

混凝土拱坝坝踵开裂研究述评

李宗利,任青文

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:从坝体开裂分析方法、坝踵开裂机理和安全准则三个方面总结已有的研究成果,并进行了简单分析.在开裂分析方法中,仍以数值分析法为主,较为先进的数值分析法有基于连续介质力学的不变网格有限单元法和基于非连续介质力学的流形元法与无单元法;坝踵开裂机理和安全准则研究虽已取得了一部分有价值的成果,但不完善;指出坝踵开裂研究中几个主要研究方向.

关键词:混凝土拱坝;坝踵;开裂机理;安全准则;述评

中图分类号:TV642.4

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)03-0062-04

拱坝坝踵开裂计算是拱坝设计的一项重要内容.我国原混凝土拱坝设计规范^[1]中明确规定了基本荷载组合和特殊荷载组合时坝内最大拉应力的容许值.这项规定意味着若计算点的拉应力不超过该容许值,从强度的观点就不会产生裂缝,但已建成的拱坝运行监测表明,绝大多数坝体在坝踵部位不同程度产生了裂缝,严重的将会威胁坝体的安全.国内外坝工界最为典型的事例是奥地利的科恩布赖拱坝坝踵开裂事故,也正是科恩布赖拱坝的破坏极大地促进了国内外坝工界对坝踵开裂机理的研究^[2~6].

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,我国近期规划拟建设一批300 m级高拱坝.修筑这类高拱坝将面临一系列以前未遇到的关键技术问题,为此,国家组织有关部门针对300 m级高拱坝的一系列技术问题进行了攻关研究,坝踵开裂问题是该研究的重要部分之一,笔者对该方面研究成果进行总结和分析,并提出一些认识.

1 研究方法

1.1 模型试验

模型试验是了解坝体受力性能的重要手段之一,即使在数值计算技术相当先进的今天,模型试验仍占有重要的地位.规范^[1]中明确指出,对于较为重要的拱坝除进行数值分析外还应进行模型试验,使二者得到的结果相互印证.国内外已进行了大量拱坝模型试验,得到了数值计算难以得到的研究成果.然而,模型试验的准确性决定于坝体和基础材料物

理力学性能、荷载及边界条件,甚至时间的相似比要求.坝踵开裂不仅受坝体体形、坝体与基础接触面附近材料的强度、变形模量和二者比值的影响,而且还受水力劈裂、地基地质构造等因素的影响.但是在模型试验中很难同时保证各影响因素的相似要求,所以模型试验也仅仅是研究手段之一,大量的坝踵开裂分析还得借助于数值分析.

1.2 数值计算方法

规范^[1]推荐拱坝应力分析方法有拱梁分载法和以有限元为代表的数值算法两类,因而坝踵开裂计算也就有两种基本方法.拱梁分载法是基于结构力学计算出建基面的内力后,按材料力学偏心受力公式得到坝踵部位的应力,再判断是否开裂^[1,7].这一方法是建立在弹性杆系变形之上的,不能反映材料的非线性变形和拱坝与坝基的整体作用特性.文献[8]针对坝体开裂计算对该方法进行了改进,在建立拱梁交点处变位协调方程时按混凝土的开裂非线性分析变形,反复迭代,在得到内力的同时得到了坝体开裂的分布.由于拱梁分载法存在本身难以克服的不足,使得变形开裂分析的结果也就难以反映真实情况,目前坝体开裂计算主要采用数值计算分析法.

采用数值方法计算坝体的开裂问题关键是如何跟踪裂缝的发展,这也是混凝土和岩石类材料开裂计算的关键技术.目前可用于分析拱坝开裂的方法有许多种,从处理裂缝的技术角度来分,可分为以下两类.

第一类是连续介质力学分析法,如有限单元法、

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50379005)

作者简介:李宗利(1967—),男,陕西凤翔人,副教授,博士研究生,主要从事水工结构教学与研究.

边界元法等^[9~12],其中有限元法是较为成熟且广为应用的数值方法,具体在跟踪裂缝发展的技术方面又可分为变网格和不变网格两种.变网格法就是随着裂缝的扩展,有限元网格不断重新剖分.这种方法的优点是已有的有限元程序不需要修改,但每一步分析前后数据处理量大,而且传递困难,尤其是采用非线性分析时更是如此;不变网格法^[12]则是在整个分析过程中网格保持不变,通过修改开裂单元的位移插值关系来反映裂缝的存在,即引入不连续位移函数.这样分析开裂问题简单易行,但目前研究中在引入不连续形函数时认为,一旦某一单元开裂,裂缝则贯穿整个单元,显然与实际不符,在分析时也就受单元尺寸的影响较大.

第二类是非连续介质力学法,具有代表性的是流形元法^[13]和无单元法等^[14,15].流形元法是石根华教授在20世纪90年代提出的基于有限覆盖技术建立起的一种数值方法,打破了传统的有限元思想,引入数学与物理双重网格,应用有限覆盖技术形成流形单元,完成对求解区域的剖分.在数学网格上进行位移插值函数的构造,而在流形单元上完成系统泛函的积分运算,插值子域的形状不因非连续界面的存在而改变得不规则,不管连续问题还是非连续问题的插值子域总是规则的,从而使得连续与非连续问题的插值函数构造相互统一.这样插值函数构造就不因裂纹扩展而改变,可以简单有效地研究连续与非连续变形问题,但该方法目前仅应用于平面问题,而且程序复杂.无单元法是在20世纪90年代由Nayroles等^[16]提出,后经许多学者发展,广泛地应用于岩土问题的一种分析方法,其主要思想是构造形函数的插值域与系统总能量积分域二者独立.具体构造插值函数时,在求解域布置一系列点,然后在任一点处,以该点为圆心作一个圆域当作插值子域.因此,在跟踪裂纹时,只要沿着裂纹可能扩展的方向布置结点或在开裂点附近加密布置结点,就可以方便地跟踪裂纹的扩展过程.但该方法仍存在裂纹的可能发展方向预测,以及在裂纹附近构造插值函数时影响半径的合理选取问题.

在拱坝开裂分析方面,文献[9]采用变网格法提出非线性弹性裂缝的定量分析方法;文献[11]在研究科恩布赖拱坝坝踵开裂时,采用弥散型裂缝模型,自动形成裂缝,开裂后无需改变原有的网格,但要求开裂单元的尺寸不能太大,建议取1/50坝高以下.前者计算工作量大,而后者则显得粗糙.文献[12]以连续介质力学分析的有限元为基础,引入开裂单元的不连续位移修正项,即建立了开裂单元位移模式,以此方法对小湾拱坝和二滩拱坝进行了分析.文献

[15]应用无单元法对小湾拱坝进行了开裂分析.

2 拱坝坝踵开裂机理研究

拱坝开裂问题一直是坝工界关注的问题之一,20世纪30年代美国建造1座试验性薄拱坝研究其开裂,得到的结论是:“裂缝的产生,不论在坝上或坝与地基面之间,都对坝的工作性能和安全运行无重大影响.然而,这种裂缝在什么条件下能允许出现,以及发展到什么程度才不致影响安全,都还不清楚.”^[17]拱坝建设的实践及70年代Zienkiewicz等的理论分析表明,拱坝上的裂缝影响是局部的,即使发展到构成周边缝,也不致立即危害坝的安全.这是因为拱坝是高次超静定结构,局部的开裂是结构放松约束来调整内力以适应变化的正常反应.但究竟开裂发展到何种程度,才不致影响拱坝的安全,还是未解决的问题.

国内外许多学者对坝踵开裂机理的研究^[3~5,12,15,18]表明,若坝体与地基连接很好,接触面具有很高的强度时,开裂可能深入地基,一般情况下,建基面为一薄弱面,坝体很可能沿建基面开裂,裂缝进入下游非拉应力区后,剪应力对裂缝的扩展作用将明显增大,形成剪切破坏区;水力劈裂对裂缝的初始扩展起决定性作用,水平荷载和缝面水压力是造成坝踵裂缝扩展的主要荷载;荷载、边界条件、开裂力学模型与参数、计算方法等对裂缝的开裂和稳定很敏感.

关于混凝土坝水力劈裂机理方面研究国外专家学者已取得了一些研究成果.文献[19]对混凝土重力坝坝踵裂缝缝宽大于2mm的情况,从质量和动量守恒原理出发推导了缝内动水压力分布,并对重力坝地震响应的影响进行了研究.文献[20~22]对混凝土水力劈裂的裂缝特性和缝内静水压力分布进行实验和数值分析研究,研究表明,缝内水流移动面滞后于裂缝发展前缘;缝内水压力分布与裂缝尖端张开位移直接相关;随着缝端张开位移的增大和时间的推移,缝内水压逐步达到水库全水头;裂缝突然闭合时,缝内来不及排出的水会引起较高的水压,产生拉应力.这些有价值的研究成果对混凝土坝的静动力特性及安全度的影响研究奠定了理论基础,但还没有形成完整的理论体系,还不能应用于工程设计与安全度评价.

3 坝踵开裂安全度评价

3.1 容许应力标准

从弹性理论出发,当混凝土内某一点的主拉应力超过材料的抗拉屈服应力时,该点就开裂,即使在

非线性分析时,仍然多采用最大拉应力准则,所以坝体或地基岩石的容许拉应力确定是判断是否开裂的最基本参数.朱伯芳院士^[23]分析了我国混凝土拱坝设计规范的应力控制标准后,指出规范^[1]存在许多不足之处,并对影响拱坝应力标准的各项因素深入分析,在总结国内外拱坝建设实践经验的基础上,结合理论分析提出了一套新的应力控制标准确定方法.该方法无疑对拱坝设计应力标准修订起到积极作用,但是该方法过多地引入修正参数,且这些参数多是主观给定的,缺乏理论基础;另外,制定应力标准的依据仍是国内外其他建筑物结构设计中已摒弃的安全系数法,这两点与即将颁布执行的新拱坝设计规范中概率极限状态设计思想是相悖的.

3.2 裂缝扩展稳定性

裂缝扩展稳定性多采用断裂力学的应力强度因子准则、最大能量释放率准则或应变能密度因子理论等来评判,并结合数值分析法计算.文献[3,4]应用平面应力强度因子分析了科恩布赖拱坝的坝踵裂缝扩展问题;文献[5]则克服其不足,应用三维边界元法计算应变能密度因子,分析该坝的坝踵裂缝扩展问题,很好地解释了科恩布赖坝的破坏过程.然而,断裂力学分析的前提是构件内某一点存在初始裂纹(缺陷),分析时需已知裂缝的位置和开裂长度,若在不知初始裂缝情况下会束手无策.混凝土是一种多相颗粒复合材料,随机分布着毛细孔、空隙及材料的裂隙等原生缺陷,这种原生缺陷就是一种损伤,通常称之为初始损伤.在外界因素作用下,初始损伤会有所发展并会出现新的损伤,当损伤积累到一定程度时,混凝土体将出现宏观裂缝,而宏观裂缝的端部又将发生新的损伤,再积累而引起裂缝的扩展,直至混凝土体完全断裂破坏.可见,混凝土的破坏过程实际上是损伤、损伤积累、宏观裂缝出现、宏观裂缝扩展等演变过程,从损伤理论出发探求混凝土拱坝的裂缝问题是一种新的途径,文献[24]在这方面进行了有益的研究.

3.3 坝踵开裂范围及深度安全准则

由于坝踵开裂的影响因素复杂,应力场、渗流场和温度场,甚至还有化学场耦合在一起,直接影响坝体的开裂及裂缝稳定,同时坝踵开裂还受坝体体形、施工质量、坝基的地质构造与物理力学特性等因素影响;另外,不同数值分析方法及网格的疏密会因开裂范围和深度变化极大,因而对拱坝开裂很难做出定量分析评判,国内外还未提出坝工界可以接受的安全度准则.

1986年瑞士坝工专家龙巴迪分析科恩布赖拱坝坝踵开裂原因时,提出用柔度系数法评判拱坝开

裂^[2].后来,许多专家学者对此系数判断的合理性提出质疑.文献[23]提出应力水平系数和安全水平系数的经验判据.文献[25]指出柔度系数不仅与坝高有关,而且与混凝土的强度有关,并从拱坝强度和拱圈稳定两个方面推导了破损曲线.文献[26]提出工程类比分析法,即选择河谷、坝高、体形条件相似的工程,采用同一计算程序及等同的有限元网格模型进行平行计算,并以已建工程的运行监测资料为依据,对拟建工程的坝踵开裂稳定性做出评价.文献[12]提出用“校准法”来评判坝踵开裂稳定性,其思想与文献[26]的基本一致.这些方法都有一定的局限性,但对拱坝开裂安全的评价都有作用,并对设计具有指导意义.

4 结 语

拱坝坝踵开裂校核是拱坝设计中极为重要的内容,尤其是300m级高拱坝,了解其开裂机理和正确应用安全准则是合理设计的基础,但该方面的研究才刚刚起步,还有许多需开展的工作:

a. 进一步完善和发展岩土类材料的开裂数值计算方法,特别是能够适用于两种材料交结面附近区域的开裂单元类型,同时使该类分析软件能够像普通有限元软件那样大众化.

b. 对裂缝产生的原因、起裂条件、开裂长度和方向、裂缝稳定判断准则等问题在实际工程调查基础上,从理论上深入研究,尤其是水力劈裂及剪力的影响.研究内容既包括材料本身的开裂机理研究,也包括拱坝坝踵的开裂机理研究.

c. 坝踵开裂对拱坝静承载力和动力响应的影响研究,提出了合理的开裂范围和开裂深度安全准则.

参考文献:

- [1] SD145—85,混凝土拱坝设计规范[S].
- [2] 汝乃华,姜忠胜.大坝事故与安全·拱坝[M].北京:水利电力出版社,1995.182~214.
- [3] Linsbaurer H N, Ingraffea A R. Simulation of cracking in large arch dam(Part 1)[J]. J of Struct Eng, 1989, 115(7): 1599~1615.
- [4] Linsbaurer H N, Ingraffea A R. Simulation of cracking in large arch dam(Part 2)[J]. J of Struct Eng, 1989, 115(7): 1616~1630.
- [5] Feng L M, Pekau O A, Zhang C H. Cracking analysis of arch dam by 3D boundary element method[J]. J of Struct Eng, 1996, 122(6): 691~699.
- [6] 夏松佑,鲁慎吾. KÖlnbrein 拱坝坝踵开裂机理探讨[J]. 水电站设计, 1999(1): 26~33.

[7] 美国垦务局. 拱坝设计[M]. 拱坝设计编译组译. 北京: 水利电力出版社, 1984. 129 ~ 145.

[8] 杨海霞, 杜成斌, 王得信. 拱坝非线性开裂分析的分载位移法[J]. 水力发电, 1997(7): 19 ~ 22.

[9] 陈祖坪. 拱坝线性破坏轨迹的随机分析[J]. 水利学报, 2000(2): 42 ~ 48.

[10] 张雪虎, 张社荣, 陈祖坪. 用任意加密有限元剖分的方法研究拱坝强度裂缝的产状[J]. 水利学报, 2001(9): 68 ~ 72.

[11] 田斌, 夏松佑. 高拱坝坝踵开裂非线性有限元分析[J]. 人民长江, 1997, 28(5): 32 ~ 34.

[12] 陈胜宏, 汪卫明, 徐明毅, 等. 小湾高拱坝坝踵开裂的有限单元法分析[J]. 水利学报, 2003(1): 66 ~ 71.

[13] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[14] Belytchco T, Lu Y Y, Gu L. Element-free Galerkin method [J]. Int J for Num Meth In Eng, 1994, 37: 229 ~ 256.

[15] 寇晓东, 周维恒. 应用无单元法近似计算拱坝开裂[J]. 水利学报, 2000(10): 28 ~ 35.

[16] Nayroles B, Touzot G, Villon P. Generalizing the finite element method—diffuse approximation and diffuse elements[J]. Comput Mech, 1992(10): 307 ~ 318.

[17] 汝乃华. 拱坝开裂的历史经验[J]. 水利学报, 2000(9): 17 ~ 25.

[18] 黄云, 金峰, 王光纶, 等. 高拱坝上游坝踵裂缝稳定性及其扩展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 555 ~ 559.

[19] Tinawi R, Guizani L. Formulation of hydrodynamic pressures in cracks due to earthquakes in concrete dams [J]. Earthquake Eng and Struct Dyn, 1993, 23(7): 699 ~ 716.

[20] Brühwiler E, Saouma V. Water fracture interaction in concrete, part I : fracture properties [J]. ACI Mat J, 1995, 92(3): 296 ~ 303.

[21] Brühwiler E, Saouma V. Water fracture interaction in concrete, part II : hydrostatic pressure cracks [J]. ACI Mat J, 1995, 92(4): 383 ~ 390.

[22] Volker V, Saouma V. Water pressure in propagating concrete cracks [J]. J of Struct Eng, 2000, 126(2): 235 ~ 242.

[23] 朱伯芳, 董福品. 高拱坝应力控制标准研究[J]. 水力发电, 2001(8): 57 ~ 59.

[24] 邓爱民, 张小芹, 王向东, 等. 混凝土拱坝温度裂缝及扩展稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 91 ~ 94.

[25] 任青文. 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.

[26] 周元得, 陈观福, 尹俊俊, 等. 用工程类比分析法研究高拱坝坝踵开裂稳定性[J]. 水力发电, 2002, 76(1): 19 ~ 26.

(收稿日期: 2003-09-25 编辑: 张志琴)

•小资料•

我国已建、在建及近期拟建的大型抽水蓄能电站

序号	电站名称	地 点	河 流	装机容量 /万 kW	年发电量 /亿 kW·h	水头 /m	型 式	建成年份	所在电网	备 注
1	潘家口	河北迁西	廉 河	3 × 9 = 27	5.64	86	混合式	1992	京津唐电网	另有 1 台 常规机组
2	十三陵	北京昌平	东沙河	4 × 20 = 80	12	477	纯抽式	1997	京津唐电网	
3	广 州	广东从化	流溪河	8 × 30 = 240	23.8	536	纯抽式	2000	广东电网	
4	天荒坪	浙江安吉	大 溪	6 × 30 = 180	31.6	667	纯抽式	2000	华东电网	
5	泰 安	山东泰安	沱 河	4 × 25 = 100	14	256	纯抽式		山东电网	在建中
6	桐 柏	浙江天台	信史河	4 × 30 = 120	21.2	270	纯抽式		浙江电网	在建中
7	白 山	吉林桦甸	第二松花江	2 × 15 = 30			混合式		东北电网	另有 5 台 常规机组
8	琅琊山	安徽滁州	小沙河	4 × 15 = 60	8.56	145	纯抽式		安徽电网	在建中
9	宜 兴	江苏宜兴		4 × 25 = 100	14.9	335	纯抽式		苏南电网	在建中
10	西龙池	山西五台	漳沱河	4 × 30 = 120	20.1	530	纯抽式		山西电网	在建中
11	宝 泉	河南辉县	峪 河	4 × 30 = 120	20.1	530	纯抽式		河南电网	前期工程已开工
12	张河湾	河北井径	甘 河	4 × 25 = 100	16.75	310	纯抽式		冀南电网	已立项并开工
13	惠 州	广东博罗		8 × 30 = 240		532	纯抽式		广东电网	已立项
14	白莲河一期	湖北罗田		2 × 30 = 60		195	纯抽式		湖北电网	项目建成已评估
15	盘 龙	重庆綦江		120		500	纯抽式		重庆电网	申请立项中

(吴 葵 高 供 稿)