

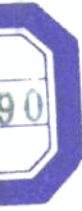


泄水工程 与高速水流

水利水电泄水工程与高速水流信息网
东北勘测设计研究院水利科学研究院 编

1998年版

XIESHUIGONGCHENG
YU GAOSUSHUILIU



吉林科学技术出版社

编 者 的 话

全国水利水电泄水工程与高速水流信息网网刊《泄水工程与高速水流》做为内部期刊,按国家出版署的文件精神,1998年起暂时停刊,为不影响泄水工程水力学学科的发展,继续及时地交流该领域的最新成果,在网刊正式期刊号批准之前,本网将以文集的形式,函盖网刊的全部内容,并增加篇幅和新的栏目,每年出版一集,正式期刊号批准后,再以期刊的形式与广大读者见面。

4年一次的全网性的活动,第五届全网大会定于1998年10月25日在珠海召开,《泄水工程与高速水流(1998年版)》做为第五届全网大会论文专辑将于9月1日正式出版,文集中收集了第四届全网大会以来最新的研究成果85篇,经审编组专家审查并做了适当的删改,按国家编辑出版标准编辑,按专题分类刊出。

全书共448页,计70万字,共分12个专题:

一、枢纽布置与体型研究(10篇),二、泄洪消能与雾化(13篇),三、空化、空蚀及其防护(6篇),四、脉动与振动(4篇),五、导流与截流(5篇)六、闸门与船闸(12篇),七、水力计算与数学模型(9篇),八、泥沙及其防护(6篇),九、设计与施工(5篇),十、原型观测(4篇),十一、其它(7篇),十二、讨论(4篇)。

该书内容广泛,可供水利水电设计、科研、施工、运行及相关专业的科技人员及大专院校师生参考。该书的出版将有助于优化工程设计、解决实际工程问题,也将有助于提高科技人员的素质,有助于推动工程水力学学科的发展。

《泄水工程与高速水流(1998年版)》由全国水利水电泄水工程与高速水流信息网、东北勘测设计研究院水利科学研究院组编,受全网大会会期的限制,该书的编辑出版周期短、工作量大,加之水平所限,错、漏之处在所难免,请作者、读者批评指正。

编者 1998年8月

泄水工程与高速水流

目 录

一、泄洪布置与体型研究

1. 弯道水流及边界处理实践 张 堡(1)
2. 江垭水库溢流坝的几个水力学问题 艾克明(8)
3. 进水口漩涡问题的探讨 夏毓常(16)
4. 李家河水库双曲拱坝的水力学问题 罗国杰、邵力群、杨维九等(22)
5. 阶梯溢流坝滑移流水力特性初步研究 周 辉、吴时强、姜树海(25)
6. 阶梯溢流面的几个水力学问题 杨 敏、滕显华、任红亮(29)
7. 三峡水利枢纽左排漂孔出口体型研究 陈 建(33)
8. 小浪底水利枢纽溢洪道的水力特性 张连合(37)
9. 曲线型低堰(设有鼻坎)水流衔接特性 王庆宜、左敦厚、王久晟(42)
10. 满拉侧堰泄洪洞的试验研究 韩 爽、胡小林、于 霞(47)

二、消能防冲、雾化

1. 黑河金盆水利枢纽的泄洪消能问题 张志恒(52)
2. 涡旋内消能竖井泄洪洞的研究 钱莺莺、姜树海、王正泉等(54)
3. 稿树下水库溢洪道消能工的选择 赖翼峰、孙永和、陈灿辉(61)
4. 水布垭溢洪道一级挑流消能试验研究 高义生、陈 俊、曾 泳(65)
5. 洞坪枢纽工程水力学问题的试验研究 魏传森、熊卫红(71)
6. 三峡枢纽溢流坝下游回流冲刷防治措施的研究 陈红霞、王才欢(73)
7. 分流墩—消力墩—消能池在工程中的应用 花立峰、卢 军、寿伟冈(77)
8. 古洞口水利枢纽泄洪消能试验研究 田士豪(80)
9. 挑流消能溅水范围和强度分布的探讨 邹敬民、于淑彦、刘万海(84)
10. 引水工程竖井段模型试验研究 李善岩、滕淑兰(87)
11. 冲沙泄洪底孔出口消能工的优化研究 许巧英(91)
12. 高岭头拱坝滑雪道式对冲消能的研究 陈 雪、卞祖铭(94)
13. 泄水工程消能方式综述 周名德(99)

三、空化、空蚀、掺气减蚀

1. 凌津滩水电站泄洪闸空化试验研究 陈 霞、李忠义(104)
2. 超高速水流试验装置及试验成果 张绍春、栗国忱、白绍学(110)
3. 三峡深孔突扩掺气体型模型比尺效应探讨 周 赤、何 勇、朱世洪等(114)
4. 三峡电站排沙孔闸门区水力特性研究 王才欢、邓 浩、曾 祥(118)
5. 小浪底溢洪道掺气减蚀设施的优化设计 何 冰、李振连、潘晓红等(122)
6. 柘溪大坝溢流段闸后水流水力特性及减蚀措施探讨 周祖俊、刘士和(126)

四、脉动、振动

1. 泄水结构振动振源分析 阎诗武(131)
2. 流激闸门振动及动态优化设计 严根华、阎诗武(142)
3. 密云第二溢洪道弧门水流激振特性检测分析 才君眉、张文翠、冯金铭(150)
4. 洞中水跃脉动压力特性的试验研究 吴桢祥、刘国昌、吴 胜(156)

五、导流、截流

1. 三峡工程大江深水截流技术研究与实施 刘乃义(161)
2. 大朝山水电站土石过水围堰模型试验研究 胡去劣、俞 波、耿 雷(169)
3. 三峡工程截流平抛垫底料流失成因初探 周厚贵(176)
4. 观音阁水库施工导、截流试验研究 阎铁奎、张 勤、郝忠志等(180)
5. 水布垭施工导流设计与试验概况 张声鸣、金宝芬(183)

六、船闸水力学、闸门水力学

1. 卷扬式垂直升船机整机模型试验研究 包纲鉴、陈锦珍(189)
2. 二滩水电站中孔弧门水封试验研究 王河生(198)
3. 升船机承船厢内水体动力特性的研究 朱仁庆、彭兴宁、吴有生等(205)
4. 二滩水电站底孔事故闸门水封试验研究 王河生、李定方(209)
5. 三峡船闸阀门段通气防护措施研究 胡亚安、张瑞凯、凌国增等(216)
6. 三峡永久船闸阀门段廊道体型水力特性研究 李 云、陈泰春、张瑞凯等(220)
7. 三峡船闸阀门段动水压力特性 苏有为、严秀俊、凌国增等(225)
8. 三峡船闸输水阀门试验设备的设计与研制 张瑞凯、胡亚安、苏有为等(231)
9. 浑水条件下偏心铰弧形闸门的空化问题 王河生、柴恭纯(237)
10. 飞来峡水利枢纽通航问题试验研究 韩昌海、骆小筑、王溥文(245)
11. 长洲水利枢纽施工通航水力学研究 徐伟章(250)
12. 三峡电站扩机增容日调节对通航的影响及优化 郭红民、董红燕(254)

七、水力计算、数值计算

1. 湍流雷诺应力的本构关系 梁在潮(262)
2. 大朝山水电站排砂底孔三维数值模拟计算 吴时强、丁道扬、雷兴顺(269)
3. 大朝山尾水调压室断面稳定性的计算分析 郑大琼、王念慎(277)
4. 抽水蓄能电站侧式取水口防涡临界淹没深度的探讨 袁雄汉、丁晓渔、张桂芬(282)
5. 高坝下游水垫塘消能机理及水力设计方法 刘沛清(287)
6. 长距离多建筑物调水工程非恒定流的数值模拟 唐春玲、贾丽芳、孙颖等(293)
7. 运用随机微分方程计算和分析河道行洪水面线 姜树海、马萍章(298)
8. 黑泉水利枢纽工程坝区三维渗流计算 彭 宇、李志群、魏李等(304)
9. 数值模拟在水动力学问题研究中的应用 丁晓渔、胡苏萍、于 霞(309)

八、泥沙与磨蚀

1. 天生桥水电站取水防沙试验研究 高云峰、刘重辰(317)
2. 三峡导流底孔防泥沙磨损设计 廖仁强(320)
3. 河床式水电站冲沙底孔排沙效果试验研究 王溥文、韩昌海(323)
4. 大凌河阎王鼻子与白石水库坝区段泥沙试验研究 苑润保、金宝琛、巩宪春等(328)
5. 长甸水电站引渠泥沙整治试验研究 巩宪春、苑润保、朱新华等(333)
6. 阜新引白水源工程泥沙处理 金宝琛、尚信宽、林聪俐(337)

九、工程设计与施工

1. 座落在弯道上的小南海水溢洪道 李凤梅(340)
2. 观音阁碾压混凝土坝底孔设计的有关问题 刘宇聪、黄志良、姜尚方等(345)
3. 莲花水电站溢洪道布置设计 舒 征、苏加林、刘万海(348)
4. 重力拱坝坝面溢流消能防冲的设计与研究 向 桐、于立新、侯佩瑾等(352)
5. 黄河小浪底工程进水塔群布置及设计 申相水、杨巧玲(357)

十、原型观测

1. 东江水电站二级放空洞掺气减蚀原型观测研究 王善达(362)
2. 小浪底泄洪洞多级孔板消能碧口中间试验研究 李振连、何 冰(375)
3. 高坝泄洪雾化原观及其灾害防治 陈惠玲、周 辉、吴福生等(381)
4. 隔河岩水利枢纽泄水建筑物水力学原型观测 汪世鹏、陈元清、宁廷俊(388)

十一、其它

1. 同位素技术在高速水流问题研究中的应用 曹更新、程和森、魏明成(394)
2. 南水北调中线工程淇河渠倒虹的几个水力学问题 吴祯祥、刘国昌、谭兴华等(402)
3. 荒沟抽水蓄能电站上池侧式进/出口水力学试验研究 邹敬民、高树华、李宝红等(407)
4. 水压控制爆破在涵闸拆除中的应用 张连合(410)
5. 石佛寺水库泄洪闸试验研究 张 勤、闫铁奎、张志慧(414)
6. 闸堤枢纽与闸桥枢纽水力特性的试验研究 虞邦义、李 燕、王久晟等(416)
7. 热电厂水泵房前水力流道试验研究 吴福生、应新亚、钱炳发(420)

十二、讨论

1. 水工建筑物的空蚀、磨蚀与其相对平衡问题 蔡为武(424)
2. 混凝土坝施工期坝体过水时的安全分析 黄国强(429)
3. 应加强三峡工程对葛洲坝枢纽下游航道及港口影响的研究 常 勤(432)
4. 三峡永久船闸几个水力学问题的研究 陈泰春(435)

弯道水流及边界处理实践

张 堡

(云南省水利水电科学研究所 昆明 650031)

【摘 要】 通过几个较典型的实际水工模型试验研究及原型观测,结合地形狭窄等特点,提出了解决弯道体形设计的几种方法和对它们的评价及适应范围。

【关键词】 开敞式溢洪道 无压隧洞 弯道水流 (水力特性)

明渠弯道的流态及水力特性较差,存在冲击波及横向水面超高等水流现象,需要加高边墙或采用特殊体形等一定的措施。通过小官村水库、东风水库、金殿水库等泄水建筑物的水工模型试验和原形观测,对明渠弯道的水流特性作了详细的观测分析和研究,并对实际边界问题提出解决方法。

1 明渠弯道水流的特性

1.1 小官村水库溢洪道^[注1]

小官村水库位于红河流域上游象鼻河上,总库容 1035 万 m^3 ,溢洪道设于大坝左肩,为河岸开敞式溢洪道,宽度 4m,全长约 130m,校核洪水泄流量 $97m^3/s$ 。小官村水库溢洪道的布置及体形受到地质、地形等工程环境的影响,泄槽段轴线在平面上有转折,采用圆弧弯道。按照设计在里程 32.72m 处右转弯,转角 145.5° ,弯道半径 20m,底坡为 1/50 或 1/20。

1.1.1 溢洪道原设计中的问题

溢洪道泄槽弯道为半径 20m 的方案经计算已不符要求,采用半径 50m 进行试验,坡降采用 1/50 和 1/20 进行比较,泄槽断面为简单矩形(体形 I)。水面线测试结果见表 1、2,冲击波流态见图 1。分析试验结果可知:

(1)泄槽弯道上水流发生三次冲击波,因第三波已进入 1/4 的陡坡段,第四波已不太明

显,但对下游流态有影响。

(2)冲击波的着墙点即最高水位点,断面的另一侧即出现最低水位点,横向超高 Δy 最大值发生在第一波的着墙点断面上,实测值为 1.25m。

(3)在小流量泄水时,冲击波依然存在,形态基本不变,幅度减小。

(4)底坡为 1/50(表 2),冲击波的形态及位置不变,幅度减小;冲击波对下游的干扰也减弱。

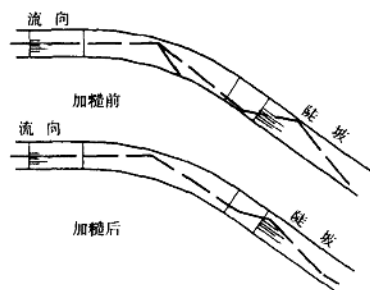


图 1 小官村水库弯道水流冲击波形态

1.1.2 为降低流速,进一步对两种底坡都进行边界加糙处理,泄槽断面仍为简单矩形(体形 II),实测结果见表 1。改变后的水流特点, Δy 最大值仍发生在第一波的着墙点断面上,比未加糙时有所减小(坡度陡的泄槽效果明显);从小流量到校核洪水,水流平稳,对下游干扰减弱,简化了对下游的边界要求。

作者简介:张堡,男,1943年11月生,高级工程师,从事水工水力学试验研究

收稿日期:1998-07-15

〔注1〕 小官村水库溢洪道水工模型试验报告,云南省水科所,1997

表1 小官村溢洪道($i = 1/20$)水力因素

工 况	断面部位	里程	105m ³ /s			70.0m ³ /s			44.5m ³ /s		
			h	y_0	v	h	y_0	v	h	y_0	v
未 加 糙	4堰底	7.33	2.63	0.00	9.98	1.80	0.00	9.72	1.03	0.00	10.8
	弯道起	17.00	2.55	-0.22	10.30	1.90	-0.27	9.21	1.18	-0.18	9.43
	弯 道	20.00	2.50	-0.11	10.50	1.82	-0.12	9.69	1.13	-0.10	9.85
	5弯 道	23.00	2.38	0.25	11.00	1.81	0.37	9.67	1.13	0.17	9.87
	弯 道	26.00	2.43	0.63	10.80	1.80	0.70	9.71	1.15	0.42	9.67
	弯 道	29.00	2.53	0.90	10.40	1.88	0.95	9.31	1.08	0.55	10.30
	6弯道中	32.32	2.43	1.25	10.80	1.94	1.07	9.02	1.20	0.73	9.27
	弯 道	35.32	2.33	1.15	11.30	1.80	0.90	9.73	1.18	0.72	9.43
	弯 道	38.32	2.25	0.98	11.70	1.68	0.72	10.40	1.15	0.58	9.68
	8弯 道	41.63	2.60	0.13	10.10	2.13	0.06	8.22	1.33	0.10	8.36
加 糙	弯 道	44.63	2.45	0.05	10.70	2.03	0.03	8.62	1.42	-0.08	7.63
	弯道尾	47.63	2.36	0.13	11.10	1.87	0.20	9.28	1.28	0.12	8.69
	10直段中	49.63	2.26	0.13	11.60	1.73	0.33	10.10	1.18	0.14	9.46
	陡槽中	55.63	2.02	0.33	12.90	1.74	0.18	10.10	1.07	0.11	10.40
	4堰底	7.33	2.73	0.00	9.82	1.83	0.00	9.56	1.27	0.00	8.76
	弯道起	17.00	2.83	-0.34	9.28	1.67	0.07	10.50	1.60	0.13	6.95
	弯 道	20.00	2.77	-0.03	9.48	1.83	0.11	9.56	1.61	0.00	6.89
	5弯 道	23.00	2.50	0.11	10.50	2.01	0.23	8.71	1.65	0.25	6.74
	弯 道	26.00	2.75	0.70	9.55	2.03	0.44	8.62	1.61	0.33	6.88
	弯 道	29.00	2.87	0.87	9.15	2.05	0.45	8.54	1.62	0.35	6.87
加 糙	6弯道中	32.32	2.97	0.97	8.84	2.01	0.50	8.73	1.95	0.35	5.71
	弯 道	35.32	2.95	0.87	8.90	2.08	0.49	8.41	1.93	0.33	5.76
	弯 道	38.32	2.93	0.63	8.96	2.12	0.28	8.25	1.92	0.22	5.79
	8弯 道	41.63	2.93	0.00	8.96	2.13	0.18	8.21	1.97	0.17	5.65
	弯 道	44.63	2.83	0.10	9.28	2.33	0.40	7.51	1.98	0.31	5.62
	弯道尾	47.63	3.03	0.33	8.97	2.23	0.51	7.85	1.93	0.36	5.76
	10直段中	49.63	2.91	0.60	8.72	2.00	0.42	8.75	1.75	0.32	6.36
	陡槽起	55.63	2.51	0.57	10.50	1.72	-0.03	10.20	1.45	0.02	7.67

注:表中 h —水深(m); $y_0 = \Delta y$ —水面横向超高(m),即外墙水面高于中心线水面的高度; v —流速(m/s)。

1.1.3 为验证原设计中泄槽弯道加隔墙的效果,坡降采用 1/20,从弯道段起(里程 17m)到陡槽段(里程 55.63m)加二道隔墙,将泄槽等分为左、中、右三条水道,泄槽断面已经成为窄深式(体形Ⅲ)。分析泄槽水面线测试结果(表 3)可知,左边水道(凹岸)水深较小,流态也较平稳;中间水道水深增大,有明显冲击波,流态略差;右边水道(凸岸)水深最大,流态恶化,有较强烈的冲击波,横向超高较大($\Delta y = 0.56\text{m}$)。进入陡槽的水流虽无明显的有界线

的冲击波,但流态较差,直到扩散段都有横向超高。

1.2 金殿水库泄水洞^{〔注2〕}

金殿水库总库容 236 万 m³,泄水隧洞位于左岸,该隧洞用于排除库内排水廊道的地下渗水,日常作为水库向世博会供水的输水通道,汛期与溢洪道共同承担水库泄洪任务。隧洞全长 271m,工作闸门后泄水隧洞门为无压洞,断面为(宽×高)1.8m×2m,城门洞形,无压段长 229m。在闸后 68.89m 处为一个右弯道,转角 54.73°,弯道半径 40m,整个无压洞底坡为 0.0168。

1.2.1 弯道问题

泄水洞的断面体形亦为简单矩形(体形Ⅰ),该弯道的理论横向超高 $\Delta y = 0.12\text{m}$, $\Delta y_{\text{最大}} = 0.29\text{m}$,测试结果见表 4,显然超过理论值,且超过准则。弯道内基本形成六个冲击波,冲击波的大小、形态与来流有关,即随上游水位和闸门开度有关,立波较

明显的冲击波横向超高也较大,主要在第 1、第 4(或第 5)二个冲击波的着墙点。出弯道后受末尾冲击波影响,尚有 2~3 个不太明显的小冲击波在水槽回荡,弯道后 20m 即消失(图 2)。



图2 金殿水库弯道水流冲击波形态

〔注2〕 金殿水库泄水洞水工模型试验报告,云南省水利所,1997

表2 小官村溢洪道($i = 1/50$)水力因素

工 况	断面部位	里程	101m ³ /s			71.6m ³ /s			44.5m ³ /s		
			h	y_0	v	h	y_0	v	h	y_0	v
未 加 糙	4堰底	7.33	2.62	0.00	9.63	1.74	0.00	10.30	1.00	0.00	10.10
	弯道起	17.00	2.57	-0.17	9.82	1.88	0.24	9.52	1.17	0.14	9.50
	弯 道	20.00	2.53	-0.08	9.98	1.93	0.24	9.27	1.28	0.09	8.68
	5弯 道	23.00	2.44	0.16	10.40	1.89	0.30	9.47	1.23	0.13	9.03
	弯 道	26.00	2.36	0.51	10.70	1.78	0.42	10.10	1.18	0.29	9.42
	弯 道	29.00	2.30	0.82	11.00	1.70	0.59	10.50	1.24	0.44	8.96
	6弯道中	32.32	2.31	0.83	10.90	1.73	1.73	10.40	1.38	0.69	8.05
	弯 道	35.32	2.50	0.73	10.10	1.89	0.69	9.47	1.40	0.67	7.94
	弯 道	38.32	2.58	0.50	9.78	1.98	0.52	9.04	1.28	0.45	8.68
	8弯 道	41.63	2.54	0.19	9.94	1.90	0.29	9.42	1.20	0.27	9.26
加 糙	弯 道	44.63	2.47	0.19	10.20	1.87	0.22	9.57	1.27	0.14	8.75
	弯道尾	47.63	2.47	0.21	10.20	1.83	0.23	9.78	1.37	0.17	8.11
	10直段中	49.63	2.38	0.33	10.60	1.77	0.24	10.10	1.35	0.12	8.23
	陡槽中	55.63	2.34	0.24	10.80	1.69	0.18	10.60	1.18	0.08	9.42
	4堰底	7.33	2.53	0.00	9.98	1.73	0.00	10.40	1.27	0.00	9.09
	弯道起	17.00	2.55	-0.12	9.90	2.01	0.07	8.95	1.47	0.00	7.86
	弯 道	20.00	2.63	-0.04	9.60	2.10	0.07	8.52	1.55	0.05	7.45
	5弯 道	23.00	2.65	0.38	9.53	2.20	0.07	8.14	1.50	0.11	7.70
	弯 道	26.00	2.87	0.80	8.80	2.05	0.32	8.43	1.58	0.31	7.31
	弯 道	29.00	3.10	0.82	8.14	2.33	0.62	7.68	1.67	0.42	6.92
未 加 糙	6弯道中	32.32	3.22	0.61	7.84	2.53	0.41	7.08	1.95	0.45	5.92
	弯 道	35.32	3.17	0.36	7.96	2.45	0.25	7.31	1.94	0.34	5.95
	弯 道	38.32	3.18	0.25	7.94	2.50	0.11	7.16	1.90	0.17	6.08
	8弯 道	41.63	3.12	0.09	8.09	2.63	0.17	6.81	2.24	0.24	5.16
	弯 道	44.63	3.22	0.19	7.84	2.70	0.43	6.63	2.21	0.27	5.25
	弯道尾	47.63	3.17	0.54	7.96	2.70	0.30	6.63	2.00	0.27	5.78
	10直段中	49.63	3.00	0.50	8.41	2.37	0.27	7.55	1.78	0.19	6.49
	陡槽起	55.63	2.48	0.09	10.20	1.95	-0.21	9.18	1.37	-0.03	8.43

1.2.2 改变底坡的影响

将底坡作小量调整,改为 $i = 0.0133$,流速略有降低,但 Δy 无明显变化,甚至有所增加但向上游集中(资料略)。

1.2.3 降低能头的影响

金殿水库泄水洞在研究消能方案时,将消能工设于工作闸前的压力段,使得出闸水流的能头极低(表4),结果表明:

(1)出闸水流由 $Fr = 1$ 的临界流逐渐加速为 $Fr = 2$ 的急流。受弯道的阻力作用,水流在接近弯道时发生一个平稳的弱水跃,在弯道段形成缓流, $Fr = 0.5$ 。过了弯道后又开始逐渐加速,在顺直段形成 $Fr = 2$ 的急流。

(2)在弯道段,流速小、水深大, $Fr = 0.5$,水流平静,无横向超高,流态很好。

(3)孔板消能效率高,压力段的流态平稳,无振动现象。整个隧洞的流态都是良好的,显然可以确认该整体布置是合理的。

1.3 东风水库溢洪道原型弯道问题

东风水库总库容 8900 万 m³,溢洪道位于大坝左肩,长 440m,宽 8m,开敞式永久性建筑物,按 500 年一遇洪水设计,千年一遇洪水校核,最大泄洪能力 176m³/s。进口设实用低堰,溢洪道泄槽共有三个弯道:(1)里程 17m(弯道中心,下同)为右弯,弧长 33m,弯道半径 100m;(2)里程 90.9m 为左弯,弧长 45m,弯道半径 120m;(3)里程 256m 为右弯,弧长 57.46m,弯道半径 60m。泄槽依地形有二段较陡坡段:(1)里程 113 ~ 177m 段坡度为 0.233;(2)里程 284 ~ 407m 段(进入消力池前)坡度为 0.124;其它段坡度均 < 0.1。里程 100m 以前泄槽边墙高度由 4.5m 逐渐降至 3m,直到

消力池边墙高度基本为 3m。

1997 年因大坝安全鉴定的需要,对溢洪道的泄流能力和水力学特性进行原型观测,其中对溢洪道的弯道水流作了重点测试,在边界有变化之处观测水深(表5),其特点为:

(1)原型弯道的横向水深分布与模型的试验值不同,以流态最差的第三弯道为例(图3),原型冲击波比较明显,在水流的加速过程中,非立波区的水深逐渐减小,水流向立波集中,增大了立波水深,形成一股窄深式的主流,发展到冲击波的着墙点附近,立波呈双峰状,且具有最大水深。断面的中线不是平均水深。实际的流态比模型要恶劣得多。

表3 弯道加隔墙后三槽水面线

断面部位	里程	105m ³ /s					70m ³ /s				
		H _L	H _C	H _{RL}	H _{RC}	H _{RR}	H _L	H _C	H _{RL}	H _{RC}	H _{RR}
4 堰底	7.33		2.49		2.49			1.87		1.87	
弯道起	17.00		2.53		2.53			1.77		1.77	
5 弯道	23.00	2.47	2.87	3.60		2.47	1.43	1.60	2.73		1.90
6 弯道中	32.32	3.17	2.83		3.10		1.60	1.80		2.07	
8 弯道	41.63	2.40	2.40	3.50		3.17	1.83	1.70		2.07	
10 直段中	49.63	2.40	2.97	3.53		2.83	1.77	1.60		2.60	2.07
陡槽起	55.63	2.17	2.62		3.07		1.50	1.92		2.33	
陡槽	58.63	2.20	2.58		2.97		1.50	1.70		1.90	
11 陡槽	62.63	2.20	2.20		2.20		1.60	1.55		1.50	
12 陡槽	82.63	1.50	1.72		1.93		1.27	1.38		1.50	
13 陡槽	102.63	1.47	1.50		1.53		1.07	1.15		1.23	
14 陡槽	122.63	1.40	1.25		1.10		1.03	0.98		0.93	
15 陡槽尾	142.63	1.27	1.33		1.40		0.93	1.05		1.17	
16 扩散段	149.40	0.93	1.02		1.10		0.83	0.88		0.93	
14 弯道首	73.0	0.78	0.12	7.90	0.78	0.18	7.67	0.72	0.12	6.93	
15 弯道段	79.0	0.81	0.29	7.69	0.76	0.18	7.69	0.76	0.12	6.56	
16 弯道段	85.0	0.81	0.09	7.70	0.83	0.13	7.03	0.84	0.18	5.94	
17 弯道段	91.0	0.85	0.19	7.32	0.82	0.14	7.11	0.85	-0.01	5.80	
18 弯道段	97.0	0.90	0.06	6.91	0.90	0.22	6.48	0.89	0.13	5.82	
19 弯道段	103.0	0.82	0.16	7.59	0.90	0.04	6.45	0.84	0.08	5.96	
20 直段	107.5	0.86	0.08	7.22	0.79	0.31	7.38	0.82	0.08	6.08	
21 直段	127.5	0.93	-0.01	6.69	0.89	0.07	6.53	0.79	0.03	6.32	

注: H_L—凹岸水道水深; H_C—中间水道水深; H_{RL}—凸岸水道的凹边水深; H_{RC}—该水道的中心水深; H_{RR}—该水道的凸边水深。

表4 缓流下的弯道水流沿程水面线(闸全开)

测点	断面部位	里程	校核水位		设计水位		正常水位	
			h	v	h	v	h	v
1	闸 门	0.0	1.00	3.45	1.00	2.80	1.00	2.80
2	扩散段	0.9	0.68	5.27	0.84	3.90	0.76	3.64
3	扩散段	3.4	0.56	4.11	0.54	4.05	0.48	3.88
4	直 段	6.1	0.48	3.98	0.46	3.96	0.42	3.70
5	直 段	26.0	0.48	3.99	0.45	4.05	0.40	3.89
6	直 段	46.0	0.47	4.08	0.44	4.14	0.38	4.09
水跃起点里程			里程 62.0	里程 61.5	里程 60.5			
7	直 段	68.0	1.21	1.58	1.18	1.54	1.12	1.39
14	弯道首	73.0	1.20	1.60	1.18	1.54	1.08	1.44
15	弯道段	79.0	1.16	1.96	1.10	1.66	1.04	1.50
16	弯道段	85.0	0.98	2.04	0.92	1.98	0.84	1.85
17	弯道段	91.0	0.94	2.34	0.90	2.02	0.78	1.99
18	弯道段	97.0	0.82	2.82	0.82	2.22	0.72	2.16
19	弯道尾	103.0	0.68	3.09	0.64	2.85	0.54	2.88
20	直 段	107.5	0.62	3.99	0.58	3.14	0.50	3.11
21	直 段	127.5	0.48	3.99	0.44	4.14	0.40	3.89
22	直 段	147.5	0.44	4.36	0.43	4.24	0.40	3.89
26	出 口	229.0	0.44	4.36	0.43	4.24	0.38	3.99

(2)弯道处发生冲击波横
向水面超高较严重,根据实测
成果进行分析,在里程 256m
弯道凹岸水深已经影响边墙
安全(表 6)(凹岸边墙高
3.2m)。

(3)陡坡处水面掺气现象
剧烈,流量超过 30m³/s 以上
掺气水面发生雾化。

(4)溢洪道能满足原设计
的泄洪能力,但其弯道及下游
河道不能通过原设计的泄洪
流量。

2 弯道水力特性

通过上述分析,弯曲段的
水力特性主要为三方面:

(1)横向水面超高,即外
墙水面高于中心线水面的高
度:

表5 东风水库溢洪道泄槽水深(m)

断面位置及特征	断面 里程	25.7m ³ /s			41.1m ³ /s		
		H _L	H _C	H _R	H _L	H _C	H _R
闸后 平段	17.0	0.35	0.35	0.3	0.63	0.63	0.63
第一弯道后 i = 0.025	54.0	0.37	0.40	0.5	0.47	0.52	0.78
第二弯道后 i = 0.106	97.4	0.25	0.28	0.4	0.37	0.40	1.03
陡槽尾段 i = 0.233	177.3	0.38	0.35	0.3	0.51	0.44	0.43
第三弯道后 i = 0.023	256.0	0.55	0.22	0.1	1.25	0.25	0.22
溢洪道尾 i = 0.124	407.0	0.34	0.34	0.3	0.49	0.49	0.50

表6 凹岸水深与流量关系

流 量(m ³ /s)	40.00	94.00	176.00
掺气水深(m)	1.25	3.70	7.00

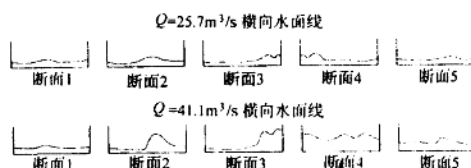


图3 弯道横向水深分布的沿程发展

目前在理论上用于设计的横向水面超高 Δy 按下式计算:

$$\Delta y = k \frac{v^2 B}{g r_{\text{中}}} \quad (1)$$

式中 Δy — 横向水面超高;

v — 断面平均流速;

B — 按水面高算得的明槽水面宽;

$r_{\text{中}}$ — 弯道中心半径;

k — 超高系数(根据泄槽形状取 0.5 ~ 1)。

在实际的模型试验及原型观测中,发现在急流弯道上,冲击波的形成、形态除与(1)式所列因素有关外,还受来流流态影响。实测(模型及原型)横向水面超高值都超过理论计算值,偏大值为

$$\Delta y_{\text{理论}} = (1.1 \sim 1.5) \Delta y_{\text{实际}}$$

由于流态影响,规律不明显,弯道上游已是陡坡时,水面干扰在进入弯道前就已经形成, Δy 偏移更大。

(2) 流态的沿程分布:

弯道内第一个冲击波较为突出、明显,以后的波形较为紊乱,着墙点的水面高度也不一样,不能按(1)式计算。冲击波的数量除了与流量(流速)有关,当流量变化时,冲击波的大小、位置都会变化;此外还与弯道的长度相关,长弯道内的冲击波数量多,且有明显的叠加现象,加剧了流态的紊乱。

(3) 对下游的影响:

横向水面超高、较大的弯道水流一旦进入陡槽,其冲击波干扰随急流带入下游,影响下游流态,影响范围除与流量(流速)有关外,还与下游底坡有关。在小官村溢洪道的研究中,弯道水流一直影响到消力池。

可见弯道水流是一种较复杂的水流,它和来流、上下游边界相关,影响范围也较大。弯道水流影响泄槽的过流能力,对泄水建筑物边界提出一定的要求,因此消除或减轻其影响也成为泄水建筑物设计、施工必需解决的问题。从总体上说,仅靠计算尚不能确定其边界

体形,最好通过模型试验来调整各有关的边界体形和尺寸。

3 解决弯道边界体形的技术措施

作为明渠泄槽,为了减弱水面干扰,通常对设计作如下限制:

最小弯道半径和最大许可超高:

简单圆曲线弯道的最小半径 $r_{\text{最小}}$ 允许值,按下式计算:

$$r_{\text{最小}} = \frac{4v^2 B}{gY} \quad (2)$$

一般矩形断面弯道最大许可超高值为:

$$\Delta y_{\text{最大}} = 0.09B \quad (3)$$

但在实际上受工程环境(地形、地质)的影响,往往不能满足上述条件,流态恶化影响建筑物泄流能力。要求在特殊情况下通过建筑物边界条件的修改来改善流态,满足泄流要求,在满足泄流和水力因素较好的前提下,边界体形应当:

(1) 具有较小的工程量;

(2) 便于施工,适应于工程环境。

弯道水流的改善,主要降低横向水面超高,平稳流态,减轻紊流对下游的干扰。分析(1)式,影响横向水面超高 Δy 的主要因素为断面平均流速 v 、明槽水面宽 B 、弯道中心半径 $r_{\text{中}}$,还有弯道本身及上、下游的体形。

通过降低横向水面超高 Δy 解决弯道水流问题的技术措施有如下方式:

3.1 降低流速

降低流速主要方法为减少坡降和增加糙率。

3.1.1 减少坡降

分析小官村水库溢洪道弯道试验结果,表 2 的坡度为 0.05(1/20),表 3 的坡度为 0.02(1/50),流速的变化不大,但 $\Delta y_{\text{最大}}$ 从 1.25m 下降为 0.89m,降幅明显。然而在金殿水库泄水洞的试验中,表 5 的坡度为 0.0175,表 6 的坡度为 0.0133,流速略有降低,但 $\Delta y_{\text{最大}}$ 没有改善,可见当坡度小于 0.01 时,坡度的改变对

降低 Δy 无贡献, 主要因为坡度调整幅度不大; 受流态的影响, 当流速的降幅不足以减轻来流干扰时, 弯道流态仍无改善。

3.1.2 增加糙率

小官村水库溢洪道弯道采取增加糙率的方式来降低流速(表1、2), $\Delta y_{\text{最大}}$ 下降, 坡度陡的泄槽效果更明显。弯道段加糙后, 改变了该段水渠的能头, 对陡槽及其以下的泄水建筑物都产生影响。其主要特点:

(1) 平滑冲击波, 改善流态, 进入下游的水流平稳;

(2) 底塘水力因素在加糙前后的测试结果不一样: 未加糙时, 能头高、水跃长、消能率也高; 加糙后能头略小、水跃较短、消能率较低一些, 水流在陡槽起始断面处已经被减低了能头, 减轻了底塘负担。水面波动幅度虽然较大, 加糙前的波浪幅度可达 1m, 但加糙后已减为 0.6m 的波幅。

(3) 加糙对抑制上游来流干扰效果明显, 冲击波在加糙区不能自由发展。

3.1.3 加糙方式

小官村水库溢洪道弯道段加糙形式为底板铺设横坎, 横坎垂直于弯曲中心线, 坎高及长度均为 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$, 为避免过流时损坏, 横坎的两角可以做成 $R = 0.02\text{m}$ 的圆形。

加糙方法简单, 易于施工, 糙率可以根据流态进行调整, 在冲击波较强的区间糙率可以设大一些。底坎在今后的运行中即使空蚀也易于修补。以小官村水库溢洪道水工模型研究弯道段加糙为例, 弯道段分为三段铺设(图4)。

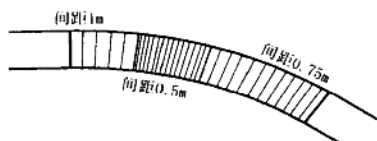


图4 加糙示意图

(1) 前部(9m): 里程 17 ~ 26m 段横坎间距为 1m;

(2) 中间(6m): 里程 26 ~ 32.3m(中点)段横坎间距为 0.5m;

(3) 后部(占弯段 1/2, 约 15m): 里程 32.2 ~ 47.6m 段, 横坎间距为 0.75m。

3.2 改变断面体形(斜底法)

采用斜底的断面形式, 其底板横向坡度通常会按设计或校核流量的 Δy 设计, 最佳过流状态的范围较小。当泄槽在通过中、小流量时, 水流向凸岸边集中, 凸岸边墙仍然需要考虑增加高度。

3.3 增大弯道中心半径

小官村水库溢洪道弯道在 $r_{\text{中}} = 20\text{m}$ 时理论计算的 $\Delta y_{\text{最大}} = 1.73\text{m}$, $r_{\text{中}} = 50\text{m}$ 时的实测 $\Delta y_{\text{最大}} = 1.25\text{m}$, 弯道中心半径改变的效果明显。

3.4 增加水深, 加隔墙

小官村水库溢洪道弯道采取的泄槽加隔墙、增加水深的试验结果见表3, 隔墙起到分隔流态的作用: 隔墙使凹岸、中间水道流态有所改善, 却将紊乱流态集中在凸岸水道内, 并且对下游流态影响大。

弯道段加隔墙应从弯道起点直至陡槽头, 隔墙厚度不得超过 0.2m, 其高度尽量与边墙高度一致。

可见在此处采用增加水深、加隔墙的措施对改善流态并无贡献:

此外尚有缓和曲线法及斜底法, 因本次未进行研究, 从略。

3.5 各种方式的特点及适用范围

克服弯道水流的影响, 主要措施都是改变水流的边界条件, 改善上、下游水流条件; 各种方法都有一定的特点及适用范围, 也有其局限性。我们将几种体形的水力因素列于表7中, 结合流态观测, 可以对弯道边界的体形作表8的描述, 并作如下结论:

(1) 在所列的方案中, 较为简单的形式是增大弯道半径, 工程量及施工难度较小; 采用斜底方式次之; 加糙方式次之; 加隔墙的方式更差一些。

表7 弯道边界水力因素比较

体 形	坡度	糙率	Fr	y_{ul}	y_{wl}
体形 1(简单矩形) $i = 1/20$	0.14	2.2	1.73	1.25	
体形 1(简单矩形) $i = 1/50$	0.14	2.2	0.93	0.89	
体形 2(矩形加糙) $i = 1/50$	0.16	1.9		0.54	0.83
	-0.21	-1.4			
凹体形 3(加隔墙) $i = 1/20$	0.13	2.4	0.34	0.15	
	0.13	2.0	0.27	0.20	
	0.13	1.8	0.23	0.57	

表8 弯道方案综合因素比较

方案	体形	泄流范围	流态	与上下游衔接	输水能力	工程量及难度
加半径	简单	大	好	衔接简单	强	不大,简单
横坡式	简单	较大	中	差,要过渡	强	不大,较难
加糙	简单	大	较好	衔接较好	稍差	稍大,简单
加隔墙	复杂	大	中	差,要过渡	强	大,较难

(2)根据实际条件,采取综合措施,可以几

种方法结合应用,充分发挥各自优势。评价边界形式时,应考虑其综合效果,不能只看一项指标(如水面横向超高);其它方面例如流态及对下游的影响也同样是不可忽视的重要因素。

(3)弯道水流是一种复杂的水流现象,受来流影响,并干扰下游流态,与上下游边界相关,影响范围也较大。每个具体弯道都有其特点,对于重要的泄水建筑物最好通过水工模型试验的验证。

4 参考文献:

- 1 水力学,清华大学,1980
- 2 水工设计手册,北京:水利电力出版社,1983

Practice in Handling Curved Channel and Lining of Its Sides

Zhang Bao

(Yunnan Water Conservancy and Electricity Scientific Research Academy Kunming 650031)

Abstract: Based on a careful research into several typical hydraulic model practices and first-hand observation of actual hydraulic projects, and also in the light of the geographical feature of our province, i.e., narrow valleys for reservoirs, the present author proposes several ways for shape design of the curved channels, makes an evaluation to these ways and defines their scopes of application. The proposed ways can be used in the design of water discharge buildings in key water control projects.

Key Word: Curved Channel, Feature of Water Flow, Lining Patterns

江垭水库溢流坝的几个水力学问题

艾克明

(湖南省水利水电勘测设计研究院 长沙 410007)

【摘 要】 江垭水库大坝为 RCC 重力坝,最大坝高 128m。泄水建筑物布置在河床中央,采用表、中孔双层泄洪、高、低坎挑流,空中碰撞消能。文中介绍了泄水建筑物的布置特点、中孔体型、岩石冲刷的模拟、闸门调度,以及坝顶漫溢最大可能洪水的水力计算等几个主要水力学问题。

【主题词】 碾压砼坝 梯形坝 溢流坝 挑流消能 试验研究 拟建工程 (江垭水库)

0 概述

江垭水库位于沅水中游、江垭镇上游 5km 的峡谷处,下距慈利县城 57km,是沅水第一期开发工程。

江垭水库具有防洪、发电、航运、灌溉等综合效益,总库容 17.4 亿 m^3 ,电站总装机容量为 300MW,为一等工程。按 500 年一遇洪水设计,5000 年一遇洪水校核,其洪水流量分别为 12100 m^3/s 和 15600 m^3/s 。

坝址处为 U 形河谷,两岸比高 700 ~ 800m,为横向河谷。岩层走向 $\text{NE}40^\circ \sim 70^\circ$,倾向南东,倾角 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。坝基主要持力层为栖霞灰岩,岩石新鲜,风化浅,力学强度高。冲刷区为中厚层灰岩,抗冲流速约 8m/s。

枢纽建筑物包括:拦河坝,最大坝高 128m,坝顶长 327m,为全断面碾压混凝土重力坝;右岸地下厂房,内装 3 台单机容量为 100MW 的水轮发电机组;左岸双向斜面升船机和灌溉引水洞。泄水建筑物位于大坝中央,溢流前沿总长度 86.5m(含两边墩总宽 8m),溢流坝两端为挡水坝段。

由于河床狭窄,岩坡陡峻,泄洪流量大,泄洪消能问题较为突出。现综合各设计阶段进行的水工模型试验,就泄洪建筑物的布置特

点、中孔体型、岩石冲刷的模拟、闸门调度以及坝顶漫溢最大可能洪水的水力计算等水力学问题介绍如下:

1 泄洪建筑物的布置特点

江垭水库的首要任务是防洪。按照防洪要求,汛前防洪限制水位 210.6m 时,水库应具有宣泄 1700 m^3/s 流量的能力。因此,泄水建筑物的布置,即要考虑汛期泄洪,又要考虑汛前降低库水位的要求。曾研究过泄水建筑物按单层一列式布置方案,结果表明,即令厂房不占河床宽度,也难以保证两岸山体不受冲刷,因而推出了中、表孔双层布置的方案,即设 4 个 14m × 12m(宽 × 高)的溢流表孔和 3 个 5m × 7m(宽 × 高)的中孔。中孔间隔地布置在宽 7.5m 的表孔闸墩内。表孔的堰顶高程为 224m,中孔的进口底孔高程为 180m。表孔和中孔均用弧形钢闸门控制。中孔除汛前用来降低库水位以外,汛期也担负泄洪任务。中、表孔均用挑流消能。为提高消能效果,采用高、低坎挑流空中碰撞消能。为此,两边表孔和 3 个中孔设计为低坎,两个中、表孔设计为高坎^[注1],布置见图 1、2。

经调洪演算,设计和校核洪水的下泄流量分别为 8322 m^3/s 和 10491 m^3/s ,水库的设计和校核洪水位分别为 237.59m 和 240.85m。

作者简介:艾克明,男,1933 年 12 月生,1959 年毕业于原苏联敖德萨水利工程学院,教授级高工,从事水工水力学专业

收稿日期:1998-03-16

〔注 1〕 沅水、江垭水利枢纽工程初步设计报告,湖南省水利水电勘测设计院,1992 年 12 月

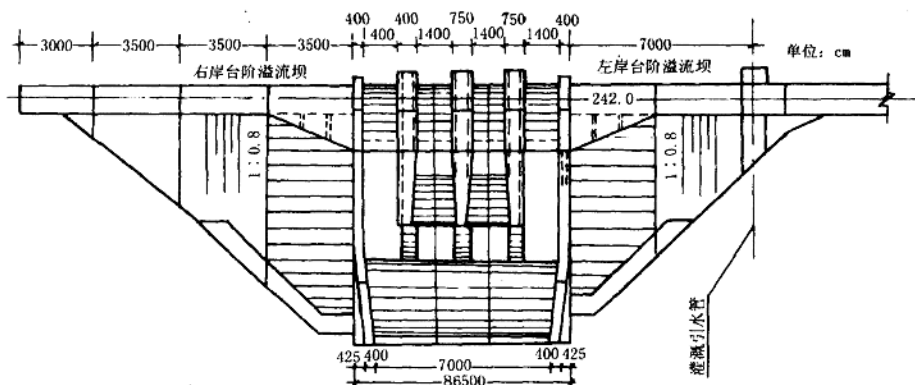


图1 大坝布置

滩为0.552)。

(4)为使低坎水舌挑距最远,其最优挑射角按下式计算^[注3]:

$$\theta_{\text{最优}} = \arccotg \sqrt{1 + \frac{a}{\psi_2^2 Z_2}}$$

式中 a —低坎顶至估算的冲坑最深点高差;

ψ_2 —低坎的坝面流速系数^[1];

Z_2 —低坎以上库水位落差。

经计算: $\theta_{\text{优}} \approx 37^\circ$, 设计取 $\theta = 35^\circ$ 。

(5)为使消能效果最佳,一般要求高坎水舌跌落在低坎水舌达到最高点的前方位置上,其相应碰撞角约为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。根据这一要求来确定高、低坎间的水平距离和高坎的挑角。根据经验,高、低坎间的水平距离与高、低坎间的落差比为1左右(风滩为0.88,江垭为1.18),高坎挑角一般在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间选择。

(6)一般来说,不希望高坎单独运行。但工程运行时往往情况复杂,有时难于避免,因此在设计高坎时应考虑高坎单独运行并应留有一定的安全余地。低坎下游的不冲距离,江垭取30m(风滩亦为30m)。

根据以上原则进行设计,并取高坎挑角 $15^\circ \sim 20^\circ$, 低坎挑角 $30^\circ \sim 35^\circ$, 组成9个不同

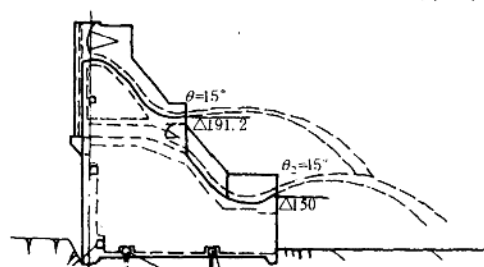


图2 溢流坝标准剖面图

1.1 高、低坎设计

高、低坎挑流空中碰撞消能有关碰撞点、碰撞角和汇流挑距计算,已有较成熟的方法^{[1]、[注2]},根据风滩等工程的经验,在设计江垭高、低坎挑流时,考虑了以下一些原则:

(1)高、低坎的进口堰顶高程设在同一高程上($\nabla 224\text{m}$),这样使高、低坎上的单宽流量分配大体一致,水流动能大体均一,碰撞消能效果最好。

(2)低坎的高程设置应略高于下游最高洪水位,能形成自由挑流,同时也能使挑距尽量远一点。根据江垭的具体情况,低坎高程设置在150m处。

(3)根据经验,高坎位置宜设置在水库正常运行水位至低坎高程差的1/2处。据此,江垭高坎高程取为191.2m,即 $Z_1/Z_2 = 0.52$ (风

[注2] 罗绍基、席与光,风滩拱坝高低坎挑流消能工的设计和初步实践,水利电力部中南勘测设计院,1983年3月

[注3] 艾克明,确定最大挑射射程的方法,湖南省水利电力勘测设计院,1979年12月

高、低坎的组合形式在半整体模型上进行了试验^[注4]。根据试验,最终选定高坎挑角为 15° ,低坎挑角为 35° (风滩高坎为 15° ,低坎为 30°)。碰撞点出现在低坎下游30~36m处,碰撞点高程为171~172m,碰撞角为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。

1.2 溢流坝下游侧墙形式

溢流坝下游侧墙最初设计与溢流前沿等宽,不收缩,为78.5m。试验发现沿两侧墙出射的水舌扩散很宽,部分水舌跌落在两岸岸坡上,后将低坎的两侧墙收缩至70m,经观测,下游水舌扩散宽仍达130m,对岸坡仍有威胁,为此最终取两边墙间距为61.5m,出射后的水舌宽约90m,基本不冲刷岸坡^[注5,6]。

1.3 溢流面掺气减蚀

溢流表孔的堰面曲线为WES曲线, $y = 0.0515 x^{1.85}$,观测不同库水位和泄流量下的坝面压力下,溢流坝头部曲线有轻微负压(设计流量时为 $-0.83 \times 9.81 \text{ kPa}$;校核流量时为 $-1.73 \times 9.81 \text{ kPa}$),溢流坝直线段上一般为正压($1 \sim 3 \times 9.81 \text{ kPa}$),但空穴指数不大。考虑到库水位到低坎之间的高差超过90m,流速可达30~40m/s,为安全计,在两边表孔190m高程处设置掺气槽(图3),整体模型试验表明,对坝面掺气减蚀有良好作用^[注7]。

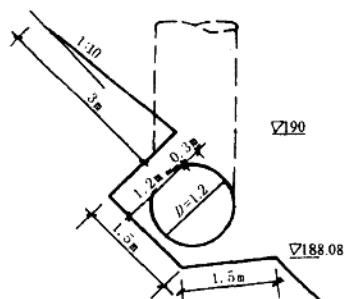


图3 坝面掺气槽

2 中孔体形及掺气减蚀研究

2.1 可行性研究阶段

为了满足汛前水位210.6m时宣泄 $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ 洪水的要求,在3个宽7.5m的闸墩内设置 $5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高)的中孔,进口底板高程为190m。进口段为喇叭形,设平板闸门控制,门后为平直段,出口的顶部和底部为抛物线。出口面积为 $5 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高),收缩比为0.8。

试验发现主要存在以下问题^[注8]:

(1)各级库水位和流量下泄洪时,进口顶部、出口顶部及底部均有很大的负压,空穴数小,有空蚀破坏的危险;

(2)当中孔出口断面逐渐收缩时,负值减小。当出口断面收缩比达到0.715时,进出口负压消除,出口底部负压也是显著减小,各部空穴数在0.2以上。但防洪限制水位时泄量减少5.4%,不满足泄量要求;

(3)中孔进口在210.6~215m库水位运行时偶发性吸气漏斗漩涡发生,孔口淹没度尚嫌不足;

(4)闸门开启过程中存在明满流过渡流态。

根据以上情况,试验单位建议在初步设计阶段应考虑适当降低进口底板高程和对体形做进一步优化。

2.2 初步设计阶段

初步设计阶段对中孔设计做了修改。将底板进口高程降低10m,即改为180m。其次将控制闸门改设在出口,用弧门控制;出口顶部底部曲线做了调整。出口控制断面为 $5 \text{ m} \times 5.812 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高),收缩比为0.83(图4)。

[注4] 江垓水利枢纽工程中、表孔半整体模型试验报告,湖南省水利水电勘测设计院,1993年7月

[注5] 江垓水利枢纽工程水力学模型试验研究阶段汇总报告,湖南省水利水电勘测设计院,1993年3月

[注6] 江垓水利枢纽工程整体模型试验报告,长江科学院,1993年9月

[注7] 江垓水利枢纽工程整体模型试验报告,长江科学院,1994年9月

[注8] 江垓水利枢纽泄洪中孔局部模型试验研究报告,湖南省水利水电勘测设计院,1993年7月

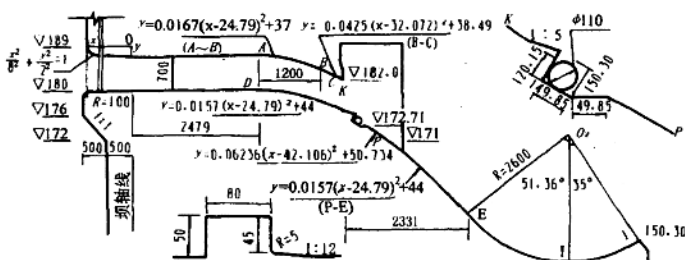


图4 修改方案中孔体型

2.2.1 常压试验

试验表明^[注9]:

(1)泄流能力满足设计要求;

(2)在洞身范围内各部压力均为正压,分布合理,从压力分布及空化特性分析,中孔体型基本可行,但出口以后的泄槽底部及侧墙末端存在负压,空穴数 $\sigma = 0.09$,可能发生空化水流,其体型应予以改善或采取减蚀措施。

(3)在泄槽底部 172.71m 高程处初步设置坎槽式掺气槽,并将侧墙出口圆弧扩散改为直墙以后,前述弊端均已改善。修改后的中孔体型基本可行。

2.2.2 掺气减蚀装置型式研究^[注10]

在模型上增设挑坎式掺气槽,使中孔沿溢流坝面下泄水流的负压区置于空腔范围内,从而免除了空蚀破坏的危险性,但从掺气槽的小挑坎上抛射下来的水舌直接跌落的冲击低坎的反弧面。为此,应对掺气槽的具体结构型式进行优化,以减小冲击力。通过 1:30 的掺气减蚀和减压模型试验结果表明:

(1)就射流作用于反弧段的冲击力而言,跌坎式(坎高为 0)优于坎槽式(坎高为 0.2m 和 0.3m)掺气槽。因在同一库水位下(例如 236m)泄流时,空腔的水平投影长度小,由坎高 0.3m 的 36.29m,缩短到坎高为 0 的 24.69m,从而减小了对反弧的冲击长度;同一泄流条件下,最大冲击时均压力,跌槽式比坎

槽式约小 $10 \times 9.81 \text{ kPa}$,脉动压力均方值也减小 30% 左右。

(2)反弧段内的掺气浓度测量表明,跌槽式掺气槽的掺气浓度随库水位升高而加大,但都以挑坎顶点的浓度为小(1.4% ~ 2.2%),考虑到掺气浓度的缩尺效

应,掺气槽可以起到免空蚀的作用。

由此,最终采用了跌槽式掺气槽。

2.2.3 中孔的空化特性^[注11]

在常压试验的基础上,对中孔可能发生空化的部位:进口顶曲线段、侧曲线段、进口下唇、门槽下缘、掺气坎升坎处以及低挑坎顶等 6 处设置了 BN-1 型水听器,施测水下噪声。根据这些讯息做了空化噪声时间波型、噪声相干谱及声级谱分析。结果表明,中孔的进口顶、侧曲线段、门槽侧墙下游的掺气槽升坎处均有初生阶段的空化发生,其声级差 ΔSPL 值在 6 ~ 10dB 之内,空化量 $B = \sigma/\sigma_i$,在 0.7 ~ 1.0 之间(最小为 0.915)。但上述量级的空化,在 210.6 ~ 240.85m 运行库水位内,对一般水工混凝土不会发生空蚀危害。所以中孔的体型就空化特性而言基本上是可行的,安全的。

3 岩石冲刷的模拟^[2]

根据溢洪道设计规范,对于本工程的消能防冲,取 100 年一遇洪水设计,500 年一遇洪水校核。经调洪演算, $P = 1\%$ 的下泄流量为 $3512 \text{ m}^3/\text{s}$,库水位为 236m; $P = 0.2\%$ 的下泄流量为 $8322 \text{ m}^3/\text{s}$,库水位为 237.59m。

在可行性研究阶段和初步设计阶段分别由二个不同试验研究单位按抗冲流速模拟岩

[注9] 江垭水利枢纽泄洪中孔水工模型试验报告,长江科学院,1993年9月

[注10] 江垭水利枢纽泄洪中孔掺气减蚀装置水工模型试验,长江科学院,1994年

[注11] 江垭水利枢纽泄洪中孔(设掺气槽体型)常、减压模型试验报告,长江科学院,1994年3月

石冲刷,进行了消能防冲试验,并取得了相近的成果。低坎末端至冲坑起点距约为37~43m,最大水舌射程约为120~140m,最大冲深点高程为107.3m(设计)~94.53m(校核),冲坑上游坡约为1:4.52~1:4.89,因而认为挑流冲刷不致危及大坝的安全。

在招标设计阶段,世界银行组成国际大坝安全评估小组对大坝安全进行评估。世行专家根据在坝轴线两岸补打的二个钻孔岩芯资料和平硐考察,提出岩块的平均粒径为30~50cm,因之认为原试验采用的碎石粒径14.3mm偏粗,要求用3~5mm的粗砂模拟(模型比尺1:90),亦即原则上按岩块粒径几何尺寸缩小模拟。

为了回复世行专家的意见,我们做了如下一些补充论证工作:

3.1 关于冲坑部位地质情况的评价

坝基座落在 P_1^{s-1} 岩组上,为中厚层的白云质灰岩夹页状滑石化灰岩。岸坡处多网状灰岩互层,岩芯为碎块状,粒径一般为30~50cm。而冲击中心位于坝趾下游120~140m处,在 P_1^{s-2} 岩组上,为厚层滑石质灰岩与白云质灰岩,岩石新鲜,无夹层。以冲坑中心的钻孔为例,河床0~1.4m以上为弱风化,1.4m以下为新鲜基岩,波速>4200m/s,完整系数>0.55,岩溶不发育,岩芯为完整的圆柱状,岩块粒径在50cm以上。因此,类比其他一些工程情况,确定其抗冲流速为8m/s左右是合理的。

3.2 岩石模拟方法的探讨

根据世行专家的意见,以模拟粒径3~5mm反算,原型岩体的抗冲流速为3~4m/s。根据江垭的地质情况,我们认为偏小。然而原试验按岩石的抗冲流速模拟,是否合适,也有待论证。为此,我们对国内一此工程的岩石冲刷的模拟方法及原、模型冲刷资料进行了分析。国内的模拟方法大致分为二类,一类是按调查的岩块粒径和节理之间的胶结情况,将岩

块粒径放大3~6倍进行模拟,如凤滩、柘溪等,另一类是根据地质情况,类比已运行工程的冲刷情况,确定岩石的抗冲流速,按抗冲流速模拟,如丹江口、双牌等工程。通常还常用上述二种方法相互验证,如凤滩、柘溪等工程。

为了探求上述二种方法的适用性,我们收集了国内几个工程的原、模型冲刷资料,并以冲刷系数 K 为评价指标,绘于图5。

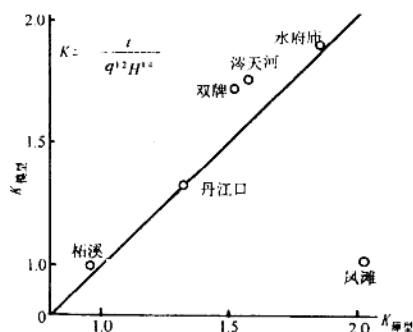


图5 $K_{原} \sim K_{模}$

由图可见,多数工程具有较好的相关性,唯凤滩的原型冲刷较模型为小。由此我们认为对于岩石基础而言,按抗冲流速模拟可能比单纯按岩块几何尺寸缩小模拟更反映实际一些。

3.3 模型复核试验^[注12]

在原1:90的整体模型上进行了复核试验。试验中将模拟粒径缩小了一倍,即取 $d_{50}=7.7\text{mm}$,其抗冲流速约5m/s。试验方法是先冲刷2小时,然后移去一半高度的堆丘,再冲刷2小时,与1993年初步设计时的成果对比(表1)结果,减小粒径并移去堆丘高度的一半以后,虽然冲刷深度有所增加,冲刷系数 K 有所加大,但冲坑上游坡尚有1:4.12~1:4.44,故工程是安全的。

3.4 与凤滩工程的类比

凤滩水电站是我国第一个采用高、低挑流空中碰撞消能的工程。江垭的坝高、单宽流量和消能型式均与凤滩类似,地质条件也相近。

[注12] 江垭水利枢纽水工整体模型试验报告,长江科学院,1994年9月