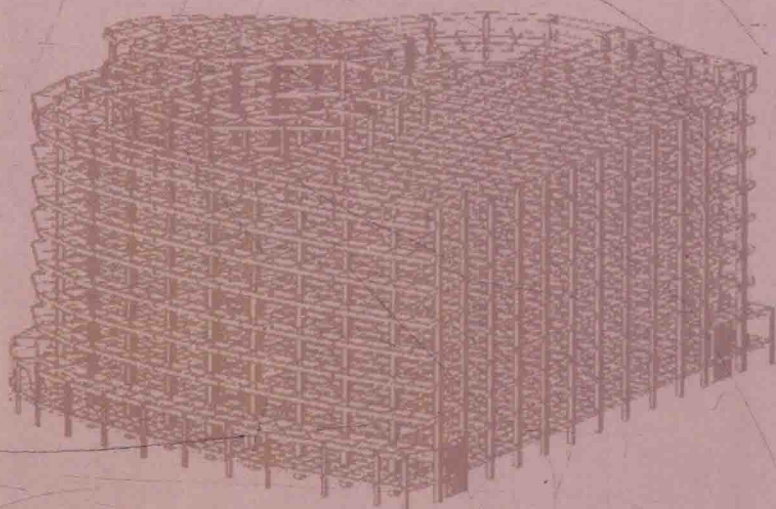


耗能钢支撑及钢板剪力墙结构设计指南

孙飞飞 李国强 宫海 王新娣 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

耗能钢支撑及钢板剪力墙结构 设计指南

孙飞飞 李国强 宫海 王新娣 主编



同济大学出版社

TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

耗能钢支撑及钢板剪力墙结构设计指南/孙飞飞等
主编. --上海: 同济大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5608-6050-3

I. ①耗… II. ①孙… III. ①建筑结构-防震设计-
指南 IV. ①TU352.104-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 247639 号

耗能钢支撑及钢板剪力墙结构设计指南

孙飞飞 李国强 宫海 王新娣 主编

责任编辑 高晓辉 马继兰 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址: 上海市四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 11.5

字 数 230 000

版 次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6050-3

定 价 68.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

耗能减震技术是目前在土木工程中广泛应用的一种减震技术。在我国,近年来发展速度最快的是耗能结构构件技术。耗能结构构件在减震结构中具有双重功能:① 充当结构构件,在正常使用和多遇地震时保持弹性,为结构提供刚度和承载力;② 用作耗能减震构件,在设防地震或者罕遇地震下进入屈服,发挥耗能作用。耗能钢支撑和钢板剪力墙就是具有代表性的耗能结构构件,由于结构构件和耗能减震构件两者功能合一,可以有效减少材料消耗和建筑空间占用,起到节材高效的效果。

同济大学研究的 TJ 屈曲约束支撑和 TJ 屈曲约束钢板墙是新型耗能钢支撑和钢板剪力墙,通过采用高效的屈曲约束机构,既可以完全避免耗能钢支撑和钢板墙在塑性变形耗能过程中发生性能退化,又可以准确控制其初始刚度、屈服位移及屈服承载力,满足不同条件下的结构耗能需求,优化结构的刚度分布、承载力分布和屈服机制,能够提高结构的减震性能和经济性。

屈曲约束支撑和屈曲约束钢板墙在中国已经取得长足的发展,本设计指南主要针对这两类技术的特点及工程应用作出详细的说明,希望能“抛砖引玉”,促进我国耗能减震技术的发展和完善。

本指南和相关技术的研究得到国家“十二五”科技支撑计划课题“新型钢结构民用建筑设计与规模化工程应用技术研究(编号:2012BAJ13B02)”资助。

笔 者
2015.8

目 录

前言

第一篇 TJ 屈曲约束支撑

第 1 章 绪论	3
1.1 TJ 屈曲约束支撑的设计概念	3
1.2 TJ 屈曲约束支撑基本原理	4
1.3 屈曲约束支撑优点	6
1.4 TJ 屈曲约束支撑部分应用实例	7
第 2 章 屈曲约束钢支撑性能与验收标准	14
2.1 屈曲约束支撑性能	14
2.2 芯板材性	16
2.3 低屈服点钢材和普通低碳钢屈曲约束支撑性能对比	18
2.4 屈曲约束支撑验收标准	19
第 3 章 设计方法	21
3.1 支撑布置原则	22
3.2 支撑等效截面面积	23
3.2.1 支撑刚度匹配——模型中等效面积 A_0 与支撑等效面积 A_e 的关系	23
3.2.2 支撑设计——支撑等效面积 A_e 与支撑芯板面积 A_1 的关系	26
3.3 支撑变形控制	26
3.3.1 支撑变形与楼层位移的关系	26
3.3.2 支撑设计位移与支撑检验	27
3.4 支撑承载力	28

3.4.1	设计承载力	28
3.4.2	屈服承载力	29
3.4.3	极限承载力	29
3.5	支撑设计要求	30
3.5.1	风载与小震下承载力要求	30
3.5.2	支撑外套筒抗弯刚度要求	30
3.6	软件实现过程	31
3.6.1	工程概况	31
3.6.2	PKPM 软件屈曲约束支撑设计过程	32
3.6.3	ETABS 软件屈曲约束支撑框架设计过程	40
3.6.4	MTS 软件屈曲约束支撑设计过程	45
3.6.5	MIDAS 软件中屈曲约束支撑框架的设计过程	48
3.6.6	屈曲约束支撑弹塑性分析方法	52
3.7	支撑节点的设计要求	57
3.7.1	螺栓连接	57
3.7.2	焊接连接	59
3.8	支撑的弹塑性滞回模型	59
3.9	延性设计方法	60
3.9.1	延性设计方法的相关原理	60
3.9.2	上海市《高层建筑钢结构设计规程》中延性设计方法的规定	62
第 4 章	工程应用	65
4.1	工程应用模式	65
4.1.1	作为主要抗侧力体系的应用	65
4.1.2	平面不规则结构——抗平面扭转应用	71
4.1.3	竖向不规则结构——薄弱层、加强层及连体应用	73
4.1.4	体育场馆建筑抗侧力体系	77
4.1.5	重型工业厂房抗侧力体系	78
4.1.6	混凝土框架加固	79
4.2	工程应用案例(含初步经济性对比)	82
4.2.1	钢筋混凝土新建项目案例	82
4.2.2	钢筋混凝土加固项目案例	86

4.2.3 钢结构项目案例	93
4.2.4 工业项目案例	99
第5章 TJ 屈曲约束支撑设计示例	106
5.1 TJ 屈曲约束支撑设计示例一(混凝土框架结构)	106
5.1.1 结构概况及针对性方案	106
5.1.2 计算模拟分析	107
5.1.3 BRB 设计	111
5.1.4 屈曲约束支撑施工图	114
5.1.5 屈曲约束支撑深化设计	116
5.2 TJ 屈曲约束支撑设计示例二(钢框架结构)	118
5.2.1 布置与 TJ 屈曲约束支撑选用	118
5.2.2 弹性分析及设计	119
5.2.3 弹塑性分析	119
附录 A 屈曲约束支撑的命名规则	124
附录 B 屈曲约束支撑应用问题与回复	125

第二篇 TJ 屈曲约束钢板墙

第6章 绪论	135
6.1 基本原理	135
6.2 TJ 屈曲约束钢板墙介绍	136
6.3 屈曲约束钢板墙优点	137
第7章 屈曲约束钢板墙性能与验收标准	139
7.1 TJ 屈曲约束钢板墙性能	139
7.2 芯板材料	140
7.3 屈曲约束钢板墙验收标准	140
第8章 设计方法	142
8.1 屈曲约束钢板墙的布置原则	142

8.2	屈曲约束钢板墙的刚度和承载力计算方法	142
8.2.1	初始刚度和承载力(TJ I型屈曲约束钢板墙)	142
8.2.2	初始刚度和承载力(TJ II型屈曲约束钢板墙)	145
8.3	屈曲约束钢板墙的简化设计模型	147
8.4	设计步骤	148
8.5	设计要求	149
8.5.1	风荷载与小震作用下承载力要求	149
8.5.2	屈曲约束钢板墙面外约束板件抗弯刚度要求	149
8.6	软件实现过程	149
8.6.1	工程概况	150
8.6.2	PKPM软件屈曲约束钢板墙结构设计过程	151
8.7	连接节点的设计要求	157
8.7.1	连接节点的设计构造	157
8.7.2	连接节点的承载力设计要求	159
8.8	边界梁的设计要求	161
8.9	计算分析中的弹塑性滞回模型	162
第9章	TJ屈曲约束钢板墙设计示例	163
9.1	结构概况及针对性方案	163
9.2	计算模拟分析	164
9.2.1	定义屈曲约束钢板墙	164
9.2.2	布置屈曲约束钢板墙	166
9.2.3	SATWE计算设置	167
9.2.4	结构整体指标	169
9.3	屈曲约束钢板墙的设计	170
9.3.1	设计参数的提供	170
9.3.2	专业单位的屈曲约束钢板墙设计	171
9.3.3	屈曲约束钢板墙计算书	172
9.4	屈曲约束钢板墙的施工图	172
9.5	屈曲约束钢板墙的深化设计	174

第一篇 TJ 屈曲约束支撑

第 1 章 绪 论

1.1 TJ 屈曲约束支撑的设计概念

结构抗震设防的三原则：“小震不坏、中震可修、大震不倒”。采用 TJ 屈曲约束支撑设防后，可以使建筑结构抗震性能更加优越，实现“小震经济、中震不坏、大震易修和余震不倒”的设防目标。

1. 小震经济

TJ 屈曲约束支撑由于没有受压稳定问题，其在风载与小震下构件承载能力比普通支撑提高 2~10 倍，支撑构件越长，其承载能力提高越多。相同承载力条件下与普通支撑相比，其截面可大大减小，所以结构的抗侧刚度变小，周期相应加大。

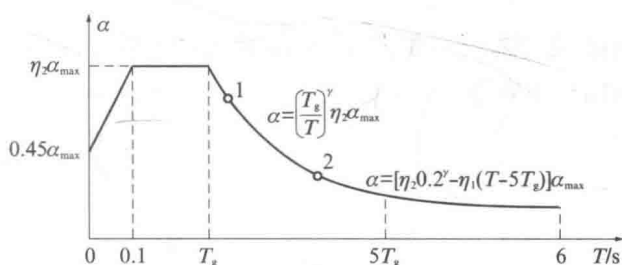


图 1-1 反应谱曲线

根据图 1-1 的反应谱曲线可以看出，结构周期加长，其地震反应就减小，周期由中心支撑方案 1 点增加到屈曲约束支撑方案 2 点，地震反应加速度有很大的降低；采用屈曲约束支撑方案后结构的各阶周期都有增加，所以各阶振型的地震反应都减小，减大幅度一般为 10%~25%。如果结构反应由地震工况控制，地震作用减小后，则所有构件的截面都可以减小，从而可降低结构的整体造价 10%~30%。

2. 中震不坏

TJ 屈曲约束支撑具有明确的屈服承载力，在中震下率先屈服耗能，可起到结构“保险丝”的作用，保护梁柱等重要的主体结构构件在中震下不屈服。此外，对于

一般的中震情况,屈曲约束支撑产生的塑性变形并不大,经过检查后大部分可以继续使用。

3. 大震易修

TJ 屈曲约束支撑在弹塑性阶段工作时,变形能力强、滞回性能好,就如同一个性能优良的耗能阻尼器,比同类结构抵御大震的能力更强,使结构真正做到大震安全。大震后对于发生较大屈服变形的 TJ 屈曲约束支撑也可以方便地更换,不影响建筑使用。而传统的梁端塑性铰耗能破坏,损坏部分的梁拆除时,需要大面积临时支撑楼板或拆除楼板,极大地影响了建筑使用。

4. 余震不倒

随着建筑物重要性的提高,部分建筑不仅要实现大震不倒的基本要求,还需要在地震后的余震中不会倒塌。通过合理布置 TJ 屈曲约束支撑,保护了主体结构不产生过大塑性变形,从而保证竖向承重构件不会在余震中倒塌,建筑物就能实现“余震不倒”的效果,避免发生类似新西兰地震中的破坏。

1.2 TJ 屈曲约束支撑基本原理

支撑可为框架、排架结构提供很大的侧向刚度和承载力(图 1-2),因而在不同结构体系的建筑中应用十分广泛。

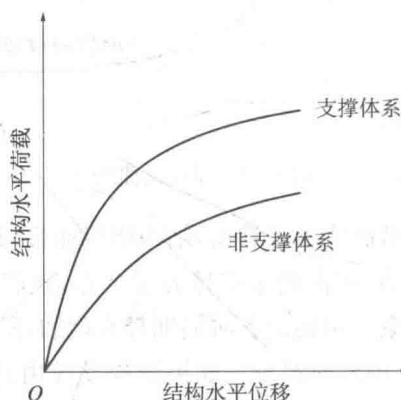


图 1-2 支撑体系与非支撑体系荷载位移曲线对比

但是,普通支撑受压会产生屈曲现象,当支撑受压屈曲后,刚度和承载力急剧降低。在地震或风的作用下,支撑的内力在受压和受拉两种状态下往复变化。当

支撑由压曲状态逐渐变至受拉状态时,支撑的内力以及刚度接近为零,因而普通支撑在反复荷载作用下的滞回性能比较差(图 1-3)。

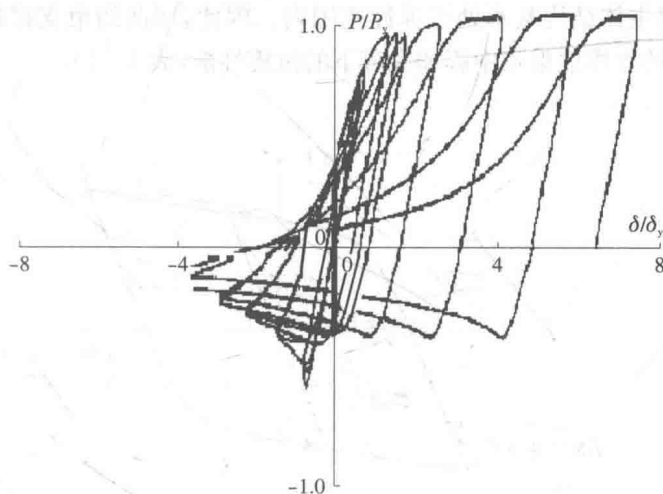


图 1-3 普通支撑试验滞回曲线

为解决普通支撑受压屈曲以及滞回性能差的问题,在支撑外部设置套管,约束支撑的受压屈曲,构成屈曲约束支撑(图 1-4)。

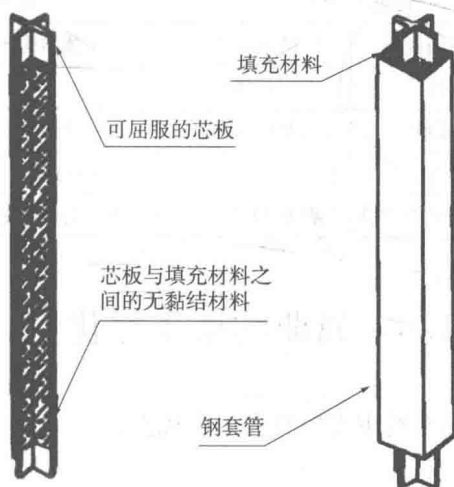


图 1-4 屈曲约束支撑构成原理图

屈曲约束支撑仅芯板与其他构件连接,所受的荷载全部由芯板承担,外套筒和填充材料仅约束芯板受压屈曲,使芯板在受拉和受压下均能进入屈服,因而,屈曲

约束支撑的滞回性能优良(图 1-5)。屈曲约束支撑一方面可以避免普通支撑拉压承载力差异显著的缺陷,另一方面具有金属阻尼器的耗能能力,可以在结构中充当“保险丝”,使得主体结构基本处于弹性范围内。因此,屈曲约束支撑的应用,可以全面提高传统的支撑框架在中震和大震下的抗震性能(表 1-1)。

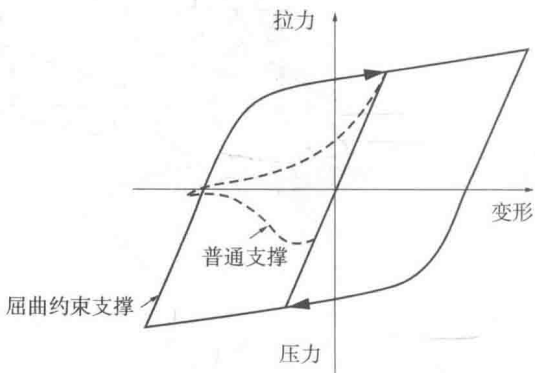


图 1-5 屈曲约束支撑与普通支撑滞回性能对比

表 1-1 屈曲约束支撑框架与普通支撑框架的抗震性能比较

状态	传统支撑框架		屈曲约束支撑框架	
	主体结构	普通支撑	主体结构	屈曲约束支撑
小震	弹性	弹性	弹性	弹性
中震	弹性或塑性	弹性或屈曲	弹性	塑性(耗能)
大震	塑性	屈曲	弹性或塑性	塑性(耗能)
中、大震后	拆除损坏部分,影响建筑使用		检查屈曲约束支撑,更换不影响建筑物使用	

1.3 屈曲约束支撑优点

与普通支撑相比,屈曲约束支撑具有以下优点。

1. 承载力高

抗震设计中,普通支撑的轴向承载力设计值为

$$N_b = \frac{\varphi Af}{1 + 0.35\lambda_n} \tag{1-1}$$

式中 φ ——轴心受压构件的稳定系数;

A ——支撑的截面面积；
 f ——支撑材料强度设计值；
 λ_n ——支撑的正则化长细比，

$$\lambda_n = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \sqrt{\frac{f_{ay}}{E}}$$

λ ——支撑长细比；
 f_{ay} ——钢材屈服强度；
 E ——钢材弹性模量。

抗震设计中，屈曲约束支撑的轴向承载力设计值为

$$N_b = 0.9A_1f_y \quad (1-2)$$

式中 A_1 ——约束屈服段的钢材截面面积；

f_y ——芯板钢材的屈服强度标准值。

2. 延性与滞回性能好

屈曲约束支撑在弹性阶段工作时，就如同普通支撑可为结构提供很大的抗侧刚度，可用于抵抗小震以及风荷载的作用。屈曲约束支撑在弹塑性阶段工作时，变形能力强、滞回性能好，就如同一个性能优良的耗能阻尼器，可用于结构抵御强烈地震作用。

3. 保护主体结构

屈曲约束支撑具有明确的屈服承载力，在大震下可起到“保险丝”的作用，用于保护主体结构在大震下不屈服或者不严重破坏，并且大震后，经核查，可以方便地更换损坏的支撑。

4. 减小相邻构件受力

当支撑为人字形或 V 字形布置时，由于普通支撑受压屈曲，受拉与受压承载力差异可能很大，而普通支撑的截面由受压承载力控制，但支撑受拉时其内力最大可达到受拉承载力，故与支撑相邻构件的内力由支撑受拉承载力控制。如采用屈曲约束支撑，支撑受拉与受压承载力差异很小，可大大减小与支撑相邻构件的内力（包括基础），减小构件截面尺寸，降低结构造价。

1.4 TJ 屈曲约束支撑部分应用实例

1. 钢框架支撑结构

上海世博中心(图 1-6)为中国 2010 年上海世博会四大永久场馆之一，总建筑

面积约 14 万平方米,其中地上建筑面积 10 万平方米,地下室建筑面积 4.2 万平方米,地上建筑由两个单体组成,西侧为会展区,东侧为会议区。会展区南北长约 90 m,东西长约 162 m,地下 1 层,地上 7 层,屋面高度约 39 m。因结构处于 8 度抗震设防区,故在结构关键部位采用 108 根 TJ 屈曲约束支撑构件,起到了大幅降低结构用钢量的良好经济效果。



图 1-6 上海世博中心效果图

山西宾利国际商务公寓(图 1-7)位于太原市小店区,东临人民路,南临先锋街。由两栋百米的双塔构成,建筑造型中西合璧,具有鲜明的时代特征;结构采用钢框架结构体系,建成后成为山西第一座高层钢结构的标志性建筑。因太原市为 8 度抗震设防区域,所以在核心筒部分的钢支撑中采用 54 根 TJ 屈曲约束支撑,一方面起到了增大抗侧刚度的作用,另一方面使结构在大震下具有良好的耗能能力,增强了结构的抗震性能。



图 1-7 山西宾利国际商务公寓效果图

阿富汗 Marriott 五星级酒店(图 1-8)位于阿富汗首都喀布尔,地下 1 层,地上 6 层,采用了屈曲约束支撑框架结构体系,按照美国规范设计。采用 TJ 屈曲约束支撑比采用普通钢结构支撑能使结构地震作用降低 30%,节省了 15%的用钢量。



图 1-8 阿富汗 Marriott 五星级酒店效果图

2. 混凝土框架支撑结构

大量工程实践表明,总层数为 6~12 层的混凝土结构,通常需要增加抗侧力构件,如果设置混凝土剪力墙,会使结构过刚,增加结构配筋,基础费用增加,结构耗能能力较差。通过设置屈曲约束支撑的方法能够使结构刚度合理,既满足变形要求,又不增加配筋,且提高施工速度。

南京禄口国际机场二期项目的主体建筑包含 T2 航站楼、交通中心、停车楼等。其中交通中心建筑面积约 14 万平方米,地下 1 层,地上 7 层,采用混凝土框架+屈曲约束支撑结构体系。该工程长度约 300 m,宽度约 100 m,平面形状较为不规则,并存在楼板大开洞、立面三层缩进 59%,设备层存在竖向转换等多项不规则情况,针对以上情况,在混凝土框架柱间布置屈曲约束支撑约 188 根,改善了结构在小震时的扭转不利影响,满足“小震不坏”的要求;在中震水平下,屈曲约束支撑部分进入屈服,开始发挥耗能效果,少量框架梁端出现塑性铰,框架柱不屈服,达到“中震可修”目标;在大震水平下,屈曲约束支撑绝大部分进入塑性耗能阶段,成为结构的第一道防线,部分框架梁端出现塑性铰,极少量柱端进入塑性发展,整体结构表现出明显的塑性行为,侧向刚度下降,但结构仍具有稳定的抗侧刚度,且结构的层间位移角不大于 $1/50$,满足“大震不倒”的目标,同时屈曲约束支撑形成第一道防线,框架为第二道防线,梁塑性铰早于柱塑性铰出现,形成典型的梁铰机制(图 1-9)。