

# 大淹没度低堰泄流能力研究

吴英卓,姜伯乐,何 勇

(长江科学院 水力学研究所,武汉 430010)

**摘要:**结合某工程实例,对大淹没度低堰选型以及大淹没度对低堰泄流能力的影响进行了研究。研究表明:在大淹没度下运行的低堰,堰的厚度与堰上水头之比  $\delta/H \leq 0.67$ ,且下游堰坡为陡坡的折线型实用堰比相同堰高的WES堰泄流能力大;在大淹没水深下运行的低堰,降低堰顶高程,减小堰高可增大泄流能力,但随着淹没水深的增加,低堰堰高以及堰面形式的变化对泄流能力的影响减小。

**关键词:**低水头;大淹没度;溢流堰;泄流能力

中图分类号:TV135.2

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)08-0021-04

## 1 研究背景

对于只能修建低水头枢纽的工程,采用低堰泄流,其泄流能力直接决定了建筑物布置形式和工程效益的大小。本文研究的某水电站枢纽工程位于长江干流重庆段,不允许工程过多地壅高河道水位,故采用低堰泄流。因长江来流量大,且工程下游水位变幅大,达26.12 m,低堰经常在大淹没水深及大淹没度条件下运行。为了减少上游淹没且为了缩短溢流前缘长度,应尽可能提高低堰的泄流能力,因此对低堰体型及相关影响泄流能力的因素开展了水力学试验研究。本文主要介绍了相关试验研究成果,以期在实际工程设计和运用提供参考。

## 2 工程基本资料及分析

该低堰工程坝址特征水位和流量列于表1,研究的溢流堰特征尺寸为堰顶高程172.0 m、上游堰高

$P_1 = 6$  m、下游堰高  $P_2 = 5$  m、单孔净宽14.0 m。该堰设计水头  $H_d = 197.63 - 172.00 = 25.63$  m,相对堰高  $P_1/H_d = 0.23 < 1.33$  为低堰;宣泄  $p = 20\% \sim 0.05\%$  ( $p$  为洪水频率)洪水时,下游淹没水深  $h_s > 18.0$  m,淹没水深较大;且相应淹没度  $h_s/H_0$  在0.90以上,一般认为  $h_s/H_0 > 0.6$  即进入大淹没度范畴,由此可知该堰的淹没度很大。

## 3 研究成果

低堰的水力特性主要受堰型、堰上水头、上下游堰高、下游水深等诸多因素的影响,本研究主要从堰型、上下游堰面坡度、堰高这3方面对泄流能力的影响着手。

### 3.1 堰型对泄流能力的影响

一般工程应用较多、较为著名的低堰主要有WES型、折线型、驼峰型等实用堰及有坎(或无坎)宽顶堰。不同堰型的低堰,设计流量系数差异较为明显,一般认为,在同等条件下WES型实用堰泄流

表1 坝址特征水位及流量

Table 1 Characteristic water level and flow at the dam site

序号	项目	设计洪峰流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	下泄流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	坝前水位/m	下游水位/m
1	$p = 0.05\%$ (混凝土坝校核洪水)	803.00	803.00	199.33	198.92
	$p = 0.02\%$ (土石坝校核洪水)	853.00	853.00	200.37	200.02
2	$p = 0.2\%$ (大坝设计洪水)	724.00	724.00	197.63	197.18
3	$p = 1\%$	629.00	629.00	195.34	195.07
4	$p = 5\%$	526.00	526.00	193.00	192.68
5	$p = 20\%$	426.00	426.00	—	190.14
6	正常蓄水位	—	—	196.00	—
7	库区防洪控制水位(6—8月)	426.00	426.00	191.50	—

收稿日期:2013-04-17;修回日期:2013-07-01

作者简介:吴英卓(1964-),女,湖北郧西人,高级工程师,主要从事水力学模型试验研究,(电话)15392887407(电子信箱)ckywuyingz@163.com。

能力最大,而宽顶堰的泄流能力最小。对于曲线型实用堰,当  $P_1/H_d \leq 0.2$  时,其泄流能力与宽顶堰相同,而本次研究对象的  $P_1/H_d = 0.23$ ,已接近 0.2,表明曲线型实用堰泄流能力已与宽顶堰接近;因此选择施工相对简单、流量系数介于宽顶堰和曲线型实用堰之间的折线型实用堰作为堰型优化试验的比较堰型,两比较堰型见图 1。

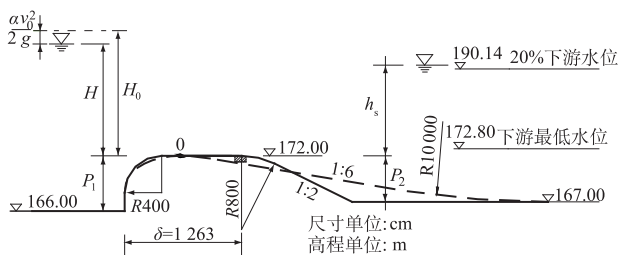


图 1 比较堰型示意图

Fig. 1 Comparison of weir types

图 1 中虚线为 WES-I 型堰,此堰型称为试验堰型 I,其上游堰坡直立,堰顶曲线形式是直接由高堰堰顶移用于低堰,上游堰顶为椭圆弧,堰顶下游曲线以堰顶为原点,满足曲线方程<sup>[1]</sup>:

$$x^{1.85} = 2H_d^{0.85}y \quad (1)$$

为了顺滑衔接,WES 型低堰的下游堰坡必形成缓坡,图 1 所示 WES 堰下游堰坡坡比为 1:6。显然堰高越低,下游堰坡就会越缓,其流量系数  $m$  就越接近宽顶堰。

图 1 中实线为折线型实用堰,此堰型称为试验堰型 II,为便于比较,其上游堰坡亦选择为直立,堰顶为平面,上游堰顶为 1/4 圆弧,堰顶下游通过一段衔接性圆弧接下游堰坡。考虑到折线型实用堰流量系数随堰顶厚度的增加而减小<sup>[2]</sup>,所以堰的厚度选择是考虑在能够支撑闸门的前提下尽量薄。另外,根据以往研究经验<sup>[3]</sup>,当下游堰坡缓于 1:1 时,泄流能力下降;下游堰坡坡比在 1:1 ~ 1:2 范围内时,流量系数减小不大;但当下游堰坡坡比小于 1:2 后,流量系数明显下降。因此低堰的下游堰坡一般以不缓于 1:1 为宜,若地形条件限制,不得不采用缓坡时,也应尽量不缓于 1:2。该比较堰型下游堰坡选择为 1:2。该堰在宣泄  $p = 5\% \sim 0.05\%$  洪水时,  $\delta/H < 0.67$ ,按常规划分应属薄壁堰范畴,但因研究对象的  $P_1/H_d < 0.3$ ,则可能向宽顶堰过渡<sup>[2]</sup>。

试验比较了图 1 所示 2 堰型下泄  $q = 14.29 \sim 144.29 \text{ m}^3/\text{s}$  8 级流量时的泄流能力,研究发现,各级流量下基本存在如下规律:堰下游水流流态为产生完全水跃的自由出流状态,或为具有下潜水舌的淹没水跃的缓流状态时,WES 堰泄流能力较大。而当下游

淹没度加大,下游流态为不产生水跃的完全淹没缓流状态时,折线堰的泄流能力略大。将  $q = 70.00, 88.57, 107.14 \text{ m}^3/\text{s}$  3 级流量时 WES 堰与折线堰的堰上水头  $H$  与下游淹没水深  $h_s$  关系曲线同时绘于图 2。由图 2 可知,宣泄  $q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时,在  $h_s < 13.30 \text{ m}$  区间泄流能力以 WES 堰略大,而随下游淹没水深进一步加大(相应淹没度亦加大)至  $h_s > 13.30 \text{ m}$  ( $h_s/H_0 > 0.93$ )后,反以折线堰的泄流能力略大;宣泄  $q = 88.57 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时,  $h_s < 17.04 \text{ m}$  区间,泄流能力以 WES 堰略大,  $h_s > 17.04 \text{ m}$  ( $h_s/H_0 > 0.94$ )后以折线堰的泄流能力略大;宣泄  $q = 107.14 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时,  $h_s < 22.18 \text{ m}$  区间,泄流能力以 WES 堰略大,  $h_s > 22.18 \text{ m}$  ( $h_s/H_0 > 0.95$ )后以折线堰的泄流能力略大,其余各级流量也基本上在  $h_s/H_0 = 0.90 \sim 0.95$  时为堰型转换分界点。各级流量堰型转换分界点处  $P_1/H = 1.19 \sim 0.26$ ,均在低堰范围内。即对于图 1 所示比较的两堰型,当  $P_1/H < 1.33$ ,在  $h_s/H_0 > 0.90 \sim 0.95$  时以折线堰泄流能力大。

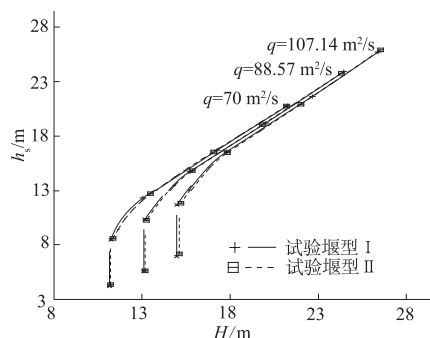


图 2 堰型 I 与堰型 II 泄流能力比较

Fig. 2 Comparison of discharge capacity between the two weir types

研究表明:①随着下游淹没水深的加大,WES 堰泄流能力大的优势愈来愈小,且在一定淹没度后,其泄流能力反而弱于形式恰当的折线堰。②低堰泄洪时,当淹没度  $h_s/H_0 > 0.90 \sim 0.95$  时,堰体  $\delta/H \leq 0.67$  且下游堰坡较陡的折线堰比相同堰高的 WES 型低堰泄流能力大。同时也验证了堰的自由泄流流量系数  $m$  值越大,其相对临界淹没度越小,即淹没影响出现得越早<sup>[4]</sup>,且上述研究成果还说明自由泄流流量系数  $m$  值较大的堰型,其流量系数随淹没度加大衰减得更快,即受淹没影响更大。

### 3.2 上、下游堰面坡度对泄流能力的影响

#### 3.2.1 上游堰坡

根据李炜<sup>[5]</sup>的研究成果,折线型低堰上游坡坡比为 1:0.5 时,流量系数比直立坡大 2%,因此对图 1 所示折线型实用堰,保持下游堰坡坡比 1:2 不变,比较

上游为直立和坡比为 1:0.5 两种堰的泄流能力大小。试验结果表明,在下游水位较高、淹没度较大时,上游坡比为 1:0.5 试验堰型泄流能力略小,分界点在堰型分界点左右。如宣泄  $q = 107.14 \text{ m}^3/\text{s}$  流量时,  $h_s < 23.0 \text{ m}$  区间泄流能力以坡比 1:0.5 上游坡的略大,  $h_s > 23.0 \text{ m}$  ( $h_s/H_0 > 0.95$ ) 后以上游直立坡的泄流能力略大。因此,对于  $P_1/H < 1.33$  的低堰,在  $h_s/H_0 > 0.90 \sim 0.95$  淹没度下运行,其上游堰坡为直立坡时泄流能力较大。

3.2.2 下游堰坡

对图 1 所示折线型实用堰,保持上游堰坡直立,比较了坡比为 1:2 和 1:6.5 下游堰坡的泄流能力大小,将试验得到的  $q = 70, 88.57, 107.14 \text{ m}^3/\text{s}$  3 级流量时上述 2 种堰坡的堰上水头  $H$  与下游淹没水深  $h_s$  关系曲线同时绘于图 3。试验结果表明,在大淹没度下运行的低堰,下游堰坡为缓坡的试验堰型泄流能力略小,即下游堰坡以陡坡为佳。

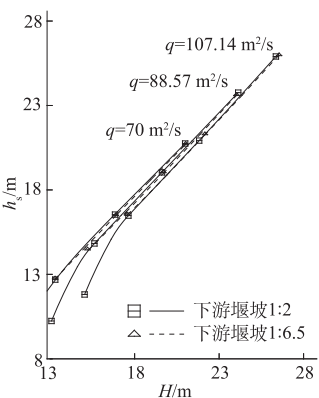


图 3 不同下游堰坡泄流能力比较

Fig. 3 Comparison of discharge capacity between the two weir types with different downstream weir slopes

3.3 上下游堰高对泄流能力的影响

保持图 1 所示折线型实用堰上下游堰坡不变,将堰顶高程由 172.0 m 降低至 170.0 m,相应堰高降低 2.0 m。此比较堰型称为试验堰型 III。

试验结果表明,下游水流流态为产生完全水跃的自由出流状态,或为具有下潜水舌的淹没水跃的缓流状态时,试验堰型 III 泄流能力比试验堰型 II 大较多,但随着下游水位的升高,下游出现不产生水跃的完全淹没缓流流态时两堰型泄流能力的差距迅速减小。如在下游水位  $Z_F = 175.0 \text{ m}$ ,单孔下泄  $Q = 460 \text{ m}^3/\text{s}$  时,采用试验堰型 II 时上游水位  $Z_U = 178.95 \text{ m}$ ,而采用试验堰型 III 时上游水位降低 2.77 m,仅为 176.18 m;而在  $Z_F = 180.0 \text{ m}$ ,单孔下泄  $Q = 460 \text{ m}^3/\text{s}$  时,采用试验堰型 II 时  $Z_U = 180.41 \text{ m}$ ,而采用试验堰型 III 时上游水位仅降低 0.09 m,为 180.32 m。显然,堰高的降低增大了泄流能力。但随着淹没水深的加大,降低堰高对泄流能力的影响逐渐被弱化。分析原因为:同一下游水位条件下,堰高较小的堰泄流时淹没水深更大,相应

淹没度也更大,加大的淹没水深和淹没度削弱了堰高降低对泄流能力的影响。

3.4 工程实例分析

前面的试验为单纯地对某一堰型进行泄流能力研究,各堰型泄流能力曲线均为某一流量的上下游水位关系曲线,而实际工程枢纽下游水位与总下泄流量是一一对应的,如枢纽下泄流量  $Q = 42\ 600 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $p = 20\%$ ) 时,此时下游水位  $H_F = 190.14 \text{ m}$ <sup>[6]</sup>,假设此洪量全由 42 孔泄水孔宣泄,并按每个泄水孔泄量一样折算,  $p = 20\%$  洪水、 $Q = 42\ 600 \text{ m}^3/\text{s}$  的单孔泄量为  $1\ 014.29 \text{ m}^3/\text{s}$ ,这样就可由单孔泄量以及对应下游水位,通过各堰型的泄流能力曲线查出相应上游水位,比较各堰型上游水位高低就可判断各堰型的优劣。

根据上述方法计算出各堰型宣泄  $p = 20\%, 5\%$ ,设计以及校核洪水时相应上下游水位值列于表 2。

表 2 各堰型宣泄特征流量时对应的上下游水位值

Table 2 Upstream and downstream water levels corresponding to discharged flow of different weir types

总泄量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	开启孔数	下游水位/m	上游水位/m		
			堰型 I	堰型 II	堰型 III
42 600 ( $p = 20\%$ )	42	189.88	190.47	190.43	190.32
52 600 ( $p = 5\%$ )	42	192.47	193.28	193.17	193.13
72 400 ( $p = 0.2\%$ 设计洪水)	42	197.01	197.96	—	197.87
85 300 ( $p = 0.02\%$ 校核洪水)	42	199.92	200.91	—	200.85

注:表中下游水位为闸下桩号 0 + 682 m 处水位(定义坝轴线处为桩号 0 + 000 m)。

由表 2 可知,在枢纽宣泄  $p = 20\%$  洪水时,堰的下游淹没水深  $h_s = 17.88 \text{ m}$ ,试验堰型 II 比试验堰型 I 上游水位低 4 cm;在枢纽宣泄  $p = 5\%$  洪水时,堰的下游淹没水深  $h_s = 20.47 \text{ m}$ ,试验堰型 II 比试验堰型 I 上游水位低 11 cm。由此可知随着泄量加大,相应下游淹没水深加大,折线型实用堰——试验堰型 II 的优势越来越明显。计算 2 堰型宣泄各特征流量时堰的淹没度均大于 0.90,由此表明该枢纽宣泄  $p = 20\%$  以上流量时,均处于试验堰型 II 的优势区,该枢纽低堰堰型以采用折线型实用堰为优。

另外从表 2 还可知,在枢纽宣泄  $p = 20\%$  洪水时,试验堰型 III 比试验堰型 I 上游水位低 15 cm;在枢纽宣泄  $p = 5\%$  洪水时,试验堰型 III 比试验堰型 I 上游水位低 15 cm;在枢纽宣泄  $p = 0.2\%$  设计洪水时,试验堰型 III 比试验堰型 I 上游水位低 9 cm;在枢纽宣泄  $p = 0.02\%$  校核洪水时,试验堰型 III 比试验堰型 I 上游水位低 6 cm。由此可以看出:随着泄量的加大,下游淹没水深加大,堰高的改变对泄流能

力的影响越来越小。

总之,对于处于大淹没水深下的低堰,其堰高以及堰面形式对泄流能力的影响有限,因此若想通过降低堰顶高程或改变堰面形式来大幅增加泄流能力是不可行的。

对于大淹没度下低堰泄流能力的影响因素研究,是一个有待进一步深入研究的课题。在一定的淹没水深范围内,由于低堰各种堰型受同一因素影响程度不一样,故堰型对低堰泄流能力的影响较大,而当淹没水深加大到一定程度后堰型对低堰的泄流能力的影响甚微。

## 4 结 论

(1) 对于  $P_1/H_d < 1.33$  的低堰,在  $h_s/H_0 > 0.90 \sim 0.95$  的大淹没度下运行时,下游堰坡为陡坡且  $\delta/H \leq 0.67$  的折线型实用堰比相同堰高的 WES 堰泄流能力大。

(2) 对于  $P_1/H_d < 1.33$  的折线型低堰,在  $h_s/H_0 > 0.90 \sim 0.95$  的大淹没度下运行时,以上游堰坡直立、下游堰坡较陡的堰型泄流能力大。

(3) 大淹没水深下运行的低堰,降低堰顶高程,减小堰高可增大泄流能力,但低堰堰高以及堰面型式的变化对泄流能力的影响有限。

### 参考文献:

- [1] 李家星,赵振全. 水力学(下)(2版)[M]. 南京:河海大学出版社,2001:11-12. (LI Jia-xing, ZHAO Zhen-quan. Hydraulics (2nd Edition) [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2001:11-12. (in Chinese))
- [2] 童海鸿,艾克明,丁新求. 折线型实用堰过流能力研究[J]. 长江科学院院报,2002,19(2):7-10. (TONG Hai-hong, AI Ke-ming, DING Xin-qiu. Discharge Capacity of Broken-Line Practical Weir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(2):7-10. (in Chinese))
- [3] 童海鸿,李梦成,丁新求. 低堰体型与泄流能力关系的初步研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(4):25-28. (TONG Hai-hong, LI Meng-cheng, DING Xin-qiu. Relation Between Low Weir Shape and Discharge Capacity [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(4):25-28. (in Chinese))
- [4] 童海鸿,严忠民,艾克明. 高淹没度下低堰泄流能力初步研究[J]. 人民长江,2003,34(7):59-61. (TONG Hai-hong, YAN Zhong-ming, AI Ke-ming. Preliminary Investigation on the Discharge Capacity of Low Weir with Big Submergence Depth [J]. Yangtze River, 2003, 34(7):59-61. (in Chinese))
- [5] 李 炜. 水力计算手册(2版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:96-97. (LI Wei. Handbook of Hydraulic Calculation (2nd Edition) [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006:96-97. (in Chinese))
- [6] 吴英卓,何 勇,姜伯乐. 小南海水电站泄水孔堰型比较断面模型试验研究报告[R]. 武汉:长江科学院,2011. (WU Ying-zhuo, HE Yong, JIANG Bo-le. Report on Model Test of Comparing Different Sections of Weir Shape of Xiaonanhai Hydropower Station [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2011. (in Chinese))

(编辑:黄 玲)

## Discharge Capacity of Low Weir with Big Submergence Depth

WU Ying-zhuo, JIANG Bo-le, HE Yong

(Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** With a hydropower project as an engineering example, we researched the effect of weir type and big submergence depth on the discharge capacity of low weir. Results showed that: for low weir with big submergence flow, the ratio of weir thickness to waterhead  $\delta/H \leq 0.67$ , and the discharge capacity of broken-line practical weir with steep slope in the downstream is larger than that of WES weir; for low weir with big submergence depth, the discharge capacity can be increased by declining the weir height, but with the increase of submergence depth, the influence of weir height and weir type on the discharge capacity is weakened.

**Key words:** low waterhead; big submergence; overflow weir; discharge capacity