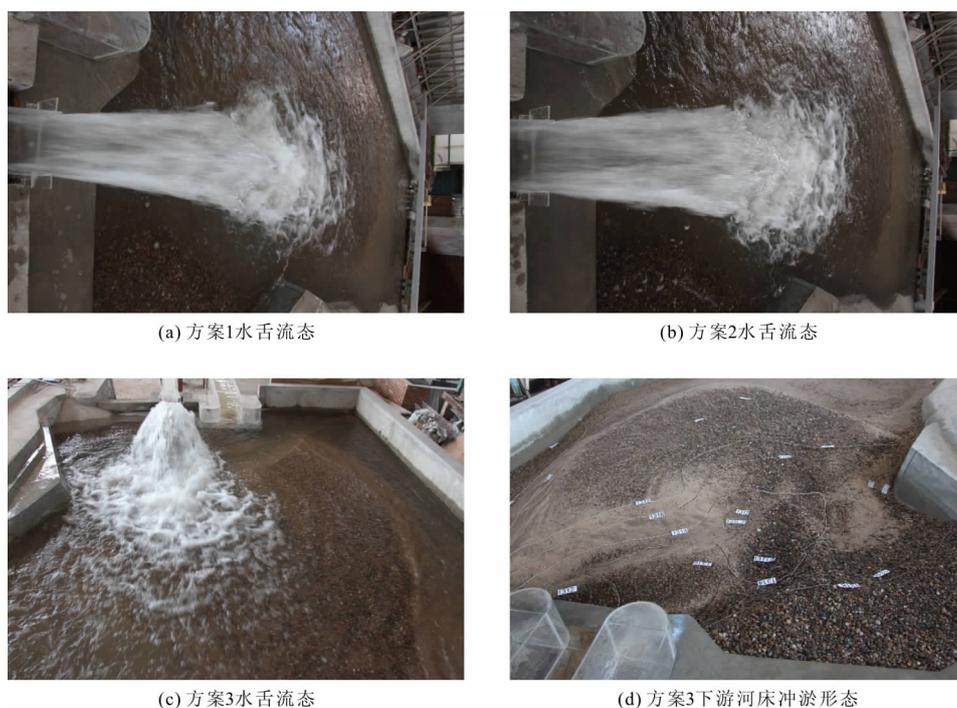


图4 横向扩散方案水舌流态及冲淤形态

由图4(a)可见,方案1扩散角为 4.46° ,靠近边墙的部分水流受到边墙的约束而水深较大。试验结果表明:由于鼻坎扩散角较小,水舌横向扩散不充分,入水偏集中,消能防冲略不足。由图4(b)可见,方案2扩散角为 6.088° ,横向扩散角略有增大,边墙对水流的影响有所减弱,试验结果表明:由于扩散角有所增加,水舌横向扩散基本充分,且扩散水流不影响河床右岸边坡安全。由图4(c)可见,方案3在方案2的基础上,适当缩短边墙长度并将底板出口做成舌形后,试验结果表明:挑流水舌横向扩散充分、连续而平滑,入水横向宽度增大,进一步减小了入水单宽流量,下游软岩河床的冲击压力得到有效

减轻,且水舌不影响河床右岸边坡的稳定。

方案3校核洪水位对应水舌最大挑射距离为73.28 m,最小挑射距离为45.28 m,入水最大宽度为35.2 m,冲坑深度为6.3 m(图4(d))。试验结果表明:水舌形态较原设计方案得到明显改善,扩散充分,水舌冲击压力减小,下游河道冲淤明显减轻,相对于原设计方案冲坑深度减小了50%,淤积物堆积范围也明显减小,消能效果较好。

5 结论

(1) 针对原设计溢洪洞方案进行水力特性研究,结果表明,溢洪洞进口泄流能力不足,出口挑流

水舌部分冲砸河床右岸边坡;通过优化,保证原设计WES堰宽6.0 m不变,将堰高降低1.5 m(高程1389.5 m),则溢洪洞泄流能力满足设计要求且余幅达到15.39%~14.77%。调整溢洪洞出口轴线向河床偏移20 m,虽然挑流水舌不影响边坡安全,但水舌入水集中,纵向、横向扩散消能均不充分,导致冲砸下游河床而产生严重淤积。

(2)针对出口挑流消能工体型,进行竖向扩散消能及横向扩散消能共5个方案模型试验优化。试验表明,由于鼻坎佛汝德数过小而不能形成窄缝水舌,竖向扩散不充分;鼻坎横向扩散角为 6.088° 时,扩散效果较优,鼻坎调整为舌形,水舌连续平滑、扩散充分,入水宽度增大,进一步减小了入水单宽流量,下游软岩河床的冲击压力得到有效减轻,且水舌不影响河床右岸边坡稳定。

参考文献:

- [1] 尹韬,邱勇,李京蔚,等.基于试验研究的挑流消能机理分析[J].水利规划与设计,2017(7):103-105+165.
- [2] 宁景昊,宁利中,宁碧波,等.挑流水舌特性及其影响[J].黑龙江大学学报,2017,8(4):1-6.
- [3] 刘斌.三河口水利枢纽泄洪消能工体型优化试验研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(3):181-186.
- [4] 刘金星,杨敏.东庄水利枢纽表孔宽尾墩水力特性研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):187-192.
- [5] 李章浩,尹进步,梁宗祥.阿海水电站表孔X型宽尾墩消能技术初拟体型试验研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(4):122-125.
- [6] 蒋小鹏,赵冠松.疏勒河青羊沟水电站枢纽挑流消能鼻坎设计与优化[J].水利水电技术,2014,45(7):33-38.
- [7] 黄国兵,谢世平,段文刚.高坝泄洪挑流消能工优化研究与应用[J].长江科学院院报,2011,28(10):90-93.
- [8] 张勇,刘韩生,汪洋,等.Y型窄缝挑坎在水电站导流泄洪洞中的应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):149-152+158.
- [9] 曾红,余玉亮.双河口水电站窄缝式挑流消能鼻坎形体设计[J].人民长江,2013,44(20):4-6.
- [10] 刘强,朱安龙.某工程消能建筑物设计与优化[J].人民长江,2016,47(S2):64-67.
- [11] 吴新宇,孙东坡,高昂,等.扭曲鼻坎对泄洪洞挑流消能的影响研究[J].水利水电技术,2014,45(8):56-61.
- [12] 位敏,陈利强,叶俊荣,等.民乐水库溢洪道挑流鼻坎体型优化试验研究[J].人民长江,2016,47(19):83-86.
- [13] 赵润达,张春财,戴晓兵.某抽水蓄能电站狭窄河道挑流鼻坎优化及下游防冲设计试验研究[J].人民珠江,2017,38(2):18-22.
- [14] 邱勇,龚爱民.斜鼻坎挑流消能在黑石罗水库的应用[J].水电能源科学,2016,34(3):101-103.
- [15] 毛栋平,张法星,钟晓凤,等.黄登水电站燕尾型挑坎挑流消能适用性试验研究[J].水电能源科学,2016,34(3):104-107.
- [16] 张东明,王媛.舌形坎与短边墙坎泄流水舌空中扩散规律研究[J].中国农村水利水电,2007(3):106-109.
- [17] 王均星,罗贝尔.龙开口水电站挑流消能方式[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(2):166-169.
- [18] 陈小威,张宗孝,刘冲,等.溢洪洞出口挑流鼻坎优化试验研究[J].电网与清洁能源,2016,32(7):143-148.
- [6] FROEHLICH D C. Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(11):04016041.
- [7] HOU Jingming, LIANG Qiuhua, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling & Software, 2015,66:131-152.
- [8] ERPICUM S, DEWALS B J, ARCHAMBEAU P, et al. Dam break flow computation based on an efficient flux vector splitting[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2010,234(7):2143-2151.
- [9] CHANSON H. Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave[C] //International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2006; Volume 1. CRC Press, 2006: 465-474.
- [10] 夏军强,王光谦,谈广鸣.复杂边界及实际地形上溃坝洪水流动过程模拟[J].水科学进展,2010,21(3):289-298.
- [11] 黄炳彬,方红卫,刘斌.复杂边界水流数学模型的斜对角笛卡尔方法[J].水动力学研究与进展,2003,18(16):679-685.
- [12] 潘存鸿,鲁海燕,郑君,等.二维溃坝波数值模型及其应用[J].水力发电学报,2010,29(4):89-95.
- [13] 宁利中,宁碧波,胡彪,等.任意梯形断面溃坝洪水最大流量解析解[J].西安理工大学学报,2017,33(2):164-168.

(上接第142页)