12. 积极、稳步地推进隔震减震技术的工程应用

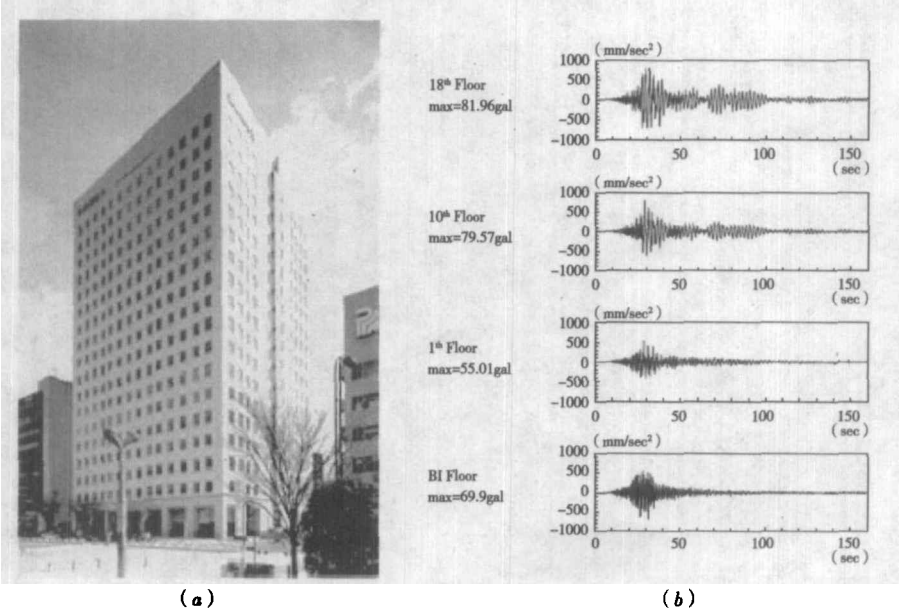
刘伟庆　王曙光

（南京工业大学土木工程学院，南京　210009）

隔震减震技术的实际效果已经被大量的强震观测结果所证实，是提高地震高烈度区房屋抗震性能的重要手段；我国《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）已经将房屋隔震与消能减震设计纳入其中。本文介绍了采用隔震减震技术的典型工程实例，分析了制约隔震减震技术在我国大规模工程应用的主要因素，并就隔震减震装置开发及其质量检验、设计方法、施工验收程序等方面提出了改进建议，最后提出应“积极支持、稳步推进”隔震减震技术的工程应用。

1　隔震建筑的强震观测记录

大量振动台试验研究和理论分析结果表明，隔震和消能减震建筑具有优异的抗震性能[1]~[5]；但是，如果没有强震观测记录，其实际使用效果还是难以令人信服的。日本、美国等国的隔震建筑，在最近几次大的地震中，表现出了优异的抗震性能（见表1），上部结构水平向地震作用显著降低。图1（*a*）是日本仙台的一栋18层、84.9m高的隔震建筑，是日本第一个超过60m的高层隔震建筑[6]；平面尺寸为47.3m×41.7m，高宽比分别为1.60（东西向）、1.81（南北向）；隔震层采用了滑移支座和橡胶支座；该建筑东西向的加速度记录见1（*b*），由此可见其良好的隔震效果。



（*a*）　　（*b*）

图1　日本仙台18层隔震建筑

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

我国最近10多年建设了大量隔震建筑，但是由于理念、设备、经济等原因，绝大多数隔震建筑都没有设置强震观测系统，或者设置了系统但还没有机会遭遇到强震检验，导致中国大陆有如此众多的隔震建筑却没有强震记录的局面，实在是一件憾事，值得我们反思。

日本隔震建筑的强震实测记录　　表1

地震	震级	最大加速度（gal）		地表最大位移
		隔震层下	上部结构	(cm)
2005年福冈地震	7.0	489	238	19.5
2004年新潟地震	6.8	808	205	15.0
2003年十胜冲地震	8.0	286	229	30.0
2003年宫城冲地震	7.0	116	58	1.1
1995年阪神地震	7.3	300	106	12.0
1994年美国北岭地震	6.7	359	128	3.5

2 隔震减震技术在国内外的应用概况

目前，隔震技术在我国、日本、意大利、美国、新西兰等国家获得了大量应用；不但应用于新建工程的抗震设计，而且也应用于历史性建筑的抗震加固。日本是隔震建筑最多的国家，从1983年开始建设隔震房屋，在1995年阪神地震后，由于隔震房屋在地震中的优越表现，使得隔震建筑蓬勃发展（见图2）。在中国大陆，目前已有超过600栋的隔震建筑，其中80%是住宅；全国超过16个以上的省份采用了隔震减震技术；其中北京地铁站工程，隔震建筑总面积达到48万m^2，具有隔“地震和地铁振动”双重功能；云南昆明新机场航站楼工程，隔震层平面尺寸324m×256m，成为目前国际上单体底盘面积最大的隔震建筑。我国台湾地区在9.21集集地震以后，隔震减震技术也获得了飞速的发展。

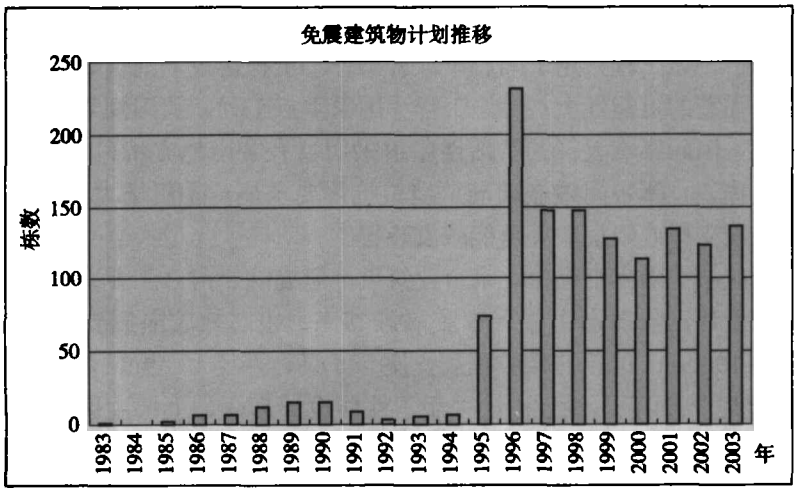


图2　日本隔震建筑发展概况

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

目前，隔震技术有朝着向高层建筑、大跨建筑、高科技厂房等方面发展的趋势，如日本隔震建筑最高达50层，大跨单层仓库平面尺寸达300m×100m，美国旧金山国际机场隔震层平面尺寸达350m×150m。尽管目前对其减震机理还存在疑问，或者还解释不清，但实际地震检验结果表明了其有效性，这正是我们需要深入研究的。

3 隔震减震典型工程应用实例

3.1 昆明新机场航站楼

昆明新机场是国家“十一五”期间批准新建的大型枢纽机场，属于国家重点工程；工程总体定位为是：面向东南亚、南亚，连接欧亚的国家门户枢纽机场。根据场地地震安全性评估报告，抗震设防烈度约8.2度。航站楼南北长约850m，东西宽约1130m，主楼地下3层，地上3层；主体结构采用钢筋混凝土框架结构，屋盖为钢结构；基本柱网为12m×12m，支撑屋盖钢结构的柱距约24m×26m。建筑中轴屋脊最高点相对标高为72.25m。采用空间交叉彩带钢结构支撑屋盖。航站楼建筑面积约423500m^2，属于乙类建筑。建筑效果图如图3所示。

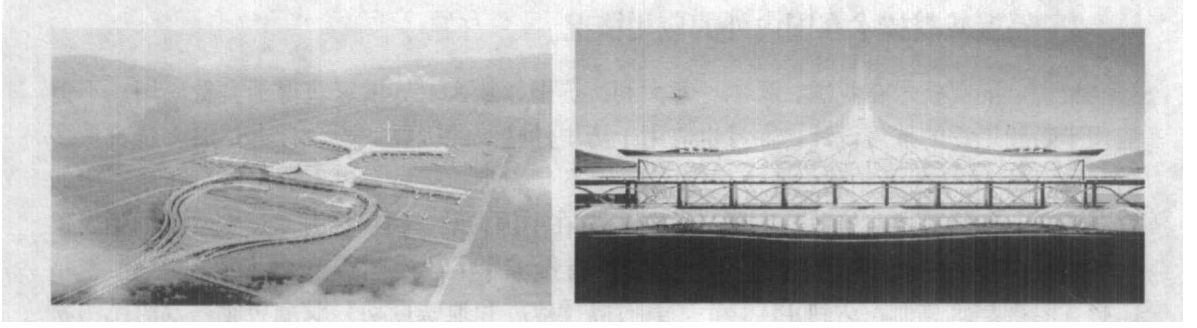


图3 昆明新国际机场航站楼建筑效果图

昆明新国际机场的建设场地位于近南北向小江地震带西缘，距小江断裂带约12km；小江断裂带为世界上活动性较强的断裂带之一。

基于以下分析，该工程采用了隔震设计方案：①工程建设场地位于地震高烈度区，在使用期限内遭遇强震的可能性大；②该工程为国家重点工程，我国规划中的第四大枢纽机场，交通流量大，国际影响大；③航站楼屋盖采用富有云南地方特色的飘带钢结构支撑，纵横向刚度不对称，且飘带间镶嵌玻璃幕墙，抗震要求高；④机场大厅大空间功能要求，难于布置消能减震支撑或阻尼墙等消能减震装置。

昆明新机场航站楼隔震工程由北京市建筑设计研究院、南京工业大学和云南省地震工程研究院等单位设计；隔震层由叠层橡胶隔震支座、铅芯橡胶隔震支座和粘滞阻尼器组成，共采用直径1000mm的铅芯橡胶隔震支座535只，直径1000mm的叠层橡胶隔震支座1177只，粘滞阻尼器54只。设计中还采用了性能设计理念，上部主体结构及大跨钢飘带结构“中震不屈服”；隔震层以上结构的水平向地震作用根据隔震分析结果按7.5度设计，竖向地震作用按原设防烈度计算，考虑了行波效应等。该工程建成后，将为世界上最大的隔震建筑。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 宿迁海关业务综合楼

宿迁海关业务综合楼位于宿迁市宿城新区，大楼地上 17 层，地下 1 层，高度为 73.6m。现浇钢筋混凝土框架—剪力墙结构，建筑面积 18229.5m²。建筑主要使用功能为办公，图 4 为该建筑的效果图。

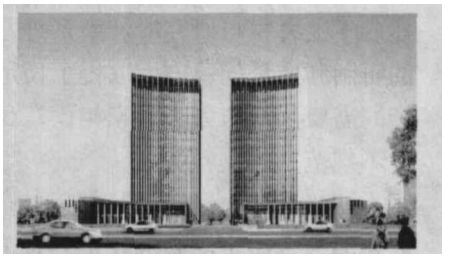


图 4 宿迁市海关业务综合楼透视图

本工程隔震层设置在地下室顶面，主体结构部分隔震层采用了 5 个直径 1300mm 的铅芯橡胶隔震支座，20 个直径 1200mm 的铅芯橡胶隔震支座，3 个直径 1000mm 的铅芯橡胶隔震支座和 2 个直径 1000mm 的橡胶隔震支座；裙房部分采用了 6 个直径 700mm 的铅芯橡胶隔震支座，8 个直径 700mm 的橡胶隔震支座和 16 个直径 500mm 的弹性滑移隔震支座；隔震层设置了 18 个非线性粘滞阻尼器。

宿迁海关业务综合楼由南京市建筑设计研究院和南京工业大学设计。该工程建成后，将为我国最高的隔震建筑。

3.3 宿迁金柏年财富广场大楼

江苏金柏年财富广场主楼 A、B 栋，地上 25 层，地下 3 层，钢筋混凝土框架—剪力墙结构体系，建筑物总高度 94.95m，建筑功能为商住楼。图 5 为金柏年财富广场的建筑透视图。



图 5 金柏年财富广场建筑透视图

该工程位于地震高烈度区——宿迁市，抗震设防烈度为 8 度，地震基本加速度为 0.3g。本工程属于多塔结构，初步分析结果表明，如采取传统抗震设计方案，结构的主要抗侧力构件—抗震墙数量多、截面尺寸大，从而严重影响建筑功能和经济性。因此，采取“主体结构按常规钢筋混凝土框架—抗震墙方案设计，层间位移超限的楼层设置阻尼消能装置，通过提高楼层的阻尼来控制薄弱层位移”的设计方法。

在主楼 A 栋的 X 向、Y 向分别布置 30 片粘滞阻尼墙，设置于 5～22 层；B 栋的 X 向布置 35 片粘滞阻尼墙，Y 向布置 26 片粘滞阻尼墙，设置于 5～24 层。分析结果表明，粘滞阻尼墙为原结构提供了 2.5%的附加阻尼，结构的最大层间位移角均小于 1/1000，满足了《建筑抗震设计规范》要求。采用消能减震设计方案后，抗震墙的数量、截面尺寸及配筋量较传统抗震方案有大幅度的下降，建筑功能得到大幅度提升，取得了显著的技术经济效益。

4 隔震减震技术推广应用中存在的问题

“房屋隔震和消能减震设计”进入《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001），符合国际上建筑抗震设计发展的趋势，是多年来我国隔震减震研究与应用成果的结晶，是工程界对这一抗震新技术的肯定。《建筑抗震设计规范》颁布后，有力地促进和规范了隔震与消能减震技术的应用，解决了高烈度区建筑抗震设计中的许多难题。然而，由于隔震减震不同于传统抗震设计，涉及面更广、更复杂，处理不好的话，不仅会影响实际减震效果，而

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

且会引起人们对技术本身的质疑，妨碍抗震新技术的推广应用。现将有关问题分析如下：

（1）隔震减震产品。我国从“八五”科技攻关项目开始，对隔震减震装置就开展了研究。在隔震支座的研发方面，先后建成了汕头和泰、无锡圣丰等橡胶隔震支座生产厂家，建成了广州大学、华中科技大学等产品质量检测机构；在消能减震装置的研发方面，先后建成了上海材料研究所、南京丹普等粘滞阻尼器生产厂家。应该说，我国在隔震减震产品的研制和质量检验方面取得了长足的进展，这也使得隔震减震产品的价格更加适应中国市场的需要。但与先进国家相比，我国隔震减震产品的种类不多，产品质量参差不齐，市场并不规范。

（2）计算与设计。“房屋隔震和消能减震设计”首次进入《建筑抗震设计规范》，对于成熟的内容给予明确的规定，对于有争议的、研究不充分的方面进行严格的限制，是必须的。然而，经过这么多年的研究和工程实践，一些已经解释清楚的问题，一些实践证明是不甚合理的条款，应该及时修改。

（3）造价。房屋采取隔震与消能减震措施，其主要目的是提高房屋的抗震安全性，降低造价只是副产品，不能作为追求的目标。以往房屋的投资渠道比较单一，《建筑抗震设计规范》要求做经济比较，也是可以理解的；但是对于非政府投资项目，业主有积极性适当增加一些投入来提高房屋的抗震安全储备，应该是值得鼓励的。

（4）产品质量检测。隔震减震产品的质量，直接影响到房屋的安全；如果隔震支座的质量不过关的话，甚至在正常使用情况下就有可能出现安全问题，更谈不上地震发生的时候能否发挥作用的问题。随着现在大直径隔震支座、大吨位阻尼器的出现，隔震减震产品对结构本身的影响愈来愈显著，完全不同于一般的建筑结构材料。

（5）施工验收。好的设计意图，需要有好的施工作保障。隔震减震房屋与常规建筑不同，非常强调建筑的构造措施；构造措施不到位，难以发挥理想的减震效果。

5 推进隔震减震技术健康发展的建议

汶川地震震害证明，我国《建筑抗震设计规范》是可靠的，几代人的努力是卓有成效的；依靠科技进步，立足于工程抗震，是减轻地震灾害的根本保证。隔震减震作为抗震新技术，经过试验研究、理论分析和实际地震检验，证明是行之有效的；我们也应本着科学的态度，来支持、规范隔震减震新技术的推广应用。建议如下：

（1）恢复建立隔震减震专家工作委员会（以下简称“专家委员会”）。专家委员会的工作职责是：规划、指导和协调“建筑隔震与消能减震设计”的研究和应用。

日本免震构造协会（JSSI）成立于1993年，该协会由日本科研人员、设计事务所、施工单位、隔震产品生产商等参与，其目的为普及隔震结构。主要业务范围包括：隔震结构研究（设计方法、施工工艺、产品研发）；隔震结构相关技术标准的制定；隔震结构相关技术和维护管理的知识普及；隔震结构相关技术人员的培训；隔震结构相关的国际交流；举办隔震结构研究成果发表及相关学术会议；隔震结构相关期刊和图书的发行；隔震结构相关的建筑法规的评价、认定与认证。

（2）加强隔震减震装置的研发和市场规范。在隔震装置方面，应该加大大直径橡胶隔震支座、高阻尼橡胶隔震支座和弹性滑移支座等的研发；在消能减震装置方面，目前产品主要局限在粘滞阻尼器，应开发适合各种工程需要的、系列化的消能减震装置，如软钢

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

类、粘弹性类、粘滞类、弹簧类等消能减震装置。应该提高对隔震减震产品质量重要性的认识，建立健全产品质量的监控体系，规范产品质量检测机构的认证制度，提高各类产品的抽检比例。

（3）加强隔震减震工程的设计审查力度。隔震减震设计通常由多家单位合作完成，同时还涉及产品生产、安装、施工等环节，比常规工程复杂。行业主管部门应建立隔震减震设计审查制度，由省级及以上建设行政主管部门组织设计审查；隔震减震工作委员会出版隔震减震研究与应用的年度进展报告。

（4）加强隔震减震工程的施工专项验收。隔震减震装置是结构抗震设防的主体，对结构抗震安全性具有举足轻重的影响，但是其施工过程相对比较复杂。应严把施工阶段的质量关，在房屋验收前开展隔震减震装置安装的专项验收。建立房屋使用若干年后的隔震减震技术复查、回访制度。在有条件的建筑中建立强震观测系统。

中国的减震控制事业在学术界、工程界和工业界的辛勤努力、团结协作下，有了一个良好的开端，基本满足了工程建设中的急需，在国际上也确立了相应的地位。然而，与先进国家相比，与国家防震减灾的严峻形势和现实需要相比，与科学发展观的要求相比，我们任重道远！“积极支持，稳步推进”隔震减震，势在必行。

参 考 文 献

[1] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京：地震出版社，1988.

[2] Housner G W，Bergman L A，Caughey T K，et al. Structural Control：Past，Present，and Future [J]. J. Engng. Mech，1997，123 (9)：897－971.

[3] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京：地震出版社，1997.

[4] 唐家祥，刘再华. 建筑结构基础隔震 [M]. 武汉：华中理工大学出版社，1993.

[5] 日本建筑学会 [日]. 隔震结构设计 [M]. 刘文光译. 北京：地震出版社，2006.

[6] 日本免震构造协会 [日]. 图解隔震结构入门 [M]. 叶立平译. 北京：科学出版社，1998.

[7] 武田寿一 [日]. 建筑物隔震防振与控振 [M]. 纪晓惠等译. 北京：中国建筑工业出版社，1997.

[8] 刘伟庆，王曙光等. 消能支撑钢筋混凝土框架结构的工程应用 [J]. 振动工程学报，1999，12 (2)：267－272.

[9] 刘伟庆，王曙光等. 宿迁市文体综合馆基础隔震设计 [J]. 建筑结构学报，2003，24 (2)：20－24.

[10] R. I. Skinne，W. H. Robinson，G. H. McVerry. 谢礼力，周雍年，赵兴权译. 工程隔震概论 [M]. 北京：地震出版社，1996.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net