

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.020

“龙落尾”布置形式在高速水流泄洪洞中的应用研究

杨志明, 郑洪, 詹双桥, 幸添

(湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410007)

摘要: 结合涇天河水库1#泄洪洞掺气减蚀与衬砌施工质量问题,对“龙落尾”布置形式在高速水流泄洪洞中的应用进行了研究。水工模型试验表明:在合适的主洞纵坡以及掺气坎布置条件下,该形式大大缩小了泄洪洞高速水流空蚀影响范围,优化了洞身断面尺寸,减少了掺气坎数量,保证了高流速区的掺气效果,降低了隧洞衬砌施工难度。

关键词: 泄洪洞;高速水流;空化;龙落尾;纵坡;掺气坎

中图分类号: TV651.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0105-04

Application of Dropped Outlet Layout for Spillway Tunnel with High-speed Flow

YANG Zhiming, ZHENG Hong, ZHAN Shuangqiao, XING Tian

(Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan 410007, China)

Abstract: In combining with alleviating cavitation and lining construction quality of No. 1 spillway tunnel of Centianhe project, application of dropped outlet layout for spillway tunnel with high-speed flow is analyzed through hydraulic model test and design calculation. The research results show that, under the suitable longitudinal slope and aeration conditions of the main tunnel, this layout can greatly reduce the impact area of high-speed water cavitation in spillway tunnel, and can optimize the cross-section size of the tunnel, at the same time reduce number of aerators, ensures aeration effects of high-flow regions, and difficulties in tunnel lining construction.

Keywords: spillway tunnel; high-speed flow; cavitation; dropped outlet; longitudinal slope; aerator

涇天河水库扩建工程位于湖南永州市江华瑶族自治县,为湘江支流潇水第一个梯级,是具有灌溉、防洪、下游补水、发电并兼顾航运等综合利用效益的大(1)型水利水电枢纽工程。水库正常蓄水位313.0 m,最大坝高114 m,总库容15.1亿 m^3 ,灌溉面积 7.43×10^4 ha,电站装机容量200 MW。

大坝为混凝土面板堆石坝,采用两条高速水流泄洪洞宣泄洪水,其中2#泄洪洞为表孔溢流明流隧洞,采用“龙抬头”布置型式与导流洞结合;1#泄洪洞为深孔短管有压明流隧洞,为了较好地解决掺气减蚀与混凝土衬砌施工质量问题,开展了“龙落尾”布置型式在高速水流泄洪洞中的应用研究。

1 掺气减蚀试验研究

前期设计中,1#泄洪洞采用一坡到底的纵向布置型式,进口底板高程260 m,出口底板高程224.5

m,洞身全长570 m,纵坡6.25%,沿线设置7道掺气坎槽,出口挑流消能。设计洪水水位下,1#泄洪洞下泄流量 $2\ 205\ m^3/s$,进口有压短管出流最大流速约28 m/s,出口挑流鼻坎前最大流速超过33 m/s,全洞大部分洞段流速大于30 m/s,属高速水流隧洞,抗空蚀要求高。为确保工程运行安全,在进行泄洪洞设计时,从解决泄洪洞防空蚀研究^[1-5]入手,开展了一系列的掺气减蚀试验研究工作。

长江水科院^[6-7]在减压箱内进行空化模型试验及掺气效果验证时,经过多种不同掺气坎体型试验分析表明,在6.25%纵坡隧洞内,各掺气坎掺气效果均不理想,坎下掺气槽极易被底部回流淹没封堵,难以形成有效空腔,最终不得不局部改变洞身纵坡来保证掺气效果。试验推荐的掺气坎型式及布置为:洞身沿线设置4道型式一致的掺气坎,间距145 m~155 m;掺气坎上游20 m洞段为水平段,坎后设

5 m 平台,平台后接 30 m 长 15% 的斜坡段,其后再接 4.28% 的斜坡与下一道掺气坎上游水平段连接;掺气坎为“挑跌坎”型式,坎高 1.1 m~1.4 m,挑坎为 1:10 的反向挑坎,通气孔尺寸 2.0 m×0.9 m,掺气坎结构形式见图 1。

根据洞身掺气坎布置及试验流速分布,由于掺气坎的小角度挑流作用,坎后水面出现局部升高,相应部位洞顶需进行加高以满足洞顶余幅要求,试验推荐的洞身纵向布置见图 2。

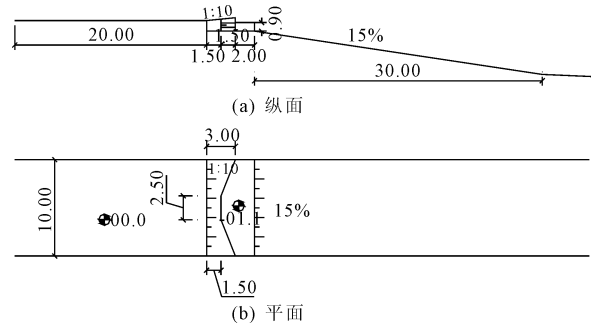


图 1 选定掺气坎体型示意图

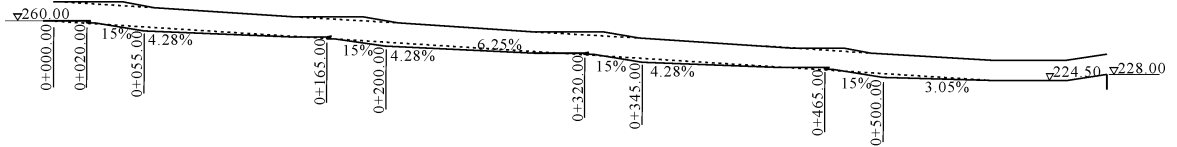


图 2 试验推荐洞身布置图

试验选定的掺气坎体型可以形成稳定的空腔,掺气效果较好,但洞身底坡及顶拱采用多段折线布置,无法采用钢模台车连续浇筑混凝土衬砌,施工难度加大,衬砌过流表面平整度难以保证;由于洞身底坡频繁变化,洞内水面线受多道掺气坎干扰而极不稳定,模型中时有较大水翅发生,水流流态紊乱,为此,设计开展了洞身纵向布置优化研究。

2 “龙落尾”布置形式

2.1 “龙落尾”布置思路

泄洪洞“龙落尾”布置形式,即上游大部分洞段采用较小纵坡和尾部小范围洞段采用较大纵坡组合的布置形式。该布置的思路是:首先通过合适的纵坡选择,尽量控制上游主洞段水流流速相对较小、恒定,避免出现高速水流现象,达到取消掺气设施、减轻减蚀保护难度的目的;然后将能量集中在尾部设置短陡坡形成高速水流,方便设置掺气效果良好的掺气坎,并通过一个掺气坎对小范围高速水流区达到良好的保护效果。

2.2 洞身纵坡选择

(1) 主洞段纵坡。合理选择主洞段纵坡,将主洞段水流流速控制在一定范围内达到减少甚至取消掺气减蚀设施的目的,同时,控制沿线水面线尽量与底板纵坡平行,即接近均匀流,既可保证主洞断面一致,方便钢模台车连续施工,又可使洞身获得最经济的断面尺寸。

1#泄洪洞进口底板高程 260 m,工作弧形闸门全开时最大出流流速约 28 m/s,国内众多工程经验及试验研究表明,该流速已接近不设掺气设施的砼衬砌泄洪流流速上限(30 m/s)。因此,上游主洞段

纵坡选择以全线过水断面均匀、流速在 28 m/s 左右为原则。采用均匀流公式计算,最终选择主洞 0+000 m 至终点 0+515 m 段纵坡为 3.5%,经单体模型试验验证,沿程水面线均匀稳定,近似均匀流。

(2) “龙落尾”段纵坡。在已经选定的上游主洞段纵坡的基础上,根据泄洪洞出口地形地质条件,综合考虑出口挑流消能要求、掺气保护范围以及掺气减蚀效果等因素,并通过模型试验,最终确定“龙落尾”段纵坡为 20%,纵坡长 62 m,坡底通过反弧曲线与出口明渠底板 228.0 m 衔接。

2.3 掺气坎布置

掺气坎布置于“龙落尾”陡坡起点 0+515 m 桩号处,上接 3.5% 纵坡,下接 20% 纵坡。经单体模型试验优化,掺气坎体型采用翼型坎^[8-11],掺气效果良好,掺气空腔稳定。由于掺气量明显加大,将通气管尺寸加大至 2 m×1.6 m。体型示意见图 3,掺气坎布置见图 4。

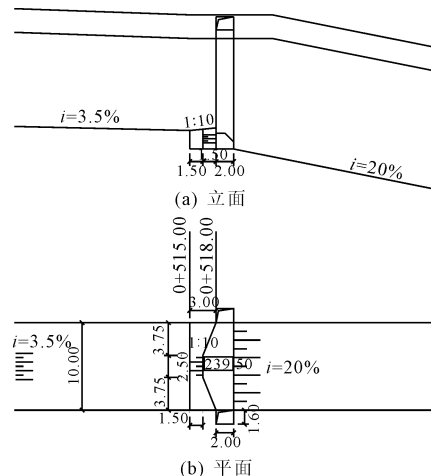


图 3 掺气设施体型示意图

2.4 试验验证

(1) 在各库水位工况下,3.5%纵坡主洞段水流较平顺,整个城门洞洞身段的水面均未超出直墙顶部,洞顶余幅均满足规范要求。

(2) “龙落尾”布置方案的掺气坎下能形成稳定的空腔,较好地解决了原方案中存在的空腔回溯积水较深的问题,保证了掺气效果。

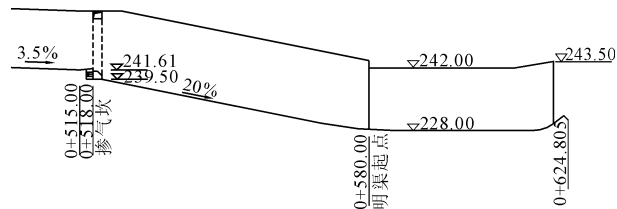


图 4 掺气坎布置示意图

(3) 模型时均压力测试成果表明,掺气坎后无明显不良压力特性,坎后底板未出现不利的动水冲击压力,底坡坡比取值合理。

(4) 通气管风速及通气量试验成果表明,通气管内的最大风速小于 60 m/s。

(5) 掺气坎后斜坡段内底板掺气浓度均大于 1.5%,空蚀破坏可能性不大;反弧段内(掺气坎后 50.3 m ~ 66.8 m 范围)底板掺气浓度最小,约为 0.3%,仍具有一定的掺气减蚀效果;而反弧后至挑流坎末端 43.9 m 范围的底板掺气浓度较小,需严格控制衬砌表明平整度。

3 结构设计

3.1 掺气水深计算

对明流泄洪洞,如果掺气水深估计不足,洞顶余幅留得过小,可能导流明满流交替现象发生,水流不间断击拍洞壁而威胁洞室安全;而掺气水深估计过大,又会增大隧洞断面尺寸,投资增加,造成不必要的浪费。根据《掺气减蚀模型试验规程》^[12](SL

157—2010),模型水流流速大于 6.0 m/s 时,模型水流掺气才与原型相似,因本模型(1/40)水流流速未达 6.0 m/s,模型试验无法提出掺气水深。因此通过计算合理估计高速水流掺气水深是十分必要的。

3.1.1 计算公式

关于掺气水深的计算确定,目前主要以经验公式为主,本文对几个主要经验公式^[13-16]进行了对比分析。

(1) 公式 1(溢洪道设计规范公式)

$$h_b = \frac{h}{\beta} = (1 + \frac{\zeta v}{100})h \quad (1)$$

式中: h 、 h_b 为泄槽计算断面的水深及掺气后的水深,m; v 为不掺气情况下泄槽计算断面的流速,m/s; ζ 为修正系数,可取 1.0 s/m ~ 1.4 s/m,流速大者取大值,取 1.4。

(2) 公式 2(霍尔公式)

$$h_b = \frac{h}{\beta}, \quad \beta = \frac{1}{K \frac{v^2}{gR} + 1} \quad (2)$$

式中: h 、 h_b 为计算断面的水深及掺气后的水深,m; β 为含水比(气水混合物中水所占的比例); K 为槽壁材料系数,混凝土渠槽取值 0.006; v 为不掺气情况下泄槽计算断面的流速,m/s; R 为水力半径,m。

(3) 公式 3(王俊勇公式)

$$h_b = \frac{h}{\beta}, \beta = 0.937(\frac{v^2}{gR} \cdot \psi \cdot \frac{b}{h})^{0.088}, \psi = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} \quad (3)$$

式中: b 为计算断面底宽,m; n 为糙率,取 0.014;其它符号意义同前。

3.1.2 计算结果

采用上述经验公式计算设计水位工况下上游缓坡段掺气水深,计算结果见表 1。

表 1 计算掺气水深对比表

糙率 n	泄槽宽度 b /m	单宽流量 q /($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	泄槽底坡 i	计算清水深 h /m	流速 v /($m \cdot s^{-1}$)	水力半径 R /m		
0.014	10.0	220.5	0.035	7.84	28.1	3.05		
修正系数 ξ	槽壁材料 系数 k	ψ	含水比 β			掺气水深 h_b/m		
			公式 1	公式 2	公式 3	公式 1	公式 2	公式 3
1.4	0.006	0.04	0.72	0.86	0.92	10.89	9.08	8.52

3.1.3 掺气水深取值

影响水流掺气的主要因素有泄槽糙率 n 、弗劳德数 Fr 、坡度及边界条件等,1# 泄洪洞主洞段具有单宽流量大、底坡小、弗劳德数低及流速高等特点。

溢洪道规范推荐的掺气水深计算公式考虑影响因素单一,只与流速相关,计算值偏大;霍尔公式考虑了弗劳德数、泄槽粗糙度及流速的影响,计算值居中;王俊勇公式考虑了糙率、弗劳德数、泄槽宽深比及流

速的影响,计算值相对较小。涑天河 1# 泄洪洞主洞段尽管流速较大,但纵坡较缓,过流断面均匀顺直,上游无掺气设施,自然掺气条件较差,采用溢洪道规范公式偏保守。国内小湾电站泄洪洞、黄连山水库溢洪洞^[17]经模型试验验证,掺气水深与霍尔公式计算值较吻合。因此,设计最终采用类似工程采用较多且相对安全的经验公式——霍尔公式计算掺气水深、确定洞身断面尺寸。

3.2 洞身断面设计

依据水工隧洞设计规范,高流速无压隧洞掺气水面以上的空间宜为断面面积的 15%~25%,且水面不宜越过直墙。

主洞段纵坡 3.5%,近似明渠均匀流,断面流速约 28 m/s,掺气水面以上净空面积按不小于总断面面积的 25% 控制。经沿程计算水面线与模型实测水面线对比分析及掺气水深计算,确定洞身断面尺寸 10.0 m×13.2m(宽×高),直墙高度 10.5 m,顶拱圆心角 112°,设计水位工况下计算掺气水面以上净空面积占总断面面积的 26.7%。

“龙落尾”洞段纵坡 20%,水流沿程加速,掺气前清水深应小于上游缓坡段水深,但受掺气坎挑射及掺气影响,水面波动较大,试验实测水面线远高于计算值,最终根据掺气坎单体模型试验成果确定洞身高度 16.2 m,直墙高度 13.5 m,顶拱角度 113.5°,洞身宽度 10 m 不变。

3.3 掺气减蚀措施

(1) 衬砌结构。1# 泄洪洞洞身围岩厚层状砂岩,以Ⅲ类为主,但破碎夹层较发育,考虑到掺气水深采用值比溢洪道规范公式计算小得多,且泄洪时洞内难免产生雾化及偶然水翅,因此,该泄洪洞全断面采用钢筋混凝土衬砌,衬砌底板过流面设置 60 cm 厚 C40HF 混凝土,侧墙采用常规 C40 混凝土,顶拱为常规 C25 混凝土,衬砌厚度 0.8 m~1.5 m。

(2) 掺气坎设计。该泄洪洞设置一道掺气坎,布置于“龙落尾”陡坡起点 0+515 m 桩号处,上接 3.5% 纵坡,下接 20% 纵坡。采用翼型坎结构,挑角反坡 1:10,坎高 2.26 m~2.41 m,底部气腔宽 2.0 m~3.5 m,掺气坎全部采用 C40HF 混凝土。左右侧墙各布置一个 2.0 m×1.6 m 的通气孔至洞顶,洞顶设两个 2.0 m×1.6 m 的进气口。

(3) 平整度控制。根据工程运用调研成果,1# 泄洪洞过流表面不平整度要求控制在 3 mm 以内,平整度不达标部位要求通过打磨,使纵向坡度不大于 1/40,横向坡度不大于 1/30。

4 结 论

“龙落尾”布置型式在涑天河水库扩建工程 1# 泄洪洞的应用,大大缩小了泄洪洞高速水流空蚀影响范围,优化了洞身断面尺寸,减少了掺气坎数量,保证了高流速区的掺气效果,降低了隧洞衬砌施工难度,加快了施工进度,提高了工程运行安全度,工程效益显著。该布置型式在高速水流泄洪洞设计中具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 郭 军,张 东,刘之平,等.大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J].水利学报,2006,37(10):1193-1198.
- [2] 于 野,刘亚坤,倪汉根,等.洞式溢洪道掺气减蚀设施的体型优化研究[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):7-9.
- [3] 南 洪,贺 威,韩鹏辉,等.查日扣水电站竖井旋流泄洪洞水力数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):204-207.
- [4] 翟保林,刘亚坤.高水头明流泄洪洞三维数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):31-34.
- [5] 刘汉东,彭 冰,王四巍,等.前坪水库溢洪道高边坡设计方案优化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(1):47-51.
- [6] 长江水利委员会长江科学院.涑天河水库扩建工程 1# 泄洪洞单体模型试验报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2013.
- [7] 长江水利委员会长江科学院.涑天河水库扩建工程 1# 泄洪洞局部体型减压模型试验研究报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2013.
- [8] 李 静,胡国毅.泄洪洞掺气减蚀设施空腔回水研究[J].长江科学院院报,2013,30(8):50-53.
- [9] 蒙富强.长河坝水电站泄洪洞掺气减蚀设施设计[J].水力发电,2016,42(10):36-38.
- [10] 梁尚英.泄洪洞掺气减蚀探讨[J].水利规划与设计,2017(4):51-54.
- [11] 向庆银,刘 杰.岸坡弯道式溢洪道优化设计应用[J].水利技术监督,2017(6):166-169.
- [12] 掺气减蚀模型试验规程:SL 157—2010[S].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [13] 中国科学院水工研究室译.高速水流论文译丛:第一辑 第一册[M].北京:科学出版社,1958.
- [14] 水工设计手册第 1 卷:基础理论[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,2013.
- [15] 王俊勇.明渠高速水流掺气水深计算公式的比较[J].水利学报,1981(5):48-52.
- [16] 曾玉娟.无压泄洪洞高速水流掺气水深的计算分析[J].云南水力发电,2001,17(3):62-64.
- [17] 夏权斌.溢洪道高速水流掺气水深计算及溢洪道设计[J].云南水力发电,2005,21(6):47-50.