

# 漫湾电站坝体应力场的有限元研究

方梦霞, 程赫明, 谢建斌

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 基于漫湾电站坝体原型观测实测点处的应力-应变关系, 应用有限元基本原理, 建立了漫湾电站坝体的有限元分析模型, 利用大型有限元分析软件 ANSYS 对该坝体的应力场进行求解, 求得了电站坝体在外载荷作用下的应力分布情况. 研究表明, 在电站坝体的坝趾和坝踵中, 存在着应力集中现象.

**关键词:** 漫湾电站; 四节点矩形单元; 有限元分析; 应力分布

**中图分类号:** TV311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)05-0105-05

## Analysis on the Finite Element Method of the Stress Distribution about Manwan Power Plant

FANG Meng-xia, CHENG He-ming, XIE Jian-bing

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Based upon the relationships between the stress and strain originated from the observed data in Manwan Power Plant and the basic principles of FEA, the analytical model of FEA and the calculation formula are established. Then, the calculation result of the dam is solved by ANSYS which is one kind of the big finite element analysis software, and the stress distribution of the dam is resolved in the result of the external loads. The results show that concentrated stress occurs at the dam toe and the dam heel.

**Key words:** Manwan Power Plant; the four nodes element of rectangle; finite element analysis; the stress distribution

## 0 引言

漫湾电站位于云南省境内澜沧江中游河段, 为混凝土重力坝, 是云南省内第一座百万级水电站. 从工程重要性来说, 作为一级水工建筑物的漫湾水电站工程, 坝体工程一旦投入使用就将承受静水压力、温度应力等荷载的交互作用<sup>[1]</sup>. 随着这些荷载和坝体性能的不断变化, 坝体内的应力也会发生相应的变化, 随着坝体使用时间的推移, 在坝体内应力较大或应力突变的位置可能会产生裂缝以及危害坝体安全性等不利现象. 在当前的国民经济建设中, 确保水电站坝体的安全正常运行形态以及坝体的结实程度不仅对输电工程, 而且对社会的发展、环境的变化都有重要的价值. 因此, 准确分析混凝土坝体内的应力分布情况, 对于预测混凝土坝体安全工作和混凝土坝体的寿命有着比较重要的意义.

本文应用有限元基本原理<sup>[2]</sup>和弹性力学理论, 从漫湾电站坝体原型观测实测点处的应力-应变关系出发, 建立了漫湾电站坝体的四节点有限元分析模型<sup>[3]</sup>, 利用大型有限元分析软件 ANSYS<sup>[4]</sup>对该坝体进行求解求得了电站坝体在外载荷作用下的应力分布状况. 研究表明, 在电站坝体的坝趾和坝踵中, 存在着应力集中现象, 这一研究结果对于电站坝体的设计与检测有一定的指导意义.

收稿日期: 2003-03-11.

第一作者简介: 方梦霞(1978.8~), 女, 硕士研究生; 主要研究方向: 工程计算力学.

## 1 电站坝体的有限元模型和控制方程

### 1.1 电站坝体的本构和有限元模型

基于弹性力学基本原理,依据漫湾电站坝体原型观测实测点处的应力-应变关系,由坝体的实际几何形状和受力情况,可将电站坝体的本构模型简化为弹性模型中的平面应变问题<sup>[1]</sup>.简化后坝体的实体模型如图1所示.

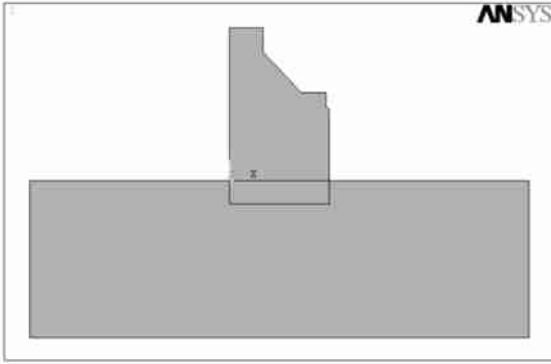


图1 漫湾电站坝体简化模型

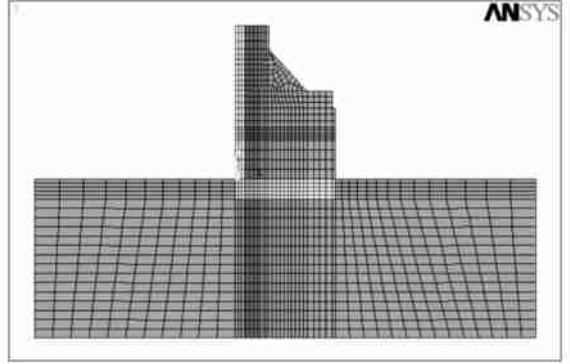


图2 漫湾电站坝体简化模型的有限元网格

与图1中简化实体模型所对应的本构关系可表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1-\mu^2}{E} \left( \sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_y \right) \\ \varepsilon_y = \frac{1-\mu^2}{E} \left( \sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_x \right) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \end{cases} \quad (1)$$

在(1)式中,  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$  分别为坝体横截面内宽度和高度方向上的正应变,  $\gamma_{xy}$  为坝体横截面上的剪应变,  $\mu$  为坝体材料的泊松比,  $E$  为坝体的弹性模量,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  坝体横截面内宽度和高度方向上的正应力,  $\tau_{xy}$  为坝体横截面上的剪应力.

由有限元理论<sup>[2,3]</sup>可知,在有限元分析中,应力与位移的误差都与单元最小内角的正弦成反比,因此在划分网格时尽可能使每个单元中内角相差很小.为了尽量拟合电站坝体的实体模型,在确定四边形单元网格时,采用映射方式(Mapped Meshing)来划分电站实体模型进而得到有限元的计算网格.在划分网格并最终确定单元和节点的数量时,同时考虑计算精度以及坝体内部实测点位置处于节点上两个方面的要求.具体简化模型的有限元网格如图2所示.

### 1.2 坝体应力场的有限元模型

在应用有限元法分析坝体及基岩的结构性能和状态时,主要是将坝体和基岩这个连续空间结构离散成为有限个单元结构,通过节点连续组成整个体系,并设法确定各单元的劲度矩阵  $K_e$ ,由此组合成整体刚度矩阵  $K$ ,最终建立节点位移和节点荷载  $R$  之间的平衡方程.

#### 1.2.1 四节点单元的位移模式

采用四节点矩形单元形式划定坝体和基岩单元网格后,采用位移法来分析计算,具体的位移模式为:

$$\begin{cases} u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \\ v(x, y) = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy \end{cases} \quad (2)$$

在(2)式中,  $2a$  和  $2b$  分别表示矩形单元边长,  $x$  和  $y$  分别表示节点的两个线位移,  $u(x, y)$  和  $v(x, y)$  为四节点单元的位移函数.

将四个节点坐标分别代入(2)式中便可解出  $a_1, a_2, \dots, a_7$  和  $a_8$  八个待定系数,然后将这些待定系数回代到式(2)中即可得到:

$$\begin{cases} u(x, y) = N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m + N_p u_p \\ v(x, y) = N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m + N_p v_p \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)中,  $N_i, N_j, N_m$  和  $N_p$  为形函数, 它们的具体形式可表示为:

$$\begin{cases} N_i = \frac{1}{4}(1 + \alpha + \beta - \alpha\beta); N_j = \frac{1}{4}(1 + \alpha - \beta + \alpha\beta) \\ N_m = \frac{1}{4}(1 - \alpha - \beta - \alpha\beta); N_p = \frac{1}{4}(1 - \alpha + \beta + \alpha\beta) \\ \alpha = \frac{x}{a}; \beta = \frac{y}{b} \end{cases} \quad (4)$$

将(3)式写为矩阵形式, 有:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 & N_p & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 & N_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \\ u_p \\ v_p \end{Bmatrix} = [N] \{\delta\}^e \quad (5)$$

### 1. 2. 2 单元的应变矩阵和应力矩阵

在平面问题中几何方程为:  $\{\epsilon\} = [B] \{\delta\}^e$ , 由此推出单元应变矩阵为:

$$[B] \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N] = \frac{1}{4ab} \begin{bmatrix} b(1-\beta) & 0 & b(1+\beta) & 0 & -b(1+\beta) & 0 & -b(1-\beta) & 0 \\ 0 & a(1-\alpha) & 0 & -a(1-\alpha) & 0 & -a(1+\alpha) & 0 & a(1+\alpha) \\ a(1-\alpha) & b(1-\beta) & -a(1-\alpha) & b(1+\beta) & -a(1+\alpha) & -b(1+\beta) & a(1+\alpha) & -b(1-\beta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

由弹性力学和计算力学基本原理可知, 在平面应变问题中, 单元的弹性矩阵为:

$$[D] = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在求得了单元应变矩阵和弹性矩阵后, 便可得到单元的应力矩阵, 具体的单元应力矩阵可写成如下形式, 即:

$$[S] = [D][B] = \frac{E}{4ab(1+\mu)(1-2\mu)} [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4] \quad (8)$$

在(8)式中,  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  为单元应力矩阵子块.

### 1. 2. 3 单元刚度矩阵的导出

基于电站坝体的工程实际<sup>[3]</sup>, 可采用最小势能原理来推导坝体的有限元基本方程. 在坝体有限元基本方程中, 单元的刚度矩阵为:

$$[k]^e = \iint_{\Omega^e} [B]^T [D] [B] t \, dx \, dy \quad (9)$$

在(9)式中,  $[k]^e$  为坝体的单元刚度矩阵, 它取决于该单元的方位、几何形状和尺寸及弹性特性, 而与该单元的位置无关, 即不因坐标的平移而改变;  $[D]$  与  $[B]$  矩阵均为已知, 可将各自表达式代入式中, 展开以后, 将每项元素在  $-a$  到  $a$  区间内对  $x$  积分, 再在  $-b$  到  $b$  区间内对  $y$  积分, 整理以后可得坝体单元刚度矩阵的具体表达式, 为:



### 3 坝体应力场有限元计算结果及分析

#### 3.1 坝体应力场的有限元计算结果

确定了坝体的本构关系、荷载情况和边界条件后, 计算得到的结果如图 3~ 5 所示。

#### 3.2 坝体应力场有限元解的收敛情况

对于线性平衡问题, 有限元分析的收敛性和收敛精度主要取决于位移插值函数的性质、单元剖分的数量和质量. 由以上的式(1)或(3)可知这种位移插值函数是  $x$ 、 $y$  的线性函数, 其分别满足关于协调性、完备性的三个判别收敛准则以及在构造函数时就已经考虑了位移模式是几何各向同性的, 也就是说本文采用的单元是协调完备单元, 插值函数的协调性保证了各单元间的几何协调性及位移协调性. 虽然如此, 为了保证单元交界面处的应变和应力也是连续的, 相应的要对单元剖分粗细程度作出调整或者提高位移模式的阶数, 这样就可以保证解是收敛的。

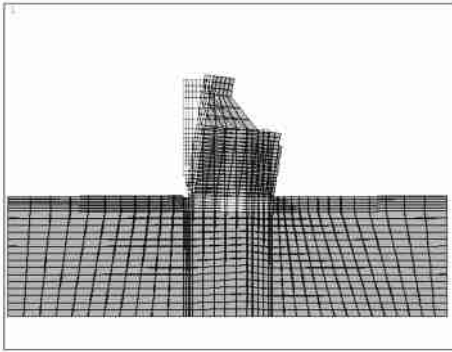


图 3 坝体在静水压力作用下的形变

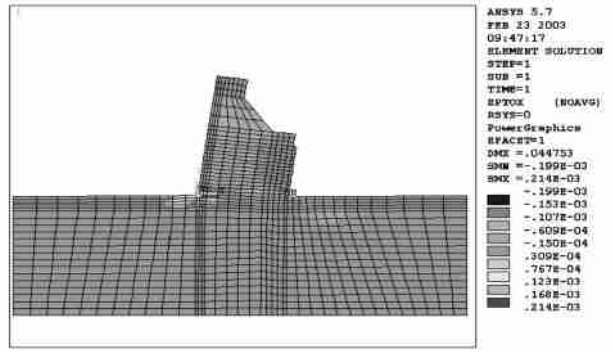


图 4 坝体在静水压力作用下的应变发布

### 4 结果讨论分析

本文通过一系列合理的假设, 并采用实际工程数值对漫湾电站进行有限元分析, 得到了静水压力作用下单元形变、应变和应力的分布图示(图 3~ 5). 下面对通过 ANSYS 计算得到的结果进行进一步的说明分析:

1) 坝体发生形变最大的地方是坝顶, 而在基岩的边界上基本没有形变(图 3);

2) 坝体发生应力和应变最大的地方是坝趾和坝踵位置, 而且在这些地方数值变化的梯度很大, 应力集中现象十分突出. 基岩部分除了坝趾和坝踵附近位置(50 m 范围内)受上部荷载的影响较大外, 别的基本没有应力和应变值的变化;

3) 在文中荷载的作用下, 迎水面的应力(应变)是拉应力(应变)为正值. 而背水面的坝体受压, 其应力(应变)为负值, 这 and 实际工程情况相符.

从上述结果分析可知, 本文所采用的基岩尺寸足以满足工程精度要求, 可以利用这个模型来进行更为深入的研究. 为了更好的拟合实际情况, 最好在坝趾和坝踵应进一步细化单元, 使有限元模型的刚度更接近结构真实刚度, 从而使坝体各个位置的解更精确地收敛于实际值.

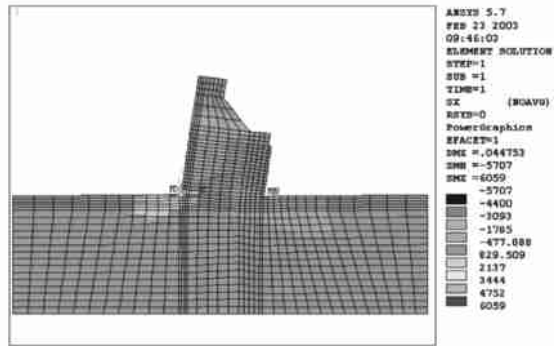


图 5 坝体在静水压力作用下的应力分布

#### 参考文献:

- 1) 凌川, 冯兴常. 漫湾水电站工程大坝安全监测成果分析 [J]. 云南水利发电, 1996, (2): 81~ 91.
- 2) 刘北辰. 工程计算力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 164~ 220.
- 3) 顾时冲, 郑东健, 吴中如. 大坝及基岩的仿真有限元模型的精度分析 [J]. 水电能源科学, 2002, 20(2): 13~ 16.
- 4) 秦杰等, 伏义淑等. ANSYS 软件在大坝施工仿真中的应用 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 16~ 18.