

文章编号: 1005-0523(2009)01-0001-06

多层框架结构利用铅芯叠层橡胶支座加层减震分析

高剑平¹, 王 斌², 刘礼君¹, 邓燕华¹

(1 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2 南昌市建设工程质量监督站, 江西 南昌 330013)

摘要: 结合一幢多层框架结构应用铅芯叠层橡胶支座进行加层改造的工程实例, 在对隔震层的抗侧刚度和阻尼比基于能量准则进行优化的基础上, 利用 Matlab 语言编制了弹塑性时程分析程序, 输入两条实际地震动记录和一条人工波. 计算结果表明: 各层位移和加速度响应以及最大层间剪力和最大层间位移均较加层前有所减少, 特别是位移响应减少更为明显; 同时也验证了该能量优化准则的合理性与有效性. 这种加层减震技术既增加了使用面积, 又提高了抗震能力, 在中低层建筑的改造中具有良好的应用前景, 值得推广.

关 键 词: 铅芯橡胶支座; 加层; TMD; 减震; 能量; 优化

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

大量工程实践证明, 在用地紧张、征地困难、拆除重建造价高的情况下, 利用旧房加层改造是一项综合效益明显, 符合我国国情的房屋改造技术. 相对于采用传统方法解决建筑物加层中的抗震问题, 将现代结构控制技术应用于旧建筑的加层改造是一个新的发展方向, 走抗震与减震相结合的道路是发展的必然趋势.

“加层减震”技术是周福霖^[1]、施卫星^[2,3]、李奉阁^[4]、Roberto Villaverde^[5] 等人先后提出的类似 TMD (Tuned Mass Damper 调谐质量阻尼系统) 原理的被动控制方法, 如图 1 所示. 与 TMD 系统不同的是, 弹簧阻尼器变成了隔震支座 (铅芯叠层橡胶支座, Lead laminated Rubber Bearing 简称 LRB), 附加的质量块变成加层结构本身, 或者是隔热层、屋盖. 这种体系实质上是高位层间隔震, 但又具有 TMD 的特征和作用. 祁皓^[6]、郑国琛等^[7] 的研究表明, 当隔震层的位置较高时, 隔震结构下部位移和上部加速度均显著减小, 表现出与 TMD 相似的工作机理. 振动台试验结果表明^[7,8], 经过参数优化的 TMD 加层减震模型, 具有明显的减震效果, 一般地震响应减少 20%~45%^[8].

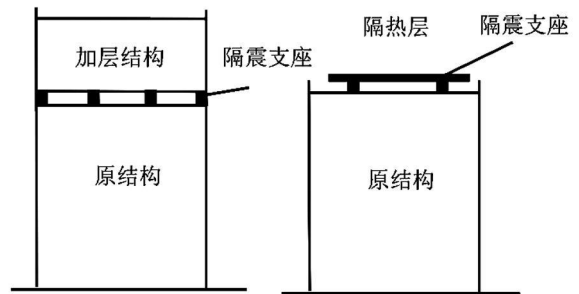


图 1 “加层减震”示意图

也可以认为隔震层就是一个人工设置的薄弱层、软弱层, 使房屋在水平地震作用下变形集中在隔震层, 并在隔震层集中消耗大部分地震能量. 为达到最佳的减震效果, 本文作者从应变能的角度对隔震层的抗侧刚度和阻尼比进行优化^[9], 以隔震层的应变能期望值占总体结构应变能期望值的比例最大为目标函数, 这样可以保证输入结构的应变能期望值中由隔震层耗散的比例始终最大, 而由主体结构所吸收耗散的应变能相对较少, 起到“弃车保帅”, 尽可能保护主体结构的目的, 从而最大限度地减少或避免对原结构的加固.

本文结合一幢多层钢筋混凝土框架结构的轻钢加层改造, 根据上述能量优化准则进行参数优化, 利用

收稿日期: 2008-10-28

基金项目: 江西省自然科学基金项目 (2007GZC0841); 江西省教育厅科学技术项目 ([2006]305)

作者简介: 高剑平 (1970-), 男, 吉林四平人, 博士, 副教授, 主要从事建筑结构鉴定、加固和改造研究.

Matlab语言编制了弹塑性时程分析程序,分析该加层结构在几种典型地震动作用下的减震效果和规律,以验证上述能量优化准则的合理性与有效性.

1 加层房屋概况

一幢 8 层的钢筋混凝土框架结构^[6],拟采用轻钢结构加层,加层结构与原结构之间用铅芯叠层橡胶支座连接形成 TMD“加层减震”结构体系.有关结构参数见表 1 该结构所处场地土为坚硬土(I类),抗震设防烈度为 6 度,设计地震分组为第一组.轻钢加层部分质量 500 t 以隔震层应变能均方值占总体应变能均方值为目标函数^[10],对隔震层的抗侧刚度和阻尼比进行优化,得出隔震层的第一刚度为 1×10^8 N/m,阻尼比为 0.1.

表 1 结构参数

层号	参数	层高 /m	层间质量 /t	层间剪切刚度 /(kN·m ⁻¹)
一		4.0	1 036	7.61×10^6
二		3.6	933	6.74×10^6
三		3.6	933	5.80×10^6
四		3.6	933	5.80×10^6
五		3.6	933	4.74×10^6
六		3.6	933	4.74×10^6
七		3.6	933	4.74×10^6
八		3.6	613	4.54×10^6

2 动力分析模型

2.1 体系运动方程

简化动力分析模型如图 2 所示.

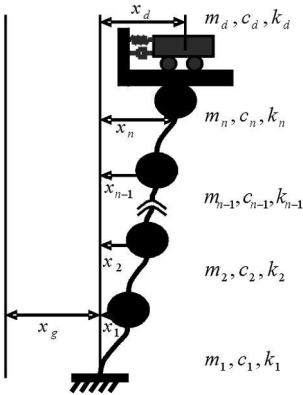


图 2 简化动力分析模型

根据图 2 建立动力学方程如下:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = M I \ddot{x}_g$$

(1)

式中

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & c_n + c_d & -c_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_d \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

$$K=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & k_n+k_d & -k_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix}_{(n+1)(n+1)}$$

$I=[1\cdots]^T$ —单位列向量; $\ddot{x}_g$ —激励加速度; m_i —第 i 层质量; m_d —加层质量;
 c_i —第 i 层阻尼系数; c_d —隔震层的阻尼系数; k_i —第 i 层剪切刚度; k_d —隔震层的剪切刚度.

2.2 隔震层恢复力模型

隔震层恢复力模型采用双线型模型 (如图 3),它是恢复力模型中最简单的一种,其正向加载曲线采用两条直线,其形状由构件的屈服强度、弹性刚度 (第一刚度)和屈服后刚度 (第二刚度)确定,反向加载的骨架曲线同正向的骨架曲线,加载与卸载刚度保持不变,等于弹性刚度^[10].

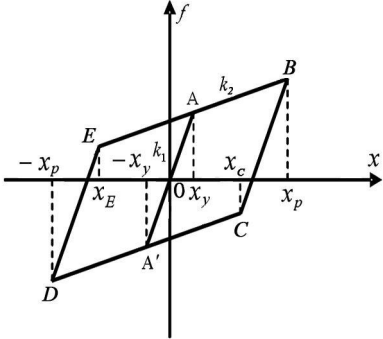


图 3 橡胶支座双线型恢复力模型

隔震层第二剪切刚度折减系数为 0.1,屈服位移为 20 mm.依次输入 EL-Centro 波 S-N 分量、天津波 S-N 分量和广州人工波,峰值加速度调整为 220 gal 相当于 7 度罕遇地震.与原结构在同样激励下的弹性地震响应进行对比分析.为定量描述减震效果,定义减震率^[10]如下式:

$$\text{减震率} = \frac{|\text{未减震的响应}| - |\text{减震的响应}|}{|\text{未减震的响应}|} \times 100\% \tag{2}$$

其中,地震响应分别以位移响应均方根值、加速度响应均方根值,以及层间剪力和层间位移响应最大值来表示.

3.1 时程分析结果

因篇幅原因未列出所有层地震响应时程曲线,部分结果如图 4、5、6 所示.可以看出,加层后各层的位移和加速度响应均较加层前不同程度降低.

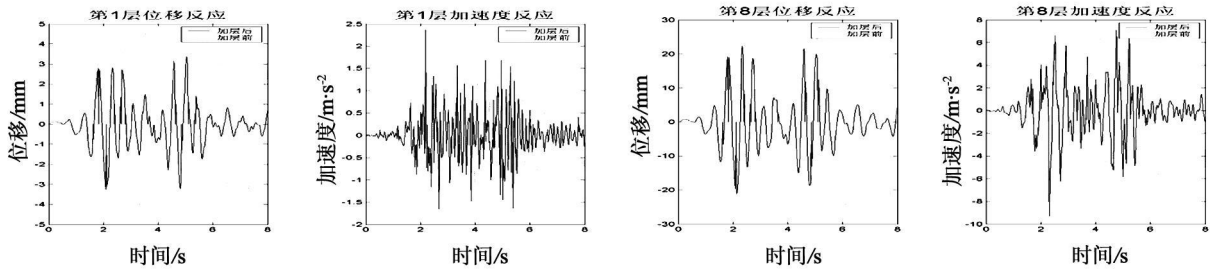


图 4 第一层和第八层位移和加速度响应 (EL-Centro波 S-N分量, PGA=220 gal)

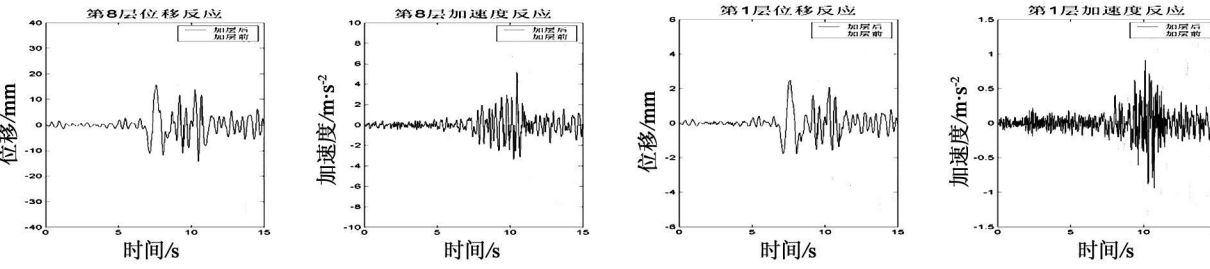


图 5 第一层和第八层位移和加速度响应 (天津波 S-N分量, PGA=220 gal)

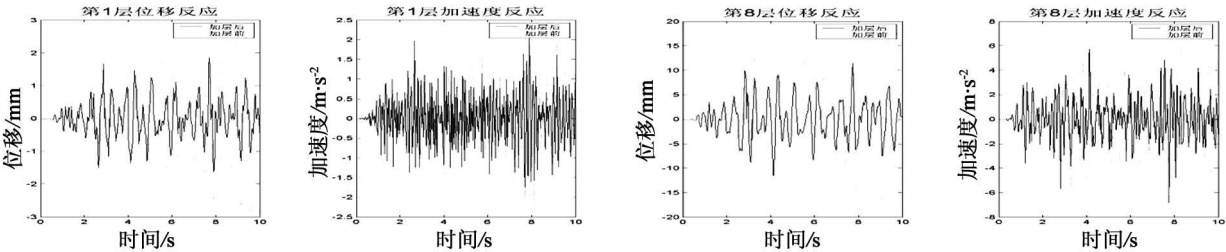


图 6 第一层和第八层位移和加速度响应 (广州人工波, PGA=220 gal)

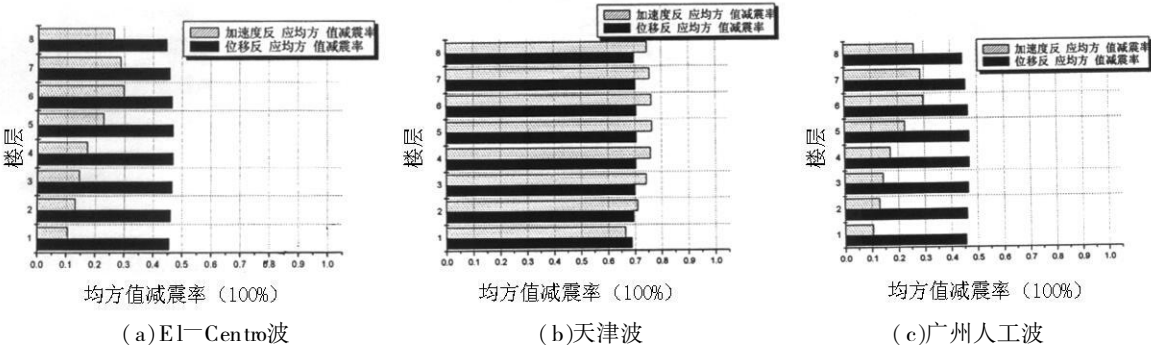


图 7 各层地震加速度和位移反应均方根值减震率 (%)

3.2 减震率

从图 7 可以看出,在同一地震波激励作用下,结构各层的位移响应均方根值减震率相差不大.对于 EL-Centro波和广州人工波,各层加速度响应均方根值减震率都比位移响应均方值减震率小,但对于天津波,两者相差不大.这说明,虽然输入不同的地震波得出各层地震响应均方根值减震率有所不同,但加层后都有明显的减震效果,尤其是位移响应降低较多,大致降低 40%~70%左右.共同的规律是:随着楼层增高,加速度响应减震效果越好,而位移响应的减震效果较为接近.

3.3 最大层间剪力和最大层间位移

三种地震动作用下各层最大层间剪力和最大层间位移包络图分别见图 8、9、10.

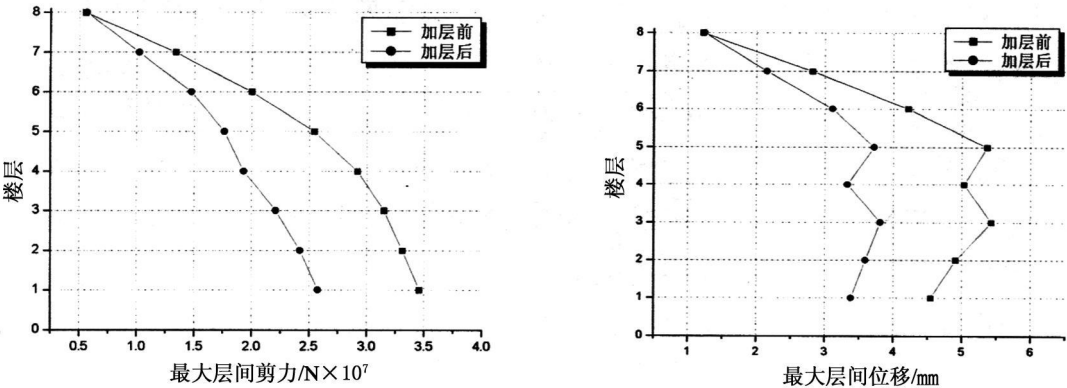


图 8 各层最大层间剪力和最大层间位移包络图 (EL-Centro波 SN分量, PGA=220 gal)

从图 8~10 可以看出,加层后,总的趋势是,随着楼层的降低,各层最大层间剪力和最大层间位移减少幅度在增大,接近底层减少幅度又稍有放缓.在 EL-Centro波和广州人工波作用下,除了第 8 层的最大层间剪力和最大层间位移较加层前些微放大外,其余 1~7 层最大层间剪力和最大层间位移较加层前均减小;而在天津波作用下,全结构各层层间剪力和层间位移均较加层前减小.

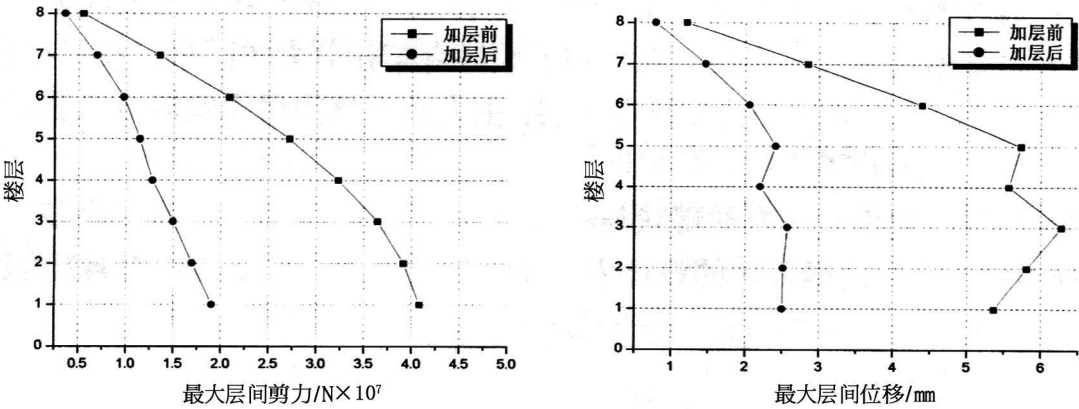


图 9 各层最大层间剪力和最大层间位移包络图 (天津波 SN分量, PGA=220 gal)

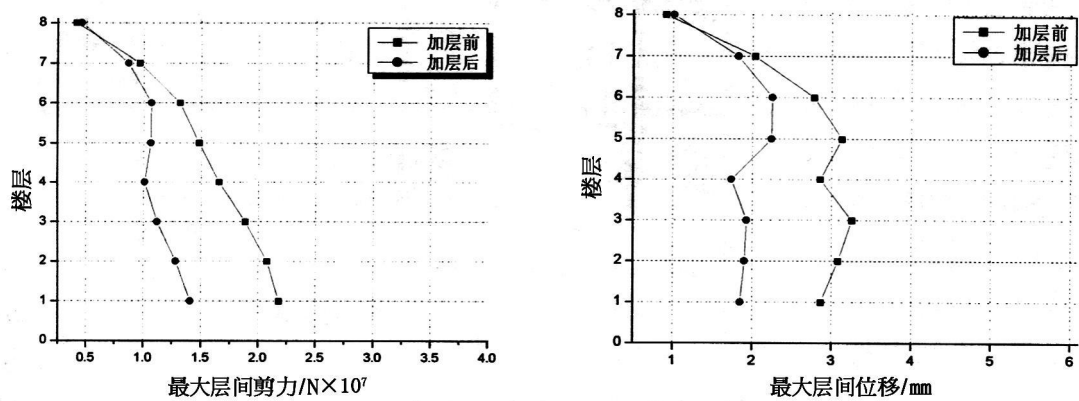


图 10 各层最大层间剪力和最大层间位移包络图 (广州人工波, PGA=220 gal)

4 结论

TMD加层减震技术可较大幅度降低结构的地震反应,从而间接地提高了结构的抗震能力.既满足了加层的需要,又减少或避免了对原结构的加固,而且施工方便,对住户干扰很小,对量大面广的多、低层房屋采用该技术,可收到显著的经济效益和社会效益.以上算例分析结果表明:

- (1) 尽管输入不同的地震波得到的地震响应不同,但均有较好的减震效果,特别是位移响应更为明显;在结构各层的地震响应中,位移响应的减震效果相差不大,而加速度响应的减震控制效果则呈现由底层到顶层逐渐增强的趋势.
- (2) 原结构除顶层最大层间剪力和最大层间位移有可能少许被放大外,其余各层的均较加层前减小,随顶层到底层,减小幅度逐渐增大,接近底层稍有放缓,但减小幅度依然较大.
- (3) 以隔震层的应变能期望值占总体结构应变能期望值的比例最大为目标函数,算例结果验证了该能量优化准则的合理性与有效性.

参考文献:

[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.
[2] 牛金龙,施卫星.房屋建筑顶层采用橡胶支承的消能减震[J].建筑结构,2002,32(6):63—65.
[3] 施卫星,王群.地震区既有建筑物增层中的结构控制方法[J].结构工程师,1996,13(4):37—42.
[4] 李奉阁,赵根田,田志昌.利用结构增层聚集和耗散能量[J].地震工程与工程振动,2002,22(5):152—155.

- [5] Roberto Villaverde. A seismic roof isolation system: feasibility study with 13-story building[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(2): 188—196.
- [6] 祁皓, 林云腾, 郑国琛. 层间隔震结构工作机理研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 239—243.
- [7] 郑国琛, 祁皓, 阎维明. 加层减震结构振动台试验分析[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 164—170.
- [8] 马万成. 加层减震结构的理论分析与振动台试验研究[D]. 广东: 广州大学, 2006. 5.
- [9] 刘礼君. 基于能量的轻钢加层“TMD减震”参数优化研究[D]. 江西: 华东交通大学, 2008. 6.
- [10] 周云. 粘弹性阻尼减震结构设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.

Seismic Reduction Analysis of an Adding-storey Structure of Multi-storey RC Frame Using Lead Laminated Rubber Bearings

¹GAO Jianping ²WANG Bin ¹LIU Lijun ¹DENG Yanhua

(¹ School of Civil Engineering and Architecture East Jiaotong University Nanchang 330013;

² Nanchang Supervision Station of Construction Project Quality Nanchang 330013 China)

Abstract More stories are added to a multi-storey RC frame using lead laminated rubber bearings. A program is developed with MATLAB language to conduct elastic-plastic time history analysis according to the optimization results of lateral rigidity and damping ratio of isolation layer based on energy criterion, and two real ground motion records and a synthetic record are input. The results show that displacement and acceleration response, interstorey shear force and story drift of each storey decrease compared to those results prior to adding-storey, and displacement response decrease significantly. This numerical example also demonstrates the effectiveness and rationality of proposed energy-based optimization criterion. This adding-storey technique increases usable area and improve the seismic capacity of existing building, which has good application prospect in the upgrading of medium and low-rise buildings.

Key words lead laminated rubber bearing; adding-storey; TMD; seismic reduction; energy; optimization

(责任编辑:王全金)