

小高层结构屋顶保温层 TMD 减震分析

周茗如, 王 腾, 文煜馨, 魏域虎
(兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

摘要:提出了利用小高层结构屋顶保温层和铅芯橡胶支座作为 TMD 装置来达到减震的设想。通过 SAP2000 有限元软件利用动力时程分析方法对其减震效果进行了分析。结果表明,该屋顶保温层 TMD 装置可有效降低结构的动力响应,其中控制后结构的楼层位移和楼层加速度的平均值降低了约 20%,层间位移平均值降低了 30%左右,层间剪力平均值减小了约 20%~30%。利用小高层结构屋顶保温层和橡胶支座作为结构的减震控制系统具有一定的可行性和实用性。

关键词:小高层; TMD; 屋顶保温层; 铅芯橡胶支座; 动力时程分析; 动力响应
中图分类号:P315.9252 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0844(2013)04-866-06
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.866

A Seismic Analysis of Using Thermal-insulating Roof as TMD in Small High-rise Buildings

ZHOU Ming-ru, WANG Teng, WEN Yu-xin, WEI Yu-hu
(Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: China is an earthquake prone country; earthquakes endanger people's lives and cause destruction of property. Therefore, researchers have raised serious concern on the seismic performance of buildings and how to improve them. Since the last century, the structural vibration control technology has been widely studied both within the country and abroad. Tuned mass dampers (TMDs) are one of the applications of passive control techniques that have good shock absorbing functions in earthquake engineering and can effectively protect buildings and internal facilities. With the development of the housing industry, small high-rise buildings have become common. In order to improve the seismic performance of high-rise structures and achieve the desired reliability and validity of the damping design, the concept of a roof insulation layer and lead rubber bearing as a TMD device is proposed. Compared to the traditional TMD, a roof insulation layer TMD has advantages in terms of structuring and installation. In order to study the damping effect of the new TMD control device, a small high-rise building having a roof insulation layer and lead rubber bearing as the TMD device, is studied. In this paper, the damping effect of the TMD device is analyzed using a dynamic time history analysis method with the SAP2000 finite element software. The results show that the roof insulation TMD device can effectively reduce the dynamic response of structures. The displacement and ac-

celeration of the floor decreased by about 20 %, the inter storey displacement; decreased by about 30 %, and the interlaminar shear force decreased by 20 %~30 % on an average. Therefore, using a roof insulation layer and lead rubber bearing, a feasible and practical damping system can be obtained for small high-rise buildings.

Key words: small high-rise; TMD; thermal-insulating roof; lead rubber bearing; dynamic time history analysis; dynamic response

0 引言

随着我国城市的发展,小高层住宅楼日益增多。我国属于地震多发国家,因此如何提高小高层住宅楼的抗震性能,保障人类的生命财产安全具有非常重要的意义。

随着结构控制理论研究的不断深入,人们不断提出各种新的控制技术和控制装置,其中TMD作为一种被动控制装置,因其良好的减震效果得到了不断的发展。传统的被动控制多采用阻尼器作为耗能元件,结构振动使耗能元件被动地往复相对变形或者在耗能元件间产生往复运动的相对加速度,从而耗散结构振动的能量,减轻结构的动力反应。但是这种被动控制系统设计、制作较为复杂,投入使用后需要经常维护,因此近年来出现了一种新的TMD减震模型,以隔震支座作为弹簧阻尼器,以屋盖、屋顶花园或加层结构本身作为附加质量块,许多研究表明该TMD减震模型具有较好的减震效果。

谢军龙和周福霖^[1]将TMD的原理应用于旧建筑物的抗震加固中,将隔震垫、加层结构本身组成一种被动控制装置,并利用这种装置来吸收和耗散能量,达到减震的目的,同时节约了拆除重建的成本;高剑平等^[2-3]针对混凝土框架结构的加层减震进行了能量时程分析和减震分析;Roberto Villaverde^[4]把结构本身的屋顶作为TMD的质量块;邹祖军^[5]等对屋顶隔热层TMD进行了设计和系统研究。

本文结合一幢小高层钢筋混凝土框剪结构进行屋顶保温层改造,利用铅芯叠层橡胶支座与屋顶保温层组成TMD装置。利用SAP2000有限元软件进行模拟,通过弹性时程分析方法分析该结构在几种典型地震作用下的减震效果和规律。

1 小高层屋顶TMD减震控制系统的设计步骤

根据文献[5],地震作用下小高层住宅楼屋顶保温层TMD控制装置的设计步骤如下:

(1)以小高层住宅楼为研究对象,建立动力分析模型,并计算出各质点的质量、刚度和阻尼矩阵;

(2)计算无TMD时,小高层结构的自振频率、标准化

振型和广义振型质量 M_i ;

(3)选取小高层住宅楼欲控制的振型,将TMD的自振频率调谐于结构控制振型相对应的频率,即 $\lambda = \frac{\omega_d}{\omega_1}$ 或 $\lambda_{opt} = \frac{\omega_d}{\omega_1}$;

(4)假设TMD控制系统的质量比为 μ ,计算出TMD控制系统的最优频率比 λ_{opt} 或 $\lambda = 1$ 以及阻尼比 ξ_d ,其中 ξ_d 可以按照最优TMD参数选择计算程序选取;

(5)计算TMD控制系统的安装参数 m_d 、 K_d 和 C_d 。其中 $m_d = \mu m$, $K_d = m_d \omega_d^2$, $C_d = 2m_d \omega_d \xi_d$;

(6)对小高层屋顶TMD系统进行时程分析,若不足控制指标或安全指标过大,返回步骤4;

(7)根据TMD控制系统的 m_d 、 K_d 和 C_d 对小高层住宅楼的屋顶TMD进行设计。

2 小高层结构屋顶TMD的最优频率比和最优阻尼比

根据理论分析和研究^[6]可知,TMD的最优阻尼比和最优频率比分别为

$$\xi_{opt} = \left| \frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)} \right|^{1/2} \quad (1)$$

$$\lambda_{opt} = (1-\mu/2)^{1/2} / (1+\mu) \quad (2)$$

式中, $\mu = \frac{m_d}{m}$, m 、 m_d 分别为结构与子结构的质量; $\lambda = \frac{\omega_d}{\omega_1}$, ω 、 ω_d 分别为主结构与子结构的圆频率。从公式(1)、(2)可以看出,最优阻尼比 ξ_{opt} 随着质量比的增大而减小,最优频率比 λ_{opt} 随着质量比的增大而增大。且研究表明TMD系统的阻尼比越大减震效果就越好,但当阻尼比增大到一定程度(≥ 0.2)后,TMD的减震效果基本保持不变。

根据现行抗震设计规范[7]隔震层的水平等效刚度和等效黏滞阻尼比可按式计算:

$$K_n = \sum K_j \quad (3)$$

$$\zeta_{eq} = \sum K_j \zeta_j / K_n \quad (4)$$

式中: ζ_{eq} 为隔震层等效黏滞阻尼比; K_n 为隔震层水平等效刚度; ζ_j 为 j 隔震支座由试验确定的等效黏滞阻尼比,设置阻尼装置时应包括相应阻尼比; K_j 为 j 隔震支座(含耗能器)由试验确定的水平等效刚度。

3 工程概况

兰州市某11层小高层住宅楼,结构类型钢筋混凝土框剪结构,建筑面积约6325 m²,总质量约15821 t。拟对该小高层结构的屋顶保温层进行改造,保温层与原结构之间用铅芯叠层橡胶支座进行连接,其中保温层相当于惯性质量块,铅芯橡胶支座相当于弹簧阻尼器,从而形成保温层TMD减震结构体系。该结构建造于II类场地上,地震设防烈度为Ⅷ度,设计地震分组为第三组。

3.1 小高层屋顶TMD设计

结合工程实际,主结构的总质量约为15821 t,屋顶保温层质量约为485 t,则 $\mu = \frac{m_d}{m} = \frac{485}{15821} = 3.07\%$ 。将 $\mu = 3.07\%$ 分别代入式(1)、(2),可得 $\xi_{opt} = 0.087$, $\lambda_{opt} = 0.96$ 。小高层住宅楼属于多自由度体系,因此将TMD设置在小高层的顶层并控制第一振型频时控制效果最好。根据原结构的第一振型基本圆频率

$\omega = 6.6757 \text{ rad/s}$, $\lambda_{opt} = 0.96$ 可得出 $\omega_d = \lambda_{opt} \omega = 5.2937 \text{ rad/s}$ 。则TMD的刚度: $K_d = m_d \omega_d^2 = 1.99 \times 10^4 \text{ kN/m}$,选用铅芯叠层橡胶支座,LRB200、LRB300的等效水平刚度分别为536 kN/m,806 kN/m,通过计算及实际情况选用16个LRB200,14个LRB300, $K_d = 20936 \text{ kN/m}$,与 $1.99 \times 10^4 \text{ kN/m}$ 相近。

3.2 屋顶隔震垫的布置图

屋顶保温层TMD和隔震垫的布置原则:

- (1) 屋顶保温层TMD的中心宜与主体结构的质心重合。
 - (2) 座的底面宜布置在相同标高位置上,隔震支座的规格型号应尽量统一,并注意充分发挥每个支座的承载力和水平变形能力,将隔震支座对称、分散地布置在建筑物的周边。
 - (3) 隔震支座一般布置在主体结构顶部梁板之上。
- 根据以上原则,将铅芯叠层橡胶隔震支座分别布置在柱子顶部,具体布置情况如图1所示。

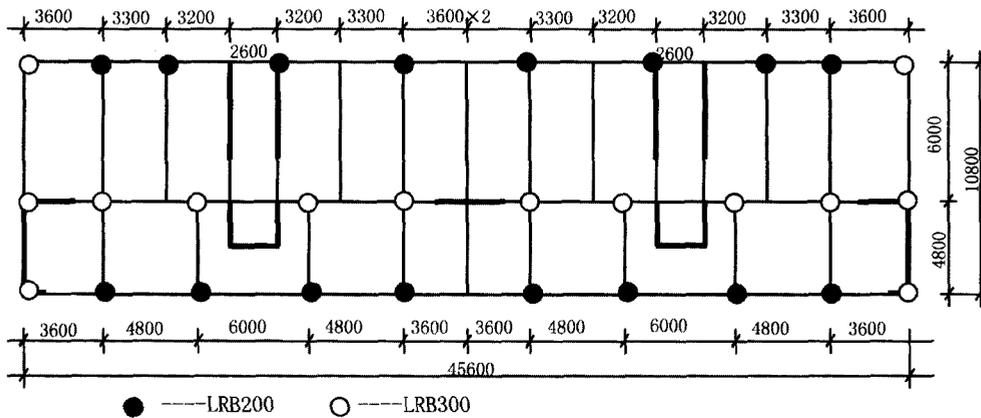


图1 屋顶隔震垫布置图
Fig.1 Layout of vibration isolation cushion on the roof

4 有限元模拟及分析结果

利用SAP2000有限元软件建立该小高层保温层TMD结构体系模型,其中铅芯橡胶支座通过SAP2000中的橡胶隔震单元进行模拟,并通过动力时程分析方法对该结构体系的动力响应进行分析。分别选取了两条天然地震波(Abbar波、El Centro波)和一条人工波地震波(兰州人工波),详细内容列于表1中,峰值调整为400 gal,相当于8度罕遇地震。通过对比控制前后结构的动力响应(楼层位移、层间位移、层间位移角、层间剪力和楼层加速度)分析该TMD控制装置的减震效果。

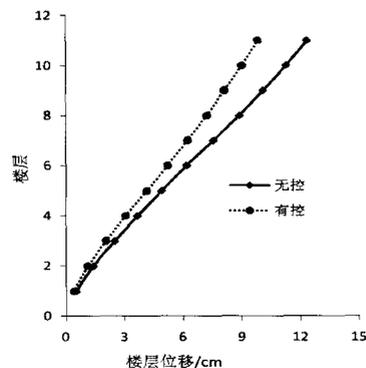
表1 地震动记录集

Table 1 Record set of ground motion

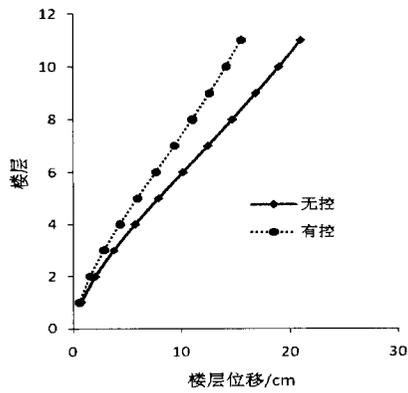
编号	发生年份	名称	地震台	PGA	分量
1	1990	Manjil,Iran	Abhar	0.496	MANJIL/ABBAR-T
2	1940	Imperial Valley EL Centro Array #9		0.313	ARRAY180
3		Lanzhou	人工波	0.056	

4.1 动力响应包络图

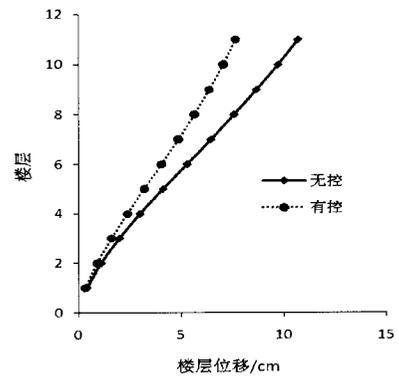
本文通过动力时程分析方法求得结构的楼层位移峰值、层间位移峰值、层间位移角峰值、层间剪力峰值和楼层加速度峰值,并将各个动力响应的峰值绘于图2~6中。



(a) Abbar波楼层位移包络图



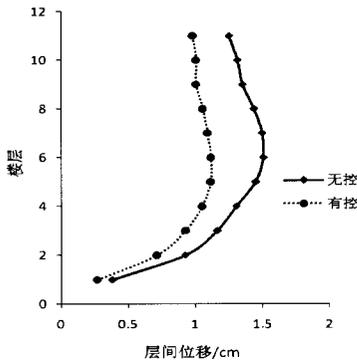
(b) El Centro波楼层位移包络图



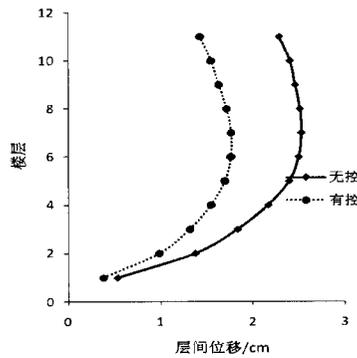
(c) 兰州人工波楼层位移包络图

图2 控制前后结构的楼层位移包络图

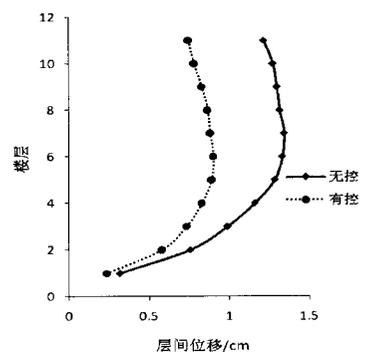
Fig.2 The envelope diagrams of floor displacements before and after the control



(a) Abbar波层间位移包络图



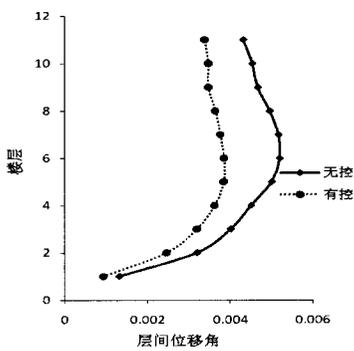
(b) El Centro波层间位移包络图



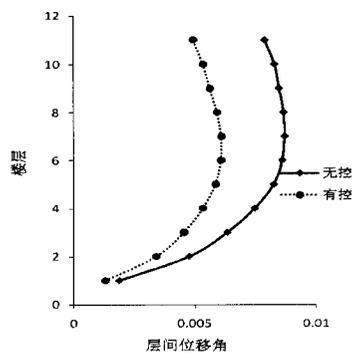
(c) 兰州人工波层间位移包络图

图3 控制前后结构的层间位移包络图

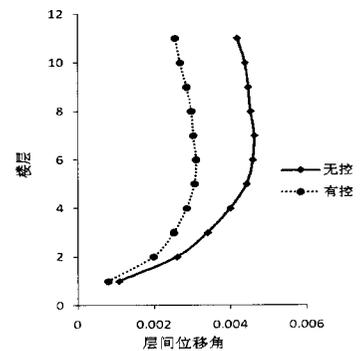
Fig.3 The envelope diagrams of story drifts before and after the control



(a) Abbar波层间位移角包络图



(b) El Centro波层间位移角包络图



(c) 兰州人工波层间位移角包络图

图4 控制前后结构的层间位移角包络图

Fig.4 The envelope diagrams of inter-story displacements before and after the control

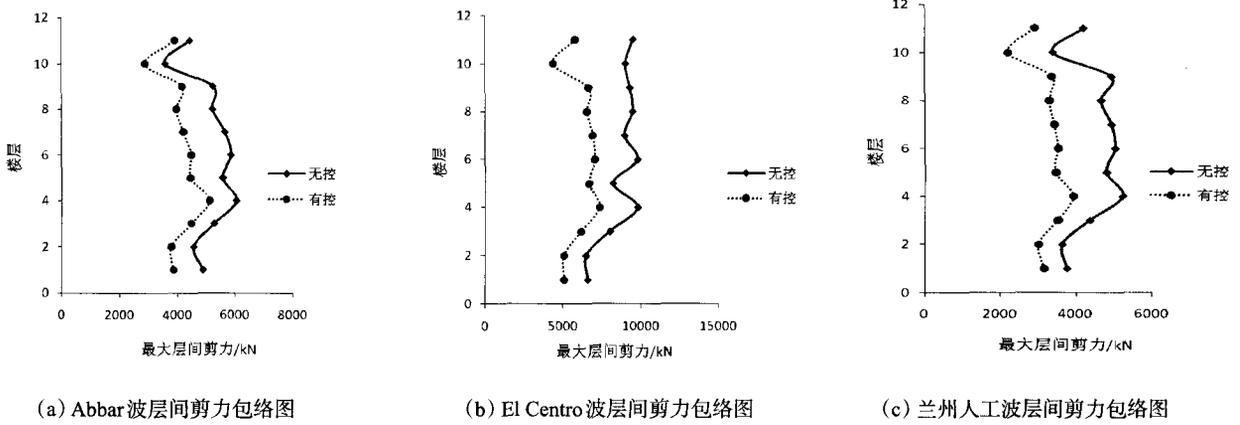


图5 控制前后结构的层间剪力包络图

Fig.5 The envelope diagrams of floor shear forces before and after the control

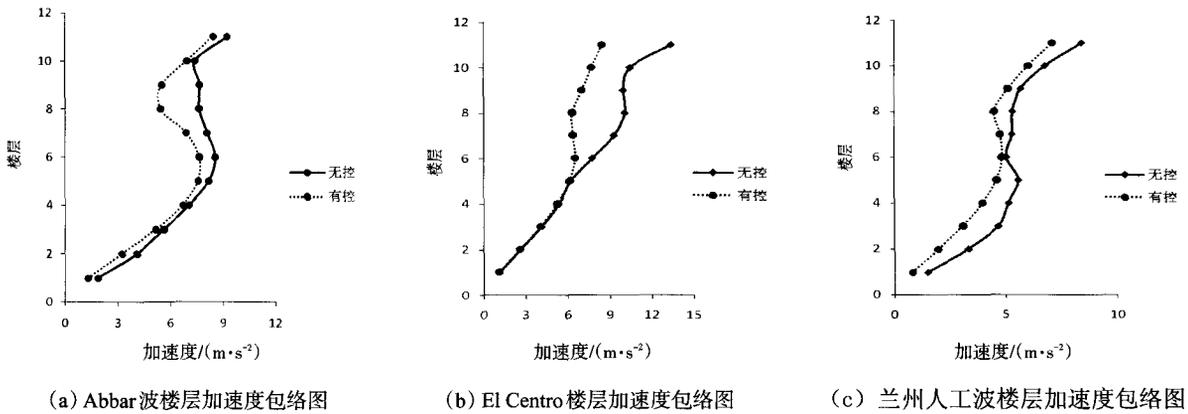


图6 控制前后结构的楼层加速度包络图

Fig.6 The envelope diagrams of acceleration of each layer before and after the control

从图2~5可以看出,采用屋顶保温层TMD控制装置后,结构的楼层位移峰值、层间位移峰值、层间位移角峰值、层间剪力峰值均明显减小;从图6可以看出控制后结构的楼层加速度也有不同程度的降低,除了在El Centro波作用下结构的1~5层楼层加速度变化不明显,其余各层以及在Abbar波和兰州人工波作用下的结构各层楼层加速度均

明显减小。

4.2 减震率

为了定量分析采用屋顶保温层TMD后结构的减震效果,本文分别将结构控制前后在Abbar波、El Centro波和兰州人工波作用下的动力响应取平均值,并将求得的平均值和减震率列于表2中。

表2 控制前后结构在不同地震激励下各层的地震响应平均值

Table 2 The the average seismic responses of each layer before and after the control under different seismic incentive

层数	楼层位移平均值			层间位移平均值			层间剪力平均值			楼层加速度平均值		
	无控 /cm	有控 /cm	减震率 /%	无控 /cm	有控 /cm	减震率 /%	无控 /kN	有控 /kN	减震率 /%	无控 /(m·s ⁻²)	有控 /(m·s ⁻²)	减震率 /%
1	0.54	0.42	21.6	0.41	0.30	28.4	5 084	4 032	20.7	1.48	1.06	28.2
2	1.51	1.19	21.3	1.02	0.76	25.6	4 895	3 954	19.2	3.33	2.59	22.2
3	2.74	2.16	21.3	1.33	0.99	25.4	5 886	4 718	19.8	4.80	4.09	14.6
4	4.13	3.25	21.3	1.55	1.14	26.1	7 021	5 450	22.4	5.83	5.29	9.3
5	5.63	4.43	21.4	1.71	1.23	27.8	6 190	4 856	21.6	6.66	6.10	8.3
6	7.21	5.63	21.8	1.78	1.26	29.2	6 904	5 024	27.2	7.11	6.33	10.9
7	8.82	6.82	22.7	1.79	1.25	30.4	6 519	4 849	25.6	7.55	5.99	20.6
8	10.39	7.97	23.3	1.76	1.21	30.9	6 447	4 601	28.6	7.65	5.39	29.5
9	11.90	9.04	24.0	1.70	1.16	32.2	6 503	4 731	27.2	7.78	5.88	24.4
10	13.35	10.08	24.5	1.66	1.11	33.1	5 337	3 163	40.7	8.22	6.88	16.3
11	14.70	11.01	25.1	1.58	1.05	33.7	6 046	4 209	30.4	10.33	7.98	22.8
TMD		24.47			13.53			3 590			7.78	

从表2可以看出,控制后结构的楼层位移平均值减小的范围为21.3%~25.1%,层间位移平均值减小的范围为25.4%~33.7%,层间剪力平均值减小的范围为19.8%~40.7%,楼层加速度平均值减小的范围为8.3%~29.5%。

5 结论

小高层屋顶保温层TMD装置施工、维护方便,可以有效地降低结构在地震作用下的动力响应,从而间接地提高了小高层结构的抗震性能。通过以上分析结果可以得出以下结论:

(1) 控制后结构的动力响应均有不同程度的降低,结构的楼层位移峰值、层间位移峰值、层间位移角峰值、层间剪力峰值均明显减小;控制后结构的楼层加速度除了个别点略有放大外,其余各点均明显减小。

(2) 控制后结构的楼层位移平均值一般可降低20%,层间位移平均值可降低30%左右,层间剪力平均值一般可减小20%~30%,楼层加速度平均值可降低20%左右。

参考文献(References)

- [1] 谢军龙,周福霖.多层房屋结构TMD“加层减震”试验研究和应用[J].世界地震工程,1998,14(4):57-60.
XIE Jun-long, ZHOU Fu-lin. Test Investigation of Seismic Reduction Using Additional Stories as a TMD and its Application to Existing Multistorey Buildings[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1998, 14(4): 57-60. (in Chinese)
- [2] 高剑平,刘礼君,李明,等.多层钢筋混凝土框架结构“加层减震”能量时程分析[J].华东交通大学学报,2008,25(5):17-20.
GAO Jian-ping, LIU Li-jun, LI Ming, et al. A Time-energy History Analysis on an Adding-storey Structure of Multi-storey RC Frame Using Light Steel Structure as a TMD System[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(5): 17-20. (in Chinese)
- [3] 刘礼君,高剑平.多层框架结构利用铅芯叠层橡胶支座加层减震分析[J].世界地震工程,2009,25(1):97-101.
LIU Li-jun, GAO Jian-ping. Seismic Analysis of a Multi-storey RC Frame with Adding-storey and Lead Laminated Rubber Bearings[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(1): 97-101. (in Chinese)
- [4] Roberto Villaverde, M ASCE. A Seismic Roof Isolation System: Feasibility Study with 13-story Building [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(2): 188-196.
- [5] 吴小峰,孙启国,狄杰建.抗震分析反应谱法和时程分析法数值仿真比较[J].西北地震学报,2011,33(3):275-278.
WU Xiao-feng, SUN Qi-guo, DI Jie-jian. A Numerical Simulation Comparison between Response Spectrum Analysis and Time History Analysis[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 275-278. (in Chinese)
- [6] 刘强.多层房屋结构屋顶隔热层TMD减震控制系统设计[J].福建工程学院学报,2006,4(3):304-309.
LIU Qiang. Aseismic System Design Of Using Thermal-insulating Roof as TMD of Multi-storey Construction Building[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2006, 4(3): 304-309. (in Chinese)
- [7] 夏昌.屋顶花园TMD减震控制研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2012,35(5):669-672.
XIA Chang. Research on TMD Vibration Control Using Roof garden[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2012, 35(5): 669-672. (in Chinese)
- [8] 吕晖,张炜超,张向红,等.温增平带调谐液体阻尼器结构的有限元模拟分析[J].地震工程学报,2013,35(3):98-103.
LV Hui, ZHANG Wei-chao, ZHANG Xiang-hong, et al. Finite Element Simulation of the Structure with Tuned Liquid Damper [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 98-103. (in Chinese)
- [9] GB 50011-2010.建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
GB50011-2010. Code for Seismic Design of Buildings[s]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)