周力强,王玉山,王迪.上部结构与基础隔震层偏心对结构地震响应的影响[J].地震工程学报,2020,42(3):624-628.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.624

ZHOU Liqiang,WANG Yushan,WANG Di.Influence of Eccentricity of the Upper Structure and Base Isolation Layer on the Structural Seismic Response[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):624-628.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.624

上部结构与基础隔震层偏心对结构地震响应的影响

周力强[1], 王玉山[1,2], 王 迪[1]

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003;
2. 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震节能技术工程实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 随着基础隔震技术的发展,我国在高烈度地区广泛开展基础隔震技术的工程应用必将成为一种趋势,但由于建筑功能和建筑造型的丰富多彩,结构的质量中心和刚度中心也趋于分布不均匀,以三层的钢框架结构为分析模型,利用结构分析软件 Sap2000 对上部结构质量中心和隔震层质量中心、刚度中心分布不均匀的三种方案进行单向水平地震作用下的非线性时程分析,分析结果表明:上部结构质量中心与隔震层质量中心存在偏心距对结构的扭转效应以及地震响应有较大的影响,减小上部结构的偏心距对调整结构的水平地震响应的影响成效最为显著;对于隔震层而言,隔震层的刚度中心偏心距较质量中心偏心距对上部结构的影响更大,有效控制隔震层刚度中心的偏心距在隔震设计中会更加有效。

关键词: 基础隔震结构; 上部结构质量中心; 隔震层质量中心; 隔震层刚度中心; 水平地震响应

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2020)03-0624-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.624

Influence of Eccentricity of the Upper Structure and Base Isolation Layer on the Structural Seismic Response

ZHOU Liqiang[1], WANG Yushan[1,2], WANG Di[1]

(*1.College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;*
2. Xinjiang Production & Construction Groups Engineering Laboratory for Seismic and Energy-Saving Building in High Earthquake Intensity and Cold Zone, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: With the development of base isolation technology, the engineering application of the technology in high-intensity areas in China is expected to become a trend. However, because of the rich and intriguing architectural functions and modeling, the mass center and stiffness center of the structure tend to be unevenly distributed. Taking a three-story steel frame structure as the analytical model, the nonlinear time-history analysis was carried out under one-directional horizontal seismic action using SAP2000, and three schemes were designed: the uneven distribution of the superstructure mass center, uneven distribution of the isolation layer mass center, and un-

收稿日期: 2020-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468058)

第一作者简介: 周力强(1994-),男,硕士生,主要研究建筑结构消能减震。E-mail:1157751567@qq.com。

通信作者: 王玉山(1979-),男,副教授,主要研究方向为工程结构损伤分析与消能减震。E-mail:wysbgxn@shzu.edu.cn。

even distribution of the isolation layer stiffness center. The analysis results showed that the eccentricity of the mass center of the superstructure and isolation layer has a great influence on the torsion effect and seismic response of the structure, and reducing the eccentricity of the superstructure has the most significant effect on the horizontal seismic response of the structure. The eccentricity of the stiffness center of the isolation layer has a greater influence on the superstructure compared with the eccentricity of the mass center; therefore, it is more effective to control the eccentricity of the isolation layer stiffness center in isolation design.

Keywords: base isolation structure; mass center of upper structure; mass center of isolation layer; stiffness center of isolation layer; horizontal seismic response

0　引言

长期以来，地震给人类造成了巨大的灾害，人类从未停止探索抵御地震的方法。我国地处世界上两个最活跃的地震带附近[1]，是一个多地震的国家，从古至今饱受了地震灾害的摧残，伤亡甚是严重。随着我国当前国民经济的不断发展以及基础隔震技术研究的不断深入[2-5]，基础隔震技术势必将成为我国高烈度地区广泛应用于实际工程的一种减震控制技术。但由于建筑功能的要求、场地的限制和城市建筑形式要求的丰富多彩以及某些多层厂房中设备与工艺布置的需求等，建筑结构的体型和布置方案也越来越复杂多变，结构的质量中心和刚度中心也趋于分布不均匀。利用基础隔震技术在上部结构与基础之间增设隔震层，隔震支座连接上部结构与基础，在结构遭受地震时，隔震层产生比较大的平动，延长整个结构体系的自振周期，隔离地震能量向上部结构传递，减小上部结构的地震作用，从而达到抗震设防要求，这就是基础隔震结构。而对于质量中心和刚度中心分布不均匀的隔震结构，虽然有不少学者针对隔震层质量中心和刚度中心不重合的平-扭耦联地震开展过研究[6-10]，但随着上部结构形状的丰富多彩，必然存在上部结构质量中心与隔震层质量中心及刚度中心的不重合，其遭遇地震后的地震响应也需要做进一步的探究，本文综合考虑上部结构质量中心与隔震层质量中心及刚度中心存在偏心的因素，针对不同偏心方案隔震结构在水平地震作用下的地震响应进行模拟分析。

1　结构分析模型概况

对于偏心结构，在水平地震作用下，结构发生平移振动的同时，还会发生扭转振动，这是因为水平地震力使结构所产生的惯性力的合力通过结构的质量中心而结构各抗侧力构件的抗力的合力是通过结构的刚度中心[11]，这样就使的结构在地震作用下产生了一个力偶，该力偶随着偏心距的不同会对主体结构的地震响应产生一定的影响。

1.1　结构质量中心的计算

第 i 楼层的质量中心，是指沿竖向的所有重力荷载代表值的中心，应用力学中质心的计算公式可得第 i 楼层的质量中心坐标：

$$x_{c,i}=\frac{\sum G_i^j\cdot x_i^j}{\sum G_i^j}\quad y_{c,i}=\frac{\sum G_i^j\cdot y_i^j}{\sum G_i^j}\tag{1}$$

式中：G_i^j 为第 i 楼层第 j 个构件承受重力荷载代表值；x_i^j、y_i^j 为第 i 楼层第 j 个构件的质量中心坐标；$x_{c,i}$、$y_{c,i}$ 为第 i 楼层的质量中心坐标。

1.2　结构刚度中心的计算

第 i 楼层（隔震层）的刚度中心，是指其他楼层固定不动，仅使第 i 楼层沿某一方向平移单位位移时，第 i 楼层各抗侧构件所需施加力的合力作用点，应用力学中的合力矩定理可得第 i 楼层的刚度中心：

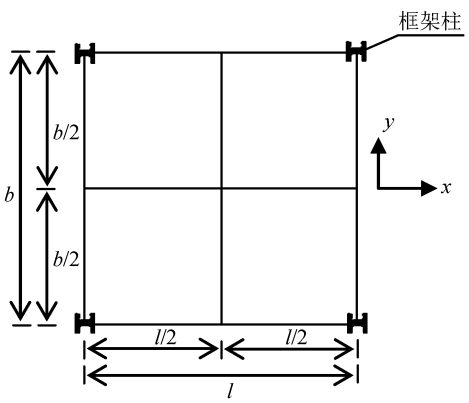
$$x_{k,i}=\frac{\sum K_i^j\cdot x_k^j}{\sum K_i^j}\quad y_{k,i}=\frac{\sum K_i^j\cdot y_k^j}{\sum K_i^j}\tag{2}$$

式中：K_i^j 为第 i 楼层（隔震层）第 j 个抗侧构的抗侧移刚度；x_k^j、y_k^j 为第 i 楼层第 j 个抗侧构件的刚度中心坐标；$x_{k,i}$、$y_{k,i}$ 为第 i 楼层（隔震层）的刚度中心坐标。

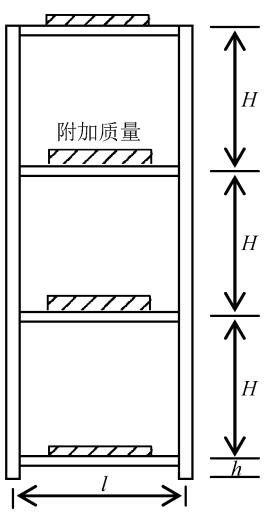
1.3　隔震结构计算模型

隔震结构计算模型采用三层单跨钢框架进行仿真分析，该框架是一个三层缩尺钢框架模型，选取本模型的目的是为后续采用三层缩尺钢框架试验模型做振动台试验对比研究分析。具体建模数值如下：每层层高 $H=2.0$ m，总高度为 6.28 m，其中隔震层高度 $h=0.28$ m，平面尺寸为 $b\times l=2.1$ m$\times$2.1 m，其中柱采用 HW 150 mm$\times$150 mm 宽翼缘 H 型钢，主梁均为 14 号工字钢，次梁采用两根 10 号槽钢

对焊而成的箱型截面梁，计算时为方便计算各层的质量中心，忽略结构自重，框架共配重 13.68 t，按照重力荷载代表值计算的方法，一层、二层各配重 1/3，隔震层与顶层共同配重 1/3，隔震支座参数以 LRB400 铅芯橡胶支座为基准做了刚度相似常数 Sk＝1/5 的相似调整，采用 Sap2000 分析软件对该结构进行水平地震作用下非线性时程分析[11-12]，采用Ⅱ类场地条件，选择 EI Centro 波、Taft 波、Chi-Chi 波三条地震波，结果取包络值，按照 8 度(0.2g)设防地震、罕遇地震进行仿真分析，模型如图 1 所示，对于该模型的基础隔震分析，本文只考虑偏心距沿 y 向的单向偏心工况，输入地震波沿 x 方向，各地震波加速度反应谱如图 2 所示。



(a) 分析模型平面图



(b) 分析模型立面图

图 1 隔震结构模型

Fig.1 The model of isolated structure

2 基础隔震结构的水平地震响应分析

2.1 分析方案

为研究上部结构与隔震层偏心对结构的地震响应，共设置三种分析方案：

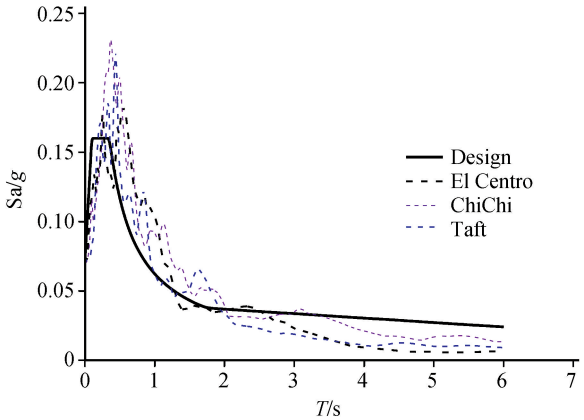


图 2 加速度反应谱曲线

Fig.2 Acceleration response spectrum

方案 1：隔震层质量中心与刚度中心位于模型几何中心，分析时调整上部结构质量中心沿-y 方向距模型几何中心的距离。

方案 2：隔震层刚度中心与上部结构质量中心均位于模型几何中心，分析时调整隔震层质量中心沿-y 方向距模型几何中心的距离。

方案 3：隔震层质量中心与上部结构质量中心位于模型几何中心，分析时调整隔震层刚度中心沿 y 方向距模型几何中心的距离。

三种方案中取偏心距均为 0、0.01b、0.03b、0.05b、0.07b 五种分析工况。其中当结构在隔震层与上部结构无偏心的自振特性分析结果如表 1 所列。

表 1 模型结构自振周期(单位:s)

Table 1 Natural period of the model structure (Unit:s)

	一阶（y 方向平动）	二阶（x 方向平动）	三阶（扭转）
非隔震结构	0.477 4	0.383 6	0.148 5
隔震结构	0.936 1	0.905 5	0.324 3

2.2 隔震结构在设防地震作用下的响应分析

(1) 偏心距对结构扭转周期比的响应分析

由图 3 可以看出，当上部结构质量中心与隔震层的质量中心、刚度中心分别存在偏心时，水平地震作用对上部结构的扭转周期比影响较大，而仅仅改变隔震层的质心(方案 2)或者刚心(方案 3)对上部结构扭转周期比虽有一定的影响，但该影响均不大，由此可见，在进行基础隔震设计时，仅通过调整隔震层的质心或者刚心而达到改变结构扭转周期比的方法收效甚微，而通过调整上部结构的布置，减小上部结构的偏心距将会对结构扭转周期比的影响成效显著。

(2) 水平减震系数分析

通过表 2 中数据可以看出，改变隔震层结构质心（方案 2）与改变隔震层结构刚心（方案 3）对水平向减震系数有一定的影响，但影响较小，而且随着隔震层刚心的偏心距增大，水平向减震系数有减小的趋势；在改变上部结构质心（方案 1）的条件下，水平向减震系数整体趋势在增大，说明调整隔震层的质心或者刚心将更有利于实现减震的效果。此外通过三种方案的水平向减震系数计算，可以看出：隔震结构总体上对结构的地震作用起到了很大消减作用，与非隔震结构相比，遭受的地震力减小接近一半，可达到降低设防烈度一度的目的。

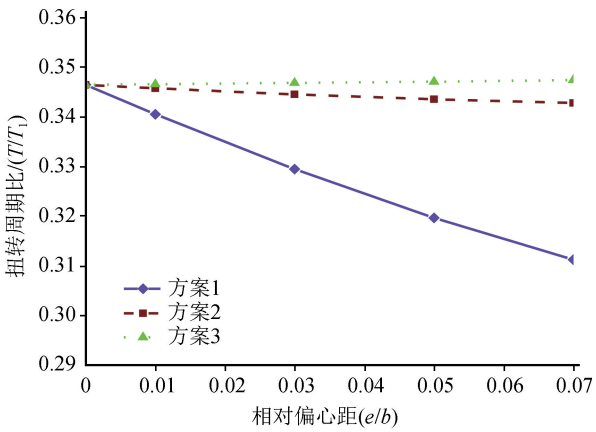


图 3　偏心距对扭转周期比的影响

Fig.3　The influence of eccentricity on the torsional period ratio of structure

表 2　水平向减震系数（β）

Table 2　The damping coefficient in the horizontal direction（β）

	方案 1	方案 2	方案 3
工况 1	0.417 182	0.417 182	0.417 182
工况 2	0.420 441	0.417 534	0.416 147
工况 3	0.419 875	0.418 144	0.412 774
工况 4	0.434 358	0.418 446	0.407 866
工况 5	0.440 86	0.418 551	0.408 991

（3）设防地震作用下顶层位移响应分析

通过图 4 趋势可以发现，当上部结构质量中心、隔震层质量中心、刚度中心分别存在偏心时，水平地震作用对结构顶层位移影响较大，仅仅改变隔震层结构质心（方案 2）对结构顶层位移虽有一定的影响，但影响最不明显，而且隔震层结构质心的相对偏心距越小，顶层位移响应越大，因此，在进行基础隔震设计时，仅通过调整隔震层结构质心的偏心距而达到降低结构顶层位移响应的方法效果不明显，而通过调整上部结构的布置，减小上部结构质心（方案 1）的偏心距或者调整隔震层结构刚心（方案 3）的偏心距将会对结构顶层位移响应成效显著。

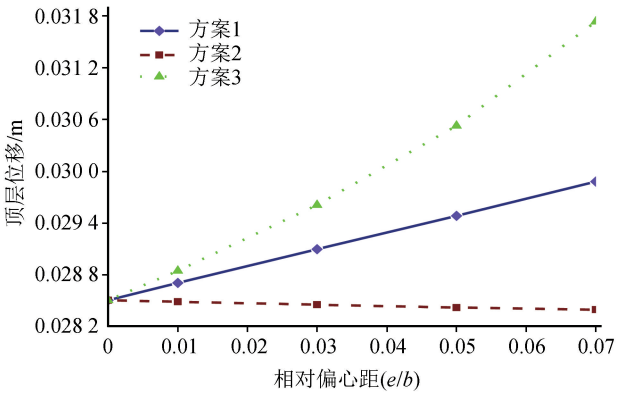


图 4　偏心距对顶层位移响应的影响

Fig.4　The influence of eccentricity on the displacement response of top floor

2.3　隔震结构在罕遇地震作用下的响应分析

（1）罕遇地震作用下隔震层位移响应分析

由图 5 可以看出，当上部结构质量中心、隔震层质量中心、刚度中心分别存在偏心时，水平地震作用对结构的隔震层位移影响均较大，仅仅改变隔震层结构质心（方案 2）对结构隔震层位移基本没有影响。因此，在进行基础隔震设计时，仅通过调整隔震层结构质心的偏心距而达到降低结构隔震层位移响应的方法效果并不明显，而通过调整隔震层结构与上部结构的布置，减小上部结构质心（方案 1）与隔震层结构刚心（方案 3）的偏心距将会对隔震层位移响应成效显著，尤其是控制隔震层刚心的偏心距对减小隔震层的位移最为明显。

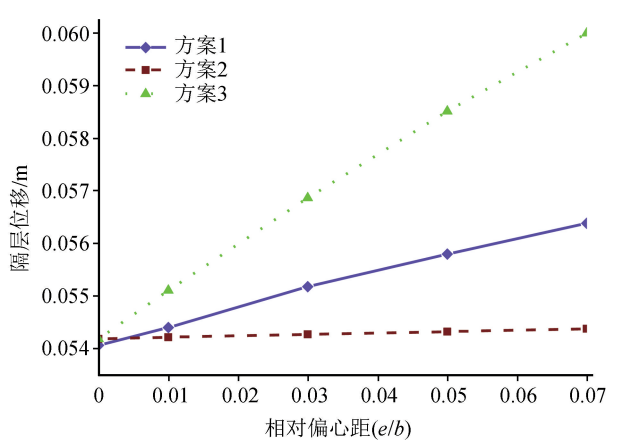


图 5　偏心距对隔震层位移响应的影响

Fig.5　The influence of eccentricity on the displacement response of the isolation layer

（2）罕遇地震作用下结构层间位移

通过三种不同方案对各层的层间位移影响可以看出，当上部结构的质量中心与隔震层的质量中心

存在偏心时，水平地震作用对上部结构各层的层间位移均较其他两种方案更大，与前述结构扭转周期比的影响分析一致。因此，在基础隔震设计中，当主体结构层间位移或者扭转周期比不满足时，若方案可调情况下，调整上部结构的布置将比调整隔震层更有效。

表 3 各层层间位移(单位:m)

Table 3 Displacement between layers (Unit:m)

		一层	二层	三层
工况 1 ($e/b=0$)	方案 1	0.008 724	0.006 622	0.006 489
	方案 2	0.008 724	0.006 622	0.006 489
	方案 3	0.008 724	0.006 622	0.006 489
工况 2 ($e/b=0.01$)	方案 1	0.008 783	0.006 644	0.006 582
	方案 2	0.008 728	0.006 626	0.003 953
	方案 3	0.008 567	0.006 468	0.003 959
工况 3 ($e/b=0.03$)	方案 1	0.008 905	0.006 687	0.003 96
	方案 2	0.008 727	0.006 635	0.003 964
	方案 3	0.008 238	0.006 151	0.003 977
工况 4 ($e/b=0.05$)	方案 1	0.009 009	0.006 73	0.003 948
	方案 2	0.008 73	0.006 645	0.003 976
	方案 3	0.007 906	0.005 948	0.003 862
工况 5 ($e/b=0.07$)	方案 1	0.009 105	0.006 773	0.003 934
	方案 2	0.008 733	0.006 657	−0.009 33
	方案 3	0.012 697	0.005 837	0.003 644

3 结论与建议

本文利用结构分析软件 Sap2000 对一个三层的钢框架结构在Ⅱ类场地上进行了单向水平地震作用下的仿真分析，研究上部结构与隔震层存在质量偏心以及刚度偏心时对结构地震响应的影响，分析得到的主要结论有：

(1) 当上部结构质量中心与隔震层质量中心存在偏心距时，水平地震作用对上部结构的扭转周期比随着偏心距的增大较其他两种方案的影响更大。

(2) 通过不同方案对结构各层的位移响应也可以看出，当上部结构的质量中心与隔震层的质量中心存在偏心时，水平地震作用对上部结构各层的位移响应随着偏心距的增大均较其他两种方案产生的影响会更大，因此综合分析知，情况容许条件下，减小上部结构的质心偏心距对调整结构的水平地震响应的影响成效将更显著。

(3) 对于控制隔震层位移而言，通过减小上部结构质心(方案 1)或者隔震层结构刚心(方案 3)的偏心距将会对隔震层位移响应起到有效控制，尤其是控制隔震层刚心的偏心距对减小隔震层的位移最为明显。

参考文献(References)

[1] 韩国兴.地震作用下偏心结构平扭耦联分析[D].天津：河北工程大学，2014.
HAN Guoxing. Study on Translational and Torsional interaction of Eccentric Structures under Seismic[D]. Tianjin: Hebei University of Engineering, 2014.

[2] 王栋，吕西林，刘中坡.不同高宽比基础隔震高层结构振动台试验研究及对比分析[J].振动与冲击，2015，34(16)：109-118.
WANG Dong, LÜ Xi-lin, LIU Zhongpo. Shaking Table Test and Comparison Analysis for Base-isolated High-rise Buildings with Different Aspect Ratios[J]. Journal of Vibration & Shock, 2015, 34(16): 109-118.

[3] 周锡元，阎维明，杨润林.建筑结构的隔震、减振和振动控制[J].建筑结构学报，2002，23(2)：2-12，26.
ZHOU Xiyuan, YAN Weiming, YANG Renlin. Seismic Base Isolation, Energy Dissipation and Vibration Control of BuildingStr Uctures[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 2-12, 26.

[4] 杨碧超，张刚华，宋勇，等.混凝土人字形折板式网壳结构的弹性稳定性分析[J].贵州大学学报(自然科学版)，2018，35(2)：100-105.

[5] CALUGARU V, PANAGIOTOU M. Seismic Response of 20-story Base-isolated and Fixed-base Reinforced Concrete Structural Wall Buildings at a Near-fault Site[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(6): 927-948.

[6] 刘勇斌，张刚华，方强，等.混凝土棱柱面网壳动力特性的参数化分析[J].贵州大学学报(自然科学版)，2018，35(4)：100-105.

[7] 王建强，丁永刚，李大望.上部结构(偏心)对基础滑移隔震结构平-扭耦联地震反应的影响[J].振动与冲击，2009，28(12)：96-100，205.
WANG Jianqiang, DING Yonggang, LI Dawang. Lateral-torsional Coupled Seismic Responses of Sliding Base-isolated Structures with Eccentric Superstructure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 96-100, 205.

[8] 王启文，周斌，唐熙，等.嘉峪关第一人民医院隔震结构设计与分析[J].建筑结构，2019，49(24)：67-71.
WANG Qiwen, ZHOU Bin, TANG Xi, et al. Design and Analysis of Isolation Structure of Jiayuguan First People's Hospital[J]. Building Structure, 2019, 49(24): 67-71.

[9] 张曼生，张国军，马伯涛，等.基础隔震结构隔震层水平性能设计研究[J].建筑结构，2019，49(11)：123-127，122.
ZHANG Mansheng, ZHANG Guojun, MA Botao, et al. Study on Design of the Isolation Layer's Performance of Base Isolation Structure[J]. Building Structure, 2019, 49(11): 123-127, 122.

[10] 程志远，胡紫东，李黎，等.考虑温度影响的 LRB 隔震建筑地震响应分析[J].地震工程学报，2020，42(1)：38-43.
CHENG Zhiyuan, HU Zidong, LI Li, et al. Seismic Response Analysis of LRB Isolation Buildings Considering the Effects of Temperature[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 38-43.

(下转第 664 页)

GB50011-2010(2016),Code for Seismic Design of Buildings [M].Beijing:China Construction Industry Publishing,2001:21-23.

[17] 吕红山,赵凤新.适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J].地震学报,2007,29(1):67-76.
LU Hongshan,ZHAO Fengxin.Site Coefficients Suitable to China Site Category[J].Acta Seismologica Sinica,2007,29(1):67-76.

[18] 胡聿贤.地震工程学(第二版)[M].北京:地震出版社,2006.
HU Lüxian.Earthquake Engineering[M].Beijing:Seismological Press,2006.

[19] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].科学出版社,1999.
YANG Fusheng.Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform[M].Science Press,1999.

[20] 胡聿贤.地震安全性评价技术教程[M].北京:地震出版社,2003.
HUYuxian.Technical Course of Seismic Safety Assessment [M].Beijing:Seismological Press,2003.

[21] 高丽霞,周锡元,董娣,等.加速度均方根地震动统计研究[J].防灾减灾工程学报,2006,26(3):251-256.
GAO Lixia,ZHOU Xiyuan,DONG Di,et al.Study on Statistical Characteristic of Ground of Square Root of Mean Squares [J].Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng,2006,26(3):251-256.

[22] 王国权,周锡元,马宗晋,等.921 台湾地震近断层强地面运动的周期和幅值特性[J].工程抗震,2001,(1):30-36.
WANG Guoquan,ZHOU Xiyuan,MA Zongjin,et al.The Characteristic of Amplitude and Period of near Fault Ground Motion of the September 21,1999 Taiwan Earthquake[J].Earthquake Resistant Engineering,2001,(1):30-36.

(上接第 628 页)

[11] 贾莉,安海玉,张锡治.隔震设计分析及隔震结构变形缝设置探讨[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(B07):81-90.
JIA Li,AN Haiyu,ZHANG Xizhi.Analysis of Isolation Design and the Discussion on the Set of Deformation Joint for Isolation Structure[J].Journal of Tianjin University(Science and Technology),2015,48(B07):81-90.

[12] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for Seismic Design of Buildings:GB 50011-2010[S].Beijing:China Building Industry Press,2010.