

基于有限元等效应力法的拱坝强度设计准则探讨

钱向东

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 指出了我国现行拱坝设计规范中存在的问题,根据若干已建拱坝的有限元等效应力分析结果,探讨基于有限元等效应力法的应力控制标准,提出了考虑建筑物等级的压应力设计准则和综合拉应力设计准则.

关键词 拱坝 有限元 等效应力 设计准则

中图分类号 TV642.4

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2003)03-0318-03

我国现行的《混凝土拱坝设计规范》^[1]以试载法为应力分析方法,规定拱坝的允许压应力等于混凝土的极限抗压强度除以安全系数,在基本荷载组合下,安全系数采用 4.0,在特殊荷载组合下,安全系数采用 3.5;允许拉应力在基本荷载组合下不得大于 1.2 MPa,在特殊荷载组合下不得大于 1.5 MPa,极端荷载组合下,允许应力可提高 30%.在欧美和日本等国家的拱坝设计规范中,也多采用试载法,强度设计准则大致相同(前苏联除外),只是应力控制标准有所差异.

尽管基于现行规范设计建造的许多拱坝几十年来都运行良好,但在实际使用中经常会碰到以下 3 方面的问题:(a)现行规范多采用试载法,而实际的拱坝应力分析中由于试载法的局限性,已广泛采用有限单元法,但有限单元法应力成果(特别是拉应力)的稳定性较差,较难采用现行的控制标准;(b)采用单一的抗压安全系数,安全系数与建筑物的重要性和级别无关;(c)虽然规定了允许拉应力,但对于许多高拱坝往往很难满足允许拉应力的要求,需作专门研究.另外,也有人指出规范中允许拉应力与混凝土的强度等级无关是不尽合理的.

为了解决拱坝弹性有限元应力数值不稳定的问题,专家提出了许多办法,如规定应力点的位置、采用厚壳单元、利用有限元计算截面内力等^[2].在“八五”国家重点科技攻关项目“高混凝土坝设计计算方法与设计准则”中,河海大学傅作新教授等系统地研究了有限单元法在拱坝设计中的应用,提出了有限元等效应力法,并对强度设计标准进行了初步的探讨^[3].本文结合国家电力公司“混凝土拱坝规范修订专题研究”和国家自然科学基金重点项目的部分研究内容,根据若干已建拱坝的有限元等效应力分析结果,进一步探讨基于有限元等效应力法的应力控制标准,为使有限单元法纳入新的混凝土拱坝规范提供科学依据.

1 若干已建拱坝的有限元等效应力

将弹性有限元法算得的坝体应力合成为截面内力,假定应力沿坝厚线性分布,由内力计算截面应力.这种应力与原来的有限元应力静力等效,故称之为等效应力.计算方法参见文献^[3].为了探讨有限元等效应力法的适用性,选择了国内具有代表性的 5 座已建拱坝进行了分析,基本荷载组合为正常蓄水位+温降+自重+泥沙压力,分析成果见表 1,为了便于比较还列出了试载法结果^[4].比较后不难发现,两种方法得到的各拱坝最大压应力都比较接近,而最大拉应力则差异较大.有限元等效应力的数值与坝高的关系具有较好的规律性.

2 基于有限元等效应力法的强度设计准则

在探讨拱坝的应力控制标准时,必须充分认识其结构形式和力学特征.拱坝是一种主要以压力拱形式传递荷载的复杂超静定结构,其压应力是维持系统平衡所必需的基本应力,应该要求有较高的强度储备,而拉

表 1 若干拱坝最大主应力

Table 1 Maximum principal stress of some arch dams

坝名	坝高/m	坝 型	河谷	有限元等效应力法		试载法	
				最大主拉应力 /MPa	最大主压应力 /MPa	最大主拉应力 /MPa	最大主压应力 /MPa
陈 村	76.3	混凝土重力拱坝	U 型	0.58	- 1.58	0.53	- 1.67
井岗冲	92.0	细石混凝土砌块石双曲拱坝	V 型	1.38	- 4.89	0.62	- 4.04
东 风	153.0	混凝土抛物线双曲拱坝	U 型	1.32	- 7.25	1.66	- 7.90
李家峡	155.0	混凝土三心圆双曲拱坝	U 型	1.55	- 6.03	0.66	- 4.97
二 滩	240.0	混凝土抛物线双曲拱坝	V 型	1.64	- 9.56	1.39	- 9.16

应力则是局部的、且可能随地基裂隙的开展或坝体的局部开裂而消失,局部的高拉应力仅是衡量大坝可能开裂范围大小的一种指标.因而,在确定拱坝的应力控制标准时,区别对待抗压和抗拉问题是合理的,也是必要的.

2.1 压应力准则

对于压应力,建议继续采用现行规范的准则,要求拱坝的设计最大压应力

$$\sigma_{cmax} \leq [\sigma_c]$$

其中允许压应力 $[\sigma_c]$ 等于混凝土的极限抗压强度除以安全系数 K_c .由于有限元等效应力法与试载法的最大主压应力结果比较接近,可继续采用现行规范的安全系数,即在基本荷载组合下, $K_c = 4.0$,在特殊荷载组合下, $K_c = 3.5$.考虑到建筑物的重要性和级别后,应适当调整安全系数(见表 2),以适应不同等级的建筑物对安全度的要求.

2.2 拉应力准则

对于拉应力,问题相对比较复杂,即使是消除了应力集中后的有限元等效应力,当坝体较高时拉应力最大值也往往难于满足现行规范的应力控制标准.如果要建立与混凝土抗拉强度相关的拉应力控制标准,则必须能够有效地测定混凝土的抗拉强度.事实上,混凝土的抗拉强度与试验方法有关,有时即使采用同一种方法,其结果也存在很大的离散性.也有人研究用相对容易测定的抗压强度的函数来表示抗拉强度,但往往各种表示方法间不能相互验证.此外,这种抗拉强度主要局限于混凝土块体,而实际拱坝中跨越竖向收缩缝、水平向浇筑缝以及坝基交界面的抗拉强度要小于混凝土块体的抗拉强度,且更难确定.因此,现行规范中拉应力控制标准不与混凝土强度挂钩有其合理的一面.

要想解决高拱坝拉应力难以满足允许拉应力要求的问题,建议在保证抗压和稳定安全度的前提下,允许拱坝发生局部的开裂.事实上对于高拱坝,局部的开裂和屈服往往难以避免.

表 3 拱坝拉、压应力之比 α

Table 3 Ratio of tensile stress to compressive stress of arch dams

坝名	最大主拉应力/MPa	同截面主压应力/MPa	拉、压应力比 α
东 风	1.32	5.62	1/4.26
二 滩	1.64	7.71	1/4.70
井岗冲	1.38	4.89	1/3.54
李家峡	1.55	6.03	1/3.89

表 2 抗压安全系数 K_c

Table 2 Factor of safety against compressive stress of arch dams

荷载组合	建筑物等级		
	1	2	3
基本组合	4.00	3.75	3.50
特殊组合	3.50	3.25	3.00

在允许局部开裂和屈服的设计原则下,以最大拉应力数值为基础的拉应力控制标准已无实际意义,应以控制拉应力区的范围为标准.在有限元等效应力的线性化假定下,沿拱坝厚度方向拉应力的范围可以用上下游面拉、压应力的比值(记为 α)来表示.如果控制拉应力区小于坝体厚度的 1/4,则相应的 α 应小于 1/3.表 3 给出了 4 座拱坝最大拉应力截面上的 α .

考虑到有些拱坝在某些设计工况(如温降)下,有可能出现上部拱圈大范围受拉的情况,且拉压应力值都不大,不能完全用拉应力区的范围进行控制,陈村拱坝就属于这种情况.因此,仍保留现行规范中允许拉应力的要求,即在基本荷载组合下不得大于 1.2 MPa,在特殊荷载组合下不得大于 1.5 MPa.

综上所述,建议拉应力控制标准采用以下两条:(a)拱坝的拉应力在基本荷载组合下不得大于 1.2 MPa,在特殊荷载组合下不得大于 1.5 MPa;(b)当(a)不能满足时,要求最大拉应力截面的上下游面拉、压应力之比值 α 小于 1/3.

3 结 语

传统的结构强度设计准则基于确定性模型的允许应力法(安全系数法),现代的结构强度设计准则已开始转向基于不确定性模型的极限状态法(概率法、可靠度法),我国的《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》就是基于极限状态法的。但是,由于混凝土拱坝设计工作的复杂性、工程样本的有限性以及统计资料匮乏等因素,仍推荐采用基于确定性模型的拱坝强度设计准则,以允许应力控制拱坝的强度。

本文讨论并建议的基于有限元等效应力法的拱坝强度设计准则,在形式上与现行规范相差不大,便于应用。但在内容上已进行了较大的改进,对压应力控制标准考虑了建筑物的重要性和等级,对拉应力控制标准,在保留原准则的基础上,增加了控制拉应力区范围的要求,使其更加科学合理,也为有限单元法纳入新的混凝土拱坝规范提供了依据。

本文工作是在河海大学傅作新教授、姜弘道教授、任青文教授的帮助和支持下完成的,也得到了云南澜沧江开发公司艾永平副总工程师的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] SD145—85,混凝土拱坝设计规范[S].
- [2] 朱伯芳.国际拱坝学术研讨会专题综述[J].水力发电,1988,(8):49—52.
- [3] 傅作新,钱向东.有限单元法在拱坝设计中的应用[J].河海大学学报,1991,19(2):8~15.
- [4] 杨海霞,卓家寿,艾永平.多拱梁法计算拱坝位移和应力的若干问题[J].水利水运工程学报,2001,(2):26—30.

Study on arch dam strength design criteria based on finite element equivalent stress analysis

QIAN Xiang-dong

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Some problems existing in the current code for arch dam design in China are pointed out. According to the analysis of equivalent stress of typical arch dams built in China, new design criteria based on finite element equivalent stress analysis are proposed, in which the importance or grade of structures is considered in the compressive stress criterion, and, as a control of tension field along the direction of dam thickness, the limit ratio of the maximum tensile stress to compressive stress of the same section is included in the tensile stress criterion.

Key words: arch dam; finite element; equivalent stress; design criterion