

## 基于有限元的高拱坝坝肩稳定分析

陈迪辉<sup>1,2</sup>, 姓海涛<sup>3</sup>, 张 敏<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;

3. 南京市溧水区水务局, 江苏 南京 211200)

**摘要:** 各类软弱结构面, 如断层、煌斑岩脉、层间挤压带、深部裂隙等, 会对拱坝坝基及坝肩稳定产生不利影响。本文以某高拱坝为例, 通过建立三维有限元模型, 研究复杂地质地基条件对大坝应力、位移以及坝肩稳定性的影响。由分析得, 在正常蓄水位工况下, 位移符合拱坝的一般规律, 拉、压应力与容许拉、压应力相比偏大。采用刚体极限平衡法对坝肩进行稳定校核。选取了6个不同高程的拱圈进行校核, 均满足规范要求。

**关键词:** 高拱坝; ABAQUS 有限元分析; 坝肩稳定; 刚体极限平衡法

中图分类号: TV64

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 03-0058-04

### Abutment stability analysis of high arch dam based on finite element method

CHEN Dihui<sup>1, 2</sup>, XING Haitao<sup>3</sup>, ZHANG Min<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu; 2. National Engineering Research Center of Water Resources

Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu;

3. Water Affair Bureau of Lishui District, Nanjing 211200, Jiangsu)

**Abstract:** There are many different kinds of weak structural planes in the abutment rock mass like faults, lamprophyre dike, inner layer compressed zone and deep-seated fracture. All of these are disadvantageous to the stability of the dam abutment and foundation. Taken a high arch dam as an example, a three-dimensional finite element model is established to study the efforts of the complex geological conditions of the dam stress, displacement and abutment stability. According to the result, the changes in displacement meet the general law of arch under the working condition of the normal storage level. Tensile stress and compressive stress is larger than the allowable value. Rigid body limit equilibrium method is used to check the stability of the abutment. Six different elevations of the arch are selected. All of them meet the stability requirements.

**Key words:** high arch dam; finite element method; stability of dam abutment; rigid body limit equilibrium method

拱坝是一个空间弹性壳体, 其几何形状和边界条件都很复杂, 难以用严格的理论计算坝体的

应力状态<sup>[1-2]</sup>。在工程设计中, 根据问题的侧重点常作一些假定和简化, 使计算成果能满足工程需

收稿日期: 2016-11-26

作者简介: 陈迪辉 (1993-), 男, 在读硕士, 研究方向为水工结构。

要。分析拱坝应力的常用方法主要是拱梁分载法和有限元法。拱梁分载法将拱坝看作由水平方向的一些拱圈和竖直的梁组成的三维壳体结构,拱和梁分别承担拱坝坝体所受到的荷载,然后按照拱和梁在各交点处变位一致的条件来确定荷载分配。有限元法的主要思想是将拱坝的坝体划分为由有限个单元组成的构件,通过结点连接组成的体系。结构上的荷载和内力施加在单元及单元结点上,可通过不同的单元型式解决复杂的边界条件和坝体坝基材料不均匀性问题,是一种较为实用且有效的方法。由于两岸边坡和地基的地质条件对大坝的稳定安全非常重要,本文运用有限元法分析复杂地基条件对大坝应力、位移以及坝肩稳定性的影响,分析坝肩稳定性。

## 1 工程概况

某高拱坝位于四川省雅砻江中游,为混凝土双曲拱坝,电站以发电为主,兼有防洪、拦沙等作用。岸坝肩发育有 $F_2$ 及 $F_5$ 断层、煌斑岩脉、挤压错动带及深部裂缝,其中 $F_2$ 断层仅出现在左岸1580~1710 m高程中,基本顺层展布,产状 $N30 \sim 40^\circ E$ ,破碎带宽0.2~0.8 m,由糜棱岩、片状岩等组成,局部泥化,属于层间挤压错动带。 $F_5$ 断层发育在坝区左岸山体内,在坝区内延伸范围有1500 m。右岸坝肩发育有NE向陡倾山里的 $F_{13}$ 、 $F_{14}$ 等断层,构成右岸滑动块体的侧滑面。 $F_{13}$ 断层贯穿分布于坝区右岸山体内,由于坡积物覆盖,地表露头断续,地下水活动迹象明显。 $F_{14}$ 断层是右岸显著的断层之一,在坝址区低高程延伸范围约700 m。

## 2 模型建立

### 2.1 网格划分

坝高305 m,本文选用的高拱坝有限元计算模型范围:上游方向取1.2倍左右坝高(约350 m),左侧坝肩取1.0倍左右坝高(约310 m),右侧坝肩取1.5倍左右坝高(约460 m),下游方向取1.2倍左右坝高(约350 m),建基面以下取1倍左右坝高(约310 m)。建模过程按照拱坝—断层—两岸—坝基的顺序进行剖分。剖分断层之前须对等高线进行处理,包括根据坝体剖分高度方向的密度删除多余的等高线以及裁弯取直,用连续的直线段模拟连续曲线。

有限元计算模型主要采用六面体8节点单元,

辅以少量三棱锥和四棱锥等单元,经过检查和修改,最终单元数量为62329个,其中不合格单元控制在1%以内,说明单元质量良好。

坐标约定:按右手螺旋法则,上下游方向为X向,向下游为正;约定左右岸方向为Y向,向左岸为正;高程方向为Z向,高程增加为正。

整体模型见图1。

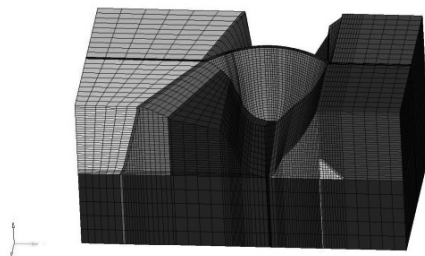


图1 整体模型的剖分

### 2.2 材料属性

根据工程地质报告,并经适当简化,选取坝体、断层及基岩的物理力学参数如表1所示。

表1 坝体、断层和坝基的变形物理参数

参数	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	粘聚力 (MPa)	摩擦系数
坝体混凝土	24.0	0.167	2400	1.65	1.18
Ⅱ类岩体	25.0	0.2	2700	2	1.35
Ⅲ类岩体	6.5	0.2	2700	1.5	1.07
Ⅳ1类岩体	1.4	0.3	2700	1.0	0.8
Ⅳ2类岩体	1.2	0.3	2700	0.7	0.65
断层	0.4	0.38	1900	0.07	0.42

### 2.3 荷载施加

坝体底部高程1580.00 m。正常蓄水位工况下,上游水位1880.00 m,下游水位1640.00 m。不考虑施加在上游山体上的水压荷载,只考虑施加在大坝上下游面的水压荷载。考虑泥沙压力的作用,且只考虑上游泥沙压力,泥沙淤积高程取为1644.10 m,浮容重取为 $5 \text{ kN/m}^3$ ,泥沙内摩擦角取为 $0^\circ$ 。不考虑坝体周围山体的自重荷载,只考虑坝体的自重荷载。同时考虑温降情况。

正常蓄水位工况荷载:坝体自重+上游水压力+下游水压力+上游泥沙压力+温降荷载。

## 3 模型计算

### 3.1 位移分析

正常蓄水位工况位移计算结果云图见图2。

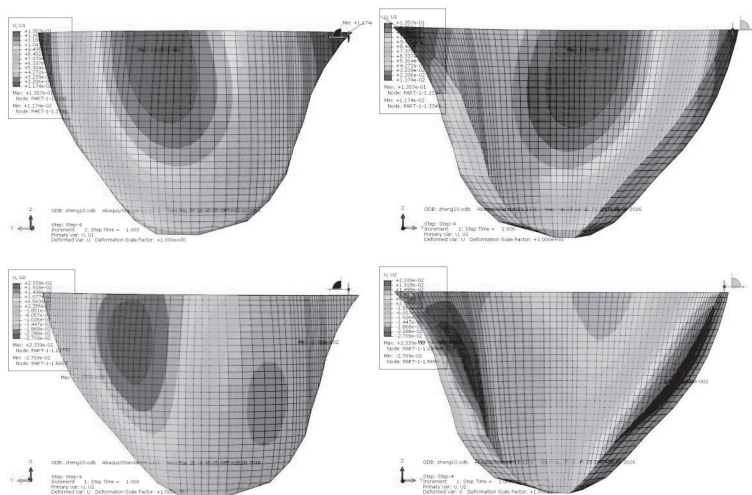


图2 正常蓄水位工况坝体顺河向位移  $U_1$ 、横河向位移  $U_2$  (单位: m)

由计算结果可以看出:

(1) 上下游面在顺河向位移均呈现出较好的对称性, 向下游变形, 且位移值由坝体拱冠顶部向建基面方向先增加再减小, 在位于坝高 2/3 左右达到最大值。横河向位移整体呈现非对称分布, 上游面右岸坝体的最大位移值大于左岸的位移值, 而下游面左岸坝体的最大位移值大于右岸的位移值。

(2) 正常蓄水位工况下, 坝体顺河向的最大位移为 135.7 mm, 位于拱冠梁下游面 1830.00 m 高程处。坝体横河向的最大位移为 27.1 mm, 方向指向右岸, 位于下游面右拱端 1800.0 m 高程处。

### 3.2 应力分析

正常蓄水位工况应力计算结果云图见图 3。

体有较大区域呈压应力, 坝体中下部受压状态十分明显, 沿建基面部分呈拉应力且拉应力较大, 下游面坝体中部呈拉应力分布。

(2) 第三主应力, 上游面第三主应力大小由坝体中部向周边呈减小趋势, 下游面则相反, 下游面的坝趾处所受的压应力较大, 上下游面对称性相对较好。

(3) 在基本荷载组合下, 最大压应力为 -14.94 MPa, 发生在下游面坝顶 1885.00 m 高程左拱端处; 最大拉应力为 3.685 MPa, 发生在下游面 1660.00 m 高程左拱端处<sup>[3]</sup>。

### 3.3 结果分析

为了得到与实际情况接近的计算结果, 本文根据提供的资料, 模拟了上下游的水压荷载、上游

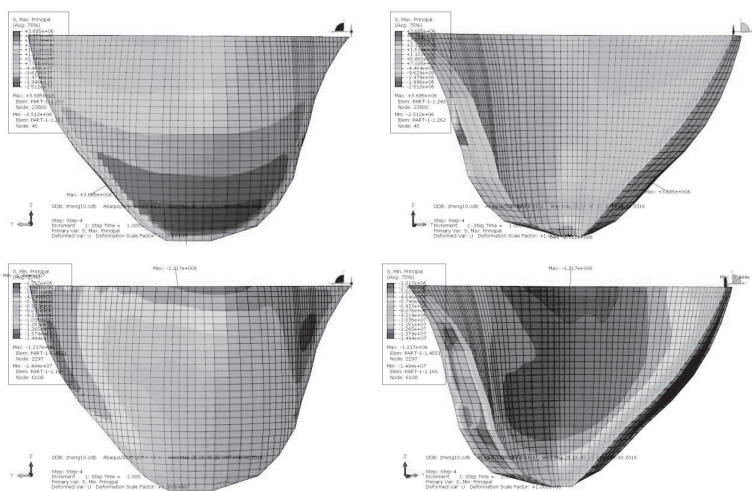


图3 正常蓄水位工况坝体第一主应力、第三主应力 (单位: Pa)

由计算结果可以看出:

(1) 第一主应力, 上游面整体呈对称分布, 坝

的泥沙压力、坝体的自重荷载和坝体的温度荷载。选取了正常蓄水位 + 温降荷载工况。



从计算结果来看,位移符合拱坝的一般规律<sup>[4]</sup>,水电站大坝为四级配混凝土,强度等级分别为 $c_{180}30$ 、 $c_{180}35$ 、 $c_{180}40$ ,基本荷载组合下 $c_{180}40$ 混凝土的允许抗压强度为10 MPa;非地震情况特殊组合下 $c_{180}40$ 混凝土的允许抗压强度为11.43 MPa,均比有限元计算出的最大压应力小。

考虑到有限元应力解在建基面附近有应力集中现象,但应力集中范围较小,由于有限单元法会夸大计算得到的应力值,且网格越小,影响越大。通过有限元等效力法对拱坝应力进行处理,基本消除应力集中现象。

## 4 坝肩稳定分析

### 4.1 坝肩抗滑稳定分析方法

采用平面分层稳定分析的方法核算坝肩岩体稳定性,即在坝体任一高程选取一定高度 $\Delta z$ 的拱圈(通常取 $\Delta z=1$  m)作为计算单元。按平面分层核算坝肩岩体稳定时,由于没有考虑到坝肩岩体的整体作用,所以是偏安全的。计算时假定拱端侧向滑移面为直立,并不计假想滑移体上、下滑面的阻滑力进行核算。由于两岸谷坡未发现对库岸稳定影响较大的物理地质现象,考虑拱端滑动面走向与拱端法向垂直,其倾角与岸坡平行。

有限元计算可以得到拱端面沿左右岸方向、上下游方向和垂直向分力分别为 $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$ 。在剖面图(图4(a))上,设滑动面与上下游方向的夹角为 $\theta$ ,将 $X_n$ 、 $Y_n$ 分解为平行和垂直拱座面的分力 $P$ 和 $V$ :

$$P=X_n\cos\theta+Y_n\sin\theta \quad (4-1)$$

$$V=Y_n\cos\theta-X_n\sin\theta \quad (4-2)$$

在立视图上(图4(b)),设滑动面与垂线的夹角为 $\varphi$ ,将 $P$ 、 $Z_n$ 分解为平行和垂直拱座面的分力 $Q$ 和 $N$ :

$$N=Z_n\sin\varphi+P\cos\varphi \quad (4-3)$$

$$Q=P\sin\varphi-Z_n\cos\varphi \quad (4-4)$$

则抗滑稳定安全系数计算公式为:

$$K=(f'N+c'l\sec\varphi)/V \quad (4-5)$$

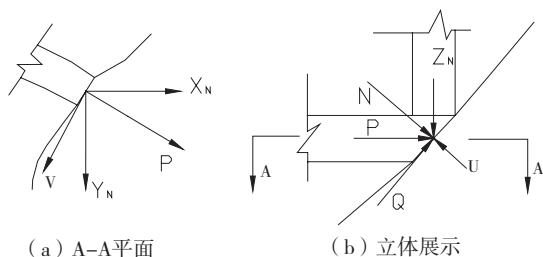


图4 拱坝坝肩稳定分层分析

### 4.2 计算工况及参数

选用正常蓄水位加温降荷载工况,摩擦系数 $f'$ 取1.18,凝聚力 $c'$ 取1.65 MPa,坝肩后岩体较长时, $l$ 取5倍对应高程的坝体厚度。

### 4.3 坝肩稳定校核

用刚体极限平衡法对坝肩进行稳定计算,共分6层,其高程分别是1580.00 m(坝基)、1650.00 m、1750.00 m、1810.00 m、1870.00 m及1885.00 m(坝顶),从计算结果中提取相应高程左右岸拱端节点的三向应力,计算出拱端面沿左右岸方向、上下游方向和垂直向分力分别为 $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$ 。根据抗滑稳定安全系数计算公式,求得各高程拱座抗滑稳定安全系数计算结果如表2。

表2 6层不同高程拱座抗滑稳定安全系数

高程(m)	1580	1650	1750	1810	1870	1885
左坝肩	7.7	4.4	7.9	17.5	15.6	45.9
右坝肩	4.2	5.8	7.1	6.2	39	33.6
规范要求	$\geq 3.5$					

由分析可得,拱坝坝肩稳定在基本组合工况下, $K_{\min}=4.2$ ,大于3.5,故拱坝的坝肩稳定满足要求。

## 5 结语

本文应用有限元方法,建立三维拱坝模型,在基本荷载组合工况下,分析坝体的位移和应力情况,并校核坝肩稳定。结果表明某拱坝应力和位移均满足条件,且坝肩稳定校核也满足安全系数要求。基于有限元的高拱坝分析可以考虑地基和两岸山体的地质条件,由于左右岸基础较弱,坝肩附近均有断层穿过,稳定安全系数相对较小,工程中需对坝肩附近的断层做加固处理。

### 参考文献:

- [1] 陈秋华,等.雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告[R].成都:国家电力公司成都勘测设计研究院,2003:86-100.
- [2] 宋胜武,向柏宇,等.锦屏一级水电站复杂地质条件下坝肩高陡边坡稳定性分析及其加固设计[J].岩石力学与工程学报,2010,19(3):442-458.
- [3] 赵玮,李守义.拱坝三维有限元等效力计算研究[D].西安理工大学硕士论文,2007.
- [4] SL282—2003,混凝土拱坝设计规范[S].

(责任编辑:王宏伟)