

杨房沟拱坝施工图阶段体形优化分析

马腾, 杨田

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610021)

摘要:在招标设计的基础上对杨房沟拱坝的拱冠梁剖面、水平拱圈中心角、坝体厚度等方面进行深化研究,采用拱梁分载法进行坝体应力分析,结果表明在维持拱冠梁剖面和坝体厚度与招标设计基本一致的基础上,适当减小上部高程拱圈中心角、增大中下部高程拱圈中心角,有利于改善坝体应力状态。

关键词:材料参数;计算工况;荷载组合;优化分析

中图分类号: [TM622];TV642.4;N945.15

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)02-0154-06

0 引言

施工图阶段,为探寻适应杨房沟坝址地形地质条件和水库运行特点的拱坝体形,以充分发挥混凝土优良的抗压性能,减小主要运行工况高拉应力值及高拉应力区范围,使坝体应力分布更合理,并进一步提高两岸坝肩拱座的抗滑稳定性,在充分吸收前期有关专题、可研和招标设计报告研究成果,及历次审查、咨询会议中专家对拱坝设计工作的意见的基础上,借鉴国内其它高拱坝工程的成功设计经验,对杨房沟拱坝体形进行了进一步的设计和深化研究。

杨房沟拱坝体形的深化研究采用了拱梁分载法^[1]进行坝体应力分析,计算程序应用浙江大学水工结构研究所编制的“拱坝分析与优化软件系统 ADAO”^[2],主要分三步进行:

(1)对拱冠梁剖面进行优选,拟定不同拱冠梁剖面,分析应力变化规律,从中选择较能体现优化目的的拱坝初始体形;

(2)在拱坝初始体形的基础上,针对招标设计阶段两岸坝肩抗滑稳定控制性的可能滑动块体分布高程,进行水平拱圈中心角的优化,适当减小局部高程水平拱圈中心角,使拱坝体形扁平化,以有利于提高坝肩抗滑稳定性,同时研究进一步减小坝体最大拉应力的可行性;

(3)选定拱冠梁剖面及水平拱圈中心角后,

研究对坝体中下部厚度进行适当优化调整的可行性^[3]。

1 工程概况

杨房沟水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内的雅砻江中游河段上,是规划中该河段的第6级水电站,一等大(1)型工程,电站总装机容量为1 500 MW。

枢纽主要建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物及引水发电系统等组成。挡水建筑物采用混凝土双曲拱坝,坝顶高程2 102 m,最大坝高155 m。招标设计阶段拱冠梁顶厚9 m、底厚32 m,厚高比0.206;最大拱端厚度34.96 m,最大中心角87.01°。坝顶中心线弧长362.17 m,弧高比2.34,共分为18个坝段。

杨房沟水电站坝址两岸岸坡陡峻,呈“V”型峡谷;坝基岩性为花岗闪长岩,岩质坚硬,岩体较完整,风化卸荷较弱,岩体质量较好;两岸岩体结构面规模均较小,且以中陡倾角为主,坝肩抗滑稳定条件较好,具备修建拱坝较优的地形地质条件。

2 材料参数

2.1 坝体混凝土材料参数

杨房沟拱坝混凝土为大体积混凝土,共分2个区,强度等级分别为A区C₁₈₀30、B区C₁₈₀25。结合试验成果和类似工程经验,拱坝混凝土静态变形模量取22 GPa,主要物理力学参数见表1。

表1 坝体混凝土主要物理力学参数

部位	容重 /kg·m ⁻³	变模 /GPa	泊松比	线膨胀系数 /(10 ⁻⁶ /℃)	导温系数 /m ² ·h ⁻¹
坝体	2 400	22	0.167	10	0.004 2

2.2 坝基材料参数

收稿日期:2017-03-16

为更加真实地反映拱坝坝基的复杂条件,本文通过有限单元法建立地基模型,在地质建议分类岩体变形参数的基础上,充分考虑岩体风化卸荷分区、主要结构面、坝基开挖及处理等多方面因素,分别计算出各特征高程的水平拱向和垂直梁向的变形,再通过应变能相等原理求出相应的水平拱向和垂直梁向的坝基综合变形模量,最后综

合两个方向的综合变形模量得出相应高程的坝基综合变形模量,见表 2,坝基主要物理力学参数见表 3。

3 计算工况及荷载组合

3.1 计算工况

采用 4 种工况进行对比计算分析,其荷载组合情况详见表 4。

表 2 各特征高程坝基综合变形模量

高程 /m	2 102	2 080	2 060	2 040	2 020	2 000	1 980	1 960	1 947
左岸	10.4	11.2	11.7	12.5	12.5	13.6	14.7	15	16
右岸	10.7	11.4	12.1	12.4	12.6	13.3	13.6	13.9	16

表 3 坝基主要物理力学参数

部位	容重 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	变模 /GPa	泊松比	线膨胀系数 / $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	导温系数 / $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$
坝基	2 700	/	0.22	6.79	0.087

表 4 荷载组合表

计算工况	自重	静水压力	温度荷载		扬压力	泥沙压力	浪压力	动水压力
			温降	温升				
工况 1 竣工	√							
工况 2 正常蓄水位 + 温降	√	√	√		√	√	√	
工况 3 正常蓄水位 + 温升	√	√		√	√	√	√	
工况 4 设计洪水位 + 温升	√	√		√	√	√	√	√

3.2 计算荷载

3.2.1 水、沙荷载

(1) 正常蓄水位 2 094 m, 相应的下游尾水位 1 987.58 m;

(2) 设计洪水位 2 096.27 m, 相应的下游尾水位 1 998.51 m;

(3) 上游淤沙高程 2 016.36 m, 浮容重 5 kN/ m^3 , 摩擦角 0° 。

3.2.2 温度荷载

根据坝址区水文气象资料分析,坝面边界气温、水温见表 5、6。

通过对坝址气温、水温的分析,结合坝体施工条件,优化得出坝体封拱温度,并按照《混凝土拱坝设计规范》(DL/T5346-2006)推荐公式,得出拱冠梁剖面各个设计高程的温度荷载,见表 7。

表 5 与空气接触的坝面边界温度 / $^{\circ}\text{C}$

多年平均气温	日照对多年平均温度的影响		气温年变幅		日照对气温年变幅的影响
	上游面	下游面	温升	温降	
16.5	2	2	5.3	8.2	1

表 6 与水接触的坝面边界温度 / $^{\circ}\text{C}$

多年平均库表水温	日照对多年平均库表水温的影响	库表水温年变幅		日照对库表水温年变幅影响	库底水温
		温升	温降		
16.5	2	6	7.5	1	10

表 7 各高程封拱温度及温度荷载表 / $^{\circ}\text{C}$

高程 /m	2 102	2 080	2 060	2 040	2 020	2 000	1 980	1 960	1 947	
封拱温度	15	15	14	14	13	13	13	12	12	
正常水位 + 温降	Tm	-2.33	-0.68	-0.29	-0.61	0.29	0.22	-0.14	0.16	-0.05
	Td	0	-0.33	1.06	2.36	3.18	3.62	3.6	2.94	2.86
正常水位 + 温升	Tm	6.82	2.81	2.04	1.28	1.91	1.62	0.96	0.87	0.49
	Td	0	5.57	9.24	10.39	10.74	11.17	9.67	6.88	5.85
设计水位 + 温升	Tm	6.82	2.57	1.94	1.24	1.89	1.62	0.38	0.69	0.45
	Td	0	6.21	9.48	10.5	10.79	11.17	8.19	6.32	5.61

注: Tm 表示均匀温差, Td 表示线性温差

4 优化分析

4.1 拱冠梁剖面优化

为进一步降低大坝上游面拉应力数值及分布范围,考虑适当调整拱坝拱冠梁剖面,使拱坝适当

前倾,从而改善坝体应力状态。在招标设计拱坝体形的基础上,拟定了三种拱冠梁剖面方案,见表 8 和图 1(虚线为招标设计体形拱冠梁剖面),以搜寻拱冠梁剖面对拱坝体形应力的影响。

表 8 拱冠梁剖面优化方案

方案编号	具体优化内容
1	坝体中部向上游调整 2 m,上游面平均倒悬度由招标体形的 0.153 增大至 0.17
2	坝体中部向上游调整 2 m,坝体顶部向上游调整 2.5 m,上游面平均倒悬度由招标体形的 0.153 增大至 0.17
3	坝体中部保持不变,坝体顶部向上游调整 2.5 m,上游面平均倒悬度保持招标体形的 0.153 不变

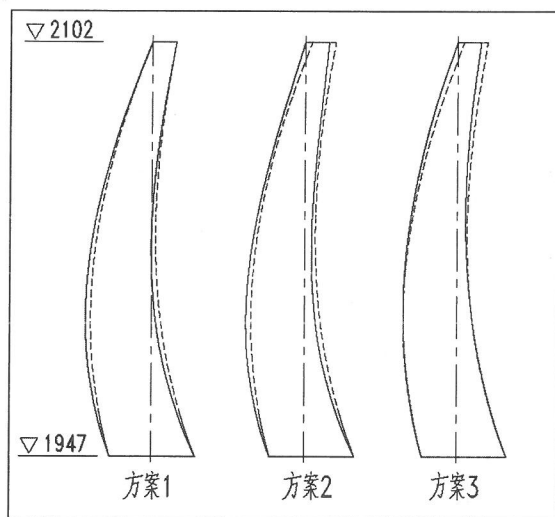


图 1 拱冠梁剖面优化方案

通过对 3 个不同拱冠梁剖面拱坝体形的应力分析表明,随着坝体拱冠梁剖面的前倾,竣工工况

(大坝浇筑并封拱到顶,未蓄水)坝踵处主压应力及坝趾处主拉应力均有明显增大,坝体整体应力水平提高;其它工况下,拱冠梁剖面前倾时,坝体主应力变化较小。因此施工图阶段拱坝坝体拱冠梁剖面基本维持与招标体形保持不变。

4.2 水平拱圈中心角优化

针对招标设计阶段两岸坝肩抗滑稳定控制性的可能滑动块体分布高程,进行水平拱圈中心角的优化,研究适当减小拱坝 2 040 m 高程以上特别是左岸水平拱圈中心角,使拱端推力向山内偏转、拱坝体形扁平化,以有利于提高坝肩抗滑稳定性,同时对拱坝 2 040 m 高程以下水平拱圈中心角进行适当调整,进一步减小坝体最大主拉应力数值和分布范围。因此在招标拱圈中心角基础上进行适当调整,优化出两个拱圈中心角方案,具体见表 11。

表 9 不同拱冠梁剖面方案坝体拉应力对比表

工 况	项 目	招标方案	方案 1	方案 2	方案 3
竣工工况	上游面	数值 0.79	1.01	0.76	0.55
	部位	2 040 m 拱冠	2 040 m 拱冠	2 040 m 拱冠	2 040 m 拱冠
	下游面	数值 0.97	1.77	1.91	1.22
	部位	1 947 m 拱冠	1 947 m 拱冠	1 947 m 拱冠	1 947 m 拱冠
正常蓄水位 + 温降	上游面	数值 0.75	0.8	0.81	0.7
	部位	1 980 m 右拱端	2 000 m 右拱端	1 980 m 右拱端	2 000 m 右拱端
	下游面	数值 0.23	0.24	0.24	0.29
	部位	1 960 m 拱冠右	1 960 m 拱冠右	1 960 m 拱冠右	1 960 m 拱冠右
正常蓄水位 + 温升	上游面	数值 0.95	1	0.99	0.91
	部位	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端
	下游面	数值 0	0	0	0
	部位	/	/	/	/
设计洪水位 + 温升	上游面	数值 0.98	1.04	1.03	0.94
	部位	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端
	下游面	数值 0	0	0	0
	部位	/	/	/	/

方案 1:上部高程中心角在招标拱圈中心角方案基础上减小约 0.4°~0.6°,中下部高程中心

角在招标拱圈中心角方案基础上增大约 0.3°~0.7°,坝体最大中心角为 86.80°,出现在 2 020

表 10 不同拱冠梁剖面方案坝体压应力对比表

/MPa

工 况	项 目	招标方案	方案 1	方案 2	方案 3	
竣工工况	上游面	数值	6.24	7.12	7.28	6.42
		部位	1 947 m 拱冠	1 947 m 拱冠	1 947 m 拱冠	1 947 m 拱冠
	下游面	数值	3.55	3.87	3.74	3.21
		部位	2 000 m 拱冠	2 000 m 拱冠	2 000 m 拱冠	2 020 m 拱冠
正常蓄水位 + 温降	上游面	数值	4.13	4.11	4.12	4.14
		部位	2 020 m 拱冠	2 040 m 拱冠右	2 020 m 拱冠	2 020 m 拱冠
	下游面	数值	5.5	5.54	5.54	5.45
		部位	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端
正常蓄水位 + 温升	上游面	数值	3.36	3.33	3.35	3.37
		部位	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右
	下游面	数值	5.77	5.8	5.81	5.75
		部位	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端	2 020 m 左拱端
设计洪水位 + 温升	上游面	数值	3.47	3.44	3.45	3.47
		部位	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右
	下游面	数值	5.92	5.95	5.95	5.91
		部位	2 020 m 左拱端	2 020 m 左拱端	2 020 m 左拱端	2 020 m 左拱端

表 11 不同拱圈中心角方案对比表

/°

高 程	左 岸			右 岸		
	招标方案	方案 1	方案 2	招标方案	方案 1	方案 2
2 102 m	38.652	38.652	38.652	39.957	39.957	39.957
2 080 m	40.458	40.050	39.701	42.23	41.745	41.374
2 060 m	41.783	41.253	40.814	43.667	43.043	42.553
2 040 m	42.489	42.079	41.75	44.532	44.043	43.682
2 020 m	42.262	42.214	42.229	44.687	44.581	44.505
2 000 m	40.813	41.187	41.65	43.059	43.39	43.712
1 980 m	36.376	37.063	37.777	38.86	39.516	40.073
1 960 m	28.013	28.488	28.969	30.605	31.073	31.394
1 947 m	20.051	20.051	20.051	20.178	20.178	20.179

m 高程;

方案 2:上部高程中心角在招标拱圈中心角方案基础上减小约 0.7°~1.1°,中下部高程中心角在招标拱圈中心角方案基础上增大约 0.7°~1.4°,坝体最大中心角为 86.73°,出现在 2 020 m 高程。

通过对 2 个不同拱圈中心角方案的坝体应力

分析表明,随着拱坝上部高程拱圈中心角的减小和中下部高程拱圈中心角的增大,坝体上游面最大主拉应力逐渐减小,高拉应力分布范围比招标拱圈中心角方案有所减小。因此,拟推荐拱圈中心角方案 2 作为施工图阶段拱坝拱圈中心角。见表 12、13

表 12 不同拱圈中心角方案坝体拉应力对比表

/MPa

工 况	项 目	招标方案	方案 1	方案 2	
正常蓄水位 + 温降	上游面	数值	0.87	0.75	0.7
		部位	1 980 m 右拱端	1 980 m 右拱端	2 020 m 右拱端
	下游面	数值	0.23	0.23	0.22
		部位	1 960 m 拱冠右	1 960 m 拱冠右	1 960 m 拱冠右
正常蓄水位 + 温升	上游面	数值	1.01	0.95	0.91
		部位	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端	2 020 m 右拱端
	下游面	数值	0	0	0
		部位	/	/	/
设计洪水位 + 温升	上游面	数值	1.05	0.98	0.95
		部位	2 000 m 右拱端	2 000 m 右拱端	2 020 m 右拱端
	下游面	数值	0	0	0
		部位	/	/	/

表 13 不同拱圈中心角方案坝体压应力对比表

/MPa

工 况	项 目	招 标 方 案	方 案 1	方 案 2	
正常蓄水位 + 温降	上游面	数值	4.11	4.13	4.14
		部位	2 020 m 拱冠	2 020 m 拱冠	2 020 m 拱冠
	下游面	数值	5.52	5.50	5.46
		部位	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端
正常蓄水位 + 温升	上游面	数值	3.34	3.36	3.37
		部位	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右
	下游面	数值	5.79	5.77	5.76
		部位	2 000 m 左拱端	2 000 m 左拱端	2 020 m 左拱端
设计洪水位 + 温升	上游面	数值	3.45	3.47	3.48
		部位	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右	2 020 m 拱冠右
	下游面	数值	5.91	5.92	5.93
		部位	2 000 m 左拱端	2 020 m 左拱端	2 020 m 左拱端

4.3 坝体厚度优化

选定拱冠梁剖面及水平拱圈中心角后, 研究对坝体中下部厚度进行适当优化调整的可行性, 并使坝体最大拉应力不致增大。现拟定两个坝体厚度方案, 见图 2。

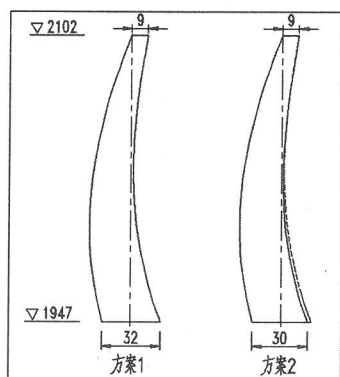


图 2 坝体厚度方案拱冠梁剖面

方案 1: 坝体拱冠梁底厚度保持 32 m 不变,

厚高比仍保持为 0.206 不变;

方案 2: 坝体拱冠梁底厚度由 32 m 减小为 30 m, 厚高比由 0.206 减小到 0.194, 坝体中下部高程拱冠梁及拱端厚度相应减小。

通过对 2 个不同坝体厚度方案的坝体应力对比分析表明, 随着拱坝坝体厚度的减小, 坝体上下游面最大主拉应力、最大主压应力数值及范围均有所增大, 坝体应力出现了恶化现象。不同坝体厚度方案分析见表 14、15、16。

5 结 论

通过对杨房沟拱坝进行拱冠梁剖面、水平拱圈中心角、坝体厚度进行调整和计算分析, 施工图阶段杨房沟拱坝体形在维持拱冠梁剖面和坝体厚度与招标拱坝体形基本一致的基础上, 适当减小上部高程拱圈中心角, 增大中下部高程拱圈中心

表 14 不同坝体厚度方案对比表

/m

高 程	左拱端厚度		拱冠梁厚度		右拱端厚度	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
2 102 m	11	11	9	9	11	11
2 080 m	14.04	13.95	13.44	13.4	14.76	14.45
2 060 m	17.63	17.15	17.02	16.82	18.85	17.83
2 040 m	21.62	20.6	20.23	19.78	23.16	21.28
2 020 m	25.65	24.09	23.12	22.37	27.3	24.63
2 000 m	29.36	27.38	25.76	24.66	30.87	27.72
1 980 m	32.38	30.26	28.21	26.76	33.47	30.38
1 960 m	34.36	32.5	30.53	28.74	34.72	32.45
1 947 m	34.9	33.5	32	30	34.61	33.4

表 15 不同坝体厚度方案坝体拉应力对比表

/MPa

工 况	项 目	坝体厚度方案 1	坝体厚度方案 2
正常蓄水位 + 温降	上游面	数值	0.7
		部位	2 020 m 右拱端
	下游面	数值	0.22
		部位	1 960 m 拱冠右
正常蓄水位 + 温升	上游面	数值	0.91
		部位	2 020 m 右拱端
	下游面	数值	0
		部位	/
设计洪水位 + 温升	上游面	数值	0.95
		部位	2 020 m 右拱端
	下游面	数值	0
		部位	/

表 16 不同坝体厚度方案坝体压应力对比表

/MPa

工 况	项 目	坝体厚度方案 1	坝体厚度方案 2
正常蓄水位 + 温降	上游面	数值	4.14
		部位	2 020 m 拱冠
	下游面	数值	5.46
		部位	2 000 m 左拱端
正常蓄水位 + 温升	上游面	数值	3.37
		部位	2 020 m 拱冠右
	下游面	数值	5.76
		部位	2 020 m 左拱端
设计洪水位 + 温升	上游面	数值	3.48
		部位	2 020 m 拱冠右
	下游面	数值	5.93
		部位	2 020 m 左拱端

角,有利于改善坝体应力状态。本文所得结论仅适用于杨房沟拱坝,是否具有普遍适用性仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 水规总院. 混凝土拱坝设计规范 DL/T5346-2006[S]. 中国电力出版社.
- [2] 黄熠辉,张伟狄,于青,等. 杨房沟水电站混凝土高拱坝体形设计[J]. 浙江水利科技,2016,(01):69-71.

- [3] 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,(08):31-34.

作者简介:

- 马 腾(1990-),男,河南夏邑人,武汉大学水工结构硕士,工程师,主要从事水电工程项目管理工作;
- 杨 田(1988-),男,四川达州人,四川大学水工结构硕士,工程师,主要从事水电工程项目管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

第十四届詹天佑奖颁奖大会在京举行

集团设计施工的瀑布沟水电站为唯一获奖水电工程

4月14日下午,第十四届中国土木工程詹天佑奖颁奖大会在北京隆重举行。中国电建成都院勘测设计、水电七局、水电五局承担施工的瀑布沟水电站获此殊荣,是29个获奖项目中唯一水电工程。本届詹天佑奖评选,坚持“数量少、质量高、程序规范”和“公开、公正、公平”的原则及严格的评选程序,从128个申报的优秀项目中,评选出了29个获奖项目,包括建筑工程9项,桥梁工程4项,铁道和隧道工程各2项,公路工程3项,水利水电和水运工程各1项,轨道交通工程3项,市政工程、燃气工程、住宅小区和国防工程各1项。这些项目在工程建设技术、建设理念、节能环保等方面都具有较大的创新。

深溪沟水电站获国家优质投资项目奖

日前,国电大渡河深溪沟水电站喜获国家优质投资项目奖,这是公司成立以来,首个获此殊荣的水电工程。国家优质投资项目奖由中国投资协会颁发,该奖项每2年组织评比1次,其评选条件严格,须符合国家产业发展政策,在自主创新、投资的质量和效益等方面处于同期同类投资项目的领先水平。深溪沟水电站为大渡河干流规划的第十八级电站,为河床式厂房枢纽工程,设计最大坝高49.5米,装机容量66万千瓦,设计年发电量32.35亿千瓦时,是瀑布沟水电站的反调节电站。