

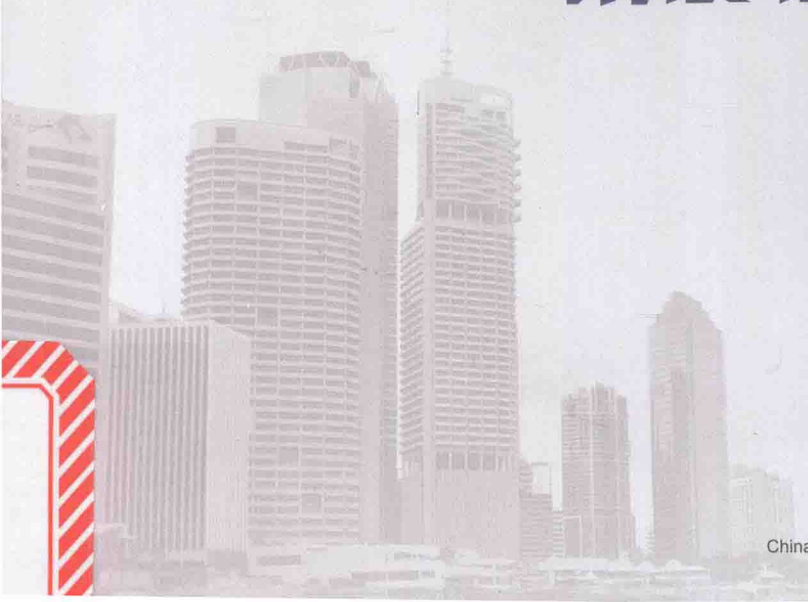


Xinxing Gangjiegou Xiaogaoceng Zhuzhai Kangzhen Xingneng Yanjiu

装配式钢结构住宅体系设计研发基地项目资助
江苏建筑节能与建造技术协同创新中心资助

新型钢结构小高层住宅 抗震性能研究

郭 震 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

装配式钢结构住宅体系设计研发基地项目资助
江苏建筑节能与建造技术协同创新中心资助

新型钢结构小高层住宅 抗震性能研究

郭 震 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要论述了作者提出的一种适用于小高层建筑的短肢组合钢板剪力墙结构体系的抗震性能的试验研究和理论分析方法,同时介绍了近年来国内钢板剪力墙结构研究的最新动态和应用现状。全书共有7章,主要内容为:国内外钢板剪力墙结构最新研究进展;钢框架短肢组合钢板剪力墙低周往复试验研究;组合钢板的抗剪、抗屈曲及耗能性能试验研究;实腹式型钢混凝土异形柱抗震性能研究;钢框架短肢组合钢板剪力墙结构抗震耗能力学模型;钢框架短肢组合钢板剪力墙结构体系的构造优化;钢框架短肢组合钢板剪力墙结构抗震设计建议等。

本书可供高等院校有关专业师生以及从事钢板剪力墙结构设计与研究工作的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

新型钢结构小高层住宅抗震性能研究/郭震著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2016.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3339 - 4

I. ①新… II. ①郭… III. ①住宅—高层建筑—钢结构—抗震结构—研究 IV. ①TU241.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第270116号

书 名 新型钢结构小高层住宅抗震性能研究

著 者 郭 震

责任编辑 陈 慧

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张13.25 字数238千字

版次印次 2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷

定 价 32.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国人口众多,土地资源与建筑密度的矛盾日益突出。从成本控制、建筑安全、高容积率的角度出发,小高层建筑将是缓解当前住房紧张的一种有效建筑形式。为适应大户型、随意分割的需要,适应提高建筑物安全性和结构设计可靠度的需要,新型住宅结构体系的研究与发展势在必行。

本书以小高层住宅建筑的抗震为研究背景,进行了新型钢框架短肢组合钢板剪力墙结构的抗震耗能能力探讨。研究了影响钢框架短肢组合钢板剪力墙结构的抗震耗能的影响因素,提出了钢框架短肢组合钢板剪力墙结构中各组成构件的合理构造形式,最终建立了钢框架短肢组合钢板剪力墙结构的抗震耗能力学模型。本书主要成果有:

(1) 组合钢板剪力墙与钢框架的抗侧刚度比应介于 $0.42 \sim 0.45$ 。对于 $7 \sim 12$ 层小高层建筑而言,此时结构体系具有较好的抗震性能,且动力响应最小。

(2) 钢框架短肢组合钢板剪力墙结构中的组合钢板剪力墙内嵌钢板宽厚比应该在 $400 \sim 500$ 之间。因为对于民用住宅建筑,内嵌钢板宽厚比低于 400 时,钢板材料性能的发挥需要依赖边界约束的可靠性,对外侧防屈曲墙板强度要求也较高;当宽厚比高于 500 时,钢板过薄,初始缺陷不易控制,钢板抗侧刚度及抗剪承载力对结构整体的作用不大。

(3) 基于钢框架短肢组合钢板剪力墙结构力学模型,本书提出了内嵌钢板面外约束墙板设计准则、自由边约束角钢设计公式、内嵌钢板与框架梁柱的高强螺栓设计公式、实腹式型钢混凝土异形柱的混凝土开裂荷载计算公式。

(4) 实腹式型钢混凝土异形柱最小体积配箍率不能小于 0.85% ;

三级框架异形柱轴压比限值为 0.75;混凝土等级不能小于 C30;当柱的轴压比低于 0.5 时,柱腹板加劲肋间高比值可以取不大于 2;当柱轴压比在 0.5~0.75 之间时,加劲肋间高比值对应取 1~0.6。根据试验和数值模拟分析,在满足竖向承载力和侧向刚度的情况下,采用实腹式型钢混凝土柱—组合钢板剪力墙的框架结构体系具有良好的抗震性能和经济性能。从满足结构安全和经济方面,实腹式型钢混凝土柱的构造措施应满足上述要求。同时,实腹式型钢混凝土柱的截面宽度比应控制在 0.4~0.5,高度比应控制在 0.6~0.8。

(5) 采用优化后的结构构造,低于 7 层结构可以提高一个抗震等级使用;高于 12 层的结构若要满足设防烈度级别罕遇地震的抗震要求,应相应提高底层柱的截面面积,或减小短肢组合钢板剪力墙中内嵌钢板的宽厚比,建议取 350~450。根据弹塑性静力分析和动力响应分析结果,相对于 7 层的结构体系,12 层结构的抗侧刚度已下降较多,结构等效周期延长,水平位移量增加。

本书在撰写过程中得到了中国矿业大学袁迎曙教授的悉心指导,以及研究生王永超、张海东、朱飞、卢楠、高芮等人的热情帮助,再次表示深深谢意。

本书得到装配式钢结构住宅体系设计研发基地和江苏建筑节能与建造技术协同创新中心资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在缺点或不足之处,敬请各位专家和广大读者批评指正。

著 者

2016 年 6 月于文昌

目 录

1 绪论	1
1.1 现有钢结构建筑体系与抗震性能研究现状	2
1.2 小高层住宅结构的初步选型	14
1.3 待解决的问题	16
2 钢框架短肢组合钢板剪力墙低周往复试验研究	18
2.1 试验方案	18
2.2 结构抗力过程与破坏特征	24
2.3 结构破坏及极限承载力的机理分析	28
2.4 结构耗能性能初步分析	32
2.5 结构弹性抗侧刚度	35
2.6 结构抗震耗能单元设计改进	35
3 组合钢板的抗剪、抗屈曲及耗能性能试验研究	37
3.1 试验方案	37
3.2 试件抗力过程与破坏特征	42
3.3 试件极限承载能力与耗能能力分析	50
4 实腹式型钢混凝土异形柱抗震性能研究	61
4.1 试验方案	61
4.2 试件抗力过程与破坏特征	64
4.3 试件的滞回特性分析	68
4.4 影响实腹式型钢混凝土异形柱抗震性能的因素	69
4.5 实腹式型钢混凝土异形柱的抗震性能评价	73
5 钢框架短肢组合钢板剪力墙结构抗震耗能力学模型	81
5.1 组合钢板的抗剪与抗屈曲力学模型	81

5.2	组合钢板抗震耗能恢复力模型·····	98
5.3	实腹式型钢混凝土异型柱抗震耗能力学模型·····	105
5.4	钢框架短肢组合钢板剪力墙力学模型·····	125
6	钢框架短肢组合钢板剪力墙结构体系的构造优化·····	133
6.1	结构体系构造设计优化·····	133
6.2	优化后钢框架短肢组合钢板剪力墙结构试验研究·····	139
6.3	优化后组合钢板剪力墙结构体系数值模拟分析·····	147
6.4	钢框架短肢组合钢板剪力墙结构优化体系推覆分析·····	155
6.5	钢框架短肢组合钢板剪力墙结构动力响应数值模拟分析·····	175
6.6	足尺寸结构模型的动力响应数值模拟分析·····	187
7	钢框架短肢组合钢板剪力墙结构抗震设计建议·····	194
	参考文献·····	197

1 绪 论

我国人口众多,土地资源与建筑密度的矛盾日益突出,小高层建筑是缓解当前住房紧张的一种有效建筑形式。

目前我国普通居民住宅基本为 6 层左右,且大量为砖砌体混合结构。这种砖砌体混合结构以砖砌墙体为承重结构,重量大、抗震性能差。

高层建筑虽然具有容积率高的特点,但是在民用住宅建筑中的应用较少,这主要是因为它存在以下几点问题:① 总体建造成本过高,投资方资金收益率低;② 增加火灾发生时的救灾难度(目前我国还没有一套完整的高层救灾措施,如 2010 年 11 月 15 日,上海静安区余姚路的一栋居民楼外部起火,现有消防设备高度不够,无法及时进行扑救);③ 高层建筑抗震设计理论有待进一步完善,现有高层建筑还未经受大震的考验。

因此,从成本控制、建筑安全、高容积率的角度出发,小高层住宅建筑应是今后广泛推广应用的一种建筑形式。随着我国的经济发展,物资短缺的现象已基本结束,节约水泥和钢材的设计思想也正在改变。随着人们生活水平的提高,除对住宅室内环境的高要求外,人们将逐渐认识到住宅结构高安全性的重要性,为适应大户型、随意分割需要,适应提高建筑物安全性和结构设计可靠度的需要,新型住宅结构体系的研究与发展势在必行。

自第二次世界大战后,钢结构建筑在全世界范围内得到广泛的应用。以钢材制作为主的结构体系,是主要的建筑结构类型之一。钢材的特点是强度高、自重轻、刚度大,故用于建造大跨度和超高、超重型的建筑物特别适宜;材料匀质性和各向同性好,属理想弹性体,符合一般工程力学的基本假定;材料塑性、韧性好,可发展较大变形,承受动力荷载;建筑工期短;其工业化程度高,可进行机械化程度高的专业化生产。因此,钢结构建筑广泛用于重型车间的承重骨架、受动力荷载作用的厂房结构、板壳结构、高耸电视塔和桅杆结构、桥梁和库等大跨结构、小高层、高层和超高层建筑等。

因此,本书将以 7~12 层左右的小高层住宅建筑为研究背景,以提高小高层住宅建筑抗震耗能性能为目的,深入探讨和研究适用于我国国情的小高层住宅建筑抗震结构形式。

1.1 现有钢结构建筑体系与抗震性能研究现状

钢结构建筑这里主要是指小高层、高层和超高层建筑。目前用于钢结构建筑物构件的截面形式众多,有工字钢、H 型钢、Z 型轻钢、角钢、槽钢、T 型钢、钢板、方钢管、圆钢管及各类轻型卷边型钢。根据它们各自的截面特征,又与其他材料组成新型的组合结构形式。本章将主要介绍以钢结构为主体的多层和高层民用建筑。

1.1.1 钢结构建筑分类

目前,国内外已建成的钢结构建筑可以归纳为以下 4 类。

(1) 纯钢结构框架体系

以钢框架结构为主要承重体系和抗震结构体系,该体系适应大户型要求、户内分隔灵活、能解决砖砌体混合结构的建筑功能与结构抗震功能的矛盾。

纯钢结构框架体系主要采用 H 型钢或焊接 H 型钢作为主体框架的钢柱和钢梁。国外已有较多以此类结构建成的建筑。

然而,1994 年美国北岭(Northridge)发生的 6.7 级地震和 1995 年日本南部地区的阪神(Hyogoken-Nanbu)发生的 7.2 级地震都导致了焊接钢框架梁-柱节点大范围的脆性破坏^[1]。根据美日两国情况的报导,钢框架破坏主要集中在梁柱混合连接节点上,节点连接部位的脆性破坏先于钢梁形成塑性铰。震后,各国研究人员针对钢框架节点进行了诸多的改良和研究工作。较为成熟的节点形式有:削弱梁翼缘型(Reduced Beam Section, RBS)、边板加强型、腋梁加强型、竖向肋加强型及焊接孔扩大型等节点形式。在水平地震作用下,通过节点改良使结构钢梁先于节点连接部位破坏前形成塑性铰,消耗地震能量。

(2) 钢框架支撑体系

钢框架支撑体系是在纯钢框架柱间设置支撑构件以抵抗水平荷载作用。由于纯弯框架结构较柔,弹性刚度差,为了控制弹性层间位移,有时必须采用超过承载要求的梁、柱截面,且为单一抗侧力体系,其破坏程度较大。因而,由支撑框架结构构成了多重抗侧力体系,支撑成为结构体系抵抗水平荷载的第一道防线。

支撑体系按布置形式主要分为两种:中心支撑和偏心支撑^[1]。中心支撑体系包括十字交叉支撑、单斜杆支撑、人字形或 V 形支撑、K 形支撑。截面形式有:单角钢、双角钢、单槽钢、双槽钢、H 型钢和焊接 H 型钢。中心支撑对钢框架抗侧刚度有较大的提高,能够有效减小层间位移。偏心支撑一般在一端

与梁连接(不在柱节点处),另一端可连接在梁与柱相交处,或在偏离另一支撑的连接点与梁连接,并在支撑与柱之间或在支撑与支撑之间形成耗能梁段。偏心支撑框架的设计原则是强柱、强支撑和弱耗能梁段,即在大震时耗能梁段屈服形成塑性铰,具有稳定的滞回性能,即使耗能梁段进入应变硬化阶段,柱、支撑和其他梁段仍保持弹性。偏心支撑框架弹性阶段的刚度接近于中心支撑框架,弹塑性阶段的延性和耗能能力接近于抗弯框架,是一种性能良好的抗震结构。

近十几年来,国内外研究人员亦对支撑结构进行了多种途径的改良,其主要目的是改善支撑与框架的协同工作性能,优化和增强结构体系的耗能能力。在众多新型耗能支撑中,最具代表性的是 Pall 型摩擦耗能器,这是 1982 年由 Pall^[2] 首先提出的一种单剪型摩擦耗能器,将交叉支撑的交叉处嵌入摩擦制动衬块,利用支撑交叉处的滑动摩擦力做功来耗散输入结构能量。由于单剪型摩擦器容易翘曲或侧向失稳,Pall 又提出了双剪型摩擦器和用于单斜杆拉压支撑的摩擦耗能器。试验证明 Pall 型摩擦器耗能能力优越,滞回曲线呈矩形。类似该型耗能器的还有吴斌、欧进萍等人^[3,4] 提出的 T 形芯板摩擦耗能器。与 Pall 型耗能器相比,中间十字形芯板变为 T 形,只设有一侧摩擦片,减少了安装螺栓和紧固螺栓,构造难度降低。试验结果表明,T 形板耗能摩擦器的滞回特性与 Pall 型摩擦器相同,不受支撑屈曲力的影响。

除上述两种用于支撑的耗能器外,还有吴斌、欧进萍^[5] 提出的拟粘滞摩擦耗能器,陈宗明等人^[6] 提出的摩擦剪切铰耗能器,Gong^[7] 提出的二阶摩擦耗能器,赵川等人^[8] 提出的钢板—橡胶摩擦耗能器及 Mualla^[9] 提出的夹板转动摩擦耗能器等。这些摩擦耗能器主要安装应用在交叉支撑的交叉处、人字支撑的交点与梁底处、支撑的端部与框架节点处。在所有的这些应用中,都是使用对角斜支撑或 V 形支撑将耗能阻尼器的控制力传递给主体结构^[10]。显然,这样的结构形式源于钢结构的柱间支撑体系。到目前为止,不论是理论研究还是实验研究,耗能系统的安装仅限于上述两种形式^[11]。

另外,部分研究人员将柱间支撑直接使用各类耗能阻尼筒代替,日本 Sumitomo 金属公司基于铁道合金的阻尼装置开发了摩擦筒制振器^[12]。摩擦阻力由带有石墨楔的铜合金摩擦板和钢管内表面相互摩擦而产生。Aiken 等^[12] 进行了装有摩擦制振器的 9 层三跨钢结构框架的模型振动台试验研究,该装置已被用于日本的 3 幢建筑中,即坐落在 Omiya 市的 31 层 Sonic 市政办公大楼(该建筑为钢结构框架预制混凝土板填充墙体系,于 1988 年建成,安装了 240 个阻尼器),东京市的 Asahi Beer Azumabashi 建筑(该建筑为 22 层钢框架支撑体系,于 1989 年建成,安装了 80 个阻尼器)和东京市的一幢 6 层钢筋混凝土隔震

建筑。

为防止传统支撑受压超过允许强度时很容易屈曲,一些学者提出一种受压时不易屈曲的轴力构件,一般称它为防屈曲钢支撑阻尼器^[13]。典型的防屈曲钢支撑阻尼器由三部分组成:承受大部分轴力的内芯耗能部分、有侧向约束作用的钢管混凝土和减小摩擦阻力的无黏结材料^[14,15]。内芯耗能部分可以用各种类型的钢结构断面,比较典型的是十字形钢芯。

(3) 钢板剪力墙结构体系

① 钢板剪力墙结构体系的发展及应用

钢板剪力墙的应用始于 20 世纪 70 年代^[16]。早期的钢板剪力墙设计以弹性屈曲为极限状态,为防止钢板屈曲失稳并获得较大的结构抗侧刚度和抗剪承载力,钢板通常较厚^[2,17,18]。从受力的特点上来看,这类钢板剪力墙具有较大的面外刚度,抗屈曲性能较高,然而由于它们用料过多、施工不便、经济性差等原因导致其推广较难。

Basler^[19]认为薄板剪切屈曲后可以重新提供后继强度。Thorburn 等人^[20]于 1983 年首次利用屈曲后强度理论对薄型钢板进行了理论分析,Timler 和 Kulak^[21]也利用试验手段验证了屈曲后强度理论,见图 1-1。这些成果为研究无侧向约束钢板剪力墙的抗剪承载力、延性及滞回特性奠定了基础,近年的研究结论表明:非加劲薄钢板剪力墙能够提供足够的耗能能力,并且具有较好的经济性^[22]。但是,薄板屈曲后形成的斜向对角拉力给梁柱构件增加了附加弯矩,不利于梁柱延性的发挥,较小的地震能量就可能使钢板发生严重的面外屈曲,影响建筑使用。

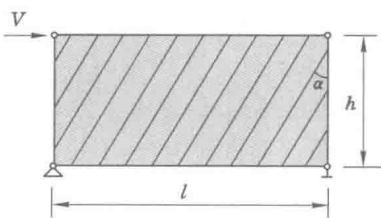


图 1-1 四边约束薄钢板屈曲后拉力带

目前在北美和日本等高烈度地震区已建成几十栋以钢板剪力墙为抗侧构件的钢结构建筑^[23-24]。

日本的第一幢钢板墙建筑是位于东京的日本钢铁公司 Shin Nittetsu Building(20 层,1970 年),它是世界上第一幢钢板剪力墙结构体系的建筑物。该建筑横向采用了由五榀 H 形钢板墙组成的抗侧力体系:钢板尺寸约为 3 700 mm×2 750 mm,纵横方向均设置了槽钢加劲肋,钢板厚度 4.5~12 mm 不等,与周边

框架焊接,钢板两侧外包 50 mm 厚防火材料^[25]。

在美国,德州达拉斯的 Hyatt Regency Hotel(30 层,1978 年)也是以钢板墙作为水平抗侧力体系的代表性建筑^[26]。该建筑整体平面呈弧形,且建筑立面由多个高度不同的部分组成。长轴方向采用钢框架-支撑体系,短轴方向采用钢板墙。采用钢板墙方案主要基于以下三个原因:① 建筑方面,减小构件截面,节省使用空间,避免柱间支撑造成空间不易灵活布置;② 施工方面,钢框架-混凝土剪力墙结构体系需要较长的混凝土养护周期,对整个工程的进度都有影响,也相应造成资金回笼较慢;③ 经济性,经分析比较,钢板墙体系比采用钢框架结构体系耗钢量大约减少 1/3。

位于日本神户地区,于 1988 年建成的一幢采用钢板剪力墙结构的 35 层建筑经受了 1995 年阪神大地震的考验,且表现出了良好的抗震性能^[27]。研究人员在震后的调查中发现,该建筑物未出现任何明显的结构破坏,仅在 26 层发生了加劲钢板墙的局部屈曲;屋顶部位在正北、正西方向的侧移分别只有 225 mm 和 35 mm。而紧邻其前的八层钢筋混凝土建筑,其中一层被压扁,上部三层整体坍塌并水平滑出较大距离。

1971 年,在 San Frenando 地震后,美国兴建了六层的 Sylmar County Hospital,用来取代在地震中严重损坏的 Olive View Hospital。该建筑底部两层为钢筋混凝土剪力墙,上部四层采用了钢板墙结构体系。在 1994 年 Northridge 地震中,楼内的记录装置显示的数据表明,顶部最大加速度达到 $1.71g$,最大速度也达到 140 cm/s,由此产生的基底剪力是设计值的数倍。然而对该楼的震害调查发现,主要受力构件并没有出现破坏,仅有钢板四周一些焊缝出现微小裂纹^[28]。

② 钢板剪力墙的分类

a. 按钢板剪力墙的厚度分类

按内嵌钢板宽厚比的大小,钢板剪力墙可分为厚钢板剪力墙和薄钢板剪力墙两种^[16]。

厚钢板剪力墙,宽厚比通常小于 250。它有较强的弹性平面内刚度,具有良好的延性及稳定的滞回性能。厚板剪力墙通过全截面抗剪来承担水平侧向力,一般不发生局部屈曲,它与普通钢筋混凝土剪力墙的工作原理一致,对周边框架梁柱的依赖程度小。厚板剪力墙通常宜采用低屈服点钢材。厚板墙的最大缺点和制约其广泛应用的原因是耗钢量大及成本高。

薄钢板剪力墙,宽厚比通常大于 250。由于其宽厚比较大,在较小的侧向力情况下,易发生局部屈曲;当侧向力不断增加时,钢板剪力墙在对角线方向形成斜向拉力带;拉力带锚固在钢板墙边缘梁柱框架上,对柱会产生附加弯矩。因此

在设计薄钢板墙时对其周边构件要适当加强,以保证钢板墙拉力带充分发挥作用。另外,从耗能能力方面讲,薄钢板剪力墙的屈曲行为,造成其滞回曲线有捏缩现象,不如厚钢板墙滞回曲线饱满。

b. 加劲和非加劲钢板墙

加劲钢板墙的设计原理是利用不同形式的加劲肋延缓钢板的屈曲,提高钢板的极限承载力及延性性能。对薄钢板墙,可以通过设置加劲肋以改善其受力性能及延性。加劲肋有多种形式,如十字或井字形布置的加劲肋,对角交叉加劲肋和门、窗洞边加劲肋等。设置加劲肋的最大优点是提高薄板的弹性刚度,并使其在弹塑性范围内具有稳定饱满的滞回曲线,克服薄钢板滞回曲线的“捏拢”现象。

c. 开缝钢板墙

受混凝土开缝剪力墙的启示,日本学者提出了开竖缝钢板墙结构体系,并已经在一些实际工程中得到应用^[28]。开竖缝墙具有如下优点:通过调整竖缝的间距、长度等,可以方便地改变单个墙体的刚度;钢板只与梁连接,对柱不产生附加弯矩,符合强柱弱梁的抗震理念,塑性和滞回性能较好^[29]。

国内郭彦林及缪友武^[30,31]对两侧开缝的钢板剪力墙进行了研究,并利用有限元方法对其非加劲、两侧加劲、和全加劲^[32,33]形式的弹性屈曲性能和弹塑性屈曲性能进行了全面分析,为两侧开缝钢板剪力墙的深入研究打下基础,同时为其设计应用提供了有益的参考。

d. 组合钢板墙

组合钢板墙是在钢板一侧或两侧现浇钢筋混凝土墙板层,两种材料用抗剪螺栓固定,基于钢板两侧混凝土层抑制钢板屈曲,保证钢板能够剪切屈服而提出的^[18]。根据钢板两侧混凝土墙体与边缘框架的连接方式不同,可以分为“传统型”和“改进型”组合钢板墙。“传统型”组合墙,是指混凝土墙体与周边的钢结构框架整浇,两者之间无缝隙,共同抵抗水平侧向力。缺点是,混凝土墙板抗剪强度低,在较小的层间位移下,可能较早地发生破坏而退出工作;另外,梁柱相对变形也对混凝土墙板造成较大的挤压破坏。“改进型”组合墙与“传统型”组合墙最大的差异是:混凝土墙板与边缘框架间预留一定的缝隙,且混凝土墙体与内嵌钢板间有滑动冗余。在较小的水平位移下,混凝土墙体不直接承担水平侧向力,仅作为钢板的侧向约束,来防止钢板发生面外屈曲变形,因此它对整体平面内刚度和承载力的贡献可忽略不计。随着水平位移的不断增加,混凝土墙板逐渐与边缘框架接触,与钢板协同工作,为结构提供一定抗侧刚度。试验结果显示^[34],“改进型”组合墙的塑性变形能力要优于“传统型”组合墙,混凝土墙板的破坏程度也小于“传统型”组合墙。因此,“改进型”组合钢板墙具有以下几个特点:混凝

土墙板作为侧向约束抑制了内嵌钢板的面外屈曲变形,提高了钢板的屈曲强度;普通混凝土剪力墙在往复荷载作用下会因受到交叉剪力的作用,墙体破坏严重,使结构总刚度和承载力退化严重,而内嵌钢板则可以作为混凝土墙体破坏后的第二道防线,避免结构的刚度和承载力下降;混凝土墙板可以起到对内嵌钢板的防火保护作用,同时也能够为建筑物提供隔温、隔音等作用。

e. 低屈服点钢板墙

如前所述,厚板剪力墙一般先屈服、后屈曲;薄板剪力墙则先屈曲、后屈服。有时为了提高钢板墙的耗能能力及延性,钢板墙也采用低屈服点材料($f_y = 100 \sim 165 \text{ MPa}$)^[35]。此时,为了满足结构刚度要求,低屈服点钢板墙均采用较强的加劲肋予以加强;也可以通过改变板厚来满足不同的设计承载力及初始刚度要求。低屈服点钢板墙上还可以开一些圆形洞口,这样,不但可以调整钢板墙的刚度,也方便设备管线的通过。低屈服点钢板具有更加优良的滞回性能、更长的低周循环疲劳寿命和更好的可焊性等优点。因此,低屈服点钢板墙也可以作为耗能器元件使用,但这时它无法给结构提供足够的侧向刚度。

③ 薄型钢板剪力墙的研究现状

目前,针对钢板剪力墙的研究重点是考虑钢板屈曲后强度利用的薄型(非加劲)钢板剪力墙体系。

在单向受剪情况下,无加劲肋的厚型钢板剪力墙以材料的屈服作为非线性特性,而无加劲肋薄型钢板剪力墙的非线性特征与厚型钢板剪力墙不同,其先发生面外屈曲,在对角线方向形成的一组平行拉力带先后形成材料屈服,因此,具有明显的几何非线性和材料非线性。

按照典型薄板理论,在水平力的剪切作用下,非加劲板弹性屈曲强度很低,且随板宽厚比的增加而降低。当宽厚比较大时,其弹性屈曲强度远低于钢板的屈曲后强度,因此可以忽略不计。板主要以一组斜向平行拉力带的形式发挥材料特性。同时,非加劲板较早的屈曲变形,使得结构在加载初期的初始刚度很小。Sheng-Jin Chen^[35]在进行低屈服点钢板墙往复荷载试验时发现,利用低屈服点钢板的屈曲后刚度和合适的钢板宽厚比可以将钢板的刚度变化控制在弹塑性范围,而不会出现突变;随着宽厚比的增加,钢板提供的初始刚度也不断下降,因为板越来越薄,面内刚度减小;当钢板与周边构件为刚性连接时,比较接时的刚度也有较大的提高。值得注意的是,当宽厚比从 200 减小到 100 时,结构的极限强度和极限变形并未提高很多,几乎可以忽略,但是耗能能力却提高 1.6~1.7 倍。

钢板剪力墙通常为矩形板,S. T. Smith^[36]等人利用瑞利-利兹(Rayleigh-Ritz)原理对单纯矩形钢板进行了剪切弹性屈曲分析。研究结果表明,不

论钢板采用两边约束还是四边约束,自身的宽厚比是决定了其在受剪切作用下屈曲失稳的关键。然而,M. M. Alinia 和 M. Dastfan^[37,38]认为钢板周边构件的剪切刚度可以极大地提高钢板弹性屈曲强度,但是对钢板的屈曲后强度没有影响。另外,框架结构的弯曲刚度与钢板的弹性剪切屈曲强度或极限强度没有关系,梁柱的节点形式对钢板的力学行为没有影响。这一点也在 M. M. Alinia 和 M. Dastfan 的研究中得到证实^[39]。

由于薄钢板的初始平面外的翘曲是不可避免的,使得框架内钢板的压应力可以忽略,仅考虑其受拉。而对于长细比较小的钢板,其平面内的压应力不可忽略。所以,薄钢板和厚钢板的受力机理是不同的。对于薄钢板可以简化成交叉布置的斜拉带,从而形成斜拉场受力机理。另外从利用钢板的塑性耗散地震能量考虑,钢板的长细比不宜太小,大于 800 较适宜^[40]。

薄型(非加劲)钢板剪力墙具有良好的延性,在初期的侧向荷载作用下极易发生屈曲,与有加劲肋薄钢板或厚钢板相比,其耗能能力有所不及,但作为非高层建筑是有着广泛的应用前景的^[41]。薄型(非加劲)钢板剪力墙的延性及耗能能力与钢板的宽厚比及钢板与周边构件连接形式有很大关系。

在有抗震设防要求的地区,采用薄钢板剪力墙作为抗侧构件的方案是可行的。通过合理的设计,在遭遇常遇地震作用或风荷载时,钢板不会产生不可恢复的永久性变形;在遭遇罕遇地震时,钢板屈曲后的塑性变形能够吸收地震能量或是耗散地震能量,作为结构的第一道防线,可以有效地避免其他构件的破坏^[40]。

S. Sabouri-Ghomi 和 M. Gholhaki^[42]在针对钢板剪力墙的延性研究过程中发现,钢板与周边构件刚结时延性比为 6.6,铰接时其延性比为 8.4,但是固结时的耗能能力却比较接时提高近 50%。说明钢板与周边固结时可以充分发挥其材料的特性,因为周边固结使钢板更能充分利用屈曲后强度,滞回性能良好。Driver 和 Kulak 在 Alberta 大学进行的四层钢板剪力墙低周往复试验也证实这一点^[43],值得关注的是,试验发现顶层的钢板剪力墙更易屈曲,而底层的柱脚翼缘却会在底层钢板剪力墙屈曲前发生破坏。

因此,陈国栋与郭彦林等^[44]在进行钢板剪力墙低周反复荷载试验研究时指出,对于薄型钢板剪力墙的设计,边缘构件不得先于钢板墙本身的破坏才能充分发挥钢板墙的水平抗侧力,即不允许出现框架柱或梁的整体失稳和局部屈曲。

(4) 型钢混凝土组合结构体系

型钢混凝土结构是将钢材抗拉特性和混凝土抗压特点相结合的一种新型结构构件形式。

① 型钢混凝土结构的特点

型钢混凝土组合结构是在混凝土内配置型钢(轧制或焊接成型)和钢筋的一

种组合结构形式^[45],日本称为钢骨混凝土结构(Steel Reinforced Concrete)^[46],欧美国家称之为内置钢混凝土结构(Steel Encased Concrete)^[47],前苏联则称其为劲性混凝土结构^[48]。我国自 20 世纪 80 年代开始研究钢与混凝土组合结构,对于这类形式的组合结构称为型钢混凝土组合结构(简称为 SRC 结构),相应设计规范也采用这种命名^[45]。

SRC 结构内置的钢构件可有空腹式和实腹式两种。实腹式型钢的腹板提高了 SRC 结构的抗震性能,而空腹式 SRC 结构的抗震性能稍差,但是施工方便。目前所建造的组合式结构中多以实腹式型钢混凝土结构为主,内置钢骨既可以是轧制型钢构件,也可以由钢板焊接而成。图 1-2 为目前较为常用的实腹式型钢构件截面形式。

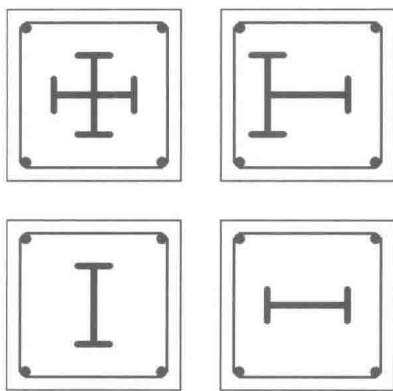


图 1-2 型钢混凝土构件典型截面形式

与钢筋混凝土结构相比,SRC 结构由于配置了核心型钢,其刚度和承载力较前者有显著提高;同时,在型钢混凝土结构中,型钢能对其核心区的混凝土起着很强的约束作用,可以有效地改善混凝土的脆性性质,增加构件的延性和耗能性能,因此抗震性能也大大提高,更加适应于高层、超高层特别是地震区的高层、超高层建筑。

与钢结构相比,型钢混凝土结构由于有外包混凝土的包裹作用,其刚度较前者大为增加,有利于控制结构的变形和振动;同时由于型钢处在混凝土的有效包围当中,可以大大减少其发生局部屈曲的可能,使钢材的强度能得以充分发挥;另一方面,与钢结构相比,型钢混凝土结构能有效节约钢材,据统计,采用型钢混凝土结构,一般可比纯钢结构节约钢材达 50% 以上。此外,外包混凝土增加了结构的耐久性和耐火性,克服了钢结构的致命弱点。

由于型钢的存在,当试件的承载力下降到最大承载力的 60% 左右时,能在维持该承载力基本不变的情况下,继续承受反复荷载的作用,塑性变形不断增大

而不至于立即倒塌,具有明显的二道设防的功效,这对于抗大震是非常有益的^[49]。

目前,针对普通型钢混凝土柱的抗震性能主要集中在轴压比、低周往复荷载作用下耗能能力的研究。

日本对 SRC 结构的抗震性能进行过大量的试验研究^[50,51]。已有的研究结果表明,轴压比仍是控制 SRC 结构抗震性能的主要因素。高轴压比下, SRC 柱的刚度退化明显,延性及耗能能力具有较为明显的降低现象。虽然其具有较高的承载能力,但是从保证 SRC 柱具有较好的延性及耗能能力的角度,仍旧需要对其轴压比进行限制,相应的研究成果也较多^[52-57]。

② 国内外型钢混凝土结构的工程应用

日本型钢混凝土结构的研究和应用起源于 20 世纪初。该结构形式开始主要是作为护墙结构形式由欧洲传入日本,而且钢骨外包为石墙。直到 1918 年,内田祥三设计的旧东京海上大楼(地上七层),则在柱和大梁构件中大规模采用 SRC 结构,而且型钢外包钢筋混凝土,具有了现代意义上的型钢混凝土结构。在 1921 年,内藤多仲设计建成的日本兴业银行则经受了 1923 年的关东大地震而几乎没有破坏,也使 SRC 结构建筑得到广泛的认可。1978 年宫城县冲发生地震后,在调查的 95 栋型钢混凝土建筑中,仅有 17 栋发生主体轻微破坏。20 世纪 30 年代至 60 年代日本的型钢混凝土以空腹式配钢为主,70 年代以来以实腹式配钢为主要形式。在 1981 年至 1985 年间,日本建造的六层以上建筑,型钢混凝土结构房屋数量已占据较高的比例,约为 45.2%;建筑面积已占总建筑面积的 62.8% 左右;在 10~15 层的高层建筑中,型钢混凝土结构的数量接近 90%;16 层以上的超高层建筑中,型钢混凝土所占比例也已达到 50%;同时,在以纯钢结构为主体的高层建筑中,底部几层也多采用了 SRC 结构^[58]。在日本 1995 年 1 月的关西大地震中,钢筋混凝土结构占建筑物倒塌和严重破坏的 55%,钢结构约为 38%,而 SRC 结构及其钢-SRC 混合结构仅占总数的 7%,也进一步验证了 SRC 结构的良好抗震性能^[59]。

英国在 1904 年为了提高建筑物内钢柱的耐火性能而将其埋置于混凝土内,从而产生了世界上最早的型钢混凝土柱。随后,欧美各国开始了对这种新型结构的研究与应用。美国达拉斯 72 层的第一国际大厦总高达 726 m,采用了型钢混凝土框架结构。休斯敦 49 层的第一城市大楼(高 207 m)和休斯敦 79 层的得克斯商业中心大厦(305 m),也均为型钢混凝土外框架和型钢混凝土内筒结构。休斯敦 52 层的海湾大楼(高 221 m),采用了型钢混凝土柱-钢梁框筒结构。澳大利亚悉尼款特斯中心(高 198 m),则采用钢筋混凝土内筒,型钢混凝土外柱。新加坡 55 层的财政大楼(242 m),采用型钢混凝土核心