

端部加强型屈曲约束支撑 抗震性能与设计方法

DUANBU JIAQIANGXING QUQYUESHU ZHICHENG

KANGZHEN XINGNENG YU SHEJI FANGFA

王永贵 著

中国建筑工程出版社

端部加强型屈曲约束支撑 抗震性能与设计方法

王永贵 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

端部加强型屈曲约束支撑抗震性能与设计方法/王永贵著.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-112-18189-6

I. ①端… II. ①王… III. ①屈曲-支撑-抗震性能-设计 IV.

①TV323. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 126748 号

屈曲约束支撑由芯材、无粘结材料和外围套管三部分构成。在外围套管的约束作用下, 芯材在轴向拉压荷载作用时均能实现全截面屈服, 进而耗散地震能量, 改善了普通支撑受压屈曲的特点, 使屈曲约束支撑不仅具有普通支撑的优点, 而且具有优异的耗能行为。在芯材的过渡段及连接段贴焊补强钢板, 即为端部加强型屈曲约束支撑, 该类型支撑工艺简单, 便于工业化生产, 有利于降低损耗及工程造价。

本书基于屈曲约束支撑的工作原理对其构造设计的若干关键理论问题进行了详细探讨, 通过数值模拟分析了相关参数对其性能的影响, 提出了端部加强型屈曲约束支撑的设计方法; 针对我国钢材市场, 选取国标 Q235 角钢作为支撑内核芯材, 设计并制作了足尺试件, 通过低周循环加载试验, 验证了其耗能减震性能及相关理论的正确性; 通过对支撑框架结构体系耗能减震的理论分析及数值模拟研究, 详细分析了屈曲约束支撑的布置方式及抗侧刚度比等对支撑框架结构抗震性能的影响; 根据能量守恒原理, 提出了支撑框架结构基于能量的设计方法。

本书可供从事结构设计、施工等工程技术人员及高等院校土木工程专业师生阅读参考。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 张 颖

端部加强型屈曲约束支撑抗震性能与设计方法

王永贵 著

*

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

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9¼ 字数: 224 千字

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月第一次印刷

定价: 25.00 元

ISBN 978-7-112-18189-6

(27403)

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

为减轻地震灾害，众多科技工作者投身于建筑结构的消能减震研究，探索出较为完善的工程抗震理论，并在实践中取得了丰硕成果。传统的抗震设计方法通过多遇地震下的承载力分析和罕遇地震下的变形验算进行“两阶段”设计，依靠建筑结构自身的强度、刚度及延性实现“三水准”的设防目标，既浪费资源，又由于荷载的不确定性，难以实现特定的设防目标。完善现有结构设计理论，探索新的消能减震技术，已成为工程界的共识和主要研究课题，对保护人民生命财产安全具有重要的现实意义。

作为框架结构抗侧力体系的传统支撑地震时容易出现受压屈曲失稳，不利于结构的抗震。为改善传统支撑的受力情况，不出现受压屈曲失稳，国外学者提出了一种新型支撑——屈曲约束支撑。屈曲约束支撑通过外围约束单元抑制内部芯材在轴向荷载下产生屈曲失稳现象，不仅起到普通支撑的作用，而且其滞回曲线饱满，可明显改善支撑框架结构体系的延性和抗震性能，具有良好的发展潜力。理论分析及工程实践表明：地震作用下，屈曲约束支撑先于主体结构屈服，减轻主体结构的震害程度，增强结构体系的抗震性能，是屈曲约束支撑框架结构体系抵抗地震作用的第一道防线。屈曲约束支撑不仅可以在新建结构中实现消能减震，还可以对既有建筑起到加固改造的作用；不仅可以适用钢结构，还可应用于钢筋混凝土结构，其应用前景极为广阔。但是，屈曲约束支撑在国内的研究起步较晚，屈曲约束支撑的设计研发等关键技术多为外国单位所拥有，国内尚无屈曲约束支撑的技术标准；国外屈曲约束支撑的内部芯材大多为低屈服点钢材，不适合我国的钢材供货市场。为拥有完全自主知识产权，推广屈曲约束支撑的工程应用，必须实现屈曲约束支撑产品的标准化及国产化。

在现有研究的基础上，通过对屈曲约束支撑若干关键问题的研究，提出了端部加强型屈曲约束支撑的设计理念。通过理论分析及试验研究，标定了端部加强型屈曲约束支撑的力学参数及计算模型，研究了屈曲约束支撑-框架结构在不同工况下的抗震性能，提出了支撑框架结构基于能量的设计方法。

本书共分 8 章：

1. 绪论：回顾了屈曲约束支撑的构成及工作原理，介绍了屈曲约束支撑及屈曲约束支撑-框架结构的国内外研究现状和工程应用，提出了本书的研究内容和技术路线。

2. 屈曲约束支撑的理论分析：通过对屈曲约束支撑的强度要求及稳定条件分析，确定支撑各构造参数的确定依据和取值范围；通过对支撑等效刚度和芯材形心变化等的分析，明确了影响屈曲约束支撑性能的主要因素，为屈曲约束支撑构件设计及相关分析提供理论基础，提出了端部加强型屈曲约束支撑的设计方法。

3. 屈曲约束支撑的有限元分析：以有限元软件 ANSYS 为平台，进行 APDL 二次开发，对内核芯材截面为 T 形及十字形、外围约束机制为矩形钢管混凝土屈曲约束支撑的

受力机理进行分析。比较研究了约束比、宽厚比、间厚比、长细比、间隙变化、外围混凝土强度及内核芯材应变强化等因素对屈曲约束支撑综合性能的影响。

4. 屈曲约束支撑足尺试验研究：通过足尺试验，对比分析了端部加强型与切削型两种屈曲约束支撑包括试件的破坏机理、屈服荷载、极限荷载、塑性变形及发展、滞回特征、刚度变化规律、恢复力模型、延性、外围约束机制对芯材的约束机理等在内的力学性能。

5. 支撑-框架体系的消能减震分析方法：由结构体系的动力微分方程的构建为切入点，分析了支撑框架结构体系的求解方法，比较研究了振型分解法、时程分析法及推覆分析法的适用范围及应用条件。

6. 屈曲约束支撑-框架结构的有限元分析：借助 SAP2000 有限元分析软件，讨论了多高层结构体系的层间剪力、层间位移角、支撑轴力等随抗侧刚度比、布置方式、楼层位置等的变化规律，阐述了屈曲约束支撑-框架结构的塑性发展过程、薄弱部位的位置及结构破坏机理等。

7. 屈曲约束支撑-框架结构体系基于能量的设计方法：基于能量原理，以结构层间位移角为控制目标，通过对屈曲约束支撑-框架结构体系的能量分析，提出了基于能量的设计方法。

8. 结论与展望：对本书的整个内容进行了总结，并对后续研究提出了建议和设想。

本书的主体是我在中国矿业大学（北京）攻读博士学位期间的研究工作内容。首先向我的博士生导师高尔新教授致以深深的谢意，正是高老师的悉心指导、建设性的批评和一贯的鼓励，消减了我内心的惶恐，顺利完成了论文的写作。我的硕士生导师——北京工业大学的高向宇教授给予我最早、最重要的学术和科研训练是这项研究得以完成的重要保障。两位导师求真务实的治学态度、积极稳健的研究作风、孜孜不倦的进取精神已经对我的研究产生了影响，并将继续产生影响。

我还要特别感谢机械工业第六研究设计有限公司的刘建伟工程师对本研究提出的合理化建议，中国矿业大学（北京）的李显龙博士对本研究的支持。在本书的撰写过程中，参考了一些国内外同行的研究成果，对他们给予诚挚的感谢。

本书的出版，得到了河南理工大学博士生导师刘希亮教授、王有凯教授、梁为民教授、于永强教授、龚耀清教授、杨建辉教授、胡春红副教授、秦本东副教授、蔺新艳副教授等人的大力支持和帮助，以及土木工程河南省一级重点学科建设经费、河南省教育厅重点科技攻关项目（14A560001）、河南理工大学博士基金（B2015-69）、河南省教育厅自然科学基金（2011B560007）对本书出版给予的资助，在此一并表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在谬误之处，恳请同行批评指正。

王永贵

于河南理工大学·翰苑

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和现状	1
1.1.1 屈曲约束支撑简介	2
1.1.2 屈曲约束支撑研究现状	4
1.1.3 屈曲约束支撑框架结构体系	7
1.2 屈曲约束支撑的工程应用	12
1.3 现有研究的不足	15
1.4 研究内容及技术路线	16
1.4.1 研究内容	16
1.4.2 研究方法	16
1.4.3 技术路线	17
第 2 章 屈曲约束支撑的理论分析	18
2.1 屈曲约束支撑的工作原理	18
2.2 屈曲约束支撑的强度要求	18
2.2.1 核心段的强度要求	18
2.2.2 连接段的强度要求	19
2.2.3 T 形截面的形心一致性	19
2.3 屈曲约束支撑的稳定性分析	20
2.3.1 支撑整体稳定性分析	20
2.3.2 芯材的稳定性分析	22
2.3.3 连接段的稳定性分析	23
2.4 影响因素分析	25
2.4.1 屈曲约束支撑等效刚度	25
2.4.2 连接段参数的影响	25
2.4.3 间隙取值及其影响	27
2.4.4 芯材初始弯曲影响的影响	30
2.5 端部加强型屈曲约束支撑的设计方法	31
2.6 小结	32
第 3 章 屈曲约束支撑的有限元分析	33
3.1 有限元法的理论基础	33

3.1.1	非线性理论	33
3.1.2	非线性理论的求解	35
3.1.3	特征值问题	36
3.2	有限元模型的建立	37
3.2.1	材料的定义	37
3.2.2	单元的定义	38
3.2.3	网格的划分	38
3.2.4	加载方式	38
3.2.5	边界条件	38
3.3	有限元分析	38
3.3.1	试件参数	38
3.3.2	特征值分析	39
3.3.3	影响因素分析	39
3.4	小结	48
第4章	屈曲约束支撑足尺试验研究	50
4.1	试件设计	50
4.1.1	芯材核心段的设计	50
4.1.2	芯材端部加强段的设计	50
4.1.3	外围约束机制的设计	52
4.1.4	支撑的设计参数	52
4.2	试件制作流程及材性试验	54
4.2.1	端部加强型支撑制作过程	54
4.2.2	切削型支撑制作过程	55
4.2.3	其他加载附件的制作	55
4.2.4	材性试验	56
4.3	试验方案	57
4.3.1	加载设备	57
4.3.2	量测方案	57
4.3.3	加载方案	58
4.4	试验结果	59
4.4.1	滞回曲线	59
4.4.2	荷载-应变曲线	60
4.4.3	外套管跨中侧向位移	63
4.4.4	破坏形态	65
4.5	力学性能分析	66
4.5.1	力学非对称性	66
4.5.2	割线刚度	69

4.5.3 耗能系数及等效黏滞阻尼比 70

4.5.4 延性及累积塑性延性 71

4.5.5 受拉强度调整系数 72

4.5.6 骨架曲线与恢复力模型 72

4.6 小结 73

第 5 章 支撑-框架体系的消能减震分析方法 74

5.1 有限元法的基本思想 74

5.2 支撑框架体系的动力微分方程 75

5.2.1 质量矩阵 75

5.2.2 阻尼矩阵 76

5.2.3 刚度矩阵 76

5.3 振型分解反应谱法 79

5.4 时程分析法 81

5.5 推覆分析法 (Push-over 法) 83

5.5.1 Push-over 分析方法基本原理 83

5.5.2 Push-over 分析流程 84

5.5.3 塑性铰的定义 85

5.5.4 侧向力分布模式 85

5.6 小结 87

第 6 章 屈曲约束支撑-框架结构的有限元分析 89

6.1 屈曲约束支撑-框架结构的协同工作机理 89

6.1.1 支撑布置方式 89

6.1.2 抗侧刚度比 90

6.2 结构分析模型 92

6.2.1 场地条件 92

6.2.2 层数及支撑布置方式 93

6.2.3 材料特性及荷载工况 94

6.3 多遇地震下的时程分析 94

6.3.1 地震记录的选取与调整 94

6.3.2 弹性层间位移角 94

6.3.3 底层剪力 103

6.3.4 底层支撑轴力 105

6.4 罕遇地震下的时程分析 106

6.4.1 地震记录的选取与调整 106

6.4.2 抗侧刚度比变化对弹塑性层间位移角的影响 106

6.4.3 底层剪力 113

6.4.4	支撑轴力	115
6.5	Push-over 分析	118
6.5.1	结构模型自振周期	118
6.5.2	层间位移角	118
6.5.3	层间剪力及框架剪力分担率	119
6.5.4	塑性铰分布	119
6.6	小结	122
第 7 章	屈曲约束支撑-框架结构体系基于能量的设计方法	124
7.1	支撑框架结构能量理论	124
7.1.1	地震输入能量的影响因素	124
7.1.2	地震输入能量的计算	125
7.1.3	屈曲约束支撑屈服所耗能能力	126
7.2	设计方法	127
7.3	小结	128
第 8 章	结论与展望	129
8.1	主要结论	129
8.2	创新点	130
8.3	展望	131
参考文献		132

第 1 章 绪 论

本章结合框架结构自身的特点,通过对现有消能减震技术的分析,阐述了屈曲约束支撑的重要性和必要性;简要介绍了屈曲约束支撑的基本原理与构造设计要求;在现有文献的基础上,总结了屈曲约束支撑及支撑框架结构的研究现状及国内外的工程应用情况;针对现有的研究内容,指出其研究的不足,提出本书的研究内容及技术路线。

1.1 研究背景和现状

地震以及地震引发的次生灾害是威胁人类生存环境的主要自然灾害之一,给人类的生命财产安全造成严重损失。我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,受地震影响较为严重,20 世纪以来,共发生 6 级以上地震近 800 次,遍布我国大部分省市^[1~3]。

为减轻地震灾害,众多科技工作者投身于建筑结构的消能减震研究,探索出较为完善的工程抗震理论,并在实践中取得了丰硕成果。传统的抗震设计方法通过多遇地震下的承载力分析和罕遇地震下的变形验算进行“两阶段”设计,依靠建筑结构自身的强度、刚度及延性实现“三水准”的设防目标,既浪费资源,又由于荷载的不确定性,难以实现特定的设防目标。完善现有结构设计理论,探索新的消能减震技术,已成为工程界的普遍共识和主要研究领域,对保护人民生命财产安全具有重要的现实意义。

框架体系的抗侧移刚度较小,其抗震能力有限,在强烈地震作用下破坏后果严重^[4]。为将水平荷载作用下的结构层间位移控制在限值内,纯框架结构体系只能靠通过增大构件截面尺寸的方法来增大框架结构的抗侧移刚度,不仅浪费资源,而且纯框架结构的应用也受到一定的限制。鉴于此,具有多重抗侧力体系的框架支撑结构被学者所重视。通过协调支撑的轴向变形和框架梁柱的弯曲变形,支撑主要承受水平剪力,降低了框架剪切破坏的可能。在地震作用下,当支撑破坏后,框架结构承受全部的水平荷载,这样框架支撑体系就具备了多道抗震防线,增加了结构的安全储备。在多高层钢框架结构中,抗侧力体系是结构的关键构件,并影响着建筑的用钢量^[5]。

作为框架结构抗侧力体系的传统支撑地震时容易出现受压屈曲失稳,不利于结构的抗震。为改善传统支撑的受力情况,不出现受压屈曲失稳,国外学者提出了一种新型支撑——屈曲约束支撑。在屈曲约束支撑与框架组成的支撑框架体系中,水平荷载主要有屈曲约束支撑承担,由于屈曲约束支撑在受拉及受压的过程中均可达到全截面屈服而不屈曲,通过钢材的屈服吸收外界能量,进而实现结构耗能,保护主体结构,可明显改善结构体系的延性和抗震性能。

1.1.1 屈曲约束支撑简介

1. 屈曲约束支撑工作原理

屈曲约束支撑是一种新型的耗能支撑，主要由三个部分构成：芯材、无粘结材料和外

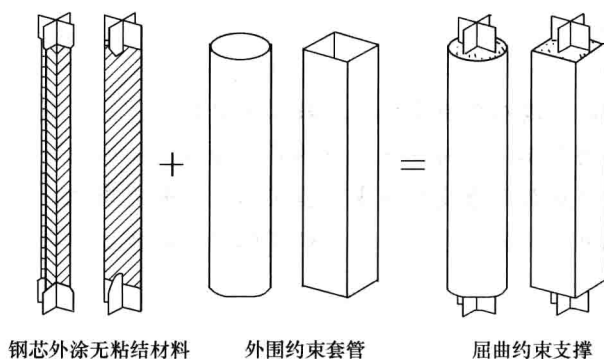


图 1-1 屈曲约束支撑的构造^[6]

围约束机制（如图 1-1 所示）。屈曲约束支撑通过芯材在轴向力作用下产生的塑性变形来耗散地震能量。为防止芯材出现受压屈曲失稳现象，保证受拉和受压时均能实现全截面屈服，在芯材外围设有屈曲约束机制。由于泊松效应，芯材受压时膨胀，需在芯材与约束套管之间留有厚度适中的间隙。通过芯材外围涂刷的无粘结材料，不仅可以实现设置间隙的目的，而且降低芯材与约

束套管的摩阻力，保证了芯材的受力均匀。正是基于上述原理，屈曲约束支撑在轴向拉压力作用下均能实现全截面屈服，改善了普通支撑受压屈曲的特点，使屈曲约束支撑不仅具有普通支撑的优点，而且具有优异的耗能行为（如图 1-2 所示），改善了传统支撑框架体系的抗震性能。

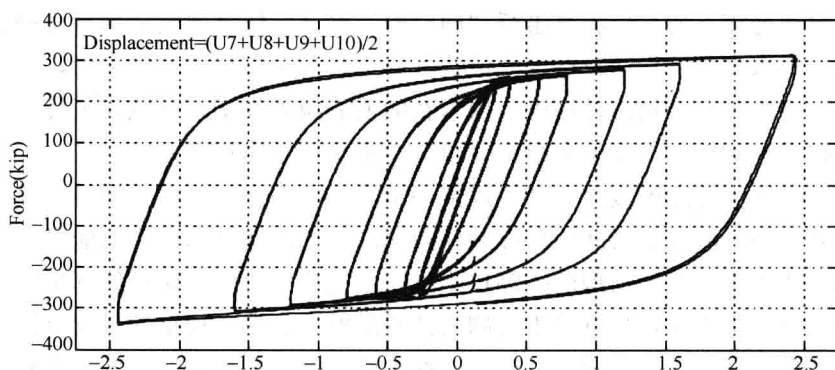


图 1-2 屈曲约束支撑滞回曲线^[7]

2. 支撑截面形式

经过众多学者的改进和创新，支撑的截面形式呈现出多样化趋势，目前常用的截面形式如图 1-3 所示^[6~12]。约束机制多由钢管（方形或圆形）内填砂浆或混凝土组成，或者由空心的钢管构成，外包在内核芯材周围。芯材有一字形（图 1-3a、d、g、j）、十字形（图 1-3c、h、k、l）、工字形（图 1-3b、e、i）、圆形（图 1-3f）等截面形式。其中图 1-3 (e) ~ (k) 中芯材与外套管之间没有填筑混凝土或水泥砂浆。

3. 芯材基本构成

为达到理想的耗能效果，作为内核单元的芯材通常选用中低强度钢材。由纵向来看，

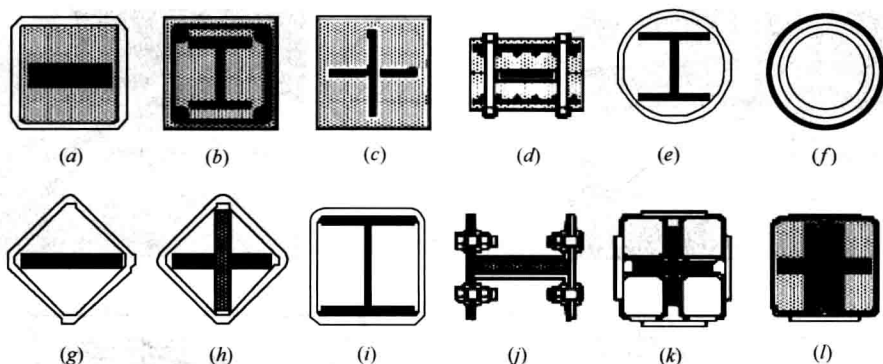


图 1-3 屈曲约束支撑常见截面形式

芯材主要包括屈服耗能段、过渡段和连接段等三个部分（如图 1-4 所示）。

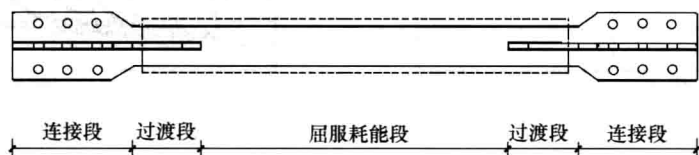


图 1-4 屈曲约束支撑构件的纵向组成

作为耗能部分的屈服段是屈曲约束支撑的核心部分，在轴向力作用下，通过外围套管的约束，芯材屈服段屈服，产生塑性变形，进而耗散地震能力。作为连接支撑与框架节点板的连接段，其未被外围约束套管所包裹。为便于安装及维护，支撑与框架通常用螺栓连接^[13~15]，也可采用铰接^[16]或焊接^[17]。过渡段是屈服段的延伸部分，其部分被套管所包裹，为保证过渡段在弹性范围内工作及未被套管约束部位不产生屈曲失稳，通常需增大截面宽度或贴焊补强钢板来增大芯材的截面面积（如图 1-5、图 1-6 所示）。为减少应力集中^[18]，过渡段的变截面部位应平缓或做成弧形^[19]。

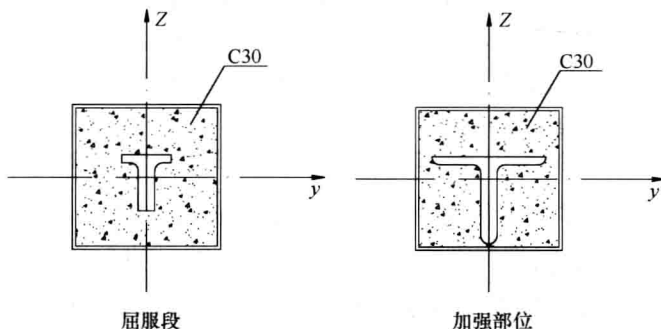


图 1-5 T 形截面屈曲约束支撑的截面图

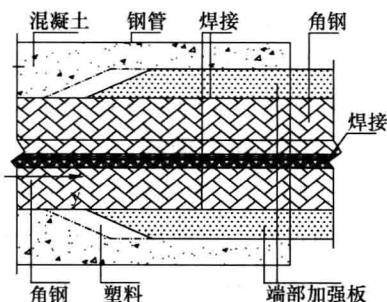
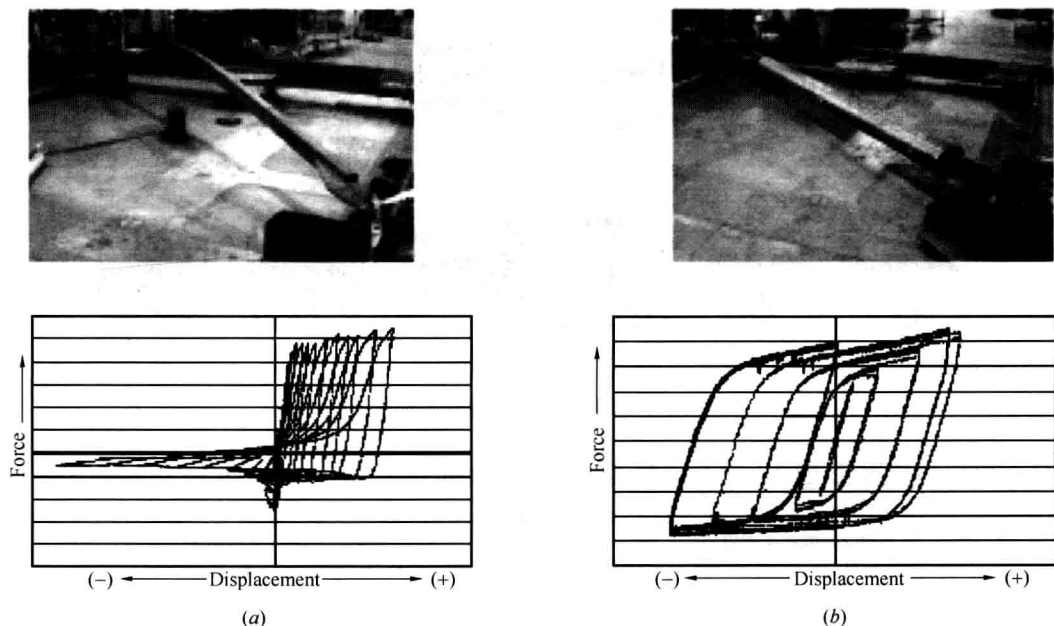


图 1-6 过渡段加强构造示意图

4. 普通支撑与屈曲约束支撑

屈曲约束支撑改善了普通支撑受压屈曲的缺点，在轴向力作用下，拉压时均能实现全截面屈服。在普通支撑与屈曲约束支撑芯材参数相同的情况下，美国学者通过试验对普通支撑与屈曲约束支撑的滞回性能进行了比较研究^[20]，如图 1-7 所示。由图 1-7 可以看出：

图 1-7 普通支撑与屈曲约束支撑^[20]

(a) 普通支撑; (b) 屈曲约束支撑

屈曲约束支撑滞回曲线饱满，拉压对称，没有出现屈曲现象，耗能效果好；普通支撑滞回曲线呈现出捏拢现象，拉压严重不对称，受压时屈曲现象严重，耗能效果差。

1.1.2 屈曲约束支撑研究现状

为解决普通支撑受压容易屈曲、拉压不对称、耗能效果差等缺点。20 世纪 70 年代，日本学者 Kimura 首先提出了利用钢材屈服耗能的屈曲约束的设计理念，随后对外围约束套管为方形钢管内填水泥砂浆，芯材为一字形钢板的屈曲约束支撑进行了试验研究^[21]，研究表明外围约束机制刚度和间隙大小是屈曲约束支撑设计的关键因素。此后，众多学者在屈曲约束支撑的构造设计、参数标定、屈服稳定、耗能行为、经济性能等方面进行了诸多研究，为屈曲约束支撑的后续研究和工程应用奠定了坚实基础。

1. 国外研究现状

在 Kimura 的基础上，日本学者先后多次进行屈曲约束支撑试验研究。Watanabe 等人^[22]通过对一字形屈曲约束支撑的试验研究，指出约束套管的屈曲强度与芯材屈服强度存在一定的对应关系。Fujimoto^[15]通过改变约束套管的外径和壁厚，对矩形钢管内填砂浆的屈曲约束支撑进行了试验研究，指出了屈曲约束支撑的设计要点。2000 年 Iwata 等人^[23]对四种常用的屈曲约束支撑（如图 1-8 所示）进行了对比分析。类型 1 来源于 Fujimoto 的设计理念；类型 2 是按照 Krawinkler 等人^[24]的设计理念制作而成，内部无填充混凝土及砂浆；类型 3 的约束套管为用螺栓连接的两根槽钢；类型 4 的芯材为型钢，约束套管仅为矩形钢管。对比发现，类型 1 在 3% 的应变下经过 14 次循环加载后，其破坏特征与砂浆压溃及端部芯材强度有关，滞回性能明显优于其他类型；类型 2 在不到 1% 的应变

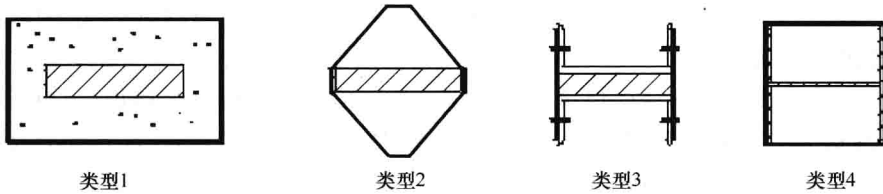


图 1-8 Iwata 试验的截面形式

下仅经过 2 次循环加载，就因芯材中部屈曲而结束，耗能效果最差。2003 年 Murai 等^[25]为实现屈曲约束支撑的产业化，设计并制作出槽钢-砂浆套管屈曲约束支撑，约束单元为相互连接的 2 块内填水泥砂浆的槽形钢（如图 1-9 所示），通过改变约束单元的截面尺寸，对支撑的耗能行为进行理论分析和试验研究。此后的几年中，日本多名学者先后对槽钢-砂浆套管屈曲约束支撑的套管截面尺寸比例及间隙大小的改变对支撑性能及耐火性能的影响进行了研究^[26~28]。2009 年 Koetaka 等^[29]通过实验研究和理论分析，提出了限制屈曲约束支撑平面外屈曲的设计标准。2012 年 Midorikawa 等^[30]对钢材砂浆板屈曲约束支撑进行了试验研究，研究表明，芯材与外围约束机制间的摩擦力对拉压对称性产生影响，屈曲约束支撑的屈曲模式正比于芯材屈服段的长细比。

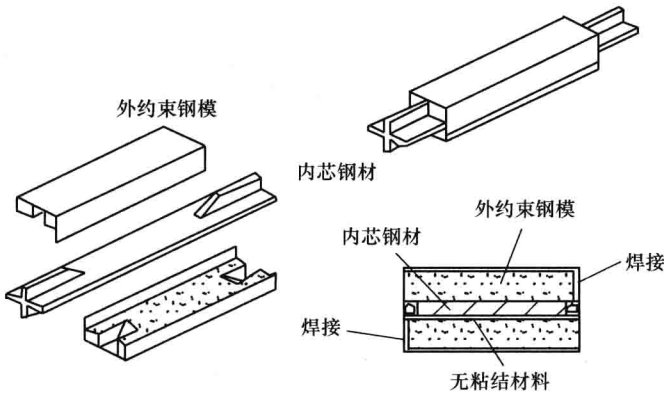


图 1-9 槽钢-砂浆套管屈曲约束支撑

屈曲约束支撑在美国的研究和工程应用起始于 1994 年的北岭地震。1999 年 Clark P. 在加州大学伯克利分校进行了美国历史上的第一次屈曲约束支撑试验，通过低周加载试验，验证了芯材为一字形和十字形截面屈曲约束支撑的滞回性能^[31]。2000 年 Nakamura H. 对芯材截面为一字形和十字形的屈曲约束支撑进行了足尺试验，验证了屈曲约束支撑的抗疲劳性能，并给出了支撑构件的疲劳寿命计算公式^[32]。Black 通过理论分析，对支撑及内核单元的屈曲稳定和弹塑性扭转屈曲进行了研究^[7]。2004 年 Higgins 等人对钢管内填无粘结性材料的大尺寸屈曲约束支撑进行了位移控制加载的性能试验，研究表明支撑性能稳定，耗能效果好，无粘结性材料提供的摩擦阻尼可降低结构水平荷载作用^[12]。2008 年 David J. 等^[33]研制出通过附加镍钛记忆合金（SMA）组件，使支撑体系具有自我复位能力的屈曲约束支撑，并通过试验验证该支撑的自我复位功能和滞回性能的稳定。2013 年 Dusicka, Peter 等^[34]对铝芯和玻璃纤维增强聚合物管组成的超轻型屈曲约束支撑进行

了理论分析和实验研究，研究表明该支撑的总应变可达 4%，质量仅为同类型传统材质的 27%，耗能效果稳定。

2005 年 1 月 AISC（钢结构建筑抗震规定）将由美国钢结构学会和加州结构工程师协会于 2001 年联合撰写的“屈曲约束支撑推荐规定”（Recommended Buckling-Restrained Unbonded Braced Frame Provisions）纳入其中。

表 1-1 给出了国外典型的屈曲约束支撑试件设计参数。可以看出，国外典型的屈曲约束支撑屈服耗能段长度与支撑长度的比值介于 0.55~0.84 之间。其他条件相同的情况下，比值越高，试件的耗能能力越显著。

国外典型屈曲约束支撑试件设计参数^[35]

表 1-1

研制者	芯材截面	屈服段 长度 L_1 (mm)	试件长度 L /mm	L_1/L	外围套管尺寸 (mm×mm×mm)	屈服段面积 (mm ²)
Watanabe (1988) Wada (1989)	一字形	3190	3820	0.84	150×150×4.5	19×90=1710
					150×100×4.5	
					150×100×3.2	
					150×75×4.5	
					150×75×3.2	
Hasegawa (1999)	一字形	1291	2351	0.55	250×250×6	22×130=2860
Iwata (2000)		1296	2351	0.55	210×150×3.2	16×170=2720
Building Center of Japan		3560	4250	0.84	300×300×6	36×250=9000
Building Center of Japan	十字形	3160	4050	0.78	300×300×6	28×250=7000
UC-Berkeley (1999)	一字形	3090	4500	0.69	250×250×6	19×90=1710
		2990		0.66	250×250×6	
UC-Berkeley (1999)	十字形	3450	4500	0.77	300×300×6	19×90=1710
UC-Berkeley (2000)		3410		0.76	300×300×6	

2. 国内研究现状

台湾科技大学的陈正诚教授和台湾大学的蔡克铨教授是我国最早研究屈曲约束支撑及支撑框架结构体系的学者。

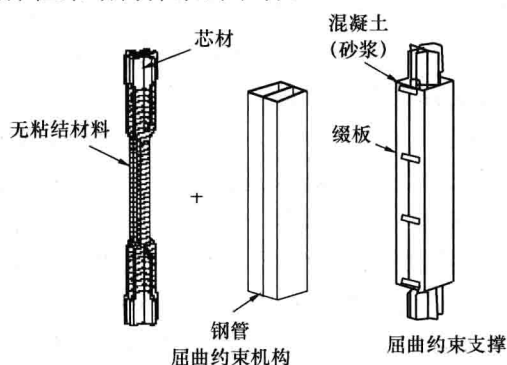


图 1-10 双钢管屈曲约束支撑构造示意图

2001 年陈正诚通过试验研究了低屈服点芯材屈曲约束支撑的滞回特性^[36]，试验表明：试件拉压存在不对称性，抗拉承载力低于抗压承载力。为探索合适的无粘结材料、减少支撑连接段长度和简化连接构造，最大限度的发挥支撑耗能性能，蔡克铨先后在 2002 年^[37]和 2005 年^[38]对双钢管屈曲约束支撑进行了理论分析和低周循环拟静力加载试验，支撑构造见图 1-10。结果证实了此类型屈曲约束支撑优良的滞回

性能和抗低周疲劳能力。

大陆学者对屈曲约束支撑的研究起始于 2005 年,随后开展了一系列的理论和试验研究,并取得了一定的研究成果。

清华大学郭彦林等^[11,39~41]通过对屈曲约束支撑的工作原理及力学性能分析,确定了屈曲约束支撑的构成条件,给出了约束比、芯材宽厚比、间隙变化等参数的合理范围,提出了简化设计方法。程光煜、叶列平等^[42]结合北京通用国际中心等工程实际,通过 7 个屈曲约束支撑试件和 3 个普通支撑试件的对比试验,提出了屈曲约束支撑的端部构造措施。同济大学李国强等^[43~45]通过对国标 Q195/Q235 制作的 TJ 型屈曲约束支撑理论分析和实验研究,给出了支撑的设计构造和内核芯材材性要求,提出了支撑的滞回模型和性能标准,建立了屈曲约束支撑的弹塑性刚度方程。哈尔滨工业大学欧进萍等^[46~49]对内核单元为一字形和十字形的全钢屈曲约束支撑进行了理论分析和试验研究,研究表明:约束比和厚度比、间隙大小、轴向变形等是影响该类型支撑设计的主要因素,全钢屈曲约束支撑构造见图 1-11。北京工业大学高向宇等^[50~55]对屈曲约束支撑的内核截面构造、端部连接机制、外围约束机制等展开了一系列理论分析和试验研究,研究了包括破坏特征、滞回性能、刚度变化规律、耗能及延性等在内的抗震性能,研究表明:连接方式及截面形式均对支撑的抗震性能不产生明显影响。广州大学周云等^[56~58]通过在内核钢管上开孔,使支撑的薄弱部位转移,进而达到定点屈服的目的,比较研究了开孔式钢管屈曲约束支撑与不开孔钢管屈曲约束支撑的构造要求、设计方法及滞回性能等,研究表明:两类屈曲约束支撑的恢复力模型均可采用双线性模型;开孔式屈曲约束支撑不仅能实现定点屈服的目标,而且延性更为优良。

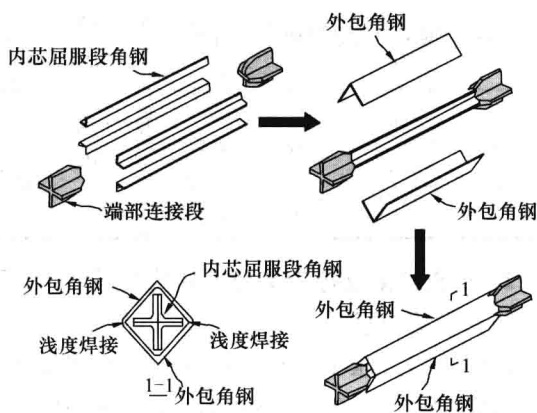


图 1-11 全钢屈曲约束支撑的主要构成

1.1.3 屈曲约束支撑框架结构体系

1. 普通支撑框架体系与屈曲约束支撑框架体系

在普通支撑框架结构体系中,地震作用由支撑和框架组成的体系共同承担,梁柱等主体结构及支撑均有不同程度的损伤,不利于抗震性能目标的实现,并且维护成本较高。而屈曲约束支撑框架结构体系通过屈曲约束支撑内核单元的屈服来耗散地震能量,降低结构振动,使主体结构控制在弹性范围或产生部分的塑性变形。大震作用下,布置合理的屈曲约束支撑框架体系,其主体结构的变形远小于普通支撑框架体系,震后修复费用较低。表 1-2 给出了屈曲约束支撑框架体系、普通支撑框架体系、纯框架体系和其他减震结构体系的技术经济比较^[59]。可见屈曲约束支撑不仅耗能效果好,造价低,而且日常不需维护,大震后建筑仅经简单维修或更换新的支撑即可继续使用。

技术经济统计表 表 1-2

结构类型 \ 比较类别		力学性能		抗震性能	造价	震后维修成本	平时维护情况	需解决问题	
		小震	大震						
框架结构			弹性	塑性	较差	高	高	免维护	不经济
传统支撑框架结构	交叉支撑结构	主体结构	弹性	塑性	较差	低	高	免维护	支撑屈曲失稳
		支撑	弹性	屈曲					
	偏心支撑结构	主体结构	弹性	塑性	一般	较高	较高	免维护	维护难
		支撑	弹性	屈曲					
附加摩擦型阻尼器主体结构			弹性	弹性或塑形（小）	较好	较高	较高	需维护	不美观、需维护
附加黏滞型阻尼器主体结构			弹性	弹性或塑性（小）	好	高	较低	需维护	成本高、耐久性差
屈曲约束支撑框架结构	主体		弹性	弹性或塑性（小）	好	较低	低	免维护	无
	支撑		弹性	塑性					

2. 屈曲约束支撑框架体系研究现状

(1) 抗震试验研究

1999 年 Clark P. 等^[31]通过对三层普通框架与屈曲约束支撑框架的大比例尺对比试验,研究了不同地震波对结构层间位移的影响,研究表明:在相同的地震加速度峰值下,屈曲约束支撑框架的顶层最大层间侧移仅为普通框架的 50%~70%。

为研究框架与支撑的协同工作机理,2002 年 Yamaguchi 等^[60]进行了普通支撑框架和屈曲约束支撑框架足尺动力对比试验。研究表明:普通支撑框架变形较大,框架的屈服变形是结构体系的主要耗能途径,耗能效果很差;屈曲约束支撑框架的变形仅为普通支撑框架的 50%,支撑承担绝大部分的能量耗散。

2006 年 Fahnestock 等^[61, 62]对一四层单跨屈曲约束支撑框架进行了足尺试验,检验了结构在小、中、大震及大震余震下的抗震性能。试验表明:在 25 的延性下结构刚度及强度没有退化趋势。图 1-12 为加载试验及节点连接示意图。

2008 年 Federico 等^[63, 64]结合工程实际(如图 1-13 所示),通过有限元分析和试验对比,研究了屈曲约束支撑-混凝土框架的抗震性能。试验的支撑内核芯材为一字形,约束单元为矩形钢管。研究表明,屈曲约束支撑不仅具有普通支撑的作用,更能增加结构延性,使整体结构具有良好的抗震性能。

2011 年 Di Sarno, L. 等^[65]进行了二层二跨普通框架与屈曲约束支撑框架的足尺对比试验,试验采用位移控制的推覆静态和循环侧向加载,通过结构破坏之前与之后的模态响应,对现有设计准则进行评价。研究表明,屈曲约束支撑框架的等效阻尼比较普通框架增大 50%,结构延性为 4.1。