

# 石膏山水库拱坝应力计算和稳定分析

梁桂萍

(山西省水利水电勘测设计研究院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 分别采用拱梁分载法(四向调整)和三维有限元法对石膏山混凝土拱坝进行了5种工况的应力计算分析。根据计算结果提出坝体封拱灌浆分三个区域:坝体高程1119.0 m以下为一区,封拱温度为14.3℃;坝体高程1119.0~1130.0 m为二区,封拱温度为12℃;坝体高程1130.0 m以上为三区,封拱温度为6.5℃。

**关键词:** 单曲拱坝;应力计算;稳定分析;拱梁分载法;有限元法

中图分类号:TV642.4 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2012)04-0154-04

## Stress calculation and stability analysis of arch dam at Shigaoshan reservoir

LIANG Guiping

(Shanxi Investigation and Design Research Institute of Water Resources and Hydropower, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Based on arch-cantilever method and 3D finite element method, the stress of Shigaoshan concrete arch dam was analyzed under 5 conditions. According to the calculation results, the dam body is divided into 3 zones on the basis of closing arch for grouting: the dam body under the elevation of 1119.0m is zone 1, the joint closure temperature is 14.3℃; the elevation of the dam body between 1119.0 to 1130.0 meters was zone 2, the joint closure temperature is 12℃; the dam body above the elevation 1130.0m is zone 3, the joint closure temperature is 6.5℃.

**Key words:** single curvature arch dam; stress calculation; stability analysis; the arch-cantilever method; finite element method

## 1 工程概况

石膏山水库地处山西省晋中市灵石县南关镇峪口村上游1.5 km,位于汾河中游一级支流仁义河,控制流域面积110 km<sup>2</sup>,主河道长22 km,平均纵坡57‰。石膏山水库采用混凝土重力拱坝,最大坝高68.0 m,水库总库容473万m<sup>3</sup>,电站总装机200 kW,根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2000)<sup>[1]</sup>及可行性研究报告的审查意见,确定石膏山水库小(1)型水库,工程等别为IV等。枢纽工程主要由大坝、导流泄洪洞、发电引水洞三部分组成。坝轴线走向为N65°W,根据坝址地形、地质条件采用定圆心变半径变中心角单曲拱坝。

## 2 基本资料

### 2.1 建筑物级别

石膏山水库采用混凝土重力拱坝,最大坝高68.0 m,水库总库容473万m<sup>3</sup>,电站总装机200 kW,根据参考文献[1]及《山西省灵石县石膏山可

行性研究报告》<sup>[2]</sup>的审查意见,确定石膏山水库小(1)型水库,工程等别为IV等。

各建筑物的级别如下:确定的主要建筑物大坝、导流泄洪洞、供水发电洞等为4级建筑物,临时建筑物为5级。引水管道及附属建筑物工程根据其引水流量,依《灌溉与排水工程规范》(GB50288-99)<sup>[3]</sup>确定其建筑物为5级建筑物。

### 2.2 水库特征水位

根据水文调节计算成果,确定汛限水位1141.0 m,正常蓄水位1144.0 m,校核洪水位1145.95 m,设计洪水位1144.96 m,正常蓄水位1144.0 m,死水位1122.5 m,泥沙淤沙高程1108 m。

### 2.3 坝体混凝土与基岩力学参数

坝体采用C20混凝土,坝体容重24 kN/m<sup>3</sup>,弹性模量25500 MPa,泊松比0.16,温度线胀系数0.00001。

根据《山西省灵石县石膏山水库工程初步设计阶段地质勘察报告》<sup>[4]</sup>左岸坝肩1140 m高程以上取基岩弹性模量为8.28 GPa,1140 m高程以上取

收稿日期:2012-03-02; 修回日期:2012-04-19

作者简介:梁桂萍(1974-),女,山西忻州人,工程师,从事水利水电工程的设计研究工作。

基岩弹性模量为 8.55 GPa;右岸坝肩取弹性模量为 1.01 万 MPa;泊松比 0.25。

2.4 气温

坝区多年平均气温多年平均气温 10.8℃,气温年变幅 14.3℃。

2.5 地震资料

据《中国地震动参数区划图》(GB18306 - 2001)<sup>[5]</sup>,区内地震动峰值加速度值 0.20 g,地震动反应谱特征周期 0.35 s,依据地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 8 度。

3 拱坝拱梁分载法计算分析<sup>[6-7]</sup>

拱坝应力分析的拱梁分载法,有一向调整法、两向调整法、三向调整法、四向调整法、五向调整法和六向调整法(全调整法)。调整向数越多,计算精度越高,计算也就越繁琐,通常工程中一般采用的是三向调整法和四向调整法,相对三向调整,四向调整精度更高,更符合实际<sup>[8]</sup>,因此本工程采用四向调整法。四向调整法是按径向位移、切向位移、水平转角、垂直转角四向拱、梁变位协调条件进行水平拱与垂直悬臂梁的荷载分配,然后分别按弹性固端拱和垂直悬臂梁计算拱截面内力、应力和梁截面内力、应力,并计算水平拱与垂直悬臂梁交点处的位移,最后计算坝体上下游面主应力。对于拱梁数目的选择,拱坝设计规范要求不少于 7 拱 13 梁,本文中选取 7 拱 15 梁进行计算。

3.1 计算工况及荷载组合

采用了 5 种工况进行计算分析,按荷载组合情况分为基本组合和特殊组合两类<sup>[9]</sup>。

基本组合为:工况 1:正常蓄水位 + 泥沙压力 + 自重 + 设计正常温降 + 扬压力 + 冰压力;工况 2:设计洪水位 + 泥沙压力 + 自重 + 设计正常温升 + 扬压力 + 浪压力;工况 3:死水位 + 泥沙压力 + 自重 + 设计正常温升 + 扬压力 + 浪压力;

特殊组合为:工况 4:校核洪水位 + 泥沙压力 + 自重 + 设计正常温升 + 扬压力 + 浪压力;工况 5:正常蓄水位 + 泥沙压力 + 自重 + 设计正常温降 + 地震荷载 + 扬压力 + 冰压力。

3.2 计算荷载

计算荷载主要包括:自重,静水压力,扬压力(其渗透压力强度系数按设置帷幕及排水孔考虑,α取 0.25),泥沙压力,温度荷载(计算结果见表 1),浪压力,地震荷载(采用拟静力法进行计算)。

3.3 应力控制标准及抗压强度安全系数

应力控制标准及抗压强度安全系数<sup>[9]</sup>见表 2。

表 1 温度荷载计算结果 m, °C

拱圈高程	1146	1141.5	1130	1119	1108	1097	1086	1078
工况 1、工况 5 的温降荷载								
tm	-12.37	-10.26	-6.40	-4.31	-3.16	-2.30	-1.74	-1.46
td	0.00	-0.33	-2.57	-5.07	-6.11	-6.15	-5.76	-5.39
工况 2 的温升荷载								
tm	12.37	10.02	6.34	4.28	3.14	2.29	1.74	1.45
td	0.00	0.76	2.76	5.18	6.18	6.19	5.78	5.41
工况 3 的温升荷载								
tm	12.37	11.58	8.77	5.59	3.64	2.51	1.85	1.53
td	0.00	0.00	0.00	1.29	3.94	4.90	5.03	4.89
工况 4 的温降温度荷载								
tm	12.37	9.80	6.27	4.26	3.13	2.28	1.73	1.45
td	0.00	1.16	2.94	5.30	6.24	6.23	5.81	5.43

表 2 应力控制标准及抗压强度安全系数 MPa

荷载组合	应力控制标准			抗压强度安全系数
	上、下游坝面主压应力	坝面主拉应力	上游面 下游面	
基本组合	5.71	1.2	1.2	3.5
特殊组合(非地震)	6.67	1.5	1.5	3.0

3.4 拱梁分载法计算分析

7 拱 15 梁计算参数见表 3。采用四向调整的拱梁分载法进行了坝体应力计算,计算结果见表 4。

根据计算结果可知各工况的各部位最大拉应力和最大压应力均满足应力控制要求。

工况 1(正常 + 温降)与工况 2(设计 + 温升)相比可以发现随着水位的升高坝体的压应力有所增大,由于工况 1 为温降荷载所以上游面的拉应力大于工况 2,工况 2 为温升荷载现有面的拉应力大于工况 1,符合一般的规律。

表 3 七拱十五梁计算参数 m, (°)

拱圈编号	高程	拱冠梁厚度	拱坝外半径	右岸半中心角	左岸半中心角	拱冠梁上游面坐标
1	1146	6.00	110	44.01	44.01	0
2	1141.5	6.80	110	44.01	44.01	0
3	1130	9.00	100	39.46	38.86	0
4	1119	11.20	110	35.00	33.70	0
5	1108	14.20	110	30.61	28.52	0
6	1097	18.5	100	26.10	20.09	0
7	1086	23.5	110	21.17	11.51	0
8	1078	27.5	110	17.66	5.34	0

工况 2 与工况 4(校核 + 温升)相比,工况 4 水位有所升高,所以坝体压应力增大,同时水压力对温度荷载有一定的抵消作用,使得上游面的拉应力增大,下游面拉应力减小。

表4 各工况最大应力和位移

MPa, mm

计算工况	工况1 (正常+温降)	工况2 (设计+温升)	工况3 (死水位+温升)	工况4 (校核+温升)	工况5(正常+ 温降+顺河向地震)	工况5(正常+温降+ 横河向地震)
上游面最大拉应力	1.02	0.69	0.32	0.71	1.00	1.07
上游面最大压应力	1.23	3.69	2.35	3.87	1.57	1.42
下游面最大拉应力	0.78	1.10	1.19	1.05	0.79	0.90
下游面最大压应力	2.62	3.48	2.06	3.60	2.94	2.53
最大位移	20.62	6.65	-7.78	7.10	24.40	20.31

注:最大位移中正值为向下游位移,负值为向上游位移。

工况3(死水位+温升)与工况1相比,由于水位较低,且受到温升荷载在死水位一下的坝体受到水压力及泥沙压力而温升荷载导致坝体向上游拉,由此导致坝体下游面死水位以下的拉应力增大。

工况5(正常+温降+顺河向地震)与工况1相比叠加了顺河向地震荷载,应力变化比较小,但是位移有明显加大,本工况位移最大为24.4 mm;工况5(正常+温降+横河向地震)与工况1相比叠加了横河向地震荷载,由于地震荷载的影响,导致上、下游面两岸拱端的拉应力有所增加,但是位移变化不大。

## 4 有限元计算

有限元计算整体模型包括坝体、地基。基础范围向上游取100 m、下游和底部均取200 m,采用线弹性模型。网格划分采用八节点六面体实体单元,其节点总数29 590个,单元总数25 078个。整体模型基础部分约束情况为:地基地部为三向约束,上下

游面及左右侧面均为法向链杆约束。计算模型应用的坐标系为:水流方向为X轴,向下游为正;沿高度方向为Y轴,向上为正;垂直水流方向为Z轴,向右岸为正。计算模型及单元剖分情况见图1。

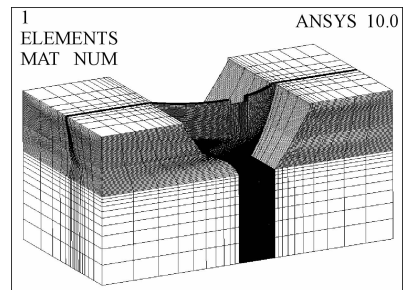


图1 有限元计算模型单元剖分图

对各工况分别进行有限元等效应力计算分析可知:各工况的最大等效主压应力和最大等效主拉应力均应力控制要求。各工况的最大等效应力和最大位移见表5。

表5 各工况最大等效应力和最大位移

MPa, mm

计算工况	工况1 (正常+温降)	工况2 (设计+温升)	工况3 (死水位+温升)	工况4 (校核+温升)	工况5(正常+温降+ 顺河向地震)
上游面最大等效拉应力	1.49	0.30	0.30	0.40	1.70
上游面最大等效压应力	2.60	4.60	4.30	4.70	1.80
下游面最大等效拉应力	1.47	0.90	1.40	0.80	1.80
下游面最大等效压应力	2.30	3.40	2.90	3.50	2.10
最大位移	16.30	-14.50	-25.80	-13.60	25.60

注:最大位移为拱冠梁顶部位移,正值为向下游位移,负值为向上游位移。

## 5 抗滑稳定计算分析

根据《混凝土拱坝设计规范(SL282-2003)》<sup>[9]</sup>抗滑稳定安全系数计算公式如下:

$$K = \frac{\sum (N \cdot f + c \cdot A)}{\sum T} \quad (1)$$

式中:  $N$  为垂直于滑裂面的作用力;  $T$  为平行于滑裂面上的作用力;  $A$  为滑裂面的面积;  $c$  为滑裂面上

的抗剪断凝聚力;  $f$  为滑裂面上的抗剪断摩擦系数;  $K$  为抗滑稳定安全系数;

在各种工况下,左、右坝肩不同高程处和坝基抗滑稳定安全系数计算结果见表6。

由表6可知:左、右坝肩不同高程处的抗滑稳定安全系数以及坝基抗滑稳定安全系数都满足《混凝土拱坝设计规范(SL282-2003)》<sup>[9]</sup>要求。

表6 各工况左、右坝肩不同高程处和坝基抗滑稳定安全系数  $K$ 

工况		高程							坝基 1078
		1146	1141.5	1130	1119	1108	1097	1086	
工况1 (正常+温降)	左坝肩	3.51	3.69	3.53	3.40	4.20	6.49	8.84	26.78
	右坝肩	3.39	3.64	3.72	4.83	5.16	7.48	9.17	
工况2 (设计+温升)	左坝肩	4.45	4.51	3.71	3.30	4.10	6.21	8.96	26.97
	右坝肩	3.54	3.64	3.63	4.77	5.14	6.43	9.17	
工况3 (死水位+温升)	左坝肩	4.55	4.72	3.72	3.77	4.96	7.76	10.52	30.55
	右坝肩	3.07	3.35	3.61	4.82	5.96	8.61	12.03	
工况4 (校核+温升)	左坝肩	4.47	4.50	3.39	3.26	4.10	6.15	8.83	26.49
	右坝肩	3.54	3.62	3.63	4.75	5.74	7.60	9.38	
工况5 (正常+温降+地震)	左坝肩	4.44	4.69	3.53	3.40	4.17	6.12	8.68	24.27
	右坝肩	3.34	3.58	3.68	4.75	5.55	7.25	8.77	

## 6 结论与建议

拱坝应力分析的拱梁分载法和有限元计算表明:拱坝各部位在各工况荷载组合情况下,最大主拉应力和最大主压应力均满足相应工况的应力控制标准。抗滑稳定计算结果表明:左、右坝肩抗滑稳定和坝基抗滑稳定都满足参考文献[9]的要求。

建议坝体封拱灌浆分三个区域:坝体高程1 119.0 m 以下为一区,封拱温度为 6.5℃;坝体高程1 119.0 ~1 130.0 m 为二区,封拱温度为 12℃;坝体高程1 130.0 m 以上为三区封拱温度为 14.3℃。封拱灌浆时间应安排在低温季节。

### 参考文献:

- [1] SL252-2000. 水利水电工程等级划分及洪水标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 山西省灵石县石膏山水库工程可选择性研究报告[R].

山西省水利水电勘测设计研究院,2005.

- [3] GB50288-99. 灌溉与排水工程规范[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [4] 山西省灵石县石膏山水库工程初步设计阶段地质勘察报告[R]. 山西省水利水电勘测设计研究院,2006.
- [5] GB18306-2001. 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [6] 朱伯芳,高季章,陈祖煜. 拱坝设计与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002. 12.
- [7] 李瓚,陈兴华,郑建波,等. 混凝土拱坝设计[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [8] 李守义,陈尧隆. 拱坝初参数分析法[J]. 水利学报,1996,27(3):30-35.
- [9] SL282-2003. 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [10] SL203-97. 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

(上接第153页)

## 5 结语

本文综合运用层次分析法和多元线性回归模型预测管网的安全使用时间,用二次指数平滑模型预测管网的漏损时间,由此建立了管网漏损的时间预测模型。多元线性回归模型结构简单,可用于单个管段,但是预测精度较差;二次指数平滑模型预测精度较高,但对单个管段缺乏指导意义。将二者结合预测管网的漏损时间能取长补短,使预测更加准确。

### 参考文献:

- [1] 城镇供水存在漏损谁来给管网把门[EB/OL][2011-06-

01]. 中国供应商, [http://cn.china.cn/article/d994575\\_5ca821\\_d2098\\_7460.html](http://cn.china.cn/article/d994575_5ca821_d2098_7460.html).

- [2] 闫丽芳. 给水管网漏损分析及预测[D]. 安徽:合肥工业大学,2009. 4.
- [3] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 苏文龙. 基于 AHP 的给水管网漏损影响因素分析[J]. 山西建筑,2010,36(30):204-205.
- [5] 张宏伟,牛志广,陈超,等. 供水管道漏损预测模型研究[J]. 中国给水排水,2001,17(6):7-9.
- [6] 邱云龙. 给水管网漏损预测的研究与应用[D]. 重庆:重庆大学,2006.