

“十三五”土木工程研究生规划教材

结构隔震技术及应用

段绍伟 陈伯望 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十三五”土木工程研究生规划教材

结构隔震技术及应用

段绍伟 陈伯望 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书主要讲述了在水平及竖向地震作用下,基础及层间隔震结构的隔震性能及隔震结构设计。共分5章,主要内容包括:普通叠层橡胶支座和铅芯橡胶支座性能、高阻尼叠层橡胶支座性能、基础隔震结构设计、层间隔震结构设计、隔震结构在竖向荷载作用下的动力分析、基础及层间隔震结构设计案例、竖向地震作用下隔震结构设计案例。

本书可用作土木工程学科的研究生教材,也可供从事结构隔震设计、力学、机械等有关工程研究及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构隔震技术及应用 / 段绍伟, 陈伯望编著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2017.1
“十三五”土木工程研究生规划教材
ISBN 978-7-5170-5031-5

I. ①结… II. ①段… ②陈… III. ①隔震—建筑结构—研究生—教材 IV. ①TU352.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第313362号

书 名	“十三五”土木工程研究生规划教材 结构隔震技术及应用 JIEGOU GEZHEN JISHU JI YINGYONG
作 者	段绍伟 陈伯望 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 6.75印张 160千字
版 次	2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

自汶川地震以来,我国地震灾害频发,采用隔震设防是目前各国常用的减震方法。目前应用最为广泛的隔震技术主要为基础隔震和层间隔震,通过在基础和上部结构或上部结构层之间设置隔震体系,延长结构的自振周期,有效地降低结构地震反应,提高结构的抗震安全性。本书是在总结近十五年科研成果及工程实践经验基础上编写的,具有如下特点:第一,内容具有全面性。不仅常规介绍了隔震支座的性能及特点,重点介绍了基础隔震、层间隔震及结构在竖向地震作用下的隔震设计;第二,内容具有针对性。在保证内容全面的基础上,针对性地介绍了基于铅芯橡胶支座的钢管混凝土组合结构隔震特性、基于并联隔震支座的层间隔震结构抗震特性、铅芯橡胶隔震结构在竖向地震作用下的动力特性等内容;第三,理论与实践具有紧密结合性。本书在叙述基础隔震及层间隔震理论的基础上,给出了各种理论对应的工程实用设计计算方法,并辅以工程实例进行示范,具有通俗易懂的特点。

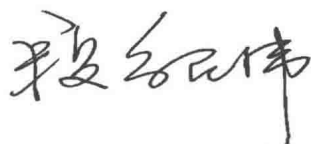
本书编写过程中,认真学习和参考了国内外大量的论文及著作,得到了多位同行及名家的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。

本书由中南林业科技大学段绍伟教授编著。

本书编写过程中,除介绍了我国科技工作者和工程技术人员部分有代表性的成果外,还介绍了段绍伟教授及其研究生王敏、向湘林、陶小委、陆端、费敏、周鹏、谭弦、黄维、毛轴、朱凯盟、陈闻耕、黄磊、喻梦利、丁沛、罗俊、邱向杰等人在国家自然科学基金资助下所做的部分成果,在此表示谢意。

本书可用作土木工程学科方向的研究生教材,也可作为从事结构隔震技术研究的高校教师及工程技术人员参考。

由于我们的水平有限,错误和不妥之处,欢迎批评指正。



2016年11月

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 近年来的地震灾害	1
1.2 结构抗震技术研究历史	2
1.3 结构隔震技术发展历史	3
1.3.1 基础隔震技术在国内外的发展和应用	3
1.3.2 层间隔震技术在国内外的发展现状	6
第2章 隔震支座的性能	8
2.1 普通叠层橡胶支座和铅芯橡胶支座	9
2.1.1 支座的构造特性	9
2.1.2 支座竖向性能	9
2.1.3 支座水平性能	13
2.1.4 耐久性	15
2.1.5 耐火性	15
2.1.6 叠层橡胶支座的其他相关性能	15
2.2 高阻尼叠层橡胶支座	16
2.2.1 高阻尼橡胶的耗能机理	16
2.2.2 高阻尼橡胶支座的性能	18
2.3 滑动支座	19
第3章 基础隔震结构设计	20
3.1 基础隔震结构工作原理	21
3.2 基础隔震结构设计	26
3.2.1 基础隔震结构概念设计	26
3.2.2 基础隔震结构设计的要求与方法	28
3.2.3 基础隔震结构地震作用计算	30
3.2.4 上部结构的设计	33
3.2.5 隔震层的设计	36
3.2.6 下部结构和地基基础设计	38
3.3 基础隔震结构设计案例	39
3.3.1 案例一：基于底部剪力法的基础隔震结构设计	39
3.3.2 案例二：基础隔震结构与抗震结构对比设计	43

第4章 层间隔震结构设计	52
4.1 层间隔震结构工作原理	54
4.1.1 双质点简化模型	54
4.1.2 多质点简化模型	57
4.1.3 减震效果分析	61
4.2 层间隔震结构设计	61
4.2.1 层间隔震结构概念设计	62
4.2.2 层间隔震结构体系简化估算设计方法	63
4.3 层间隔震结构设计案例	67
4.3.1 案例一：基于铅芯橡胶隔震支座的层间隔震设计	67
4.3.2 案例二：基于并联隔震支座的层间隔震设计	70
第5章 隔震结构在竖向荷载作用下的动力分析	81
5.1 竖向地震作用的震害	81
5.2 基础隔震结构在竖向地震作用下的动力特性分析	81
5.2.1 基础隔震结构体系在竖向地震作用下的单质点模型	82
5.2.2 基础隔震结构体系在竖向地震作用下的位移反应分析	82
5.3 层间隔震结构在竖向地震作用下的动力特性分析	83
5.3.1 层间隔震结构在竖向地震作用下的简化模型	83
5.3.2 层间隔震结构在竖向地震作用下的隔震效果分析	84
5.4 竖向地震作用下隔震结构设计案例	86
5.4.1 工程概况	86
5.4.2 模型参数设置	86
5.4.3 有限元建模	87
5.4.4 传统抗震结构和基础隔震结构竖向地震反应对比	90
5.4.5 传统抗震结构和层间隔震结构竖向地震反应对比	94
5.4.6 基础隔震结构和层间隔震结构竖向地震反应对比	97
参考文献	100

第 1 章 概 述

1.1 近年来的地震灾害

地震可以造成极其严重的自然灾害，仅持续几十秒的强烈地震就能使一座繁华的城市变成废墟，导致生命财产的严重损失。近几年来地震有愈加频繁的趋势，2008 年 5 月 12 日，在我国汶川发生了 8 级地震；2010 年 1 月 12 日，海地发生了 7 级地震，同年智利发生 8.8 级地震，我国青海玉树发生 7 级地震；2011 年 3 月，日本发生 9 级地震；2012 年 2 月，俄罗斯西伯利亚地区发生 7 级地震，同年 9 月云南昭通市发生 5.7 级地震；2013 年 3 月至 4 月间，在云南大理及四川雅安地区发生了 5 级以上地震。短短几年时间我国强震接连不断，图 1-1 所示为汶川地震中房屋建筑被破坏的境况。



图 1-1 汶川地震中被破坏的房屋建筑

中国是世界上遭受地震灾害最严重的国家，曾发生过多次给人类带来灾难性后果的地震。据相关资料记载，20 世纪全球死亡 20 万人以上的两次地震都发生在我国：一次是 1920 年宁夏海原 8.5 级地震，死亡 23 万人；另一次是 1976 年唐山 7.8 级地震，死亡 24 万多人。全球发生 8 级和 8 级以上地震共 35 次，其中我国 9 次；死亡人数 1 万人以上的地震 21 次，我国 5 次，占总死亡人数的 51%。

近一个世纪的工程抗震研究在保护人类生命方面取得了较大的进步，但城市化发展和人口密度的高度集中，使得地震带来的经济损失增长加快。1976 年发生在我国唐山市的 7.8 级大地震造成 24.2 万人死亡、16.7 万人重伤；1999 年发生的我国台湾集集镇 7.3 级地震再次震惊世界，地震中死亡人数为 2405 人，受伤 11306 人，倒塌和半倒塌房屋约 10 万间，经济损失近 100 亿美元，此次地震中因供电系统受损造成新竹高科技园区芯片生产停顿，引起了世界范围内计算机市场价格的波动；2008 年 5 月 12 日，在我国汶川发生了



8级特大地震,其惨状震惊了国内国际;2010年1月12日,海地发生的7级地震,造成22.25万人死亡,19.6万人受伤;2011年3月11日,日本发生9级地震,福岛第一核电站多个反应堆爆炸,发生核泄漏,此次地震造成全日本境内乃至其他国家的人民都人心惶惶,甚至导致了电子产品的价格上涨乃至缺货;2013年3月3日,发生在云南昭通大理白族自治州洱源县的5.5级地震,造成云龙县5个乡镇12740人受灾,还波及附近乡镇近6万人受灾,20多人受伤,受损房屋2500间左右,倒塌房屋700间左右,水利、道路、交通、通信等基础设施多处受损,地震没有造成人畜伤亡,经济损失达11277万元。

简而言之,不论在发达国家还是发展中国家,地震都造成了大量人员伤亡和严重的经济损失,人类距实现“最大限度地减轻地震人员伤亡和财产损失”的抗震防灾目标还有相当大的距离。如何提高城市整体抗灾能力,是20世纪留给21世纪的重要问题。据统计,我国有41%的国土及一半以上的城市位于地震基本烈度7度或7度以上的地区,6度及6度以上的地区则占国土面积的79%,并且据专家预测,今后一个时期我国大陆仍处于地震活动相对活跃阶段,极有可能发生多次强烈破坏性地震。

1.2 结构抗震技术研究历史

从结构抗震发展的历史看,抗震设计理论经历了静力分析、反应谱分析和动力时程分析3个阶段。20世纪初,日本的佐野利器提出了地震系数法,就是在建筑物上加一水平的地震力,其大小为建筑物重力的某一比值,即地震系数。这是较早的静力分析方法,本质上是将地震力等效为一种侧向力加以考虑。20世纪30年代初,美国提出了反应谱的概念;1943年,M. A. Biot发表了以实际地震记录求得的加速度反应谱;20世纪50年代起,美国、苏联和中国陆续采用反应谱理论用于抗震设计。需要指出,结构动力学的振型分解法的发展是使反应谱理论从单自由度推广到多自由度的关键,从而使实际结构的抗震设计完善起来。20世纪60年代计算机技术在抗震分析中得到推广应用,在运动方程中输入地震加速度记录后可以直接求出位移、速度和加速度。动力时程分析是分析大型复杂结构的有效方法,是抗震理论日益重要的组成部分。当前,反应谱理论仍是各国抗震设计规范中的抗震计算重要途径,时程分析法通常作为重要结构物或复杂结构物的补充验算。

工程抗震设计主要考虑所在地区的地震环境、场地条件、结构体系和建筑材料、建筑体型、平面布局以及结构和构件的强度、刚度和延性等因素。地震环境、场地条件、结构体系和建筑材料、建筑体型和平面布局等因素决定设计地震动的强度或设计谱的峰值、设计谱的周期特性和结构的振动特性。这些因素确定以后,如何保证结构和构件具备必要的强度、刚度和延性就成为抗震设计的中心问题。刚度和强度分别用于衡量结构或构件抵抗侧向变形、承载内力的能力,而延性主要反映结构或构件承受极大变形的能力,也在一定程度上反映利用滞回特性吸收能量的能力。如果结构具有良好的延性,即使在大震下发生较大变形,结构仍有可能维持大部分的初始强度而得以幸存,震后略加修复仍可使用。

现行各国抗震设计规范的传统抗震设计主要致力于保证结构本身具有一定的强度、刚度和足够的延性,使所设计的结构“小震不坏、中震可修、大震不倒”(各国家规范具体



表述有所不同), 即在多遇地震作用下, 结构处于弹性工作阶段, 震后结构可全部复原; 在相当于设计烈度地震作用下, 部分结构构件在一定程度上进入了弹塑性状态, 但破坏不大, 震后易于修复; 在罕遇地震作用下, 虽然破坏严重, 但结构不致倒塌, 从而可以避免人员伤亡。我国 1976 年唐山大地震的惨痛教训是由于房屋大量倒毁, 顷刻间数十万人丧失生命。之后修订抗震设计规范时, 将“大震不倒”作为结构抗震设计的主要目标。但采用这种设计方法, 须根据建筑的不同抗震等级采取大量严格的抗震构造措施, 不但材料耗量大大增加, 施工的难度也相应增大, 从而大大提高了建筑造价, 而且当遭遇大震后, 其破坏的严重程度使建筑物无法继续使用, 震后不得不拆除重建, 因而在经济上造成的损失是极其巨大的。此外, 还应考虑如何保证地震发生时某些高精尖技术设备能正常运行而不致因结构反应使其破坏, 引发或加重次生灾害。为了解决这些问题, 近 30 年来世界各国学者与工程师们不断致力于结构地震反应控制技术的研究, 企图使结构在大震后仍处于弹性状态或经过适当修理后仍可继续使用, 即不仅在中、小震作用下可处于或基本处于弹性状态, 而且在大震作用下, 要使结构震后破坏可修甚至在一定条件下也处于或基本处于弹性状态。显然, 这样的目标采用现行的依靠结构自身的破坏来消耗地震能量的抗震设计方法是难以做到的。今后随着这一卓越的抗震新技术逐渐在新建或抗震加固工程中得到成功推广和应用, 其创造的经济价值和对社会安全的贡献是无可估量的。

1.3 结构隔震技术发展历史

1.3.1 基础隔震技术在国内外的发展和应用

基础隔震是目前应用最为广泛的隔震技术。现有文献记载最早提出基础隔震概念的是日本的学者河合浩藏, 1891 年他在日本建筑学会的《建筑杂志》上提出“在地震时不受大震动的结构”, 具体做法是在地基上并排铺设数层圆木, 如图 1-2 所示。1906 年, 德国的 J. Bechtold 提出用滚球作为隔震基础, 并申请了美国专利。1909 年居住在美国的英国医生 J. A. Calantariens 提出了隔震结构方案, 如图 1-3 所示, 即在建筑物的基础和上部之间设置滑石层, 当地震发生时, 建筑物可以通过滑动来隔离地震作用。以上几种隔震方案都是在地震工程学尚未出现或萌芽阶段提出的, 但都已具备了隔震思想的重要元素, 为日后隔震技术的发展奠定了基础。

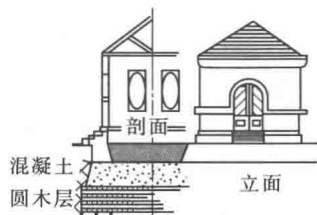


图 1-2 铺设圆木的隔震结构

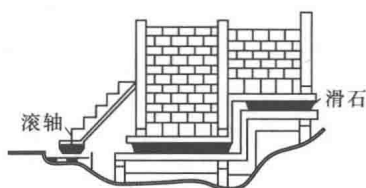


图 1-3 设置滑石层的隔震结构

1923 年的关东大地震对日本的隔震技术的研究发展起到了很大的推动作用, 此后日



本出现了很多隔震专利。1924年，鬼头健三郎和山下兴象提出了各种各样的隔震结构方案，鬼头的“建筑物抗震装置”专利是在建筑物的柱脚与基础间设置滑动的滚轴；山下的“结构物抗震装置”专利这是在基础和柱脚间设置弹簧来减小上部结构的地震力。1927年，中村太郎认为建筑的抗震性能是能量方面的问题，并提出了在底柱上下设置泵式阻尼器，作为地震时的吸能装置。该方案中引入了地震能量的概念，强调了结构中阻尼的作用，而这正是以往各种隔震方案所没有的。1926—1931年，以真岛健三郎为代表主张柔性结构和以佐野利器为代表主张刚性结构的两派展开了激烈的“刚柔之争”，在美国也出现主张将建筑物底层部分的刚度降低以减少地震力传递的建筑方案。1929年，美国的R. R. Martel首先提出了柔性底层的隔震方法。日本的真岛健三郎也于1934年提出在建筑物底层设置柔性柱方案（图1-4），并获得了“抗震住宅结构”专利。虽然当时已经出现众多的隔震理论和实际的建筑方案，但限于当时的理论和技术水平，隔震技术的优越性未能被人们充分认识，在实际的工程推广中也仅仅处于试点应用状态。

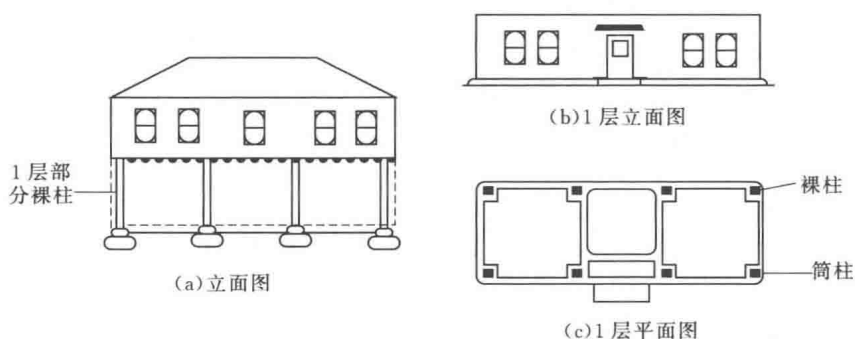


图1-4 设置柔性柱的隔震结构

现代意义上的隔震技术始于20世纪60—70年代。1965年日本的松下清夫和泉正哲教授在新西兰举行的第三届世界地震工程会议上提出了以摇动球座装置进行隔震，这是首次以解析方法来研究隔震结构；1969年瑞士人首次利用天然橡胶隔震支座在前南斯拉夫建造了柏斯坦劳奇小学；现代基础隔震技术是以叠层橡胶支座和聚四氟乙烯摩擦板的开发应用为标志的。20世纪70年代，新西兰学者R. I. Skinner等开发出铅芯橡胶隔震支座，大大推动了隔震技术的实用化进程。随后在南非和法国的一些核电站中就采用了叠层橡胶隔震支座，如图1-5（a）所示的威廉克雷顿大楼，是新西兰1981年建成的世界上第一幢采用铅芯叠层橡胶支座的建筑。

1982年日本也建成了第一幢钢筋混凝土橡胶隔震房屋，1985年美国加州福希尔（Foothill）法律司法中心大楼是美国第一栋采用叠层橡胶隔震支座的隔震建筑。此后，由于基于采用橡胶支座的基础隔震技术具有鲜明的减震机理、显著的减震效果，以及施工和安装方便等特点，日本、新西兰、美国等地震多发国家加强了对基础隔震技术的研究和推广，越来越多的工程项目均采用这一新技术，并在实际地震中经受了考验。如1994年美国洛杉矶地震中，震中附近有两座医院，一座为隔震结构，另一座为抗震结构，如图1-6和图1-7所示。南加州大学医院是橡胶支座隔震系统，这栋八层医院基础加速度为 $0.49g$ ，而顶层加速度只有 $0.21g$ ，加速度折减系数为1.8；而抗震结构的橄榄景医院底



(a)世界上第一栋采用基础隔震的建筑



(b)我国第一栋采用基础隔震的建筑

图 1-5 基础隔震结构

层加速度为 $0.82g$ ，而顶层加速度为 $2.31g$ ，加速度放大系数为 2.8 ，由此可见橡胶支座隔震系统的优越性。地震后，南加州大学医院中 $6\sim 8$ 英尺高的花瓶等没有一个掉下来，建筑物内的各种机器等均未损坏，医院功能得到维持，并且成为防灾中心，起到了十分重要的作用；而橄榄景医院在此次地震中，不仅剪力墙产生剪切裂缝，设备机器、医疗机械及家具等翻倒，而且水管破裂使各层浸水，建筑物不能使用，完全丧失了医院的功能，由此可见隔震建筑在地震中比非隔震建筑显示出更显著的减震效果。经过这几次强地震的考验，工程界对隔震技术优越的减震效果有了更直观的认识，此后，各国便大力推广隔震技术在本国的发展和应用。



图 1-6 南加州大学医院（基础隔震结构）

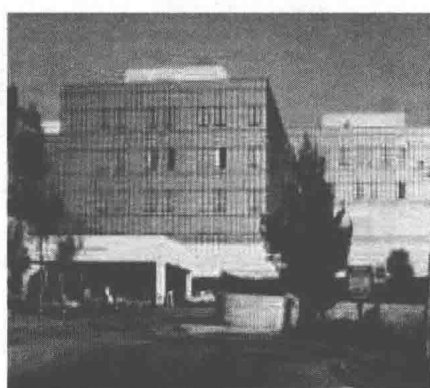


图 1-7 橄榄景医院（抗震结构）

我国在房屋隔震研究上起步比较晚，但近年来发展非常迅速，并且得到了比较广泛的应用。我国学者李力早在 20 世纪 60 年代就开始关注基础隔震理论的探索，从 70 年代末到 80 年代初进行了砂粒摩擦滑移隔震的工程试点，相继建成了几幢采用砂粒滑移层和石墨砂浆滑移层的隔震房屋。进入 80 年代中后期，隔震技术逐渐受到重视。随着国外对叠层橡胶支座的不断推广和应用，我国对基础隔震技术的研究、开发和工程试点方面的重点也从摩擦滑移隔震转到叠层橡胶支座隔震。

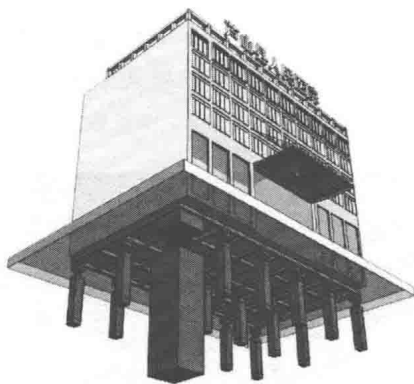


进入 20 世纪 90 年代,采用隔震技术建造的建筑越来越多。如图 1-5 (b) 所示,这是周福霖院士在 1993 年汕头主持建设的我国第一幢采用叠层橡胶支座的住宅楼。住宅楼建成后,1994 年台湾海峡发生一次 7.3 级的地震,地震波及汕头地区,在同地段的传统结构房屋发生剧烈晃动的情况下,该隔震房屋里面的人却毫无震感,隔震支座起到了明显的减震效果。1994 年唐家祥、刘再华等在安阳主持建成了采用无黏结叠层橡胶支座的建筑物;1996 年,在汕头建成的高达 42m 的博物馆是当时我国采用叠层橡胶支座最高的隔震建筑;2004 年年底,广州大学城新校区行政办公大楼采用基础隔震技术,成为我国当时隔震面积最大的单体楼,建筑面积达 3 万多平方米。

住建部于 2001 年将基础隔震结构的设计纳入《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001),同年 11 月《叠层橡胶支座隔震技术规程》(CECS—126: 2001)颁布实施,并在 2010 年对规范进行了修正,使隔震结构设计在国内的应用变得规范化,进一步促进了该技术在我国的推广和应用。自 2008 年汶川地震以来,国内的研究人员对基础隔震结构的性能、生产工艺、工程应用等方面都进行了系统、深入的研究,并取得了较大的成果。如 2013 年四川芦山 7.0 级地震中,芦山县人民医院新门诊综合楼几乎毫发无损挺过了 7.0 级地震(图 1-8)。这栋大楼之所以如此坚强,其奥秘在于建筑中上部结构与基础之间安装了橡胶隔震支座,广州大学公共安全与防灾减灾研究中心主任周云教授参观后认为,这是我国首栋经受强震考验的隔震建筑,论证了我国隔震技术已进入了快速发展阶段。



(a) 芦山县人民医院



(b) 芦山县人民医院基础隔震示意图

图 1-8 我国第一栋经受大震考验的建筑

1.3.2 层间隔震技术在国内外的发展现状

由于层间隔震是在基础隔震发展过程中出现的一种新型减震技术,目前的研究成果还比较少,研究工作处于初级阶段,还未形成系统的理论研究成果。只有在一些工程实践中,由于一些特殊的情况,要求结构采用层间隔震形式,并对这种特殊情况进行专门的隔震分析。例如,2008 年在日本建成的东京汐留住友大厦是最高的层间隔震结构,如图



1-9所示。该结构总高度为 128.1m, 13 层以下为旅馆, 14~42 层为办公用房, 隔震层设置在结构的 13~14 层之间。在隔震层内设置了 41 个天然叠层橡胶支座, 100 个铅制减震器, 14 个钢制减震器。日本学者对该结构进行了非线性地震反应分析, 分析结果表明, 在罕遇地震作用下, 隔震层的最大变形约为 30cm, 隔震层下部的最大反应加速度为 600cm/s^2 , 而隔震层上部的最大反应加速度为 300cm/s^2 , 隔震效果非常明显。Roberto Villaverde 的研究显示, 将屋顶隔震系统安装在一个钢筋混凝土高层结构上, 并对该方案进行了可行性研究。研究结果表明, 采用合理的隔震设计后, 与抗震结构相比, 隔震结构在地震作用下的延性系数 (实际的位移/屈服位移) 降低了大约 40%, 且隔震结构的实际延性系数均小于 1.0, 结构的变形完全在弹性范围内。



图 1-9 东京汐留住友大厦

近十几年来, 随着隔震结构在地震作用中的效果越来越显著, 国内对层间隔震结构的原理和分析方法都进行了大量的研究。祁皓等对层间隔震结构的适用范围、优点以及其在实际工程中的应用情况进行了综述; 赵昕、李杰等提出了层间隔震结构有限元分析中隔震垫的有限元模型, 并从静力、模态两方面进行了验证; 李向真、欧海龙等通过对层间隔震结构整体动力性能及时域反应的分析, 用模态综合方法建立了该结构计算分析简化模型, 为建立实用设计方法, 推广层间隔震结构的应用提供了有效途径; 王斌、崔杰等介绍了层间隔震在某一工程中的应用, 采用 ETABS 有限元分析程序对其进行了动力非线性时程分析; 张颖、谭平、周福霖分析了地震输入能量在层间隔震结构中的分配和耗散, 推导出了基于能量平衡的层间隔震结构的隔震层总剪力、最大变形以及基底剪力的地震响应预测式, 分析了隔震层刚度、阻尼以及隔震层的设置位置等参数对层间隔震结构减震性能的影响, 并阐明了其自身的减震控制机理; 李娟, 王社良讨论利用有限元分析软件 ANSYS8.1, 计算了 6 层钢框架模型隔震层位置改变时的层间隔震结构的地震反应, 并对计算结果与非隔震结构进行对比分析, 反映了隔震效果随隔震层位置的不同而不同; 吴从晓, 周云等采用 ETABS 软件对电梯井核心筒结构与外围结构之间布置黏滞阻尼器、弹簧、无阻尼器和弹簧的 PMIT 结构、悬挂法结构和框支剪力墙结构进行了分析; 卫杰彬、谭平等对一高层装配式层间隔震结构进行了动力弹塑性分析; 金建敏、谭平、周福霖进行了下部结构附加黏滞阻尼器的层间隔震结构振动台试验研究, 这是国内首次层间隔震结构振动台试验研究, 也是国内关于层间隔震实验的最新进展。

第2章 隔震支座的性能

隔震装置按功能主要可分为隔震器和阻尼器两类，隔震器用来提供大变形，阻尼器用来提供阻尼力，作为工作人员，要设计一个隔震结构，不仅要了解一些隔震装置的构造，还必须熟悉隔震装置的性能，才能选择合适的隔震装置参数，达到预期的减震目标。

隔震装置需要具备一定性能才能发挥隔离地震的作用。首先，隔震装置要能承受上部建筑物的重量，并且在竖向荷载作用下不能有过大变形；其次，为了延长结构的振动周期，减小上部结构的加速度反应，水平向需要有充分的柔度；同时为了使振动衰减，限制结构的位移，还必须有一定的阻尼。因此，隔震装置应该具有以下的基本性能，即足够的竖向承载力和竖向刚度、较小的水平刚度和适当的阻尼衰减特征，如图 2-1 所示。此外，建筑物的设计寿命为 50 年或更长时间，在此期间，无论环境如何变化，如温度升降、地基沉陷和氧化等，隔震装置应能正常工作，或在偶尔发生的情况，如地震、火灾等，隔震装置要在一定的时间内仍发挥作用。综上所述，隔震装置的性能包括：竖向性能、水平性能、阻尼性能、耐久性、耐火性及各种相关性能等。

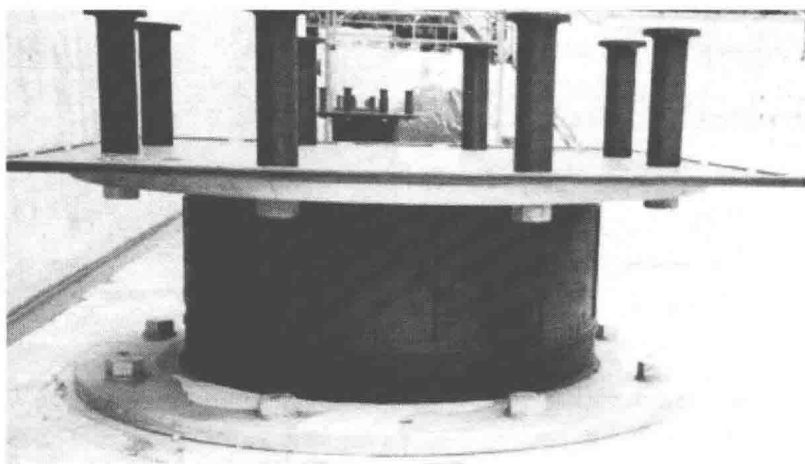


图 2-1 叠层橡胶隔震支座

常用的隔震方式主要有两种，即叠层橡胶支座隔震和滑动隔震，其中叠层橡胶支座隔震占绝大多数。因此，叠层橡胶支座的性能研究及相应的规范、标准也比较完善，现颁布有针对普通叠层橡胶支座和铅芯叠层橡胶支座的制作、性能指标及质量检查的建筑工业行业标准、规程等；但对于其他类型的隔震器及阻尼器，目前还没有统一国家标准。因此，本章主要论述普通叠层橡胶支座和铅芯叠层橡胶支座，而其他隔震装置只做简单介绍。



2.1 普通叠层橡胶支座和铅芯橡胶支座

2.1.1 支座的构造特性

叠层橡胶支座属于隔震器的一种，通常有 3 种形式，即普通叠层橡胶支座、铅芯叠层橡胶支座和高阻尼叠层橡胶支座。

普通叠层橡胶支座 (laminated rubber bearing) 是由多层天然橡胶和多层钢板交替放置而成，利用钢板的约束作用减小竖向变形，其特点是弹性高、阻尼低。普通叠层橡胶支座滞回曲线的面积较小，为了满足隔震体系对阻尼值的要求，一般在隔震构造中外加阻尼 (耗能) 装置。叠层橡胶支座的滞回特性与位移历程和轴力变化几乎无关，支座无论是在小变形状态下还是在大变形状态下都具有稳定的弹性性能。这种支座的优点是设计和施工简单、效果容易控制、性能可靠，其缺点是对于竖向地震的隔离效果不佳，并且仅仅适合在刚度比较大的建筑中应用。

铅芯橡胶支座是在普通叠层橡胶支座的中央开孔部位灌入铅芯柱而成的，是目前应用最普遍的一种隔震系统。铅本身具有较高的塑性变形耗能能力和较低的受剪屈服应力 (约 10MPa)，并且在常温下能快速结晶，与其他金属相比不易发生应变硬化的情况。由于独立使用铅棒不利于充分发挥其吸能能力，因此，充分利用周围的橡胶对铅芯的约束力，达到提高吸收能量的效果。铅芯橡胶支座周围的橡胶和中心部位的铅芯形成一个整体，因此在施工和使用过程中都较为方便。

叠层橡胶隔震支座的截面主要有两种：一种为圆形；另一种为正方形。由于圆形与方向无关，目前圆形截面的橡胶隔震支座应用较多。图 2-2 所示为普通叠层橡胶支座内部构造，图 2-3 所示为铅芯叠层橡胶支座内部构造。

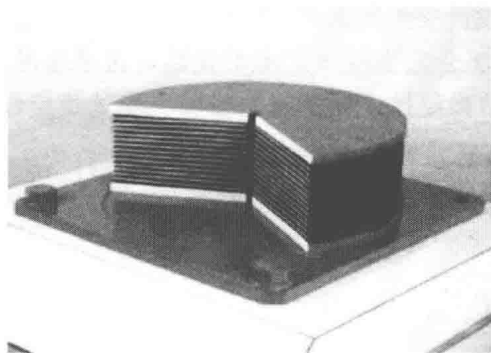


图 2-2 普通叠层橡胶支座内部构造

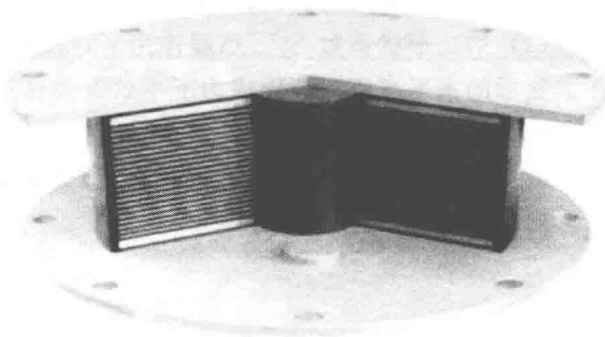


图 2-3 铅芯叠层橡胶支座内部构造

2.1.2 支座竖向性能

叠层橡胶支座必须长期承受竖向荷载，且在竖向荷载作用下，支座不会发生大的竖向



变形及失稳。无论是普通叠层橡胶支座还是铅芯叠层橡胶支座，其竖向性能基本相同，因为铅芯不承担压力。

行业标准规定支座的竖向性能参数包括形状系数、竖向刚度、竖向变形、竖向极限压应力以及当水平位移为支座内部橡胶直径的 0.55 倍状态时的极限压应力、竖向极限拉应力等。

1. 形状系数

橡胶隔震支座有两个重要系数，即第一形状系数 S_1 和第二形状系数 S_2 。

(1) 第一形状系数 S_1 。控制每层橡胶厚度的形状系数为第一形状系数 S_1 ，定义为橡胶支座中各层橡胶层的有效承压面积与其自由表面积之比，可以用下式计算。

对圆形截面，有

$$S_1 = \frac{D - d}{4t_R} \quad (2-1)$$

对矩形截面，有

$$S_1 = \frac{l_a l_b}{2(l_a + l_b)t_R} \quad (2-2)$$

式中 D —— 橡胶层有效承压面的直径；

d —— 橡胶层中间开孔的直径；

t_R —— 每一薄层橡胶的厚度；

l_a —— 矩形截面隔震支座的长边尺寸；

l_b —— 矩形截面隔震支座的短边尺寸。

由式 (2-1) 可见，橡胶隔震支座的第一形状系数与每一薄层橡胶的厚度有关。第一形状系数的大小直接影响橡胶隔震支座的竖向刚度及弯曲刚度，每层橡胶层厚度 t_R 越小， S_1 越大，支座竖向刚度越高。说明 S_1 表征的是叠层橡胶支座中的钢板对橡胶层变形的约束程度。此外 S_1 还与支座的有效直径有关， D 越大，说明支座的形状矮而粗，则支座的弯曲刚度也越大。也就是说， S_1 也与支座的竖向刚度和稳定性有关。因此，在实际的隔震结构中，第一形状系数的范围在 10~50，实际设计中一般取 $S_1 \geq 15$ 。

(2) 第二形状系数 S_2 。地震作用下，橡胶支座会发生较大的水平变形，这就要求处于大变形的水平支座在高压应力下不致失去自身的稳定性，为了控制橡胶支座的稳定性，引入第二形状系数 S_2 。

若橡胶隔震支座有 n 层橡胶薄层，那么橡胶隔震支座的第二形状系数 S_2 为

对圆形截面，有

$$S_2 = \frac{D}{t_r} \quad (2-3)$$

对矩形截面，有

$$S_2 = \frac{l_b}{t_r} \quad (2-4)$$

式中 t_r —— 橡胶层的总厚度。

第二形状系数越大，说明橡胶隔震支座越扁平，第二形状系数与橡胶隔震支座的水平刚度及失稳荷载有关。在实际隔震结构中，橡胶隔震支座的第二形状系数的适用范围为



3~7, 实际设计中一般取 $S_2 \geq 5$ 。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 规定, 当 $S_2 \leq 5$ 时, 应降低支座的平均压应力限值; 当 $4 < S_2 < 5$ 时, 降低 20%; 当 $3 < S_2 < 4$ 时, 降低 40%。

2. 竖向刚度

竖向刚度是指叠层橡胶支座产生单位竖向位移时所施加的竖向力, 记作 K_v 。

$$K_v = \frac{P}{\delta_v} = \frac{\pi D E_{cb} S_2}{4} \quad (2-5)$$

式中 K_v ——橡胶隔震支座的竖向刚度, N/mm;

P ——橡胶隔震支座承受的竖向压力, N;

δ_v ——橡胶隔震支座竖向压缩变形, mm;

D ——橡胶隔震支座有效受压圆断面直径, mm;

E_{cb} ——橡胶隔震支座的修正压缩弹性模量, MPa。

其中, 橡胶隔震支座的修正压缩弹性模量 E_{cb} 可由下式计算, 即

$$E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b} \quad (2-6)$$

$$E_c = E_0 (1 + 2\lambda S_1^2) \quad (2-7)$$

式中 E_b ——橡胶材料体积约束弹性模量, $E_b = 1960 \text{ MPa}$;

E_c ——橡胶压缩弹性模量;

E_0 ——橡胶的标准弹性模量;

λ ——橡胶材料硬度修正系数。

橡胶材料硬度修正系数 λ 的大小与橡胶的剪切弹性模量 G 有关, G 越大, λ 值就越小。根据试验结果, 修正系数 λ 与 G 具有表 2-1 所列的对应关系。

表 2-1 修正系数 λ 与 G 的关系

参 数	数 值						
G/MPa	0.29	0.36	0.44	0.53	0.63	0.79	1.04
λ	0.93	0.89	0.85	0.80	0.73	0.64	0.57

3. 竖向变形

竖向变形即橡胶隔震支座在荷载作用下产生的竖向位移。当不考虑温度和偶然因素的影响时, 橡胶隔震支座的竖向变形一般由式 (2-8) 计算, 即

$$\delta_v = \delta_{v1} + \delta_{v2} \quad (2-8)$$

其中:

$$\delta_{v1} = \frac{P_v}{K_v}$$

式中 δ_{v1} ——由于承受竖向荷载 P_v 产生的压缩位移;

δ_{v2} ——剪切变形产生的几何下沉位移, 一般控制在橡胶层总厚度的 1% 内, 通常由足尺测试进行测量。

4. 竖向极限压应力

橡胶隔震支座的竖向极限压应力是指橡胶隔震支座在无任何水平变形的情况下所承担