

粘滞阻尼减震结构设计 理论及应用

周 云 著



WUTP

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

014035647

TU352.104
64

粘滞阻尼减震结构设计 理论及应用

周 云 著



武汉理工大学出版社
· 武汉 ·

TU352.104
64



北航

C1723054

内容简介

本书系统地总结和阐述了粘滞阻尼减震的理论、方法、技术和工程应用的主要研究成果。主要内容包括粘滞阻尼减震结构的概念与原理、粘滞流体的类型与特性、粘滞阻尼器的类型和性能、粘滞阻尼器的恢复力模型、粘滞阻尼减震结构的特性、分析方法、设计方法和分析软件以及粘滞阻尼器的工程应用等。

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、机械工程、航空航天工程研究、设计、制造和施工的工程技术人员参考,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

粘滞阻尼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 978-7-5629-4134-7

I. ①粘…

II. ①周…

III. ①粘性阻尼-建筑结构-防震设计 ②滞后阻尼-建筑结构-防震设计

IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 190973 号

项目负责: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:18.5

字 数:470 千字

版 次:2013 年 8 月第 1 版

印 次:2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价:53.00 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,自从人类诞生以来人们就为抗拒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,并成为比较成熟的技术,结构减震(振)控制方法改变了通过提高结构刚度、强度和延性来提高结构的抗震抗风能力的传统方法,而是通过调整或改变结构动力特性的途径,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粘滞阻尼减震的理论、方法和技术及工程应用的主要研究成果。全书共9章。第1章为粘滞阻尼减震结构的概念与原理,第2章为粘滞流体的类型与特性,第3章为粘滞阻尼器的类型与性能,第4章为粘滞阻尼器的恢复力模型,第5章为粘滞阻尼减震结构的性能试验研究,第6章为粘滞阻尼减震结构的分析方法,第7章为粘滞阻尼减震结构的设计方法,第8章为粘滞阻尼减震技术的应用,第9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、工程技术人员主动提供了有关资料和工程照片,特在此表示衷心的感谢。作者的研究生汪大洋、冷加冰、汤统壁、丁鲲、聂一恒、吴从晓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

目 录

1 粘滞阻尼减震结构的概念与原理	(1)
1.1 结构减震控制的概念、原理与分类	(1)
1.1.1 结构减震控制的基本概念	(1)
1.1.2 结构减震控制的分类	(1)
1.2 耗能减震的概念、原理与分类	(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	(6)
1.2.4 耗能减震装置设计的新思想	(7)
1.2.5 耗能减震结构的优越性及应用范围	(8)
1.3 粘滞阻尼减震的原理	(9)
1.3.1 粘滞材料的耗能机理	(9)
1.3.2 粘滞阻尼减震的基本原理	(9)
1.4 粘滞阻尼器的发展概况及应用范围	(12)
参考文献	(13)
2 粘滞流体的类型与特性	(15)
2.1 粘滞流体的类型与特征	(15)
2.1.1 牛顿流体与非牛顿流体	(15)
2.1.2 非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体	(16)
2.2 液压油的特性	(17)
2.2.1 一般特性与凝固点	(17)
2.2.2 粘温性	(18)
2.2.3 压缩性	(18)
2.3 有机硅油的特性	(18)
2.3.1 粘度特性	(19)
2.3.2 粘温性	(20)
2.3.3 压缩性	(21)
2.4 改性高分子材料(硅基胶)的特性	(22)
2.4.1 粘度特性	(22)
2.4.2 粘温性	(22)
2.4.3 压缩性能	(22)
参考文献	(24)
3 粘滞阻尼器的类型与性能	(25)
3.1 粘滞阻尼器的类型	(25)

3.2 缸式粘滞阻尼器的性能	(27)
3.2.1 双出杆式粘滞阻尼器的构造与原理	(28)
3.2.2 双出杆式粘滞阻尼器的性能研究	(29)
3.2.3 单出杆式粘滞阻尼器的构造与原理	(48)
3.2.4 单出杆式粘滞阻尼器的性能研究	(52)
3.3 粘滞阻尼墙的性能	(65)
3.3.1 粘滞阻尼墙的构造与原理	(65)
3.3.2 粘滞阻尼墙的性能试验研究	(66)
3.3.3 粘滞阻尼墙的动力性能研究	(69)
3.3.4 粘滞阻尼墙的旋转性能研究	(73)
3.4 圆筒式粘滞阻尼器的性能	(75)
3.4.1 圆筒式粘滞阻尼器结构构造与原理	(75)
3.4.2 圆筒式粘滞阻尼器的性能研究	(76)
3.5 粘胶阻尼器的性能	(80)
3.6 人造橡胶弹簧阻尼器的性能	(82)
3.7 粘滞阻尼器的质量要求	(83)
参考文献	(84)
4 粘滞阻尼器的恢复力模型	(87)
4.1 线性模型	(87)
4.2 Kelvin 模型	(87)
4.3 Maxwell 模型	(88)
4.4 Wiechert 模型	(89)
4.5 分数导数模型	(91)
4.6 忽略介质压缩性的缸式粘滞阻尼器恢复力模型	(94)
4.6.1 粘滞阻尼器的耗能原理	(94)
4.6.2 孔隙式粘滞阻尼器的恢复力模型	(95)
4.6.3 间隙式粘滞阻尼器恢复力模型	(100)
4.7 考虑介质压缩性的粘滞阻尼器模型	(102)
4.7.1 考虑液体压缩性的理论模型	(102)
4.7.2 考虑流体压缩性的粘滞阻尼器的恢复力	(103)
4.7.3 考虑动态刚度的粘滞阻尼器的阻尼简化理论	(103)
4.8 粘滞阻尼器的等效线性化	(104)
4.8.1 等效线性阻尼理论公式	(104)
4.8.2 粘滞阻尼器的等效阻尼比	(105)
4.8.3 考虑动态刚度的等效线性化阻尼模型	(107)
4.9 粘滞阻尼器的耗能性能评价体系	(108)
4.9.1 耗能性能评价指标概念和模型	(108)
4.9.2 粘滞阻尼器的耗能性能评价分析	(109)
4.9.3 粘滞阻尼器耗能能力的验证	(110)

参考文献	(112)
5 粘滞阻尼减震结构的性能试验研究	(113)
5.1 设置缸式粘滞阻尼器结构性能试验研究	(113)
5.1.1 1/4 比例的三层钢框架模型	(113)
5.1.2 1/3 比例的三层钢筋混凝土框架模型	(118)
5.1.3 方钢管钢筋混凝土框架模型	(127)
5.1.4 三层钢框架缩尺模型	(130)
5.2 设置粘滞阻尼墙结构性能试验研究	(135)
5.2.1 1/3 比例的三层钢筋混凝土框架模型	(135)
5.2.2 1/10 比例的四层钢筋混凝土框架模型	(136)
5.2.3 1/2 比例的三层钢筋混凝土框架模型	(139)
5.3 考虑支撑影响的粘滞阻尼结构的性能试验研究	(148)
参考文献	(150)
6 粘滞阻尼减震结构的分析方法	(152)
6.1 结构体系的分析模型	(152)
6.1.1 传统抗震结构的分析模型	(152)
6.1.2 耗能减震结构的分析模型	(156)
6.2 弹性状态下减震结构的分析方法	(156)
6.2.1 振型分解法	(156)
6.2.2 复模态分析法	(165)
6.2.3 考虑扭转耦联的振型分解法	(167)
6.3 弹塑性状态下减震结构的分析方法	(171)
6.3.1 时程分析法	(171)
6.3.2 静力非线性分析法	(182)
6.3.3 耦联阻尼减震结构弹塑性地震反应分析	(194)
6.4 粘滞阻尼减震结构的能量分析法	(199)
6.4.1 能量分析法的概念和原理	(199)
6.4.2 能量反应方程的建立	(199)
6.4.3 能量反应分析的研究	(202)
参考文献	(204)
7 粘滞阻尼减震结构的设计方法	(208)
7.1 耗能减震结构的概念设计	(208)
7.1.1 耗能减震结构概念设计的基本思路	(208)
7.1.2 耗能减震结构的适用范围和设防目标	(208)
7.1.3 耗能减震结构设计的基本要求和性能标准	(209)
7.1.4 耗能器的选择、数量确定及布置原则	(210)
7.2 常遇地震作用下耗能减震结构的设计验算	(213)
7.3 罕遇地震作用下耗能减震结构的位移验算	(216)
7.4 复模态设计法	(220)

7.5 能量设计法	(224)
7.5.1 基于能量和变形的破坏准则	(224)
7.5.2 减震结构的能量设计方法	(224)
7.6 减震结构的优化设计	(225)
7.6.1 粘滞阻尼器的参数优化	(226)
7.6.2 粘滞阻尼器的数量及布置优化	(226)
7.7 耗能部件的连接与构造	(227)
7.8 设计实例	(228)
7.8.1 台北某钢结构设计	(228)
7.8.2 洛杉矶某混凝土结构加固设计	(232)
参考文献	(235)
8 粘滞阻尼减震技术的应用	(237)
8.1 粘滞阻尼器在民用建筑中的应用	(237)
8.1.1 工程应用概况	(237)
8.1.2 工程应用举例	(237)
8.2 粘滞阻尼器在桥梁中的应用	(251)
8.2.1 工程应用概况	(251)
8.2.2 工程应用举例	(251)
参考文献	(259)
9 耗能减震结构分析软件简介	(260)
9.1 耗能减震结构分析软件概述	(260)
9.2 ETABS	(260)
9.2.1 ETABS 概述	(260)
9.2.2 耗能减震单元在 ETABS 中的实现	(261)
9.3 SAP2000	(264)
9.3.1 SAP2000 概述	(264)
9.3.2 耗能减震单元在 SAP2000 中的实现	(265)
9.4 MIDAS	(268)
9.4.1 MIDAS 概述	(268)
9.4.2 耗能减震单元在 MIDAS 中的实现	(268)
9.5 ANSYS	(273)
9.5.1 ANSYS 概述	(273)
9.5.2 耗能减震单元在 ANSYS 中的实现	(273)
参考文献	(275)
附录 A Taylor 公司液体粘滞阻尼器在建筑工程中的应用	(277)
附录 B Taylor 公司液体粘滞阻尼器在桥梁工程中的应用	(284)
附录 C 粘滞阻尼墙的部分工程应用(日本)	(287)
附录 D 英制与国际单位转换表	(288)

1 粘滞阻尼减震结构的概念与原理

1.1 结构减震控制的概念、原理与分类

1.1.1 结构减震控制的基本概念

结构减震控制就是通过在结构上安装耗能减震装置减轻或抑制结构由于外荷载作用引起的反应,该技术最初应用于机械、宇航、船舶等工业领域。1972年,美籍华裔学者姚治平(Yao J. T. P.)首次将结构控制技术引入土木工程。随后,结构振动控制技术在建筑工程中得到迅猛发展,目前已成为一个十分活跃的研究领域,且近30年的理论和实践研究表明:结构振动控制可以有效减轻结构在风或地震作用下所引起的反应和损伤,有效提高结构的抗震抗风能力和防灾的性能。

传统结构抗震方法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。由于地震的随机性,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功能。因此,结构很可能在风荷载或地震作用下不满足安全性能要求,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抗震装置(系统),由抗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,以调节和减轻结构的地震作用反应。这是积极主动的抗震对策,也是目前抗震对策中的重大突破和发展方向^[1-4]。

1.1.2 结构减震控制的分类

结构减震控制根据是否需要外部能量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所示)。

被动控制(Passive Control)——指在结构的某些部位附加耗能装置或子结构系统,或对结构自身的某些构件作构造上的处理以改变结构体系的动力特性。被动控制不需要外部能量输入提供控制力,控制过程不依赖于结构反应和外界干扰信息。而且因其具有构造简单、造价低、易于维护及无需外部能源支持等诸多优点,所以引起工程界的广泛关注,成为目前应用开发的热点,因而许多被动控制技术日趋成熟,并在实际工程中应用。目前常用的被动控制系统有:基础隔震、耗能减震和吸震减震,如图1.2(a)、(b)、(c)所示。

主动控制(Active Control)——指应用现代控制技术,对输入的外部激励和结构反应实现联机实时监测,再按分析计算结果应用伺服加力装置对结构施加控制力,实现自动调节,使结构在地震和其它动力作用下的响应控制在允许的范围内,以达到保护结构和设备免遭损伤的目的。主动控制需要外部能量输入提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息。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,其工作原理为:利用传感器检测

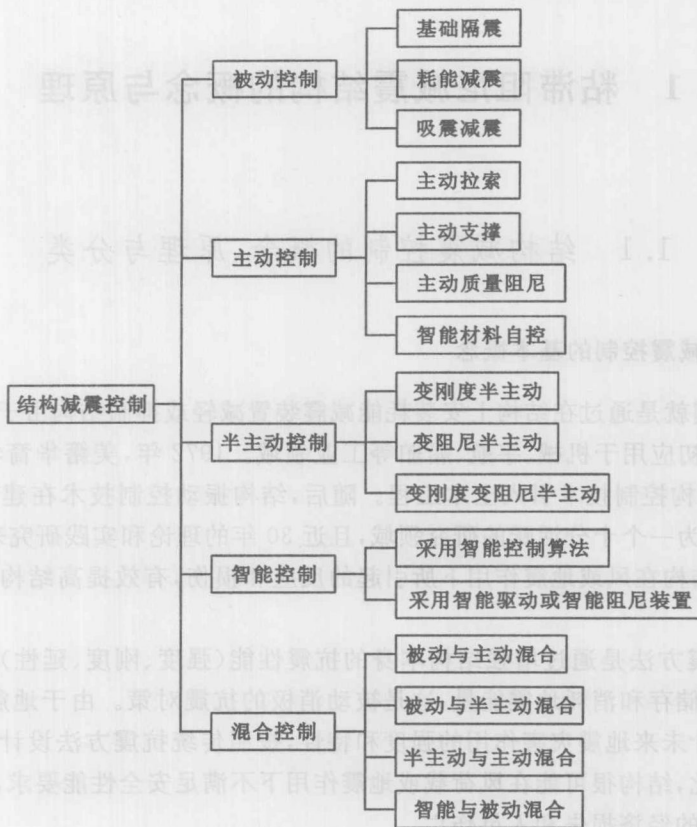


图 1.1 结构减震控制分类

结构的动力响应和外部激励,将监测的信息送入计算机内,计算机依据给定的算法计算应施加的控制力大小,最后由外部能源驱动提供所需的控制力。如果传感器仅测量结构响应的信号,称控制系统为开环控制;如果传感器仅测量外部激励的信号,称控制系统为闭环控制;如果传感器同时测量结构响应和外部激励的信号,则称控制系统为开-闭环控制,如图 1.3 所示。主动控制是将现代控制理论和自动控制技术相结合应用于结构控制的高新技术,如图 1.2(d)所示。目前研究中常用的主动控制系统有:主动质量阻尼器、主动拉索系统、主动支撑系统、主动空气动力挡风板系统和主动气体脉冲发生器控制系统等。

主动控制技术具有很广泛的应用范围,控制效果好,已进行了大量的理论研究,并在少数试点工程中应用。但因控制系统结构复杂,造价昂贵,所需的巨大能量在强烈地震作用下难以实现,因此在实际工程应用上遇到较大困难。

半主动控制(Semi-Active Control)——以被动控制为基础,利用控制机构来主动调节系统内部的参数,对被动控制系统的工作状态进行切换,使结构控制处于最优状态。半主动控制仅需要少量外部能量输入提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法,如图 1.2(d)所示。与主动控制相比,半主动控制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,且通过一定的控制律可以达到主动控制系统的控制效果,因此半主动控制具有很好的工程应用潜力。半主动控制往往采用开关控制或称“0-1”控制,通过开关改变控制器的工作状态。目前,典型的半主动控制装置有:可变刚度系统、可变阻尼系统、主动调谐参

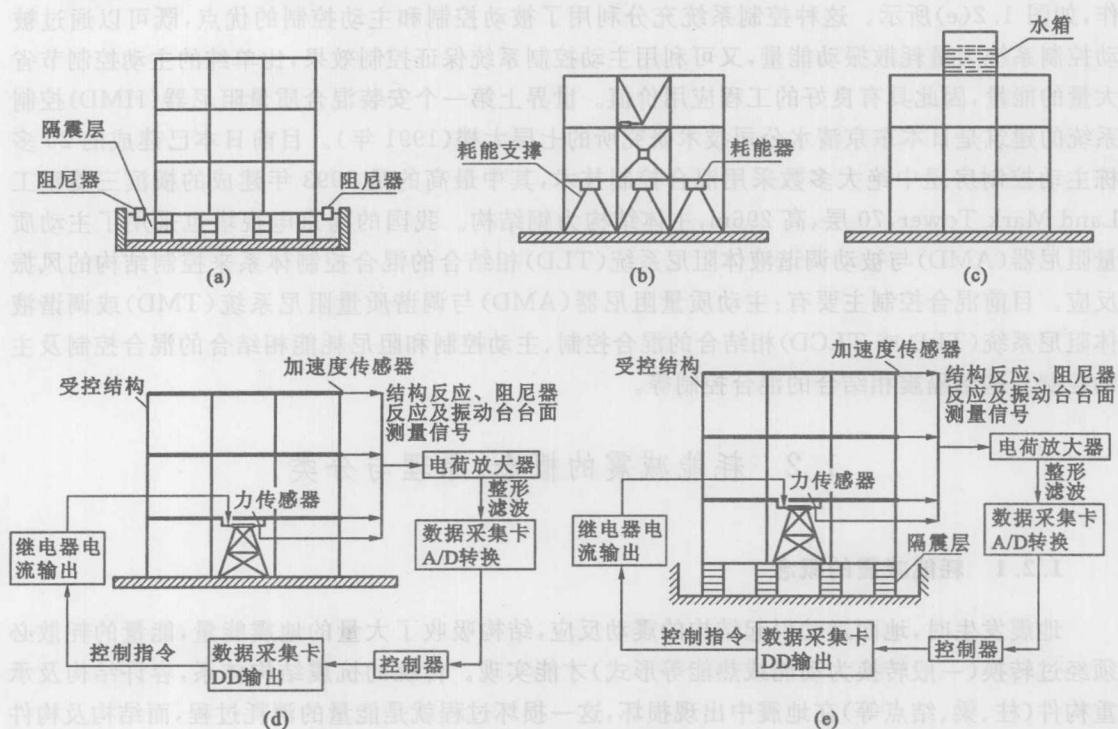


图 1.2 结构控制示意图

(a) 基础隔震结构示意图; (b) 耗能减震结构示意图; (c) 吸震减震结构示意图;

(d) 主动、半主动控制示意图; (e) 混合控制示意图

数质量阻尼系统及可控摩擦式隔震系统等。

智能控制(Intelligent Control)——结构振动的智能控制是国际振动控制研究的前沿领域。由智能材料制成的智能可调阻尼器和智能材料驱动器构造简单、调节驱动容易、耗能小、反应迅速、几乎无时滞,在结构主动控制、半主动控制和被动控制中具有广泛的应用前景。智能控制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。适于土木工程智能控制的智能材料有:电流变液(ER)、磁流变液(MR)、压电材料(PZ)、形状记忆合金(SMA)和磁致伸缩材料等。此外,智能控制采用智能控制算法,与主动控制的区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)并且控制力也不需要很大外部能量作用下的作动器来实现。目前国内外在结构智能控制方面的研究主要集中在智能阻尼器或驱动器的性能,以及对建筑结构模型试验的研究上,今后尚需在其实用技术方面加强研究。

混合控制(Hybrid Control)——主动控制和被动控制的联合应用,使其协调起来共同工

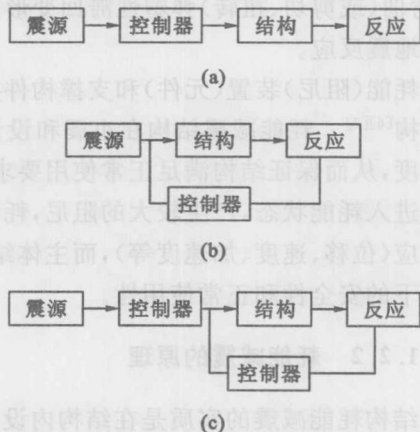


图 1.3 主动控制形式或类型

(a) 开环控制; (b) 闭环控制; (c) 开-闭环控制

作,如图 1.2(e)所示。这种控制系统充分利用了被动控制和主动控制的优点,既可以通过被动控制系统大量耗散振动能量,又可利用主动控制系统保证控制效果,比单纯的主动控制节省大量的能量,因此具有良好的工程应用价值。世界上第一个安装混合质量阻尼器(HMD)控制系统的建筑是日本东京清水公司技术研究所的七层大楼(1991 年)。目前日本已建成的 20 多栋主动控制房屋中绝大多数采用混合控制技术,其中最高的是 1993 年建成的横滨三菱重工 Land Mark Tower,70 层,高 296m,主体结构为钢结构。我国的南京电视塔也采用了主动质量阻尼器(AMD)与被动调谐液体阻尼系统(TLD)相结合的混合控制体系来控制结构的风振反应。目前混合控制主要有:主动质量阻尼器(AMD)与调谐质量阻尼系统(TMD)或调谐液体阻尼系统(TLD 或 TLCD)相结合的混合控制、主动控制和阻尼耗能相结合的混合控制及主动控制与基础隔震相结合的混合控制等。

1.2 耗能减震的概念、原理与分类

1.2.1 耗能减震的概念

地震发生时,地面运动引起结构的震动反应,结构吸收了大量的地震能量,能量的耗散必须经过转换(一般转换为动能或热能等形式)才能实现。传统的抗震结构体系,容许结构及承重构件(柱、梁、结点等)在地震中出现损坏,这一损坏过程就是能量的消耗过程,而结构及构件的严重损坏或倒塌,就是地震能量转换或消耗的最终完成。

结构耗能减震技术是在结构物的某些部位(如支撑、剪力墙、结点、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,以减小主体结构的地震反应。

耗能(阻尼)装置(元件)和支撑构件共同构成耗能部件,装有耗能部件的结构称为耗能减震结构^{[6][7]}。耗能减震结构在小震和设计风荷载作用下处于弹性状态,向主体结构提供足够的刚度,从而保证结构满足正常使用要求;在中震、大震及强震作用下,耗能(阻尼)装置(元件)率先进入耗能状态,产生较大的阻尼,耗散地震输入结构的大部分能量,并迅速衰减结构的动力反应(位移、速度、加速度等),而主体结构不出现明显弹塑性变形,从而确保其在强震或强风作用下的安全性和正常使用性。

1.2.2 耗能减震的原理

结构耗能减震的实质是在结构内设置耗能构件(或耗能装置),它们能为结构提供较大的耗能机制,地震时大量消耗输入结构的震动能量,有效衰减结构的地震反应。

对于位移相关型的摩擦耗能构件、钢件非弹性变形耗能和材料塑性滞回变形耗能,主要是通过附加耗能构件的滞回耗能来消耗地震输入能量,减轻地震作用。对于速度相关型的材料粘弹性耗能和液体阻尼耗能,耗能构件作用于结构上的阻尼力总是与结构速度方向相反,从而使结构在运动过程中消耗能量,达到耗能减震的目的。

对于混合式耗能构件,主要是综合上述二者的原理,同时利用刚度改变机制和阻尼耗能机制进行耗能减震。

耗能减震的原理可以从能量的角度来描述,如图 1.4 所示。结构在地震中任意时刻的能量方程为^{[8][9]}:

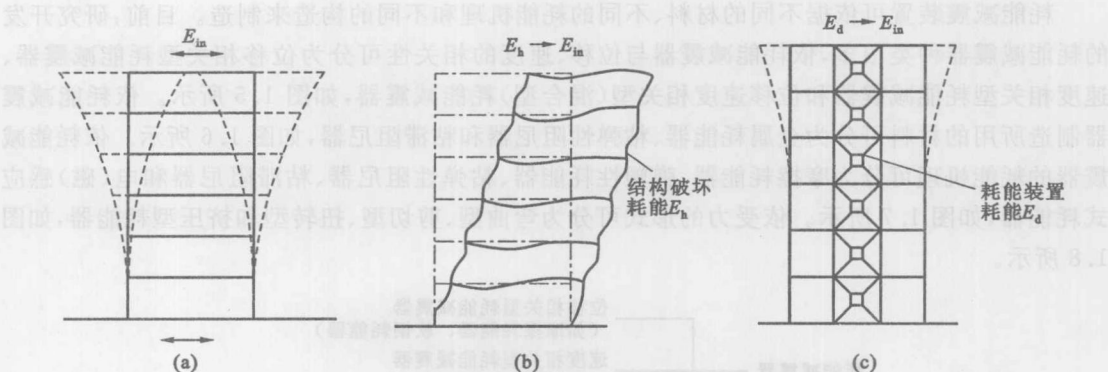


图 1.4 结构能量转换途径对比

(a) 地震输入; (b) 传统抗震结构; (c) 耗能减震结构

传统抗震结构

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

耗能减震结构

$$E'_{in} = E'_v + E'_c + E'_k + E'_h + E_d \quad (1.2)$$

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能量;

E_v 、 E'_v ——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、耗能减震结构体系的粘滞阻尼耗能;

E_k 、 E'_k ——传统抗震结构、耗能减震结构体系的弹性应变能;

E_h 、 E'_h ——传统抗震结构、耗能减震结构体系的滞回耗能;

E_d ——耗能(阻尼)装置或耗能元件耗散或吸收的能量。

在上述能量方程式(1.1)和式(1.2)中,由于 E_v 和 E'_v 、 E_k 和 E'_k 仅使能量转换而不耗散能量, E_c 和 E'_c 仅占总能量的很小部分(只占 5%左右),可忽略不计。故在传统的抗震结构中,主要依靠 E_h 耗散输入结构的地震能量,但因结构构件在利用其自身弹塑性变形耗散地震能量的同时,构件本身将遭到损伤甚至破坏,某一结构构件耗能越多,则其破坏程度越严重。而在耗能减震结构体系中,耗能(阻尼)装置或元件在主体结构进入非弹性状态前先率先进入耗能工作状态,充分发挥耗能作用,而结构本身需消耗的能量却很少,这意味着结构在地震作用下的反应将大大减小,从而有效地保护主体结构的安全性,避免或延缓其遭受损伤或破坏。

一般来说,结构的损伤程度与结构的最大变形 Δ_{max} 、滞回耗能(或累积塑性变形) E_h 成正比,可以表达为^[9-12]:

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

在耗能减震结构中,由于最大变形 Δ'_{max} 和构件的滞回耗能 E'_h 较之传统抗震结构的最大变形 Δ_{max} 和滞回耗能 E_h 大大减少,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、减震效果明显、安全可靠、经济合理、技术先进、适用范围广等特点。目前,已成功应用于实际工程结构的减震控制中。

1.2.3 耗能减震装置的类型

耗能减震装置可依据不同的材料、不同的耗能机理和不同的构造来制造。目前,研究开发的耗能减震器种类很多,依耗能减震器与位移、速度的相关性可分为位移相关型耗能减震器、速度相关型耗能减震器和位移速度相关型(混合型)耗能减震器,如图 1.5 所示。依耗能减震器制造所用的材料可分为金属耗能器、粘弹性阻尼器和粘滞阻尼器,如图 1.6 所示。依耗能减震器的耗能机理可分为摩擦耗能器、弹塑性耗能器、粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器和电(磁)感应式耗能器,如图 1.7 所示。依受力的形式可分为弯曲型、剪切型、扭转型和挤压型耗能器,如图 1.8 所示。

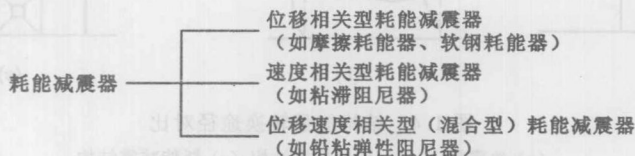


图 1.5 耗能减震器按与位移、速度的相关性分类

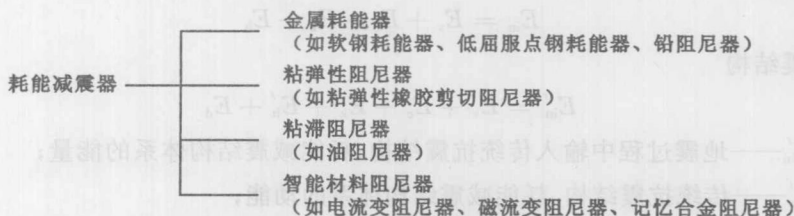


图 1.6 耗能减震器按耗能材料分类

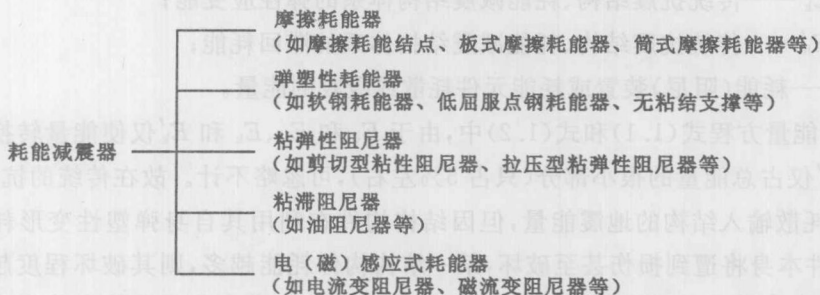


图 1.7 耗能减震器按耗能机制分类

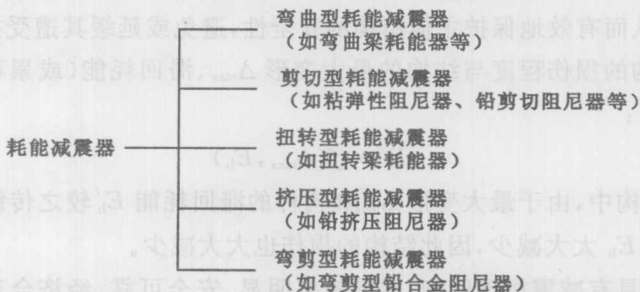


图 1.8 耗能减震器按受力形式分类

耗能减震器可以增加结构阻尼和刚度,减少地震作用所引起的结构震动响应。图 1.9 为不同阻尼器的滞回曲线图。结构在地震时会产生一定的变形,如果将变形的建筑比作一个驼背的人,阻尼器就好像是拐杖,可以增加刚度,使结构不致倒塌。

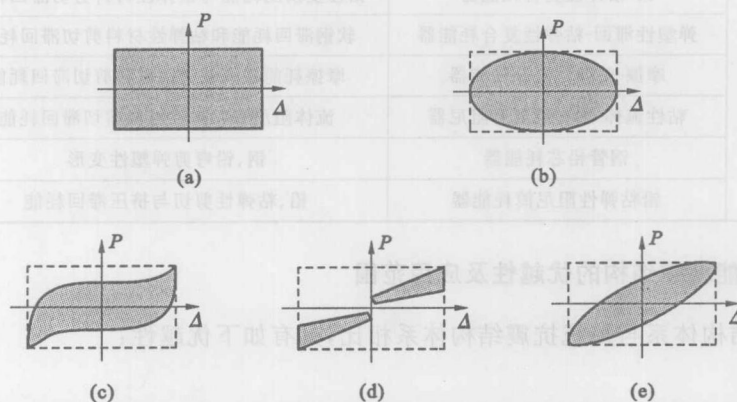


图 1.9 不同阻尼器的滞回曲线形状

(a) Pall 摩擦阻尼器; (b) 粘滞阻尼器; (c) 屈服钢阻尼器;

(d) 复位式摩擦阻尼器; (e) 粘弹性阻尼器

1.2.4 耗能减震装置设计的新思想

针对以往耗能减震器的不足,作者提出以下设计耗能减震器的思想^[13]:

- (1) 在同一种耗能机理下,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理共同耗能,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性能,其承载能力和耗能能力具有随变形增大变化的自适应能力;
- (5) 将耗能减震器设置成具有位移放大的功能,可提高耗能减震器的耗能效果,减小结构的地震反应。

依据这些思想,作者研究开发了以下多种类型耗能(阻尼)减震器^{[7][13][14]},具体见表 1.1。

表 1.1 目前已开发的耗能(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)性阻尼器	粘弹性材料剪切滞回耗能	1994
	高效流体阻尼器	阻 尼	

续表 1.1

类 型	名 称	耗 能 原 理	研制日期
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-粘弹性复合阻尼器	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

1.2.5 耗能减震结构的优越性及应用范围

耗能减震结构体系与传统抗震结构体系相比,具有如下优越性:

1) 安全性

抗震结构体系实质上是把结构本身及主要承重构件(柱、梁、结点等)作为“耗能”构件。按照传统抗震设计方法,容许结构本身及构件在地震中出现不同程度的损坏。由于地震的随机性和结构实际抗震能力设计计算的误差性,结构在地震中的损坏程度难以控制,特别是出现超烈度强震时,结构就更加难以确保安全。

耗能减震结构体系由于设有非承重耗能构件(耗能支撑、耗能剪力墙等)或耗能装置,它们具有极大的耗能能力,在强震中能率先进入塑性,消耗地震能量及衰减结构的地震反应,保护主体结构和构件免遭损坏,从而确保结构在强地震中的安全性。

国内外耗能减震结构的振动台试验表明,耗能减震结构与传统抗震结构相对比,地震反应减少 40%~60%。

此外,耗能构件(或装置)属“非结构构件”,即非承重构件,其功能仅是在结构变形过程中发挥耗能作用,对结构的承载力和安全性不构成任何影响或威胁。所以,耗能减震结构体系是一种非常安全可靠的结构减震体系。

2) 经济性

传统抗震结构体系采用“硬抗”地震的途径,通过加强结构、加大断面、加多配筋等途径提高结构抗震性能,使结构的造价明显提高。

耗能减震结构是通过“柔性消能”来减少结构地震反应,可以减少结构中剪力墙的数量、减小构件断面、减少配筋,而其抗震性能反而提高。国外工程资料表明,耗能减震结构体系与传统抗震结构体系相比,可节约结构造价 5%~10%。若用于已有建筑结构的改造加固,可节省造价 60%左右。

3) 技术合理性

传统抗震结构体系是通过加强结构侧向刚度以满足抗震要求的,但结构强度越大,刚度也就越大,地震作用(荷载)也越大。这对于高强、轻质的高层建筑、超高层建筑、大跨度结构及桥梁结构等,会造成严重的制约。

耗能减震结构则是通过设置耗能构件或装置,使结构在出现变形时迅速消耗地震能量,保护主体结构在强震中的安全。结构越高、越柔,跨度越大,耗能减震效果就越显著。

由于耗能减震结构体系具有以上优越性,且已被广泛、成功地应用于“柔性”工程结构物减震(或抗风)。一般来说,层数越多、高度越高、跨度越大、结构越柔,耗能减震效果越显著。所以广泛应用于下述结构:① 高层、超高层建筑;② 高柔结构,高耸塔架;③ 大跨度桥梁;④ 柔性管道、管线(生命线工程);⑤ 已有建筑抗震(或抗风)加固。

1.3 粘滞阻尼减震的原理

1.3.1 粘滞材料的耗能机理

理想的粘性材料的应力与应变之间存在滞后现象,相位差 $\delta = \pi/2$;而理想弹性材料的应力与应变之间不存在滞后现象,相位差 $\delta = 0$ 。因此,在正弦交变应力作用下,理想的粘性材料只能耗散能量,不能储存能量,体现材料的阻尼特性;理想的弹性材料只能储存能量,不能耗散能量,体现材料的刚度特性。然而在实际的工程应用中,理想的粘性或弹性材料是不可获得的,粘滞阻尼器中的粘滞材料也一样,它的应力与应变存在滞后现象,相位差 δ 介于 $0 \sim \pi/2$ 之间,因此既能储存能量,又能耗散能量。三种材料的滞回曲线如图 1.10 所示。

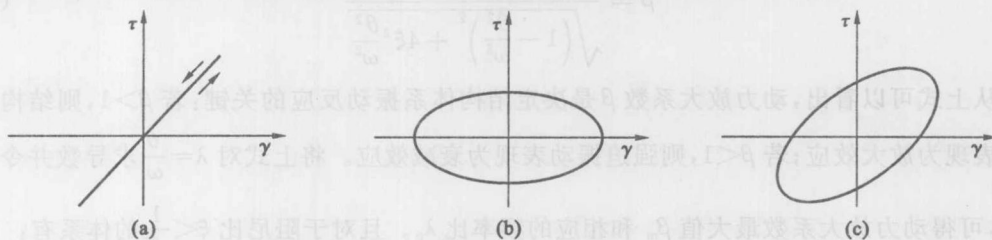


图 1.10 三种材料的 τ - γ 关系

(a) 理想弹性材料的 τ - γ 关系; (b) 理想粘性材料的 τ - γ 关系; (c) 高聚物材料的 τ - γ 关系

一般来讲,材料的耗能特性可由三种参数来描述:储能模量 G' 、耗能模量 G'' 和耗能因子 η 。参数之间的关系为:

$$\eta = \frac{G''}{G'} = \tan \delta \quad (1.4)$$

而影响储能模量、耗能模量和耗能因子的主要因素是温度、振动频率和振幅大小,在适当的温度、频率和振幅范围内,承受交变应力时材料具有很强的耗能能力。另外,阻尼材料滞回曲线所包围的面积越大,耗能能力就越强。

1.3.2 粘滞阻尼减震的基本原理

阻尼是结构振动衰减的根本原因,但实际结构中由于阻尼特性的复杂性而不能将其准确定位,所以在结构分析中通常认为结构阻尼为线性粘滞阻尼,即认为阻尼力与速度成正比。同时假定结构中设置粘滞阻尼器后所附加给结构的阻尼与结构本身的阻尼相一致。

结构减震原理可以通过单质点体系 SDOF 振动分析来阐明,其运动方程^[15]为:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (1.5)$$

或

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = \frac{f(t)}{m} \quad (1.6)$$