

易鸣,姚运生,王秋良,等.某框架结构基础隔震地震反应对比分析[J].地震工程学报,2019,41(2):340-346.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.340

YI Ming, YAO Yunsheng, WANG Qiuliang, et al. Seismic Response Analysis of the Base Isolation of a Frame Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 340-346. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.340

某框架结构基础隔震地震反应对比分析

易 鸣¹, 姚运生^{1,2}, 王秋良¹, 魏 勇¹, 雷 霆³

(1. 中国地震局地震研究所(地震预警湖北省重点实验室), 湖北 武汉 430071;

2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 3. 中建三局, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于结构动力学原理和有限元基本理论, 利用 SAP2000 有限元分析软件, 以某框架结构基础隔震楼和与其相近的非隔震楼为研究对象分别建立分析模型, 运用动力时程分析法对两种模型进行水平地震反应分析。结果表明: 基础隔震楼的水平向地震反应远小于非隔震楼, 其上部结构的自振周期明显大于非隔震楼, 其层间剪力和基底剪力、楼层相对位移和加速度低于非隔震楼。总体来说, 隔震支座可以显著降低水平向地震对于结构的不良反应, 值得推广应用。

关键词: 基础隔震; 地震反应; 动力时程分析; SAP2000

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0340-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.340

Seismic Response Analysis of the Base Isolation of a Frame Structure

YI Ming¹, YAO Yunsheng^{1,2}, WANG Qiuliang¹, WEI Yong¹, LEI Ting³

(1. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;

3. China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Based on the principle of structural dynamics and the basic theory of the finite element method, the finite element analysis software SAP2000 was used to establish an analytical model for an actual frame structure base isolation building and a similar non-isolated building, respectively. The dynamic time history analysis method was applied to analyze the horizontal seismic responses of the two models. The results showed that the horizontal seismic response of the base-isolated building was much smaller than that of the non-isolated building, and the natural period of the superstructure of the base-isolated building was significantly larger than that of the non-isolated building. Moreover, the interstory shear force, basement shear force, and the relative displacement and acceleration of the floor were lower than those of the non-isolated building. In general, isolation bearings can significantly reduce the adverse effects of horizontal ground motion on a structure and thus deserve propagation.

Keywords: base isolation; seismic response; dynamic time-history analysis; Sap2000

收稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572354)

第一作者简介: 易 鸣(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为结构抗震。E-mail: 1727544833@qq.com。

通信作者: 姚运生(1962-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。E-mail: yunsheng@eqhb.gov.cn。

0 引言

相比于传统的抗震技术,基础隔震技术作为一种新的抗震设计思想已经被广泛应用于各类建筑物中。2008 年芦山县医院运用隔震技术建造的大楼在之后的雅安地震中几乎完好无损,说明了隔震技术的优势。基底隔震的基本思想是在结构物地面以上部分的底部设置隔震层,使之与固结于地基中的基础顶面分离开,从而限制地震动向结构物的传递^[1]。目前国内隔震建筑结构形式主要以多层砌体结构和钢筋混凝土结构为主^[2],如国内最大的隔震建筑北京新机场、昆明机场等都采用了基础隔震技术。近年来,许多学者对隔震建筑的核心技术和抗震性能进行了研究和改良。徐忠根等对高层建筑隔震体系开展了试验和理论相结合的研究,于 1993 年主持完成我国第一栋橡胶隔震建筑^[3];祁凯等^[4]提出了改进基础隔震结构地震作用简化方法;王曙光等^[5]也对隔震建筑设计的关键问题进行了研究,分析结构高阶振型的影响和隔震支座受拉等一系列问题,并对规范反应谱的阻尼系数和形状参数提出了修改意见。通过前人所做研究可以看出,依据实际建筑模拟研究隔震结构地震动响应的工作较少,本文则以某一实际存在工程隔震楼为背景,与其邻近的结构相似的非隔震楼作对比,来研究该隔震楼的隔震性能。

本文运用 SAP2000 有限元分析软件对实际框架结构基础隔震楼和与其结构类似的非隔震楼进行模型的建立(图1),分别选取不同的地震动时程输

入到模型中,进行动力时程分析,比较二者的地震反应特性。通过对比分析结构地震反应关键参数的差异,进一步探讨隔震技术的应用前景。

1 工程概况

本工程为一钢筋混凝土框架结构,地上两层,局部三层,在一层下布置 0.5 m 高的隔震层,结构楼总高度为 18.29 m。平面布置较规则,质量和刚度中心基本位于结构正中央。本工程结构设计使用年限为 50 年,建筑结构的安全等级为二级,建筑场地类型为中软土,场地特征周期为 $T_g=0.35$ s,建筑场地类别为 II 类,抗震设防类别为丙类(标准设防),设防烈度为 VI 度,基本地震动加速度为 $0.05g$,结构阻尼比为 $\zeta=0.05$ 。

本次研究的隔震楼所使用的隔震装置为圆形叠层橡胶支座,共 50 套,其中包括铅芯橡胶隔震支座(LRB)22 套,天然橡胶隔震支座(LNR)28 套,直径有 400 mm 和 500 mm 两种尺寸,统一布置在各框架柱下,其型心同框架柱界面中心重合。支座布置图如图 2 所示。隔震支座的几何参数以及力学性能指标列于表 1 和表 2。

2 模型建立

利用有限元分析软件 SAP2000 对该框架结构进行建模,根据实际房屋结构的材料来定义模型中各个材料的属性。梁柱构件采用杆系单元模拟,节点约束采用刚结;楼板采用膜单元模拟;隔震支座采用连接单元模拟,普通橡胶支座定义为线性模型,铅芯橡胶支座定义为非线性恢复力模型^[6]。非隔震楼采用固定支座单元代替隔震支座模拟单元。另外在建立模型时,由于框架填充墙受到的内力非常小,属于非承重构件,且其刚度较小,对地震作用下结构物受力影响不大,所以把填充墙当作是施加在框架上的均布荷载来考虑是可行的^[6]。同时结构建模暂时也未考虑楼梯等的影响。隔震楼和非隔震楼的模型如图 3 所示。

3 地震波的选取与分析

3.1 地震波的选取

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[7](简称抗规)5.1.2,在采用时程分析法时,应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线。故本次分析选用了 3 条适



(a) 隔震楼



(b) 隔震支座

图 1 隔震楼及隔震支座

Fig.1 Isolation building and isolation bearing

用于Ⅱ类场地的地震波,其中两条为实际强震动观测记录,分别是1940年南北向El-Centro地震波和

东西向迁安波,另一条是根据规范反应谱模拟的人工波(图4)。

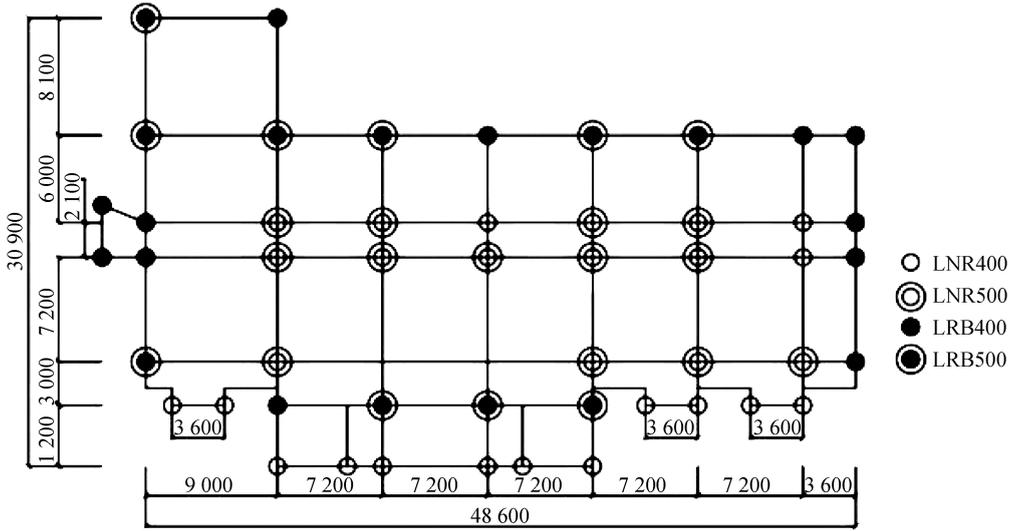


图2 隔震支座布置图(单位:mm)

Fig.2 Layout drawing of isolation bearings (Unit:mm)

表1 隔震支座几何参数

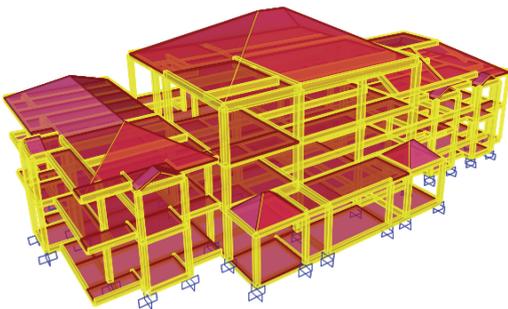
Table 1 Geometric parameters of isolation bearings

支座型号	有效直径/mm	铅芯直径/mm	内部橡胶厚度/mm	支座总高度/mm
LNR400	400	-	80	184
LNR500	500	-	100	211
LRB400	400	80	80	184
LRB500	500	100	100	211

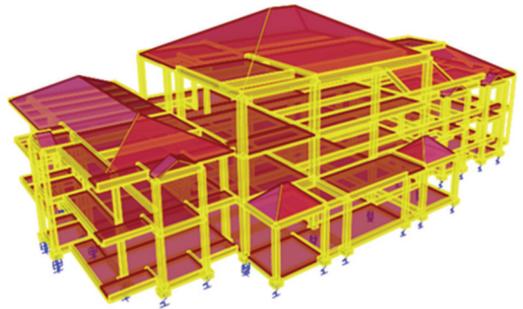
表2 隔震支座力学性能指标

Table 2 Mechanical performance indexes of isolation bearings

支座型号	竖向刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服力 /kN	50%水平剪切变形		100%水平剪切变形	
			等效水平刚度 /(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比 /%	等效水平刚度 /(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比 /%
LNR400	1 440.3	-	0.60	-	0.60	-
LNR500	1 825.8	-	0.751	-	0.751	-
LRB400	1 692.2	39.0	1.707	0.323	1.102	0.263
LRB500	2 115.3	61.0	2.133	0.323	1.378	0.263



(a) 非隔震楼



(b) 隔震楼

图3 隔震楼和非隔震楼模型

Fig.3 Models of base-isolated building and non-isolated building

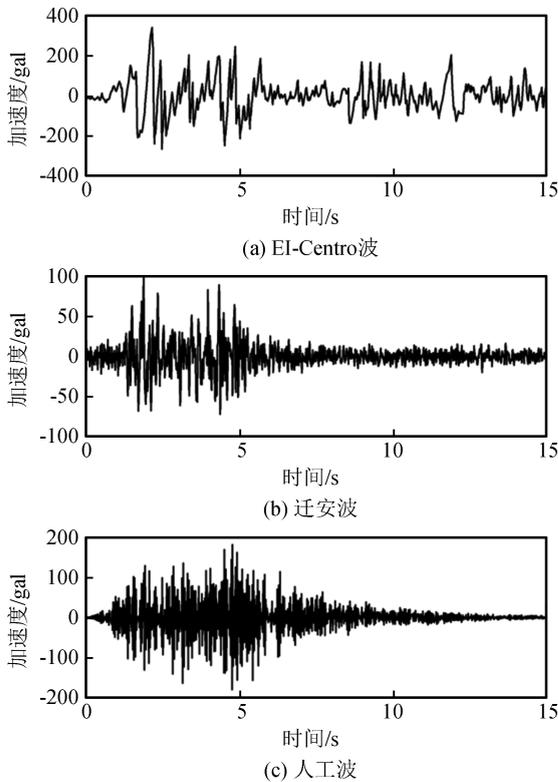


图 4 选取的天然波和人工合成波

Fig.4 Natural waves and synthetic waves selected in the study

根据抗震设计规范,6 度抗震设防烈度下的设计基本地震加速度为 49 cm/s^2 ,多遇地震加速度时程峰值为 18 cm/s^2 ,罕遇地震加速度时程峰值为 125 cm/s^2 。建筑场地的多遇烈度、罕遇烈度、设防烈度应同选取的地震波主振型的加速度峰值相对应,使选出的地震记录的地震最大加速度和地震烈度的地震最大加速度相等^[8],即:

$$A_t = \frac{A_{\max}}{a_{\max}} a_t \quad (1)$$

表 4 非隔震楼和隔震楼的自振周期对比

Table 4 Comparison between the natural periods of the non-isolated building and base-isolated building

振型	周期/s		周期比	振型	周期/s		周期
	隔震楼	非隔震楼			隔震楼	非隔震楼	
1	1.458	0.553	2.637	7	0.215	0.173	1.243
2	1.373	0.525	2.615	8	0.203	0.160	1.269
3	1.217	0.444	2.741	9	0.196	0.158	1.241
4	0.349	0.239	1.460	10	0.167	0.139	1.201
5	0.314	0.200	1.570	11	0.159	0.128	1.242
6	0.270	0.176	1.534	12	0.155	0.115	1.347

时从图 5 中也能够直观地看出隔震与非隔震楼前十二阶自振周期的变化,其中前三阶的自振周期相差较大,而高阶振型的自振周期则相接近。模态分析结果表明:基础隔震建筑物的自振周期显著高于非隔震结

其中: A_t 为调整之后的地震波; A_{\max} 为相应烈度下统计的峰值加速度; a_t 为选取的地震波; a_{\max} 为选取的地震波的峰值加速度。

3.2 地震波分析

根据《抗规》^[7] 5.1.2 条规定,弹性分析时程时,每条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 65%,多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%。为了验证所选的三条地震波的合理性,利用软件分别采用时程分析和振型分解反应谱的方法分别计算出非隔震楼在 VI 度设防地震下的底部剪力。计算对比结果列于表 3,可以看出所选的地震波均可用于工程计算。

表 3 时程分析和振型分解反应谱的底部剪力对比

Table 3 Comparison between the bottom shear forces obtained by the time history analysis method and the mode-superposition response spectrum method

	X 向		Y 向	
	基底剪力 /kN	时程/反应谱	基底剪力 /kN	时程/反应谱
反应谱	437.1	-	359.6	-
El-Centro	432.1	98%	409.5	114%
迁安波	719.6	164%	447.0	124%
人工波	460.9	105%	411.4	114%
平均	537.5	123%	422.6	117%

4 动力特性分析

4.1 自振周期

本结构选取前 12 个振型进行模态分析。隔震楼和非隔震楼的前 12 阶自振周期及其比值列于表 4。

根据表 4 可以看出,基础隔震的框架结构楼的自振周期要大于非隔震结构,二者的自振周期比在 1.201~2.741 倍间,尤其是前三阶振型尤为明显。同

构,从而能够有效避开场地的卓越周期,降低结构的地震反应,从而减轻结构在地震作用的损坏^[9]。

4.2 基底剪力

根据《叠层橡胶支座隔震技术规程》(CECS126:

2001)^[10]规定,在对结构进行多遇地震的时程分析时,隔震支座的有效刚度取50%水平剪切变形时的等效刚度;罕遇地震时,隔震支座的有效刚度取250%水平剪切变形时的等效水平刚度。由于篇幅原因,本文仅给出隔震楼与非隔震楼在调幅后 El-Centro 波(多遇地震)作用下的时程分析结果。

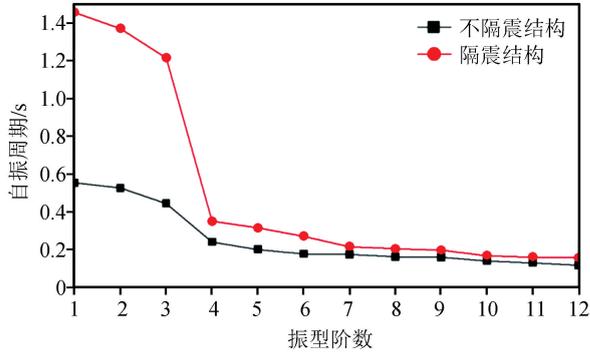


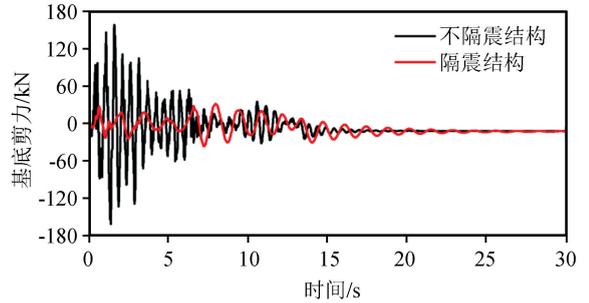
图5 隔震楼和非隔震楼自振周期对比

Fig.5 Comparison between natural periods of isolated and non-isolated buildings

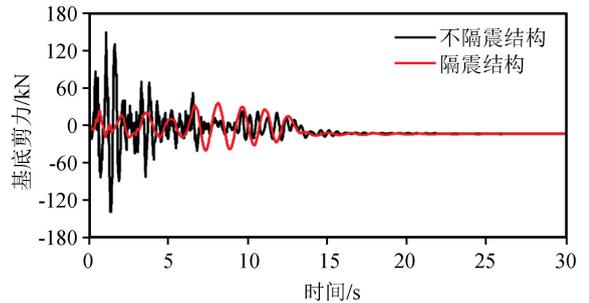
其中,隔震楼及非隔震楼在 X 向(长轴)和 Y 向(短轴)的基底剪力时程反应对比图如图 6 所示。结果显示,基础隔震楼在 X 向和 Y 向的基底剪力均要小于非隔震楼,其中 X 向基底剪力的最大值只有非隔震楼的 22.36%,Y 向的最大值也仅有非隔震楼的 25.33%。

4.3 层间剪力

在调幅后的 El-Centro 波作用下隔震楼与非隔震楼的层间剪力对比如表 5 所列(多遇地震动):隔震楼的层间剪力仅为非隔震楼的 15.78%~21.90%,减震效果明显。



(a) X向基底剪力



(b) Y向基底剪力

图6 隔震楼和非隔震楼基底剪力对比图

Fig.6 Comparison between base shear forces of isolated and non-isolated buildings

表5 隔震楼和非隔震楼层间剪力对比

Table 5 Comparison between inter-story shear forces of isolated and non-isolated buildings

楼层	X 向层间剪力/kN			Y 向层间剪力/kN		
	隔震楼	非隔震楼	剪力比	隔震楼	非隔震楼	剪力比
3	5.42	26.17	20.71%	6.40	35.36	8.10%
2	20.80	131.79	15.78%	19.78	123.47	16.02%
1	27.31	161.06	16.96%	29.96	136.79	21.90%

4.4 层间位移

由于 SAP2000 软件没有层间位移的定义,仅有对结构物各个节点的位移输出,所以选择各个楼层的若干节点,输出其在调幅后 El-Centro 波作用下的 X 向和 Y 向节点位移,求其平均值作为该楼层的层间位移。各楼层的水平绝对位移对比如图 7 所示(其中‘0 层’表示隔震层,roof1、roof2 表示两个屋顶)。结果显示,由于地震动强度较小,隔震楼和非隔震楼的位移值都比较小,约 8~9 mm,且因为 X 向(长轴)在第二、三层之间结构存在差异(图 3),导致位移发生突变,而 Y 向(短轴)则位移变化较为均衡;隔震楼和非隔震楼的水平位移都是

自下而上逐步增加,其中非隔震楼的水平位移大部分发生在上部结构中,顶层和底层相对位移量较大,分别为 8.34 mm(X 向)和 8.65 mm(Y 向);而隔震结构楼的水平位移则主要集中在隔震层,上部结构的相对位移较小,分别为 0.05 mm(X 向)和 0.07 mm(Y 向),在水平地震作用下几乎处于整体平动的运动状态,这是因为基础隔震层的刚度较小,吸收了大部分的地震波能量,大大减小了上部结构的水平地震反应。

4.5 层间加速度

选取隔震楼和非隔震楼顶层的加速度作为参考量进行对比(图 8)。从图 8 中可以看出,在调幅后

的 EI-Centro 波作用下,隔震楼顶层的加速度要明显低于非隔震楼,其中隔震楼的顶层加速度仅为非隔震楼的 12.13%(X 向)和 17.67%(Y 向)。同时,隔震楼和非隔震楼各楼层之间的加速度均自下而上逐步增加,且隔震结构的顶层与最底层的变化率仅

为 1.04,要小于非隔震结构的 1.48,这说明了基础隔震层可以有效地吸收水平地震波的能量,阻隔地震能量在结构物中的纵向传递,大大减小水平地震对结构物的不良反应,使上部结构物能够在地震作用下处于整体平动的状态。

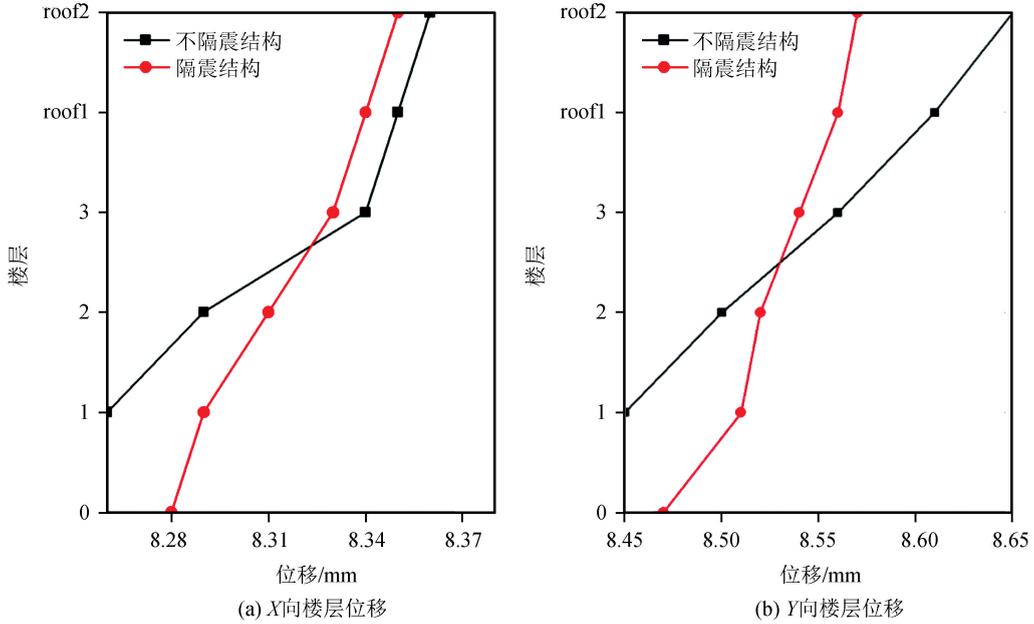


图 7 隔震楼和非隔震楼层间位移对比图

Fig.7 Comparison between the inter-story displacements of isolated and non-isolated buildings

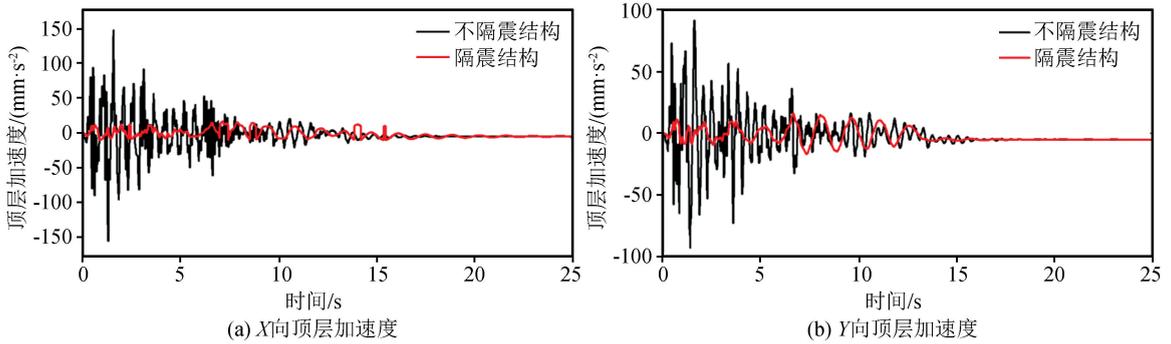


图 8 隔震楼和非隔震楼顶层加速度对比图

Fig.8 Comparison between top accelerations of isolation and non-isolated buildings

4.6 隔震层验算

根据《抗规》^[7]12.2 条房屋隔震设计的要点,隔震支座应进行竖向承载力的验算和罕遇地震下水平位移的验算。

对于丙类建筑,橡胶隔震支座在重力荷载代表值的竖向压应力不应超过 15 MPa。通过数值分析,得到该隔震结构楼的各个隔震支座在重力荷载作用下的最大压应力为 7.82 MPa,满足规范的规定。同时,对于该隔震楼,在根据罕遇地震下的 X 和 Y 方

向的不同地震荷载组合进行时程分析时,均满足规范规定的 $u_i = \eta_i u_c \leq [u_i]$,即考虑隔震支座的扭转影响系数情况下,罕遇地震作用下隔震层的各支座水平变形均未超过 150%。

5 结论

本文通过工程实例,对隔震楼和非隔震楼进行建模,分别选取天然地震波和人工合成地震波完成地震反应分析。由计算结果对比,得到如下结论:

(1) 基础隔震楼的自振周期对比非隔震楼显著延长,是非隔震结构的 1.20~2.74 倍。

(2) 基础隔震楼的基底剪力远低于非隔震楼,最大值仅为非隔震楼的 22.36%~25.33%;层间剪力也仅为非隔震楼的 15.78%~21.90%。

(3) 基础隔震楼在地震作用下的水平位移主要发生在隔震层,上部结构的层间位移量非常小,上部结构处于整体平动的状态;同时,隔震层在罕遇地震的水平位移要小于隔震支座的极限位移值。

(4) 基础隔震楼在地震作用下的顶层加速度峰值仅为非隔震楼的 12.13%(X 向)和 17.67%(Y 向),且隔震结构的底层到顶层的变化率为 1.04,低于非隔震楼的 1.48。

对比分析结果可以看出,基础隔震技术能够有效降低结构物的水平地震反应,基础隔震多层框架结构楼在地震多发区域可以广泛应用。

参考文献(References)

- [1] 李国强,李杰,陈素文,等.建筑结构抗震设计[M].第四版.北京:中国建筑工业出版社,2014.
LI Guoqiang, LI Jie, CHEN Suwen, et al. Seismic Design of Architectural Structure[M]. Fourth Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2014.
- [2] 唐克东,郭祥程,范程程.基础隔震多层钢框架结构地震反应分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(3):91-98.
TANG Kedong, GUO Xiangcheng, FAN Chengcheng. Seismic Response Analysis of Base Isolated Multi-layer Steel Frame Structure[J]. Engineering Earthquake Resistant and Reinforcement Transformation, 2017, 39(3): 91-98.
- [3] 徐中根,周福霖.我国首栋橡胶垫隔震住宅楼动力分析[J].世界地震工程,1996(1):38-42.
XU Zhonggen, ZHOU Fulin. Dynamic Analysis of the First Rubber Bearing Isolated Dwelling of Our Country[J]. World

- Earthquake Engineering, 1996(1): 38-42.
- [4] 祁皑,林于东.改进的基础隔震结构地震作用简化计算方法[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):152-157.
QI Ai, Lin Yudong. An Improved Simplified Method for Seismic Action Design of Base-isolation Buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 152-157.
- [5] 王曙光,杜东升,刘伟庆.高层建筑结构隔震设计关键问题[J].南京工业大学学报(自然科学版),2009,31(1):71-77.
WANG Shuguang, DU Dongsheng, LIU Weiqing. The Key Problems of High Building Structure Isolation Design[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 31(1): 71-77.
- [6] 魏勇,崔建文,王秋良,等.填充墙对于框架结构抗震性能影响分析[J].建筑结构,2017,47(增刊2):351-355.
WEI Yong, CUI Jianwen, WANG Qiuliang, et al. Analysis of Seismic Performance of Filled Wall to Frames[J]. Building Structure, 2017, 47(Supp2): 351-355.
- [7] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
Code for Seismic Design: GB50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [8] 胡文源,邹晋华.时程分析法中有关地震波选取的几个注意问题[J].南方冶金学院学报,2003,24(4):25-28.
HU Wenyuan, ZOU Jinhua. A Few Questions of Seismic Record's Choice for Time-travel Analyzing Method[J]. Journal of South Institute of Metallurgy, 2003, 24(4): 25-28.
- [9] 刘平.某工程基础隔震动力时程分析[J].福建建设科技,2012(1):19-21.
LIU Ping. Time History Dynamic Analysis of a Base Isolated Engineering[J]. Fujian Construction Technology, 2012(1): 19-21.
- [10] 叠层橡胶支座隔震技术规程:CECS126:2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
Laminated Rubber Bearing Isolation Technical Specification: CECS126:2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.