

网络出版时间:2013-05-02 10:55

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130502.1055.023.html>

基于等效应力法的不同拱圈厚度拱坝承载力仿真分析

李 斌¹, 李守义¹, 沙玉霞², 张晓飞¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 银川市水电勘测设计院, 宁夏 银川 750004)

【摘要】 **【目的】**研究 2 种不同体型拱坝在基本荷载和特殊荷载组合的几种工况下, 拱坝结构各个部位的受力和位移情况, 为拱坝在选型期体型的确定以及大坝运行期的极限承载力和破坏机理研究提供参考依据。**【方法】**应用大型有限元软件 ANSYS 建立拱坝三维有限元模型, 模拟并分析方案 1 和方案 2 不同体型坝体在各个工况下的应力应变情况, 利用有限元等效应力分析方法, 对计算结果进行二次计算, 以消除有限元计算中出现的应力集中现象。**【结果】**2 种不同体型坝体在工况 1 条件下, 除第 1 主拉应力外, 其他部位均满足基本荷载组合的拉应力控制标准, 第 3 主压应力均满足基本荷载组合的压应力控制标准; 使用等效应力法计算后, 方案 1 左右坝肩的应力集中范围由高程 1 134~1 146 m 变为高程 1 119~1 146 m。**【结论】**拱坝的坝体体型可以同时通过改变拱圈中心角和半径使坝体变薄, 在满足坝体稳定的前提下, 小圆心角薄体拱坝坝型受力状态更好, 不仅能充分发挥材料的抗压性能, 还能有效的减小坝体位移及拉应力区范围, 可以满足工程运行需求, 并符合应力控制标准的规定。

【关键词】 拱坝; 拱圈厚度; 应力应变; 有限元; 等效应力

【中图分类号】 O312.2; TV642.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)05-0219-09

Simulation of capacity for arch dam with different ring thickness using equivalent stress method

LI Bin¹, LI Shou-yi¹, SHA Yu-xia², ZHANG Xiao-fei¹

(1 College of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
2 Ningxia Water Resources Hydropower Survey Design Research Institute CO. LTD, Yinchuan, Ningxia 750004, China)

Abstract: **【Objective】** This paper studied the structure stress and displacement of two arch dams under basic load and special load combination of several conditions. **【Method】** Large-scale finite element software ANSYS was used to establish three dimension finite element model of arch dam, simulate and analyze the stress and strain of dam in different operating modes. The finite element analysis method of equivalent stress was used to do verification calculation and analysis to eliminate the problem of stress concentration. **【Result】** Under condition one, all parts of both dams met the basic load combination of tensile stress control standard except the first principal tensile stress and third principal compressive stress met the basic load combination stress control standard. Application of equivalent stress calculation, the concentration range of left and right dam shoulders for plan one changed from 1 134—1 146 m to 1 119—1 146 m. **【Conclusion】** The dam body can thin the dam body by changing the center arch angle and radius to be thinner. The dam body with small central angle thin arch dam has better stress state, not only can give full play to the compressive properties of materials and reduce the displacement and tensile stress area of dam, but also can meet the requirements of stress control.

【收稿日期】 2012-08-19

【基金项目】 陕西省重点学科建设项目(106-00X9030); 陕西省自然科学基金项目(2012JQ7008)

【作者简介】 李 斌(1984—), 男, 河北承德人, 在读博士, 主要从事水工结构数值仿真研究。E-mail: liam_fan@126.com

Key words: arch dam; arch ring thickness; stress and strain; finite element; equivalent stress

拱坝结构的优越性和安全性使其应用十分广泛,结构也向“扁”、“平”、“薄”迅速发展^[1]。国内外有关拱坝承载力的研究,大多集中于拱坝坝基坝肩稳定分析^[2-4],很少涉及相同拱坝体型在不同拱圈厚度时拱坝实际承载力的分析。较厚的拱圈厚度不仅浪费材料,而且施工过程中若处理不当会成为结构的薄弱点或薄弱面。为此,本研究基于有限元等效应力的方法^[5],对相同体型不同拱圈厚度拱坝的承载力进行了分析,以期以后同类型的拱坝设计提供依据,并为建成拱坝运行期极限承载力的确定提供参考。

1 计算方案及荷载组合

某水库修建混凝土拱坝,最大坝高 68.0 m,高比为 0.45,属厚拱坝,拱冠处坝底宽为 30.61 m;溢流坝段 2 孔孔口净宽 10 m,坝轴线为弧线;中墩上游宽 2.0 m,下游宽 1.0 m;边墩上游宽 3.185 m,下游宽 1.0 m。溢流坝段堰顶高程为 1 141.5 m,进

口为 1/4 椭圆,溢流面为幂曲线;挑流鼻坎顶高程 1 127.0 m,反弧半径 5 m,挑角 20°,幂曲线与反弧曲线采用 1:0.7 坡面衔接,上游面为铅直面,下游面挑流鼻坎以下坝坡为 1:0.25,坝基处底宽 24.30 m;坝轴线走向为 N65°W。

坝体采用定圆心变半径变中心角单曲拱坝,现分别计算方案 1 和方案 2 不同拱圈厚度的 2 个拱坝模型在各种工况下的坝体主应力、正应力分布和位移,方案 1 拱坝体型参数见表 1,方案 2 拱坝体型参数见表 2,不同工况时的荷载组合见表 3。

由于篇幅所限,文章只列举具有特点的 1、5、7 等 3 种工况的计算结果。

本研究计算采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 来模拟工程中的各种结构、材料和受力情况。经其他工程计算验证和对比分析可知,ANSYS 软件计算结果合理、可靠,其精度可以满足行业的需要^[6-7]。

表 1 方案 1 拱坝的体型参数

Table 1 Parameters of arch dam for plan one

拱圈编号 Arch ring serial number	高程/m Altitude	拱冠梁厚度/m Crown cantilever thickness	拱坝外半径/m Outer radius of arch dam	右岸半中心角/(°) Right half angle	左岸半中心角/(°) Left half angle	拱冠梁上游面 y 坐标/m Crown cantilever upstream y coordinates
1	1 146	5.00	110	42.87	42.87	0
2	1 141	5.30	110	42.87	42.87	0
3	1 130	6.95	110	38.84	32.17	0
4	1 119	9.70	110	35.05	25.54	0
5	1 108	13.80	110	31.91	19.09	0
6	1 097	19.39	110	27.34	13.06	0
7	1 086	25.81	110	19.59	7.43	0
8	1 078	30.61	110	11.96	3.52	0

表 2 方案 2 拱坝的体型参数

Table 2 Parameters of arch dam for plan two

拱圈编号 Arch ring serial number	高程/m Altitude	拱冠梁厚度/m Crown cantilever thickness	拱坝外半径/m Outer radius of arch dam	右岸半中心角/(°) Right half angle	左岸半中心角/(°) Left half angle	拱冠梁上游面 y 坐标/m Crown cantilever upstream y coordinates
1	1 146	5.00	110	39	39	0
2	1 141.5	6.0	110	38.452	38.452	0
3	1 130	8.56	110	34.486	35.136	0
4	1 119	11.2	110	30.690	33.254	0
5	1 108	14.2	110	27.548	29.747	0
6	1 097	18.5	110	22.982	23.092	0
7	1 086	23.5	110	15.695	11.442	0
8	1 078	27.5	110	8.803	0.00	0

表 3 不同工况时拱坝的荷载及其组合
Table 3 Load under different conditions

荷载 Load	工 况 Conditions						
	1	2	3	4	5	6	7
坝体质量 Mass of arch dam							
正常蓄水位水压力 Normal storage level water pressure	✓	✓				✓	✓
设计洪水位水压力 Design flood level water pressure			✓				
校核洪水位水压力 Checking flood level water pressure					✓		
死水位水压力 Fixed the water level water pressure				✓			
下游水压力 Downstream water pressure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
泥沙压力 Sediment pressure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
浪压力 Wave pressure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
冰压力 Ice pressure	✓					✓	
扬压力 Uplift pressure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
正常温升 Normal temperature rise		✓	✓	✓	✓		✓
正常降温 Normal temperature down	✓					✓	
地震惯性 The earthquake inertia						✓	✓
动水压力 Dynamic water pressure					✓	✓	✓

2 计算假定与计算模型

2.1 计算假定

(1)假定材料为均质弹性、各向同性的连续体，不考虑混凝土的应力重分布。

(2)考虑地基边界辐射问题，坝基按照无质量地基考虑。

2.2 计算模型

选取整个坝段进行计算，地基向上游延伸 40.0

m,向下游延伸 80.0 m,基础向下延伸 100 m,左右坝肩各延伸 100 m。计算模型应用的坐标系为:水流方向为 X 轴方向,向下游为正;铅直方向为 Y 轴方向,向上为正;坝轴线方向为 Z 轴方向,向右岸为正。整体坐标系原点取在坝顶水平拱圈圆心处。

计算单元划分基本采用八节点六面体实体单元,部分可通过四面体实体单元过渡。节点和单元总数分别为 91 034 个和 105 757 个。有限元计算模型见图 1,大坝整体有限元模型见图 2。

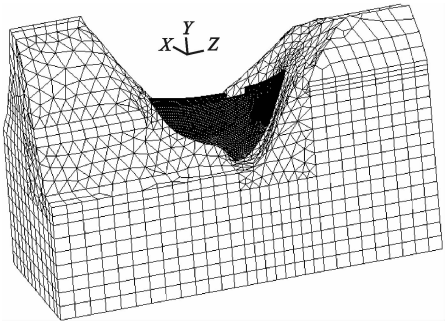


图 1 拱坝有限元计算模型单元剖分图
Fig.1 Unit division of finite element calculation model

2.3 边界条件

为了既能确保计算结果的可靠性和计算精度,又能简化计算过程中的繁琐性,对结构的边界条件进行了一些适当的、符合实际情况的假定及简化,即假定地基地面为固端约束,上游面和下游面为法向约束,左右坝肩为法向约束。

2.4 荷载施加

本次计算中荷载施加方式如下所述。

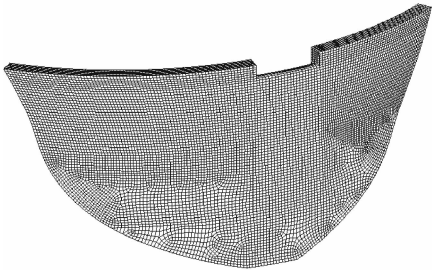


图 2 大坝整体有限元模型单元剖分图
Fig.2 Unit division of finite element model for the whole dam

(1)坝体质量。根据混凝土的重度,按惯性力 9.8 m/s² 施加在计算模型上;地基质量不予考虑。

(2)静水压力。坝体上游面,按上游水位施加静水压力;坝体下游面,按下游水位施加静水压力。水压力以函数形式施加在坝体上、下游面,水压力函数为 0.01×(y_l−y)MPa,其中 y 为计算点的 Y 向坐标,y_l 为水面线的 Y 向坐标。按上述方式施加静水压力后,不再考虑其他水力作用。

(3)扬压力。按文献[8]规定,坝基设有防渗帷幕和排水孔时,坝踵处的扬压力为作用水头 H_1 (上游水深),排水孔中心线处扬压力为 $H_2 + \alpha(H_1 - H_2)$,坝趾处扬压力为 H_2 (下游水深),其间依次以直线连接,折减系数 $\alpha=0.25$ 。

(4)泥沙应力。泥沙压力按浮体质量计算,与上游面静水压力叠加,施加到上游面上。

(5)温度荷载。按文献[8]规定,拱坝运行期温度荷载按公式(1)、(2)计算:

$$T_m = T_{m1} + T_{m2} - T_{m0} \quad (1)$$

$$T_d = T_{d1} + T_{d2} - T_{d0} \quad (2)$$

式中: T_m 、 T_d 分别为截面平均温度变化值和截面等效线性温度差变化值; T_{m0} 、 T_{d0} 分别为由坝体封拱温度场确定的截面平均温度和等效线性温差; T_{d1} 为

由坝体多年年平均温度场确定的截面等效线性温差,一般将 T_{d1} 与 T_{d0} 按相等考虑; T_{m1} 为坝体多年平均温度场确定的截面平均温度,可由公式(3)确定,考虑日照影响,增加 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; T_{m2} 、 T_{d2} 为坝体多年平均变化温度场确定的截面平均温度和等效线性温差。

$$T_{m1} = (T_{a7} - T_{a1}) / 2 \quad (3)$$

式中: T_{a7} 、 T_{a1} 分别为计算年 7 月份和 1 月份最高温度。

根据分层确定法确定本拱坝封拱温度为 $14.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9-10],取相同封拱温度和坝厚,比较方案 1 和方案 2 在不同工况下的温度荷载。各工况下温度荷载计算结果如表 4 所示。

表 4 不同工况及距坝顶不同高度处拱坝的温度荷载

方案与工况 Plan and condition		项目 Items	距坝顶高度/m Height from the dam top							
			0.00	4.50	16.00	27.00	38.00	49.00	60.00	68.00
方案 1 工况 1 Plan 1, condition 1	封拱温度/ $^{\circ}\text{C}$ Closed arch temperature		14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30
	坝厚/m Dam thickness		5.00	5.3	6.95	9.7	13.8	19.39	25.81	30.61
	上游面静水压力/MPa Upstream face hydrostatic pressure		13.15	10.71	6.48	3.14	0.36	-0.75	-1.11	-1.19
	下游面静水压力/MPa Downstream face hydrostatic pressure		13.15	11.92	10.19	7.19	6.15	5.12	4.27	3.80
方案 2 工况 3 Plan 2, condition 3	封拱温度/ $^{\circ}\text{C}$ Closed arch temperature		14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30
	坝厚/m Dam thickness		5.00	6.00	8.56	11.20	14.20	18.50	23.50	27.50
	上游面静水压力/MPa Upstream face hydrostatic pressure		-13.15	-10.37	-5.45	-2.12	-0.27	0.70	1.10	1.22
	下游面静水压力/MPa Downstream face hydrostatic pressure		-13.15	-11.27	-8.26	-6.49	-6.04	-5.29	-4.58	-4.13
方案 2 工况 5 Plan 2, condition 5	封拱温度/ $^{\circ}\text{C}$ Closed arch temperature		14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30
	坝厚/m Dam thickness		5.00	6.00	8.56	11.20	14.20	18.50	23.50	27.50
	上游面静水压力/MPa Upstream face hydrostatic pressure		13.15	9.70	5.12	1.94	0.17	-0.75	-1.13	-1.24
	下游面静水压力/MPa Downstream face hydrostatic pressure		13.15	11.23	8.31	6.57	6.09	5.32	4.60	4.14
方案 2 工况 7 Plan 2, condition 7	封拱温度/ $^{\circ}\text{C}$ Closed arch temperature		14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30
	坝厚/m Dam thickness		5.00	6.00	8.56	11.20	14.20	18.50	23.50	27.50
	上游面静水压力/MPa Upstream face hydrostatic pressure		13.15	10.15	5.29	2.03	0.22	-0.73	-1.12	-1.23
	下游面静水压力/MPa Downstream face hydrostatic pressure		13.15	11.25	8.29	6.53	6.07	5.31	4.59	4.14

(6)地震荷载。根据《中国地震震动参数区划图》(GB 18306-2001),坝址区内地震震动峰值加速度值为 $0.20\text{ }g$,地震震动反应谱特征周期为 0.35 s ,依据地震震动峰值加速度确定的本区地震基本烈度属Ⅷ度区,地震设防烈度为 8 度。根据要求,参照

文献[11]的相关规定,计算本拱坝的水平向和竖向地震作用效应,应将竖向地震作用效应乘以 0.5 的偶合系数后与水平向地震作用效应直接相加,即为总的地震作用效应。

2.5 有限元应力控制标准及抗压强度安全系数

及抗压强度安全系数,如表 5 所示。

根据文献[8]和[11]可得,拱坝的应力控制标准

表 5 拱坝的应力控制标准及抗压强度安全系数

荷载组合 Load combination	坝面主压应力/MPa Dam surface main stress	上游面主拉应力/MPa Upstream face principal tensile stress	下游面主拉应力/MPa Downstream face principal tensile stress	抗压强度安全系数 Compressive strength of the safety coefficient
基本组合 Basic combination	5.7	1.5	1.5	3.5
特殊组合(非地震) Special combination(No earthquake)	6.7	2.0	2.0	3.0
特殊组合(地震) Special combination(Earthquake)	10.4	2.1	2.1	

3 有限元计算分析

本研究的有限元计算中规定拉应力为正,压应力为负,应力单位为 MPa^[12-13],各工况的封拱温度拟定为 14.3℃。

3.1 工况 1 计算成果

工况 1 主要研究方案 1 拱坝在正常温降情况下坝体的应力分布,计算成果提供了拱坝坝体 X、Y、Z 向的位移云图和拱坝上、下游面第 1 主应力 S1 及第 3 主应力 S3 应力云图。由于篇幅所限,现列出 2 种不同体型方案的拱坝上游面 S1 向应力云图(图 3,4)。

3.1.1 方案 1 工况 1 X 向,拱冠梁向下游位移,

拱冠梁顶部最大位移值为 0.022 m;Y 向,拱坝整体向坝基方向位移,最大值为 0.007 7 m;Z 向,拱坝左、右坝肩向坝中心方向位移,最大值为 0.005 3 m。拱坝上游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处,分布范围为高程 1 134~1 146 m,坝体与坝基连接处出现大于 1.5 MPa 的拉应力;上游面第 3 主应力在拱坝上游面中心出现 2.1 MPa 的压应力。拱坝下游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处及溢流坝下游面局部范围内出现大于 1.5 MPa 的拉应力;下游面第 3 主应力在拱坝上游面顶部出现 0.3 MPa 的拉应力,在坝体与坝基连接部位出现 5.5 MPa 的压应力。

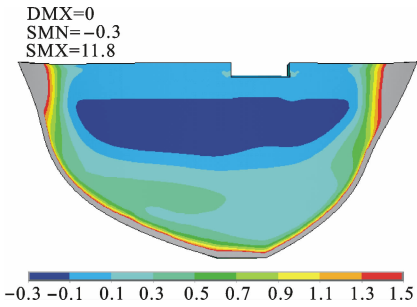


图 3 方案 1 工况 1 拱坝上游面 S1 向应力云图
Fig. 3 Stress nephogram for arch dam at condition 1 of plan 1

3.1.2 方案 2 工况 1 X 向,拱冠梁向下游位移,拱冠梁顶部最大位移值为 0.019 m;Y 向,拱坝整体向坝基方向位移,最大值为 0.007 m;Z 向,拱坝左、右坝肩向坝中心方向位移,最大值为 0.004 7 m。3 个方向上的位移与方案 1 相比都有减小。拱坝上游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处(分布范围为高程 1 131~1 146 m)及坝体与坝基连接处出现大于 1.5 MPa 的拉应力;上游面第 3 主应力在坝体与坝基连接处出现 1.0 MPa 的拉应力,在拱坝上游面中心出现 2.6 MPa 的压应力。拱坝下游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处及溢流坝下游面局部范围内

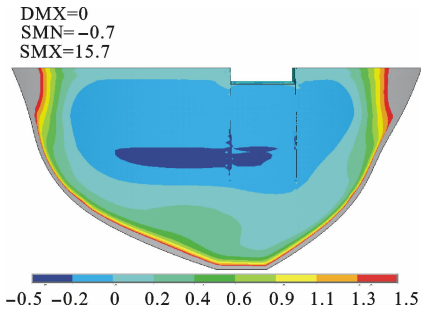


图 4 方案 2 工况 1 拱坝上游面 S1 向应力云图
Fig. 4 Stress nephogram for arch dam at condition 1 of plan 2

出现大于 1.5 MPa 的拉应力;下游面第 3 主应力在坝体与坝基连接处出现 5.2 MPa 的压应力,与方案 1 相比压应力减小 5.5%,无拉应力。

3.2 工况 5 计算成果

工况 5 主要研究方案 2 拱坝在校核水位温升情况下坝体的应力分布,在此条件下上游面的 S1 应力云图及其应力分布情况如图 5,6 所示。

3.2.1 方案 1 工况 5 X 向,拱坝中部向下游位移,最大值为 0.002 m;拱坝顶部向上游位移,最大值为 0.004 7 m。Y 向,拱冠梁底部向坝基方向位移,最大值为 0.001 5 m;拱冠梁顶部向上游位移,

最大值为 0.001 6 m。Z 向,拱坝向左、右坝肩方向位移,最大值为 0.002 4 m。拱坝上游面第 1 主应力在坝体与坝基连接处出现大于 1.5 MPa 的拉应力,上游面第 3 主应力在坝顶左、右坝肩处出现大于 5.7 MPa 的压应力。拱坝下游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处局部范围内出现 0.9 MPa 的拉应力;下游面第 3 主应力在坝体与坝基连接部位出现 4.8 MPa 的压应力。

3.2.2 方案 2 工况 5 X 向,拱坝中部向下游位移,最大值为 0.002 2 m;拱坝顶部向上游位移,最大值为 0.003 9 m。Y 向,拱冠梁底部向坝基方向位

移,最大值为 0.001 473 m;拱冠梁顶部向上位移,最大值为 0.001 58 m。Z 向,拱坝整体向坝中心方向位移,最大值为 0.002 3 m。除拱坝中部向下游位移外,其他方向上的位移与方案 1 相比都有减小。拱坝上游面第 1 主应力在坝体与坝基连接处出现大于 2.0 MPa 的拉应力;上游面第 3 主应力在坝顶左、右坝肩处出现大于 6.7 MPa 的压应力。拱坝下游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处局部范围内出现 0.9 MPa 的拉应力;下游面第 3 主应力在坝体与坝基连接部位出现 4.5 MPa 的压应力,与方案 1 相比压应力减小 6.3%。

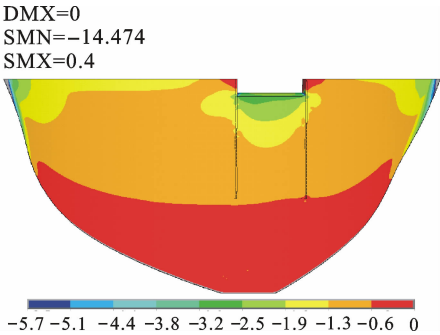


图 5 方案 1 工况 5 拱坝上游面 S1 向应力云图
Fig. 5 Stress nephogram for arch dam at condition 5 of plan 1

3.3 工况 7 计算成果

工况 7 主要研究方案 2 拱坝在正常温升、地震

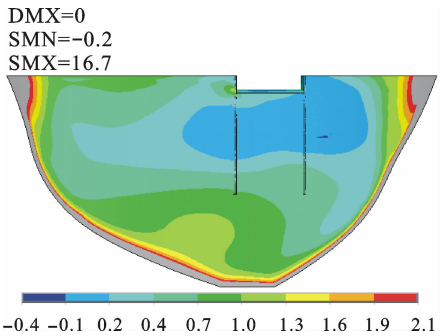


图 7 方案 1 工况 7 拱坝上游面 S1 向应力云图
Fig. 7 Stress nephogram for arch dam at condition 7 of plan 1

3.3.1 方案 1 工况 7 X 向,拱冠梁向下游位移,拱冠梁顶部最大位移值为 0.028 m。Y 向,在拱冠梁底部向上游位移,最大值为 0.001 9 m;拱冠梁顶部向下游位移,最大值为 0.005 1 m。Z 向,左、右坝肩向坝中心方向位移,最大值为 0.005 7 m。拱坝上游面第 1 主应力在坝顶左右坝肩处(分布范围为高程 1 133~1 146 m)及坝体与坝基连接处出现大

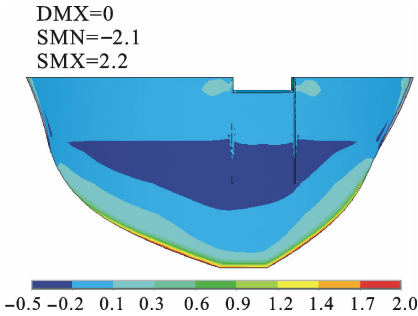


图 6 方案 2 工况 5 拱坝上游面 S1 向应力云图
Fig. 6 Stress nephogram for arch dam at condition 5 of plan 2

荷载情况下坝体的应力分布,在此条件下拱坝上游面 S1 应力云图及其应力分布情况如图 7,8 所示。

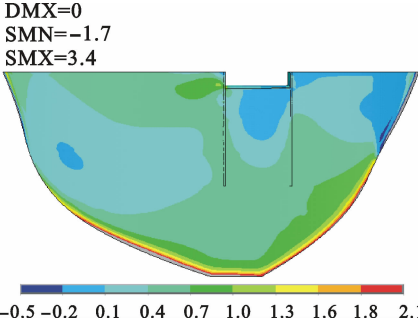


图 8 方案 2 工况 7 拱坝上游面 S1 向应力云图
Fig. 8 Stress nephogram for arch dam at condition 7 of plan 2

于 2.1 MPa 的拉应力;上游面第 3 主应力在坝体与坝基连接部位出现 0.3 MPa 的拉应力,在拱坝上游面中心出现 1.5 MPa 的压应力。拱坝下游面第 1 主应力在坝顶左、右坝肩处以及溢流坝下游面局部范围内出现大于 2.10 MPa 的拉应力;下游面第 3 主应力在拱坝上游面顶部出现 0.2 MPa 的拉应力,在坝体与坝基连接处出现 4.5 MPa 的压应力。

3.3.2 方案2工况7 X向,在拱冠梁底部向下游位移,最大值为0.006 m;拱坝顶部向上游位移,最大值为0.000 8 m。Y向,在拱冠梁底部向坝基方向位移,最大值为0.001 5 m;拱冠梁顶部向上游位移,最大值为0.002 6 m。Z向,拱坝向左、右坝肩方向位移,最大值为0.002 9 m。3个方向上的位移与方案1相比,X向位移减小了71.4%,Y向位移减小了约50%,Z向位移减小了约50%。拱坝上游面第1主应力在坝体与坝基连接处出现大于2.1 MPa的拉应力;上游面第3主应力在坝顶左、右坝肩处出现大于8.0 MPa的压应力,无拉应力。拱坝下游面第1主应力在坝顶左、右坝肩处局部范围内出现1.8 MPa的拉应力;下游面第3主应力在坝体与坝基连接处出现5.0 MPa的压应力,无拉应力。

4 有限元等效应力分析

4.1 有限元等效应力分析

根据有限元法计算的应力分量,沿拱、梁断面积分可以得到内力(集中力和力矩),但有限元法计算拱坝得到的是整体坐标系(x',y',z')中的应力,在水平拱圈中心线的结点上建立局部坐标系(x,y,z),其中 x 轴平行于拱中心线的切线方向, y 轴平行于半径方向, z 轴为垂直方向,原点在中心线上,计算时应注意局部坐标系(x,y,z)与整体坐标系(x',y',z')的关系^[14]。

利用拱与梁的内力及可用材料力学的方法,计算梁截面和拱截面上的等效正应力和剪应力,由此再计算坝体等效主应力,从而可以消除应力集中的影响。

4.2 等效应力的实现

在一般的等效应力计算中,可以将路径上节点的坐标和应力值提取出来,再用fortran、matlab、excel等进行编程计算,但是这种处理方法不仅工作量大,且精度很难得到保证^[15]。在ANSYS中可以把路径分成任意段进行积分运算,以消除有限元计算中出现的应力集中现象。在有限元计算模型上取出边界单元组,将结果坐标系移到边界线的中间单元节点,以 X 为切向、 Y 为径向、 Z 为竖直向,再将应力分量沿边界路径进行积分,得到内力,再用有关材料力学公式计算坝体上、下游面的应力(由于篇幅所限公式就不再列举)。为了方便地处理多组结果,可以将计算等效应力的程序用ANSYS的APDL语言编制一个宏^[16],在具体计算时只需调用该宏,并将上、下游面及中间节点号和上、下游水位作为输入参数。

4.3 方案2各工况等效应力

方案2各工况上游面第1主应力的等效应力计算结果见表6~8。

4.3.1 方案2工况1的等效应力 由表6可知,方案2工况1的第1主应力在拱坝上游面左、右坝肩高程1 119~1 146 m部位产生大于1.5 MPa的拉应力,在拱坝下游面左、右坝肩高程1 130~1 146 m部位拉应力均大于1.5 MPa,不满足基本荷载组合的拉应力控制标准,而其他部位均满足基本荷载组合的拉应力控制标准;第3主应力压力均满足基本荷载组合的压应力控制标准。因此,需要降低拱坝上部的封拱温度或者改变坝体体型来降低拱坝上部左、右坝肩的第1主应力的拉应力。

表6 方案2工况1条件下拱坝上游面第1主应力等效应力的计算结果

Table 6 Upper surface first principal stress equivalent stress of plan 2 under condition 1		MPa														
拱圈编号 Arch ring number	高程/m Altitude	上游面不同梁第1主应力 Upper surface first principal stress														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1 146	7.2														7.5
2	1 141.5		5.6												5.4	
3	1 130			2.6										2.6		
4	1 119				1.8								1.4			
5	1 108					1.3						1.0				
6	1 097						0.8				1.0					
7	1 086							0.5		1.0						
8	1 078								0.4							

注:拱圈编号从顶拱到底拱,梁编号从右岸到左岸;拉应力为正,压应力为负。下表同。
Note:The ring number from top arch to floor arch,beam number from right to left;tensile stress is compressive, stress is negative. The same as in the following table.

4.3.2 方案2工况5的等效应力 从表7可知,方案2工况5的第1主应力产生了小于2.0 MPa的

拉应力,满足特殊荷载组合的拉应力控制标准;第 3 主应力在拱坝上游面左坝肩高程 1 146 m 处产生了大于 6.7 MPa 的压应力,不满足特殊荷载组合的压应力控制标准,其他部位均满足特殊荷载组合的压应力控制标准。因此,需要增加坝顶厚度或提高坝顶封拱温度,从而减小坝顶左、右坝肩的主压应力。

表 7 方案 2 工况 5 条件下拱坝上游面第 1 主应力等效应力的计算结果

Table 7 Upper surface first principal stress equivalent stress of plan 2 under condition 5																MPa
拱圈编号 Arch ring number	高程/m Altitude	上游面不同梁第 1 主应力 Upper surface first principal stress														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1 146	-1.4														-1.8
2	1 141.5		-1.4													-1.3
3	1 130			-1.0											-1.3	
4	1 119				-0.1								-0.3			
5	1 108					0.5						0.2				
6	1 097						0.6				0.5					
7	1 086							0.5		0.5						
8	1 078								0.3							

表 8 方案 2 工况 7 条件下拱坝上游面第 1 主应力等效应力的计算结果

Table 8 Upper surface first principal stress equivalent stress of plan 2 under condition 7																MPa
拱圈编号 Arch ring number	高程/m Altitude	上游面不同梁第 1 主应力 Upper surface first principal stress														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1 146	-1.4														-1.8
2	1 141.5		-1.5													-1.3
3	1 130			-1.3											-1.0	
4	1 119				-0.2								-0.1			
5	1 108					0.9						0.3				
6	1 097						1.0				0.5					
7	1 086							1.0		0.8						
8	1 078								0.7							

5 结 论

根据有限元计算成果,可以得出以下结论与建议:

(1)温度对拱坝应力分布影响很大。温度降低时,拱坝向下游变形,坝体收缩;温度升高时,拱坝向上游变形,坝体膨胀。由此可知,温度降低使坝体拉应力增大,温度升高使坝体压应力增大。建议在拱坝 1 130.0 m 高程以上,将左、右坝肩局部加厚,降低 1 108 m 高程以上范围坝体的封拱温度,从而可降低该部位拱端应力。

(2)一般情况下,加大中心角可以减小拱圈厚度,但是在本研究中,由于拱坝最大应力一般出现在坝高 1/3~1/2 处,在一定条件下既可减小中心角又可减小拱圈厚度。方案 2 的薄壁拱结构承受轴向推

4.3.3 方案 2 工况 7 的等效力 从表 8 可知,方案 2 工况 7 的第 1 主应力在拱坝上游面左、右坝肩高程 1 119~1 146 m 部位产生了小于 2.1 MPa 的拉应力,满足地震荷载组合的拉应力控制标准;第 3 主压应力均小于 10.4 MPa,满足地震荷载组合的压应力控制标准。

力的作用发挥得更充分,并且充分地发挥了混凝土材料抗压强度高的特性;拱圈中段曲率较大,向两侧逐渐减小,拱圈中的压力线接近中心线,拱端推力方向与岸坡线的夹角增大,拱圈中间部分接近于均匀受压,有利于改善拱端和两岸连接,提高拱坝坝体的稳定性。

(3)方案 1 和方案 2 在工况 1 条件下计算的应力和位移相同,说明正常蓄水位+泥沙压力+坝体质量+正常温降+扬压力荷载条件下,在满足拱坝坝体稳定性的前提下,薄壁体型拱坝和厚壁坝体拱坝具有相同的承担荷载的能力,但随着荷载条件的变化,薄壁型拱坝的强度优势逐渐体现,混凝土材料的特性得以充分发挥,并且能有效控制拉应力区和坝体位移的出现。

(4)方案 2 使用等效应力法计算后,使得应力集

中现象得以消除或缓解。工况 1 条件下,拉应力大于 1.5 MPa 应力集中范围由 1 131~1 146 m 变为 1 130~1 146 m;工况 5 条件下,计算得到第 1 主应力在左、右坝肩产生的拉应力小于 2.0 MPa,而压应力大于 6.7 MPa 处在高程 1 146 m 以上;工况 7 条件下,计算得到第 1 主应力在左、右坝肩产生的拉应力小于 2.1 MPa,第 3 主应力在坝顶左、右坝肩处出现小于 10.4 MPa 的压应力,符合应力控制标准。

[参考文献]

- [1] 李 瓚,陈 飞,郑建波,等. 特高拱坝枢纽分析与重点问题研究 [M]. 北京:中国电力出版社,2004:182-221.
Li Z,Chen F,Zheng J B,et al. Special high arch dam pivot and key [M]. Beijing:China Power Press,2004:182-221. (in Chinese)
- [2] Li S Y,Ding L J,Zhao L J,et al. Optimization design of arch dam shape with modified complex method [J]. Advances in Engineering Software,2003,40:804-808.
- [3] 李 海. 长坝双曲拱坝结构分析研究 [D]. 广西:广西大学,2009.
Li H. Structure analysis of Chang tong double arch dam. [D]. Guangxi:Guangxi University,2009. (in Chinese)
- [4] 唐 岗. 源口拱坝加高加固应力稳定分析 [D]. 广西 南宁:广西大学,2008.
Tang G. Stress and stability analysis of Yuankou arch dam heightening and strengthening [D]. Nanning,Guangxi:Guangxi University,2008. (in Chinese)
- [5] 李守义,周 伟,苏礼邦,等. 基于 ANSYS 的拱坝等效应力研究 [J]. 水力发电学报,2007,26(5):38-41.
Li S Y,Zhou W,Su L B,et al. Study on equivalent stresses of arch dams based on ANSYS software [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(5):38-41. (in Chinese)
- [6] 博弈创作室. ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:69-72.
Game Brand. ANSYS 9.0 classic product advanced analysis technology and example explanation [M]. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2005:69-72. (in Chinese)
- [7] 叶裕明,刘春山,沈火明. ANSYS 土木工程应用实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:52-58.
Ye Y M,Liu C S,Shen H M. ANSYS civil engineering application examples [M]. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2005:52-58. (in Chinese)
- [8] 上海勘测设计研究院. 混凝土拱坝设计规范 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:74-80.

- Shanghai Investigation,Design & Research Institute. The concrete arch dam design specifications [M]. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2003:74-80. (in Chinese)
- [9] 赵靖伟,张 博,周邻鹏. 碾压混凝土拱坝封拱温度场的仿真分析 [J]. 水资源与水工程学报,2011,22(3):126-131.
Zhao J W,Zhang B,Zhou L P. Simulation analysis of arch-closure temperature of RCC arch dam [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2011,22(3):126-131. (in Chinese)
- [10] 周筑宝,卢楚芬. 拱坝封拱温度的分层确定法 [J]. 水力发电学报,1990(4):71-78.
Zhou Z B,Lu C F. Arch dam temperature stratification determination method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,1990(4):71-78. (in Chinese)
- [11] 中国水利水电科学研究院. 水工建筑物抗震设计规范 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1997:41-46.
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The standard a anti-seismic design of hydraulic structure [M]. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,1997:41-46. (in Chinese)
- [12] 宋佩峰. 有限元法在拱坝体形优化设计中的应用研究 [D]. 陕西 西安:西安理工大学,2007.
Song P F. The application of finite element method in shape optimization of arch dam [D]. Xi'an,Shaanxi:Xi'an University of Technology,2007. (in Chinese)
- [13] 刘建雄. 基于遗传算法的三心圆拱坝体形优化研究 [D]. 陕西 西安:西安理工大学,2007.
Liu J X. Optimum design for shape of three-center arch dams based on genetic arithmetic [D]. Xi'an,Shaanxi:Xi'an University of Technology,2007. (in Chinese)
- [14] 宋佩峰,李守义,王新慧. 有限元等效应力在拱坝体形优化设计中的应用 [J]. 电网与水力发电进展,2007,23(6):55-58.
Song P F,Li S Y,Wang X H. Application of equivalent finite element stresses in shape optimization of arch dam [J]. Development of Grid and Power,2007,23(6):55-58. (in Chinese)
- [15] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:50-55.
Game Brand. APDL parametric finite element analysis technology and its application examples [M]. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2004:50-55. (in Chinese)
- [16] 彭国伦. Fortran95 程序设计 [M]. 北京:中国电力出版社,2002:64-69.
Peng G L. Fortran95 program design [M]. Beijing:China Power Press,2002:64-69. (in Chinese)