

曲线型阶梯溢流坝坝面掺气发生点位置的确定

汝树勋 唐朝阳 梁川

(四川联合大学高速水力学国家实验室, 成都 610065)

摘要 曲线型阶梯溢流坝坝面形成掺气水流, 是阶梯溢流坝具有较高消能率的重要原因之一, 故掺气初生点位置的确定, 对阶梯尺寸的选择有重要的影响。根据在大型钢架玻璃水槽中, 对4种不同阶梯尺寸的曲线型阶梯溢流坝系统试验结果, 分析了坝面掺气的机理, 给出了确定坝面掺气初生点位置的计算公式及曲线。

关键词 坝 掺气 位置 阶梯溢流坝 掺气初生

0 引言

把溢洪道作成阶梯状, 例如多级跌水(图1), 这是一个多世纪以前就已采用过且行之有效的泄流及消能措施。但多级跌水要求在每一级台阶上都形成淹没水跃, 通过水跃来消除跌落水流的动能。故每一级台阶长度均应满足消能池的要求, 工程量颇大。而曲线型阶梯溢流坝, 则是将坝面作成阶梯状, 利用坝面阶梯上所形成的强烈横轴旋滚及水流掺气来达到消能的目的(图2)。坝面阶梯上一般无水跃产生, 每个阶梯的长度也无须满足消能池的要求, 只须根据坝面直线段坡度而定, 不会增加工程量。同时, 由于阶梯坝面已消除了大量水流动能, 坝趾下游消能池的尺寸可大为缩减, 甚至根本省去消能池。从而可获得显著的经济效益。将坝面作成阶梯状还有利于碾压式混凝土施工方法的采用。

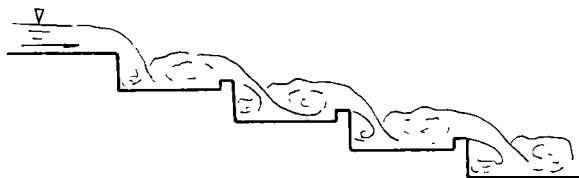


图1 多级跌水

正因为如此, 一些国家把阶梯溢流坝作为首选的溢洪道方案。至今为止, 国内外已建或在建的阶梯式溢流坝已达40余座, 包括南非、中非、美国、英国、法国、日本、原苏联及我国的水东及拟建的鱼背山电站在内。

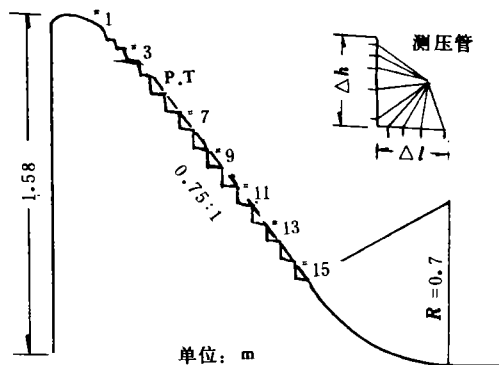


图2 曲线型阶梯式溢流坝

十余年来, 国内外众多学者对阶梯溢流坝的水力特性进行了大量的研究工作, 取得了不少可喜的成果。然而, 由于曲线型阶梯溢流坝水流的复杂性, 各家的研究成果在某些方面存在明显的差别。已发表的研究报告中, 针对某一工程的试验成果居多, 系统的研究较少。

根据已知的设计流量及其它条件, 选择适当的阶梯高度, 能使曲线型阶梯溢流坝面发生掺气水流, 发生掺气的流段越长, 坝面消能率越高。有的作者建议^[1]: 为保证所设计的阶梯溢流坝有较高消能率, 坝面掺气初生点应在坝趾以上5~10m。因而, 探明坝面掺气发生的机理及控制因素, 并进一步研究掺气初生点位置的确定方法, 对阶梯溢流坝的水力设计有重要意义。

本文作者在大型钢架玻璃水槽内对标准的

表 1 模型 A,B,C,D,E 的特征值

模型	正 规 阶 梯		布 置 测 压 管 的 阶 梯 号						
	高度 $\Delta h/\text{cm}$	坝面阶 梯总数							
A	/	无阶梯							
B	2	46	#5	#17	#29	#38	#44	#50	
C	4	24	#5	#10	#16	#22	#25	#28	
D	6	16	#5	#9	#13	#16	#18	#20	
E	8	12	#5	#7	#9	#11	#13	#15	

WES 剖面及 4 种不同阶梯尺寸的阶梯溢流坝进行了系统的试验研究。根据试验成果,对曲线型阶梯溢流坝水流的掺气机理、影响因素及掺气初生点位置的确定方法进行了分析研究,给出了确定掺气初生点位置的计算公式及曲线,可供设计部门参考。

1 水力模型试验

试验是在高 200cm,宽 45cm 的钢架玻璃水槽内进行。模型坝高 158cm,坝剖面为标准的 WES 型,曲线方程为 $y/H_d = \frac{1}{2}(x/H_d)^{1.85}$;曲线末端与直线段相切;直线段下游与反弧段相接(图 2)。模型线性比尺 $L_r=10$ 。

坝的正规阶梯从上切点(P,T)开始布置,向下延伸至直线段末端,各阶梯高均为 Δh 。为了改善坝顶水流与阶梯的衔接情况,上切点以上还设置 4 个过渡阶梯,按由上而下的顺序,第 1,2 个阶梯高度为 $\frac{1}{2}\Delta h$,第 3,4 个阶梯高度为 $\frac{3}{4}\Delta h$ 。所有阶梯顶端的外包络线,即为标准的 WES 剖面。

本阶段共进行了 A, B, C, D, E 5 个断面模型试验。其中, B, C, D, E 均为阶梯溢流坝,其正规阶梯高度 Δh 分别为 2, 4, 6, 8cm(表 1)。模型 A 为无阶梯的 WES 剖面,作为比较试验对象。试验流量为 0~150L/s,每个模型各进行 8 个流量级试验。

试验中除流量观测外,还测量了坝面压强分布、水面线、坝面掺气发生点的位置、坝趾水深及流速分布。有关压强分布的成果见文献[2];阶梯溢流坝的消能率及其水力设计方法将另文讨论。本文仅对坝面掺气机理及掺气发生点的位置进行讨论。

2 阶梯坝面的水流形态及掺气

试验表明:阶梯坝面的水流形态随单宽流量 q 及阶梯高度 Δh 而变。现以模型 E($\Delta h=8\text{cm}$)为例描

述如下(下文中提到的 q , Δh 及 L 等均已换算成原型值)。

当 $q<0.1\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,坝面呈舌状跌落水流(nappe flow)(图 3)。薄层水舌连续地沿阶梯逐级下跌,阶梯水平段上无水跃产生,跌落后的水流保持急流状态再跌至下一级阶梯;跌落水舌与阶梯立面的空腔内有微弱的横轴漩滚。水舌由上一级阶梯下跌时由势能转换成的动能,主要通过水舌撞击及紊动而消除。

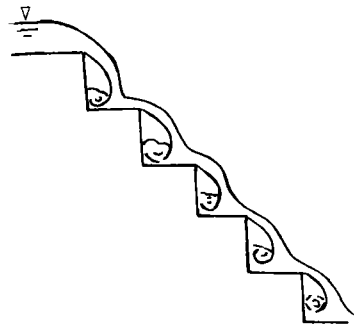


图 3 舌状跌落水流(nappe flow)

随着 q 的增大,坝顶水流流速也增大,水舌开始从第一级阶梯跨越几个阶梯,再溅落至下游某一阶梯上。例如,当 $q=0.1\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,水舌自第一阶梯跃起,跨越#2, #3 阶梯再溅落至#4 阶梯上(图 4);当 $q=0.4\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,溅落的阶梯下移至#7。 q 继续增大,水舌自重也随之增加,跨越距离逐渐减小;当 $q\geq 0.96\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,水舌跨越现象消失,水舌滑过阶梯外缘下泄,阶梯面与水舌下部空腔内形成了较强烈的横轴漩滚区,坝面水流形成以阶梯上的漩滚为衬底的滑移水流(skimming flow)(图 5)。随着水流向下滑移,流速逐渐增大,自由表面紊动也随之加强,当紊动达一定强度时,水流开始掺气。掺气一旦发生,水面即膨胀隆起,且变得粗糙不平。试验中可明显观察到 $q=1\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,自#5 阶梯起水质点从表层向上跃起,至一定高度后又回落至主流,空气也随之卷入,从表面卷入主

流的气泡,通过主流与漩滚区水流的动量交换而带入漩滚区,此即掺气水流。经一定距离后,水深及流速不再变化而形成均匀掺气水流。在阶梯高度 Δh 不变的情况下,随着 q 增大坝面水深增加,掺气初始点逐渐下移,当 q 增大到一定值后,坝面不再有掺气现象发生,消能率也随之下降。

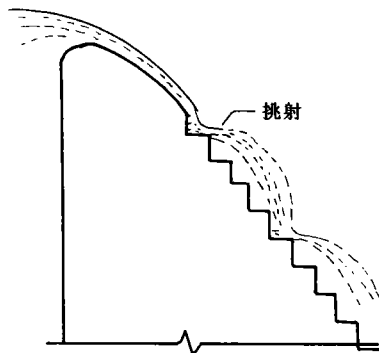


图1 水舌挑射

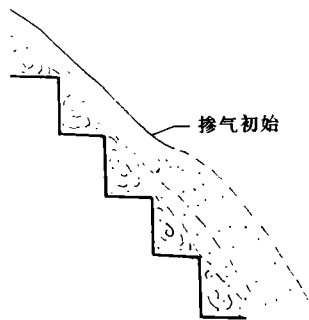


图5 滑移水流(skimming flow)

在较小的阶梯高度时(例如模型 B, C, D)也有掺气水流发生。对一定的 q 值,阶梯高度越小,掺气发生点越往下移。

对模型 A(坝面无阶梯),在所有试验流量范围内,均未见发生掺气现象。

3 曲线型阶梯溢流坝掺气初始断面的确定

由于水流的粘滞性及固体边界的阻滞作用,水流自坝顶开始形成边界层,边界层厚度 δ 沿流向逐渐增长,至断面 B 处边界层发展至水面,即 $\delta = d$, d 为 B 断面水深(图 6)。此处,自由表面紊动强度增加,液体质点有可能借助横向脉动速度而跃出水面,回落时卷入空气,形成掺气水流。故一般以边界层发展至水面的 B 断面作为掺气初始断面。

溢流坝面为曲面,目前有关曲面边界层尚无理

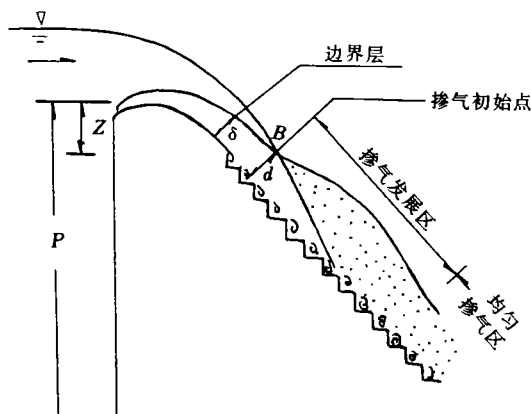


图6 水流掺气

论公式可供计算,只有少数试验成果。至于曲线型阶梯溢流坝面的边界层,研究成果更少。

美国陆军工程兵团根据 Bauer 等人的试验资料,整理出计算普通溢流面边界层厚度 δ 与发展长度 x 的公式^[3]

$$\delta/x = 0.08(x/K_s)^{-0.233} \quad (1)$$

式中 K_s 为坝面绝对粗糙度。但(1)式中未包括单宽流量 q 的影响。

1978 年 N·S·L·Rao 等根据印度科学院及其它试验资料,给出下列计算公式^[4]

$$H/H_d = f(K_s/H_d)(x/x_d) - 0.035 \quad (2)$$

式中: H_d 及 x_d 分别是坝面设计流量 q_d 时的坝顶水头及边界层发展至水面的距离; H 及 x 分别是某一流量 q 时的水头及距离; $f(K_s/H_d)$ 是与相对粗糙度 K_s/H_d 有关的某一函数。式(2)也是在无阶梯溢流坝条件下得出的,其坝面粗糙度 K_s 比阶梯溢流坝的粗糙度小得多。

1994 年 Chanson 应用他人的试验资料,得出了估算曲线型阶梯溢流坝边界层发展至水面处的水深 d 及相应距离 L 的计算公式^[5]

$$\frac{d}{K_s} = \frac{0.40}{(\sin\alpha)^{0.04}} (Fr)^{0.64} \quad (3)$$

$$\frac{L}{K_s} = 9.8(\sin\alpha)^{0.08} (Fr)^{0.71} \quad (4)$$

式中: $Fr = q/\sqrt{g \cdot \sin\alpha \cdot K_s^3}$; $K_s = \Delta h \cdot \cos\alpha$; α 为坝面直线段与水平线间夹角。

式(3)及(4)主要依据 $\Delta h = 0.61\text{m}$ 及 0.80m 的两组试验资料而得,阶梯高度变化不大,其应用范围尚须进一步检验。

由上述讨论可知,影响阶梯坝面边界层发展至水面的主要因素包括:单宽流量 q , 阶梯高度 Δh ,

坝面直线段坡度 α 及重力加速度 g 。常用的曲线型溢流坝, α 变化不大。略去 α 的影响, 将掺气发生点的距离 L 改用该点至坝顶的高差 Z 来表示, 并引入坝高 P , 则可写出下列函数关系

$$Z/P = f(h_k/\Delta h, P/\Delta h) \tag{5}$$

式中: h_k 为临界水深; $h_k/\Delta h = (q^2/g)^{1/3} \cdot 1/\Delta h = (q^2/g\Delta h^3)^{1/3} = (Fr_{-\Delta h})^{1/3}$; $Fr_{-\Delta h}$ 为一无量纲参数, 按形式可称为阶梯坝面“佛汝德数”。

应用模型 B, C, D, E 在不同流量时所观测到的掺气发生点位置的资料(表 2), 以 Z/P 为纵座标, $h_k/\Delta h$ 为横座标, $P/\Delta h$ 为参数, 点绘在直角座标上, 可得出一组通过座标原点的直线簇(图 7), 也可拟合成下列经验公式

$$Z/P = \frac{2.858}{(P/\Delta h)^{0.73}} (h_k/\Delta h) \tag{6}$$

图 7 中还点绘了文献[1]及[6]的实验资料。

从表 2 中可以看出: 阶梯高度 Δh 一定时, q 越大, 掺气发生点距坝顶高差愈大; 类似地, q 一定, 阶梯高度 Δh 越大, 掺气发生点距坝顶高差愈小, 即掺气愈早发生。

还必须指出, 边界层发展至水面只是掺气发生的必要条件, 只有在表面流体的紊动达到一定强度, 能克服表面张力的阻滞作用后, 水点才会跃出水面, 掺气才可能发生。故除边界层发展至水面的条件外, 还要求表面流速达到 3~4m/s^[7]。但从表 2 资料可见, 对模型 D, 当 $q=0.5\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (原型值) 时, 模型的 #3 阶梯处已开始掺气, 而该处的模型流速约为 2m/s, 比要求的 3~4m/s 为小。可以认为, 这是阶梯坝面特定的水流边界条件所形成。坝面阶梯的存在, 极大地扰动了溢流水舌, 特别是阶

梯面上所形成的横轴漩涡与主流之间强烈的剪切及动量交换, 强化了水流的紊动, 促进了边界层迅速发展至水面, 所以阶梯坝面能在较小的流速下发生掺气。

表 2 掺气初始点阶梯号及 Z 值

模 型	$q/\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$				
	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0
B	#5/28	#10/3.8	#25/6.8	#45/10.8	/
C	#3/2.3	#7/3.8	#12/5.4	#22/9.8	/
D	#3/2.15	#6/3.8	#8/5.0	#12/7.4	#17/10.1
E	/	#5/3.4	#7/5.0	#10/7.4	#13/9.8

注: 表中分母为 Z 值, 单位 m

应用式(6)和图(7), 根据初步选定的阶梯高度 Δh 及设计流量 q , 可计算出阶梯坝面掺气发生点距坝顶的垂直距离 Z , 从而可判断初选的阶梯高度 Δh 是否有较好的消能效果。

由于掺气模型律至今仍是悬而未决的问题, 模型与原型的掺气情况也许不尽一致。但作为初步设计中比较不同 Δh 的掺气情况, 式(6)及图(7)仍有重要的参考价值。

4 结 论

(1) 阶梯坝面形成掺气水流, 是阶梯坝面具有较高消能率的重要原因之一。坝面掺气流段越长, 坝面消能率也愈高。

(2) 坝面阶梯的存在, 极大地扰动了溢流水舌, 强化了水流紊动, 促进了坝面边界层迅速增长。故阶梯坝面能在较低流速下发生掺气。

(3) 阶梯坝面掺气发生点距坝顶高差为 Z 。 Δh 一定时, Z 随 q 增大而增大; q 一定时, Z 随 Δh 增大而减小。 Z 值可利用式(6)或图(7)计算。

参 考 文 献

1 Bindo M, Gautier J, Lacroix F. The Stepped Spillway of M' Bali dam. Water Power and Dam Construction. Vol. 15, No. 1, Janary 1993

2 Ru Shuxun, Tan Chaoyang, Pan Ruiwen and He Xuemin. Stepped Dissipator on Spillway Face. In: Proceeding of the Ninth Congress of the Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research. Singapore, Vol. II, pp. 193-200, August 1994

(下转第 16 页)

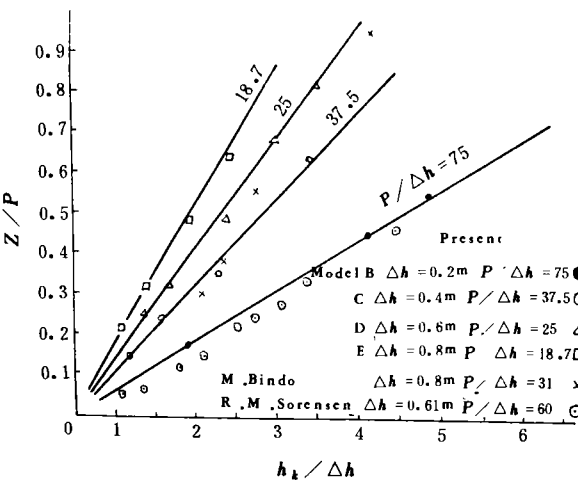


图 7 确定掺气初始断面的试验曲线

2 结 论

(1) 对于类似万安泄洪底孔与消力池消能布置的工程, 不宜采用间隔开启的方法进行泄洪调度, 宜采用分区调度闸门均匀开启的泄洪方案, 此为成功经验。其特点是使各区相对独立, 调度灵活, 底孔能适应各种运行条件, 避免了消力池内的不良流

态, 确保工程安全。

(2) 在各区单独及两区联合运行时, 将两边孔的闸门开度作适当调整, 可保证水跃跃头基本一致, 使消力池内流态均匀稳定。

参 考 文 献

- 1 吴持恭. 水力学. 北京: 高等教育出版社, 1985. 5

Experimental Studies on Flood Regulation for Bottom Outlets of Wan'an Project

Liu Caiyun

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract Two flood regulation schemes for the bottom outlets of the Wan'an Project were studied. The first scheme is that the operations of 10 bottom outlets were used in interval, and, the second, in subregion regulation. The preliminary comparison has indicated that the second scheme is better suitable for the requirements of hydraulic conditions. So, it was studied in more detail. A series of regulation curves with regarding to various discharges and water levels in the upstream and downstream are provided for using in practice.

Keywords flood regulation; bottom outlet; subregion; regulation

(上接第 10 页)

- 3 Corps of Engineers 著, 王诤昭, 张元禧译. 水力设计准则. 北京: 水利出版社, 1982
- 4 Rao N S L, Gangadharaiah T. A Method for the Location of Inception of Air Entrainment on Free Overfall Spillway for Different Discharges. Water and Waste Water Current Research and Practice. Vol. 10, pp. 70—75, 1978
- 5 Chanson H. Hydraulics of Skimming flows Over Stepped Channels and Spillways. Journal of Hydraulic Research, Vol. 32, pp. 445—460, 1994
- 6 Soresen R M. Stepped Spillway Hydraulics Model Investigation. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 1416—1472, 1985
- 7 斯里斯基 C M 著, 毛世民, 相立信译. 高水头水工建筑物的水力计算. 北京: 水利电力出版社, 1981

Determination for Location of Aeration Inception on Stepped Spillway

Ru Shuxun, Tang Chaoyang, Liang Chuan

(State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flows, Sichuan Union University, Chengdu 610065)

Abstract Air entrainment for the flow on stepped curved spillway is one of the important sources of the stepped spillway possessing high rate of energy dissipation. The location of aeration inception affects the choice of step sizes. Based on systematic model tests with four various step sizes of stepped spillway in a large flume, the mechanism of flow air entrainment is analyzed. A figure and a formula for the estimation of location of aeration inception are proposed.

Keywords dam; aeration; position; stepped spillway; aeration inception