

大型水电站地下厂房的地震反应特点初探

张运良¹, 马艳晶², 刘晋超³

(1. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院 辽宁 大连 116024 ;
2. 中国恩菲工程技术有限公司 北京 100038 ; 3. 广东省电力设计研究院 广东 广州 510006)

摘要 : 简要介绍水电站地下厂房的以往震害情况。基于黏弹性边界理论和等效地震荷载输入方法 , 以小湾水电站地下厂房为例 , 假定地震波为从底部竖直向上入射的剪切波 , 且围岩质点振动方向平行于机组段横向 , 初步分析厂房主要部位的横向地震反应的位移、速度、加速度和动应力在幅值和波形方面的特点。针对地下厂房 , 论述了应开展抗震研究和设计的紧迫性和必要性。

关键词 : 水电站 ; 地下厂房 ; 地震反应分析 ; 时域 ; 小湾水电站

中图分类号 : TV731.6 ; TV312 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2011)S1-0001-04

对于大型水电站地下厂房所遭受的震害 , 世界各地报道中还不多见。史上著名的一次是 1967 年印度柯以那水电站地下厂房遭受了 6.5 级地震 , 震后发现水轮机机墩混凝土块体间产生了相对位移 , 水轮机轴中心线发生了偏转 , 影响了机组的正常运转^[1]。2008 年 5.12 汶川大地震后进行震害调查的水电站中 , 映秀湾、太平驿、鱼子溪、天龙湖、耿达等中型水电站地下厂房均有不同程度的震损^[2] , 其中映秀湾水电站地下厂房机墩和风罩位置处虽然部分裂缝为震前裂缝 , 但震后裂缝开展较多(如 1 号机组风罩内壁裂缝) ; 对于耿达电站 , 其厂房为窑洞式 , 震损严重 , 厂房门口及一次、二次副厂房垮塌且全部被埋 , 调查人员无法进入厂房内部 , 厂房发电机层以下被水淹。需要指出的是 , 汶川地震后在被调查的地下厂房中 , 都是中小型电站厂房 , 单机装机容量最大的为太平驿电站(仅 65 MW) , 与西部地区许多单机容量达 700 ~ 1000 MW 级的超大型水电站厂房(如拉西瓦、溪洛渡、龙滩、小湾等)相比 , 在尺寸和规模上差别较大。因此 , 尽管这些中型地下厂房受损不是很严重 , 但并不能说明未来超大型地下厂房结构在强地震作用下也具有相当的安全性。客观地讲 , 高烈度地震区内的巨型地下厂房的大规模兴建是最近若干年来在中国才出现的 , 并且大多数还在建设和规划设计中 , 根本没有经过大地震的考验 , 因此灾难性的震害实例极为匮乏。当前在世界范围内地震活动比较频繁 , 地下厂房因深埋于岩石介质中 , 一旦发

生强震 , 震害发现与修复将十分困难 , 这对于我国富集水电资源而强震频发的西部地区来说是一个非常不利的因素。

虽然现行的 SL 266—2001《水电站厂房设计规范》和 DL5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》都建议对大型重要地下厂房的抗震进行专门研究 , 然而 , 岩土工程和水利水电工程领域近年来关注的热点多集中在大型水电站地下洞室群的抗震研究^[3-9] , 而对水电站地下厂房则关注极少^[10]。鉴于此 , 笔者以单机装机容量达 700 MW 的小湾电站为例 , 通过三维时域地震反应分析探讨地下厂房的地震反应特点 , 以期为工程设计和管理工作提供初步参考。

1 计算方法和理论

地下厂房的动力反应分析涉及围岩-厂房的动力相互作用以及对远域半无限围岩介质的有效模拟。

目前 , 大型水电站地下厂房混凝土结构设计一般使厂房上下游边柱、墙体以及下部大体积混凝土紧贴围岩 , 以充分利用围岩的刚度支撑作用。这种处理对混凝土结构抵御由厂房内部静、动力作用及振源引起的变形和振动是有益的。因此 , 在进行有限元建模时对围岩-厂房的动力相互作用考虑 , 可以将围岩与厂房作为一个整体 , 且认为在围岩与厂房交界处节点变形协调 , 具有一致的自由度。

对于动力作用下远域半无限围岩介质的模拟 ,

将涉及人工边界问题。研究表明,对结构动力反应不产生影响的围岩范围需满足下式:

$$D \geq \frac{C_{\max} T}{2} \quad (1)$$

式中: D 为计算边界至所考察结构边缘或中心的最短距离; $C_{\max}$ 为岩石介质内的最大波速; T 为计算总时长。

一般岩石介质的波速(以剪切波速为例)达上千米每秒,强地震持时至少达数十秒。由此可见,若按式(1)进行围岩边界截断进而进行大型地下厂房的抗震计算,其规模和代价将非常大。

为了避免这一缺陷,近年来提出的应力型局部人工边界如黏性边界和黏弹性边界等,以其物理概念清晰、工程精度足够、便于在计算机上实现等特点,已越来越受到研究者的重视。采用黏弹性边界,即在截断围岩边界处施加人工弹簧和阻尼器,以模拟远处围岩介质的弹性恢复作用以及对波动能量的吸收作用。

基于黏弹性边界理论和相应的地震动输入方法^[1],笔者已成功在 ANSYS 软件平台上通过自编程序进行了地下水电站洞室群在地震作用下的瞬态行波效应分析,并就洞室群的一些地震反应特点进行了初步研究^[7-9]。本文结合工程实例,探讨地下厂房结构在横向地震作用下的反应特点,以期抛砖引玉,引起研究者和设计方的重视。

2 工程概况及计算模型和参数

小湾水电站工程是澜沧江中下游河段梯级开发的龙头水库和巨型电站。主厂房采取一机一缝的布置方式,标准机组段间距是 33.0 m,厂房洞室上下部的跨度分别为 30.60 m 和 28.00 m,高为 79.40 m(厂房洞室顶拱高程 1030.88 m,尾水管底板高程为 951.50 m),其中顶拱距发电层楼板 32.43 m(发电机层楼板高程 998.45 m)。此外,母线层楼板高程为 991.10 m,水轮机层楼板高程为 984.95 m。蜗壳采用保压埋设方式。

计算模型取中间一个完整的机组段主厂房连同一定范围的围岩,见图 1。整体模型高 440 m,沿机组段横向和纵向各取 183 m,并不计其他机组段的存在影响。其中,从机组中心(水轮机安装高程为 980.00 m)到模型围岩底边界和地表的距离分别为 98.50 m 和 341.85 m,到上、下游侧围岩边界距离分别为 80.85 m 和 102.20 m,到前后侧围岩边界的距离为 94.00 m 和 89.00 m。模型中考虑了从发电机层楼板高程至尾水管底板高程的主要混凝土结构构件,包括尺寸较大的孔洞和廊道。

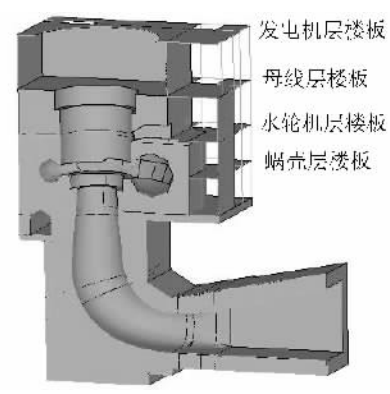


图 1 主厂房混凝土结构半剖面图

计算采用的设计地震加速度时程取由美国原子能 RG1.60 谱生成的人工地震波^[7-9],它综合了 20 世纪 70 年代初期以前的美国主要强震记录的特点,具有中低频带宽、包含一定的高频分量、场地性适应广的特点,在缺乏场地谱及类似场地地震记录的情况下可以用来作为岩石场地的地震动。计算时,不失一般计,假定地震波为剪切波,从底部竖直向上入射,入射面与厂房横剖面平行,即围岩质点振动方向平行于机组段横向。小湾地下厂房区设计加速度幅值取 0.17 g,经幅值调整后,计算模型底面处的输入速度波和位移波分别如图 2 和图 3 所示。

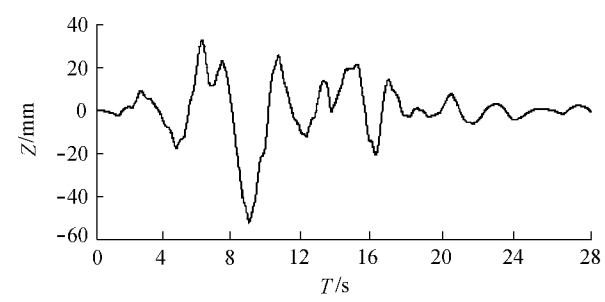


图 2 输入位移波

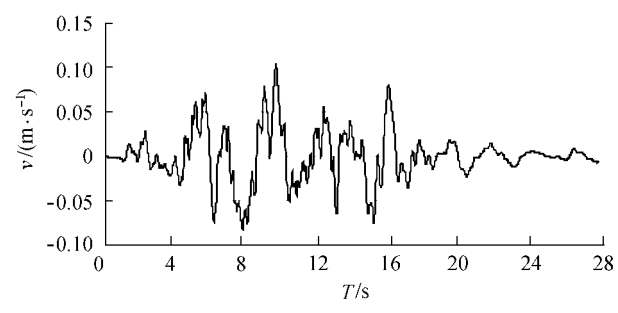


图 3 输入速度波

计算时间步长取 0.01 s,采用 Newmark 隐式时间积分方案。计算中只考虑地震波传播时影响较大的辐射阻尼而忽略影响较小的岩体材料阻尼。在应用黏弹性边界理论计算边界弹簧和阻尼元件参数时, r 取值为计算中心到各边界的距离平均值,对于本问题约为 90 m。为满足波动传播的精度要求,网格竖向尺寸控制在平均约为 20 m。

小湾地下厂房围岩岩性主要为黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩夹薄层透镜状片岩,岩体完整、新鲜,围岩总体稳定条件较好。地下洞室群开挖后,因采取喷混凝土、锚索和锚杆等支护措施,可以认为围岩变形和应力重分布已经完成,因此本文的地震反应分析可暂不考虑初始条件的影响。厂房内部混凝土、钢部件以及围岩的材料参数见表 1。

表 1 材料参数			
部 位	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比
板梁柱结构混凝土 C30	30	2500	0.17
大体积混凝土结构混凝土 C25	28		
围 岩	24	2700	0.25
钢 材	210	7850	0.30

3 结果分析

为便于分析,计算采用的右手直角坐标系为 z 轴竖直向上为正, y 轴正向指向上游侧。厂房上下部结构的各向时程最大位移见表 2。其中,正值表示位移方向与坐标正向一致,括号内的负值则表示位移与坐标正向相反。

表 2 厂房主要部位各方向最大动位移/mm				
部 位	纵向	横向	竖向	
上部结构	发电机层楼板	4.7(-2.7)	75.5(-131.7)	5.5(-3.9)
	母线层楼板	4.8(-2.7)	74.8(-131.6)	5.4(-4.0)
	水轮机层楼板	4.9(-2.8)	74.2(-131.3)	5.6(-3.9)
	蜗壳层楼板	4.9(-2.8)	73.5(-130.9)	5.6(-4.1)
	机墩混凝土	3.2(-1.8)	72.1(-126.9)	4.5(-3.7)
下部结构	蜗壳外混凝土	4.0(-2.2)	71.8(-127.3)	5.1(-4.2)
	尾水管底板	2.9(-1.6)	69.1(-126.7)	7.3(-5.4)

从表 2 可以看出,在横向地震作用下,厂房各部位的横向位移比竖向和纵向位移明显(大一个量级),且上部位移比下部位移大。对于横向位移,最大值发生在上部发电机层楼板处,为 -131.7 mm,具体位置在楼板下游右端部与岩体接触处(节点编号 9883),发生时刻为 8.70 s(见图 4)。对于位于厂房最下部的尾水管,其横向最大位移为 -126.7 mm,发生在底板底面上游侧与岩体接触处(节点编号 2612),发生时刻亦为 8.70 s(见图 4)。此时,厂房各部位的横向位移分布见图 5(图中的虚线表示地震前的轮廓)。由图 5 可明显看出,横向地震作用下厂房的地震位移以横向为主。此外,考察厂房内其他部位的横向位移,与计算底面处的输入地震位移场相比在波形上随时间的变化几乎一致(见图 2 和图 5),只是幅值沿高程逐渐放大。这说明地下厂房结构的横向震动与围岩震动基本同步,其地震反应主要受到周围岩石介质的影响。当仅考虑洞室的地震作用效应时(相当于厂房结构未修建),沿洞室高度方向各点的位

移也几乎同步,基本上顶部大于底部^[7-9]。

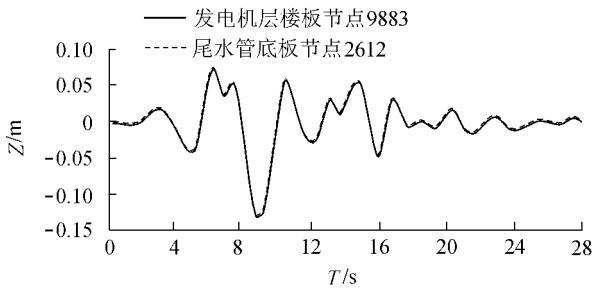


图 4 发电机层楼板与尾水管底板典型节点的横向位移时程曲线

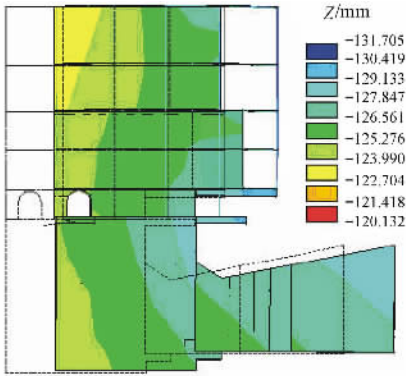


图 5 横向地震作用下 $t = 8.70\text{ s}$ 时的厂房横向位移分布

厂房上下部结构在 $t = 8.70\text{ s}$ 的横向相对动位移差较大,正是此相对位移引起了厂房结构很大的动应力。为了说明这一点,厂房各部位在 $t = 8.70\text{ s}$ 时的横向地震动应力和第一主应力分布分别如图 6 和图 7 所示。由该 2 幅图可以看出,横向地震作用下地震动应力以横向分量为主,且引起厂房各部位的拉、压应力值都较大,特别是在距围岩-结构接触面的较远部位及结构开孔部位。例如,在母线层和水轮机层楼板开孔处的横向动拉应力达 29.55 MPa(考虑地震作用效应折减系数 0.35 后,也将达 10.34 MPa),当然,这也包括一定的应力集中因素。这说明地下厂房的地震反应是比较显著的。

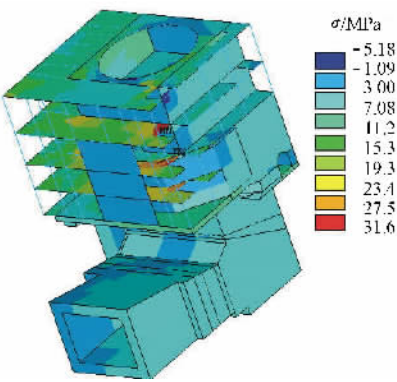


图 6 横向地震作用下 $t = 8.70\text{ s}$ 时厂房结构的横向应力分布

图 8 和图 9 分别给出 $t = 8.70\text{ s}$ 时刻的厂房横

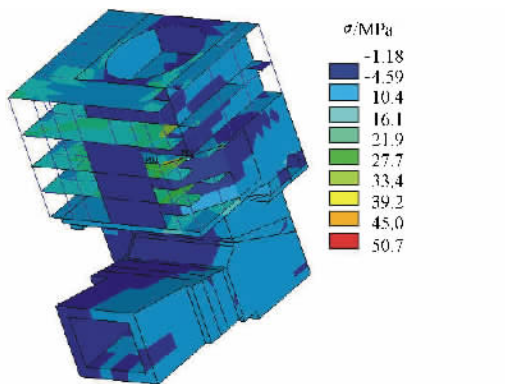


图 7 横向地震作用下 $t = 8.70\text{ s}$ 时厂房结构的第一主应力分布

向速度和加速度反应分布。由图可见,横向地震作用下厂房的横向速度和加速度基本上沿高程的增大而增大,但速度反应在厂房上下部方向相反,并以蜗壳底高程为符号分界线。加速度反应在 $t = 8.70\text{ s}$ 时在厂房整个高程内方向都一致且沿高程的增加而增大,发电机层楼板处的平均加速度约为 2.16 m/s^2 ,与设计加速度幅值 $0.17g$ 相比,放大系数约为 1.3;在尾水管底板高程,横向加速度约为 0.98 m/s^2 ,略大于输入加速度幅值 $0.085g$ 。

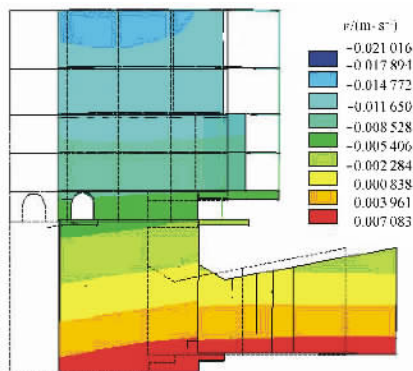


图 8 横向地震作用下 $t = 8.70\text{ s}$ 时的厂房横向速度分布

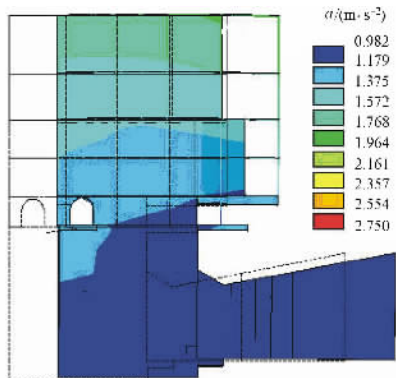


图 9 横向地震作用下 $t = 8.70\text{ s}$ 时的厂房横向加速度分布
为进一步了解速度和加速度反应的特点,图 10 和图 11 分别给出了发电机层楼板与风罩相交处下游侧节点(编号 20470)的横向和竖向速度及加速度时程曲线。从图中可见,在不同的方向即横向与竖

向,无论是速度还是加速度反应,随时间的波形变化差别较大,且速度反应幅值在横向上远大于竖向,而加速度反应幅值横向却与竖向相差不大。

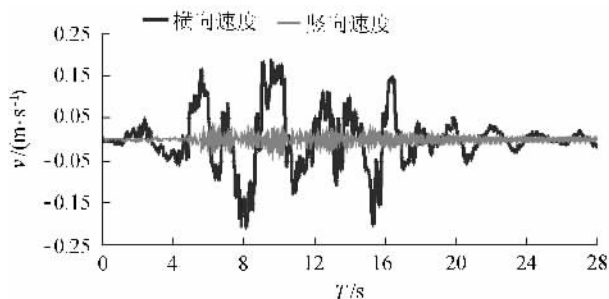


图 10 横向地震作用下发电机层楼板与风罩相交处下游侧节点 24070 的速度时程曲线

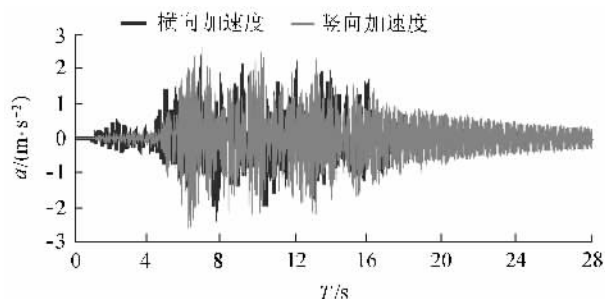


图 11 横向地震作用下,发电机层楼板与风罩相交处下游侧节点 24070 的加速度时程曲线

4 结 语

以小湾电站地下厂房为例,假定地震波为从底部竖直向上入射的剪切波,且围岩质点振动方向平行于机组段横向。经初步分析,得到一些认识:①地下厂房的地震反应主要受到周围岩石介质的影响。在横向地震作用下,厂房各部位的位移以横向为主,比竖向和纵向位移大一个数量级,且厂房上部结构位移比下部位移大。②沿高程的增加,厂房内各部位的横向位移在波形上随时间的变化与周围岩体几乎一致,相位差别极小。与位移反应相比,速度和加速度反应较为复杂。在不同的方向即横向与竖向,无论是速度还是加速度反应,随时间的波形变化差别较大,且速度反应幅值在横向上远大于竖向,而加速度反应幅值横向却与竖向相差不大。对于本算例,在厂房横向位移反应最大时刻,对于横向加速度反应,上部结构放大系数为 1.27。③在横向地震作用下,地震动应力以横向分量为主。由于相对位移差最大达 5 mm (在 8.70 s 时刻),引起厂房的横向拉、压应力值都比较大,特别是在距围岩-结构接触面的厂房内较远部位及开孔部位。

由此可见,在横向地震动作用下,大型地下厂房的地震反应比较剧烈且复杂。(下转第 44 页)

程度以上夏旱发生 34 a ,特大夏旱发生 16 a。发生频率偏大 ,与实际有一定的出入。按照本文确定的等级标准(表 3) ,钟祥市 52 a 中有 36 a 发生轻度以上夏旱 ,中度以上夏旱发生 25 a ,严重程度以上夏旱发生 16 a ,特大夏旱发生 7 a。本文确定的秋旱标准值与表 1 中的相应标准值相当。

根据表 3 的等级标准和不同时期降水距平百分比指标值 ,评定钟祥市 1956—2007 年间发生夏旱情况如下 :1959 年 ,1966 年 ,1972 年发生特大干旱 ,1988 年 ,1990 年 ,1992 年 ,1993 年 ,1994 年 ,2001 年发生严重干旱 ,1962 年 ,1964 年 ,1995 年 ,1999 年 ,2005 年 ,2006 年发生中度干旱 ;发生秋旱情况如下 :1973 年 ,1979 年 ,1988 年 ,1991 年发生严重秋旱 ,1957 年 ,1978 年 ,1990 年 ,2004 年发生严重干旱 ,1966 年 ,1992 年 ,1994 年 ,2002 年发生中度干旱。干旱识别和评判结果较为符合实际 ,说明本文使用的干旱等级划分方法是可行性的。

3 结 语

干旱指标是监测、评价、研究干旱的发生、发展规律的重要工具 ,在实践中得到广泛应用并发挥巨大作用。但干旱影响因素的复杂性制约了干旱指标及其等级标准在不同时空条件下的通用性 ,从而使干旱指标及其等级标准确定方法的研究成为当前研

究的热点 ,特别是对等级标准确定方法的研究 ,由于起步较晚 ,研究成果较少。本文对干旱指标等级确定方法进行了详细的归纳总结 ,分析了各种方法的优缺点 ,供择优使用。利用钟祥站 1956—2007 年共 52 a 气象资料 ,采用频率分析法对降水距平百分比指标进行等级划分 ,划分后干旱等级指标值与《干旱评估标准》中的相应值有一定的差别 ,但更加符合钟祥地区的实际情况 ,对干旱的识别和等级评估基本符合该区干旱实际情况。

参考文献 :

[1] 张强 鞠笑生 李淑华 . 三种干旱指标的比较和新指标的确定 [J]. 气象科技 ,1998 (2) :48-52.
[2] 赵旭春 . 中国北方干旱区干旱指标的应用研究 [D]. 兰州 :兰州大学 ,2007.
[3] 朱自玺 ,刘荣花 ,方文松 ,等 . 华北地区冬小麦干旱评估指标研究 [J]. 自然灾害学报 ,2003 ,12 (1) :145-150.
[4] 王旭峰 . 山东省抗旱预案研究 地下水干旱指标、综合旱涝指标评价及抗旱对策研究 [D]. 济南 :山东大学 ,2005.
[5] 国家防汛抗旱总指挥部办公室 . 中国水旱灾害 [M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,1997.
[6] 湖北省水利厅 . 湖北水利大事记 [M]. 武汉 :长江出版社 ,2006.
[7] 湖北省水利厅 . 湖北省抗旱指导手册 [M]. 武汉 :湖北科学技术出版社 ,2003.

(收稿日期 2011-03-18 编辑 方宇彤)

(上接第 4 页)

可以预计 ,在纵向和竖向地震作用下地下厂房的地震反应也将比较显著。因此 ,应重视和加强大型地下厂房的抗震研究 ,确保水电机组安全稳定运行。

参考文献 :

[1] 舒扬骥 ,王日宣 . 水电站厂房动力分析 [M]. 北京 :水利电力出版社 ,1987.
[2] 晏志勇 ,王彬 ,周建平 ,等 . 汶川地震灾区大中型水电工程震损调查与分析 [M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2009.
[3] 隋斌 ,朱维申 ,李晓静 . 地震荷载作用下大型地下洞室群的动态响应模拟 [J]. 岩土工程学报 ,2008 ,30 (12) :1877-1882.
[4] 李海波 ,朱莅 ,吕涛 ,等 . 考虑地震动空间非一致性的岩体地下洞室群地震反应分析 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2008 ,27 (9) :1757-1766.

[5] 李小军 ,卢滔 . 水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析 [J]. 水力发电学报 ,2009 ,28 (5) :41-46.
[6] 左双英 ,肖明 . 映秀湾水电站大型地下洞室群三维非线性损伤地震响应数值分析 [J]. 水力发电学报 ,2009 ,30 (3) :721-728.
[7] 张运良 ,马艳晶 . 基于两类典型动力人工边界的水电站地下洞室群地震反应分析 [J]. 水电能源科学 ,2010 ,28 (3) :70-73 ,145.
[8] 张运良 ,马艳晶 ,韩涛 . 大型水电站地下洞室群三维地震反应时域分析 [J]. 水力发电 ,2010 ,36 (5) :27-30.
[9] 张运良 ,马艳晶 . 斜入射 SV 波作用下的水电站地下洞室群地震反应特点 [C] // 夏才初 . 第三届水工岩石力学会论文集 . 上海 :同济大学出版社 ,2010 :157-162.
[10] 张运良 . 大型水电站蜗壳及厂房结构动力分析问题探讨 [J]. 水利水电科技进展 ,2010 ,30 (6) :20-25.
[11] 杜修力 ,赵密 . 基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方 [J]. 水利学报 ,2006 ,37 (9) :1063-1069.

(收稿日期 2010-09-13 编辑 高建群)