

文章编号: 1006-4710(2014)01-0079-06

远场大震对深厚覆盖土层地基上超高层 建筑物的影响分析

陶磊¹, 张俊发²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 建造在深厚覆盖土层上的超高层建筑往往受到远场大震的影响较大。为了探讨这一现象产生的原因,从远场地震记录特征及超高层建筑自身的动力特性进行了分析。通过汶川地震时西安远场记录,结合西安地区的地质构造情况,分析远场地震动特征,并对一幢超高层建筑进行远场地震反应分析,研究远场大震对这类长周期建筑物的影响。通过对地震记录的频谱分析可知:①远场地震具有相对较小的加速度峰值、超长的持时以及丰富的长周期成分;②远场地震动的卓越频率小于 El Centro 记录,远场地震动优势频率段远小于 El Centro 记录。通过时程分析可知:在地震动峰值相似的情况下,远场地震对超高层建筑的动态响应远大于 El Centro 记录。深厚覆盖土层上超高层建筑自振周期较长,易与远场大震的长周期成分接近而发生共振,其响应与一般地震不同,进行抗震设计时,应对遭遇远场地震的情况予以重视。

关键词: 远场大震; 超高层建筑; 地震反应分析; 深厚覆盖土层

中图分类号: P315.1, TU973⁺.17 **文献标志码:** A

Influence and analysis of super-rise building on soil layer with deep deposit subjected to strong far-field ground motion

TAO Lei¹, ZHANG Junfa²

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Major influence for super-rise building constructed on soil layer with deep deposit is subjected to strong far-field ground motion. In order to probe into this phenomenon, an analysis from far-field motion characteristic and dynamic characteristics of super-rise building is made. Based on far-field records and area of geological structure in Xi'an when Wenchuan earthquake took place, far-field earthquake motion characteristics are analyzed, and a far-field seismic response simulation analysis for a super high-rise building in Xi'an is made to study influence of far-field earthquake to such long-period structures. Through the result of spectral analysis and response spectrum analysis, it indicates that firstly, far-field ground motion is of relatively lower peak ground acceleration, super long time of duration and abundant long period component; secondly, predominant frequency of far-field ground motion is smaller than El Centro, meanwhile, the dominant frequency range of far-field is much smaller than El Centro. From time history analysis, it indicates that in the similar of PGA condition, the dynamic response of super-rise building of far-field ground motion is greater than El Centro earthquake record. Vibration period of super-rise building constructed on soil layer with deep deposit is long, and easy to close the long period component of far-field ground motion records to cause resonance, whose response is different

收稿日期: 2013-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279162)。

作者简介: 陶磊,男,博士生,研究方向为工程结构抗震分析。E-mail:taolei0100@126.com。

张俊发,男,教授,研究方向为工程结构抗震分析。E-mail:Zhangjf-4314@163.com。

from general seismic records. Accordingly, when a seismic design starts, more attention should be paid to the structure subjected to far-field ground motion.

Key words: far-field strong ground motion; super high-rise building; earthquake response analysis; soil layer with deep deposit

汶川地震中,中国数字强震动台网获得了19个省市的455个台站的主震加速度记录,极大丰富了我国的强震地震记录^[1-3]。距震中约600 km的陕西省西安市的几个台站,如:草滩、长安、西安台站也获取了此次地震动的主震记录(以下简称草滩记录、长安记录、西安记录),属于典型的大震远场地震记录。研究人员通过对以往的地震记录进行研究后发现^[4-5]:大震远场地震记录的长周期成分明显要比小震近场的地震记录丰富,因此对长周期结构的影响也较大,造成的震害也比较严重。从汶川地震震后的震害调查可以发现:地震发生时,西安地区的震感非常明显,高层、超高层建筑里的人震感尤为强烈,这些长周期的震害对高层建筑也比对低层建筑严重^[6-8]。为研究大震远场地震动对长周期结构的影响,本文根据西安地区的地震台站获取的数字强震动记录,并结合西安地区的地质构造以及地形特点,分析远场地震动特征,并对西安一幢长周期结构的超高层建筑进行地震反应仿真分析,以期获得对此类工程有价值的结论。

1 汶川地震西安地震动记录特征

西安市位于黄河流域中部的关中盆地,地处陕西省关中平原偏南地区,北部为开阔平坦的渭河冲积平原,地表覆盖深层的软弱黄土,南部为秦岭剥蚀山地。为便于结合西安地形特点研究汶川远场地震动特征,本文选取了西安地区三个代表性台站:位于西安北郊渭河平原开阔地的草滩台站(获取的是地表地震动记录)、位于秦岭北坡山地上的长安台站(其下为基岩层)、位于西安城区的西安台站。通过分析三个台站的远场地震动记录后,发现具有以下几个地震动特征。

1.1 影响范围广且持续时间长

汶川大地震除少数几个省无震感外,其余各省均有震感,很多东南亚国家和地区也有明显震感,城市的高层、超高层建筑的人在地震时都感到了长时间的强烈晃动。

西安市距离震中600 km多,草滩台站获取的汶川主震记录长达274 s,长安台站获取的主震记录长达350 s,而西安台站的地震记录达到了403 s,持时远超过此次地震震中附近的记录。这样超长的强

震记录对于研究深厚覆盖土层上的长周期结构的远场地震反应很有价值。

1.2 远场地震动强度较低

汶川地震近场的地震动强度很大,震中附近烈度达到了XI度,近断层附近的加速度峰值约为1.0g。根据文献[1]可知,距震中22.2 km的汶川卧龙台台站获得的地震记录东西向加速度峰值为957.7 cm/s²。西安地区地震烈度为VI度,还未达到《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[11]按8度设防的小震的水平,远场峰值加速度为54.708 cm/s²和52.714 cm/s²,仅为震中附近的1/18,而位于基岩上长安台站接收到的地震波加速度峰值仅为17.322 cm/s²,远远小于震中附近的地震动强度,此外可以看出:西安城区地表覆盖黄土将基岩地震动峰值放大3倍以上。

通过以上对比可以发现:远场地震动强度很低;深厚覆盖土层对远场地震动的放大作用影响很大。

1.3 长周期成分丰富

远场地震动向远处地震传播的过程中,高频成分快速衰减,远场地震动主要成分为地震断层破裂产生的丰富的长周期地震动,以及传播过程中激发的长周期面波。图1~图3分别给出了西安记录、草滩记录以及1940年美国El Centro记录(南北方向)的地震动加速度时程曲线及其傅里叶幅值谱。通过对比傅里叶幅值谱可以发现:与El Centro记录相比,西安记录的长周期成分丰富得多。由图1~3可见,各地震记录的卓越频率分别为0.195 Hz、0.153 Hz和1.465 Hz。

为了定量分析长周期成分范围,笔者定义了优势频率段 f_n 用以表征超过傅里叶幅值最大值的 $n\%$ 以上的频率范围。表1给出了西安记录、草滩记录以及El Centro记录超过40%~70%所对应的 f_n 值。

表1 各地震记录优势频率段
Tab.1 Dominant frequency range of each earthquake

f_n	西安记录	草滩记录	El Centro 记录
f_{40}/Hz	0.784	0.790	5.567
f_{50}/Hz	0.430	0.766	2.734
f_{60}/Hz	0.427	0.367	2.637
f_{70}/Hz	0.220	0.129	0.318

由表1可见,西安记录、草滩记录的优势频率段较为集中,且为低频;而El Centro记录较为分散,

且频率值更高。

笔者将西安远场地震记录划分为前期(0~80 s)、中期(80~200 s)和后期(200~403 s)三个阶段,分别分析了各个阶段的傅里叶幅值谱,如图4所示。前期地震波主要由10 Hz 以内的各种频率成分构

成,地震波的高频成分显著地衰减,到后期地震动以低频成分为主。由于远场地震波包含丰富的长周期成分,因此极易与长周期结构的基本自振周期一致或接近,虽然地震动峰值不大,但因易于引起共振而造成较大的危害。

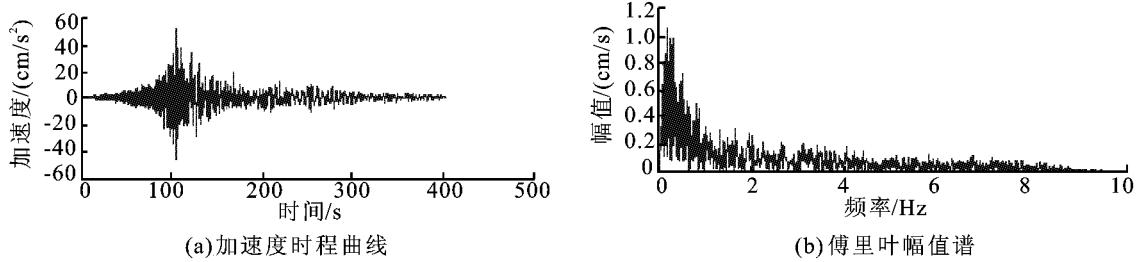


图1 西安记录加速度时程曲线及其傅里叶幅值谱
Fig. 1 Time history curve of acceleration and Fourier amplitude spectrum of Xi'an earthquake record

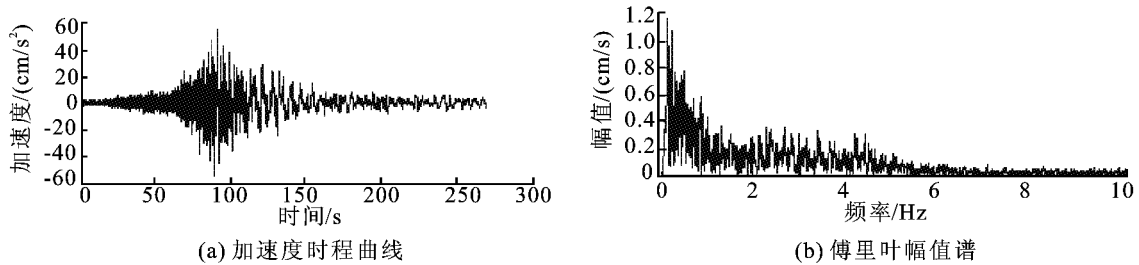


图2 草滩记录加速度时程曲线及其傅里叶幅值谱
Fig. 2 Time history curve of acceleration and Fourier amplitude spectrum of Caotan earthquake record

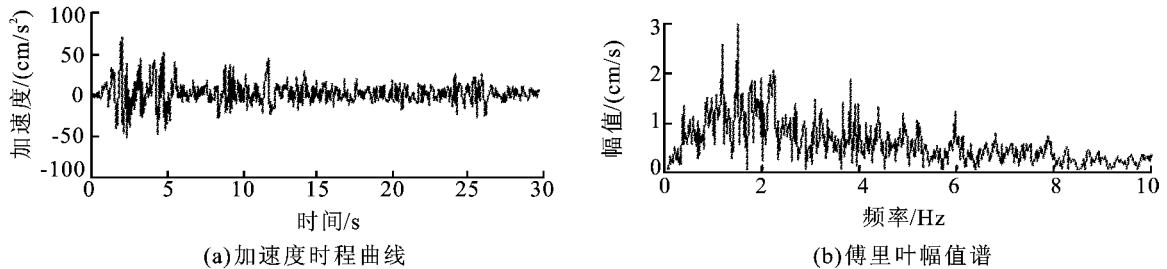


图3 El Centro 地震记录加速度时程曲线及其傅里叶幅值谱
Fig. 3 Time history curve of acceleration and Fourier amplitude spectrum of El Centro earthquake record

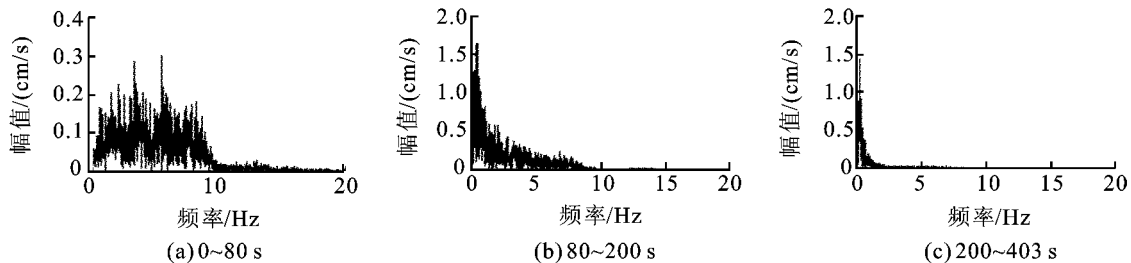


图4 西安记录三个阶段的傅里叶幅值谱
Fig. 4 Fourier amplitude spectrum of Xi'an earthquake record in three stages

2 长周期结构的地震反应分析

随着经济的发展,国内大中城市兴建了大量高层、超高层等长周期建筑物。由地震记录分析结果可知,远场地震动特征主要包括震动强度相对较小、

持时长、位移大以及地震动长周期成分丰富,而这些特点对于长周期结构来说,则会由于自振周期与远场地震一致或接近而引起共振,进而造成较大的震害。

震后的震害调查表明,远场大震中使人震感强

烈的为高层、超高层这样的长周期建筑。特别是由于特定的传播途径和场地条件同样能产生丰富的长周期地震动,如:深厚覆盖黄土层上的西安地区极易激发长周期面波,由面波激励以及场地土的放大作用共同造成了面波效应,经过松软场地土的滤波、放大作用使得长周期成分加强,在传播到地面后成为破坏性极强的地震动,尤其在地震动后期振动阶段,包含大量的长周期脉冲,从而引起了长周期结构的强烈晃动而导致其破坏。

近断层脉冲型地震动和远场软土地地震动是两类长周期地震动,但当前的规范很少对这两类地震动作用作出具体规定^[10]。从图 5 的汶川远场地震波和 El Centro 记录的加速度反应谱对比可以看出:在 0~1 s 的短周期部分,两者大体相当,而在超过 1 s 的长周期范围,远场波的反应谱呈多峰特征,且远高于 El Centro 记录,在 1~3 s 的周期内,前者的放大系数最大值达到了 2.25,而后者仅为 0.5 左右,这对于长周期结构的影响也较大,与我国抗震规范的设计反应谱也存在较大差别,说明远场地震波的长周期成分相当丰富,对于长周期结构的影响不可忽视。

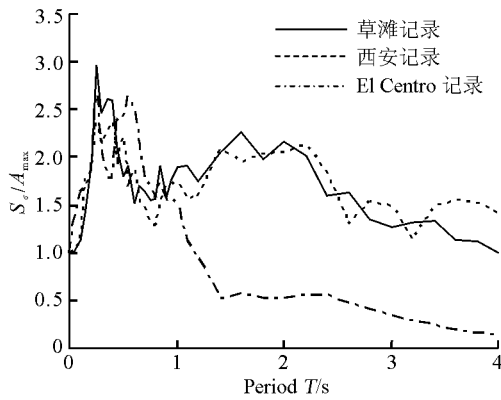


图 5 远场地震记录和 El Centro 记录反应谱(阻尼比 5%)
Fig. 5 Response spectra of Far-field and El Centro earthquake records (damping ratio is 5%)

3 工程实例

陕西省信息大厦位于西安市南二环路朱雀大街交叉口的东北角,分主楼和裙楼两部分,其中主楼地上 52 层,高 189.4 m,地下 3 层,基底埋深标高 -17.7 m,建筑面积 75 000 m²;裙楼地上 4 层,高 20.4 m,地下 1 层,基础标高 -7.1 m,建筑面积 21 800 m²,是西北地区较高的超高层建筑之一。主楼结构体系为筒中筒,核芯筒、角筒为钢筋混凝土结构,外筒钢骨混凝土结构,门厅入口处采用 2 根 8.5 m 的钢管混凝土柱。工程设防烈度为 8 度,地震分组为第一组,场地类别 III 类。

信息大厦有限元模型如图 6 所示,使用壳单元 SHELL63,梁单元 BEAM188 单元离散,共划分 40 491 个单元,31 205 个结点。



图 6 信息大厦有限元模型
Fig. 6 Finite element model of Information building

4 模态分析及弹性时程分析

4.1 模态分析

结构的地震反应分析的第一步是求解结构自身的动力特性,通过模态分析可以得到结构的各阶自振频率和自振周期。通过有限元分析可知,信息大厦前三阶自振周期分别为:2.755 s、2.103 s、0.661 s。本课题组在汶川地震之前的 2005 年通过实测得到结构的前三阶自振周期^[11]为:2.646 s、2.101 s、0.803 s。根据“GB50011-2010 建筑抗震设计规范”可知:场地类别为 III 类,设计地震分组为第一组的特征周期 T_g 为 0.45 s。结构的基本自振周期 T_1 超过了特征周期 T_g 的 5 倍,属于长周期结构。

4.2 本例所选地震波

陕西省信息大厦位于西安市区,进行地震反应分析时所选地震波为距工程最近且场地条件最接近的西安台站获取的汶川地震东西向地震波成分,更接近于信息大厦所在地,其峰值加速度 (PGA) 为 52.714 cm/s²,持续时间为 403 s,记录步长为 0.005 s,波形如图 1 所示。为了研究汶川远场地震动与常见地震记录的超高层建筑地震响应的差异,选取了 El Centro 记录作为参照。西安地区设防烈度为 8 度,按现行建筑抗震设计规范将其加速度时程的峰值 (PGA) 调整为 70 cm/s²,时间为 30 s,时间步长为 0.02 s,波形如图 3 所示。反应谱建立了结构体系自身的动力特性与地震反应之间的关系,反映了地震动强度以及频谱特性,反应谱的幅值反映了地震动的强度,反应谱的形状反映了地震动的频谱特性。从图 5 可以看出:西安记录水平东西向加速度反应谱在 1~3 s 范围内的动力放大系数最大值在

2.25 左右,而 El Centro 记录在这个区间内只有 0.5 左右,而本文的信息大厦的前两阶自振周期恰好处于这个时间段内,因此,可以定性分析:输入西安记录后结构的响应会远大于输入 El Centro 记录。

4.3 地震反应分析结果

4.3.1 位移时程

通过对信息大厦有限元模型的弹性时程分析可以得到各结点的位移时程,取有限元模型每层同一位置为该层代表点,分析该点位移时程最大值与其所在层数的关系,如图 7 所示。各层位移时程最大值是随着层数的增加而逐渐增大的,在结构顶部位移响应的幅值达到最大,输入汶川远场地震记录,结构的位移响应的最大值为 19.63 cm,远大于输入 El Centro 记录的 6.55 cm。

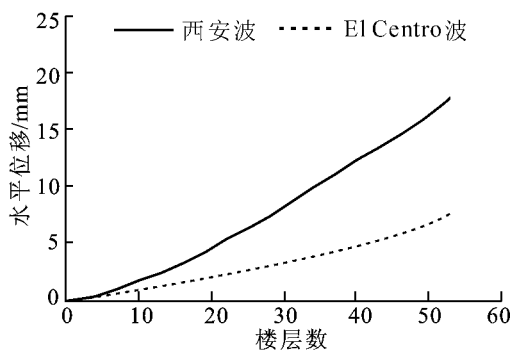


图 7 各层位移最大值

Fig. 7 Maximum displacement of each story

虽然远场地震动的幅值略小于 El Centro 记录,但是汶川远场地震动对长周期结构的影响却比 El Centro 记录大得多,笔者分析认为这主要是由于远场地震波长周期成分与超高层建筑基本自振周期接近或一致而产生共振引起的。另外,超高层建筑的阻尼比一般小于 0.05,在远场地震记录的作用下将会产生更大的位移。

4.3.2 绝对加速度时程

笔者还提取了各层绝对加速度响应的最大值与所在层数的关系曲线,如图 8 所示。

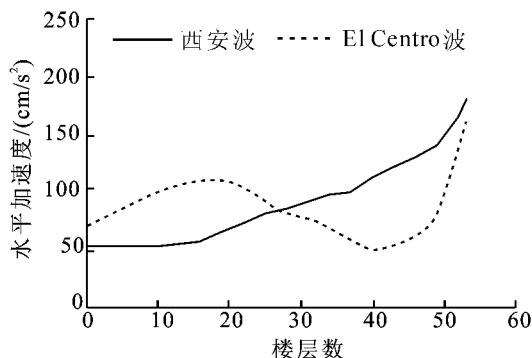


图 8 各层绝对加速度最大值

Fig. 8 Maximum absolute acceleration of each story

通过对比可以发现,输入西安记录进行地震反

应分析,得到的结构各层绝对加速度最大值随着层数增加而增加,上部增加速度比下部快,顶部达到 221.14 cm/s^2 ;而输入地震动为 El Centro 记录后,上部结构的绝对加速度响应的最大值先增加至结构高度的 $1/3$ 处又逐渐减小,至结构全高的 $2/3$ 处又开始增加,在结构的顶部绝对加速度达到最大,为 161.43 cm/s^2 ,曲线呈“S”型。综上所述,由绝对加速度的最大值与结构层数的关系曲线可以看出:输入远场地震动与 El Centro 记录,结构的绝对加速度分布是明显不同的。

5 结 论

1) 汶川远场地震草滩记录、长安记录、西安记录都具有加速度峰值相对较小、持续时间长、长周期成分丰富的特点。

2) 西安地区各台站接收到的汶川远场地震动加速度强度相对较低。其中,靠近基岩的长安台站的加速度峰值最小,仅为 17.322 cm/s^2 ,另外两个台站由于上部覆盖深厚的软弱黄土而接收到的加速度峰值有所放大,分别为 54.708 cm/s^2 和 52.714 cm/s^2 ,这反映出场地深厚覆盖土层对于远场地震波有放大作用。

3) 远场地震记录的卓越频率分别为 0.195 Hz 和 0.153 Hz ,明显低于 El Centro 记录的 1.465 Hz ,同时定义了优势频段用以表征地震波的优势频率的范围,由 $f_{40} \sim f_{70}$ 的结果可见:西安记录、草滩记录的优势频率段较为集中,且为低频;而 El Centro 记录较为分散,且频率值更高。

4) 利用有限元软件对西安一幢长周期结构——陕西省信息大厦进行了时程分析。分别输入两种不同类型地震记录:西安记录和 El Centro 记录,结构的各层位移最大值均随着层数的增加而增加,输入远场地震记录,结构位移响应增加较快,结构的顶部位移最大,达到了 19.63 cm ,远大于后者 6.55 cm 的结果,这反映出远场地震记录的长周期成分丰富并且更接近结构的基本自振周期,造成共振使得结构的位移响应变大。

5) 通过结构各层的绝对加速度最大值的对比发现:输入西安记录后,结构各层的绝对加速度峰值随着层数的增加而增加,在顶层达到最大,为 221.14 cm/s^2 ;而输入 El Centro 记录后,结构的绝对加速度最大值随着层数的增加呈“S”型分布,结构顶部的达到最大,为 161.43 cm/s^2 。

6) 通过对比两者的反应谱,在超过 1 s 的长周期部分,汶川远场地震记录的加速度反应谱远大于

El Centro 记录的加速度反应谱,充分体现了其长周期成分丰富的特点。

7) 鉴于远场地震的反应谱与抗震规范的设计反应谱存在着较大的差异,笔者建议在进行深厚覆盖土层上的长周期结构的抗震设计时,应充分考虑大震、远场地震动对长周期结构的影响。

参考文献:

- [1] 中国地震局震害防御司. 汶川 8.0 级地震未校正加速度记录[M]. 北京:地震出版社, 2008.
- [2] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Southwest Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [3] 于海英, 王栋, 杨永强, 等. 汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 1-13.
Yu Haiying, Wang Dong, Yang Yongqiang, et al. The preliminary analysis of strong ground motion records from the Ms8.0 Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 1-13.
- [4] Chung Yulin, Takuya Nagae, Toko Hitaka, et al. Seismic resistance capacity of high-rise buildings subjected to long-period ground motions: E-defense shaking table test[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 6: 637-644.
- [5] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 68-85.
- [6] 梁兴文, 董振平, 王应生, 等. 汶川地震中离震中较远地区的高层建筑的震害[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 24-31.
Liang Xingwen, Dong Zhenping, Wang Yingsheng, et al. Damage to tall buildings in areas with large epicentral distance during M8.0 Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 24-31.
- [7] 杨伟林, 朱升初, 洪海春, 等. 汶川地震远场地震动特征及其对长周期结构影响的分析[J]. 防灾减灾学报, 2009, 29(4): 473-478.
Yang Weilin, Zhu Shengchu, Hong Haichun, et al. Characteristics of far-field ground motion of Wenchuan Earthquake and the effect on long-periodic structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(4): 473-478.
- [8] 门进杰, 史庆轩, 陈曦虎. 汶川地震对远震区高层建筑造成的震害及设计建议[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2008, 40(5): 648-653.
Men Jinjie, Shi Qingxuan, Chen Xihu. Seismic damage of high buildings caused in the remote areas from epicenter and aseismic design suggestion[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(5): 648-653.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010 建筑结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 徐龙军, 胡进军, 谢礼立. 特殊长周期地震动的参数特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 20-27.
Xu Longjun, Hu Jinjun, Xie Lili. On characteristics of ground motion parameters for special long-period ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 20-27.
- [11] 黄瑜. 超高层建筑结构动力特性测试研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
Huang Yu. Analysis of dynamic characteristics and seismic response of high-rise building[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.

(责任编辑 王卫勋)