

建筑防灾年鉴2014

住房和城乡建设部防灾研究中心 联合主编
中国建筑科学研究院科技发展研究院

BUILDING
DISASTER
PREVENTION
YEARBOOK
2014

中国建筑工业出版社

建筑防灾年鉴

2014

住房和城乡建设部防灾研究中心 联合主编
中国建筑科学研究院科技发展研究院

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑防灾年鉴 2014 / 住房和城乡建设部防灾研究中心, 中国建筑科学研究院科技发展研究院联合主编. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.8

ISBN 978-7-112-18203-9

I. ①建… II. ①住…②中… III. ①建筑物—防灾—中国—2014—年鉴 IV. ①TU89-54

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第131136号

责任编辑: 张幼平

责任校对: 张颖 赵颖

建筑防灾年鉴

2014

住房和城乡建设部防灾研究中心
中国建筑科学研究院科技发展研究院 联合主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京京点图文设计有限公司制版
北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 29 插页: 4 字数: 721千字
2015年8月第一版 2015年8月第一次印刷

定价: 88.00元

ISBN 978-7-112-18203-9

(27423)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

《建筑防灾年鉴 2014》

指导委员会:

主 任:	王 俊	中国建筑科学研究院	院长	研究员
副主任:	李朝旭	中国建筑科学研究院	副院长	教授级高工
	林海燕	中国建筑科学研究院	副院长	研究员
	赵基达	中国建筑科学研究院	总工	研究员

编 委 会:

主 任:	王清勤	住房和城乡建设部防灾研究中心	主任
副主任:	李引擎	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任
	王翠坤	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任
	黄世敏	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任
	高文生	住房和城乡建设部防灾研究中心	副主任
	程志军	中国建筑科学研究院标准规范处	处长
	金新阳	中国建筑科学研究院结构所	所长
	宫剑飞	中国建筑科学研究院地基所	副所长

委 员:(按姓氏笔画排序)

马东辉	北京工业大学	教授
王 佳	住房和城乡建设部防灾研究中心	高工
王广勇	北京建筑大学	教授
王金平	中国建筑科学研究院	高工
王曙光	中国建筑科学研究院	副总工程师/研究员
尹保江	中国建筑科学研究院	研究员
申世元	中国建筑科学研究院	高工
吕西林	同济大学	教授
朱 磊	住房和城乡建设部防灾研究中心	高工
朱立新	华中科技大学	教授
朱宏平	黑龙江省寒地建筑科学研究院	副总工程师/教授级高工
刘文利	中国建筑科学研究院	研究员
刘松涛	住房和城乡建设部防灾研究中心	高工

刘朋辉	中国建筑科学研究院	工程师
许 镇	清华大学	博士后
孙家鑫	温州大学	教授
苏经宇	北京工业大学	教授
李宏文	中国建筑科学研究院	研究员
李明水	西南交通大学	教授
杨 沈	建研抗震工程技术有限公司	研究员
杨思声	华侨大学	教授
杨润林	北京科技大学	副教授
肖泽南	中国建筑科学研究院	研究员
余世舟	中国地震局工程力学研究所	副研究员
沈 麒	中国建筑科学研究院	工程师
张 昊	中国建筑科学研究院	高工
张靖岩	住房和城乡建设部防灾研究中心	高工
陈 凯	住房和城乡建设部防灾研究中心	研究员
陈厚群	中国水利水电科学研究院	中国工程院院士
陈耀光	中国建筑科学研究院	研究员
周铁钢	西安建筑科技大学	教授
单大圣	国务院发展研究中心	副研究员
侯圣山	中国地质环境监测院	博士
闻绍毅	辽宁省国土资源厅信息中心	工程师
胥 良	四川省地质环境监测总站	高工
郭春雨	住房和城乡建设部防灾研究中心	研究员
唐 意	住房和城乡建设部防灾研究中心	研究员
唐曹明	中国建筑科学研究院	研究员
康景文	中国建筑西南勘察研究院有限公司	教授级高工
阎亚宁	国立台湾科技大学	副教授
曾 坚	天津大学	教授
曾德清	中国建筑西南勘察设计研究院有限公司	高工
谢壮宁	华南理工大学	教授
薛丽影	中国建筑科学研究院	高工
魏陆顺	佛山科技学院	高工

编辑部:

主任:赵 海

副主任:张靖岩

成 员:(按姓氏笔画排序)

于 文 王 洋 张立峰 高 迪 康井红

前 言

中国是世界上自然灾害频发的地区之一，近年来我国连续遭受了南方低温雨雪冰冻、汶川特大地震、大范围秋冬春连旱、青海玉树地震、舟曲特大山洪泥石流、华北地区洪涝风雹灾害、四川雅安地震、甘肃岷县漳县地震、云南鲁甸地震等重特大自然灾害，积极应对这些自然灾害是建筑防灾的主要工作。我国每年基础设施建设规模宏大，“大码头、大钢铁、大化工、大电能”纷纷上马，但重大工程防灾减灾等基础性科学研究距世界先进水平还有一定的差距，尤其是灾害作用机理和工程防御技术方面的原创性科学研究极度匮乏。因此，突破灾害和工程防灾减灾领域的关键性科学问题显得尤为紧迫和重要。

根据联合国亚太经社会理事会 2015 年 3 月 9 日在曼谷发布的《2014 年亚太地区自然灾害评估报告》，2014 年全球发生的 226 起自然灾害中，一半以上发生在亚太地区，造成 6000 多人死亡，7900 万人受影响，并给所在地区造成约 590 亿美元的经济损失。报告显示：中国和印度是受灾最严重的两个国家，自然灾害给中国带来 230 亿美元的损失，占亚太地区全部损失的 39%。因此，采取有效的防灾与减灾措施和手段是国民经济实现可持续发展的重要保障，是国家财产和人民生命安全的重要保证。国务院办公厅于 2011 年 11 月 26 日颁布了《国家综合防灾减灾规划（2011～2015）》，并将防灾减灾人才队伍建设纳入《国家中长期人才发展规划纲要（2010～2020 年）》。住房和城乡建设部颁布了《城乡建设防灾减灾十二五规划》，规划要求全面提高城乡建设防灾减灾能力，最大限度地避免和减轻灾害中因房屋建筑、市政公用设施破坏造成的人员伤亡和经济损失。党的十八大报告提出“加强防灾减灾体系建设，提高气象、地质、地震灾害防御能力”。这些都是党和国家对工程防灾减灾领域的殷殷期许，更是工程防灾减灾领域应该急于解决的重大课题与核心任务。

为贯彻《城乡建设防灾减灾“十二五”规划》，促进各地开展建筑防灾的相关工作，提高我国建筑防灾能力，受住房和城乡建设部委托，住房和城乡建设部防灾研究中心（以下简称“防灾中心”）自 2012 年起开展《建筑防灾年鉴》的编纂工作，旨在全面系统地总结我国建筑防灾减灾的研究成果与实践经验，交流和借鉴各省市建筑防灾工作的成效与典型事例，增强全国建筑防灾减灾的忧患意识，推动建筑防灾减灾工作的发展与实践应用，使世人更全面了解中央政府和人民为防灾减灾所作的巨大努力。防灾中心专家团队通过共同的辛勤劳动，《建筑防灾年鉴 2012》、《建筑防灾年鉴 2013》已分别于 2013 年 3 月和 2014 年 5 月顺利出版发行。

为力求系统全面地展现我国 2014 年度建筑防灾工作的发展全景，《建筑防灾年鉴 2014》在编排结构上进行了调整，全书共分为 8 篇，包括综合篇、政策篇、标准篇、科研

篇、成果篇、工程篇、调研篇、附录篇。

第一篇综合篇，选编 13 篇综述性论文，内容涵盖综合防灾、抗震、隔震、抗暴、抗风雪和地质灾害等多个方面。主要对建筑防灾减灾领域研究进展进行全面综合的分析和评述，为读者了解学科发展现状提供条件，有效促进学科研究品质的提升，科学引导学科的发展。

第二篇政策篇，选编国家颁布的有关建筑防灾方面的法律条例 1 部，管理办法 1 项，指导意见 1 项；收录住房和城乡建设部关于房屋建筑工程推广应用减隔震技术的若干意见 1 部；收录浙江省、山东省和湖北省颁布的有关建筑防灾方面的法律条例 1 部，管理办法 1 项和应对办法 1 条。这些政策法规的颁布实施，为防灾减灾事业的发展提供了政策支持、决策参谋和法制保障。

第三篇标准篇，主要收录国家、行业等标准在编或修订情况的简介，主要包括编制或修编背景、编制原则和指导思想、修编内容与改进等方面内容，便于读者能在第一时间了解到标准规范的最新动态，做到未雨绸缪。

第四篇科研篇，主要选录了重大在研项目、课题的研究进展、关键技术、试验研究和分析方法等方面的文章 10 篇，集中反映了建筑防灾的新成果、新趋势和新方向，便于读者对近年来建筑防灾减灾领域的研究进展有较为全面的了解和概要式的把握。

第五篇成果篇，选录了包括抗震技术、耗能减震、地质灾害、建筑防火、灾害风险评估在内的 12 项具有代表性的最新科技成果。通过整理、收录以上成果，希望借助防灾年鉴的出版机会，能够和广大防灾科技工作者充分交流，共同发展、互相促进。

第六篇工程篇。防灾减灾工程案例对我国防灾减灾技术的推广具有良好的示范作用。本篇选取了有关工程抗震、加固改造、建筑防火、结构抗风、地质灾害等领域的工程案例 8 个，分享了防灾减灾工程实践经验。

第七篇调研篇。为配合各级政府因地制宜地做好建筑防灾减灾工作，以实地经验指导防灾减灾建设，本篇通过对台湾、福建、四川、江西等地具有地方特色建筑防灾工作的调研与总结，向读者展示各地建筑防灾工作的开展情况，便于读者对地方建筑防灾减灾发展有一个概括性的了解。

第八篇附录篇。基于住房和城乡建设部、民政部和国家统计局等相关部门发布的灾害评估权威数据，本篇主要收录了我国 2013 年到 2014 年间，住房和城乡建设部抗震防灾 2013 年工作总结和 2014 年工作要点、2013 年度城乡抗震防灾工作有关数据统计情况；民政部、国家减灾办发布的 2014 年全国自然灾害基本情况、国家减灾委办公室公布 2014 年全国十大自然灾害事件、2014 年上半年全国灾害灾情及救灾等数据。此外，2014 年度建筑防灾减灾领域的研究、实践和重要活动，以大事记的形式进行了展示，读者可通过阅读大事记而洞察我国建筑防灾减灾的总体概况。

本年鉴可供从事建筑防灾减灾领域研究、规划、设计、施工、管理等专业的技术人员、政府管理部门、大专院校师生参考。

本年鉴在编纂过程中，受到住房和城乡建设部、各地科研院所及高校的大力支持，在此对他们的指导与支持表示由衷的感谢。本书引用和收录了国内大量的统计信息和研究成果，在此对他们的工作表示感谢。

本年鉴是防灾中心专家团队共同辛勤劳动的成果。虽然在编纂过程中几易其稿，但由于建筑防灾减灾信息浩如烟海，在资料的搜集和筛选过程中难免出现纰漏与不足，恳请广大读者朋友不吝赐教，斧正批评！

住房和城乡建设部防灾研究中心

中心网址: www.dprcmoc.com

邮箱: office@dprcmoc.cn

联系电话: 010-64517465

传真: 010-84273077

2015年3月31日

目 录

第一篇 综合篇	1
1. 建筑隔震结构研究进展与分析	2
2. 水工混凝土结构抗震研究进展的回顾和展望	13
3. 灾后重建隔震技术应用	28
4. 结构抗爆防护措施研究	37
5. 风致积雪漂移的研究进展	44
6. 城市地下空间环境灾害防治控制研究	58
7. 山地城市灾害风险与规划控制	67
8. 村镇防灾减灾规划研究	75
9. 地质灾害防灾减灾技术研究现状及发展综述	80
10. 冻土地基处理技术的研究与应用现状	86
11. 复杂周边环境基坑工程变形控制技术	91
12. 基于智慧技术的城市综合防灾体系及构建方法	97
13. 加强信息流管理——提高综合防灾减灾能力	107
第二篇 政策篇	111
1. 城镇排水与污水处理条例	112
2. 突发事件应急预案管理办法	121
3. 国务院办公厅关于加强城市地下管线建设管理的指导意见	126
4. 住房城乡建设部关于房屋建筑工程推广应用减隔震技术的若干意见（暂行）	131
5. 浙江省防震减灾条例	134
6. 山东省地震应急避难场所管理办法	140
7. 湖北省突发事件应对办法	145
第三篇 标准篇	153
1. 国内外应急避难条件标准对比研究	154
2. 国家标准《建筑防烟排烟系统技术规范》编制简介	160
3. 国家标准《建筑内部装修设计防火规范》GB 50222-1995 修订简介	162
4. 国家标准《高填方地基技术规范》编制简介	166
5. 行业标准《建筑工程风洞试验方法标准》的研究与编制	169

6. 城市化进程在建筑地基基础工程标准化变迁中的折射	177
第四篇 科研篇	189
1. 全再生混凝土框架抗震性能	190
2. 结构碰撞研究	203
3. 高层建筑典型房间及共享空间火灾温度场分布规律研究	208
4. 高速铁路隧道分段式纵向通风设计及风流短路问题研究	219
5. 基于建筑信息模型技术的可视化消防管理系统	227
6. 高大空间建筑火灾探测技术的试验研究	233
7. 地铁运营工况点型探测器探测性能试验研究	238
8. 地震次生火灾蔓延过程模拟研究	244
9. 超高层建筑气动荷载特性及风振控制措施	253
10. 综合防灾信息化决策平台研究	264
第五篇 成果篇	283
1. 抗震技术集成	284
2. 特大地震下建筑工程抗倒塌关键技术	286
3. 新型“一”字形三芯板并联屈曲约束支撑	287
4. 一种新型插板式黏滞阻尼墙	289
5. 基坑地下水控制设计软件	291
6. 竖向荷载下桩身压缩和桩基沉降变形计算方法	293
7. 软岩大直径素混凝土置换桩复合地基技术	295
8. 滨海新区围海造陆工后沉降预测与防治技术	297
9. 基坑支护结构单肢与多支斜撑加固技术	299
10. 地铁隧道施工引发邻域建筑地基变形预测及灾害防治技术	301
11. 大长度矿物绝缘耐火电缆	302
12. 高层建筑遇灾群体安全快速撤离研究和方法	303
第六篇 工程篇	305
1. 某框架—抗震墙结构加固工程	306
2. 老旧住宅加装电梯与加固改造工程	310
3. 宁波地铁 2 号线东外环停车场建筑结构抗火设计	316
4. 苏州中南中心抗风试验研究	323
5. 某“格构式锚杆挡墙”稳定性和耐久性评价	327
6. 某大型深基坑逆作法施工工程实践	335
7. 某小区基坑边坡演变滑坡的机制分析与治理工程实例	343
8. 某工程筏形基础与桩基础设计和选型研究	349

第七篇 调研篇	357
1. 台湾聚落防灾的观念与架构	358
2. 基于“活态演变”的闽西客家古村落有机防灾策略研究	368
3. 鲁甸地震农村房屋震害调研与灾后恢复重建建议	374
4. 芦山 7.0 级强烈地震的城市住宅震害分析	383
5. 江西瑶里古镇消防安全现状调研	390
6. 四川芦山地震灾区次生地质灾害主要特征及防灾对策	402
7. 四川雅安地质灾害预警预报及分析	408
第八篇 附录篇	415
1. 建筑防灾机构简介	416
2. 住房和城乡建设部抗震防灾 2013 年工作总结和 2014 年工作要点	427
3. 关于印发 2013 年度城乡抗震防灾工作有关数据统计情况的函	430
4. 民政部国家减灾办发布 2014 年全国自然灾害基本情况	441
5. 国家减灾委办公室公布 2014 年全国十大自然灾害事件	443
6. 大事记	444

第一篇 综合篇

建筑防灾减灾是一项复杂的系统工程，大到国家的发展规划，小到具体建筑的防灾设计，贯穿了社会生活的各个层面。同时，它还包含了不同的专业分工和学科门类，具有综合性强、多学科互相渗透等显著特点。本篇选录 13 篇综述性论文，内容涵盖综合防灾、建筑抗震、防火、防洪、抗风雪和地质灾害等多个方面，对建筑防灾减灾研究进展进行综合、分析与评述，旨在概述本领域研究的基本面貌，为读者了解学科发展现状提供条件；评价本领域研究的成就得失，有效促进学科研究品质的提升；揭示本领域研究的发展趋势，引导学科研究的发展。尽管如此，论文的选编工作仍难免挂一漏万，恳请读者不吝批评指正。也期待广大的防灾研究工作者能够通过防灾年鉴这个交流平台，阐发观点与见解，共同促进我国建筑防灾减灾研究工作的发展进步。

1. 建筑隔震结构研究进展与分析

朱宏平 周方圆 袁 涌

华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉

建筑物结构隔震技术是 20 世纪 60 年代出现的一项新技术, 多年来, 世界各国学者对此项技术开展了广泛、深入的研究, 并取得了引人注目的成果, 使这方面的研究工作成为当今土木工程学科中的热点研究课题, 并且形成一个新的学科分支。隔震技术是目前工程中应用最多的一种减震控制技术。由于其易于实施、减震控制效果好, 正受到越来越多国家的重视^[1-2]。

隔震技术的本质作用就是使结构和(或)构件与可能引起破坏的地震地面运动分离开来。这种分离或解耦是通过增加系统的柔性和提供适当的阻尼来实现的^[2]。结构隔震体系按隔震机理的不同划分, 目前主要有叠层橡胶垫隔振体系、滑动摩擦隔振体系, 组合隔震体系、摩擦摇摆体系、滚轴或滚珠摩擦隔震体系、滑动凹面基础隔振体系, 还有最近出现的适用于农村民居的钢筋沥青隔震体系及砂垫层隔震体系等。由于各方面的原因, 例如, 结构安全性、结构可行性、造价经济性等, 隔振体系研究和应用较为广泛的主要包括叠层橡胶垫隔震体系、滑动摩擦隔震体系、组合隔震体系, 以及适用于农村民居的钢筋沥青隔震体系和砂垫层隔震体系。

一、建筑隔震技术的研究现状

常用的叠层橡胶垫主要有三种: 天然夹层橡胶垫、铅芯夹层橡胶垫、高阻尼橡胶垫。高阻尼橡胶隔震技术, 因其所特有的耗能优势及无污染特点目前正成为研究的热点。

1. 高阻尼橡胶隔震支座

高阻尼橡胶隔震支座的构造与天然橡胶支座类似, 不同之处在于, 在天然橡胶和合成橡胶的橡胶聚合物中, 加入添加剂、补强剂、可塑剂、硫化剂等配合物, 制成高阻尼橡胶支座(HRB 支座), 从而使其不仅具备天然橡胶支座的水平和竖向性能外, 还具有较强的阻尼性能。由于其综合了弹簧和阻尼器功能, 设计时可以不在隔震层安装其他阻尼器, 因此高阻尼橡胶隔震支座代替了传统隔震结构所采用的隔震支座加阻尼器的结构形式, 使隔震层的结构布置简单规则。目前这种阻尼器在日本有一定的应用, 在国内, 由于具有优良阻尼性能的橡胶没有取得较大进展, 目前高阻尼橡胶支座在国内工程应用较少。

1) 高阻尼橡胶隔震支座的基本力学性能

具有高阻尼性质的橡胶增强了支座抗水平变形的能力, 但对其竖向变形能力没有太大影响, 为了增加高阻尼橡胶支座的竖向承载能力以及限制其水平过大变形, 一般在高阻尼橡胶支座中加入叠层钢板。橡胶材料由于水平刚度较小, 因此在水平荷载作用下, 具有较好的水平变形能力。高阻尼橡胶支座由于加入了一系列的高阻尼材料, 在一定程度上增加

了支座的阻尼,因此高阻尼橡胶支座除了能够提供一定的水平变形能力以外,其对水平变形还具有一定的抵抗作用,这种抵抗作用使它吸收地震能量的能力比普通的橡胶支座要强,起到一定的自复位效果。高阻尼橡胶隔震支座由于具有阻尼功能,其滞回曲线较为丰满。高阻尼橡胶支座在小变形领域刚度较大,随着变形的增大,其刚度会软化,在剪应变超过200%后开始硬化。

高阻尼橡胶隔震支座是在天然橡胶和合成橡胶的橡胶聚合物中,加入添加剂、补强剂、可塑剂、硫化剂等配合剂制作而成的。添加的聚合物使高阻尼橡胶隔震支座具有较复杂的非线性特性。由于高阻尼橡胶隔震支座中内部材料的不均匀性,在动力荷载作用下,内部复合材料会发生细微结构的损伤,从而会导致高阻尼橡胶隔震支座丧失较大的刚度,同时耗能特性也会相应降低。在通常情况下,上述刚度及耗能特性损失现象在很大程度上依赖于加载历史路径及高阻尼橡胶隔震支座在加载过程中发生的最大变形。因此在采用数值模拟对高阻尼橡胶隔震支座的动力特性进行模拟时必须考虑上述的刚度及耗能特性折减现象。

在一些国家的规范中^[3-5],关于高阻尼橡胶隔震支座的本构模型被指定采用 Bi-Linear 模型。然而最近一些学者^[6-10]的研究表明高阻尼橡胶隔震支座的力学特点具有应变率迟滞特性。不同的应变率下,高阻尼橡胶隔震支座的应力—应变本构关系在加载过程中表现出了明显的应变率滞回现象,在卸载过程中也呈现了一定的应变率滞回特性。然而,传统的 Bi-Linear 模型由于初始刚度及折减刚度的数值为定值,因此不能有效模拟应力—应变本构关系随着应变率的变化而出现的滞回现象。

为了克服传统双折线模型在高阻尼橡胶隔震支座中应用的缺陷,Sano 及 Di-Pasquale^[11]依据 Davienkov-Martine 法则提出了一个非应变率相关模型来近似等效考虑在不同的应变条件下高阻尼橡胶隔震支座的刚度折减及阻尼变化。Kikuchi 及 Aiken^[12]等将 Bi-Linear 模型与 Ramberg-Osgood 模型相结合的方式,同样也提出了一个非应变率相关模型来近似模拟高阻尼橡胶隔震支座的本构关系。Abe 等^[13]提出了一个双向弹塑性模型,来考虑在双向加载条件下,高阻尼橡胶隔震支座的应力—应变本构特性。然而以上所提到的数值模型有一个共同特点,它们考虑了在不同应变条件下高阻尼橡胶隔震支座刚度的折减及阻尼的变化,但是没有将应变率对高阻尼橡胶隔震支座本构关系的影响考虑进去。

考虑应变率的高阻尼橡胶隔震支座本构模型的相关研究并不是很多,Hwang 等^[9]开发了一个模拟高阻尼橡胶隔震支座的阻尼及回复力模型。通过循环荷载试验,得到高阻尼橡胶隔震支座在加载过程中的应力、应变等相关参数,利用非线性最小二乘法对试验数据进行拟合,将刚度和阻尼系数用一系列与高阻尼橡胶隔震支座的相对位移及速度相关的高次多项式进行表达。Hwang 等所提出的高阻尼橡胶隔震支座的非线性模型考虑了应变率因素的影响,但是这种应变率的影响是通过非线性最小二乘法的模拟得到的,因此其非线性模型缺乏相应的物理基础。Tsai 等^[14]以增量形式提出了一个应变率依存数值模型来模拟高阻尼橡胶隔震支座的非线性本构关系。该模型用应变、速度诱导力等参数来描述高阻尼橡胶隔震支座在荷载作用下的恢复力,然而,这种数值模型,无法清晰的阐述如何将速度诱导力从整个恢复力中分离出来,速度诱导力的物理意义不明确。Dall'Asta 等^[6]对高阻尼橡胶隔震支座进行了大量的循环荷载剪切试验及简单的松弛试验,确定了高阻尼橡胶隔震支座的受力特性对加载过程中应变率的依存性。依据大量试验数据,Dall'Asta 等提出了

高阻尼橡胶隔震支座的应变率依存非线性数值模型。但是这种应变率依存非线性数值模型由于加载条件比较单一,因此无法很好地用来模拟实际复杂使用情况下对高阻尼橡胶隔震支座的加载及卸载特性的描述。Bhuiyan 等^[10]为了能合理提出一个考虑应变率依存性的高阻尼橡胶隔震支座的非线性模型,对高阻尼橡胶隔震支座进行了一系列的循环荷载剪切试验、分级的松弛试验及单调的松弛试验,提出了一个考虑高阻尼橡胶隔震支座非线性特性的流变模型。由于高阻尼橡胶隔震支座存在复杂的非线性应力—应变本构关系,如何提出一个合理的非线性模型来模拟高阻尼橡胶隔震支座的动力特性仍有待进一步的完善。

2) 高阻尼橡胶隔震支座+SMA 阻尼器

由于高阻尼橡胶隔震支座在强地震作用下,有可能产生较大的支座位移,从而可能导致高阻尼橡胶隔震支座产生不可恢复的残余变形,因此为了保证隔震层的有效性及安全性,在地震烈度较大区域,一般会采用高阻尼橡胶隔震支座与阻尼器组合使用的形式。目前主要在建筑工程领域使用的阻尼器类型有粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器、压电摩擦型阻尼器及 SMA(形状记忆合金)阻尼器等, SMA 阻尼器因其具有超弹性特性和高阻尼特性,目前在隔震领域里正在逐步形成一个新的科学分支^[15-16]。利用 SMA 的特性制作阻尼耗能装置最早是由 Graesser 和 Cozzarelli^[17]提出的。自此以后, SMA 阻尼耗能装置的相关研究在国内外陆续开展。

国外 SMA 阻尼耗能装置研究: 1) 各种样式的阻尼器相继研发成功,并对其性能进行了测试。美国加州大学地震工程研究中心 Peter^[18]等研制出一种用于土木结构地震反应的 SMA 被动阻尼装置,它的设计采用了多股超弹性 Ni-Ti 索缠绕到 2 个距离固定的椭圆形柱上,该装置称为单面阻尼器。如果将两个单面阻尼器组合起来,可制成双面阻尼器。性能测试结果表明,这种阻尼器具有稳定的迟滞性,受频率等因素的影响较小;美国加州 E.Sorb System 的 Robert^[19]研制了另外一种 SMA 双面阻尼器,称为 CT 装置。装置的性能测试是在加州大学地震工程研究中心的一台带温控的卧式平面试验机上进行。结果表明,在允许的范围内,该阻尼器性能不受频率影响,而且抗疲劳性能良好; Dolce M 等^[20]介绍了两种基于形状记忆合金的被动控制装置,试验结果表明,这两种被动控制装置在大应变循环下具有优良的抗疲劳性、耐久性和可靠性。2) SMA 阻尼器对土木工程结构的减振效果研究。Williams、Chiu 和 Bernhard^[21]采用三副形状记忆合金丝和一副钢丝制成适应式减振器,并研究了这种减振器对梁的减振能力,提出此种减振器有希望发展成一种高效的振动被动控制技术; Adachi Y 等^[22]则提出一种形状记忆合金阻尼器,通过一系列的振动台试验,发现其能有效减小桥梁结构的地震反应,尤其是在形状记忆效应阶段,阻尼器的工作效果更好; Tamai 等^[23]将 SMA 棒和钢筋复合在一起,形成一个耗能支撑装置,并将其安装在一框架结构上,试验结果表明,这种耗能支撑装置可有效耗散结构输入的地震能量,并且在震后很容易进行修复和置换。

3) SMA 阻尼器

在实际工程应用方面,意大利的 Indirli M 等^[24]通过深入的理论论证,采用 SMA 作为加固组件对意大利的教堂钟塔进行加固。在 2000 年的地震中,教堂钟塔没受到任何破坏,形状记忆合金装置有效控制了地震加速度和能量的输入。与传统加固方法相比, SMA 装置加固的优越性在于既能起到很好的加固效果,又能保证古建筑的完整性,这是一例成功应用于古建筑修复的事例。

在国内,土木工程界的学者也进行了大量的研究工作。彭刚等^[25]对形状记忆合金耗能阻尼器设计理论方法进行了研究。以 Brinson 本构模型为理论依据,建立了阻尼器的热力学非线性方程及其求解方法,并利用 MATLAB 编制的计算机软件进行了数值仿真计算。计算结果表明,形状记忆合金阻尼器具有较强的耗能能力;欧进萍等^[26]就 X 形和三角形 SMA 板式阻尼器的阻尼力滞回模型进行了推导;李忠献等^[27]提出应用形状记忆合金对斜拉桥的参数振动实施半主动控制,并数值模拟了其控制效果。结果表明,对斜拉桥参数振动进行 SMA 半主动控制,不仅可大幅降低斜拉索和桥面板的振动,而且能够有效抑制斜拉桥参数共振的发生;薛素铎等^[28]提出一种新型 SMA 阻尼器,并对其在大跨空间结构中的减振控制理论和方法进行了相应的探讨。地震反应时程分析表明, SMA 阻尼器可有效减小结构地震反应;张继刚等^[29]研制了一种锥形 SMA 阻尼器,并对其进行了性能试验。试验结果表明,这种 SMA 阻尼器具有良好的自复位能力,但其耗能能力和疲劳性差于丝材的 SMA 阻尼器; Han Yulin 等^[30]设计了一种拉压扭超弹性 SMA 阻尼器,并进行了耗能试验研究;左晓宝^[31]研制了一种变刚度复合摩擦 SMA 阻尼器,试验结果证明,其具有输出控制力大、耗能能力强等特性。李宏男等^[32]利用超弹性 SMA 丝的耗能能力和自复位能力,提出了一种新型的 SMA 阻尼器,试验研究了该阻尼器在循环荷载作用下不同位移幅值、不同加载频率和不同初始位移条件下的力学性能,并通过建立的理论模型对阻尼器的力学性能进行了数值模拟。研究结果表明:开发的新型 SMA 阻尼器在循环荷载作用下形成稳定的滞回曲线,具有良好的耗能能力及自复位能力。

纵观近几年的研究现状, SMA 阻尼器可以分为以下三类: 1) SMA 超弹性阻尼器。这是研究最多的一类阻尼器。这类阻尼器主要利用 SMA 超弹滞回耗能特性,达到耗散结构输入的能量。同时,在中等或小的受载情况下,其不会产生永久变形和位移,使 SMA 阻尼器具有自复位功能。2) SMA 形状记忆阻尼器。这类阻尼器主要是利用 SMA 的形状记忆效应和马氏体阶段 SMA 具有很高的阻尼特性研制的。由于 SMA 具有热滞效应,因而限制了这类阻尼器的应用研究。随着 SMA 材料性能的改进和加热方法的深入研究,这类阻尼器将会有很大的应用前景。3) SMA 复合阻尼器。这类阻尼器是将 SMA 与其他材料复合在一起制成阻尼器,两种材料优势互补,提高阻尼器的性能。这也是研究比较多的一类阻尼器,试验也证明其具有很好的减振耗能特性。

目前已经发现的 SMA 材料的种类有上百种之多,其中被普遍认为具有实用价值且比较常用的主要有近等原子比 Ni-Ti 合金、Cu 基形状记忆合金和 Fe 基形状记忆合金。其中 Ni-Ti 合金作为一种基础材料被广泛应用于土木工程领域中的阻尼器设计中。Ni-Ti 记忆型合金最早是 1960 年被 Buehler 等^[33]提出的。

Ni-Ti 记忆型合金具有以下特征: 1) 弹性应变区域较大; 2) 滞回阻尼特性; 3) 高效可靠的耗能机制; 4) 在 6% 应变之后会出现应变硬化现象; 5) 卓越的低-高周疲劳性能; 6) 优越的耐腐蚀性能; 7) 形状自回复能力。Ni-Ti 记忆型合金由于具备以上所提的超弹性及形状记忆特性而被目前广泛地应用在工程的各个领域。

Han 等^[34]开发了一个同时考虑拉伸、压缩及扭转方向的动态阻尼器, Han 等研发的动态阻尼器包括两个同心管以及 Ni-Ti 记忆型合金。能量主要通过 Ni-Ti 记忆型合金进行耗散。大量的试验表明,能量通过内外管道耗散量的大小与内外管道内 Ni-Ti 记忆型合金的布置数量有很好的对应关系。

Clark 等^[35]对将 Ni-Ti 记忆合金线缠绕在圆柱形的支撑构件上所组成的阻尼器支座进行了大量的试验研究,试验结果表明, Ni-Ti 阻尼器支座具有很好的动力性能,能很好地控制上部结构的地震反应。为了实现在不同环境温度效应下, Ni-Ti 记忆型合金阻尼器能够充分发挥去作用效能,一些学者^[36-37]研制开发了一种能兼顾不同温度效应影响的 Ni-Ti 记忆型合金阻尼器,它的主要构造原理是在阻尼器中配置不同种类的 Ni-Ti 记忆型合金,以便在不同温度条件下,阻尼器都能够很好地进行能量耗散,从而对结构动力效应起到控制作用。

2. 其他隔震体系

1) 滑动摩擦隔震体系

滑动摩擦隔震体系,其主要原理为:当结构受到较小的地面激励时,摩擦力阻止上部结构滑动,使结构保持稳定;当地面激励超过某一限值时,隔震层地震作用将超过摩擦力,滑动面开始滑动,发挥隔震作用。这时即使地面激励再增大传入,上部结构的地震作用也不会随之增大。滑动摩擦隔震基础的关键在于滑动摩擦装置。滑动摩擦装置包括滑动摩擦组件和限位耗能组件,常见的滑动摩擦组件由上下钢板和中部滑动面三部分组成。摩擦面的材料有聚四氟乙烯板、复合聚四氟乙烯和柔性石墨土层等。另外,上下承板可考虑用高强混凝土制作。滑动摩擦装置中的限位组件,并不承受竖向荷载,在水平荷载下只起稳定、复位和耗能限位作用。常见的限位组件有变截面刚杆、U 型热轧钢板和扭转梁等。目前关于滑动隔震体系和叠层橡胶隔震体系研究已较为成熟,国内外的工程应用也较多^[38]。但是,由于滑动隔震体系没有自复位能力,在大震时将可能产生不可控制的位移,这是人们所不能接受的;而叠层橡胶支座虽有自复位能力,但是出于经济等多方面的考虑,其直径不可能做得太大,这样在大地震时过大的位移将可能使支座产生倾覆等问题,从而导致结构隔震控制失败。为了综合利用这两种隔震体系的优点,抛却其缺点,人们提出了组合隔震体系的概念。

2) 组合隔震体系

最常用的组合隔震体系是由滑动摩擦隔震支座和叠层橡胶隔震支座并联组成,基本原理是系统中的叠层橡胶隔震支座提供系统的向心恢复力,而滑动摩擦隔震支座滞回耗能,隔离地震。所以,这种组合隔震体系兼有叠层橡胶隔震体系和滑动摩擦隔震体系的优点,有效避免了各自的缺点,近年来在国内外得到广泛应用^[39-40]。

3) 钢筋沥青隔震体系及砂垫层隔震体系

传统隔震技术减震消能效果优越,一般应用于政府大楼、医院、带有精密电器设备的厂房间、学校、核电站等对国计民生具有重大影响的建筑结构。目前村镇及经济欠发达地区的防灾减灾问题已经逐渐引起人们的重视,国内外的一些研究机构和学者已经开始着手这方面的研究。国内尚守平等^[41]提出了一种适用于农村地区隔震减震的钢筋-沥青隔震系统,并通过大量试验证明了该隔震体系可以有效减少上部结构动力响应,且造价低廉。窦远明等^[42]进行了不同工况下的砂垫层隔震振动台试验研究,结果表明砂垫层隔震层可有效减少上部结构地震反应;刘斯宏等^[43]在小型电动振动台上进行了土工袋和袋内填充物的水平减振对比试验,试验结果表明,土工袋具有较好的减振效果,且造价低廉,能很好应对农村低矮房屋的减振要求。国外的加州大学伯克利分校地震工程研究中心(Earthquake Engineering Research Center, EERC)与英国的 Tun Abdul Razak Research Centre (TARRC)