

拦河闸折线型低实用堰泄流参数试验研究

黄智敏^{1,2}, 李剑桥^{1,2}, 李泽森^{1,2}, 周成永^{1,2}, 陆汉柱^{1,2}

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

摘要: 目前拦河闸折线型低实用堰堰流淹没界限判别、淹没系数计算方法尚不完善。基于堰高 $T \leq 2.0$ m 及不同 T 与堰顶长度 δ 之比 T/δ 的拦河闸折线型低实用堰泄流能力试验, 研究折线型低实用堰堰流淹没界限判别和淹没系数计算, 提出相应的判别标准和计算方法。结果表明: ①折线型低实用堰堰流临界淹没界限小于宽顶堰堰流临界淹没界限, 并随 T 、 T/δ 的增大而减小; ②在同一淹没度 h_s/H_0 条件下, 折线型低实用堰淹没系数 σ 小于宽顶堰淹没系数 σ_0 , 并随 T 、 T/δ 、 h_s/H_0 的增大, 两者的相对误差 η 绝对值增大; ③在 $h_s/H_0 \leq 0.96$ 条件下, 获得了 σ 修正系数的计算方法。研究成果得到了相关工程模型试验验证, 可供类似工程设计参考。

关键词: 拦河闸; 折线型实用堰; 泄流参数; 淹没系数

中图分类号: TV132.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2026)05-0118-07

Experimental Study on Discharge Parameters of Polygonal-line Low-head Practical Weirs of Sluices

HUANG Zhi-min^{1,2}, LI Jian-qiao^{1,2}, LI Ze-sen^{1,2}, ZHOU Cheng-yong^{1,2}, LU Han-zhu^{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: [Objective] At present, the calculation methods for the discharge capacity of polygonal-line low-head practical weirs at sluices (such as the discrimination of the submergence limit and the calculation of the submergence coefficient) are still incomplete, which brings considerable inconvenience to related engineering design. This study aims to investigate the submergence limit discrimination and submergence coefficient calculation of polygonal-line low-head practical weir flow, and to propose corresponding discrimination criteria and calculation methods. [Methods] Hydraulic normal model tests on the discharge capacity of polygonal-line low-head practical weirs at sluices were conducted. The model conditions included a weir height $T \leq 2.0$ m ($T = 0, 0.5, 1.0, 1.5$, and 2.0 m), a ratio of weir height to crest length $T/\delta \leq 0.4$, and a submergence ratio $h_s/H_0 \leq 0.96$, where h_s was the downstream water depth referenced to the weir crest, and H_0 was the total upstream head above the weir crest. The model scale was 35.5. [Results] (1) Under the experimental conditions of this study, the critical submergence limit (h_s/H_0) of the weir flow ranged from 0.748 to 0.787, which was lower than that of the broad-crested weir (0.8), indicating that the polygonal-line low-head practical weir at a sluice was more susceptible to submergence than a broad-crested weir. As the weir height T and T/δ increased, the critical submergence limit decreased correspondingly, and the difference between the critical submergence limit of the polygonal-line weir and that of the broad-crested weir increased accordingly. (2) Under the same submergence ratio h_s/H_0 , the submergence coefficient σ of the polygonal-line low-head practical weir was smaller than that of the broad-crested weir σ_0 . The absolute value of the relative error η between the two increased with increasing T , T/δ , and h_s/H_0 . Compared with the geometric parameters of the polygonal-line low-head practical weir, namely the weir height T and the crest length δ , the variations in weir height T had a relatively greater influence on the relative error η . (3) When h_s/H_0 ranged from 0.8 to 0.96, the relative error η ranged from -1.5% to -7.6% . (4) Based on the weir height T and submer-

gence ratio h_s/H_0 , the relative error η can be obtained from the $\eta - T - h_s/H_0$ relationships shown in Table 4 and Figure 8. The corresponding submergence coefficient of the polygonal-line low-head practical weir could then be calculated using the formula and applied to discharge capacity calculation. (5) The results were validated by multiple hydraulic model test results of sluice projects. The discharge values calculated based on the present results were in good agreement with the measured values, with the absolute value of the relative error between the two being less than 1.5%. [Conclusion] The findings of this study can be applied to the calculation of discharge capacity of polygonal-line low-head practical weirs at sluices under the conditions of $T \leq 2.0$ m, $T/\delta \leq 0.4$, and $h_s/H_0 \leq 0.96$. Further in-depth studies are still required on the discharge characteristics of polygonal-line low-head practical weirs with $T > 2.0$ m and larger ranges of T/δ . The proposed method has relatively high calculation accuracy and convenient application, and can provide a reference for the design and operation of similar projects.

Key words: sluice; polygonal-line practical weir; discharge parameters; submergence coefficient

0 引言

通常,低水头拦河闸溢流堰堰型主要为平底与下游折线(或曲线)的组合堰型,根据其堰顶长度 δ 与堰顶作用水头 H 之比 δ/H ,可分为宽顶堰和实用堰(见图1),二者运行流态和泄流能力有明显差异^[1-2]。目前,拦河闸宽顶堰泄流能力的计算方法已较完善,而拦河闸折线型实用堰泄流能力的计算方法(如淹没界限判别、淹没系数计算)尚不完善,给相关工程设计带来极大不便^[1-4]。

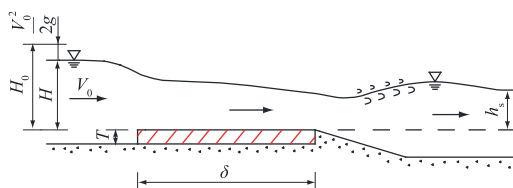


图1 拦河闸溢流堰体型

Fig.1 Shape of overflow weir of sluice

李炜^[1]将折线型低实用堰分为a型和b型2种堰型(见图2),给出了其泄流流量系数 m 的取值方法,但其淹没界限判别标准不明确,其淹没系数 σ 选取困难;童海鸿等^[5-7]、张绪进等^[8]、吴国君等^[9]、吴英卓等^[10]对低堰的体型和泄流能力进行研究,给出了 m 的计算方法,但未明确折线型低实用堰 σ 如何选取;黄智敏等^[11]在拦河闸折线型实用堰上游设置铺盖(或护底,即闸室堰顶与上游河床面基本齐平)、闸室设置多个闸墩等布置条件下,提出拦河闸折线型低实用堰堰流呈现宽顶堰堰流流态,其淹没界限判别和淹没系数计算方法可采用与宽顶堰流相同的方法,但对于具有一定堰高 T 的折线型低实用堰堰流淹没界限和淹没系数仍无法明晰。

低水头拦河闸实际工程布置,综合考虑闸址河床地形、泄流能力、上游河道淹没、拦沙、减小闸门高

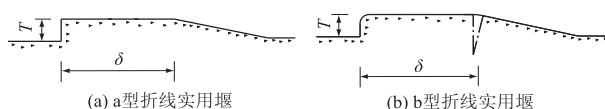


图2 折线型低堰剖面

Fig.2 Schematic diagram of polygonal-line low-head weir profiles

度和节省工程投资等因素,往往需要在闸室内设置具有一定 T (闸址河床与堰顶的高差)的有底坎的折线型实用堰(见图2)。目前,有底坎(具有一定 T)的折线型实用堰堰流 m 等可查阅文献^[1],但其淹没界限判别和 σ 计算尚无法得出。鉴于此,本文基于 $T \leq 2.0$ m 的拦河闸折线型低实用堰(简称折线型低堰)泄流水工模型试验,研究其泄流淹没界限判别和淹没系数计算,初步提出相应的判别标准和计算方法,可供拦河闸折线型低堰泄流能力计算参考。

1 模型设计和试验方法

基于广东省湛江市木岭拦河闸,在宽1.0 m玻璃水槽中开展拦河闸折线型低堰水工模型试验^[12]。拦河闸设置13孔闸,单孔闸净宽12 m,闸墩厚1.5、2.0 m,堰顶高程8.50 m、 $\delta = 11.8$ m,堰顶下游以坡比1:4的陡坡与下游消力池连接(见图3)。

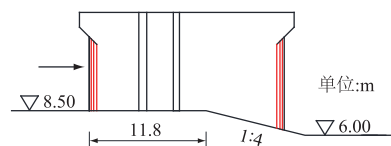


图3 木岭拦河闸闸室剖面

Fig.3 Schematic diagram of lock chamber profile of Muling sluice

模型取2.67孔闸(即中间1个完整单孔和两侧各0.835孔)和2个闸墩(宽2.0、1.5 m),按重力相似准则

设计为比尺35.5的正态模型。折线型低堰 T 为 0、0.5、1.0、1.5、2.0 m, 每级 T (除 $T=0$ m 外) 取 2 种 δ 进行试验(堰顶上游端修圆半径 $R=0.5$ m), 如表 1 所示。采用木岭拦河闸 100 a 一遇洪水泄流量(泄流量 Q 为 $3\,592\text{ m}^3/\text{s}$, 2.67 孔闸泄流量 Q_m 为 $737.7\text{ m}^3/\text{s}$), 下游河道水位逐渐抬升、拦河闸出流由自由出流过渡至淹没出流, 观测闸上游河道水位 Z_a 、下游河道水位 Z 及相应流态。

表 1 模型试验各方案溢流堰体型参数和流量系数

Table 1 Shape parameters and discharge coefficients of overflow weirs for model tests

方案	T/m	δ/m	T/δ	m
A	0.0	11.8	0.000	0.359
B1	0.5	13.0	0.038	0.363
B2		9.8	0.051	0.367
C1	1.0	12.0	0.083	0.369
C2		8.0	0.125	0.374
D1	1.5	8.3	0.181	0.378
D2		5.8	0.259	0.384
E1	2.0	7.3	0.274	0.389
E2		5.0	0.400	0.395

2 拦河闸堰流泄流能力计算和分析

2.1 堰流泄流能力计算

根据水闸闸室水平段 δ/H 划分堰流类型(见图 1), $0.67 < \delta/H \leq 2.5$ 为实用堰流(可分为折线型和曲线型实用堰), $2.5 < \delta/H < 10$ 为宽顶堰流。拦河闸堰流泄流量 Q 为

$$Q = \varepsilon \sigma m B \sqrt{2g} H_0^{1.5} \quad (1)$$

式中: ε 为侧收缩系数; B 为溢流堰泄流净宽(m); g 为重力加速度(m/s^2); H_0 为堰顶总水头(m), $H_0 = H + v_0^2/2g$, v_0 为水闸上游库区行进流速(m/s)。

2.2 侧收缩系数 ε 和流量系数 m 计算

拦河闸宽顶堰和实用堰 ε 、 m 计算方法比较完善^[1-3], 根据折线型低堰堰型(a型和b型)和 H , 可查阅相应图表计算 ε 、 m ^[1]。

2.3 淹没系数 σ 计算

宽顶堰出流淹没界限和其淹没度 h_s/H_0 有关, 其中, h_s 为以堰顶为基准的下游河道水深(见图 1)^[1-2]。当 $h_s/H_0 < 0.8$ 时, 宽顶堰出流为自由出流, 当 $h_s/H_0 \geq 0.8$ 时, 宽顶堰出流为淹没出流, h_s/H_0 越大, σ_0 越小, 其 σ_0-h_s/H_0 关系可查阅图表^[1-2]。

折线型低堰出流淹没界限判别和 σ 计算方法尚不完善, 文献[1]给出的 a 型和 b 型 2 种低堰的淹没界限判别标准不明确, σ 选取困难。

3 折线型低堰侧收缩系数 ε 、流量系数 m 试验成果

经模型试验率定, 本工程闸室溢流堰 ε 平均值取为 0.976; 采用文献[1]宽顶堰公式计算方案 A—方案 E 的 ε 为 0.984~0.987, 与试验值 0.976 的相对误差为 0.8%~1.1%, 选取值与计算值较符合。

模型试验测试和计算不同 T 、 δ 条件下的 m 见表 1。试验表明: 在同一 T 条件下, 随 δ 增大, m 相应减小; 在同一 δ 条件下, 随 T 增大, m 相应增大。方案 A—方案 E 溢流堰泄流 m 为 0.359~0.395, 文献[1]查阅的 m 为 0.357~0.382, 相对误差为 0.6%~3.4%, 试验取值与查阅取值较符合。

4 折线型低堰泄流淹没界限及淹没系数 σ 试验和分析

4.1 临界淹没界限试验和分析

基于自由出流宽顶堰, 上游河道来流进入闸室后, 在进口处水面产生跌落, 在进口处下游约 $2H$ 处形成收缩断面(图 4 中 a—a 断面, 该断面水深 $h_c < h_k$, h_k 为临界水深), 其下游为急流状态, 并在堰顶末端出口后再次产生水面跌落。通常, 宽顶堰的淹没条件(平均值)为 $h_s/H_0 \geq 0.8$ (即临界淹没界限 $(h_s/H_0)_{0m} = 0.8$)^[1-2]。

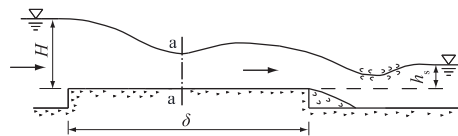


图 4 宽顶堰泄流流态和水力参数示意

Fig.4 Schematic diagram of discharge pattern and hydraulic parameters of broad-crested weir

由于折线型低堰 δ 相对宽顶堰要小, 在相同的泄流条件(即 Q 、 Z 相同)下, 折线型低堰较宽顶堰易淹没(即折线型低堰临界淹没界限 $(h_s/H_0)_m$ 和 σ 小于宽顶堰)。

本文部分折线型低堰水力模型试验成果见表 2 和图 5、图 6。试验结果表明: ①随 T 增大, 折线型低堰产生临界淹没界限的 Z 相应增大, 其 Z_a 亦随之增大; ②在同一 T 条件下, 随 δ 增大, 折线型低堰产生临界淹没界限的闸上、下游水位亦相应增大。

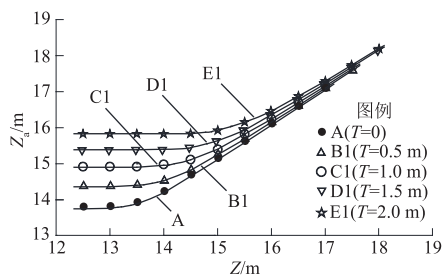
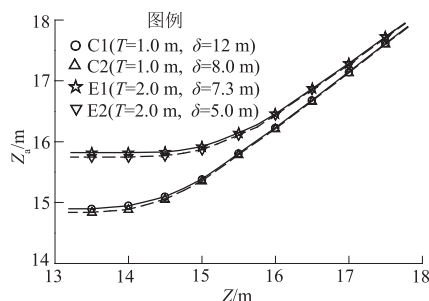
为分析折线型低堰堰流与宽顶堰堰流两者临界淹没界限的差异, 模型试验时加密折线型低堰临界淹没出流区域的水位。对试验资料计算分析可知

表2 部分方案的折线型低堰泄流试验成果

Table 2 Discharge test results of polygonal-line low-head weirs for selected schemes

方案	T/δ	Z/m	Z_a/m	H_0/m	h_s/H_0	σ	σ_0	$\eta/\%$
A	0.000	12.50	13.75	6.05	0.661	1.000	1.000	0.00
		13.00	13.76	6.06	0.743	0.997	1.000	-0.26
		13.50	13.88	6.14	0.814	0.977	0.993	-1.63
		14.00	14.19	6.37	0.863	0.925	0.943	-1.91
		15.00	15.11	7.11	0.914	0.784	0.803	-2.40
		16.00	16.06	7.95	0.944	0.664	0.682	-2.65
C1	0.083	17.00	17.04	8.85	0.961	0.565	0.582	-2.92
		13.50	14.90	5.94	0.674	1.000	1.000	0.00
		14.00	14.95	5.98	0.753	0.989	1.000	-1.09
		14.50	15.10	6.11	0.819	0.959	0.991	-3.23
		15.00	15.39	6.35	0.866	0.904	0.938	-3.65
		16.00	16.23	7.10	0.915	0.764	0.798	-4.26
E1	0.274	17.00	17.15	7.94	0.944	0.646	0.678	-4.62
		17.50	17.62	8.39	0.954	0.596	0.626	-4.78
		14.00	15.82	5.73	0.611	1.000	1.000	0.00
		14.50	15.83	5.74	0.697	0.998	1.000	-0.24
		15.00	15.92	5.82	0.773	0.977	1.000	-2.29
		15.50	16.15	6.02	0.830	0.928	0.980	-5.31
		16.00	16.46	6.31	0.872	0.867	0.923	-6.08
		17.00	17.29	7.07	0.919	0.729	0.784	-6.89
		18.00	18.18	7.92	0.947	0.616	0.664	-7.26

注: η 为折线型低堰淹没系数 σ 与宽顶堰淹没系数 σ_0 的相对误差, $\eta = [(\sigma - \sigma_0) / \sigma_0] \times 100\%$ 。

图5 不同 T 的 Z_a - Z 关系曲线Fig.5 Relationship between Z_a and Z with different weir heights T 图6 方案C与方案E的 Z_a - Z 关系曲线Fig.6 Relationship between Z_a and Z in schemes C and E

(见表2和图5、图6): ①在 $h_s/H_0 = 0.8$ 条件下, 折线型低堰 σ 小于宽顶堰临界淹没系数 σ_{0m} ($\sigma_{0m} = 1.0$), 两者相对误差 η_0 绝对值随 T 和 T/δ 的增大而增大, 这表明折线型低堰临界淹没界限 $(h_s/H_0)_m$ 小于宽顶堰临界淹没界限 $(h_s/H_0)_{0m}$; ②由于宽顶堰

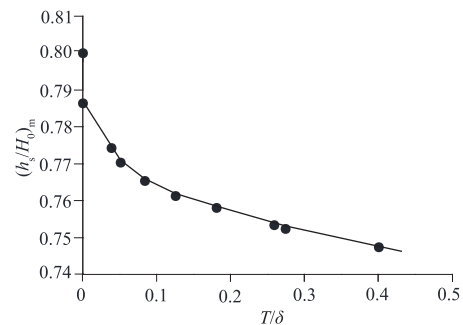
$(h_s/H_0)_{0m} = 0.8$ ($\sigma_{0m} = 1.0$) 是众多试验结果的平均值^[1-2], 本文取折线型低堰临界淹没系数 $\sigma_m = 1.0$ (实际取 $\sigma_m = 0.988 \sim 0.989$, 与 $\sigma_m = 1.0$ 的相对误差绝对值 $|\eta| \leq 1.2\%$) 对应的 $(h_s/H_0)_m$ 列于表3和图7, 该值小于宽顶堰 $(h_s/H_0)_{0m}$, 并随 T 、 T/δ 的增大而减小。

表3 折线型低堰淹没特征值

Table 3 Test results of submerged characteristic values of polygonal-line low-head weirs

方案	T/m	T/δ	$h_s/H_0 = 0.8$ 对应的折线型低堰试验值				$\sigma_m = 1.0$ 对应的 $(h_s/H_0)_m$
			Z/m	Z_a/m	σ	$\eta_0/\%$	
A	0.0	0.000	13.38	13.84	0.984	-1.56	0.787
B1	0.5	0.038	13.87	14.47	0.978	-2.14	0.775
B2		0.051	13.83	14.42	0.977	-2.23	0.771
C1	1.0	0.083	14.35	15.04	0.971	-2.89	0.766
C2		0.125	14.30	14.98	0.970	-3.01	0.762
D1	1.5	0.181	14.80	15.55	0.963	-3.68	0.759
D2		0.259	14.75	15.48	0.961	-3.80	0.754
E1	2.0	0.274	15.24	16.02	0.955	-4.51	0.753
E2		0.400	15.20	15.96	0.954	-4.62	0.748

注: η_0 为折线型低堰淹没系数 σ 与宽顶堰临界淹没系数 σ_{0m} ($\sigma_{0m} = 1.0$) 的相对误差, $\eta_0 = [(\sigma - \sigma_{0m}) / \sigma_{0m}] \times 100\%$ 。

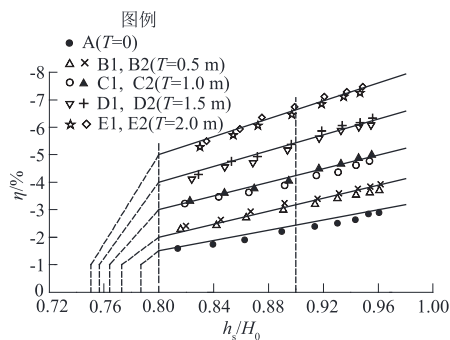
图7 折线型低堰 $(h_s/H_0)_m$ - T/δ 关系曲线Fig.7 Relationship between $(h_s/H_0)_m$ and T/δ of polygonal-line low-head weirs

4.2 淹没系数 σ 分析讨论

由表2和图5、图6等试验资料分析, 在不同 h_s/H_0 条件下, 不同 T 和 δ 组合的折线型低堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 η 见表4和图8。试验结果表明:

表4 不同 T 、 h_0/H 的折线型低堰 η 试验结果Table 4 Test results of η of polygonal-line low-head weirs with different h_s/H_0 and T values

方案	T/m	$\eta/\%$	
		$h_s/H_0 = [0.80, 0.90]$	$h_s/H_0 = [0.90, 0.96]$
A	0.0	$[-1.50, -2.50]$	$[-2.50, -3.00]$
B	0.5	$[-2.00, -3.00]$	$[-3.00, -4.00]$
C	1.0	$[-3.00, -4.20]$	$[-4.20, -5.00]$
D	1.5	$[-4.00, -5.50]$	$[-5.50, -6.30]$
E	2.0	$[-5.00, -6.60]$	$[-6.60, -7.60]$

图8 不同 T 的折线型低堰 η - h_s/H_0 关系曲线Fig.8 Relationship between η and h_s/H_0 of polygonal-line low head weirs with different weir heights T

(1) 在不同 T 、 T/δ 条件下,随 h_s/H_0 增大,折线型低堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 η 绝对值相应增大(见表2)。

(2) 在同一 δ 和 h_s/H_0 条件下,随 T 增大,淹没出流折线型低堰 σ 比宽顶堰 σ_0 减小程度增大, T 越大、两者的 η 绝对值亦越大。

(3) 在同一 T 条件下,随 δ 增大,淹没出流折线型低堰 σ 也相应增大,其与宽顶堰 σ_0 的 η 绝对值相应减小。相对 T 而言(即在相同 T 条件), δ 变化,对其 σ 的影响相对较小(见图8),而对其 m 变化的影响相对较明显(见表1), δ 较大者,其 m 相应较小(见表1)。

(4) 由表2可见,在不同 h_s/H_0 条件下,方案A折线型平底堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 η 绝对值较小($\eta < 3\%$)。这表明文献[11]提出的拦河闸折线型低堰堰顶与上游河床面基本齐平、闸室设置多个闸墩分隔水流条件下,其堰流为宽顶堰流,其淹没界限判别和淹没系数计算可采用宽顶堰流相同的方法是合理的。

(5) 在不同 T 条件下,随 T 、 h_s/H_0 增大,折线型低堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 η 绝对值相应增大(见表4和图8)。

(6) 本文试验的折线型低堰堰型与文献[1]中a型堰堰型接近(见图2)。文献[1]指出a型堰 $\delta/H=0.67\sim 2.5$ 时(即实用堰),其淹没界限介于宽顶堰与曲线型实用堰之间。由于曲线型低实用堰的淹没界限判别计算较复杂,故在表5中列出了 $H=5.46$ m、 $h_s/H_0=0.8$ 的方案E2折线型低堰(见表3)、宽顶堰和克奥型低实用堰($T/H \leq 2.5$)^[1]的 σ 。由表5可知,方案E2折线型低堰淹没系数与克奥型堰淹没系数较接近(克奥型堰 $\delta/H=0.916$)。

4.3 成果总结

4.3.1 临界淹没界限和淹没系数

折线型低堰 $(h_s/H_0)_m$ 小于宽顶堰 $(h_s/H_0)_{om}$ ($(h_s/H_0)_{om}=0.8$),两者相对误差绝对值随 T 、 T/δ

表5 方案E2折线型低堰、宽顶堰和克奥型堰的淹没系数 σ 比较Table 5 Comparison of submergence coefficient σ among polygonal-line low-head weir scheme E2, broad-crested weir and Keo-type weir

H/m	h_s/H_0	σ		
		宽顶堰	方案E2折线型低堰	克奥型堰 ^[1]
5.46	0.8	1.00	0.954	0.953

注:方案E2折线型低堰($T=2.0$ m)与克奥型堰的 δ 均为5.0 m。
的增大而增大。在工程计算中,可由 T 、 T/δ 查表3和图7初步得出 $(h_s/H_0)_m$ 。

在淹没出流条件下($h_s/H_0 \geq 0.8$),同一 h_s/H_0 条件下折线型低堰 σ 小于宽顶堰 σ_0 ,两者的 η 绝对值随着 T 、 T/δ 和 h_s/H_0 的增大而增大; T 的变化对 η 的影响相对较大(见表4)。

4.3.2 淹没系数计算方法

若折线型低堰 h_s/H_0 在 $(h_s/H_0)_m$ 与0.8之间,先由图8插值得到 η ,再由式(2)计算相应的 σ ,其中 $\sigma_0=1.0$ 。当 $h_s/H_0 > 0.8$ 时,可根据实际 T 、 h_s/H_0 ,先计算出相应的折线型低堰淹没系数的修正系数 $1+\eta$,再由式(2)计算其 σ ,用于其泄流能力计算。

$$\sigma = (1 + \eta) \sigma_0 \quad (2)$$

5 算例

5.1 龙船厂航电枢纽拦河闸

龙船厂航电枢纽为II等大(1)型工程。拦河闸为7孔闸,单孔闸净宽12 m,闸墩厚度2.0 m,闸室堰顶高程82.00 m, $T=1.5$ m,堰顶上游端修圆半径 $R=1.5$ m、末端以半径 $R=12$ m、圆心角 $\alpha=23^\circ$ 的圆弧与下游反弧和挑坎连接(见图9)。基于龙船厂航电枢纽拦河闸,在宽0.6 m玻璃水槽中开展拦河闸折线型低堰水工模型试验^[13]。模型取1.5孔闸(即中间1个完整单孔和两侧各0.25孔)和2个闸墩,按重力相似准则设计为比尺36.67的正态模型。

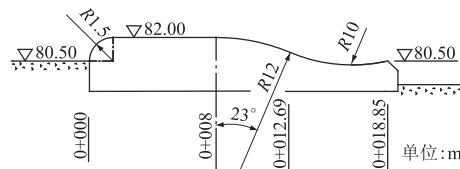


图9 龙船厂拦河闸剖面布置

Fig.9 Schematic diagram of cross-sectional layout of Longchuanchang sluice

1.5孔闸 $Q_m=632.1$ m³/s(洪水频率 $P=5\%$, $Q=2\,950$ m³/s)、 $Z=93.06$ m条件下,试验量测 $Z_a=93.21$ m,计算得 $h_s=11.06$ m、 $H_0=11.47$ m、 $h_s/H_0=0.964$ (查得宽顶堰 $\sigma_0=0.552$);取 $\varepsilon=0.975$ 、 $m=$

0.40^[1],由表4和图8查得该工程折线型低堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 $\eta=-6.36\%$,由式(4)计算该工程闸室折线型低堰 $\sigma=0.517$ 。由式(1)模型得1.5孔闸 $Q_m=624.2\text{ m}^3/\text{s}$,与实际泄流量 $632.1\text{ m}^3/\text{s}$ 较符合。

5.2 大坡山拦河闸

大坡山拦河闸枢纽为大(2)型工程,拦河闸共设置12孔闸,单孔闸净宽12 m,闸墩厚为2.4 m和2.0 m(墩厚2.4 m闸墩的上、下游墩头和墩尾的两侧修为半径 $R=0.7\text{ m}$ 的 $1/4$ 圆弧,墩厚2.0 m闸墩相应位置的圆弧半径 $R=0.5\text{ m}$),闸室堰顶高程38.00 m、 $\delta=10\text{ m}$, $T=2.0\text{ m}$,堰顶上游端修圆半径 $R=1.0\text{ m}$,堰顶末端下游以1:4的陡坡段与下游消力池连接(见图10)。基于大坡山拦河闸,在宽0.7 m玻璃水槽中开展拦河闸折线型低堰水工模型试验^[14]。模型取1.5孔闸(即1个完整单孔和两侧各0.25孔)和2个闸墩,按重力相似准则设计为比尺32的正态模型。

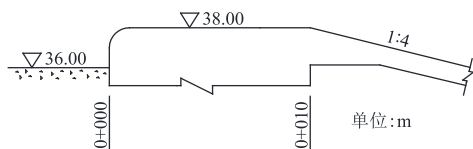


图10 大坡山拦河闸剖面布置

Fig.10 Schematic diagram of cross-sectional layout of Daposhan sluice

经试验率定后 $m=0.386$ 、 $\varepsilon=0.97$ 。在1.5孔闸 $Q_m=520.9\text{ m}^3/\text{s}$ (洪水频率 $P=1\%$, $Q=4\,167\text{ m}^3/\text{s}$)、 $Z=44.39\text{ m}$ 条件下,试验量测 $Z_a=45.03\text{ m}$ 。计算得 $h_s=6.39\text{ m}$ 、 $H_0=7.37\text{ m}$ 、 $h_s/H_0=0.867$ (查得宽顶堰 $\sigma_0=0.936$);由表4和图8查得该工程折线型低堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 $\eta=-6.1\%$,由式(4)计算该工程闸室折线型低堰 $\sigma=0.879$ 。由式(1)得1.5孔闸 $Q_m=524.7\text{ m}^3/\text{s}$,与实际泄流量 $520.9\text{ m}^3/\text{s}$ 较符合。

5.3 湘江土谷塘航电枢纽泄水闸

湘江土谷塘航电枢纽泄水闸为17孔闸,单孔闸净宽20 m,闸墩厚3.0 m,闸室堰顶高程47.00 m、 $\delta=11\text{ m}$, $T=2.0\text{ m}$,堰顶上游端修圆半径 $R=1.0\text{ m}$ 、末端以半径 $R=10\text{ m}$ 的圆弧与下游陡坡段和消力池底连接。基于湘江土谷塘航电枢纽泄水闸,在宽1.5 m玻璃水槽中开展泄水闸折线型低堰水工模型试验^[15]。模型取3个完整闸孔和3个闸墩,按重力相似准则设计为比尺46的正态模型。

3孔闸 $Q_m=3\,052.9\text{ m}^3/\text{s}$ (洪水频率 $P=2\%$, $Q=17\,300\text{ m}^3/\text{s}$)、 $Z=64.86\text{ m}$ 条件下,试验量测 $Z_a=65.01\text{ m}$ 。取 $\varepsilon=0.98$ 、 $m=0.386$,计算得 $h_s=17.86\text{ m}$ 、 $H_0=18.26\text{ m}$ 、 $h_s/H_0=0.978$ (查得宽顶堰 $\sigma_0=0.42$);由图8($T=2.0\text{ m}$ 的 $\eta-h_s/H_0$ 关系延伸线)查得该工程折

线型低堰 σ 与宽顶堰 σ_0 的 $\eta=-7.9\%$,由式(4)计算该工程闸室折线型低堰 $\sigma=0.387$ 。由式(1)得3孔闸 $Q_m=3\,034.3\text{ m}^3/\text{s}$,与实际泄流量 $3\,052.9\text{ m}^3/\text{s}$ 较符合。

6 结 论

基于堰高 $T\leq 2.0\text{ m}$ 及不同堰高与堰顶长度之比 T/δ 的拦河闸折线型低实用堰泄流能力试验研究,研究折线型低实用堰泄流淹没界限判别和淹没系数计算,提出相应的判别标准和计算方法。主要结论如下:

(1)折线型低堰临界淹没界限 $(h_s/H_0)_m$ 小于宽顶堰临界淹没界限 $(h_s/H_0)_{0m}$ ($(h_s/H_0)_{0m}=0.8$),二者的相对误差 η 绝对值随 T 、 T/δ 值增大而增大。由于影响折线型低堰 $(h_s/H_0)_m$ 的因素较复杂,本文基于特定的 T 和 T/δ 得到的折线型低堰 $(h_s/H_0)_m$ 值仅供参考。

(2)在淹没泄流条件下,同一淹没度 h_s/H_0 的折线型低堰淹没系数 σ 小于宽顶堰 σ_0 ,二者的相对误差 η 绝对值随 T 、 T/δ 、 h_s/H_0 的增大而增大;在体型参数 T 、 T/δ 的变化中, T 的变化对 η 的影响相对较大。

(3)在工程应用中,可根据实际的 T 、 T/δ 、 h_s/H_0 ,查表4和图8,由式(4)计算出相应的折线型低堰淹没系数 σ 值,应用于其泄流能力计算。

(4)本文试验研究的折线型低堰 T 为 $0\sim 2.0\text{ m}$ 、 δ 为 $5.0\sim 13.0\text{ m}$,而对 $T>2.0\text{ m}$ 、不同 T/δ 的折线型低堰泄流特性尚需进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 李 伟. 水力计算手册[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (Li Wei. Handbook of Hydraulic Calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 成都科学技术大学水力学教研室. 水力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. (Hydraulic Mechanics Teaching and Research Office of Chengdu University of Science and Technology. Hydraulics[M]. Beijing: People's Education Press, 1979. (in Chinese))
- [3] SL 265—2016 水闸设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (SL 265—2016 Design Specifications for Sluices[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [4] 华东水利学院. 水工设计手册: 第1卷基础理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (Huadong Institute of Water Conservancy. Handbook of Hydraulic Structure Design:

- Volume 1, Fundamental Theory[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 童海鸿, 兰芙蓉. 堰高对低堰泄流能力影响的分析[J]. 人民长江, 2002, 33(11): 20-21. (Tong Hai-hong, Lan Fu-rong. Analysis on Influence of Crest Height on Flood Release Capacity of Low Weir[J]. Yangtze River, 2002, 33(11): 20-21. (in Chinese))
- [7] 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(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(4): 25-28. (in Chinese))
- [8] 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. (Zhang Xu-jin, Fan Wei-ping, Zhang Hou-qiang. Discharge Capacity of Low Head Sluice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1246-1251. (in Chinese))
- [9] 吴国君, 刘晓平, 方森松, 等. 低实用堰水力特性及其对工程的影响[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 21-24. (Wu Guo-jun, Liu Xiao-ping, Fang Sen-song, et al. Hydraulic Characteristic of Low Practical Weir and Its Influence on Engineering[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(9): 21-24. (in Chinese))
- [10] 吴英卓, 姜伯乐, 何 勇. 大淹没度低堰泄流能力研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(8): 21-24. (Wu Ying-zhuo, Jiang Bo-le, He Yong. Discharge Capacity of Low Weir with Big Submergence Depth [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(8): 21-24. (in Chinese))
- [11] 黄智敏, 陆汉柱, 付 波, 等. 低水头拦河水闸折线型实用堰流计算分析[J]. 广东水利水电, 2023(3): 9-13. (Huang Zhi-min, Lu Han-zhu, Fu Bo, et al. Analysis on the Calculation of the Practical Weir Flow with Polygonal Line of the Low Head Sluice[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2023(3): 9-13. (in Chinese))
- [12] 李 明, 陈家豪. 木岭水闸重建工程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, 2024. (Li Ming, Chen Jia-hao. Research Report on Sectional Model Test for the Reconstruction Project of Muling Sluice[R]. Guangzhou: Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, 2024. (in Chinese))
- [13] 黄智敏, 陈卓英, 朱红华, 等. 连州市龙船厂航电枢纽工程第二阶段水工模型试验研究报告[R]. 广州: 广东省水利水电科学研究院, 2013. (Huang Zhi-min, Chen Zhuo-ying, Zhu Hong-hua, et al. Research Report on the Second-Stage Hydraulic Model Test for the Longchuan-chang Navigation-Hydro Project in Lianzhou City [R]. Guangzhou: Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, 2013. (in Chinese))
- [14] 宫鹏杰, 丘佳永. 高州市大坡山水利枢纽重建工程水工模型试验研究报告[R]. 广州: 广东省水利水电科学研究院, 2025. (Gong Peng-jie, Qiu Jia-yong. Research Report on Hydraulic Model Test for the Reconstruction Project of Daposhan Water Conservancy Hub in Gaozhou City [R]. Guangzhou: Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, 2025. (in Chinese))
- [15] 熊 智, 邹开明. 土谷塘航电枢纽泄水闸堰型比选试验研究[J]. 湖南水利水电, 2013(4): 34-36. (Xiong Zhi, Zou Kai-ming. Experimental Study on Weir Type Selection of Tugutang Navigation-power Junction Sluice[J]. Hunan Hydro & Power, 2013(4): 34-36. (in Chinese))

(编辑:任坤杰)

(上接第 110 页)

- [16] 薄会娟, 林青霞, 李 璐, 等. 基于 REOF 的两种卫星降水产品 (IMERG 和 MSWEP) 在金沙江流域降水分区尺度精度评估[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 620-633. (Bo Hui-juan, Lin Qing-xia, Li Lu, et al. Accuracy Evaluation of Two Satellite Precipitation Products (IMERG and MSWEP) at Precipitation Zoning Scale Based on REOF in the Jinsha River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(2): 620-633. (in Chinese))
- [17] Li M, Wang G, Cao F, et al. Determining Optimal Probability Distributions for Gridded Precipitation Data Based on L-moments [J]. Science of the Total Environment, 2023, 882: 163528.
- [18] 范雪梅. 气候变化影响下怒江流域水文过程响应机制研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020. (Fan Xue-mei. Study on the Response of Hydrological Processes To Climate Change in the Nu River Basin [D]. Kunming: Yunnan University, 2020. (in Chinese))
- [19] 王家祁, 郑似苹, 崔玉琴, 等. 中国暴雨地域分布概述[J]. 水文, 1991, 11(2): 1-7. (Wang Jia-qi, Zheng Shi-ping, Cui Yu-qin, et al. Overview of Regional Distribution of Rainstorms in China [J]. Hydrology, 1991, 11(2): 1-7. (in Chinese))

(编辑:王 慰)