

李广洲, 谭平, 李祥秀, 等. 飞机撞击某隔震办公楼的研究[J]. 华南地震, 2015, 35(4): 17-24. [LI Guangzhou, TAN Ping, LI Xiangxiu, et al. Study on the Plane Crash on An Isolated Office Building[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(4): 17-24.]

飞机撞击某隔震办公楼的研究

李广洲¹, 谭平¹, 李祥秀², 周福霖^{1, 2}

(1. 广州大学, 广州 510405; 2. 北京工业大学, 北京 100022)

摘要: 对某重要办公楼进行了基础隔震设计, 研究了其强震下的隔震效果; 基于时程分析法, 建立了在飞机撞击下的评价点绝对加速度反应谱, 分析了飞机撞击区域应力的变化。研究结果表明, 评价点的反应谱峰值出现的位置由隔震前的高频段挪至隔震后的低频段; 撞击区域应力有所降低; 当飞机的速度小于 145 m/s 时, 隔震层的位移小于规范规定的最大容许位移。

关键词: 基础隔震; 飞机撞击; 时程分析; 反应谱

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2015) 04-0017-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.04.003

Study on the Plane Crash on An Isolated Office Building

LI Guangzhou¹, TAN Ping¹, LI Xiangxiu², ZHOU Fulin^{1, 2}

(1. Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: This paper performed a base-isolated design for a office building, and systematically investigated the performance of the isolated building under strong ground motion. Based on time-history analysis, the paper established the absolute acceleration response spectrum of the evaluation impact point during aircraft crash, and analyzed the change of stress on the crash area. The research results show that the response spectrum peak of the evaluation point moved from high frequency band in the base-fixed case to low frequency band in the base-isolated case, meanwhile, the stress on the crash area for the isolated building is reduced significantly; on the condition that the speed of the aircraft is less than 145 m/s, the drift of isolation layer is less than the maximum allowable of the standard provisions.

Keywords: Base isolation; Plane crash; Time history analysis; Response spectrum

收稿日期: 2014-03-10

基金项目: 973 项目(2012CB723304)、125 科技支撑计划(2012BAJ07B02)、国家基金项目(91315301-07)和长江学者和创新团队发展计划 (IRT13057)

作者简介: 李广洲 (1989-), 男, 硕士生, 主要从事结构抗震与减震研究。

E-mail: 1041319478@qq.com.

通信作者: 谭平 (1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事结构抗震与减震控制研究。

E-mail: ptan@foxmail.com.

0 引言

基础隔震体系是指在结构物底部与基础顶面之间设置隔震装置而形成的结构体系^[1], 其中隔震装置起到隔离地震作用向上部结构传输和耗散地震能量的作用, 保障上部结构及设备的安全。目前全世界已建成 5 000 栋左右的隔震建筑, 主要分布在人口密集、集约化成本高的城市以及富裕发达地区。杜永峰和朱前坤^[2]介绍了高层隔震结构风振响应特点并提出了建议; 熊伟和熊世树^[3]对高层隔震建筑进行了概念设计; Hamid Toopchi-Nezhad^[4]提出一种有限元模型分析纤维橡胶隔震支座; 冯玲玲^[5]研究了高层建筑层间隔震和 TMD 混合控制的抗震; 张颖、谭平等^[6]通过仿真分析研究了带智能磁流变阻尼器的层间隔震混合控制; 范世凯、谭平等^[7]对某核电厂应急指挥中心进行了基础隔震研究。

近几年来, 随着重要建筑的建设发展及大型商用飞机数量剧增, 飞机撞击重要建筑的问题越来越引起学者们的重视。研究飞机撞击的问题主要有两种方法: 耦合法和非耦合法^[8]; 按照撞击物体的特性和破坏机理, 撞击问题一般分为刚性体撞击和变形体撞击^[9]。核电站设计中已开始考虑飞机撞击屏蔽厂房因素^[10]; 刘晶波和郑文凯^[11]采用有限元方法建立飞机与核电站屏蔽厂房非线性模型; 张涛、方秦、吴昊等^[12]建立了精细化的飞机和核电站模型进行分析; 但是党政机关这些重要建筑几乎还没有考虑飞机撞击的影响。

本文对国家某部委办公楼进行了基础隔震设计, 并研究了其强震下减震效果; 在此基础上, 基于时程分析法, 建立了在飞机撞击下的评价点绝对加速度时程曲线反应谱, 分析了飞机撞击区域应力的变化以及飞机撞击下隔震层的最大位移。

1 工程概况

本模型采用美国 CSI 公司开发的集成化的通用结构分析与设计软件 SAP2000 建模。用到的单元类型有: 框架单元、壳单元和橡胶隔震单元。梁和柱用框架单元模拟, 混凝土墙、板用壳单元模拟, 隔震支座用橡胶隔震单元模拟。

模型将上部结构的质量和转动惯量均集中在各节点上, 而两相邻节点间的连接采用梁单元模拟, 下部基础采用 Solid 单元模拟, 此模型可精确的模拟隔震层橡胶支座的布置, 方便对隔震支座的受力计算。某办公楼分析模型如图 1 所示, 长

79.6 m, 宽 24.6 m, 高 28.8 m, 一共八层, 每层 3.6 m, 该建筑所在地区抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度峰值为 0.2 g, 设计地震分组为第一组, 场地设计特征周期为 $T_g=0.4$ s。

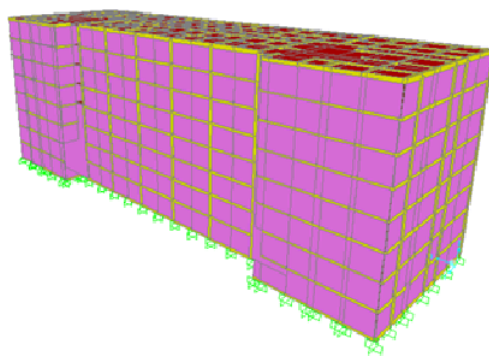


图 1 隔震办公楼分析模型

Fig.1 Finite element model of the base-isolated office building

2 隔震设计

2.1 隔震支座的布置及选型

隔震层支座布置时, 考虑到结构的重要性, 以及隔震层位移要求和隔震效果, 设计时将周期控制在 2~3 s, 屈重比大于 4%。隔震支座对称布置如图 2 所示, 以减小偏心的影响。基于上述原则, 最终选用 80 个支座, 其中 LNR600: 42 个、LRB700: 12 个、LNR800: 12 个、LRB800: 14 个, 支座参数见表 1, 分析结果表明隔震后周期从 0.329 s 变为 2.358 s。

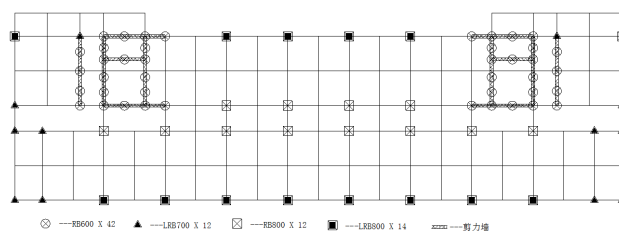


图 2 支座布置图

Fig.2 Diagram of bearings arrangement

2.2 动力时程分析

设防地震下水平向地面运动加速度峰值取为 0.2 g; 罕遇地震下水平向地面运动峰值加速度取为 0.4 g。《建筑抗震设计规范》^[13](GB50011-2010) 要求不少于 3 条地震波, 本工程拟采用 3 条地震波。其中, 人工合成加速度时程曲线 1 条,

简称为 Wave1 波，与规范地震影响系数曲线在统计意义上相符的强震记录 2 条，选用 El Centro 波和 Taft 波，所采用的 3 条地震波相对应的时程曲线及频谱如图 3 所示。

表 1 隔震支座参数

Table1 Design parameters of bearing isolators			
型号	有效直径/mm	总高度/mm	数量/个
LNR-G4-D600-Tr120-C30	600	267.5	42
LRB-G4-D700-Tr140-C140	700	315	12
LNR-G4-D800-Tr162-C40	800	363	12
LRB-G4-D800-Tr162-C160	800	363	14
支座总数			80

注：表中总高度包含上下连接板

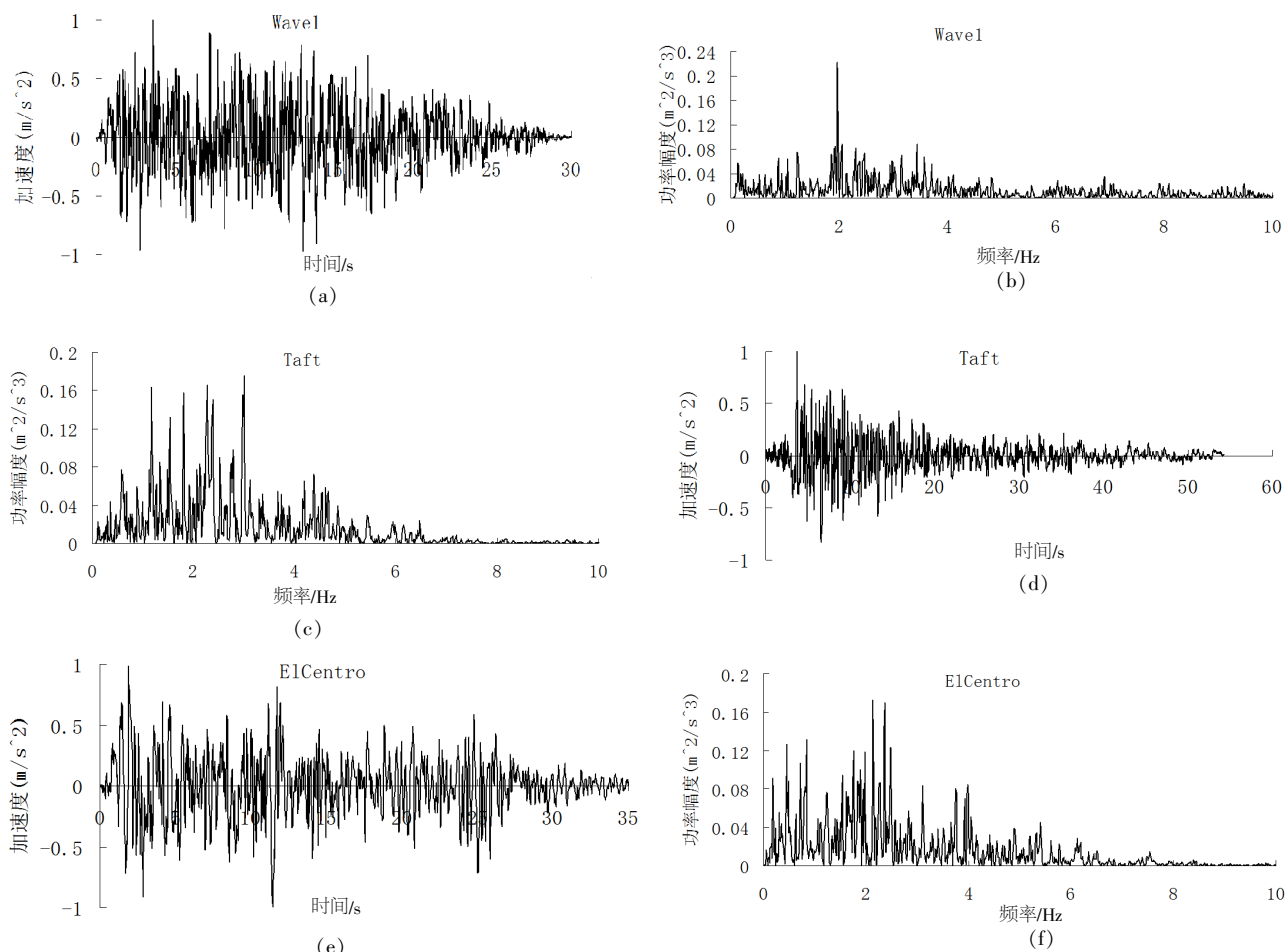


图 3 时程曲线及频谱

Fig.3 Time histories curves and spectrum of selected ground motions

设防地震下抗震和隔震结构的楼层的剪力值见图 4，楼层倾覆弯矩值见图 5。

由图 4 和图 5 可得，采用基础隔震技术后，结构的楼层剪力和倾覆弯矩大大减小，隔震结构与抗震结构楼层剪力比最大值为 0.33，楼层倾覆弯矩之比最大值为 0.35，根据抗震规范规定，结构减震系数为 0.35。

罕遇地震 El Centro 波下结构顶层加速度时程曲线见图 6。从图中可得，隔震后结构顶层绝对加速度峰值由 11.8 mm/s² 降低到 1.83 mm/s²，隔震效果明显。

《叠层橡胶支座隔震技术规程》^[14]规定的支座最大容许位移为 0.55 Dr 和 3 Tr 两者的最小值，LRB800、LNR800 支座 Dr 为 800 mm，Tr 为 162

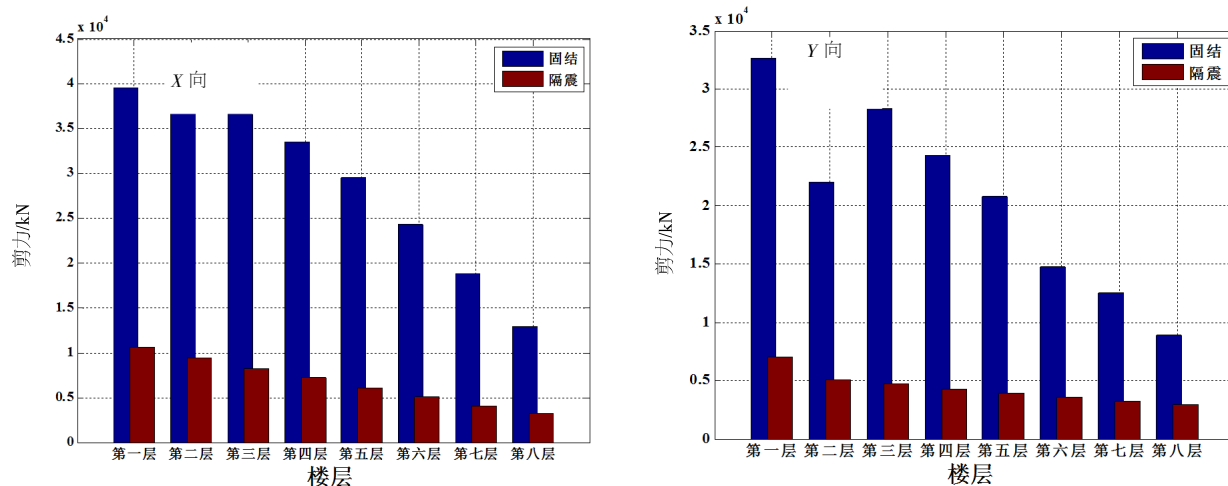


图4 结构X向和Y向剪力

Fig.4 Shear force in X and Y directions

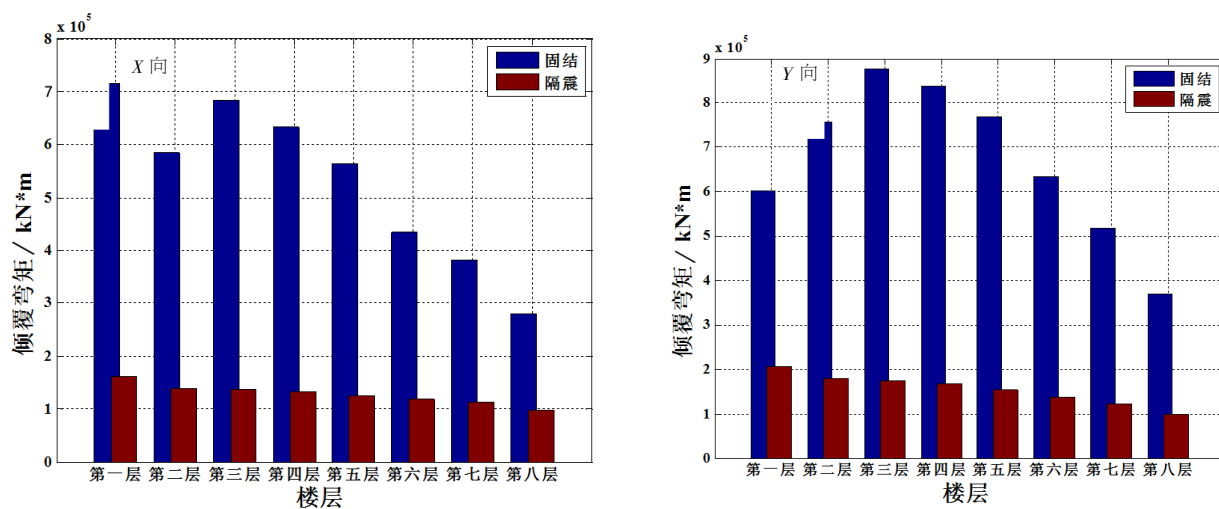


图5 结构X向和Y向倾覆弯矩

Fig.5 Overturning moment in X and Y directions

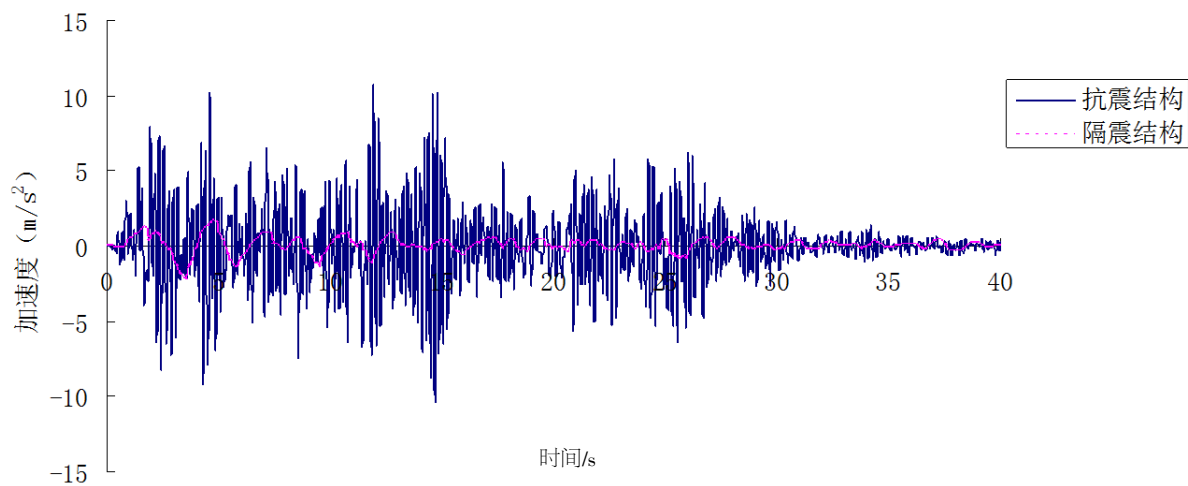


图6 顶层加速度对比

Fig.6 Comparison of roof acceleration

mm, 故最大容许位移为 $0.55 D_r=440 \text{ mm}$; LRB700 支座 D_r 为 700 mm , T_r 为 140 mm , 故最大容许位移为 $0.55 D_r=385 \text{ mm}$; LNR600 支座 D_r 为 600 mm , T_r 为 120 mm , 故最大容许位移为 $0.55 D_r=330 \text{ mm}$; 所以隔震层的最大容许位移为 330 mm 。根据时程分析结果, 罕遇地震作用下结构隔震层最大位移为 300 mm , 小于最大容许位移, 满足规程规定。

3 飞机荷载时程曲线

飞机撞击的刚性荷载函数 $P(t)=p_b[x(t)]+\mu[x(t)]V^2(t)$, 其中: $p_b(x)$ 为压碎机身 x 长度的荷载(垂直作用), $x(t)$ 为从机头到压碎处的距离, $\mu(x)$ 为单位长度飞机质量, $V(t)$ 为尚未压碎的飞

机部分的速度^[15]。波音 707-320 飞机撞击荷载分布区域可以简化为三个区域如图 7 所示, 撞击前飞机速度为 250 m/s 时的时程曲线如图 8 所示。根据飞机基本特征和撞击过程的具体情况, 各区域对应的压力时间曲线如图 9~11 所示。

4 飞机撞击计算

从飞机撞击的刚性荷载函数中, 可以看出飞机撞击荷载与速度的平方近似呈线性关系, 当速度为 250 m/s 时, 隔震层的最小位移为 863 mm , 大于《叠层橡胶支座隔震技术规程》规定的最大容许位移, 隔震层发生破坏。当速度小于 145 m/s 时, 隔震层的最大位移为 322 mm 小于《叠层橡胶支座隔震技术规程》规定的最大容许位移, 隔震

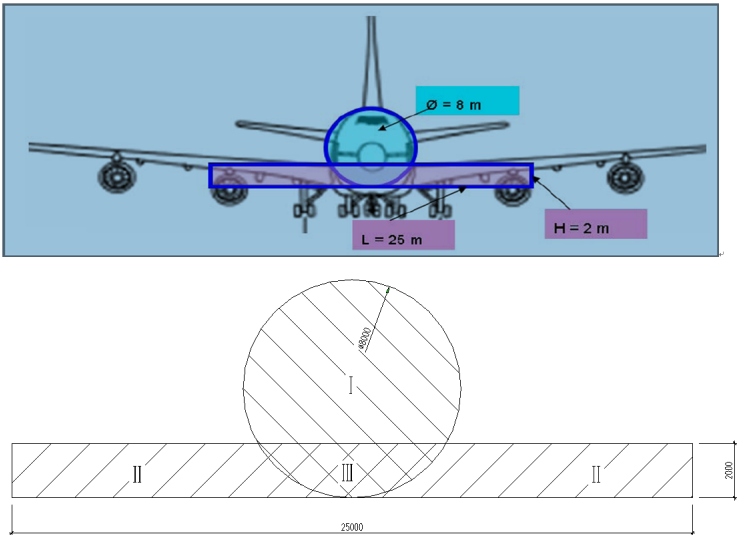


图 7 飞机撞击荷载分布图
Fig.7 Load distribution with the aircraft hit

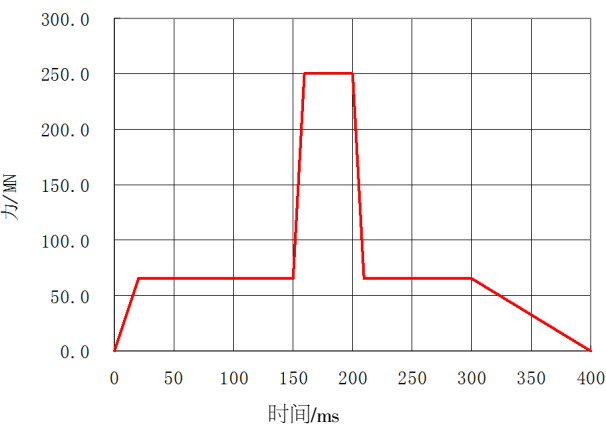


图 8 时程曲线
Fig.8 Time histories curves

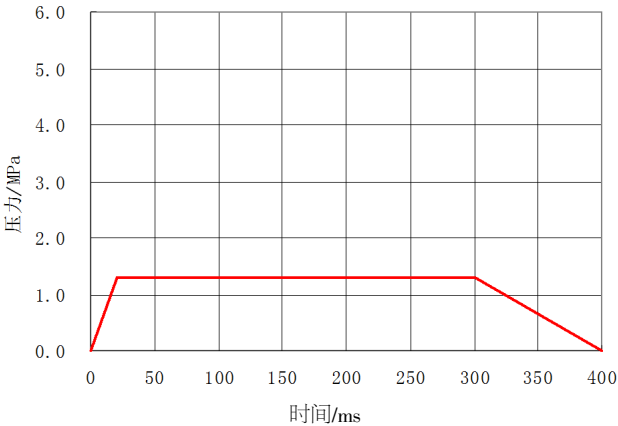


图 9 I 区时程曲线
Fig.9 Time histories curves in area I

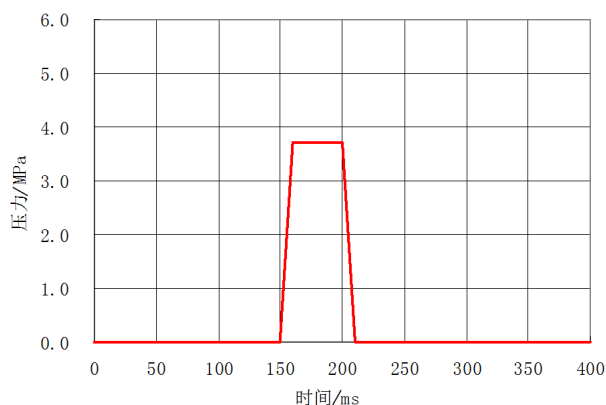


图 10 II 区时程曲线

Fig.10 Time histories curves in area II

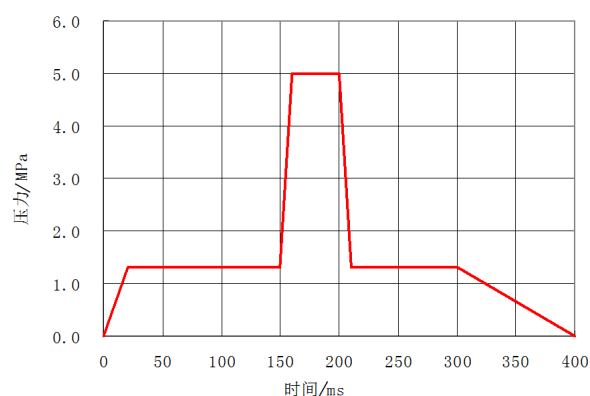


图 11 III 区时程曲线

Fig.11 Time histories curves in area III

层没有发生破坏。

4.1 X 方向撞击

撞击中心点的位置为 NODE255 (0 m, 12.3 m, 12.60 m), 沿 X 方向撞击, 如图 12 所示。评价点为 NODE256 (0 m, 12.3 m, 16.2 m)、NODE691 (0 m, 16.8 m, 16.2 m), 各评价点的绝对加速度反应谱曲线是在阻尼比为 4% 的情况下生成的。评价点的绝对加速度反应谱对比曲线如图 13 和图 14。

由以上对隔震前、后结构在飞机撞击荷载作用下的绝对加速度反应谱的对比分析可以得到如下结论: 隔震后, 当该建筑发生 X 向撞击时, 其各评价点 X 向反应谱峰值出现的位置由隔震前的高频段挪至隔震后的低频段, Y、Z 向的反应谱得到明显减小。隔震后撞击区域最大应力得到极大减小, 撞击点应力值由 7.5MPa 减小至 3.7Mpa, 大约减小至原来的 1/2, 隔震与非隔震时相比较, 撞击区域的应力加强设计值可以减少 1/2。

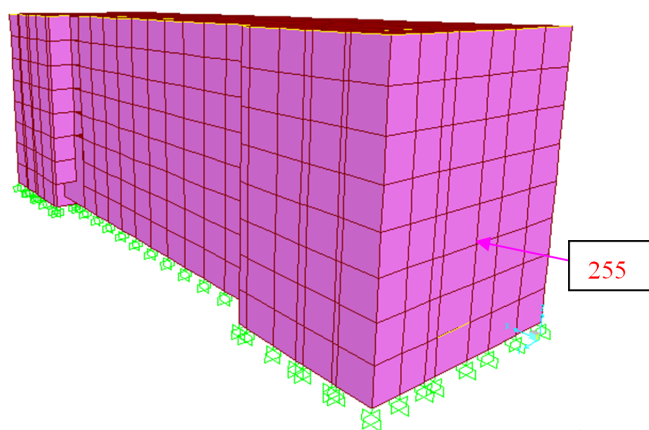


图 12 撞击中心点 NODE255

Fig.12 Impact center of NODE 255

4.2 Y 方向撞击

撞击中心点的位置为 NODE644 (39.8 m, 0.0 m, 12.6 m), 沿 Y 方向撞击, 如图 15 所示。评价点为 NODE699 (39.8 m, 0.0 m, 16.2 m)、NODE751 (39.8 m, 0.0 m, 19.8 m), 各评价点的绝对加速度反应谱曲线是在阻尼比为 4% 的情况下生成的。评价点的绝对加速度反应谱对比曲线如图 16 和图 17。

由以上对隔震前、后结构在飞机撞击荷载作用下的绝对加速度反应谱的对比分析可以得到如下结论: 隔震后, 当该建筑发生 Y 向撞击时, 其各评价点 Y 向反应谱峰值出现的位置由隔震前的高频段挪至隔震后的低频段, X、Z 向的反应谱得到明显减小。隔震后撞击区域最大应力得到极大减小, 撞击点应力值由 12 MPa 减小至 4.9 Mpa, 大约减小至原来的 1/3, 隔震与非隔震时相比较, 撞击区

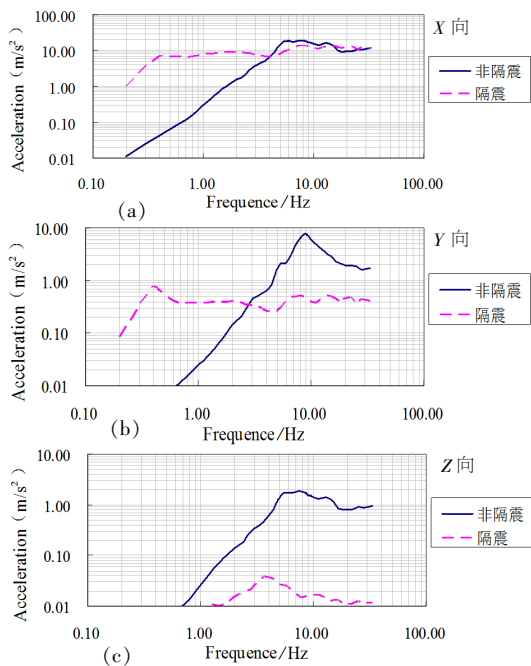


图 13 NODE256 反应谱对比

Fig.13 Comparison of response spectrum at NODE256

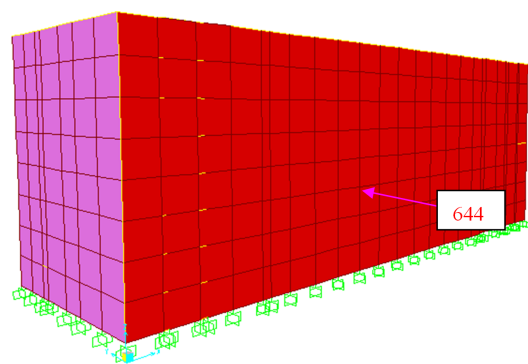


图 15 撞击中心点 NODE255

Fig.15 Impact center of NODE255

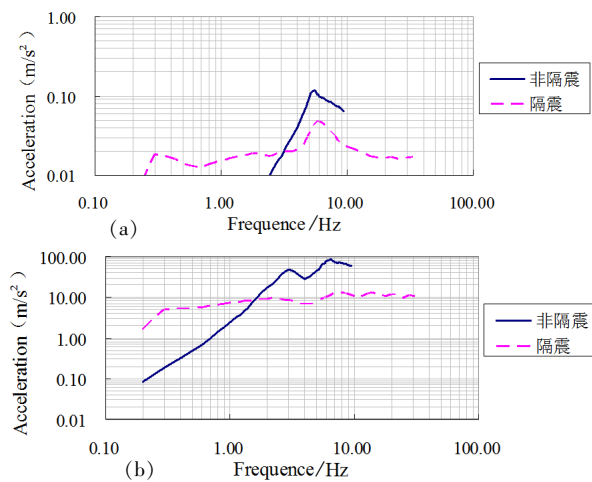


图 17 NODE751 反应谱对比

Fig.17 Comparison of response spectrum at NODE751

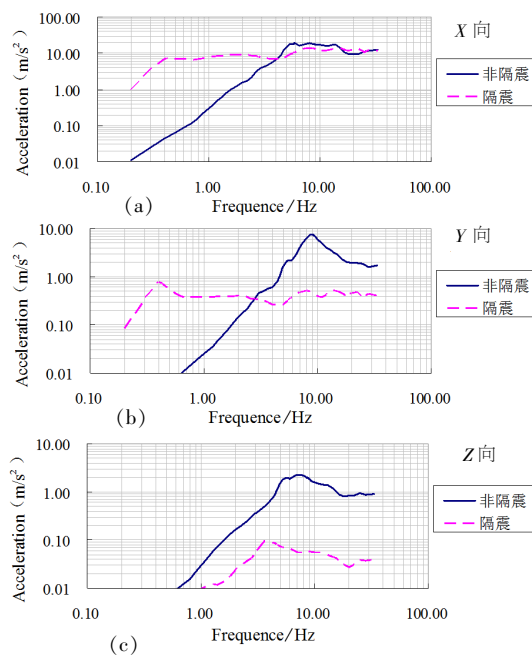


图 14 NODE691 反应谱对比

Fig.14 Comparison of response spectrum at NODE691

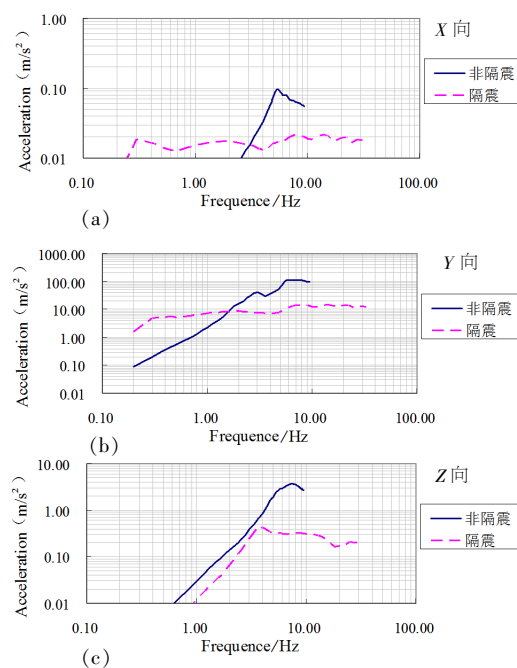
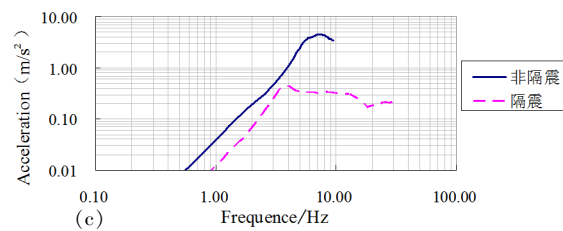


图 16 NODE699 反应谱对比

Fig.16 Comparison of response spectrum at NODE699



域的应力加强设计值可以减少 1/3。

5 结语

本文对某办公楼进行了基础隔震设计, 研究基础隔震效果; 在此基础上, 基于时程分析法, 建立了在飞机撞击下的分析, 初步得到以下结论:

(1) 采用基础隔震技术后, 设防地震作用下结构的楼层剪力和倾覆弯矩大大减小, 结构减震系数为 0.35; 罕遇地震下结构顶层加速度有较大的降低。

(2) 某隔震办公楼, 当发生 X 向飞机撞击时, 其各评价点 X 向反应谱峰值出现的位置由隔震前的高频段挪至隔震后的低频段, Y 、 Z 向的反应谱得到明显减小; 当发生 Y 向飞机撞击时, 其各评价点 Y 向反应谱峰值出现的位置由隔震前的高频段挪至隔震后的低频段, X 、 Z 向的反应谱得到明显减小。

(3) 隔震后撞击区域最大应力得到极大减小, 大约减少为原来的 1/3~1/2; 隔震后的绝对加速度在高频阶段有所降低。

(4) 当飞机速度小于 145 m/s 时, 隔震层的位移为小于《叠层橡胶支座隔震技术规程》规定的最大容许位移, 隔震层没有发生破坏; 当飞机速度大于 145 m/s 时, 隔震层的位移为小于《叠层橡胶支座隔震技术规程》规定的最大容许位移, 隔震层发生破坏。

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] 杜永峰, 朱前坤. 高层隔震建筑风振响应研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30 (6): 64-68.
- [3] 熊伟. 高层隔震建筑设计的若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2008.
- [4] Hamid Toopchi -Nezhad, Michael J. Tait, Robert G. Drysdale, et al. Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: Finite element analysis [J]. Composite Structures, 2011 (93): 850-859.
- [5] 冯玲玲. 高层建筑层间隔震和 TMD 混合控制抗震研究 [J]. 建材世界, 2009, 30 (5): 65-68.
- [6] 张颖, 谭平, 李祥秀. 带智能磁流变阻尼器的层间隔震混合控制研究[J]. 华南地震, 2013, 33 (1): 26-32.
- [7] 范世凯, 谭平, 刘德稳, 等. 某核电厂应急指挥中心基础隔震研究[J]. 华南地震, 2014, 34(1): 80-85.
- [8] 林丽, 陆新征, 韩鹏飞, 等. 大型商用飞机有限元建模及撞击力研究[C]. 西安: 中国土木工程学会防护工程分会第十四次学术年会, 2014.
- [9] 王远功. 飞射物对钢筋混凝土板碰撞的局部破坏及其设计评价公式[J]. 核科学与工程, 1994 (14): 203-212.
- [10] 汤搏. 关于核电厂防大型商用飞机撞击的要求[J]. 核安全, 2010 (3): 1-16.
- [11] 刘晶波, 郑文凯. 大型商用飞机撞击核电站屏蔽厂房荷载研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33 (6): 97-100.
- [12] 张涛, 方秦, 吴昊, 等. 飞机对核安全壳撞击破坏效应的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15 (4): 335-340.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 中国工程建设标准化协会. CECS126-2001 叠层橡胶支座隔震技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [15] 王远功, 余爱萍. 飞机撞击核反应堆安全壳荷载一时间曲线的确定[J]. 核科学与工程, 1991, 11 (3): 208-215.