

高拱坝研究新进展

柴军瑞, 刘浩吾

(四川大学水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:以西部水电能源开发为背景讨论高拱坝研究的意义和重要性;综述高拱坝的体形与优化设计、场仿真分析与应力控制标准、破损机理与安全度分析、抗震分析与抗震工程措施等方面的最新研究进展.认为今后高拱坝研究的发展方向是:努力使高拱坝体形优化设计进入实用阶段;结合仿真应力分析,提出更接近实际的高拱坝应力控制标准;总结已建工程的经验,进行高拱坝安全度分析;开展广泛的高拱坝抗震分析与抗震工程措施研究.

关键词:高拱坝;优化设计;仿真应力;安全度;抗震

中图分类号:TV642.4

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)06-0001-04

随着国家西部大开发战略的逐步实施以及国家电力能源结构的调整,我国西部(特别是西南地区)的水电能源开发将更加得到重视.西南地区有许多坝址适合修建高拱坝,如近期拟开发的澜沧江小湾拱坝(坝高292m)、金沙江溪洛渡拱坝(坝高273m)、锦屏拱坝(坝高300m)等,其坝高都将超过目前世界上最高的拱坝——格鲁吉亚的英古里拱坝(坝高272m),且这些地区的地震烈度较高.修建这一批300m级的高拱坝,目前国内外缺乏可以借鉴的工程经验(我国拱坝设计规范^[1,2]规定,对坝高超过250m的拱坝必须进行专门研究).为此,“八五”、“九五”期间,国家组织有关部门针对300m级高拱坝的一系列技术问题进行了攻关研究^[3].

1 体形与优化设计

拱坝属于高次超静定的整体性空间壳体结构.只要地形、地质等条件有利,就能充分发挥拱坝混凝土材料的强度,减小坝体厚度,节省工程量.所以,从经济意义上讲,拱坝是一种很优越的坝型.但是,拱坝的体形是决定拱坝稳定和安全的因素之一;相同的坝体方量,不同的拱坝体形,拱坝的安全度差异可能会很大.由于拱坝(特别是双曲拱坝)的空间结构体形很复杂,确定其体形的参数很多,加之影响拱坝体形的因素很多,所以传统的经验性的设计方法很难兼顾安全性与经济性的要求.正是基于上述原因,拱坝(特别是高拱坝)体形的优化设计具有重要的现实意义^[4].

拱坝体形的几何模型由坝轴线位置与形状、拱冠梁剖面形状和水平拱圈形状三部分组成^[5].水平拱圈形状的类型有:单心圆拱、双心圆拱、多心圆拱、抛物线拱、椭圆拱、双曲线拱、对数螺旋线拱及混合线型拱等.这些拱圈形状都可以用统一的二次曲线来表示,二次曲线方程中参数的不同取值,对应着上述某种特定类型的拱圈形状.拱坝体形优化时将以拱坝几何模型中的这些参数为自变量进行优化.

和一般优化问题一样,拱坝体形优化的数学模型包括目标函数和约束条件两大部分.拱坝体形优化的目标函数根据不同的需要有以下3种类型:经济型(最经济,即坝体方量或工程造价最小)、安全型(最安全,在一定坝体方量的限制下安全度最大)、兼顾经济与安全型(即多目标规划,通过加权可化为单目标规划).针对最常用的经济型目标函数,约束条件有几何约束条件、应力约束条件和稳定约束条件.其中几何约束条件包括:坝轴线位置的限制、坝顶最小宽度及坝底最大宽度的限制、坝面倒悬度的限制、坝面保凸要求、坝顶或坝中溢流时冲坑与下游坝趾的距离要求等;应力约束条件是指坝体和坝基中拉应力与压应力的限制;稳定约束条件包括坝肩岩体抗滑稳定要求、拱座推力角和拱圈中心角的限制等.优化求解前,要对这些约束条件进行筛选及标准化处理^[5].

针对拱坝体形优化的数学模型(非线性规划问题),可采用的优化求解方法有3种:序列线性规划法(SLP)、罚函数法、序列二次规划法(SQP).序列线

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2001年第29批)

作者简介:柴军瑞(1968—),男,陕西眉县人,博士后,副教授,主要从事水工结构与渗流力学研究.

性规划法就是将目标函数和约束条件都按泰勒级数展开,并略去二阶以上的高阶项,化为线性规划问题后按单纯形法求出最初最优解;再在最初最优解处将目标函数和约束条件都按泰勒级数展开,略去二阶以上的高阶项,求出下一个最优解;以此类推,进行迭代,直到收敛(即相邻两个最优解的误差满足要求)为止。序列线性规划法简单易行,但所需的迭代次数较多。罚函数法就是构造一个由目标函数和约束条件组合的罚函数,对一系列罚因子求罚函数的无约束极小值问题;当罚因子趋于零时,即得原问题的最优解。序列二次规划法就是将目标函数和约束条件都作二次展开,化为二次规划问题,通过计算二次导数阵求解,迭代至收敛。序列二次规划法所需的迭代次数少,是目前效率最高的拱坝体形优化求解方法。

在我国,拱坝体形优化设计已应用于 30 余座拱坝工程中^[3],其中包括少数高拱坝。一般来说,拱坝采用优化设计方法可比传统设计方法节省坝体混凝土方量 5%~30%。

2 场仿真分析与应力控制标准

近年来,考虑施工过程的高拱坝仿真应力分析与研究愈来愈受到各国学者的重视。但由于混凝土拱坝是分块分层浇筑的,且施工期较长(数年之久),所以要进行较精确的仿真应力(特别是温度应力)分析,一般需要划分许多单元,计算许多时段。有时由此而引起的计算规模会达到令人无法接受的程度,更没有可能在个人计算机上进行计算,从而也达不到实用的目的。为此,在满足一定精度要求的前提下,出现了许多减小计算规模的高坝仿真应力分析方法,如仿真并层算法(或浮动网格法)、分区异步长算法、排水孔与冷却水管的等效算法等。

并层算法^[6](或浮动网格法)主要是针对温度应力仿真分析应运而生的。由于上部刚浇筑的混凝土层内温度梯度较大,且热学与力学性能指标的变化也大;而下部混凝土随着龄期的增长,性能指标的变化越来越小,温度梯度相对稳定,所以在某一计算时刻,将浇筑坝块由上到下划分为 4 个区域,即密集单元区域、单层单元区域、复合并层单元区域和均质并层单元区域。在密集单元区域内,将每个浇筑层(30~50cm 厚)划分为 3~5 层单元;在单层单元区域内,将每个浇筑层划分为 1 层单元;在复合并层单元区域内,将性能指标较接近的数个浇筑层并为 1 层划分单元;在均质并层单元区域内,将超过一定龄期的最下部浇筑层视为均质,按大网格划分单元。随着计算时段的迭代,每个浇筑层都要经过密集单元、单层单元、复合并层单元和均质并层单元这 4 个区域(故也称浮动网格法),区域之间的划分和过渡主要

是依据混凝土的性能指标与龄期的关系曲线而确定的。此外,由于各坝块并不是同时上升的,就需要各坝块之间或坝块与坝基之间的并层坝块接缝单元^[4,7],以减小计算规模。

分区异步长算法^[8]主要是为了解决计算时段太多的问题。和上述的并层算法(或浮动网格法)相结合,对密集单元区域、单层单元区域、复合并层单元区域和均质并层单元区域,分别采用不同的计算步长,密集单元区域和单层单元区域的计算步长较小(如 0.2~1.0d),而复合并层单元区域和均质并层单元区域的计算步长较大(如 10~30d)。这样,即大大地减小了计算规模,又具有较高的精度。

排水孔与冷却水管的等效算法包括渗流场分析的排水孔子结构法^[9]与温度场分析的冷却水管等效算法^[10,11]。由于排水孔与冷却水管的尺寸相对坝体很小,若在其附近剖分单元及过渡单元,势必使单元太多且复杂。渗流场分析的排水孔子结构法的思路为:若在某排水单元内有 n 个排水孔,就将该单元分成 n 个子结构,每个子结构内有一个排水孔;在每个子结构内,采用边界元法计算排水孔的影响;再由子结构向排水单元凝聚,求出反映排水孔列效应的排水单元传导矩阵;然后与其它单元组装成总体传导矩阵求解渗流场。温度场分析的冷却水管等效算法也是将单元内的冷却水管看成热量的汇项,通过热传导控制方程求出冷却水管对单元传导矩阵的等效贡献,然后与其它单元组装成总体传导矩阵求解温度场。

目前我国拱坝设计规范^[1]在应力控制标准方面存在以下不足:应力控制标准与建筑物重要性无关;允许主拉应力与混凝土强度等级无关;规范规定应力计算采用多拱梁法,但多拱梁法的不同程序计算结果不一致,特别是主拉应力;有限元法因计算结果应力集中,缺乏合适的应力控制标准,因而没有纳入规范。为解决以上问题,朱伯芳^[12]提出了控制拱坝设计主拉应力和设计主压应力分别在混凝土可用抗拉强度和可用抗压强度范围内的方法。在设计主应力中,以计算主应力为基础,按拉、压分别考虑了计算方法和程序软件修正系数、荷载修正系数、建筑物重要性系数、超载系数、荷载和计算仿真修正系数以及结构系数。在可用强度中,以试件的抗拉(压)强度为基础,按拉、压分别考虑了试件形状、尺度、湿筛影响修正系数、混凝土龄期修正系数以及持载时间效应系数。这样,可初步解决这些问题。此外,一些学者也开展了有限元法应用于拱坝设计的研究^[13,14]。

3 破损机理与安全度分析

总结已发生的拱坝失事及破坏实例,可将拱坝破损机理划分为以下几种典型的类型^[3]:

a. 坝基(肩)失稳.以法国 Malpasset 拱坝失事为代表.关于该坝的失事原因与破坏机理,有多种理论,而且至今仍为坝工界所争论.但是和大坝破坏痕迹相符且为大多数专家学者所公认的破坏机理如下:左岸坝踵开裂→渗流进入坝基→滑动楔形体受向下游的压力作用→断层区渗透系数降低为原来的1%(阻水)→滑动楔形体受很高的静水扬压力→滑动楔形体局部失稳→左岸重力墩向下滑移→大坝沿右岸扭转弯曲→溃坝.由此可以看出,坝基坝肩稳定是拱坝成立的前提.此坝的破坏机理也从一个方面说明了进行坝区动态的渗流场与应力场耦合研究的重要性.

b. 库岸滑坡.以意大利 Vajont 拱坝库岸大滑坡为代表.事后分析得出的此库岸大滑坡的破坏机理为:左岸倾向河床的岩层层面与卸荷裂隙、断层及古滑坡面组成一个大范围的下稳定岩体,层面上的粘土夹层、软弱岩层起主要作用;蓄水后由于岩溶发育,与断层、裂隙相连形成地下水补给集中区,使滑坡体扬压力和下滑力增大,而抗滑力减小;水位升高至 710 m 后又骤降至 700 m,内水外渗,形成向水库的渗透力;且连续降雨十几天,滑坡体完全饱和,从而触发大滑坡.此例也表明了库区治理工程在大坝工程中的重要性.

c. 坝体开裂.以奥地利 Kolnbrein 拱坝的开裂破坏为代表.该坝开裂的破坏机理为:坝体过薄(在 200 m 拱坝中柔度系数最大),在水压力作用下,上游坝踵附近形成较大的拉应力,并超过混凝土抗拉强度而产生受拉裂缝,渗流进入后又使裂缝进一步扩展.

d. 强震开裂.以美国 Pacoima 拱坝开裂破坏为代表.该坝的开裂主要是因为强震(已接近该地区最大可信地震)作用下,坝体与重力墩之间的垂直接缝(类似于横缝)严重开裂;修复后,在 1994 年强震中该处再次开裂.

e. 上滑(浮)失稳.以我国福建梅花拱坝溃决失事为代表.该坝溃决的破坏机理为:设周边缝后降低了拱坝的整体性,且周边缝面涂沥青大大降低了抗滑能力,溢流时在高水头作用下坝体沿周边缝上滑(浮),从而引起溃坝.

上述 Malpasset 拱坝的失事和奥地利 Kolnbrein 拱坝的开裂破坏引起对拱坝整体安全度评价的研究.瑞士著名坝工专家 Lombardi^[15]最早提出拱坝柔度系数 C 的概念: $C = A^2/(VH)$,其中 A 为拱坝中剖面(拱冠梁断面)面积, V 为拱坝体积, H 为最大坝高;并认为对相同的坝高, C 越小,坝越安全.为了反映坝高的影响,朱伯芳^[16,17]提出拱坝应力水平系数 D ($D = CH$) 的概念,认为 D 越小,坝越安全;并以 Kolnbrein 拱坝的应力水平系数 $D_0 = 3\ 500$ 为破坏的临界点.为了进一步反映坝体及坝基强度的影响,朱

伯芳还提出拱坝安全水平系数 J ($J = 100R/D$,其中 R 为反映坝体及坝基强度的一个综合指标)的概念, J 是反映拱坝相对安全水平的一个指标, J 越大,坝越安全.

4 抗震分析与抗震工程措施

目前拱坝的抗震安全评价仍以稳定安全系数和限制应力不超过容许应力来表示.在抗震设防标准方面,有单级设防与两级设防两大类^[18].由于高拱坝在强震作用下动力反应的特殊性,高拱坝抗震分析具有以下特点:高应力水平引起非线性,叠加原理不再适用,需研究静动作用组合分析方法;高应力水平引起伸缩横缝张开与闭合;需考虑坝址地基实际状况的影响、坝基各点地震动的差异及厚淤沙层对坝面动水压力的影响;坝肩岩体抗震稳定分析尤为重要;需研究基于随机理论的抗震可靠度分析.

关于静动作用组合分析方法,一般将静力作用视为特殊的动力作用.先将静力作用作为突加的阶跃函数,在考虑近域地基边界约束的条件下通过阻尼效应求得其稳定状态后,再施加动力作用进行求解.

关于伸缩横缝开合的模拟,Fenves 最早提出三维平面接触单元模型,采用非线性的动态子结构法进行求解,该法以缝面两边结点的相对位移量和假定的法向接触刚度来确定接触力.为克服 Fenves 模型的缺点,陈厚群等^[3,19~21]提出了考虑动、静摩擦的动力接触单元模型.

关于地基辐射阻尼的影响,以往采用偏于安全的无质量地基法.廖振鹏提出人工透射边界理论,采用二阶透射公式,将总场分解为自由场和外行散射场进行求解.张楚汉^[22]提出采用有限元(坝体)-边界元(近域地基)-无限边界元(远域地基)耦合方法进行分析,以反映地基的影响,坝基各点地震动的时空差异已为地震监测资料、数值分析及中美两国联合进行的东江拱坝水封爆破试验及龙羊峡重力拱坝水中爆破试验所证实;一般来说,拱坝坝顶的动力放大系数为 5~7 倍.关于厚淤沙层对坝面动水压力的影响,可将淤沙作为饱和多孔两相介质处理(沙颗粒较粗时),也可将淤沙作为单相介质处理(沙颗粒较细,成为淤泥,近似流体时).

坝肩岩体抗震稳定分析一般采用刚体极限平衡法,但该法不能考虑坝肩岩体变形与坝体动力的耦合影响.陈厚群^[3,23]提出有限元法与刚体极限平衡法相结合的分析方法,有限元法给出随时间变化的沿滑动岩块边界的应力,经积分得出动推力,然后用刚体极限平衡法求出整个地震过程中坝肩岩块抗滑稳定安全系数随时间变化的历程.将拱坝体系作为离散介质的坝肩岩体抗震稳定分析方法还有:拉格朗日下连续变形分析(LDDA)方法,界面元法(刚体

弹簧元法)、三维离散元法、基于塑性力学上限定理的三维极限平衡法等^[24~26]。

基于随机理论的抗震可靠度分析包括3个方面的内容:随机地震动场研究、随机地震动场下的动力反应、可靠度分析与可靠度设计。此外,还有材料随机特性的研究^[27]。由于地震荷载的随机性很大、开展此项研究具有很高的理论与实用价值。

高拱坝的抗震工程措施研究目前仍处于起步阶段。尽管结构振动控制技术已从成熟与实用的基础隔震系统、被动能量耗散系统向半主动与主动控制系统、智能结构发展,但由于高拱坝的特殊性,应用于高拱坝工程尚须进行深入的研究。目前拱坝工程中已采用的抗震工程措施为抗震钢筋(包括拱向钢筋与梁向钢筋),林皋^[18]对在拱坝横缝中安装被动能量耗散装置(包括粘弹性阻尼装置、软钢阻尼装置等)来代替抗震钢筋进行了研究。

5 结 语

高拱坝研究所涉及的课题很多,其中许多课题研究仍处于起步阶段^[28],今后宜在以下主要问题上开展研究,作为高拱坝研究的发展方向:

a. 高拱坝(特别是高双曲拱坝)的体形与优化设计:努力使高拱坝体形优化设计步入实用阶段。

b. 高拱坝应力控制标准研究:结合仿真应力分析方法,提出更接近客观实际的高拱坝应力控制标准。

c. 高拱坝安全度分析:系统总结已建高拱坝的工程经验,进行高拱坝安全度分析,提高高拱坝设计水平。

d. 高拱坝抗震分析与抗震工程措施:进行混凝土(包括碾压混凝土)材料三轴动力特性研究;采用多级设防标准研究;局部开裂后拱坝抗震安全研究;开发符合高拱坝强震反应一切主要特性的非线性仿真动力分析软件;将结构控制技术应用于高拱坝抗震的研究。

致谢:本文第一作者在2000年9月11~15日参加清华大学高拱坝设计与计算分析高级研讨班期间,曾得到过Gerald Zenz博士、Martin Wieland博士、朱伯芳院士、陈厚群院士、林皋院士、潘家铮院士、张楚汉教授、周维垣教授等专家的指导,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] SD145-85,混凝土拱坝设计规范[S].
- [2] DL5073-1997,SL203-97,水工建筑物抗震设计规范[S].
- [3] 清华大学高坝大型结构国家专业实验室.高拱坝设计与计算分析高级研讨班论文集[R].北京:清华大学,2000.
- [4] 朱伯芳,宋敬廷.双曲拱坝的最优化设计[J].水利水运科学研究,1980(1):13~23.
- [5] 朱伯芳.朱伯芳院士文选[M].北京:中国电力出版社,1997.
- [6] 朱伯芳.多层混凝土结构仿真应力分析的并层算法[J].水力发电学报,1994(3):21~30.
- [7] 朱伯芳.有限厚度带键槽接缝单元及接缝对混凝土坝应力的影响[J].水利学报,2001(2):1~7.
- [8] 朱伯芳.不稳定温度场数值分析的时间域分区异步长算法[J].水利学报,1995(8):40~52.
- [9] 朱岳明,张燎军.渗流场求解的改进排水子结构法[J].岩土工程学报,1997,19(2):69~76.
- [10] 朱伯芳.考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J].水利学报,1991(3):13~19.
- [11] 朱伯芳.利用预冷集料和水管冷却加快高碾压混凝土重力坝的施工速度[J].水利水电技术,2001,32(3):11~14.
- [12] 朱伯芳.拱坝应力控制标准研究[J].水力发电,2000(12):39~44.
- [13] 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.
- [14] 周维垣,杨若琼,刻公瑞.高拱坝的有限元分析方法和判据研究[J].水利学报,1997(9):1~6.
- [15] Lombardi. Kolnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem [J]. Water Power and Dam Construction, 1991(6):31~34.
- [16] 朱伯芳.混凝土拱坝的应力水平系数与安全水平系数[J].水利水电技术,2000,31(8):1~3.
- [17] Zhu Bofang. Stress level coefficient and safety level coefficient for arch dams [J]. Dam Engineering, 2000, 11(3): 133~142.
- [18] 林皋,陈健云.混凝土大坝的抗震安全评价[J].水利学报,2001,(2):8~15.
- [19] 郭永刚,侯顺载,陈厚群,等.高拱坝伸缩横缝的开关对拱座岩体稳定的影响研究[J].水利学报,2000(12):38~42.
- [20] 涂劲,侯顺载,陈厚群.纵缝对重力坝地震反应影响的研究[J].水利学报,2000(12):53~58.
- [21] 胡晓,侯顺载,王济,等.小湾高拱坝整体及有横缝模型的动力试验研究[J].水力发电,2001(2):48~50.
- [22] Zhang Chuhan, Song Chongmin. Infinite boundary elements for dynamic problem of 3-D half space [J]. Int J Num Method in Eng, 1991, 31:447~462.
- [23] 张伯艳,陈厚群,杜修力,张艳红.拱坝坝肩抗震稳定分析[J].水利学报,2000(11):55~59.
- [24] 张有天,周维垣.岩石高边坡的变形和稳定[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [25] 张建海,范景伟,胡定.刚体弹簧元理论及其应用[M].成都:成都科技大学出版社,1997.
- [26] Zhou Weiyan, Yang Ruqiong. Rock mechanics in China—application of computer methods in rock mechanics [M]. New York: Science Press, 1995.
- [27] 张艳红,杜修力,张伯艳.考虑介质随机性的结构——地基系统地震反应分析[J].水利学报,2001(1):11~17.
- [28] 黄达海.碾压混凝土拱坝的发展[J].水利水电科技进展,2000,20(3):21~24.

(收稿日期:2000-10-24 编辑:马敏峰)