

建筑结构 黏滞阻尼减震设计

张志强 李爱群 编著

中国建筑工业出版社

建筑结构黏滞阻尼减震设计

张志强 李爱群 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构黏滞阻尼减震设计/张志强等编著. —北京:
中国建筑业出版社, 2012. 12
ISBN 978-7-112-14492-1

I. ①建… II. ①张… III. ①建筑结构—黏性阻尼—
防震设计 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 022375 号

本书主要介绍了建筑结构在地震和风荷载作用下的黏滞流体消能器减震 (振) 的基本理论、设计方法、施工和检测要求以及工程应用, 共分 6 章, 主要内容包括: 黏滞流体消能器的发展、构造、原理、力学性能、分析方法和装有黏滞流体消能器结构的设计方法以及工程实例。

本书可作为土木工程学科的研究生和高年级本科生进行创新教学的教材, 也可供从事土木工程领域的研究、设计和施工技术人员参考。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺
责任设计: 张 虹
责任校对: 张 颖 赵 颖

建筑结构黏滞阻尼减震设计

张志强 李爱群 编著

*

中国建筑业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$ 字数: 211 千字

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-14492-1

(23127)

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)

前 言

地震和风是一种自然现象,强震和飓风给人类带来了巨大的灾难。因此,最大限度地减轻震灾和风灾所造成的损失,是人类必须解决的一个重要问题。随着科学技术的发展,结构被动减震(振)控制技术已经成为抵御地震(强风)的一种有效方法和比较成熟的技术。在被动控制装置中黏滞流体消能器由于其耗能能力强、性能稳定、受激励频率和温度的影响较小以及具有良好的耐久性等优点,成为工程师进行减震(振)设计的重要选择。

本书是在总结东南大学建筑工程抗震和减震研究中心近二十年相关的科研成果和工程实践经验基础上编写而成的。本书的编写突出了以下特点:第一,体系的完整性,在介绍各种被动减振装置的工作原理和技术特点的基础上,系统地介绍了黏滞流体消能阻尼器的工作原理、力学性能和技术特点;第二,理论与应用的紧密结合,本书给出了没有黏滞流体消能阻尼器的建筑结构工程实用设计计算方法和消能阻尼器的检测方法,并辅以适当的设计例题作为示范,还详细介绍了黏滞阻尼减振控制技术在工程中的具体应用。

本书在编写的过程中,学习和参考了国内外大量的论著,在此谨向原著者致以诚挚的谢意和敬意。

本书由张志强和李爱群编著。

本书的第2章的第2.3节和第3章为硕士研究生刘文文在本书作者指导下完成的硕士学位论文的部分内容。第4章的第4.2.2节为硕士研究生汪子月在本书作者指导下完成的硕士学位论文的部分内容。第6章的第6.4节为博士研究生徐庆阳在本书作者指导下完成的博士学位论文的部分内容。本书算例中的部分弹塑性分析由缪志伟博士完成。

在本书的编写过程中,东南大学建筑工程抗震和减震研究中心、东南大学建筑设计研究院抗震设计研究中心给予了许多帮助,其中硕士生胡心一、夏冬平等协助做了大量的辅助工作,在此深表谢意。

限于时间和水平,书中的疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2012年12月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 结构振动控制技术的概念与使用范围	1
1.2 被动消能减振技术的原理	3
1.3 被动消能阻尼器的类型	4
1.3.1 摩擦消能阻尼器	4
1.3.2 金属消能阻尼器	5
1.3.3 屈曲约束支撑	6
1.3.4 黏滞流体消能阻尼器	7
1.3.5 黏弹性消能阻尼器	8
1.4 结构被动消能减振技术的优越性	8
参考文献	9
第2章 黏滞流体消能阻尼器的构造与减振原理	11
2.1 黏滞流体消能阻尼器的发展概况	11
2.2 黏滞流体消能阻尼器的构造	13
2.2.1 单出杆黏滞流体消能阻尼器	13
2.2.2 双出杆黏滞流体消能阻尼器	14
2.2.3 间隙式黏滞流体消能阻尼器	15
2.3 黏滞流体消能阻尼器的原理	16
2.3.1 阻尼介质的类型与特性	16
2.3.2 孔隙式黏滞流体消能阻尼器的耗能机理与理论力学模型	20
参考文献	31
第3章 黏滞流体消能阻尼器的力学性能	32
3.1 黏滞流体消能阻尼器的动力性能	32
3.2 黏滞流体消能阻尼器的活塞杆相对运动速度与阻尼力的关系	33
3.3 黏滞流体消能阻尼器的刚度问题	34
3.4 黏滞流体消能阻尼器的阻尼力滞后特性	38
3.5 黏滞流体消能阻尼器低温环境下的性能	40
3.5.1 极限位移试验结果	40

3.5.2	最大阻尼力试验结果	41
3.5.3	消能阻尼器规律性检测结果	41
3.5.4	消能阻尼器疲劳性能检测结果	42
3.5.5	低温试验总结	43
3.6	黏滞流体消能阻尼器的高温环境下的性能	43
3.7	黏滞流体消能阻尼器的密封性能	44
3.8	黏滞流体消能阻尼器的耐久性	45
	参考文献	47
第4章	黏滞流体消能阻尼器减振结构的分析方法	48
4.1	黏滞流体消能阻尼器的力学模型	48
4.1.1	Maxwell 模型	48
4.1.2	Taylor 公司的模型	48
4.1.3	东南大学的模型	49
4.1.4	武田寿一的模型	49
4.2	黏滞流体消能阻尼器的设计方法	49
4.2.1	动力时程分析方法	50
4.2.2	黏滞阻尼结构直接基于位移的简化设计方法	52
4.2.3	黏滞阻尼结构有限元实现	66
	参考文献	71
第5章	黏滞阻尼减震建筑结构的设计方法	72
5.1	黏滞阻尼减震建筑结构的适用范围	72
5.2	黏滞阻尼减震建筑结构的设防目标	72
5.2.1	黏滞阻尼减震建筑结构的的基本抗震设防目标	72
5.2.2	黏滞阻尼减震建筑结构的的基本抗风设防目标	73
5.2.3	黏滞阻尼减震建筑结构其他的基本抗震设防目标	73
5.3	黏滞流体消能阻尼器的布置	73
5.4	黏滞流体消能阻尼器的性能要求	74
5.5	黏滞流体阻尼减震建筑结构的设计方法	74
5.6	消能减震（振）建筑结构的减震（振）效果评估	75
5.6.1	黏滞流体消能阻尼器附加给结构的有效阻尼比和有效刚度计算	75
5.6.2	需要注意的问题	76
5.7	黏滞流体消能阻尼器与主体结构的连接部件（消能支撑）性能要求	77
5.7.1	消能支撑的类型	77
5.7.2	消能阻尼器与主体结构的连接部件（消能支撑）的性能要求	79

5.8 黏滞流体消能阻尼器的检测与安装	80
5.8.1 黏滞流体消能阻尼器的检测	80
5.8.2 黏滞流体消能阻尼器的安装要求	83
参考文献	83
第6章 黏滞流体消能器减震(振)设计工程实例	84
6.1 实例一:某八度区高层办公楼结构黏滞阻尼减震设计	84
6.1.1 工程概况	84
6.1.2 结构模型分析参数	84
6.1.3 消能减震设计方案	87
6.1.4 时程分析减震效果	91
6.1.5 例举某一种阻尼支撑的消能部件设计	99
6.1.6 与消能器相连的框架柱减震前后的内力值比较	102
6.2 实例二:某七度区高层住宅结构黏滞阻尼减震设计	103
6.2.1 工程简介	103
6.2.2 结构模型分析参数	103
6.2.3 消能减震设计方案	106
6.2.4 时程分析减震效果	107
6.2.5 例举某一种阻尼支撑的消能部件设计	111
6.3 实例三:某八度区既有学校建筑黏滞阻尼减震设计	115
6.3.1 工程概况	115
6.3.2 结构模型分析参数	115
6.3.3 消能减震设计方案	119
6.3.4 时程分析减震效果	120
6.4 实例四:某大跨结构黏滞阻尼减震计算分析	132
6.4.1 工程概况	132
6.4.2 大跨机库结构地震响应特点分析	133
6.4.3 大跨机库结构采用柱间消能支撑的减震控制研究	137
6.4.4 大跨机库结构采用柱间消能支撑的减震控制研究	144
6.4.5 大跨机库采用柱间消能支撑减震的参数优化	148
6.5 实例五:某高耸结构黏滞阻尼减震(振)计算分析	152
6.5.1 工程概况	152
6.5.2 地震响应分析	153
6.5.3 黏滞流体消能器对塔地震响应的控制研究	156
6.5.4 顺风向脉动风荷载的模拟	161
6.5.5 电视塔在脉动风荷载作用下的风振响应分析	162
6.5.6 黏滞流体消能器对塔风振响应的控制研究	164
参考文献	166

第 1 章 绪 论

1.1 结构振动控制技术的概念与使用范围

地震和风是一种自然现象，强震和飓风会造成巨大的人员伤亡和财产损失。地震灾害和风灾的发生具有随机性、突发性和不确定性等特点，特别是随着经济发展和城市化进程的加速，各种高层高耸建筑、大跨空间建筑、大跨桥梁等结构的大规模建设，地震、强风所造成的经济损失更大，因此，最大限度地减轻震灾和风灾所造成的损失，是人类必须解决的一个重要问题。

强震是一种突发性的破坏性极强的自然灾害，对人类社会构成严重威胁。一次突发性的大地震瞬息间可使成片房屋破坏倒塌，交通、通信、供水、供电等生命线工程中断，并可能引发火灾、疾病等次生灾害，导致严重的人员伤亡和经济损失。1976 年 7 月 28 日我国的唐山大地震把一座百万人口的工业城市毁为一片废墟，死亡 24.2769 万人；1995 年 1 月 17 日日本阪神大地震，造成神户城横墙断壁，一片火海，倒塌房屋 5 万多幢，高速公路及桥梁整线倒塌，死亡 6500 多人，30 万人无家可归；2008 年 5 月 12 日下午 2 点 28 分中国四川省汶川县发生里氏 8.0 级大地震，共造成 9 万多人死亡及失踪，受灾面积 44 万平方公里，受灾人口 4000 多万，导致直接经济损失致超过 12000 亿元人民币；2010 年 1 月 12 日在海地发生了里氏 7.3 级大地震，共造成约 30 万人死亡；2010 年 2 月 27 日在南美智利发生里氏 8.8 级大地震，共造成 800 多人死亡；2010 年 4 月 14 日凌晨，在青海省玉树县发生了里氏 7.1 级特大浅表地震，造成重大人员财产损失；2011 年 2 月 22 日在新西兰发生里氏 6.3 级地震，造成 170 多人死亡及失踪；2011 年 3 月 11 日在日本东北地区发生了里氏 9.0 级特大地震，造成约 2.7 万人死亡及失踪。20 世纪以来，地震引起的经济损失达数千亿美元，导致约 126 万人死亡和近千万人严重伤残。

20 世纪 80 年代，德意志联邦共和国慕尼黑保险公司对西方发达国家损失 1 亿美元以上的自然灾害统计结果表明，风灾发生的频率高，次生灾害大，其中风灾的次数占自然灾害总次数的 51.4%，经济损失占自然灾害总损

失的40.5%。随着生产和建设的不断发展,与其他灾害损失一样,风灾损失也每年递增。我国是受风灾威胁非常严重的国家之一,特别是沿海地区经常受到台风的袭击,所造成的人员伤亡和财产损失难以估计。2004年在浙江温岭登陆的台风“云娜”,造成176人死亡,6.43万间房屋倒塌,受灾人口达1299万人,直接经济损失超过200亿元人民币;2006年在浙江苍南南部登陆的超强台风“桑美”,为1949年以来登陆我国大陆最强的台风,造成浙江、福建、江西3省665.5万人受灾,死亡483人,直接经济损失196.5亿元,这次台风给浙江苍南和福建福鼎的部分地区造成了巨大的损失。此外,美国也是受风灾威胁严重的国家。2005年8月29日登陆美国南部的路易斯安那州和密西西比州的飓风“卡特里娜”所造成的损失更是惨重,据估计,造成的死亡人数就可能超过1万人,经济损失高达1万亿美元,超过了美国历史上其他任何一次自然灾害;2012年10月30日在新泽西州登陆的飓风“桑迪”,导致美国多个州受灾,百余人死亡,造成海水倒灌,纽约市区被淹,联合国总部受损。

传统的结构设计方法是通过改变结构自身性能例如增加结构的刚度、承载力、改变质量分布等来抵抗强震和强风的作用。但由于地震和风具有很大的随机性以及结构实际抗震(振)能力设计计算的误差,结构在强震和飓风作用下很难确保安全。为了更经济、有效地提高结构的抗震(振)性能,近年来,在土木工程领域新兴起了一门通过“柔性耗能”的途径来减小结构振动反应的学科——结构振动控制。

结构振动控制根据是否需要外部能量输入可分为被动控制、主动控制和半主动控制三种。主动控制需要外加能源,其控制力是控制装置按最优控制规律由外加能源主动施加。主动控制装置主要有:主动质量消能阻尼器(active mass dampers, AMD)、主动调谐质量消能阻尼器(active tuned mass dampers, ATMD)、主动拉索(active tendons, AT)、主动变刚度(active variable stiffness, AVS)。半主动控制需要的外加能源较小,其控制力也是控制装置随结构一起振动变形时产生的,但在控制过程中能通过外加能源主动调整本身的参数从而调节控制力。但由于高层建筑和高耸结构本身体型巨大,主动控制所需的外加能源比较大,而且控制机构比较复杂,许多设计者还是倾向于采用构造简单、造价便宜而且比主动控制更可靠的被动控制装置。

与主动控制不同,被动控制不需要外加能源,其控制力是控制装置随结构一起振动变形时产生的,而且与主动控制和半主动控制相比有着构造简单、造价低、可靠性高等优点。因此,被动控制已成为人们应用开发的热点,许多被动控

制技术已日趋成熟，并已在实际工程中得到广泛应用。

结构被动振动控制概念是指通过在建筑结构上安装被动消能阻尼器和被动吸能器，消耗、吸收、转移结构的振动能量，减小结构的振动，从而确保结构本身及结构中的人、仪器设备、装修等的安全或处于正常的使用状态。或简言之：通过在结构中设置减振装置，由结构与减振装置共同承受振动作用，以减轻结构的振动反应，使它在外界干扰作用下的各项反应值被控制在允许范围内。

被动控制适用于抗震设防地区和对抗震设防有特殊要求的新建建筑结构的抗震设计以及既有建筑结构的抗震加固；适用于高层建筑、超高层建筑和高耸结构的抗风设计；也可用于其他动荷载作用下建筑结构的抗震设计。

1.2 被动消能减振技术的原理

结构被动减振控制可表述为：通过在结构中合理设置被动消能装置，来有效地控制结构的振动响应，使结构在地震、大风或其他动力干扰作用下的各项反应值被控制在允许范围内。被动控制的原理还可以从能量守恒的角度来看（见图 1-1）：

传统结构：

$$E_{in} = E_R + E_D + E_S \quad (1-1)$$

采用被动消能装置的减振结构：

$$E_{in} = E_R + E_D + E_S + E_A \quad (1-2)$$

式中 E_{in} ——输入结构的外部能量；

E_R ——结构物振动反应的能量，即结构物振动的动能和势能（弹性变形能）；

E_D ——结构阻尼消耗的能量（一般不超过 5%）；

E_S ——主体结构及承重构件非弹性变形（或损坏）消耗的能量；

E_A ——被动消能装置消耗的能量。

对于传统结构，当 E_{in} 过大时，主要依靠 E_S 消耗输入结构的外部能量，即只有通过构件损坏甚至结构破坏或倒塌来实现能量守恒；而对于采用被动消能装置的减振结构，被动消能装置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能量，并实现能量守恒，从而使结构的振动反应大大减少，主体结构的安全性得到有效保证。

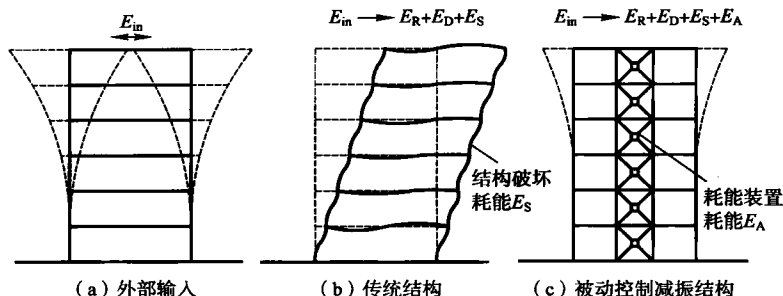


图 1-1 结构能量转换途径对比

1.3 被动消能阻尼器的类型

被动消能阻尼器分为速度相关型消能阻尼器、位移相关型消能阻尼器及复合型消能阻尼器。位移相关型消能阻尼器的耗能能力与消能阻尼器两端的相对位移相关，包括摩擦消能阻尼器、金属消能阻尼器和屈曲约束支撑；速度相关型消能阻尼器的耗能能力与消能阻尼器两端的相对速度有关，包括黏滞消能阻尼器、黏弹性消能阻尼器；复合型消能阻尼器的耗能能力与消能阻尼器两端的相对位移和相对速度有关，包括铅黏弹性消能阻尼器等。

1.3.1 摩擦消能阻尼器

摩擦消能阻尼器是通过摩擦材料之间的滑动摩擦消耗结构振动能量的一种位移相关型消能阻尼器。摩擦消能阻尼器在正常使用荷载下不产生位移，也不对结构提供刚度；在强震作用下摩擦消能阻尼器产生滑移，为结构提供阻尼，并依靠摩擦做功耗散能量。

目前，开发的摩擦消能阻尼器主要有：普通摩擦消能阻尼器、Pall 摩擦消能阻尼器、Sumitomo 摩擦消能阻尼器、摩擦剪切铰消能阻尼器、滑移型长孔螺栓节点消能阻尼器、T 形芯板摩擦消能阻尼器、拟黏滞摩擦消能阻尼器、压电智能摩擦消能阻尼器、多级摩擦消能阻尼器以及一些摩擦复合耗能器。下面简要介绍普通摩擦消能阻尼器和 Pall 摩擦消能阻尼器的构造及减振机理。

图 1-2 为普通摩擦消能阻尼器的构造详图，它是通过开有狭长槽孔的中间钢板相对于上下两块铜垫板的摩擦运动而耗能，调整螺栓的紧固力可改变滑动摩擦力的大小。滑动摩擦力与螺栓的紧固力成正比。另外，钢与铜接触面之间的最大静摩擦力与滑动摩擦力差别小，滑动摩擦力的衰减也不大，从而保证了摩擦耗能系统工作的稳定性。

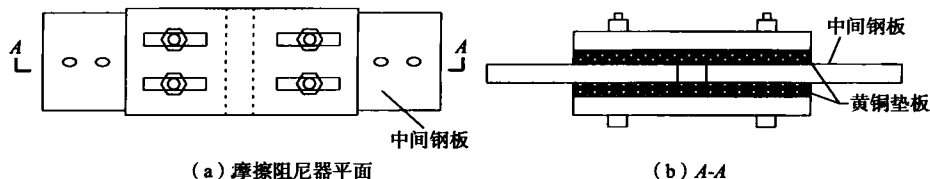


图 1-2 普通摩擦阻尼器的构造详图

Pall 摩擦消能阻尼器 (图 1-3) 是 1982 年 Pall 和 Marsh 研究的一种安装在 X 形支撑中央的双向摩擦器, 并且已用于实际的结构工程中。该消能阻尼器中支撑的两根柔性交叉斜杆在中心节点处各自断开, 并采用夹摩擦耗能材料的滑动连接的构造做法, 同时交叉杆中心处又用四根连接杆连成一个铰接方框。这样, 当结构的动力反应引起消能阻尼器所在结构层发生相对层间位移时, 将在支撑斜拉杆中产生拉力, 当此拉力达到或超过支撑中心滑动连接节点的滑动摩擦力时, 就会带动斜杆在中心节点处相对滑移错动, 从而产生摩擦耗能。另外, 该消能阻尼器的变形特点使耗能支撑的设计不受临界力的限制。与普通摩擦耗能器相比较, Pall 摩擦消能阻尼器的摩擦力稳定得多, 摩擦力的衰减与螺栓紧固力没有关系。Pall 摩擦消能阻尼器起滑时将由矩形变为平行四边形, 其对角线在受拉边变长, 受压边变短。这种变形方式使得支撑在受压时不会发生失稳屈曲, 这样在反向变形时, 受压杆将直接变成受拉杆, 不需要恢复屈曲变形后再使摩擦器起滑。

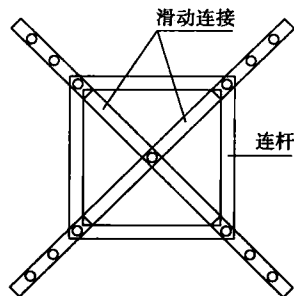


图 1-3 安装在结构中的 Pall 摩擦阻尼器

摩擦消能阻尼器的优点是构造简单、造价便宜, 但是其也存在着一定的不足, 表现为: (1) 动摩擦系数不易掌握, 另外, 由于摩擦层材料老化、锈蚀或粘结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。上述因素都带来了摩擦系数和摩擦力可能的变化, 使设计者很难在计算分析中将其作为一个稳定的定量作用来考虑。目前, Pall 摩擦消能阻尼器已在加拿大、美国、日本、中国、印度等国家的几十个工程中得到应用。

摩擦消能阻尼器的优点是构造简单、造价便宜, 但是其也存在着一定的不足, 表现为: (1) 动摩擦系数不易掌握, 另外, 由于摩擦层材料老化、锈蚀或粘结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。上述因素都带来了摩擦系数和摩擦力可能的变化, 使设计者很难在计算分析中将其作为一个稳定的定量作用来考虑。目前, Pall 摩擦消能阻尼器已在加拿大、美国、日本、中国、印度等国家的几十个工程中得到应用。

1.3.2 金属消能阻尼器

金属消能阻尼器是由各种不同金属材料 (软钢、铅等) 元件制成, 利用金属元件屈服时产生的弹塑性滞回变形耗散能量的减震装置。比较有代表性的有: X

形板和三角形钢板消能阻尼器和剪切钢板消能阻尼器。金属消能阻尼器还可以简单地分为软钢的剪切变形和弯曲变形两种。其主要的优点是力学性能稳定且价格便宜。

X 形软钢阻尼器可由多块 X 形状的钢板叠加而成, 如图 1-4 所示。其减震原理是: 通过 X 形钢板的侧向弯曲屈服来耗散结构的振动能量, 以减小结构的振动反应。该阻尼器的优点在于钢板相同厚度处的各点将同时达到屈服, 这将充分发挥钢板材料的塑性性能, 大大提高其耗能能力。三角形软钢阻尼器可由多块三角形钢板叠加而成, 如图 1-5 所示, 其减震原理同 X 形软钢阻尼器。剪切钢板消能阻尼器由中间主要承受剪力的剪切板、防止剪切板屈曲的纵向及横向加劲肋、剪切板左右两侧的翼缘板以及上下两端的连接端板组成, 如图 1-6 所示。

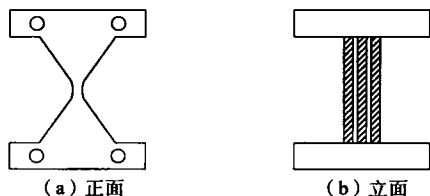


图 1-4 X 形软钢阻尼器的构造详图

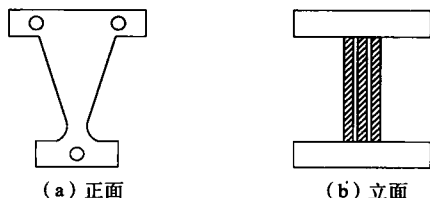


图 1-5 三角形软钢阻尼器的构造详图

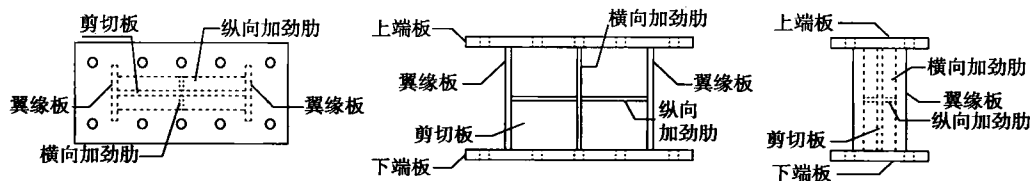


图 1-6 剪切板消能阻尼器组成部件

1.3.3 屈曲约束支撑

屈曲约束支撑是由核心单元、外约束单元等组成, 利用核心单元钢材的拉压塑性变形消耗结构振动能量的一种位移相关型消能阻尼器 (见图 1-7)。屈曲约束支撑又称为防屈曲支撑、无粘结支撑, 其延性和滞回耗能能力高, 兼有普通支撑 (抗风和小震条件下提供抗侧刚度) 和耗能构件 (中震和大震条件下提供阻尼) 的双重作用, 并具有较高承载能力, 力学性能可控且稳定, 同时具有良好的耐久性 (包括耐老化性能、耐疲劳性能), 施工简便, 便于维护。因此, 它是目前国内外应用较广的一种消能阻尼器。

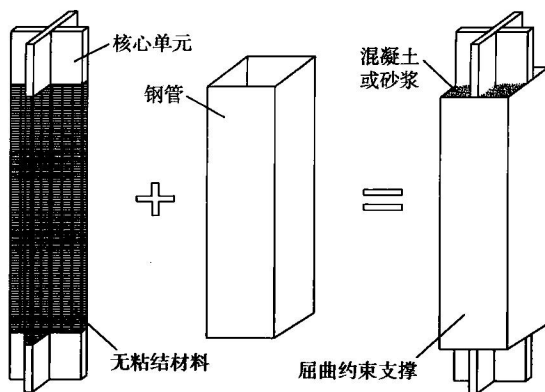


图 1-7 屈曲约束支撑的构成

目前屈曲约束支撑的截面形式很多，常用的截面形式如图 1-8 所示。图 1-8 (a) 为应用最为广泛的由填充砂浆或混凝土的钢管包裹的一字形断面的支撑，为了加大此种支撑的承载力，核心单元也可以采用十字形断面。图 1-8 (b) 为由钢筋混凝土作为约束单元、宽翼缘型钢为核心单元的屈曲约束支撑。图 1-8 (c) 是使用

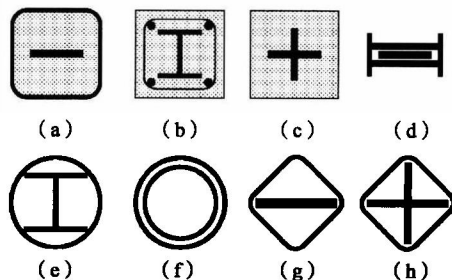


图 1-8 屈曲约束支撑的常用截面形式

钢纤维混凝土约束的十字形断面的支撑。图 1-8 (d) 是由两个通过螺栓连接的混凝土板作为约束单元的屈曲约束支撑。图 1-8 (e)、(f) 表示的是两种用圆钢管约束的支撑，其中在图 1-8 (f) 中，内钢管是作为轴力支撑，而外钢管是作为约束机构来使用。图 1-8 (g)、(h) 是其他的几种屈曲约束支撑。在这些屈曲约束支撑中，图 1-8 (a)、(c)、(f) 是使用无粘结材料的屈曲约束支撑，其余的各种支撑中没有使用任何的无粘结材料，而是核心单元和约束单元之间预留一定的空隙以使核心单元可以自由伸缩。

1.3.4 黏滞流体消能阻尼器

黏滞流体消能阻尼器是由缸体、活塞、黏滞材料等部分组成，利用黏滞材料运动时产生黏滞阻尼耗散能量的一种速度相关型消能阻尼器。黏滞流体消能阻尼器根据其构造可分为单出杆和双出杆两种形式。黏滞消能阻尼器能提供较大的阻尼，因而可以有效地减小结构的振动，同时当结构变形最大时，消能阻尼器的控制力为零，从而使结构的受力更加合理；此外由于黏滞流体消能阻尼器不提供附加的刚度，不会因为安装消能阻尼器而改变结构的自振周期从而增加地震作用；

同时其受激励频率和温度的影响较小。这些优点表明，黏滞流体消能阻尼器在结构的抗震和抗风控制中有着广阔的应用前景。

1.3.5 黏弹性消能阻尼器

黏弹性消能阻尼器（见图1-9）是由黏弹性材料和约束钢板或圆钢筒等组成，是利用黏弹性材料的剪切变形或拉压应变产生阻尼、消耗结构振动能量的一种速度相关型消能阻尼器。黏弹性阻尼墙也常采用钢板与黏弹性材料叠层连接的形式（见图1-10），通过黏弹性材料的剪切变形来耗散能量。黏弹性阻尼墙能够使用比普通黏弹性消能阻尼器大得多的黏弹性材料，因此给结构增加的阻尼就更大。

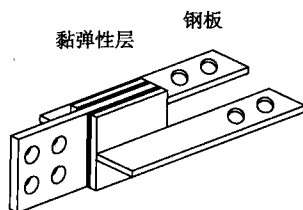


图1-9 常用的黏弹性消能阻尼器

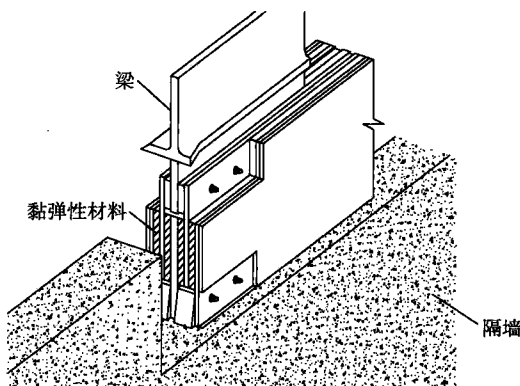


图1-10 黏弹性阻尼墙

黏弹性消能阻尼器性能可靠、构造简单、制作方便，既可以提供较大的刚度也可以提供一定的阻尼。但是环境温度、频率和应变幅值会对其产生较大的影响；另外，使用时间的增长以及其他环境因素的变化（如预压缩量、烟雾、油污、高真空等），也会对消能阻尼器的耐久性和性能稳定性产生一定的影响。

1.4 结构被动消能减振技术的优越性

结构被动消能减振技术和传统抗震技术可从以下几方面进行对比分析：

（1）抗震途径和方法方面：传统抗震技术采用加强结构，加大构件截面尺寸，增加构件配筋，提高结构刚度等“硬抗”的方法来抵抗地震；消能减振控制

则是在结构上设置减振装置,通过消耗地震能量、调整结构动力特性等方法,达到减轻结构地震响应的目的。

(2) 减振效果方面:同传统的抗震技术相比,减振控制具有明显的减振效果,根据有关振动台试验的数据,消能减震结构的地震反应可比传统抗震结构降低40%~60%,且结构越高、越柔,消能减振效果越显著。

(3) 安全性方面:传统抗震方法是按照“预定的”的抗震设防烈度设计结构的抗震能力,当实际地震超过“预定值”时(中外破坏性大地震超过预定烈度的甚多),过大的振动将导致部分构件进入弹塑性状态,结构就处于不安全状态;而对于消能减振结构,通过消能阻尼器在强震中率先消耗地震能量,迅速衰减结构的地震反应并保护主体结构和构件免遭破坏,来控制或衰减结构的振动反应以确保结构的安全。

(4) 经济性方面:传统抗震技术采用增大截面、提高材料强度和结构刚度来“硬抗”地震,因而需要有必要的经济投入;而消能减震结构是通过“柔性消能”的途径减少结构的地震反应,因而可以减少抗侧力构件的设置,减少结构截面和配筋,并提高结构的抗震性能。一般在高烈度区的工程可节约造价5%~10%;若用于既有建筑物的抗震加固,则可节约造价30%~60%。

(5) 震后可修复方面:传统抗震技术设计的工程结构,由于大震后结构或构件发生了弹塑性变形甚至破坏,必须采用震后加固修复等补救措施,工作量和修复难度均较大;而减振控制结构在地震后多处于弹性或弱非线性状态,故可根据建筑物震后的实际情况进行简单的修复或无需修复。

(6) 适用范围方面:传统抗震技术所设计的工程结构,主要依靠结构本身来满足结构抗震抗风要求,如果结构本身抗震抗风能力不足,则需要采用增大截面、提高材料强度和结构刚度等“补强”的方法来弥补。而减振控制技术主要依靠减振装置来有效提高结构的抗震抗风能力,根据其工作原理,该技术不仅适用于新建的工程结构(包括多高层建筑、高耸结构、大跨空间结构、桥梁结构),也适用于既有建筑物的抗震加固改造。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, Chassiakos A G, Claus R O, Masri S F, Skelton R E, Soong T T, Spencer B F, Yao J T P, Structural control: past, present, and future [J]. Journal of Engineering, 1997, 123 (9).
- [3] T. T. Soong, G. F. Dargush, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering. John Wiley & Sons, 1998.
- [4] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [5] 瞿伟廉. 高层建筑高耸结构的风振控制和设计 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991.

- [6] 周福霖. 工程结构减振控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [7] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 李宏男, 李忠献等. 结构振动与控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [9] 吴波, 李惠. 建筑结构被动控制的理论与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [10] 周云. 黏滞阻尼减震结构设计 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.
- [11] Skinner, 等. 工程隔震概论 [M]. 谢礼立, 等译. 北京: 地震出版社, 1996.
- [12] 武田寿一. 建筑物隔震防振与控振 [M]. 纪晓惠译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [13] 蒋通译. 被动减震结构设计施工手册 (原著第2版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [14] 李爱群. 工程结构减振控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.