

[文章编号] 1002-8412(2012)01-0042-05

串联隔震结构震损倒塌动态模型分析

杜永峰^{1,2}, 唐 能² (1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

[提 要] 建立了叠层橡胶隔震垫与地下室悬臂 RC 柱组成的串联隔震结构的有限元分析模型, 编写了利用 MSC. MARC 软件生死单元二次开发 UACTIVE 程序来模拟隔震垫的失效, 并分析了远场多维地震激励下不同长细比悬臂柱柱顶加连梁对结构响应的影响, 同时分析了设置阻尼器控制隔震层位移后的结构地震响应。分析表明: 通过生死单元二次开发程序可以有效模拟隔震垫破坏; 实际工程中常规的长细比悬臂柱柱顶加连梁对串联隔震结构的响应影响微小; 隔震层增设非线性阻尼器可以控制位移且不影响多遇地震下的隔震效果。

[关键词] 近断层; 串联隔震结构; 倒塌分析; 动态模型; 非线性阻尼器

[中图分类号] TU352.1 [文献标识码] A

Dynamic Model Analysis for Collapse of the Serial Isolation Structure under Near - fault Earthquake Excitations

Du Yong-feng^{1,2}, Tang Neng² (1. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Analysis model of the serial isolation structure is established, which consists of laminated rubber bearing (LRB) mounted on top of basement column. User subroutine of MSC. MARC to simulate LRB damage is written. The influence of link beam which on top of basement column with different slenderness ratio under near-fault earthquakes is analyzed, and seismic response of the serial isolation structure with damper in isolation layer is analyzed. Analysis shows that the isolation layer damage preferably simulates through wrote user subroutine birth-death element. The link beam to the influence of structural response is minimal in general engineering. When nonlinear damper is installed in the isolation layer, not only be good for effectively reduce displacement, but as well not influence isolation effect of the serial isolation structure under frequent earthquakes.

Keywords: near-fault; serial seismic isolation structure; collapse analysis; dynamic model; nonlinear damper

E-mail: dooyf@lut.cn

1 引言

普通隔震通过在建筑基础与上部结构之间设置隔震支座形成具有整体复位功能的隔震层, 有效增大了结构的自振周期, 减少水平地震作用对上部结构的输入, 在减小结构地震损害及保护建筑物内部设备方面的有效性得到了广泛认同。在实际工程中常常设置地下室, 为了使上部结构在地震作用下有足够的位移空间, 隔震支座优先设置在地下室的柱

顶部。如果柱顶加设连梁不仅因连梁的高度大大减小了地下室的使用空间, 而且浪费隔震垫所增加净空, 这些因素常常使悬臂柱与叠层橡胶支座构成了串联隔震系统。国内外许多学者对叠层橡胶支座与 RC 悬臂柱组成的串联体系做了大量研究, 周锡元等^[1]建立了橡胶隔震支座与 R/C 柱串联系统的动力分析模型, 给出了水平刚度与临界力计算公式。本课题组通过对地震波的频谱分析, 结合体系的动力失稳区间分析, 判断在某竖向地震作用下串联体系没有发生失稳的可能, 并对双向水平地震作用下串联隔震结构进行了振动控制研究^[2-4]。

[收稿日期] 2011-03-31

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50978130)

历次大地震给人类带来的灾难,其主要原因是集中在近断层附近建筑结构的倒塌。研究资料表明,近断层地震动明显的长周期速度、位移脉冲和较大的竖向分量对隔震建筑等长周期结构的抗震性能带来不利影响^[5-6]。我国一些重要的城市,如成都、乌鲁木齐、兰州和西宁等都处在地震的近断层范围中。这些因素使得串联隔震系统在近断层地震作用下的失效因素和失效模式具有特殊性。因而对近断层地震作用下倒塌机理以及有效措施的研究就显得十分重要。而隔震结构与传统抗震结构不同,存在刚度非常薄弱的隔震层,故有必要先研究隔震层的失效机理。目前对结构倒塌过程模拟的途径主要为数值仿真。通用有限元软件 MSC. MARC,具有较强的非线性分析能力,并提供较全面的用户子程序接口,为分析复杂问题和二次开发带来了很大的方便^[7],陆新征等^[8-10]人已经对混凝土结构及砌体结构做了大量的倒塌模拟分析。本文对 LRB 与地下室悬臂 RC 柱组成的串联隔震结构建立了分析模型,分别进行以下分析:①比较分析 7 种不同长细比悬臂柱加连梁和加连梁的响应分析;②编制生死单元二次开发程序 UACTIVE,根据与隔震垫弹簧相连单元的最大剪力或轴力达到隔震垫失效前的最大值杀死单元,以实现隔震垫失效;③分析了在隔震层附加非线性阻尼器,用表格(table)定义其刚度为以位移(displacement)作变量的函数,控制特大地震作用下隔震层的位移,防止因隔震层位移过大而产生倒塌。

2 串联隔震结构分析模型

2.1 工程概况

某钢筋混凝土框架结构,采用隔震技术,地上 6 层,1 层层高为 4.5m,其它均为 3.6m;地下 1 层,层高为 3.3m,地下室悬臂柱高 2.5m,铅芯橡胶隔震支座放置在地下室悬臂柱顶。柱距为 x 向 $6\text{m} \times 3\text{m} \times 6\text{m}$, y 向 $6\text{m} \times 6\text{m} \times 6\text{m}$ 。隔震层顶板厚 0.3m,其它楼板厚 0.12m。梁柱截面尺寸见表 1 所示。

2.2 有限元模型参数

应用有限元软件 MACR 连接(LINKS)中的 SPRINGS/DASHPOTS(弹簧/阻尼)来模拟铅芯橡胶隔震支座的刚度和阻尼,根据设计所选取的铅芯橡胶隔震支座型号 LRB600,确定模拟弹簧水平刚度为 $1.2 \times 10^6 \text{N/m}$,竖向刚度为 $1.5 \times 10^9 \text{N/m}$ 。

阻尼系数 C 按下式求得:

表 1 梁柱截面尺寸

Table 1 The sectional dimension of the beams and the columns

	所在楼层	截面尺寸(m × m)
柱	悬臂柱	1 × 1
	1 层、2 层	0.6 × 0.6
	3 层、4 层、5 层、6 层	0.5 × 0.5
梁	隔震层顶板	0.3 × 0.8
	其它各层	0.25 × 0.7

$$C = 2\xi_b\omega_1M_T$$

式中, ξ_b 为铅芯橡胶隔震支座的等效阻尼比; ω_1 为隔震结构的第一圆频率; M_T 为铅芯橡胶隔震支座所承受的总质量。

2.3 地震波的选取

本文选取三向强震实际记录地震波为来自网站 <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html> 的 Chichi-TCU068,其峰值加速度分别为 X 向 4.53m/s^2 、 Y 向 5.55m/s^2 、 Z 向 4.76m/s^2 ,如图 1 所示。

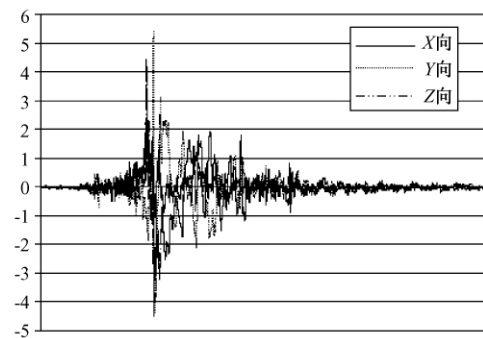


图 1 集集地震 TCU068 测站实际三向记录波

Fig.1 The three-dimensional wave of Chichi TCU068

3 有限元计算及结果分析

3.1 不同长细比悬臂柱加与不加连梁响应分析

为了对比分析不同长细比悬臂柱加与不加连梁对响应的影响,本文采取固定悬臂柱截面尺寸,改变悬臂柱高度的措施,总共计算了 7 种不同柱高,分别为:2.5m、3.0m、4.0m、4.5m、5.0m、6.0m、8.0m,连梁的截面尺寸为 $300\text{mm} \times 800\text{mm}$ 。各种工况在近断层地震作用下隔震层、6 层的 X 向位移(m)响应和加速度(m/s^2)响应峰值如图 2 所示(注:图中 0w1 表示无连梁隔震层、0y1 表示有连梁隔震层、6w1 表示无连梁 6 层、6y1 表示有连梁 6 层、dx 和 ax 分别代表 x 向位移和加速度,横坐标为柱高)。

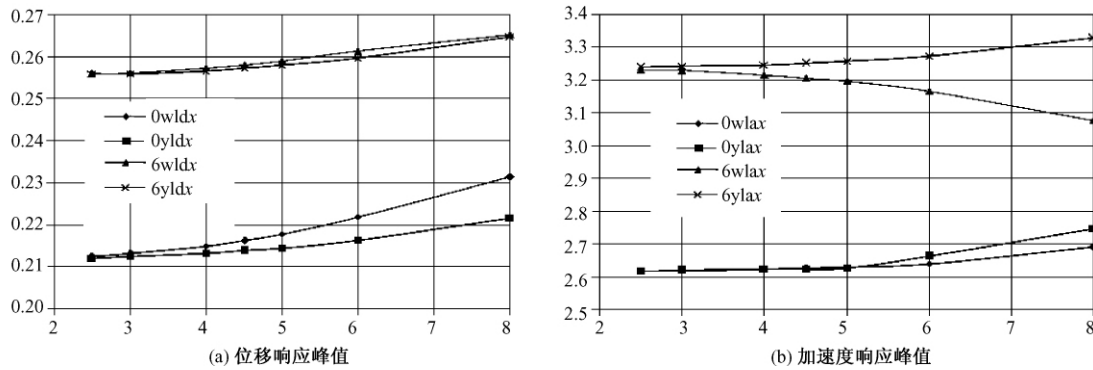


图2 隔震层、6层的X向位移响应和加速度响应峰值

Fig. 2 The peak of displacement and acceleration response in isolation layer and the sixth floor

总体上看,各种柱高加连梁的影响随柱增高而增加。分别从位移和加速度两个方面分析:①加连梁减小了位移响应,在隔震层,当柱高为5m时,影响仅为1.5%;当柱高达到8m时,影响为7%,对6层位移的影响,所有工况影响均极小(见图2a);②加连梁后,增大了加速度响应,在隔震层,当柱高为5m时,影响不到1%;当柱高达到8m时,影响仅为2.1%,对6层加速度的影响相对较大。当柱高为5m时,影响约1.9%;当柱高达到8m时,影响约8.1%(见图2b)。由上述分析可知:从对结构响应的影响方面考虑,在实际工程中,悬臂柱的长细比一般小于5,本身刚度较大,加连梁的作用微小。

3.2 隔震层失效模拟

隔震层是整个串联隔震体系中刚度最薄弱的位置,地震时通过隔震层的位移,消耗地震能量,减少上部结构的地震能输入,从而达到减震效果。近断层地震动存在明显长周期速度、位移脉冲和较大的竖向分量,会加大隔震建筑等长周期结构的位移响应,在隔震结构设计的时候,当处于发震断层10km以内时,输入地震波应考虑近断层影响系数来考虑近断层地震动的不利影响。同时设计的时候,在罕遇地震下,时程分析表明隔震层的位移响应已经接近隔震垫的破坏位移,而此时需要保证上部结构不倒塌,故在超罕遇地震作用时,极有可能先因隔震层由于位移过大而发生整体倒塌。编制生死单元二次开发程序 UACTIVE,根据与隔震垫弹簧相连单元的最大剪力或轴力达到隔震垫失效前的最大值杀死单元,实现隔震垫失效。计算模型如图3所示。

K_x 、 K_y 分别为水平 x 向和 y 向刚度等于 $1.2 \times 10^6 \text{ N/m}$, K_z 为竖向刚度等于 $1.5 \times 10^9 \text{ N/m}$,最大位

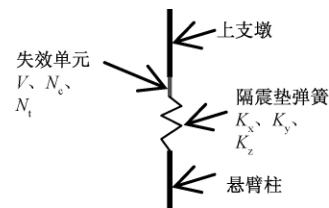


图3 隔震垫失效模型

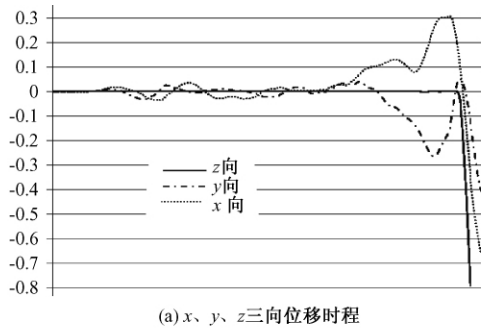
Fig. 3 The damage model of LRB

移为 $0.55D$ 等于 0.33m ,取 0.3m ,故达到最大位移时,隔震垫因水平刚度对“失效单元”的剪力 V 为 $0.36 \times 10^6 \text{ N}$;隔震垫最大压应力为 12MPa ,此时失效单元轴压力 N_c 为 $3.39 \times 10^6 \text{ N}$,隔震垫最大拉应力为 1MPa ,失效单元轴拉力 N_t 为 $0.28 \times 10^6 \text{ N}$ 。

在二次开发程序 UACTIVE 中定义:当 $V > 0.36 \times 10^6 \text{ N}$ 或 $N_c > 3.39 \times 10^6 \text{ N}$ 或 $N_t > 0.28 \times 10^6 \text{ N}$ 时,“失效单元”杀死。从而使隔震垫与上部结构失去联系,达到隔震垫失效的目的。为了使结构进入倒塌阶段,使用地震波为两倍原始记录,结果如图4所示。在 15.10s 时, x 向位移达到 0.3m 限制,之后“失效单元”被杀死,隔震垫失效,结构在竖向加速度和重力作用下, z 向位移急剧增加(见图4a),模型变形图见图4b,到 16.02s 时,悬臂柱顶及地下室顶板,位移达到 -0.8m ,模型变形图见图4c。

3.3 特大地震作用下隔震层位移控制分析

隔震结构在超罕遇地震作用时,极有可能因隔震层由于位移过大而发生整体倒塌,故控制隔震层位移在允许范围极为重要。简单有效的方法就是在隔震层与下部结构直接设置阻尼器,为了不影响多遇地震下的隔震效果,往往使阻尼器在特定前提下才发挥作用。本文设置的非线性弹簧阻尼器为:当



(a) x、y、z 三向位移时程

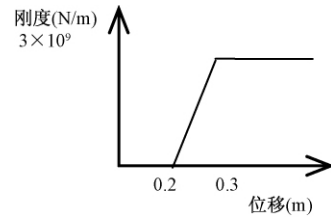


图 5 弹簧刚度模型

Fig. 5 The model of spring stiffness

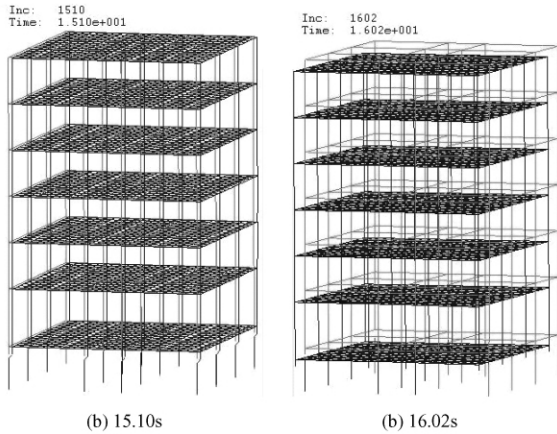


图 4 隔震层破坏模拟结果

Fig. 4 The simulated result of the isolation layer damage

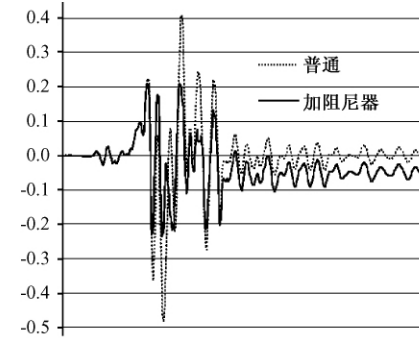
隔震垫位移达到 0.2m 时,阻尼器开始进入工作,位移达到 0.3m 时,其弹簧刚度为 $3 \times 10^9 \text{ N/m}$,用较大的刚度来有效地限制位移。弹簧刚度模型如图 5 所示。

地震波选取 1.5 倍三向强震实际记录地震波 CHICHI—TCU068,模型未考虑隔震层失效。不设置阻尼器弹簧和设置阻尼器弹簧的隔震层位移时程和加速度对比分析如图 6 所示。

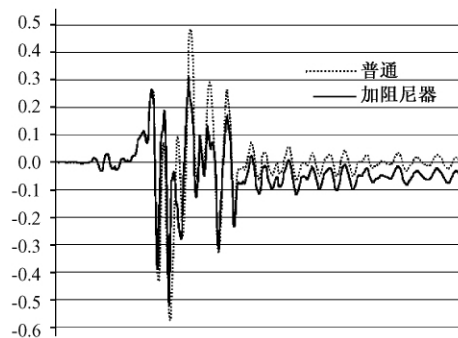
从图 6 可知,增加阻尼器弹簧可以有效控制位移在许可范围。为了比较分析加阻尼器弹簧的效果,定义隔震垫失效,当特大地震作用下隔震垫的位移远大于允许值时,而加阻尼器可以控制位移范围,但结构已经发生明显塑性变形;另外,位移在 0.2m 内时,两种曲线完全重合,说明在多遇地震下加阻尼器弹簧不影响隔震效果(见图 6(a)、(b)),且加速度也有了很大程度的放大(见图 6(c)、(d))。

4 结论

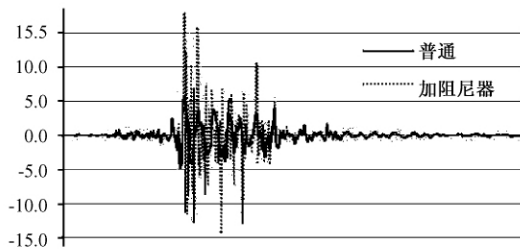
本文通过用通用有限元软件 MSC. MARC 建立了有限元分析模型,比较分析了 7 种不同长细比悬臂柱加连梁和不加连梁的响应分析,编制了由



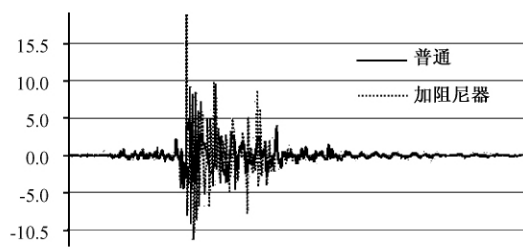
(a) 隔震层位移时程



(b) 6层位移时程



(c) 隔震层加速度时程



(d) 6层加速度时程

图 6 普通和加阻尼器隔震时程曲线

Fig. 6 The isolation layer time response of ordinary isolation and installed damper isolation

MSC. MARC 二次开发程序生死单元 UACTIVE, 实现隔震垫失效, 分析了为控制隔震层位移防止整体倒塌而设置附加非线性阻尼器弹簧的各种结构地震响应时程, 得出以下结论:

(1) 当地下室悬臂柱长细比在 5 以内时, 悬臂柱顶加连梁对结构的地震响应影响微小, 实际工程中常规悬臂柱的长细比一般小于 5, 本身有较大的刚度, 柱顶加连梁贡献极微;

(2) 在特大地震作用下, 隔震结构极有可能因隔震垫位移过大失效而整体倒塌, 通过合理生死单元二次开发程序可以有效地模拟隔震层破坏;

(3) 隔震层增加非线性阻尼器可以在不影响多遇地震下隔震效果的同时, 控制其位移, 设计时须优化阻尼器刚度以免带来不可接受的加速度放大。

参考文献(References):

- [1] 周锡元, 韩淼, 曾德民, 马东辉. 橡胶支座与 R/C 柱串联隔震系统水平刚度系数[J]. 振动工程学报, 1999, 12(2): 157~165
Zhou Xi-yuan, Han Miao, et al. Horizontal Rigidity Coefficient of the Serial System of Rubber Bearing with Column [J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 157~165 (in Chinese)
- [2] 李慧, 姚云龙, 杜永峰, 党育, 韩建平. 叠层橡胶支座与柱串联体系动力失稳特性探讨[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 18~23
Li Hui, Yao Yun-long, Du Yong-feng, et al. Discussion on Dynamic Instability Behavior of Serial System of Laminated Rubber Bearing with Column [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 18~23 (in Chinese)
- [3] 杜永峰, 李慧. 叠层橡胶垫与 RC 柱串联隔震体系的随机屈曲分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(4): 16~21
Du Yong-feng, Li Hui. Stochastic Buckling Analysis for the Serial Isolation System of Laminated Rubber Bearings and RC Column [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 16~21 (in Chinese)
- [4] 杜永峰, 林治丹. 双向水平地震作用下串联隔震结构的振动控制[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 32~37
Du Yong-feng, Lin Zhi-dan, Vibration Control for Serially Connected Isolated Structures Subject to Two-directional Horizontal Earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 32~37 (in Chinese)
- [5] 刘启方, 金星. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1~9
Liu Qi-fang, Jin Xing. Basic Characteristics of Near-fault Ground Motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2006, 26(1): 1~9 (in Chinese)
- [6] 杨迪雄, 赵岩, 李刚. 近断层地震运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(2): 133~140
Yang Di-xiong; Zhao Yan; Li Gang. Influence Analysis of Motion Characteristics of Near-fault Ground Motions on Seismic Responses of Long-period Structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(2): 133~140 (in Chinese)
- [7] 陈火红, 杨剑, 薛小香, 王鹏波. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007
Chen Huo-hong, Yang Jian, Xue Xiao-xiang, Wang Peng-bo. New Marc Finite Element Examples Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2007 (in Chinese)
- [8] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
Lu Xin-zheng, Ye Lie-ping, Miao Zhi-wei. Elastoplastic Analysis of Buildings Against Earthquake [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009 (in Chinese)
- [9] 陆新征, 李易, 叶列平, 马一飞. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J]. 工程力学, 2008, 25(Sup.2): 150~157
Lu Xin-zheng, Li Yi, Ye Lie-ping, Ma Yi-fei. Study on Design Method to Resist Progressive Collapse for Reinforced Concrete Frames [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Sup.2): 150~157 (in Chinese)
- [10] 陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 叶列平. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J]. 山西地震, 2006, 126(2): 7~11
Lu Xin-zheng, Miao Zhi-wei, Jiang Jian-jing, Ye Lie-ping. Collapse Simulation of High-Rise Structure of Concrete under the Action of Static and Dynamic Load [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2006, 126(2): 7~11 (in Chinese)

[作者简介] 杜永峰(1962~), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事结构工程与减震控制研究