

文章编号:1673-9469(2009)01-0001-04

## 建筑结构的复合加层减震分析

杨树标,胡光园,李荣华

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**论述了影响复合加层减震设计的主要因素和复合减震层的特点,利用有限元软件对一复合加层减震建筑结构进行了时程分析,结果表明:复合加层减震体系支座布置灵活,并能增大减震频率的带宽,减震效果也比较显著。

**关键词:**复合加层减震;复合减震层;时程分析;减震频率

**中图分类号:** TU352

**文献标识码:** A

### Analysis on compound adding story and seismic decrease for building structure

YANG Shu-biao, Hu Guang-yuan, Li Rong-hua

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** The main factor that affects designing of compound adding story and seismic decrease and characteristics of compound shock absorption layer are discussed. This paper uses time history analysis to analyze one building structure of compound adding story and seismic decrease in using finite element software. The results indicate that this shock absorption system can enlarge the bandwidth of shock absorbing frequency and the arrangement of support is flexible, and the damping effect is relatively remarkable.

**Key words:** compound adding story and seismic decrease; compound shock absorption layer; time history analysis; shock absorbing frequency

加层减震技术是运用结构被动调谐质量减震的基本原理,在已有建筑物上加层,达到提高已有建筑物的耐震性能的一种技术方法。加层减震技术一般可以使已有建筑耐震能力提高30%~50%;加层还能提高土地利用率增加建筑面积;此外由于采用加层减震,故对原有建筑物无须采用任何加强措施保护其一切构造,使用要求不受任何影响<sup>[1]</sup>。

目前加层减震结构中,减震层往往采用的是纯夹层橡胶垫,一般存在以下两个问题:一是支座的布置不够灵活,容易受结构平面形式和橡胶支座型号的限制,加层子结构自振频率不易满足设计最优自振频率<sup>[2]</sup>。二是在地震作用下减震频率带宽较窄<sup>[3]</sup>。

复合加层减震结构采用橡胶垫和摩擦滑动支座并联作为减震层,减震元件一部分为夹层橡胶垫,一部分为摩擦滑动支座,共同承担上部加层质

量,也同时起到减震作用<sup>[4]</sup>。通过合理的设计,减少橡胶垫的数量和托梁的截面可以降低结构的造价。并且复合加层减震层所表现出来的是一种非线性TMD的性质,使加层减震结构的减震频率带宽增大,可以有效的增强结构的减震效果。本文采用有限元时程分析方法,计算复合加层减震结构的地震反应,分析其减震效果,得到了一些有意义的结论。

### 1 影响设计方案的主要因素

#### 1.1 夹层橡胶垫型号的选择

加层减震是被动调谐振动控制体系(TMD)的一种,是一种附加在主结构上的子结构,通过调谐子结构的自振频率实现主结构的振动反应控制。大量的实际应用表明,加层减震结构能取得较好的减震效果,显著降低了结构的动力响应。

收稿日期:2008-10-20

作者简介:杨树标(1959-),男,河北保定人,教授,从事建筑抗震方面的教学与研究工作。

由于减震层只承受附加子结构的竖向荷载,所以减震元件所承受的竖向荷载相对较小。因此夹层橡胶垫的型号可以选择尺寸较小的,这样也能降低造价。

### 1.2 减震层侧移刚度的确定

在实际工程中,减震层位置、夹层橡胶垫和摩擦滑动支座的类型都是可以确定的,即减震层上下部质量比已确定,故只要对加层结构与原有结构的自振频率比进行优化就可以了。

文献[5]已给出两质点模型的优化频率比

$$\gamma_{opt} = \left[ \frac{a}{1+\mu} \right]^b \quad (1)$$

式中  $a = 1.0 - \zeta/4$ ;  $b = 1.35e^{3.2\zeta}$ ;  $\mu$  - 加层结构与原结构质量比;  $\zeta$  - 主结构阻尼比。

通过把  $\gamma_{opt}$  作为初参数进行数值搜索,可得到多质点体系下的加层减震模型结构最优频率比。由式  $\gamma = \omega_{\mp} / \omega_{\pm}$  及  $\omega^2 = K/m$  ( $K$  的值应取初始刚度  $K_1$ ), 就可以计算出加层子结构的最优自振频率。

如果用纯夹层橡胶垫,满足最优的子结构自振频率是存在一些困难的:受结构平面形式的限制,受橡胶支座型号的限制等。

## 2 复合减震层的特点

复合减震层是利用夹层橡胶支座作为复位元件,摩擦滑移支座作为耗能元件的一种加层减震层。它充分发挥了两种减震支座各自的优点,提高减震性能的同时,还可以降低造价。

复合减震层具有以下几个特点:

1) 复合减震层由橡胶垫和摩擦滑动支座组成,所以布置更加灵活,容易满足理论要求的子结构最优自振频率。

2) 复合减震层可形成非线性 TMD,子结构的等效线性刚度随结构振动强度的增加而减小,可适应更宽的激振频率,更适应于抗地震作用。复合隔震支座的滞回曲线呈双线性,具有初始刚度  $K_1$  和屈服刚度  $K_2$  [6]。

3) 复合减震层中的摩擦支座可以起到摩擦耗能的作用。

## 3 算例分析

### 3.1 计算模型及参数

下面以某六层框架为例,在上部加设一层,在其减震层分别设置纯夹层橡胶支座和复合减震支座,对其进行地震反应分析。该框架标准层高为 4m,结构总高度为 24m。主结构的总质量  $M = 2361.31t$ ,第一振型的频率  $f_1 = 1.547Hz$ ,加层结构的总质量  $M_d = 665.92t$ ,  $\mu = 28.2\%$ 。计算时结构体系阻尼比  $\zeta$  取 0.05,由公式(1)可以算出加层子结构的最优自振频率  $\gamma_{opt} = 0.66$ ,所以加层子结构的最优自振频率  $f = 1.021 Hz$ 。

### 3.2 计算结果与分析

方案 1:纯夹层橡胶支座加层减震方案,由于受到结构平面形式和橡胶支座型号的限制,减震层在采用 35 个型号全部为 GPY200 橡胶支座时,加层子结构的自振频率与最优频率比最为接近。GPY200 橡胶支座,其设计竖向承载力为 300kN,最大水平位移为 110mm,水平刚度为 0.90kN/mm,等效阻尼比为 25%;通过有限元软件计算采用这种方案的加层结构的自振频率  $f_1 = 1.029 Hz$ 。

复合加层减震方案,由于复合减震层是由夹层橡胶支座和摩擦滑移支座组成,所以布置形式就可以有很多种。下面列举三种复合加层方案采用有限元软件进行时程分析,进行对比。

方案 2:采用型号为 GPY250 的橡胶支座 26 个,摩擦滑移支座 9 个。

方案 3:采用型号为 GPY250 的橡胶支座 20 个,摩擦滑移支座 15 个。

方案 4:采用型号为 GPY250 的橡胶支座 14 个,摩擦滑移支座 21 个。

GPY250 橡胶支座,其设计竖向承载力为 500kN,最大水平位移为 138mm,水平刚度为 1.0kN/mm,等效阻尼比为 25%;摩擦滑移支座摩擦系数为 0.1。分别得到三种方案的自振频率  $f_2 = 1.028 Hz$ ,  $f_3 = 1.021 Hz$ ,  $f_4 = 0.991 Hz$ 。

为了方便比较减震效果,引入减震率概念 [7]:

$$\text{减震率} = \left( 1 - \frac{\text{加层减震结构反应峰值}}{\text{原结构反应峰值}} \right) \times 100\%$$

对抗震原结构和原结构采用方案 1,2,3,4 时的加层减震结构分别进行有限元时程分析,地震波选用二类场地的 EL Centro 波。表 1 给出了在 EL Centro 波 8 度罕遇地震作用下数层的加速度、层间位移反应峰值和减震率。

表1 加速度( $m/s^2$ )、层间位移(mm)反应峰值和减震率(%)  
Tab.1 The maximal acceleration, lateral displacement and decreasing amplitude ratio

		楼层						减震层	
		1	2	3	4	5	6		
二类场地 EL Centro 波	原结构	加速度	4.565	6.667	8.739	9.943	11.120	13.270	
		层间位移	17.55	26.76	26.03	22.42	16.44	9.41	
	方案 1	加速度	4.722	6.545	7.822	8.209	8.467	9.055	7.515
		减震率	-3.43	1.83	10.49	17.44	24.40	31.76	
		层间位移	17.19	24.13	22.14	17.92	12.71	7.27	122.4
		减震率	2.05	9.83	14.94	20.07	22.69	22.74	
	方案 2	加速度	3.478	3.185	3.812	4.495	5.847	6.880	6.383
		减震率	23.81	52.23	56.38	54.79	47.42	48.16	
		层间位移	10.53	14.01	12.71	10.72	8.61	6.27	117.11
	方案 3	加速度	3.473	3.172	3.915	4.542	5.480	6.321	5.100
		减震率	23.85	52.42	55.20	54.32	50.72	52.37	
		层间位移	9.52	12.71	11.48	9.69	7.78	5.28	93.75
		减震率	45.75	52.50	55.89	56.78	52.68	43.89	
	方案 4	加速度	3.458	3.100	3.916	4.627	5.198	5.782	3.786
		减震率	24.25	53.50	55.19	53.46	53.26	56.43	
		层间位移	9.85	13.16	11.89	10.01	8.05	5.71	81.76
		减震率	43.87	50.82	54.32	54.95	51.03	39.32	

表2 加速度( $m/s^2$ )和层间位移(mm)反应峰值  
Tab.2 The maximal acceleration and lateral displacement

		楼层						减震层	
		1	2	3	4	5	6		
一类场地 广州 1 波	ASS	加速度	7.016	4.666	5.867	4.867	4.060	6.451	
		层间位移	6.72	8.86	8.60	7.20	5.73	3.39	
	SRS	加速度	4.008	4.950	3.928	2.309	3.829	5.482	4.918
		层间位移	5.15	6.05	5.49	5.23	3.69	2.00	15.94
	CIS	加速度	3.087	2.204	2.208	2.427	3.204	3.799	2.126
		层间位移	2.42	3.23	2.92	2.46	1.98	1.47	12.96
三类场地 兰州 1 波	ASS	加速度	4.764	4.122	5.212	4.784	3.773	5.825	
		层间位移	8.31	11.26	9.71	7.3	5.12	3.11	
	SRS	加速度	3.054	4.221	4.119	3.135	3.427	3.959	3.243
		层间位移	8.02	9.53	7.42	7.84	6.59	4.61	51.27
	CIS	加速度	3.456	2.729	2.287	2.303	3.236	3.899	2.316
		层间位移	4.50	6.01	5.43	4.58	3.68	2.66	47.03

由表1可以看出:(1)方案2,3,4与方案1相比,各层的加速度和层间位移峰值均减少了很多,并且加层子结构的加速度和层间位移峰值也下降了很多。这说明在二类场地时复合加层减震体系要比纯夹层橡胶减震结构减震效果明显。(2)随着摩擦滑移支座数量的增加,楼层加速度的减震率在逐渐增大,但层间位移的减震率却有所降低。(3)总体来说,方案2,3,4各楼层加速度和层间位移的峰值相差并不大,减震率变化也不十分显著。

这说明复合减震层在布置支座上比较灵活,并且布置方案也比较多样。

为了验证频率带宽对加层减震结构的影响,从第一类和第三类场地分别两条波对加层结构进行地震时程分析,它们分别是一类场地广州1波和三类场地兰州1波。表2给出了在两条地震波8度罕遇作用下,主结构偶数层加速度和层间位移反应峰值(表中ASS代表抗震原结构、SRS代表纯夹层橡胶加层减震结构采用方案1、CIS代表复合

加层减震结构采用方案4)。

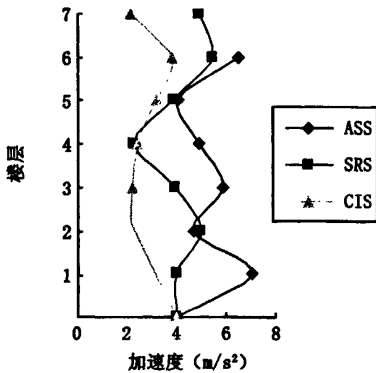


图1 广州1波时三种结构加速度比较  
Fig.1 The comparison of three structural acceleration under Guang Zhou 1 wave

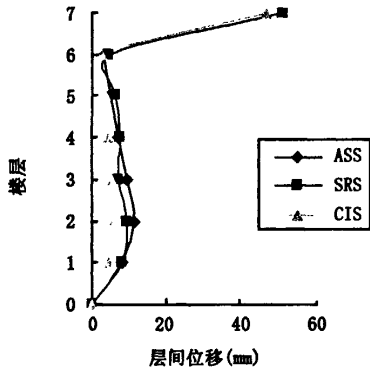


图2 兰州1波时三种结构层间位移比较  
Fig.2 The lateral displacement of three structural acceleration under Lan Zhou 1 wave

由表2、图3和图4可以看出:(1)通过计算在采用广州1波和兰州1波时复合减震结构6层的加速度和2层的层间位移减震率分别为41.11%, 39.56%, 63.54%和46.63%,而纯夹层橡胶加层减震结构的减震率分别为15.02%, 38.62%, 31.72%和15.36%。这说明复合加层减震结构要比纯夹层橡胶加层减震结构的减震效果明显。(2)在一类场地广州1波作用时,纯夹层橡胶加层减震结构的第二层加速度大于抗震结构的加速度;在三类场地兰州1波作用时,纯夹层橡胶加层减震结

构四层以上的层间位移均大于抗震结构的层间位移,而复合加层结构并没出现此现象。(3)由以上两点可以说明复合加层减震结构要比纯夹层橡胶加层减震结构的减震频率的带宽,所以复合减震层所形成的非线性TMD可以增大复合加层减震结构的减震频率的带宽。

#### 4 结论

1)减震层支座的布置受结构平面形式和橡胶支座型号的影响较小,布置比较灵活,并且布置方案也比较多样,减震效果也很明显。

2)复合加层减震结构比纯夹层橡胶减震结构减震频率带宽要宽,同时复合减震层所形成的非线性TMD可以增大加层减震结构的减震频率的带宽。

随着摩擦滑移支座数量的增加复合加层减震结构的减震效果也有所增加,但复合加层减震结构中摩擦滑移支座数量与夹层橡胶垫的数量的比值,对复合加层减震结构的减震效果应该是有影响的,确切的影响有待进一步的研究和分析。

#### 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] 杨树标. 砌体并联复合隔震体系的隔震性能研究[J]. 工业建筑, 2002, (15):15-17.
- [3] SONG T T, DARGUSH G F. 结构工程中的被动消能系统[M]. 董平译. 北京:科学出版社, 2005.
- [4] 杨树标, 杨艳秋, 高天宝, 等. 框架复合隔震结构地震响应分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(1): 23-26.
- [5] 罗小华, 程超. TMD原理应用在框架房屋结构加层减震时最优参数值的探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2000, (2): 20-22.
- [6] 孙武, 杨树标, 吴斌, 等. 并联复合隔震结构地震反应时程分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004, 21(1):52-55.
- [7] 郑国琛, 祁皓, 阎维明. 加层减震结构震动台试验分析[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 27(2):164-170.

(责任编辑 闫纯有)