

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.028

贵州省开阳县三岔河水库混凝土拱坝设计

罗居剑

(上海勘测设计研究院有限公司,上海 200434)

摘要:三岔河水库为地方性水利工程,工程投资控制较严。设计根据地形地质条件,优选坝轴线,优化体形设计,采取合理的基础处理措施;泄洪采用挑跌流结合坝下水垫塘的消能型式;提出大坝混凝土温度控制的标准和可行措施;大坝结构和构造设计力求简化。设计及建设实践表明,拱坝设计较为合理,75 m的高拱坝坝体混凝土总方量仅10万 m^3 ,取得了较好的经济效果,可供类似工程参考。

关键词:混凝土拱坝;坝轴线;洪消能;温度控制;构造设计

中图分类号:TV642.4

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2019)05-0163-05

Concrete Arch Dam Design of Sanchahe Reservoir in Kaiyang County, Guizhou Province

LUO Jujian

(Shanghai Investigation Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Sanchahe Reservoir is a local water conservancy project with strict investment control. According to the topographic and geological conditions, the dam axis and the dam shape are optimized, reasonable foundation treatment measures are also considered. The energy dissipation type of overhang-drop flow combined with plunge pool under the dam is adopted in the design. The criteria and feasible measures for temperature control of the dam concrete are proposed. Dam structure and constructional detail design was simplified. The design and actual construction show that the design of the arch dam is reasonable. The total concrete volume of the 75 m high arch dam is only 100 000 m^3 , which has greatly reduced the cost and can be used as a reference for similar projects.

Keywords: concrete arch dam; dam axis; flood discharge and energy dissipation; temperature control

三岔河水库工程位于贵州省开阳县龙岗镇小谷光村,乌江三级支流三岔河的中下游,是一座以供水、灌溉为主的 III 等中型水库^[1]。水库汇水面积 41.5 km^2 ,总库容 1 106.52 万 m^3 。大坝、表孔溢洪道、引水建筑物、放空建筑物等主要建筑物为 3 级,设计洪水重现期 50 年,校核洪水重现期 500 年,消能防冲建筑物设计洪水重现期为 30 年。工程抗震设防烈度为 6 度。

工程所在区域气候属亚热带湿润气候区,无酷暑寒冬,相对湿度大,日照时数低。多年平均气温 12.7 $^{\circ}C$,最冷月(1月)平均气温 2.1 $^{\circ}C$,最热月(7月)平均气温 22.2 $^{\circ}C$ 。多年平均风速为 2.8 m/s,多

年平均降雨量为 1 203 mm。

坝址区河谷为“V”形横向谷,河流走向近似南北向,左岸地形坡度 46 $^{\circ}$ ~55 $^{\circ}$,右岸地形坡度 34 $^{\circ}$ ~43 $^{\circ}$,正常蓄水位 1 061.0 m 时,河谷宽约 134 m,宽高比 1.95。坝基岩体为寒武系中上统娄山关群 $\epsilon_{2-3}ls^2$ 浅灰色、灰色中厚层细至中粒白云岩。岩层产状较稳定,总体为单斜构造,岩层倾上游,产状 160 $^{\circ}$ ~165 $^{\circ}$ \angle 20 $^{\circ}$ ~26 $^{\circ}$ 。坝址区无较大型断层、褶皱等构造发育,主要发育三组陡倾角的裂隙。夹层主要为岩体强风化带沿层面及裂隙面间局部夹泥,层面的起伏差大于夹层的厚度。弱风化带白云岩为中硬岩,其岩石饱和单轴抗压强度 42 MPa。坝基

(肩)弱风化岩体质量 $\in 2_{-3} \text{Is}^2$ 属 B_{III2} 类。

1 枢纽布置

1.1 坝轴线确定

大坝选址于三岔河青山峡谷附近,坝址区地形情况详见图 1,可研阶段坝轴线布置如图中所示,该阶段推荐方案的坝轴线长 184 m。从宏观来看,原坝线所在的上游 50 m、下游约 100 m 总计约 150 m 范围的山谷是坝址区最为狭窄的一个区域。在距离可研推荐坝线上游约 300 m 处,河谷呈收缩状,两岸山坡也较对称,从地形上讲具备建设拱坝的条件。如在该处建坝,要维持原水库规模不变,势必抬高水位较多。在大坝可研阶段推荐坝线下游约 50 m ~ 100 m 处,亦可布置一条坝线。但该处左右两岸拱座下游均有冲沟,抗力体相对较为单薄。

初设阶段的地勘成果表明,受左岸拱座处冲沟影响,原坝线左岸地质条件相对右岸稍差,弱风化层深度左岸比右岸大约深 12 m。为此坝线左岸拱座适当往下游方向移动约 8 m,坝线延长约 20 m,使其左坝肩嵌入微风化上部或弱风化岩体下部。

可研阶段大坝右坝肩位于山体等高线拐点附近,单纯从右坝肩条件来看,有条件往上游方向移动一段距离以加大右坝肩抗力体范围。但考虑到溢洪道的泄流归槽条件,往上游移动的距离有限。经优化,最终确定坝线右岸拱座往上游偏移约 3.0 m。

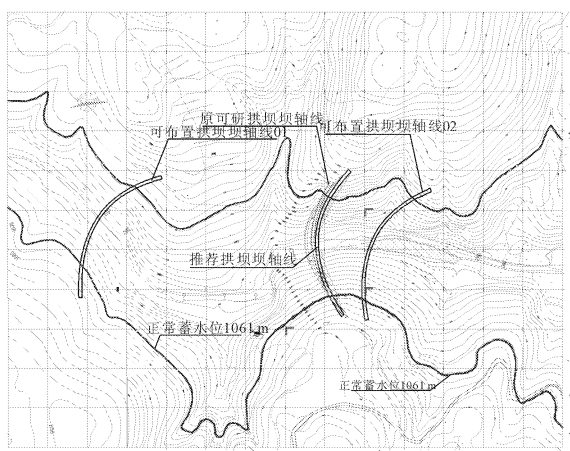


图 1 坝轴线优化示意图

1.2 选定的枢纽布置

拦河大坝坝型为抛物线型变厚常态混凝土双曲拱坝,大坝中心线方位为 $N1^{\circ}28'39''E$,坝顶高程 1 065 m。坝身设置表孔溢洪道,引水管,放空管(兼做生态放水管)。

2 拱坝体形设计、应力分析和拱座稳定

2.1 拱坝体形设计

从坝址地形来看,左岸拱座位于两条冲沟之间,山体等高线在 1 025 m 以上往左岸侧偏转,对拱座稳定不利,故体形设计时须考虑到左岸有足够的嵌深。从坝址区地质条件来看,坝址处基岩综合变形模量在 8 GPa 左右,适宜建设 70 m 级的拱坝^[2]。但基岩隐裂隙较为发育,爆破开挖后形成的石头均为小粒径的碎石,因此应重视岩基的承载力问题,相应拱端厚度不宜过薄。对坝高超过 70 m 的高拱坝,其体形设计不仅要满足光滑美观的基本要求,而且对温度荷载、岩体综合变形模量等主要因素应具有较强的适应性^[3]。

考虑上述因素,对拱坝体形进行优化设计,拱圈中心线为抛物线,确定大坝的体形参数见表 1。坝轴线总长 204 m,坝顶宽 5.0 m,拱冠处底宽 15.2 m,拱冠厚高比 0.203,弧高比 2.713,最大中心角 85.03° 。

2.2 拱坝应力分析

拱坝应力分析采用拱梁分载法为主,辅以有限单元法。拱梁分载法计算软件采用浙江大学拱坝计算软件 ADAO,拱梁网格系统为 9 拱 19 梁,采用四向调整法。

坝基岩体综合变形模量,河床坝段、两岸 1 024 m 以下为 9.0 GPa,两岸 1 024 m 以上为 8.0 GPa,泊松比 $\mu = 0.29$ 。坝体混凝土的物理力学参数取值:弹性模量 $E_c = 2.1 \times 10^4$ MPa;泊松比 $\mu = 0.167$;重度 $\gamma_c = 24$ kN/m³;线胀系数 $\alpha = 0.975 \times 10^{-5}/^{\circ}C$;导温系数 $a = 0.0034$ m²/h = 2.448 m²/月。温度荷载主要参数取值为:多年平均气温为 12.8 $^{\circ}C$;封拱温度为 11.0 $^{\circ}C$;设计正常温降年变幅取为 11 $^{\circ}C$;设计正常温升年变幅取为 10 $^{\circ}C$ 。

两种方法计算得出的主应力变化规律一致、高主应力范围吻合,两者互为验证。采用有限元计算时,合理应用薄层单元以提高坝基面上应力的稳定性,并计算出等效应力^[4]。基本组合下,坝体最大等效压应力为 5.01 MPa,最大等效拉应力为 1.48 MPa;特殊组合下,坝体最大等效压应力为 5.04 MPa,最大等效拉应力为 1.35 MPa。拱坝坝体上、下游面的最大主应力值均小于应力控制标准值;拱坝最大径向向水平位移亦符合拱坝变形的一般规律。

为评价拱坝体形的适应性,选取封拱温度、温度荷载(温升、温降)、基岩变形模量等主要参数,开展

这些因素对拱坝应力影响的敏感性分析^[5]。分析表明,拱坝坝体应力对上述因素的敏感性在合理范围内,体形设计较为合理。

表1 拱坝体形参数表

高程/m	拱冠梁上游面坐标 Z_u/m	拱冠梁拱圈厚度 T_c/m	左拱端拱圈厚度 T_{al}/m	右拱端拱圈厚度 T_{ar}/m	左岸拱圈中心曲率半径 R_{al}/m	右岸拱圈中心曲率半径 R_{ar}/m	左岸拱圈半中心角 $\varphi_{al}/(^{\circ})$	右岸拱圈半中心角 $\varphi_{ar}/(^{\circ})$
1065	0.00	5.00	5.09	5.09	95.13	127.99	42.07	36.70
1058	-4.02	6.74	6.77	6.84	87.30	113.28	42.25	38.43
1053	-6.44	7.77	7.95	8.08	82.03	104.20	42.48	39.49
1042	-10.52	9.55	10.45	10.69	71.24	87.73	42.99	41.21
1031	-13.10	10.84	12.69	13.04	61.37	75.04	43.09	41.94
1020	-14.39	11.87	14.55	15.00	52.17	64.85	42.26	41.47
1010	-14.64	12.78	15.79	16.31	44.17	56.69	40.28	39.83
1000	-14.18	13.83	16.51	17.08	36.33	48.57	36.71	36.89
990	-13.17	15.20	16.60	17.20	28.46	39.54	31.18	32.49

2.3 拱座稳定分析

拱座无特定的滑裂面,拱座稳定分析按二维刚体极限稳定方法进行计算。分层进行拱座稳定计算时,底滑面取为层面;侧滑面自拱座上游端点起,方向取为陡倾裂隙走向方向。左岸拱座侧滑面方位为 $N15^{\circ} \sim 20^{\circ}E$,右岸拱座侧滑面方位为 $N5^{\circ} \sim 35^{\circ}W$ 。侧滑面上抗剪断强度指标按照裂隙连通率将节理面与岩体间的指标予以加权平均,底滑面抗剪断强度指标取为层面指标。计算结果表明大坝拱座稳定满足规范要求。

3 拱坝基础处理设计

3.1 坝基开挖

拱座开挖型式为全径向开挖。大坝建基面中下部进入微风化基岩,上部进入微风化基岩。河床开挖深度为15 m,左岸嵌岩深度27 m~35 m,右岸嵌岩深度20 m~28 m。坝基开挖采用钻孔梯段爆破法,拱肩槽及边坡轮廓面的开挖采用预裂爆破,水平建基面的开挖,采用预留保护层的开挖方法。

3.2 固结灌浆

对坝基进行全面固结灌浆,并在坝基以外上、下游区各增设1排固结灌浆孔,固结灌浆孔深8 m。坝基范围内灌浆孔排距、孔距为3 m,呈梅花型布置。坝踵、坝趾外的分别增设一排灌浆孔,孔距3 m,采用斜孔灌浆,与竖直方向夹角为 7° 。固结灌浆均要求在有混凝土盖重(厚度不小于3.0 m)下进行。

3.3 坝基防渗与排水

坝基防渗采用灌浆帷幕,两岸帷幕延伸至正常

水位与蓄水前的天然地下水位线相交处。帷幕深度按照深入相对不透水层(透水率小于 $3 Lu$)不小于5 m控制,深度不小于坝高的0.5倍。坝基帷幕采用单排孔布置,孔距2.0 m,帷幕灌浆采用孔口封闭法。

在基础灌浆排水廊道内设置排水孔,孔距3 m,孔径110 mm,孔深为帷幕孔深的40%~60%。其中1 009.00 m高程以下坝基渗水汇集于995 m高程处的集水井,通过水泵抽排出坝;1 009.00 m以上坝基渗水,通过1 009.00 m高程处坝廊道自流出坝。

4 表孔溢洪道设计

泄洪建筑物位于5#、6#坝段的坝顶中部,为开敞式表孔溢洪道。溢洪道共2孔,单孔净宽12 m,不设闸门。为简化结构并便于施工,溢洪道堰孔采用非径向的顺直式布置,即边墩和中墩分别与溢洪道中心线平行。溢洪道顺水流向全长12.5 m,下游闸顶设置了交通桥。溢流堰采用WES实用堰,堰顶高程1 061 m,出口设置挑流鼻坎,鼻坎顶高程1 055.50 m,挑角 25° 。大坝溢流中心线剖面见图2。

工程最大泄量 $232.30 m^3/s$,单宽流量较小。由于堰顶无闸门控制,堰上水头较小时,下泄水流为跌流。因此,坝趾下游应设置护坦对坝基形成防护^[6]。大坝下游覆盖层厚度1.5 m~2.5 m,表面岩体抗冲刷性能较差。经消能防冲计算,在不采取防护措施情况下,在30年一遇消能洪水作用下,下游冲坑最大深度为5.2 m。对于拱坝而言,形成的冲

坑不仅危及坝基安全,也会危及两岸山体稳定进而削弱拱座抗力体。经计算,在校核洪水水位下,水舌最大挑距为 44 m。综合考虑上述因素,设计采用护坦末端设置尾坎形成水垫塘的消能型式。护坦顶面高程 1 003 m,尾坎顶高程 1 007 m。按此布置,在各种工况下,入射水舌均能入塘消能,且基本不会形成冲坑。

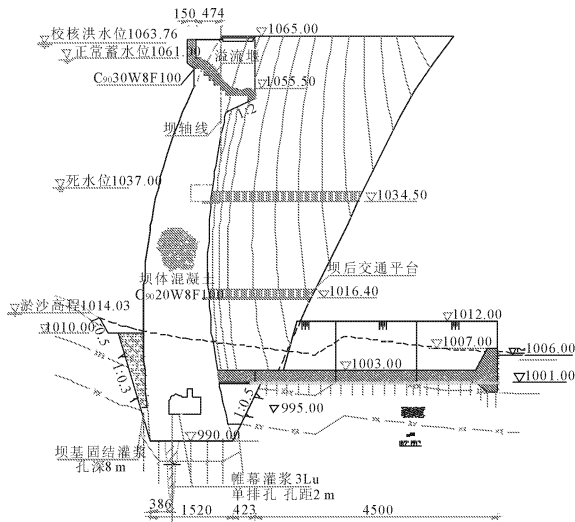


图 2 大坝拱冠剖面(高程单位:m;管径:mm)

水垫塘长 45 m,横断面为梯形,底宽为 20 m。水垫塘底板厚度 2.0 m,板块间设置两道止水,底板下设置锚杆 $\Phi 25$ 和纵横向排水系统^[7]。水垫塘范围内两岸采用 1.0 m 厚的贴坡式挡墙防护,墙顶高程 1 012 m,坡比 1 : 0.75。

5 大坝混凝土及温度控制设计

5.1 坝体混凝土分区

大坝主体混凝土总方量约 10 万 m^3 。结合拱坝应力分布情况,大坝混凝土以 C20 为主,其综合性能指标为 C9020W8F100,限制最大水胶比为 0.55,28 d 极限拉伸值不小于 0.80×10^{-4} ,90 d 极限拉伸值不小于 0.90×10^{-4} 。引水管、放空管、廊道等周边混凝土采用 C25 混凝土,溢流坝牛腿、堰面以及闸墩等采用 C30 混凝土。

5.2 温度控制标准

对混凝土拱坝开展施工全过程温度应力仿真计算与温控措施优化研究,大坝封拱温度为 11°C 。综合基础温差、上下层温差、内外温差的控制要求,并考虑到工程施工中温度控制标准的可操作性,方便施工与管理,坝体允许最高温度对于约束区为 32°C ,非约束区为 35°C ^[8]。

5.3 温度控制措施

(1)原材料控制及配合比优化。大坝混凝土采用的水泥为开阳县当地生产的紫江水泥,其性能基本均能满足国标标准^[9]中对中热硅酸盐水泥的全部要求。骨料采用库区右岸的灰岩,品质良好。单方混凝土水泥用量为 151 kg,粉煤灰掺量 30%,用水量 112 kg。

(2)浇筑温度控制。骨料堆场应搭设遮阳棚,骨料堆高在 6 m 以上,堆存时间确保 5 d ~ 7 d。严格控制水泥入罐最高温度不得大于 65°C 。合理利用低温季节或低温时段浇筑混凝土。

(3)施工方法和程序控制。大坝混凝土的浇筑采用平铺法施工,浇筑层厚 2.0 m。混凝土浇筑遵循“薄层短间歇均匀上升”的原则。浇筑层间间隔时间 3 d ~ 14 d,控制相邻坝段高差在 12 m 以内,相邻坝块浇筑时间的间隔应小于 28 d。

(4)通水冷却。坝体内预埋冷却水管,对混凝土实施一期、中期、二期通水冷却降温。各期通水冷却控制要素见表 2^[4]。

表 2 通水冷却阶段降温控制表

阶段	降温幅度/ $^\circ\text{C}$	目标温度/ $^\circ\text{C}$	降温速率/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{d}^{-1})$
一期	5 ~ 7	25 ~ 28	≤ 0.5
中期	6 ~ 9	16 ~ 20	≤ 0.3
二期	5 ~ 9	11	≤ 0.5

6 坝体结构及构造

6.1 引水建筑物设计

综合考虑引水条件和阀门室基础工程量^[10],引水管布置在 8#坝段,进口底坎高程 1 035.0 m,管径 1.2 m。进口设平面检修闸门和拦污栅,共用 1 套门槽。库水经 DN1.2 m 引水管引到坝后再由三岔管分为 3 根供水管流出,引水管和供水管上分别设置控制阀门。结合大坝混凝土垂直运输设备的布置,控制阀室基础兼作塔机基础。根据现场地形,将阀门基础布置成衡重式挡墙结构,并与下游山体间封闭。在控制阀室基础顶 1 034.5 m 高程处可以形成一个不规则的三角形回填平台,既简化了坝后交通连接设计,还为阀门设备的安装提供场地。

6.2 放空建筑物设计

放空管布置于位于主河床的 6#坝段,结合上部外挑溢流堰的设计,将出口结构布置于外挑堰体轮廓范围以内,既可确保上部溢洪道的下泄水流不会跌流至放空管出口段,又能保证放空管出水能够进

入水垫塘,避免对岸坡的冲刷。放空管进口底坎高程1 017.0 m,放空率达98%。考虑到放空管使用频率不高,借鉴国内已建工程经验^[11-12],进口不设置检修门仅设钢筋拦污网,出口设锥形阀控制并辅以消能,锥形阀前设置可靠性相对更高的偏心半球阀作为检修阀。DN1200主管在检修阀后引出一DN300的支管作为生态环境放水管,出口设锥形阀予以控制。

6.3 构造设计

大坝坝顶不设防浪墙,下游侧设置3.5 m宽的行车道。横缝采用铅直缝,横缝间距控制在20 m以内。横缝方向为沿1 048 m高程拱圈中心线的径向,底部缝面与基础面正交。横缝面设置球形键槽,并埋设灌浆系统。横缝上游面设置两道止水,横缝下游面1 015 m以下设置两道止水,1 015 m以上仅设置一道橡胶止浆片。

接缝灌浆沿河流向不分区,沿高度方向分为7个灌浆区,灌区高度,除顶层为15 m外其余各层均为12 m。接缝灌浆管路系统采用“进回浆管+塑料拔管”,即升浆和出浆设施采用拔塑料管方式。

基础灌浆廊道,主要布置于2#—9#坝段,河床处廊道底板高程为995.0 m。1 009 m高程处左岸、1 034.5 m高程处左、右岸分别设一个出坝交通兼观测廊道。

在拱坝体形之外,上、下游坝体与开挖岩体间的三角形狭小区域内直接浇筑混凝土形成贴角^[13]。上、下游贴角顶宽分别按照不小于1.0 m、1.5 m控制。为便于施工,坝后交通以水平交通桥为主,结合放空管和引水管布置,共设置2层,高程分别为1 016.4 m、1 034.5 m。坝顶和坝后水平交通系统的连接通过坝趾贴角处的踏步来实现。

7 结 语

三岔河水库大坝所处河谷狭窄,坝基岩体为白云岩,坝址区无较大地质构造,适宜建设混凝土拱坝。设计根据地形地质条件及自身特点,开展了一系列优化设计,枢纽布置紧凑,坝体混凝土总方量仅10万m³,取得了较好的效果,可供类似工程参考。

三岔河水库工程主体工程于2015年初开工,目前,三岔河水库大坝混凝土已经完成85%,预计2019年9月份全线浇筑到顶。截止目前为止,大坝混凝土未出现一条裂缝。

参考文献:

- [1] 上海勘测设计研究院. 贵州省开阳县三岔河水库工程初步设计报告[R]. 上海:上海勘测设计研究院,2014.
- [2] 刘国华,吴党中,王茂荣. 拱坝优化时建基面岩体变模的合理选用[J]. 四川大学学报(工程科学版),2011,43(6):48-52.
- [3] 孙林松,孔德志. 基础变形模量不确定条件下的拱坝体形稳健可行性优化设计[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):61-64.
- [4] 杨珂,钱丽云. 等效应力在拱坝应力分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):179-182.
- [5] 上海勘测设计研究院有限公司. 混凝土拱坝设计规范:SL 282—2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018:9-10.
- [6] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 溢洪道设计规范:SL 253—2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018:16-17.
- [7] 宁利中. 水垫消能的水力计算问题讨论[J]. 水利与建筑工程学报,2004,2(2):24-27.
- [8] 上海勘测设计研究院有限公司. 贵州省开阳县三岔河水库工程大坝混凝土温度控制施工技术要求[R]. 上海:上海勘测设计研究院有限公司,2017.
- [9] 中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥:GB 200—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [10] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 水利水电工程进水口设计规范:SL 285—2003[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003:7-9.
- [11] 马以超,陈舟. 下岸水库工程设计[J]. 小水电,2007(4):25-27.
- [12] 徐建军,徐建荣,何明杰. 周公宅水库混凝土双曲拱坝体形优化设计[J]. 水力发电,2010,36(8):31-34.
- [13] 水利部水利水电规划设计总院. 水工设计手册:第五卷 混凝土坝[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2011:222.