

# 框架结构基础隔震的减震效果分析<sup>\* 1</sup>

雷静雅<sup>1)</sup> 王开岭<sup>2)</sup> 罗登贵<sup>1)</sup> 王磊<sup>2)</sup> 曾心传<sup>1)</sup>

(1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071  
(2) 开封大学,开封 475004

**摘 要** 框架结构采用叠层橡胶支座基础隔震,根据叠层橡胶支座应满足的基本条件,运用 ANSYS 软件建立隔震结构计算模型,通过具体算例分析这种结构在破坏性地震作用下的减震效果,得出:1) 橡胶支座基础隔震的适用范围不只与结构高宽比有关,还与结构的自振周期有关,结构的自振周期大于 1,隔震结构的减震效果就会明显下降;2) 叠层橡胶支座基础隔震可应用于十四层以下的纯框架结构;十四层以上则减震效果不好,不能采用。

**关键词** 框架结构;叠层橡胶支座;基础隔震;减震;高宽比

**中图分类号:** TU352

**文献标识码:** A

## SEISMIC ANALYSIS FOR BASE ISOLATION OF FRAME STRUCTURE

Lei Jingya<sup>1)</sup>, Wang Kailing<sup>2)</sup>, Luo Denggui<sup>1)</sup>, Wang Lei<sup>2)</sup> and Zeng Xinchuan<sup>1)</sup>

(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071  
(2) Kaifeng University, Kaifeng 475004

**Abstract** The frame structure uses laminated rubber bearings base isolation, according to the basic conditions of laminated rubber bearings, using the ANSYS software to establish the calculation model of the isolated structure, the damping effect of this structure in the rare earthquake is analyzed through a specific example. Finally, two conclusions are proposed. 1) The application scope of rubber bearings base isolation is not only associated with the structure of the height to width aspect ratio, but also associated with the structure of the natural period. If the vibration period of the structure is greater than 1, the damping effect of the isolated structure will be significantly decreased. 2) Laminated rubber bearings base isolation can be applied to the pure frame structure with the following 14 floors; the 14 layer can be used, but the damping effect is not good; 14 floors above can not be used.

**Key words:** frame structure; laminated rubber bearing; base isolation; earthquake response reduction; height to width aspect ratio

## 1 引言

近年来,我国发生了多次破坏性地震,特别是汶川、玉树地震,造成的人员伤亡和财产损失尤为惨重,造成人员伤亡最主要的原因是建筑物倒塌。建筑物发生倒塌破坏除与地震地质、地形地貌等有

关,还与建筑物本身的结构有关。国内外专家学者研究了多种减隔震技术来减轻建筑物的震害,在众多防震减灾技术中,叠层橡胶支座基础隔震体系被认为是隔震技术迈向实用化最卓有成效的体系<sup>[1-3]</sup>。基础隔震结构的发展也越来越受到关注,但是,国内外在不同层数的框架结构建筑物基础隔

\* 收稿日期:2012-10-23

基金项目:中国地震局地震研究所所长基金(1S200716004)

作者简介:雷静雅,女,1978 年生,硕士,工程师,研究方向:主要从事结构抗震及减隔震研究. E-mail: jingya0915@126.com

震的减震效果方面的研究仍很缺乏,我国新修订的国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)也还没有对此作出明确规定。

鉴于此,本文采用 ANSYS 软件模拟一种平面布置状态下的隔震结构,分析这种结构的基础隔震技术的应用效果。

2 分析模型

上部结构采用层间剪切模型<sup>[4,5]</sup>,隔震层采用弹簧加阻尼的模型(图 1)。

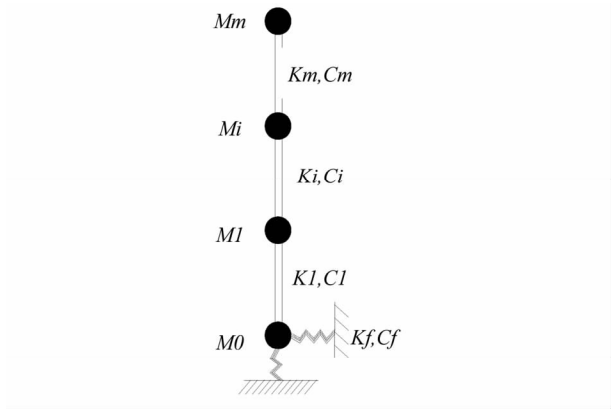


图 1 隔震结构的力学模型  
Fig. 1 Mechanical model of isolated structures

基础上部设隔震层,其等效水平刚度为  $k_f$ ,等效阻尼系数分别为  $c_f$ 。

结构的运动方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -MI\ddot{x}_g(t) \tag{1}$$

式中, $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为主结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $x = (x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n)^T$  为主结构各层相对于地面的位移向量; $\dot{x} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \cdots, \dot{x}_i, \cdots, \dot{x}_n)^T$  为主结构各层相对于地面的速度向量; $\ddot{x} = (\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \cdots, \ddot{x}_i, \cdots, \ddot{x}_n)^T$  为主结构各层相对于地面的加速度向量; $I = (1, 1, \cdots, 1, \cdots, 1)^T_{1 \times N}$  为单位向量。

3 隔震结构高宽比限值

1) 支座限值的决定因素<sup>[6,7]</sup>

隔震层边缘支座不受拉;隔震层边缘橡胶支座所受压力不超过橡胶支座的极限抗压强度。

2) 橡胶支座的受力状态

一部分为竖向力,另一部分是水平地震作用。假设支座均匀对称布置,故在竖向地震和重力作用下,各支座竖向力相等并取为  $f_g$ ,而水平地震作用产生的是一端支座受拉、一端支座受压的受力状态(令此时边缘一排橡胶支座每个所受分布力为  $f_m$ )。

所以满足条件(1)的要求可表示为:

$$f_g - f_m \geq 0 \tag{2}$$

$$f_g + f_m \leq f_A \tag{3}$$

式中, $f$  为橡胶支座的极限抗压强度,一般可达 15 ~ 20 MPa; $A$  为单个橡胶支座的面积。

4 隔震层位移

隔震支座对应于罕遇地震水平剪力的水平位移,应符合<sup>[8]</sup>

$$u \leq U \tag{4}$$

$$U = \min(0.55d, 3t_r) \tag{5}$$

式中, $u$  为罕遇地震作用时隔震层最大层间位移, $U$  为隔震支座容许位移, $d$  为隔震支座直径。

与隔震支座的水平位移限值对比,若每个隔震支座的位移均不大于相应的位移限值,则满足隔震的要求,否则,需调整隔震支座型号或参数,重新进行计算。

5 算例分析

采用结构平面布置如图 2 所示的框架结构办公楼,分别计算楼层总层数为六层、八层、十层、十一层、十三层、十四层、十五层的七种情况下结构在破坏性地震作用下的不同地震响应,层高均为 3.3 m,柱子截面尺寸均为 500 mm × 500 mm。场地类别为 II 类,抗震设防烈度为 7 度,用 Ansys 建立其分析模型,其中梁、柱选用 BEAM4 单元,板选用 SHELL63 单元,橡胶支座用 COMBINE14 和 COMBINE40 单元来模拟,所选橡胶支座参数见表 1。

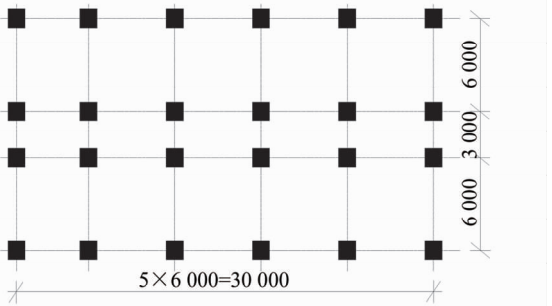


图 2 结构的平面布置(单位:mm)  
Fig. 2 The layout of the strcuture(unit: mm)

本文输入 EW 向 EL-Centrol 波,截取前 15 s,分别对非隔震结构、隔震结构分别进行时程分析,采用 Newmark- $\beta$  法,取  $\gamma = \frac{1}{2}$ ,  $\beta = \frac{1}{4}$ ,步长  $\Delta t = 0.02$  s,将加速度幅值调整到 4.0 m/s<sup>2</sup>,在罕遇地震下对结构进行分析。

6 减震效果分析

1) 从表 2 可看出:从八层到十四层的每个支座

所受的压力均大于所受拉力,符合隔震结构高宽比限值的条件;十五层的边缘支座所受的拉力为 3 680 420N,大于支座所受压力 2 230 031N,所以十五层的结构不适合使用橡胶支座。

表 1 橡胶支座的参数<sup>[7]</sup>

Tab.1 Parameters of rubber bearings							
型 号	数 量	有效	铅芯	竖向	等效	等效	屈服
		直径	直径	刚度	刚度	阻尼比	力
		(mm)	(mm)	(KN/mm)	(KN/mm)	(%)	(kN)
GZY500—V6A 12	500	100	1972	1.88	22.4	65.3	
GZY600—V6A 12	600	120	3213	2.5	21.9	94.1	

表 2 各栋建筑的基本数据

Tab.2 Basic data of each architecture							
层数	支座直径 (mm)	每个支座承受的压 力(N)	地震作用下对 边支座产生的 拉力 (N)	非隔震结 构基本周 期(s)	隔震结 构基本周 期(s)	薄弱层 弹塑性 层间位 移角	
八	500	877 500	450 974	0.9	1.4	1/134	
十	500	1 096 875	664 600	1.0	1.6	1/171	
十一	500	1 306 387	793 230	1.1	1.7	1/183	
十三	500	168 337.5	125 450 0	1.3	2.0	1/167	
十四	500	189 656 2.5	160 102 0	1.5	2.1	1/154	
十五	600	223 003 1	368 042 0	1.5	2.3	/	

2)各结构的隔震结构的基本周期比非隔震结构的基本周期明显增大,且各结构的薄弱层的层间位移角均小于 1/100,满足抗震规范要求。

3)从表 3 可看出,十层框架结构及以下的建筑,顶层最大层间位移减少量在 70 % 左右,隔震效果非常明显;十一层及其以上结构顶层层间位移减少量在 11.6 % ~49.2 % ,可以看出其隔震效果明显小于十层及其以下。

表 3 顶层层间位移及加速度比较

Tab.3 Comparison of displacement and acceleration of the top layers						
层数	顶层层间位移			顶层最大加速度		
	非隔震 (mm)	隔震 (mm)	减少 (%)	非隔震 (m/s <sup>2</sup> )	隔震 (m/s <sup>2</sup> )	减少 (%)
八	8.6	2.5	70.9	10.37	6.04	41.8
十	8.5	2.4	71.7	10.94	6.41	41.4
十一	6.1	3.1	49.2	8.75	6.70	23.4
十三	4.3	3.8	11.6	7.95	6.48	18.5
十四	6.1	4.6	24.6	8.47	6.06	28.5

4)从表 4 可看出,十四层框架结构虽然层间位移有减少但是减少量很小,且第一、二层的层间位移及一到五层的加速度是增大的,其减震效果较差。

表 4 十四层框架结构在罕遇地震作用下的地震响应

Tab.4 Earthquake response of 14 layer frame structure under the severe earthquake				
楼层	各层最大层间位移 (mm)		各层最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )	
	无支座	有支座 增、减	无支座	有支座 增、减
隔震层	/	55.6	/	1.77
一	6.1	21.3 增 71.4%	1.70	3.42 增 50.3%
二	12.3	16.8 增 36.6%	1.84	4.64 增 63.6%
三	15.3	15.2 减 0.6%	2.66	5.13 增 48.1%
四	15.7	14.5 减 7.6%	3.42	5.07 增 32.5%
五	15.0	14.2 减 5.3%	4.11	4.70 增 12.6%
六	15.0	13.9 减 7.3%	4.44	4.20 减 4.5%
七	13.2	13.2 减 0%	4.40	4.36 减 0.9%
八	13.2	12.4 减 6.1%	4.31	4.45 增 3.2%
九	11.4	11.3 减 0.9%	5.12	4.44 减 13.3%
十	11.3	10.2 减 9.7%	6.03	4.87 减 19.2%
十一	10.4	8.7 减 16.3%	6.83	5.26 减 23.0%
十二	9.5	7.3 减 23.2%	7.51	5.96 减 20.6%
十三	7.4	5.9 减 20.3%	8.06	5.86 减 27.3%
十四	6.1	4.6 减 24.6%	8.47	6.06 减 28.5%

7 结论

1) 橡胶支座基础隔震的适用范围不只与结构高宽比有关,还与结构的自振周期有关。结构的自振周期大于 1,隔震结构的减震效果就会明显下降。自振周期过大表明结构越柔,隔震结构的层间位移和加速度较之非隔震结构反而上升,这是因为叠层橡胶支座本身是用其自身的柔性来消耗地震在建筑

物的基底产生的能量,如果非隔震结构自身过于柔性,则采用橡胶支座基础隔震就达不到减震的目的;

2) 叠层橡胶支座基础隔震可应用于十四层以下的纯框架结构;十四层可以采用,但是减震效果不好,建议不采用;十四层以上不能采用。

参 考 文 献

1 周福霖,等. 我国结构隔震技术的发展应用和探讨[ A]. 工程结构隔震减震研究进展[ C]. 北京:地震出版社,2004.

2 楼永林,王敏权. 隔震技术的发展方向[ A]. 工程结构隔震减震研究进展[ C]. 北京:地震出版社,2004.

3 刘惠利,刘文光. 橡胶支座隔震建筑的特性及其最新发展趋势[ A]. 工程结构隔震减震研究进展[ C]. 北京:地震出版社,2004.

4 周福霖. 工程结构减震控制[ M]. 北京:地震出版社,1997.

5 日本免震构造协会. 隔震结构入门[ M]. 科学出版社,1998.

6 李宏男. 橡胶垫隔震支座结构高宽比限值研究[ J]. 建筑结构学报,2003,24(2)14 – 19.

7 党育,杜永峰,李慧. 基础隔震结构设计及施工指南[ M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

8 GB 50011—2010. 建筑抗震设计规范[ S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(上接第 37 页)

表 4 测站周期运动结果  
Tab.4 Results of periodic motion of stations

坐标分量	点名及仪器型号	年速率 (mm/a)	年周期项系数 A (mm)	年周期项系数 B (mm)	拟合残差 RMS(mm)
N	TS01 VNet6	- 15. 864 ± 0. 732	1. 737 ± 0. 228	0. 150 ± 0. 216	1. 140
	TS02 VNet6	- 18. 968 ± 0. 796	1. 918 ± 0. 220	- 0. 534 ± 0. 229	1. 081
	TSLN NetR8	- 14. 427 ± 0. 611	1. 315 ± 0. 209	- 0. 165 ± 0. 179	1. 177
E	TS01 VNet6	27. 634 ± 0. 530	1. 142 ± 0. 165	- 2. 979 ± 0. 155	0. 897
	TS02 VNet6	25. 925 ± 0. 611	0. 883 ± 0. 168	- 4. 002 ± 0. 175	0. 901
	TSLN NetR8	29. 793 ± 0. 458	0. 884 ± 0. 156	- 3. 361 ± 0. 133	0. 958
U	TS01 VNet6	3. 342 ± 1. 419	1. 022 ± 0. 432	- 1. 195 ± 0. 400	0. 874
	TS02 VNet6	- 5. 473 ± 1. 839	3. 873 ± 0. 500	- 2. 343 ± 0. 502	0. 987
	TSLN NetR8	0. 973 ± 1. 287	1. 099 ± 0. 420	- 2. 347 ± 0. 359	1. 013

4 结 论

经过对两套中海达 VNet6 GNSS 接收设备的常规测试和一年多的与天宝 NetR8、NetR9 GNSS 接收设备在唐山 GNSS 野外检定场的对比测试结果的分析,可以得出:

1) VNet6 GNSS 接收设备具有的功能和技术性能可以满足作为 CORS 站的观测设备的要求,长期观测也可以反映 CORS 站的长期变化;

2) VNet6 GNSS 接收设备如果用作更高精度和更高采样率要求的地壳运动监测的连续站的观测设备,需要在数据采样率、设备的抗多路径效应和抗电磁干扰能力等方面加以改进。

参 考 文 献

1 薄万举,等. GNSS 野外检定场[ J]. 测绘科学,2009,34(增刊):48 – 50.

2 中海达 VNet6 接收机[ J/OL]. [http://detail. china. alibaba. com/offer/1088912257. html](http://detail.china.alibaba.com/offer/1088912257.html).

3 ZYGPS-S035GPS 基准站天线[ J/OL]. [http://www. afzhan. com/st218/product\\_7808. html](http://www.afzhan.com/st218/product_7808.html).

4 地壳运动监测工程研究中心. 中国地壳运动观测技术规范[ M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.

5 Estey L H and Meertens C M. TEQC(1999),The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data[ J]. GPS Solutions, 1999, 3(1): 42 – 49.

6 占伟,等. 数据缺失对 GNSS 时间序列分析的影响[ J]. 大地测量与地球动力学,2013,(2):49 – 53.