

建筑结构减轻地震灾害的新方法

建筑隔震技术与工程应用

徐至钧 主编

陈祥福 主审

李景 等 编著



中国质检出版社
中国标准出版社

建筑结构减轻地震灾害的新方法

建筑隔震技术与工程应用

徐至钧 主编
陈祥福 主审
李景 等 编著

中国质检出版社
中国标准出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑隔震技术与工程应用/徐至钧主编. —北京:中国标准出版社,2013
ISBN 978-7-5066-6773-9

I. ①建… II. ①徐… III. ①建筑结构—抗震设计 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 101224 号

中国质检出版社
中国标准出版社 出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 371 千字

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月第一次印刷

*

定价 48.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010) 68510107

前 言

地震作为一种突发性的自然灾害，给人民的生命财产带来了巨大的危害。在目前还不能准确预报地震的情况下，认真搞好工程抗震，从而使各种建筑物以及工程设施和设备在地震时不遭受重大破坏，并避免由此带来的重大次生灾害就有着十分重要的意义。

我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一。1976年的唐山大地震瞬间将一座经营了几百年的工业城市毁于一旦，成为近代史上震惊世界的人类大灾难。

2008年5月12日四川汶川发生大地震，这是唐山大地震时隔32年后，发生在我国的又一次毁灭性地震，造成了几十万人伤亡，直接经济损失达8400多亿元人民币。

灾难发生后，在党中央和各级政府的坚强领导下，全国人民万众一心，以无比坚强的意志和勇气开展抗震救灾、重建家园的伟大斗争。但应该看到的是，进入90年代以后，一系列大地震袭击了世界各地的城市和农村，使这些国家和地区蒙受了巨大损失。如：1990年的伊朗地震，死亡4万人；1993年的印度地震，死亡3万人；1994年的美国洛杉矶地震，经济损失达200亿美元；1995年的日本阪神地震，造成1000亿美元的巨大损失；2011年3月11日在日本北部宫城县以东太平洋海域发生了迄今为止震级最高的地震，里氏9.0级地震，整个日本东北部海岸遭遇不同程度的海啸袭击，死亡14704人，失踪10969人，直接经济损失达2350亿美元。

严酷的地震事实再次证明，随着世界经济的高速发展，城市化人口的高度集中，都市化、城镇化进程的加快，地震灾害正呈现加速增长之势，这种趋势已引起多地震国家的高度关注。

我国抗震设计现状其结构抗震的设防目标是：

——小震不坏：在遭遇小震时（50年内发生的概率是63%，对于四川为6.5度），建筑处于正常使用状态；

——中震可修：在遭遇中震时（50年内发生的概率是10%，对于四川为8度），结构体系的损坏控制在可修复的范围内；

——大震不倒：在遭遇罕遇地震时（50年内发生的概率是2%，对于四川为9度），结构发生较大破坏，但结构不倒塌。

我国四川汶川地震震害使结构倒塌造成了人员伤亡，房屋严重破坏必须拆除，房屋发生了破坏，需要进行加固处理结构完好，但发生了很多隔墙开裂、家具倾倒、设备损坏的情况，造成了人员的心理恐慌、生产的停顿，也造成了很大的损失。

我国目前的抗震设计是以保证生命安全为主要目标的，这一目标在不超过设防烈度的地区得到了保证，但其他损失越来越大甚至无法避免。“大震不倒”的房屋无法使用，只能加固或拆除，损失难以承受，即使结构没有破坏，但仍面临着重新装修、物品损坏、生产停顿等损失。因此必须采取新的技术提高结构在地震中的表现。

目前世界各国在地震中采取的新举措有：

(1) 抗震结构

利用结构各构件的承载力和变形能力抵御地震作用，吸收地震能量。立足于“抗”。

(2) 隔震结构

在建筑物上部结构与基础之间设置滑移层，阻止地震能量向上传递。立足于“隔”。

(3) 消能减震结构

把结构物中的某些构件设计成消能部件，在小震作用下，消能部件和阻尼器处于弹性状态，结构体系具有足够的抗侧移刚度以满足正常使用要求；在强烈地震作用下，消能部件先进入非弹性状态，大量消耗输入结构的地震能量，使主体结构避免进入非弹性状态，从而保证主体结构在强震中免遭损坏。

地震灾害实践表明，对于特大地震，单纯采取“抗”的办法是抗不住的，建筑工程还是免不了要遭破坏，于是这几年出现了一种隔震和消能减震技术，它的技术思路和抗震不同，它不是着眼于工程本身的强度、刚度、柔性，而是企图利用一种设备或装置把建筑物和基础隔开，以“隔”和“消能”的方法达到使建筑物不被破坏的目的。新西兰、日本、美国、法国等国家这几年都增加了一些隔震建筑物，尤以日本发展最快。

建筑结构减轻地震灾害的新方法新思路值得推广应用。

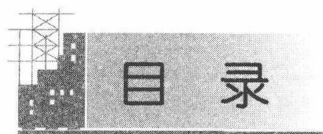
本书主要根据规范对隔震和消能减震设计的要求，介绍概述、隔震与消能减震技术、隔震概念设计与隔震结构的原理和方法、隔震建筑与消能减震结构的设计准则、隔震设备的材料与结构、建筑结构隔震设计与构造，建筑结构消能减震设计、高层建筑隔震与减震技术、隔震与消能减震设计工程应用实例、隔震设备的试验研究及隔震、减震与抗震的工程造价分析等内容。可供从事抗震加固设计施工工程技术人员在抗震设计和加固改造中参考，也可供高等院校教师和研究生在工作中参考。

本书选用的实例系从《工业建筑》、《建筑技术》、《建筑结构》、《工程抗震与加固改造》、《建筑施工》、《施工技术》、《特种结构》等刊物 2000 年以来刊载的有关文章及其他各专业会议上出版的论文集进行筛选、加工而成。力求做到典型真实、通用性强、适用面广、技术先进，且编写形式统一，内容完整，便于比较和应用。但由于时间短，加之编者水平所限，本书仍有不少缺点和疏漏之处，在此热诚期望广大读者批评、指正。本书在编写过程中还得到了广大作者的通力合作和各编辑部的热情支持，在此谨表衷心的感谢。

本书由教授级高级工程师徐至钧主编和李景博士等编著，陈祥福教授主审。另外，在编写过程中还有杨瑞清、陈月妮、赵尧钟、张勇、付细泉、陈静、易亚东、林婷、全科政等参加了部分编写和校对等工作。

编 著 者

2011 年 10 月



第一章 概 述	1
一、隔震建筑将地震损失降到最低	1
二、隔震减震技术必将成为建筑抗震的主流	2
1. 隔震减震 PK 传统抗震	2
2. 隔震减震技术必将成为主流	3
三、隔震技术的发展现状	3
四、隔震的理论和试验研究	5
1. 刚体隔震	5
2. 单质点体系隔震	5
3. 隔震结构抗倾覆稳定	5
五、隔震装置的原理和方法	5
六、隔震技术的工程应用	6
七、当前隔震减震亟待解决的问题	12
第二章 隔震与消能减震技术	14
一、工程隔震与消能减震	14
二、隔震技术	15
1. 基础滚球（轴）隔震	16
2. 基础橡胶垫隔震	17
3. 基础弹簧隔震	17
4. 结构底层柔性柱隔震	17
5. 悬吊结构隔震（见图 2-5）	17
6. 基础砂石垫层隔震	18
三、消能减震技术	18
四、基础隔震方法的发展历史	20
1. 早期隔震技术	21
2. 最新隔震技术	22
五、基础隔震研究的现状与新进展	25
1. 隔震器的研究现状	25



2. 隔震器的应用现状	29
3. 隔震器的应用和发展趋势	29
第三章 隔震概念设计与隔震结构的原理和方法	31
一、隔震概念设计	31
1. 明确设防目标和标准	31
2. 动反应概念	31
3. 总体抗震的概念	31
4. 变形协调概念	31
5. 脆弱点概念	32
6. 冗盈度概念	32
7. 反应谱概念	32
8. 建筑物隔震的概念设计	33
二、基础隔震结构的一般原理	37
1. 原理和方法	38
2. 隔震装置的基本机能	38
3. 隔震结构设计的基本概念	38
三、常用的隔震装置介绍	38
1. 多层橡胶垫	38
2. 阻尼器	39
四、体会和建议	40
第四章 隔震建筑与消能减震结构的设计准则	42
一、地震影响	42
二、场地和地基	42
三、建筑形体及其构件布置的规则性	43
四、结构体系与结构分析	44
五、隔震与消能减震设计	45
六、结构材料的性能指标	45
七、地震作用和结构抗震验算	46
八、多层和高层钢筋混凝土房屋	54
九、多层砌体房屋和底部框架砌体房屋	57
十、多层和高层钢结构房屋	60
十一、隔震结构设计的基本要求	61

第五章 隔震设备的材料与结构	65
一、隔震设备应用的材料	65
1. 橡胶 ^[11]	65
2. 钢材与弹簧钢	72
3. 铅	87
4. 聚四氟烯支座	87
二、应用隔震的主要设备	89
1. 隔震支座	89
2. 建筑耗能阻尼器	91
三、对行业标准 JG/T 209—2007《建筑耗能阻尼器》几点问题的商榷	96
1. 前言	96
2. 速度型阻尼器的基本概念和性能要求	97
3. 不必要的容许和极限位移概念和要求	97
4. 阻尼器的安全系数	98
5. 黏滞阻尼器的设计使用年限	99
6. 阻尼器的测试	99
7. 总结	101
8. 结束语	107
四、各类隔震和耗能减震产品	107
1. JA 型弹簧式隔震器	107
2. JS-D 弹簧式隔震器	113
3. JS 型弹簧式隔震器	114
4. JC-P 弹簧式隔震器	116
5. JK 弹簧式隔震器	117
6. JC 型弹簧式隔震器	119
7. JB 型弹簧式隔震器	121
8. JD 型弹簧式隔震器	123
9. JL 型弹簧式隔震器	126
10. MS 型弹簧式隔震器	126
11. SK 型气垫式隔震器	127
12. CD 型隔震基座	129
13. CB 及 CC 型隔震基座	133
14. JSC 隔震基座	136



15. 消能隔震的主要消能装置	136
第六章 建筑结构隔震设计与构造	139
一、设防目标和适用范围	139
二、一般规定	140
三、计算分析	142
四、设计要点	146
1. 隔震层部分	146
2. 隔震层以上结构	149
3. 下部结构和地基基础	151
五、抗震措施	151
第七章 建筑结构消能减震设计	153
一、消能减震的原理与特点	154
二、消能减震装置与部件	155
三、房屋消能减震设计要点	155
四、消能减震结构的抗震设计基本步骤	159
五、消能减震的一般规定	159
第八章 高层建筑隔震与减震技术	162
一、隔震技术措施	162
二、减震技术措施	164
三、当前存在的问题	165
四、超高层建筑的阻尼器	165
[工程实例 1] 台北 101 大楼	165
[工程实例 2] 上海环球金融中心	168
[工程实例 3] 百吉迪拜大楼 (Burj Dubai Tower)	170
第九章 隔震与消能减震设计工程应用实例	172
[工程应用实例 1] 采用基础隔震的高层剪力墙结构时程反应分析	172
1. 隔震设计	172
2. 计算结果	173
3. 分析与结论	173
[工程应用实例 2] 某保护性建筑隔震加固技术研究	176
1. 工程概况	176

2. 隔震结构分析	178
3. 结论	182
[工程应用实例 3] 四川成都凯德风尚高层住宅区隔震建筑	182
1. 项目概况	183
2. 隔震技术设计及重要意义	183
3. 隔震设计的目标	185
4. 隔震计算分析结果	185
5. 结论	190
6. 经济分析	191
[工程应用实例 4] 土-结构相互作用对基础隔震体系地震反应的影响	191
1. 计算实例与模型的建立	191
2. 三维模型的建立与地震波的输入	192
3. 动力特性分析	193
4. 地震反应分析	193
5. 地震反应的影响因素分析	196
6. 小结	201
[工程应用实例 5] 奥体体育场加固改造工程消能减震分析与设计	201
1. 工程简介	201
2. 加固方案比较	201
3. 消能减震分析和设计	202
4. 消能结构构件设计	205
5. 消能装置安装方式及要求	206
6. 小结	206
[工程应用实例 6] 框架-剪力墙高层隔震建筑设计实例	207
1. 工程概况	207
2. 设计要点	207
3. 隔震层布置	208
4. 模态分析	208
5. 地震波选取	209
6. 多遇地震下隔震结构验算	210
7. 罕遇地震下隔震结构验算	211
[工程应用实例 7] 框架-核心筒高层隔震建筑设计实例	214
1. 工程概况	214
2. 设计要点	214



3. 隔震层布置	214
4. 模态分析	215
5. 地震波选取	216
6. 多遇地震下隔震结构验算	216
7. 罕遇地震下隔震结构验算	219
8. 小结	220
[工程应用实例 8] 软弱场地高层隔震设计 ^[18]	221
1. 工程概要	221
2. 结构设计	221
3. 隔震设计	223
4. 结语	225
第十章 隔震设备的试验研究及隔震、减震与抗震的工程造价分析	228
一、高阻尼橡胶隔震支座的力学性能及隔震效果研究	228
1. 概述	228
2. 力学性能试验研究	228
3. 隔震性能速度控制型实时子结构试验研究	231
4. 试验方案	232
5. 结语	234
二、考虑橡胶支座拉压刚度不同取值对隔震效果的影响研究	234
1. 引言	234
2. 目前采用的隔震支座模型	235
3. 橡胶隔震支座模型的改进	236
4. 算例分析	236
5. 结语	239
三、隔震、减震与抗震的工程造价分析	240
1. 抗震结构	240
2. 隔震结构	240
3. 建议采用“抗”与“隔”相结合的地震设防方案	240
编后语 从建筑抗震到建筑隔震	241
参 考 文 献	243

第一章 概 述

历次大地震对人类造成严重灾害的经验教训使世界各国地震工程专家及工程抗震设计逐步形成共识，即在抗震设计中贯彻“小震不坏，中震可修，大震不倒”的基本设计原则。这已成为当今世界各国公认的结构抗震设计准则，并开始在各国规范中有所体现。

2008年5月12日我国四川汶川发生大地震！这是1976年唐山大地震时隔32年后，发生在我国的又一次毁灭性地震，造成了几十万人伤亡和直接经济损失8400多亿元。结合汶川大地震的震害和经验，新修订颁布的《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）提出隔震技术的开发与应用是抗震措施的补充与发展。我们知道传统的抗震技术是利用材料的强度和结构构件的变形能力来抵抗外来的地震力，使建（构）筑物不倒塌，但它保证不了建筑物内的重要设备、贵重仪表、计算机系统不受破坏。隔震技术则是采用一种特殊的装置来隔离地震震动对这些贵重设施的影响，使建筑物或设备仪表只产生很小的震动，这种震动不致造成结构和设备的破坏或仪表的失灵。新西兰、日本、美国、法国等最先开发了隔震技术，并在建筑物、设备、桥梁中应用。近十多年来，我国也进行了隔震技术的研究，广州城建学院、大连理工大学、中国建筑科学研究院、哈尔滨工程力学所、江苏省地震工程研究中心等单位采用不同材料、不同方法、不同装置进行了广泛的隔震技术研究，一批批隔震大楼、一台台装有隔震装置的设备出现在中国的城市 and 厂矿，这是一种十分可喜的现象，隔震技术的出现标志着中国抗震技术的突破与发展。

一、隔震建筑将地震损失降到最低

传统的抗震设计是利用材料的强度和结构构件的塑性变形能力来抵抗外来的地震力，使建筑物不致被严重破坏，而隔震技术是采用一种特殊的措施来隔离地震对上部结构的影响，使建（构）筑物在地震时只产生很小的震动。近10年来隔震技术发展很快，新西兰、美国、日本、法国、台湾等地已在高烈度区的重要工程上广泛采用基础隔震装置，即将建筑物与地基用特制的隔震装置隔开，使地面运动的地震能量直接由基础的隔震支座和耗能装置所吸收，建筑物相对不受影响，从而达到抗御地震的目的。长期以来，日本政府十分重视发展隔震建筑，以最大限度地减少地震造成的损失。尤其是对于城市的高层建筑。阪神大地震后，日本规定了建筑防震标准，在构筑高层建筑的基础中采用“地基地震隔震”技术，在建筑物底部安装橡胶弹性垫或摩擦滑动承重座等抗震缓冲装置。为了提高传统木结构房屋的抗震能力，日本最普通的民宅也采用箱体设计，地震灾害发生时房屋可以整体翻滚而不破毁；在专业技术人员对民房进行抗震加固等级评定的基础上，政府给予居民适当的补贴，鼓励抗震加固。

近年来，日本提出一些新的设计观念，例如具有较好抗震性能的“隔震建筑”。东京的12座隔震建筑，在经东京发生的里氏6.6级地震考验后，证明了在减轻地震灾害方面

有显著的效果。这种隔震建筑物建在隔离体上,隔离体由分层橡胶硬钢板组和阻尼器组成,建筑结构不直接与地面接触。阻尼器由螺旋钢板组成,以减缓上下的颠簸。有的日本城市建筑物的地基部分加上硬质橡胶和钢板,使建筑物本身结构有了隔震,能抗7级左右的地震。

目前常用的隔震装置有多层橡胶垫和阻尼器。我国不少地区也在开发,这就是抗震领域中的一大突破。另外,砂石垫层也有明显的隔震效果。

隔震装置不仅用于建筑物,也可用于桥梁、储罐、高塔、精密设备上。例如日本竹中工务店在东京都江东区的软土地基上建造了大型筒仓试验体,在该试验体上设置了隔震装置,并进行了长期观测。他们还研究发现,对宽度很小的高层建筑,隔震效果不大。

二、隔震减震技术必将成为建筑抗震的主流

1989年,中国科学院抗震所主持承担了由联合国工业发展组织和中国自然科学基金资助的隔震科研项目,联合国工业发展组织希望能在我国建立一个隔震体系试点,然后向第三世界推广。经过近4年的试验研究和奔走协调,于1993年在汕头市主持设计建成了我国首栋采用夹层橡胶垫的多层隔震住宅(8层),它也是当年世界上最高最大的隔震住宅楼。

1994年,联合国工业发展组织在汕头召开了由18个国家,共120名专家参加的国际会议,对该项目进行现场示范介绍。联合国的代表对此项目给予很高的评价:“汕头多层隔震房屋是把隔震技术应用于量大面广的住宅房屋的最成功范例,它是世界隔震技术发展的第三个里程碑。”该项目后来被国务院发展研究中心评为“中华之最”。

1994年,台湾海峡发生7.3级地震。地震也波及汕头地区,在同地段的传统结构房屋发生剧烈晃动的情况下,该隔震房屋里面的人却毫无震感,这在当地引起强烈反响。

这是世界上第一次将隔震技术应用在民用建筑上,成功地建造了“在地震中不倒的房屋”。

汶川大地震发生后,从灾区房屋倒塌的调查中再次看到了“为人类建造在大地震中确保安全的房屋”的现实意义。

1. 隔震减震 PK 传统抗震

我国处在环太平洋地震带,大多数是浅源地震,且人口集中,房屋密集,所以我国是世界上地震灾害最严重的国家。从目前看,粤东地区地震的可能性比较大。

目前工程抗震的方法有两个,一个是传统的抗震技术,一个是新的隔震减震技术。传统的抗震设计是根据预估的“设防烈度”进行抗震设计。

工程抗震研究中心国家重点实验室寻求的技术是隔震减震技术。隔震就是在房屋下面做一层软的隔震装置,还有消能减震。目前比较成熟的是隔震技术。

目前比较现实的手段,是把房屋做在一个柔软层上,这个柔软层是一个支柱,水平是柔软的,地震发生时,能把地面震动隔离开来。实验证明,有隔震和无隔震两种房屋的保护程度相差6~8倍。

为了使隔震技术成熟,广州大学工程抗震研究中心做了大量的震动台实验和耐久性

实验。隔震装置是一个橡胶支座，在里面放上很多钢板，叫橡胶隔震支座，水平是柔软的，能够隔离地震。

据了解，目前用此技术建造房屋，中国能做 20 层，美国能做 29 层，日本能做 50 层。这个橡胶支座可以做在层间，也可以做在底部。

2. 隔震减震技术必将成为主流

四川汶川地震以后，中国工程院推荐三种技术，其中一种是隔震技术。2008 年 12 月 31 日，汶川地震灾后重建，第一批永久建筑就是采用隔震技术来建造的。

隔震减震技术从 20 世纪 70 年代开始被研究，已历经近 40 年。汶川大地震后，我国颁布了一项新规范，“对于安全性要求比较高，要求考虑地震的时候内部功能不要中断的建筑物，优先采用隔震减震技术”。

目前隔震减震技术在世界上还处于初始阶段，因为一个技术的发展需要经过一段时间，隔震技术的发展时间比较短，只有三、四十年的历史，所以目前要大面积推广，还需要一个实践检验的过程。

隔震减震技术的推广会遇到很大的阻力。比如政府管理部门是否能接受这个观念，设计单位是否熟悉这项技术，另外就是房地产商，有些只追求眼前利益的，就不愿意采用这项技术，因为要增加一些工程造价。

尽管新技术的推广不尽如人意，但我们坚信：隔震技术是近 40 年来地震工程最重要的成果之一，抗震结构仍为主流结构，但有时难以满足要求。隔震、减震结构将成为主流结构之一。

三、隔震技术的发展现状

在抗震防灾中，传统方法还是停留在“抗”上，即通过提高结构承载力和延性来抵御地震，而采用“隔”的办法则是近几年才开始的，也就是将地震运动输入的能量部分转移到隔震元件或减震构件上。

目前，房屋抵抗倒塌主要依靠结构自身的累积耗能和损坏来实现。随着社会进步，即使能减少地震中人员的伤亡，但由结构破坏造成的直接和间接经济损失及其引发的次生灾害变得日益严重和难以承受，它严重地妨碍着社会发展。近 20 年来，世界上逐渐转向结构减震隔震的研究应用，并已取得较大进展。试验研究表明，通过适当的减震控制措施，在地震中特别是“大震”作用下，结构的地震作用可大大降低，能有效防御地震灾害。在地震工程中，走抗震与减震相结合的道路，将是今后的发展趋势。

目前国内外采用的隔震措施可分为橡胶垫支座隔震和滑移隔震两类。前者一般为多层橡胶之间夹以薄钢板，中央加铅芯。这种结构能加长房屋自振周期，使其远离地震波特征周期，减小地震作用，并具有自动复位功能。后者是在基础或层间等部位设置低摩擦的滑移元件和限位件等，通过相对滑移运动和摩擦耗能而有效限制地震能量向上部传递和向下部反馈。该方法受力可靠，造价不断降低，施工难度不大，并可考虑钢件的防锈、损坏更换问题，但需设置复位机构。

根据滑移支座设置的位置，滑移隔震可分为基础滑移隔震和层间滑移隔震。关于基

础滑移隔震,最早是由日本学者河合浩藏于1881年提出的,先在地基上纵横交错放置几层圆木,然后在圆木上做混凝土基础,再在混凝土基础上盖房,以削弱地震传递的能量。1909年,美国的J·A·卡兰特伦茨提出了另外一种隔震方案,即在基础与上部建筑物之间铺4层滑石或云母,这样地震时建筑物会发生滑动,以达到隔离地震的目的。1921年,美国工程师F·L·莱特在设计日本东京帝国饭店时,有意用密集的短桩穿过表层硬土,直接插到软泥土层底部,利用软泥土层作为隔震层。1923年关东大地震发生,附近同类建筑毁坏严重,但帝国饭店却保持完好。1924年,日本的鬼头健三郎提出了在建筑物的柱脚与基础之间插入轴承的隔震方案。1927年,日本的中村太郎论述了加装阻尼器吸能装置,在隔震理论方面进行了有益的探索。在这一阶段,虽然有了清晰的隔震概念和一定的隔震理论基础,但限于当时的水平与条件,基础隔震技术的应用未被很好地研究与开发。实际震害中出现过因基础设有油毡防潮层产生水平剪切缝导致上部结构滑移而保存的震例。这些启发了人们对滑移隔震的研究。

随着地震工程理论的逐步建立以及实际地震对结构工程的进一步考验,特别是近20~30年来,由于采用大量的强震记录仪对地震进行观测,使人们较快地积累了有关隔震及非隔震结构工作性能的定量化经验,从而对早期提出的一些隔震方法进行了淘汰与升级。其中叠层橡胶垫基础隔震体系被认为是隔震技术迈向实用化最卓有成效的体系。1984年,新西兰建造了世界上第一幢以铅芯叠层橡胶垫作为隔震元件的4层建筑物。1985年,美国建成第一座4层的叠层橡胶垫隔震大楼加州·圣丁司法事务中心。1986年,日本又建成一幢5层高技术中心楼,采用铅芯橡胶垫。1994年1月17日,美国洛杉矶发生6.7级地震,伤亡超过7 000人,损失很大。大多数医院因建筑内部设备损坏而失去使用功能。与此相反,USC University医院是一个地下1层、地上7层的隔震建筑。地震中该建筑内的各种仪器设备均未损坏,甚至连花瓶也没有一个掉下来。该医院起到了救护中心的作用,减少了地震损失。1995年1月17日,日本阪神发生了7.2级地震,是日本战后最大的地震灾害。地震又一次考验了基础隔震建筑。震区内有两栋基础隔震建筑,一栋是邮政楼,一栋是研究所。同样神奇的是,基础隔震建筑不仅结构保持完好无损,内部设施也完全正常。基础隔震技术在地震中的卓越表现,大大推动了这一技术的应用。

目前,世界上大约有30多个国家在开展这方面的研究,这项技术已被应用在桥梁、建筑,甚至是核设施上。截至目前,世界上已建成大约5 000多幢基础隔震建筑,其中80%以上采用的是叠层橡胶垫隔震系统。20世纪80年代以来,基础隔震研究开始在我国得到重视,国内不少学者对国际上流行的基础隔震体系进行了研究,取得了较大的进展。1993年我国在8度区设计建造了7层滑移隔震砖房,并进行了油压千斤顶水平滑移试验,取得成功,将我国基础滑移隔震的研究应用向前推进了一步。目前,我国已建造了中国人民解放军83 235部队科技楼、宿迁市劳动局综合楼、邯郸市釜山房地产开发公司住宅楼等2 000余幢各类基础隔震体系的建筑物,有叠层橡胶垫隔震体系、砂垫层滑移摩擦体系、石墨砂浆滑移体系、悬挂隔震结构体系等,其中绝大多数采用的是黏结型叠层橡胶垫隔震体系。现代隔震技术经历了30年的发展,得到了广泛的应用,目前隔震技术的应用程度在日本等国家,已经成为建筑的主导;我国在2008年应用面积首次超过日本。

四、隔震的理论和试验研究

1. 刚体隔震

对隔震建筑物,当自振周期很小(如 0.1s 以下)时,可将被隔震体当做刚体考虑。刚体由相对支承体从静止到开始滑动的主要条件是刚体惯性力大于最大静摩擦力,而从滑动到停止滑动的主要条件是惯性力不大于动摩擦力且相对滑动速度为 0 。据此,刚体的滑移反应可由滑移运动方程用数值积分法得到。研究表明:

- a) 摩擦作为一种阻尼,同样也使滑移反应滞后于输入波。
- b) 当输入周期波的幅值足够大时,产生正反交替的断续滑动以至连续滑动,其间,刚体最大加速度介于 $f_d g$ 和 $f_s g$ 之间(其中 f_d 为滑移面动摩擦系数, f_s 为最大静摩擦系数, g 为重力加速度),且基本不受输入波特性的影响。
- c) 滑移量直接受摩擦性能和输入波特性的影响。地震波能引起滑移的脉冲数多少、脉冲面积及波的平稳性大小等均影响滑移反应及其残余量。

2. 单质点体系隔震

当结构基本周期较长(如大于 0.1s)时,相对于输入波有较显著弹性特征时,其动力反应对滑移支承有明显的弹性反馈作用,同时支座滑移又显著影响上部反应。而且滑动时动力反应特征有较大变化,故与刚体隔震运动规律有很大差别。另外由于摩擦滑移的存在,使振动体系成为阻尼非线性和半线性体系。我国已进行了一定的理论和试验研究。分析中一般采用集中质量的剪切模型,有的还考虑了平扭耦连的影响。滑移判别原则对单质点体系与刚体类同,一般根据两种状态的运动方程,用逐步积分法分析滑移反应。

单质点体系的下列特点值得注意:

- a) 当底部输入波幅较小时,支座无滑移,上部反应与底部固定时相同。
- b) 当输入加速峰值超过 $f_s g/\beta$ (β 为底部固定时放大系数)以后,开始滑移。而质点最大反应加速度则为 $f_d g$ 叠加某些高频衰减振动。因而起始滑动与峰值、频谱或与场地特征有关,而滑移中最大加速度反应则仅与摩擦面有关,且不存在共振问题,故与刚体比较,既有相似之处,又有截然不同的特点。

3. 隔震结构抗倾覆稳定

滑移隔震结构由于在支座处上下断开,极易产生倾覆失稳问题。若无附加抗倾覆措施,地震下的抗倾覆力矩只有自重来提供。判断结构能否保证绝对不倾覆的一个准则是地震倾覆力矩不大于抗倾覆力矩。其中靠自重抗倾覆稳定(或抗摇摆振动)的判别条件为 $\gamma \geq f_s H_0$ (γ 为结构重心到支座外缘的水平距离, H_0 为地震作用合力到滑移支座的竖向距离)。当该条件不满足时,则应采取附加措施对支座或上部结构进行抗倾覆设计。

五、隔震装置的原理和方法

滑移元件是隔震支座的关键元件,一方面它承受上部结构的全部重力荷载,故要求

有足够的竖向承载力；另一方面为了有效隔震，最重要的是必须有较低的摩擦系数。此外滑移件还需有一定的自由滑动范围以满足滑移量要求。

常见的滑移件基本上由上、下钢承板和中部滑移板（或涂层）组成。单面滑移件，中部滑板（或涂层）常贴焊（或粘涂）在上、下承板上，因而只有一个滑移摩擦面。另外在滑移件上部或下部可设置橡胶薄层以减小转动影响并可有竖向缓冲减震作用。摩擦面材料很多，如柔性石墨涂层、聚四氟乙烯板或其涂层，复合聚四氟乙烯以及不锈钢板等。这些材料性能各异，其中摩擦系数及其离散性能稳定性及竖向承载能力是性能优劣的重要标志，有些摩擦系数可达 0.07 以下，另外上、下承板除用钢板外，还可考虑用高强混凝土、钢纤维混凝土和环氧砂浆等，其优点是不会锈蚀，维护费低，耐久性好。

此外，滑移支座也有以面接触为特征的滑移缝，如砂粒滑移缝、水泥砂浆-油毡滑移缝等。

另一种辅助装置为限位耗能元件。它不承受竖载，在水平荷载下起限位及保证风载下稳定作用，并可耗能。弹塑性限位件常见有变截面钢杆、U 形热轧钢板等，其滞回曲线饱满，制作施工方便，造价低，另外还有扭转梁、液压阻尼器以及用橡胶垫承受少量竖载并限位者。有的将滑移和限位功能一体化。国外资料中刚性限位装置也被采用。

六、隔震技术的工程应用

国内收集到的部分隔震技术的应用见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 隔震技术（部分）应用一览表之一

序号	工程名称	时间	结构型式	层数	建筑 面积/m ²	隔震支座	
						类型	数量
1	北京美丽园小区	2000.03	砌体	7.5	80 000	GZY400	1248
				6.5		GZY500	182
2	南京都市山庄小区	2000.04	底部框架， 上部砌体	7	38 000	GZY300	152
						GZY400	179
						GZY500	85
						GZY600	68
3	宿迁市府苑小区 A 座	2000.05	框架	6	13 000	GZP500	29
						GZY500	51
						GZY600	31