

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.06.002

导流洞改建为跌流式竖井溢洪道的试验研究

孙双科¹,徐体兵¹,孙高升²,解卫东²

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100038;2.内蒙古水电勘测设计研究院,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要 结合某水电站导流洞改建永久性溢洪道试验,研究了跌流式竖井溢洪道的水力特性,并对消力井布置进行了优化研究。研究表明,该溢洪道自环形进水口以下采用突扩方式与竖井连接所形成的脱壁水流结构,与传统的贴壁式竖井的水流结构具有明显不同,不仅可以有效避免竖井段因水流流速较高可能造成的空化空蚀破坏,降低施工难度,而且有利于水舌掺气并促进消力井消能。该研究提出的消力井优化布置体型,与传统的布置形式相比具有更高的消能效率,消能效率可以达到 83% 以上。

关键词 跌流式竖井溢洪道 环形堰 消力井 消能效率 大石门水电站

中图分类号 :TV651.1+3 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)06-0005-04

Experimental study of drop shaft spillway reconstructed by diversion tunnel//SUN Shuang-ke¹, XU Ti-bing¹, SUN Gao-sheng², XIE Wei-dong² (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China ; 2. Inner Mongolia Hydroelectric Investigation Design and Research Institute, Huhehaote 010020, China)

Abstract : Combined with an experiment on reconstruction of the diversion tunnel as a permanent spillway in one hydropower project, the hydraulic characteristics of the drop shaft spillway were studied. The optimization of the layout of the stilling well was also studied. The results show that the sudden enlargement between the circular inlet and the shaft in this spillway is significantly different from the traditional face-stuck shaft. This can prevent cavitation of the vertical shaft by high-velocity flow, reducing the difficulty of construction. It is beneficial to the water jets aeration and promotes tenergy dissipation. The optimal layout of the constructed spillway has a higher energy consumption efficiency, reaching 83% .

Key words : drop shaft spillway ; circular inlet ; stilling well ; energy consumption efficiency ; Dashimen Hydropower Station

1 问题的提出

竖井式溢洪道具有体型简单、布置灵活、消能效率高等特点,通常较多运用于城市排洪系统,在水电工程中也有不少成功运用的实例。近年来,出于节省工程投资的需要,我国的一些大中型水电工程,如沙牌水电站、小湾水电站、溪洛渡水电站等都相继开展了将导流洞改建为永久性泄洪洞的相关研究工作,并都采用了竖井式溢洪道的布置形式(沙牌水电站竖井式溢洪道已建成并投入运行)^[1-3]。从竖井段的体型布置看,上述工程都采用了旋流竖井的布置方式,以提高消能效率。从水力学角度看,尽管旋转流动有利于避免负压出现,但由于水流流速很大,竖井段的空化空蚀问题依然较为突出。另外,高速旋转流动可能引起的结构振动也是需要关注的问题^[4]。

为避免上述问题的出现,笔者在大石门水电站导流洞改建为永久性泄洪洞的试验研究中,提出了

一种跌流式竖井溢洪道布置方式^[5],即在进水口下部采用突扩方式与竖井连接,从而形成脱壁流动结构,这样不仅可以完全避免高速水流对竖井段可能造成的空化空蚀,降低施工难度,而且有利于水舌掺气并促进消力井消能。从国内外工程运用情况看,这样的布置格局以往仅限于城市排洪工程^[6-7],工作水头与流量都比较小,设计与运行标准也不高,而在国内外水电工程中只有少量运用实例^[8]。因此,有必要通过水工模型试验,进一步研究其水力特性并进行布置体型的优化研究。

2 工程概况与跌流式竖井溢洪道布置

大石门水电站位于内蒙古西拉沐伦河干流上游,距赤峰市 300 km。工程建设开发的任务以发电和供水为主,兼顾旅游等综合利用。水电站大坝最大坝高为 63.78 m,总库容为 1.85 亿 m³,正常蓄水位为 1 072.00 m,电站装机容量为 6 000 kW。

作者简介 孙双科(1966—),男,河南南阳人,教授级高级工程师,博士,从事水工水力学研究。E-mail :Sunska@iwhr.com

枢纽主要建筑物包括沥青混凝土心墙堆石坝、发电引水隧洞及竖井式溢洪道。竖井式溢洪道是枢纽唯一的泄洪建筑物,位于左岸山体内,由导流洞改建而成,最大下泄流量为 $148\text{ m}^3/\text{s}$,由环形实用堰、竖井、消力井以及部分导流隧洞段组成,见图 1。

基本方案的细部设计如下:①环形实用堰采用无闸门控制方式,堰面设计采用的下堰面曲线方程如图 2 所示。其中, H_d 为定型水头,取 $H_d = 0.85H_{\max} = 1.19\text{ m}$;②自环形堰堰面曲线末端高程从 1065.76 m 开始至高程 1061.99 m ,采用沿程收缩的喇叭口布置体型,堰面坡度为 $3.033:1$ 。喇叭口直径由 6.384 m 缩至 3.900 m ;③在高程 1061.99 m 处,自由溢流式进水口以突扩方式与竖井连接,由 3.900 m 突扩至竖井直径 5.000 m ,之后进入竖井段;④沿环形溢流堰堰顶对称设置了 8 个直径为 0.450 m 的通气钢管,其上部穿越环形堰隔墩与大气相连,下部安装在竖井起始断面的突扩位置,向竖井供气;⑤竖井底部设消力井,其深度取 1 倍竖井直径,即 5.000 m ;⑥导流洞段隧洞断面为城门洞形,底宽 5.000 m ,直墙高 4.500 m ,圆拱半径 2.500 m ,底坡为 1% ,隧洞全长 175.000 m ;⑦下游出口段采用底流消能。

3 水流流态与消能效率

依据工程规模、特征水位条件等,在重力相似准则下进行模型设计,几何比尺采用 $\lambda = 20.83$ 。考虑

到自由溢流式环形实用堰独特的进流特性,专门制作了长 2.5 m 、宽 2.5 m 、高 1.5 m 的钢结构水箱,环形堰穿越水箱底部安装在水箱内。为确保来流条件的对称性与均匀性,在水箱的 4 个角部对称设置了 4 个供水口,供水口出口设置均流稳水滤网。

主要量测内容包括水位、流量、流速和压强等。流量采用定制的三角堰与平板堰测定,压强测量采用压电晶体式传感器与 DJ800 数据采集系统,流速测量采用 P-EMS 型高精度二维电磁流速仪。试验工况见表 1,下游水位按尾水位 ~ 流量关系进行控制。

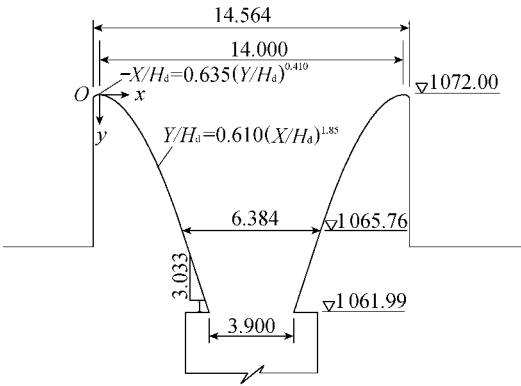


图 2 环形堰堰面曲线(单位:m)

表 1 试验研究工况

工况	洪水频率/%	上游水位/m	泄量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	下游水位/m
校核洪水	0.02	1073.46	148.00	1028.57
设计洪水	1	1072.75	51.90	1027.85

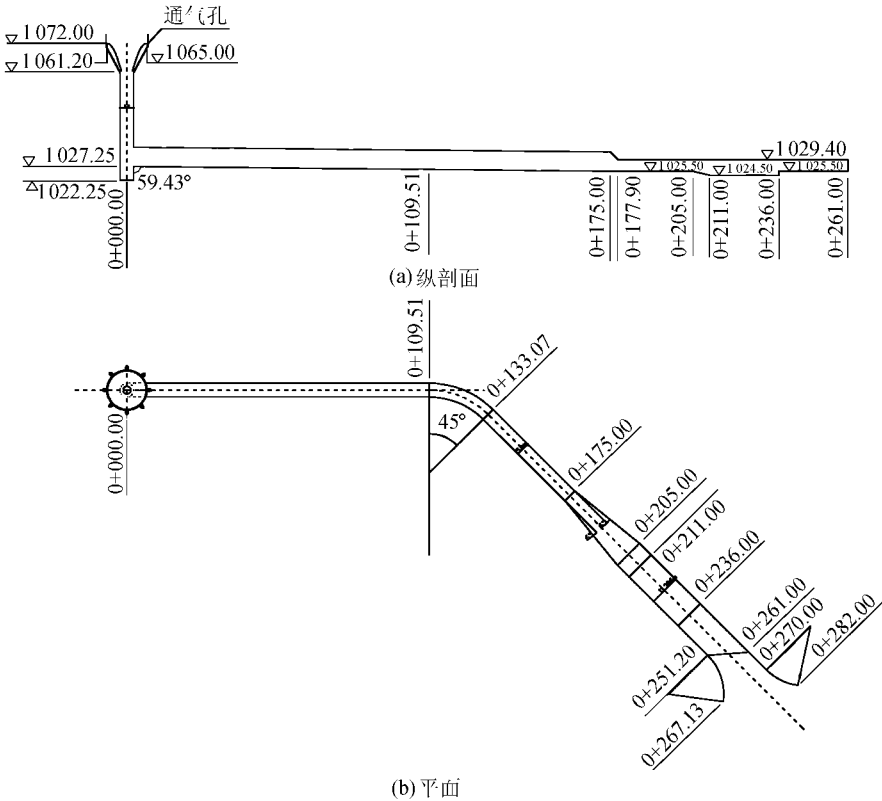


图 1 大石门水电站竖井式溢洪道布置示意图(单位:m)

试验表明,在上游水位 1 072.26 ~ 1 073.46 m 范围内,流量系数在 0.395 ~ 0.433 之间,在校核水位工况下竖井溢洪道的最大过流能力为 148 m³/s。

流态观察试验表明 环形溢流堰进流流态良好,在校核洪水位及各运行工况下均为自由堰流,未出现有压淹没流等不利流态,这表明环形溢流堰堰面曲线的选择是适当而合理的;在设计与校核洪水工况下,水流均呈脱壁流形式跌入消力井内,实测最大通气量达到 131.6 m³/s,该量值与竖井的下泄流量为同一数量级。水流跌入消力井后,形成强掺混、强紊动、强掺气的水流流态,从而消耗了大部分能量;水历经消力井消能后,以明流的形式进入隧洞段,在流动过程中伴随掺气水流的沿程逸气,水面线的轮廓开始逐步明朗化,水面波动也随之逐步降低。

竖井式泄洪洞的消能效率可以通过测量明流洞段控制断面的水深与断面平均流速,根据式(1)计算得到(在本研究中,以隧洞段出口 0 + 175.00 m 断面为流速测量断面,该断面底板高程为 1 025.50 m)。

$$\eta = 1 - \frac{h + \frac{\bar{v}^2}{2g}}{H_0 - 1\,025.50}$$

(1)

式中: h 为控制断面水深; $\bar{v}$ 为控制断面的平均流速; H_0 为上游水位。

实测结果表明,在设计洪水与校核洪水工况下,控制断面的水流平均流速分别为 8.21 m/s 与 12.36 m/s,对应的消能效率分别为 89.9% 与 78.7% (表 2)。从消能效率看,大石门竖井溢洪道采用的基本方案是令人满意的。

表 2 竖井溢洪道的消能效率

工况	H_0/m	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h/m	$\eta/\%$
设计洪水	1 072.75	8.21	1.26	89.9
校核洪水	1 073.46	12.36	2.39	78.7

4 消力井深度的优化研究

对大石门竖井式溢洪道而言,由于采用的是脱壁流布置形式,消力井是最主要的消能载体。从消力井消能的水力特性看,在一定范围内,随消力井深度的增加,消能效率会提高,但当消力井深度达到一定量值后,消力井的消能效率将基本上维持为一个定值,在此情况下进一步加大消力井深度只能导致工程投资增加,无助于提高竖井溢洪道的消能效率。

消力井井深的合理选定,不仅要看竖井溢洪道总的消能效率,还要看消力井底板的压强分布。如果消力井深度过浅,消力井底板将承受较大的水舌冲击压强与脉动荷载,自身安全将难以保证。另一方面,消力井深度也无需过大,否则会增加施工难度

与工程投资。

本研究进行了消力井井深为 1.0D,1.5D,2.0D 共 3 个方案的试验对比(D 为竖井直径,5 m),结果表明 对应于消力井深度 1.0D,1.5D,2.0D,设计洪水工况下消能效率分别为 89.9%,89.9%,89.5%;而在校核洪水工况下,相应的消能效率分别为 78.7%,78.7%,78.2%。可见,在本文的研究范围内,对应于不同的消力井井深,竖井溢洪道总的消能效率没有本质的差异,在设计与校核洪水工况下,消能效率分别为 90% 左右与 78% 左右。

为定量观测竖井内脱壁的环状跌流对消力井底板的冲击压强,沿消力井底板布置了 13 支压强传感器,量测了时均压强与脉动压强的分布情况。测点布置见图 3。

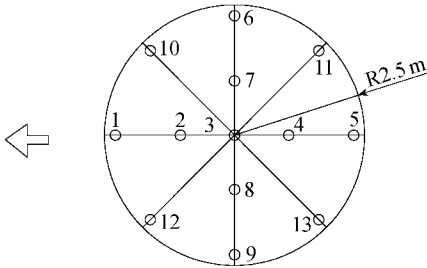


图 3 消力井底板压强测点布置

表 3 列出了不同井深情况下消力井底板时均压强与脉动压强的最大值。表 3 结果表明,对应于不同消力井井深,底板时均压强最大值随井深增加而增大,而各体型之间最大时均压强的差值基本上与消力井井深的差值相当,进一步表明在 3 种消力井井深条件下,消力井底板承受的最大冲击压强基本相同。

表 3 不同井深情况下消力井底板压强最大值

消力井深度	时均压强最大值		脉动压强均方根最大值	
	测点	测值/kPa	测点	测值/kPa
1.0D	1	237.61	1	33.33
1.5D	5	254.66	1	30.57
2.0D	11	278.09	1	31.74

综上所述,从消能效率与底板最大冲击压强看,大石门水电站竖井式溢洪道工程的消力井井深取 1.0D 已能满足要求。这一结果与文献[9]的研究结果一致。鉴于竖井溢洪道是大石门水电站唯一的泄水建筑物,且消力井几何尺度不大,为慎重起见,最终采用了 1.5D 的消力井井深方案,这样也有利于防止初始运行过程中当消力井内水垫深度有限时出现跌落水流对消力井底板冲击压强过大的问题。

5 消力井布置体型的调整

试验研究表明,消力井与隧洞段衔接部位水流流态较为复杂,尤其是隧洞段底板起始部位容易受

跌落水舌的直接冲击,为此进行了如下调整:底板的平面布置由原设计的圆形改进为半圆形(直径仍为5 m)与5 m×5 m平面的组合,而在消力井与导流洞底板衔接处采用半径为1 m的圆弧进行圆化处理,消力井深度仍维持7.5 m不变。消力井调整前后的横截面的体型布置见图3、图4。消力井调整后的优点如下:①简化了消力井与导流洞底板交汇处的施工复杂性;②由于消力井在平面上向下游有所扩大,从而避免了跌落水流对衔接段导流洞底板的直接冲击;③由于消能体积增大,有利于进一步提高消力井的消能效率。试验表明,进行上述优化后,无论是设计洪水工况还是校核洪水工况,隧洞段出口断面的水流流速均得到进一步降低,设计与校核洪水工况下泄洪洞的总消能效率分别由原来的89.9%和78.7%(1.5D方案)提高至91.6%和83.1%(表4)。该结果表明消力井断面扩大后,消能效果得到了进一步提高。

表4 优化方案的消能效率

工况	H_0/m	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h/m	$\eta/\%$
设计洪水	1072.75	6.993	1.48	91.6
校核洪水	1073.46	10.242	2.89	83.1

为定量观测竖井内脱壁的环状跌流对消力井底板的冲击压强,沿消力井底板布置了31支压强传感器,量测时均压强与脉动压强的分布情况。测点布置见图4。试验结果(表5)表明,消力井体型调整后,底板时均压强与脉动压强均有所降低。

表5 优化方案消力井底板压强最大值的变化

体型	时均压强最大值		脉动压强均方根最大值	
	测点	测值/kPa	测点	测值/kPa
修改前	5	254.66	1	30.57
修改后	28	239.76	6	29.09

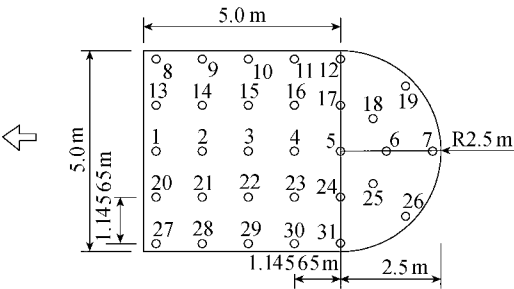


图4 调整方案消力井底板压强测点布置

综上所述,对消力井布置体型进行调整,不仅有利于提高竖井溢洪道总的消能效率,而且有助于改善底板压强分布。

6 结 语

笔者结合工程实例,研究了竖井式溢洪道竖井段与消力井的布置体型。研究结果表明,自环形进

水口以下采用突扩方式与竖井连接所形成的脱壁水流结构,不仅可以有效避免竖井段可能产生的空化空蚀破坏,降低施工难度,而且有利于水舌掺气并促进消力井消能,消能效率可以达到83%以上。

参考文献:

[1] 董兴林,郭军,杨开林,等.旋流式泄洪洞的特点及其运行可靠性分析[J].水力发电,2003,29(4):33-35.
[2] 邵敬东.旋流式竖井泄洪洞在沙牌工程中的应用[J].水电站设计,2003,19(4):61-68.
[3] 孙双科,刘之平,周胜.下游高水位条件下导流洞改建为旋流竖井式泄洪洞的水力学问题研究[J].水利学报,2000(10):22-27.
[4] 郑林平,李岳军.水工隧洞内消能工的研究及应用进展[J].水力发电,2006,32(9):81-83.
[5] 孙双科.大石门水电站竖井溢洪道水工模型试验研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2008.
[6] RAJARATNAM N,JOHNSTON G A,BARBER M A. Energy dissipation by jet diffusion in stormwater drop shafts[J]. Can J Civ Eng,1993,20:374-379.
[7] AJARATNAM N R,MAINALI A,HSUNG C Y. Observations on flow in vertical drop shafts in urban drainage systems[J]. Journal of Environmental Engineering,1997,123(5):486-491.
[8] 郭雷,张宗孝,马斌,等.竖井泄洪洞水力特性试验研究[J].人民长江,2007,38(6):110-112.
[9] 赵灿华,孙双科,刘之平.旋流式竖井泄洪洞消力井并深优化研究[J].水力发电,2001,27(5):30-33.

(收稿日期:2009-04-16 编辑:高建群)

·简讯·

“第一届全国高坝安全学术会议”将在南京召开

我国是世界上修建高坝最多的国家。由于高坝大多建在我国西部,坝址地区地形地质条件复杂、环境恶劣、地震烈度高,以及勘测、设计、施工和管理中存在的问题,高坝安全越来越成为人们关注的问题。由中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会主办、河海大学承办的“第一届全国高坝安全学术会议”将于2010年6月在南京召开。本次会议的主题是“高拱坝设计、施工和运行中的重大工程技术问题”。会议将就高拱坝坝址地质勘探与试验,高拱坝设计与分析,施工技术、基础处理,高拱坝的安全监测、运行管理等专题,结合国内外近年来的发展和研究工作开展广泛的学术交流。会议将就以下专题进行交流和研讨:①高拱坝的枢纽布置和坝工设计;②高拱坝设计分析新理论和新方法;③高拱坝基础处理的原则和方案优化,坝基处理的技术、工艺和设备;④高拱坝的泄洪消能;⑤高拱坝施工新技术和新工艺;⑥高拱坝的失效风险对策和安全评估;⑦大坝的运行监测,大体积混凝土损伤检测与大坝修复;⑧高拱坝的环境效应。(本刊编辑部供稿)