

低水头拦河闸下游一、二级消力池的布置

黄智敏,陈卓英,朱红华,钟勇明

(广东省水利水电科学研究院广东省水动力学应用研究重点实验室,广东 广州 510635)

摘要:为了解决低水头拦河闸下游河床下切、河道水位下降造成下游消能工无法正常运行的问题,需要对拦河闸工程下游消能工进行除险改造或重建。基于广东省3座拦河闸除险改造和重建工程的水力模型试验研究成果,对低水头拦河闸下游两级消力池的布置进行研究,提出加高一级消力池尾坎顶及在下游陡坡段设置外凸型阶梯跌坎等优化措施。试验结果表明,采取上述措施可大幅度提高消力池水流消能率,简化消能工设施,节省工程投资。

关键词:低水头拦河闸;消力池;阶梯消能工;尾坎

中图分类号:TV653⁺.1;TV66 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)06-0033-04

Layout of primary and secondary stilling basin downstream low head barrage//HUANG Zhimin, CHEN Zhuoying, ZHU Honghua, ZHONG Yongming(Guangdong Provincial Key Laboratory of Hydrodynamics, Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Because of the downstream river water-level degradation and river bed cutting, the downstream energy dissipator of barrage cannot operate normally, the improvement or reconstruction is needed for the energy dissipator. Based on the research results of the hydraulic model test of improvement and reconstruction of three barrages in Guangdong Province, a reasonable layout of barrage downstream two stilling basin is studied. The optimization measures of primary stilling basin end still top height, and the outer bulging step provided in its downstream slope are given. The flow energy dissipation rate of stilling basin is greatly improved, the energy dissipator facilities are simplified, and the project investment is reduced.

Key words: low head barrage; stilling basin; step energy dissipator; end still

通常,采用底流消能的低水头拦河闸是在其下游修建消力池,并在消力池下游设置海漫段和防冲槽等,以确保拦河闸泄洪消能及其上、下游水流衔接过渡。对于大多数新建的拦河闸工程,采用一级消力池往往能节省工程投资,但由于部分已建拦河闸下游河道河床下切,水位明显下降,现有消力池无法满足拦河闸泄洪消能的要求,造成工程破坏或损毁,需对拦河闸工程进行除险改造或重建。在拦河闸下游消能工除险改造或重建设计中,一般考虑以下2种情况:①若现状消力池仍可加以利用,可在现状消力池(一级消力池)下游增设二级消力池,采用分级消能的方式以确保工程的安全运行;②若现状消力池无法利用,则根据泄洪闸泄水力条件、闸址地形和地质条件、两岸堤围和建筑物布置、工程施工和投资等,重建一级或两级消力池。本文在广东省3座拦河闸下游两级消力池消能试验研究成果的基础上,对拦河闸下游两级消力池的布置进行研究,供工程设计和运行参考。

1 3座拦河闸下游两级消力池布置试验研究

1.1 共青河拦河闸坝重建工程

共青河拦河闸坝枢纽位于广东省电白县西部的沙琅江干流上,是一座以灌溉为主,兼顾供水、交通等功能的水闸工程。该工程始建于1958年,1988年重建后投入运行。运行多年来,由于拦河闸下游河道人为超量挖沙,水位降低明显,闸下游消能工无法正常运行,险情不断,严重影响工程的安全运行,因此重建拦河闸坝及消力池。

共青河拦河闸坝重建工程为Ⅱ等大(2)型水闸,拦河闸坝上游正常蓄水位为19.3 m,设计洪水频率($P=2\%$)泄洪流量 $Q=2\,300\text{ m}^3/\text{s}$,校核洪水频率($P=0.5\%$)泄洪流量 $Q=2\,940\text{ m}^3/\text{s}$ 。闸坝主要建筑物包括拦河闸、溢流坝及两岸连接段等。拦河闸布置5孔闸,单孔净宽12.5 m,泄流总净宽62.5 m,闸底高程16.3 m;溢流坝段位于拦河闸的两侧,两侧长度均为45.68 m,堰顶高程19.3 m。拦河闸坝下游

作者简介:黄智敏(1957—),男,广东惠州人,教授级高级工程师,硕士,主要从事水工水力学及河流动力学研究。E-mail:hzm3011@163.com

采用底流消能。

现状拦河闸坝上、下游河床高差达 5 ~ 6 m,若拦河闸坝下游采用一级消力池布置,由于闸坝下游陡坡段及消力池两岸侧导墙较高,不利于两岸堤围的稳定,且工程投资较大,因此,拦河闸坝下游采用两级消力池布置方案,设计初拟的两级消力池布置见图 1(a)。

设计方案的拦河闸水力模型试验结果表明:
①在各级洪水流量泄流运行时,一级消力池内形成稳定的水跃,池长和池深基本满足设计要求;②在闸上游为正常蓄水位、5 孔闸闸门局部开启(闸门开度 $e \leq 2.1$ m,泄流量 $Q \leq 520 \text{ m}^3/\text{s}$) 条件下运行,一、二级消力池水流落差约 6 ~ 7.5 m,且下游河道水位较低,因此,二级消力池内水流波动较大,消能不充分,池末尾坎形成较明显的跌流,并在下游海漫段出现二次水跃,易对海漫段产生冲刷破坏。经水力模型试验优化后,拦河闸坝重建工程下游两级消力池的布置见图 1(b)。相比设计方案,该推荐方案一级消力池体型和布置不变。为了改善一、二级消力池之间陡坡段的泄流流态和降低陡坡段流速,将其坡度由 1 : 2 修改为 1 : 2.5,并参考已有工程经验^[1-2],在陡坡段设置了 4 级外凸型阶梯,阶梯高度 $a = 0.35$ m、间距 $s = 3.2$ m,见图 2。同时,将设计方案的二级消力池池底和池末尾坎顶高程分别降低至 8.0 m 和 8.8 m,在池内上游端设置 1 排消力墩(墩高 1.2 m、墩宽和墩间距均为 1.6 m),水平段池长由设计方案的 25.35 m 缩短为 22 m;取消二级消力池下游的水平海漫段,在池末尾坎末端以 1 : 25 斜坡海漫段与防冲槽连接;拦河闸下游消能工总长度(计至防冲槽末端)由设计方案的 135 m 减短至 106.5 m,大幅度节省了工程投资。

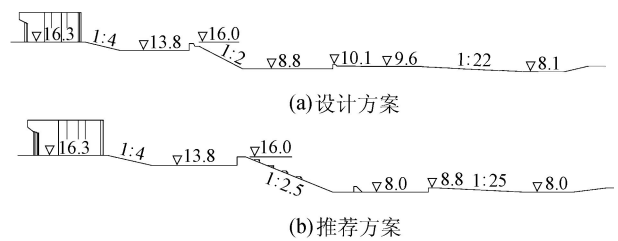


图 1 共青河拦河闸及其下游消能工布置示意图(单位:m)

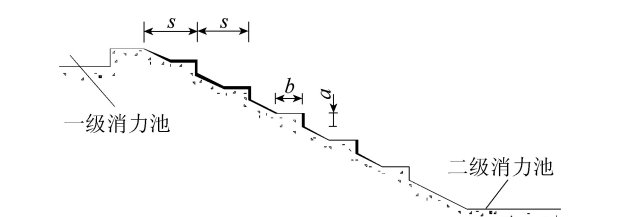


图 2 陡坡段不连续外凸型阶梯布置示意图
拦河闸下游消能工优化方案模型试验表明:

①在闸上游为正常蓄水位、5 孔闸闸门局部开启(闸门开度 $e \leq 2.1$ m,泄流量 $Q \leq 520 \text{ m}^3/\text{s}$) 条件下运行,阶梯陡坡段下游二级消力池入池流速比设计方案相应流速减小约 25% ~ 30%,大幅度减轻了二级消力池的消能压力;在闸门全开的各级洪水流量泄流运行时($Q > 520 \text{ m}^3/\text{s}$),随着泄流量的增大,下游河道水位逐渐上升,陡坡段外凸型阶梯逐渐被淹没,一、二级消力池水流落差减小,水流衔接较平顺。②二级消力池内形成稳定的强迫水跃,池内水流消能较充分。③二级消力池池底及尾坎顶高程降低之后,出池流速降低,出池水流与下游河道水流衔接较平顺。

1.2 乌石拦河闸除险改造工程

乌石拦河闸是广东省普宁市引榕灌区的枢纽工程,属Ⅲ等 3 级建筑物。拦河闸布置 15 孔闸,单孔闸净宽 7.6 m,闸底高程 13.0 m,闸下游采用底流消能。拦河闸正常蓄水位为 17.0 m,设计洪水频率为 20 年一遇,相应泄洪流量 $Q = 2\,660 \text{ m}^3/\text{s}$;校核洪水频率为 50 年一遇,相应泄洪流量 $Q = 3\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。乌石拦河闸于 1992 年重建,重建工程竣工后,由于闸下游河道人为无序过量采沙,水位明显下降,致使原消力池偏短、池深偏小,出闸水流消能不充分,水闸出流对下游河床造成严重冲刷,危及工程的安全运行。

在 2000 年乌石拦河闸除险改造工程设计中,将现有消力池扩建为一级消力池,并在其下游修建二级消力池。经水力模型试验论证之后,在维持设计方案两级消力池位置和池长不变的情况下,推荐两级消力池布置见图 3。

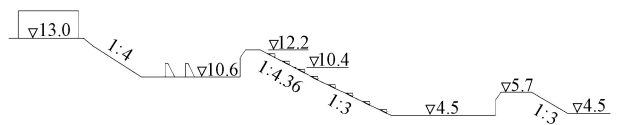


图 3 乌石拦河闸下游消能工推荐方案布置示意图(单位:m)

运行流态如下^[1-2]:
①在各级洪水频率流量泄流运行时,拦河闸出流均为自由泄流;在一级消力池内增设 2 排消力墩(消力墩高 1.8 m、墩宽和墩间距均为 1.4 m)后,池内形成稳定的水跃,大幅度降低了一级消力池的出池流速。
②一、二级消力池高差 6 ~ 7 m,在洪水流量 $Q < 1\,580 \text{ m}^3/\text{s}$ 泄流条件下,闸下游水位较低,二级消力池入池流速 10 ~ 12 m/s,二级消力池内水流波动较大,消能不充分。于是,在一级消力池下游陡坡段设置了 8 级外凸型阶梯($a = 0.3 \sim 0.35$ m, $s = 3 \sim 4$ m)。修改后,在 $Q < 1\,580 \text{ m}^3/\text{s}$ 泄流运行时,一级消力池出流沿下游阶梯陡坡段逐级下跌,大幅度增加了泄流的紊动和掺气,明显降低了陡坡段流速和二级消力池的入池流速,二级消力池入池流速只有光滑陡坡段相应流速的 70% ~ 80%,明

显增大了陡坡段的泄流消能率,有效减小了二级消力池的池长和池深。随着拦河闸下泄流量逐渐增加,下游河道水位逐渐抬高,淹没陡坡段的外凸型阶梯,一级消力池出流与下游河道水流衔接较平顺。③考虑到下游河床存在继续下切的可能性,将二级消力池池底高程和池末尾坎顶高程分别较设计方案降低 0.5 m 和 0.8 m,在各级洪水流量泄流运行时,二级消力池出流与下游河道水流衔接较平顺。乌石拦河闸除险改造工程于 2001 年初建成投入运行,至今运行情况良好。

1.3 潮州供水枢纽东溪拦河闸除险改造工程

潮州供水枢纽工程位于广东省韩江下游的潮州市境内,为大(1)型水闸工程。枢纽工程横跨韩江东溪、西溪两河道,东溪、西溪枢纽各布置 16 孔拦河闸,单孔闸净宽 16 m,闸下游采用底流消能。拦河闸上游正常蓄水位为 10.5 m,设计洪水频率为 50 年一遇,相应泄洪流量 $Q=13\,600\text{ m}^3/\text{s}$;校核洪水频率为 200 年一遇,相应泄洪流量 $Q=18\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 。

东溪拦河闸于 2004 年建成投入运行。近年来,由于拦河闸下游河道人为过量采沙,造成闸下游河床严重下切,水位明显下降,拦河闸下游消力池无法正常运行。2006 年汛期,东溪拦河闸消力池下游海漫段遭受不同程度的冲刷破坏,危及工程的安全运行,需对闸下游消能工进行除险改造。

东溪拦河闸下游消能工除险改造设计方案见图 4(a),水力模型试验推荐的拦河闸下游消能工除险改造布置见图 4(b),详细的试验研究成果见文献[3]。本文主要对一级消力池末尾坎顶加高后对拦河闸泄流能力的影响进行分析。

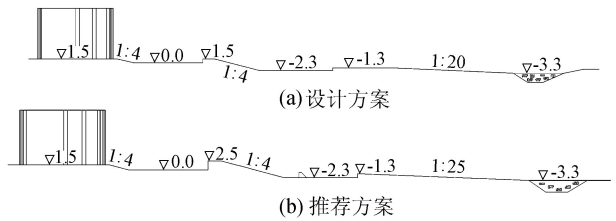


图 4 东溪拦河闸下游消能工布置示意图(单位:m)

除险改造设计方案保留现状的消力池为一级消力池,为了消除池内的折冲水流、远驱式水跃等不良流态,将池末尾坎加高 1.0 m,加高后的一级消力池末尾坎顶高程为 2.5 m,尾坎顶比拦河闸堰顶高 1.0 m。下面分析一级消力池尾坎加高后是否会影响拦河闸的泄流能力;通常确定拦河闸规模和泄流能力的闸址水位采用的是高水头工况的水位-流量关系曲线(设计洪潮水面线),拦河闸上、下游水位差一般较小(如东溪拦河闸在校核洪水频率流量泄流时上、下游水位差不超过 0.3 m),拦河闸闸孔断面

和一级消力池末尾坎顶断面的流速相差不是太大,同时考虑到拦河闸闸孔泄流的侧收缩影响大于一级消力池末尾坎顶水流的侧收缩影响,因此,只要一级消力池末尾坎顶过水断面大于拦河闸闸孔过水断面面积,一级消力池末尾坎顶加高就不会影响拦河闸的泄流能力。

在设计洪水频率($P=2\%$)和校核洪水频率($P=0.5\%$)的下游水位条件下,计算得出东溪拦河闸一级消力池尾坎过水面积大于水闸闸孔过水面积(表 1)。模型试验表明,一级消力池末尾坎顶加高后,对东溪拦河闸泄流能力无影响。2008 年初,东溪拦河闸下游消能工除险改造工程建成投入运行,运行情况良好。

表 1 东溪水闸闸孔和一级消力池尾坎顶过水面积比较

洪水频率 $P/\%$	闸下游 水位/m	水闸闸孔		一级消力池尾坎	
		闸底 高程/m	过水 面积/ m^2	坎顶 高程/m	过水 面积/ m^2
2	12.70	1.5	2509	2.5	2673
0.5	14.35	1.5	2878	2.5	3106

2 拦河闸下游两级消力池布置理论分析

2.1 一级消力池布置

一级消力池主要承担拦河闸泄流和下游二级消力池衔接过渡的作用,其泄流消能率一般较小,在拦河闸各级洪水流量泄流条件下,一级消力池内水流应较平稳,不应出现折冲水流、远驱式水跃等不良流态。由于众多的拦河闸除险改造工程在中小洪水流量运行时,下游河道水位往往较低,一级消力池尾坎出流多呈自由出流状况,因此,为了减小消力池池长和池深,改善消力池运行流态,可采取在消力池内设置消力墩、加高池末尾坎顶等措施^[4-8]。

a. 若工程条件许可,可在一级消力池内设置消力墩等辅助消能工,以形成强迫水跃,并缩短消力池池长。如乌石拦河闸除险改造工程一级消力池内设置消力墩后,消除了池内远驱水跃,池内形成稳定的强迫水跃,一级消力池出流与下游二级消力池水流衔接较平顺。

b. 若受一级消力池结构、闸址河床地质条件等限制,一级消力池内无法设置消力墩等辅助消能工,则在不影响拦河闸泄流能力的前提下,适当加高一级消力池末的尾坎顶高程,增加消力池的池深,以消除池内的折冲水流、远驱式水跃等不良流态,增大消力池的水流消能率。如在潮州供水枢纽东溪拦河闸除险改造工程水力模型试验中,将拦河闸下游一级消力池末尾坎顶加高,明显改善了一级消力池的运行流态,且工程量和投资较省,施工也较方便。

若采取加高池末尾坎顶的方法,工程设计中应注意以下问题:①对尾坎为自由出流或部分洪水流量为自由出流的一级消力池,应初步满足消力池尾坎前缘水深大于跃后水深、池长大于水跃长度的要求^[3]。②在设计洪水和校核洪水等洪水频率流量条件下,计算复核拦河闸泄流能力是否能够满足设计要求,即在相应洪水流量的闸下游水位条件下,检验一级消力池尾坎过水面积是否大于拦河闸闸孔总净过水面积。③重要的工程应经水力模型试验论证。

2.2 二级消力池布置

根据一、二级消力池水力条件,由参考文献[4]可计算出下二级消力池的体型参数。为了减小下游二级消力池的规模,可采用以下辅助消能工。

a. 当一、二级消力池之间的陡坡段落差较大时,可在陡坡段设置不连续的外凸型阶梯,以消杀陡坡段的部分泄流能量,降低进入下游二级消力池的流速,减小二级消力池的规模。如共青河拦河闸坝重建工程、乌石拦河闸除险改造工程中的一级消力池下游陡坡段设置了不连续的外凸型阶梯后,大幅度减小了二级消力池的规模,节省了工程投资,效果较显著。拦河闸一、二级消力池之间陡坡段的不连续外凸型阶梯体型布置、水力特性等参见文献[5-6]。工程设计中,若一级消力池下游陡坡段坡度为1:2~1:4,外凸型阶梯高度一般可取0.3~0.4 m,间距可取3~4 m,陡坡段末级阶级面可高于闸下游最低水位0.5~1 m。

b. 二级消力池内可设置消力墩等辅助消能工,使池内产生强迫水跃,增大水流消能率,减小二级消力池的长度。

3 结 语

拦河闸下游河道河床下切、水位降低,会造成拦河闸下游消能工的破坏或损毁,危及工程安全运行,需对拦河闸工程进行除险改造或重建。本文在总结广东省3座拦河闸除险改造和重建工程中下游两级消力池布置试验成果的基础上,对拦河闸下游两级消力池的布置进行分析,认为在一级消力池内设置消力墩,加高消力池末尾坎顶,在二级消力池上游陡坡段设置不连续的外凸型阶梯等措施,可大幅度提高消力池的消能率,简化下游消能工设施,节省工程投资。

参考文献:

[1] 朱展毅. 乌石拦河闸除险加固工程消能建筑物的设计

[J]. 广东水利水电, 2003(3): 33-34. (ZHU Zhanyi. Design of energy-dissipating structure for Wushi Sluice Rehabilitation [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2003(3): 33-34. (in Chinese))

[2] 朱红华, 黄智敏, 罗岸, 等. 乌石拦河闸除险加固工程消能试验研究[J]. 广东水利水电, 2002(12): 64-65. (ZHU Honghua, HUANG Zhimin, LUO An, et al. Experimental study on energy dissipation in Wushi Sluice [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002(12): 64-65. (in Chinese))

[3] 黄智敏, 罗岸, 陈卓英, 等. 潮州供水枢纽东溪拦河闸消能工除险改造试验研究[J]. 广东水利水电, 2010(12): 1-3. (HUANG Zhimin, LUO An, CHEN Zhuoying, et al. Experimental research on reinforcing the energy dissipater of the Dongxi River Barrage of the Chaozhou Water Conservancy Project [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(12): 1-3. (in Chinese))

[4] 华东水利学院. 水工设计手册: 第六卷 泄水与过坝建筑物[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.

[5] 黄智敏, 朱红华, 何小惠, 等. 缓坡度陡槽溢洪道阶梯消能研究与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 179-182. (HUANG Zhimin, ZHU Honghua, HE Xiaohui, et al. Research and application of stepped energy dissipater spillway with gentle slope [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(3): 179-182. (in Chinese))

[6] 黄智敏, 朱红华, 何小惠, 等. 溢洪道阶梯陡槽段水深试验与计算探讨[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(6): 782-789. (HUANG Zhimin, ZHU Honghua, HE Xiaohu, et al. Calculation of the water depth on a stepped chute spillway based on experimental study [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(6): 782-789. (in Chinese))

[7] 韩守都, 刘韩生, 吴宝琴. 布仑口水电站消力池尾坎位置模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 62-64. (HAN Shoudu, LIU Hansheng, WU Baoqin. Model test on position of end sill of stilling basin of Bulunkol Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 62-64. (in Chinese))

[8] 陆杨, 刘焕芳, 金谨, 等. T形墩消力池消能率的计算及优化设计试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6): 42-45. (LU Yang, LIU Huanfang, JIN Jin, et al. Study on calculation of energy dissipation ratio and optimal design test of stilling basin with T-shape baffle [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(6): 42-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-01-07 编辑: 骆超)