

文章编号: 1005-0523(2008)05-0016-05

多层钢筋混凝土框架结构“加层减震”能量时程分析

高剑平¹, 刘礼君², 王 斌³, 李 明¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 海南元正建筑设计咨询有限公司责任公司 江西分公司, 江西 南昌 330013; 3. 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(LRB)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 语言编制了能量时程分析程序, 考虑地震动三要素和铅芯隔震支座动力特性(屈服位移和第二刚度系数)等影响因素, 分析典型地震动作用下设置上述隔震元件 LRB 加层结构的能量输入、转化及耗散特性。分析结果表明, 输入到结构的总能量较加层前有不同程度的增加, 但是大部分都由隔震层来吸收和耗散, 使得输入到原主体结构能量较加层前大大降低, 减震效果较为明显, 证明提出的基于能量的优化准则的合理性与有效性。

关键词: 铅芯叠层隔震支座; 框架结构; 加层; 减震; 能量

中图分类号: TU385⁺¹

文献标识码: A

20 世纪 80 年代以前, 我国的住宅和民用建筑多以多层房屋为主。随着城市建设的发展, 城市用地越来越紧张。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到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]针对旧建筑抗震加固而提出的类似 TMD(Tuned Mass Damper, 调谐质量阻尼系统)原理的被动控制方法, 与 TMD 系统不同的是, 弹簧阻尼器变成了隔震支座, 附加的质量块变成加层结构本身, 组成类似 TMD 的减震系统, 见图 1(a)。实质上是高位层间隔震, 但又具有 TMD 的特征和作用。周福霖等^[2]对此结构系统进行了包括建模、试验、工程应用的研究。施卫星等^[3,4]、Roberto Villaverde^[5]提出类似的想法, 利用结构本身的屋顶或隔热层作为 TMD 的质量块, 见图 1(b)。钱国桢等^[6]、罗小华等^[7]、李春祥等^[8]、郑国琛等^[9]分别以不同的目标函数和优化准则研究了加层结构中 TMD 系统的优化设计问题。

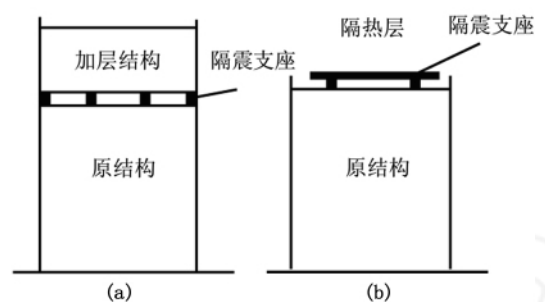


图1 “加层减震”示意图

长期以来, 人们往往采用结构的最大反应来评估地震破坏, 在结构抗震设计中采用弹性设计反应谱确定地震作用。然而这种设计方法基本上没有反映地震动持时对结构破坏的影响, 也无法对许多震害现象做出合理的解释^[10]。地震对结构的作用是一种能量的传递、转化与消耗过程, 而减轻或控制地震反应的基本原则是以适当的方式耗散地震输入的能量^[11]。随着工程抗震理论研究的深入, 结构地震反应的能量分析方法正日益受到国内外地震工程界的关注^[10~15], 因为它能较好地反映结构在强震作用下的非线性性质及地震动三要

收稿日期: 2008-06-23

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目([2006] 305)

作者简介: 高剑平(1970-), 男, 吉林四平人, 副教授, 研究方向为建筑结构鉴定、加固和改造。

素对结构抗震性能的影响.

从能量的角度对隔震层的抗侧刚度和阻尼比进行优化^[4],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为目标函数,使该比例取极大值,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.

本文结合一幢使用铅芯隔震支座(Lead Laminated Rubber Bearing,简称 LRB)进行隔震减震的多层钢筋混凝土框架轻钢加层结构,考虑地震动三要素及铅芯隔震支座的动力特性(屈服位移和第二刚度系数)等影响因素,采用 MATLAB 语言编制了能量时程分析程序,分析典型地震动作用下设置上述隔震元件 LRB 的加层结构的能量输入、转化及耗散特性.

1 多自由度结构体系地震反应能量方程

地震作用下多自由度体系能量方程如式(1)^[7~18]所示.

$$\sum_{i=1}^n \int_0^t m_i \ddot{x}_i \dot{x}_i dt + \sum_{i=1}^n \int_0^t c_i \dot{x}_i \dot{x}_i dt + \sum_{i=1}^n \int_0^t k_i x_i \dot{x}_i dt = - \sum_{i=1}^n \int_0^t m_i \ddot{x}_g \dot{x}_i dt \quad (1)$$

式(1)可以简化为

$$\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{ci} + \sum_{i=1}^n E_{hi} + \sum_{i=1}^n E_{ei} = \sum_{i=1}^n E_{in} \quad (2)$$

式(2)中各符号含义如下

动能总和

$$\sum_{i=1}^n E_{ki} = \sum_{i=1}^n \int_0^t m_i \ddot{x}_i \dot{x}_i dt \quad (3)$$

阻尼耗能总和

$$\sum_{i=1}^n E_{ci} = \sum_{i=1}^n \int_0^t c_i \dot{x}_i \dot{x}_i dt \quad (4)$$

滞回耗能与弹性应变能总和

$$\sum_{i=1}^n E_{hi} + \sum_{i=1}^n E_{ei} = \sum_{i=1}^n \int_0^t k_i x_i \dot{x}_i dt \quad (5)$$

地震输入结构的总能量

$$\sum_{i=1}^n E_{in} = - \sum_{i=1}^n \int_0^t m_i \ddot{x}_g \dot{x}_i dt \quad (6)$$

其中: $m_i, c_i, k_i, x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i, \ddot{x}_g$ 依次为第 i 个自由度的质量、阻尼、剪切刚度、位移、速度、加速度和地震动加速度.

铅芯橡胶支座隔震层的恢复力模型采用双线性模型,隔震层简化为弹簧与阻尼的并联体系,加层结构连同隔震支座为子结构,将其拓展成“TMD 减震”系统^[4].由于铅芯橡胶支座具有滞回耗能特性,则结构的总输入地震能量由各层的动能、弹性应变能、阻尼耗能及隔震层的滞回耗能四部分组成^[18].

2 算例分析

2.1 加层结构概况

一幢 8 层的钢筋混凝土框架结构,各有关的结构参数见表 1.该结构所处场地土为坚硬土(Ⅰ类),设防烈度为 6 度,设计地震分组为第一组.现对其进行加层改造,加层部分质量 5×10^5 kg,根据文献^[7]的结论,以隔震层应变能均方值占总体应变能均方值为目标函数,对其进行极大值优化,得到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

参数 层号	层高/m	层间质量/Kg	层间剪切刚度/(N/m)
1	4.0	1.036×10^6	7.61×10^9
2	3.6	9.33×10^5	6.74×10^9
3	3.6	9.33×10^5	5.80×10^9
4	3.6	9.33×10^5	5.80×10^9
5	3.6	9.33×10^5	4.74×10^9
6	3.6	9.33×10^5	4.74×10^9
7	3.6	9.33×10^5	4.74×10^9
8	3.6	6.13×10^5	4.54×10^9

2.2 分析工况

在本算例中综合考虑了地震动三要素和铅芯隔震支座动力特性(屈服位移和第二刚度系数)等影响因素进行多工况分析,具体见表 2.

表 2 工况汇总表

工况	隔震层 屈服位移/m	第二刚度 折减系数	地震波	场地类别	峰值速度调幅/gal	地震烈度
1	0.01	0.1	迁安波 S-N 分量	I 类	220	7 度罕遇
2	0.01	0.1	EL-Centro 波 S-N 分量	II 类	220	7 度罕遇
3	0.01	0.1	天津宁河波 S-N 分量	III、IV 类	220	7 度罕遇
4	0.01	0.1	EL-Centro 波 S-N 分量	II 类	140	8 度多遇
5	0.01	0.3	EL Centro 波 S-N 分量	II 类	220	7 度罕遇
6	0.03	0.1	EL Centro 波 S-N 分量	II 类	220	7 度罕遇

2.3 能量时程分析结果与讨论

根据地震动三要素输入不同类型的典型地震波,计算出“加层减震”结构的能量时程曲线如图 2~5 所示.

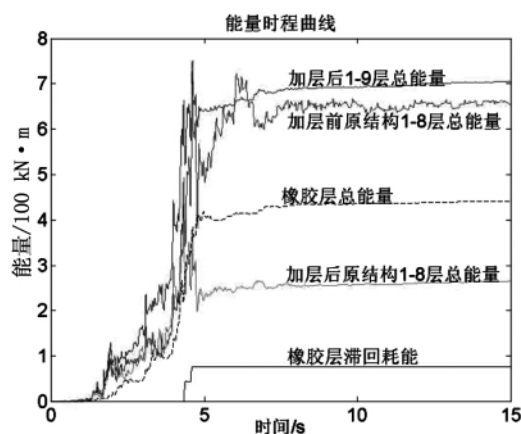


图 2 能量输入和耗散时程曲线(工况 1)

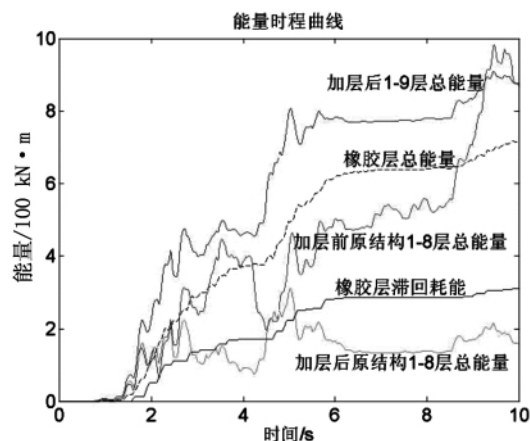


图 3 能量输入和耗散时程曲线(工况 2)

从图 2~5 可以看出:

- (1) 轻钢加层后输入给结构的总能量都有不同程度的增加,但是大部分都由隔震层来吸收和耗散.
- (2) 原结构的输入能量较加层前均大大减少,减少比例高达 50%,证明作者提出的基于能量的优化准则的合理性与有效性,达到了通过隔震层来吸收和耗散更多的地震能量,从而最大限度地保护主体结构的目的.
- (3) 当场地土由 I 类向 IV 类变化时,输入到结构总能量最大时刻逐步向后推移,即场地越硬,最大能量就越早发生.
- (4) 随着地震动强度的提高,输入到结构的总能量、结构的阻尼耗能、隔震层的滞回耗能等均大幅度增加.
- (5) 地震动持时越长,输入到结构的累积总能量便越多.

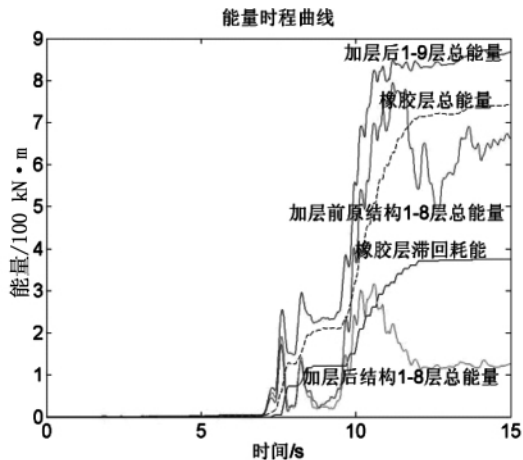


图4 能量输入和耗散时程曲线(工况3)

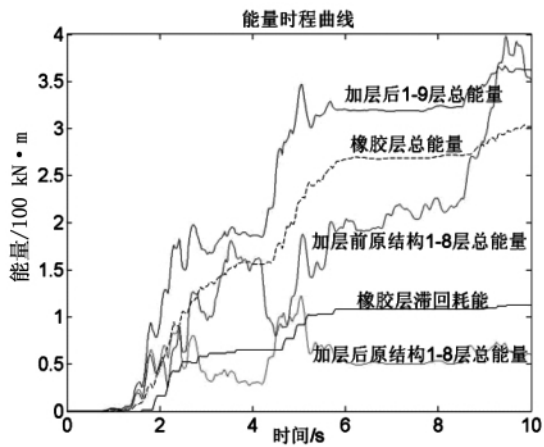


图5 能量输入和耗散时程曲线(工况4)

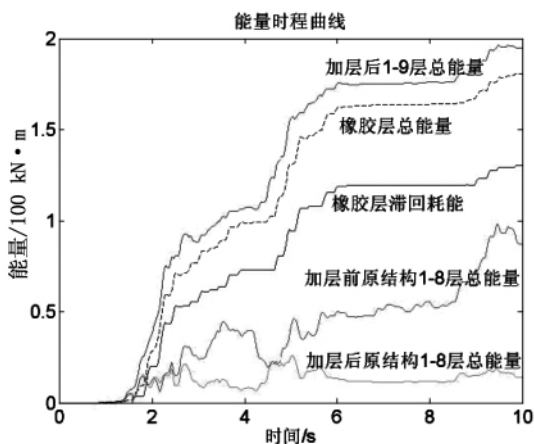


图6 能量输入和耗散时程曲线(工况5)

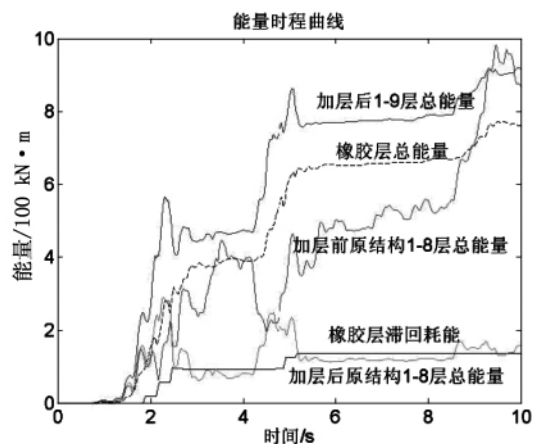


图7 能量输入和耗散时程曲线(工况6)

通过改变隔震层的第二刚度系数,输入 EL-Centro 波 S-N 分量,绘出能量时程曲线如图6所示,与图3对比分析可以看出:隔震层的第二刚度折减系数越大,输入给结构的总能量也越大,其中增加的总能量大部分是隔震层增加的滞回耗能,而原主体结构的总输入能量基本不变。

通过改变隔震层的屈服位移,输入 EL-Centro 波 S-N 分量,绘出能量时程曲线如图7所示,与图3对比分析可以看出:输入给结构的总能量不随屈服强度的变化而变化,但随着屈服强度的提高,隔震层的滞回耗能却降低,其阻尼耗能增加,保持总和大致不变。

3 结论

本文利用多自由度体系的能量平衡方程,结合一多层框架轻钢加层结构,进行了地震能量输入、转移和耗散研究,其中考虑到地震动三要素和隔震层的动力特性的影响,主要结论如下。

(1) 使用铅芯隔震支座进行轻钢加层改造,输入到结构的总能量较加层前有不同程度的增加,但是大部分都由隔震层来吸收和耗散,使得输入到原主体结构的能量较加层前大大降低,证明作者提出的基于能量的优化准则的合理性与有效性。

(2) 当场地土由 I 类向 IV 类变化时,输入到结构总能量最大时刻逐步向后推移,即场地越硬,最大能量就越早发生。

(3) 随着地震动强度的提高,输入到结构的总能量、结构的阻尼耗能、隔震层的滞回耗能等均大幅度增加。

(4) 随着隔震层第二刚度折减系数的增大,输入到结构的总能量也增大,其中增加的总能量大部分是隔震层增加的滞回耗能,而原结构的总输入能量基本不变。

(5) 输入到结构的总能量不随隔震层的屈服强度的变化而变化,但随着屈服强度的提高,隔震层的滞回耗能却降低,其阻尼耗能增加,保持总和大致不变。

参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减振控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997. 50 - 70.
- [2] 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.
- [3] 牛金龙, 施卫星. 房屋建筑顶层采用隔震支承的消能减震 [J]. 建筑结构, 2002, 32(6): 63 - 65.
- [4] 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, (4): 37 - 42.
- [5] Roberto Villaverde. Aseismic roof isolation system: feasibility study with 13 - story building. Journal of Structural Engineering [J]. 2002, (2): 188 - 196.
- [6] 钱国桢, 池毓蔚. 地震波激励下加层结构被动控制最优参数求解 [J]. 工程抗震, 1998, (3): 36 - 38.
- [7] 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, 26(2): 20 - 22.
- [8] 李春祥, 熊学玉. 加层结构中 TMD 减震优化设计方法 [J]. 工业建筑, 1999, 29(3): 27 - 29.
- [9] 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.
- [10] 周 云, 徐 彤, 周福霖. 抗震与减震结构的能量分析方法研究与应用 [J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 133 - 139.
- [11] 魏新磊, 周 云, 等. 基于结构能量分析的抗震设计新方法的研究 [J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 62 - 67.
- [12] W. - L. He and A. K. Agrawal. Energy transfer approach for the design of passive energy dissipation systems [C]. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. New York, NY, Columbia University: 2000. 2 - 5.
- [13] Bertero and C M. Uang. Issues and future directions in the use of an energy approach for seismic - resistant of structures [C]. Workshop on Nonlinear Seismic Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Slovenia, Yugoslavia, 1992. 13 - 16.
- [14] 周 云, 周福霖. 耗能减震体系的能量设计方法 [J]. 世界地震工程, 1997, 13(4): 8 - 13.
- [15] 程光煜, 叶列平. 弹性多自由度系统地震输入能量的研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(4): 6 - 9.
- [16] 刘礼君. 基于能量的轻钢加层 “TMD 减震”参数优化研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
- [17] 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. 132 - 153.
- [18] 北村春幸(日). 裴星洙, 等译. 基于性能设计的建筑振动解析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. 160 - 183.

A Time - energy History Analysis on an Adding - storey Structure of Multi - storey RC Frame Using Light Steel Structure as a TMD System

GAO Jian - ping¹, LIU Li - jun², WANG Bin³, LI Ming¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. Yuanzheng Architectural Design & Construction Co., LTD, Nanchang 330013; 3. Nanchang Supervision Station of Construction Project Quality, Nanchang 330013, China)

Abstract: A program is developed with MATLAB language to conduct time - energy history analysis, according to the optimization results of lateral rigidness and damping ratio of isolation layer based on the energy criterion proposed by the authors, combining with an adding - storey project of a multi - storey RC frame structure using lead laminated rubber bearings (LRB). The characteristics of energy input, energy conversion and energy dissipation are analyzed under some typical earthquake ground motions considering the three essential elements of ground motion and the dynamic characteristics of LRB. The results show that, the total energy input into the structure increases at different degree compared to that of previous adding - storey, but most of the input energy is dissipated by the isolation layer, so the energy dissipated by the original structure reduces remarkably compared to that of previous adding - storey. The obvious effect of seismic reduction proves the feasibility and rationality of energy - based optimization criterion.

Key words: lead laminated rubber bearing; frame structure; adding - storey; seismic reduction; energy

(责任编辑: 王建华)