

阳江抽水蓄能电站大转角弯道溢洪道消能优化研究

史振华

(广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635)

摘要: 阳蓄下水库采用了大转角弯道正槽式溢洪道, 弯道段的转弯半径小、转角大, 弯道前后过渡段距离短且纵坡大, 总水头落差达 61m。为了研究溢洪道弯道水流、阶梯消能工及消力池组合消能问题, 通过水工物理模型试验, 从泄流能力、水流流态、消能工运行效果等方面论证溢洪道设计体型的合理性, 针对存在的问题对设计体型进行了优化, 提出了溢洪道泄洪消能的推荐体型。文中对于类似工程的溢洪道设计, 具有一定的参考价值。

关键词: 溢洪道; 弯道水流; 高底坎; 中导墙; 阶梯消能工; 消力池

中图分类号: TV651

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0092-03

一、工程概况

阳江抽水蓄能电站位于广东省阳春市与电白县交界处的八甲山区, 上、下水库同处于白水河上, 电站装机容量 2,400MW。下水库主要建筑物包括沥青砼心墙堆石(渣)坝、溢洪道、泄放洞等。溢洪道布置在主坝右侧坝口处, 为无闸门开敞正槽溢洪道, 设计最大泄流量达 1,042m³/s, 控制堰为 WES 堰, 堰顶高程与正常蓄水位相同, 为 103.70m, 共设 6 孔溢流孔, 每孔净宽 10m, 溢流总净宽为 60m, 主要包括进口段、溢流堰段、一级消力池、泄槽段、二级消力池、出口明渠段共 6 个部分。溢流堰段下游设置一级消力池, 之后采用弯道衔接泄槽, 弯道段的转弯半径较小、转角较大, 达 43°, 弯道前后过渡段距离短且纵坡较大, 弯道后接台阶式陡槽及二级消力池, 总水头落差达 61m, 而下游河道的抗冲流速较低, 因此溢洪道弯道水流、台阶及消力池组合消能及下游河道消能防冲问题均十分突出。

二、弯曲陡槽段试验优化

1. 设计初拟方案弯曲陡槽段试验成果

设计初拟方案如下:

(1) 进口水口段

开敞式溢洪道进口明渠宽 88.68m, 长 16.70m, 底板高程 100.00m, 喇叭口段长 21m, 宽度 88.68~68.40m。

(2) 溢流堰段

溢洪道堰顶高程 103.70m, 总长度 15.0m。溢流堰为 WES 曲线, 其顶部上游段为三圆弧, 下部接有幂曲线, 后部接 1:1 直线及反弧半径 5m 圆弧段, 圆弧段末端高程 95.633m。

(3) 一级消力池

溢流堰底部反弧末端与一级消力池连接, 池长 20m, 池宽由 66.0m 渐变为 37.6m; 消力池底板高程由 95.633m 降至 95.433m, 池底设 8 个 T 形消力墩, 末端池顶高程 98.0m。

(4) 泄槽段

泄槽水平总长度为 247.59m。泄槽分为两段, 断面均为底宽 37.6m, 两侧坡度 1:1.5 的梯形, 上段泄槽为立面坡度 1:13.5 的缓槽, 下段泄槽为立面坡度为 1:3.75 的陡槽。上段泄槽起始高程为 98.0m, 末端高程为 89.483m, 在一级消力池后水平转了 42° 53' 27", 平面转弯半径为 125.0m, 弯道沿半径方向布置 6 道右高左低的斜向消能坎, 高低坎右侧边墙处高为 2.2m, 左侧边墙处高度为 0m, 水平转弯后接长为 21.427m 的泄槽; 下段泄槽陡坡水平长度 132.59m, 起始高程为 89.483m, 末端高程为 54.126m。

(5) 二级消力池

二级消力池底板高程 54.126m。池长 42.0m, 宽 37.6m, 深 3.6m, 池内布置 8 个梯形消力墩。消力池末端墙顶高程 57.726m。

(6) 出水明渠段

二级消力池顶末端与砼梯形出水明渠相接, 明渠底宽 37.6m, 底坡 1:1,000, 侧墙坡度 1:1.5, 在明渠出口侧向接至白水河河床, 出口布置梯形块石防冲槽, 防冲槽下游为主河道。

溢洪道平面布置图见图 1, 纵断面图见图 2。

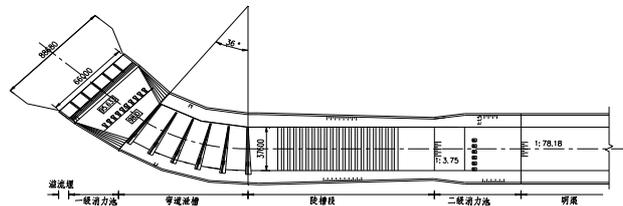


图 1 溢洪道平面布置图

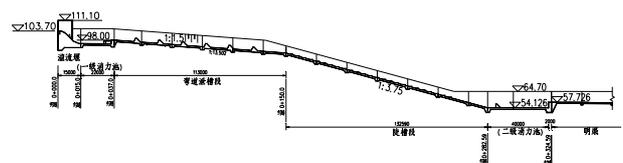


图 2 溢洪道纵断面图

收稿日期: 2022-03-19

作者简介: 史振华 (1984-), 女, 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 高级工程师, 硕士, 从事水利水电工程水工设计工作。

从原设计方案的模型试验结果来看，在各工况下，溢洪道进口引渠内表面流态基本对称，水流平稳。一级消力池内水跃形态基本对称，随着库水位增加，池内水流波动强度增强。水流进入转弯段后，由于受弯道离心力影响，水流偏向右侧，在连续高低坎作用下，右侧水面呈波状向下游行进，右侧水面高于左侧。水流进入台阶陡槽后，在起始位置右侧水深大于左侧水深，水流方向斜向由右侧向左侧流动。从台阶消能效果上看，在百年一遇水位泄洪时，台阶段水流流态基本处于滑流流态，没有出现明显的台阶掺气水流，消能效果较差，进入二级消力池前左侧水深大于右侧水深，进入二级消力池后，水流流态不对称，水跃发生在二级消力池池首位置消力墩上游侧，右侧跃头略靠上游，在池内右侧有一轻微顺时针的旋流。左侧水跃头位置略靠下游，跃后水流翻滚程度强于右侧。分析表明，受上游转弯段的影响，加上弯道内高低坎对水流的调整，在泄槽台阶段水流横向分配不均，下半段右侧单宽流量小于左侧，在能量分配及能量消耗上存在左右不均问题，因此造成二级消力池内的水流不对称，在百年一遇以上洪水时表现更加强烈。水流出二级消力池后有一明显的水力坡降，水流为急流流态，之后在进入防冲槽前形成波状水跃，波状水跃一直到防冲槽出口。

2. 试验优化

针对溢洪道设计体型转弯段及陡槽段存在水流流速分布不均及流态不对称问题，一方面从调整转弯段体型入手，使水流进入台阶之前的流速分布及流量分配尽量均匀，但考虑到斜向高低坎加 T 形消力墩的消能工体型相对复杂，取消一级消力池内的 T 形消力墩，简化一级消力池体型，并取消转弯段高低坎，采用中隔墙的方式来解决弯道水流问题；另一方面调整台阶体型及布置形式，改善台阶段消能效果。调整后布置见图 3。

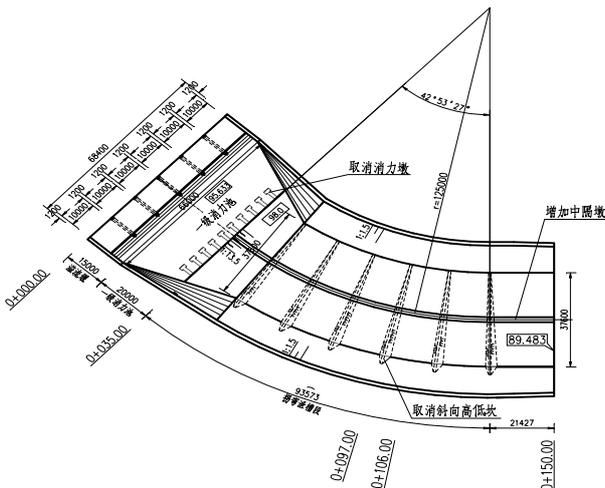


图 3 优化方案布置图

(1) 取消一级消力池内 T 形消力墩方案

在原设计方案基础上取消一级消力池内 T 形消力墩，在不同工况下观测消力池内水流流态，测量了一级消力池出口断面的流速分布。各试验工况下泄洪，一级消力池内水流流态与设置 T 形消力墩相比变化不大，取消 T 形消力墩后池内

仍能形成较稳定的水跃消能形态，池内水流基本对称，随着库水位增加，池内水流波动逐渐增强，由于受弯道高低坎的影响右侧水深略大于左侧，中部与左侧水深基本一致。弯道段、陡槽台阶段、二级消力池内水流流态与一级消力池内设置 T 形消力墩相比没有明显区别，故可以取消一级消力池的 T 形消力墩。

(2) 取消弯道高低坎方案

在原设计方案基础上取消弯道高低坎，观测了不同工况下泄槽水流流态，测量了弯道左右边墙水面线，及弯道进口断面及出口断面的流速分布。

水流进入弯道后，由于受弯道离心力作用，泄槽右岸水面线逐渐升高，大约在桩号 0+97 到 0+106 之间水面达最高，而后略有降低。左侧主水流约在桩号 0+67 位置与边墙发生分离，左侧边墙水深变化范围约为 1.0~0.2m，分离水流先流向右侧，受右侧边墙作用在桩号 0+97 到 0+106 之间从右岸转向左岸，在进入陡槽段前水流明显偏于断面右半侧泄槽。图 4 为 5000 年一遇洪水泄洪时转弯段水流流态照片，图 5 为不同工况下转弯段两侧边墙水面线分布图。由于弯道作用，转弯段水体集中在右侧，呈典型的弯道偏流形态。当水流进入陡槽台阶段时，水流也集中在右侧二分之一的区域，受右侧边墙作用，水流方向斜偏向左侧。



图 4 5000 年一遇洪水泄洪时转弯段水流流态

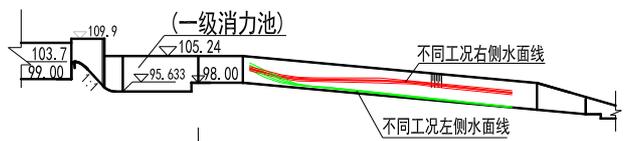


图 5 不同工况下转弯段两侧边墙水面线分布图（去掉 T 形墩及高低坎）

三、中隔墙加陡槽段台阶方案

取消原设计的高低坎和一级消力池 T 型墩，在一级消力池后的泄槽中心线设一宽度为 2.0m 的导墙，桩号 0+37m~0+119.047m 之间墙高为 5.0m，桩号 0+119.047~0+152.175 之间墙高由 5.0m 逐渐降低到 3.0m。导墙末端位置从泄槽中心线向右侧偏移 2.0m，向上游与导墙圆弧相切，切点桩号为 0+119.047m。陡槽段由不连续台阶调整为 1~8 级台阶高度 0.58m、长度为 2.18m，9~29 级台阶高度 1.16m、长度为 4.35m。

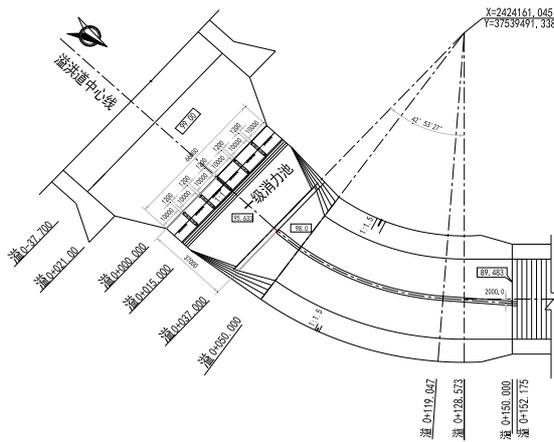


图 6 中隔墙方案溢洪道平面布置图

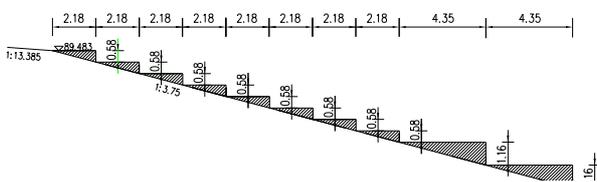


图 7 陡槽段阶梯体型图

1. 水流流态

弯道内水流流态平顺, 水流进入陡槽后, 导墙末端形成有效进气通道, 左、右泄槽内水流经过第一级台阶后在底部形成空腔, 从 20 年一遇到 5000 年一遇水位下均能形成稳定的掺气空腔, 在台阶内可以看到有明显的掺气。水流在陡槽起始段形成冲击波水流, 随着库水位升高, 冲击波水流逐渐增强, 经过约 40m 长台阶段的掺混调整后, 水流平顺进入二级消力池, 二级消力池内水流流态基本对称。



图 8 百年一遇工况下陡槽起始段水流流态照片



图 9 百年一遇工况下二级消力池水流流态照片

2. 断面流速

百年一遇工况下, 对一级消力池内桩号溢 0+25.000m 断面的流速分布进行了测量, 从一级消力池流速分布测量结

果可以看出, 两侧边孔流速较中间 4 孔流速大, 左 6 号孔比左 1 号孔中心线流速略大外, 中间 4 孔流速分布均匀一致, 两侧边孔中心线水深为 7.0m, 中间孔中心线水深约 6.5m, 说明一级消力池内水流流速分布基本均匀, 水流流态基本对称。水流出一级消力池后, 进入弯道左右泄槽的流速分布在不同水深大小基本一致, 流速分布基本对称。

20 年一遇洪水, 泄槽内水流平顺, 台阶消能形态较好, 一、二级消力池内水流流态基本对称。500 年一遇、5000 年一遇洪水, 一、二级消力池及泄槽内水流流态与 20 年一遇类似, 一、二级消力池内水流强度增强, 水流流态基本对称。

四、结论

比较泄槽弯道高低坎及导墙方案的体型优化试验结果, 从水流表面流态上来看, 导墙方案优于高低坎方案, 弯道及陡槽内水流表面平顺; 导墙方案水流进入二级消力池前断面的水量及流速分布更加均匀, 断面平均流速相对较小; 从二级消力池内水流流态上看, 两种方案池内流态均基本对称, 消力池长度满足消能要求。综合两种方案的试验结果, 导墙方案优于高低坎方案, 由于在桩号 0+050.00m 左侧边墙出现了扭曲面与弯道边墙之间的一个转折突变, 使水流出现分离并使水流更加偏向中导墙一侧, 加剧了弯道水流集中分布现象, 因此建议在扭曲面与弯道边墙衔接部位作圆滑过渡处理, 改善水流流态及水流分布均匀性。从水流流态上看, 弯道末端的水流相对平顺过渡到陡槽段, 有效减小水流沿边墙爬高。溢洪道消能组合体型调整试验表明一级消力池内去掉 T 形墩后对水跃消能效果无明显影响; 弯道单一横向坡方案不能很好解决弯道偏流问题; 取消陡槽台阶方案会明显增大二级消力池入池流速和消能负担。综合比较试验结果, 推荐一级消力池采用去掉 T 形墩的设计体型; 弯道采用导墙方案, 陡槽段采用外凸式连续阶梯消能方案, 1~8 级阶梯高度为 0.58m 的小阶梯, 9~29 级阶梯高度为 1.16m 的大阶梯; 二级消力池为池首设辅助消力墩 (原设计体型) 的布置型式。

参考文献

- [1] 史振华, 陈志伟等. 广东阳江抽水蓄能电站下水库溢洪道设计变更报告, 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 2019, 6.
- [2] 高建标, 章晋雄等. 广东阳江抽水蓄能电站下水库溢洪道水工模型试验研究, 中国水利水电科学研究院, 2017, 12.
- [3] 水工设计手册 (第 2 版). 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [4] DL/T 5166-2002, 溢洪道设计规范[S].
- [5] 夏淑容, 陈雨田. 凤升水库溢洪道工程优化设计[J]. 小水电, 2018 年第二期 (总第 200 期).
- [6] 黄智敏, 何小慧等. 陡槽溢洪道外凸式阶梯消能试验研究, [J]. 广东水利水电, 2007, (6): 1-4.
- [7] 黄智敏, 何小慧等. 阳江核电水库溢洪道阶梯消能计算和研究[J]. 广东水利水电, 2013, 8.
- [8] 曾衡. 某工程阶梯溢洪道优化试验研究[J]. 广东水利水电, 2012, 8.