

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.01.042

# 石埡子水电站泄洪消能工设计研究

阮祥明, 罗光其

(中国水电顾问集团 贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 石埡子水电站河谷狭窄, 单宽流量大, 坝后不远处为规模较大的堆积滑坡体, 受地形地质条件和工程建设条件限制, 工程只能采用挑流消能, 而常规挑流消能工雾化水流将会影响坝后左岸堆积体的稳定。通过泄洪消能工体型设计与模型试验研究, 提出一种新型的泄洪消能工——半圆锥挑坎双缝消能工。研究结果表明, 该消能工能较好的解决下游消能与减小雾化问题, 自身结构抗空蚀破坏性能也比较好。

**关键词:** 泄洪消能; 水力学模型试验; 压强; 流速

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)01-0201-04

## Design Study on Energy Dissipator for Shiyazi Hydropower Station

RUAN Xiang-ming, LUO Guang-qi

(Guiyang Investigation and Design Institute Co., Ltd., China Hydropower Consulting Group, Guiyang, Guizhou 550081, China)

**Abstract:** Shiyazi Hydropower Station is characterized by narrow valley and large unit discharge, and a relatively large sliding mass is developed not far from the dam toe. Affected by topographical and geological conditions and restricted by construction conditions, ski-jump energy dissipation is the only pattern to be adopted, but the atomized water formed by conventional ski-jump energy dissipation structure will affect the stability of the downstream sliding mass on the left bank. By carrying out the shape design of energy dissipation structure and hydraulic model tests, a new type energy dissipation structure named semi-cone-shaped ski-jump energy dissipation structure with double joints is proposed. The test results show that this kind of energy dissipation structure can achieve the better effects of energy dissipation, atomization reduction and cavitation resistance.

**Keywords:** flood discharging and energy dissipation; hydraulic model test; pressure intensity; flow velocity

石埡子水电站位于贵州省务川县大坪镇和柏村镇交界的梅林峡谷河段, 是乌江水系左岸一级支流洪渡河干流水电梯级开发的第六级电站, 水库正常蓄水位 544.0 m, 电站装机 120 MW。工程为 II 等大(2)型工程, 枢纽工程主要由拦河坝、泄水建筑物、右岸引水系统、右岸地下厂房组成。拦河坝为碾压混凝土重力坝, 最大坝高 129.30 m, 泄洪系统按 100 年一遇洪水设计, 1 000 年一遇洪水校核, 下游消能防冲按 50 年一遇洪水设计, 经大坝调蓄后, 校核洪水最大泄洪流量 8 894 m<sup>3</sup>/s, 设计洪水泄洪流量 7 012 m<sup>3</sup>/s, 消能防冲洪水泄洪流量 6 410 m<sup>3</sup>/s。泄洪建筑物设 3 个表孔, 每孔净宽 12 m, 中墩厚 4.0 m, 边墩厚 3.0 m, 堰面采用 WES 曲线, 堰顶上游为三圆弧,

堰顶以下堰面曲线方程为  $Y = 0.042854x^{1.85}$ , 堰顶高程 523.5 m, 下游坝坡为 1:0.70。由于枢纽下游左岸有一个巨大的滑坡堆积体, 如图 1 所示, 考虑到表孔最大泄洪单宽流量高达 247 m<sup>3</sup>/s·m, 原设计过程, 下游消能形式先后采用了表孔宽尾墩 + 台阶坝面 + 消力池联合消能以及传统窄缝挑流消能两种布置形式<sup>[1-2]</sup>。前期试验研究发现<sup>[3]</sup>: 采用表孔宽尾墩 + 台阶坝面 + 消力池联合消能形式, 虽然经过宽尾墩与消力池体型的修改与优化<sup>[4-6]</sup>, 可以解决受不对称来流影响, 以及中小流量泄洪水舌不稳定等问题, 但大流量泄洪时, 水舌局部微小摆动的问题仍然时有发生, 而且库水位在消能防冲水位以上, 左岸滑坡堆积体表面的护坡有被水流冲刷的可能性存

在,特别是校核水位时,冲刷范围几乎延伸至堆积体一定范围内;采用传统窄缝挑流消能工<sup>[7-9]</sup>,库水位在设计洪水以上时,单孔水舌外缘落点超过 170 m,已接近堆积体,冲坑已经延伸至滑坡堆积体,左岸堆积体的稳定性很难保证,随着泄洪流量的进一步增加,泄洪产生的冲坑深度约 15 m,又直接危及到坝脚的稳定性,且满足窄缝消能工要求的出口边墙高度也比较高。基于上述原因,经过设计与试验研究,最后为本工程提出了一种单孔半圆锥挑坎双缝消能工的体型布置形式<sup>[10]</sup>。

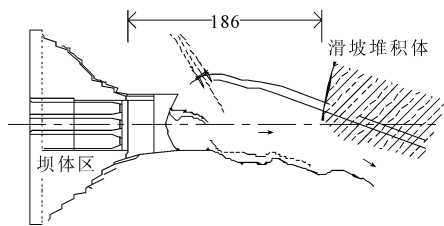


图 1 石垭子工程枢纽区示意图

## 1 单孔半圆锥挑坎双缝消能工体型简介

单孔半圆锥挑坎双缝消能工是在一孔泄槽的出口部位,采用两侧两个窄挑坎与中间一个宽挑坎构成的一种双窄缝消能工,如图 2 所示。其中两侧挑坎顶部采用 1/4 圆锥面,末端圆半径为 1.5 m,圆锥面纵向长度为 14.5 m,在坝纵 0+045.438 m 处与斜坡坝面相交。中间挑坎顶部采用 1/2 圆锥面,末端圆半径为 2.5 m,圆锥面纵向长度为 14.1 m,在坝纵 0+046.65 m 处与 1:1.21 的坝面斜坡相交。中挑坎尾部接长度为 1 m、半径为 2.5 m 的半圆柱,侧挑坎尾部接长度为 1 m、半径为 1.5 m 的 1/4 圆柱至坝纵 0+060.47 m。窄缝出口宽度为 2 m,其收缩的折射角为 5.89°,出口挑坎总高度为 13.5 m。溢流坝段下游布置短护坦,护坦长度 15.00 m,净宽 28.51 m。

## 2 试验验证

### 2.1 水流流态

试验观测发现,校核洪水、设计洪水全开时,水舌纵向拉开最大距离大约在 75 m 附近,内缘落点距坝脚约 20 m,外缘挑距大约 90 m~100 m,外缘与堆积体边缘之间的距离均超过 70 m,在两个纵向水舌顶部有层一横向展开的水舌,该水舌在半圆锥挑坎顶部厚度大约 2.5 m~3 m,根据实测流速估算,其流量约占总泄量的 1/3,流态纵剖面示意图如图 3 所示,一般这种水舌布置形式相对于完全窄缝水舌

而言,对减小总体雾化程度有一定的作用<sup>[11-13]</sup>;1/2 开度时,水舌纵向扩散程度还比较均匀,但水舌纵向拉开长度已减小至 45 m,内缘落点距坝脚仍约 20 m,外缘挑距大约 60 m~70 m,但半圆锥形挑坎顶部的横向展开水舌厚度已减小至 0.5 m~1 m,由于水舌厚度比较薄,且不稳定,因此并不能形成稳定的横向展开水舌;1/4 开度时,水舌纵向扩散程度不够均匀,在主水舌顶部形成一部分不稳定的水翅,但水翅量很小,虽然内缘落点距坝脚仍约 20 m,但主水舌纵向拉开长度大约只有 30 m,相对于全开与 1/2 开度大幅度减小。

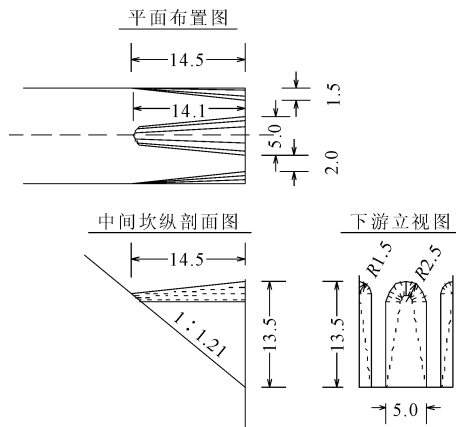


图 2 单孔圆锥双缝挑坎消能工示意图(单位:m)

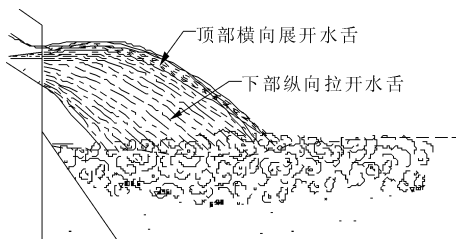


图 3 水舌纵向拉开流态示意图

单体模型试验测试结果表明,单孔两股水舌的挑射方向及其间距基本平行,占据空间的总宽度与闸孔宽度很接近。整体模型的三孔不同组合的运行情况也表明了这一结果,三孔全开时,水舌总宽度与泄洪建筑物总宽度基本相同,与两岸保持一定距离,局开时,三个孔、六股窄缝水舌互相平行,入水时也不叠加。由于挑坎使水舌在不影响坝脚与堆积体、两岸稳定的前提下,实现了空间上的最大化分散,因此下游河道消能水体基本得到了最大化的应用,也使河道水流的消能效果得到了最优发挥。河道水流流速的测试结果基本予以验证,实测堆积体之前的下游河道最大底流流速不超过 4 m/s,表流速不超过 6 m/s,堆积体之后河道受堆积体对河道束窄的影

响,水流流速略有增加。

## 2.2 压强测试

试验首先对门槽与堰面压强进行了测试,测试结果发现,堰面压强均为正压,在挑坎附近,尽管挑坎的横向收缩角度很小,但受挑坎挤压,窄缝水深还是比较大,因此堰面压强也随之快速上升,最大值接近 300 kPa,这一结果表明挑坎与坝面的结合处必须承受较大的连接力,正因为如此,体型设计中在此处布置了一较大的面接触连接方式,可基本满足连接力的需求。

对门槽按常规试验测试方式也进行了压强测试,测试结果发现,在门槽下游角隅靠近底板的一个测点,在小开度时压强为正压,而大开度或全开时,出现负压,且负压值随着泄洪流量的增加逐渐增加。一般负压出现处,水流有可能产生空化现象,因此该测点应该是门槽水流空化最有可能出现的位置,结合前面流态测试中的水流流速测试结果,对该测点

附近水流空化数进行计算分析。分析结果发现,水流空化数约为 0.31 ~ 0.52,由于此处门槽设计中已经带有错距,根据《溢洪道设计规范》<sup>[14]</sup>(SL253-2000),带有错距的门槽水流初生空化数应为 0.48 ~ 0.90,由此可以判断在门槽下游的角隅处,可能会出现水流空化现象,因此该处应该加强结构的防空蚀设计。

由于半圆锥形挑坎的侧壁容易出现水流分离现象,因此试验按图 4 所示测点布置方式,利用压力传感器对侧壁时均压强与脉动压强分布也进行了测试,测试结果如表 1 所示。

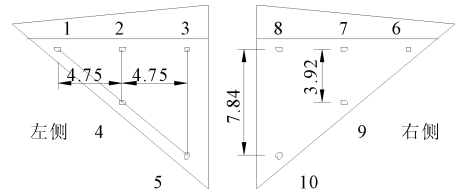


图 4 半圆锥挑坎两侧压强测点布置图(单位:m)

表 1 半圆锥挑坎侧壁压强测试结果

闸孔开度	项目	测点编号									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1/4 开度 (544 m)	时均压强/kPa	32	2	1	69	48	29	7	3	52	64
	脉动均方根/kPa	11	2	1	6	4	4	2	1	5	5
1/2 开度 (544 m)	时均压强/kPa	96	55	43	131	60	86	58	45	121	79
	脉动均方根/kPa	8	3	3	4	3	6	4	4	4	4
全开 (544 m)	时均压强/kPa	172	129	83	176	68	167	131	79	164	90
	脉动均方根/kPa	5	2	3	4	2	5	3	2	4	4
校核 (547.35 m)	时均压强/kPa	214	170	100	207	72	220	172	98	202	102
	脉动均方根/kPa	7	4	4	4	3	4	3	3	3	4

测试结果表明,所有测点的时均压强均为正压,脉动压强均方根都很小。由此可以说明水流在挑坎处未出现大幅度波动或紊动的现象。随着泄洪流量的变化,由于水深不断增加,时间压强也在不断增加,但左右两侧压强基本相同,不均衡现象很少,只有在窄缝出口处的底部 5 与 10,出现压强分布不均的现象,且压强差值随流量的增加而增加,最大幅度达到 30 kPa。该处有可能是来流本身挟气紊动产生,另外从半圆锥形挑坎的受力作用效果看,力臂较长的顶部两侧受力比较平衡,而受力相对不平衡的底部力臂较短,因此这些可能对结构稳定也不会有较大影响。另外,1/4 小开度时,靠近坝面的 1 测点脉动压强均方根值超过 11 kPa,由于测点位置处于水流与挑坎初始接触部位,此处水面很薄,也不稳定,因此出现较大脉动压强,但靠近坝面,同样作用

力臂也比较短,因此也不会对结构稳定产生影响。

## 2.3 河道冲淤测试

一般河道模型冲淤试验中,河床覆盖层与基岩均按照依兹巴什公式<sup>[15]</sup>,选取不同的散粒体进行模拟,对于同样体型与下泄洪水,下游河道冲刷料不同,可能出现不同的冲淤地形,因此冲刷料一定程度也决定了冲淤地形的变化。有些河道地质情况比较简单,都是较好的岩石,冲刷模拟相对比较简单,但一般大部分河道地质情况都比较复杂,如石垭子工程下游的河道,既有抗冲能力比较弱的覆盖层,又有相对抗冲能力比较强的基岩,如果从构造方面需要准确模拟,则试验模型中既要铺设一定厚度的覆盖层冲刷料,同时,在覆盖层下面还必须铺设一定厚度的基岩。这种复合铺设形式虽然保证了河道与原工程地质情况相同,但泄洪冲刷后可能会出现两种情

况,一种情况是试验冲坑深度未触及到基岩面,这种冲刷模拟比较相似,另一种情况可能是冲刷深度已深入到基岩面以下,则试验中消能区不同抗冲性能的材料混和在一起,冲刷料的抗冲性能必然发生变化,相对于工程实际的冲刷状况,试验中这种冲刷可能偏深,还是冲刷偏浅,很难说明。因此对不同工程,可以通过不同材料的单一铺设方法,进行冲刷料对冲坑深度的敏感性分析。即试验中首先进行覆盖层的模拟冲刷,如果冲刷深度已经深入到基岩面以下,则可以确定实际冲刷应该比试验冲刷深度要小,因为覆盖层的抗冲能力要小于基岩的抗冲能力,当然若冲坑深度未到基岩面,则模拟相对比较准确一些;如果去掉覆盖层,只模拟基岩进行试验,若冲刷深度同样也深入到基岩面以下,考虑到实际工程中还存在覆盖层冲刷形成的淤积对冲坑深度可能产生的影响,因此也可确定,实际工程冲坑深度基本小于试验冲刷深度,若试验中无冲坑出现,则实际冲坑只发生在覆盖层中。

为了对石垭子工程的下游河道冲淤情况有一个相对比较准确的判断,首先进行了冲淤敏感性试验与分析,即在同样洪水与推荐体型条件下,分别进行覆盖层与基岩单一冲刷料铺设的试验,试验测试发现,设计洪水及以上洪水泄洪,试验冲坑深度基本都深入到基岩面以下,而消能防冲以下洪水泄洪,冲坑基本都在基岩面以上。基于河道的这种冲淤变化,推荐体型试验选择了全覆盖层的模拟方法。同时考虑到堆积体顶部松散体抗冲性能差的缘故,在堆积体顶部又设置了薄层混凝土防护层。试验结果表明,校核洪水时,冲坑最深点 412.2 m,设计洪水时,冲坑最深点 418.0 m,虽然冲坑都深入到基岩面以下,但堆积体混凝土护面基础仍未出现淘刷现象,且冲坑范围也很小;中小洪水泄洪时,冲坑最深点始终在 416 m 以上,范围也很小,且冲刷也未触及到堆积体混凝土护面,部分护面还被淤积体所覆盖。由于试验是全覆盖层模拟条件下进行,因此结合前面的敏感性分析结果可知,实际冲刷程度只能比试验小,可能到原基岩面 422.0 m,或最大深入到原基岩面以下 4 m~5 m,而这些冲坑位置均在坝脚安全位置以后,因此可基本满足工程安全运行的要求。

### 3 结 语

通过设计与试验研究,为石垭子水电站泄洪消能提出一种新型消能工——半圆锥挑坎双缝消能

工,该消能工由两侧两个窄挑坎与中间一个宽挑坎构成,试验结果表明,该消能工使水舌呈现一孔双窄缝+顶部横向展开的分布形式,最大限度的利用了下游河道的消能空间与水体,同时水舌与冲坑又不危及坝脚、两岸、下游堆积体的稳定,流速与压强也能满足结构本身的安全要求。该体型布置形式在满足石垭子水电站泄洪消能要求的同时,也为同类工程的设计提供一定参考。

### 参考文献:

- [1] 陈椿庭. 大坝大流量泄洪建筑物[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [2] 童显武,李桂芬,谢省宗,等. 高水头泄水建筑物收缩式消能工[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [3] 尹进步. 洪渡河石垭子水电站水工水力学模型试验报告[R]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [4] 尹进步,刘韩生,梁宗祥. 用于大单宽泄洪台阶坝面上的一种新型宽尾墩[J]. 西北水电,2002,(1):44-46.
- [5] 梁宗祥,尹进步,刘韩生,等. 宽尾墩与台阶坝面联合消能工的试验探索[J]. 长江科学院院报,2003,20(6):3-5.
- [6] 林可冀,韩立,邓毅国. 大朝山水电站 RCC 溢流坝宽尾墩、台阶式坝面联合消能工的研究及应用[J]. 云南水力发电,2002,18(4):6-15.
- [7] 刘宣烈,刘钧,姚仲达,等. 空中掺气水舌运动轨迹及射距[J]. 天津大学学报,1989,22(2):23-30.
- [8] 宁利中. 挑流鼻坎反弧半径及临界条件探讨[J]. 陕西水力发电,1989,4(2):9-15.
- [9] 陈忠儒,陈义东,黄国兵. 窄缝式挑坎体型研究及其挑流水舌距离的估算[J]. 长江科学院院报,2002,19(4):11-14.
- [10] 尹进步. 洪渡河石垭子水电站水工水力学模型 2009 试验报告[R]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [11] 胡敏良. 挑流水舌雾化的研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,1994,(3):344-349.
- [12] 梁在潮. 雾化水流溅水区的分析和计算[J]. 长江科学院院报,1996,13(1):9-13.
- [13] 周辉,吴时强,陈惠玲. 泄洪雾化降雨模型相似性探讨[J]. 水科学进展,2009,20(1):58-62.
- [14] 水利部天津水利水电勘测设计研究院. SL253-2000. 溢洪道设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [15] 夏毓常. 水力计算论文集[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.