

凸起型阶梯对阶梯溢流坝面压强特性影响

陈卫星, 董丽艳, 郭莹莹, 杨具瑞

(昆明理工大学 现代农业工程学院, 昆明, 650500, Email: baymaxcwx@163.com)

摘要: 对于高水头、大单宽流量的泄水建筑物泄洪, 阶梯溢流坝上传统的均匀阶梯容易发生空蚀空化破坏。为此, 将传统的均匀阶梯设计为局部凸起的过渡式阶梯, 从而更好地掺气, 避免空蚀空化破坏的发生。通过水工模型试验将传统的均匀阶梯与 6 种凸起型阶梯做对比, 研究发现: 当首级阶梯为凸起型阶梯时, 第一台阶被水流充满, 负压出现在第二台阶; 当首级阶梯为大阶梯时, 掺气空腔体积较大, 负压较小; 阶梯的局部凸起可以增大水流的紊动程度, 可提高空腔吸卷空气的能力; 水流与坝面分离时, 阶梯处的压强基本为 0 kPa, 下跌水舌与阶梯面接触, 压强迅速增大。

关键词: 凸起型阶梯; 阶梯溢流坝; 负压; 时均压强

1 引言

近几十年来, 百米级以上的大坝越来越多, 单宽泄洪流量也愈来愈大。单一的消能方式已经满足不了这类工程的高效地消能。为此, 在许多学者的潜心研究下, “宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池”一体化消能方式脱颖而出。但是, 阶梯面可能会发生空蚀空化破坏。为了研究如何降低甚至避免空蚀空化破坏, 许多学者做了很多工作。比如: 张洛等^[1]通过数值模拟发现, 出闸室水流受宽尾墩的挤压, 在宽尾墩迎水面尖角处有一范围较大的高压区, 水流与壁面发生分离, 导致宽尾墩底部斜面出口处存在局部负压; 后小霞^[2]发现宽尾墩收缩比减小, 空腔最大负压值减少, 但负压分布范围增大; 张挺等^[3]通过数值模拟发现, 一定的负压有利于宽尾墩墩后空腔在阶梯面上吸卷空气, 提高掺气效果, 但负压较大, 会导致水流产生空化; 不仅如此, 增加掺气坎的角度^[4], 有利于阶梯面掺气, 可以防止阶梯面被破坏; 增加掺气坎的高度^[5], 也会改善阶梯的掺气效果, 避免台阶竖直和水平壁面的空化空蚀; 但郭莹莹等^[6]在模型试验中发现, 在增大掺气坎相对高度的同时, 增加过渡台阶尺寸, 可明显减少台阶立面负压的产生; 王强^[7]发现, 若阶梯空腔内不能充分掺气, 阶梯内会产生较大的负压, 容易发生空蚀空化破坏; 张志昌等^[8]发现, 台阶式溢洪道的压强呈波浪式分布, 在相邻台阶上出现波峰和波谷, 当台阶上的时均压强增大, 相对应负压值逐渐减小。

以上对消能工的压强均有研究，但阶梯仅仅局限于传统的内凹式阶梯。为此，本文采用模型试验的方法，选取 6 种不同形状的凸起型阶梯，与传统的内凹式阶梯作对比，研究凸起型阶梯对阶梯溢流坝面压强的影响，其结果对实际工程有一定的指导意义。

2 物理模型与试验方案

2.1 物理模型

本文模拟的试验是以坝高为 138 m 的阿海水电站为原型，在昆明勘察设计院水工模型试验场地完成。整个水工模型呈正态整体形态，几何材料采用有机玻璃制作。在模型设计中，严格按照阿海水电站原型按照比尺设计，WES 曲面与阶梯溢流坝的衔接过渡段采用分段制作。从上游至下游依次为 WES 曲面、过渡阶梯段（由均匀阶梯前六阶改造而成）、1m × 0.75m（高 × 宽）的均匀阶梯段、反弧段以及消力池段。模型根据重力相似准则设计。其主要设计比尺关系见表 1。

表 1 模型主要比尺关系

名称	几何比尺 λ_L	流量比尺 λ_Q	流速比尺 λ_v	压力比尺 λ_p	糙率比尺 λ_n	时间比尺 λ_t
关系	λ_L	$\lambda_L^{2.5}$	$\lambda_L^{0.5}$	λ_L	$\lambda_L^{1/6}$	$\lambda_L^{0.5}$
数值	60	27885.48	7.746	60	1.979	7.746

2.2 试验方案

在无掺气坎的条件下，将均匀阶梯段的前六阶设计为过渡阶梯，为方案一。将均匀阶梯的前六阶设计为 3 个尺寸为 1.5m × 0.75m（高 × 宽）的凸起型阶梯，为方案二。将均匀阶梯的前六阶设计为 3 个尺寸为 1m × 1.125m（高 × 宽）的凸起型阶梯，为方案三。将均匀阶梯的前六阶设计为 3 个尺寸为 1.5m × 1.125m（高 × 宽）的凸起型阶梯，为方案四。在方案二的基础上，将前两级阶梯设计成 2m × 1.5m（高 × 宽）的大阶梯，为方案五。在方案三的基础上，将前两级阶梯设计成 2m × 1.5m（高 × 宽）的大阶梯，为方案六。在方案四的基础上，将前两级阶梯设计成 2m × 1.5m（高 × 宽）的大阶梯，为方案七。各方案阶梯见图 1。

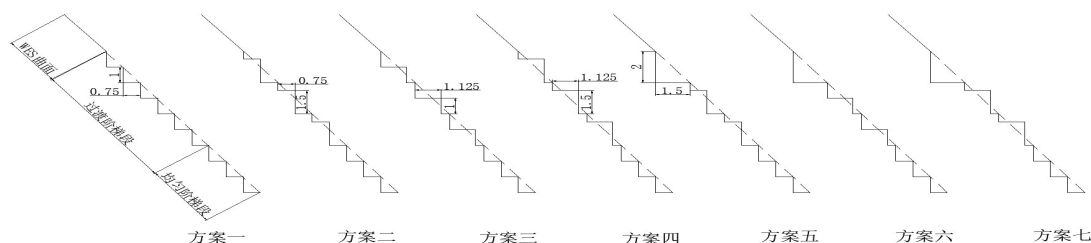
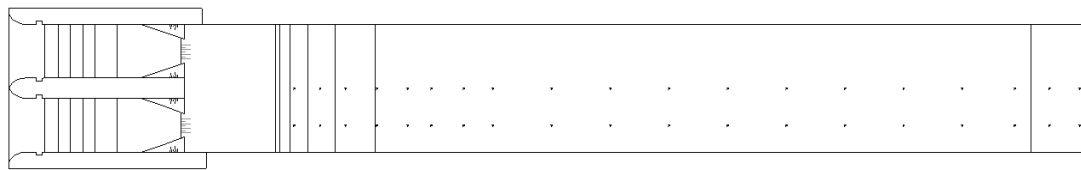


图 1 各方案阶梯示意图

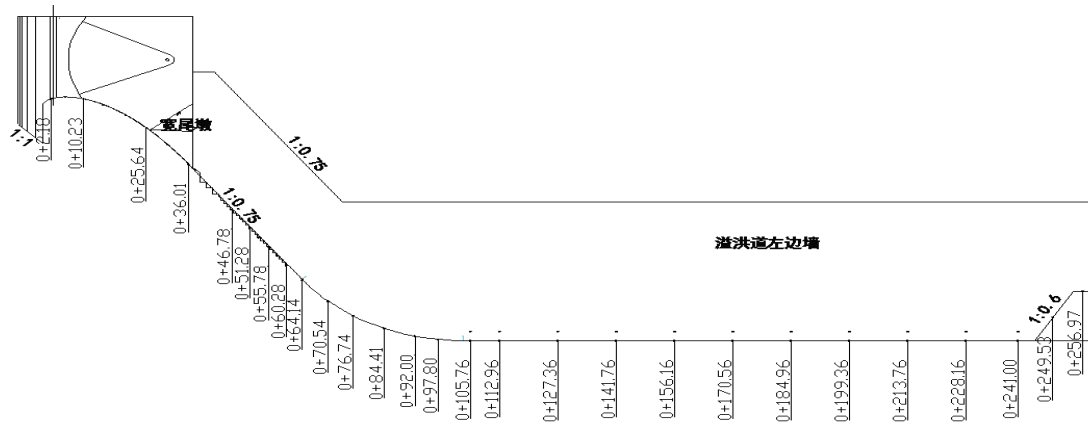
注：上图各方案的阶梯尺寸均为 m

本次试验在一体化消能工共布置 36 个断面测点，测点桩号 0+2.18m~0+256.97m。其中，桩号 0+2.18m~0+36.01m 为 WES 曲面段，共 8 个测点；桩号 0+44.53m~0+60.28m 为阶梯段，共 8 个测点；0+64.14m~0+97.80m 为反弧段，共 6 个测点；0+105.76m~0+256.97m 为消力池段及消力坎，共 14 个测点。

本文对一体化消能工的压强特性进行研究，负压采用综合精度 0.1% 的 CY202 数字压力传感器测量，测点位于第一台阶的立面、平面以及第二台阶的立面；时均压强采用内径 12 mm、精度 1 mm 的玻璃管测量，测点分布在 0+2.18m~0+245.00m，共 34 个。测点位置如图 2 所示。



(a) 平面



(b) 剖面

图 2 模型试验测点示意图

注：图中尺寸的单位为 m；“·”为测点

3 试验结果及分析

3.1 负压分布

水流在下泄过程中，受宽尾墩的横向收缩和纵向拉伸作用，在阶梯溢流坝段与阶梯分

离，形成掺气空腔，若掺气空腔内掺气量不足，则会导致负压的形成。较小的负压可有利于空腔吸卷空气，有利于掺气。但负压较大，则会对阶梯壁面造成破坏。本试验对第一台阶立面、平面以及第二台阶立面进行负压测量，各方案负压分布如表 2 所示。

由表 2 可知，方案一阶梯内无负压，其余方案在前两级阶梯内均存在局部负压，相对比而言，方案一阶梯内无负压，不能很好地掺气，不利于消能。对比方案二至方案七，在第一台阶立面和平面，方案二至方案四均为正压，台阶不受水流空蚀空化破坏。主要原因是方案二到四首级阶梯为凸起型阶梯，下泄水流经过宽尾墩的收缩作用后，部分水体跌落在首级阶梯平面上，在首级阶梯内形成旋滚水流，逐渐充满整个阶梯，再汇入主流水体，所以方案二至方案四的首级阶梯均为正压；而方案五至方案七在第一台阶内局部出现负压，且最大负压出现在第一台阶立面（上），分别为-24.46kPa、-20.60kPa、-23.58kPa。主要是由于方案五至方案七的首级阶梯为大阶梯，水流在下泄过程中，与阶梯溢流坝面产生分离，形成掺气空腔，进而产生负压。水体在空中与空气接触、碰撞以及掺混，将部分空气带入空腔体内。加之方案五至方案七的第二阶梯为凸起型阶梯，阶梯局部的凸起加大了对水流的扰动，增强了水流的紊动程度，致使空腔吸卷入更多的空气，扩散至首级阶梯，因此首级阶梯负压有所降低。由此可以发现，首级阶梯为大阶梯，有利于阶梯面的掺气。

在第二台阶立面，方案二至方案四开始出现负压，且在第二台阶立面（上）出现最大负压，最大负压分别-50.34kPa、-48.10kPa、-55.12kPa。主要原因有以下两点：方案二至方案四的首级阶梯为凸起型阶梯，下泄水流溅落到首级阶梯平面上，形成不完整的通道，水流无法更好地掺气，导致负压较大；再者，方案二至方案四的前几级阶梯均为凸起型阶梯，有效地掺气空腔体积较大，掺气不充分，负压较大。在二者联合作用下，负压增大较为明显。方案五至方案七仅在第二台阶立面（上）出现负压，且负压相对第一台阶最大负压较小。

表 2 各方案阶梯负压分布值

kPa

测点位置	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七
第一台阶立面（上）	10.77	42.56	42.79	41.68	-24.46	-20.60	-23.58
第一台阶立面（中）	11.42	48.64	53.86	48.34	-23.89	-17.38	-22.36
第一台阶立面（下）	13.54	52.64	61.60	50.22	-20.65	-15.24	-19.28
第一台阶平面（上）	27.82	34.58	42.14	27.18	-17.29	-14.36	-16.18
第一台阶平面（中）	28.38	36.78	48.92	32.15	-14.97	-9.70	-12.62
第一台阶平面（下）	32.26	40.26	47.16	44.24	24.06	26.18	25.92
第二台阶立面（上）	32.22	-50.34	-48.10	-55.12	-21.68	-19.68	-24.68
第二台阶立面（中）	46.18	-49.70	-43.32	-52.18	32.78	41.78	37.78
第二台阶立面（下）	51.32	-45.76	-41.40	-47.24	45.46	55.46	52.62

3.2 时均压强分布

3.2.1 WES 曲面—阶梯段压强分布

各方案下的 WES 曲面—阶梯段的时均压强如图 3 所示。从图 3 中可以看出，从桩号 0+2.18m 到桩号 0+5.73m，各方案压强有所减小，主要由于在水流进口断面附近，水头高，流速小，压强较大；水流沿 WES 曲面下泄，水头减小，流速变大。此时，部分势能转化成动能，压强减小。从桩号 0+5.73m 到桩号 0+30.82m，水流受到宽尾墩的横向收缩作用，水位被抬高，压强增大。从桩号 0+30.82m 到桩号 0+36.01m，宽尾墩墩尾逐渐扩宽，迫使水流在闸室内横向收缩、纵向扩散产生射流，形成纵向拉伸的水舌，势能迅速转化成动能，将下泄水流挑射在空中，与阶梯溢流坝面分离，压强减小^[9]。

各方案在阶梯段的桩号 0+44.53m 到桩号 0+53.53m 之间的压强值接近于 0kPa，主要是下泄水流由于宽尾墩的收缩作用，经过挑坎的挑射，在空中与试验模型壁面发生分离，水舌底部和台阶之间先是产生无水空腔，而后被水充满，形成过渡水流^[10]，而且由于水流掺气后在阶梯面形成水垫塘，并逐级跌落消能，削弱水流对阶梯的冲击，使得阶梯段的压强很小，且有些许波动。从桩号 0+53.53m 到桩号 0+60.28m，各方案压强增大，且在桩号 0+60.28m 处压强达到最大，其中方案四的压强最大，为 74.87kPa；方案六的压强最小，为 48.40kPa。这是因为下泄水流与坝面分离后，水舌跌落在桩号 0+53.53m 附近，在此处既有前段空腔内的气体，又有下跌水舌冲击水面带入的空气，两种气体交汇在一起，水流底部产生较多气泡，时均压强随之增大。方案六的可掺气空腔体积较大，掺气较为充分，加之阶梯的凸起增大了水流的紊动性，水流在空中与空气相互接触、碰撞，逐步消耗能量，压强较小；方案四的凸起型阶梯数量较多且尺寸较大，使其可掺气空腔体积较小，掺气效果较差，掺气空腔后的水体剪切能力较差，水流在与空气接触、碰撞后相互混合产生的剧烈程度较弱，因此方案四的压强较大。

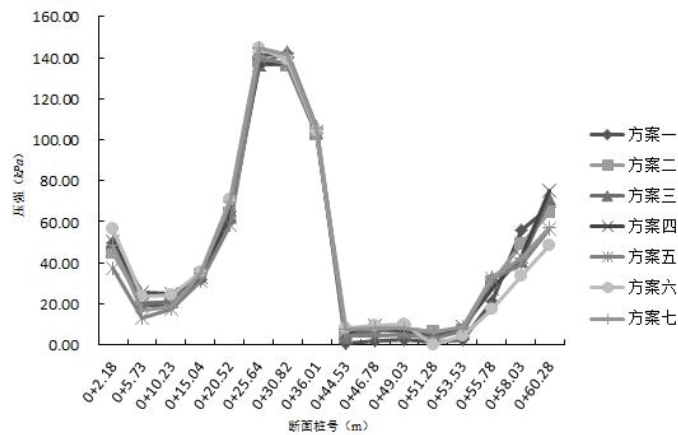


图 3 WES 曲面—阶梯段时均压强分布情况

3.2.2 反弧—消力池段压强分布

图4表示的是各方案下的反弧—消力池段的时均压强分布情况。由图4可知,各方案在反弧段至桩号0+105.76m的压强逐渐增大,主要原因是下泄水流流经阶梯面后,继续对反弧段进行冲击,压强增大。在桩号0+105.76m处,压强达到峰值,各方案的压强分别为:414.54kPa、421.60kPa、441.00kPa、415.72kPa、436.30kPa、429.24kPa及450.15kPa。从桩号0+105.76m到桩号0+141.76m,由于水流受宽尾墩收缩的影响,分成上缘水流与下缘水流,两股水体在消力池前端汇合,产生剧烈地碰撞形成淹没式水跃,同时出现回流现象,致使压强减小。自桩号0+141.76m后,压强持续上升,主要是由于回流现象消失,以及在消力坎前发生雍水作用,提升水面线,流速减小,压强增大。各方案在消力池的时均压强相差不大,说明改变阶梯的形状,对消力池内时均压强影响不大。这与文献[11]所提出的观点基本一致。

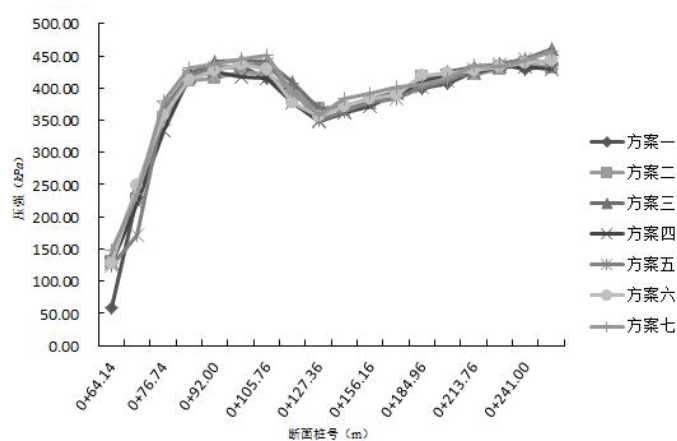


图4 反弧—消力池段时均压强分布情况

4 结论

在无掺气坎的条件下,对上述7种方案进行了宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池的一体化消能方式的水工模型试验,并对各方案过渡阶梯段的阶梯进行负压及时均压强的对比、分析,得出以下结论:①当首级阶梯为凸起型阶梯时,下泄水流易跌落在首级阶梯上,进而充满整个阶梯,此时,首级阶梯内无负压。方案二至方案四首级阶梯内均无负压,负压出现在第二台阶,且负压较大;②首级阶梯为大阶梯,有助于阶梯面掺气,加之后几级阶梯的凸起,增大了水流的紊动程度,增大空腔吸卷空气的能力,空腔掺气越多,负压越小。方案五至方案七的最大负压出现在第一台阶立面,最大负压分别为-24.46kPa、-20.60kPa、-23.58kPa,方案六负压最小。③水流与坝面分离后,跌落在若干级阶梯上,压强迅速增大,在阶梯段末端压强达到最大。其中方案四的压强最大,为74.87kPa;方案六的压强最小,

为 48.40kPa。

参 考 文 献

- 1 张洛,后小霞,杨具瑞.边宽尾墩体型对边墙区域水流水力特性的影响研究[J].水力发电学报,2015,34(1):85-92.
- 2 后小霞,杨具瑞,甄建树.宽尾墩体型对宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池消能方式中阶梯掺气空腔长度及负压影响研究[J].水力发电学报,2014,33(3):203-209.
- 3 张挺,伍超,卢红,等.X型宽尾墩与阶梯溢流坝联合消能的三维流场数值模拟[J].水利学报,2004,8(6):15-20.
- 4 张靓,杨具瑞,陈玉壮.前置掺气坎角度对溢流坝阶梯面消能特性的影响[J].水利水运工程学报,2016(4):118-125.
- 5 朱利,张法星,刘善均.前置掺气坎高度对阶梯溢流坝水力特性的影响[J].人民黄河,2014,36(6):110-112.
- 6 郭莹莹,杨具瑞,张勤,等.不同体型过渡阶梯对联合消能工水力特性的影响研究[J].水动力学研究与进展,2018,33(5):658-665.
- 7 王强,杨具瑞,武振中,等.不同台阶数的过渡阶梯对阶梯溢流坝面压强及消能特性的影响研究[J].水力发电学报,2016,35(5):84-93.
- 8 张志昌,曾东洋,郑阿漫,等.台阶式溢洪道滑水流压强特性的试验研究[J].水动力学研究与进展,2003,18(5):652-659.
- 9 董丽艳,杨具瑞.挑坎+过渡阶梯的组合设施对一体化消能工的影响研究[J].水动力学研究与进展,2018,33(6):807-815.
- 10 田嘉宁,赵庆,范留明.台阶式溢流坝后消力池压强特性[J].水力发电学报,2012,31(4):113-118.
- 11 赵相航,解宏伟,顾声龙,等.台阶式溢流坝消力池压强特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):171-176.

Influence of raised ladder on pressure characteristics of stepped spillway dam

CHEN Wei-xing, DONG Li-yan, GUO Ying-ying, YANG Ju-rui

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Huazhong Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500. Email: baymaxcwx@163.com)

Abstract: For high-head, large single-drainage discharge structures, the traditional uniform step on the stepped overflow dam is prone to cavitation damage. To this end, the traditional

uniform step is designed as a partially raised transition ladder to better aerate and avoid cavitation cavitation damage. In this paper, the traditional uniform step is compared with six kinds of convex steps through the hydraulic model test. It is found that when the first step is a convex step, the first step is filled with water flow and the negative pressure appears at the second step; When the first step is a large step, the aeration cavity has a large volume and a small negative pressure; the partial protrusion of the step can increase the turbulence of the water flow, and can improve the ability of the cavity to absorb air; the water flow and the dam surface When separating, the pressure at the step is basically zero, and the falling water tongue is in contact with the step surface, and the pressure increases rapidly.

Key words: Raised ladder, Stepped spillway dam, Negative pressure, Time-average pressure.