

特高薄拱坝坝体屈曲分析及应力控制指标的修正

蒋 勇¹,丁晓唐¹,顾冲时²

(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 对高薄拱坝几何参数进行了统计分析,根据此分析结果建立了特高薄拱坝稳定分析概化模型.采用空间有限元稳定分析方法对特高薄拱坝的坝体屈曲问题进行了研究,并通过对拱坝的强度和稳定超载分析,得出了拱坝破坏包络曲线.分析结果表明,特高薄拱坝设计时应重视坝体屈曲影响,考虑坝体屈曲影响后应对应力控制指标进行修正.

关键词 特高薄拱坝;坝体屈曲;柔度系数;稳定超载系数;应力控制指标;修正

中图分类号 TV642.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2008)01-0054-04

较之普通拱坝,特高拱坝总体应力水平高,材料各项性能已充分利用,潜力有限,一旦个别地方失效,就会出现不可逆和向最终破坏发展的变化^[1-2].随着各种优化方法在设计中的应用以及混凝土强度等级的逐渐提高,特高拱坝呈现体积相对变小、厚度相对变薄的趋势.过薄的坝体可能会发生弹性屈曲^[3],其安全性可能由自身稳定性控制.SL282—2003《混凝土拱坝设计规范》^[4]的适用范围没有涵盖坝高大于 200m 的特高拱坝,同时该规范仅从强度角度出发确定拱坝应力控制指标,没有考虑特高薄拱坝可能出现的坝体屈曲对应力控制指标的影响.本文采用空间有限元屈曲分析方法来研究特高薄拱坝的坝体屈曲问题,探讨特高薄拱坝坝体屈曲对应力控制指标的影响.

1 特高薄拱坝坝体屈曲分析

1.1 拱坝的坝体屈曲和柔度系数

拱坝结构稳定是拱坝设计与研究的重要课题之一.拱坝的稳定是指在荷载作用下,拱坝能够保持坝体、岩体及其交界面的整体稳定.坝体、岩体和交界面三者中,有一个失稳将导致拱坝整体失稳.拱坝失稳具体可分为坝肩岩体的滑移、坝肩岩体的超量压缩、建基面的破坏、坝体的破坏和坝体的屈曲 5 种形式^[5].前 4 种拱坝失稳形式都属于强度破坏,可以通过求解强度极限问题来确定安全度.拱坝是一种变厚度壳体结构,厚度 t 并非远小于中面的曲率半径 R ,一般属厚壳范围.当拱坝不太高、混凝土材料强度不太大、坝体不过于单薄时,不会发生坝体屈曲.目前,我国高拱坝建设蓬勃发展,高强混凝土材料的应用以及坝体体形优化使拱坝厚度变得越来越薄,部分区域的 t/R 已小于 0.05,接近薄壳范围,故特高薄拱坝可能产生的坝体屈曲失稳值得注意.

文献[3]将拱坝视为一种受压的薄壁结构,认为既要进行强度控制,还要进行坝体稳定控制.将拱坝简化成由水平拱段和竖向悬臂梁组成的网格结构,假定一切水平径向荷载由水平拱段承担,拱坝自重和地震荷载由竖向悬臂梁承担,分别建立了由拱段和悬臂梁控制的 2 个拱坝抗屈曲校核准则,并采用结构稳定解析方法研究了坝体屈曲问题.上述简化分析不能真实地反映实际拱坝坝体结构的稳定状态.

拱坝的柔度系数 C 由瑞士坝工专家龙巴迪提出,用来反映拱坝结构的柔度,其表达式为

$$C = \frac{A^2}{VH} = \frac{S_m}{t_m} \quad (1)$$

式中: A ——拱坝中剖面的面积; V ——拱坝体积; H ——拱坝的最大高度; S_m ——拱坝平均弧长; t_m ——拱坝

平均厚度.

龙巴迪通过对一批已建拱坝的数据统计,绘制了拱坝高度与柔度系数的分布统计图,如图 1 所示^[6].在龙巴迪的柔度系数基础上,文献[6]假定拱坝力学模型为圆筒的一部分,从强度观点要求圆筒应力不大于混凝土的容许压应力,给出相应的强度破坏曲线,如图 1 中 a 线所示;同时假定拱坝力学模型为受匀布压力的无铰弹性圆拱,从屈曲观点给出了破坏曲线,如图 1 中 b 线所示.文献[6]通过强度和屈曲分析,得出如下结论:拱坝坝体的安全性一般由强度控制,只有当坝体采用高强度混凝土,且强度破坏曲线抬高接近或超过稳定破坏曲线时,才会由屈曲失稳控制.文献[6]还建立了拱坝强度和稳定破坏之间的关系,但在拱坝强度和稳定分析时没有统一的力学模型,亦不能真实反映拱坝受力状态.

1.2 特高薄拱坝坝体屈曲有限元分析

坝体屈曲问题的分析方法有 2 种,即解析法和数值法.解析法利用静力平衡条件建立微分方程式,并通过微分方程的求解得到拱坝的临界荷载.但由于数学求解比较困难,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.本文运用有限元法分析坝体屈曲稳定性^[7],通过建立的拱坝结构的几何刚度矩阵来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.三维有限元稳定分析能考虑拱坝的空间整体作用,应用于不规则的几何形状和各种边界条件,可以更精确地分析拱坝一类具有复杂体形结构的稳定性.

结构屈曲的全拉格朗日列式法表达式为^[8]

$$(K_E + K_G + K_L)\delta = K\delta = 0 \tag{2}$$

式中: K_E ——常规有限元法中刚度矩阵; K_G ——几何刚度矩阵; K_L ——大位移刚度矩阵; K ——刚度矩阵.位移增量 δ 有不平凡解,因而不为零, K 行列式必须为零,结构屈曲的判别准则为

$$|K| = 0 \tag{3}$$

在线性屈曲情况下,大位移矩阵 K_L 为零,则式(3)变为

$$|K_E + K_G| = 0 \tag{4}$$

K_E 可以事先确定,但几何刚度矩阵 K_G 尚没有数值解,因为此时外荷载正是待求的屈曲临界荷载.有限元分析时先给定任意一组外荷载 P^* ,使几何刚度矩阵数值化,得到相应的几何刚度矩阵为 K_G^* ,再令屈曲临界荷载为施加外荷载的 λ 倍,则几何刚度矩阵成为 λK_G^* ,于是结构屈曲判据为

$$|K_E + \lambda K_G^*| = 0 \tag{5}$$

这是一个广义特征值方程,由此可求出结构屈曲临界荷载.

本文进行拱坝稳定分析时,给定初始外荷载为实际水荷载,采用超水密度方式^[9],保持结构的材料参数和水位不变,以增加水密度的方式超载.随着密度的不断增加,拱坝的受力状态不断发生变化,直至拱坝坝体屈曲,以屈曲时液体的密度与设计时密度之比来定义稳定超载系数 λ .

2 概化模型及屈曲分析

本文通过对国内外众多高薄拱坝几何参数的统计分析^[10],建立了 300 m 特高薄拱坝屈曲分析概化模型,选定模型的宽高比为 2.5,河谷形状为内角为 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 0.15~0.3,混凝土弹性模量取 20.7 GPa,泊松比取 0.167.利用有限元软件 ANSYS 的屈曲分析功能分析所建模型的稳定性.

用柔度系数 C 反映拱坝坝体的柔度,所建特高薄拱坝概化模型厚高比变化范围为 0.08~0.2,则柔度系数在 14~28 之间.计算得到的坝体稳定超载系数与柔度系数的关系如图 2 所示.

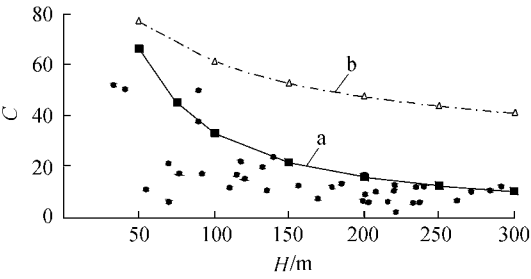


图 1 拱坝坝高与柔度系数的分布

Fig.1 Flexibility coefficient vs. arch dam height

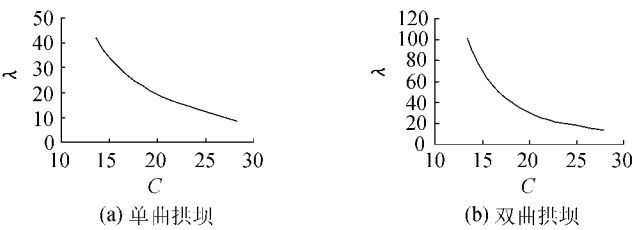


图 2 柔度系数与稳定超载系数的关系

Fig.2 Relationship between flexibility coefficient and stability overload coefficient

从计算结果可以看出：

- a. 随着柔度系数的增加, 即当坝体厚度越来越薄时, 拱坝的超载系数越来越低, 稳定性越来越差。
- b. 双曲拱坝的稳定性高于单曲拱坝. 如当柔度系数同为 28 时, 双曲拱坝稳定超载系数为 13.57, 单曲拱坝的稳定超载系数为 8.5. 因此, 双曲拱坝由于体形合理, 应力分布均匀, 不仅对强度有利, 其稳定性同样高于单曲拱坝。
- c. 对于 300 m 特高拱坝, 当柔度系数为 28 时, 其稳定超载系数约为 8.5. 本文采用的稳定分析方法为有限元线性屈曲分析, 而由于拱坝材料和几何的非线性, 应属于非线性屈曲问题, 实际失稳的临界荷载应比上述分析结果小, 稳定超载系数也比线性屈曲分析结果小. 所以, 当稳定安全度小于拱坝应力分析安全度时, 高薄拱坝就可能发生失稳破坏。

3 应力控制指标的修正

拱坝的应力控制指标关系到拱坝的体形和坝体厚度, 反映了拱坝设计的发展水平, 对于拱坝的经济性和安全性具有决定性的影响. 现行规范在确定应力控制指标时, 仅从强度角度出发, 没有考虑坝体屈曲对应力控制指标的影响。

随着拱坝柔度系数的增加, 拱坝的强度和稳定的安全系数都随之减小. 因此, 可以在考虑拱坝几何及材料的非线性基础上, 通过对拱坝非线性强度及稳定的有限元超载计算, 得到拱坝强度、稳定安全(超载) 系数随柔度系数的变化曲线, 取其外包线作为“ 拱坝破坏包络曲线”(图 3)。

由图 3 可以看出: 特高薄拱坝柔度系数比较小时, 先发生强度破坏; 当此柔度系数超过某一“ 界限柔度系数 C_0 ”后, 可能先发生屈曲失稳破坏, 此时应力控制指标已起不到控制作用, 应进行适当修正. 所以, 应考虑到柔度系数大于“ 界限柔度系数” 时拱坝破坏带有坝体失稳性质, 而强度尚未达到应力控制指标这一可能, 将特高薄拱坝的应力控制指标做一定的修正, 作为坝体屈曲对应力控制指标的影响。

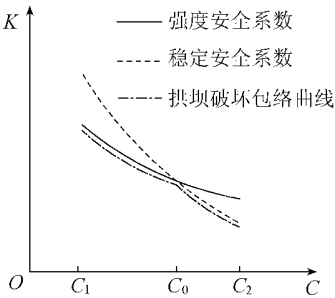


图 3 拱坝破坏包络曲线

Fig.3 Failure envelopes of arch dams

对于柔度系数大于“ 界限柔度系数 C_0 ”时可能发生失稳破坏性质的特高薄拱坝, 其稳定安全系数 $K_{稳}$ 将小于强度安全系数 $K_{强}$. 鉴于拱坝坝体稳定的安全度较之强度安全度要求较高, 建议将特高拱坝的应力控制指标修正为规范限值的 $K_{稳}/K_{强}$, 以考虑坝体屈曲对应力控制指标的降低作用. 当然, 具体的修正系数还需考虑其他因素的影响。

4 结 语

特高薄拱坝极限承载力与坝体强度和稳定的综合影响有关, 当拱坝柔度系数较小时, 强度的影响是第一位的, 当柔度系数比较大时, 拱坝可能先发生屈曲失稳破坏. 本文对所建特高薄拱坝概化模型进行了空间有限元稳定分析, 结果表明: 特高薄拱坝坝体稳定在设计中应予以重视, 当坝体厚度较薄时, 需弄清楚使结构丧失承载能力的主要因素, 是屈曲还是强度. 对于坝体屈曲引起的破坏, 设计时应应对特高薄拱坝的应力控制指标进行修正, 以考虑坝体屈曲对应力控制指标的降低作用。

参考文献：

[1] 潘家铮 陈式慧.关于高拱坝建设中若干问题的讨论[J].科技导报 ,1997(2) :17-19.
[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] 黄文熙.拱坝抗屈折稳定初探[J].水利学报 ,1995(9) :1-3.
[4] SL282—2003 混凝土拱坝设计规范[S].
[5] 白以龙 杨卫.力学 2000[M].北京 :气象出版社 ,2000.
[6] 任青文 王柏乐.关于拱坝柔度系数的讨论[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2003 31(1) :1-4.
[7] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京 :水利电力出版社 ,1979.
[8] 何君毅 林祥都.工程结构非线性问题的数值解法[M].北京 :国防工业出版社 ,1994.
[9] 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.
[10] 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.

**Buckling analysis and modification of stress control index
for super high and thin arc dam body**

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

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

Abstract :Based on statistical analysis of geometric parameters of high and thin arc dams , a generalized model for stability analysis of super high arc dams was established . Buckling analysis of super high and thin arc dam bodies was performed by use of the spatial finite element method , and the failure envelops for arch dams were obtained by strength and stability over-loading analysis on arc dams . The result shows that buckling effect should be paid much attention in design of super high and thin arch dams , and the stress control index should be modified when the buckling effect is taken into account .

Key words :super high and thin arch dam ; buckling of dam body ; flexibility coefficient ; stability overload coefficient ; stress control index ; modification