

内凹型和外凸型阶梯陡坡段水力特性研究

黄智敏, 陈卓英, 朱红华, 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, 广州 510635)

摘要: 根据溢洪道陡坡段坡度的大小, 可设置连续的内凹型阶梯和不连续的外凸型阶梯两种形式的辅助消能工, 以增大陡坡段泄流的摩阻和跌流, 降低流速, 增加泄流的消能率。基于水力模型试验, 对溢洪道陡坡段坡度 1:1.5 的连续的内凹型阶梯和不连续的外凸型阶梯的泄流流态和消能率进行比较和分析。试验表明: 在相同陡坡段坡度条件下, 不连续的外凸型阶梯数明显少于连续的内凹型阶梯, 但单位根数的外凸型阶梯的糙率相对较大, 外凸型阶梯陡坡段泄流消能率相应大于内凹型阶梯陡坡段。因此, 当溢洪道陡坡段坡度 $i \leq 1:1.5$ 时, 若工程布置条件许可, 可优先选用不连续的外凸型阶梯, 以获得较大的泄流消能率, 同时也可以简化阶梯体型、便于工程施工。

关键词: 溢洪道; 泄洪; 阶梯式消能工; 流态; 消能率

中图分类号: TV672.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0137-04

Study on hydraulic characteristics in steep slope section of inner concave and outer convex

HUANG Zhimin, CHEN Zhuoying, ZHU Honghua, ZHONG Yongming

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

Abstract: According to the size of steep slope segment, two types of auxiliary energy dissipation which include continuous internal concave step and discontinuous outer convex step can be set in the spillway so as to increase the friction and drop flow of discharge in steep segment, reduce the flow velocity, and increase discharge energy dissipation rate. Based on the test of hydraulic model, the paper compared and analyzed the discharge flow pattern and energy dissipation rate of continuous internal concave step and discontinuous outer convex step with slope 1:1.5 in steep slope section of spillway. The experiment shows that in the same steep slope condition of steep segment, the number of discontinuous outer convex step is significantly less than that of continuous inner concave step, but the roughness of outer convex step of unit root number is relatively larger, and the discharge energy dissipation rate of outer convex step is greater than that of internal concave step. Therefore, when the slope i of spillway steep segment is equal and less than 1:1.5, if the project layout conditions permit, the discontinuous outer convex step should be chosen priority so as to obtain the larger discharge energy dissipation rate, and the step type can also be simplified and the engineering construction can be facilitated in the same time.

Key words: spillway; flood discharge; stepped energy dissipator; flow pattern; energy dissipation rate

1 研究背景

阶梯式消能工是应用在下游采用底流消能的溢洪道陡坡面上, 其作用是增大了溢流坡面的“糙率”, 加剧泄流的紊动, 消杀陡坡段泄流的能量, 降低陡坡段流速和下游入池流速, 达到简化下游消能

设施、节省工程量和投资的目的。

20 世纪 80 年代以来, 随着碾压混凝土筑坝技术的开发和应用, 一种连续式的内凹型阶梯在国内外的溢流坝工程得到研究和应用(见图 1)。20 世纪 90 年代中期以来, 一种新型的不连续的外凸型阶梯消能工已在广东省多座水库溢洪道和拦河闸工程

得到了应用^[1](见图2),取得了较显著的经济效益和社会效益。

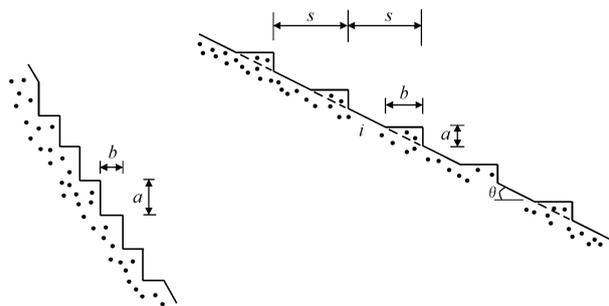


图1 陡坡段连续的内凹型阶梯 图2 陡坡段不连续的外凸型阶梯

连续的内凹型阶梯多用于坡度较陡溢流坝面上,不连续的外凸型阶梯主要应用于坡度较缓的溢洪道陡槽段上,国内已有相关工程设计和已建工程运行的实例。文献[1]对两种类型阶梯消能工应用条件进行了初步探讨,提出:①溢洪道陡坡段坡度 $i \geq 1:1$ 时,可选用连续的内凹型阶梯;② $i \leq 1:2$ 时,可优先选用不连续的外凸型阶梯;③当 i 为 $1:2 \sim 1:1$ 之间时,可综合考虑阶梯体型结构和布置、泄流消能率、工程施工和投资等因素后,择优选用连续的内凹型阶梯或不连续的外凸型阶梯。为了探讨溢洪道陡坡段连续的内凹型阶梯和不连续的外凸型阶梯泄流和消能特性的差异,本文开展了坡度 $i = 1:1.5$ 的两种形式阶梯陡坡段水力模型试验研究,为相关工程的溢洪道陡坡段阶梯消能工设计和运行参考。

2 水力模型试验简介

水力模型的溢洪道陡坡段坡度 $i = 1:1.5$ (陡坡段与水平线夹角 $\theta = 33.69^\circ$),陡坡段宽度 $B = 15$ m,溢洪道堰顶与其下护坦段高差为35 m。陡坡段的两种形式阶梯体型尺寸和布置为:①连续的内凹型阶梯——陡坡段布置58级高度 $a = 0.6$ m、宽度 $b = 0.9$ m的阶梯;②不连续的外凸型阶梯——陡坡段布置17级高 $a = 0.5$ m、宽度 $b = 0.75$ m(阶梯顶面为水平面)、间距 $s = 3$ m的外凸型阶梯(见图1~2)。

模型为1:30的正态模型,溢洪道陡坡段泄流单宽流量 $q = 10 \sim 25$ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,相应堰顶水头 $H = 3.46 \sim 6.22$ m。模型试验的阶梯陡坡段水流韦伯数 $W_e > 2000$,模型水流表面张力的影响可以忽略^[2],模型试验的阶梯陡坡段水流掺气状况与原型有良好的相似性。

3 阶梯陡坡段泄流流态

3.1 泄流流态

有关的试验研究表明^[3-9],溢洪道阶梯陡坡段的泄流流态主要受阶梯尺寸和单宽流量 q 的影响,在陡坡段阶梯体型和尺寸确定的条件下,根据泄流单宽流量 q 的大小,其基本流态可以分为跌流水流、滑行水流两种流态。由于在实际工程的设计和运行中,主要是针对溢洪道较大洪水流量泄流工况进行分析,所研究的溢洪道阶梯陡坡段运行的流态多为滑行水流流态,因此,本文着重对内凹型和外凸型阶梯陡坡段滑行水流流态进行研究。

试验表明,阶梯陡坡段滑行水流流态按其水面掺气特征,可以划分为光滑水流区和掺气水流区等两个流段(见图3~4):

(1)光滑水流区段为堰顶(或堰顶末端)至水面掺气始起断面,连续的内凹型阶梯陡坡段和不连续的外凸型阶梯陡坡段的光滑水流段流态基本相同。此水流区段陡坡段的泄流受坡面阶梯跌坎的摩擦阻和跌流作用,加大了泄流的紊动,加速了底部紊流边界层的发展,但紊流边界层尚未发展到水面,水面无掺气,水流表面仍为光滑水面。模型测试的各级单宽流量的堰顶末端至阶梯陡坡段水面掺气始起断面的距离 L 见表1。

(2)掺气水流区段为水面掺气始起点至陡坡段末端,由于两种阶梯陡坡段的体型和布置不同,其掺气水流段流态有所差异:

1)连续的内凹型阶梯陡坡段的掺气水流区段可分为掺气过渡区和完全掺气区两个流段(见图3),各流段的流态和水力特性可参见文献[3-9]。掺气过渡区水流受陡坡面阶梯的跌流和紊动作用,阶梯底部出现较明显的小漩涡,泄流沿程流速衰减的速率加快、水深增大,水流掺气浓度增加;完全掺气区水流断面掺气较充分,水体呈乳白色,水面波动大,陡坡段的沿程水深和流速变化相对较小,出现类似均匀流动的状况(见图3);

2)不连续的外凸型阶梯陡坡段的掺气水流区段可分为不均匀流段、准均匀流段、末级阶梯至陡坡末端不均匀流段等3个流段(见图4),各流段的流态、水力特性和划分等可参见文献[10]。

由图3~4分析,外凸型阶梯陡坡段掺气水流区段的不均匀流段和准均匀流段流态分别与内凹型阶梯陡坡段掺气过渡区和完全掺气区的流态相类似,由于两种阶梯陡坡段的阶梯体型和布置不同,外凸型阶

梯陡坡段掺气水流区段比内凹型阶梯陡坡段掺气水

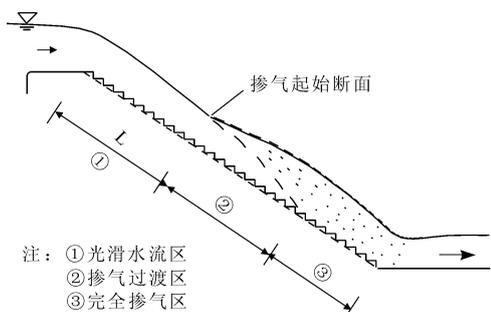


图 3 内凹型阶梯陡坡段流态示意图

流区段多了末级阶梯至陡坡段末端不均匀流段。

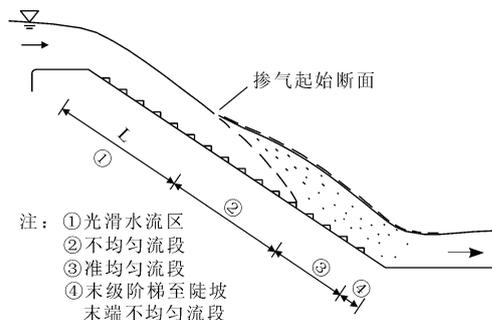


图 4 外凸型阶梯陡坡段流态示意图

3.2 阶梯陡坡段水面初始掺气位置试验和比较

3.2.1 初始掺气位置的计算 文献[4]通过试验研究,得出溢流坝内凹型阶梯陡坡的水流表面初始掺气位置 L 与泄流单宽流量 q 及阶梯高度 a 的关系曲线。文献[11]得出了内凹型阶梯陡坡的水流表面初始掺气位置 L 计算的经验公式为:

$$L = 9.719 K(\sin\theta)^{0.0796} F^{0.713} \quad (1)$$

式中: K 为阶梯糙度, $K = a \cos\theta$, a 为阶梯高度; F 为计算参数, $F = q/(gK^3 \sin\theta)^{0.5}$, q 为单宽流量, g 为重力加速度; θ 为陡坡段与水平线的夹角。

文献[10,12]通过大量的试验研究,得出坡度 $i = 1:1.5 \sim 1:6$ 的不连续外凸型阶梯陡坡段的水流表面初始掺气位置 L 的计算式:

$$L = mh_k^{1.2041} \left(\frac{a \cos^2 \theta}{s} \right)^{-0.2041} \quad (2)$$

式中: m 为系数,在 $i = 1:1.5 \sim 1:6$ 范围内, $m = 5.152 \sim 10.563$ (见图 5); $h_k = \sqrt[3]{q^2/g}$ 为陡坡段临界水深(q 为泄流单宽流量, g 为重力加速度); a 为阶梯高度; s 为不连续阶梯的水平间距; θ 为陡坡段与水平线的夹角。根据文献[10,12]的试验条件,式(2)的适用范围为: $1.366 m \leq h_k \leq 4 m$; $0.046 \leq (a \cos^2 \theta)/s \leq 0.14$ 。

3.2.2 初始掺气位置试验比较 测试的内凹型和外凸型阶梯陡坡段的水面初始掺气位置(距离 L)见表 1,分析表明:

(1)在相同的泄流单宽流量 q 条件下,不连续的外凸型阶梯陡坡段的水面初始掺气位置距离 L 比连续的内凹型阶梯相应要小,这表明相同阶梯高度(或外凸型阶梯高度略小于内凹型阶梯高度)的外凸型阶梯陡坡段表面糙率比内凹型阶梯陡坡段表面糙率相应要大。

(2)测试的内凹型和外凸型阶梯陡坡段水面初始掺气位置分别与式(1)和式(2)的计算值均较接

近(见表 1)。

表 1 阶梯陡坡段水流表面初始掺气位置 L 试验值与计算值比较

单宽流量/ ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	临界水深 h_k / m	内凹型阶梯 L / m		外凸型阶梯 L / m	
		本文 试验值	式(1) 计算值	本文 试验值	式(2) 计算值
10	2.169	26.29	27.48	20.39	20.34
15	2.842	35.56	36.69	28.33	28.16
20	3.443	44.36	45.05	36.06	35.48
25	3.995	51.93	52.82	43.18	42.43

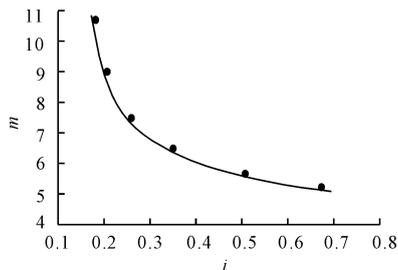


图 5 $m - i$ 的关系曲线

4 阶梯陡坡段消能比较试验

4.1 消能率计算

通常,溢洪道陡坡段下游的泄流消能率 η 可以采用式(3)进行计算:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (3)$$

式中: E_1 为溢洪道下游护坦以上的总水头; $E_2 = h_2 + v_2^2/2g$ 为陡坡段下游护坦水流收缩断面的能量; h_2, v_2 为相应断面的平均水深和流速。

4.2 消能率比较

测试的各级单宽流量泄流条件下的两种类型阶梯陡坡段泄流消能率见表 2~3。试验表明:

(1)在泄流单宽流量 $q = 10 \sim 25 m^3/(s \cdot m)$ 的条件下,测试和计算的内凹型和外凸型阶梯陡坡段

泄流消能率 η 分别达约 0.39 ~ 0.66 和 0.44 ~ 0.69, 两者之比, 外凸型阶梯陡坡段泄流消能率相应要大些(见图6)。

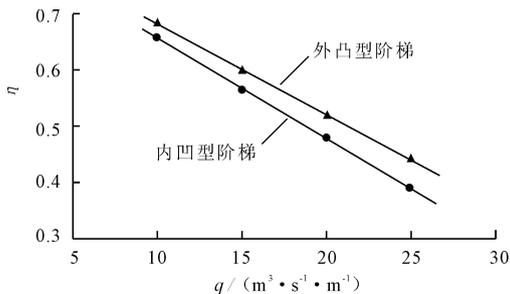


图6 内凹型和外凸型阶梯陡坡段消能率比较

(2) 在相同的陡坡段坡度 i 条件下, 虽然内凹型阶梯陡坡段的阶梯级数要比外凸型阶梯多得多, 但外凸型阶梯陡坡段泄流消能率仍较大, 这表明单位根数的外凸型阶梯消能率要大于内凹型阶梯消能率。

(3) 由本文的试验成果及参考文献[1]研究成果可得, 当溢洪道陡坡段坡度 $i \leq 1:1.5$ 时, 若工程布置条件许可, 可优先选用不连续的外凸型阶梯, 以获得较大的泄流消能率, 同时也可以简化阶梯体型结构和布置、便于工程施工。

表2 连续的内凹型阶梯陡坡段泄流消能率

单宽流量 $q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	总水头 E_1 / m	护坦段水力参数			消能率 η
		h_2 / m	$v_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_2 / m	
10	38.46	0.64	15.63	13.10	0.659
15	39.51	0.84	17.96	17.29	0.562
20	40.41	1.01	19.8	21.02	0.480
25	41.22	1.15	21.74	25.26	0.387

表3 不连续的外凸型阶梯陡坡段泄流消能率

单宽流量 $q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	总水头 E_1 / m	护坦段水力参数			消能率 η
		h_2 / m	$v_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_2 / m	
10	38.46	0.67	14.93	12.04	0.687
15	39.51	0.87	17.24	16.03	0.594
20	40.41	1.05	19.05	19.57	0.516
25	41.22	1.21	20.66	22.99	0.442

5 结语

本文对溢洪道陡坡段坡度 1:1.5 的连续内凹型阶梯和不连续的外凸型阶梯的泄流流态和消能率进行试验研究, 取得主要的认识和成果为:

(1) 溢洪道陡坡段设置阶梯式消能工之后, 可

明显增大陡坡段泄流消能率。在同一坡度陡坡段和相同的泄流单宽流量条件下, 外凸型阶梯陡坡段的水面初始掺气位置距离比内凹型阶梯相应要小, 外凸型阶梯陡坡段泄流消能率比内凹型阶梯陡坡段消能率相应要大, 这表明外凸型阶梯陡坡段表面糙率比内凹型阶梯陡坡段表面糙率相应要大。

(2) 当溢洪道陡坡段坡度 $i \leq 1:1.5$ 时, 若工程布置条件许可, 可优先选用不连续的外凸型阶梯, 以获得较大的泄流消能率, 同时也可以简化阶梯体型结构和布置、便于工程施工、节省工程投资。

参考文献:

- [1] 黄智敏, 钟勇明, 朱红华, 等. 阶梯消能技术在广东省水利工程中的研究与应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 146-150.
- [2] 吴时强, 吴修锋, 周辉, 等. 底流消能方式水电站泄洪雾化模型试验研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 84-88.
- [3] 陈群, 戴光清, 朱分清, 等. 影响阶梯溢流坝消能率的因素[J]. 水力发电学报, 2003, 22(4): 95-104.
- [4] 周辉, 吴时强, 姜树海. 阶梯溢流坝滑移流水力特性初步研究[C] // 泄水工程与高速水流, 吉林科学技术出版社, 1998: 25-28.
- [5] 张志昌, 曾东洋, 刘亚菲. 台阶式溢洪道滑移水流水面线和消能效果的试验研究[J]. 应用力学学报, 2005, 22(1): 30-35.
- [6] Chanson H. Hydraulics of stepped spillways: current status [J]. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE, 2000, 126(9): 636-637.
- [7] Boes R M, Hager W H. Closure to "hydraulic design of stepped spillways" [J]. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE, 2005, 131(6): 527-529.
- [8] 陆芳春, 史斌, 包中进. 阶梯式溢流面消能特性研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(1): 9-11.
- [9] 田嘉宁, 天津岩夫, 李建中, 等. 台阶式溢洪道各流况的消能特性[J]. 水利学报, 2003, 34(4): 35-39.
- [10] 黄智敏, 朱红华, 何小惠, 等. 溢洪道阶梯陡槽段水深试验与计算探讨[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(6): 782-789.
- [11] Jose L, Sanchez B, Fernando, G V. Spilling floods cost effectively [J]. Water Power & Dam Construction, 1996, 48(5): 16-20.
- [12] 黄智敏, 陈卓英, 付波. 外凸型阶梯陡槽段水力特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 152-154+157.