

基于有限元和突变理论的高拱坝坝体稳定研究

丁晓唐¹, 顾冲时², 蒋 勇¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 建立了高薄拱坝坝身稳定分析的系列概化模型, 采用通用有限元软件 ANSYS 的屈曲分析功能, 计算其稳定超载系数并用突变理论分析了高薄拱坝的稳定问题, 分析表明, 其稳定性判别结果与有限元稳定计算结果相吻合。

关键词 高薄拱坝; 坝体屈曲; 有限元; 稳定超载系数; 突变理论

中图分类号 TV642.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)02-0175-04

随着水利水电事业的发展和西部大开发战略的实施, 目前我国正处于水电建设的高峰时期, 已建和在建的 100 m 以上的高拱坝有 20 多座, 如小湾、溪洛渡、锦屏等, 坝高都在 300 m 左右。拱坝是一种高次超静定的空间结构, 既安全又经济, 已成为我国水电建设中的一个主要坝型。

拱坝设计主要应满足坝体应力和拱座稳定等方面的要求。随着各种优化方法在设计中的应用及混凝土强度等级的逐渐提高, 拱坝呈现体积相对越来越小、厚度相对越来越薄的趋势。过薄的坝体可能会发生弹性屈曲^[1-3], 其安全性可能由自身稳定性控制, 如科尔布莱恩高拱坝的开裂, 我国有学者认为其作为薄壁受压结构, 出现裂缝可能是不满足抗屈折稳定所致^[2]。所以对于高薄拱坝来说, 除坝身混凝土强度破坏和拱座失稳之外, 坝体屈曲也是一种破坏模式, 有必要对拱坝坝体自身稳定性进行研究。

1 高薄拱坝有限元稳定分析

1.1 稳定分析方法

稳定问题分析方法有解析法和数值法。结构稳定解析分析方法通过静力平衡条件, 建立微分方程式, 求解微分方程得到结构的临界荷载, 可以对结构稳定问题的实质进行深入研究。由于数学求解上的困难, 解析法往往只能应用于有规则几何形状和典型边界条件的简单结构, 而对于拱坝类具有复杂体形的结构, 缺少直接应用的解答。基于有限单元法的数值分析方法^[4]通过建立拱坝结构的几何刚度矩阵, 求解稳定特征值问题, 以获得拱坝结构的临界荷载因子和屈曲形态, 为拱坝坝体稳定分析提供了有力的工具。本文采用通用有限元软件 ANSYS 的屈曲分析功能, 分析所建高薄拱坝数值分析模型的稳定性。

1.2 稳定超载系数

计算拱坝强度或稳定安全系数时, 通常可采用同比降低材料强度参数、同比增大荷载及单独增大水压力等方法^[5]。本文在拱坝稳定分析时, 采用单独增大水压力法计算拱坝稳定超载系数。设拱坝的自重、材料参数、水位等保持不变, 以增加水密度的方式超载。随着水密度的不断增加, 拱坝的变形、应力和稳定性等不断发生变化, 直至丧失稳定承载力。破坏时的水与原水之比就是稳定超载系数 K 。

1.3 概化模型的有限元稳定分析

决定拱坝体形的参数众多, 包括河谷形状、坝型、宽高比、水平拱圈形式、坝顶中心角、拱冠梁剖面和倒悬度等, 且变化范围比较大。为使拱坝坝体稳定分析具有实用性, 所建模型必须有一定的代表性。本文对国内外众多高薄拱坝的几何参数进行统计分析^[6], 在此基础上确定拱坝坝身稳定分析的系列概化模型和材料参数。

中厚拱坝和厚拱坝一般只会发生强度破坏, 高薄拱坝可能发生坝体屈曲破坏。概化模型的高度和厚高比

限定在规范规定的高拱坝和薄拱坝的范围内(高度大于70 m、厚高比0.08~0.20),模型的宽高比取2.5,河谷形状采用内角为45°的等腰梯形,水平拱圈为单心圆,顶拱中心角为100°,拱冠梁倒悬度为0.15~0.30,混凝土弹性模量取20.7 GPa,泊松比取0.167。

厚高比是拱坝的一个重要体形参数,拱坝设计规范以厚高比的大小将拱坝分为厚拱坝、中厚拱坝以及薄拱坝,同时厚高比也反映了拱坝悬臂梁的柔度。本文所建系列稳定分析概化模型的超载系数和厚高比的计算结果见图1。

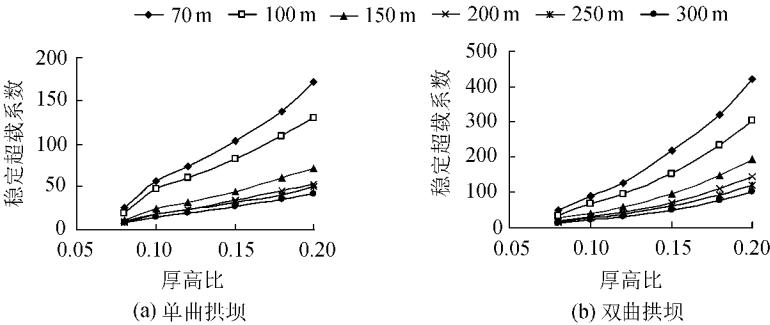


图1 厚高比与稳定超载系数的关系

Fig.1 Relationship between thickness-height ratio and stability overload coefficient

2 用突变理论分析拱坝稳定性

2.1 尖拐型突变模型

突变理论是以分叉理论、奇异理论和拓扑学为数学工具,用以分析如岩石突然断裂、桥梁突然坍塌、拱坝失稳等传统的微积分方法不能解释的不连续变化现象的数学分支^[7]。突变理论通过给出系统在突变过程的势函数,讨论相应的突变模型,特别是控制空间中突变集的几何形状,定性研究不连续变化现象。按照几何形状的不同,可分为折叠型、尖拐型、燕尾型等7种类型的初等突变^[8]。拱坝坝体一般在设计荷载作用下变位光滑连续,但在特殊情况下,坝体刚度不够,突然失稳,从一种连续的状态突然跳跃到不连续的状态,其失稳突变过程具有突跳性、滞后性、发散性、多模型性和不可达性等特征,与尖拐型突变的典型性质相符合,故本文采用尖拐型突变模型研究拱坝的稳定性,其几何形状见图2。

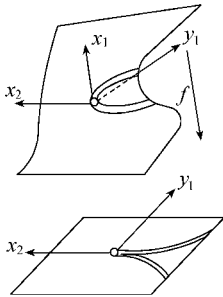


图2 尖拐型突变

Fig.2 Cusp catastrophe

拱坝稳定分析尖拐突变模型的势函数为

$$V(x) = x^4 + ux^2 + vx$$
 (1)

式中: x ——拱坝状态变量; u, v ——控制变量。对势函数进行一次求导得到其临界点方程

$$V'(x) = 4x^3 + 2ux + v = 0$$
 (2)

拱坝的稳定平衡曲面也由式(2)给出,求解式(2),得到式(1)即拱坝稳定分析模型的临界点。由代数学可知,式(2)可能有1个或3个实根,实根的数目由判别式

$$\Delta = 8u^3 + 27v^2$$
 (3)

决定。当 $\Delta > 0$ 时,式(2)只有一个实根,势函数取唯一的极值,拱坝处于稳定状态;当 $\Delta = 0$ 时,拱坝处于稳定和非稳定的临界状态;当 $\Delta < 0$ 时,式(2)有3个实根,势函数有多个极值,拱坝则处于非稳定状态。

2.2 基于突变理论的拱坝稳定分析

本文用尖拐型突变模型研究拱坝坝体稳定性^[9-10]。

设拱坝坝体稳定超载系数 K 与拱坝厚高比 t/H 的关系为

$$K = F(G, P, B) \sum_{i=0}^4 a_i \left(\frac{t}{H} \right)^i$$
 (4)

其中 $F(G, P, B)$ 是拱坝的几何特性、受力状况和边界条件的函数, a_i 为由有限元稳定计算结果(图1)得到的回归系数。

令 $\frac{t}{H} = Y - L$,其中 $L = \frac{a'_3}{4a'_4}$,则式 (4) 变为

$$K = a_4 Y^4 + a_2 Y^2 + a_1 Y + a_0 \tag{5}$$

其中

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_4 \end{bmatrix} = F(G,P,B) \begin{bmatrix} L^4 & -L^3 & L^2 & -L & 1 \\ -4L^3 & 3L^2 & -2L & 1 & 0 \\ 6L^2 & -3L & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_4 \\ a'_3 \\ a'_2 \\ a'_1 \\ a'_0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

令式 (5) 中的 $K = a_4 V$, $P = a_2/a_4$, $Q = a_1/a_4$, $E = a_0/a_4$,这样得到拱坝稳定分析尖拐型突变模型的标准开折为

$$V = Y^4 + PY^2 + QY + E \tag{7}$$

因此 ,拱坝坝体稳定的判别式为

$$\Delta = 8P^3 + 27Q^2 \tag{8}$$

分析本文所建系列拱坝分析模型的坝体稳定性 ,由有限元计算结果得到回归系数 a'_i ,计算得坝体稳定判别式 Δ 的结果 ,见表 1 和表 2.

表 1 单曲拱坝回归系数和判别式计算结果

Table 1 Regression coefficients and calculation results of the discriminant of single-curvature arch dam

坝高/m	a'_4	a'_3	a'_2	a'_1	a'_0	R^2	$\Delta/10^{-5}$
70	- 583 979	411 184	- 100 013	11 142	- 412	0.999 7	6.65
100	- 1 000 000	674 535	- 151 472	15 369	- 542	0.999 7	6.64
150	- 529 244	316 810	- 68 494	6 784	- 234	0.999 9	1.03
200	- 190 322	115 649	- 25 246	2 686	- 95	0.999 6	4.58
250	- 124 909	96 765	- 25 341	3 029	- 116	0.999 4	14.90
300	- 180 548	113 797	- 25 549	2 677	- 93	0.999 9	3.00

表 2 双曲拱坝回归系数和判别式计算结果

Table 2 Regression coefficients and calculation results of the discriminant of double-curvature arch dam

坝高/m	a'_4	a'_3	a'_2	a'_1	a'_0	R^2	$\Delta/10^{-5}$
70	751 900	- 353 024	71 043	- 4 558	110	0.999 6	14.30
100	- 866 092	563 554	- 120 964	12 194	- 419	1.000 0	9.99
150	22 793	12 803	190	237	- 0.4	1.000 0	701.00
200	- 147 947	110 762	- 22 633	2 408	- 80	1.000 0	102.00
250	- 267 338	179 313	- 38 422	3 926	- 135	1.000 0	17.60
300	- 151 211	105 109	- 21 918	2 273	- 76	1.000 0	40.50

由表 1 和表 2 可见 ,当拱坝超载至稳定超载系数时 ,其坝体稳定判别式 Δ 均约为 0 ,说明此时拱坝处于稳定和非稳定的临界状态.由此可见 ,对于本文建立的高薄拱坝模型的稳定性分析 ,应用突变理论分析的结果与有限元计算结果是完全吻合的.

突变理论的数学基础是宽厚的 ,它能够很好地应用到弹性理论中 ,研究平衡态的分叉.通过对高薄拱坝稳定性的研究 ,说明突变理论在高拱坝有限元稳定分析中的应用同样是成功的.

3 结 语

目前我国正处于水电工程建设的高峰时期 ,随着拱坝建设高度的增加、高强度和高性能混凝土的应用 ,使拱坝的厚度在优化设计中更薄 ,因此拱坝坝体的自身稳定问题变得不容忽视.

高薄拱坝坝体结构的失稳是一种典型的突变现象 ,可用突变理论来分析.为了分析高薄拱坝的稳定性 ,本文建立了拱坝稳定分析的系列概化模型 ,用有限元和突变理论分析了高薄拱坝的稳定性 ,计算了其稳定超

载系数. 计算结果表明, 两者的分析结果是吻合的.

参考文献：

[1] 黄文熙. 拱坝抗屈折稳定初探[J]. 水利学报, 1995(9) :1-3.

[2] 李瓚, 陈飞, 郑建波. 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.

[3] 钱向东, 任青文, 赵引. 拱坝的失稳形式及其分析方法[C]//白以龙, 杨卫. 力学, 2000. 北京: 气象出版社, 2000 :714-715.

[4] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.

[5] 朱伯芳, 高季章, 陈祖煜, 等. 拱坝设计与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

[6] 丁晓唐. 高拱坝结构稳定转异和体形优化分析理论和方法[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[7] ARNOLD V I. Catastrophe theory[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

[8] 何平, 赵子都. 突变理论及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.

[9] 顾冲时, 吴中如, 徐志英. 用突变理论分析大坝及岩基稳定性的探讨[J]. 水利学报, 1998(9) :48-51.

[10] 陈亮. 应用突变理论分析 Euler 压杆的稳定性[J]. 应用力学学报, 2003, 20(2) :111-115.

Analysis of stability of high arch dams based on FEM and catastrophe theory

DING Xiao-tang¹, GU Chong-shi², JIANG Yong¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : A series of generalized stability analysis models of high and thin arch dams were established, and the stability overload coefficients were calculated with the buckling analysis function of ANSYS based on FEM. The stability of dam body was also analyzed using catastrophe theory. The results coincide with the FEM results.

Key words : high and thin arch dam ; dam buckling ; FEM ; stability overload coefficient ; catastrophe theory