

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221950

龙落尾式泄洪洞泄流数值反馈与掺气设施布置优化

王 廷¹, 黄耀英¹, 詹双桥², 申幸志², 王显峰³

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南 长沙 410007; 3. 湖南涇天河工程建设投资有限责任公司, 湖南 永州 425500)

摘要: 为验证和优化涇天河水库扩建工程^{#1}泄洪洞“龙落尾”布置方案, 首先建立^{#1}泄洪洞泄流数值计算模型, 然后根据室内试验翼型掺气坎后的空腔回水结果反馈数值计算模型的合理性, 进而基于水力安全和经济综合原则定义了掺气坎体型的优化目标函数, 最后利用反馈数值计算模型研究^{#1}泄洪洞掺气设施优化布置。研究表明, 采用结构化矩形网格的FAVOR方法、VOF方法、RNG κ - ϵ 湍流模型及精细网格的数值模型进行模拟, 其计算结果与室内试验结果在空腔长度和空腔形态上的规律较为接近; ^{#1}泄洪洞翼型坎挑坎角度 α 和坎后底坡坡率 θ 最优值分别为 10%、20%。

关键词: 龙落尾; 翼型掺气坎; 空腔回水; 数值反馈; 布置优化

中图分类号: TV651.3; TU313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0105-04

1 概况

涇天河水库扩建工程是具有灌溉、防洪、下游河道补水和发电, 兼顾航运等综合利用的大型水利水电枢纽工程, 水库正常蓄水位为 313.0 m, 水库总库容为 $15.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为 I 等大(1)型水利水电枢纽工程。该工程泄洪建筑物为^{#1}、^{#2}泄洪洞联合泄洪, 均布置于右岸。初步设计阶段批复方案中,^{#1}泄洪洞沿程设置 8 道掺气坎, 出口采用挑流消能。在技施阶段中, 发现初设中的掺气坎体型效果差, 虽然通过减压模型试验重新选定的掺气坎体型一定程度上可以缓解原设计掺气坎效果差的问题, 但该掺气坎体型复杂, 施工难度较大, 若施工控制不到位有可能形成新的空化源, 给工程安全带来隐患。对此, 本文结合涇天河水库扩建工程^{#1}泄洪洞泄洪物理模型试验成果, 采用 FLOW3D 软件对^{#1}泄洪洞推荐掺气减蚀设施布置进行验证和优化。在数值模拟过程中, 采用结构化矩形网格的 FAVOR 方法、VOF 方法、RNG κ - ϵ 湍流模型及精细网格来提升模拟效果, 最终提出了^{#1}泄洪洞采用“龙落尾”布置方案。

2 物理模型试验与数值模拟

2.1 物理模型试验

为验证和优化^{#1}泄洪洞“龙落尾”布置方案, 开展单体模型试验研究, 对^{#1}泄洪洞(“龙落尾”布置体型)进口至出口沿程水流流态、水面线、泄流能力、掺气减蚀体型及掺气效果、洞身尺寸等进行试验验证和优化^[1]。试验针对 2 种泄洪洞体型的 4 种掺气坎体型方案进行研究, 具体试验方案见表 1, 其中进水口高程为 260.0 m, 出水口底板高程为 224.5 m, 试验特征水位分别为校核水位(320.27 m)、设计水位(317.76 m)、正常蓄水位(313.00 m)和防洪限制水位(310.50 m)。采用有机玻璃制作试验模型, 模型按重力相似准则设

表 1 ^{#1}泄洪洞掺气坎试验方案参数

Tab. 1 Parameters of the test plan for the aeration sill of the ^{#1} spill tunnel

方 案	掺气坎 数量/个	挑角 型式 /%	挑角 /%	桩号	坎后平 台长度/m	坎后斜坡 坡度/%
1	2	连续式	-3.5	0+479.6 0+550.56	2 8	24 10
2	1	连续式	-3.5	0+518.00	2	20
3	1	翼型坎	0	0+518.00	2	20
4	1	翼型坎	10.0	0+518.00	2	20

收稿日期: 2022-09-19, 修回日期: 2022-10-30

基金项目: 湖南省水利科技项目(湘水科计[2017]230-28)

作者简介: 王廷(1983-), 男, 博士, 研究方向为大坝安全与稳定, E-mail: jerry828045@163.com

通讯作者: 黄耀英(1977-), 男, 博士、教授, 研究方向为水工程安全监控及数值计算, E-mail: huangyaoying@sohu.com

计,几何比尺为 1 : 40,流量比尺为 10 119. 289,流速比尺为 6. 325,糙率比尺为 1. 849,在掺气设施下游底板中心沿程共布置时均压力测点 16 个,掺气片 6 对,对表 1 试验方案逐一进行室内试验。

试验表明,掺气坎采用方案 4 挑角为 10% 的翼型坎(图 1)时,能有效解决水舌中间长两边短的问题,使得水舌落点较为一致,并进一步增大了整体水舌挑距,使坎下形成较稳定的空腔,改善了其他 3 种方案中存在的空腔回溯积水较深的现象,有效提高了掺气效果,故推荐方案 4。

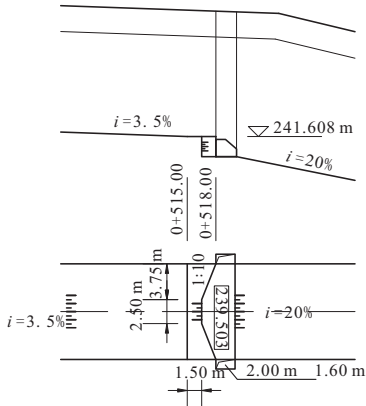


图 1 方案 4 掺气设施体型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the aeration facility in Scheme 4

2.2 数值模拟

(1)数值模型建立。采用 FLOW3D 软件,按照物理模型试验中方案 4 建立数值计算模型,如图 2、3 所示,主要包括上游斜坡段、掺气坎、通风管、坎后斜坡段及坎后反弧段。为提升模拟效果,模拟过程中采用结构化矩形网格的 FAVOR 方法及 VOF 方法,使自由液面附近结果准确;选用 RNG κ - ϵ 湍流模型,与标准 κ - ϵ 模型相比,其可考虑小尺度涡体运动影响,对于旋转流动、急变流及



图 2 #1 泄洪洞数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model of #1 spillway tunnel

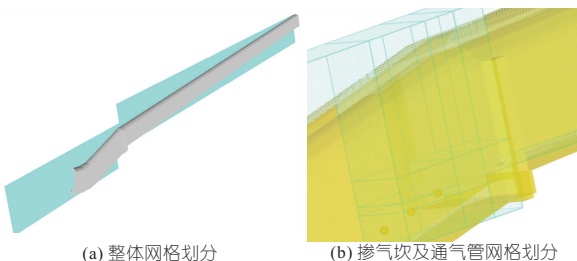


图 3 #1 泄洪洞数值网格划分

Fig. 3 Numerical mesh division of #1 spillway tunnel

低雷诺数流动有更好的准确性;对控制方程的离散采用有限差分法,空间被离散为正交的矩形网格,离散后的控制方程采用 GMRES 求解器进行压力速度耦合求解;同时使用精细网格(掺气坎部位单元尺寸约为 1/40 掺气坎坎高),提高湍流参数的收敛性。其中,上游斜坡段网格尺寸在 0.3~0.4 m 范围,掺气坎及通风管的网格尺寸在 0.05~0.20 m 范围,坎后斜坡段网格尺寸为 0.25~0.30 m 范围,模型总网格数为 5 365 000。在数值模拟中,上游边界设置为速度进口边界条件和压力进口边界条件,下游设置为自由出流边界,出口压力值为一个大气压值。对近壁流,采用壁面函数模拟,壁面采用无滑移条件。上边界设置为相对压强边界,相对压强为 0。

(2)数值计算与室内试验对比。方案 4 数值计算与物理模型试验空腔回水分布情况对比见图 4,方案 4 掺气坎后空腔特征参数计算值与试验值对比见表 2。由图 4、表 2 可知,数值计算结果与室内试验结果在空腔长度和空腔形态上较为接近,规律较为一致,如模型试验和数值计算的空腔长度最大差异为 0.70 m,最大误差不超过 4.2%,空腔形态积水最大差异为 0.10 m,即数值反馈合理。

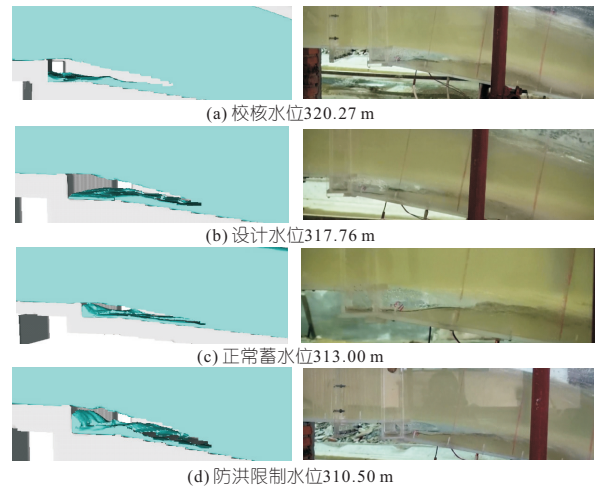


图 4 方案 4 数值计算与物理模型试验空腔回水分布情况对比

Fig. 4 Comparison of the distribution of backwater in the cavity between the physical model test and numerical calculation of scheme 4

表 2 方案 4 掺气坎后空腔特征参数试验值与计算值对比
Tab. 2 Comparison of experimental and calculated values of cavity characteristic parameters after air-entraining sill in scheme 4

库水位	数值计算		模型试验	
	空腔长度/m	空腔形态/m	空腔长度/m	空腔形态/m
校核水位 320.27 m	18.4	积水 0.15 m	17.8	积水 0.10 m
设计水位 317.76 m	17.6	积水 0.20 m	16.9	积水 0.10 m
正常蓄水位 313.00 m	16.0	积水 0.30 m	15.4	积水 0.20 m
防洪限制水位 310.50 m	15.2	积水 0.35 m	14.7	积水 0.30 m

3 涿天河水库扩建工程[#]1 泄洪洞掺气坎布置优化

3.1 掺气坎布置优化设计

工程实践表明,大流量小底坡泄洪洞布置的掺气减蚀设施,往往存在空腔回水和水翅击打泄洪洞洞顶的问题。当水流处于大单宽流量、低 Fr 数条件下,重力影响十分显著,空腔区流线产生严重弯曲,掺气空腔内容易形成回水,空腔回水对掺气设施的水力及掺气特性影响明显,减少水气交界面,并削弱水流掺气效果,严重时还会导致回水封堵进气孔,出现空腔消失的不利流态,影响掺气设施的正常运行。此外,由于边界条件的变化引起的冲击波均可能引起掺气坎水体紊动特性加剧形成水翅,水翅喷溅击打洞顶盖板等猝发现象,从而威胁工程安全。由于室内模型试验耗时长成本高,试验方案有限,为避免空腔回水封堵通气孔及防止水翅冲刷破坏,采用反馈数值模型进行掺气坎布置优化分析。

以涿天河水库扩建工程[#]1 泄洪洞的掺气减蚀设施的设计来看,应使掺气保护范围尽量长(最不利水位条件下避免空腔回水封堵通气孔),掺气坎后挑射水流最高点至底板的距离尽量小(防止掺气坎后水翅冲刷泄洪洞洞顶)。因此,基于水力安全和经济两方面的考虑,[#]1 泄洪洞掺气坎体型的优化目标函数定义为:

$$a(\alpha, \theta) = T_{\max} / L_{\text{jet}} \quad (1)$$

式中, α 为翼型坎挑坎角度; θ 为坎后底坡坡率; T_{\max} 为通过掺气坎后挑射水流最高点至底板的距离,作为度量泄洪洞边墙开挖高度的参数; L_{jet} 为掺气坎的有效空腔长度(稳定的空腔截面面积比上坎高),作为度量掺气保护长度的参数。

由式(1)可知,当优化目标函数取最小值时,此时对应的翼型坎挑坎角度 α 和坎后底坡坡率 θ 为最优。

3.2 掺气坎布置优化分析

根据掺气坎体型优化的目标函数,参考[#]1 泄洪洞室内试验体型参数及相应的试验结果,设计了 9 种不同的掺气坎体型方案,见表 3。建立[#]1 泄洪洞泄流数值计算模型,采用数值反馈分析模型参数逐一计算,然后计算掺气坎体型优化目标函数(式(1)),计算结果见表 4。由表 4 可知:①空腔回水的有效长度,主要受水舌落点及射流水舌冲击角影响。随着挑坎角度增大落点越远,坎后底坡坡率越大冲击角越小,空腔回水的有效长

表 3 掺气坎体型优化计算方案参数
Tab. 3 Parameters of optimization calculation scheme of aerated sill shape

掺气坎 体型 方案	型式	挑角 $\alpha/\%$	坎高 /m	坎后斜 坡坡度 $\theta/\%$	掺气坎 体型 方案	型式	挑角 $\alpha/\%$	坎高 /m	坎后斜 坡坡度 $\theta/\%$
M1	翼型坎	10	1.6	10	M6	翼型坎	5	1.6	20
M2	翼型坎	10	1.6	15	M7	翼型坎	0	1.6	10
M3	翼型坎	10	1.6	20	M8	翼型坎	0	1.6	15
M4	翼型坎	5	1.6	10	M9	翼型坎	0	1.6	20
M5	翼型坎	5	1.6	15					

表 4 不同掺气坎体型计算方案下优化目标函数
Tab. 4 Optimization objective function under different calculation schemes of aerated sill shape

掺气坎体 型方案	水位	空腔形态	$T_{\max} / L_{\text{jet}}$
M1	校核水位 320.27 m	积水 0.53 m	2.31
	设计水位 317.76 m	积水 0.66 m	2.43
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.94 m	3.82
	防洪限制水位 310.50 m	回水淹没通气孔	
M2	校核水位 320.27 m	积水 0.31 m	1.08
	设计水位 317.76 m	积水 0.35 m	1.39
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.82 m	3.26
	防洪限制水位 310.50 m	积水 1.07 m	4.33
M3	校核水位 320.27 m	积水 0.15 m	0.98
	设计水位 317.76 m	积水 0.21 m	1.05
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.33 m	1.16
	防洪限制水位 310.50 m	积水 0.35 m	1.22
M4	校核水位 320.27 m	积水 0.62 m	2.52
	设计水位 317.76 m	积水 0.65 m	2.86
	正常蓄水位 313.00 m	积水 1.00 m	4.12
	防洪限制水位 310.50 m	回水淹没通气孔	
M5	校核水位 320.27 m	积水 0.43 m	1.88
	设计水位 317.76 m	积水 0.41 m	1.95
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.75 m	3.10
	防洪限制水位 310.50 m	积水 1.05 m	4.38
M6	校核水位 320.27 m	积水 0.21 m	1.16
	设计水位 317.76 m	积水 0.24 m	1.28
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.41 m	1.87
	防洪限制水位 310.50 m	积水 0.45 m	2.22
M7	校核水位 320.27 m	积水 0.67 m	2.89
	设计水位 317.76 m	积水 0.82 m	3.46
	正常蓄水位 313.00 m	回水淹没通气孔	
	防洪限制水位 310.50 m	回水淹没通气孔	
M8	校核水位 320.27 m	积水 0.21 m	1.16
	设计水位 317.76 m	积水 0.24 m	1.28
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.41 m	1.87
	防洪限制水位 310.50 m	积水 0.45 m	2.34
M9	校核水位 320.27 m	积水 0.32 m	1.33
	设计水位 317.76 m	积水 0.35 m	1.47
	正常蓄水位 313.00 m	积水 0.46 m	2.14
	防洪限制水位 310.50 m	积水 0.52 m	2.73

度越大,掺气效果越好。挑射水流最高点至底板的距离在同等条件下主要受挑坎角度的影响,挑坎角度越大挑射高度越高。②除方案 M1、M4、M7 的掺气坎后空腔出现了回水淹没通气孔的情况外,其余 6 组方案均形成了有效空腔。其中,方案 M2、M3、M5、M6、M8、M9 在不同水位作用下

