

高拱坝体型多目标优化设计研究进展

王文娟¹, 谢能刚¹, 孙林松²

(1. 安徽工业大学力学系, 安徽 马鞍山 243002; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要 针对考虑经济性和安全性的高拱坝体型多目标优化设计, 综述了几何模型、目标函数、约束条件、结构分析方法、优化算法以及多目标求解方法等相关内容的研究进展, 对多目标优化问题的博弈求解方法进行了展望。

关键词 拱坝; 体型设计; 多目标优化; 综述

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2007)01-0086-05

Research progress of multi-objective shape optimal design of high arch dams//WANG Wen-juan¹, XIE Neng-gang¹, SUN Lin-song² (1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China; 2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yanzhou 225009, China)

Abstract: From the aspects of economy and safety in multi-objective shape optimal design of high arch dams, the game solving method for multi-objective shape optimal design of high arch dams was prospected based on a review of some advances in research of geometric model, objective function, constraint condition, structural analysis method, optimization algorithm, and multi-objective solving method.

Key words: arch dam; shape design; multi-objective optimization; review

从 20 世纪 50 年代建成首批高混凝土拱坝——响洪甸拱坝(坝高 87.5 m)和流溪河拱坝(坝高 78 m)以来,我国在拱坝建设事业上取得了辉煌的成就,目前我国修建的拱坝已占全球拱坝总数的一半,在数量上已跃居世界首位,其中包括龙羊峡重力拱坝(坝高 178 m)、二滩双曲拱坝(坝高 240 m)等高拱坝工程。随着我国西部大开发战略的实施,特别是 2003 年突如其来的缺电问题,促使我国政府决心加快水电项目建设。目前在蕴藏丰富水力资源的大西南地区动工建设或将要动工建设一批大型、特大型水电站,其中拉西瓦(坝高 250 m)、构皮滩(坝高 225 m)、小湾(坝高 292 m)、溪洛渡(坝高 278 m)、白鹤滩(坝高 277 m)及锦屏一级(坝高 305 m)等水电工程都将采用双曲拱坝方案。因此对拱坝结构设计作深入的研究具有十分显著的社会意义和经济意义,同时也必将推进我国拱坝设计水平的提高^[1-2]。

由于拱坝体型的变化对坝体体积、应力、位移和坝肩稳定将产生较大影响,体型的好坏直接决定了拱坝的经济投资与安全运行,因此拱坝设计首先要做好其体型的设计,这是拱坝设计中一个战略性的关键问题。目前拱坝体型设计方法主要采用拱坝优

化技术,拱坝优化是数学规划理论、现代结构分析理论以及水工结构设计等多学科交叉形成的综合决策学科,在国外开始于 20 世纪 60 年代末期,我国从 70 年代中期开始,中国水利水电科学研究院、浙江大学、河海大学等单位先后展开了基于拱坝优化技术的体型设计研究,经过近 30 年的努力,我国在拱坝体型优化设计领域,在理论和实践方面均处于国际领先水平。有近百座中小型拱坝采用了拱坝优化技术,产生了明显的社会效益^[3]。现有的拱坝优化设计还大都采用单目标(主要是经济性目标)优化模式,随着拱坝建设事业的发展,拱坝的高度越来越高,坝址的地形地质条件日益复杂,在强震、高寒、弱基等恶劣环境和地质条件下也开始了拱坝建设,特别是历史上曾有法国 Malpassee(坝高 66 m)、奥地利 Kolnbrein(坝高 200 m)、俄罗斯萨杨舒申科(坝高 242 m)等拱坝工程事故的前车之鉴,因此,为确保强地震区高拱坝的安全性,应开展拱坝体型多目标优化设计研究。

拱坝体型多目标优化设计的主要内容包括几何模型的构造、目标函数与约束条件的确定、结构分析方法、寻优算法和多目标优化模型求解方法等几个方面。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50409017, 90410011)

作者简介: 王文娟(1982—),女,山东烟台人,硕士研究生,从事现代设计理论及可视化方法研究。E-mail: wjw@hhu.edu.cn

1 几何模型

拱坝体型优化的目标是选择合理的拱坝几何形状,因此,正确构造拱坝的几何模型是十分重要的,所构造的几何模型一方面应符合拱坝的受力特性,以充分利用材料强度,发挥结构潜力,节省投资;另一方面,又必须便于施工,能为实际工程所接受。根据构造方法的不同,拱坝几何模型可分为连续几何模型、离散几何模型和混合几何模型^[4]。

连续几何模型的构造方法是:把水平和铅直两个平面内几何形状的变化分开描述,水平面内拱轴线的参数以及铅直面内轴线参数和厚度等沿高度方向的变化用多项式描述。目前,水平面内拱圈线型已从单心圆逐步发展到了多心圆、抛物线、双曲线、椭圆、对数螺旋线等二次曲线形式,由于它们存在着对地形、地质等条件适应的单一性,采用单独的一种拱圈形式,有时不能很好地兼顾不同部位的地形、地质与坝体受力特点,所以又提出了统一二次曲线拱圈^[5]和混合线型拱圈^[6]等。另外,为了突破曲线类型的限制,获得坝面方程的直接解析表达式,可采用等参变换方法的线性规划模型^[7]和 B_3 样条方法^[8]。连续几何模型设计变量比较少,优化结果显示坝体剖面光滑,易为实际工程所接受。这是目前拱坝体型优化中普遍采用的几何模型。对于极端非对称的河谷条件,刘国华^[9]提出了“非直立拱冠剖面”的拱坝新体型,它将更好地适应非对称的河谷条件,改善拱圈的对称性和受力条件,提高其抗屈折稳定性。

离散几何模型的优点是几何形状变化的自由度高,优化结果得到的坝体工程量可能最小。但它有两个缺点:一是设计变量多,因而计算量大;二是优化结果的坝体剖面往往不规则,实际工程难以采纳。混合几何模型同时采用连续变量和离散变量建立拱坝的几何模型。由于坝址地形地质条件往往是不规则的,采用局部离散变量有利于改善局部的应力状态。

2 目标函数

在拱坝体型多目标优化设计中,多目标函数一般采用经济性和安全性目标。关于拱坝体型优化设计中的经济性目标,业界已达成共识,采用筑坝总费用指标,主要包括基础开挖费用(基础开挖量)和坝体费用(坝体方量),如果因体型变化而引起的基础开挖量变化较小,则可直接采用坝体方量指标;另外如果在体型优化的同时还考虑坝体封拱条件的优化,则在总费用中还应包含达到某种封拱条件(如封拱温度)所需要的附加费用^[10]。而对拱坝安全性目标的选择,则众说纷纭,从现有文献看,主要有:①最

大主拉应力指标。在我国现行的 SL282—2003《混凝土拱坝设计规范》中,为保证拱坝安全,严格规定了拉、压允许应力控制标准,因此从提高安全裕度出发,降低拱坝应力特别是最大主拉应力值可以提高安全性。文献[11-13]在拱坝体型设计中都采取了这一指标,但值得注意的是最大主拉应力只表明局部的受力情况,而不能反映应力分布和整体安全状态。②拉应力区的范围。在同样的应力水平下,范围较大的拉应力区显然比范围较小的具有危险性,因此拉应力区的范围大小也可以表征拱坝安全性,并且该指标在一定意义上反映了应力分布,具有特色和优势^[13-14]。③整体安全度指标。Malpasset 拱坝的失事和 Kolnbrein 拱坝的开裂破坏引起人们对拱坝整体安全度指标的研究。在 Lombardi 提出的拱坝柔度系数基础上,朱伯芳^[15]考虑到坝高的影响,提出拱坝应力水平系数,并进一步考虑坝体及坝基强度的影响,提出反映拱坝相对安全度的指标——拱坝安全水平系数。④抗屈折稳定指标。拱坝是一种受压的薄壁结构,它的安全除受应力控制外,还受变形控制,壁厚过薄的坝体可能发生屈折稳定问题。黄文熙^[16]提出两条拱坝抗屈折稳定指标,指标主要与坝的尺寸和形式,即坝厚、河谷宽度、坝高、中心角以及混凝土弹性模量有关。任青文^[17]通过研究 Lombardi 破损曲线,提出拱坝整体安全的两类控制:一般情况下,拱坝坝体的安全性由强度控制,只有当坝体采用高强度混凝土导致坝体过于单薄,从而使强度破损线抬高,接近或超过稳定破损线的情况下,才由抗屈折稳定控制。⑤能量指标。基于拱坝整体工作性态的需要,还可采用反映拱坝综合响应量的性能指标——能量作为表征拱坝整体安全的控制指标^[18]。另外,有关拱坝安全度的指标,还可以选择坝体能承受的超载系数、强度失效概率^[13]、大坝位移以及剪应力指标等。

3 约束条件

拱坝优化的约束条件一般包括几何约束、应力约束和稳定约束三部分,这些约束反映了坝体的布置合理性,以及施工与运行安全等设计要求。刘国华等^[19]提出采用单工况的应力约束常常会导致优化体型无法满足其他工况的安全要求而被放弃,应进行多工况应力约束下的体型优化。计家荣等^[20]认为应考虑基础变形模量的不确定性,对变形模量计算值给予可能的浮动,建立敏感性约束,在浮动范围内,要求坝体应力都能满足规定要求。

4 结构分析方法

拱坝结构分析方法的发展经历了纯拱法、拱梁

分载法和有限单元法。有限单元法的适应性很强,通过采用不同的单元,可以在不同的精度上解算拱坝。我国用于拱坝分析的有一维有限元法、适用于较薄拱坝的壳体有限元法以及适用于各种拱坝的三维有限元法。另外也有学者采用三维样条边界元法分析拱坝应力,将拱坝和坝基分别视为子结构,用三维样条边界元模拟坝体,用无限样条边界元模拟不规则地基,考虑拱坝与地基之间的三向耦合条件,用传递矩阵法分解子结构^[21]。王复明等^[22]以壳体理论和能量原理为基础,提出了薄拱坝静力分析的样条半解析法,它吸收了样条函数方法的一般优点,避免了有限元方法中计算繁琐的不足,且能满足精度要求。

结合目前强地震区高拱坝的结构分析,考虑地震的动力分析和考虑伸缩横缝的非线性分析成为研究热点^[23-25]。在现有的拱坝优化研究中均将拱坝作为一个完整的整体结构进行分析。实际上,由于施工的需要拱坝中都设置有伸缩横缝,这就破坏了拱坝结构的整体性,在外荷载作用下横缝可能会发生张开、滑移等,在地震作用下甚至会发生张开-闭合-滑移的往复运动。横缝的张开会使得拱坝的梁向应力增加,而在拱坝多目标优化中坝体应力是最主要的目标函数,因此,考虑拱坝横缝影响以更准确地反映坝体工作性态,这在高拱坝优化尤其是强地震区高拱坝优化中显得非常重要。

由于有限单元法在某些应力集中区域(如拱坝的坝基面上)求得的应力值往往很大,为了与现行拱坝设计规范中的应力控制标准相适应,需对有限元计算的应力值进行等效处理^[26]。朱伯芳^[27]、傅作新等^[28]提出有限元等效应力法,将有限元法所求得的应力合成为截面内力,然后求出对应的线性化应力。李同春等^[29]提出首先按常规方法建立拱坝及地基在水压力、自重等荷载作用下的有限元平衡方程,求解结点位移和单元应力,然后将坝体分解为拱系和梁系,根据拱和梁的内力平衡条件求解指定截面上的约束内力,并在文献^[30]中又提出改进方法。

5 优化算法

拱坝体型优化的目标函数、应力约束和稳定约束都是设计变量的非线性函数,且都是设计变量的隐函数,属于非线性规划问题。求解非线性规划问题的方法很多,目前在拱坝体型优化设计中得到应用的有约束变尺度法^[19]、序列二次规划法^[31]、复形法^[32]、外罚函数法^[33]、满应力设计方法^[34]、人工神经网络方法^[35]等。近年来,遗传算法和进化算法也在拱坝体型设计中得到了应用^[36-37]。

6 多目标优化问题求解方法

一个多目标设计问题如果存在非劣解,往往存在无穷多个,形成非劣解集。在求解实际问题时,过多的非劣解是无法直接应用的,决策者只能选择令其最满意的一个非劣解作为最终解。求解多目标设计问题一般存在两个过程:生成和决策,根据生成和决策的先后顺序,可以将多目标设计问题分为3类:①决策先于生成;②生成先于决策;③生成与决策交互进行。

目前在拱坝体型多目标设计中得到应用的求解方法有:孙文俊等^[38]选取最大拉应力和坝体体积作为优化设计的目标,研究了兼顾考虑拱坝“体积最小”和“最大拉应力最小”的双目标体型优化设计问题。采用线性加权的统一目标法寻求非劣解(有效解),然后利用模糊贴近度的概念从众多非劣解中找出最贴近理想解的最优解。汪树玉等^[13]提出以经济性指标(坝体方量 V)和安全性指标(应力水平 $[\sigma]$ 、强度失效概率 F 、高应力区范围 H)作为优化的多个目标函数的设想。多目标优化采用理想点法,通过对各分目标的权系数调整,提供反映设计者要求的多个解方案。厉易生^[39]提出拱坝的安全、经济双目标优化分为两个步骤:①求出有效点集;②在有效点集的基础上,通过允许应力专题研究、专家评审和图解法等3种方法来选取最优设计。

由于实际问题的复杂性,许多参数与限值的模糊性,近年来又探讨了多目标模糊综合评判方法,要点是先选定各分目标的隶属函数与约束的隶属函数,确定该方案对不同目标的隶属度与约束隶属度,然后再结合权重,通过模糊线性变换和加乘法综合评优。谢能刚等^[40]综合考虑拱坝的安全性和经济性,利用模糊理论提出了拉应力满意度目标函数和多目标优化设计的评价函数,建立了多目标优化设计的数学模型,并以小湾拱坝为例,进行了体型多目标模糊优化设计,优化体型的坝体方量较初始体型下降了1.26%,坝体最大主拉应力与拉应力区都较初始体型小,充分体现了多目标优化的特征。孙扬镝^[41]提出了多目标模糊全局优化设计方法,并应用于拱坝体型设计。

以上方法都体现了决策者的主体地位,设计方案和目标函数是被动的受体,这是一种主观性的系统观,其客观性的缺乏将直接导致优化结果的个性化,不同的决策人将得到不同的决策结果,致使得到的体型方案降低了可信度,缺少了可行性。目前提倡的第三代系统观突破了把系统元素看成“死”的、被动的对象的观念,引进了具有竞争和适应能力的

主体概念,从系统元素对环境的适应性、系统元素之间的互动作用去认识和描述复杂系统的行为。从这个系统观出发,文献[42-44]报道了在飞行器多目标动力优化设计中利用博弈解法的研究成果,谢能刚等^[45]在拱坝、重力坝、补偿滑轮组机构的多目标优化设计中成功应用了博弈方法,该方法从博弈的观点分析多目标问题:①多目标决策设计问题的本质类同于博弈决策问题;② m 个设计目标视为博弈问题的参加者,即 m 个博弈方;③设计变量集合 X 视为所有博弈方的战略集合 S ,设计变量的可行域视为战略组合的可行空间,利用一定的技术手段将设计变量集合 X 分解为各博弈方拥有的战略集 $S_1, \dots, S_m$;④ m 个目标函数的响应值视为相应博弈方在博弈中的得益;⑤多目标问题中的约束条件视为博弈问题的约束条件。一方面通过各博弈方之间的相互竞争,主动实现各博弈方的相应得益,另一方面通过相互协同去适应环境(满足约束条件),在整体得益和宏观层面上实现多个目标之间的均衡、稳定与和谐。在博弈分析中,无需人为去确定各目标权重,也无需将各设计要求被动组合起来构建一个评价函数去有意识地引导设计,而是通过系统需要和谐共存的客观第一性要求来引导各博弈方的竞争和协同,实现得益均衡,满足设计需要。从方法论角度出发,由于博弈决策过程是客观的物竞天择,目的是实现事物和谐共存,因此各博弈方最终策略组合的均衡和协同性决定了事物存在的稳定性;从理论角度出发,通过博弈决策理论得到的策略组合(解)具有一致预测性质,即解是稳定的和自我强制的,如非合作博弈模型中的纳什均衡等,因此通过多目标博弈方法求出的一定是非劣解集中的稳定解,解的稳定性质决定了体型设计方案的“健壮性”。

7 结 语

高拱坝的体型设计研究具有十分重要的意义,拱坝体型多目标优化设计的核心内容为多目标优化模型的合理建立与有效求解,其中多目标优化模型的关键问题为多目标函数的选择和反映高拱坝真实性态的约束条件构建;有效求解的关键技术包括拱坝结构分析方法与多目标求解方法。拱坝体型多目标优化设计可有效改善拱坝的经济性和安全性,是拱坝体型优化设计的未来发展方向之一。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 中国拱坝建设的成就[J]. 水力发电, 1999(10): 38-40.
[2] 陈宗梁. 我国高坝建设和科技攻关[J]. 中国工程科学,

2000 2(12): 84-89.
[3] 朱伯芳, 厉易生. 高拱坝新型合理体形的研究和应用[J]. 水力发电, 2001(8): 60-62.
[4] 孙林松. 基于超级有限元分析的高拱坝开裂约束下体型优化设计的研究[D]. 南京: 河海大学, 1997: 3-4.
[5] 厉易生. 拱圈线型优选[J]. 水利学报, 1996(1): 74-77.
[6] 汪树玉, 刘国华, 魏文凯. 拱坝非线性全过程分析与混合线型优化[J]. 水力发电, 1996(9): 19-23.
[7] 阳明盛, 林皋, 金海. 将线性规划模型引入拱坝优化设计[J]. 大连理工大学学报, 2001 41(2): 237-243.
[8] 王章虎, 王有成, 乔润德. 拱坝应力分析的三维样条边界元法[J]. 合肥工业大学学报, 1996, 19(4): 75-81.
[9] 刘国华, 汪树玉. 拱坝新体形的研究和应用: 九五“国家重点科技攻关项目子题报告[R]. 杭州: 浙江大学, 1999.
[10] 刘德富. 拱坝封拱温度场及体形综合优化方法[J]. 水利学报, 1998(3): 34-38.
[11] 孙林松, 王德信, 裴开国. 以应力为目标的拱坝体型优化设计[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000 28(1): 57-60.
[12] 金海, 林皋, 阳明盛. 以应力为目标的拱坝体型优化线性规划模型[J]. 水利水运工程学报, 2005(1): 8-14.
[13] 汪树玉, 刘国华, 杜王盖, 等. 拱坝多目标优化的研究与应用[J]. 水利学报, 2001(10): 48-53.
[14] 谢能刚, 孙林松, 王德信. 拱坝体型的多目标模糊优化设计[J]. 计算力学学报, 2002, 19(2): 192-194.
[15] 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.
[16] 黄文熙. 拱坝屈折稳定初探[J]. 水利学报, 1995(9): 1-3.
[17] 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.
[18] 谢能刚, 孙林松, 郭兴文, 等. 基于能量指标的结构形式最优控制设计[J]. 水利学报, 2004(3): 29-34.
[19] 刘国华, 汪树玉. 拱坝体形优化设计方法及工程应用[J]. 计算结构力学及其应用, 1994, 11(4): 461-469.
[20] 计家荣, 丁予通. 二滩拱坝设计与优化[J]. 水力发电, 1998(7): 25-28.
[21] 王章虎, 王有成, 乔润德. 拱坝应力分析的三维样条边界元法[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1996, 19(4): 75-81.
[22] 王复明, 冯红建, 周鸿钧. 薄拱坝静力分析的样条半解析法[J]. 郑州工业大学学报, 1999 20(4): 6-9.
[23] 龙渝川, 周元德, 张楚汉. 基于两类横缝接触模型的拱坝非线性动力响应研究[J]. 水利学报, 2005 36(9): 1093-1099.
[24] 林皋, 胡志强, 陈健云. 考虑横缝影响的拱坝动力分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004 24(6): 45-72.
[25] 涂劲, 陈厚群, 杜修力. 高拱坝非线性地震反应分析中横缝模拟方案研究[J]. 水力发电学报, 2001(2): 18-25.
[26] 柏宝忠, 钟源清. 混凝土拱坝设计应力控制标准的研究[J]. 人民长江, 2003 34(11): 12-13, 16.

[27] 朱伯芳 . 国际拱坝学术讨论会综述[J]. 混凝土坝技术 , 1987(2) :11-15 .

[28] 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 .

[29] 李同春 , 温召旺 . 拱坝应力分析中的有限元内力法[J]. 水力发电学报 , 2000(4) :18-24 .

[30] 李同春 , 章杭惠 . 改进的拱坝等效应力分析方法[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2004 , 32(1) :104-107 .

[31] 杨仲侯 , 杨海霞 , 任青文 , 等 . 高拱坝应力分析与形状优化设计程序系统[C]//姜弘道 , 赵光恒 , 向大润 , 等 . 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序 . 南京 : 河海大学出版社 , 1992 :160-173 .

[32] 黎展眉 . 复形法在拱坝优化中的应用[J]. 计算技术与计算机应用 , 1991(2) :7-11 .

[33] 孙扬镝 , 姜常青 , 徐也平 , 等 . 具有智能的拱坝设计系统[J]. 水利学报 , 1995(7) :79-83 .

[34] 朱伯芳 , 黎展眉 . 拱坝的满应力设计[C]//水利水电科学院科学研究论文集 . 第 9 集 . 北京 : 水电出版社 , 1982 :38-42 .

[35] 刘德富 , 李文正 , 刘从新 . 拱坝近似优化的人工神经网络方法[J]. 武汉水利电力大学学报 , 1998 , 31(4) :22-25 .

[36] 杨海霞 . 基于遗传算法的拱坝优化设计[J]. 水利水运工程学报 , 2000(3) :13-17 .

[37] 谢能刚 , 孙林松 , 方浩 . 基于进化策略的拱坝体型优化设计[J]. 水利水运工程学报 , 2006(1) :24-29 .

[38] 孙文俊 , 孙林松 , 王德信 , 等 . 拱坝体形的两目标优化设计[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2000 , 28(3) :39-43 .

[39] 厉易生 . 双目标优化的有效点集及拱坝双目标优化[J]. 水力发电 , 1998(11) :10-13 .

[40] 谢能刚 , 孙林松 , 王德信 . 静力与动力荷载下高拱坝体型多目标优化设计[J]. 水利学报 , 2001(10) :8-11 .

[41] 孙扬镝 . 多目标模糊全局优化设计方法和软件[J]. 水电站设计 , 1994 , 10(2) :25-30 .

[42] PÉRIAUX J , CHEN Hou-qun , MANTEL B , et al . Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozzle optimization problems[J]. Finite Elements in Analysis and Design , 2001 , 37(5) :417-429 .

[43] WANG Jiang-feng , WU Yi-zhao , PÉRIAUX J . Decentralized multi-point optimization algorithms for multi-airfoil design in aerodynamics[J]. Journal of Astronautics , 2003 , 24(1) :71-77 .

[44] WANG Jiang-feng , WU Yi-zhao , PÉRIAUX J . Genetic algorithms and game theory for high lift design problems in aerodynamics[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , 2002 , 19(1) :7-13 .

[45] 谢能刚 , 孙林松 , 赵雷 , 等 . 拱坝拱圈结构的抗震多目标博弈设计[J]. 水利水运工程学报 , 2005(4) :36-40 .

(收稿日期 2006-03-15 编辑 熊水斌)

(上接第 45 页)

模型的大小并不受振动台台面尺寸的限制 , 并不需要满足类似于模型试验的相似律要求 , 克服了振动台非线性模型试验中有些物理量不能完全满足相似律要求的缺陷。

总体说来 , 地震模拟振动台仿真模型是拱坝地震输入模型的一个可能的选择。今后还应加强这一拱坝地震输入模型与其他模型的比较研究。

参考文献 :

[1] COULGH R W , CHENG K T , CHEN Hou-qun , et al . Dynamic interaction effects in arch dams report No. EERC-85/11[R]. Berkeley :Earthquake Engineering Research Center , University of California , 1985 .

[2] COULGH R W , RAPHAEL J M , MOJTAHEDI S . ADAP , a computer program for static and dynamic analysis of arch dams report No. EERC 73/14[R]. Berkeley :Earthquake Engineering Research Center , University of California , 1973 .

[3] ZHANG Chu-han , JIN Feng , PEKAU O A . Time domain procedure of FE-BE-IBE coupling for seismic interaction of arch dams and canyons[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics , 1995 , 24 :1651-1666 .

[4] 涂劲 . 有缝界面的混凝土高坝—地基系统非线性地震波

动反应分析[D]. 北京 : 中国水利水电科学研究院 , 1999 .

[5] 张伯艳 . 高拱坝坝肩抗震稳定研究[D]. 西安 : 西安理工大学 , 2005 .

[6] 廖振鹏 . 工程波动理论导引[M]. 北京 : 科学出版社 , 1996 .

[7] CAI Yong-en , HE Tao , WANG Ren . Numerical simulation of dynamic process of the tangshan earthquake by a new method LDDA[J]. Pure and Applied Geophysics , 2000 , 157(11/12) :2083-2104 .

[8] 张伯艳 , 陈厚群 , 胡晓 , 等 . 用时域法进行人造地震动的谱拟合[J]. 地震工程与工程振动 , 1998 , 18(1) :147-155 .

[9] 陈厚群 , 张伯艳 , 涂劲 . 小湾拱坝坝肩抗震安全评价深化研究[R]. 北京 : 中国水利水电科学研究院 , 2002 .

[10] 涂劲 , 李德玉 . 溪洛渡水电站双曲拱坝抗震分析及地震作用下的整体安全评价[R]. 北京 : 中国水利水电科学研究院 , 2005 .

[11] 林皋 . 大岗山水电站双曲拱坝非线性动力分析与抗震安全评估[R]. 大连 : 大连理工大学 , 2005 .

[12] 李德玉 , 张伯艳 . 大岗山双曲拱坝抗震安全分析与抗震措施研究[R]. 北京 : 中国水利水电科学研究院 , 2005 .

[13] 张楚汉 . 大岗山拱坝非线性动力分析和抗震措施研究[R]. 北京 : 清华大学 , 2005 .

(收稿日期 2006-03-08 编辑 熊水斌)