

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.009

低水头拦河闸重建工程消能工优化布置试验研究

陈卓英^{1,2,3}, 倪培桐^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510630;

2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510630;

3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510630)

摘要: 共青河拦河闸坝工程是典型的低水头枢纽工程, 近年来随着下游河床下切等原因, 拦河闸坝多次出现险情, 个别部位残损严重, 影响工程的安全运行。为研究研究拦河闸坝及其消能工运行的水力特性, 妥善解决拦河闸坝下游消能防冲的问题, 基于共青河拦河闸坝工程设计资料, 建立了水工模型试验。试验表明通过增加一级消力池末端左、右两侧尾坎顶高程和在一级消力池尾坎下游两侧斜坡段上设置外凸型阶梯, 有效降低了消力池出流斜向流速, 减轻该斜向流撞击左、右两侧斜坡段内坡的现象, 且外凸型阶梯削减了斜坡段的流速, 减轻了下海漫段和防冲槽的消能压力, 较好地解决了下游河床的消能防冲问题。

关键词: 共青河拦河闸; 消能工; 外凸型阶梯; 试验研究

中图分类号: TV135

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)02—0049—06

Experiments on Optimal Layout of Energy Dissipation of Low Head Sluice Reconstruction Project

CHEN Zhuoying^{1,2,3}, NI Peitong^{1,2,3}

(1. Guangdong Provincial Water Conservancy and Hydropower Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510630, China;

2. Hydrodynamic Research Key Lab of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510630, China;

3. State-province Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou, Guangdong 510630, China)

Abstract: Gongqing River dam is a typical low-head water control project. Its the right bank which was found in danger situation in recent years because of sand extraction in the downstream. The physical model was built to study the hydraulic characteristics of the dam and solve the problem of energy dissipation and erosion prevention in the downstream. The results shows that by increasing the elevation of end sill at right and left sides of the first stilling pool and arranging convex type ladder on both sides at end of the first stilling pool, the stilling basin flow, the oblique flow hitting the left and right sides of the slope section in slope, the convex step cut slope flow and the velocity of downstream apron can all be effectively reduced.

Keywords: Gongqing River dam; energy dissipater; convex type ladder; experiments

低水头水工建筑物具有水头低、流量大、弗劳德数低、深尾水及消能率低等特点。由于低水头建筑物效能率低是普遍问题, 因此能量被大量带到河道下游, 致使下游河道受水流冲刷侵蚀。特别是近年来河道采砂量大致使枢纽下游河道下切严重, 边坡滑坡, 对枢纽安全形成较大威胁^[1-5]。从目前研究

看低水头消能工关注阶梯式消能工^[6-10]、消力墩位置^[11-13]、缓坡溢洪道挑坎^[14-15]、消力池综合消能效率^[16-17]、电站导墙布置对流态影响^[18]、溢洪道中墩尾部水翅消减方案^[19]、泄水闸前冲刷^[20]等问题。广东省地处华南沿海, 河流比降小, 普遍存在低水头拦河闸工程。共青河引水枢纽位于电白县西部

收稿日期: 2016-12-06

修稿日期: 2017-01-22

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-12)

作者简介: 陈卓英(1973—), 女, 广东四会人, 高级工程师, 主要从事水工水力学方面的工作。E-mail: 576353001@qq.com

通讯作者: 倪培桐(1971—), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 主要从事水力学数值模型方面的工作。E-mail: 69383183@qq.com

的沙琅江干流上,是典型的低水头水利枢纽。其担负着电白县西南部九个镇 $7\ 100\text{ hm}^2$ 农田的灌溉和县城水东镇的工商业及 20 多万居民生活用水任务。是一座以灌溉为主,兼顾供水、交通等功能的水闸工程。枢纽闸坝工程始建于 1958 年,1986 年重建,1988 年重建完成并投入运行 20 多年,拦河闸坝工程个别部位残损严重,险情不断,严重影响工程的安全运行,需要重建。

共青河拦河闸坝重建工程为 II 等大(2)型水闸,主要建筑物包括拦河闸、溢流坝、两岸连接段及上、下游翼墙等。拦河闸布置共 5 孔,闸室堰顶高程 16.3 m(珠基,下同),单孔净宽 12.5 m,泄流总净宽 62.5 m,前缘总宽度 75.54 m。溢流坝段位于拦河闸的两侧,两侧长度均为 45.68 m,溢流堰型采用 WES 堰,堰顶高程为 19.3 m,堰下游高程为 16.3 m(见图 1)。

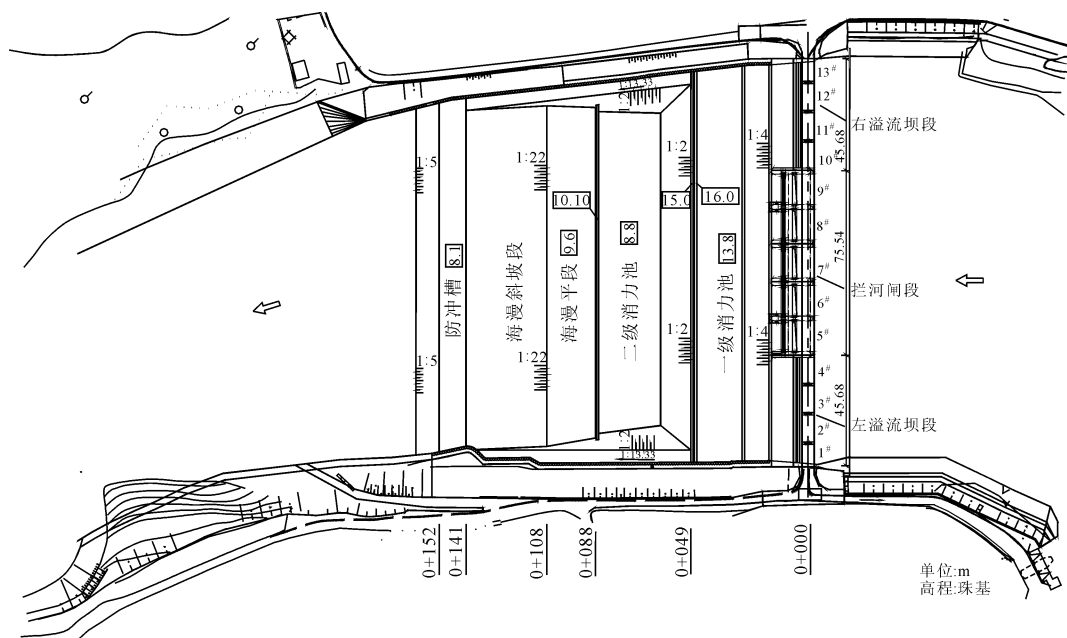


图 1 共青河闸坝重建工程初选方案平面布置图

共青河拦河闸坝设计洪水标准为 50 年一遇 ($P=2\%$),洪水流量 $Q=2\ 300\text{ m}^3/\text{s}$,校核洪水标准为 200 年一遇 ($P=0.5\%$),洪水流量 $Q=2\ 940\text{ m}^3/\text{s}$ 。消能防冲建筑物洪水设计标准与拦河闸坝标准一致,采用 50 年一遇 ($P=2\%$),拦河闸上游正常蓄水位为 19.3 m。

本文试验主要研究拦河闸坝及其消能工运行的水力特性,妥善解决拦河闸坝下游消能防冲的问题^[21-22],为工程设计和运行提供科学依据。

1 模型设计

模型按弗劳德相似定律设计为正态,在满足试验成果精度的前提下,根据试验场地、供水条件等,选取模型几何比尺 $L_r=40$ 。流量根据弗劳德重力相似律,可得出模型各主要物理量的比尺关系。

根据共青河拦河闸坝坝址工程区域的河道地形,为了保证工程河段水流条件的相似,模型截取范围为拦河闸坝上、下游河道各约 1 000 m,模型试验模拟的拦河闸坝上、下游河道总长度约为 2 000 m。

拦河闸坝上、下游模型河道地形采用工程设计提供的河道地形图进行制作,河道地形和拦河闸坝根据设计方提供的设计图纸按几何相似缩制。拦河闸、溢流坝等采用优质杉木精制,表面上蜡抛光;模型河道地形用水泥沙浆刮制、批荡抹光,以满足模型河床糙率与原型河床糙率相似。

2 原设计方案消能工运行试验

2.1 工程布置

2.1.1 拦河闸及其下游消能工布置

经共青河拦河闸水工断面模型试验研究^[21],优化了拦河闸下游消能工的布置和体型。水工断面模型试验推荐的拦河闸及其下游消能工的布置和体型尺寸为(见图 2)。

闸室下游布置两级消力池,一级消力池水平长度为 19.5 m,池深 2.2 m,池末尾坎顶高程 16.0 m,尾坎末端以 1:2.5 坡度陡坡段与下游二级消力池连接;一、二级消力池之间陡坡段布置 4 级高 0.35 m、间距 3.2 m 的外凸型阶梯;二级消力池水平长度为

22 m,池深 0.8 m,池内设置一排消力墩(墩高 1.2 m、墩宽 1.6 m、墩间距 1.6 m),池末坎顶高程 8.8 m,尾坎顶宽度 2 m;二级消力池尾坎下游以 1:25 坡度

的斜坡海漫段(水平投影长度 20 m)与防冲槽连接,防冲槽顶高程 8.0 m,后以 1:10 反坡段与下游河床连接(见图 2)。

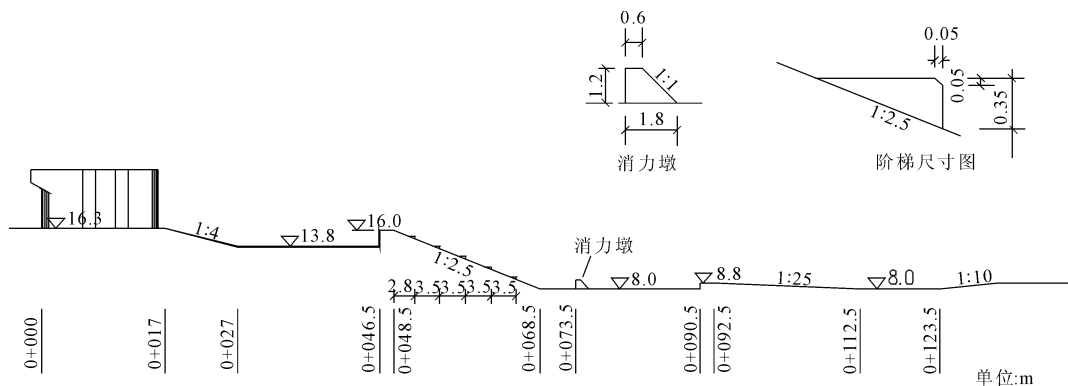


图 2 设计方案——拦河闸及其下游消能工剖面图

2.1.2 溢流坝

溢流坝段位于拦河闸段的左、右两侧,两侧长度均为 45.68 m,堰型采用 WES 堰,堰顶高程为 19.3 m,溢流坝下游底板顶高程为 16.3 m,底板顺水流长 10 m,底板下游末端与下游两级消力池连接。拦河闸坝左、右两岸的一级消力池尾坎末端至防冲槽首端布置 5 m 宽的斜坡段,斜坡段与一级消力池下游陡坡段、二级消力池、斜坡海漫段等内坡以 1:2 坡度连接。

2.2 试验结果

原方案在拦河闸不同闸门开度与溢流坝联合运行时(闸上游水位 $Z = 19.6\text{m}$),由于溢流坝泄流量较小,拦河闸两边孔出流后向左、右两侧扩散。水流沿一级消力池下游陡坡段斜向撞击两侧斜坡段的内坡,两侧斜坡段及内坡面区域的水流较集中,受其影响,二级消力池左、右两侧尾坎顶出现明显的跌流现象,流速较大,导致其下游海漫段及下游河床区域流速较大,不利于工程的安全运行(见图 3)。

随着上游来流的增大,溢流坝过流相应增大,水闸两边孔出流往左、右两侧扩散程度减小。由于下游水位仍然较低,在两侧斜坡段及其连接的内坡区域同样出现较明显的急流段,水流斜冲击内坡的流速约 $4.3 \text{ m/s} \sim 5.3 \text{ m/s}$;二级消力池左、右两侧的尾坎区域出现较明显的跌流现象,出池流速约 $3.8 \text{ m/s} \sim 4.0 \text{ m/s}$,两侧端防冲槽及其下游的左、右岸区域流速较大,断面流速分布不均匀,不利于工程的安全运行(见表1)。

表 1 消能工原方案拦河闸坝运行流速值

拦河闸 开度 e /m	泄流量 $Q_{\text{总}}$ /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	撞击两侧 内坡的斜 向流速 V /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	二级消力池尾 坎顶(桩号 0+ 91.5)流速较 大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	桩号 0+140 两岸区域流 速较大值 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.8	460	5.4	3.9	2.7
全开	1200	4.3	3.8	2.7
全开	2300	5.3	4.0	3.0

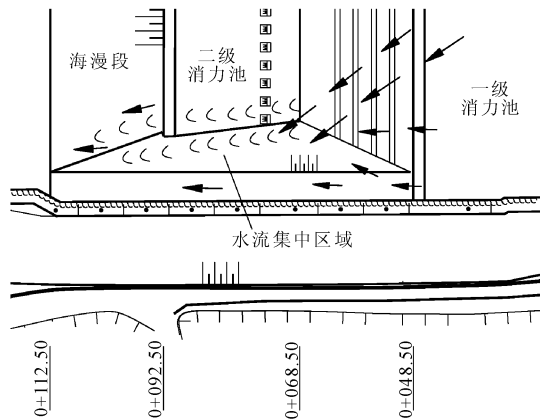


图 3 两侧斜坡段及其内坡区域泄流流态示意图

3 消能工方案优化布置试验结果与讨论

3.1 优化布置方案

(1) 修改方案 1: 将一级消力池左、右侧各 18 m 长尾坎加高 0.8 m (顶高程 16.8 m), 尾坎顶宽为 2 m (见图 4)。

(2) 修改方案 2: 在修改方案 1 的基础上, 将一级消力池末端左、右两侧尾坎顶加高至 17.2 m 高程。且在左、右两侧所增加的尾坎坡面上增加一级外凸型阶梯, 并在一级消力池尾坎下游的左、两侧斜坡段上增设 6 级外凸型阶梯 (见图 5)。

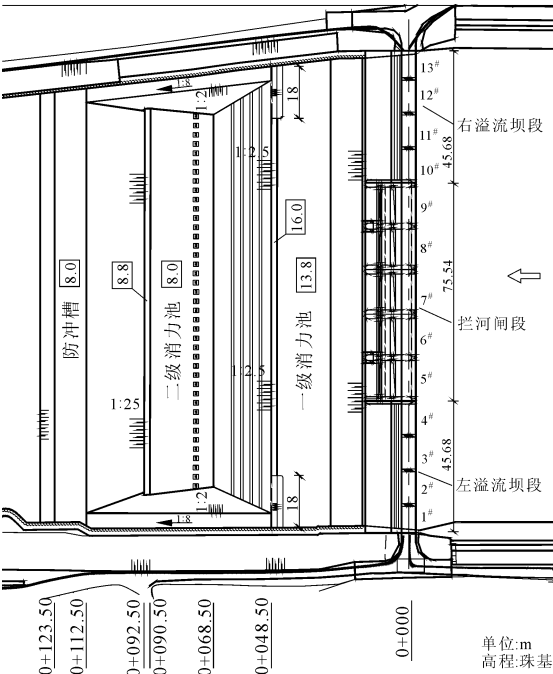
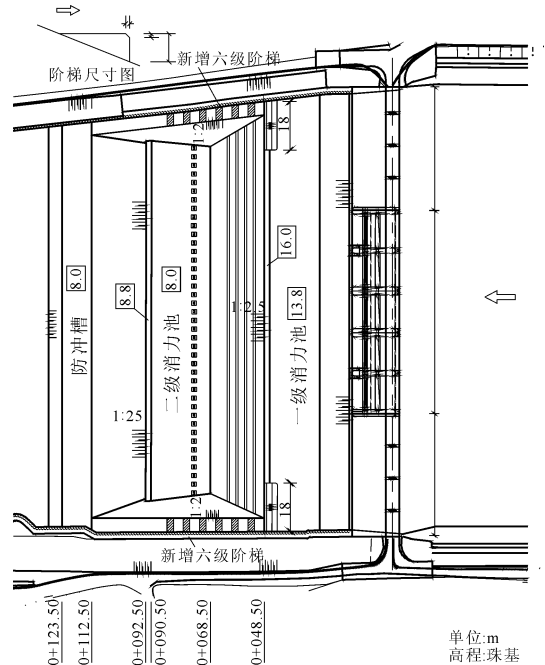
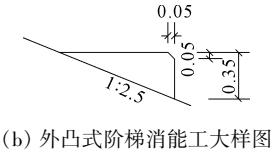


图 4 消能工修改方案 1 平面布置图



(a) 修改方案 2 平面图



(b) 外凸式阶梯消能工大样图

图 5 消能工修改方案 2 布置图

3.2 修改方案 1 试验结果

修改方案 1 把原设计方案一级消力池左、右两侧尾坎抬高之后,拦河闸不同闸门开度局部开启与

溢流坝运行时,削弱了拦河闸两边孔出流斜向水流撞击下游两岸侧斜坡段内坡的流量和流速,同时,从两侧尾坎顶翻越水流流量明显减小。在 5 孔闸闸门开度 $e = 1.8\text{ m}$ 的运行时(闸上游水位 $Z = 19.6\text{ m}$, 闸坝联合运行),一级消力池两侧尾坎顶流速约 $3.2\text{ m/s} \sim 3.3\text{ m/s}$,一级消力池下游陡坡段斜向撞击两侧内坡的流速约 $2.7\text{ m/s} \sim 2.9\text{ m/s}$,二级消力池左、右两侧的出池流速约 2.7 m/s (见表 2)。

表 2 消能工修改方案 1 拦河闸坝运行流速值

拦河闸开度 e /m	泄流量 $Q_{\text{总}}$ /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	撞击两侧内坡的斜向流速 V /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	二级消力池尾坎顶(桩号 0+91.5)流速较大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	桩号 0+140 两岸区域流速较大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.8	460	2.7~2.9	2.7	2.0
全开	1200	2.8	2.9	2.5

当上游来流量 $Q = 1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 泄流运行时(拦河闸门全开与溢流坝联合运行),其运行流态的与闸门开度 $e = 1.8\text{ m}$ 运行工况相近,一级消力池下游陡坡段斜向撞击两侧内坡的流速减小至约 $2.7\text{ m/s} \sim 2.8\text{ m/s}$;二级消力池出池流速减小,左、右两侧的出池流速约为 2.9 m/s (见图 6)。



图 6 消能工修改方案 1 拦河闸坝泄流运行流态

3.3 修改方案 2 试验结果

方案 2 明显减轻了一级消力池下游陡坡段水流斜向撞击左、右两侧斜坡段内侧坡的现象,且消力池两侧斜坡段设置的阶梯削减了斜坡段的流速,减轻了下游海漫段和防冲槽的消能压力,有利于工程的安全运行(见表 3 和图 7)。

(1) 拦河闸闸门开度 $e \leq 0.6\text{ m}$ 运行时,由于一级消力池水面低于左、右两侧尾坎顶高程,加高的尾坎顶无溢流,拦河闸两侧边孔出流斜向水流对其下游两侧边坡的撞击作用甚微。

(2) 拦河闸闸门开度 $e = 1.8\text{ m}$ 运行时,一级消力池内水位约 17.9 m ,漫越一级消力池左、右两侧

高尾坎的水深约 0.7 m,一级消力池左、右两侧高坎出流斜向撞击下游两侧内坡的流速约 1.9 m/s~2.1 m/s。二级消力池尾坎顶(桩号 0+091.50)左、右两侧出流流速分别约 2.1 m/s 和 2.3 m/s,下游河道(桩号 0+140)两侧区域流速为 1.5 m/s~1.7m/s。

表 3 消能工修改方案 2 拦河闸坝运行流速值

洪水频率 $P/\%$	拦河闸开度 e /m	泄流量 $Q_{总}$ /($m^3 \cdot s^{-1}$)	撞击两侧内坡的斜向流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	二级消力池尾坎顶(桩号 0+091.500)流速较大值/($m \cdot s^{-1}$)	桩号 0+140 两岸区域流速较大值/($m \cdot s^{-1}$)
	1.8	460	2.1	2.3	1.7
	全开	800	2.5	2.4	2.1
	全开	1200	2.8	2.5	2.2
5	全开	1860	2.9	2.6	2.3
2	全开	2300	3.1	2.7	2.4

(3) 上游来流量增大、拦河闸闸门全开与溢流坝运行时(泄流量 $Q=800\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$,闸下游水位分别为 13.42 m 和 14.57 m)。一级消力池水面高于加高的尾坎顶,水流漫越坎顶沿斜坡段下泄,斜坡段的阶梯增加了泄流消能率,二级消力池尾坎顶出流流速约为 2.1 m/s~2.5 m/s。

(4) 上游来流量为 $Q=1\,860\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=5\%$ 、闸下游水位为 16.2 m)运行时,随着泄流量增大,溢流坝泄流量相应增大,左、右两侧的溢流坝堰面末端偶有水流起挑现象,拦河闸两边孔出流往左、右两侧扩散程度减小。一级消力池水深增大,一、二级消力池的水位差减小,二级消力池水深加大,水流消能率增加,二级消力池出流较平顺与下游河道水流衔接。

(5) 上游来流为设计洪水频率流量 ($P=2\%$ 、 $Q=2\,300\text{ m}^3/\text{s}$)运行时,左、右两侧的溢流坝下游末端水流略起挑,一级消力池左、右两侧水流波动较中间的拦河闸段稍大。



图 7 消能工修改方案 2 拦河闸坝泄流运行流态
(拦河闸 $e=1.8\text{ m}$)

3.4 讨论

在拦河闸闸门局部开启和全开运行时,消能工

初选方案泄流经一级消力池后,沿一级消力池下游陡坡段斜向撞击两侧斜坡段内侧坡,斜坡段及内坡面区域的水流较集中,二级消力池左、右两侧尾坎顶出现较明显的跌流现象,出池流速较大,导致其下游左、右两侧海漫段及下游河床区域流速较大,不利于工程的安全运行。

消能工一级消力池末端左、右两侧尾坎顶加高特别是抬高 1.2 m 后,一级消力池出流斜向撞击两侧斜坡段的流速明显减小,二级消力池尾坎区域的跌流现象减弱。消能工修改方案 1 将一级消力池末端左、右两侧尾坎顶加高至 16.8 m 高程(长度分别为 18 m),一级消力池出流斜向撞击两侧斜坡段的流速明显减小,二级消力池尾坎区域的跌流现象减弱。

消能工修改方案 2 将一级消力池末端左、右两侧尾坎顶加高至 17.2 m 高程(加高的尾坎长度分别为 18 m),在左、右两侧所增加的尾坎坡面上增加一级外凸型阶梯,并在一级消力池尾坎下游的左、右两侧斜坡段上增设 6 级外凸型阶梯(见图 4)。该方案明显减轻了一级消力池下游陡坡段水流斜向撞击左、右两侧斜坡段内侧坡的现象,且消力池两侧斜坡段设置的阶梯削减了斜坡段的流速,减轻了下海漫段和防冲槽的消能压力,有利于工程的安全运行。修改方案 2 在左、右两侧所增加的外凸型阶梯消力池两侧斜坡段设置的阶梯有助于泄流的湍流的发展,加快能量耗散、减小斜坡段的水流流速,从而减轻了下海漫段和防冲槽的消能压力。

4 结 论

本文通过试验研究了拦河闸坝及其消能工运行的水力特性,妥善解决拦河闸坝下游消能防冲的问题,为工程设计和运行提供科学依据。

试验原设计方案存在一级消力池下游陡坡段斜向撞击两侧斜坡段内侧坡,斜坡段及内坡面区域的水流较集中,二级消力池左、右两侧尾坎顶出现较明显的跌流现象,出池流速较大,且其下游左、右两侧海漫段及下游河床区域流速较大,不利于工程的安全运行。试验通过在一级消力池末端左、右两侧尾坎顶高程增加和一级消力池尾坎下游两侧斜坡段上设置外凸型阶梯,有效的降低了消力池出流斜向撞击两侧斜坡段的流速,减轻了一级消力池下游陡坡段泄流斜向撞击左、右两侧斜坡段内侧坡的现象,且消力池两侧斜坡段设置的外凸型阶梯削减了斜坡段的流速,减轻了下海漫段和防冲槽的消能压力,有

利于工程的安全运行,建议工程设计采用。

参考文献:

- [1] 张春财,杜宇.低水头泄水建筑物消能防冲研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2008,5(2):48-53.
- [2] 张绪进,樊卫平,张厚强.低闸枢纽泄流能力研究[J].水利学报,2005,36(10):1246-1251.
- [3] 郑慧洋,王英伟,安伟.低水头消能防冲试验研究[J].水利水电工程设计,2006,25(2):2-4.
- [4] 吴子荣,包中进.多级消力池水利特性的研究及其应用[J].水利水电技术,1998,29(12):17-19.
- [5] 孙保沐,王海龙.低坎分流墩消能工的优化研究[J].水力发电学报,2004,23(3):93-97.
- [6] 黄智敏,陈卓英,朱红华,等.低水头拦河闸下游一二级消力池的布置[J].水利水电科技进展,2013,33(6):33-36.
- [7] 黄智敏,陈卓英,朱红华,等.低水头拦河闸下游消能方式分析[J].广东水利电力职业技术学院学报,2013,11(3):1-4.
- [8] 黄智敏,陈卓英,朱红华,等.低水头拦河闸下游消力池布置探讨[J].广东水利水电,2012(11):14-16.
- [9] 潘旭东,郭宇.山口水电站泄流能力及消能方式研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(2):46-49.
- [10] 张力,赖克华,周招.阶梯式消能工在低水头溢流坝中的应用[J].水电与新能源,2015(1):26-28.
- [11] 张宇,刘晓平,苏天宇,等.低水头枢纽消力墩位置对消能效果的影响[J].水运工程,2016(5):88-91.
- [12] 史志鹏,张根广,何婷婷.低水头辅助消能工水力特性数值模拟计算研究[J].水电能源科学,2011,29(6):106-108.
- [13] 刘莲萍.不同墩形下低水头电站消能效果试验研究[J].水利科技与经济,2015,21(9):95-96.
- [14] 胡明.低水头、大单宽流量泄洪消能形式试验研究[J].水力发电学报,2013,32(5):158-162.
- [15] 代尚逸,刁明军,袁晓龙,等.低水头缓坡溢洪道挑坎体型优化试验研究[J].西南民族大学学报(自然科学版),2013,39(2):233-236.
- [16] 陈亮,王月华.低水头水闸消力池三维数值模拟[J].浙江水利科技,2016,44(6):9-13.
- [17] 唐文超,程观富,陈胖胖,等.低水头条件下常用底流消力池的对比研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(3):408-411.
- [18] 刘晓平,周千凯,周俊,等.低水头电站导墙布置对进水口流态的影响[J].长江科学院院报,2011,29(5):21-25.
- [19] 沈鑫.水电站溢洪道中墩尾部水翅消减方案试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):201-204.
- [20] 方森松,刘晓平,吴国君,等.低水头水利枢纽泄水闸闸前冲刷研究[J].长江科学院院报,2011,28(6):25-29.
- [21] 朱红华.电白县共青河拦河闸坝重建工程水工断面模型试验报告[R].广州:广东省水利水电科学研究院,2015.
- [22] 陈卓英.电白县共青河拦河闸坝重建工程水工整体模型试验报告[R].广州:广东省水利水电科学研究院,2015.

(上接第 8 页)

- [11] 中华人民共和国交通运输部,中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口工程荷载规范:JTSL44-1-2010[S].北京:人民交通出版社,2010:34-39.
- [12] 中华人民共和国交通运输部,中交公路规划设计院.公路桥涵通用规范:JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社,2015:8-14.
- [13] 于文,葛学礼,朱立新,等.山区乡村房屋模型水流作用试验[J].北京交通大学学报,2011,35(1):24-27.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.砌体结构设计规范:GB50003-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [15] 李英民,韩军,刘立平,等.ANSYS在砌体结构非线性有限元分析中的应用研究[J].重庆建筑大学学报,2006,28(5):90-96.
- [16] Xiao S Y, Sun Y F. Numerical analysis of the rural building due to flood impact[J]. Advanced Materials Research, 2011,255/260:1857-1861.
- [17] 李碧雄,谢和平,王哲,等.汶川地震后多层砌体结构震害调查及分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(4):19-26.
- [18] 中华人民共和国建设部.蓄滞洪区建筑工程设计规范:GB50181-93[S].北京:中国计划出版社,1993.
- [19] 王章立,王威.蓄滞洪区风浪要素计算的探讨[J].水利水电技术,2000,31(8):35-36.
- [20] 何建京.明渠非均匀流糙率系数及水力特性研究[D].南京:河海大学,2003.
- [21] 刘刚,滕凯.梯形断面均匀流水深的近似计算公式[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):39-42.