



周期结构

理论及其在隔震减振中的应用

Periodic Structures: Theory and Applications to
Seismic Isolation and Vibration Reduction

石志飞 程志宝 向宏军 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

周期结构理论及其在隔震 减振中的应用

**Periodic Structures: Theory and Applications to Seismic
Isolation and Vibration Reduction**

石志飞 程志宝 向宏军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容涵盖周期结构分析的基本理论、数值方法和部分试验,共11章,各章内容大致如下:第1章主要就周期结构在结构隔震和交通环境减振方面的应用、研究现状和周期结构的动力特性进行概述;第2章以固体物理研究周期结构的基本理论为基础,介绍相关概念、方法和基本理论,并就弹性波在周期介质中的传播特性以及工程结构的波动问题进行阐述;第3章和第4章分别研究周期结构的能量耗散以及频散特性的主要分析方法;第5~7章为周期结构在基础隔震中的应用,包括层状周期基础、二维周期基础、三维周期基础的设计与理论;第8~10章为周期结构在交通环境减振中的应用,主要包括周期性连续墙和周期性排桩的设计及减振效果数值模拟;在上述典型周期结构基础上,第11章介绍几种改进的周期结构,丰富了周期结构的类型和应用范围。

本书可供从事土木、地震、交通、环境等工程领域的科研人员和技术人员参考,并可作为高等院校相关专业研究生的教材和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

周期结构理论及其在隔震减振中的应用/石志飞,程志宝,向宏军著. —北京:科学出版社,2017.6

ISBN 978-7-03-052987-9

I. ①周… II. ①石…②程…③向… III. ①隔震-建筑结构-研究 IV. ①TU352.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 118009 号

责任编辑:杨向萍 张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:熙 望

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2017年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:23 3/4 彩插:8

字数:481 000

定价:160.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

周期结构无处不在,小到细胞、碳纳米管结构,大到超高层建筑、特大桥梁结构,无不体现着周期性。周期性的存在,给人们的生活带来了许多便利,更增添了无限的美感。遗憾的是,在土木和交通工程等领域,人们对周期结构所具有的隔震减振机理还比较陌生,更谈不上很好地去利用这种特性。固体物理学研究发现,按照某种方式排列的周期介质具有弹性波的衰减域特性,即入射波的频率落在衰减域频段内时,该入射波不能在周期介质中传播。受此启发,作者于2007年提出了设计周期基础进行土木工程结构隔震减振的设想,经本书作者和团队其他成员多年的共同努力,成功地将周期结构的衰减域特性引入土木工程和交通环境工程等领域,并陆续对一维、二维和三维周期结构的隔震、减振方法进行了较为系统的研究,取得了良好的效果,为研究土木工程结构隔震以及交通环境减振提供了新思路。此外,本书合作者还提出了求解频散曲线的微分求积法,极大地丰富了周期结构的研究方法。美国休斯敦大学 Thomas T. C. Hsu 结构研究实验室主任 Yi Lung Mo 教授及其团队,近年来也投入了大量的人力、物力开展利用周期结构进行隔震、减振的试验研究。上述理论与试验研究成果构成了本书的主要内容。

固体物理学研究的周期结构,通常称为声子晶体或光子晶体,一般尺寸较小,大多需要用到贵金属,其衰减域频率基本处于千赫兹甚至兆赫兹量级。但是,在土木工程和交通环境工程中,无论是结构的固有频率还是外部荷载的激励频率都比较低,通常只有几赫兹或者几十赫兹,常见环境振动的主要频率也在 100Hz 以内。因此,能否利用常用的且价格低廉的土木工程材料,设计出在低、中频段能够形成衰减域的周期结构,不仅对土木和交通环境工程领域具有重要意义,更直接决定着基于周期结构衰减域特性进行隔震减振设计思想的成败。目前,国内外尚无利用周期结构进行隔震减振的书籍。本书针对低、中频段的隔震减振问题,尽可能利用土木工程人员熟悉的语言描述周期结构的理论,从土木工程和交通环境工程领域的特点出发,通过着重介绍周期结构设计理论和分析方法,将这一新兴且极具潜力的研究方向推荐给读者,使之能为更多从事土木工程、地震工程、交通工程和环境工程工作的科研人员、工程技术人员及相关专业学生提供参考。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金重大研究计划项目(90715006)、面上项目(51178036、51678046)、优秀青年科学基金项目(51522803)、青年科学基金项目(50808012、51508023)等的资助。作者团队的研究生黄建坤、刘心男、贾高峰、包静、熊晨、陈鹏飞、李卿、王颖、李荻、张志亮、肖国华、马琰等在攻读学位期间所取

得的丰富研究成果为本书的撰写提供了很好的素材；杜修力教授、李宏男教授、刘晶波教授和其他多位专家对相关研究工作提出过许多很有价值的建议，对本书的出版提供了极大的帮助，在此表示衷心感谢。另外，作者对其他同仁、朋友在本书出版过程中给予的热情鼓励、支持和帮助一并致以由衷的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏或不足之处，恳请读者不吝赐教。

石志飞

2014年9月于北京交通大学

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 工程结构隔震	1
1.1.1 隔震基本原理	2
1.1.2 隔震技术研究现状	4
1.2 交通环境振动	9
1.2.1 交通环境振动的危害	9
1.2.2 交通环境振动的控制措施	13
1.3 周期结构概述	21
1.3.1 周期结构的概念及其特性	21
1.3.2 周期结构的研究历史与现状	24
1.3.3 周期结构隔震减振应用	28
参考文献	29
第 2 章 周期结构的基本理论	49
2.1 固体物理基本概念	49
2.1.1 平移周期性	50
2.1.2 原胞与单胞	51
2.1.3 空间对称性	52
2.1.4 倒格子	55
2.1.5 布里渊区	58
2.2 周期介质中的弹性波	62
2.2.1 弹性动力学基本方程	62
2.2.2 弹性波动问题基本概念	66
2.2.3 Bloch 定理	78
2.2.4 周期结构频散曲线及衰减域	82
2.2.5 黏弹性人工边界	87
2.2.6 波动输入问题	92
参考文献	95
第 3 章 周期结构的频散特性和能量流动特性	98
3.1 引言	98

3.2	周期结构的频散特性	99
3.2.1	散射型周期结构——多质点弹簧振子模型	99
3.2.2	局域共振型周期结构——主子结构模型	101
3.3	周期结构的衰减域	105
3.3.1	频散曲线的一致性关系	105
3.3.2	衰减域边界频率	106
3.4	有限周期结构的动力特性	108
3.4.1	频率响应函数	109
3.4.2	理想周期结构和有限周期结构	110
3.5	周期结构的能量流动特性	111
3.5.1	散射型周期结构的能量流动特性	112
3.5.2	局域共振型周期结构的能量流动特性	116
	参考文献	119
第4章	周期结构频散特性分析方法	121
4.1	传递矩阵法	121
4.1.1	特征方程的建立	121
4.1.2	频散特性分析与计算	123
4.1.3	有限层状周期结构的传输特性	123
4.2	平面波展开法	124
4.2.1	平面波展开法的基本原理	125
4.2.2	傅里叶系数与结构函数	129
4.2.3	平面波展开法的收敛性及改进	133
4.3	多重散射理论	145
4.3.1	基本思路	145
4.3.2	三维多重散射理论	145
4.3.3	二维多重散射理论	152
4.3.4	有限结构层间多重散射理论	157
4.4	时域有限差分法	163
4.4.1	基本原理	163
4.4.2	波动方程离散化	164
4.4.3	初始条件	168
4.4.4	边界条件	168
4.4.5	频散曲线	170
4.4.6	算法稳定性与实用离散方法	170
4.5	有限单元法	172

4.5.1 基于复数运算的有限元法	172
4.5.2 基于通用有限元软件的频散曲线分析	175
4.6 微分求积法	176
4.6.1 微分求积法基本原理	176
4.6.2 强形式微分求积元法	179
4.6.3 弱形式微分求积元法	183
4.6.4 复杂周期结构的处理	190
4.6.5 有限周期结构的传输特性	192
参考文献	192
第5章 层状周期结构的动力特性及层状周期性隔震基础	198
5.1 引言	198
5.2 理想层状周期结构及衰减域	199
5.2.1 理想层状周期结构	199
5.2.2 衰减域特性分析	200
5.3 参数分析	202
5.3.1 衰减域边界频率	202
5.3.2 最大衰减因子	204
5.4 衰减域的近似确定方法	204
5.5 有限周期结构的动力特性	206
5.5.1 谐响应分析	206
5.5.2 时程响应分析	207
5.6 层状周期隔震基础隔震效果的数值模拟	208
5.6.1 层状周期隔震基础模型	208
5.6.2 数值模拟结果	208
5.7 层状周期隔震基础试验研究	210
5.7.1 试验模型	210
5.7.2 测试内容	211
5.7.3 测试结果	211
参考文献	214
第6章 二维周期结构的动力特性及其隔震应用	216
6.1 引言	216
6.2 二维周期结构及其衰减域	217
6.3 完全衰减域	217
6.3.1 高对称周期结构	217
6.3.2 散射型周期结构的完全衰减域	218

6.3.3 局域共振型周期结构的完全衰减域	221
6.4 方向性衰减域	222
6.4.1 非高对称周期结构	222
6.4.2 散射型周期结构的方向性衰减域	223
6.4.3 局域共振型周期结构方向性衰减域	226
6.5 混凝土配筋对衰减域的影响	227
6.5.1 材料等效	227
6.5.2 配筋影响分析	229
6.6 有限周期结构的动力特性	229
6.6.1 分析模型	230
6.6.2 数值计算结果	230
6.7 二维周期隔震基础的数值模拟	233
6.7.1 二维高对称周期隔震基础	233
6.7.2 二维非高对称周期隔震基础	235
6.8 二维周期隔震基础的试验研究	242
6.8.1 试验模型及仪器	242
6.8.2 水平向隔震性能测试	243
6.8.3 竖向隔震性能测试	245
参考文献	246
第7章 三维周期结构的动力特性及其隔震应用	249
7.1 引言	249
7.2 三维周期结构及其衰减域	249
7.2.1 平面波展开法	250
7.2.2 正确性验证	251
7.2.3 计算方法对比	251
7.3 参数分析	253
7.3.1 几何参数	254
7.3.2 物理参数	255
7.4 黏弹性边界条件及波动输入方法	256
7.5 三维周期结构隔震性能数值模拟	257
7.5.1 单频简谐荷载输入	258
7.5.2 地震波输入	259
7.6 三维周期隔震基础的试验研究	263
7.6.1 试验模型及仪器	263
7.6.2 水平向隔震性能测试	264

7.6.3 竖向隔震性能测试	265
参考文献	267
第 8 章 周期性连续墙在交通环境减振中的应用	269
8.1 引言	269
8.2 连续墙衰减域参数分析	270
8.2.1 材料参数的影响	271
8.2.2 几何参数的影响	273
8.3 连续墙的单频谐响应分析	276
8.4 连续墙减振效果数值模拟	278
8.4.1 地铁激励	278
8.4.2 受位置 A 处激励作用	279
8.4.3 受位置 B 处激励作用	287
参考文献	295
第 9 章 周期性实心排桩在交通环境减振中的应用	296
9.1 引言	296
9.2 控制方程	297
9.3 对平面内耦合波(P-SV 波)的隔离	298
9.3.1 衰减域存在性验证	298
9.3.2 衰减域影响因素分析	301
9.3.3 减振效果数值模拟	304
9.4 对出平面波(SH 波)的隔离	310
9.4.1 衰减域存在性验证	310
9.4.2 衰减域影响因素分析	310
9.4.3 减振效果数值模拟	314
参考文献	319
第 10 章 周期性填充排桩在环境减振中的应用	323
10.1 引言	323
10.2 填充排桩对 P 波和 SV 波的隔离	324
10.2.1 正确性验证	324
10.2.2 衰减域影响因素分析	326
10.2.3 减振效果数值模拟	328
10.3 填充排桩的振动机制	331
10.4 空心排桩对 SH 波的隔离	334
10.4.1 存在性验证	334
10.4.2 单元类型和内半径对衰减域的影响	334

10.4.3 频率响应	336
参考文献	337
第 11 章 改进的周期结构在隔震减振中的应用	338
11.1 引言	338
11.2 组合层状周期隔震基础	338
11.2.1 组合层状周期隔震基础模型	338
11.2.2 谐响应分析	339
11.2.3 地震动时程分析	341
11.3 等效层状周期隔震基础	351
11.3.1 等效层状周期隔震基础模型	351
11.3.2 等效模型衰减域计算方法	352
11.3.3 隔震性能模拟	353
11.4 复合排桩减振	358
11.4.1 复合排桩有限元模型	358
11.4.2 单频平面波入射响应分析	360
11.4.3 多频平面波入射响应分析	361
11.5 波在分层土中的传播	363
11.5.1 分层土的动力特性	363
11.5.2 分层土位置对衰减的影响	367
参考文献	369
索引	370
彩图	

第 1 章 绪 论

在工程结构所受的外加动力荷载中,一类是自然原因引起的动力荷载,如地震、风、波浪荷载等;另一类是由人类活动产生的动力荷载,如交通环境振动、人群荷载、机械振动、建筑施工扰动等。在上述荷载中,地震和交通环境振动带来的危害及其防治措施越来越受到人们的关注,也是本书的主要研究内容。

1.1 工程结构隔震

地震是地壳快速释放能量过程中造成震动随之产生地震波的一种自然现象。由于地震的随机性和突发性,以及人类对其认识的不足,目前还难以做到准确预测地震,因此,地震往往会给人类造成灾难性的后果,如建筑物的大量破坏、倒塌乃至人员的伤亡。在传统的结构抗震设计中,为增强结构的抗震性能,研究人员依次提出了刚性结构体系、柔性结构体系、柔性底层结构体系和延性结构体系。刚性结构体系是通过增大结构刚度使结构地震反应接近于地面运动,但是,结构的刚度越大,所受的地震作用也越大,反过来又要求更大的刚度和强度,这样便形成了恶性循环。柔性结构体系则与之相反,通过减小结构刚度来降低地震作用下的结构加速度响应,进而减小地震作用,但由于建筑层间位移过大,可能使建筑装饰等配件严重破坏,不能满足正常使用。随之,柔性底层结构体系应运而生,它通过增大上部结构刚度并降低底层刚度,使之能有效减小上部结构响应,并通过底层的非弹性变形消耗能量,但 $P-\Delta$ 效应使底层变形过大,导致底层柱破坏乃至结构倒塌。延性结构体系则是通过适当地控制建筑结构体系的刚度,使结构在小震下具有足够的强度承受地震作用,在大震下部分结构构件进入塑性状态,消耗地震能量,以减轻地震反应,但不致倒塌。延性结构体系是目前许多国家普遍采用的传统抗震设计方法,虽多数情况下是有效的,但仍然存在安全性、适应性和经济性等方面的不足。这种抗震设计理念立足于“抗”,即依靠建筑物本身的结构构件的强度来抵抗地震作用以及通过其塑性变形来吸收地震能量,加大了建设成本。此外,依靠结构构件发生塑性变形来消耗地震能量也不能满足人们对现代建筑功能的严苛要求。总之,传统的结构抗震通过增强结构本身的抗震性能来抵御地震作用,由结构本身存储和消耗地震能量是一种消极被动的抗震策略。因此,寻求有别于传统抗震体系的新方法,成为各国学者和工程师探索和研究的目标,结构减振控制的概念随之产生^[1],结构抗震、减振理论也发展到了一个新的阶段^[2]。按是否需要外部能源输入,结构

控制可分为主动控制、被动控制、半主动控制和混合控制^[2-4],如图 1.1 所示。



图 1.1 结构控制分类及基础隔震在结构控制策略中的位置

结构减振控制的研究已有至少 40 多年的历史,其中,主动控制是在实时监测结构反应和环境干扰的情况下,采用现代控制理论计算最优控制力,由驱动器在极大外部能量输入下作用于结构上,控制和修正结构的反应;被动控制是在结构的某些部位附加耗能装置或者子系统,或对结构自身某些构件在构造上进行处理,以改变结构体系的动力特性,不需要外部能量的输入即可达到保护结构的目的;半主动控制原理与主动控制类似,仅需要极小的能量来主动调节控制机构系统内部参数,使结构控制处于最优状态;混合控制则是同时采用被动控制和主动控制两种策略的方法。近年来,已有大量关于结构主动控制和半主动控制的理论研究,也有少量的试点工程,它的主要优点是具有良好的适应性,但控制系统结构复杂,造价昂贵,主动控制所需能量在强烈地震作用下无法完全保证,主动控制与半主动控制都依赖于结构响应或环境干扰信息。被动控制不需要外部能量输入,加之具有控制过程不依赖结构响应和外界干扰信息、构造简单、造价低、易于维护等诸多优点,因而受到工程界的广泛关注,成为目前应用开发的热点,许多被动控制技术也日趋成熟,并在实际工程中得到应用。目前常用的被动控制系统有基础隔震、耗能减振和吸振减振等。隔震技术的设计思路简单明确且行之有效,已被工程界广泛接受,本书重点关注基础隔震。有关耗能减振与吸振减振,可参考相关专著^[2-4]。

1.1.1 隔震基本原理

传统结构抗震是通过增强结构的抗震性能(强度、刚度、延性)来抵御地震作用,即由结构本身储存和耗散地震能量,这是一种消极的“硬抗”策略。合理的途径是增加减振装置,由减振装置与结构共同储存或消耗地震能量,隔震技术便是其中之一,采取了积极的“以柔克刚”的理念^[4]。该技术通过在结构底部或者结构系统出现明显转换的地方设置隔震系统,以减小被隔离结构的地震动能输入,从而减小被隔离结构的地震动响应,提高建筑物、构筑物及其附属设施的安全性^[5,6]。

图 1.2 给出了抗震结构和隔震结构的地震动力响应示意图^[7]。由于隔震系统的水平向刚度远远小于上部结构的水平向刚度,地震作用下上部结构的动力响应表现为整体移动,结构变形主要集中在隔震层,上部结构的层间变形非常小。研究表明^[4,6],采用隔震措施的结构其上部结构的加速度响应约为传统抗震结构的 $1/5 \sim 1/3$ 。因此在地震作用下,应用隔震技术之后,建筑物及其附属设施基本没有破坏;而抗震结构则会有较大的结构变形甚至破坏,造成家具倾翻、门窗开裂、灯具掉落等。

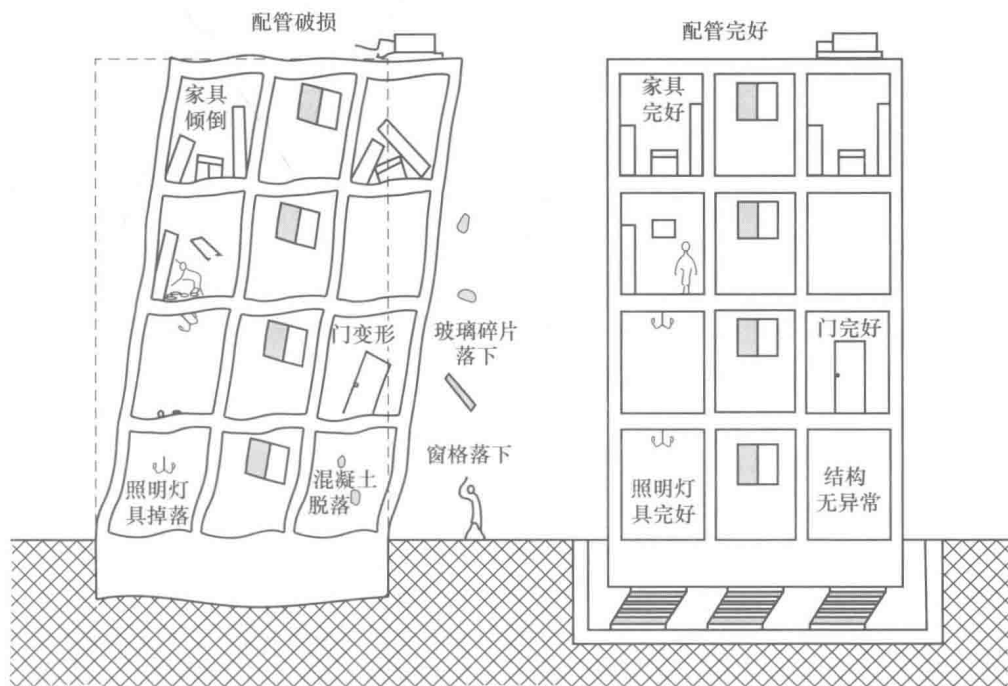


图 1.2 抗震结构和隔震结构的地震动力响应示意图^[7]

隔震系统主要包括隔震器和阻尼器。通过增设横向刚度较小的隔震器,有效降低结构系统的特征频率,使其避开地震动的主要频段,从而降低上部结构的地震动响应。但隔震层的设置,导致水平位移增大,需要设置横向阻尼器来吸收地震能量并减小上部结构的位移^[8]。隔震器与阻尼器是互相制约的:从降低建筑结构特征频率的角度出发,要求隔震装置的水平刚度尽量小,但同时会增加结构的位移响应;从增加耗能的角度出发,要求阻尼器的阻尼尽量大,但同时会降低隔震效果。实际设计中,应在增大水平位移响应和减小层间作用力响应中间寻求一个平衡。目前常见的隔震器有叠层橡胶支座、摩擦滑移隔震元件、滚动摆、滚珠及滚轴元件,其中以叠层橡胶支座隔震器的应用最广。常见的阻尼器有黏滞阻尼器和滞回阻尼器两种。

1.1.2 隔震技术研究现状

1969年,南斯拉夫建成了第一座现代隔震建筑,该结构直接用橡胶块支撑上部结构,因此在地震作用下有明显的晃动^[9]。为提高纯橡胶的工作性能,法国工程师应用薄钢板层和薄橡胶层交错布置构造了叠层橡胶支座。叠层橡胶支座的问世,极大地促进了隔震技术的应用。20世纪70年代,Charleson等^[10]、Skinner等^[11,12]和Robinson^[13]研发了铅芯叠层橡胶支座,并将其成功应用到新西兰William Clayton政府办公大楼。之后,该技术被日本、美国等国家广泛应用。1982年,日本在一座两层的民用住宅建设中采用了隔震技术,这是日本第一栋现代隔震建筑。1985年,美国建成的富希尔法律司法中心(Foothill Communities Law and Justice Center)是美国第一栋隔震建筑,同时也是全世界第一座采用高阻尼橡胶支座的隔震建筑。在欧洲,意大利和法国也相继开展了隔震技术研究。1981年,意大利Naples建成的消防站是第一座采用低阻尼橡胶支座的隔震建筑。与此同时,法国学者研究了核电站结构隔震性能。之后,经过多年的系统研究,新西兰、日本、美国、意大利等先后将隔震设计纳入建筑设计指南,这为隔震技术在实际工程中应用提供了技术及理论依据。现代隔震技术在我国起步相对较晚,1993年广东省汕头市建成了第一栋隔震建筑^[14]。唐家祥和刘再华^[5]、杨佑发和周福霖^[15]、李中锡和周锡元^[16]等为将隔震技术引入我国做了很多工作,对隔震建筑的简化分析、隔震支座性能及设计规范的制定奠定了很好的基础。在《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)中引入了“隔震与消能减振设计”的内容^[17],并且2010版《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)还扩大了隔震设计适用范围^[18]。

隔震支座的性能研究是隔震研究的基础。美国加州大学伯克利分校的Kelly及其合作者开展了一系列理论和试验研究,分析了橡胶隔震支座的工作性能。Koh和Kelly^[19,20]研究了轴向荷载对隔震支座的性能影响,给出了计算橡胶支座屈服荷载的线弹性近似法。同时,试验研究表明,低形状参数的支座在大变形下水平刚度会增加,这种由于大剪切应变引起的应变极化现象可提高结构在大震作用下的安全性。之后,Koh和Kelly^[21]进一步给出了一个分析高阻尼橡胶支座稳定性的黏弹性模型。Imbimbo和Kelly^[22]从理论的角度研究了计入大变形条件下材料硬化对橡胶支座稳定性的影响。另外,隔震橡胶支座通常处于受压状态,但在大震下由于上部结构的倾翻会导致部分支座处于受拉状态。鉴于此,Kelly^[23]分析了多层橡胶支座的受拉屈服问题。针对高阻尼橡胶支座和铅芯橡胶支座,Ryan等^[24,25]基于试验研究了轴向荷载对这两种支座性能的影响,试验结果表明:随着轴向荷载的增大,支座水平刚度减小;随着水平向变形的增大,支座竖向刚度减小。同时,该试验对研究计入轴向荷载后橡胶支座动力模型提供了理论支持。此外,Constantinou等^[26,27]和Mokha等^[28,29]系统地研究了滑移隔震支座、摩擦摆隔震支

座的力学性能及理论模型。

隔震系统的静、动力分析其实属于非线性系统的求解问题。从工程应用的角度看,一个可靠的近似计算方法总是具有非常广泛的应用价值。Hwang^[30,31]对隔震系统的等效线性化近似方法做了细致的研究,给出了一个铅芯橡胶支座的等效线性模型,并通过对比分析,证实了该等效线性模型可以准确地预测铅芯橡胶支座的非弹性响应。之后,Hwang等^[32]又给出了改进的等效线性模型,并据此分析了铅芯橡胶支座滞回环的等效刚度、屈服力、应变强化率等。数值分析表明,改进的等效线性模型可以较好地用于分析隔震桥梁结构的非线性动力响应。考虑到高阻尼橡胶支座的力学特性与其材料特性紧密相关,Hwang和Ku^[33]基于振动台试验建立了两个高阻尼橡胶支座的分析模型,并应用这两个分析模型较好地模拟了结构的地震动响应。通过对美国国家高速公路和交通运输协会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)规范中建议的等效线性化方法的评估,Hwang和Sheng^[34,35]还给出了一个改进的等效刚度和等效阻尼比计算方法。另外,周锡元和韩森^[36]、周锡元等^[37]、苏经宇和韩森^[38]先后研究了隔震橡胶支座、组合橡胶支座的水平刚度特性及其稳态振动反应的简化计算方法。针对橡胶隔震支座,刘文光^[39]提出了刚度因子的概念,给出了采用刚度因子计算隔震支座竖向刚度的简化计算公式,阐明了橡胶隔震支座竖向刚度与水平刚度的相关性。

合成橡胶是复杂的黏弹性材料,低温条件下材料刚度约为室温下材料刚度的50~100倍。通过试验研究,Roeder等^[40,41]测试了低温条件下隔震支座的工作性能,试验表明,低温对橡胶支座刚度的提高与橡胶材料的组分紧密相关。之后,Yura等^[42]和Yakut等^[43]进一步对足尺的天然橡胶支座和氯丁橡胶支座进行了低温性能测试。该试验考虑了往复受压、往复受剪、荷载率、橡胶组分、温度历史、徐变等因素的影响。结果表明,低温环境下橡胶支座剪切刚度的提高与橡胶组分、温度及时间有关;加载速率、应变幅值、摩擦系数及温度历史对支座的性能有一定的影响;低温环境下的徐变与常温下的徐变明显不同;往复受压、往复受剪应力状态对支座的剪切刚度变化没有影响。此外,高温条件或发生火灾后,隔震支座的工作性能研究同样重要。刘文光等^[44,45]研究了建筑隔震结构中天然橡胶支座的温度特性,该研究测试了常温下、100℃恒温老化条件下和高温燃烧条件下隔震支座的性能。

近年来,国内外关于基础隔震技术的研究主要集中在如下几个方面:三维隔震系统、组合隔震系统、基于半主动控制理论的隔震技术、高层结构隔震应用、近断层地震动对隔震的影响、土-结构动力相互作用对隔震的影响等。

1. 三维隔震系统

为了能够有效地阻隔竖向地震动对上部结构的作用,学者们开发了多种三维隔震系统^[46-51]。Tajirian等^[52,53]研究了一种可适用于低层建筑的三维隔震支座,

并通过一系列的振动台试验,测试了该隔震支座对水平向及竖向地震动的隔离作用。Morishita 等^[54]研究了由滚动密封式弹簧与液压系统组合而成的三维隔震系统,提高了结构的安全性,且结构更加经济。熊世树和唐家祥^[55]对三种类型的钢丝绳隔震器的三维隔震性能进行了试验研究,该研究考虑了隔震器直径比与其三向刚度、阻尼的关系。赵亚敏等^[56-58]设计了一种新型组合式三维隔震支座,该支座由铅芯橡胶支座和蝶形弹簧竖向隔震支座组合而成。振动台性能试验结果表明,该三维隔震系统的水平特性与铅芯橡胶支座类似,竖向特性与组合式蝶形弹簧竖向隔震支座相似。该组合式三维隔震支座具有较高的承载能力,可用于建筑结构的三维隔震。李雄彦和薛素铎等^[59-61]提出了一种新型的摩擦-弹簧三维复合隔震支座,建立了概念设计模型,并通过振动台试验,研究了其动力性能。该支座的水平刚度由 Teflon 滑移设备和螺旋弹簧提供,竖向刚度由蝶形弹簧或螺旋弹簧提供^[62]。数值分析结果表明,该隔震支座可以有效地减小大跨度空间结构的地震响应。

2. 组合隔震系统

组合隔震系统是将两种或多种隔震基本原件通过串联或并联的方式复合应用。已有的研究表明,通过合理的参数搭配,采用组合隔震系统能收到比单独使用一种隔震器件更好的隔震效果^[63-69]。Mostaghel 和 Khodaverdian^[70,71]研究了弹性摩擦隔震装置,该隔震装置由摩擦支座与橡胶支座复合而成,可同时提供摩擦力、阻尼力及恢复力。周锡元等^[72]探讨了并联和串联基础隔震体系地震反应的基本特征,串联隔震体系地震反应的周期特征和并联体系明显不同,前者以长周期振动为主,后者则以短周期振动为主,它们分别与橡胶垫隔震体系的基本周期和非隔震结构的基本周期有关。刘小煜等^[73]研究了由滑板式橡胶支座和普通橡胶支座组合而成的滑移支座,建立了这种组合支座的恢复力模型,并完成了由该组合支座组成的基础隔震体系的时程分析。杨树标^[74-76]用时程分析法对砌体结构的摩擦滑移隔震方法、夹层橡胶垫隔震方法及并联复合隔震方法进行了对比分析,同时给出了计算砌体复合隔震结构的简化计算方法。李爱群和毛利军^[77]系统研究了典型并联基础隔震结构地震反应的一般特征,探讨了并联基础体系隔震层参数的合理选择问题。吕西林等^[78,79]研究了由叠层橡胶支座的黏弹性模型和滑板摩擦隔震支座的黏刚塑性模型组合而成的隔震支座分析模型,并通过三维数值模拟与试验对比,验证了该模型的正确性。

3. 基于半主动控制理论的隔震技术

由于隔震技术是一种被动减振方法,为拓宽隔震技术的应用范围,学者们研究了基于半主动控制理论的隔震技术^[80-84]。Ramallo 等^[85]应用传统低阻尼支座与半主动阻尼器组成智能隔震器,并通过数值模拟证明了这种隔震技术的有效性。此