

新型宽尾墩在索风营水电站的应用与研究

南晓红¹, 梁宗祥¹, 刘韩生¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:把宽尾墩应用到碾压混凝土台阶溢流坝面, 形成“宽尾墩+台阶坝面+消力池”联合消能工, 是我国科技工作者的一大创举。索风营水电站单宽流量达 $207\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$, 在应用台阶溢流坝面工程中属最大, 经模型试验验证常规宽尾墩联合消能工已不能满足要求, 于是提出了一种新型宽尾墩形式——X 型宽尾墩, 它继承了传统宽尾墩的优势, 又拓宽了台阶坝面的消能作用。本文是“X 型宽尾墩+台阶坝面+消力池”联合消能工在索风营水电站应用的水力特性研究成果的一部分。

关键词:宽尾墩; 台阶坝面; 消力池; 联合消能工; 水力特性

中图分类号:TV135.2 **文献标识码:**A

宽尾墩是我国首创的一种新型消能工, 已成功应用于安康、五强溪、岩滩、隔河岩等许多大型水利水电工程中, 取得了显著的技术效果和经济效益^[1]。它主要是利用宽尾墩形成堰顶收缩射流, 在消力池中形成剧烈掺气的三元水跃, 大幅度地提高了消能率, 可使消力池的长度减小 $1/3$ 以上^[2], 大大节约了工程量, 台阶消能工在碾压混凝土坎中应用也越来越多。台阶溢流坝是在溢流坝的下游坝面上设置一系列的台阶。利用这些台阶对过坝水流的阻力, 使水流沿程产生强烈紊动和大量掺气, 可以消散过坝水流的部分能量, 从而简化下游消能设施。碾压混凝土坝采用台阶式坝面, 在坝体的碾压和浇筑过程中自然形成, 施工方便, 与光滑的溢流坝面相比较, 可以缩短工期、节省投资, 经济效益显著, 应用前景广阔。已建的福建水东水电站、云南大朝山水电站已成功地把宽尾墩的消能技术运用到碾压混凝土溢流坝, 使之形成宽尾墩和台阶坝面相结合进行联合消能^[3]。这种新的联合消能方式利用宽尾墩后的无水区对台阶底部进行通气来避免空化和空蚀, 从而使台阶溢流坝向高水头、大单宽流量方向发展。西北水利科学研究所在进行乌江索风营水电站泄洪消能系统试验研究过程中, 与国家电力公司贵阳勘测设计研究院研究后, 提出了一种新型的消能工形式——X 型宽尾墩。这种体型的优点在于既保持了传统宽尾墩的优势, 又增加了台阶坝面的过水面积, 使台阶坝面全坝面参与过水消能。小流量过流时, 水流全部经台阶坝面过流, 充分发挥台阶坝面的消能作用, 同时避免了 Y 型宽尾墩最不利的工况; 大流量过流时, 过堰水流分为两部分, 部分水流经下部开口通过台阶坝面全坝面过流, 对上部宽尾墩纵向拉开的水舌产生一定的上托作用, 既可以减小宽尾墩过流时台阶坝面出现的负压, 又可以避免水流集中对台阶坝面的冲蚀作用。

1 工程概况

索风营水电站位于贵州修文、黔西县交界的乌江中游六广河段上, 是乌江干流的第 3 个梯级水电站。电站距上游东风水电站 35.5km , 距下游乌江渡水电站 74.9km 。枢纽控制流域面积 2186.2km^2 , 总库容 2.012亿 m^3 , 发电总装机 600MW 。该工程以发电为主, 在电网中起调峰、调频和事故备用作用, 并兼有灌溉、养殖、旅游等综合效益。索风营水电站是国家“西电东送”要求在“十五”期间向广东送电的国家重点工程

收稿日期: 2003-04-28

基金项目: 西北农林科技大学青年专项项目; 重点专项基金资助项目

作者简介: 南晓红(1966-), 女, 山西临猗人, 工程师, 主要从事水工水力学研究工作。

项目。

枢纽由碾压混凝土重力坝泄洪系统等建筑物组成。该电站属二等大(2)型工程,其主要建筑物大坝、泄洪系统、引水发电系统等为2级建筑物,均按100年一遇洪水设计,下泄流量 $12281\text{m}^3/\text{s}$;大坝和泄洪系统按1000年一遇洪水校核,下泄流量 $15956\text{m}^3/\text{s}$;引水发电系统按500年一遇洪水校核,下泄流量 $14886\text{m}^3/\text{s}$;下游消能防冲按50年一遇洪水设计,下泄流量 $11200\text{m}^3/\text{s}$ 。

坝顶长度178m,最大坝高121.8m,坝顶宽8m,溢流坝段长82m。

可研阶段枢纽布置有2种方案:碾压混凝土重力坝+坝顶五表孔+左岸地面厂房方案;碾压混凝土重力坝+坝顶五表孔+右岸地下引水发电系统方案。泄洪建筑物均由5个溢流表孔组成,每孔净宽13m,溢流前缘总宽82m,堰面按WES曲线设计。泄洪消能采用“宽尾墩+台阶坝面+消力池”联合消能工,台阶尺寸为 $0.84\text{m}\times 1.2\text{m}$ (宽 \times 高)。该工程具有单宽流量大的特点,最大单宽流量 $207\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 。

2 试验研究成果

2.1 X型宽尾墩的提出 索风营水电站采用了“宽尾墩+台阶坝面+消力池”的联合消能工,其中的宽尾墩形式是常规的Y型,在左岸地面厂房方案的模型试验过程中,比较了Y型宽尾墩和平尾墩方案,得出以下结论:第1,Y型宽尾墩方案的泄流能力小于平尾墩方案;第2,Y型宽尾墩方案泄流时,宽尾墩后台阶坝面大面积处于无水区(约70%),且在小流量过流时,宽尾墩形成的水舌纵向拉开不够远,致使部分水流直接跌落在下游台阶坝面上,平尾墩则全坝面过流;第3,Y型宽尾墩方案在大流量过流时,台阶坝面局部存在负压,宽尾墩后第6个台阶立面出现 $0.72\times 9.81\text{kPa}$ 的负压,而平尾墩为零压;第4,台阶坝面在小流量时的消能率较高,而Y型宽尾墩在大流量过流时的消能作用显著。为了充分将这些对工程有利的条件结合起来,既发挥小流量时台阶坝面的消能作用,又能改善大流量时台阶坝面的压力分布,同时尽可能避免或减小Y型宽尾墩在本工程中所存在的问题,经与设计单位共同研究,我们提出了一种新型的宽尾墩形式,因其过水断面与英文字母“X”相似,故称为X型宽尾墩。通过一系列的模型试验,X型宽尾墩的作用达到了预期的效果。

2.2 X型宽尾墩的体型特征 X型宽尾墩是在Y型宽尾墩的基础上发展而来的,上部尺寸与Y型宽尾墩一致,下部开口处形式基本与上部对称。下部开口成牛腿形式,满足了自身结构支撑的需要,也便于施工。其尺寸大小既取决于台阶坝面的过流量和消能率达到最优,又要避免X型宽尾墩自身出现过大的负压。图1是研究中X型宽尾墩的基本体型,下部开口与坝面的距离为2m,经试验实测对应的单宽流量大约为 $40\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$,这部分的消能率大约为60%。

在不控制下游水位时的情况下,由试验实测得到台阶坝面的起始断面、末端断面及收缩断面的平均水深,则台阶坝面的消能率可用下式计算得:

$$\eta = \frac{E1 - E2}{E1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E1$ 为台阶坝面始端总能头; $E2$ 为收缩断面总能头。

计算结果见图2。

2.3 X型宽尾墩、Y型宽尾墩和平尾墩方案的水力特性对比

2.3.1 泄流能力 原设计是根据Y型宽尾墩方案计算的泄流能力,经试验验证,实测的泄流能力基本满足设计要求,为了进一步研究X型宽尾墩的水力特性,试验在单孔模型上又做了X型宽尾墩方案和平尾墩方案的泄量比较,计算了其综合流量系数,综合流量系数用堰流公式^[4]计算,结果见图3。

$$m = \frac{Q}{B\sqrt{2gH^{3/2}}} \quad (2)$$

其中：Q 为实测流量(m³/s)；B 为堰顶过水宽度(m)；H 为堰上水头(m)。

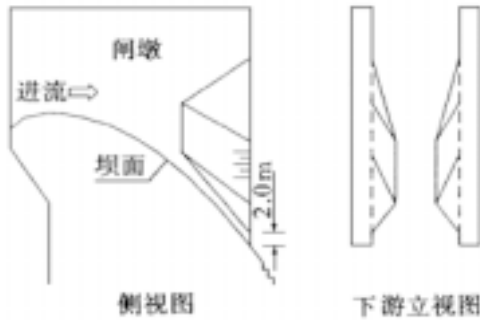


图 1 X 型宽尾墩体型

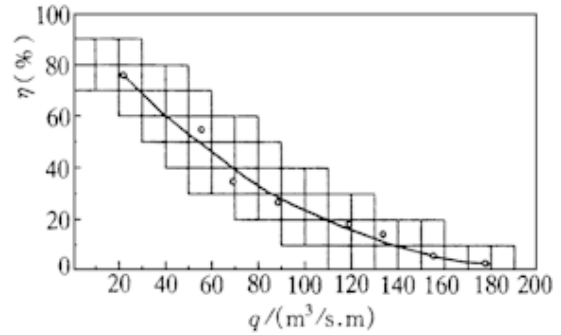


图 3 堰上水头 ~ 流量系数关系相关曲线

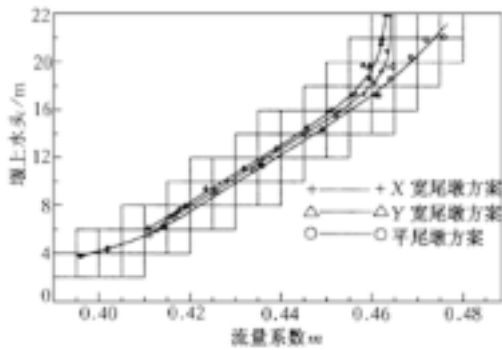


图 2 单宽流量与消能率关系曲线

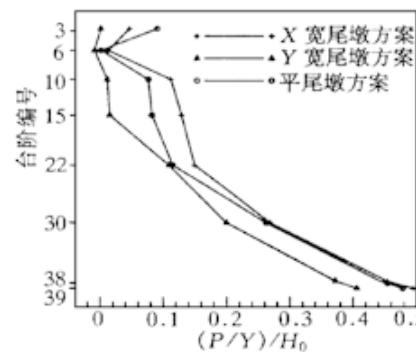


图 4 台阶坝面立面相对压力分布

从图 3 可以看出，在相同的堰上水头情况下，X 型宽尾墩方案的综合流量系数，大于 Y 型宽尾墩方案，小于平尾墩方案。分析其原因，在于过堰水流在平尾墩情况下，顺畅下泄，而在宽尾墩情况下，受两边边墙的缩窄约束，水位壅高，下泄不畅。X 型宽尾墩方案，部分水流顺畅沿坝面下泄，其余则受宽尾墩约束，因而其综合流量系数就介于 Y 型宽尾墩和平尾墩之间。经试验验证，X 型宽尾墩方案的泄流能力也满足设计要求。

2.3.2 压力分布 验证 X 型宽尾墩方案是否成立，还有一个重要的水力要素——压力分布要合理。优化定型后的 X 型宽尾墩只在局部出现微小负压，台阶坝面也无负压。而 Y 型宽尾墩方案在台阶立面局部有负压。由于 3 个方案的试验条件如堰顶高程，库水位及库池底部高程都不尽相同，因此用相对压力(p/Y)/H₀(即实测压力值 p/Y 与测点处水头落差 H₀之比)来对比表征。由于台阶坝面水平面在 3 个方案时都为正压，只有竖直面局部有负压，所以只列出竖直面的相对压力分布，见图 4(设计洪水)。从图 4 可以看出，X 型宽尾墩方案的相对压力分布更为合理。

Y 型宽尾墩方案时，台阶坝面局部出现负压，这和 Y 型宽尾墩的过流形式有关，当水流经过宽尾墩时被收缩雍高，射流舌经过台阶坝面时，极易脱壁形成负压，而其他 2 种方案则不会出现这种情况。从水流掺气的角度看，文献^[5-7]和^[8]提出，在台阶尺寸一定的条件下，溢流面的水流流态随单宽流量的增大而变化。单宽流量较小时，整个溢流坝面相当于多级跌水消能工；随着流量的增大，溢流面过渡到台阶溢流的

典型流态——滑掠水流，紊动剧烈，掺气充分；随着流量逐步增大，水流表面趋于光滑，台阶潜没于水下，其内部紊动仍然强烈，此时，台阶面还不会出现负压；当流量增加到一定程度时，台阶对水流的扰动作用逐步减小，水流沿台阶外缘形成水力光滑面下泄，这时，台阶坝面就有可能产生负压。在单宽流量较大的情况下，Y型宽尾墩后的无水区虽然为掺气提供了通道，但水流形成的水力光滑面紊动掺气作用减小，所以局部出现负压；而X型宽尾墩下部开口所通过的流量不大，流态呈滑掠水流，因此无负压出现。

2.3.3 流速分布 试验重点观测了X型宽尾墩方案在3种特征水位下，具有代表性的几个断面沿表孔中线的底流速分布。在设计水位时测得各点的底流速分布为：堰顶(0+000.0m)15.78m/s、闸室出口(宽尾墩末端, 0+29.6m)26.56m/s、台阶坝面(0+50.0m)24.49m/s、消力池入水水舌前沿(0+083.0m)14.00m/s、尾坎前(0+120m 桩号处)15.33m/s，到消力池末端，尾坎底部时仅为4.20m/s，尾坎顶部为6.26m/s。从流速分布的情况也可以说明“X型宽尾墩+台阶坝面+消力池”的消能作用是明显的。

2.3.4 水流流态及下游河道冲淤情况 平尾墩方案，台阶坝面全坝面过流。流量较小时，水流比较破碎，经过台阶坝面相当于多级跌水；随着流量的逐渐加大，水流过渡到最佳消能状态——滑掠水流，自由表面掺气充分，台阶内部紊动强烈，当流量增加到一定程度时，台阶坝面的水深增大，水舌光滑掠过台阶坝面，底部仅有少量掺气，台阶作用不明显。

Y型宽尾墩方案，流量较小时，过堰顶的收缩水流直接砸在台阶坝面上；随着流量的增大，收缩射流可以稳定地过渡到库式消力池水垫内，池内的水体掺混、旋滚和扩散十分充分，而台阶坝面则沿轴线部分过水，其余的约2/3部分坝面不过水。

X型宽尾墩方案，小流量过流时，台阶坝面全坝面过流，水流流态与平尾墩方案相似，消能充分。大流量过流时，水流分上、下两部分下泄，经宽尾墩下部开口的下层出流，除充分消能外，还对上部宽尾墩纵向拉开的水舌产生一定的上托作用，使上层部分经宽尾墩收缩交汇碰撞后的水流，平稳进入库池，库池里水流掺气充分，呈乳白色，相互扩散、碰撞、剧烈旋滚、消能充分。

索风营水电站的下游河道狭窄、水深较大，经上述综合消能工的消能后，除平尾墩方案沿下游河道轴线沿程有轻微冲刷外(设计水位冲坑深2m，校核水位冲坑深2.4m)，其它2个方案沿轴线均无冲淤现象。从消能防冲的角度看，索风营水电站采用“X型宽尾墩+台阶坝面+消力池”联合消能工是非常成功的。

3 结语

试验结果表明，新型的“X型宽尾墩+台阶坝面+库式消力池”联合式消能工，非常适合索风营水电站的泄洪消能系统。X型宽尾墩在保持Y型宽尾墩的优点的同时，克服其存在的其它问题，充分利用了台阶坝面的消能作用，且避免了台阶坝面出现负压。为台阶坝面联合消能工向高水头、大单宽泄流的方式提出了新的途径，使碾压混凝土坝的新技术进一步得到了推广应用。随着研究的进一步进行，X型宽尾墩从体型设计、水力特性等方面会更加完善。

参考文献：

- [1] 谢省宗, 朱荣林, 李世琴, 张元领. 宽尾墩库式消力池联合消能工的水力特性及其水力计算方法[J]. 水利学报, 1992, (2): 7-18.
- [2] 于忠政, 刘永川, 谢省宗, 李世琴. 安康水电站泄洪消能新技术的研究与应用[J]. 水力发电, 1990, (11): 32-36.
- [3] 艾克明. 台阶式泻槽溢洪道的应用状况浅析[A]. 见: 尹洪昌. 泄水工程与高速水流[M]. 长春: 吉林科学出版社, 2000.
- [4] 吴持恭. 水力学(上册), 第二版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.

-
- [5] 潘瑞文, 徐一民, 杨志林. 阶梯溢流坝的水流特性与消能效果 [J]. 泄水工程与高速水流, 1995, (2): 57-62.
- [6] 杨敏, 等. 阶梯溢流面的几个水力学问题 [A]. 见: 栾力, 苑润保. 泄水工程与高速水流 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1998.
- [7] 吴宪生. 台阶溢流坝的消能效果 [A]. 见: 尹洪昌. 泄水工程与高速水流 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2000.
- [8] AM 什瓦英什高. 台阶式溢流坝及其消能 [J]. 水利水电快报, 2000, 21(6): 1-6.