

阶梯式溢流坝研究综述

陈 群,戴光清,刘浩吾

(四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要:回顾阶梯式溢流坝的研究方法及成果,提出目前研究较少或尚未解决的一些问题,如有关消能机理、掺气和空蚀特性等方面的研究以及如何提高大单宽流量时的消能率问题.指出阶梯式溢流坝的数值模拟研究几乎无人涉足,这也是今后的一个研究方向.

关键词:溢流坝;消能;模型试验;数值模拟;综述

中图分类号:TV641.4⁺5

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)01-0047-04

一般泄水建筑物下游的消能设施工程量大,造价昂贵.近10多年来,国内外不少学者对把泄流和消能设施结合为一体的溢流坝面阶梯式消能工产生了极大兴趣.阶梯式溢流坝即是在溢流坝面上从胸墙附近直到坝趾处设置一系列阶梯,阶梯的外包线一般仍按标准的溢流面曲线如WES曲线来设计,它主要利用坝面阶梯上水流所形成的横向旋滚及其与主流之间的剪切和动量交换来达到消能的目的,且由于坝面水流掺气,更增强了消能效果.试验研究表明,设计良好的阶梯坝面消能工可以显著减小消力池尺寸,甚至完全省去消力池,从而获得巨大的经济效益.另外,阶梯溢流坝的发展与新型的碾压混凝土筑坝技术的发展紧密相连,若采用碾压混凝土(RCC)坝,将坝面做成阶梯状,可以加快施工进度,缩短工期,节省投资.但是,工程实践表明,在大流量和高水头情况下,阶梯溢流坝的消能率将下降,通气难、易空化,并可能产生空蚀破坏,故其应用范围受到较大限制.

1 研究现状

阶梯式溢流坝早在本世纪初就有应用,1971年英国的Essery等^[1]针对阶梯式溢流坝设计作了一些试验研究.直到1982年,美国垦务局对建在犹他州的上静水坝的阶梯溢流坝进行了水工模型试验^[2],此试验研究对阶梯式溢流坝设计很有用,且激发了以后的研究及应用.

1.1 坝面流态研究

坝面流态直接关系到坝面水流对坝体的作用,若

流态不佳会对坝体产生不利影响.里亥大学的Sorensen^[3]对新蒙克斯维里坝(New Monksville Dam)的模型试验研究表明,当流速较低、水深很浅时水流在阶梯上会出现偏折现象,即水流从第一级阶梯向外向下发生偏折而落在相隔几级的阶梯上,这种现象可通过设置尺寸由小到大的过渡性阶梯来消除.汝树勋^[4]所做的模型试验也观察到水流的偏折现象.

加拿大的Rajaratnam^[5]总结Essery和Sorensen的研究成果,把阶梯溢流坝面的水流分为舌状流(nappe flow)和滑移流(skimming flow).目前,许多文献都沿用这种分类方法来进行研究.法国的Peyras等^[6]主要针对阶梯式石笼溢流面的设计进行了模型试验,把阶梯上的水流分为舌状流、部分舌状流和滑移流三种形式.

在阶梯溢流坝面的阶梯上会形成旋涡.Sorensen^[3]做模型试验时在水流中放入色素,观察到阶梯上有旋涡产生,同时伴随着气泡的卷入.廖华胜^[7]用流函数方法计算了阶梯溢流坝的流场,从流线图中明显可见阶梯上有旋涡产生.

1.2 消能率研究

1.2.1 消能率计算

在阶梯溢流坝的消能率计算公式中最简单、直观的就是根据坝体上下游能量守恒原理,用能量的减小与上游总能量之比作为能量损失率.

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100\% = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_1 , E_2 分别为上、下游总能量.

另一种较通用的方法是利用相对消能率的概念,计算阶梯溢流坝相对于光滑坝面的消能率.一般是用

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59879013)

作者简介:陈群(1972—),女,重庆云阳人,讲师,博士研究生,主要从事高速水流研究.

两者坝趾的动能差与光滑溢流坝下游的动能相比较.

$$E = \frac{v_s^2 - v_t^2}{v_s^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: v_s, v_t 分别为光滑和阶梯溢流坝趾的流速. Pegram^[8]以式(2)的定义为基础提出了相对能量损失率(EDR)的概念.

Rajaratnam^[5]着重研究了滑移流的剪应力和摩擦能量损失,把阶梯坝面视为均匀加糙的明渠,根据力平衡条件推导出的计算阶梯相对能量损失的半经验公式为

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E' - E}{E'} = \frac{(1 - A) + \frac{F_0'^2 (A^2 - 1)}{2 A^2}}{1 + F_0'^2 / 2} \quad (3)$$

式中: E, E' 分别为阶梯和光滑溢流坝趾处的能量; $A = (C_f / C_f')^{1/3}$, C_f, C_f' 分别为阶梯和光滑溢流坝面的摩擦系数; F_0' 为光滑溢流坝趾的 F_r . 此公式形式较简单,概念也较清楚,但光滑和阶梯溢流坝面的摩擦系数确定较困难.

南非的 Stephenson^[9]根据达西公式推导出的消能率计算公式如下:

$$\frac{\Delta E}{H} = 1 - \left(\frac{4S}{\lambda} + 1 \right) \left(\frac{\lambda}{8S} \right)^{1/2} \left(\frac{y_c}{H} \right) \quad (4)$$

式中: ΔE 为上、下游能量差; H 为以水头表示的上游总能量; $S = q^2 / (8gy^3)$, 为能量比降, q, y 分别为单宽流量和水深; $y_c = (q^2 / g)^{1/3}$, 为临界水深; λ 为无因次达西摩擦系数.

加拿大的 Chamani 等^[10]对阶梯溢流坝上的舌状流进行了研究,引入每个阶梯的能量损失比 α 的概念,推得下列计算舌状流消能率的公式:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{(1 - \alpha)^N \left[1 + 1.5 \left(\frac{y_c}{h} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^i}{N + 1.5 \left(\frac{y_c}{h} \right)} \quad (5)$$

式中: ΔE 为能量损失; E_0 为上游的总能量; y_c 为临界水深; h 为阶梯高度; N 为阶梯个数. 运用此公式的关键在于如何求出 α , 如果每个阶梯的 α 值不同, 那么此公式就不适用了.

澳大利亚的 Chanson^[11]推导出的计算阶梯溢流坝舌状流的消能率公式为

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.55}}{3/2 + H/y_c} \quad (6)$$

式中: $\Delta E, E_0, y_c$ 和 h 的意义同式(5); H 为上游总水头. 此式与式(5)相比, 其优点是不需要确定 α 值. Chanson 还推导出阶梯溢流坝面滑移流的消能率计算公式:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3}}{H_{\text{dam}} / y_c + 3/2} \quad (7)$$

式中: $\Delta E, E_0$ 和 y_c 的意义同式(5); θ 为坝面的倾角; H_{dam} 为坝高; f 为摩擦系数. 式(7)中较难确定的是 f 值, 它根据水深 y 来确定, 而阶梯溢流坝面上的水深是不易确定的.

汝树勋^[4]考虑掺气影响, 得到如下计算相对于光滑溢流坝消能率的公式:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \left(\frac{v_c^2}{2g} - \frac{v_T^2}{2g} \right) / \frac{v_c^2}{2g} \quad (8)$$

式中: v_c 为光滑溢流坝趾断面平均流速; v_T 为掺气水流等效为不掺气水流的水深后的断面平均流速. v_T 的计算中考虑掺气影响是通过计算不掺气的等效水深来实现的. 式(8)的主要优点是计算消能率时考虑了掺气影响.

1.2.2 消能率的影响因素

Stephenson^[9]针对阶梯尺寸、溢流面坡度等对阶梯式溢流坝的影响做了模型试验, 指出采用阶梯消能时下游溢洪道坡度为 1:10 ~ 1:5 时消能效果才会好, 但对混凝土坝来说会增大体积. 当下游坡较陡, 阶梯上的水深约为临界水深的 1/3 时, 消能效果会增加, 因而可用增大阶梯尺寸来增加消能效果.

Peyras 等^[6]由试验结果得到了不同坡度时, 单位水头的能量损失和堰趾处水深随 $q^2 / (g \cdot H^3)$ 的变化曲线 (q, g, H 分别为单宽流量、重力加速度和堰上下游水位差), 进而得出了堰下游消力池的设计方法.

蒋晓光^[12]通过对二滩阶梯式过水围堰的模型试验与 New Monksville 大坝的模型试验结果的对比表明, 小的阶梯高度适合于小的单宽流量, 其消能率很高; 而大的阶梯高度适合于大的单宽流量, 但当单宽流量增大到一定值时消能率有明显下降的趋势.

希腊的 Christodoulou^[13]对阶梯高宽比为 1:0.7 的阶梯式溢洪道进行模型试验. 通过无量纲分析, 表明控制能量损失的最重要的参数是阶梯面上的临界水深 y_c 与阶梯高度 h 之比 y_c/h 和阶梯的个数 N . 对很小的 y_c/h 值, 能量耗散率很高, 接近 1; 但随着 y_c/h 的增大, 能量耗散率减小. 当 y_c/h 一定时, 能量耗散率随 N 的增大而增大.

才君眉等^[14]通过试验, 分析了台阶式溢洪道的消能特性、单宽流量与消能率的关系, 以及台阶面坡度对消能率的影响. 指出台阶式溢洪道的消能率很高, 甚至可达 90% 以上, 但随单宽流量的增加而减小.

美国的 Rice 等^[15]对坡度为 1V:2.5H 的土坝下游的阶梯溢洪道进行模型试验. 阶梯的消能作用很明显, 阶梯溢洪道的消能率可达到光滑溢洪道的 2

~3倍,这使坝趾的消力池尺寸大大减小.在最大单宽流量 $q = 14.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 时,消力池长度可减为原来的70%.作者把试验结果与 Christodoulou^[13]试验所得的 $\Delta H/H \sim y_c/h$ ($\Delta H, H, y_c, h$ 分别为某阶梯以上的水头损失、水头、临界水深和阶梯高度)和 $\Delta H/H \sim y_c/(Nh)$ (N 为阶梯个数)关系曲线相比较,两者相当吻合.但作者模型阶梯的坡度为 1:2.5,比 Christodoulou 所做的模型的坡度要缓得多,由此可知阶梯上的能量损失在很大程度上依赖于坡面长度.当溢洪道高度、阶梯高度和流量一定时,虽然较陡的坡面有较大的摩擦系数,单位长度坡面的消能率比缓坡高,但较缓的坡面在相同高度时更长,因此总的能量损失与较陡的坡面相同.

土耳其的耶尔德兹^[16]对前人的研究成果进行了分析,总结出陡坡和缓坡上水流流态的不同,从而分析了两种坡的消能率影响因素.当坡角小于 51.3° 时,能量的消散随着台阶高度的增加而增大;但当坡角达到 60° 时,台阶高度对消能率几乎没有影响.当台阶高度较小时,坡度变陡,能量损失减小;但对于较大的台阶高度,坡度对总能量损失率的影响不显著.

南非的 Pegram 等^[8]对两组坡度都为 1:0.6 且具有相同堰面曲线但比尺不同、阶梯尺寸不同的阶梯溢洪道模型进行了研究.一组比尺为 1:10,对应溢洪道高度为 30 m;另一组比尺为 1:20,对应于 58 m 高的溢洪道.研究表明,对两组不同比尺的模型,当阶梯上的临界水深 h_c 相同时,不论阶梯高度是否相同,都可得到相同的下游跃后水深 y_2 值.由此可知,在阶梯总高度相同时 y_2 只与 h_c 有关,而与阶梯高度无关.

1.3 其它水力特性研究

除了消能率外,一些研究者还对阶梯上的水深、掺气等特性进行了研究.西班牙坎塔布里大学(Cantabria University)的 Diez-Cascon 等^[17]对与 RCC 坝相结合的阶梯式溢流坝的水力特性进行了模型研究,主要给出了跃后水深的变化和水跃前后一些水力参数的关系.

中非的 Bindo^[18]把溢流坝面的水流按掺气情况分为 3 部分:未掺气区、逐渐掺气区和掺气区.指出由于阶梯使水流大量掺气,从而减小了坝面的空蚀.模型试验结果表明,有阶梯时流量系数不受影响,为了避免水流在低流量时产生跳级,第一级台阶应向堰顶靠近.

汝树勋等^[4]对一系列不同阶梯高度的阶梯溢流坝进行模型试验,研究了掺气初生点位置随流量和阶梯尺寸的变化.把掺气水流分为液滴跳跃区和气泡悬浮区,推导出不计液滴跳跃区水深时的消能率公

式.此外,还对阶梯上出现负压的情况进行了研究.

廖华胜等^[19]对文献[3]提出的 New Monkville 阶梯溢流坝的模型的流场用激光测速仪进行量测,所测速度与不设阶梯的光滑溢流面相比有较大减小,表明阶梯的消能效果较好.光滑和阶梯溢流面的水面线基本一致,水面稳定性较好.负压多产生于阶梯的立面上,但绝对值比光滑溢流面时增加不大.廖华胜等^[7]将自己提出的“残压反馈”方法按势流方程进行自由面求解,结合平均化差分格式求解 $\omega-\psi$ 方程来对阶梯式溢洪道进行数值模拟计算,得出了流场中的流线图.这是对阶梯式溢洪道进行的首次数值模拟研究,虽然其中利用了势流理论,其结果必然与实际情况有所出入,但可为以后的研究提供一些借鉴.

谢省宗等^[20]对福建水东水电站的 RCC 溢流坝进行了水工模型试验.由于流量大,尾水深,采用宽尾墩-阶梯式坝面-库池联合消能,强调了宽尾墩对消能起主要作用,而阶梯作用很小,说明当流量大时阶梯消能作用会变小.杨寿龙等也对水东水电站的 RCC 溢流坝进行了模型试验,主要对阶梯面上的压力进行研究.测试表明,阶梯立面上的压力都低于阶梯平面上的压力.当阶梯向消力池靠近时,立面和平面上的压力值逐渐接近,空蚀最可能发生的区域是阶梯溢洪道的最开始几级阶梯的立面上.

周辉等^[21]通过模型试验研究了阶梯溢流面上滑移流的水深,以及坝面流态、掺气发生点和能量耗散等特性.并指出目前缺乏大单宽流量条件下阶梯溢流坝滑移流水力特性和原型观测等方面的研究.

唐毅^[22]等对老挝南果河水电站前池的阶梯溢流陡槽进行模型试验,结果表明阶梯尺寸对阶梯的影响不仅仅取决于阶梯的高宽比,还取决于其高和宽的具体尺寸.当阶梯尺寸减小时,水流的掺气和水滴的跳跃变得不明显,水流掺气的发生点基本都在阶梯开始的断面.对于阶梯溢流面,当流速达到一定值后,沿程断面平均流速几乎不变,此时水流势能沿程的减小基本与阶梯消耗的能量平衡,水流动能不变,但光滑溢流面的断面平均流速会一直沿程增加.

2 主要研究方向

综上所述,对阶梯式溢流坝的研究还处于初级阶段,亟待进一步深入.从研究方法来说,大多是用模型试验进行研究,通过对试验结果的分析,得出阶梯大小、溢流面坡度、流量等对消能率的影响规律.有些研究者推出了计算消能率的半经验公式,但对水流掺气形成两相流后水流的脉动、掺气浓度以及空蚀发生的可能性方面研究较少.

由于模型试验与原型相比,有一定的比尺效应,

不一定在各方面都能很好地反映原型的特性,所以有必要进行更多的原型观测工作。目前,数值模拟和计算技术迅速发展,模型试验相对于数值模拟来说又颇显昂贵,所以数值模拟研究越来越受到人们的青睐。但是,对于阶梯式溢流坝来说,存在几个较难解决的问题:①存在不规则的曲线自由水面;②边界条件由于有阶梯的存在,下游可能还会有反弧段而变得较复杂;③由于水流掺气,溢流面的水流是具有一定掺气浓度的两相流,而水-气两相流的机理及其动力方程的研究都还不十分成熟。由于上述困难的存在,这方面的数值模拟研究很少,但它将是一个发展趋势。

在消能方面的研究中还有一个目前尚未解决的问题,就是有很多研究都表明,在大单宽流量时阶梯的消能效果将大大降低。故在确保较高的消能率且无空化空蚀破坏的前提下,如何提高单宽泄流量,即寻求提高单宽流量的途径和工程措施是今后研究的一个重要方向。在国家自然科学基金的资助下,作者将针对以前的研究者涉及较少的问题,如水流的紊动结构与消能机理,坝面掺气特性和掺气对空化及消能率的影响等问题作进一步的研究。除通过水工模型试验进行系列试验外,还要用两相流理论来对阶梯式溢流坝面的流场进行数值模拟研究。在如何提高过坝单宽流量方面,作者将探索把具有充分扩散面而无空蚀之虑的掺气分流墩与阶梯式溢流坝相结合,充分利用掺气分流墩的水流分散及强掺气作用,大幅度减小阶梯坝面滑移水流的深度,强化阶梯消能效果,从而达到增大单宽流量、提高水头应用范围的目的。

从上述可以看出,阶梯式溢流坝主要应用于RCC重力坝。但据文献[7]的研究,溢洪道坡度为1:10~1:5时阶梯的消能效果最好。文献[11]对土石坝下游阶梯溢洪道的研究也指出,当坝高相同时较缓的坡面并不比陡坡上阶梯的消能效果差,这就为阶梯溢流坝应用于土石坝提供了依据。虽然目前对土石坝采用阶梯式溢流的研究还很少,但这将是一个很有意义的研究方向。

参考文献:

- [1] Essery I T S, Horner M W. The hydraulic design of stepped spillways[R]. Construction Industry Research and Information Association, London, Report 33.
- [2] Young M F. Feasibility study of a stepped spillway[A]. Hydraulic Division Specialty Conference[C]. Jackson, MS, 1982. 96~105.
- [3] Sorensen R M. Stepped spillway hydraulic model investigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1985, 111(12):

1461~1472.

- [4] Ru Shuxun, et al. Stepped dissipator on spillway face[A]. In: Proceedings of Ninth Congress of Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research (vol 2) [C]. Singapore, 1994. 193~200.
- [5] Rajaratnam N. Skimming flow in stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1990, 116(4): 587~591.
- [6] Peyras L, Royet P, Degoutte G. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1992, 118(5): 707~717.
- [7] Liao Huasheng, Wu Chigong. Numerical model of stepped spillway overflow[A]. In: Proceeding of 2nd International Conference on Hydro-Science and Engineering[C]. Beijing, 1995.
- [8] Pegram G C S, Officer A K, Mottram S R. Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999(5): 500~510.
- [9] Stephenson D. Energy dissipation down stepped spillways[J]. Water Power and Dam Construction, 1991(9): 27~30.
- [10] Chamani M R, Rajaratnam N. Jet flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120(2): 254~259.
- [11] Chanson H. Stepped spillway flows and air entrainment[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1993, 20(3): 422~435.
- [12] 蒋晓光. 阶梯式溢流消能浅析[J]. 泄水工程与高速水流, 1992(4): 37~40.
- [13] Christodoulou G C. Energy dissipation on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, 119(5): 644~651.
- [14] 才君眉, 薛慧涛, 冯金鸣. 碾压混凝土坝采用台阶式溢洪道消能初探[J]. 水利水电技术, 1994(4): 19~25.
- [15] Rice C E, Kadavy K C. Model study of a roller compacted concrete stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(6): 292~297.
- [16] D·耶尔德兹, I·科斯. 台阶式斜槽溢洪道的水力特性[J]. 阙圣堂译. 水利水电快报, 1999, 20(9): 1~4.
- [17] Diez-Cascon J, et al. Studies on the hydraulic behaviour of stepped spillways[J]. Water Power and Dam Construction, 1991(9): 22~26.
- [18] Bindo M, Gautier J, Lacroix F. The stepped spillway of M' Bali dam[J]. Water Power and Dam Construction, 1993(1): 35~36.
- [19] 廖华胜, 汝树勋, 吴持恭. 阶梯溢流坝水力特性实验研究[A]. 见: 水利水电泄水工程与高速水流信息网, 水利部松辽水利委员会科学研究院. 泄水工程与高速水流论文集[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 95~97.
- [20] 谢省宗, 李世琴, 李铁洁. 宽尾墩和阶梯式溢流坝联合消能新技术[J]. 泄水工程与高速水流, 1996(1): 24~30.
- [21] 周辉, 吴时强, 姜树海. 阶梯溢流坝滑移流水力特性初步研究[A]. 水利水电泄水工程与高速水流信息网, 东北勘测设计研究院水利科学研究所. 泄水工程与高速水流[C]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1998. 25~28.
- [22] 唐毅. 阶梯式消能工的试验研究及在南果河水电站的应用[J]. 水力发电, 1998(4): 33~35.

(收稿日期: 2000-09-19 编辑: 张志琴)