

外凸型阶梯式陡坡段掺气和动压特性

黄智敏, 付波, 陈卓英

(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: 为了探讨溢洪道不连续外凸型阶梯陡坡段的掺气和动水压强特性, 开展了坡度为 1:3 阶梯陡坡段的掺气和动水压强水力模型试验。研究表明: 受外凸型阶梯突体的影响, 其阶梯陡坡段水流未掺气区长度比常规连续的内凹型阶梯陡坡段缩短, 其水面掺气断面下游的陡坡段壁面水流掺气浓度较高和沿程增大, 掺气浓度随阶梯高度增大而增加, 随单宽流量增大而减小, 陡坡段壁面的抗空蚀性能明显提高; 阶梯陡坡段壁面动水压强随阶梯高度和单宽流量增大而增加, 在阶梯高度 $a \leq 0.6$ m、单宽流量 $q \leq 30$ m³/(s·m) 试验条件范围内, 陡坡段水面掺气断面下游的阶梯壁面动水压强值为其相应断面流速水头的 45% 之内。

关键词: 溢洪道; 外凸型阶梯; 陡坡段; 掺气浓度; 动水压强; 模型试验

中图分类号: TV131

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0138-06

Aeration and hydrodynamic pressure characteristics for outer convex step in steep slope section

HUANG Zhimin, FU Bo, CHEN Zhuoying

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

Abstract: In order to discuss the characteristics of aeration and hydrodynamic pressure of discontinuous outer convex step in spillway steep slope section, the hydraulic model test of aeration and hydrodynamic pressure of the steps in steep slope section with a gradient of 1:3 is carried out. The study results show that, first, affected by the body of outer convex step, the length of non-aeration zone of the steep slope is shorter than that of conventional continuous internal concave step, the water air concentration at the steep slope wall is higher and increases along the slope in the downstream of water surface aeration initial section, and the air concentration increases with the increase of the step height and decreases with the increase of the unit-width discharge, the anti-cavitation properties of steep slope wall are obviously increased. Secondly, the hydrodynamic pressure intensity of the step steep slope wall increases as the step height and unit-width discharge increase and in the experimental conditions of the step height $a \leq 0.6$ m and the unit-width discharge $q \leq 30$ m³/(s·m), the pressure value at the step steep slope wall is within limit of 45% of the velocity head of the corresponding section in the downstream of water surface aeration initial section.

Key words: spillway; outer convex step; steep slope section; aeration concentration; hydrodynamic pressure intensity; model test

1 研究背景

不连续的外凸型阶梯具有水流消能率较高、体型结构简单、施工方便等特点, 已在国内的多个水利工程陡槽溢洪道得到了成功地应用^[1-2]。溢洪道陡

坡段的外凸型阶梯增大了溢流陡坡面的“糙率”, 相当于在陡坡面上设置了突体, 因此, 外凸型阶梯顶面易遭受较大流速泄流的冲击, 而阶梯下游立面底部压强较小或产生负压, 易使陡坡面阶梯产生冲击破坏和空蚀。现有的研究成果主要是对坡度较陡的溢

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2018-02-09

作者简介: 黄智敏(1957-), 男, 广东惠州人, 硕士, 教授级高级工程师, 从事水工水力学及河流动力学研究。

流坝面连续的内凹型阶梯掺气和动压特性进行研究^[3-10],文献[5-6]采用前置掺气坎式阶梯溢洪道布置,提高了溢洪道掺气浓度和水流消能率等,溢洪道抗空蚀性能明显增强。目前,对坡度较缓的不连续外凸型阶梯陡坡段的掺气和动水压强特性研究甚少。通常,根据陡坡段的阶梯高度 a 、泄流单宽流量 q 的大小不同,不连续的外凸型阶梯陡坡段流态可以分为跌流、过渡水流和滑行水流等,当陡坡段泄流单宽流量 q 较大时,流过阶梯坎顶的水流与各阶梯坎顶端连线近似平行,各级阶梯下游立面下游区域充满水体;陡坡段水面掺气之后,其下游各级阶梯下游立面底部形成稳定的含气漩涡,此流态为滑行水流^[11-12]。

本文在坡度 $i = 1:3$ 的外凸型阶梯陡坡段滑行水流流态下,对其壁面沿程掺气浓度和动水压强特性进行试验研究。

2 水力模型试验简介

根据试验室的条件,选用溢洪道模型为1:16的正态模型。溢洪道陡坡段坡度 $i = 1:3$ 、宽度为8 m,其上游堰顶高程设为45.0 m、下游护坦段高程为0.0 m;陡坡段设置35级不连续的外凸型阶梯,阶梯高度 $a = 0.3、0.45$ 和 0.6 m,阶梯间距 $S = 3.8$ m(见图1)。试验的单宽流量 $q = 10、20$ 和 30 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,相应堰顶水头 $H = 3.61 \sim 7.28$ m。

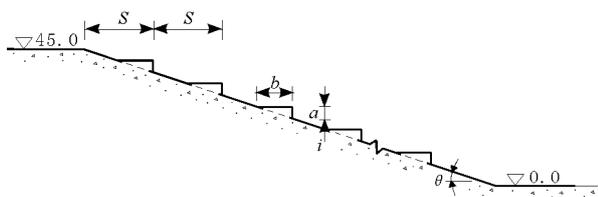


图1 陡坡段不连续的外凸型阶梯布置示意图

根据文献[13]的规定,模型掺气设施处水流速度宜大于 6 m/s 。模型掺气设施处水流速度不大于 6 m/s 时,仍可以进行掺气设施选型,但模型实测通气量向原型引伸时,应考虑比尺影响。本试验陡坡段水面掺气起始断面下游陡坡段流速约为 $3 \sim 5$ m/s ,综合有关的研究表明^[6],阶梯陡坡段受阶梯的摩擦阻和跌流作用,水流紊动明显增大,加快了陡坡面紊流边界层发展和水面的破碎,阶梯陡坡段的水流掺气明显大于光滑陡坡段,其掺气相似性明显优于光滑陡坡段。对于模型阶梯陡坡段流速小于 6 m/s 产生的缩尺效应分析表明,由于原型工程水流掺气浓度大于模型值,模型试验值应有一定的安全裕度,

是有利于工程的安全。因此,本模型外凸型阶梯陡坡段掺气浓度试验成果可供工程设计和运行参考。

模型试验在陡坡段各阶梯顶面中部和下游立面底部坡面布置动压测点(见图2的⑤和⑩测点),并在27#和30#等阶梯顶面、下游立面及其上游陡坡面加设动压测点(见图2的①~④和⑥~⑨测点)。阶梯面掺气浓度采用中国水利水电科学研究院研制的CQ-2005型掺气浓度仪测量,流速采用ADV流速仪、毕托管等测量,并采用相应的断面水深进行复核。

3 阶梯陡坡段掺气浓度试验与分析

3.1 阶梯陡坡段水流掺气特性

根据不连续的外凸型阶梯陡坡段泄流流态的划分^[12],可将陡坡段掺气水流划分为3个区段:未掺气区、掺气发展区和掺气均匀区等(见图3)。未掺气区为阶梯陡坡段的光滑水流区,其流态与光滑陡坡段未掺气水流相似;掺气发展区与阶梯陡坡段的不均匀流区相近,水流表面掺气沿程逐渐向陡坡段壁面发展;掺气均匀区为阶梯陡坡段的准均匀流区和末级阶梯至陡坡段末端不均匀流区,该区内各断面水流掺气较均匀,沿程的水流掺气浓度变化较小。

为了便于了解阶梯陡坡段沿程掺气分布特性,将测试的不同阶梯高度($a = 0.3 \sim 0.6$ m)的陡坡段水面掺气起始断面的阶梯号绘于图4。在不同单宽流量 q 条件下,测试的不同阶梯高度 a 的各阶梯顶掺气浓度见表1。

3.2 不同单宽流量的掺气浓度分布

(1)在相同 a 的条件下, q 较小时,阶梯坎顶对水流顶托作用较大,水流紊动和波动较明显,阶梯壁面水流掺气浓度较大;随着 q 的增加,陡坡段水深增大,水流紊动和波动相应减弱,阶梯壁面水流掺气浓度相应减小。

(2)在相同 a 的条件下,随着 q 的增加,陡坡段掺气发展区长度相应增大,其壁面的掺气浓度沿程逐渐增加,直至掺气均匀区之后,沿程的掺气浓度变化相应减小(见图5)。

3.3 不同阶梯高度的掺气浓度分布

(1)在陡坡段水面掺气起始断面下游,受泄流撞击阶梯和水流紊动的影响,每一级阶梯下游立面底部产生漩流和漩涡,由水面波动和紊动卷吸的气体不同程度地影响陡坡面,陡坡段壁面掺气浓度沿程逐渐增加,至掺气均匀区之后,其沿程流速变化较小,壁面的掺气浓度沿程变化也相应较小。

(2)由表1和图4、5,水面掺气起始断面下游

阶梯壁面掺气浓度 C 一般可达约 2% ~ 5% ,外凸型

阶梯陡坡段壁面水流掺气效果较明显。

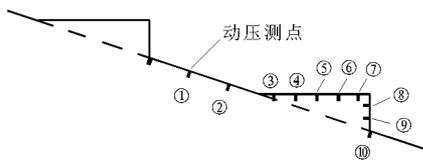


图2 陡坡面和阶梯面动压测点布置图

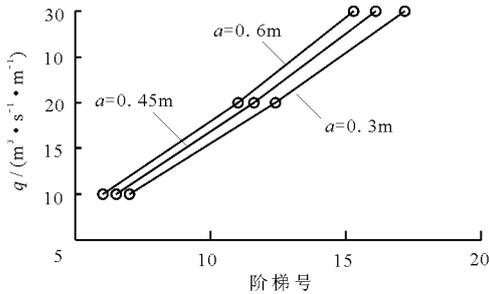


图4 陡坡段水面掺气起始断面阶梯号

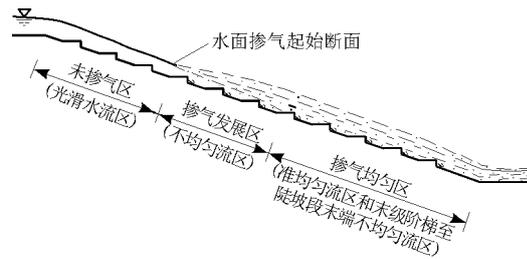


图3 阶梯陡坡段掺气水流分区示意图

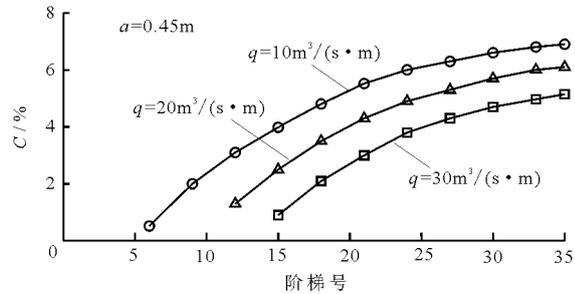


图5 不同单宽流量陡坡段阶梯面掺气浓度 C 分布图

表1 阶梯陡坡段掺气浓度 C 分布

阶梯号	掺气浓度 C								
	$a = 0.3$			$a = 0.45$			$a = 0.6$		
	$q = 10$	$q = 20$	$q = 30$	$q = 10$	$q = 20$	$q = 30$	$q = 10$	$q = 20$	$q = 30$
3									
6	0.4			0.5			0.8		
9	1.4			2.0			2.8		
12	2.0	0.7		3.1	1.3		4.0	2.1	
15	2.9	1.8		3.9	2.5	0.9	5.0	3.3	1.1
18	3.9	2.7	1.7	4.8	3.5	2.1	5.8	4.3	2.8
21	4.8	3.6	2.6	5.5	4.3	3.0	6.3	5.0	3.6
24	5.4	4.3	3.3	6.0	4.9	3.8	6.7	5.5	4.4
27	6.0	4.8	4.0	6.3	5.3	4.3	7.0	5.9	5.1
30	6.2	5.2	4.4	6.6	5.7	4.7	7.3	6.3	5.4
33	6.4	5.5	4.7	6.8	6.0	4.9	7.6	6.6	5.6
35	6.5	5.6	4.8	6.9	6.1	5.1	7.7	6.7	5.8

注: a 为阶梯高度, m ; q 为泄流单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$ 。

(3)在相同的单宽流量 q 条件下,随着阶梯高度 a 增加,水流紊动和波动加剧,水流掺气浓度相应增大。在 $q = 30 m^3/(s \cdot m)$ 时,阶梯高度 a 由 0.3 m 分别增大至 0.45 和 0.6 m,其水面掺气起始断面下游各阶梯顶面掺气浓度相应分别增加约 10% ~ 22% 和 19% ~ 40%。

3.4 阶梯顶面和陡坡面的掺气浓度分布

测试的陡坡段掺气均匀区起始断面下游陡坡面和阶梯顶面的掺气浓度分布见图 6。试验显示:

(1)在同一的阶梯顶面上,水流掺气浓度分布相对较均匀,由阶梯顶面上游端往其下游端角处沿程略增大,因此,可采用阶梯顶面中间点的掺气浓度

代表该阶梯顶面的平均掺气浓度。

(2) 在阶梯顶面的上游陡坡面,其水流掺气浓度由阶梯顶面上游端往上游坡面逐渐减小,并在上

一级阶梯下游立面底部区域达较小值。阶梯下游立面底部区域的掺气浓度一般可达该阶梯顶面掺气浓度的约 40% ~ 50%。

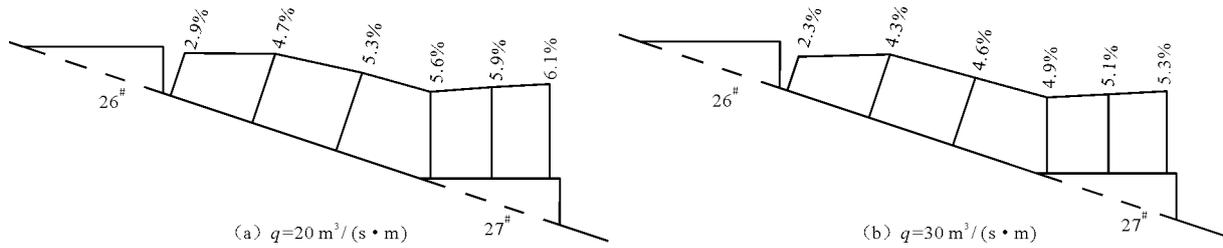


图 6 阶梯顶面和陡坡面掺气浓度 C 分布 ($a = 0.6 \text{ m}$)

3.5 试验小结

(1) 由于外凸型阶梯陡坡段未掺气水流区的长度比常规连续的内凹型阶梯相应缩短^[12],陡坡面的阶梯削减了泄流流速,该区域陡坡面流速 v 相应较小 ($v < 16 \text{ m/s}$)、阶梯顶面和下游立面均为正压 (见以下章节 4),因此,陡坡段未掺气区壁面产生空蚀破坏的可能性较小。

(2) 在本文试验条件范围内 ($0.3 \text{ m} \leq a \leq 0.6 \text{ m}$, $q \leq 30 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$),水面掺气起始断面下游掺气发展区阶梯壁面掺气浓度 C 约为 1% ~ 3%,掺气均匀区阶梯壁面掺气浓度 C 达约 3% ~ 5%,考虑到原型工程陡坡段水流掺气浓度明显大于模型试验值,因此,外凸型阶梯陡坡段壁面水流掺气效果较明

显^[14],能够起到较明显的减免空蚀破坏作用。

4 阶梯陡坡段动压试验与分析

4.1 阶梯陡坡段动压分布

溢洪道泄流对陡坡段外凸型阶梯产生了较强烈的冲击作用,陡坡面和阶梯顶面产生了较大的冲击动水压强,阶梯下游立面及底部坡面 (即⑩测压点) 的压强值较小或产生一定的负压值。

4.2 阶梯陡坡段动压值与阶梯高度 a 关系

(1) 在相同的泄流单宽流量 q 条件下,陡坡面和阶梯顶面动压值随阶梯高度 a 的增加而增大,如阶梯高度由 0.3 m 增加至 0.6 m,其阶梯面的动压值增大大约 20% ~ 30% (表 2 和图 7)。

表 2 不同阶梯高度 a 的陡坡段沿程动水压强值

m, kPa

阶梯号	动水压强值 p					
	$a = 0.3$		$a = 0.45$		$a = 0.6$	
	阶梯顶⑤	阶梯下游立面底部⑩	阶梯顶⑤	阶梯下游立面底部⑩	阶梯顶⑤	阶梯下游立面底部⑩
1	29.2	10.3	32.8	12.9	35.5	16.1
3	32.9	8.5	37.1	12.3	39.6	20.1
6	37.7	6.1	42.3	7.6	44.8	15.7
9	40.9	3.1	45.3	3.1	48.9	8.4
12	43.7	2.3	47.8	2.0	51.5	3.2
15	46.1	1.1	50.1	-3.6	54.1	-5.5
18	48.2	-3.8	52.1	-8.1	56.4	-9.6
21	50.1	-6.2	53.9	-9.3	58.5	-10.5
24	51.8	-7.0	55.6	-9.8	60.4	-10.9
27	53.7	-8.7	57.3	-10.0	62.2	-11.3
30	55.5	-9.0	58.9	-10.3	63.8	-11.6
33	57.1	-9.7	60.4	-10.7	65.1	-11.9
35	58.0	-10.1	61.2	-11.2	65.9	-12.3

注:(1) 泄流单宽流量 $q = 30 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; (2) a 为阶梯高度, m。

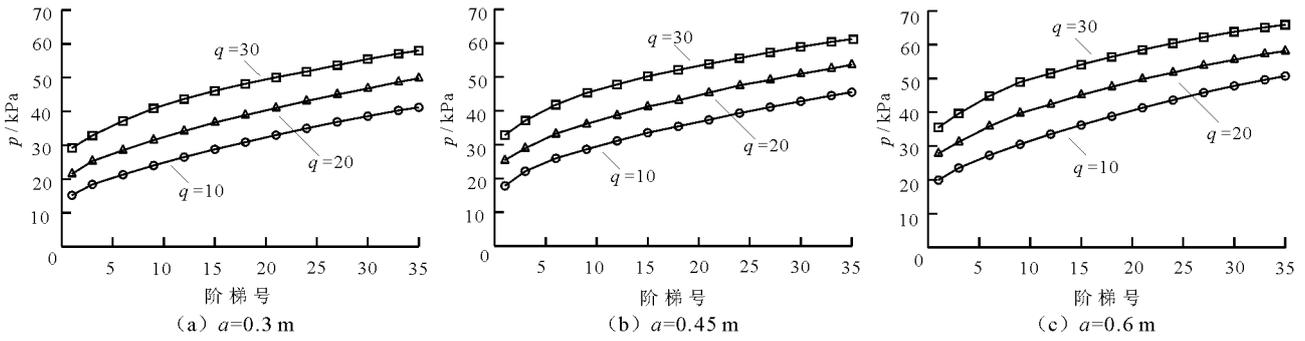


图7 陡坡段阶梯顶面动水压强沿程分布图

(2)在各级阶梯上游陡坡面至阶梯顶面上,动水压强值沿程逐渐增大,并在阶梯顶面中部附近区域达较大值,然后往阶梯顶面末端略减小(图8)。本文以阶梯顶面中部测点(即⑤测点)动压值为阶梯顶面代表值,作为工程设计的依据。

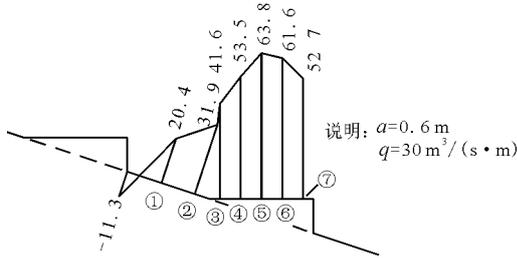


图8 30#阶梯面动水压强分布图(单位:kPa)

(3)在陡坡段首端至水面掺气起始断面的陡坡段,各级阶梯下游立面底部充满水体,阶梯下游立面及其底部坡面主要为正压(在靠近水面掺气起始断面的阶梯下游立面底部或会出现小负压值),其压强值小于阶梯顶面压强值;在水面掺气起始断面的下游陡坡段,阶梯下游立面的压强呈正压或负压分布,其底部坡面(即⑩测点)会产生不同程度的小负压值,阶梯下游立面及底部坡面的压强绝对值 $|p| < 15$ kPa。

4.3 阶梯陡坡段动压值与流速水头关系

(1)在各种阶梯高度 a 条件下,随着 q 增大,陡坡段流速沿程增加,其阶梯顶面和陡坡面动压值相应沿程增大,各阶梯顶面的最大动水压强值出现在末级阶梯上(见表3)。

(2)在各种 a 和 q 条件下,阶梯面动压值 (p/γ) 与其相应断面流速水头 $(v^2/2g)$ 的比值 $(p/\gamma)/(v^2/2g)$ 沿程减小。由于阶梯陡坡段最大动压值通常出现在陡坡段下游末级阶梯顶面,因此,可采用末级阶梯顶面动水压强值作为陡坡段阶梯结构设计的依据。试验表明,在 $a \leq 0.6$ m、 $q \leq 30$

$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 条件下,陡坡段水面掺气起始断面下游的阶梯顶面 $(p/\gamma)/(v^2/2g) < 0.45$ (见表4)。

表3 不同泄流单宽流量的阶梯顶面动水压强值

阶梯号	阶梯顶面动水压强 p /kPa		
	$q = 10$	$q = 20$	$q = 30$
1	17.8	25.3	32.8
6	25.8	33.2	42.3
12	31.1	38.7	47.8
18	35.4	43.3	52.1
24	39.3	47.3	55.6
30	42.8	50.9	58.9
33	44.5	52.5	60.4
35	45.5	53.6	61.2

注:(1)阶梯高度 $a = 0.45$ m;(2) q 为单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

表4 阶梯顶面动水压强值 p 与流速水头 $(v^2/2g)$ 的关系

阶梯号	p /kPa	断面平均流速 $v /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$(v^2/2g) / \text{m}$	$(p/\gamma)/(v^2/2g)$
1	35.5	9.73	4.83	0.75
6	44.8	12.32	7.74	0.59
12	51.5	14.15	10.22	0.51
15	54.1	15.67	12.53	0.44
18	56.4	16.73	14.28	0.40
24	60.4	17.52	15.66	0.39
30	63.8	18.33	17.14	0.38
33	65.1	18.62	17.69	0.38
35	65.9	18.78	17.99	0.37

注:(1)阶梯高度 $a = 0.6$ m;(2)单宽流量 $q = 30$ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;(3)水面掺气起始断面阶梯号为15.3#。

参考已有的研究成果和工程经验^[15],陡坡段外凸型阶梯高度 a 取值范围一般为0.3~0.6 m,其在 $q \leq 30$ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 运行条件下,可取得良好的消能效果。因此,在 $a = 0.3 \sim 0.6$ m、 $q \leq 30$ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$

条件下,可先计算出阶梯陡坡段沿程流速 $v^{[12,16]}$,再采用 $(p/\gamma)/(v^2/2g) = 0.4 \sim 0.45$ (a 和 q 较大者,取上限值),计算出陡坡段水面掺气起始断面下游末级阶梯顶面动水压强值,以作为陡坡段外凸型阶梯结构设计的依据。

5 结 论

(1) 外凸型阶梯陡坡段未掺气水流区的长度比常规连续的内凹型阶梯相应缩短,该区域陡坡段阶梯削减了泄流流速、阶梯顶面和下游立面动压为正压,其壁面产生空蚀破坏的可能性较小;外凸型阶梯陡坡段壁面掺气浓度随阶梯高度 a 增加而增大、随泄流单宽流量 q 增加而减小,水面掺气起始断面下游阶梯陡坡段壁面水流掺气浓度较高,减免空蚀破坏作用较显著。

(2) 阶梯陡坡段壁面(陡坡面和阶梯顶面)动水压强、阶梯下游立面及其底部坡面压强或负压绝对值等随 a 和 q 增大而增加,在本文试验条件范围内,陡坡段水面掺气起始断面下游的阶梯下游立面及底部坡面的压强绝对值 $|p| < 15$ kPa,阶梯顶面压强值为其相应断面流速水头的45%之内。

(3) 阶梯陡坡段的掺气浓度和动压特性主要与其阶梯高度、泄流单宽流量等有关,因此,本文成果可供不连续的外凸型阶梯陡坡段工程设计和运行参考。今后,尚需对不同阶梯体型和布置的陡坡段掺气浓度和动压特性等进一步深入研究。

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,2011,31(1):146-150.

[2] 王洪伟,徐 岗. 阶梯式消能工在大河口水库溢洪道中的应用[J]. 浙江水利科技,2010(5):40-42.

[3] BOES R M, HAGER W H. Closure to "Hydraulic Design

of Stepped Spillways" by Robert M. Boes and Willi H. Hager[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(6):527-529.

- [4] PFISTER M, HAGER W H, MINOR H E. Bottom aeration of stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,132(8):850-853.
- [5] 吴守荣,张建民,许唯临,等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):37-42.
- [6] 刘善均,朱 利,张法星,等. 前置掺气坎阶梯溢洪道近壁掺气特性[J]. 水科学进展,2014,25(3):401-406.
- [7] 杨吉健,刘韩生,张为法. 台阶式溢洪道滑掠水流时均压强影响因素分析[J]. 长江科学院院报,2015,32(8):57-60.
- [8] 郑秋文,陈芝宇. 阶梯消能工研究综述[J]. 吉林水利,2015(8):21-25+28.
- [9] 钟晓凤,张法星,孙 宁,等. 某水库阶梯溢洪道水力特性研究[J]. 人民黄河,2016,38(6):115-118+123.
- [10] 赵信峰,徐 鹏. 某阶梯溢洪道与光滑溢洪道水力特性对比[J]. 水电能源科学,2017,35(9):77-80.
- [11] 张志昌,曾东洋,刘亚菲. 台阶式溢洪道滑行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+157.
- [12] 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.
- [13] 国家能源局. DL/T 5245-2010 水利水电工程掺气减蚀模型试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 中华人民共和国水利部. SL253-2000 溢洪道设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [15] 黄智敏,朱红华,何小惠,等. 缓坡度陡槽溢洪道阶梯消能研究与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(3):179-182.
- [16] 黄智敏,朱红华,何小惠,等. 溢洪道阶梯陡槽段消能特性试验和计算探讨[J]. 广东水利水电,2008(8):8-10+26.