

近场地震作用下不规则层间隔震结构的动力响应分析^①

李 慧^{1,2}, 包 超², 杜永峰^{1,2}

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:层间隔震结构作为一种新型的隔震形式,不仅可以降低上部结构的动力响应,还可以弥补基础隔震结构的不足。现有研究多集中在远场地震作用下的规则层间隔震结构。本文利用通用结构分析与设计软件 SAP2000 分别模拟了一幢 8 层带裙房钢筋混凝土框架层间隔震结构、基础隔震结构和抗震结构,分析并对比了三种结构在近场地震作用下动力响应特征。结果表明在近场条件下三种结构顶层均出现不同程度的鞭梢效应;相比抗震结构两种隔震结构具有很好的减震效果,而且基础隔震结构的减震效果好于层间隔震结构;由于结构刚度突变的部位剪力较大,所以应对其裙楼顶部予以加强。

关键词: 近场; 地震作用; 层间隔震; 时程分析法; 动力响应

中图分类号: TU352.1⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0051-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0051

Dynamic Response Analysis of Irregular Story Isolation Structures under Near-field Earthquake Conditions

LI Hui^{1,2}, BAO Chao², DU Yong-feng^{1,2}

(1. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: As a new form of isolation, the story isolation structure not only can reduce the dynamic response of upper structures but also can make up for the deficiency of foundation isolation structures. The existing literature mostly analyzes the regulated story isolation structures in far-field earthquakes. In this paper, an eight-story house with a podium-reinforced concrete frame story isolation structure, a foundation isolation structure, and a seismic structure are simulated by using SAP2000. The dynamic responses of the three structures in near-field earthquake conditions are compared. The results show that the whiplash effect is different in the top stories of the three structures in the near-field conditions. However, compared with the seismic structure, the other two kinds of isolated structures show very good damping behavior. In addition, the damping properties of the foundation isolation structure are better than the story isolation structure. Therefore, structures with a podium should be strengthened at the top of the podium.

Key words: Near field; Seismic action; Story-isolation; Time-history analysis method; Dynamic Response

0 引言

层间隔震作为一种新型的隔震技术,其隔震原

^① 收稿日期:2011-12-30

基金项目:国家自然科学基金(50978130)

作者简介:李 慧(1954-),女,教授,博士生导师,主要从事结构工程、防震减灾等方面的研究。

通讯作者:包 超, E-mail: bchao863@qq.com

理源自基础隔震,但又有别于基础隔震。层间隔震就是将隔震层置于结构中间某层,利用隔震系统的阻尼来吸收地震输入结构的能量,从而减小结构的地震反应。层间隔震结构的隔震层设置在结构某一层的柱顶,上部结构底部周围没有障碍阻止其发生较大变形,故无需预留空间或相应的构造措施。此外,层间隔震结构可以有效减小隔震器所承受的竖向荷载,减小结构高宽比,避免隔震器受到周围环境和地基中腐蚀物质的影响^[1-2]。

层间隔震结构有明确的工程需求,其研究工作几乎与实际工程应用同步。因此虽然有一些工程应用,但还没有较为系统的研究成果^[3],而且作为一种新型的隔震形式,层间隔震结构的工作机理研究还不很充分^[2]。近年来,几次主要的大地震,例如1994年美国Northridge地震、1995年日本Kobe地震、1999年土耳其Kocaeli地震、1999年台湾Chi-Chi地震等,对结构物造成了严重破坏^[4],这种以断层滑移为本质特征的地震具有强方向性、包含有明显的长周期速度和位移脉冲以及较大的峰值加速度等特征^[5-7],有必要对近断层地震作用下不同形式结构的地震响应进行研究。因此,本文采用时程分析法并选用脉冲分量为主的近场地震波研究层间隔震结构响应状况,进一步认识结构近场地震动特性并为近场不规则结构提供理论依据。

1 层间隔震结构计算模型

由于隔震层的水平刚度远小于其他各层水平刚度,所以在地震作用激励下,上部隔震结构近似做水平向运动。为此将上部结构(含隔震层)和隔震层下部分别等效成一个单自由度体系,整体结构可组成双自由度体系。该模型形式简单,且突出了结构各部分的主要参数。计算简图如图1,层间隔震结构计算模型如图2。

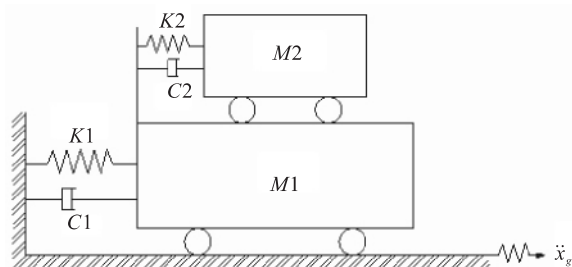


图1 层间隔震结构计算模型

Fig. 1 Calculation model of story-isolation structure.

系统平衡方程:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{E\}\ddot{x}_g$$

其中: M 为体系质量矩阵; K 为体系刚度矩阵; C 为体系阻尼矩阵; E 为单位列向量; x 为结构相对于地面的位移; \dot{x} 为结构相对于地面的速度; \ddot{x}_g 为地面加速度。

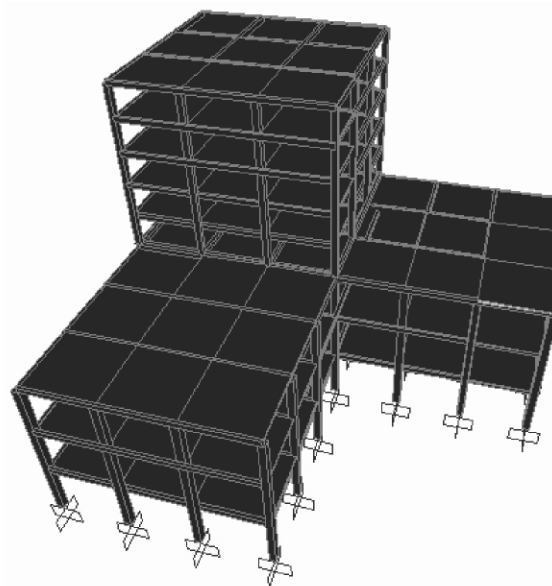


图2 层间隔震结构模型

Fig. 2 FEA model of story-isolation structure.

2 结构分析模型及参数

本文模型为8层带裙房框架结构,采用SAP2000分别建立了钢筋混凝土框架抗震结构、层间隔震结构以及基础隔震结构。隔震结构中采用铅芯橡胶隔震支座。其中,层间隔震结构的隔震支座布置在裙楼顶部和上部塔楼的底部之间。三种结构的柱距均为6 m,裙房层高均为4.5 m,上部结构层高3 m。混凝土强度等级为C30。裙房部分柱截面为0.6 m×0.6 m,上部结构柱截面为0.5 m×0.5 m,框架梁0.45 m×0.3 m,隔震层部位的梁为0.6 m×0.3 m。结构设置其中层间隔震结构模型如图2。结构参数如表1所示。其中,基础隔震结构隔震层刚度为67 880 kN·m⁻¹,层间隔震结构隔震层刚度为27 152 kN·m⁻¹。

3 结构模态分析

结构模态分析可用于确定结构自振特性,从而作为结构动力分析的基础。通过分析计算,得出了抗震结构、基础隔震结构以及层间隔震结构相应模态信息用以比较。

表 1 结构参数

Table 1 Parameters of structure

| 层号 | 楼层质量 /kg | X 向刚度 /[kN · m ⁻¹] | Y 向刚度 /[kN · m ⁻¹] |
|----|----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | $m_1=781\ 700$ | $k_{1x}=617\ 000$ | $k_{1y}=617\ 000$ |
| 2 | $m_2=781\ 700$ | $k_{2x}=604\ 000$ | $k_{2y}=604\ 000$ |
| 3 | $m_3=781\ 700$ | $k_{3x}=606\ 000$ | $k_{3y}=606\ 000$ |
| 4 | $m_4=240\ 600$ | $k_{4x}=265\ 000$ | $k_{4y}=265\ 000$ |
| 5 | $m_5=240\ 600$ | $k_{5x}=229\ 000$ | $k_{5y}=229\ 000$ |
| 6 | $m_6=240\ 600$ | $k_{6x}=222\ 000$ | $k_{6y}=222\ 000$ |
| 7 | $m_7=240\ 600$ | $k_{7x}=226\ 000$ | $k_{7y}=226\ 000$ |
| 8 | $m_8=240\ 600$ | $k_{8x}=219\ 000$ | $k_{8y}=219\ 000$ |

从表 2 可以看出,将层间隔震结构和基础隔震结构的第一阶自振周期分别为抗震结构第一阶自振周期的 1.5 倍和 1.8 倍。而无论采用何种隔震措施,其自振周期均显著延长,这有利于降低上部结构地震反应。此外,基础隔震结构比层间隔震结构更能延长结构自振周期。从模态分析结果可以看出,本文所采用两种隔震结构的前两阶自振周期非常接近。而由于结构的水平向布置和竖向布置均不规则,结构的前三阶模态的质量参与系数均不高。

表 2 结构各阶模态

Table 2 Structural modes in different orders

| 模态 | 抗震结构 | | 层间隔震结构 | | 基础隔震结构 | |
|----|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | 周期/s | 质量参与系数 | 周期/s | 质量参与系数 | 周期/s | 质量参与系数 |
| 1 | 1.001 30 | 0.446 | 1.531 95 | 0.451 | 1.821 91 | 0.485 |
| 2 | 0.942 79 | 0.407 | 1.493 98 | 0.411 | 1.727 01 | 0.408 |
| 3 | 0.667 26 | 0.047 | 1.182 05 | 0.004 | 1.342 96 | 0.079 |
| 4 | 0.449 73 | 0.031 | 0.528 83 | 0.048 | 0.556 45 | 0.010 |
| 5 | 0.421 35 | 0.054 | 0.515 05 | 0.058 | 0.549 53 | 0.008 |

4 结构时程分析

本文选用台湾集集地震($M_L=7.3$)中采集的距离断裂带 11.14 km 处 CHY101 波以及美国北岭地震($M_L=6.7$)中距离断裂带 20.8 km 比华利山 90014 台站采集的近场地震记录作为结构时程分析的输入地震。所以用集集波 X 向和 Y 向加速度峰值分别为 4.3 m/s^2 和 3.5 m/s^2 ,北岭波 X 向和 Y 向加速度峰值分别为 4.2 m/s^2 和 3.6 m/s^2 。考虑到本算例中各结构前两阶模态质量参与系数较大,对结构起控制作用,地震波采用双向输入,且 X 向与 Y 向加速度峰值按 1:0.85 的比例进行调整。

4.1 结构加速度时程分析

图 3 在集集波和北岭波作用下三种不同结构顶层的加速度时程曲线。

从图 3 可以看出抗震结构在近场地震作用下,其顶点加速度明显大于基础隔震结构和层间隔震结

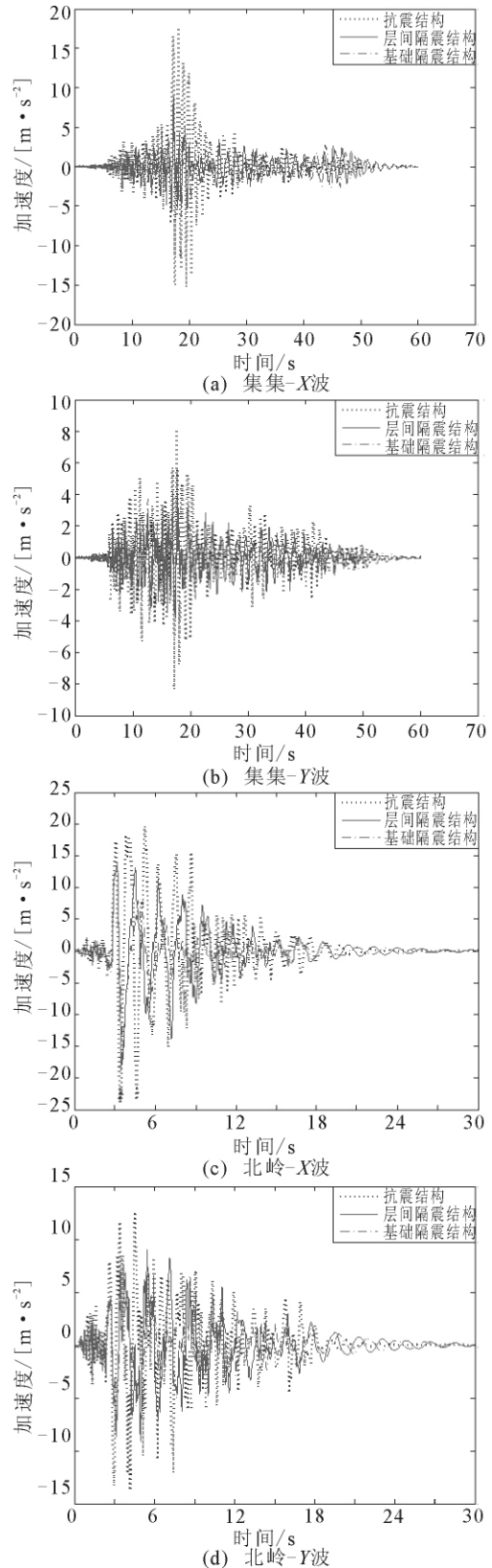


图 3 结构顶层加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration history curves on the top floor.

构的顶点加速度。由于近场地震的脉冲效应,在集集波的作用下抗震结构 X 向和 Y 向的加速度峰值

分别为 17.319 m/s^2 和 7.972 m/s^2 ;而层间隔震结构分别为 8.831 m/s^2 和 4.158 m/s^2 ,其相对应的加速度峰值分别为抗震结构的 50.99% 和 52.16% ;基础隔震结构分别为 4.712 m/s^2 和 3.925 m/s^2 ,其相对应的加速度峰值分别为抗震结构的 27.21% 和 49.23% ;

在北岭波的作用下抗震结构 X 向和 Y 向的加速度峰值分别为 23.867 m/s^2 和 12.556 m/s^2 ;而层间隔震结构分别为 13.604 m/s^2 和 9.014 m/s^2 ,其相对应的加速度峰值分别为抗震结构的 56.99% 和 71.790% ;基础隔震结构分别为 13.924 m/s^2 和 6.873 m/s^2 ,其相对应的加速度峰值分别为抗震结构的 47.45% 和 54.739% 。这表明在近场地震作用下两种隔震结构的地震响应均有所降低,但由于脉冲效应的影响,隔震结构有较为明显的鞭梢效应,其峰值加速度略有放大。

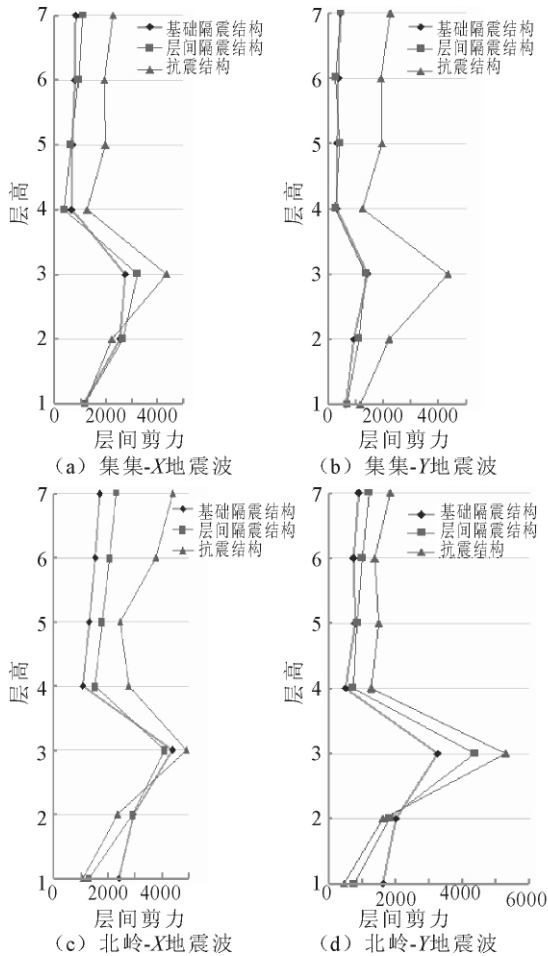


图4 结构层间剪力分布图

Fig. 4 Distributio of shear force inter-story of the structures.

4.2 结构层间剪力分析

层间剪力是衡量建筑结构抗震性能的重要指标,隔震建筑各层地震剪力值的大小直接反映了其减震性能的好坏。

从图4中可以看出,由于裙楼以上结构的刚度和质量较下部裙楼结构突然减小,所以抗震结构出现了明显的鞭梢效应,而且其鞭梢效应随着地震加速度的增大而增大。隔震结构均能显著降低结构的层间剪力,但当地面加速度增大时隔震层以上结构层间剪力会随着层高的增加而增大,即存在层间剪力放大的鞭梢效应;而与基础隔震结构相比,层间隔震结构隔震层以上部分的层间剪力放大的略为明显,其鞭梢效应也相对较大。

4.3 结构减震率

减震率定义为抗震结构各层层间剪力和隔震结构各层层间剪力之差与抗震结构各层层间剪力的比值。本文定义结构减震率来直观反映结构减震效果,计算公式如下:

$$\text{减震率} = \frac{\text{抗震结构地震响应} - \text{隔震结构地震响应}}{\text{抗震结构地震响应}} \times 100\%$$

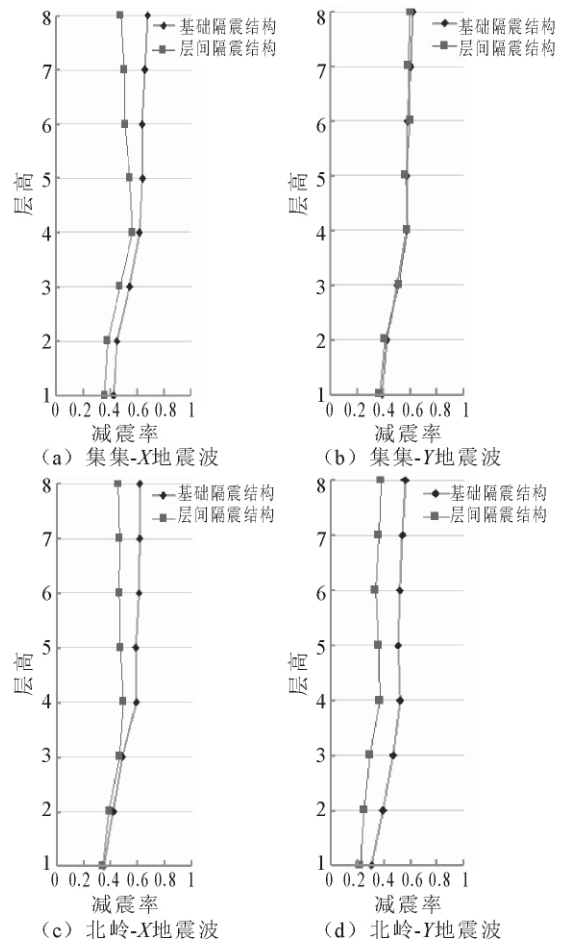


图5 结构减震率

Fig. 5 Isolation rate of the structures.

从图 5 可以看出,相对于抗震结构,隔震结构的层间剪力均有明显的减小,其中刚度较小的上部塔楼减震率更为显著。其中(a)图和(c)图中层间隔震结构顶层的减震率相对于基础隔震结构明显降低,且层间隔震结构顶层的减震率相对于塔楼底部减震率也略有降低,即隔震结构上部塔楼在脉冲分量的作用下产生了鞭梢放大效应。比较两种隔震结构的减震率可以看出,基础隔震结构减震效果比层间隔震结构的减震效果更为明显。

5 结语

通过对抗震结构、层间隔震结构和基础隔震结构进行时程分析和比较,得到以下主要结论:

(1) 竖向刚度不均匀的带裙楼隔震结构和抗震结构,其裙楼顶部附近的剪力明显大于其他各层,在结构设计时应该对该部位予以加强。

(2) 在近场地震作用下,各结构顶部的地震反应均被放大,说明较大的脉冲分量是结构在近场地震中破坏的主要因素。

(3) 相对于抗震结构较大的地震反应,隔震结构显著降低了上部结构的鞭梢效应,隔震结构在近场地震作用下仍然有一定的减震效果,说明隔震结构在近场条件下也是可以应用的。

(4) 与层间隔震结构相比,基础隔震结构的减震率相对较大,说明基础隔震结构有着更好的减震效果。所以没有特殊要求的条件下,应该优先选用基础隔震结构。

[参考文献]

- [1] 祁皑,林云腾,郑国琛. 层间隔震结构工作机理研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 239-243.
QI Ai, LIN Yun-teng, ZHENG Guo-chen. Research on Working Mechanism of Story Isolation Structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 239-243.
- [2] 徐忠根,周福霖. 底部二层框架上部多塔楼底隔震数值模拟与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 126-132.
XU Zhong-gen, ZHOU Fu-lin. Data Imitation and Test Research of Tower Bottom Isolation of Buildings with Lower Two Stories Frame and Upper multi-tower[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 126-132.
- [3] 陶明白,盛宏玉,吴韬,等. 竖向刚度突变结构设置层间隔震层

在地震作用下的反应谱分析[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2008, 16(5): 18-21.

- TAO Ming-bai, SHENG Hong-yu, WU Tao, et al. Response Spectrum Analysis for the Structure with Changing Vertical Stiffness and Story Isolation under Earthquake Excitation[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2008, 16(5): 18-21.
- [4] 卢明奇,田玉基,杨庆山. 近断层地震作用下高层建筑结构地震响应分析[J]. 世界地震工程, 1996, (2): 33-36.
LU Ming-qi, TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan. Analysis of Seismic Response of High-rise Building to Near-fault Ground Motions[J]. World Earthquake Engineering, 2007, (29) 2: 314-317.
- [5] 叶昆,李黎,朱宏平,等. 近断层脉冲型地震作用下基础隔震建筑结构最大位移反应研究[A]//第四届全国防震减灾工程学术研讨会论文集[C]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009: 523-530.
YE Kun, LI Li, ZHU Hong-ping, et al. Study on Maximum Displacement of Base-isolated Buildings under Near-fault Pulse-like Ground Motions[A]//Fourth National Earthquake Resistant Engineering Proceedings[C]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 523-530.
- [6] 王根龙,刘红帅,张军慧. 汶川特大地震之北川县城震害分析[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 173-178.
WANG Gen-long, LIU Hong-shuai, ZHANG Jun-hui. Analysis on Seismic Hazards in Beichuan County Town Caused by Wenchuan Great Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(2): 173-178.
- [7] 罗光财,丁海平,王绍博. PGV/PGA 和 PGD/PGA 随震级和震中距变化的研究[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 112-116.
LUO Guang-cai, DING Hai-ping, WANG Shao-bo. Variation of the PGV/PGA and PGD/PGA along with the Change of Magnitudes and Epicentral Distances[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(2): 112-116.
- [8] 徐忠根,周福霖. 多层钢结构基础隔震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(3): 131-135.
XU Zhong-gen, ZHOU Fu-lin. Base Isolation Research of Multi-story Steel Frame[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(3): 131-135.
- [9] 夏坤,张令心,刘洁平. 建筑物高低层地震反应差异研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 284-290.
XIA Kun, ZHANG Lin-xin, LIU Jie-ping. Study on Difference between Seismic Response of Lower Stories and That of Higher Stories of Building[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 284-290.