

泄洪洞反弧段上游掺气坎对反弧段下游侧墙的减蚀作用

刘超¹, 张光科¹, 冯凌霄², 王海云¹, 杨永全¹

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学工程设计研究院, 四川 成都 610065)

摘要 通过对龙抬头明流泄洪洞反弧末端下游易蚀原因的总结分析, 指出在设计掺气坎时应重视反弧段下游附近边墙的掺气防护。通过大比尺模型试验, 对能否通过增加反弧段上游掺气坎的掺气能力达到对反弧段下游侧墙的减蚀目的的问题进行了研究, 试验表明, 增加反弧段前掺气坎的掺气能力, 虽然能在一定程度上改善反弧段下游边墙的掺气效果, 并减小边墙清水区范围, 但反弧段前掺气坎的掺气能力即使较大时, 也难以完全消除边墙清水区, 该措施难以可靠地解决反弧段下游边墙的空蚀问题。

关键词 掺气减蚀; 掺气坎; 反弧段; 边墙; 掺气盲区; 泄洪洞; 模型试验

中图分类号: TV131.61

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2007)01-0046-04

Effect of upstream aerator in ogee section of spillway tunnel on cavitation alleviation of downstream sidewall // LIU Chao¹, ZHANG Guang-ke¹, FENG Ling-xiao², WANG Hai-yun¹, YANG Yong-quan¹ (1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of Engineering Design, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on an analysis of causes of cavitation damages to the downstream at the end of ogee section in the spillway tunnel of open channel, it is pointed out that the aeration measure for sidewall protection nearby the downstream of ogee section should be paid much attention in aerator design. Large-scale model tests were performed to study whether the cavitation alleviation of downstream sidewall in ogee section can be realized by enhancement of the aeration capacity of upstream aerator. The results show that the enhancement of the aeration capacity of upstream aerator can improve the effect of aeration on downstream sidewall to a certain degree and reduce the clean water region of the sidewall; but it cannot eliminate the clean water region completely. Therefore, it is difficult to control cavitation of downstream sidewall thoroughly only by this measure.

Key words: cavitation alleviation by aeration; aerator; ogee section; sidewall; non-aerated flow area; spillway tunnel; model test

大量工程实例表明, 高水头龙抬头泄洪洞反弧段下游是发生空蚀的常见部位, 如美国的波德坝泄洪洞、黄尾坝泄洪洞, 西班牙圣伊斯坦堡坝泄洪洞, 我国的刘家峡泄洪洞、二滩泄洪洞等。根据泄洪洞反弧段下游破坏部位划分, 一种是反弧末端下游底板的破坏, 一种是反弧末端侧壁的破坏, 更常见的是反弧末端底板和侧壁的同时破坏。

反弧末端发生空蚀的原因, 除了施工定线误差、不平整度等问题外, 胡明龙^[1]、杨永森等^[2]等学者研究表明: 由于反弧段离心力影响动水压强分布, 在反弧前半段受逆压梯度影响边界层变厚, 反弧后半段受顺压梯度影响边界层变薄, 在反弧末端达到最薄, 且反弧段边界层内的紊动程度很高, 流速梯度很大, 因而反弧段下切点附近壁面切应力最大, 初生空化数很大, 容易出现空化空蚀。

笔者进一步研究^[3-4]表明, 反弧末端易于空蚀,

尤其是反弧末端侧壁容易空蚀的原因, 除了上述原因之外, 还主要与目前龙抬头泄洪洞掺气减蚀设计的思路有关。掺气能有效地减免空蚀, 在对泄洪洞掺气减蚀设计时应考虑与水流接触的所有壁面, 然而, 常规的掺气减蚀设计往往只注重对底板的保护, 而忽视了对边壁的掺气保护, 比如在确定掺气坎数量及间距时, 一般均主要考虑近底板处水流的掺气浓度, 而忽视了近边壁处的掺气浓度。目前, 龙抬头明流泄洪洞常规的掺气方法是设置掺气坎从底部掺气, 典型的掺气减蚀设计为^[5-7]: 在反弧段上游设一掺气坎(1号坎), 防止反弧段的空蚀; 在反弧末端设一掺气坎(2号坎), 保护紧邻反弧段的下游直线段; 然后根据掺气坎的保护长度及洞内水面自掺气状况在直线段沿线布设其他掺气设施。这种设计思路存在如下问题: 在反弧末端设底部进气掺气坎(2号坎)后, 掺气坎后的出射水流, 其底部受掺气空腔的

影响,压强接近于空腔负压,其顶部为净空,压强接近大气压强,因而空腔段水流动水压强小,对于反弧末端水流速度达 40 m/s 量级的泄洪洞而言,在未考虑脉动压强的影响时水流空化数仍很低(约为 0.12),因此水流空化难以避免,此外,在设置反弧段前的掺气坎(1 号坎)时,往往仅考虑了对反弧段本身的保护,未考虑利用 1 号坎来对 2 号坎下游附近洞身进行保护,因此龙抬头泄洪洞设计的 1 号坎进气量一般不大,水流至反弧末端时掺气浓度已经很小,而此时反弧段下游水流表面自掺气向全水深的扩散尚不够充分,2 号坎底部强迫掺气也尚未充分扩散,致使反弧段下游附近边墙存在较大范围的掺气盲区,见图 1。由于该部位边墙未能受到掺气的有效保护,因而易导致反弧段下游边墙空蚀破坏。

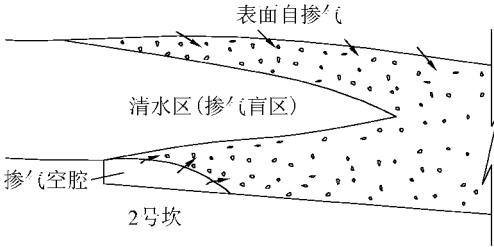


图 1 掺气盲区示意图

因此,研究能否通过增加反弧段前 1 号坎的进气量,使其保护范围不仅为反弧段,还包括反弧末端掺气空腔附近一定范围,从而达到消除反弧末端 2 号坎下游边墙掺气盲区的目的,具有很大的现实意义。笔者参照二滩水电站大型龙抬头明流泄洪洞,通过大比尺的水工常压模型试验,对此进行了试验研究。

1 试验设计

试验模型严格按照二滩水电站大型龙抬头明流泄洪洞的体型尺寸按重力相似准则设计,模型比尺 1:30。该泄洪洞洞身横断面为城门洞形,模型典型断面尺寸为 43.3 cm × 45.0 cm(宽 × 高)。模型模拟范围为洞身进口至直线段 3 号坎下游,其中,1 号坎(反弧段前)的形式为小挑坎 + 掺气槽,2 号坎(反弧末端)及 3 号坎(下游直线段)的形式为小挑坎 + 跌坎。

试验模型流量 $Q = 0.756 \text{ m}^3/\text{s}$,该流量时试验模型反弧末端掺气坎处水力特性指标为: $v = 7.12 \text{ m/s}$, $Fr = 4.6$, $Re = 1.75 \times 10^6$, $We = 1.68 \times 10^5$ 。

为了增加 1 号坎掺气量,试验采用了两种方式,一种方式为优化 1 号坎体型,即增加 1 号坎的坎高及坡度,增加其水动力强迫掺气;另一种方式为人工强迫通气,即将 1 号坎两侧通风竖井顶部的自然通

风进气口封闭,以防人工输送的空气从泄洪洞顶部外泄,强迫通风的空压机则连接到两侧竖井上,在两侧竖井同时进行人工强迫通气。

掺气浓度测量采用中国水利水电科学研究院研制的 848 型电阻式掺气浓度仪。由于模型中水流流速较高,平行电极在高速水流中不易固定,且电极在高速水流中易产生分离旋涡,从而影响掺气浓度的测量结果,为了量测泄洪洞近壁面处的掺气浓度,将测量电极(传感器)贴在泄洪洞左边墙的壁面上,即掺气浓度测量采用贴片方式,每次测量时均对每一对贴片分别进行率定。本次试验在距反弧末端 50.0 cm 及 83.3 cm 两断面处的左边墙上共布置了 8 对贴片,各测点布置位置见图 2。

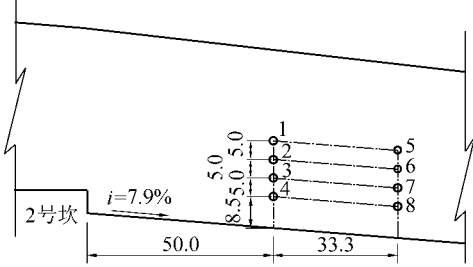


图 2 掺气浓度测点布置(单位:cm)

2 试验结果

2.1 优化 1 号坎体型试验结果

为了分析优化 1 号坎体型、增加其掺气量对消除 2 号坎下游掺气盲区的效果及相应的水力特性,对 1 号坎进行了 6 个体型方案的试验。各方案体型尺寸见图 3 及表 1。

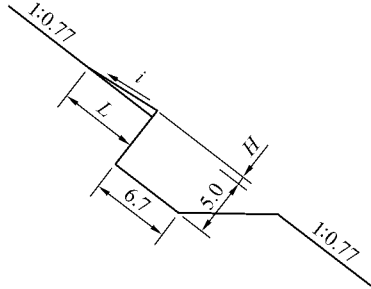


图 3 1 号坎体型示意图(单位:cm)

表 1 1 号坎各体型测试结果

方 案	坎高 H/cm	坎长 L/cm	坡度 i	通风量/ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	空腔长度/ cm
方案 1	0.67	6.7	1:10	< 2.68	30
方案 2	1.33	13.3	1:10	< 2.68	40
方案 3	1.33	6.7	1:5	7.99	63
方案 4	1.67	13.3	1:8	5.34	53
方案 5	1.67	10.0	1:6	9.33	68
方案 6	1.67	6.7	1:4	12.27	73

试验表明,随着 1 号坎坎高或坡度的增大,其通气量有所增大。 $Q = 0.756 \text{ m}^3/\text{s}$ 时各体型洞内水流

流态较为接近,仅在坎高和坡度较大时(如方案6),挑射水水面线有微弱隆起现象,但各体型时1号坎下游水面线均未超过隧洞直墙段。然而,在高水位闸门小开度(1/4开度)情况下(此时模型流量为 $0.185\text{ m}^3/\text{s}$)随着1号坎坎高或坡度的增加,坎后出射水流两侧水翅串顶的情况逐步加重,流态恶化。

从反弧末端2号坎下游边墙处的掺气效果来看,优化1号坎体型、增加1号坎通气量后,能明显观察到2号坎下游边墙清水区逐步减弱,但即使在通气量较大时(方案6:12.27 L/s,平均进气体积分数约1.62%),在2号坎下游边墙约60 cm范围的上(靠近水面)下(靠近底空腔)部位也仍存在2个条带形清水区,亦即沿过水断面从上到下存在3个条带形的掺气水流区和2个条带形的清水区:表面自掺气水流区;上部清水区;1号坎形成的掺气水流区;下部清水区;2号坎底空腔掺气区,见图4。

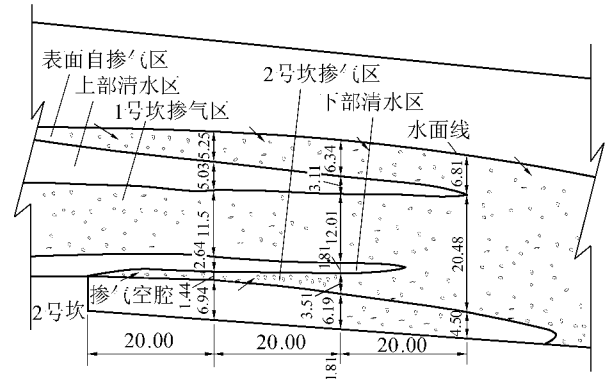


图4 2号坎下游条带形清水区示意图(单位:cm)

2.2 人工强迫通气试验结果

试验表明,当通气量较小时,1号坎空腔内有回水及负压,通风动力仍来自水动力的抽吸作用,随着通气量的增加,1号坎空腔回水消失,空腔内出现正压,空腔长度也相应增加,此后通风动力才来源于空压机的强迫加压。在空腔压力从负压变化到很大正压的整个过程中, $Q = 0.756\text{ m}^3/\text{s}$ 时1号坎附近的水面线变化不大,在高水位闸门小开度(1/4开度)情况下(此时模型流量为 $0.185\text{ m}^3/\text{s}$),坎后出射水流流态也较好。

观察表明,不论是增加1号坎坎高或坡度而增大掺气量,还是人工强迫通气增大掺气量,从1号坎底部掺入水流中的气泡的运动规律基本一致,对反弧末端2号坎下游边墙处的掺气盲区的消除效果也基本一致。人工强迫通气时,随着1号坎强迫通气量的逐渐增加,能明显观察到2号坎下游边墙清水区逐步减弱,但即使在通气量很大时(15.00 L/s,此时对应的通气压力为1.11 kPa,换算为原型,供气所需动力将达到2500 kW),在2号坎下游边墙的上(靠

近水面)下(靠近底空腔)部位仍存在2个条带形清水区。

为了分析1号坎处通气量对2号坎下游边墙掺气浓度的影响,在 $Q = 0.756\text{ m}^3/\text{s}$ 时,对1号坎方案1体型(坎高0.67 cm,坎长6.7 cm,坡度1:10)在1号坎不进气(即将1号坎两侧通风竖井顶部的自然通风进气口封闭,且不进行人工强迫通气)和1号坎强迫通气量为15.00 L/s时,测试了2号坎下游边墙掺气浓度的变化,1号坎强迫通气15.00 L/s与不进气相比,2号坎下游边墙近壁掺气浓度增加值见表2。

表2 1号坎强迫通气15.00 L/s较不进气时
2号坎下游边墙近壁掺气浓度的增加值

测点编号	掺气浓度增加值/%	测点编号	掺气浓度增加值/%
1	0.27	5	
2	0.29	6	0.22
3	0.16	7	0.10
4	0.46	8	0.18

3 试验结果分析

观察表明,不论是增加1号坎坎高或坡度而增大掺气量,还是人工强迫通气增大掺气量,从1号坎底部掺入水流中的气泡的运动规律基本一致。1号坎体型优化试验,即使在通气量较大时(方案6),在2号坎下游边墙约60 cm范围的上(靠近水面)下(靠近底空腔)部位也仍存在2个条带形清水区。1号坎强迫通气试验,1号坎强迫通气量为15.00 L/s(平均进气体积分数约1.98%)时,也仍存在类似的2个条带形清水区。上部清水区的形成,主要是由于从1号坎中掺入的空气沿水深方向扩散较慢,直至2号坎下游,也尚未能扩散到水面;下部清水区的形成,主要是由于1号坎的掺气水流在反弧段受离心力影响,气泡上浮,而反弧末端2号坎的掺气从底空腔向上尚未发展所致。

掺气浓度测试结果表明,1号坎强迫通气量为15.00 L/s与不进气相比,2号坎下游边墙处掺气浓度增加值为0.10%~0.46%。这表明,增加1号坎通气量能在一定程度上提高2号坎下游边墙掺气浓度,但效果不是很明显。

本次试验表明,增加反弧段前1号坎的进气量,虽然能在一定程度上提高反弧末端2号坎下游边墙掺气浓度和减小2号坎下游边墙掺气盲区的范围,但仍难以消除上、下2个条带形清水区,难以可靠地防止该部位的空蚀破坏。同时,依靠增加1号坎的坎高及挑角进而达到增加1号坎进气的目的时,会导致泄洪洞在高水位闸门小开度工况时过坎水流水翅串顶现象,恶化水流流态,而依靠人工强迫通气增

加 1 号坎的进气量所需动力设备功率很庞大。

值得说明的是,反弧段前 1 号坎的设置位置对反弧末端 2 号坎下游掺气盲区的消除效果也有一定的影响。分析表明,如果 1 号坎愈靠近上游,水流流速愈小,其掺气能力也更小,且距离掺气盲区愈远,更难以消除掺气盲区;如果 1 号坎愈靠近下游,即 1 号坎愈靠近反弧段起点,水流流速愈大,其掺气能力有所提高,但高水位闸门小开度工况时过坎水流水翅串顶现象会有所加剧,同时,通过 1 号坎的挑射水流易落在反弧段内,会恶化水流流态;如在反弧段内设置 1 号坎,其设想更难以实现,因为反弧段内动水压强很大,难以形成有效的空腔实现水动力强迫掺气。

4 结 论

龙抬头明流泄洪洞反弧末端下游易蚀原因的总结分析表明,反弧末端掺气坎下游附近容易出现空化,同时,常规的底部掺气设施容易在反弧末端下游侧墙上形成较大范围的掺气盲区,因此,在设计掺气坎时应重视反弧段下游附近边墙的掺气防护。

试验表明,优化反弧段前 1 号坎体型(坎高、坡度适当增加)增加其掺气能力,能在一定程度上提高反弧末端 2 号坎下游边墙掺气浓度,但效果不是很明显,且同时会引起高水位小开度工况下 1 号坎出射水流流态的恶化。更重要的是,由于 1 号坎的掺气在水流中扩散缓慢并受离心力影响,因而 2 号坎下游边墙一定范围内仍然存在上(靠近水面)下(靠近底空腔)2 个条带形的清水区。这表明,增加

反弧段前掺气坎的掺气能力难以有效消除 2 号坎下游边墙的清水区。因此,在实际工程中仅靠优化反弧段前掺气坎体型减免反弧段下游侧墙的空蚀具有很大的难度。参照文献 3-4 的思路,减免反弧段下游侧墙空蚀的工程措施应主要研究侧面进气方式,关于这方面的研究,可参见文献 8-10。

参考文献:

[1] 胡明龙. 压力梯度区空化特性试验研究[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(4): 36-40.

[2] 杨永森, 吴持恭. 明流隧洞反弧段水力及空化特性研究[J]. 成都科技大学学报, 1991(3): 21-28.

[3] 刘超, 杨永全. 龙抬头明流泄洪洞反弧段下游边墙防蚀探讨[J]. 水利水电技术, 2003(9): 26-28.

[4] 刘超, 杨永全. 泄洪洞反弧末端掺气减蚀研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004(3): 375-382.

[5] 丁澎涛, 马长顺, 李西平. 盘石头水库泄洪洞的掺气减蚀研究[J]. 水利水电工程设计, 2000(3): 43-44.

[6] 罗克湘. 白云水电站高水头明流泄洪洞水力学问题的试验研究[J]. 湖南水利, 1995(5): 15-20.

[7] 庞昌俊, 苑亚珍. 大型龙抬头明流泄洪洞的体形设计[J]. 水力发电, 1998(8): 23-28.

[8] 刘超. 泄洪洞反弧段下游侧墙掺气减蚀试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006, 21(4): 465-472.

[9] 刘超. 泄洪洞侧墙的人工强迫掺气减蚀研究[J]. 水力发电, 2006, 32(8): 81-84.

[10] 王海云. 高水头泄水建筑物侧墙掺气减蚀特性研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006(1): 38-43.

(收稿日期: 2005-08-10 编辑: 熊水斌)

· 简讯 ·

第 3 届全国水力学与水利信息学学术大会将在南京召开

由中国水利学会水力学专业委员会、中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会和国际水利工程与研究协会(IAHR)中国分会联合举办的“第 3 届全国水力学与水利信息学学术大会”将于 2007 年 10 月 18~20 日在南京河海大学召开。这次会议也是为 2008 年将在南京召开的第 16 届亚太地区国际水利学大会暨 2008 水工水力学国际研讨会(16th Congress of APD-IAHR)做准备。本次会议将着眼于在可持续发展理论指导下的水利水电工程建设新技术和新发展,会议的中心议题是水利与环境的和谐发展,包括 4 个议题:①环境水力学:水工结构对环境的影响及解缓措施,大坝建设与环境的关系,水环境与生态,雨水利用与城市水环境;②水工水力学:水力学与水文计算在水利工程设计中的新方法,水力学结构物的安全评价,长距离输水工程水力学,数值计算、模型试验与原型观测的混合模拟,水利量测(室内试验及原型观测的仪器与新设备);③河口、岸边水力学:水利工程对河口形态的影响,河、湖、海岸边的淘刷与保护,考虑环境、生态的护岸工程中的水力学问题,岸边围垦及水力学;④水利信息学的新进展:水利信息技术在水利中的应用(水利水电工程、防洪、水文水资源等),数值模拟与仿真技术,数字实验室的新发展,等等。会议就以上 4 个议题征集论文,论文集将正式出版,并选择质量高的论文推荐到全国核心期刊上发表。会议网址: <http://www.iahr.org.cn>。

(本刊编辑部供稿)