

摩擦耗能减震结构设计 理论及应用

周 云 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

014035583

TU352. 104
62

摩擦耗能减震结构设计 理论及应用

周 云 著



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·



北航

C1722801

TU352. 104

62

内容简介

本书系统地总结和阐述了摩擦耗能减震的理论、方法、技术和工程应用的主要研究成果。主要内容包括摩擦耗能减震的概念和原理、摩擦耗能器的类型和性能、摩擦耗能器的力学模型、摩擦耗能减震结构的特性、分析方法和设计方法以及摩擦耗能器的工程应用情况等。

本书可供从事土木工程、防灾减灾工程及防护工程、工程力学、材料科学与工程的研究、设计、制造和施工工程技术人员参考,也可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

摩擦耗能减震结构设计理论及应用/周云著. —武汉:武汉理工大学出版社,2013.8
ISBN 978-7-5629-4133-0

I. ①摩…

II. ①周…

III. ①建筑结构-防震设计-研究

IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 190971 号

项目负责人:蔡德民

责任编辑:于应魁

责任校对:丁 冲

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

印刷者:武汉兴和彩色印务有限公司

经销者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.25

字 数:416 千字

版 次:2013 年 8 月第 1 版

印 次:2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

版权所有,盗版必究。

前 言

地震和风灾害严重威胁着人类的生存与发展,自人类诞生以来人们就为抵抗这两种自然灾害而奋斗。随着科学技术和人民生活水平的提高,预防与抵御地震和风灾害的能力也在不断地提高,结构减震(振)控制技术作为抗御地震(强风)的一种有效方法,也得到了发展和应用。结构减震(振)控制在工程结构抗震抗风中已发展成为比较成熟的技术,结构减震(振)控制方法改变了传统抗震抗风方法通过提高结构刚度、强度和延性来提高结构的抗震抗风能力,而是通过调整或改变结构动力参数的途径,改变结构的震(振)动反应,有效地保护结构在地震(强风)中的安全。在结构中加入耗能器来控制结构的地震和风振反应的耗能减震(振)方法是结构减震(振)控制技术中一种有效、安全、可靠、经济的减震(振)方法。

本书系统地总结和阐述了摩擦耗能减震的理论、方法和技术及工程应用的主要研究成果。全书共7章。第1章为摩擦耗能减震的概念与原理,第2章为摩擦耗能器的类型、性能与恢复力模型,第3章为摩擦耗能减震结构及其结构特性,第4章为摩擦耗能减震结构的分析方法,第5章为摩擦耗能减震结构的设计方法,第6章为摩擦耗能器的实际工程应用,第7章为耗能减震结构分析软件简介。

本书得到周福霖院士等前辈和同行的鼓励、指导和支持,作者特表示由衷的感谢!

本书在编写过程中,参阅了国内外许多学者的著作、论文和研究报告,一些学者主动提供了有关资料和工程照片,特在此表示衷心的感谢!作者的研究生汤统壁、杨波、吴丛晓和冷加冰等协助进行了资料收集和书稿录入等大量工作,作者对他们的贡献表示衷心的感谢!

本书部分研究成果得到了国家自然科学基金、广东省自然科学基金和住建部、广东省建设厅、广州市建委、广州市教委科技基金的资助,在此表示衷心的感谢!

由于耗能减震内容十分丰富,书中难免挂一漏万,我们将在今后的研究和教学中逐步完善,同时,由于作者水平有限,书中难免有疏漏及错误之处,衷心希望有关专家、学者和读者批评指正。

周 云

2013年3月

3.3.3	摩擦耗能器耗能性能测试	123
3.3.4	摩擦耗能器耗能性能测试方法	124
参考文献		125
3.1	摩擦耗能器耗能性能测试	126
1	摩擦耗能减震的概念与原理	(1)
1.1	结构减震的概念与原理	(1)
1.1.1	结构减震控制的概念与发展简况	(1)
1.1.2	结构减震控制的类型与原理	(1)
1.2	耗能减震的概念与原理	(4)
1.2.1	耗能减震的概念	(4)
1.2.2	耗能减震的原理	(4)
1.2.3	耗能减震装置的类型	(5)
1.2.4	耗能减震装置设计的新思想	(7)
1.3	摩擦耗能减震的概念与原理	(7)
1.3.1	摩擦学基本原理	(7)
1.3.2	摩擦耗能减震的概念与基本原理	(8)
1.3.3	摩擦耗能装置及摩擦耗能结构的耗能机制	(10)
1.4	摩擦耗能减震的应用范围	(12)
参考文献		(12)
2	摩擦耗能器的类型、性能与恢复力模型	(14)
2.1	摩擦耗能器的类型与性能	(14)
2.1.1	摩擦耗能节点	(14)
2.1.2	板式摩擦耗能器	(22)
2.1.3	筒式摩擦耗能器	(32)
2.1.4	复合型摩擦耗能器	(36)
2.2	影响摩擦耗能器性能的因素分析	(43)
2.2.1	摩擦元件组成形式对摩擦耗能器性能的影响	(43)
2.2.2	高强螺栓对摩擦耗能器性能的影响	(44)
2.2.3	摩擦元件和接触面处理对摩擦耗能器性能的影响	(44)
2.2.4	摩擦元件和孔槽的几何尺寸对摩擦耗能器性能的影响	(45)
2.2.5	使用时间对摩擦耗能器性能的影响	(46)
2.2.6	滑动速度与温度对摩擦耗能器性能的影响	(46)
2.2.7	循环次数对摩擦耗能器性能的影响	(47)
2.2.8	外荷载类型对摩擦耗能器性能的影响	(47)
2.2.9	加工精度对摩擦耗能器性能的影响	(47)
2.3	摩擦耗能器的恢复力模型	(48)
2.3.1	普通摩擦耗能器恢复力模型	(49)
2.3.2	向心式摩擦耗能器(EDR)恢复力模型	(51)

2.3.3 拟粘滞摩擦耗能器恢复力模型	(52)
2.3.4 圆环-摩擦耗能器恢复力模型	(53)
参考文献	(53)
3 摩擦耗能减震结构及其结构特性	(57)
3.1 摩擦耗能减震结构	(57)
3.1.1 摩擦耗能剪力墙结构	(57)
3.1.2 摩擦耗能支撑框架结构	(59)
3.2 摩擦耗能-钢结构的振动台试验及结构特性	(59)
3.2.1 装有摩擦耗能节点钢结构的振动台试验及结构特性	(60)
3.2.2 装有 Pall 摩擦耗能器钢结构的振动台试验及结构特性	(62)
3.2.3 装有 T 形芯板拟粘滞摩擦耗能器钢结构的试验研究与结构特性	(65)
3.2.4 装有夹板摩擦耗能器钢结构的结构试验及结构特性	(69)
3.2.5 装有 Sumitomo 摩擦耗能器钢结构的结构试验及结构特性	(72)
3.2.6 装有 EDR 摩擦耗能器钢结构的结构试验及结构特性	(74)
3.2.7 装有压电摩擦耗能器钢结构的结构试验及结构特性	(80)
3.2.8 装有电磁/永磁摩擦耗能器钢结构的结构试验及结构特性	(83)
3.2.9 装有复合型摩擦耗能器钢结构的振动台试验及结构特性	(87)
3.3 摩擦耗能-钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(89)
3.3.1 装有 Pall 型摩擦耗能器钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(89)
3.3.2 装有十字芯板摩擦耗能器钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(97)
3.3.3 装有 Sumitomo 摩擦耗能器钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(99)
3.3.4 装有圆环-摩擦耗能器钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(102)
3.3.5 装有复合型摩擦耗能器钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(106)
3.3.6 装有钢筒摩擦耗能器钢筋混凝土结构的试验研究与结构特性	(108)
3.4 小结	(113)
参考文献	(113)
4 摩擦耗能减震结构的分析方法	(115)
4.1 耗能减震结构的分析方法	(115)
4.1.1 结构地震反应分析方法概述	(115)
4.1.2 耗能减震结构的分析方法概述	(115)
4.2 耗能减震结构的分析模型	(116)
4.2.1 普通结构的分析模型	(116)
4.2.2 耗能减震结构的分析模型	(120)
4.3 基于等价线性化的振型分解反应谱法	(120)
4.3.1 振型分解反应谱法概述	(120)
4.3.2 耗能减震器的等价线性化	(121)
4.3.3 耗能减震结构的振型分解法	(125)
4.3.4 耗能减震结构的抗震设计反应谱	(126)
4.3.5 耗能减震结构地震作用与作用效应计算	(127)

4.4 时程分析法	(129)
4.4.1 时程分析法概述	(130)
4.4.2 输入地震波的选用及调整	(131)
4.4.3 耗能减震结构的恢复力模型	(133)
4.4.4 质量、刚度与阻尼矩阵	(137)
4.4.5 结构振动方程的数值积分法	(138)
4.5 静力弹塑性(Push-over)分析方法	(139)
4.5.1 静力弹塑性(Push-over)分析方法概述	(140)
4.5.2 静力弹塑性(Push-over)分析方法的原理	(141)
4.5.3 结构的能力谱	(141)
4.5.4 结构的地震需求谱	(150)
4.5.5 目标位移与结构性能评估	(157)
4.6 能量分析法	(164)
4.6.1 能量分析法概述	(164)
4.6.2 能量分析法的基本原理	(165)
4.6.3 地震输入能量及其分配的影响因素	(170)
4.6.4 能量反应谱	(173)
参考文献	(177)
5 摩擦耗能减震结构的设计方法	(181)
5.1 耗能减震结构的概念设计	(181)
5.1.1 耗能减震结构的适应范围和设防目标	(181)
5.1.2 耗能减震结构的性能标准和基本要求	(183)
5.1.3 耗能器的选择、数量确定及布置原则	(184)
5.2 摩擦耗能减震结构的设计方法	(189)
5.2.1 最优滑移荷载设计谱法	(189)
5.2.2 期望阻尼比循环设计方法	(196)
5.2.3 与现行抗震规范相结合的设计方法	(200)
5.2.4 能量设计方法	(205)
5.3 摩擦耗能器的连接与构造	(207)
参考文献	(209)
6 摩擦耗能器的实际工程应用	(210)
6.1 摩擦耗能器的应用概况	(210)
6.2 摩擦耗能器在新建工程中的应用	(213)
6.2.1 肯考迪亚大学图书馆	(213)
6.2.2 加拿大民航总部大楼	(214)
6.2.3 摩斯柯恩西会议中心	(214)
6.2.4 利诺维尔欧罗巴大楼	(215)
6.2.5 救护中心大楼	(216)
6.2.6 印度的梔子花公寓住宅楼	(217)

6.2.7 日本某图书馆	(218)
6.2.8 云南洱源县振戎中学食堂	(219)
6.3 摩擦耗能器在加固工程中的应用	(220)
6.3.1 蒙特利尔娱乐场	(220)
6.3.2 魁北克省警察局	(221)
6.3.3 马克特克大楼	(221)
6.3.4 易通大楼	(221)
6.3.5 正义中心大楼	(222)
6.3.6 加拿大国家电子研究大楼	(223)
6.3.7 斯特文森医院	(223)
6.3.8 波音商业飞机厂	(225)
6.3.9 波音发展中心大楼、自助餐厅和礼堂大楼	(226)
6.3.10 高地水塔和罗林山水塔	(226)
6.3.11 弗里波特水塔	(227)
6.3.12 日本多幢钢筋混凝土教学楼、办公楼和公寓	(228)
参考文献	(230)
7 耗能减震结构分析软件简介	(232)
7.1 耗能减震结构分析软件概述	(232)
7.2 ETABS	(232)
7.2.1 ETABS 概述	(232)
7.2.2 耗能减震单元在 ETABS 中的实现	(233)
7.3 SAP2000	(237)
7.3.1 SAP2000 概述	(237)
7.3.2 耗能减震单元在 SAP2000 中的实现	(237)
7.4 MIDAS	(241)
7.4.1 MIDAS 概述	(241)
7.4.2 耗能减震单元在 MIDAS 中的实现	(241)
7.5 ANSYS	(245)
7.5.1 ANSYS 概述	(245)
7.5.2 耗能减震单元在 ANSYS 中的实现	(245)
参考文献	(248)
附录 英制与国际单位制(SI)转换表	(249)
附录 1 长度单位换算表	1.1
附录 2 面积单位换算表	2.1
附录 3 体积单位换算表	3.1
附录 4 质量单位换算表	4.1
附录 5 力单位换算表	5.1
附录 6 力矩单位换算表	6.1
附录 7 压力单位换算表	7.1
附录 8 功、能、热单位换算表	8.1
附录 9 功率单位换算表	9.1
附录 10 速度单位换算表	10.1
附录 11 加速度单位换算表	11.1
附录 12 频率单位换算表	12.1
附录 13 角度单位换算表	13.1
附录 14 转动惯量单位换算表	14.1
附录 15 弹性模量单位换算表	15.1
附录 16 泊松比单位换算表	16.1
附录 17 热膨胀系数单位换算表	17.1
附录 18 热导率单位换算表	18.1
附录 19 导热系数单位换算表	19.1
附录 20 比热容单位换算表	20.1
附录 21 热流密度单位换算表	21.1
附录 22 热通量单位换算表	22.1
附录 23 热效率单位换算表	23.1
附录 24 热损失单位换算表	24.1
附录 25 热平衡单位换算表	25.1
附录 26 热平衡常数单位换算表	26.1
附录 27 热平衡常数单位换算表	27.1
附录 28 热平衡常数单位换算表	28.1
附录 29 热平衡常数单位换算表	29.1
附录 30 热平衡常数单位换算表	30.1
附录 31 热平衡常数单位换算表	31.1
附录 32 热平衡常数单位换算表	32.1
附录 33 热平衡常数单位换算表	33.1
附录 34 热平衡常数单位换算表	34.1
附录 35 热平衡常数单位换算表	35.1
附录 36 热平衡常数单位换算表	36.1
附录 37 热平衡常数单位换算表	37.1
附录 38 热平衡常数单位换算表	38.1
附录 39 热平衡常数单位换算表	39.1
附录 40 热平衡常数单位换算表	40.1
附录 41 热平衡常数单位换算表	41.1
附录 42 热平衡常数单位换算表	42.1
附录 43 热平衡常数单位换算表	43.1
附录 44 热平衡常数单位换算表	44.1
附录 45 热平衡常数单位换算表	45.1
附录 46 热平衡常数单位换算表	46.1
附录 47 热平衡常数单位换算表	47.1
附录 48 热平衡常数单位换算表	48.1
附录 49 热平衡常数单位换算表	49.1
附录 50 热平衡常数单位换算表	50.1
附录 51 热平衡常数单位换算表	51.1
附录 52 热平衡常数单位换算表	52.1
附录 53 热平衡常数单位换算表	53.1
附录 54 热平衡常数单位换算表	54.1
附录 55 热平衡常数单位换算表	55.1
附录 56 热平衡常数单位换算表	56.1
附录 57 热平衡常数单位换算表	57.1
附录 58 热平衡常数单位换算表	58.1
附录 59 热平衡常数单位换算表	59.1
附录 60 热平衡常数单位换算表	60.1
附录 61 热平衡常数单位换算表	61.1
附录 62 热平衡常数单位换算表	62.1
附录 63 热平衡常数单位换算表	63.1
附录 64 热平衡常数单位换算表	64.1
附录 65 热平衡常数单位换算表	65.1
附录 66 热平衡常数单位换算表	66.1
附录 67 热平衡常数单位换算表	67.1
附录 68 热平衡常数单位换算表	68.1
附录 69 热平衡常数单位换算表	69.1
附录 70 热平衡常数单位换算表	70.1
附录 71 热平衡常数单位换算表	71.1
附录 72 热平衡常数单位换算表	72.1
附录 73 热平衡常数单位换算表	73.1
附录 74 热平衡常数单位换算表	74.1
附录 75 热平衡常数单位换算表	75.1
附录 76 热平衡常数单位换算表	76.1
附录 77 热平衡常数单位换算表	77.1
附录 78 热平衡常数单位换算表	78.1
附录 79 热平衡常数单位换算表	79.1
附录 80 热平衡常数单位换算表	80.1
附录 81 热平衡常数单位换算表	81.1
附录 82 热平衡常数单位换算表	82.1
附录 83 热平衡常数单位换算表	83.1
附录 84 热平衡常数单位换算表	84.1
附录 85 热平衡常数单位换算表	85.1
附录 86 热平衡常数单位换算表	86.1
附录 87 热平衡常数单位换算表	87.1
附录 88 热平衡常数单位换算表	88.1
附录 89 热平衡常数单位换算表	89.1
附录 90 热平衡常数单位换算表	90.1
附录 91 热平衡常数单位换算表	91.1
附录 92 热平衡常数单位换算表	92.1
附录 93 热平衡常数单位换算表	93.1
附录 94 热平衡常数单位换算表	94.1
附录 95 热平衡常数单位换算表	95.1
附录 96 热平衡常数单位换算表	96.1
附录 97 热平衡常数单位换算表	97.1
附录 98 热平衡常数单位换算表	98.1
附录 99 热平衡常数单位换算表	99.1
附录 100 热平衡常数单位换算表	100.1

1 摩擦耗能减震的概念与原理

1.1 结构减震的概念与原理

1.1.1 结构减震控制的概念与发展简况

传统结构抗震是通过增强结构本身的抗震性能(强度、刚度、延性)来抵御地震作用的,即由结构本身储存和消耗地震能量,这是被动消极的抗震对策。由于人们尚不能准确地估计未来地震灾害作用的强度和特性,按照传统抗震方法设计的结构不具备自我调节能力。因此,结构很可能不能满足安全性的要求,而产生严重破坏或倒塌,造成重大的经济损失和人员伤亡。

合理有效的抗震途径是对结构施加减震装置(系统),由减震装置与结构共同承受地震作用,即共同储存和耗散地震能量,以调和减轻结构的地震反应。这是积极主动的抗震对策,是抗震对策中的重大突破和发展^[1~4]。

结构减震控制的研究与应用已有近 30 年的历史,以改变结构频率为主的隔震技术是结构减震控制技术中研究和应用最多、最成熟的技术。国内外已建隔震建筑数千栋,并在桥梁、地铁等工程中大量应用,其中一些隔震建筑已在几次大地震中成功经受考验。

以增加结构阻尼为主的被动耗能减震理论与技术已趋于成熟,并已成功用于工程结构的抗震抗风控制中。本书与同期出版的系列丛书将着重介绍耗能减震控制的研究成果。

结构减震的主动控制具有很广的适应范围,控制效果好,已进行了大量的理论研究,并已在少数试点工程中应用,但控制系统结构复杂,造价昂贵,所需的巨大能源在强烈地震下无法完全保证,因此,其应用遇到较大困难。

近年来,智能驱动材料和控制装置的研究和发展为土木工程结构的抗震控制开辟了新的天地,将为土木工程结构减震控制的第二代高性能耗能器和主动控制驱动器的研制和开发提供基础,从而使结构与其感知、驱动和执行部件一体化的减震控制智能系统设计成为可能。

1.1.2 结构减震控制的类型与原理

结构减震控制根据是否需要外部能源输入可分为被动控制、主动控制、半主动控制、智能控制和混合控制^[2~5],如图 1.1、图 1.2 所示。

被动控制(Passive Control)——不需要外部能源输入提供控制力,控制过程不依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法。如基础隔震、耗能减震和吸振减震等均为被动控制,如图 1.2(a)、(b)、(c)所示。

主动控制(Active Control)——需要外部能源输入提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法。主动控制系统由传感器、运算器和施力作动器等三部分组成。主动控制是将现代控制理论和自动控制技术应用于结构控制的高新技术,如图 1.2(d)所示。

半主动控制(Semi-Active Control)——不需要外部能源输入提供控制力,控制过程依赖

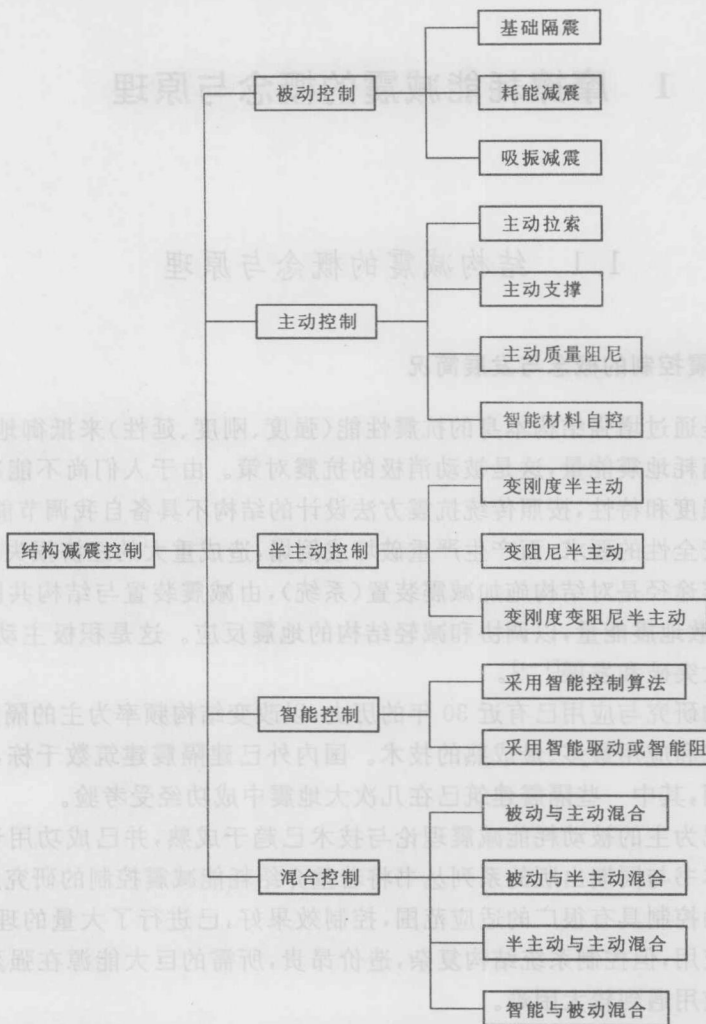


图 1.1 结构减震控制分类图

于结构反应和外界干扰信息的控制方法,如图 1.2(d)所示。

半主动控制以被动控制为主,它既具有被动控制系统的可靠性,又具有主动控制系统的强适应性,通过一定的控制律可以达到主动控制系统的控制效果,是一种具有前景的控制技术。

智能控制(Intelligent Control)——采用智能控制算法和采用智能驱动或智能阻尼装置为标志的控制方式。

采用智能控制算法为标志的智能控制,它与主动控制的差别主要表现在不需要精确的结构模型(采用智能控制算法确定输入或输出反馈与控制增益的关系)且控制力也不需要很大外部能量输入下的作动器来实现;采用智能驱动或智能阻尼装置为标志的智能控制,它的控制原理与主动控制基本相同,只是实施控制力的作动器是智能材料制作的智能驱动器或智能阻尼器。

混合控制(Hybrid Control)——不同控制方式相结合的控制方法,如图 1.2(e)所示。

合理选取控制技术的较优组合,吸取各控制技术的优点,避免其缺点,可形成较为成熟而先进有效的组合控制技术,但其本质上仍是一种完全主动控制技术,仍需外界输入较多能量。

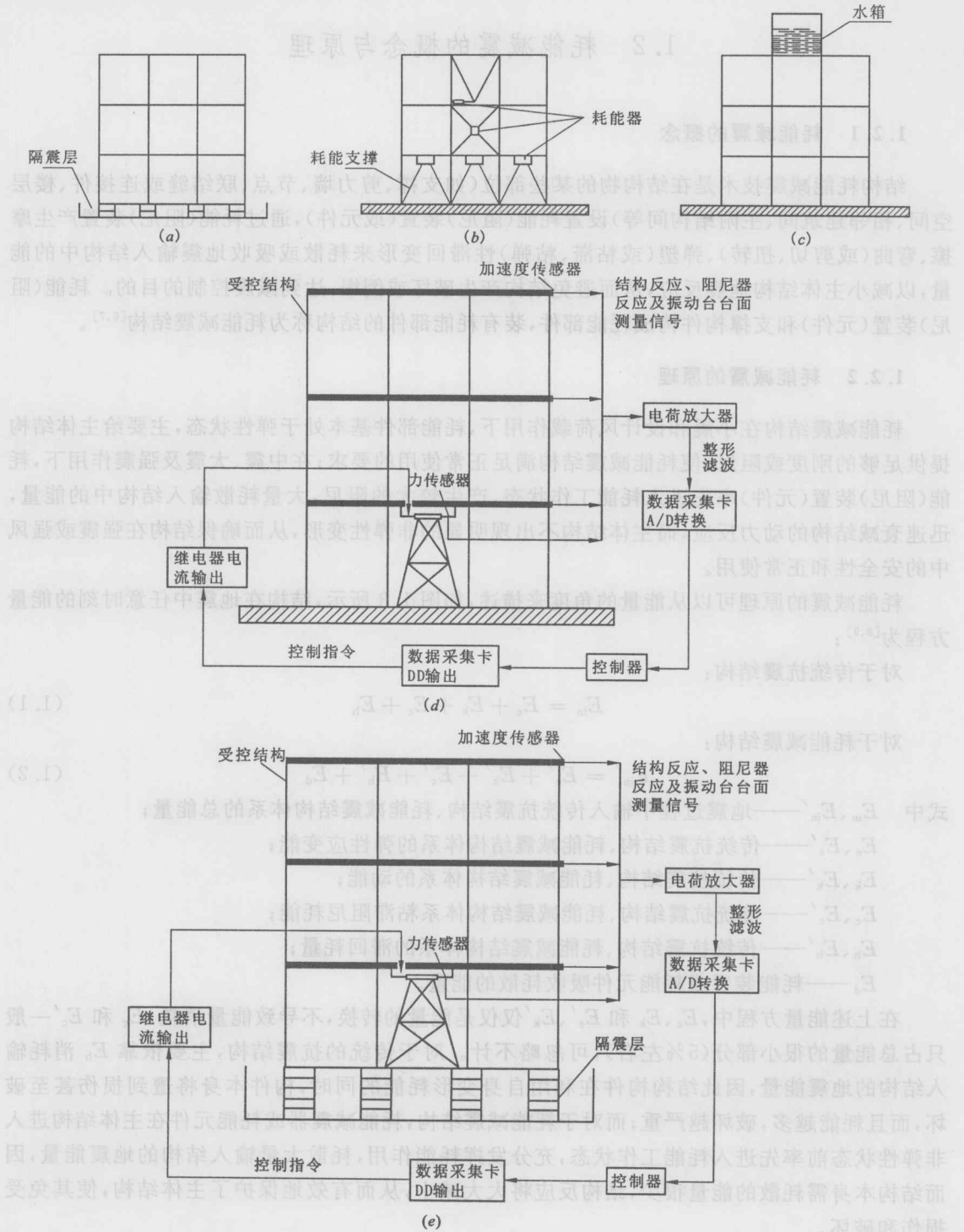


图 1.2 结构控制示意图

(a) 隔震结构示意图; (b) 耗能减震结构示意图; (c) 吸振减震结构示意图;

(d) 主动、半主动控制示意图; (e) 混合控制示意图

1.2 耗能减震的概念与原理

1.2.1 耗能减震的概念

结构耗能减震技术是在结构物的某些部位(如支撑、剪力墙、节点、联结缝或连接件、楼层空间、相邻建筑间、主附结构间等)设置耗能(阻尼)装置(或元件),通过耗能(阻尼)装置产生摩擦、弯曲(或剪切、扭转)、弹塑(或粘滞、粘弹)性滞回变形来耗散或吸收地震输入结构中的能量,以减小主体结构地震反应,从而避免结构产生破坏或倒塌,达到减震控制的目的。耗能(阻尼)装置(元件)和支撑构件构成耗能部件,装有耗能部件的结构称为耗能减震结构^[6,7]。

1.2.2 耗能减震的原理

耗能减震结构在小震和设计风荷载作用下,耗能部件基本处于弹性状态,主要给主体结构提供足够的刚度或阻尼,使耗能减震结构满足正常使用的要求;在中震、大震及强震作用下,耗能(阻尼)装置(元件)率先进入耗能工作状态,产生较大的阻尼,大量耗散输入结构中的能量,迅速衰减结构的动力反应,而主体结构不出现明显的非弹性变形,从而确保结构在强震或强风中的安全性和正常使用。

耗能减震的原理可以从能量的角度来描述,如图 1.3 所示,结构在地震中任意时刻的能量方程为^[8,9]:

对于传统抗震结构:

$$E_{in} = E_e + E_k + E_c + E_h \quad (1.1)$$

对于耗能减震结构:

$$E_{in}' = E_e' + E_k' + E_c' + E_h' + E_d \quad (1.2)$$

式中 E_{in} 、 E_{in}' ——地震过程中输入传统抗震结构、耗能减震结构体系的总能量;

E_e 、 E_e' ——传统抗震结构、耗能减震结构体系的弹性应变能;

E_k 、 E_k' ——传统抗震结构、耗能减震结构体系的动能;

E_c 、 E_c' ——传统抗震结构、耗能减震结构体系粘滞阻尼耗能;

E_h 、 E_h' ——传统抗震结构、耗能减震结构体系的滞回耗量;

E_d ——耗能装置或耗能元件吸收耗散的能量。

在上述能量方程中, E_e 、 E_k 和 E_e' 、 E_k' 仅仅是能量的转换,不导致能量消耗, E_c 和 E_c' 一般只占总能量的很小部分(5%左右),可忽略不计。对于传统的抗震结构,主要依靠 E_h 消耗输入结构的地震能量,因此结构构件在利用自身变形耗能的同时,构件本身将遭到损伤甚至破坏,而且耗能越多,破坏越严重;而对于耗能减震结构,耗能减震器或耗能元件在主体结构进入非弹性状态前率先进入耗能工作状态,充分发挥耗能作用,耗散大量输入结构的地震能量,因而结构本身需耗散的能量很少,结构反应将大大减小,从而有效地保护了主体结构,使其免受损伤和破坏。

一般来说,结构损伤与结构的最大变形 Δ_{max} 和滞回耗能(或累积塑性变形) E_h 成正比,可以表达为^[10~12]:

$$D_s = f(\Delta_{max}, E_h) \quad (1.3)$$

在耗能减震结构中,由于最大变形 $\Delta_{\max}'$ 和构件的滞回耗能 E_h' 比传统抗震结构的最大变形 $\Delta_{\max}$ 和滞回耗能 E_h 大大减小,因此结构的损伤也大大减少。

耗能减震结构具有减震机理明确、减震效果显著、安全可靠、经济合理、技术先进、适用范围广等特点。目前,已成功用于工程结构的减震控制。

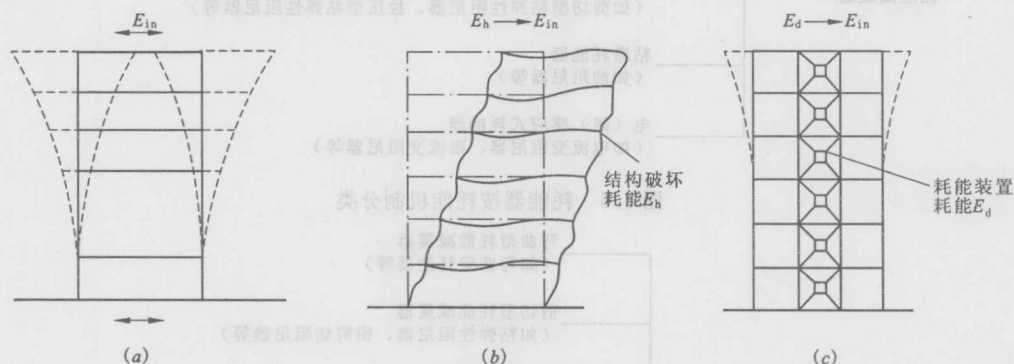


图 1.3 结构能量转换途径对比

(a)地震输入;(b)传统抗震结构;(c)耗能减震结构

1.2.3 耗能减震装置的类型

耗能减震装置可以用不同的材料、不同的耗能机制、不同的构造来制造。目前,研究开发的耗能减震装置种类很多,从耗能减震装置与位移和速度的相关性来分,可以分为位移相关型和速度相关型及位移-速度相关型(复合型)耗能器,如图 1.4 所示;从耗能器制造所用的材料可以分为金属耗能器、粘弹性耗能器、粘滞耗能器和智能材料耗能器,如图 1.5 所示;从耗能器的耗能机制可以分为摩擦耗能器、弹塑性耗能器、粘弹性耗能器、粘滞耗能器和电(磁)感应式耗能器,如图 1.6 所示;从受力的形式上可以分为弯曲型、剪切型、扭转型、弯剪型和挤压型耗能器,如图 1.7 所示。

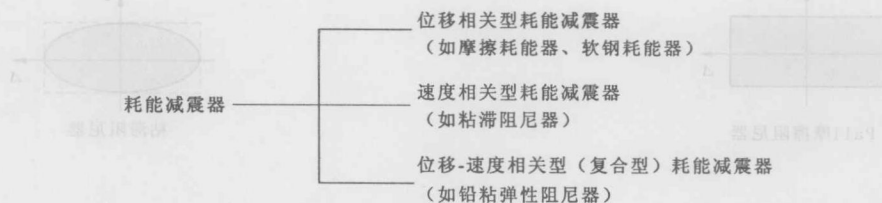


图 1.4 耗能器按速度与位移的相关性分类

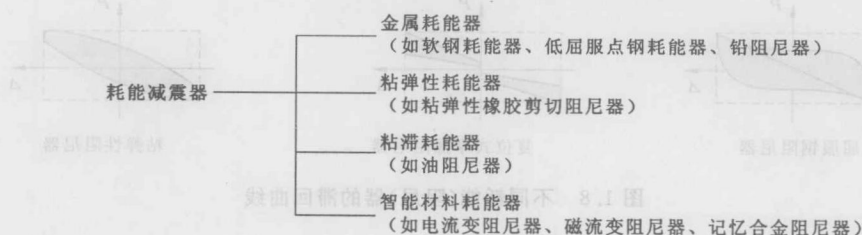


图 1.5 耗能器按耗能材料分类

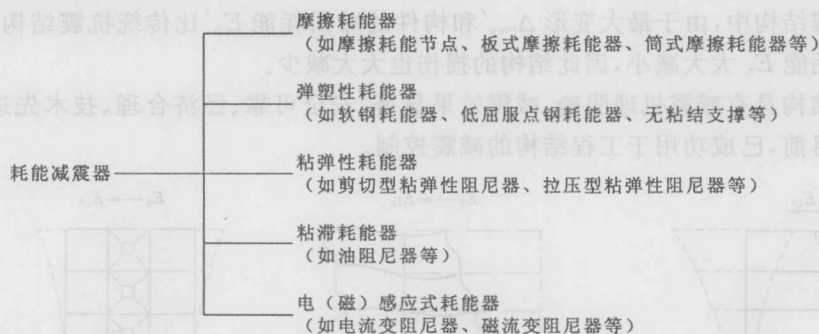


图 1.6 耗能器按耗能机制分类

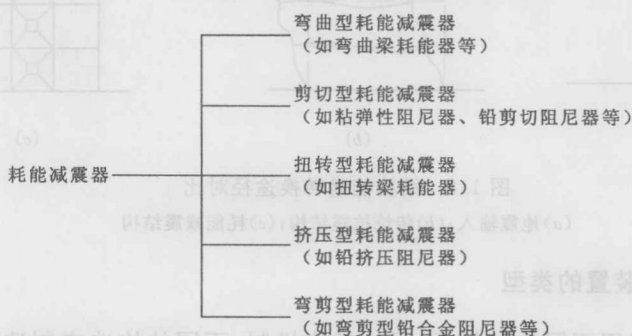


图 1.7 耗能器按受力形式分类

耗能(阻尼)器可以增加结构阻尼和刚度,减小结构在地震作用下的动力反应。图 1.8 所示为不同耗能(阻尼)器的滞回曲线图^[13]。结构在地震时会产生一定的变形,如果将这种变形的建筑比作一个驼背的人,则耗能(阻尼)器就好像是扶杖,它可以增加刚度和阻尼,使得结构不至于倒塌。

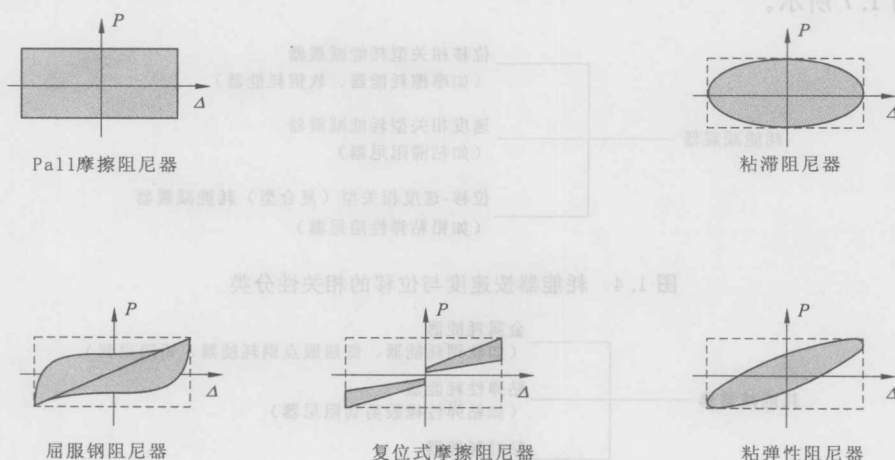


图 1.8 不同耗能(阻尼)器的滞回曲线

1.2.4 耗能减震装置设计的新思想

针对以往耗能(阻尼)器的不足,作者提出了以下设计耗能(阻尼)器的思想^[14,15]:

- (1)在同一种耗能机制下,可利用多个耗能元件协同工作、共同耗能;
- (2)在同一种耗能(阻尼)减震器中,综合利用不同的耗能机制共同耗能,即耗能(阻尼)减震器同时利用两种或两种以上的耗能方式耗能;
- (3)耗能(阻尼)减震器应具有多道耗能减震防线(或多级耗能元件);
- (4)具有良好的变形跟踪能量,其承载能量和耗能能力具有随变形增大变化的自适应能力;
- (5)具有位移放大功能,能提高耗能器的耗能效果,大大减小结构地震反应。

依据上面提出的思想,作者研究开发了多种类型的耗能(阻尼)减震器^[7,14~16],见表 1.1。

表 1.1 作者研究开发的耗能(阻尼)减震器

类 型	名 称	耗能原理	研制日期
金属类耗能器	双环耗能器	软钢滞回耗能	1993
	加劲圆环耗能器		
	超塑性合金筒耗能器	合金弹塑性滞回耗能	1998
摩擦耗能器	双摩擦耗能器	摩擦耗能	1994
粘(弹)性阻尼器	新型粘(弹)性耗能器	粘弹性材料剪切滞回耗能	1994
	高效流体耗能器	阻尼	
复合类耗能(阻尼)器	弹塑性滞回-摩擦复合耗能器	软钢圆环滞回耗能与摩擦耗能	1994
	铅-粘弹性复合耗能器	铅往复挤压耗能与粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	弹塑性滞回-粘弹性复合耗能器	软钢滞回耗能和粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	摩擦-粘弹性复合耗能器	摩擦耗能器和粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	粘性流体-粘弹性复合耗能器	流体阻尼和粘弹性材料剪切滞回耗能	1996
	钢管铅芯耗能器	钢、铅弯剪弹塑性变形	1998
	铅粘弹性阻尼筒耗能器	铅粘弹性剪切与挤压滞回耗能	1998

1.3 摩擦耗能减震的概念与原理

1.3.1 摩擦学基本原理

摩擦是指两个接触表面相互作用引起的滑动摩擦阻力和能量损耗,其实质是将机械运动转化为分子运动,将机械能转化为热能,并遵守能量守恒定律。例如汽车刹车时,通过刹车片所提供的摩擦力来制止车辆的惯性作用,使其停止继续向前运动。

经典的物体滑动摩擦理论是通过实验方法建立的,以物体平面直线滑动的物理试验为基

础,经典的库仑(Coulomb)摩擦理论对物体干摩擦理论提出了以下假设^[17]:

- (1)总摩擦力大小与接触面面积无关;
- (2)总摩擦力大小与作用在接触面上法向力的大小成正比;
- (3)若两接触体相对滑动速度较小,则总摩擦力的大小与速度无关。

由上述假设可得出物体在即将滑动之际或是在滑动过程中,摩擦力的大小可由下式确定:

$$F = \mu N \quad (1.4)$$

式中 F ——摩擦力,方向沿接触面切向且与运动方向相反;

N ——接触面法向压力;

μ ——摩擦系数,可以分为静摩擦系数 μ_s 和动摩擦系数 μ_k ,一般情况 $\mu_s > \mu_k$ 。

由式(1.4)可知,摩擦力的大小取决于摩擦系数和法向压力的大小。摩擦系数与所对应的物体接触面材料有关,而法向力的大小一般可以通过控制(如调节螺栓紧固力的大小)来实现。摩擦力可分为静摩擦力和动摩擦力,使物体间开始滑动所需要的切向力为静摩擦力;维持物体滑动继续进行所需要的切向力则为动摩擦力,通常工程材料的动摩擦力小于静摩擦力。

在物体产生滑动之前,存在一个预位移,即在施加的外力使静止的物体开始滑动过程中,当切向力小于静摩擦力的极限值时,物体产生一极小的预位移而达到新的静止位移。预位移的大小随切向力而增大,物体开始作稳定滑动时的最大预位移称为极限位移,当达到极限位移后,摩擦系数将不再增加,对应极限位移的切向力就是静摩擦力。

图 1.9 列出了几种金属材料的预位移曲线^[18],由图可知:仅在开始阶段预位移才与切向力成正比,随着预位移趋近于极限位移,预位移增长速度不断加大,当达到极限位移后,摩擦系数将不再增加。

预位移问题对于机械零件设计十分重要。过盈配合和铆钉等连接零件是在预位移状态下工作的。各种摩擦传动以及车轮与轨道之间的牵引力都是基于相互紧压表面在产生预位移条件下的摩擦力作用。另外,预位移状态下的摩擦力对制动装置的可靠性具有重要的意义。

库仑摩擦理论实际上更多的是从宏观上描述物体的摩擦特性,只能用于工程近似计算,它也存在着一一定的局限性,特别是对于某一给定的材料,假设其摩擦系数为某一常数,实际上摩擦系数除了与接触面材料有关外,还受静止接触时间、荷载情况及滑动速度与温度等因素的影响,其影响规律详见 2.2 节。

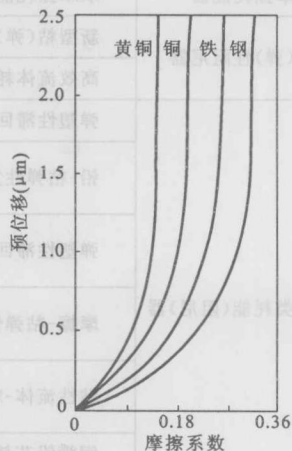


图 1.9 预位移曲线

1.3.2 摩擦耗能减震的概念与基本原理

早在一两千年前,人类便已开始利用摩擦原理对结构进行减震控制,许多保存至今的国内外古建筑物就是很好的实例。根据在结构中的应用方式,摩擦耗能主要分为以下两种方式^[4,19]:

(1) 摩擦耗能隔震结构

在建筑物上部结构和下部基础之间采用石墨、云母片、砂粒层之类的材料作为摩擦耗能隔震层,当地震发生时通过隔震层的摩擦耗能来减少输入上部结构的地震能量,减小结构地震反

应以保护结构的安全。

某些古代建筑物便在墙脚与墙基顶面之间设灰沙膏、糯米灰膏或片石之类的材料,在地震过程中,通过上部结构与基础之间的滑动摩擦来消耗地震能量,如图 1.10 所示。1909 年,英国医生 Calantarients 还申请过一项专利——利用云母、滑石作为隔震层,如图 1.11 所示。20 世纪 70 年代末期,我国冶金建筑科学研究所的李立教授设计并建成一栋四层砖混结构基础隔震房屋,采用砂粒垫层作为摩擦滑动隔震层。

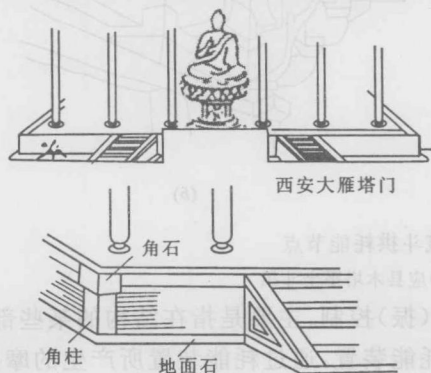


图 1.10 中国古基底摩擦隔震结构

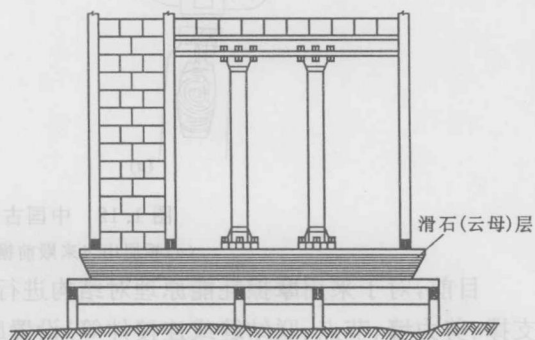


图 1.11 英国人 Calantarients 的隔震构造图

摩擦耗能隔震结构不但建造简单、造价便宜,而且其最大的优点是没有明确的周期,因此对于不同周期特性的地震作用都能起到一定的隔离作用,但是,摩擦耗能隔震层也存在一定的不足,具体如下:

- ①动摩擦系数不易掌握,另外由于老化、侵蚀或磨碎等原因还将引起摩擦系数的改变;
- ②摩擦面太大,不易做到受力均匀;
- ③没有自复位功能,上部结构可能会产生过大的滑动位移,震后复位困难。

鉴于上述缺点,单纯靠采用摩擦耗能隔震层来对结构进行耗能减震控制,其控制效果便显得不是很突出,也缺乏工程实用性及适应性,因此,目前采用较多的是复合摩擦耗能隔震装置,即在隔震层中,通过附加复位装置或限位装置以防止上部结构产生过大的滑动位移。

(2) 摩擦耗能支撑结构

在结构中安装带有摩擦耗能器的支撑构件,利用摩擦耗能器的摩擦来耗能,并通过耗能支撑与结构的相互作用来减小结构动力反应,以保证结构的安全性和适应性。

古代木结构中,通常将梁柱节点及屋檐节点处做成柔性“斗拱”节点(图 1.12),通过“斗拱”节点的摩擦及塑性变形来消耗地震能量,以达到保护结构的目的,这与目前各种摩擦耗能支撑有异曲同工的效果。近 30 年来,随着结构振动控制技术和理论的形成及不断发展,各国工程技术研究人员开发设计了多种摩擦耗能装置,如各种摩擦耗能节点、板式摩擦耗能器(如 Pall 摩擦耗能器)、筒式摩擦耗能器及复合型摩擦耗能器等等,并将其推广应用于实际建设工程及加固改造工程中。

一般来说,摩擦耗能装置可以采用不同的机械组合方式和不同的摩擦介质,但其基本机理都是一致的:通过滑动摩擦做功来耗散输入结构的能量。对于摩擦耗能隔震结构,由于摩擦耗能隔震层自身存在一定的不足,使其不能广泛应用于实际工程中,取而代之的更多是采用技术更为成熟的叠层橡胶隔震支座。