DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.04.023

拦河闸下游两级消力池布置和计算研究

黄智敏,陈卓英,付波,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:通常根据拦河闸泄洪水力条件、闸址地形和地质条件、两岸翼墙和堤围的安全、工程施工和投资等,拦河闸 下游可选择设置一级或两级消力池。本文对拦河闸下游两级消力池的布置和水力计算方法进行了分析,提出了相 应的布置和计算方法:①首先确定一级消力池水平段池底高程,计算消力池末端尾坎的合理高度和水平段池长,使 一级消力池内形成稳定的水跃;②根据拦河闸闸址下游河道水位条件,在满足二级消力池出流与下游河道水流为 缓流衔接的条件下,初拟二级消力池末端尾坎顶高程,计算出消力池池深和池长,使消力池出流平顺与下游河道水 流衔接。本文成果得到了水力模型试验研究实例的验证,可供类似工程设计参考。

关键词: 拦河闸; 消力池; 消能; 消力池布置

中图分类号:TV653.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)04-0115-04

Study on calculation and layout of two stage stilling pool at downstream of sluice

HUANG Zhimin, CHEN Zhuoying, FU Bo, ZHONG Yongming

(Key Laboratory of Hydrodynamics of Guangdong, Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Based on the conditions of flood-releasing hydraulic, topograph and geology, wing walls of two bank and embankment safety, construction and investment etc., one or two stages of stilling basin can be chosen in the downstream of barrage. The paper analyzed the layout and hydraulic calculation method of two stages stilling basin in downstream of sluice that are first, determining the horizontal bottom's elevation of primary stilling basin, and then calculating the reasonable height of stilling basin end sill and horizontal section length which can form stable hydraulic jump in stilling basin; secondly, according to the river water level conditions at the downstream of sluice, and meeting two stages stilling basin flow joint with the downstream river flow in subcritical flow conditions, protocoling preliminarily the top elevation of the second stage stilling, and then calculating the depth and length of stilling basin. which make stilling basin out flow joint smoothly with downstream river flow. The results verified by hydraulic model test of the examples can provide a reference for similar engineering design.

Key words: sluice; stilling pool; energy dissipation; layout stilling pool

1 研究背景

底流消能是低水头拦河闸泄流消能最为常用的 一种方法。通常可根据拦河闸泄流落差、闸址地形 和地质条件、两岸翼墙和堤围的安全、工程施工和投 资等,选择修建一级或两级消力池。目前,由于众多 的拦河闸下游河道河床下切、水位降低,造成拦河闸 下游消能工出险,需进行除险改造,拦河闸下游消能 工除险改造在以下两种情况下,可以优先考虑采用 两级消力池布置:①现状消力池仍可加以利用;② 若现状消力池无法使用,但闸下游采用一级消力池 布置会使消力池两岸端翼墙过高、影响两岸堤围的 稳定和安全,或工程投资过大、施工困难等。因此, 以上两种情况可在现状消力池加固改造或重建的基 础上,在其下游增设二级消力池,采用分级消能以确 保工程的安全运行。

由于拦河闸下游采用两级或多级消力池的水流 条件较复杂^[1-3],其体型布置也相对较复杂,相关的 研究成果所见不多。本文对拦河闸下游两级消力池 体型和水力参数进行分析和计算,并给出相应的布

基金项目:广东省水利科技创新项目(2012-04)

作者简介:黄智敏(1957-),男,广东惠州人,硕士,教授级高级工程师,从事水工水力学及河流动力学研究。

收稿日期:2014-02-23; 修回日期:2014-03-23

2 拦河闸下游两级消力池布置和分析

2.1 消力池体型和水力参数

由文献[4]等,拦河闸下游消力池体型和水力 参数计算见图1。

跃后水深 h₂:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \tag{1}$$

$$L_{si} = L_s + \beta L_i \tag{2}$$

$$L_j = 6.9(h_2 - h_1) \tag{3}$$

$$S = \sigma h_2 - t - \Delta Z \tag{4}$$

式中: h_1 为消力池进口收缩断面水深; Fr_1 为消力 池进口收缩断面佛劳德数; L_s 为消力池斜坡段水平 投影长度; L_j 为水跃长度; β 为水跃长度校正系数, 可取0.7 ~ 0.8; σ 为水跃淹没度,可取 σ = 1.05 ~ 1.1; t 为消力池下游水深; ΔZ 为消力池末端出口水 面落差。

由以上公式分析和有关的文献成果介绍^[5],消 力池池长随拦河闸泄洪流量增大而增加,其通常可 由拦河闸最大泄洪流量来确定;而消力池池深应由 拦河闸各级泄洪流量计算的池深最大值*S*_m确定。



图1 拦河闸下游消力池体型和水力参数示意图

2.2 一级消力池布置和分析

通常,设置两级消力池的拦河闸下游一级消力 池在中小洪水流量(甚至大洪水流量)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,在拦河闸各级洪水流量泄流条件 下,一级消力池内应形成稳定的水跃,不应出现折冲 水流、远驱式水跃等不良流态,池末端尾坎出流应较 平稳沿下游陡坡段进入二级消力池。

图 2 为一级消力池及其水力参数示意图。为了 使一级消力池内形成稳定的水跃,应满足消力池尾 坎前缘水深(*H* + *h*) > *h*₂(跃后水深)、水平段池长 *L* > *βL_j*(水跃长度)的要求。根据文献[6]等,一级 消力池布置要求为:① 为了使消力池尾坎前缘能够 形成正常的水深值(H+h), 若 $(H+h)/h_2 = 1.1 ~$ 1.2,则要求 $L/L_j = 1 ~ 0.95$; ②若 $(H+h)/h_2 =$ 1.2 ~ 1.3,则 $L/L_j = 0.95 ~ 0.85$ 。因此, 工程设计 中, 可根据工程布置、地质和地形、施工条件等, 先确 定一级消力池水平段池长底板顶高程, 再计算出消 力池末端的尾坎高度 H (即池深 S)和水平段池长 L等; 同时, 一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, 增加水流消能率, 减小消 力池的长度。

在现状的拦河闸下游消力池除险改造中,若其 消力池底板仍可利用或需在底板面层铺设一层钢筋 砼层进行加固,为了满足消力池池深的要求,可将其 池末尾坎顶适当加高,甚至将尾坎顶加高至略高于 拦河闸闸室堰顶高程,此时应计算复核在设计洪水 和校核洪水等洪水频率条件下的拦河闸泄流能力是 否能够满足设计的要求,计算复核可在相应洪水流 量的闸下游水位条件下,一级消力池尾坎顶过水面 积大于拦河闸闸孔总净过水面积^[7]。



图 2 一级消力池水力参数示意图

2.3 二级消力池布置和分析

(1)根据拦河闸各级泄洪流量和闸址下游水位 Z与泄流量Q关系,二级消力池末端尾坎出流与下 游河道(海漫段)水流衔接应为缓流衔接,出池水流 不应出现较明显的跌流和二次水跃;并根据拦河闸 各级泄洪流量和相应的下游河道水位、消力池下游 海漫段材料等,确保消力池出池流速小于海漫段的 抗冲流速。因此,工程设计中可初拟二级消力池末端 尾坎顶高程,然后再计算相应的池深S值,以计算的 最大值S_m为池深。

(2)为了减短二级消力池的池长,通常可采用: ①池内设置消力墩等辅助消能工;②在一级消力池 尾坎下游陡坡段上设置阶梯,增大陡坡段泄流消能 率,减小陡坡段泄流流速及二级消力池入池流速 等^[7-8]。

3 两级消力池布置和计算实例

高堂拦河闸为大(2)型水闸工程,设置10孔泄 洪闸孔,闸室堰顶高程4.8m(珠基,下同),单孔闸 净宽12.5m,总净宽为125m,闸中墩和边墩厚为

117

2.0 m、缝墩厚3.0 m,拦河闸总宽度为151.08 m;拦 河闸下游采用底流消能,消力池总宽度为147.08 m。拦河闸上游正常蓄水位为8.72 m,设计洪水频 率为50 年一遇(*P*=2%、*Q*=2430 m³/s)。

近年来,由于拦河闸下游河道人为过量采沙,造 成闸下游河床明显下切、水位降低,拦河闸上、下游 河床高差达约6~7m,水头落差较大,严重影响工 程的安全运行。在高堂拦河闸重建工程设计中,综 合考虑拦河闸两岸堤围安全、闸下游陡坡段及消力 池两岸翼墙稳定、地质条件、工程施工及投资等,确 定在拦河闸下游修建两级消力池。本文对高堂拦河 闸重建工程两级消力池的布置和计算进行分析。

(1)一级消力池布置和计算。工程设计初拟的 一级消力池底板顶高程为 1.4 m。在各级洪水流量 泄流运行时,一级消力池尾坎出流均为自由出流,需 确定一级消力池合理的尾坎高度 H 和池长 L 。在 水闸上游水位为正常蓄水位(8.72 m)运行条件下, 水闸闸门开度以 e =0.25 m 分档开启泄流,闸门控 泄运行的闸门最大开度 e =2.5 m。

一级消力池尾坎高度 H_{\circ} 一级消力池尾坎高度 H 随水闸泄洪流量增大而增加,本文以设计洪水频率流量(P = 2%、 $Q = 2 430 \text{ m}^3/\text{s}$)泄流运行条件计算一级消力池尾坎高度 $H : ①取消力池进口断面流速系数 <math>\Phi = 0.97$,计算出消力池的跃前和跃后水深 $h_1 \pi h_2$ 值;②初步拟定尾坎高度 H 值,由文献[9]查出消力池尾坎泄流流量系数 m_0 ,计算相应的尾坎顶水深 h (表 1)。

由表1可见,当选取一级消力池尾坎高度 H = 2.4 m时,计算的尾坎顶水深 h = 4.03 m,则有 H + h = 1.17 h₂。

表1 一级消力池尾坎高度 H 计算 %, m, m³/s. m, m

洪水	面し海	池单	台水	跃前	跃后	尾坎	尾坎	尾坎	
频率	町上研	宽流	心小	水深	水深	高度	流量	顶水	H + h
Р	水型	量 q	天 E ₀	h_1	h_2	H	系数 m	ŋ深h	
2	9.8	16.5	8.4	1.46	5.49	2.4	0.46	4.03	6.43

一级消力池池长 L_0 由式(3),计算得设计洪水 频率(P = 2%)流量的水跃跃长 $L_j = 27.78$ m。由 于已有(H + h) = 1.17 h_2 ,则近似取一级消力池水 平段池长 $L = 0.965L_j = 26.8$ m。为了缩短消力池 池长,在消力池进口端设置一排消力墩(墩高 2.0 m、墩宽和墩间距均为 1.5 m),则将消力池池长缩 短为 16.9 m(16.9/26.8 = 0.63)(图 3)。

(2) 二级消力池布置和计算。为了确保二级消

力池出流与下游河道水流缓流衔接,以水闸最小闸 门开度 e = 0.25 m 初始泄流条件(消力池单宽流量 $q = 1.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 、闸下游水位 Z = -1.2 m),同时 也考虑到各级洪水频率流量泄流的消力池末尾坎顶 流速 $v \leq 2.5 \text{ m/s}$,初拟消力池末尾坎顶高程为 -2.1 m。因此,在闸门开度 e = 0.25 m初始泄流 条件下,二级消力池尾坎顶水深 t = 0.9 m,相应 Fr= 0.49。

选取二级消力池进口断面流速系数 $\Phi = 0.94$ ~0.96,先假定二级消力池池深值,再计算相应的池 深 $S(\pm 2)$ 。由表 2 可见,在最小闸门开度 e = 0.25 m 初始泄流工况下,其池深值为最大(S = 0.87 m);随着水闸泄洪流量逐渐增大,闸下游河道水位 上升的速率加快,计算的池深值减小,在闸门开度 $e \ge 0.5$ m 泄流运行时,计算的二级消力池池深多为 负值或池深值较小。因此,经综合考虑和分析,本工 程实际选用池深S = 1.0 m,由此可得出二级消力池 池底高程为 -3.1 m。

表 2 二级消力池池深 S 计算 %, m, m³/s·m

洪水 频率 P	闸门 开度 <i>e</i>	池单 宽流 量 q	一级池 尾坎顶 全水头 h ₀	二级池 底总 水头 <i>E</i> 1	跃前 水深 <i>h</i> 1	跃后 水深 h ₂	下游 水位 <i>Z</i>	下游 水深 t	池深 <i>S</i>
	0.25	1.3	0.88	7.65	0.11	1.69	-1.2	0.9	0.87
	0.5	2.28	1.24	7.14	0.21	2.18	0.5	2.6	-0.19
	1.0	4.22	1.82	7.72	0.37	2.96	1.29	3.39	-0.11
	1.5	6.0	2.27	8.17	0.52	3.53	1.99	4.09	-0.18
	2.0	7.59	2.65	8.55	0.64	3.97	2.43	4.53	-0.13
	2.5	9.3	3.0	8.96	0.77	4.41	2.72	4.82	0.05
2	全开	16.5	4.37	10.27	1.3	5.93	4.78	6.88	-0.29

注:①水跃淹没度 σ 取1.1; ②在闸门开度 e =0.5~2.0 m 及 P =2% 的组次计算中,初设定的池深 S =0。

由选定的二级消力池池底高程 -3.1 m,计算得 设计洪水频率 (P = 2%)流量的水跃跃长 $L_j =$ 33.98 m,可取二级消力池水平段池长 $L = 0.8 L_j =$ 27.18 m。为了缩短二级消力池池长,在消力池进口 端设置一排消力墩(墩高1.2 m、墩宽和墩间距均为 1.2 m),则将消力池池长缩短为 22 m(22/27.18 = 0.81)。

由此,可得出高堂拦河闸重建工程下游两级消 力池体型初拟布置方案见图3。



(3) 水力模型试验论证。为了验证上述计算成 果的合理性,对图 3 的高堂拦河闸重建工程下游消 能工布置进行水力模型试验^[10]。试验表明: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,消力池池深和池长满足运行的要求,池末尾坎 出流沿下游陡坡段较平顺进入二级消力池;②二级 消力池水流消能效果较好,出池水流较平顺与下游 河道水流衔接。因此,本文计算初拟的拦河闸下游 两级消力池布置和体型是合理的,得到了工程设计 和施工的采用。

4 结 语

本文根据拦河闸下游消力池水力计算方法,对 其下游两级消力池的布置进行分析,提出拦河闸下 游两级消力池体型布置和水力计算方法:

(1)根据拦河闸泄洪水力条件、闸址地形和地 质条件、消力池两岸翼墙和堤围的安全、工程施工条 件等,先确定一级消力池水平段池底板高程,再计算 消力池末端尾坎的合理高度和水平段池长,使一级 消力池内形成稳定的水跃;此外,在满足拦河闸泄流 能力要求和工程布置的前提下,可适当加高尾坎的 高度 H,使(H+h)≥1.2 h₂,以尽量减小消力池的 池长,节省工程投资。

(2)根据各级洪水流量的闸址下游水位,在满 足二级消力池出流与下游河道水流为缓流衔接的条 [10 件下,先初拟二级消力池末端尾坎顶高程,然后再计 算出二级消力池池深和池长,使二级消力池出流较

(上接第114页)

- [11] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. Grey integer programming: An application to waste management planning under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 1995,83(3):594-620.
- [12] Liu B D, Iwamura K. Chance constrained programming with fuzzy parameters [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998,94(2):227-237.
- [13] He L, Huang G H, Lu H W. A simulation based fuzzy chance – constrained programming model for optimal groundwater remediation under uncertainty [J]. Advances in Water Resources, 2008,31(12):1622 – 1635.
- [14] Zhang Y M, Huang G H. Fuzzy robust credibility constrained programming for environmental management and planning [J]. Journal of the Air &Waste Management Association, 2010,60(6): 711 – 721.
- [15] Zhang Y M, Huang G H, Lin Q G, et al. Integer fuzzy

平顺与下游河道水流衔接。

本文成果得到了水力模型试验研究实例的验证,可供类似工程设计和运行参考。

参考文献:

- [1] 宋兵伟,贺清录,潘绍财.高落差水闸消能工优化设计 [J].水电能源科学,2011,29(11):126-128+215.
- [2] 王 胜,李连侠,孙 炯,等. 多级连续消力池水跃的水力特 性模型试验[J].水利水电科技进展,2012,32(4):23 -28.
- [3] 邓飞. 潮州供水枢纽西溪拦河水闸二级消力池设计[J]. 吉林水利,2009,(11):10-12.
- [4] 中华人民共和国水利部. SL 265 2001 水闸设计规范 [S].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [5] 谢景惠,陈菊清. 消力池最不利设计条件的分析与计算[J]. 水利水电技术,1995,(12):7-11.
- [6] 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.
- [7] 黄智敏,陈卓英,朱红华,等.低水头拦河闸下游一、二级 消力池布置研究[J].水利水电科技进展,2013,33(6): 33-36.
- [8] 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+36.
- [9] 武汉水利电力学院水力学教研室.水力计算手册[M]. 北京:水利电力出版社,1980.
- [10] 广东省水利水电科学研究院. 饶平县高堂水闸重建工 程水工断面模型试验研究报告[R]. 广州:广东省水利 水电科学研究院,2013.

credibility constrained programming for power system[J]. Energy, 2012,38(1):398-405.

- [16] Liu Baoding. Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2012.
- [17] Dubois D, Foulloy L, Mauris G, et al. Probability possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities [J]. Reliable Computing, 2004, 10 (4):273 297.
- [18] Huang G H, Sun W, Nie X H. Development of a decision
 support system for rural eco environmental management in Yongxin County, Jiangxi Province, China [J].
 Environmental Modelling & Software, 2010, 25(1):24 –
 42.
- [19] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility
 [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 100(1):9-34.