

消能支撑结构

冼巧玲 著

地震出版社

TU352. 104/20

2004

建筑结构减震新技术

消能支撑结构

冼巧玲 著



地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

消能支撑结构/冼巧玲著. —北京:地震出版社,2004. 12

ISBN 7-5028-2597-5

I. 消... II. 冼... III. 结构—抗震设计 IV. TU352.104

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第116583号

地震版 XT200400302

消能支撑结构

冼巧玲 著

责任编辑:蒋乃芳

责任校对:张晓梅

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部:68423031 68467993

门市部:68467991

总编室:68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编:100081

传真:88421706

传真:68467991

传真:68467972

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大彩印厂

版(印)次:2004年12月第一版 2004年12月第一次印刷

开本:850×1168 1/32

字数:142千字

印张:5.25

印数:0001~1000

书号:ISBN 7-5028-2597-5/TU·180 (3225)

定价:20.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

在结构中设置消能支撑是多高层建筑减轻地震灾害、实现结构被动控制的有效途径之一。如在框架结构中设置消能支撑就构成了消能支撑框架结构,后者与前者在抗震设计机理上有本质上的区别。由于消能支撑具有减震效果好、构造简单、施工简便、维护费用低等优点,国内外已有越来越多的新建和已建工程使用了消能支撑。

本书在广泛调研国内外消能支撑结构研究成果的基础上,从复合型摩擦消能支撑的试验研究出发,逐步展开了对于消能支撑结构的理论研究,进而提出了消能支撑结构新的设计方法。本书各章的内容安排如下:

第一章,综述结构减震控制技术的分类、发展简史和适用范围;概括了消能减震体系中消能构件和耗能器的类型,介绍了研究和应用较多的软钢耗能器和摩擦耗能器的发展情况;然后列举了消能支撑框架结构的优越性,归纳了消能支撑框架结构现有的分析方法和设计方法以及存在的问题;最后提出了本文的研究内容。

第二章,通过大量的低周往复水平荷载试验确定了复合型摩擦消能支撑的合理构造形式,根据试验实测的滞回

曲线拟合了复合型摩擦消能支撑的滞回模型；在此基础上，分别完成了设置复合型摩擦消能支撑的 6 层钢框架结构模型和 28 层微粒混凝土框架-剪力墙结构模型的振动台试验。试验结果表明，复合型摩擦消能支撑具有显著的减震作用。

第三章，首先讨论了消能支撑的计算模型和滞回模型，然后根据消能支撑的特点分别给出了主体结构为层间模型和杆系模型的非线性地震反应时程分析方法，并以框架结构为例编制了相应的分析程序。

第四章，把非线性规划中的复形法与结构非线性动力时程分析相结合，提出了基于结构非线性动力时程分析的消能支撑参数优化方法，给出了消能支撑参数优化的步骤，并编制了相应的程序。此外还解决了采用多条地震波进行消能支撑参数优化的问题，并通过算例进行详细的解析。该法能够获得满足指定层间位移角限值的、在给定消能支撑参数上下限范围内技术经济指标最优的消能支撑参数，成功地解决了多高层建筑结构中消能支撑参数的确定问题。

第五章，运用书中基于结构非线性动力时程分析的消能支撑参数优化方法，研究了消能支撑参数的取值范围和消能支撑参数偏差的容许范围，得出了有实际意义的

结论。

第六章，首先提出了低周反复水平荷载试验仿真分析方法，该法既能够避免动力时程分析中地震波频谱对分析结果的影响，又能够模拟地震过程中水平荷载的反复作用，特别适用于消能支撑结构的分析，可以充分反映消能支撑的耗能过程和作用。在此基础上，提出了基于低周反复水平荷载试验仿真分析的消能支撑参数优化方法，该法可以与第四章消能支撑参数优化方法互为补充。本章还探讨了消能支撑对框架主体结构延性的要求，研究了结构延性很差的两种典型情况——框架柱轴压比超过限值的情况和主体框架为“强梁弱柱”型的情况，研究结果表明，即使在这两种情况下消能支撑也能发挥提高结构水平承载力和耗能的作用，说明消能支撑对框架主体结构没有延性要求。

第七章，提出了消能支撑框架结构的设计方法，该方法的思路与现行规范的设计思路完全不同。按照本文的设计方法，框架主体结构可以降低设防烈度进行设计，消能支撑参数则由与罕遇烈度相应的地震波在指定的层间位移角限值下优化确定。本章还以一栋 15 层的房屋作为设计算例，分别按规范的方法设计常规框架结构和按本文的方法设计消能支撑框架结构，并对两种设计结果进行了比

较,得出的结论是按本文设计的消能支撑框架结构的技术经济效益高于常规框架结构。

本书对消能支撑结构的试验、分析和设计作了比较系统的研究和探讨,但其中难免存在谬误之处,敬请读者批评指正。

本书的撰写得了到广州大学周福霖院士和湖南大学成文山教授的悉心指导,湖南大学易伟健教授也对本书提出了很多宝贵意见,在此笔者表示衷心的感谢。

本书出版获得了广州大学著作出版专项经费的资助。

冼巧玲

2004年5月于广州大学

目 录

第一章 结构控制技术与消能支撑结构.....	(1)
1.1 结构控制技术的发展概况.....	(1)
1.2 消能减震结构体系.....	(6)
1.3 消能支撑结构.....	(11)
1.4 小结.....	(15)
第二章 复合型摩擦消能支撑的试验研究.....	(17)
2.1 概述.....	(17)
2.2 复合型摩擦消能支撑的研制和试验.....	(17)
2.3 复合型摩擦消能支撑框架结构模型 的振动台试验	(27)
2.4 设置复合型摩擦消能支撑的中房大厦 模型振动台试验	(32)
2.5 小结	(44)
第三章 消能支撑结构的非线性动力时程分析.....	(46)
3.1 概述.....	(46)
3.2 结构动力分析基本方程.....	(46)
3.3 消能支撑的计算模型.....	(48)
3.4 框架主体结构采用层间剪切模型的分析.....	(52)
3.5 框架主体结构采用杆系模型的分析.....	(62)
3.6 小结.....	(71)

第四章	基于结构非线性动力时程分析的 消能支撑参数优化	(75)
4.1	概述	(75)
4.2	复形法	(76)
4.3	基于结构非线性动力时程分析的消能 支撑参数优化方法	(79)
4.4	消能支撑参数优化步骤	(84)
4.5	算例	(86)
4.6	小结	(96)
第五章	消能支撑参数研究	(100)
5.1	概述	(100)
5.2	消能支撑参数与层间位移角限值的关系	(101)
5.3	消能支撑参数偏差对减震效果的影响	(103)
5.4	小结	(112)
第六章	消能支撑框架结构的低周反复荷载试验仿真 分析及消能支撑参数优化	(113)
6.1	概述	(113)
6.2	低周反复水平荷载试验的计算机仿真分析	(114)
6.3	基于低周往复荷载试验仿真分析的消能 支撑参数优化	(121)
6.4	消能支撑对框架主体结构的延性要求	(124)
6.5	小结	(135)
第七章	消能支撑框架结构的设计方法研究	(136)
7.1	概述	(136)

7.2	消能支撑框架结构的概念设计.....	(137)
7.3	设计方法建议.....	(138)
7.4	设计算例.....	(140)
7.5	小结.....	(151)
参考文献.....		(153)

第一章 结构控制技术与 消能支撑结构

1.1 结构控制技术的发展概况

地震是一种严酷的自然灾害,十几秒的强烈地震就能使一座繁华的城市变成废墟,导致生命财产的严重损失。地震造成灾难的主要原因是房屋、桥梁等基础固结于地面的工程结构在地面运动作用下产生很大的惯性力,导致结构严重破坏或倒塌。到目前为止,抵御地震的最有效方法仍然是工程抗震。通过总结一次次震害的教训,工程抗震技术得到不断的发展。房屋地震作用分析方法经历了静力法、反应谱法和时程分析法,房屋抗震设计方法发展到了现在世界各国结构抗震设计规范普遍采用的三水准两阶段设计法。

现行结构抗震设计规范规定了房屋结构在不同的烈度下有不同的损坏程度,因而有一定的经济合理性。但由于目前的科学水平还不能准确地预估未来可能遭遇的地震强度和特性,对材料的非线性性质、结构阻尼的变化等因素与结构破坏机理的内在关系还认识不足,所以目前的抗震设计方法无法准确地控制房屋结构的损坏程度和破坏机制,这对于生命线工程、核电站等重要结构,以及业主对安全性有特殊要求的情况是不能满足需要的。此外,按现行方法设计的房屋是依靠结构构件的塑性变形来消耗地震能量,强震时结构将产生难以修复的破坏甚至倒塌,比结构本身造价更高的房屋装修和内部管线、设备等也将遭到严重破坏。因此现行抗震设计方法是消极、被动的抗震方法。

为了更有效地保证房屋结构的安全度，地震工程研究者们相继提出了各种增强结构的自我调节能力、用附加的装置吸收和消耗输入结构的地震能量等积极主动的结构减震方法，突破了传统结构抗震设计仅依靠结构自身强度、刚度和延性来消极抵御地震和环境作用的思想路线，导致结构控制这门科学的崛起和迅速发展。结构控制是工程抗震技术的重大突破和发展趋势，是结构抗震对策的新的里程碑。

1.1.1 结构控制的分类

结构控制是指在工程结构的特定部位装设某种装置（如隔震垫等），或某种机构（如消能支撑、消能剪力墙、消能节点等），或某种子结构（如调频质量等），或施加外力（外部能量输入），以改变或调整结构的动力特性或动力作用，使工程结构在地震作用或风荷载下的动力反应（加速度、速度、位移）得到合理的控制，以满足结构安全性、适用性和舒适度的要求^[1-4]。结构控制按是否需要外部能源激励以及结构反应的信息，分为主动控制、被动控制、半主动控制和混合控制。结构控制的分类见图 1-1。

（一）结构主动控制

结构主动控制是利用外部能源（计算机控制系统或智能材料），在结构物受激励振动过程中，按预定的减震（振）控制目标，瞬时施加控制力或瞬时改变结构的动力特性，以迅速衰减和控制结构震动反应的一种减震（振）技术。主动控制系统一般由三部分组成：传感器系统、计算机系统和驱动施力设备。结构主动控制按控制手段可分为施加外力控制型、改变结构参数型和智能材料控制型，其中每个类型又可根据所采用的措施再进行细分。

结构主动控制是现代控制理论在结构工程领域的应用^[5]。控制方式有正反馈控制方式和负反馈控制方式两大类，还有兼两者所长的并用方式。正反馈控制方式是由测得的地面震动直接确定控制力，结构的地震反应没有反映在控制力中，其信息路径是：

地震动→控制，故控制回路是开环的。负反馈控制方式用传感器感知作为结果的结构物反应，将它反映到下一次的控制力中，其信息路径是：反应→控制→反应，故控制回路是闭环的。

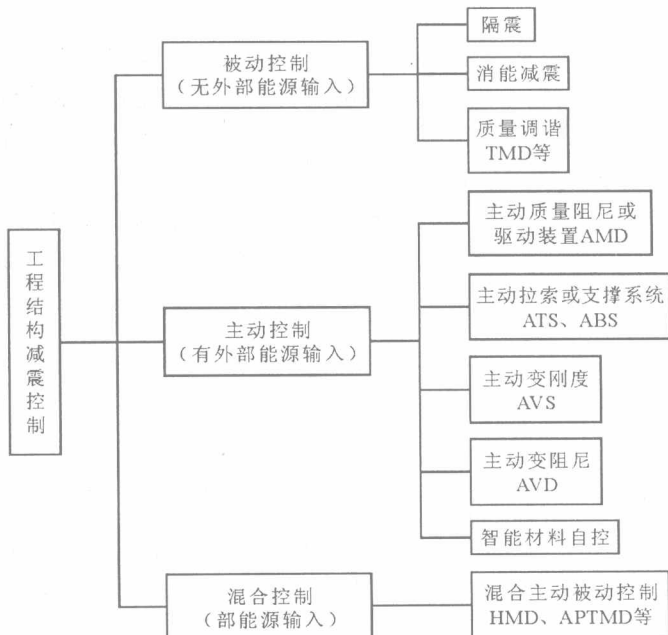


图 1-1 结构控制的分类

(二) 结构被动控制

结构被动控制指不依赖于外部能源，针对地震动的一般特性或某种地震动特征，在结构上附加控制装置和控制构件，使其在随结构一起变形和运动的过程中隔离和消耗地震能量，以减小结构的地震反应。结构被动控制按减震机理分为隔震、消能和吸能三类。

(三) 结构半主动控制

半主动控制不单依靠输入外部能源直接提供控制力，它一般

以被动控制为主体，仅需要少量的外部能源用以改变被动控制系统的参数或工作状态，以适应系统对最优状态的跟踪。半主动控制比主动控制经济而容易实施，控制效果又与主动控制相近，有较大的研究和应用价值。

（四）结构混合控制

混合控制是在一个结构上同时采用主动控制系统和被动控制系统。主动控制的减震控制效果明显、控制目标明确，但需外部能源，系统设置要求较高，造价较高。被动控制简单可靠，不需外部能源，经济易行，但控制范围和控制效果受到限制。混合控制把两种控制方法结合起来，取长补短，达到更加合理、安全、经济的目的。一般采用以被动控制为主、主动控制为辅的主从组合方式。

1.1.2 结构控制的发展简史

结构控制在工程中的应用的历史可追溯到一千多年前，我国许多完好保存至今的古建筑就是很好的实例。比如，古代木结构中广泛采用的“斗拱”就是一个十分巧妙的柔性梁柱结点，它通过多道“榫接”的摩擦及变形消耗大量的地震能量，大大衰减建筑物的地震反应，使建筑物成功地经受一次又一次强烈地震考验。又如，有些古建筑的墙脚与墙基顶面之间设灰沙膏、糯米灰膏等柔性隔层，容许上部结构与基础之间在地震时产生滑动或摩擦，这与现代基础隔震有异曲同工的效果。在国外也有不少古代建筑由于采用了消能、隔震的结构控制措施而在多次大地震后得以幸存。但是，古建筑的结构控制措施是古代建筑工匠凭着经验和直觉实现的，并没有形成理论体系。

结构控制技术的形成和发展，依赖于抗震设计理论的发展、结构动力试验设备的进步以及特大地震的震害教训总结，各种结构控制技术的发展简史归纳于表 1-1。

表 1-1 结构控制技术发展历史简表

时间	隔震	消能减震	被动调谐控制	主动控制
1881 年	河合浩藏提出了基础隔震的思想			
1909 ~ 1940 年	出现了各种基础隔震方案, 有个别工程应用。大致掌握隔震原理, 还不能进行定量分析		1940 年, 日本人提出在屋顶放置带滚轮的质量块控制房屋震动	
20 世纪 50~60 年代	1965 年, 松下清夫等在第三届世界地震工程会议上首次以解析方法论证隔震的效果, 从此隔震研究走上国际化、实用化的道路	苏联开始研究利用软钢塑性耗能的消能支撑。 1956 年, Housner 首先提出用能量法进行抗震设计	50 年代初, 苏联在一个 100m 高的钢铁电视塔上安装了 4 个摆锤、在一个 80m 高的钢铁烟囱上安装了 8 个摆锤, 大大减小了风振	1960 年, T. Korobi 提出动态智能建筑的概念。1965 年, Lev Zetlin 提出用由液压马达控制拉力的拉索来控制结构的运动
20 世纪 70 年代	法国、新西兰、美国、日本等对钢板夹层橡胶隔震垫进行了大量性能试验研究, 并于 70 年代后期开始在实际工程中的应用。1976 年新西兰首创铅芯橡胶垫	新西兰、加拿大、中国等研究软钢的塑性耗能性能, 做成消能支撑, 并应用于工业厂房结构	美、加等国开展 TMD 减小风振的研究, 并用于试点工程	1972 年, T.P.Yao 基于古典和现代控制理论, 首次提出结构控制的概念; 开始研究结构控制方式及计算方法
1979 年 6 月	第一次“结构控制”国际会议在加拿大召开, “结构控制”作为一门新兴学科得到了正式确认			

续表

时间	隔震	消能减震	被动调谐控制	主动控制
20 世纪 80 年代	1985年,美国研制出高阻尼橡胶垫。1982年,新西兰把隔震结构设计方法形成规范;1989年,日本建筑学会制定了“免震构造设计指针”;美国、意大利等国相继制定了隔震设计规范	80年代初,加拿大、美国、日本、意大利等研制出摩擦耗能器、粘弹性阻尼器、铅阻尼器、油阻尼器、液压质量泵等消能阻尼器,以及各种形式的消能构件。开展了消能减震结构的分析方法研究;我国于80年代开展这方面的研究	1987年, Takanari Sato 首次提出用 TLD 控制结构的振动。 下乡太郎总结了结构被动控制基于最优控制理论的三种控制装置参数准最优化方法	美国首先对该领域进行系统研究,包括设计理论、可行性、可靠性及试验研究。日本从1986年开始,到1988年迅速发展
20 世纪 90 年代	钢板夹层橡胶垫隔震技术已到推广应用阶段,工程应用急增。其它隔震技术有较缓慢的发展,尚未成熟	继续开发新型阻尼器;研究消能减震结构的实用设计计算方法;消能减震体系的工程应用不断增加	TMD、TLD 的设计理论及工程应用研究	Yang, J.N.等系统研究了非线性控制理论,并提出了混合控制的概念。实际工程应用研究

1.1.3 各种结构控制方法的适用条件及成熟程度

各种结构控制方法都有其特点,各自的适用条件及减震效果都有所不同,表 1-2 列出了各种结构控制方法的粗略比较。

1.2 消能减震结构体系

结构消能减震体系,就是把结构物的某些非承重构件(如支撑、剪力墙、连接件等)设计成消能杆件,或在结构的某部位(层

表 1-2 各种结构控制方法的比较

		被动控制			主动、半主动控制
		基础隔震	消能减震	被动调谐控制	
应用条件	结构条件	1~30 层、高宽比 ≤ 3 、以剪切变形为主的建筑, 桥梁, 筒仓, 设备基础等	水平刚度较小的多层、高层、超高层建筑, 塔架, 大跨度桥梁等	主振型较为明显和稳定的多层、高层、超高层建筑, 塔架, 大跨度桥梁等	对抗风抗震要求较高的建筑结构物
	场地条件	$T_g \leq 0.85s$	无限制	中等以上	无限制
目前的成熟程度		各国先后制定了夹层橡胶垫隔震房屋设计规范, 在实际工程中推广应用	进入应用研究阶段, 工程应用数量呈增加的趋势	控制风振效果好, 但对地震反应控制有时失效。 尚在完善阶段	控制风振效果好, 但对地震反应控制有时失效。 尚在完善阶段
减震效果 (与传统结构相比)		结构反应降至 1/4~1/12; 8 度区节省造价 5%~15%, 9 度区节省造价 10%~20%	减震 40%~60%, 用于新建结构可节省造价 5%~10%, 用于旧有建筑加固可节省造价 10%~60%	减震 30%~60%	减震 40%~85%
特点		不需要外部能源, 性能稳定可靠, 造价较低, 维护费用低			需要外部能源, 造价高, 维护费用高

间空间、节点、联结缝等) 装设消能装置。在风荷载或小烈度地震时, 这些消能构件或消能装置具有足够的初始刚度, 处于弹性状态, 结构物仍具有足够的侧向刚度以满足使用要求。当出现中、强烈度地震或强风时, 随着结构侧向变形的增大, 消能构件或消能装置率先进入非弹性状态, 产生较大阻尼, 大量消耗输入结构的能量, 使主体结构避免出现明显的非弹性状态, 并且迅速衰减结构的动力反应 (位移、速度、加速度等), 从而确保主体结构在