

当前混凝土高拱坝抗震研究中的几个问题

陈在铁,任青文

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 综述能对坝基、坝身与库水综合分析的简单实用方法,合理的高拱坝抗震安全评价准则,混凝土材料强度的动力特性,坝址河谷地震动的输入模型,抗震工程措施等高拱坝抗震研究中亟待解决的问题和难点.在分析高拱坝抗震研究最新进展的基础上,提出进一步完善用动力分析技术研究坝、水、地基综合系统的地震响应、更新抗震设防理念、建立不均匀地震动模型、加强抗震工程措施的有效性研究等建议.

关键词 高拱坝 抗震分析 评价准则 混凝土动态强度 地震动输入模型

中图分类号 :TU352 ;TV642.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2005)06-0098-04

Some issues about seismic research of high concrete arch dams//CHEN Zai-tie, REN Qing-wen (College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :Some problems and difficulties urgently to be solved in seismic research of high concrete arch dams were reviewed, including to find simple and practical methods for comprehensive analysis of dam foundation, dam body, and reservoir water, to work out rational safety evaluation criteria for high arch dams, to study the dynamic behavior of the strength of concrete materials, to develop the seismic input model of the dam-site river valley, and to explore aseismatic measures. Based on an analysis of some new advances in seismic research of arch dams, some suggestions were made, such as to further perfect the study of seismic response of the dam, water and foundation integrated system by means of dynamic analysis technique, to renew the idea of seismic prevention, to establish the uneven seismic model, to enhance the effectiveness research on aseismatic engineering measures, etc.

Key words :high arch dam ; seismic analysis ; evaluation criterion ; dynamic strength of concrete ; seismic input model

自法国 1854 年修建世界上第一座拱坝 (Zola 坝)、美国 1936 年修建世界上第一座高拱坝 (Hoover 坝) 至今,拱坝以其独有的强超载能力以及自调节性能受到世界坝工界的青睐.坝工实践表明,坝越高,拱坝的经济性和安全性越显著.全世界 200 m 以上的大坝有一半以上采用拱坝坝型^[1].在我国,小湾、溪洛渡等一批 300 m 级世界超高拱坝即将在西部高烈度地震区建设.这些高拱坝都有大型水库,一旦由于地震引起溃坝,其后果特别严重.因此,研究高拱坝的抗震稳定性具有特别重要的意义.尽管国内外许多学者对此进行了研究^[2~4],但仍有不少关键问题未能得到很好解决,主要包括超高拱坝的抗震动力分析方法的深入探索、高拱坝的抗震评价准则的完善与创新,混凝土材料强度的动力特性研究、坝址河谷地震动的不均匀输入模型的建立、工程抗震措施的应用研究等.本文对此进行综述,并提出作者的观点.

1 改进高拱坝应力与变形分析方法

a. 动、静应力与变形计算是高拱坝抗震分析的基础.抗震研究初期沿用了静力分析的方法分别独立地计算地震作用下坝身和地基的应力与变形,只是在静力荷载的基础上增加地震惯性力.目前拱坝静力分析的基本方法仍采用美国垦务局 20 世纪 30 年代发展起来的试载法,包括我国在内的许多国家的规范明确规定,拱坝动力分析的基本方法采用拱梁分载法^[5],坝肩稳定分析的基本方法为刚体极限平衡法^[6,7],而基于线弹性和无质量地基假设的有限单元法被推荐为动力分析校核的主要方法,对坝高超过 250 m 的高拱坝要进行专门的研究.拱梁分载法无法精确模拟高拱坝复杂的空间高次超静定壳体结构形状,应力和变形的计算精度常显不足,有时甚至无能为力^[8].运用刚体极限平衡法对坝基、坝肩进行抗震稳定分析,关键在于事先找到潜在滑动块

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (50379005)

作者简介 陈在铁 (1967 —),男,江苏盐城人,副教授,博士研究生,从事水工结构稳定性研究;工作单位为沙洲工学院.

体,而且滑移面必须为平面或圆弧面,否则计算结果不惟一^[9,10]。潜在滑动块体通常由底滑面、侧滑面、上游拉裂面和下游临空面切割而成,它承受拱坝拱座传递的推力、岩体内部边界面的渗压、块体本身的自重和地震惯性力,以及由侧滑面和底滑面的岩体抗剪强度产生的抗滑力和反力。规范规定的基本方法仅仅反映水工设计经验和较为成熟的科研成果,难以考虑或只能极其简单地考虑坝、地基的相互作用和无限地基对动力反应的影响,也无法模拟坝体和地基材料进入屈服破坏以后应力重分配过程。

b. 以有限单元法、边界元法等为代表的连续变形数值分析方法和以刚体弹簧元法、块体单元法、界面元法等为代表的非连续变形数值分析方法已在大坝动应力、变形分析中得到较广泛的应用^[11,12]。在地震荷载作用下考虑动水压力时,这些数值方法所依据的高拱坝动力平衡方程式^[13]为

$$M_g \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + Ku(t) = -M_g \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: M_g 为考虑了动水压力引起的附加质量后的质量矩阵; C 和 K 分别为阻尼矩阵、刚度矩阵; u , $\dot{u}$, $\ddot{u}$ 分别为位移、速度、加速度向量; G 为影响系数矩阵; $\ddot{u}_g$ 为基底地震加速度向量。

c. 数值计算方法通过非连续单元或设计特殊的单元来较为精确模拟高拱坝坝身与地基这个整体,一定程度上解决了坝体、地基和库水的相互作用问题,反映了坝肩岩体的动力放大作用^[14]。为了考虑坝肩岩体的局部开裂、各向异性以及坝肩岩体的变形对坝体稳定性的影响,一些学者建立了用于动力非线性计算的动态接触界面单元模型,研究了坝体应力对坝肩岩体变形的敏感性^[15]。为了考虑地震时地基的行波影响,杜修力等应用时域显式有限元方法结合透射人工边界,建立了拱坝-地基非线性地震波动反应分析模型和方法^[16]。数值分析方法依据的动力方程中没有考虑库水的可压缩性,仅仅增加了考虑动水压力引起的附加质量,一些实验和分析表明,库水的可压缩性对地震反应有明显的影响^[17],应用拱坝-可压缩库水-复杂地基地震波动反应的分析模型和方法对高拱坝的抗震稳定性进行深入研究具有重要的学术和工程意义。

地震作用下高拱坝的坝身、地基、库水有动载荷相互作用、且在动力荷载作用下有一个动力响应的问题,地震动载荷的大小、频率、持续时间等动参数对坝身和地基的应力、变形都有影响,其规律与静载荷作用有很大的区别,因此必须应用动力分析技术对高拱坝进行比较严密的三维坝、水和地基系统的地震响应分析,计算动应力和变形。

2 完善高拱坝抗震评价准则

抗震评价准则是高拱坝抗震分析的依据,它是与抗震设防的理念紧密联系的。我国的水工建筑物抗震设计规范标准规定以容许应力建立强度条件,以最大拉应力安全系数来控制高拱坝的抗震安全性^[18],它不容许拱坝在地震中出现裂缝。采用一级设防标准,对基本烈度(50 a 超越概率 10%,重现期 475 a)为Ⅶ,Ⅷ,Ⅸ度区的场地,设计地震加速度分别取为 0.1 g, 0.2 g 和 0.4 g。对重要大坝,则需将设计地震加速度的水准提高到 100 a 超越概率 2%、重现期 4 950 a。日本与俄罗斯保持传统的做法,采取较低的设计地震加速度^[19]。日本在强震区混凝土坝的设计地震加速度取为 0.2 g,在弱震区取为 0.1 g。俄罗斯设计地震加速度取值基本与日本相当,但要求进行模型试验和补充分析。以美国为代表的一些国家采用了两级地震设防标准。美国大坝委员会 1985 年起草并经国际大坝委员会 1989 年公布的《大坝地震系数选择导则》明确了使用安全运行地震动 OBE 与最大设计地震动 MDE 两级设防的地震动参数选择原则。按照这一准则,在安全运行地震作用时,大坝应能保持运行功能,所受震害易于修复,故一般可进行弹性分析,并采用容许应力准则。在最大设计地震作用时,要求大坝至少能保持蓄水能力,可容许大坝出现裂缝,但不影响坝的整体稳定,不发生溃坝,大坝的泄洪设备可以正常工作,震后能放空水库。一般用地质构造法等确定性方法和概率法确定 MDE。

各国的大坝抗震设防处理方法和地震动参数的取值虽然不同,但并不能完全反映大坝抗震设计的安全度。原因在于各国国情不同,材料强度的控制标准不同,施工质量的可靠程度不同等等。我国不容许坝在地震作用下出现裂缝的评价准则显得要求过高,对于复杂的高拱坝来讲常常难以做到。一方面,出现一些裂缝可能并不影响坝的安全运行;另一方面,高拱坝是超静定结构,局部拉应力过大引起的开裂是拱坝放松约束来调整内力以适应变化的正常反应,在破坏之前,必定存在一个不断开裂、不断静定化的过程,在这个过程中拱坝的潜力未尽。而国外在保持水库蓄水能力的情况下,一般容许发生一定程度震害的大坝抗震设防指导思想值得我们深入研究。我国以及日本、俄罗斯等国的规范对重要的大坝、高坝必须进行专门的研究的做法值得坚持和推广。对于重要大坝采取两级或多级地震设防标准的研究可使大坝的抗震设计更为合理,符合安全性和经济性兼顾的原则。

3 重视混凝土材料强度动力特性的研究

目前规范中的高拱坝抗震评价准则大多将容许应力作为一个主要指标,而容许应力是由坝材料的静强度得到的.大坝震害调查表明^[20],静强度不能准确地评价坝的抗震安全性.实际上,拱坝在地震作用过程中某一瞬间安全系数可能瞬间等于或小于1,达到临界平衡或超载状态,但由于超载历时可能比较短,拱坝并没有完全失效.造成这种情况的原因在于高拱坝的主要材料是混凝土,它的强度具有明显的动力特性,而坝工界对这方面的研究相对薄弱.日本的火田野正在20世纪50年代后期对混凝土动态抗压和动态抗拉强度影响进行了比较全面的研究,发现了加载速率对混凝土动态强度的重要影响.在一些拱坝设计中,目前应用比较广泛的是Raphael所进行的试验结果^[21].他在5座混凝土坝中钻孔取样进行动力试验,以相当于大坝5 Hz的振动频率,在0.05 s的时间内加载到极限强度,得出动态抗压强度较静强度平均提高31%,直接拉伸强度平均提高66%,劈拉强度平均提高45%.虽然该试验结果具有一定的离散性,且是在应变速率大体相当于5 Hz的情况下取得的,但它使人们开始重视应变速率对材料强度的影响的研究,并取得了一定的成果^[22,23].这些成果表明,混凝土在受拉、受弯和受压时,其动态强度的增长幅度不同.不同强度的混凝土增长幅度不同,低标号混凝土增长幅度较高.混凝土试件的湿度也对其动强度的增长幅度发生重要影响,干混凝土的动态强度基本上不随应变速率的增加而变化.此外,发现混凝土动态强度还与加载历史有关.

然而以上很多有关动态强度的研究都是针对恒定的加载速率而进行的.事实上,地震时大坝各部分所承受的应变速率是不同的,同一部位不同时刻的应变速率也是变化的.因此,对大坝混凝土材料动强度的深入研究将是一个值得高度重视的课题.

4 建立合理的坝址地震动输入模型

当地震发生时,地震波在地表层传播过程中是通过建筑物基础面而引发建筑物振动的.传统假定地震输入沿建筑物基础面是相同的,即所谓一致地震动输入方式的假定.此假定对于基础面尺寸小于地震波主要波长的房屋、电视塔、海洋平台等是合理的,但对于高拱坝这类大体积建筑物,此假定的合理性越来越受到质疑.我国台湾翡翠拱坝坝址的地震实测记录不仅证实了河谷不同高程的地震动幅值有很大的差异,而且揭示出两岸同一高程处的地震动

加速度也存在很大差异.不少学者提出在计算中应考虑河谷地震动的不均匀输入问题,但如何考虑坝址河谷地震动的不均匀输入问题远没有得到解决^[24,25].其中主要原因在于:对地震的发生、地震波的传播机制的认识不够充分,缺乏足够的地震动空间相关性的实测记录,无法通过实验手段来重现地震波的传播过程等.因此,加强坝工界与地震研究工作者的合作、在地震高发区坝址不同位置安装地震动测量仪器、加强对地震波行波效应、空间放大效应、河谷屏蔽和阻尼效应以及坝址地质环境等因素的研究是解决河谷地震动的不均匀输入问题、建立地震动输入模型的有效途径.

坝址地震动输入的另一个重要参数是地震加速度,它对高拱坝的应力、变形分析有重要的影响,因此必须合理确定高拱坝抗震分析时的设计地震加速度的值.确定设计地震加速度的值必须联系坝址所在地历史上发生地震时的最大实测加速度和发生概率,必须考虑高拱坝地震响应分析方法的准确性、坝的设计安全度以及材料、建坝质量和控制水平.

5 高拱坝抗震结构工程措施的研究

目前,提高高拱坝抗震性能的措施主要是配置横缝抗震钢筋、限制横缝在地震作用下的张开度,横缝间布设阻尼器以及探索抗震优化的坝形等^[26,27].

由于地震具有随机性和不确定性,利用传统方法对坝体形状进行抗震优化是很困难的,习惯上对坝体形状按正常工况优化、根据抗震要求和工程经验进行调整,再经过专门的抗震校核.基于抗震可靠度理论的坝体形状抗震优化研究正越来越得到重视.

在横缝间配置抗震钢筋,其目的主要在于减小横缝在地震作用下的张开度和防止止水破坏引起渗漏.配置钢筋过多不利于灌浆,也可能导致混凝土被拉裂.配置钢筋过少又达不到控制横缝张开度的要求.到目前为止,抗震钢筋的配置还没有成熟的设计原则和计算方法^[28,29].为保证地震后横缝完全复位的同时钢筋能恢复原始性能,抗震钢筋必须在弹性范围内工作而不发生塑性变形.这就需要认真研究钢筋在横缝灌浆前后的变形,研究钢筋锚固的合理长度.

在坝体横缝处安装阻尼器是控制横缝张开度的一个新的设计思想,这种方法既不像配置抗震钢筋那样很明显增加工程的造价,又对灌浆的影响不大^[30].缝间阻尼器的设置能够限制横缝的开合,但限制程度的研究和阻尼器的优化布置仍是一个值得深入研究的课题.

6 结 语

混凝土强度具有明显的动力特性,随应变速率的变化而变化,它的值是建立高拱坝抗震评价的依据,必须加强混凝土材料动强度的研究.高拱坝是高次超静定结构,局部拉应力过大引起的早期开裂是高拱坝放松约束来调整内力以适应变化的正常反应,在这个不断开裂、不断静定化的过程中,拱坝的潜力未尽,仍能正常工作.因此不容许高拱坝在地震作用下出现裂缝的抗震评价准则显得要求过高,也常常难以达到,而国外在保持水库蓄水能力的情况下,一般容许发生一定程度的震害的大坝抗震设防指导思想值得我们深入研究,对于重要大坝采取两级或多级地震设防标准的研究可使高拱坝的抗震设计更为合理.研究和地震实测表明,高拱坝坝址河谷地震动具有不均匀输入的特点,河谷不同高程的地震动幅值有很大的不同,两岸同一高程处的地震动加速度也存在差异,建立坝址河谷地震动的不均匀输入模型是对高拱坝抗震分析的前提.通过虚加惯性力、应用拟静力法来计算高拱坝地震作用下的应力和变形具有明显的弊端,将动力响应分析方法应用于高拱坝的抗震分析是必然的选择.

参考文献:

- [1] 刘国华,汪树玉,包志仁,等.拱坝非线性全调整分载法研究[J].浙江大学学报,1999,33(1):40—46.
- [2] Zhang Chuhan, Xu Yanjie, Wang Guanglun, et al. Nonlinear seismic response of arch dams with contraction joint opening and joint reinforcement. Earthquake eng. [J]. Struct Dyn, 2002, 29(2): 1547—1566.
- [3] 张楚汉.高坝——岩基系统的安全稳定性[A].中国岩体力学与工程学会.中国岩体力学与工程学会第七次岩体力学与工程大会论文集[C].北京:科学技术出版社,2002.17—31.
- [4] 宋战平,李宁,陈飞熊,等.拱坝有缝坝体——坝基系统的非线性抗震分析[J].水利学报,2004(6):33—40.
- [5] 李德玉,陈厚群.高拱坝抗震动力分析和安全评价[J].水利水电技术,2004,35(1):45—48.
- [6] 潘家铮.建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M].北京:水利出版社,1980.
- [7] 王毓泰,周维恒.拱坝坝肩块体稳定分析[M].贵阳:贵阳人民出版社,1982.
- [8] Ren Qingwen. Development of theory and methods on high dam structural analysis[A]. Wieland Martin, Ren Qingwen, John S Y Tan. New Developments in Dam Engineering[C]. UK London: A A Balkema Publishers. 2004. 63—74.
- [9] 饶宏玲.溪洛渡水电站拱坝坝肩稳定研究[J].四川水力发电,2002,20(1):24—26.
- [10] 任青文,钱向东,赵引,等.高拱坝沿建基面的破坏和安全度研究[J].水力发电,2002(12):10—13.
- [11] 唐洪祥,邵龙潭.地震动力作用下有限元土石坝边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1218—1224.
- [12] 栾茂田,黎勇,林皋.非连续变形计算力学模型及其在有缝重力坝静力分析中的应用[J].水利学报.2001(4):40—46.
- [13] 尹显俊,王光纶,张楚汉,等.溪洛渡拱坝动力分析[J].水力发电学报,2004,23(1):27—30.
- [14] 张伯艳,陈厚群.用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗滑稳定[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):665—670.
- [15] 宋战平,李宁,陈飞熊.高拱坝坝肩裂隙岩体的三维非线性抗震稳定性分析[J].岩土工程学报,2004,26(3):361—366.
- [16] 杜修力,陈厚群,侯顺载.拱坝系统三维非线性地震波动分析[J].地震工程与工程振动,1996,16(3):11—20.
- [17] 杜修力,王进廷.拱坝-可压缩库水-复杂地基地震波动反应分析方法[J].水利学报,2002(6):83—90.
- [18] SL203-97,水工建筑物抗震设计规范[S].
- [19] 苏达科夫 B B. 抗震重力坝的现代设计和施工技术[J].张文成译.水利水电快报,1996,17(18):15—19.
- [20] 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.
- [21] Raphael J M. Tensile strength of concrete [J]. ACI Journal, 1984, 81(2): 158—165.
- [22] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behaviors of concrete at high strain rate [J]. Materials and Structures, 1991, 24: 425—45.
- [23] Javier M L, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. ACI Material Journal, 1998, 95(6): 735—739.
- [24] 迟世春.不同地震输入对混凝土面板堆石坝动力反应的影响[J].世界地震工程,2002,18(2):70—74.
- [25] 迟世春,顾淦臣.混凝土面板堆石坝幅频反应研究[J].岩土工程学报,1996,18(4):75—79.
- [26] 邹丽春,侯顺载,杨宜文.高拱坝地震应力控制标准和抗震工程措施研究[J].水力发电,2001(8):54—56.
- [27] 徐艳杰,张楚汉,王光纶,等.小湾拱坝横缝配筋的非线性地震反应分析[J].水力发电,2001(5):26—29.
- [28] 曲卓杰,吴胜兴,刘龙强.小湾拱坝抗震钢筋粘结滑移试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2004,33(3):308—312.
- [29] 郭永刚,涂劲,陈厚群.抗震钢筋对高拱坝抗震性能的影响[J].水利学报,2004(3):1—6.
- [30] 郭永刚,涂劲,陈厚群.高拱坝伸缩缝间布设阻尼器对坝体地震反应影响的研究[J].世界地震工程,2003,19(3):44—49.

(收稿日期 2005-02-28 编辑 马敏峰)