# 龙潭沟水库溢流坝泄洪消能局部冲刷试验研究

吴福生1, 阮仕平1, 冯新权2

(1. 南京水利科学研究院,水文水资源及水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210029;2. 山东水利勘 测设计院,山东 济南 250000)

摘要:采用几何比尺为1:30的大比尺整体枢纽水工模型,根据重力相似准则,进行了龙潭沟水库溢流坝泄洪 消能水力学试验研究。试验结果表明,设计洪水时,原设计方案及修改方案都不会对下游河床造成冲刷;下游 河道水流平稳,流速分布均匀。校核洪水时,随着溢流坝过坝流量的增加,单宽流量增加坝面水深增大,原设计 光滑溢流坝面沿程水流掺气消能效果欠佳,下游流速大、水流紊乱,挑流水舌下游造成严重冲刷,影响泄洪安 全。通过方案修改优化,提出阶梯溢流坝台阶尺寸为0.90 m×0.72 m+连续挑坎方案新型消能形式,宣泄校核洪 水时消能率较高,且下游河道水流平稳,流速较低且分布均匀,满足龙潭沟水库工程的安全泄洪。

关 键 词:龙潭沟水库;阶梯溢流坝;连续挑坎;水工模型试验
中图分类号:TV652.1
文献标志码:A
文章编号:1009-640X(2014)01-0062-08

龙潭沟水库位于山东省日照市五莲县东南部,潮白河最上端。水库坝址位于五莲县户部乡上沟村西约 376 m处。建设龙潭沟水库是为了控制中小洪水下泄,提高潮白河流域的区域防洪能力,保障流域内人民群 众生命财产的安全和国家基础设施安全,缓解当地水资源紧缺的状况,实现流域内社会、环境和经济的可持 续发展。水库的首要任务是防洪、农业灌溉,兼顾生态补水和旅游等。

龙潭沟水库总库容 1 078 万 m<sup>3</sup>,相应水位 170.51 m;兴利库容 600 万 m<sup>3</sup>,相应水位 161.85 m;死库容 150 万 m<sup>3</sup>,相应水位 137.00 m。水库主要建筑物包括大坝、泄洪洞及放水洞等。水库大坝为碾压混凝土重 力坝,最大坝高 69.21 m,坝长 264 m,坝顶高程 171.34 m。采用泄洪洞和溢流坝相结合的泄洪方式。泄洪洞 宽度 2.8 m,洞底高程 112.73 m,溢流坝顶高程为 167.08 m。放水洞直径 1.8 m,洞底高程 136.0 m(1985 国 家高程基准)。

根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》,该工程的主要建筑物级别为3级,确定本工程大坝、溢流坝 与泄洪洞的设计洪水标准为50年一遇,校核洪水标准为1000年一遇。设计勘测部门将混凝土糙率定为 0.014,坝址处基岩抗冲流速定为5m/s。

1 物理模型设计及试验条件

模型采用正态模型,水流运动根据重力相似准则设计。综合考虑研究目的、技术要求以及场地等因素,确定几何比尺 $\lambda_L$ =30,则流速相似比尺: $\lambda_v = \lambda_L^{1/2} = 5.48$ ;流量相似比尺: $\lambda_q = \lambda_L^{5/2} = 4$ 929.50;糙率相似比尺: $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.76$ 。

模型上游尺寸为5 m×8.82 m(长×宽),模拟 150 m×265 m(长×宽)的库区范围;模型下游河道长 9.17 m,模拟下游 275 m长的河道。水库下游水位通过尾门控制,泄流量用矩形壁量水堰测量。为便于观察 水流流态,模型全部采用有机玻璃进行制作。有机玻璃的糙率为 0.008,按模型糙率比尺换算得原型糙率为

收稿日期: 2013-07-26

作者简介:吴福生(1963-),男,安徽池州人,教授级高级工程师,博士,主要从事水工水力学与环境水力学研究。 E-mail: fswu@nhri.cn

0.0141,满足要求。

龙潭沟水库枢纽水工整体模型根据山东省水利勘测设计院提供的图纸资料制作。为便于观察水流流态,竖井泄洪洞与溢流坝模型采用有机玻璃精加工制作。模型平面误差在2 mm 以内,高程误差在0.5 mm 以内。水库及下游河道地形根据1:2000 地形图,采用水泥抹光制作。

在模型下游排水管末端采用矩形薄壁量水堰测控流量,采用水工(常规)模型试验规程<sup>[6]</sup>给出的公式计算流量。溢流坝面及挑坎处水流为高速水流,用南京水利科学研究院研制的 **Φ25** mm 微型毕托管测量流速, 下游流速采用微型 OA 红外旋桨流速仪与三维 ADV 流速仪测量。

2 原设计方案溢流坝泄流水力特性试验

#### 2.1 试验工况

根据设计提供的资料,设计(洪水频率2%)与校核洪水条件下(洪水频率0.1%),上游库水位分别为 168.40和171.51m,下游河道水位分别为111.33和112.58m,溢流坝泄流量分别为105和409.4m<sup>3</sup>/s,单 宽流量分别为3.50和13.65m<sup>3</sup>/s。因龙潭沟水库主要为防洪、灌溉、蓄水改善生态环境,设计时考虑正常 20年一遇洪水时,溢流坝不泄流(溢流坝顶高程167.08m,与正常水位一致),所以,设计有放水洞满足下游 农业灌溉与生态补水。

## 2.2 溢流坝泄流能力及水力特性试验研究

设计及校核工况下溢流坝泄洪时流态如图 1 所示。可见,溢流坝泄洪时挑流水舌掺气充分,下游河道水 流湍急。设计洪水时,溢流坝挑流水舌落水处距离鼻坎 30~35 m,略超过鼻坎后护坦范围;校核洪水时,挑 流水舌挑距大大增加,其落水处距离鼻坎 78~84 m。



图 1 设计和校核洪水溢流坝泄洪 Fig. 1 Overflow dam discharging under the design and check flood conditions

龙潭沟水库溢流坝泄流时水位流量关系试验结果见图 2。溢流坝泄流能力计算公式:  $Q = m_z B \sqrt{2g} H^{1.5}$ , 其综合流量系数计算公式: $m_z = Q/(B\sqrt{2g} H^{1.5})$ ,其中  $m_z$ 为含侧收缩系数在内的综合流量系数;Q 溢流坝过 坝流量(m<sup>3</sup>/s);B 为堰顶处的净宽(30 m);g 为重力加速度(9.81 m<sup>2</sup>/s);H 为堰顶水头(m)。根据试验结果 进行计算,得出综合设计及校核洪水下流量系数值约为0.45。





设计洪水时溢流坝面斜坡段时均压强出现负压,但负压绝对值较小,小于 0.84×9.81kPa;校核洪水时, 负压绝对值最大为 1.14×9.81 kPa。可见,溢流坝面的设计是合适的。设计及校核洪水条件下坝面水深较 小,溢流坝两边的挡水边墙高度满足要求。设计洪水时,挑坎处流速为 18.48 m/s,校核洪水时为 27.62 m/s。

图 3 绘出了溢流坝在各库水位流量下挑流水舌挑距范围的试验结果。可见,挑距随着泄流量的增加而 增大。泄流量达到设计洪水时,挑流水舌挑距范围为 33.0 ~ 34.2 m,略大于挑坎下游设计护坦长度 (30.0 m)。溢流坝泄洪时,设计洪水时下游流速一般小于 5 m/s,但校核洪水时下游河床流速较大,超过了 河床基岩的抗冲流速 5 m/s,将会对下游河床造成冲刷。

3 溢流坝消能措施修改方案试验研究

从原设计方案试验结果可知,溢流坝泄洪时,下游河床流速不均匀,设计洪水时下游流速一般小于 5 m/s;校核洪水时下游河床流速较大,可能引起对下游河床的冲刷,且挑流水舌距挑坎达 84 m,可能引起河 床冲刷影响到泄洪洞出口泄流安全。因此,考虑将溢流坝斜坡段光滑面改成阶梯消能工,以提高消能率,减 轻泄洪对下游河床的冲刷影响。

通过修改阶梯尺寸以提高阶梯溢流坝的消能效果,最后得到修改方案 2 溢流坝的阶梯尺寸为 0.90 m× 0.72 m,见图 4,其消能效果最佳。





图 4 修改方案 2 Fig. 4 The modified scheme 2

溢流坝消能率:  $\eta = \frac{H_1 - H_2 - v_2^2/(2g)}{H_1 - H_2} \times 100\%$ ,其中 $H_1$ 为上游库水位(m), $H_2$ 为挑坎高程(m); $v_2$ 为 挑坎处水流平均流速(m/s)。将各修改方案的试验结果与原设计方案进行比较(见表1)。由表1可见,阶

梯溢流坝由于水流在阶梯上跌落、掺气,消能效果较好,大大缩短了挑流水舌挑距,特别对于校核洪水泄洪时,消能效果更明显。修改方案2的阶梯溢流坝台阶尺寸为0.90 m×0.72 m(高×宽),消能效果最佳,其设计与校核洪水时消能率分别达到87.5%与69.7%,且下游河道内水流平顺,流速分布均匀。

Tab. 1   Energy dissipation ratios for different schemes								
	设计洪水				校核洪水			
溢流坝消能方案	库水位	挑坎流速 V <sub>0</sub> /	消能率	水舌挑距/	库水位	挑坎流速 V <sub>0</sub> /	消能率	水舌挑距/
	$H_1$ / m	$(m \cdot s^{-1})$	$\eta$ / %	m	$H_1$ / m	(m•s <sup>-1</sup> )	$\eta$ / %	m
原设计方案(溢流坝光	168.40	15.79	78.07	30.0 ~ 34.2	170.51	25.83	43.34	78.0~84.0
滑坝面+连续挑坎)								
修改方案1(阶梯溢流坝	168.40	12.80	85.58	12.0~18.6	170.51	20.82	63.19	38.5~49.5
0.60 m×0.48 m+连续挑坎)								
修改方案2(阶梯溢流坝	168.40	11.91	87.51	12.0 ~16.5	170.51	18.90	69.67	36.0~40.5
0.90 m×0.72 m+连续挑坎)								

# 表1 各泄洪消能方案消能率

# 4 局部动床冲刷试验

考虑到龙潭沟水库下游河床地质情况,基岩抗冲流速为5 m/s。根据已有经验,采用散粒体法模拟基 岩,能较好地反映基岩的冲刷情况。模型中采用散粒体模拟溢流坝下游河床的抗冲特性,根据地质部门提供 的河道抗冲流速资料,常采用经验公式选择模型散粒体冲料的粒径。根据依兹巴斯公式  $V_k = 5 - 7\sqrt{d}$  确定散 粒体的粒径。由此计算确定本模型散粒体粒径为 2.5 cm。模拟挑坎下游宽 30 m,长180 m的动床范围,选用 粒径为 2.5 cm 的碎石模拟河床岩石,进行溢流坝下游局部动床冲刷试验。

对溢流坝原设计方案以及两种阶梯溢流坝修改方案进行了试验,按设计洪水与校核洪水2种工况,观测 泄洪冲刷流态、流速分布以及冲坑特性。

## 4.1 原设计方案

原设计方案为光滑溢流坝面+连续挑坎。设计洪水时溢流坝泄洪冲刷情况见图 5,由图可见下游水流平 稳,挑流水舌范围为 30.0 ~ 34.2 m,水舌落在原设计护坦下游边缘。下游流速分布如图 6,流速分布均匀,流 速值较小,一般低于 2.5 m/s。不会引起下游河床冲刷。可见,除水舌落点处有所冲击外,下游河床基本未 冲刷。



图 5 设计洪水泄洪冲刷试验和冲刷后地形(原设计方案)

Fig. 5 Flood releasing tests under the design flood and terrain conditions after scour (the original design scheme)



图 6 设计洪水下动床冲刷后下游河道流速分布(原设计方案)(单位:m/s)

Fig. 6 Velocity distribution in downstream channel under the design flood condition (the original design scheme) (unit: m/s)

宣泄校核洪水时,下游水流湍急,水流极不稳定(见图7),水舌范围78~84 m。下游河床冲刷严重,冲 坑范围较大,堆丘直至泄洪洞出口,对泄洪洞泄流造成不利影响。下游冲坑等值线见图8。





图 7 校核洪水泄洪冲刷试验(原设计方案)





### 4.2 修改方案

**4.2.1** 修改方案1 修改方案1为阶梯溢流台阶0.60 m×0.48 m+连续挑坎。设计洪水时泄洪冲刷情况见图9(a),由于修改方案阶梯溢流坝消能效果较好,挑流水舌挑距大为减小,水舌范围为12.0~18.6 m,水舌完全落在原设计挑坎防护范围内。可见下游水流平稳,流速分布均匀,流速值比原方案小,一般低于1.7 m/s。可见不会引起下游河床冲刷。由图9(a)冲刷后地形可见,下游河床基本未冲刷。

宣泄校核洪水时,泄流冲刷情况见图9(b),由于消能较充分,水舌范围减小到38.5~49.5 m,下游河道 水流较平稳,流速分布均匀,下游河道流速一般不超过5.0 m/s。但堆丘后尚有少数测点流速超过5.0 m/s, 下游河床冲刷范围比原方案明显减小。可见,下游冲刷范围和堆丘范围都较小,不影响泄洪洞泄流。



(a) 设计洪水

(b) 校核洪水



4.2.2 修改方案 2 修改方案 2 为阶梯溢流坝台阶 0.90 m×0.72 m+连续挑坎。设计洪水时原设计方案溢流坝泄洪冲刷情况见图 10(a)。可见由于修改方案台阶尺寸增大,阶梯溢流坝消能效果更好,下游水流平稳,挑流水舌范围进一步缩小为 12.0~16.5 m,水舌完全落在原设计挑坎防护范围内。下游流速分布如图 11,流速分布均匀,流速值较小,一般低于 2.0 m/s。可见不会引起下游河床冲刷。由图 10(a)可见设计洪水 泄洪后下游河床未发生冲刷。

校核洪水泄洪时,泄流冲刷情况见图 10(b),由于消能充分,水舌范围减小到 36.0~40.5 m,下游河道 水流较平稳,流速分布均匀,流速不超过 2.80 m/s,下游河床冲刷范围较小。可见,下游冲刷范围较小,堆丘 较小,不影响泄洪洞正常泄流。校核洪水冲坑等值线见图 12。



图 10 设计和校核洪水泄洪冲刷试验和冲刷后地形(修改方案 2)

D) 仅该供小

Fig. 10 Flood discharging under the design and check flood conditions and the terrain after scour (modified scheme 2)



(修改方案2)(单位:m/s)

Fig. 11 Velocity distribution in downstream channel under Fitter the design flood condition (modified scheme 2)(unit: m/s)





#### 4.3 各方案溢流坝泄洪下游河道冲刷比较

从以上各方案试验研究结果可知,设计洪水由于单宽流量小,溢流坝各方案泄流时,水流沿程掺气较充 分,消能效果较好,消能率达到78.1%~87.5%,挑流鼻坎处挑流流速小于16 m/s,除原设计方案水舌落于 衬砌保护段末端略有冲击外,其他两修改方案挑流水舌基本落入原设计方案鼻坎后衬砌保护段范围内,由于 水垫作用充分消能,未对下游河床造成冲刷;下游河道水流平稳,流速分布均匀,且都远低于基岩的抗冲流 速。故设计洪水时,溢流坝能安全泄洪。

校核洪水时,各方案沿溢流坝中心线冲坑剖面如图 13 所示。校核洪水泄洪时,随着溢流坝过坝流量增加,单宽流量增加坝面水深增大,原设计光滑溢流坝面沿程水流掺气消能效果不佳,到挑坎处消能率降为43.3%,挑坎处的流速达到 26 m/s,水舌挑距达 78.0~84.0 m;对下游造成严重冲刷,冲刷堆积物堵塞了泄洪洞出口明渠,将严重影响泄洪洞安全泄洪。下游河道水流湍急,紊乱,主河道中局部流速较高,高于基岩抗冲流速。因此,原设计方案溢流坝宣泄校核洪水时,将会造成下游河床严重冲刷,并且严重影响泄洪洞安全泄洪。



Fig. 13 Longitudinal profiles along the middle line downstream of the spillway under the check flood condition

修改方案阶梯溢流坝台阶尺寸为0.60 m×0.48 m+连续挑坎,校核洪水时,由于台阶消能作用,使溢流坝 过流沿程跌落掺气,消能率明显提高,至挑流鼻坎处消能率达到63.2%,水舌挑距也减小到38.5~49.5 m, 水流对下游河床的冲刷程度也明显减小,不会影响到泄洪洞的泄洪安全;下游河道水流较平稳,流速分布较 均匀,除少数测点流速略高于基岩的抗冲流速,一般流速都基本低于基岩的抗冲流速。

修改方案阶梯溢流坝台阶尺寸为0.90 m×0.72 m+连续挑坎,由于加大了台阶尺寸,宣泄校核洪水时进 一步提高了消能率。至挑流鼻坎处消能率提高到69.7%,水舌挑距也进一步减小到36.0~40.5 m,水流对 下游河床的冲刷程度大为减轻。从以上试验结果可知,冲坑范围小,不影响泄洪洞的泄洪安全;且下游河道 水流平稳,流速分布均匀,流速不超过2.80 m/s,满足溢流坝安全泄洪要求。

5 结 语

(1)原设计方案定床试验中,设计洪水泄洪时下游河道流速一般小于5 m/s;但校核洪水时下游河道水 流湍急,流速大且流向紊乱,超过了河床基岩的抗冲流速(5 m/s)。

(2)通过对溢流泄洪消能方式进行修改,并与原设计方案进行比较。可见,将原设计光滑溢流坝面改成阶梯溢流坝后,由于水流在阶梯上跌落、掺气,消能效果较好,特别对于校核洪水泄洪时,消能效果更明显。 通过试验比选,修改方案2阶梯溢流坝台阶尺寸0.90 m×0.72 m,挑流水舌完全落入消力池内,其消能效果 最佳。设计与校核洪水时消能率分别达到87.5% 与69.7%,下游河道内水流平顺,流速较小且分布均匀。

(3)从局部动床试验结果可知,在设计洪水时,原设计方案及修改方案都不会对下游河床造成冲刷;下 游河床水流平稳,流速较小且分布均匀。设计洪水时,溢流坝能安全泄洪。

修改方案阶梯溢流坝台阶尺寸为0.60 m×0.48 m+连续挑坎,校核洪水时,由于台阶消能作用,使溢流坝 过流沿程跌落掺气,消能率明显提高,水流对下游河床的冲刷程度也明显减弱;下游河道水流较平稳,流速分 布较均匀,除少数测点流速略高于基岩抗冲流速外,一般流速都低于5 m/s。

修改方案阶梯溢流坝台阶尺寸为0.90 m×0.72 m+连续挑坎,由于加大了台阶尺寸,宣泄校核洪水时进 一步提高了消能率。至挑流鼻坎处消能率提高到69.7%,水舌挑距也进一步减小到36.0~40.5 m,水流对 下游河床的冲刷大为减轻,冲坑范围小,且下游河道水流平稳,流速分布均匀,流速不超过2.80 m/s,满足工 程安全泄洪要求。

### 参考文献:

- [1] SL 155-2012,水工(常规)模型试验规程[S]. (SL 155-2012, Specification for normal hydraulic model test[S]. (in Chinese))
- [2] 南京水利科学研究院,水利水电科学研究院.水工模型试验[M].2版.北京:水利电力出版社,1985.(Nanjing Hydraulic Research Institute, Institute of Water Resources and Hydropower Research. Hydraulic model tests[M]. 2nd. Beijing: China WaterPower Press, 1985. (in Chinese))
- [3] 高金花,蒋晶,滕显华,等. 阶梯溢流坝综述[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2004(4):11-15. (GAO Jin-hua, JIANG Jin, TENG Xian-hua, et al. Overview of staircase spillway dams[J]. Journal of Changchun Institute Technology, 2004 (4):11-15. (in Chinese))
- [4] 陈群, 戴光清, 朱分清, 等. 影响阶梯溢流坝消能率的因素[J]. 水力发电学报, 2003, 83(4): 95-104. (CHEN Qun, DAI Guang-qing, ZHU Fen-qing, et al. Factors of influence on the energy dissipation ratio of stepped spillway[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 83(4): 95-104. (in Chinese))
- [5] 刘金辉, 奚晶莹. 台阶式溢流坝的消能设计与试验[J]. 吉林水利, 2009(8): 28-31. (LIU Jin-hui, XI Jing-ying. The energy dissipation design of stepped spillway and test[J]. Journal of Jilin Water Conservancy, 2009(8): 28-31. (in Chinese))
- [6] 常晓亮. 台阶式溢洪道与光面溢洪道水流形态及消能率[J]. 山西建筑, 2010, 36(31): 361-363. (CHANG Xiao-liang. On flow patterns of stepped spillways and smooth-surfaced spillways and their energy dissipation rate[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(31): 361-363. (in Chinese))

- [7] 田嘉宁,李建中,大津岩夫,等. 台阶式溢洪道的消能问题[J]. 西安理工大学学报,2002,18(4):346-350. (TIAN Jianing, LI Jian-zhong, OHTSU Iwao, et al. The research of energy dissipation on stepped spillways [J]. Journal of Xi' an University of Technology, 2002, 18(4): 346-350. (in Chinese))
- [8] SARFARAZ M, ATTARI J. Selection of empirical formula for design of stepped spillways on RCC dams[C] // Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress (EWRI), California: Palm Spring, 2011: 2508-2517.
- [9] OHTSU I, YASUDA Y, TAKAHASHI M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(9): 860-869.
- [10] RICE C E, KADAVY K C. Model study of a roller compacted concrete stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 122(6): 292-297.

# Hydraulic experimental studies on the spillway of Longtangou reservoir

WU Fu-sheng<sup>1</sup>, RUAN Shi-ping<sup>1</sup>, FENG Xin-quan<sup>2</sup>

(1. State Key Labaoratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Shandong Water Conservancy Survey and Design Institute, Jinan 250000, China)

**Abstract**: Based on a 1 : 30 large geometric scale for the hydraulic model, the hydraulic tests are made according to the gravity similarity criterion. The test results show that under the overall design flood, the original design and modification scheme will not cause the erosion of downstream river channel. Flow in downstream channel is flowing smoothly, and the velocity distribution is uniform. During the period of the check flood, the unit width discharge increases with the increase of flood discharge along the spillway. Air entrained energy dissipation effect reduces along the spillway of flow surface in the original design, which causes serious scour along the lower channel by the nappe and loads to the tunnel outlet channel blocked seriously. It will affect the safety of the tunnel during flood discharging. Through the scheme optimization modification, the ladder step size of 0.90 m×0.72 m with continuous flip bucket scheme is put forward. The energy dissipation is higher under the check flood condition, the nappe distance and the scour degree of the lower channel are reduced greatly, the downstream flow is flowing smoothly and the velocity distribution is uniform along the channel. The flow velocity in the lower channel is less than 2.80 m/s and meets the requirements of the safety flood discharge from the stepped overflow dam.

Key words: Longtangou reservoir; stepped overflow dam; continuous flip bucket; hydraulic model test

69