

池末尾坎自由出流的消力池布置研究

黄智敏^{1,2}, 付波^{1,2}, 陈卓英^{1,2}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635)

摘要:池末尾坎自由出流的拦河闸下游消力池流态较复杂,其水力特性和体型布置是工程设计和运行关心的问题。通过水力模型试验研究,对尾坎自由出流的消力池池长和消力池末端尾坎高度的关系进行分析,提出消力池体型布置方法:首先在消力池水平段池底高程选定的基础上,根据消力池进口断面弗劳德数,初选池末尾坎高度;其次通过调整尾坎高度和计算尾坎顶水深,使两者之和与跃后水深的比值在1.15~1.2之间,则消力池水平段池长与跃长的比值可减小至0.8~0.85。该方法可较合理地确定尾坎自由出流的消力池水力和体型参数。

关键词:拦河闸;消力池;尾坎;自由出流;试验研究

中图分类号:TV653 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0068-05

Study on layout of stilling basin with free discharge at end sill of basin//HUANG Zhimin^{1,2}, FU Bo^{1,2}, CHEN Zhuoying^{1,2} (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Hydrodynamics, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The flow patterns of a stilling basin with free discharge at the end sill of the basin downstream of a sluice are complex. Thus, the hydraulic characteristics and layout of the basin are significant to the engineering design and operation. Based on a hydraulic model test, the relationship between the stilling basin length and the end sill height was analyzed, and the layout method of the stilling basin is put forward: First, according to the Froude number in the inlet section of the stilling basin, the height of the end sill is preliminarily selected on the basis of the selected bottom elevation of the horizontal segment. Second, through adjustment of the end sill height and calculation of the water depth at the top of the end sill, the ratio of the sum of the two variables mentioned above to the water depth after the hydraulic jump is controlled within a range of 1.15 to 1.2, and then the ratio of the length of the horizontal segment of the stilling basin to the length of hydraulic jump can be reduced to within the range of 0.8 to 0.85. This method can reasonably determine the hydraulic and shape parameters of the stilling basin with free discharge at the end sill.

Key words: sluice; stilling basin; end sill; free discharge; test study

拦河闸下游河道河床下切、水位降低之后,若其下游消力池经修复和改造后仍可利用,可在修复和改造后的消力池下游修建二级消力池,采用分级消能以解决闸下游消能防冲的问题。在实际工程运行中,由于部分拦河闸下游河道水位降低较为明显,因此,在拦河闸各级洪水流量泄流条件下,其下游一级消力池(即经修复和改造后的原拦河闸下游消力池)末端尾坎出流多为自由出流,池内流态相对较复杂。文献[1]对自由出流的消力池末端尾坎相对水深 $(T+H)/h_2$ 与池长 L 的关系进行了初步分析(图1)。文献[2]对水跃下游断面的尾坎高度 T 进行研究,提出了使水跃稳定的相对坎高 T/h_1 与跃前断面弗劳德数 Fr_1 的关系式。由于尾坎自由出流消

力池的水流条件和体型较复杂,现阶段相关的研究成果仍较少^[3-10]。本文对尾坎自由出流的消力池水力特性和体型布置进行水力模型试验和分析。

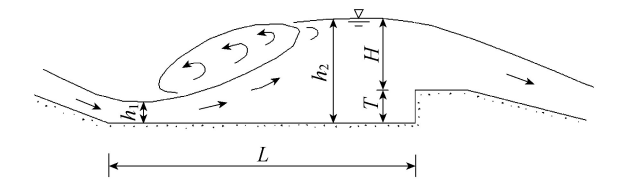


图1 自由出流消力池水力和体型参数示意图

1 消力池运行流态和体型布置分析

通常,常规的拦河闸下游消力池体型布置的方法如下:根据闸上游水位 Z 、闸门开度 e 、泄流单宽流

量 q 等,选取消力池进口断面的流速系数 ϕ ,由有关的消力池计算公式^[11-12],计算消力池进口跃前水深 h_1 、跃后水深 h_2 、水跃长度 L_j 、池深 S 等,消力池水平段池长 L 可取为自由水跃长度 L_j 的 70%~80%,池深 S 、池下游水深 t 、池末端出口水面落差 ΔZ 之和 $(S+t+\Delta Z)$ 与 h_2 之比约为 1.05~1.1,以使消力池内形成一定淹没度的水跃,见图 2。

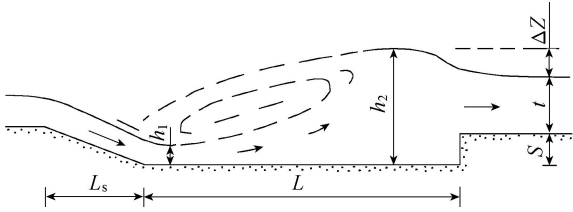


图 2 消力池水力和体型参数示意图

分析图 1,为了使自由出流的消力池内形成稳定水跃,应满足消力池末端尾坎前缘水深 $(T+H) \geq h_2$ 和水平段池长 $L \geq L_j$ 的要求。由于尾坎自由出流的消力池水力特性较复杂,池末尾坎的高度及位置等不同,会影响消力池的流态、水力参数等,给计算和分析带来一定的难度,需借助水力模型试验对消力池水力特性和体型参数进行研究。

2 水力模型试验设计

拦河闸下游消力池水力模型试验在 50 cm 宽的玻璃水槽中进行,为 1:50.8 的正态模型。拦河闸闸室泄流净宽 $B=23.2$ m,闸墩厚度为 2.2 m,取水平段池底高程为 0.0 m,闸室堰顶高程为 1.5 m,闸下游消力池净宽 $B_0=25.4$ m ($B/B_0=0.913$)。模型试验的闸上游水位 Z 分别取 7.5 m、10.5 m 和 14.0 m,水平段池长 L 分别取 18 m 和 23.5 m,池末端尾坎高度 T 分别为 0.75 m、1.0 m、1.5 m、1.75 m 和 2.0 m,尾坎顶厚度 $b=3$ m,下游陡坡段坡度 $i=1:4$,见图 3。

试验系统包括抽水泵房、供水管道、调节阀、量

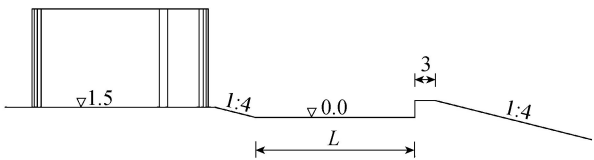


图 3 拦河闸下游消力池布置示意图(单位:m)

水堰、调节尾门和回水渠道等,量测设备和仪器(量水堰和水位测针等)经校正后使用,各试验值经多次量测后,取其平均值。

3 消力池试验结果及分析

3.1 闸门局部开启运行试验

3.1.1 试验方法和流态分析

保持消力池尾坎出流为自由出流,各级闸上游水位下拦河闸闸门局部开启运行时闸口出流均为自由泄流,闸孔泄流单宽流量 q 与闸门开度 e 的关系见图 4。在不同的 Z/L 和 T 的组合下,观测拦河闸下游消力池不出现急流状远驱水跃而形成临界稳定水跃的 $e、q$ 等参数(见表 1、表 2、图 4)。试验表明:①在相同 Z 的条件下,随着 T 的增大,池内形成稳定水跃的 q 相应增大;在相同 T 的条件下,随着 Z 的增大,池内形成稳定水跃的 q 相应减小。②在相同 Z 和 T 的条件下,随着水平段池长 L 的增加,池内形成稳定水跃的 q 相应增大,但增大的幅度较小。③在 $(T+H)/h_2 < 1$ 条件下,池内形成稳定水跃的 $L/L_j > 1$,即水平段池长 L 大于水跃跃长 L_j ;在 $(T+H)/h_2 \geq 1$ 条件下,池内形成稳定水跃的 $L/L_j \leq 1$,此时池内水跃为强迫水跃,池末尾坎位置对池内水跃形态的影响较大。

3.1.2 $T/h_1 \sim Fr_1$ 关系

将表 1、表 2 中各试验组次的 $T/h_1 \sim Fr_1$ 关系绘于图 5,发现 T/h_1 随 Fr_1 增大而增大,两者近似呈线性关系。

表 1 稳定水跃的消力池水力和体型参数(池长 $L=18$ m)

Z/m	T/m	$q/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	h_1/m	Fr_1	h_2/m	L_j/m	$q_0/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	H/m	$(T+H)/h_2$	L/L_j	T/h_1
7.5	0.75	2.80	0.25	7.16	2.41	14.90	2.56	1.44	0.91	1.21	3.00
	1.00	4.59	0.41	5.53	3.03	18.05	4.19	1.95	0.97	1.00	2.42
	1.50	13.42	1.24	3.10	4.86	24.97	12.25	3.74	1.08	0.72	1.21
10.5	0.75	1.76	0.13	11.81	2.13	13.78	1.61	1.06	0.85	1.31	5.73
	1.00	2.60	0.19	9.71	2.57	16.39	2.37	1.36	0.92	1.10	5.15
	1.50	8.02	0.61	5.38	4.35	25.78	7.32	2.79	0.99	0.70	2.46
	1.75	12.20	0.93	4.34	5.26	29.89	11.14	3.48	0.99	0.60	1.88
	2.00	18.33	1.41	3.49	6.29	33.68	16.73	4.52	1.04	0.54	1.42
14.0	0.75	1.17	0.07	18.57	1.91	12.64	1.06	0.81	0.82	1.42	10.14
	1.00	2.05	0.13	13.65	2.48	16.20	1.88	1.16	0.87	1.11	7.58
	1.50	4.07	0.26	9.64	3.46	22.04	3.72	1.80	0.96	0.82	5.70
	1.75	6.29	0.41	7.65	4.24	26.41	5.74	2.39	0.98	0.68	4.27
	2.00	9.46	0.62	6.25	5.15	31.25	8.62	3.11	0.99	0.58	3.25

注: Z 为拦河闸上游水位; q 为闸孔泄流单宽流量; q_0 为消力池尾坎泄流单宽流量。

表 2 稳定水跃的消力池水力和体型参数(池长 $L=23.5\text{ m}$)

Z/m	T/m	$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	h_1/m	Fr_1	h_2/m	L_j/m	$q_0/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	H/m	$(T+H)/h_2$	L/L_j	T/h_1
7.5	0.75	3.40	0.30	6.51	2.64	16.15	3.10	1.61	0.89	1.46	2.48
	1.00	5.85	0.53	4.86	3.39	19.72	5.34	2.29	0.97	1.19	1.89
	1.50	14.91	1.38	2.93	5.07	25.48	13.61	4.00	1.09	0.92	1.09
10.5	0.75	2.03	0.15	10.97	2.28	14.68	1.86	1.16	0.84	1.60	4.93
	1.00	3.44	0.26	8.38	2.93	18.45	3.14	1.62	0.89	1.27	3.88
	1.50	8.80	0.67	5.17	4.55	26.79	8.03	2.97	0.98	0.88	2.25
	1.75	13.53	1.04	4.07	5.49	30.72	12.35	3.74	1.00	0.77	1.68
	2.00	20.30	1.57	3.30	6.58	34.57	18.52	4.82	1.04	0.68	1.27
14.0	0.75	1.57	0.10	15.94	2.20	14.52	1.44	0.99	0.79	1.62	7.50
	1.00	2.56	0.17	12.20	2.77	17.94	2.34	1.35	0.85	1.31	6.06
	1.50	4.96	0.32	8.72	3.79	23.94	4.53	2.04	0.94	0.98	4.69
	1.75	7.72	0.50	6.96	4.68	28.83	7.05	2.73	0.96	0.82	3.50
	2.00	11.25	0.73	5.72	5.58	33.43	10.27	3.35	0.96	0.70	2.73

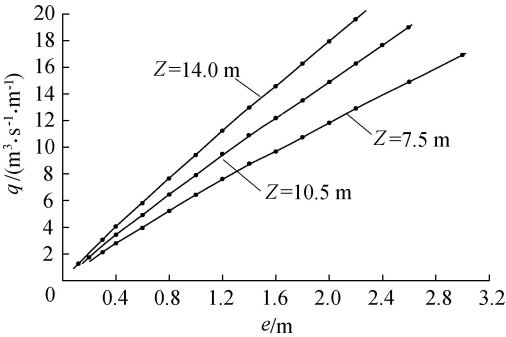


图 4 闸门局部开启 $q \sim e$ 关系

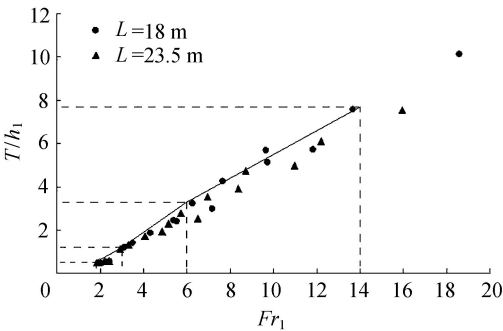


图 5 $T/h_1 \sim Fr_1$ 关系

表 3 稳定水跃的消力池水力和体型参数(池长 $L=18\text{ m}$)

Z/m	T/m	E_0/m	$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	h_1/m	Fr_1	h_2/m	L_j/m	H/m	$(T+H)/h_2$	L/L_j	T/h_1
5.12	0.75	5.58	11.89	1.35	2.43	4.00	18.31	3.56	1.08	0.98	0.56
6.26	1.00	6.87	18.02	1.87	2.25	5.09	22.20	4.60	1.10	0.81	0.54
8.49	1.50	9.44	33.06	3.02	2.01	7.21	28.91	6.74	1.14	0.62	0.50
9.53	1.75	10.64	41.09	3.57	1.94	8.19	31.89	7.72	1.16	0.56	0.49
10.61	2.00	11.92	50.48	4.18	1.89	9.25	35.00	8.64	1.15	0.51	0.48

注: E_0 为消力池作用总水头。

表 4 稳定水跃的消力池水力和体型参数(池长 $L=23.5\text{ m}$)

Z/m	T/m	E_0/m	$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	h_1/m	Fr_1	h_2/m	L_j/m	H/m	$(T+H)/h_2$	L/L_j	T/h_1
5.2	0.75	5.67	12.32	1.39	2.41	4.08	18.63	3.65	1.08	1.26	0.54
6.37	1.00	7.00	18.81	1.94	2.22	5.21	22.56	4.75	1.10	1.04	0.52
8.76	1.50	9.75	35.05	3.16	1.99	7.47	29.76	7.00	1.14	0.79	0.48
9.91	1.75	11.09	44.35	3.79	1.92	8.57	32.97	8.06	1.15	0.71	0.46
11.15	2.00	12.56	55.62	4.52	1.85	9.77	36.21	9.07	1.13	0.65	0.44

3.1.3 $L/L_j \sim (T+H)/h_2$ 关系

选取消力池进口收缩水深断面流速系数 $\phi = 0.94 \sim 0.97$ 、池末端尾坎泄流流量系数 $m_0 = 0.33 \sim 0.4$ ^[2],由消力池和堰流有关计算公式^[2,11],计算出各组次消力池进口跃前水深 h_1 、跃后水深 h_2 、水跃长度 L_j 、尾坎顶水深 H 等(表 1、表 2),将 $L/L_j \sim (T+H)/h_2$ 的关系绘于图 6 得:①相对池长 L/L_j 随淹没度 $(T+H)/h_2$ 的增大而减小;②忽略图 6 中个别较离散的试验点,当 $(T+H)/h_2 = 0.9 \sim 1$ 时,可取 $L/L_j = 1 \sim 1.3$;当 $(T+H)/h_2 = 1 \sim 1.2$ 时,可取 $L/L_j = 0.8 \sim 1$ 。

3.2 闸门全开运行试验

闸门全开运行的消力池作用水头相对较小,消力池进口断面 Fr_1 相应减小,池内形成临界稳定水跃的 T/h_1 与 Fr_1 的比值比闸门局部开启运行时小(见表 3、表 4、图 5)。

$L/L_j \sim (T+H)/h_2$ 的关系与闸门局部开启运行的相应关系一致,随着 $(T+H)/h_2$ 的增大, L/L_j 相应减小。当尾坎高度 T 较小时($T=0.75\text{ m}$ 、 1.0 m),出现了 $(T+H)/h_2 > 1$ 、 $L/L_j > 1$ 的情况(见表 3、表 4、图 6)。分

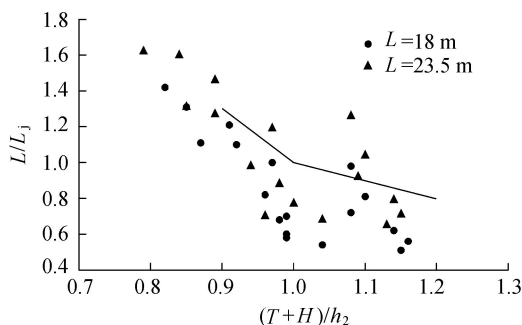


图6 $L/L_j \sim (T+H)/h_2$ 关系

析其原因为:此时尾坎位于水跃的下游($L > L_j$),尾坎位置对池内流态影响较小^[2],在确保消力池内水跃为稳定水跃的条件下,可将尾坎往池上游移动至水跃范围内(即 $L/L_j \leq 1$),使池内水跃形成强迫水跃;当 $(T+H)/h_2$ 值较大时, L/L_j 值可相应取小些。如表3、表4的 $T=0.75$ m 组次试验中,消力池 $(T+H)/h_2 = 1.08$,若将其 L/L_j 值取0.92,池内仍形成临界稳定水跃; $T=1.0$ m 组次的试验情况也类似。

4 消力池水力和体型参数选取分析

4.1 消力池末端尾坎高度

通常,消力池水平段池底高程是由工程布置、地形和地质条件、工程施工和投资情况等确定的,在设计泄洪流量条件下,可先设定池末尾坎的高度,通过反复试算得出形成一定淹没度水跃的尾坎高度,然后再选取合理的池长^[13]。

分析可知,在给定池底高程的条件下,形成稳定水跃的池末尾坎高度 T 与其池进口的 h_1 和 Fr_1 等有关。由本文试验资料(图5, $Fr_1 > 14$ 的试验点较少,故舍去),可得出尾坎自由出流的消力池内形成临界稳定水跃的 $T/h_1 \sim Fr_1$ 关系为

$$T/h_1 = \begin{cases} (0.28 \sim 0.4) Fr_1 & 1.8 \leq Fr_1 \leq 3 \\ (0.4 \sim 0.55) Fr_1 & 3 < Fr_1 \leq 6 \\ 0.55 Fr_1 & 6 < Fr_1 \leq 14 \end{cases} \quad (1)$$

计算时可由 Fr_1 值按线性插值计算出各式的系数 C ($C = (T/h_1)/Fr_1$),然后再计算相应的 T/h_1 。

4.2 消力池水平段池长

由于池末尾坎的工程量和投资额比水平段池长小得多,因此,在不影响拦河闸泄流能力的前提下,应优先考虑设置较高的尾坎,即适当增大 $(T+H)/h_2$,以尽量减小水平段池长 L 。由本文试验成果可知,当 $(T+H)/h_2 = 1.15 \sim 1.2$ 时,其相对池长 $L/L_j = 0.8 \sim 0.85$ 。

综上所述,在工程计算中,根据设计洪水条件的 Fr_1 值,可由式(1)初步选取消力池末端尾坎高度 T ,然后计算出尾坎顶水深 H ,并适当调整尾坎高度

T ,使尾坎淹没度 $(T+H)/h_2 = 1.15 \sim 1.2$,其相对池长 L/L_j 相应可取 $0.8 \sim 0.85$ 。

5 算例

乌石拦河闸枢纽设置15孔泄洪闸孔,闸室堰顶高程为13.0 m,单孔闸净宽为7.6 m,总净宽为114 m;其下游消力池段总宽度为131.6 m。近年来,由于拦河闸下游河床下切明显、水位急速降低,池末端尾坎出流均为自由出流,严重影响工程安全运行。除险改造工程设计拟在现状消力池改造基础上,在其下游修建二级消力池。设计初拟的一级消力池水平段池底高程为10.6 m,池长 $L=20$ m,尾坎高度 $T=1.75$ m。

在50年一遇洪水流量($P=2\%$, $Q=3500$ m³/s)条件下运行时,闸下游一级消力池内出现急流状远驱水跃,急流撞击池末尾坎后跃起并跌向下游,流态极差。模型试验在消力池内设置两排消力墩(墩高1.8 m,墩宽与墩间距均为1.4 m,消力墩呈梅花状排列)之后,消除了池内远驱水跃,池内形成稳定水跃^[14-15]。采用本文方法对乌石拦河闸下游一级消力池进行布置:

a. 由闸上游水位 $Z=19.45$ m、闸孔泄流单宽流量 $q=30.7$ m³/(s·m)和消力池进口断面流速系数 $\phi=0.98$,计算得出消力池 $h_1=2.66$ m, $Fr_1=2.26$, $h_2=7.27$ m, $L_j=31.8$ m;由式(1)得 $T/h_1=0.737$, $T=1.96$ m;以尾坎泄流单宽流量 $q_0=26.6$ m³/(s·m)、流量系数 $m_0=0.42$,计算得 $H=5.89$ m。从而得到 $(T+H)/h_2 = 1.08$,由图6查 $L/L_j = 0.92$,计算得 $L=29.26$ m。由此可知,设计初拟的一级消力池($T=1.75$ m、 $L=20$ m)无法形成稳定的水跃。

b. 为了进一步缩短池长,取池末尾坎高度 $T=2.6$ m,则由 $H=5.89$ m、 $(T+H)/h_2 = 1.168$,查 $L/L_j = 0.832$,计算得 $L=26.46$ m。

水力模型试验表明,在 $Q=3500$ m³/s 泄流运行条件下, $T=1.96$ m、 $L=29.26$ m 和 $T=2.6$ m、 $L=26.46$ m 两种布置的消力池内均能形成稳定的水跃,显然后者的效益较高,且均可在池内设置消力墩等辅助消能工,其池长可再缩短25%~30%。

6 结语

根据水力模型试验,对尾坎自由出流的消力池水力特性和体型布置进行研究,提出了其体型布置的初步方法:①在消力池水平段池底高程选定的基础上,计算出消力池的水力参数 h_1 、 Fr_1 、 h_2 和 L_j 等;然后根据 Fr_1 值,初选池末尾坎高度 T 。②通过调整尾坎高度 T 和计算其坎顶水深 H ,使 $T+H$ 与跃后水深 h_2 的比值 $(T+H)/h_2 = 1.15 \sim 1.2$,则消力池水

平段池长 L 与跃长 L_j 的比值 L/L_j 可减小至 0.8 ~ 0.85。

采用本文方法可较合理地确定尾坎自由出流的消力池水力和体型参数,可供类似工程参考。本文试验中消力池水平段池长分别取 18 m 和 23.5 m,池底作用水头为 7.5 ~ 14 m,对不同水平段池长(及不同尾坎高度)和作用水头的自由出流消力池水力特性尚需进一步深入研究。

参考文献:

[1] 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))

[2] 武汉大学水利水电学院水力学流体力学教研室.水力计算手册[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2006.

[3] 孙双科,柳海涛,夏庆福,等.跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J].水利学报,2005,36(10):1188-1193. (SUN Shuangke, LIU Haitao, XIA Qingfu, et al. Study on stilling basin with step-down floor for energy dissipation of hydraulic jump in high dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (10): 1188-1193. (in Chinese))

[4] 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. (WANG Sheng, LI Lianxia, SUN Jiong, et al. An experimental study on characteristics of hydraulic jumps in multiple continuous stilling basins [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (4):23-28. (in Chinese))

[5] 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. (HUANG Zhimin, CHEN Zhuoying, ZHU Honghua, et al. Layout of primary and secondary stilling basin downstream low head barrage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (6):33-36. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 李艳富,韩昌海,杨宇.河床下切对闸坝泄洪消能的破坏及对策[J].水利水运工程学报,2014(6):58-64. (LI Yanfu, HAN Changhai, YANG Yu. Riverbed incision damagable to hydraulic structure and its countermeasures [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014 (6): 58-64. (in Chinese))

[8] 周春天,宁勇.石梁河水库泄洪闸闸下冲刷试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):113-116. (ZHOU Chuntian, NING Yong. Test of scour under sluice gates of Shilianghe Reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000, 28 (2): 113-116. (in Chinese))

[9] 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. (SONG Bingwei, HE Qinglu, PAN Shaocai. Optimization desing of sluice energy dissipator with high head [J]. Water Resources and Power, 2011, 29 (11): 126-128, 215. (in Chinese))

[10] ZARE H K, DOERING J C. Forced hydraulic jumps below abrupt expansions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137: 825-835.

[11] SL265—2001 水闸设计规范[S].

[12] 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.

[13] 黄智敏,陈卓英,付波,等.拦河闸下游两级消力池布置和计算研究[J].水资源水工程学报,2014,25(4):115-118. (HUANG Zhimin, CHEN Zhuoying, FU Bo, et al. Study on calculation and layout of two stage stilling pool at downstream of sluice [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25 (4): 115-118. (in Chinese))

[14] 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. (ZHU Zhanyi. Design of energy-dissipating structure for Wushi Sluice Rehabilitation [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2003 (3): 33-34, 36. (in Chinese))

[15] 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(6):64-66. (ZHU Honghua, HUANG Zhimin, LUO An, et al. Experimental study on energy dissipation in Wushi Sluice [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002 (6): 64-66. (in Chinese))

(收稿日期:2015-06-13 编辑:骆超)

