

前置掺气坎坡度对阶梯溢洪道掺气水流影响的数值模拟

谭立新, 李梅玲, 唐敏, 赵安妮

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究复杂边界条件下气液两相界面的流动及混掺现象对工程建设的影响,结合某大型水电站的溢洪道,利用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对其进行三维流场模拟,采用有限体积法离散控制方程,并用 GMRES 算法进行压力求解,对前置掺气坎式阶梯溢洪道和传统阶梯溢洪道泄流壁面上的高速掺气水流进行数值模拟。结果表明:随着掺气坎坡度的增加,其掺气空腔及掺气浓度均有所增大,随着水流下泄掺气浓度沿程降低,达到一定距离后趋于稳定,掺气浓度值达到了减免空蚀破坏的要求;与传统阶梯溢洪道的模拟结果进行对比可知,增设前置掺气坎后,既可以增加前几级阶梯的掺气浓度使水流提前达到水气平衡,也没有降低阶梯式溢洪道的消能率,为解决传统阶梯溢洪道中出现的工程难题提供了一种新思路。

关键词: 前置掺气坎坡度; 阶梯溢洪道; 掺气浓度; 空蚀破坏; 数值模拟

中图分类号: TV135.2; TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0150-06

Numerical simulation of the influence of the slope of the front aerator on the aeration flow of the stepped spillway

TAN Lixin, LI Meiling, TANG Min, ZHAO Anni

(Faculty of Water Resource and Hydroelectric Engineering, Xian University of Technology, Shanxi Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the influence of gas-liquid two-phase interface flow and mixing phenomenon on engineering construction under complex boundary conditions, we combined with the medium spillway of a large hydropower station, used the RNG $k-\varepsilon$ model to simulate the three-dimensional flow field, used the finite volume method to discretize the governing equation, and used the GMRES algorithm to solve the pressure problem. Numerical simulation of high speed aerated flow on the discharge wall of the pre-aerated stepped spillway and the traditional stepped spillway was carried out. The results show that the aeration cavity and aeration concentration increased with the increase of the slope of the aerator, and the aeration concentration decreased along the flow, until reaches a certain distance, the concentration reaches the requirement of reducing cavitation damage. Compared with the simulation results of the traditional stepped spillway, the addition of the front aerator can increase the aeration concentration of the first several steps, make the flow reach water and gas balance ahead of time, and do not affect the energy dissipation rate of the stepped spillway. This study provides a new way to solve the engineering problems in the traditional stepped spillway.

Key words: pre-aerated slope; stepped spillway; aeration concentration; cavitation damage; numerical simulation

1 研究背景

阶梯式溢洪道作为一种经济效益显著的泄洪消

能技术措施,虽能消除水流的大部分动能,但其过流阶梯表面在高水头、大流量下易发生空蚀破坏也已是不争的事实^[1-2]。近几年,有部分学者提出采取

收稿日期:2018-03-25; 修回日期:2018-04-26

基金项目:陕西省重点学科建设专项项目

作者简介:谭立新(1967-),女,陕西西安人,博士,副教授,主要从事水力学及两相流数值模拟研究。

通讯作者:李梅玲(1994-),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要从事掺气水流数值模拟方面研究。

在传统阶梯溢洪道泄槽与 WES 曲线堰面之间增设掺气坎的方式,将阶梯溢洪道应用于高水头大流量的泄水工程中。Pfister 等^[3-4]研究表明,在大单宽流量下水流上表面破碎自掺气达到底部以前,在首级阶梯下方设置掺气装置,能够成功降低前几级阶梯发生破坏的风险。彭勇等^[5]应用动量矩方程推导出前置掺气坎式阶梯溢洪道中均匀流形成时的掺气水深和消能率计算公式,得出这种溢洪道有掺气充分、抗空蚀性强、消能效果良好等显著特点。刘善均等^[6]通过试验得出,前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气坎后阶梯面掺气浓度在前若干级范围沿程减小,达到一定距离后趋于稳定,能够达到较高的掺气浓度。朱利等^[7]通过某水电站模型试验表明,在宽尾墩阶梯溢流坝上设置不同体形的前置掺气坎,与未设掺气坎相比,沿程掺气效果有较大改善,有效空腔长度与坎高成正比。王自明等^[8]等以某水库的溢洪道改造工程为例,提出一种前置掺气墩布置方案,该方案不仅弥补了原光滑陡槽方案的不足,改善了水流流态、克服了初始掺气点较低等缺陷,还扩大了传统阶梯溢洪道的应用范围。尹芳芳^[9]对带有掺气坎的台阶溢洪道和光滑溢洪道进行数值模拟,得出台阶溢洪道比光滑溢洪道在消能上更优越。

综上所述,近年来国内外学者对水气两相流的研究方法主要为物理试验法,由于试验中的水流状态及掺气情况并不容易控制,因此需要大量试验加以佐证。随着气液两相流流场的数值模拟不断发展,数值模拟计算在减少冗杂的试验过程、解决高速水力学问题方面的优势愈发明显。由于目前水气两相流的流动及掺气现象的数值模拟仍是一个难点,且阶梯近壁面掺气浓度作为衡量掺气减蚀效果的一项重要指标,利用数值模拟方法研究此种联合型消能工的文献并不多见。本文基于某大型水电站的溢洪道,利用数值模拟软件 FLOW-3D 中的卷气模型,讨论前置掺气坎坡度分别为 1:10、1:7 和 1:5 时,阶梯溢洪道上阶梯水平及竖直近壁面掺气浓度分布及消能效果,并与传统阶梯溢洪道水力特性进行比对分析,为今后多相流模型研究的可行性、有效性奠定基础,也为前置掺气坎式阶梯溢洪道的工程设计和应用提供一定的技术支持,具有重要的理论意义和工程应用价值。

2 数学模型

RNG $k-\varepsilon$ 模型是目前使用最广泛的模型之一,其在 ε 方程中增加了一附加项,能够反映主流的时均

变化率,对高速水流数值计算的准确度大大提高,在科学研究和流场模拟中得到了检验和广泛的应用。这里采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型来描述水气两相流。其具体连续方程、动量方程以及紊流模型方程参见文献[10-11]。FLOW-3D 中设有专门的卷气模型可以计算水气混合物中气体浓度的分布情况,其原理详见文献[12-13]。采用有限体积法隐式求解控制方程;速度压力耦合方程组采用 GMRES 法。

3 模型建立及验证

3.1 模型尺寸

某大型水电工程^[14]坝高 147 m,溢洪道长度 540 m,最大下泄流量 760 m³/s,设计泄槽宽度 10 m,最大单宽流量 76 m³/(s·m)。溢洪道进口采用 WES 型实用堰,随后连接过渡段及带挑坎的阶梯式泄槽。沿溢洪道轴线底板坡度为 1:3.75。本次采用三维数值模拟,计算区域如图 1 所示,阶梯高 $\Delta = 2$ m,宽 $L = 7$ m,掺气坎工况尺寸见图 1,网格划分如图 2。掺气坎位置设置在流速约为 22 m/s 处,距 0 号桩位约 120 m,传统阶梯溢洪道首级阶梯设置在距 0 号桩 120 m 处。分别取掺气坎坡度为 1:10、1:7、1:5。

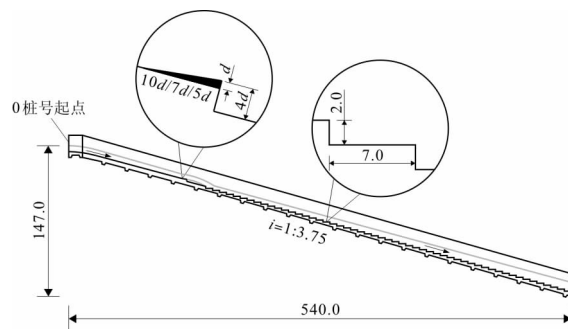


图1 前置掺气坎式阶梯溢洪道计算区域示意图

3.2 网格划分及边界条件

为使水流模拟更为准确,掺气坎处网格块 2 尺寸为 0.25,光滑溢流段网格块 1 及阶梯部分网格块 3、4 尺寸为 0.5,网格数量大约为 244×10^4 。入口边界条件采用流速入口 $v = 12.67$ m/s,计算时模型的水面以上均为空气,采用标准大气压,自由表面的边界条件取为大气压强即相对压强为 0,且在自由表面上所有速度的分量沿法向的梯度为 0。溢洪道边壁及底板均为固壁无滑移边界条件,黏性底层的处理方式为标准壁面函数,下游出口选择自由出流。算法采用有限体积法隐式求解;速度压力耦合采用 GMRES 法。

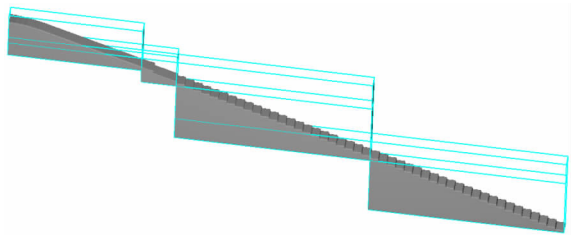


图2 网格划分示意图

3.3 计算模型验证

取坡度为 1:10 时的前置掺气坎式阶梯溢洪道与物理试验模型^[15]中的数据进行比较,模型试验及数值模拟结果均显示:水流整体流态较为平稳。图 3 为溢洪道中轴线处水深的模拟值与试验测得水深

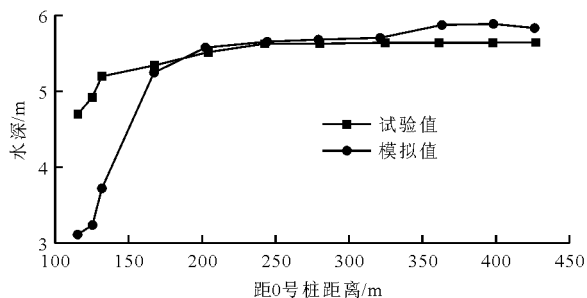


图3 溢洪道中轴线水深模拟值与试验值的比较

比较,试验中水深测量结果是时均值,没有反映水面的波动情况,水深分布前段出现较大误差,原因是该段水流所处掺气空腔位置,试验所得水深值为距离底板高度,模拟计算所得水深值为有水覆盖的高度,后段水深吻合情况较好。平均误差为 4.8%。图 4 为溢洪道中轴线处沿程掺气浓度模拟值与试验值的比较,水流稳定后模拟值较实测值偏高,平均误差为 11.6%。流速模拟结果如图 5 所示,试验出口流速为 26.7 m/s,模拟结果为 25.21 m/s,误差为 5.6%。从比较结果可以看出,不论是水深还是掺气浓度,模拟值与试验值的误差均在合理范围内,说明计算所采用的紊流模型、掺气模型、边界条件以及网格划分是合理可行的。

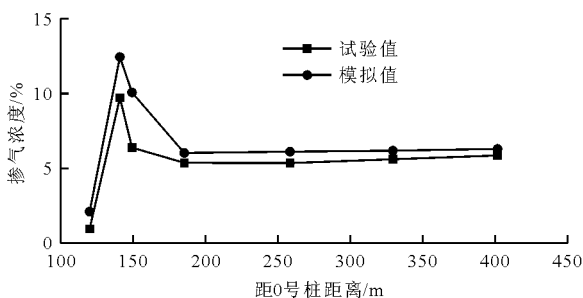
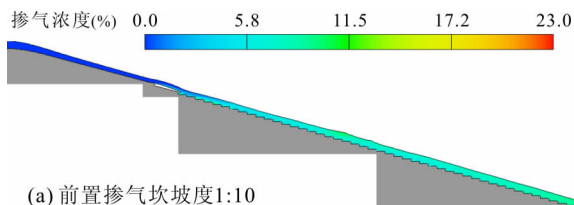


图4 坎后平均掺气浓度对比

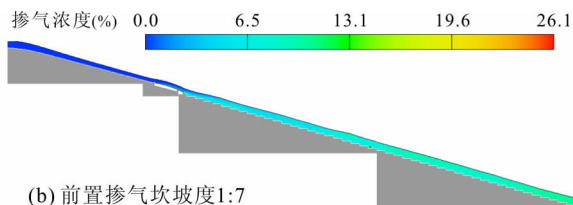
4 计算结果及分析

4.1 掺气浓度分布与前置掺气坎坡度的关系

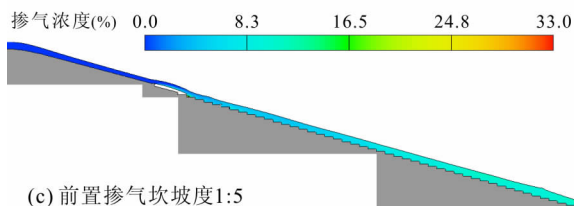
图 6 为不同掺气坎坡度的掺气浓度分布云图。由图 6 可知,在不同掺气坎坡度下,掺气水流落在不同的阶梯面上,首级阶梯前存在一定长度的掺气空腔,掺气坎坡度越大,对水流的挑射作用越强,形成的挑射水舌越长,即掺气空腔长度随掺气坎坡度的增大而增大。当坡度为 1:10 和 1:7 时,掺气水流在第一级阶梯面上覆盖,空腔长度分别为 20.1 和 23.7 m。



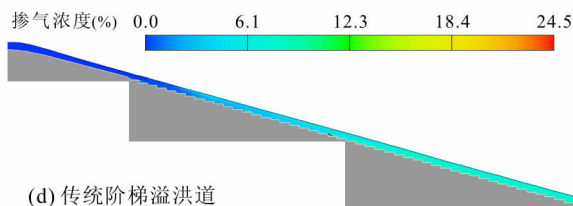
(a) 前置掺气坎坡度1:10



(b) 前置掺气坎坡度1:7



(c) 前置掺气坎坡度1:5



(d) 传统阶梯溢洪道

图6 不同工况下掺气浓度分布云图

坡度为 1:5 时,在第二级阶梯面上覆盖,空腔长度为 27.1 m,而传统阶梯溢洪道其首级阶梯前没有掺气空腔。

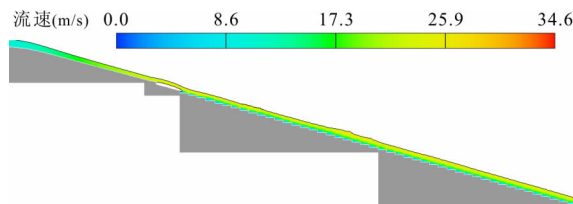


图5 前置掺气坎坡度1:10时流速分布云图

4.1.1 平均掺气浓度沿程分布 本次研究将单个台阶水平近壁面处掺气浓度取平均值作为每级阶梯上的平均掺气浓度。图7为4种掺气坎体型阶梯溢洪道近壁面平均掺气浓度沿程分布图,从图7中可以看出,3种坡度下掺气浓度分布规律均为随着阶梯数的增加而逐渐减小,且掺气坎坡度越大,有水覆盖的第一级阶梯上掺气浓度值越大,之后水流中水气平衡,浓度达到稳定。掺气坎强迫掺气使得水流携带大量超过其携带能力的气泡,所以气泡沿水流方向不断向上发展使得沿程浓度逐渐降低。由图7还可以看出,掺气坎坡度对前几级阶梯上掺气浓度沿程分布影响较大,坡度越大,掺气浓度曲线斜率越高,衰减速度越快。由于阶梯体型(坡度、台阶高度)和单宽流量决定阶梯上稳定掺气水流的流速、紊动,从而决定阶梯面上的水流携气能力,这两种因素不变的前提下,阶梯后段的浓度分布基本相似且掺气充分。坡度为1:10、1:7、1:5时,水流达到稳定后的掺气浓度值分别为6.5%、6.7%、7.4%,3种坡度下出现的最小掺气浓度值为5.8%、5.1%、6.2%。由图6(d)可知,传统阶梯溢洪道在前几级阶梯底部有明显的清水区,掺气浓度较低,其掺气发展主要依靠后半段阶梯内水流紊动发展至水面破碎来携气,因此在前几级阶梯处并没有达到阶梯溢洪道携气减蚀的目的,产生空蚀空化的风险大大增加。

4.1.2 阶梯水平及竖直近壁面上的掺气浓度分布

工程上研究掺气大部分是用试验的方法研究其整体分布情况,但近壁面区域,特别是凸角和凹角区域很难布设测量工具,而利用数值模拟的方法可以弥

补这一短板,对掺气浓度分布情况进行深入研究,为类似工程提供设计依据。

图8和图9是4种不同工况下,取第1级、第5级、第20级和第40级阶梯的水平近壁面掺气浓度分布图。图中 x/b 表示测点到水平近壁面凹角的距离/单个阶梯水平面长度(7 m), z/h 表示测点到垂直近壁面凹角的距离/单个阶梯垂直高度(2 m)。当过流阶梯近壁面掺气浓度达到5%~8%时,能有效减小阶梯面发生空蚀破坏的概率。由图8和9可知,前置掺气坎式阶梯溢洪道中阶梯水平近壁面第1和第5级阶梯处掺气浓度分布走势为由凹角到凸角方向先减小随后逐渐增大,竖直近壁面掺气浓度分布走势为先增大后减小,且受坡度的影响较大,同一截面处浓度随着坡度的增加而增加,最小掺气浓度出现的位置不同但均达到减免空蚀破坏的要求,但传统阶梯溢洪道在这两级阶梯处水平面及竖直面的浓度值极低,均小于1%,有发生空蚀空化的风险;在第20级和40级阶梯处,4种工况下掺气水流均趋于稳定,浓度变化较小,阶梯水平及竖直近壁

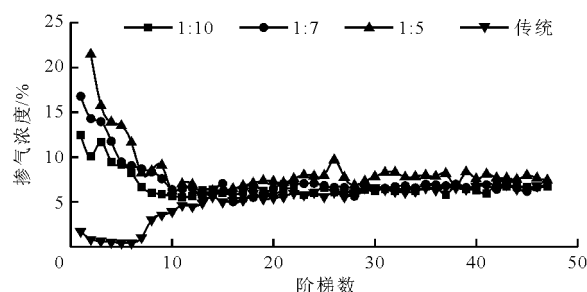


图7 不同掺气坎工况下平均掺气浓度沿程分布图

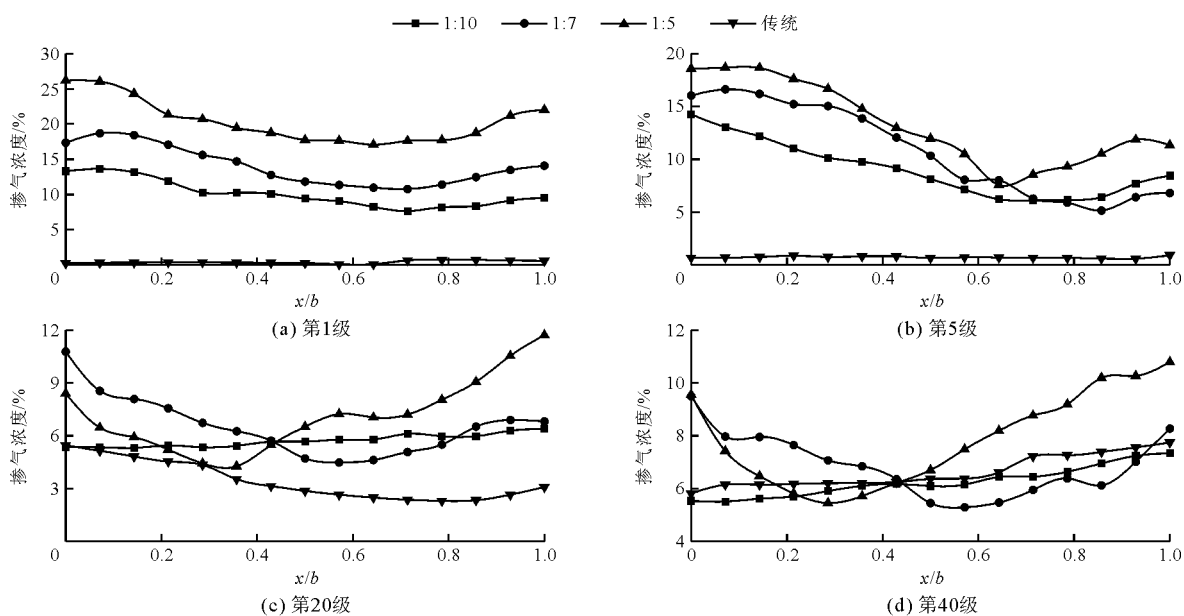


图8 不同掺气坎工况下阶梯水平近壁面掺气浓度分布图

面处的掺气浓度均大于 5%。坡度为 1:10、1:7、1:5、0(传统)时所取 4 个阶梯面上出现水平最小掺气浓度分别为 5.4%、5.3%、5.1%、0.1%，。竖直最小掺气浓度分别为 5.2%、9.1%、8.3%、0.6%。

4.2 流速及消能特性与前置掺气坎坡度的关系

4.2.1 流速分布 在掺气坎和阶梯的共同作用下,溢洪道下泄水流的势能逐渐转化为动能。图 10 为不同掺气坎工况下溢洪道平均流速沿程分布。由图 10 可知,4 种掺气坎工况下阶梯面上平均流速分布规律大致相同。增设掺气坎后水流流经掺气空腔,抵达首级阶梯时与传统阶梯溢洪道相比流速更大,由于充分掺气,落至阶梯时流速衰减更快,此时与传统方案中掺气不足的水流相比前段阶梯流速未发生显著变化。随着水流下泄,阶梯作用加速水流横向旋滚,阶梯面上平均流速不断减小直至稳定。掺气

坎坡度为 1:10、1:7、1:5 的前置掺气坎式阶梯溢洪道和传统阶梯溢洪道的稳定流速分别为 25.21、25.14、25.01、25.28 m/s,水流流速随着掺气坎坡度的增大略有减小,相比较而言,坡度为 1:5 时更利于水流能量的耗散。

4.2.2 消能特性 本文通过两断面能量差确定泄流的能量消散,取上游入水口为断面 1,下游最后一级阶梯处为断面 2,利用公式(1)计算溢洪道泄槽段消能率。

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

式中: E_1 为断面 1 的总能量, $E_1 = H_1 + \frac{V_1^2}{2g}$; E_2 为断面 2 的总能量, $E_2 = H_2 + \frac{V_2^2}{2g}$ 。

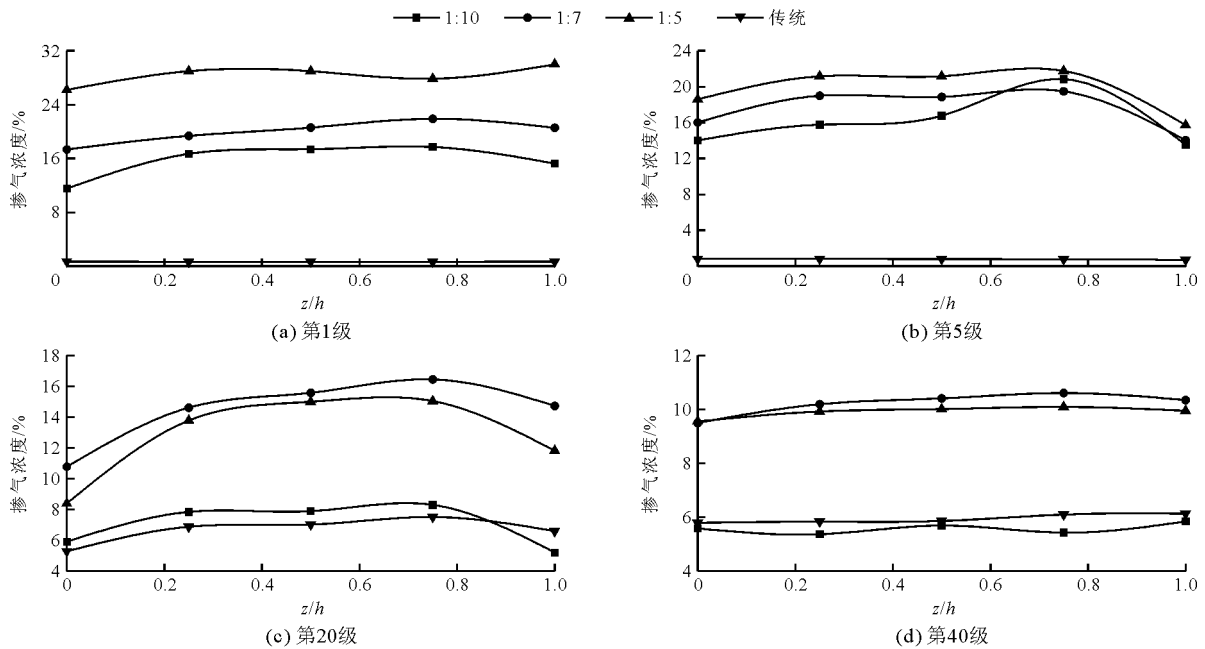


图 9 不同掺气坎工况下阶梯竖直近壁面掺气浓度分布图

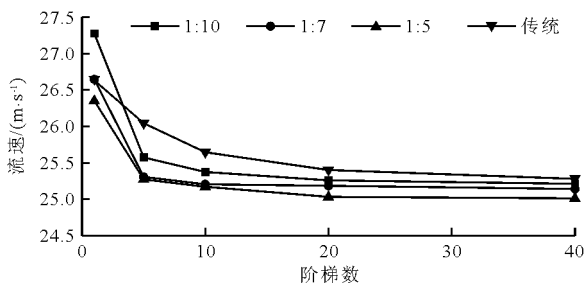


图 10 不同掺气坎工况下平均流速沿程分布

各掺气坎工况溢洪道泄槽段消能率计算结果见表 1。从表 1 中可以看出,相同来流流量、阶梯体型

下,4 种工况下计算消能率分别为 66.4%、66.4%、66.6%、66.6%。本次研究工况中,前置掺气坎坡度对阶梯溢洪道整体消能率影响不大。

根据以往对阶梯溢洪道的研究可知,在大单宽流量下,阶梯溢洪道的前几级阶梯上有通气难、易空化、可能产生空蚀破坏等问题,这些问题导致其应用范围受到较大限制,本次通过数值模拟的方法证明,增设前置掺气坎后,既可以增加前几级阶梯的掺气浓度使水流提前达到水气平衡来降低阶梯水平和竖直面空蚀破坏的风险,也保证了阶梯式溢洪道消能工的消能效果。

表 1 各掺气坎工况溢洪道泄槽段消能率对比

溢洪道	掺气坎 坡度	H_1 / m	$V_1 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_1 / m	H_2 / m	$V_2 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_2 / m	$\eta / \%$
前置掺气坎式	1: 10	150	12.67	158.19	20.67	25.21	53.10	66.4
	1: 7	150	12.67	158.19	20.87	25.14	53.12	66.4
阶梯溢洪道	1: 5	150	12.67	158.19	20.94	25.01	52.85	66.6
传统阶梯溢洪道		150	12.67	158.19	20.18	25.28	52.78	66.6

5 结 论

本文结合流体计算软件 Flow - 3D 建立数学模型,对前置掺气坎坡度分别为 1: 10、1: 7 和 1: 5 的阶梯溢洪道及传统阶梯溢洪道进行了数值计算,分别从近底掺气浓度沿程分布、台阶水平面及竖直面掺气浓度分布及消能特性进行了分析,主要结论为:

(1)在其他条件不变的前提下,掺气坎坡度越大,形成的挑射水舌越长,空腔长度和有水覆盖的首级阶梯面上掺气浓度值与掺气坎坡度成正比。而传统阶梯溢洪道首级阶梯前没有掺气空腔,在最初几级阶梯底部有明显的清水区,掺气浓度较低,其掺气主要依靠阶梯内水流紊动发展至水面破碎来携气,在前几级阶梯处并没有达到阶梯溢洪道的携气减蚀的目的。

(2)3 种掺气坎坡度下的阶梯面上平均掺气浓度分布规律均为随着阶梯数的增加而逐渐减小,掺气坎坡度对前段阶梯上掺气浓度沿程分布影响较大,坡度越大,则掺气浓度曲线斜率越大,衰减速度越快。水平近壁面上掺气浓度分布走势为由凹角到凸角方向先减小后增大,竖直近壁面为先增大后减小,之后水流中气水平衡,浓度达到稳定。坡度为 1: 10、1: 7、1: 5 时,水流达到稳定后平均掺气浓度值分别为 6.5%、6.7%、7.4%,而传统阶梯溢洪道由于前几级阶梯处掺气不足,水流发展至阶梯后半段水流全断面水气才基本达到掺气保护要求,相比于前置掺气坎式阶梯溢洪道,传统阶梯溢洪道水流断面的掺气浓度更晚达到稳定,不利于阶梯面的保护。

(3)由末端稳定流速计算可知,这种前置掺气坎式阶梯溢洪道虽在设计上比传统阶梯溢洪道复杂,但仍具有阶梯溢洪道较高消能效率的特性。结合以上考虑,前置掺气坎坡度为 1: 5 的阶梯溢洪道要优于其他 3 种体型。

参考文献:

[1] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.

[2] 李志高,霍静静,向光红. 跌坎型底流消能试验研究[J]. 人民长江,2009,40(23):28-29.

[3] PFISTER M, HAGER W H, MINOR H E. Stepped chutes: Pre-aeration and spray reduction[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006,32(2):269-284.

[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] 彭 勇,张建民,许唯临,等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算[J]. 水科学进展,2009,20(1):63-68.

[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] 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.

[8] 王自明,王 斌,包中进. 阶梯式消能工与掺气墩在工程中的联合运用[J]. 人民长江,2016,47(15):78-81.

[9] 尹芳芳. 带有掺气挑坎的台阶式溢洪道的三维数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2010.

[10] 王月华,包中进,王 斌. 基于 Flow - 3D 软件的消能池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012,45(2):454-457+476.

[11] 包中进,王月华. 基于 FLOW - 3D 软件的溢洪道三维水流数值模拟[J]. 浙江水利科技,2012(2):5-9.

[12] HIRT C W. Modeling turbulent entrainment of air at a free surface[J]. Flow Science, 2004.

[13] SARFARAZ M. Numerical computation of inception point location for steeply sloping stepped spillways[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009,27(16):3662-3671.

[14] 陈剑刚,张建民,许唯临. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型特点及工程应用试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(6):6-11.

[15] 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.