

评判混凝土高坝地震灾变的关键问题探讨

陈厚群 张艳红

(中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心 北京 100044)

摘要 :针对当前我国在西部强震区建设的一系列重大高坝工程的抗震安全问题 ,提出以“遭遇最大可信地震时不发生严重次生灾变”为确保重大工程抗震安全的战略重点 ,简要阐述相关工程背景、关键问题及目前已有的基础条件。指出其主要难点在于如何对溃坝的极限状态给出可操作的定量准则。认为基于损伤力学求解坝体-地基体系在强震作用下的损伤破坏过程是可行的。探讨了直接基于试验资料建立计入残余变形的损伤演化规律和力学模型的新思路 ,避免了损伤与塑性耦合 ,使分析更贴近实际、计算工作大幅度简化。通过对试件试验结果的实例分析 ,初步验证了本文方法的可行性。

关键词 :混凝土高坝 地震灾变 溃坝定量准则 损伤力学 残余变形

中图分类号 :TV642.1 ;TU352 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)04-0008-05

Key problems for evaluating seismic catastrophe of high concrete dams//CHEN Hou-qun , ZHANG Yan-hong (*Earthquake Engineering Research Center , China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100044 , China*)

Abstract : With regard to the seismic safety of a series of high concrete dams currently constructed in the highly seismic region of western China , the strategic point to ensure the seismic safety of key projects was proposed , that is , to prevent severe secondary catastrophe during the maximum credible earthquake. The engineering background , main problems and existing essential prerequisites were described. It was put forward that the major difficulty was how to provide practical quantitative criteria for the critical state of dam failure. Evidently , a feasible way was to investigate the damage and failure process of the dam - foundation system by means of the damage mechanics. For this purpose a new concept of establishing the damage model with consideration of residual deformation directly based on the experimental data of materials without plastic - damage coupling was proposed. The proposed approach would make the non - linear analysis of the seismic response of the dam - foundation system more simplified and reasonable , and its feasibility was verified by the comparison between the numerical and experimental results of specimens.

Key words : high concrete dam ; seismic catastrophe ; quantitative criterion for dam failure ; damage mechanics ; residual deformation

1 工程背景

在水源集中的西部 ,充分利用高山峡谷地形兴建移民淹没相对少的高坝大库 ,以尽量用洪水资源增加水电保证出力 ,是缓解水资源时空分布不均和短缺、满足防洪抗旱之急需、改善能源结构、发展可再生清洁能源以及应对全球气候变化、保证庄严承诺等的战略需求。我国政府承诺 ,至 2020 年我国非化石能源占一次能源消费比重达 15% 左右。单位国内生产总值二氧化碳排放量比 2005 年下降 40% ~ 45%。据有关部门预测 ,至 2020 年我国发电总装机容量将达到 14 亿 kW ,其中煤电约占 9 亿 kW ,水

电约占 3.1 亿 kW。因此 ,资源占全球首位、技术成熟、可大规模开发的水电是保证我国政府顺利实现庄严承诺的主力军。

当前 ,随着全球环境意识和可持续发展要求的日益增强 ,国际社会对高坝大库功能和作用的认知不断深化。在我国 ,在充分重视移民安置、生态和环境影响的前提下 ,积极有序地进行高坝工程建设是切合我国国情和为社会经济发展所急需的 ,已成为我国基础设施建设中不可或缺和无可替代的重要组成部分。为此 ,我国在水资源主要源头和水能资源集中的西部正修建一系列 300 m 级的高坝 ,其中以拱坝居多。

我国是多地震国家,80%的水能资源主要集中在西部强地震地区。西部高山陡谷既宜于修建淹没少、调节库容和装机容量大的高水头电站,又都和强烈区域性地质构造关联。因此,西部水电建设中的高坝大库难以避让高地震区。

高坝大库一旦发生地震灾变将对下游地区造成严重的次生灾害。在汶川地震中,担心一个数十米高滑坡体形成的、仅2亿多 m^3 库容的唐家山堰塞湖的溃决会殃及下游北川县的安危,就曾经牵动了中央领导和全国人民的心。数百亿立方米库容的300 m高坝万一在强震中失事,其后果将不堪设想。因此,在我国,高坝大库无可替代的重要作用、难以避让的抗震问题及其一旦发生严重灾变引起不堪设想的次生灾害后果,突显其防止地震灾变、确保抗震安全的战略重要性。

2 战略重点

鉴于高坝大库一旦遭受强震而发生严重破坏将导致不堪设想的次生灾害,设计人员、业主及社会对防止其重大灾变必然十分关注。因此,当前大坝抗震安全的战略重点应为:“重大工程遭遇最大可信地震时不发生次生灾变”。当前为完成这一战略重点任务,以实现“对高拱坝重大地震灾变的评价,存在的主要困难在于:①如何确定最大可信地震及其场地相关的地震动参数;②如何对溃坝的极限状态给出定量准则。

对于重大工程,确定最大可信地震及其场地相关的地震动参数的基本要求可概括如下:

a. 需要基于“设定地震”确定与场址地震地质条件相关的设计加速度反应谱替代规范中由统计平均得出的与场地不相关的“标准设计反应谱”及常遇的具有包络特征、谱值明显偏大、不反映实际地震动频谱特性的“一致概率反应谱”。目前人们已经提出了综合概率法和确定性法的“设定地震法”,以确定场址相关设计反应谱。其步骤为:在坝址地震危险性分析的基础上,从对场址设计地震动峰值加速度有贡献的少数潜在震源中,沿其主干断裂,从在其震级上限范围内可能对场址产生设计地震动峰值加速度的诸地震震中位置中选择其发生概率最大的。由此可设定地震的震级(M)、震中距(R),再按统计平均反应谱衰减关系最终确定坝址实际可能发生的场地相关设计反应谱。将设定地震的震级取为潜源震级上限,沿主干断裂移至距坝址最近处,可取为在点源假定下的最大可信地震^[1]。

b. 鉴于在最大可信地震作用下坝体和地基岩体的应力状态都已超出线弹性范畴,其地震响应对

地震震动的频率非平稳特性影响较为敏感,因而提出了基于渐进谱理论生成幅值和频率都非平稳的人工地震加速度时程的新方法,以替代迄今在工程抗震中采用的只是幅值非平稳而频率平稳的人工模拟地震波。基于 Priestley 于 1965 年提出渐进功率谱 $dQ(t, \omega) = A(t, \omega)^2 dZ(\omega)$ 的概念,在非平稳复随机过程中 $\int A(t, \omega) e^{i\omega t} dZ(\omega)$ 引入时变的复调制函数 $A(t, \omega)$,采用 Nakayama 窄带和低通滤波方法求解复调制函数。参照 Goto 等 1966 年建议的地震动加速度时程强度包络线形式,给出由其起始时刻 $t_s(f)$ 、功率谱峰值到时的和起始时刻的差时 $t_r(f)$ 以及功率谱峰值的方根 $a_m(f)$ 等 3 个参数组成的各频率分量的目标渐进功率谱的统计回归经验模型,根据美国西部震级大于或等于 6.4、震中距小于或等于 45 km 的共 80 条基岩实测地震动加速度记录,回归式中各项系数 a_i ,再根据目标渐进谱直接合成地震动加速度时程。其步骤为:取 $(0 \sim 2\pi)$ 区间内均匀随机分布的相角和目标渐进谱求得初始时程 $a_0(t)$;由初始时程经过窄带滤波和低通滤波计算渐进谱和与时间和频率相关的时变幅角;合成新的时程后重新求解渐进谱;按与目标渐进谱的差异调整 $Q(t, \omega)$;通过同时对非平稳渐进谱幅值和相位进行迭代拟合目标渐进谱后,最终求得幅值和频率非平稳加速度时程^[2]。

c. 对近场大震,基于“随机有限断层法”,按三维空间面源直接生成地震动加速度时程,以取代不能反映近场大震断层破裂过程、模态和时序的点源假定。其基本思路为:将潜在震源的主干断层划分为一系列可作为点源的子断裂,顺序叠加按一定模态和时间序列破裂的各点源对坝址的作用,直接给出近场强震的坝址地震动加速度时程。依据地震学物理模型和基于经验统计确定有关参数的半理论、半经验确定性方法。其主要特点为:不涉及地震危险性分析中经验性衰减关系中的诸多不确定因素。能反映近断裂大震有限震源体影响的地震动特征:震源尺度、断层破裂方式、传播方向性及上盘效应,并能考虑邻近破裂释放的地震能量对坝址的影响,改善了将整个破裂面作为一个点源的假定所导致的地震动偏大的问题,震级越大,改善越显著^[3]。

以上这些确定最大可信地震及其场地相关地震动参数的问题,在和地震部门共同协作下已初步得到解决,并在实际工程抗震的应用中逐步完善。当前的关键问题在于如何对溃坝的极限状态给出定量准则。

3 关键问题

迄今不溃坝是模糊的定性概念,缺乏可操作性,

无法在设计中应用。为此,首先必须突破以下这些难以反映实际的传统理念和方法:

a. 高拱坝作为大体积混凝土结构,坝体-地基-库水动态相互作用影响十分重要。地基的惯性作用、近域地基的岩体中各类地质构造以及远域地基的辐射阻尼不容忽视。必须把坝体-地基-库水作为整个开放波动体系考虑。

b. 拱坝分段浇筑,横缝进行灌浆。在静载作用下可视作整体结构,但强震时,上部拱向拉应力可达 5~6 MPa,强度无法满足。实际横缝无抗拉强度,地震时必然反复张合而不再是整体结构,拱向拉应力将被释放而导致应力重分布,必须考虑横缝开合的动态边界非线性接触效应。

c. 刚体极限平衡法对坝肩岩块的拟静态稳定分析,不能计入地震时坝体和岩块间动态耦合作用和地震动往复特性,必须以变形为核心,考虑坝体-地基-库水作为整个体系的动态耦合影响。

d. 高次超静定结构的拱坝对其两岸拱座的差异变形十分敏感。必须在高拱坝地震响应分析中考虑坝基面地震动输入的不均匀性。

对高混凝土坝,为给出定量判断溃坝的准则,必须具备下述前提条件:

a. 要研发更贴近工程实际的大坝-地基-库水系统的非线性地震反应分析方法和软件。为此,在拱坝地震响应分析中同时考虑以下重要因素:拱坝、地基和库水间的动力相互作用;地基的质量和能量向远域地基逸散的辐射阻尼;坝体内横缝间必然发生的瞬间往复开合;邻近坝体的近域地基的地形和包括潜在滑动岩块在内的各类地质构造;沿坝基地震动输入的空间不均匀性等^[4]。

b. 由于坝肩岩块与坝体分割的传统的静力刚体极限平衡法不反映整个坝体与地基系统实际的地震动稳定性状,需要提出替代传统刚体极限平衡法的高拱坝抗震总体安全性评价的新方法。比较可行的思路是把坝体、地基和库水作为整个体系,以在强震作用下产生的、包括坝体和地基接触面局部开裂和滑移在内的位移响应的突变作为由量变发展到质变的整体失稳的极限状态^[5]。

c. 考虑到大规模的高非线性坝地震响应计算十分繁复,为保证数值计算的收敛性和稳定性,时域计算中的时间步长常需取万分之几秒,而输入地震动的持续时间长达数十秒。势必采用高性能并行计算新技术。为此,初步建置了“联想深腾 1800”的 6 节点微机群并行计算平台,并基于中国科学院梁国平教授的有限元语言(FEPG)重新编制程序,再基于 PFEPG 平台开发并程序。目前已经成功应用

于工程实际。以节点总数达 146769、含 9298 个接触点对的溪洛渡拱坝含孔口的模型为例,采用串程序,用双核 3.6 G 主频、4 G 内存的单机计算,耗时 505 h 12 min。采用自行研发的并程序,用 6 节点 12 核、单核主频速度为 3 G 和 2 G 内存的并行机计算,耗时仅 10 h 48 min。效果是十分显著的^[6]。

综上所述,可以认为目前对混凝土高坝在地震作用下的损伤破坏过程进行深入分析研究的基础条件已经基本具备。当前为探索定量判断溃坝的关键难点在于建立坝体混凝土和地基岩体损伤力学模型。因为无论是坝体强度还是坝肩抗滑稳定的抗震校核,都要归结到坝体和岩体的强度超限检验。其中最主要的障碍是:传统的线弹性有限元动力分析中,在关键的坝踵部位存在应力集中,影响开裂和损伤的判断。由于大坝混凝土存在大量随机分布微裂缝,且裂缝尖端并不存在均匀的应力场,与断裂力学基本假定相悖,因此难以采用断裂力学方法解决。目前看来以采用由各向同性损伤变量表征连续介质中弥散裂缝演化的损伤力学基本理论和力学模型较实用。但其关键难点在于损伤力学模型的建立。

4 解决思路

为了开拓建立材料损伤力学模型的新思路,必须先考虑地震作用下混凝土和岩体损伤模型的一些特点:①这类非均质准脆性材料的损伤过程是由微裂纹拓展、萌生、贯通的损伤演化发展至形成宏观裂缝和破坏的过程;②材料抗拉强度远低于其抗压强度,损伤及破坏主要由拉应力控制;③材料受拉和受压的损伤演化规律不同,且受拉损伤后再反向受压时有恢复刚度的“单边效应”;④材料弹性模量和强度随损伤演化而降低,卸载后因拉剪裂纹不能完全复原而产生残余变形;⑤受制于试验资料,目前只能基于各向同性连续介质的假定。

迄今,在商用软件中只有 ABAQUS 能计入残余变形对损伤演化规律的影响。其采用的是基于 Lubliner 等^[7]和 Lee 等^[8]提出的弹塑性损伤模型。对此,似有一些问题值得进一步商榷和探讨:①对混凝土和岩体准脆性混凝土材料,损伤是因微裂隙的扩展、连通,而不同于塑性力学基于的晶格滑移和变形。损伤与塑性相耦合导致模型复杂、求解困难,并需以增量形式求解,且非关联流动法则的塑性势函数不但难以确定,而且导致刚度矩阵呈非对称性。②整个损伤过程释放的断裂能并非如文献[7-8]中采用的观点——仅与残余变形相关。为此,笔者建议了一个不与塑性耦合、直接基于试验资料、建立计入残余变形的损伤演化规律和力学模型的新思路。

按照这一思路,通过与河海大学协作,目前已初步得出湿筛大坝混凝土单轴拉伸的应力-应变全过程曲线。中国水利水电科学研究院正在安装 MTS 公司制造的 1500 t 的动静态材料试验机,用该试验机可以进行全级配大坝混凝土应力-应变全过程曲线的测试,从而为笔者建议的方法创造了有利条件。

在参考文献[7-8]的基础上,笔者所建议方法的重点如下:先建立损伤应变与应力和损伤变量的关系:

$$\sigma_N = f_{N0}[(1 + a_N)\exp(-b_N \epsilon_{dN}) - a_N \exp(-2b_N \epsilon_{dN})] \tag{1}$$

$$D_N = 1 - \exp(-d_N \epsilon_{dN}) \tag{2}$$

其中 $N = t, c$
式中: σ_N, D_N 分别为应力和损伤变量; t, c 分别表示拉和压。

关键在于:根据材料试验给出的应力-应变全过程曲线,直接确定相应于 2 个任选的应力点 σ_{N1} 和 σ_{N2} 的、计入残余应变的损伤变量 D_{N1} 和 D_{N2} ,代入式(1)(2)后求解系数 a_N 。再以材料试验给出断裂能表征损伤释放的应变能,并由此确定系数 b_N 和 d_N 。

$$\frac{G_N}{l_N} = \int_0^\infty \sigma_N d\epsilon_{dN} \tag{3}$$

式中: G_N, l_N 分别为断裂能和特征长度。

对于复杂应力状态,以权重因子表征等效损伤变量和等效残余变形,并体现拉、压不同损伤演变规律的相互影响及“单边效应”。

定义权重因子为

$$r(\hat{\sigma}) = \frac{\sum_{i=1}^3 \hat{\sigma}_i}{\sum_{i=1}^3 |\hat{\sigma}_i|} \tag{4}$$

取复杂应力状态下考虑拉、压损伤相互影响及单边效应后的损伤变量为

$$D = 1 - (1 - D_c)[1 - r(\hat{\sigma})D_t] \tag{5}$$

以最大、最小应变作为单轴试验中的拉、压应变。

采用基于修正的 Drucker-Prager 模型的损伤准则

$$F(\bar{\sigma}, \hat{\epsilon}_{dt}, \hat{\epsilon}_{dc}) = \frac{1}{1 - \alpha}(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta \hat{\sigma}_{\max}) - \bar{\sigma}_c(\hat{\epsilon}_{dc}) \geq 0 \tag{6}$$

其中

$$\alpha = \frac{\sigma_{b0} - \sigma_{c0}}{2\sigma_{b0} - \sigma_{c0}}$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\hat{\epsilon}_{dc})}{\bar{\sigma}_t(\hat{\epsilon}_{dt})} \{ (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \}$$

$$\bar{p} = -\frac{1}{3}\bar{\sigma} : I$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}\bar{S} : \bar{S}}$$

式中: σ_{b0} 和 σ_{c0} 分别为双轴等压和单轴受压时的初始屈服应力; $\bar{\sigma}_t(\hat{\epsilon}_{dt})$ 和 $\bar{\sigma}_c(\hat{\epsilon}_{dc})$ 分别为与损伤应变相应的材料有效拉、压强度; $\bar{p}$ 为有效静水压力; $\bar{q}$ 为 Mises 等效应力。

采用所建议的考虑残余变形的损伤力学模型,在上述高混凝土坝抗震已有研究成果的基础上可以更简捷地进行混凝土坝损伤破坏过程的非线性动态分析,并能方便地计入在地震作用下材料的应变率效应特性。建议的模型和方法的主要特点是:①直接由试验成果确定残余应变对损伤变量的影响,更接近于实际;②无需损伤与塑性耦合,可进行全量运算,简化了计算,提高了效率;③在各向同性的损伤变量假定下刚度矩阵对称,可采用高阶单元进行分析,提高了精度。该项研究目前正结合大坝工程进行中。

5 实例验证

为验证所建议混凝土试件模型的合理性,应用文献[8]中的算例对计算结果与试验结果进行比较。

例 1 考察所建议混凝土模型给出的应力-应变关系的合理性。

图 1(a)是单轴受拉问题,混凝土的弹性模量 $E = 3.1 \times 10^4$ MPa,最大抗拉强度 $f_{to} = 3.48$ MPa, $G_t = 54.3$ N/m, $l_t = 82.6$ mm, $D_{t1} = 0.5, D_{t2} = 0.726$ 。图中给出了由本文模型计算确定的拉应力-拉应变曲线和文献[8]给出的试验结果(以受拉方向为正)。

图 1(b)是一个单轴受压问题。混凝土弹性模

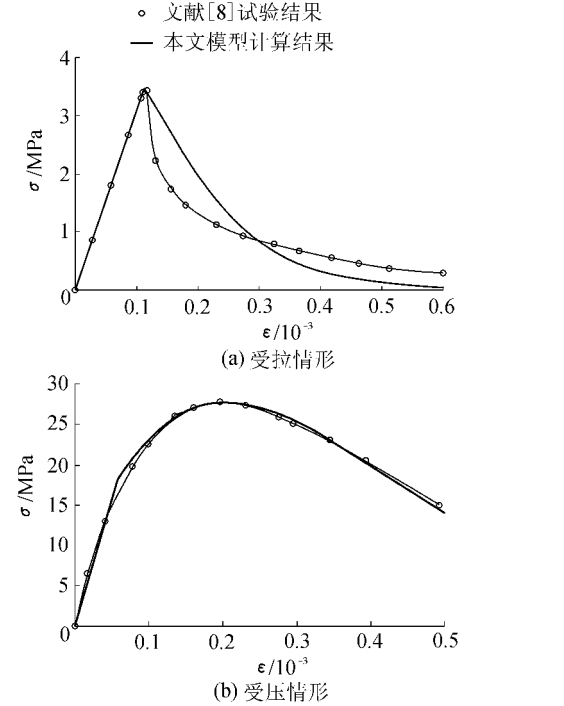


图 1 应力-应变关系的计算结果与试验结果比较

量 $E = 3.17 \times 10^4 \text{ MPa}$ 最大抗压强度 $f_{cu} = 27.6 \text{ MPa}$, $G_c = 11\,150.5 \text{ N/m}$, $l_c = 82.6 \text{ mm}$, $D_{cl} = 0.4$ 。图 1(b)给出了由本文模型计算确定的压应力-压应变曲线和文献 [8] 给出的试验结果(以受压方向为负)。

例 2 考察所建议混凝土试件模型在单轴拉、压往复荷载作用下损伤变量的演化、残余应变的发展的合理性。图 2(a)为试块单轴受拉损伤并经过多次加载和卸载的应力-应变曲线(以受拉方向为正) 图 2(b)为试块单轴受压损伤并经过多次加载和卸载的应力-应变曲线(以受压方向为负)。作为比较 , 图中也绘出了文献 [8] 给出的试验结果。

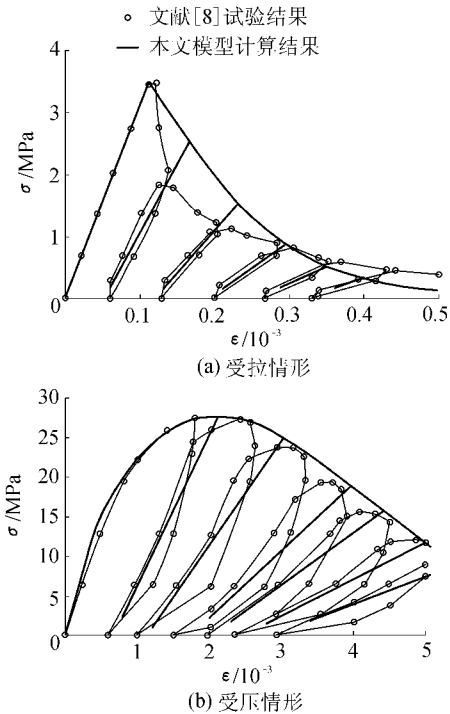


图 2 单轴循环荷载作用下应力-应变关系的
计算结果与试验结果比较

例 3 考察所建议混凝土试件模型在拉压循环荷载作用时 , 拉损伤对混凝土抗压刚度和抗压强度影响以及压损伤对混凝土抗拉刚度和抗拉强度影响的合理性。图 3(a)为混凝土在多次拉加载-卸载-反向压加载时的应力-应变曲线。图 3(b)为混凝土在多次压加载-卸载-反向拉加载时的应力-应变曲线。由图 3 可见 , 混凝土的拉损伤对混凝土的抗压刚度和抗压强度没有影响 , 拉损伤的混凝土在反向受压时刚度恢复 ; 压损伤后的混凝土对其抗拉刚度和抗拉强度均有影响 , 压损伤的混凝土反向受拉时抗拉刚度降低、抗拉强度也降低。

6 结 语

在已有研究成果的基础上 , 探索了建立基于试

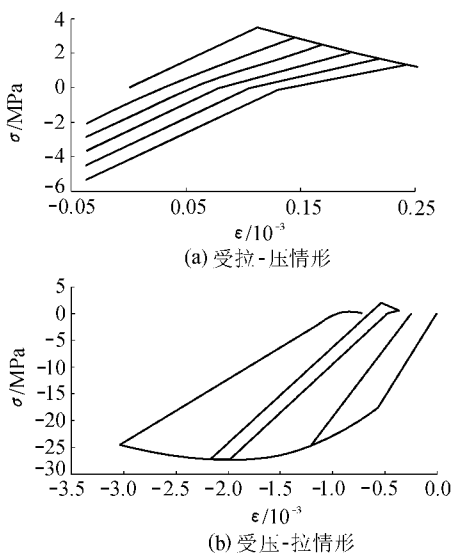


图 3 拉压荷载往复作用下的应力-应变关系
(正值表示受拉 , 负值表示受压)

验资料的、更为合理和简便的坝体混凝土和地基岩体损伤力学模型的新思路和方法。通过对试件的试验结果对所建模型进行了初步验证。目前正基于上述结果研发相应的串、并行计算软件 , 并结合实际工程 , 确定评判溃坝的定量准则 , 可望为防止混凝土高坝地震灾变提供更科学的依据。

参考文献 :

[1] 陈厚群 , 李敏 , 石玉成 . 基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法 [J] . 水利学报 , 2005 , 36(12) : 1399-1404 .
[2] 张翠然 , 陈厚群 , 李敏 . 根据渐进谱的统计规律生成地震加速度时程 [J] . 地震学报 , 2007 , 29(4) : 409-428 .
[3] 张翠然 . 重大水利水电工程地震动输入研究 [D] . 北京 : 中国水利水电科学研究院 , 2009 .
[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 , 涂劲 , 陈厚群 . 基于动接触力法的拱坝抗震稳定有限元分析 [J] . 水利学报 , 2004 , 35(10) : 7-12 .
[6] CHEN Hou-qun , MA Huai-fa , TU Jin , et al . Parallel computation of seismic analysis of high arch dam [J] . Earthquake Engineering and Engineering Vibration , 2008 , 7(1) : 1-11 .
[7] LUBLINER J , OLIVER J , OLLER S , et al . A plastic-damage model for concrete [J] . Int J Solids Structures , 1989 , 25(3) : 299-326 .
[8] LEE J , FENVES G L . Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J] . Journal of Engineering Mechanics , 1998 , 124(8) : 937-956 .

(收稿日期 2011-01-27 编辑 : 高建群)