

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.002

小石峡水电站导流兼深孔泄洪洞消能工优化试验

李琳^{1,2}, 鲁克恩³, 邱秀云^{1,2}, 赵涛^{1,2}, 牧振伟^{1,2}, 侯杰^{1,2}

- (1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052 ;
- 2. 新疆农业大学农业节水与水资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052 ;
- 3. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要 通过新疆库马拉克河小石峡水电站导流兼深孔泄洪洞原设计方案的消能工试验,发现消力池内发生淹没水跃,水跃旋滚区与闸后射流相叠加,使陡坡段水流剧烈脉动。为了防止护坦段在较大的动水荷载下发生振动和破坏,采用在消力池内设置不同于传统布置方式的悬栅式消能工的方式,即从闸后陡坡末端起布置悬栅,悬栅的安装高度随水跃跃高逐渐抬高,呈台阶式布置。试验表明,台阶式布置悬栅起到了破碎水跃上部剧烈回旋运动的表面旋滚的作用,增大了回流的阻力,从而使水跃向下游移动,由淹没式水跃转化成稍有淹没水跃。在悬栅作用下,陡坡段和消力池内水流脉动明显减弱,浪花溅起高度明显小于加悬栅前的高度,这种悬栅布置方式可为其他同类工程提供参考。

关键词 导流兼深孔泄洪洞 悬栅式消能工 小石峡水电站

中图分类号 :TV653 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)02-0005-04

Optimization tests on energy dissipator of diversion and deep flood discharge Tunnel of Xiaoshixia Hydropower Station// LI Lin^{1,2}, LU Ke-eng³, QIU Xiu-yun^{1,2}, ZHAO Tao^{1,2}, MU Zhen-wei^{1,2}, HOU Jie^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China ; 2. Agricultural and Water Saving Research Centre, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China ; 3. Reconnaissance and Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Urumqi 830000, China)

Abstract :Based on the model tests on the original design scheme for the diversion and deep flood discharge tunnel of Xiaoshixia Hydropower Station on Kumalake River in Xinjiang Uygur Autonomous Region, the submerged hydraulic jump was generated in the stilling pool of the diversion tunnel, and the hydraulic jump superimposed with the jet flows from the floodgate at the steep gradient section, resulting in violent fluctuation of water flows. In order to prevent the apron slab from vibrating and being destroyed by great hydrodynamic load, a suspended grid dissipator was employed, whose installation method was different from that of the traditional one. The suspended grids were installed from the end of the steep slope section and the installation height increased with the length of hydraulic jump, and thus a stair type was formed. The tests show that the suspended grids break up the surface circumflex vortex and increase the backflow resistance, make the hydraulic jump move toward the lower part of the stilling pool, and a little submerged hydraulic jump is thus generated. The fluctuating intensity of water flows at the steep section and in the stilling basin obviously decreases, and splash height is much lower than that before installing suspended grids. The proposed arrangement of suspended grids will be useful for similar projects.

Key words :diversion and deep flood discharge tunnel ;suspended grid energy dissipator ;Xiaoshixia Hydropower Station

消能设施在水利工程中的应用历史悠久,如阶梯溢洪道、收缩式消能工的应用等^[1-8]。悬栅式消能工系新疆农业大学水利与土木工程学院近年来研究的一种新型消能工,运行实践证明其消能效果比过去通常采用的底流式及面流式消能工效果好,且造价低、结构简单,但水流流态与水流结构却非常复杂。悬栅式消能工悬于陡坡之上或消力池内,水流分别从悬空设置的悬栅栅条上、下通过,栅条本身对水流有摩阻作用,造成水流能量损失。但最主要的消能作用是水流受悬栅条的阻挡,造成过栅时水流

被切割成上、下两股水流,下股水流急剧收缩过栅,上股水流急剧上扩过栅,这种急剧的收缩与扩散使水流损失大量能量,过栅后两股水流交汇时发生碰撞与摩擦,又要消耗其能量。这样水流经过栅条,水流能量多次受到消减,至消力池尾部时,其大部分能量被消散,转换成热能等其他形式的能量,使其下游建筑物免遭冲刷破坏。

小石峡水电站工程由大坝、表孔溢洪道、导流兼深孔泄洪洞、发电引水洞及岸边式电站厂房组成。根据地形条件和泄洪安全运用要求,采用表孔溢洪道、导流兼深孔泄洪洞组合泄洪,导流兼深孔泄洪洞施工期导流,运行期作为永久泄洪洞,且兼有冲沙和放空水库的功能,它与发电洞一起布置在左岸,为有压洞。导流兼深孔泄洪洞设计流量为 $740\text{ m}^3/\text{s}$,校核流量为 $783\text{ m}^3/\text{s}$ 。进口引渠长 268.797 m ,采用复式断面,与发电洞进口引渠联合布置。进口闸井底板高程为 1437.00 m ,闸井顶部高程为 1483.30 m ,事故门孔口尺寸为 $7.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$,洞长为 222.886 m ,纵坡 $i=0.0241$,采用圆形断面,内径为 7.0 m ,混凝土衬砌厚度为 0.6 m 。出口闸井底板高程为 1432.00 m ,工作门孔口尺寸为 $6.0\text{ m}\times 5.5\text{ m}$,采用弧形钢闸门。工作门闸井后接出口消能段,采用底流消能方式。消力池底板高程为 1422.50 m ,池深 8.0 m ,池宽 14 m ,池长 89 m 。

由于库水位较高,库水位的变化对导流洞进口及闸后消力池的水流流态和消能效果影响很大。因此,需通过水力学模型试验对设计方案进行验证,并根据试验结果来确定最终的消能方式及消能工尺寸。

1 模型设计及试验工况

按重力相似准则同时满足紊流阻力相似条件,考虑场地布置和导流洞管道制作,进行电站导流洞兼深孔泄洪洞的整体模型设计,模型的几何比尺选为 58.33 ,其他物理量的比尺如下:流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{25} = 25988.77$ 流速比尺 $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 7.64$ 糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.97$ 。

模型由上游水库供水,上游水库设有消浪前池和稳水栅,以确保由上游水库进入模型的水流平稳。下游河道水位通过尾水闸板的开度来控制。模型供水由矩形薄壁堰计量控制,电站流量亦由另一矩形薄壁量水堰计量控制。上、下游水位由水位测针量测。各部位的水流流速由旋桨式螺旋测速仪进行量测,压强由测压管测读。水工整体模型试验工况见表 1。

表 1 水工整体模型试验工况

洪水类别	库水位/ m	泄流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	下游 水位/m
设计洪水	1480.00	756.00	1437.77
校核洪水	1481.65	783.49	1438.41

2 消能工方案优化

2.1 原方案试验

原方案消力池布置见图 1。试验表明,当库水位为设计洪水位 1480.00 m 、导流兼泄洪洞通过流量为 $777.85\text{ m}^3/\text{s}$ 时,由于消力池内水跃为淹没水跃,跃前断面发生在陡坡段 $0+278.64$ 断面。陡坡段最大水深为 9.22 m ,水位为 1433.82 m ,低于墙顶高程 1440.50 m 。但由于水跃旋滚区与闸后射流相叠加,陡坡段水流脉动剧烈,强烈紊动产生的压力脉动可能诱发护坦的振动和破坏,并使结构产生随机振动。水流剧烈紊动使水花溅起,跃出边墙,如图 2 所示。当库水位降低或闸门局部开启流量较小时,这种现象越发明显。闸孔出流流速随之减小,下泄水流动能减小,不能平衡下游水深的阻滞作用,使消力池内的淹没式水跃跃前断面位置随着库水位的降低不断向上游移动,即向闸井靠近,随着淹没度的增大,闸门可能被淹没,此种水流流态对闸门的结构和启闭是不利的。

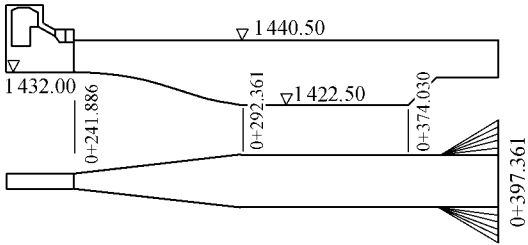


图 1 原方案导流兼深孔泄洪洞消力池结构布置(单位:m)

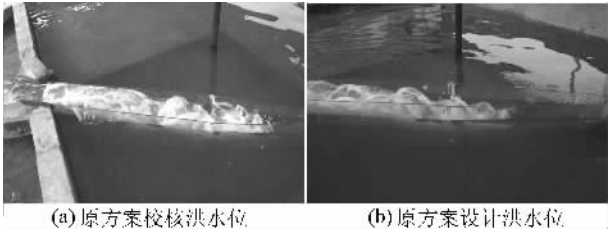


图 2 导流兼泄洪洞宣泄设计洪水时明流段流态

实测校核洪水位和设计洪水位下导流兼泄洪洞泄洪时消力池内水流翻腾滚动,在消力池出口至下游河道产生周期性的涌浪,涌浪高度随库水位的升高而增大。由试验测得,库水位为校核洪水位和设计洪水位时池内最大水深分别为 19.20 m 和 18.97 m ,发生在断面 $0+339.030\text{ m}$ 和 $0+350.690\text{ m}$ 处,水位分别为 1441.70 m 和 1441.47 m ,均高于边墙顶高程 1440.50 m (图 3、图 4)。

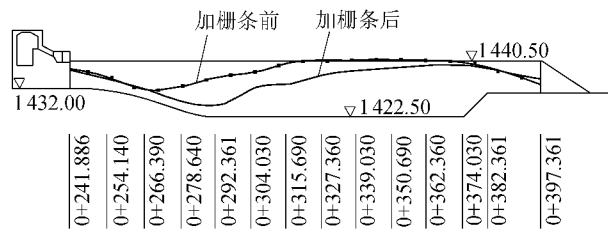


图3 方案修改前后设计洪水水面线对比(单位:m)

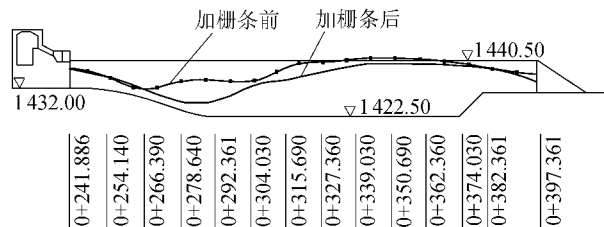


图4 方案修改前后校核洪水水面线对比(单位:m)

2.2 修改方案试验

原设计方案试验结果表明,无论库水位高低,导流兼泄洪洞闸后陡坡段水流脉动剧烈。消力池段通过设计洪水和校核洪水时,水流翻腾滚动剧烈,形成涌浪跃出边墙。为了削弱陡坡段和消力池内水流的剧烈脉动,稳定水流,且同时考虑到发电洞“门前清”的要求,即导流兼泄洪洞除了宣泄洪水外还兼顾着排沙任务,避免泥沙进入发电洞,保证导流洞排沙顺畅,决定采用悬栅式消能工对消力池进行优化。悬栅式消能工系新疆农业大学水力学课题组成员研究的一种新型消能工,主要应用于泄水陡坡上水流能量削减,将栅条按照同一安装高度布设,并悬于陡坡底之上,水流分别从悬空设置的悬栅栅条上、下通过,栅条本身对水流有摩阻作用,造成水流能量损失^[9-12]。

通过多组次、不同栅高和不同栅距的悬栅消力池泄水试验,发现按照传统的布设方式^[9-12],即将悬栅栅条按同一安装高度布置,对改善消力池内的流态有显著作用,但是闸后仍然发生淹没度较大的淹没水跃,陡坡段水流剧烈脉动现象基本没有改善。同时,如果悬栅沿水流方向长度较短或放置于水跃末端,将起不到平稳池内水流翻滚的作用。经优化试验,将悬栅的起始端设置于闸后陡坡段末端,悬栅总长为35.18 m,在水跃旋滚区栅条的密度稍大些,跃后区栅条的密度稍小些,其具体形式及结构尺寸见图5。水跃区栅条安装高度距消力池底板7.12 m,随着水跃跃高安装高度逐渐增加为8.83 m。悬栅宽度与池宽相同,断面形状为矩形,尺寸为1.75 m × 1.05 m。

在设计洪水位和校核洪水位闸门全开时进行试验,加悬栅前后不同工况下导流洞明流段水面线对比见图3、图4。从图中可以看出,加悬栅后闸后水

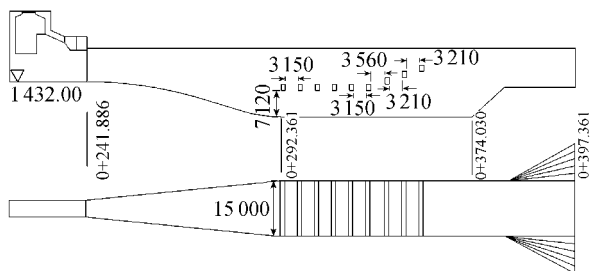


图5 修改后消力池结构(尺寸单位:mm,高程单位:m)
面线明显低于加悬栅前,陡坡段和消力池内水流脉动减小(图6)。在通过设计洪水777.85 m³/s和校核洪水794.48 m³/s时,陡坡段最大水深由加悬栅前的9.22 m和7.93 m降低至6.03 m和5.73 m,消力池段最大水深由加悬栅前的18.97 m和19.20 m降低至17.62 m和17.74 m,均小于设计边墙高度18.00 m。由图6可以看出,无论库水位高低,设置台阶式悬栅后水跃跃前断面位置均从原方案陡坡段0+270.780 m断面移至0+283.610 m断面,台阶式布置悬栅使水跃上部回流运动阻力增大,水跃上部回流旋滚区的回流流量减小,跃后水深降低,使水跃跃前断面向下游移动,形成稍有淹没式水跃。同时,台阶式布置悬栅起到了破碎水跃上部剧烈回旋运动的表面旋滚的作用,增大了回流区水流阻力,使陡坡段和消力池内水流脉动强度明显减弱,浪花溅起高度明显小于加悬栅前。



(a) 侧视



(b) 俯视

图6 方案修改后消力池内流态

2.3 方案修改前后消力池的消能率

以设计洪水位1480.00 m和校核洪水位1481.65 m情况为例,计算消力池加悬栅前、后的消能率。

其中

$$K_j = \frac{\Delta E_j}{E_1} \times 100\%$$

$$\Delta E_j = E_1 - E_2 - d$$

$$E_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}$$

$$E_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

式中： E_1, E_2 为跃前、跃后断面的水流总能量； ΔE_j 为水跃段(消力池段)的消除能量； d 为消力池池深； h_1, h_2 分别为跃前、跃后断面的水深； A_1, A_2 分别为跃前、跃后断面面积。

计算结果见表 2, 结果表明, 加悬栅前后消力池的消能率变化不大, 加悬栅后消能率略有增加。

表 2 方案修改前后消力池的消能率

运行工况	泄流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	消能率 $K_j/\%$	
		原方案	修改方案
设计洪水、闸门全开	777.85	53.7	54.1
校核洪水、闸门全开	794.48	55.7	56.8

3 结 语

原设计方案试验结果表明, 无论流量大小, 导流兼泄洪洞闸后陡坡段水流脉动剧烈, 水流跃出边墙, 消力池内水流脉动剧烈。为了防止护坦段在较大的动水荷载下发生振动和破坏, 本文采用了不同于传统悬栅布置方式(即栅条安装高度相同)的台阶式布置, 即在消力池水跃回流旋滚区采用了台阶式的悬栅布置方式, 消力池上游部分栅条安装高度相同, 下游栅条安装高度随水跃的发展逐渐抬高。试验表明, 台阶式布置悬栅可有效地降低消力池内水深, 使陡坡段和消力池内水流脉动明显减弱, 浪花溅起高度明显小于加悬栅前。但是台阶式悬栅的布置形式

对消力池消能率的影响很小。此类布置方式可为其他同类工程提供参考。

参考文献：

[1] 杨建, 万纪伟, 吴桐, 等. 大变幅相对淹没度下冲沙闸的水力特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (2) : 9-12.

[2] 余子丹. 中低水头宽尾墩联合消能工的应用与认识 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (2) : 36-39.

[3] 李贵吉, 张建民, 许唯临, 等. 高水头水电站“三洞合一”布置的体型优化试验 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (5) : 54-60.

[4] 孙双科, 徐体兵, 孙高升, 等. 导流洞改建为跌流式竖井溢洪道的试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (6) : 5-8.

[5] 黄秋君, 吴建华. 收缩式消能工的研究现状及进展 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (2) : 219-223.

[6] 尹志刚, 左战军, 刘春友等. 若干拱网效能工与普通消力池工程实例的经济分析 [J]. 水利经济, 2008, 28 (5) : 30-32.

[7] 张宗孝, 郭雷, 谭立新. 消能井内消能工直径优化试验 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28 (5) : 54-57.

[8] 王承恩, 张建民, 李贵吉. 阶梯溢洪道的研究现状及展望 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28 (6) : 89-94.

[9] 侯杰, 成军, 邱秀云. 悬栅消能工水力特性研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2003, 26 (3) : 1-7.

[10] 邱秀云, 侯杰, 孙涛, 等. 一种消除陡坡急流冲击波的新措施 [J]. 水力发电, 1998, 24 (11) : 18-20.

[11] 侯杰, 赵涛, 牧振伟, 等. 悬栅消能工水力特性研究 [J]. 水力发电, 2004, 30 (1) : 36-39.

[12] 邱秀云, 侯杰, 王锟. 无压隧洞洞内消能试验研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27 (3) : 62-65.

(收稿日期 2010-07-27 编辑 方宇彤)

· 简讯 ·

第十一届全国青年岩石力学与工程学术大会将在青岛召开

人类已悄然进入“低能耗、低污染、低排放”的低碳时代, 而我国以地铁为代表的大规模城市地下空间开发才刚刚开始, 为此给岩石力学与工程带来了新的挑战和机遇。中国岩石力学与工程学会青年工作委员会拟定于 2011 年 11 月 17—20 日在青岛召开“第十一届全国青年岩石力学与工程学术大会”, 会议主题为“低碳时代的城市地下空间与工程”。围绕会议主题, 与会者将探讨与交流岩石力学研究成果与工程实践经验。会议议题包括 ①岩土力学基本性质与本构关系; ②岩土力学新理论、新方法; ③岩土工程数值分析与仿真; ④地下空间与城市可持续发展; ⑤地下空间设计理论与建设技术; ⑥地下工程稳定性与风险分析; ⑦城市环境岩土工程问题与防治技术; ⑧岩土力学测试、监测、检测新设备、新技术。

会议网址如下: http://www.csrme.com/CN/News/2010-10/EnableSite_ReadNews36810711286467200.html
(本刊编辑部供稿)