

# 有限元超载法在拱坝整体安全分析中的应用

于建忠<sup>1</sup>, 孙斌斌<sup>2,3</sup>, 孙登峰<sup>1</sup>, 吕 犇<sup>1</sup>

- (1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128;  
2. 浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012;  
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; )

**摘要:** 拱坝等水工混凝土结构体积庞大结构复杂, 确保其安全稳定意义重大。针对拱坝整体安全分析问题, 采用 D-P 屈服准则并利用超载法进行弹塑性有限元计算, 根据特征点位移突变判据研究拱坝的整体健康状态。以某高拱坝为例进行有限元计算分析, 计算结果表明其安全系数 K 应在 5 ~ 5.5 之间, 并证明了有限元超载法在拱坝整体安全分析中的可行性。

**关键词:** 超载法; D-P 屈服准则; 位移突变判据; 拱坝整体安全

**中图分类号:** TV698.1      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2019) 02-0028-04

## Application of finite element overloads method in the analysis of arch dam overall safety

YU Jianzhong<sup>1</sup>, SUN Binbin<sup>2, 3</sup>, SUN Dengfeng<sup>1</sup>, LV Ben<sup>1</sup>

- (1. *Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215128, Jiangsu;*  
2. *Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310012;*  
3. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu*)

**Abstract:** Hydraulic concrete structures such as arch dams are huge and complex, so it is of great significance to ensure their safety and stability. Aiming at the overall safety analysis of arch dams, the D-P yield criterion and the overload method were used to calculate the elastic-plastic finite element method. The overall health state of arch dams was studied according to the displacement catastrophe criterion of characteristic points. Taking a high arch dam as an example, the finite element analysis was carried out. The calculation results showed that its safety factor K should be between 5 and 5.5, and the feasibility of finite element overloading method in the overall safety analysis of arch dam was proved.

**Key words:** overload method; D-P yield criterion; displacement catastrophe criterion; overall safety of arch dam

## 0 引言

拱坝作为高次超静定结构, 局部小损伤对拱坝的整体安全没有决定作用, 应考虑其整体工作系统的安全稳定。目前, 通常采用间接法分析拱

坝坝体坝基系统的稳定性, 以系统的整体安全度来反映拱坝的整体安全性。利用有限元弹塑性分析拱坝整体安全, 通常采用间接法。即不必事先给定破坏面, 破坏面在分析过程中自动形成, 而且该方法可以模拟拱坝系统的渐进破坏过程。常用

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51379068、51139001); 江苏省杰出青年基金项目 (BK20140039)。

作者简介: 于建忠 (1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程设计研究工作。

方法主要有超载法、强度储备法以及两者相结合的综合法等<sup>[1-3]</sup>。本文以某高拱坝为例,采用D-P (Drucker-Prager)屈服准则并利用超载法对其进行弹塑性有限元计算,根据特征点位移突变拱坝安全判据研究拱坝的整体健康状态。

## 1 有限元超载法的基本原理

### 1.1 超载法

超载法通常采用超水容重或超水位的方式。超容重方法就是保持结构的自重和水位不变,以增加水容重方式超载直至结构破坏<sup>[4]</sup>,以破坏时的液体容重与设计时容重之比来定义超载系数。超水位方法则是保持结构自重和水容重不变,用抬高水位的方式超载,以破坏时的水压荷载与设计水压荷载比来定义安全系数。

大坝等水工混凝土结构受到的荷载较多且复杂,所有荷载同时加大的工况发生可能性极小,一般只考虑加大水荷载的工况。水荷载超载所反映的工况可以是坝址上游强降雨所引发的爆发性洪水,以至坝体、基础的材料参数来不及发生变化,该工况有一定的实际工程意义<sup>[5]</sup>。

利用有限元法对结构进行超载分析时,通常采用加大水容重的方式来实现,水容重加大的倍数即为超载系数K。在失稳临界状态时,K表示了结构的超载安全系数。

### 1.2 材料屈服条件

弹塑性材料在应力达到一定条件时发生屈服,材料从弹性状态进入塑性状态<sup>[6]</sup>。该条件即为屈服条件,可以表示为:

$$F(\{\sigma\})=0 \quad (1)$$

式中, $F$ 为屈服函数, $F < 0$ 表示材料处于弹性状态; $F=0$ 表示处于塑性状态; $F > 0$ 并不存在。

目前,岩土工程中通常采用Mohr-Coulomb屈服准则,以及在其基础上改进的Drucker-Prager屈服准则(即“D-P屈服准则”)。D-P屈服准则能够反映中间主应力对屈服特性的影响以及岩体材料的剪胀性质,而且其屈服面是光滑圆锥的表面,避免了Mohr-Coulomb屈服准则尖点处的数值计算困难。故本文弹塑性有限元计算中,材料均采用D-P屈服准则。

Drucker-Prager屈服条件为:

$$F=\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 、 $k$ 为材料参数,可表示为:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (3)$$

$$k = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (4)$$

$I_1$ 表示应力张量第一不变量, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ;

$J_2$ 表示应力偏张量第二不变量, $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ 。

### 1.3 拱坝破坏状态判据

对拱坝进行有限元弹塑性分析研究其安全稳定时,其破坏过程无法直接反映,研究判定坝体破坏或失稳的依据有重要意义。但由于对拱坝整体安全稳定的研究理论以及有限元计算的方法不尽相同,目前并没有形成统一而有效的判据。当前,常用的拱坝整体安全判据包括收敛性判据、塑性区贯通判据、能量法以及特征量突变判据等<sup>[7-8]</sup>。

(1)收敛性判据。在弹塑性分析过程中,因结构塑性区范围发展过大,导致迭代计算不收敛,那么可将此作为判定拱坝失稳的依据<sup>[9]</sup>。但是拱坝弹塑性分析较为复杂,逐一排查引起计算不收敛的包括模型、材料、计算理论和计算软件等各种因素较为困难,目前尚无明显有效的方法来消除这些因素的影响。因此,单独使用该判据得到的分析结果是不完善的,一定程度上限制了该判据的使用。

(2)塑性区贯通判据。该判据认为坝体结构上若存在贯穿结构上下游的塑性区,那么可判定拱坝将发生破坏。在分析过程中,坝体局部范围内应力达到材料的屈服点,随着荷载的增加,屈服范围逐渐发展并扩大,最终形成贯通的屈服区<sup>[10]</sup>。但是实际操作时对塑性区的贯穿只能通过人为的经验判断,在计算结果分析上存在一定的差异和不确定性。

(3)能量法判据。该方法在拱坝整体安全稳定分析中的临界失稳状态可表示为:

$$\int_V \delta U^T K \delta U dV = 0 \quad (5)$$

式中, $K$ 为系统整体劲度矩阵; $U$ 表示系统位移。

若式(5)大于零,说明系统安全;若式(5)小于零,则表示系统将发生破坏。能量法从系统总

能量角度出发研究整体安全,原理简单易懂,但计算较为复杂,不便于工程应用。

(4) 特征量突变判据。该判据认为拱坝失稳临界状态与坝体或坝肩岩体某些部位的位移、总应变能等特征量有关<sup>[11-12]</sup>。一般认为,通过超载法或降强法进行结构计算时,若结构处于安全状态,那么这些特征量的变化是连续且线性的;随着计算的继续,在达到临界失稳状态后,特征量会发生突变,此时判定系统已经发生破坏。该判据方法直观明了,应用亦较广泛。

综上所述,本文采用特征量突变判据对坝体破坏或失稳进行判别。

## 2 算例分析

本文以某高拱坝为例,应用D-P屈服准则并利用超载法对其进行弹塑性有限元计算,根据特征点位移突变判据研究拱坝的整体健康状态。利用位移判据求解拱坝整体安全系数时,根据逐级增加的超载系数K,计算得到不同的位移值,绘制位移量与超载系数的“位移-K”关系曲线,曲线斜率突变点对应于结构临界破坏状态,对应的K即为拱坝结构整体的安全系数。拱坝结构整体安全系数求解过程如图1所示。

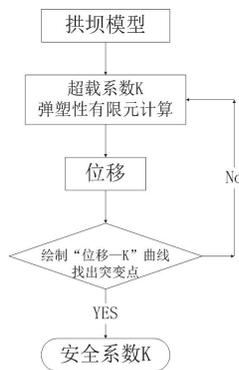


图1 安全系数求解流程图

### 2.1 工程概况

某水电站位于雅砻江干流下游河段。坝址处多年平均流量为 $1220\text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均年径流量 $3.85 \times 10^{10}\text{ m}^3$ ,电站总装机容量 $3.60 \times 10^6\text{ kW}$ (6台 $\times 6.0 \times 10^5\text{ kW}$ )。水库正常蓄水位 $1880\text{ m}$ ,死水位 $1800\text{ m}$ ,总库容 $7.76 \times 10^9\text{ m}^3$ 。大坝为混凝土双曲拱坝,坝高 $305\text{ m}$ 。

### 2.2 有限元模型

根据实际资料建立拱坝三维有限元模型,其

基础范围:上下游方向、左、右坝肩及坝基底均取为1倍坝高。有限元计算模型采用六面体8节点等参单元,网格模型共有单元142254个,节点150648个。模型中河谷最低处高程 $1580.0\text{ m}$ ,坝顶高程 $1885.0\text{ m}$ ,坝高 $305.0\text{ m}$ 。整体计算坐标系:X轴指向下游;Y轴指向左岸;Z轴竖直向上。模型如图2所示。

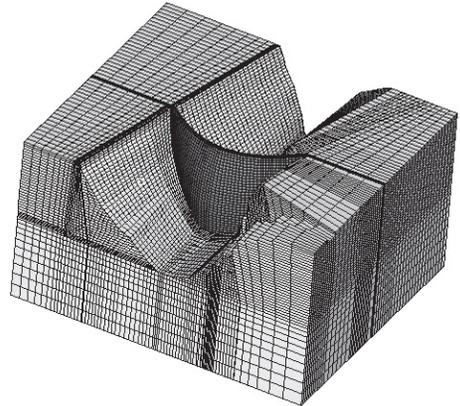


图2 整体三维模型

### 2.3 边界条件、荷载工况及材料参数

对拱坝整体模型进行仿真计算时,对其底部基岩边界约束其X、Y、Z向位移,对四周边界采用法向约束。

拱坝的应力应变状态较为复杂,受水位、温度、坝基库盘以及施工工艺的影响较大。本次弹塑性计算分析,外荷载只考虑水压荷载的作用,计算工况为正常蓄水位工况。为简化模型计算,对坝体和基岩不再进行材料分区,坝体混凝土、坝基岩体的材料参数如表1。

表1 坝体及地基的物材料参数

材料类别	弹性模量 E ( $10^3\text{ MPa}$ )	泊松比 $\mu$	黏聚力 ( $\text{MPa}$ )	内摩擦角 $\varphi$ (rad)
坝体混凝土	25.0	0.167	1.643	0.868
坝基岩体	18.0	0.280	2.000	0.983

分析时,利用超载法增加水容重,超载系数从1开始,此后逐级递增,增量为0.5,材料参数及荷载保持不变。当拱坝整体到达临界失稳状态时,对应的超载系数即为拱坝整体安全度。

### 2.4 计算结果分析

根据拱坝在不同超载工况下的弹塑性有限元计算结果,K=1时计算结果如图3所示,以拱冠梁上游面顶点、左右坝肩节点的顺河向位移作为

特征量,分析其随超载系数增大的变化规律。图4和图5为相关特征节点顺河向位移与不同超载系数K的关系曲线。

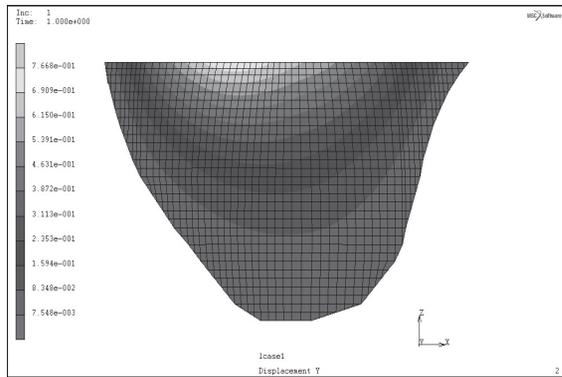


图3 坝体上游面径向位移

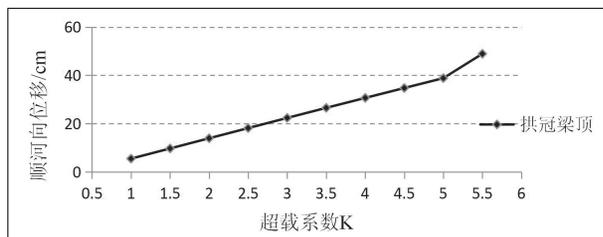


图4 拱冠梁顶点顺河向位移与超载系数K关系曲线

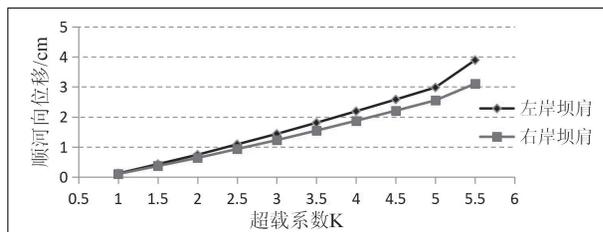


图5 坝肩顶点顺河向位移与超载系数K关系曲线

由图4、图5可以看出,在超载系数 $K=5$ 以下时,坝体特征点(拱冠梁顶点及左右岸坝肩顶点)顺河向位移随超载系数的增大而增大,呈现较明显的线性增长关系。当超载系数 $K=5.5$ 时,特征点顺河向位移均出现突变增大的情况。根据位移突变安全判据,可认为此时拱坝发生了破坏,其安全系数 $K$ 应在 $5 \sim 5.5$ 之间。

### 3 结语

本文针对拱坝整体安全分析问题,采用超载法进行弹塑性有限元分析,并以某高拱坝进行了数值实验,得出如下结论:

(1)有限元法超载法的超载系数 $K$ 本身就是传统意义上的稳定系数,通过增加水容重来分析结构的稳定性,直到临界状态为止,此时的超载系数就是所要求的稳定系数。该模型安全系数 $K$ 应在 $5 \sim 5.5$ 之间。

(2)位移特征判据具有反映拱坝破坏失稳及监测拱坝整体健康状态的可行性。

### 参考文献:

- [1] 孙剑,孙建生,曹国珍,等.有限元应力积分等安全系数剩余推力法重力坝深层稳定分析研究[J].水力发电.2016,42(7):45-48.
- [2] 戴妙林,李同春.基于降强法数值计算的复杂岩质边坡动力稳定性安全评价分析[J].岩石力学与工程学报.2007,26(S1):2749-2754.
- [3] 李朝国,陆金池.综合法与超载法在沙牌RCC拱坝坝肩稳定分析中的应用[J].四川联合大学学报:工程科学版.1997,1(3):64-71.
- [4] 林继镛,王光纶.水工建筑物[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [5] 陈国荣.有限单元法原理及应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [6] Sun P M, Bao T F, Gu C S, et al. Parameter sensitivity and inversion analysis of a concrete faced rock-fill dam based on HS-BPNN algorithm. Sci China Tech Sci, 2016, 59: 1442-1451.
- [7] 任青文.突变条件下高拱坝整体失效分析的理论与方法[J].工程力学,2011,28(2):85-96.
- [8] 李同春,王仁坤,游启升,等.高拱坝安全度评价方法研究[J].水利学报,2007(S1):78-83.
- [9] 任威威,苏超,陈丽,等.某混凝土高拱坝整体安全度评估[J].水力发电.2012,38(4):21-23.
- [10] Ren Q, Li Q, Jiang Y, et al. Theory and methods of global stability analysis for high arch dam[J]. Science China Technological Sciences. 2011, 54(1):9-17.
- [11] 宋鹏,程琳,田振华.高拱坝安全度计算方法对比分析[J].水力发电.2012,38(10):36-39.
- [12] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报.2003,22(02):254-260.