

金建敏, 谭平, 陈鹏, 等. 黏滞阻尼器层间隔震结构振动台试验研究[J]. 华南地震, 2016, 36(4): 91-96. [JIN Jianmin, TAN Ping, CHEN Peng, et al. Shaking Table Test Study on Mid-story Isolation Structures with Viscous Dampers [J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(4): 91-96.]

黏滞阻尼器层间隔震结构振动台试验研究

金建敏, 谭平, 陈鹏, 黄襄云, 陈建秋
(广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405)

摘要: 层间隔震结构是基础隔震结构的发展与延伸, 作为一种复杂结构体系, 基础隔震结构的工作机理不一定完全适合, 延长结构的周期可能无法同时降低上、下部结构的地震响应。此类体系以往的理论及试验研究, 隔震层的阻尼多由铅芯橡胶支座提供, 采用天然橡胶支座及黏滞阻尼器作为隔震层, 进行了层间隔震结构振动台试验研究。设计了一个4层的钢框架模型, 依次进行了基础固接、基础隔震、1层顶隔震、2层顶隔震及3层顶隔震的振动台试验研究, 测定结构的加速度、层间位移及层剪力系数。试验结果表明: 黏滞阻尼器层间隔震结构具有良好的减震效果。建立了层间隔震结构的有限元模型, 将有限元分析结果与试验结果进行了对比。

关键词: 层间隔震结构; 天然橡胶支座; 黏滞阻尼器; 振动台试验; 有限元分析

中图分类号: TU352.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 04-0091-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.04.014

Shaking Table Test Study on Mid-story Isolation Structures with Viscous Dampers

JIN Jianmin, TAN Ping, CHEN Peng, HUANG Xiangyun, CHEN Jianqiu
(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Mid-story isolation structure is developing from base isolation structures. As a complex structural system, the work mechanism of base isolation structure is not entirely appropriate for mid-story isolation structure, and the prolonging of structural natural period may not be able to decrease the seismic response of substructure and superstructure simultaneously. In the previous theoretical and experimental studies, the damping of isolation layer was mostly provided by lead rubber bearings. In this paper, using natural rubber bearings and viscous dampers as the isolation layer, the shaking table test for a mid-story isolation structure was conducted. For a four-story steel frame model, the locations of isolation layer are set at bottom of the first story, top of the first story, top of the second story or top of the third story in turn. Changing the location of isolation layer, acceleration, story displacement and story shear force coefficient were measured. The results show that mid-story

收稿日期: 2016-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(51468050)、国家自然科学基金(51478131)、广州市高校科研重点项目(1201610135)

作者简介: 金建敏(1973-), 男, 高工, 博士, 主要从事隔震、抗震研究。

E-mail: jinjianmin152@aliyun.com.

isolation with viscous dampers has a good seismic reduction effectiveness. The finite element model of a mid-story isolation system was established, and the comparison between the finite element analysis results and test results was conducted.

Key words: Mid-story isolation; Linear natural rubber bearing; Viscous dampers; Shaking table test; Finite element analysis

0 引言

作为被动控制技术的分支,隔震技术因其在历次大地震中的卓越表现,成为目前应用最广泛的一项结构减震技术^[1]。特别是我国 5.12 汶川大地震后,隔震技术的优越性也逐步被工程界所认识和接受,目前,隔震技术的主要应用为基础隔震,即隔震层设在基础顶面或地下室底部。层间隔震体系是在基础隔震体系的基础上发展而来的复杂结构体系,隔震层设在地下室顶部或地面以上的楼层,其振动特性同时受到隔震层以上的上部结构及下部结构的影响。层间隔震结构的研究主要在日本与我国,小林正人,洪忠熹等以上、下结构质量比及屈重比为指标对一 15 层的层间隔震结构的振动特性及地震响应的影响进行了研究,研究表明,该结构存在最优质量比及屈重比^[2];小野三千代、寺本隆幸对一 10 层隔震模型(四层顶层间隔震)进行了隔震支座的应力变化范围的分析,以考察层间隔震结构由于隔震支座过大的拉应力导致上部结构倾覆的问题^[3]。2000 年开始,周福霖等对北京通惠家园进行了层间隔震研究。通惠家园住宅小区建在北京地铁平台上(2 层、钢筋混凝土框架),隔震层设置于大平台顶部与上部 9 层住宅之间,平台上部的九层住宅水平地震作用由 8 度降为 7 度;下部平台结构的基底剪力也下降 20% 以上,既提高了上部结构的抗震安全性,又减少了对下部平台结构的地震作用^[4,5]。黄襄云及祁

皓分别采用铅芯橡胶支座进行了层间隔震振动台试验^[6,7]。既往研究的隔震层的阻尼多由铅芯橡胶支座提供,对于隔震层阻尼由黏滞阻尼器提供的相关研究相对较少。

1 模型设计及隔震装置介绍

设计一个 4 层的钢框架模型,该钢框架由 1 个 1 层模型(有柱脚拉梁)、1 个 1 层模型(无柱脚拉梁)、1 个 2 层模型(无柱脚拉梁)构成。通过这三个模型的组装进行基础固接及隔震层分别设置在 1 层底、1 层顶、2 层顶、3 层顶的振动台试验研究,组装后的钢框架为四层模型,平面尺寸为 1×1.6 m,层高为 1 m,梁、柱截面尺寸均为 $HW100 \times 100 \times 6 \times 8$ mm (高 \times 宽 \times 腹板厚 \times 翼缘厚),楼板采用 12 mm 厚的钢楼板,该模型 X 向高宽比为 4。隔震层采用 4 个直径为 90 mm 的天然橡胶支座(LNR90,橡胶剪切弹性模量为 0.392 MPa,内部橡胶 15×1.2 mm,实测的竖向刚度,等效刚度均值分别为 157 kN/mm, 0.155 kN/mm); 2 个隔震用黏滞阻尼器(设计黏滞阻尼系数 C 为 $4\,550$ N/(m \cdot s $^{-1}$) $^\alpha$, $\alpha=0.3$,设计最大阻尼力为 287 kg,最大行程为 ± 50 mm,分别以 0.5 Hz、1 Hz、1.5 Hz、2 Hz、2.5 Hz 频率,进行了 ± 20 mm 行程的测试,根据实测数据对黏滞阻尼器的阻尼系数进行了调整,见图 1,实测的黏滞阻尼系数 C 为 $4\,700$ N/(m \cdot s $^{-1}$) $^\alpha$ 。表 1 为模型与原型的相似关系。模型结构自重为 2 465

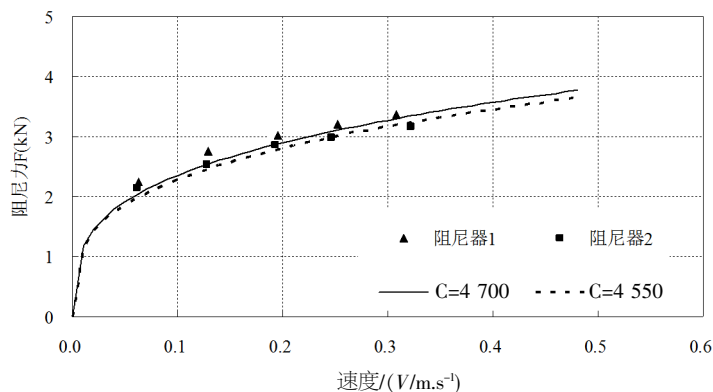


图 1 阻尼器阻尼系数

Fig.1 Damping coefficient of viscous dampers

表 1 相似关系

Table 1 Similarity relation			
相似系数	符号	公式	比值(模型/原型)
长度	S_L	模型 L /原型 L	1/9
弹性模量	S_E	模型 E /原型 E	1.0
加速度	S_a	模型 a /原型 a	1.0
质量	S_m	$S_m = S_E S_L^3 / S_a$	1/81
时间	S_t	$S_t = \sqrt{S_L / S_a}$	1/3
位移	S_u	$S_u = S_L$	1/9
力	S_F	$S_F = S_E S_L^2$	1/81

kg, 根据振动台的承载能力, 取模型各层配重为 2 420 kg, 模型配重共 5 层, 其中 4 层采用混凝土块, 隔震层采用铅块(高度限制, 无法采用混凝土块)。

2 振动台试验

2.1 试验工况及量测系统布置

进行了黏滞阻尼器层间隔震模型(为简洁表达, 将天然橡胶支座+黏滞阻尼器层间隔震模型简称为黏滞阻尼器层间隔震模型)的振动台试验, 分为基础隔震、1 层顶隔震、2 层顶隔震及 3 层顶隔震; 图 2~4 为振动台试验时的模型。输入地震波为 El Centro NS 波、Taft EW 波及两条与抗震规范加速度反应谱相吻合的人工波(场地特征周期为 0.4 s), 输入加速度峰值为 0.2 g 及 0.408 g (8 度设防烈度地震及罕遇地震), 输入方向为 X 向。使用丹麦产传感器测定各层加速度和位移, 布置在各层的中心点。在隔震模型试验时, 在隔震层布



图 2 基础固接
Fig.2 Fixed-base



图 3 基础隔震
Fig.3 Base Isolation



图 4 2 层顶隔震
Fig.4 Isolated on the top of the second story

置了 2 个激光传感器(分别沿 X 向布置在模型的对角点), 用于测定 X 向隔震层层间位移, 采用 4 个日本产三维力传感器, 测定隔震支座在地震作用下的三向力变化情况。

2.2 动力特性

表 2 为白噪声输入时(0.05 g, 0.1~40 Hz), 黏滞阻尼器层间隔震模型的 X 向前三阶周期, 括号内为计算周期, 隔震层刚度采用天然橡胶支座的等效刚度。由实测的基础固接模型周期换算的原型周期为 1.143 s, 实测的隔震模型周期比橡胶支座等效刚

度对应的周期偏短, 这是因为: ① 小变形时橡胶支座等效刚度比 100%变形时的刚度偏大; ② 黏滞阻尼器内部气泡及摩擦产生的内部刚度^[9]。

2.3 加速度反应

图 5 给出了 8 度中、大震输入时隔震与基础固接模型加速度包络图, 由结果分析可知:

与基础固接结构相比, 基础隔震与层间隔震结构的上部结构加速度均可以减小。8 度中震时, 基础隔震、1 层顶隔震、2 层顶隔震、3 层顶隔震的上部结构顶层加速度平均值分别为基础固接结

表 2 模型周期

Table 2 Period of the experimental model					
阶次	周期/s				
	基础固接	基础隔震	1 层顶隔震	2 层顶隔震	3 层顶隔震
1	0.381(0.370)	0.800(1.032)	0.696(0.932)	0.640(0.856)	0.516(0.707)
2	0.118(0.121)	0.188(0.216)	0.152(0.174)	0.160(0.172)	0.167(0.239)
3	0.069(0.071)	0.095(0.102)	0.089(0.092)	0.116(0.129)	0.088(0.088)

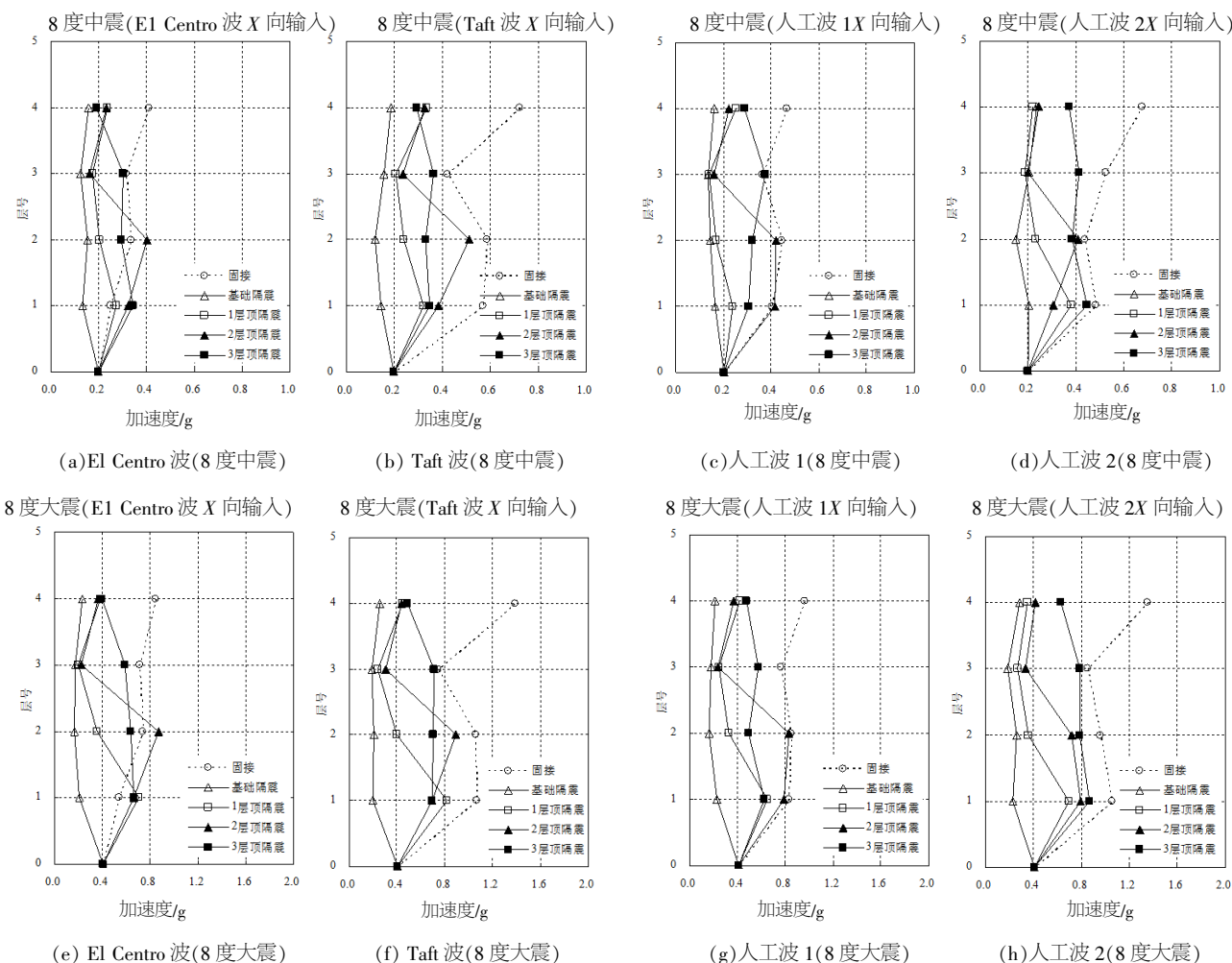


图5 加速度包络图

图5 Acceleration response envelope

构的 32.6%、46.2%、45.3%、50.4%；8 度大震时，基础隔震、1 层顶隔震、2 层顶隔震、3 层顶隔震的上部结构顶层加速度平均值分别为基础固接结构的 21.7%、35.4%、35.0%、43.8%。

与基础固接结构相比，除 El Centro 波中、大震及人工波 1 中震输入外，单条波输入及四条波结果平均后，下部结构顶层加速度均有所减小。8 度中震时，1 层顶隔震、2 层顶隔震、3 层顶隔震的下部结构顶层加速度平均值分别为基础固接结构的 70.9%、96.6%、89.5%；8 度大震时，1 层顶隔震、2 层顶隔震、3 层顶隔震的下部结构顶层加速度平均值分别为基础固接结构的 82.8%、92.5%、86.3%；下部结构加速度减震效果受到地震波幅值、频谱特性、隔震层的位置、隔震前结构特性等因素的

2.4 层间位移反应

表 3 为隔震前后的各层最大层间位移角，表 4

为隔震层最大层间位移。8 度中震时，基础固接模型最大层间位移角为 1/168，各种隔震型式模型最大层间位移角为 1/335。8 度大震时，基础固接模型最大层间位移角为 1/97，各种隔震型式模型最大层间位移角为 1/198。与基础固接模型对比，隔震后模型的最大层间位移角均有所减少，基础固接模型在 8 度中震时即已进入弹性，层间位移角超过《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)的 1/250 的弹性层间位移角限值。8 度大震输入时，基础固接模型的最大层间位移角已超过 1/100，而隔震模型的最大层间位移角接近 1/200，隔震效果明显。从隔震层层间位移可见，隔震模型的隔震层层间位移明显大于其它层，结构的变形主要集中在隔震层，隔震层层间位移受到地震波幅值、频谱特性的影响，随隔震层位置的上移变化较小(四条波平均后)。

2.5 层剪力系数

8 度中震、大震时，隔震模型与基础固接模型

表 3 层间位移角 (1/rad)
Table 3 Maximum story drift angle (1/rad)

结构型式	8 度中震				8 度大震			
	El Centro	Taft	人工波 1	人工波 2	El Centro	Taft	人工波 1	人工波 2
基础固接	296	232	282	168	131	119	130	97
基础隔震	821	640	598	549	419	377	290	247
1 层顶隔震	401	396	443	342	282	228	234	249
2 层顶隔震	624	488	566	625	370	287	309	337
3 层顶隔震	549	379	396	335	277	198	214	203

表 4 隔震层最大层间位移 (mm)
Table 4 Maximum story displacement of isolation layer (mm)

结构型式	8 度中震					8 度大震				
	El Centro	Taft	人工波 1	人工波 2	平均	El Centro	Taft	人工波 1	人工波 2	平均
基础隔震	3.76	4.22	4.78	5.63	4.59	9.44	11.44	13.49	17.28	12.91
1 层顶隔震	4.25	5.22	5.48	4.97	4.98	11.54	13.65	13.73	11.60	12.63
2 层顶隔震	4.01	5.83	5.10	4.77	4.93	10.75	11.12	11.46	14.20	11.88
3 层顶隔震	3.23	5.32	5.35	5.26	4.79	10.60	16.85	13.13	13.72	13.57

的层剪力系数的比值见表 5,从层剪力系数的比值可见,与基础固接模型相比,隔震层位置不同的隔震模型,层剪力系数均得到有效降低,基础隔震效果显著,随着隔震层位置的提高,上、下部结构的层剪力系数比值的整体平均值均呈现提高的趋势。

3 有限元分析与试验结果对比

采用 SAP2000 建立天然橡胶支座+黏滞阻尼器层间隔震结构的三维有限元模型,黏滞阻尼器模型采用 Maxwell 模型。有限元分析采用 8 度大震 X 向输入 Taft 波和人工波 1 时台面响应的值作为输

入波,表 6 为有限元分析和试验的隔震层最大层间位移对比,图 6 为人工波 1 部分工况的加速度时程、隔震层层间位移时程对比。分析结果与试验结果比较,实测加速度偏大,误差在 25%以内;隔震层最大层间位移误差较小。比较可见,有限元分析结果和试验结果吻合较好。

4 结论

本文采用天然橡胶支座及黏滞阻尼器作为隔震层,对层间隔震模型结构进行了振动台试验研究及有限元分析,主要结论为:

- (1) 天然橡胶支座+黏滞阻尼器层间隔震可明

表 5 层剪力系数的比值
Table 5 The ratio of story shear force coefficient

结构型式	8 度中震				8 度大震			
	上部结构最大比值	下部结构最大比值	上部结构整体平均比值	下部结构整体平均比值	上部结构最大比值	下部结构最大比值	上部结构整体平均比值	下部结构整体平均比值
基础隔震	0.387		0.287		0.298		0.220	
1 层顶隔震	0.583	0.406	0.387	0.316	0.454	0.327	0.299	0.300
2 层顶隔震	0.567	0.538	0.439	0.388	0.436	0.488	0.344	0.372
3 层顶隔震	0.622	0.595	0.504	0.434	0.491	0.560	0.438	0.414

表 6 隔震层最大层间位移对比 (mm)
Table 6 Comparison of the maximum story displacement of isolation layer (mm)

结构型式	8 度大震隔震层最大层间位移/mm			
	Taft		人工波 1	
	试验值	计算值	试验值	计算值
基础隔震	11.44	11.27	13.49	15.39
1 层顶隔震	13.65	11.97	13.73	14.06
2 层顶隔震	11.12	9.79	11.46	10.89
3 层顶隔震	16.85	15.40	13.13	12.59

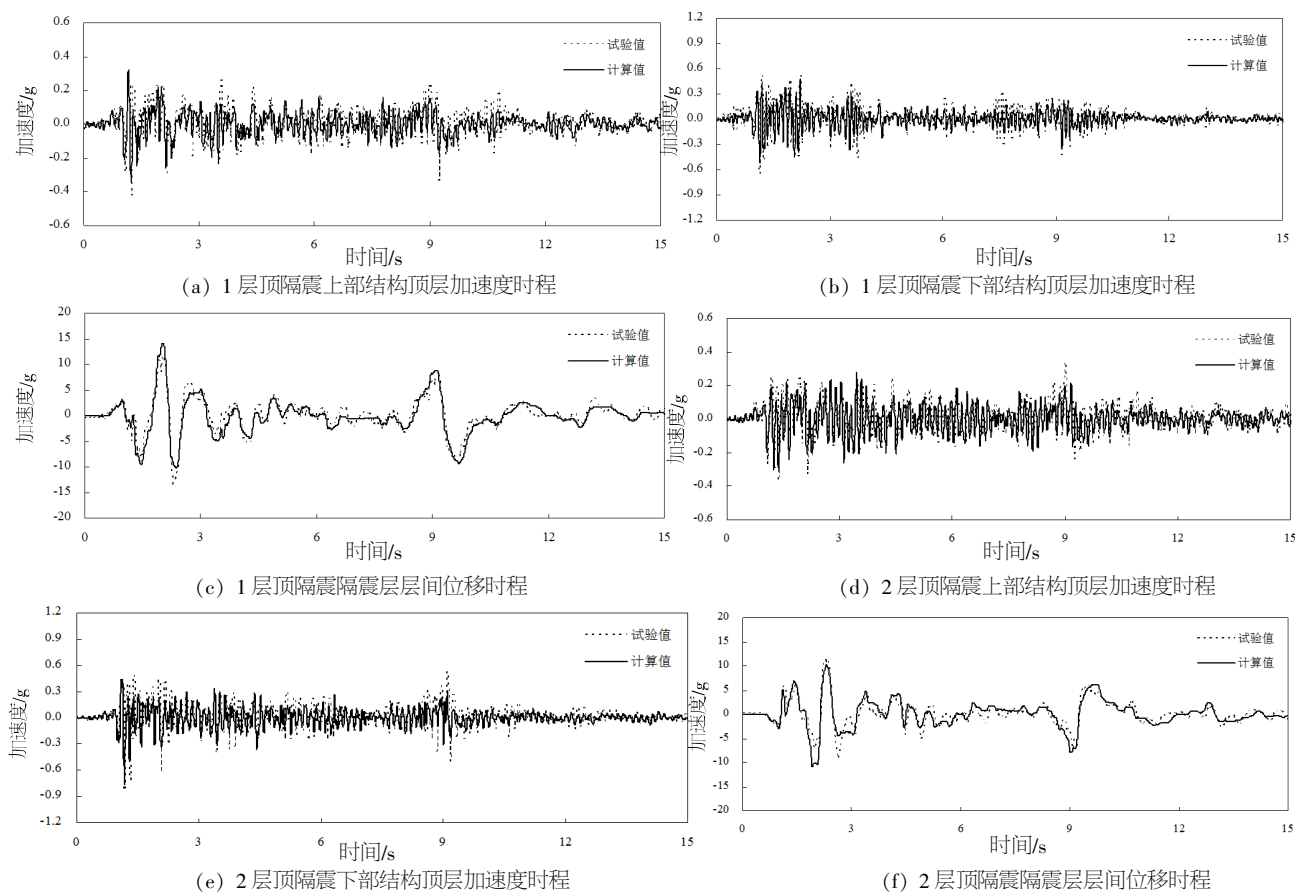


图6 时程对比

Fig.6 Comparison of time-history

显降低隔震前周期为 1 s 左右结构的地震响应。

(2) 与基础固接结构相比,除部分地震波输入时下部结构的加速度外,隔震结构的加速度、层间位移及层剪力系数等地震响应均得到有效降低,基础隔震效果最为显著,随着隔震层位置的提高隔震效果降低,尤其是隔震层位于结构中上部的 3 层顶隔震,隔震效果较差。

(3) 有限元分析与试验结果对比表明,加速度峰值有较好的近似,隔震层最大层间位移误差较小,时程曲线吻合较好。

采用天然橡胶支座及黏滞阻尼器作为隔震层的层间隔震结构可起到降低结构地震响应的作用,但采用该类隔震层,应另设置抗风装置以起到抗风的作用。

参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [2] 小林正人, 洪忠熹ほか. 中間層免震建物の振動特性と地震応答性状[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000, B-2 (9): 551-552.
- [3] 小野三千代, 寺本隆幸. 中間層免震建物における免震層の軸方向変動[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002, B-2 (8): 451-452.
- [4] Tan P., Zhou F. L., Xu Z.G. Design and application examples of public and regular apartment buildings using a new isolation system in P.R. China [C] // Proceedings of the 7th International Seminar Assisi, Italy, 2001 (1): 702-707.
- [5] 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.
- [6] Xiangyun Huang, Fulin Zhou, Sheliang Wang, et al. Experimental Investigation on Mid-Story Isolated Structures [C] // The 2011 International conference on Structures and Buildings Materials, Guangzhou, P.R. China, 2011 (1): 4 014-4 021.
- [7] 祁 皓, 郑国琛, 阎维明. 考虑参数优化的层间隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30 (2): 8-16.
- [8] 日本隔震结构协会编, 蒋通, 冯德民译校. 被动减震结构设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.