

不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析

韩 淼, 张文会, 朱爱东, 孙一林, 李进波

(北京建筑大学 土木与交通工程学院 北京 100044)

摘 要: 选用天然橡胶支座(LNR)与铅芯橡胶支座(LRB)作为两栋 8 层钢筋混凝土结构的隔震装置,对其分别输入 172 条近断层地震波,计算隔震层设置在基础或以上每一层时隔震结构的动力响应,分析近断层地震动对不同层隔震结构动力响应的影响。分析结果表明:隔震结构输入能量小于非隔震结构输入能量,LRB 隔震结构的输入能量小于 LNR 隔震结构的输入能量;随着隔震层的上移,隔震支座位移减小,顶层最大加速度增大。近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数均存在相关性,但相关程度不同。隔震结构设计要根据建筑结构动力响应的需求,同时考虑隔震层位置与地震动特征参数的影响。

关键词: 近断层地震动; 隔震结构; 橡胶支座; 动力响应

中图分类号: Tu352.1+2

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.05.019

Dynamic response analysis for multi-story structures with different isolation stories under near-fault ground motions

HAN Miao, ZHANG Wen-hui, ZHU Ai-dong, SUN Yi-lin, LI Jin-bo

(School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The dynamic responses of two 8-story RC frame structures with isolators under near-fault ground motions were studied when the isolation layer was set on the base or each story. The natural rubber bearings (NRB) or lead-rubber bearings (LRB) were taken as isolators. 172 near-fault seismic wave records were input in structures, respectively. The effects of near-fault ground motions on multi-story structures with different isolation stories were analyzed. The results showed that the input energy of an isolation structure is less than that of a non-isolation structure; the input energy of a LRB isolation structure is less than that of a NRB isolation structure; the displacement of isolation bearing decreases and the maximum acceleration of the top-story increases with lifting the isolation layer; the characteristic parameters of near-fault ground motions are all correlated with the dynamic response parameters of isolation structures, but the levels of correlation are different; the isolated structures need to be designed in terms of the requirements for structure dynamic responses, meanwhile the position of isolation layer and the influence of seismic characteristic parameters should be considered.

Key words: near-fault ground motion; isolation structure; rubber bearing; dynamic response

近断层地震动是较为复杂的一种地面运动,它强烈依赖于断层的破裂机制,具有显著的方向性和滑冲效应。近断层地震动不同于远场地震动,具体表现在破裂方向性效应引起的速度大脉冲,地表破裂造成的地面永久位移,地震动幅值随断层距的增加而不断衰减的集中性效应,明显的竖向效应和上下盘效应等,这些特性均有可能增大结构动力响应并加重地震灾害^[1-3]。

隔震技术是一种新型抗震措施,主要是通过隔震

装置将建筑结构与地面运动隔离开,减少地震能量向结构上部的传递,进而减小建筑物的地震响应,实现地震时建筑物只发生轻微的振动或变形,从而使建筑物在地震作用下不发生损坏或倒塌,其减震效果明显,性价比高且设计灵活^[3-4]。隔震技术在国外发展较快,美国、日本、新西兰等多地震国家对隔震技术投入大量资源,取得了丰硕成果;隔震技术在我国也取得一定进展,特别是 2008 年汶川地震发生后,隔震技术引起社会的广泛关注,2013 年在芦山地震中采用橡胶支座隔震技术的芦山人民医院保持完好,使得隔震研究与应用再次成为关注热点。

在隔震结构中,叠层橡胶支座是应用最多的隔震支座,按构造不同可分为:天然橡胶支座(LNR)、铅芯

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51378047)

收稿日期: 2014-12-30 修改稿收到日期: 2015-03-17

第一作者 韩淼 男,博士,教授,1969 年生

橡胶支座(LRB) 和高阻尼橡胶支座(HDR) 。随着人们对近断层地震动研究的深入 ,发现隔震结构遭遇近断层地震动具有不同于远场地震作用下的动力响应 ,而不同隔震支座在近断层地震作用下的隔震性能亦不同。Yang 等^[5]对安装两种新型半主动控制装置的隔震结构在近断层地震动作用下的动力响应进行了分析 ,发现这两种装置对结构具有很好的隔震效果。Mazza 等^[6]对 HDR 隔震结构输入近断层地震记录 ,研究其在水平地震和竖向地震作用下的隔震效果。分析表明水平向脉冲地震要求结构具有很大的延性 ,尤其当低层建筑的剪切应变达到最大时 ,隔震装置可能发生破坏。

隔震装置及隔震层位置的不同 ,将会使隔震结构在近断层地震动作用下的动力响应不同。为研究不同隔震结构在近断层地震动作用下的影响 ,本文选用天然橡胶支座(LNR) 与铅芯橡胶支座(LRB) 作为隔震装置 ,对两栋 8 层钢筋混凝土框架结构输入 172 条近断层地震波 ,分别计算隔震装置设置在基础或以上每一层柱顶时隔震结构的动力响应 ,分析不同层隔震结构在近断层地震作用下的动力响应 ,为结构设计优选隔震参数与输入地震动提供参考。

1 近断层地震动选取

根据近断层地震定义 ,本文选取断层距小于 20 km ,震级大于 5.5 级 ,峰值加速度大于 0.1 g 的全球 20 次地震中的 172 条地震记录(见表 1) 作为近断层地震动输入 ,选取的地震记录来自美国太平洋地震工程研究中心数据库。

2 有限元模型建立

采用 SAP2000 有限元软件建立两栋 8 层钢筋混凝土框架结构分析模型(记为模型 1 ,模型 2) ,平面尺寸为 27.6 m ×4.7 m ,总高 27.3 m ,主梁截面尺寸 300 mm ×600 mm ,次梁截面尺寸 200 mm ×450 mm ,柱截面尺寸 700 mm ×700 mm。结构布置见图 1 ,重力荷载代表值见表 2。混凝土采用 C30 ,梁柱钢筋均采用 HRB400。根据规范要求及支座选取原则 ,模型 1 的隔震装置选用天然橡胶隔震支座(LNR500) 20 个 ,模型 2 的隔震装置选用铅芯橡胶隔震支座(LRB500) 20 个 ,隔震支座安装在图 1 中的柱位置处 ,隔震支座参数见表 3。分别将不同隔震支座设置在基础或上部结构每一层柱顶(见图 2) ,隔震层高为 300 mm。结构模型分析得非隔震结构自振周期 $T_1 = 1.097\text{ s}$, $T_2 = 1.010\text{ s}$, $T_3 = 0.901\text{ s}$ 。LNR500 隔震结构和 LRB500 隔震结构的自振周期见表 4。由表 4 可知 ,天然橡胶支座隔震结构基本自振周期大于铅芯橡胶支座隔震结构基本自振周期;随着隔震

层位置的上移 ,隔震结构自振周期减小 ,但均大于非隔震结构自振周期。模态分析表明第一振型为沿结构 X 方向 ,则地震动的输入方向取为 X 方向 ,即结构的长边方向。

表 1 选用的近断层地震记录
Tab. 1 Earthquake record information utilized in this study

地震名称	条数	震级	时间
Coyote Lake	2	5.74	1979
Coalinga-05	2	5.77	1983
Morgan Hill	5	6.19	1984
Nahanni , Canada	2	6.76	1985
Loma Prieta	14	6.93	1989
San Fernando	1	6.61	1971
Imperial Valley-06	18	6.53	1979
Mammoth Lakes-01	2	6.06	1980
Chalfant Valley-02	2	6.19	1986
N. Palm Springs	3	6.06	1986
San Salvador	3	5.80	1986
Superstition Hills-02	5	6.54	1987
Whittier Narrows-01	12	5.99	1987
Cape Mendocino	2	7.01	1992
Erzican , Turkey	2	6.93	1992
Landers	2	7.28	1992
Northridge-01	22	6.69	1994
Kobe , Japan	5	6.90	1995
Duzce-Turkey	7	7.14	1999
Chi-Chi , Taiwan	58	7.62	1999
Kocaeli , Turkey	3	7.51	1999
总数		172	

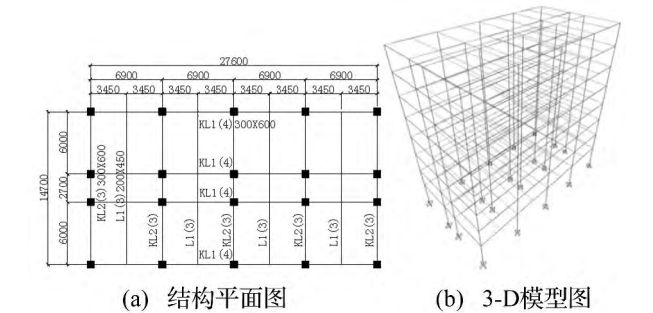


图 1 结构平面图和 3 - D 模型图(单位: mm)
Fig. 1 Plan and 3 - D model of structure(unit: mm)

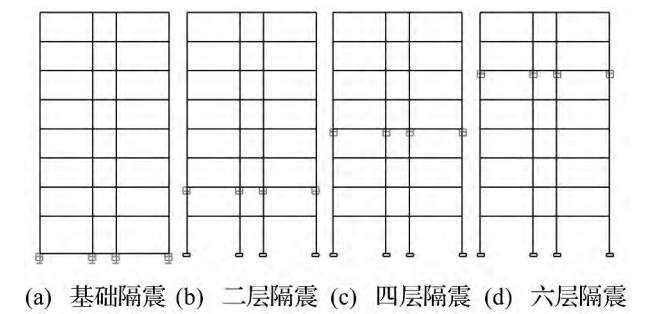


图 2 不同层隔震结构(Y - Z 立面图) (部分)
Fig. 2 The parts of different story isolation structure
(Y - Z elevation view of structure)

表 2 各层重力荷载代表值
Tab.2 The gravity load representative value of each floor

层数	1	2	3	4	5	6	7	8
重力荷载/kN	4 918	4 370	4 370	4 370	4 370	4 370	4 370	4 008

表 3 隔震支座参数
Tab.3 Parameters of the bearing

参数 支座	有效直径/ mm	剪切模量/ MPa	竖向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	100% 水平性能			
				等效水平刚度/ (kN·m ⁻¹)	等效 阻尼比/%	屈服后刚度/ (kN·m ⁻¹)	屈服力/ kN
LRB500	500	0.392	1 839	1 459	26.5	807	62.6
LNR500	500	0.392	2445	1525	5	—	—

表 4 隔震结构的基本自振周期(s)
Tab.4 The natural vibration periods of isolation structure(s)

隔震装置位置	基础	1	2	3	4	5	6	7
LRB500	2.650	2.486	2.381	2.249	2.087	1.897	1.674	1.417
LNR500	3.459	3.245	3.077	2.881	2.656	2.396	2.092	1.725

3 近断层地震动特征参数与结构动力响应参数分析

选取近断层地震动的 8 个主要特征参数: 断层距、地面峰值加速度(PGA)、地面峰值速度(PGV)、地面峰值位移(PGD)、地面峰值速度与峰值加速度的比值(PGV/PGA)、地震持时(90% 显著持时)、脉冲周期与结构自振周期的比值(T_p/T_1)、输入能,分析其对结构动力响应的影响。

3.1 地震动输入能分析

影响地震动输入能量的主要因素为地震动特征和结构动力特征,其中地震动特征包括地震强度、频谱和持时等,而结构动力特征有质量、刚度、阻尼等^[7]。基于能量法的基本原理,水平地震作用在任一时刻的能量平衡方程^[8]为:

$$E_i = E_v + E_c + E_d + E_h \tag{1}$$

式中 E_v 为结构的动能; E_c 为结构的阻尼耗能; E_d 为隔震支座耗能; E_h 为隔震结构的变形能; E_i 为地震对结构的输入能。

通过对非隔震结构、不同层隔震结构输入 172 条近断层地震动,计算得到地震动的平均输入能量见图 3。由图 3 可以看到:

- (1) 隔震结构比非隔震结构输入能量减少。三层隔震时隔震结构输入能量减少比例最大,LNR500 隔震结构减少 37.2%,LRB500 隔震结构减少 41.0%。
- (2) LNR500 隔震结构的输入能量大于 LRB500 隔震结构的输入能量。
- (3) 隔震层由基础上移到第三层,输入能量减少;

再由第四层上移到第七层,输入能量增大。隔震层位于结构中下部的隔震效果优于结构上部。

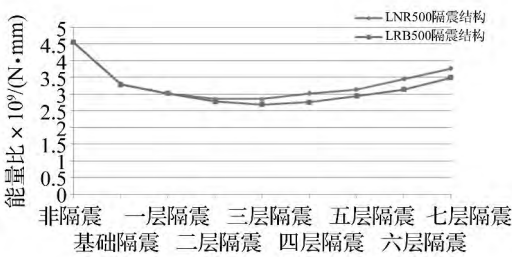


图 3 不同层隔震结构的输入能量对比
Fig.3 The comparison of the input energy of different story isolation structure

3.2 结构动力响应分析

对结构进行动力弹塑性分析,可得到不同层隔震结构在 172 条近断层地震动作用下的动力响应,选取两个结构动力响应参数(支座最大位移、顶层最大加速度),并将其平均值绘于图 4,图 4 中横轴为隔震层位置。由图 4 可以看到:

- (1) 随着隔震层位置升高,隔震支座最大位移减小;当隔震层设置在七层柱顶时,由于鞭梢效应,支座最大位移偏大。LRB500 隔震结构的支座最大位移小于 LNR500 隔震结构的支座最大位移。
- (2) 随着隔震层位置升高,隔震结构顶层最大加速度增大;LRB500 隔震结构与 LNR500 隔震结构的顶层最大加速度相差不大。当隔震层设置在结构三层及以下部位时,LRB500 隔震结构的顶层最大加速度稍大于 LNR500 隔震结构的顶层最大加速度;当隔震层设置

在结构三层以上部位时 ,LRB500 隔震结构的顶层最大加速度略小于 LNR500 隔震结构的顶层最大加速度。

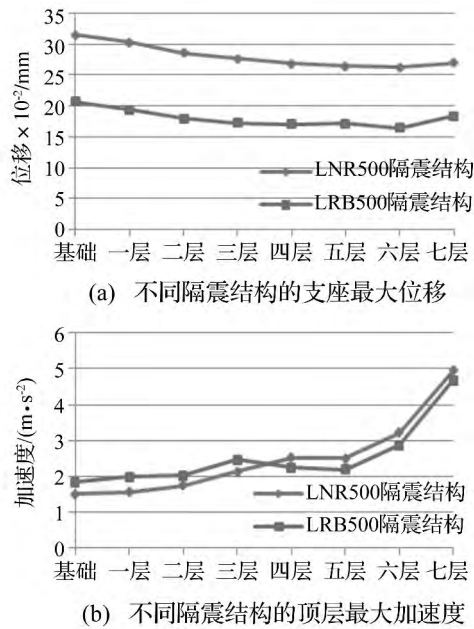


图 4 不同隔震结构的动力响应

Fig. 4 The dynamic response of different isolation structure

3.3 近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数相关性分析

不同的地震动输入得到的结构动力响应不同 ,为比选出与不同隔震结构动力响应相关性强的地震动特征参数 ,对近断层地震动的 8 个特征参数与不同隔震结构的 2 个结构动力响应参数进行相关性分析。

表 5 近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数的相关系数绝对值

Fig. 5 Absolute value of the correlation coefficient between characteristics of near-fault ground motion parameters and seismic responses of the different isolation structure

不同隔震结构	结构动力响应	输入能	PGV	PGA	断层距	$T_p/T_1(> 1)$	$T_p/T_1(< 1)$	PGD	PGV/PGA	地震持时
LNR500 隔震结构	支座最大位移	最小值	0.895	0.740	0.161	0.484	0.318	0.399	0.419	0.027
		最大值	0.976	0.816	0.591	0.579	0.586	0.469	0.830	0.279
	顶层最大加速度	最小值	0.914	0.741	0.326	0.505	0.322	0.385	0.418	0.022
		最大值	0.971	0.831	0.598	0.581	0.610	0.456	0.782	0.178
LRB500 隔震结构	支座最大位移	最小值	0.890	0.750	0.294	0.532	0.478	0.411	0.379	0.008
		最大值	0.933	0.840	0.664	0.590	0.543	0.494	0.736	0.164
	顶层最大加速度	最小值	0.741	0.697	0.636	0.517	0.484	0.358	0.348	0.113
		最大值	0.917	0.807	0.754	0.599	0.578	0.482	0.444	0.284

(3) 断层距与 LNR500 隔震结构的支座最大位移、顶层最大加速度的相关程度为低度相关到显著相关 ,与 LRB500 隔震结构的相关程度为显著相关。

(4) $T_p/T_1 > 1$ 时 , T_p/T_1 与隔震结构的支座最大位移、顶层最大加速度的相关程度为低度相关到显著相关 ; $T_p/T_1 < 1$ 时 , T_p/T_1 与隔震结构的支座最大位移、顶层最大加速度的相关程度为低度相关。

(5) PGD 对隔震结构支座位移影响最大 ,随隔震层位置升高 ,与 LNR500 隔震结构支座最大位移相关程度由高度相关变为低度相关 ,与 LRB500 隔震结构支座

利用 SPSS 统计分析软件计算变量间的相关系数 ,通过 Spearman 等级相关系数求解 ,可得 8 个近断层地震动特征参数与不同层隔震结构的 2 个动力响应参数之间的相关系数。相关系数取绝对值 ,当相关系数为 0 时 ,表示完全不相关 ;当相关系数在 (0 ,0.3] 内时 ,表示微弱相关 ;当相关系数在 (0.3 ,0.5] 内时 ,表示低度相关 ;当相关系数在 (0.5 ,0.8] 内时 ,表示显著相关 ;当相关系数在 (0.8 ,1) 内时 ,表示高度相关 ;当相关系数等于 1 时 ,表示完全相关 [9] 。

表 5 给出了近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数的相关系数绝对值的范围 ,图 5 为近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数相关系数绝对值的变化趋势 ,从表 5 和图 5 中可以得到 ,近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数均存在相关性 ,但相关程度不同。具体情况分析如下 :

(1) 输入能、PGV 与不同层隔震结构的支座最大位移、顶层最大加速度的相关性较强 ,为显著相关到高度相关。

(2) PGA 与隔震结构支座最大位移的相关程度随隔震层位置升高由微弱相关变为显著相关 ;与 LNR500 隔震结构的顶层最大加速度因隔震层位置不同为低度相关到显著相关 ,与 LRB500 隔震结构的顶层最大加速度为显著相关。这可能是因为 LRB500 隔震结构中铅芯阻尼的影响。

最大位移相关程度由显著相关变为低度相关 ;PGD 与 LNR500 隔震结构顶层最大加速度相关程度为微弱相关到显著相关 ,与 LRB500 隔震结构顶层最大加速度相关程度为低度相关。

(6) PGV/PGA 与隔震结构支座最大位移相关程度随隔震层位置升高由显著相关变为微弱相关 ;与 LNR500 隔震结构顶层最大加速度相关性为微弱相关到显著相关 ,与 LRB500 隔震结构相关程度为微弱相关。

(7) 地震持时与隔震结构支座最大位移、顶层最

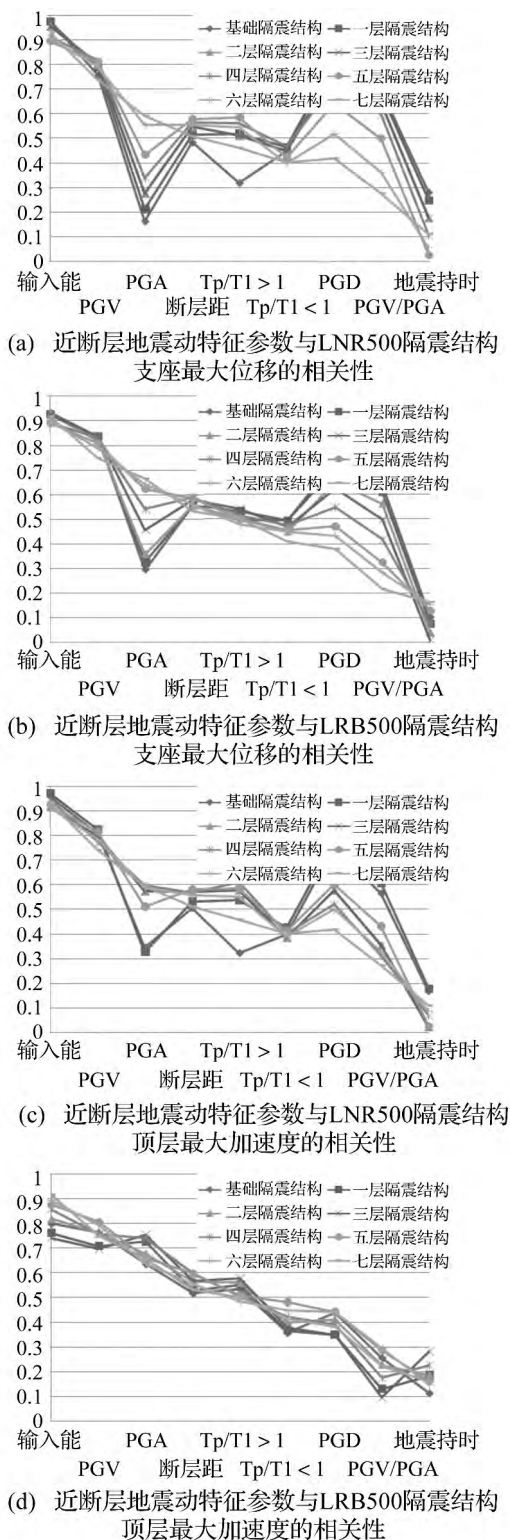


图5 近断层地震动特征参数与不同隔震结构动力响应参数的相关性对比

Fig. 5 Comparison of the correlation coefficient between characteristics of near-fault ground motion parameters and seismic responses of the different isolation structure

大加速度的相关程度为微弱相关。

从图5中可看到,对两种隔震支座的中下部隔震结构,PGD、PGV/PGA与隔震支座最大位移的相关性高于PGA。对于LRB500隔震结构,PGA与顶层最大加速度的相关性高于PGD、PGV/PGA。

4 结论

对采用两种隔震支座的的不同层隔震结构,分析其在近断层地震动作用下的动力响应,得到以下结论:

(1) 隔震结构输入能量小于非隔震结构输入能量,铅芯橡胶支座隔震结构输入能量小于天然橡胶支座隔震结构的输入能量。

(2) 隔震层设置在结构中下部位的减震效果优于设置在结构中上部位。

(3) 随着隔震层位置升高,隔震支座最大位移减小,结构顶层最大加速度增大。

(4) 近断层地震动特征参数与不同层隔震结构动力响应参数均存在相关性,但相关程度不同。其中,输入能、PGV与不同层隔震结构动力响应参数相关性显著,地震持时与不同层隔震结构动力响应参数相关性微弱。

(5) 隔震层位置和隔震装置不同,近断层地震动特征参数与结构动力响应参数的相关性程度亦不同。隔震结构设计要根据建筑结构动力响应的需求,同时考虑隔震参数与地震动特征参数的影响。

参考文献

- [1] 刘启方,袁一凡,金星,等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1-10.
LIU Qi-fang, YUAN Yi-fan, JIN Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10.
- [2] 王海云,谢礼立. 近断层强地震动的特点[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2070-2076.
WANG Hai-yun, XIE Li-li. Characteristics of near-fault strong ground motions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2070-2076.
- [3] 火明谔,赵亚敏,陆鸣. 近断层地震作用隔震结构研究现状综述[J]. 世界地震工程, 2012, 28(3): 161-170.
HUO Ming-xuan, ZHAO Ya-min, LU Ming. Research progress in base-isolated structures subjected to near-fault ground motions [J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(3): 161-170.
- [4] 苏经宇,曾德民,田杰. 隔震建筑概论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [5] Yang J N, Agrawal A K. Semiactive hybrid control systems for nonlinear buildings against near-field earthquakes [J]. Engineering Structures, 2002, 24(3): 271-280.
- [6] Mazza F, Vulcano A. Effects of near fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base isolated RC framed buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(1): 211-232.
- [7] 周云,乐登,邓雪松. 设计用地震动总输入能量谱研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(5): 1-7.
ZHOU Yun, YUE Deng, DENG Xue-song. Research on input energy spectra for design of earthquake strong motion [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(5): 1-7.
- [8] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [9] 王璐. SPSS 统计分析基础、应用与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.