

隔震建筑概论

GEZHEN JIANZHU GAILUN

苏经宇 曾德民 田杰 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

隔震建筑概论

苏经宇 曾德民 田 杰·编著

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

全书共分8章, 主要内容包括: 建筑隔震原理与进展、叠层橡胶隔震支座的性能与设计、建筑隔震结构的分析方法、建筑隔震结构的设计方法、建筑隔震结构的构造、建筑隔震结构的施工与验收维护、既有建筑物的基础隔震加固施工、低造价隔震技术等。为方便读者应用隔震技术, 本书还结合实际工程, 列举了建筑隔震设计实例。

本书可供土木工程技术人员阅读, 也可作为高等院校土木工程等专业师生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

隔震建筑概论/苏经宇, 曾德民, 田杰编著. —北京: 冶金工业出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-5024-5889-8

I. ①隔… II. ①苏… ②曾… ③田… III. ①建筑结构—隔震 IV. ①TU352. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 045839 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchbs@cnmip.com.cn

责任编辑 廖 丹 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5889-8

北京鑫正大印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 4 月第 1 版, 2012 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 16 印张; 309 千字; 242 页

45.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010) 65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

建筑隔震技术是一种新兴的抗震技术，主要通过专门的隔震层设置隔震和耗能元件，降低传到建筑结构的地震作用（通常可降低40%~80%），从而提高建筑的安全性，保证建筑物的使用功能。

自20世纪70年代性能稳定可靠的叠层钢板橡胶支座诞生以来，建筑隔震技术逐渐在世界多个国家得到推广应用，如新西兰、美国、意大利、日本、中国等。尤其在日本，当前新建的医院、超高层建筑等广泛采用这一抗震新技术。在汶川地震中，国内隔震建筑首次经受了较大地震的考验，表现出良好的抗震性能。建筑隔震技术在国内更加受到关注，其应用也进入了一个推广加速期。

为推动建筑隔震技术在我国的发展应用，帮助广大工程技术人员深入理解建筑隔震技术，特别是了解我国隔震技术研究应用的实际情况，我们编写了本书。

本书一方面总结了作者多年来在隔震技术方面的研究成果和工程应用经验，另一方面紧密联系近年来国内外隔震技术的研究应用趋势和最新进展，对隔震技术发展历程和应用由浅入深地进行了详细阐述。全书共分8章，主要内容包括：建筑隔震原理与进展、叠层橡胶隔震支座的性能与设计、建筑隔震结构的分析方法、建筑隔震结构的设计方法、建筑隔震结构的构造、建筑隔震结构的施工与验收维护、既有建筑物的基础隔震加固施工、低造价隔震技术等，覆盖了新建和既有建筑隔震技术从设计、产品选用、安装实施到后期管理维护等各阶段。为方便读者应用隔震技术，本书还结合实际工程，列举了建筑隔震设计实例。

本书的编写得到了马东辉教授的无私帮助；赵亚敏、杜志超等与

作者多年在隔震技术领域进行合作研究，为本书的完成做出了重要贡献；本书还得到了宋晓胜博士，高晓明、郭风池硕士等的大力协助，在此一并表示衷心的感谢。

本书可供土木工程技术人員阅读参考，也可作为高等院校土木工程等专业师生的教学参考用书。

限于作者水平，书中不妥之处，敬请广大读者指正。

作 者
2012 年 1 月

目 录

1 建筑隔震原理与进展	1
1.1 建筑隔震的基本概念	1
1.1.1 建筑隔震体系的提出	1
1.1.2 建筑隔震体系的发展历程	2
1.1.3 地震对隔震技术的考验	5
1.2 隔震技术的基本原理	12
1.2.1 隔震体系组成	12
1.2.2 隔震技术原理	14
1.3 建筑隔震的分类	16
1.3.1 按隔震技术类型划分	16
1.3.2 按隔震层的位置划分	17
1.4 我国隔震技术的研究与应用进展	19
1.4.1 以摩擦滑移体系为主的研究	19
1.4.2 以橡胶隔震支座体系为主的研究	20
1.4.3 隔震技术的多样化、实用化与深入化研究	21
1.4.4 我国建筑隔震技术的应用情况	23
1.4.5 我国建筑隔震技术的标准化情况	27
2 叠层橡胶隔震支座的性能与设计	28
2.1 叠层橡胶隔震支座中所用材料的力学性能	29
2.1.1 橡胶	29
2.1.2 铅	32
2.2 叠层橡胶隔震支座的结构特征参数	34
2.2.1 叠层橡胶隔震支座的几何特征	34
2.2.2 叠层橡胶隔震支座的力学特征	37
2.3 叠层橡胶隔震支座的力学性能检验	43
2.3.1 叠层橡胶隔震支座的压缩性能	43
2.3.2 叠层橡胶隔震支座的剪切性能	45
2.3.3 叠层橡胶隔震支座的相关性能	46

2.3.4	叠层橡胶隔震支座的极限剪切性能	47
2.3.5	叠层橡胶隔震支座的拉伸性能	48
2.4	叠层橡胶隔震支座的耐久性能	49
2.4.1	老化性能	49
2.4.2	徐变性能	50
2.4.3	疲劳性能	51
2.5	叠层橡胶隔震支座的性能要求与设计	52
2.5.1	叠层橡胶隔震支座的分类	52
2.5.2	叠层橡胶隔震支座的设计压应力和设计剪应变	53
2.5.3	隔震支座的力学性能要求	54
2.5.4	隔震支座的设计	54
3	建筑隔震结构的分析方法	63
3.1	建筑隔震支座的力学模型和参数标定	63
3.1.1	建筑隔震支座的力学模型	63
3.1.2	建筑隔震橡胶支座与结构柱串联系统的力学模型	76
3.1.3	串联隔震支座力学模型	83
3.1.4	建筑隔震支座的力学参数	88
3.2	隔震结构动力分析模型的选取以及动力方程的建立	89
3.2.1	单质点基础隔震体系结构的动力分析	89
3.2.2	多质点基础隔震体系结构的动力分析	92
3.2.3	基础隔震结构体系竖向地面震动反应分析	100
3.3	隔震建筑的时程分析方法	102
3.3.1	结构动力方程的数值解法	103
3.3.2	数值积分方法	104
3.3.3	非平衡力的处理	107
3.3.4	非线性力的求解	108
3.3.5	拐点的处理	108
3.4	隔震建筑的能量分析方法	109
3.4.1	能量设计原理和设计准则	109
3.4.2	计算方法	110
3.5	隔震建筑的振型分析方法	112
3.5.1	实振型分析方法	112
3.5.2	复振型分解方法	113
3.5.3	振型分解反应谱分析方法	115

3.6 隔震建筑的简化分析方法	118
3.6.1 新西兰 Shinnev 等人建议的方法	118
3.6.2 美国规范建议的方法	119
3.6.3 周锡元建议的方法	120
3.6.4 周福霖建议的方法	121
3.6.5 苏经宇等人建议的方法	121
4 建筑隔震结构的设计方法	124
4.1 基础隔震结构设计的一般要求	124
4.1.1 隔震结构的抗震设防目标	125
4.1.2 隔震结构的适用范围	125
4.1.3 对隔震房屋体型的要求	127
4.1.4 隔震结构场地和地基的选择	129
4.1.5 非地震水平作用	129
4.2 隔震建筑的设计流程	129
4.2.1 隔震建筑设计的一般方法	129
4.2.2 隔震建筑设计的一般过程	131
4.3 隔震层的布置	132
4.3.1 隔震层的位置	132
4.3.2 隔震层的平面布置	134
4.4 隔震结构动力分析计算	136
4.4.1 计算模型	136
4.4.2 隔震层水平等效刚度和等效阻尼比的确定	137
4.4.3 地震波的选取	138
4.4.4 计算结果分析	139
4.5 隔震层的验算	139
4.5.1 隔震层受压承载力验算	140
4.5.2 罕遇地震下的水平向位移验算	140
4.5.3 抗风装置的验算和隔震装置弹性恢复力验算	140
4.5.4 隔震房屋抗倾覆验算	141
4.6 上部结构的验算	141
4.6.1 地震作用的取值	141
4.6.2 上部结构截面抗震验算	143
4.6.3 上部结构的变形验算	144
4.7 下部结构和地基基础的设计	144

4.7.1 下部结构的设计	144
4.7.2 隔震建筑地基基础的验算和抗液化措施	145
4.8 隔震结构简化计算方法	145
4.8.1 隔震后结构的基本周期和水平向减震系数	146
4.8.2 上部结构的总水平地震作用和层间剪力的分配	147
4.8.3 隔震层在罕遇地震下的水平剪力和位移	149
4.8.4 竖向地震作用下的抗震验算	150
4.8.5 砌体结构的隔震措施	150
4.9 规程中提出的等效侧力法	150
4.9.1 等效侧力法的适用条件	151
4.9.2 等效侧力法的计算过程	151
4.10 砌体结构隔震设计实例	154
4.10.1 概要	154
4.10.2 初步设计	154
4.10.3 隔震支座的选型与布置	155
4.10.4 水平减震系数的计算	156
4.10.5 上部结构的计算	156
4.10.6 隔震层水平位移验算	157
4.10.7 隔震层下部的计算	159
4.10.8 构造要求	161
4.11 框架结构隔震设计实例	161
4.11.1 概要	161
4.11.2 初步设计	163
4.11.3 隔震支座的选型与布置	163
4.11.4 隔震的分析方法和原则	163
4.11.5 上部结构的验算	165
4.11.6 隔震层水平位移验算	166
4.11.7 隔震层下部的计算	167
4.11.8 构造要求	168
5 建筑隔震结构的构造	169
5.1 隔震建筑的空间构成及一般要求	169
5.1.1 上部结构	170
5.1.2 隔震层	172
5.1.3 基础、底部和下部结构	173

5.1.4 隔震建筑与外周场地、构筑物等之间的关系	173
5.2 隔震支座的布置及节点构造	177
5.2.1 隔震支座的布置	177
5.2.2 混凝土结构的节点构造	181
5.2.3 砌体结构的节点	182
5.3 室外台阶	185
5.4 室内楼梯	186
5.5 电梯井	192
5.6 其他节点构造	198
5.6.1 组合隔震支座节点	198
5.6.2 隔震节点密封处理	198
5.6.3 加腋托梁	200
5.6.4 隔震支座不在同一标高的处理	200
5.7 穿越隔震层的设备管道	201
5.8 隔震支座的连接	206
6 建筑隔震结构的施工与验收维护	208
6.1 隔震层的施工要点	208
6.1.1 隔震层施工的关键问题	208
6.1.2 隔震层施工的工艺流程	211
6.1.3 隔震层施工的操作要点	212
6.1.4 隔震层施工的精度要求	213
6.2 施工过程监测	214
6.2.1 监测内容	214
6.2.2 监测要求	214
6.2.3 成果整理	215
6.3 隔震层施工的验收	215
6.3.1 隔震层部件的进场验收	215
6.3.2 隔震层施工的验收	219
6.4 日常使用中对隔震层的维护	219
6.4.1 维护管理的目的	220
6.4.2 我国规范中规定的措施	220
6.4.3 隔震层维护管理的方法和内容	220
7 既有建筑物的基础隔震加固施工	223
7.1 柱下隔震加固改造	223

7.1.1	柱下隔震加固的施工步骤	223
7.1.2	支撑结构的构造设计	225
7.2	墙下隔震加固改造	226
7.2.1	砌体结构墙下的隔震加固	226
7.2.2	剪力墙下的隔震加固	229
7.2.3	电梯井道的隔震改造加固	231
8	低造价隔震技术	233
8.1	隔震材料	233
8.1.1	钢丝网片	233
8.1.2	沥青	233
8.2	农村新建建筑隔震层	235
8.3	农村新建建筑隔震层设计	235
8.3.1	改性沥青隔震层隔震原理	235
8.3.2	隔震层的简化计算	236
8.3.3	隔震效果分析	238
8.4	隔震层施工工艺	240
	参考文献	241

1 建筑隔震原理与进展

1.1 建筑隔震的基本概念

1.1.1 建筑隔震体系的提出

建筑隔震体系是在人类与大自然的抗争中发展起来的。自古以来，地震这一由于地壳运动而产生的自然灾害给人类造成了巨大的灾难，并且随着人类物质文明的不断提高和城市规模的不断扩大，地震给人类造成的损失也越发严重。随着人类社会的发展与科学技术的不断进步，人们在与大自然抗争的过程中不断探索与总结，逐步形成了抗震设计理论与方法^[1, 2]。

现在各国普遍采用的抗震设计理论是通过适当的设计，使建筑结构形成延性结构体系。这种“延性结构”体系，是指通过适当设计建筑结构，控制结构体系的刚度，在小震下结构具有足够的强度承受地震作用，当大震时部分结构构件进入塑性状态，但不能发生倒塌，以消耗地震能量，减轻地震反应。这一抗震设防目标在我国《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）中具体化为“小震不坏”、“中震可修”、“大震不倒”的三水准两阶段设计思想。这种设计思想抵御地震作用立足于“抗”，即是依靠建筑物本身的结构构件的强度和塑性变形能力，来抵抗地震作用和吸收地震能量^[3]。

然而，随着社会经济的发展，一方面建筑结构内部的设备、装修等日趋复杂和昂贵，很多重要建筑如纪念性建筑、核电站、海洋平台等，不允许结构构件进入塑性工作阶段，对结构的抗震性能提出更高的要求；另一方面，建筑结构体系越来越复杂，对使用功能的要求也越来越高。然而，由于设计地震动输入的欠准确性和结构在地震时非弹性破坏的复杂性，人们无法准确预知结构的地震时程反应和破坏程度。采用抗震设计思想设计的结构，由于要靠自身结构构件的塑性变形来吸收地震能量，在强震作用下，结构会产生很大的变形，轻者造成内部设备和装修等的损坏，重者即使不发生倒塌，其正常使用功能也得不到保证，甚至造成使用工程功能的丧失。依靠结构构件发生弹塑性变形来消耗地震能量保证结构大震的安全的延性结构体系，已不能满足实际需要。抗震设计的不完善与人类需求的矛盾越来越明显^[4, 5]。

为了解决这一矛盾，各国科研人员和工程技术人员相继进行了大量研究，隔

震结构体系逐渐发展起来。其基本思想是在建筑中设置柔性隔震层,地震产生的能量在向上部结构传递的过程中,大部分被柔性隔震层所吸收,仅有少部分传递到上部结构,从而降低上部结构的地震作用,提高其安全性。

隔震结构体系的提出,适时地满足了人类的需求,为人类与地震的抗争提供了一条新的思路^[1, 6~10]。

1.1.2 建筑隔震体系的发展历程

从早期的朴素的隔震思想到现代意义上的隔震部件的工业化生产和隔震建筑的大量建造,建筑隔震体系的发展大致可分为三个阶段^[11]。

1.1.2.1 早期的隔震思想和概念的萌芽

我国古代已经有了朴素的基础隔震思想。位于西安市的小雁塔始建于唐代,距今已有一千多年的历史。研究表明,其基础与地基连接处采用圆弧形的球面,而非一般所采用的平面结构,使得其塔身与基础坐落于圆弧球面上,形成了一个类似“不倒翁”结构,这种结构使其历经两次较大地震而不倒,也许是最早的朴素的隔震思想。闻名于世的北京紫禁城属于中世纪的砖木结构建筑群,由于其主要建筑都建于大理石高台之上,下面有一层柔软糯米层(类似一种隔震层),在一定程度上隔离了地震作用,使得紫禁城虽处于地震区,却很少受到震害的影响^[12~14]。

1881年,日本人河合浩藏在《建筑杂志》上提出了削弱地震动向建筑物传递的方法:“……要盖一种在地震时也不震动的房屋”,其做法是先在地基上横竖交错放几层圆木,圆木上做混凝土基础,再在上面盖房,以削弱地震能量向建筑物的传递。

1906年,德国的 Jacob Benchbold 提出了要采用基础隔震技术以保证建筑物安全的建议。在美国旧金山地震之后,1909年,英国籍医生 J. A. Calantarientis 在斯坦福大学提出了在基础与上部结构之间用滑石粉或云母作隔震层,当地震发生时建筑物滑动以隔离地震的方法,并申请了专利。

历史上第一幢根据隔震思想设计建造的建筑物是1921年在日本东京落成的帝国饭店(Imperial Hotel),其设计者是美国的 Frank Lloyd Wright。该工程所处场地下2~4m处为厚18~21m的软泥土层,覆盖土层较为坚实。Wright没有对软土层按照传统方法进行处理,而是有意在上部土层密集布置短桩,使短桩穿过坚硬土落到软土层顶部。这种构造,将上部结构与持力层构成整体,使其“浮”在下部软弱地基上,使软土层成为性能很好的隔震垫。然而,这一创新之举在当时引起了很大的争议,直到1923年关东7.9级大地震时,其优异的抗震性能终于得到了验证。在当时,由于地震作用,建筑物普遍遭受严重破坏,而该建筑物

由于隔震层的作用,结构本身没有发生任何破坏。

1924年,日本的鬼头健三郎提出了在建筑物的柱脚与基础间插入滑动或滚动轴承的隔震方案。1927年,日本的中村太郎论述了在隔震系统中吸收地震能量的必要性,并提出在底柱上端加侧向阻尼器,作为地震时的吸能装置。中村太郎对阻尼的认识,正是以前的各种基础隔震方案中所忽视的。

1933年,美国人首先提出柔弱底层的减震构想。采用该方法,结构底层水平刚度远小于上部结构,在水平地震作用下,结构的变形主要发生于底层柱子。为减小上部结构的地震作用,底层柱子的位移需要很大,远远超过了柱子的承受能力,最终会导致结构倒塌破坏。

以上这些结构或者隔震方案都属于早期隔震思想的萌芽,其时间都早于地震工程学的建立或者处于其萌芽时期,虽不完全合理、可靠,但隔震思想已经逐渐有了清晰的轮廓,所提出的概念已具备了现代隔震系统的基本要素。但限于当时的理论和技术水平,基础隔震技术应用的可能性及优越性未能被人们充分认识和了解^[8]。

1.1.2.2 现代隔震技术的诞生和实用化技术的发展

20世纪60年代以来,新西兰、日本、美国等多地震国家投入了大量人力物力,对隔震系统开展了深入系统的理论和试验研究,取得了较大的成果。由于科技水平的不断进步,隔震理论和技术已经取得了飞速发展,隔震技术已进入实用化发展阶段,并建成了许多有代表性的隔震建筑。

前南斯拉夫的Scopje市曾因1963年的大地震,大部分建筑物受到毁灭性破坏。在恢复重建过程中,1969年瑞士援建了一所隔震结构小学,这个由瑞士人Alfred Roth设计的Pestaloci小学大概是最早的现代意义上的基础隔震建筑。该建筑是一幢三层钢筋混凝土结构,隔震支座采用了天然橡胶块(70cm×70cm×35cm)。如今看来,其耐久性考虑得并不周全。并且,天然橡胶块的橡胶层中未插入钢板,在上部重力作用下,容易发生侧向鼓出,同时竖向刚度小,地震中存在上下弹跳和前后倾覆摇晃的问题^[8]。

20世纪70年代后期,法国G. C. Delfosses发明了叠层钢板橡胶隔震支座,解决了上述问题。20世纪70年代末,法国马赛附近的一座小学用152个直径为300mm的叠层橡胶支座,建造了一幢三层钢筋混凝土结构教学楼。1977年至1984年兴建的库鲁阿斯核电站也采用了这种橡胶隔震支座。隔震支座为边长500mm的正方形,橡胶层厚度13mm,共计三层,采用两层钢板作为加劲层。但以上建筑没有设置阻尼器。1984年,法国在南美洲兴建的核电站中采用了隔震支座,同时还加设了滑板支撑作为耗能装置,这是世界上首次考虑弹性支撑与阻尼器共同工作设计的隔震建筑。

1975 年,新西兰学者 W. H. Robinson 等率先开发出了实用的隔震元件——铅芯橡胶支座,用以弥补普通橡胶支座阻尼小的缺陷,同时为风载和地基微振动提供初始刚度,大大推动了隔震技术的实用化进程^[8, 9, 15~17]。

1983 年,在新西兰完成的 William Clayton 政府办公大楼,是世界上首座采用铅芯橡胶隔震支座的隔震建筑。该大楼设计人员从 1974 年开始对各类阻尼耗能器进行比较分析,以选择最优化的设计。目前,这类隔震系统已经广泛应用于隔震建筑物之中。

美国建造的第一幢隔震建筑是 1985 年建成的位于加州 Rancho Cucamonga 的市司法事务中心大楼。该楼是四层钢框架结构,应用了 98 个高阻尼隔震支座,这也是世界上第一座采用高阻尼橡胶隔震支座的建筑。

1983 年,日本千叶县建成日本国内的第一座隔震建筑——八千代台住宅。该建筑是钢筋混凝土两层住宅,将直径 300mm 的 6 个天然橡胶支座放在基础位置。1985 年,在日本神奈川建造的基督教博物馆为三层钢筋混凝土结构,隔震层采用了 64 个橡胶加钢板的隔震支座和四组盘条耗能装置作为隔震部件^[18]。

到 20 世纪 90 年代中期,美、日、新、法、意等国已建造了 400 座左右的采用橡胶支座的隔震建筑和桥梁。隔震技术由研究阶段逐渐进入了一个推广应用的新阶段。

1.1.2.3 隔震技术的成熟应用阶段

进入到 20 世纪 90 年代,隔震结构的分析理论日渐成熟,分析模型已经由简单的单质点模型、多质点模型发展到三维空间模型。1989 年, Nagarajaiah 等开发了隔震结构专用的三维非线性动力分析程序 3D - BASIS,并不断完善。新西兰学者 R. I. Skinner、美国学者 J. M. Kelly 等都相继写出了关于橡胶隔震系统理论研究和应用的专著,系统地总结了隔震元件和体系的构成、各种分析模型、设计标准和工程应用方面的成果。

美国、日本、新西兰等国相继推出了自己的更加详尽和严格的隔震建筑设计规范和隔震支座的质量和验收标准,以保证其在大规模应用时的可靠性。隔震元件特别是橡胶支座的生产开始向工业化方向发展。隔震橡胶支座的尺寸和应用的范围越来越大。大型试验和检测设备也不断发展,使得大型隔震支座的足尺试验成为可能,相应的高性能、大直径的橡胶支座开发和应用发展很快。

在 1994 年美国洛杉矶北岭地震和 1995 年日本阪神地震中,采用橡胶隔震支座的隔震建筑表现了令人惊叹的隔震效果。阪神地震后,国际上尤其是日本兴起了一股隔震研究和应用的热潮,韩国等国也开始了隔震技术的理论研究和工程应用的探索。仅在阪神地震后的一年时间内,日本新建的隔震建筑就超过了以前所有隔震建筑的总和。截至 2009 年,日本已经有超过 3800 栋的隔震建筑。1996 ~

2003 年,日本每年的橡胶支座应用量在 6000 个左右,基本上以铅芯橡胶隔震支座(LRB)和天然橡胶隔震支座(NB)作为应用的主流。近些年来由于环保原因,高阻尼橡胶支座(HRB)的应用日渐增多。日本的隔震建筑应用开始集中在多层的办公楼、公寓和重要建筑如控制中心、医院等。近年来,已经开始应用在高层、超高层建筑上。值得注意的是,2001 年以来,独立民居(Detached House)隔震建筑每年新增都在 300 栋以上。

但是,由于隔震技术相关产品验收标准和设计指南、规范的相对保守和严苛,隔震技术在除了日本的其他国家如美国、新西兰等的应用受到很大的限制。

到 20 世纪 90 年代初期,新西兰建了 50 多座隔震桥梁,主要采用 LRB 支座。但在过去的十年里几乎没有新建的隔震桥梁^[19]。

美国迄今约有 80 栋隔震建筑,基本都是公共建筑如政府办公楼、指挥救援中心、医院等,也包括少量旧有建筑的隔震加固。基本上采用橡胶支座(有时附加钢或黏滞阻尼器)作为隔震元件,15% 左右采用摩擦摆(FPS)隔震系统。几乎没有民用住宅应用隔震技术。

从国外隔震建筑的研究和应用历程来看,以橡胶隔震支座为主流的现代隔震技术从系统研究到广泛应用大致经历了 30 年左右的时间。这期间经过大量的理论研究、试件和模型结构试验、试点工程建设。经过不断发展、完善,隔震技术进入了一个比较成熟的阶段,美国、日本、新西兰、意大利等都颁布了相应的标准、指南或规范。

国外的隔震技术开始主要应用在办公楼、政府机构、生命线工程等比较重要的建筑中,并且呈现快速增长的趋势。进入 20 世纪 90 年代后期,隔震建筑在日本开始向民用住宅发展,而且应用量比较稳定地逐渐增加。而在美国、新西兰等国家,由于规范和设计标准过于严格等,深入研究多,工程应用却基本上处于一个少量阶段。另外一个特点是国外还逐步将隔震技术应用在具有历史价值的建筑(如美国的盐湖城市政大楼、新西兰的惠灵顿旧议会大厦和议会图书馆等)的抗震加固中^[11]。

随着隔震技术日益引起人们的重视,许多学者提出了新型的隔震技术。1985 年,美国的 Victorzayas 博士在加州大学伯克利分校首先提出了摩擦摆隔震系统,后来 Zayas 博士创办了 EPS 公司专门做摩擦摆隔震产品。由于其具有良好的性能,得到了国内外学者较为深入的研究,并在国外已成功地应用于许多实际工程中。近年来,随着形状记忆合金(SMA)、碟形弹簧等在隔震中的应用,隔震技术又将发展到一个新的阶段^[11, 20, 21]。

1.1.3 地震对隔震技术的考验

在 20 世纪 90 年代中期以前,许多隔震建筑已经经受了地震的考验,但都是

比较小的地震。例如,在日本仙台同一场地上建了两栋相同的三层楼房,一栋为隔震建筑,另一栋为普通不隔震的建筑。从1986年5月开始进行地震观测,到1988年8月共得到近50个地震记录。其中,最强的一次地面加速度超过 0.9m/s^2 ,不隔震建筑的楼顶加速度为 2.7m/s^2 ,而隔震建筑的楼顶加速度为 0.4m/s^2 ,相当于不隔震建筑的 $1/7$ 。1992年2月东京发生Ⅴ度(日本烈度)地震,有21栋隔震建筑得到地震记录,其中19栋建造于Ⅱ类场地,2栋建于Ⅲ类场地。大部分隔震建筑1层的最大加速度小于基础部位,平均在 $1/2 \sim 1/3$ 左右。其中东京都小金井市建造的两栋三层隔震和不隔震的建筑,同时记录到顶层的 y 方向最大值,隔震建筑为 0.44m/s^2 ,约为不隔震建筑最大值 2.09m/s^2 的 $1/5$ 。美国加州的第一栋隔震建筑——圣丁司法事务中心,在建成后不久即经受了1985年10月2日的4.8级地震,地震中建筑物未受任何损坏,加速度响应降低了 $1/3$ 。基础上出现的高频水平运动明显被隔震层滤除^[22, 23]。

国内也有一些隔震建筑经受过地震的考验。在1994年9月的7.3级台湾海峡地震中,汕头的隔震房屋无明显震感,而其他房屋住户震感强烈,纷纷惊慌外逃。在1998年陕西泾阳4.8级地震中,其他房屋的住户均从室内跑至楼外空地,唯独两栋隔震楼住户没震感,无人往室外跑,其中一户的装修亦正常进行。隔震房屋的类似表现在云南等地也有出现。可惜的是,以上建筑并未安装地震观测设备,无法得到地震观测记录。

隔震建筑经受真正的强震考验是1994年美国的洛杉矶北岭地震、1995年日本的阪神地震、2008年我国的汶川地震以及2011年日本的“3·11”特大地震。在这四场地震中,隔震技术经受了强地震作用的考验,并进一步证明了隔震技术的有效性,促进了隔震技术的发展。

1.1.3.1 北岭地震中的隔震建筑

1994年1月17日,美国加州北岭地区发生6.7级地震,对各类建筑、桥梁、生命线系统等造成了极大破坏。在北岭地震中,有四座基底隔震建筑经受了地震考验。其中,有三座建筑支撑在叠层橡胶隔震支座上,另一座支撑在有黏弹性阻尼器的螺旋形弹簧系统上^[16]。

USC University 医院位于洛杉矶市中心,距震中东南36km,是地下1层、地上7层的隔震结构,隔震层采用了81个天然橡胶支座和68个铅芯橡胶隔震支座。地震中观测到的水平最大加速度结果为:地基上 $0.49g$,隔震构件下部 $0.37g$,建筑屋面 $0.21g$,也就是说,衰减系数为1.8,1~7层仅为 $0.10g \sim 0.15g$ 。在这次地震及其余震中,建筑内部中183~244cm高的花瓶等没有一个掉下来,各种机器等均未损坏,医院功能得到维持,成为防灾中心,起到了十分重要的作用,这充分证实了隔震效果。