

王先铁
马尤苏夫

著

方钢管混凝土框架内置开洞钢板 剪力墙的性能与设计方法



科学出版社

方钢管混凝土框架内置开洞钢板 剪力墙的性能与设计方法

王先铁 马尤苏夫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了作者在方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的理论、试验研究和设计方法方面的创新性成果。全书共 6 章, 主要内容包括: 绪论、方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的抗震性能试验研究、受力性能、边缘构件设计方法和抗剪承载力计算, 以及钢板剪力墙的典型工程应用。

本书可供土木工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校的教师、研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的性能与设计方法 / 王先铁, 马尤苏夫著. —北京: 科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052322-8

I. ①方… II. ①王… ②马… III. ①钢管混凝土结构—框架结构—框架剪力墙结构—研究 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 052805 号

责任编辑: 亢列梅 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 312 000

定价: 95.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

中国是一个多地震国家,近年来地震灾害频发,给人民生命财产造成了巨大损失。在地震中,造成人员伤亡和经济损失的最主要因素是建筑物倒塌及其引起的次生灾害,因此对建筑结构采取抗震措施并进行抗震设计尤为重要。随着社会经济和科学技术的发展,高层及超高层建筑越来越多,其抗震问题更加突出。作为结构工程领域的一个重要方向,高层建筑结构的抗震研究已经受到众多土木工程研究者的关注和重视。王先铁教授在总结前人研究工作的基础上,提出在高层建筑结构中采用“方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙”,这种剪力墙结构抗侧刚度大、延性好,并且耗能能力强。王先铁教授为高层建筑设计提供了一种可选择新型抗侧力体系,其研究工作很有意义。

王先铁教授在博士学习阶段和博士后研究阶段,对方钢管混凝土框架及其梁柱节点的受力性能 and 设计方法进行了研究,为方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙结构的研究奠定了坚实的基础。2010年开始,他又先后完成了方钢管混凝土框架内置不同加劲形式和开洞形式钢板剪力墙的试验研究和理论分析,本书就是在这些成果的基础上完成的。全书共6章,包括绪论、方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙的抗震性能试验研究、受力性能、边缘构件设计方法与剪力墙抗震承载力计算,以及钢板剪力墙的典型工程应用等。全书内容丰富、结构严谨、论述翔实,具有较强的理论性和实用性,为设计人员进行方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙结构设计提供了可靠依据。

王先铁教授2015年入选中组部第12批“西部之光”访问学者计划后,从西安建筑科技大学来到重庆大学,在我带领的钢结构工程研究中心进行了为期一年的访问学者研究工作。在我的鼓励下,他对从事的研究工作进行了总结、梳理和完善,遂成此书。我为王先铁教授取得新的进步感到由衷的喜悦。

中国工程院院士

重庆大学 教授

周绪红

2017年4月16日

前 言

自 20 世纪末以来, 高层建筑在我国得到了迅猛发展。随着建筑高度的增加, 水平荷载和地震作用对建筑的影响越来越显著。钢板剪力墙作为一种经济、高效的新型抗侧力构件, 自 20 世纪 70 年代以来受到研究者的关注, 尤其是近十余年, 国内外研究者开展了较为广泛而深入的研究。钢板剪力墙抗侧承载力高、侧向刚度大、延性和耗能性能好。实践表明, 钢板剪力墙在历次地震中表现出优异的抗震性能。方钢管混凝土柱以其优异的力学性能、良好的经济性、施工性能和建筑适用性在高层建筑结构中得到了越来越广泛的应用。方钢管混凝土框架与钢板剪力墙组合形成的方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙结构, 能满足钢板剪力墙对竖向边缘构件较高的强度和刚度需求, 可充分发挥二者优异的结构性能, 具有广泛的应用前景。国内外研究者对采用型钢竖向边缘构件的钢板剪力墙开展了大量的研究工作, 取得了诸多成果, 但对方钢管混凝土柱作为竖向边缘构件的钢板剪力墙研究较少, 对方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的研究更少。本书主要介绍作者在方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙结构性能 and 设计方法方面开展的研究工作和取得的研究成果。

本书第一作者自 2003 年开展方钢管混凝土组合结构方面的研究工作, 在攻读博士学位和博士后阶段进行了一系列方钢管混凝土梁柱节点和方钢管混凝土框架受力性能及设计方法的研究, 主要包括不同形式方钢管混凝土梁柱节点的抗震性能、受力机理和破坏机制, 以及采用穿芯高强螺栓-端板节点的方钢管混凝土框架抗震性能。自 2010 年进行方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙结构的研究, 完成了方钢管混凝土框架内置不同加劲形式和开洞形式钢板剪力墙的试验研究和理论分析。本书主要介绍第一作者及研究团队近 7 年来的研究成果。

全书共 6 章, 主要内容包括: 绪论、方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的抗震性能试验研究、受力性能、边缘构件设计方法和剪力墙抗剪承载力计算, 以及钢板剪力墙的典型工程应用。本书可供土木工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校的教师、研究生和高年级本科生参考使用。

作者自 2001 年开展结构工程方向的研究工作以来, 得到了西安建筑科技大学郝际平教授的关心与指导, 在此深表感谢! 2015 年, 作者入选中组部第 12 批“西部之光”访问学者计划, 师从著名结构工程专家、中国工程院周绪红院士开展研究工作。在周院士的鼓励 and 指导下, 作者开始整理近年来的研究成果, 遂成本书。周绪红院士悉心指导作者制订本书大纲, 对书稿提出了宝贵的意见和建议, 在此

致以诚挚的谢意！感谢西安建筑科技大学土木工程学院牛荻涛教授、史庆轩教授、朱丽华教授、苏明周教授和重庆大学钢结构研究中心各位老师在本书撰写过程中给予的支持、鼓励和帮助！

本书大纲的制订由王先铁负责，全书统稿由王先铁和马尤苏夫共同负责。作者指导的研究生对本书所论述内容做出了重要贡献：储召文、周超参与了第2、5章的部分研究工作，杨航东参与了第2、3章的部分研究工作，罗遥、白连平参与了第4章的部分研究工作，刘立达、王东石、贾贵强参与了第3章的部分研究工作。在此，作者向对本书研究工作提供无私帮助的各位研究生表示诚挚的感谢！

本书的出版得到了国家自然科学基金项目（51108369）、教育部高等学校博士学科点科研基金项目（20116120120008）、中国博士后科学基金项目（20080431230）、陕西省自然科学基金项目（2010JQ7001）、陕西省青年科技新星科研项目（2013KJXX-54）等的资助，特此致谢！

作为一种新型结构形式，方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙的相关研究工作还需要继续深入，其设计理论和设计方法还需要进一步完善，作者期待本书的出版能对该结构的研究和应用提供一定的参考。

由于作者水平和知识有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2016年12月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 剪力墙的分类	1
1.1.1 钢板剪力墙	1
1.1.2 组合剪力墙	4
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 非加劲钢板剪力墙的研究现状	5
1.2.2 加劲钢板剪力墙的研究现状	6
1.2.3 开洞钢板剪力墙的研究现状	7
1.2.4 组合剪力墙的研究现状	9
1.3 钢板剪力墙的应用与发展	10
1.3.1 钢板剪力墙的应用	10
1.3.2 钢板剪力墙的发展	12
1.4 本书的主要内容	12
参考文献	13
第 2 章 方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的抗震性能试验研究	18
2.1 试验设计	18
2.1.1 试验目的	18
2.1.2 试件设计与制作	18
2.1.3 材料力学性能	21
2.2 试验方法	23
2.2.1 试验装置及加载方案	23
2.2.2 测量装置	26
2.3 试验现象	30
2.3.1 未开洞钢板剪力墙(试件 SPSW-BS)	30
2.3.2 中部开洞钢板剪力墙(试件 SPSW-CO)	32
2.3.3 单侧开洞钢板剪力墙(试件 SPSW-SO)	35

2.3.4 两侧开洞钢板剪力墙 (试件 SPSW-BSO)	38
2.4 试验结果分析	40
2.4.1 滞回曲线	40
2.4.2 骨架曲线	47
2.4.3 延性	49
2.4.4 耗能能力	51
2.4.5 刚度与承载力退化	55
2.4.6 应力	58
2.4.7 受力机理与破坏机制	62
2.5 本章小结	65
参考文献	66
第 3 章 方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的受力性能分析	67
3.1 有限元模型的建立与求解	67
3.1.1 材料本构模型	67
3.1.2 有限元模型的单元与网格	71
3.1.3 边界条件与荷载	73
3.1.4 初始几何缺陷	73
3.2 有限元结果分析及与试验结果对比	75
3.2.1 滞回曲线对比	75
3.2.2 骨架曲线对比	77
3.3 开洞钢板剪力墙的受力机理分析	79
3.3.1 未开洞钢板剪力墙 (SPSW-BS) 的受力机理分析	79
3.3.2 单侧开洞钢板剪力墙 (SPSW-SO) 的受力机理分析	84
3.3.3 中部开洞钢板剪力墙 (SPSW-CO) 的受力机理分析	87
3.3.4 两侧开洞钢板剪力墙 (SPSW-BSO) 的受力机理分析	90
3.4 开洞钢板剪力墙的参数分析	93
3.4.1 分析模型	93
3.4.2 宽厚比对钢板剪力墙滞回性能的影响	95
3.4.3 轴压比对钢板剪力墙滞回性能的影响	100
3.4.4 开洞率对钢板剪力墙滞回性能的影响	106
3.4.5 洞口高度比对钢板剪力墙滞回性能的影响	110
3.5 改变洞口形式的两侧开洞钢板剪力墙受力分析	112
3.5.1 洞口尺寸对钢板剪力墙性能的影响	113
3.5.2 洞口形状对钢板剪力墙性能的影响	115

3.5.3 洞口对边缘构件的影响	118
3.6 本章小结	119
参考文献	120
第 4 章 方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙边缘构件设计方法	121
4.1 方钢管混凝土竖向边缘构件的刚度限值研究	121
4.1.1 方钢管混凝土竖向边缘构件的刚度限值	121
4.1.2 方钢管混凝土边缘构件刚度限值公式验证	129
4.1.3 柔度系数对钢板剪力墙平均应力的影响	132
4.1.4 柔度系数对方钢管混凝土柱变形的影响	139
4.1.5 柔度系数对钢板剪力墙结构破坏机制的影响	142
4.2 方钢管混凝土竖向边缘构件加劲构造措施研究	144
4.2.1 方钢管混凝土竖向边缘构件加劲截面选择	144
4.2.2 T 形钢加劲效果分析	149
4.2.3 影响 T 形钢加劲效果的因素	152
4.2.4 全贯通式加劲	157
4.3 开洞钢板剪力墙水平边缘构件受力分析	159
4.3.1 未开洞钢板剪力墙水平边缘构件剪力计算方法	159
4.3.2 中梁剪力计算方法的修正	163
4.3.3 单侧开洞钢板剪力墙中梁受力分析	164
4.3.4 中部开洞钢板剪力墙中梁受力分析	168
4.3.5 两侧开洞钢板剪力墙中梁受力分析	170
4.3.6 开洞钢板剪力墙中梁剪力计算公式验证	172
4.4 开洞钢板剪力墙洞口加劲肋性能研究	172
4.4.1 加劲肋刚度对钢板剪力墙屈曲性能的影响	173
4.4.2 加劲肋刚度对钢板剪力墙抗剪性能的影响	180
4.4.3 加劲肋刚度对钢板剪力墙滞回性能的影响	184
4.4.4 洞口加劲肋强度验算	189
4.5 钢板剪力墙边缘构件的设计	193
4.5.1 顶梁的计算方法	193
4.5.2 底梁的计算方法	194
4.5.3 竖向边缘构件的计算方法	195
4.5.4 中梁的计算方法	198
4.5.5 边缘构件的设计方法	198
4.5.6 有限元验证	199

4.6 本章小结	202
参考文献	202
第 5 章 方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙抗剪承载力计算	204
5.1 已有钢板剪力墙受剪承载力计算方法	204
5.2 方钢管混凝土框架内置钢板剪力墙的破坏模式	204
5.3 方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙抗剪承载力计算	205
5.3.1 方钢管混凝土框架内置单侧开洞钢板剪力墙的抗剪承载力计算	205
5.3.2 方钢管混凝土框架内置中部开洞钢板剪力墙的抗剪承载力计算	209
5.3.3 方钢管混凝土框架内置两侧开洞钢板剪力墙的抗剪承载力计算	213
5.4 公式计算结果与有限元结果对比	217
5.4.1 方钢管混凝土框架内置单侧开洞钢板剪力墙公式与有限元结果对比	217
5.4.2 方钢管混凝土框架内置中部开洞钢板剪力墙公式与有限元结果对比	219
5.4.3 方钢管混凝土框架内置两侧开洞钢板剪力墙公式与有限元结果对比	221
5.5 方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的构造要求	223
5.6 本章小结	223
参考文献	223
第 6 章 钢板剪力墙典型工程应用	225
6.1 钢板剪力墙的应用范围	225
6.2 钢板剪力墙结构在国外的应用	225
6.2.1 钢板剪力墙在日本的应用	225
6.2.2 钢板剪力墙在美国的应用	227
6.2.3 钢板剪力墙在加拿大的应用	228
6.3 钢板剪力墙结构在国内的应用	230
6.3.1 天津环球金融中心	230
6.3.2 天津国际金融会议酒店	232
6.3.3 昆明世纪广场	235
6.3.4 钢结构住宅项目	236
参考文献	237

第 1 章 绪 论

1.1 剪力墙的分类

20 世纪末期以来,随着经济水平的不断提高,高层建筑在我国得到了迅猛发展。随着建筑高度的增加,水平荷载和地震作用的影响也越来越显著。因此,高层建筑需要有较大的承载能力和侧向刚度,使水平荷载产生的侧向变形控制在一定范围内^[1]。剪力墙是一种被广泛采用的有效抗侧力构件,小震下具有很高的刚度,能限制结构的侧移量,满足正常使用状态,大震时又能够大量消耗地震能量。作为高层结构中的重要构件,剪力墙可视为结构的耗能减震装置。强度、刚度和延性是抗震设计的重要参数。钢筋混凝土剪力墙结构虽然具有很高的刚度和水平承载力,但其延性较钢板剪力墙差。

钢板剪力墙结构是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型抗侧力结构体系,其主要结构单元由内嵌钢板、竖向边缘构件和水平边缘构件构成。钢板剪力墙具有优异的抗震性能,如侧向承载力高、侧向刚度大、滞回环饱满、延性和耗能性能好^[2,3]。实践表明,采用钢板剪力墙作为抗侧力构件的建筑,在历次地震中表现出优异的抗震性能。

1.1.1 钢板剪力墙

钢板剪力墙是以承受水平剪力为主的钢板墙体,分类方式较多^[4]。根据钢板剪力墙的高厚比,可将钢板剪力墙分为厚钢板剪力墙和薄钢板剪力墙。厚钢板剪力墙(高厚比 $\lambda_h < 250$)的剪切弹性屈曲荷载较高,有较大的初始面内刚度,通过钢板剪力墙面内抗剪承担水平力,边框和内嵌钢板共同承担整体倾覆力矩,大震下具有良好的延性和稳定的承载力。厚钢板剪力墙以钢板屈曲为破坏标志,其虽具有较大的初始刚度和强度,但也可能会造成框架柱先于钢板剪力墙破坏,不符合理想的破坏顺序,因此不利于在高设防烈度地区使用。此外,厚钢板剪力墙的用钢量大,成本高,使其发展也受到一定的限制。薄钢板剪力墙(高厚比 $\lambda_h \geq 250$)在较小的水平荷载作用下就发生屈曲,其抗震性能由边界条件和拉力带的发展控制,拉力带的发展使其具有很高的屈曲后强度和很好的延性^[5]。这样既能够充分发挥钢板剪力墙的屈曲后强度,又不至于使框架柱先于钢板剪力墙破坏,符合双重抗震设防目标。充分利用屈曲后强度的薄钢板剪力墙以其良好的力学性能和经济性受到结构工程师的青睐,近年来成为钢板剪力墙研究的热点。

按照钢板剪力墙表面是否加劲可将钢板剪力墙分为加劲钢板剪力墙和非加劲钢板剪力墙。钢板剪力墙表面加劲后,加劲肋将钢板表面划分为若干个小区格,降低了小区格内钢板的高厚比,从而使钢板剪力墙具有较高的剪切屈曲承载力,同时抑制薄钢板剪力墙过大的面外变形。加劲钢板剪力墙有加劲肋可采用水平布置、竖向布置、水平与竖向混合布置以及斜向交叉布置(图 1.1)。在国内,清华大学的陈国栋最早开始研究加劲钢板剪力墙,并取得了一系列的研究成果。在非加劲和十字加劲钢板剪力墙的研究基础上,根据钢板剪力墙的受力特性,他又提出了一种新型的对角交叉斜加劲钢板剪力墙,研究结果表明斜加劲钢板剪力墙具有更优异的力学性能。

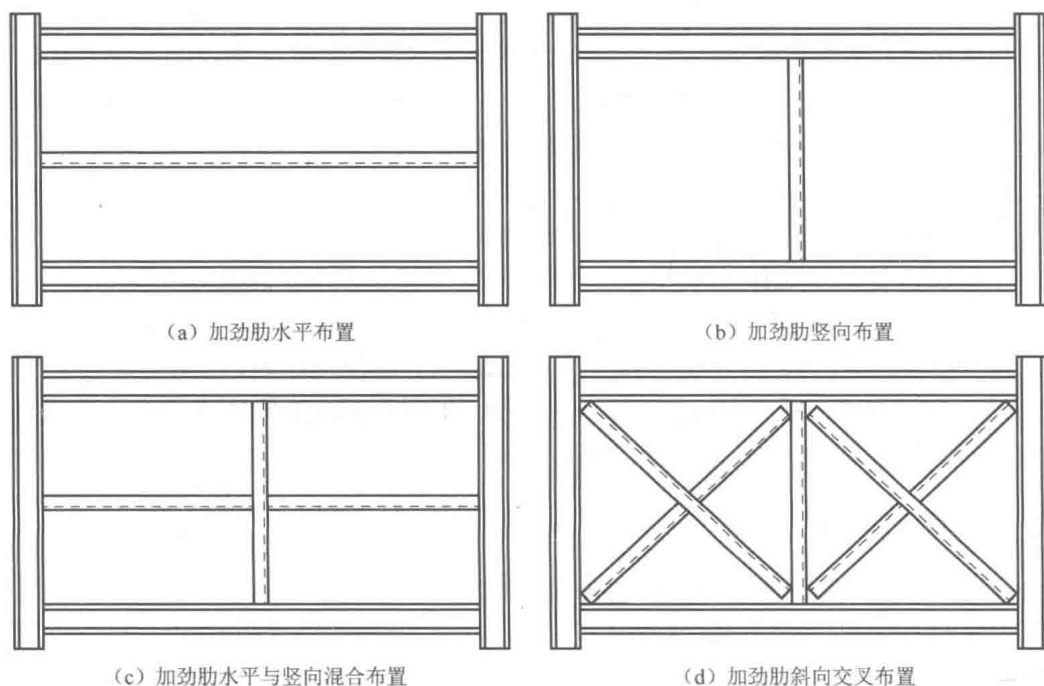


图 1.1 加劲钢板剪力墙有加劲肋布置形式

为改善薄钢板剪力墙的屈曲形态,可在钢板表面开竖缝^[6]。按照是否在钢板剪力墙表面开缝可将钢板剪力墙分为开缝钢板剪力墙(图 1.2)和不开缝钢板剪力墙。当钢板剪力墙表面开缝后,整块钢板被分割成一系列板条,每个板条如同竖向杆件参与受力,在不需强大加劲体系的前提下,使弯曲弹塑性变形主要集中在板条的端部,从而实现延性耗能。研究表明^[7-10]:开缝钢板剪力墙的承载力和侧向刚度能够满足正常使用阶段要求;当钢板整体面外屈曲、缝间板条和边缘加劲肋的弯扭屈曲不先于板条的端部弯曲屈服时,开缝钢板剪力墙具有很好的延性和耗能能力。

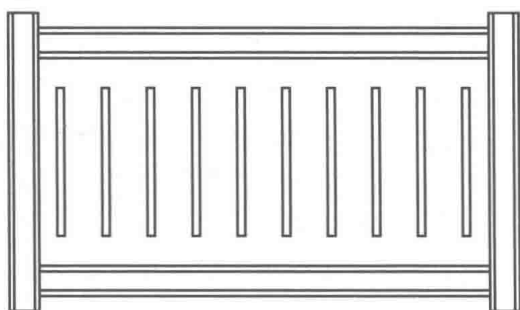


图 1.2 开缝钢板剪力墙

按照钢板是否开洞可将钢板剪力墙分为开洞钢板剪力墙和未开洞钢板剪力墙。常见的开洞形式有单侧开洞（三边连接）、中部开洞和两侧开洞（两边连接）（图 1.3）。由于薄钢板剪力墙在形成拉力带后会对框架柱产生较大的水平力作用，为保证框架柱不过早破坏，两边连接钢板剪力墙仅与框架梁相连，放松了钢板剪力墙与框架柱之间的连接，有效地保证了框架柱不受其影响。三边连接钢板剪力墙放松了钢板与一侧框架柱的连接，其性能介于四边连接钢板剪力墙与两边连接钢板剪力墙之间。两边连接钢板剪力墙失去了框架柱对钢板剪力墙的锚固作用，承载能力和耗能能力有一定程度的降低，但可以较为方便地调整剪力墙在框架中的位置和数量，易于调整刚度和承载力，也使框架柱不承担钢板剪力墙产生的附加水平荷载。

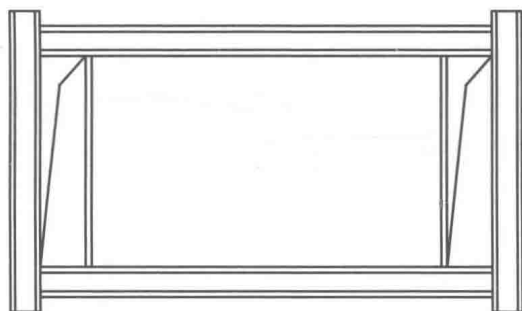


图 1.3 两边连接钢板剪力墙

为防止薄钢板剪力墙面外屈曲，可在钢板剪力墙两侧添加防屈曲构件，形成防屈曲钢板剪力墙^[11]。防屈曲构件可采用预制混凝土盖板或型钢。采用混凝土盖板时，在盖板上开设椭圆形孔，以便螺栓有足够的滑移空间；连接螺栓的位置及分布根据内嵌钢板的面内变形及混凝土盖板的约束刚度确定，保证内嵌钢板在混凝土盖板的面外约束作用下，二者不发生面外局部失稳及整体失稳。防屈曲钢板剪力墙与边缘构件宜采用鱼尾板过渡，鱼尾板与边缘构件宜采用焊接连接，鱼尾

板与钢板剪力墙可采用焊接或高强度螺栓连接,两种连接方式如图 1.4 所示。根据其设计要求,防屈曲钢板剪力墙可以分为大震滑移的防屈曲钢板剪力墙和完全滑移的防屈曲钢板剪力墙两种。大震滑移的防屈曲钢板剪力墙,需对高强螺栓施加一定的预拉力。在小震作用下既能保证内嵌钢板不发生局部屈曲,也能使混凝土盖板与内嵌钢板通过二者之间的接触摩擦共同承担侧向力;在大震作用下螺栓滑移,内嵌钢板和外侧混凝土盖板之间产生相对滑移,在保证内嵌钢板不发生面外屈曲的情况下,钢板充分发挥耗能作用。完全滑移的防屈曲钢板剪力墙,螺栓不施加预应力。在小震和大震作用下,混凝土盖板与内嵌钢板之间完全滑移。混凝土盖板对钢板仅提供面外约束,不参与面内受力;内嵌钢板提供面内刚度,在大震作用下发挥耗能作用。

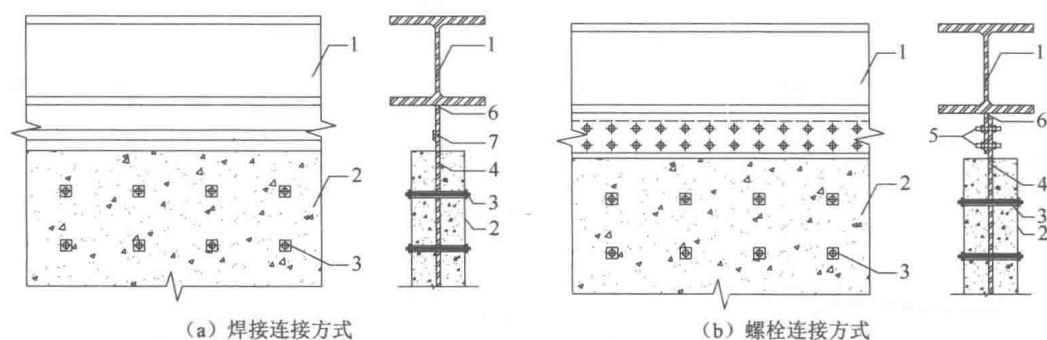


图 1.4 防屈曲钢板剪力墙与周边框架的连接示意图

1-钢梁; 2-预制混凝土盖板; 3-对拉螺栓; 4-内嵌钢板; 5-高强度螺栓; 6-鱼尾板; 7-焊缝

1.1.2 组合剪力墙

组合剪力墙即钢板-混凝土组合剪力墙,由钢板、混凝土板和两者之间的连接件组成。根据混凝土板与周边框架梁、框架柱的结合方式,组合钢板剪力墙可分为传统型和改进型两种形式(图 1.5)^[12,13]。二者的最大区别在于:改进型组合剪力墙的混凝土板与周边框架梁、框架柱预留适当的缝隙(根据结构在大震作用下的侧移大小确定)。在较小的水平位移下,混凝土板并不直接承担水平力,而仅仅作为钢板的侧向约束,防止钢板剪力墙发生面外屈曲,此时它对结构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大,混凝土板先在角部与框架梁、框架柱接触,随后,接触面不断扩大,混凝土板开始与钢板协同工作。混凝土板的加入,可以补偿因部分钢板发生局部屈曲造成的刚度损失,从而减小 $P-\Delta$ 效应。研究表明,改进型组合剪力墙的混凝土板不会过早压碎,破坏程度轻于传统型组合剪力墙,有更好的塑性变形能力。

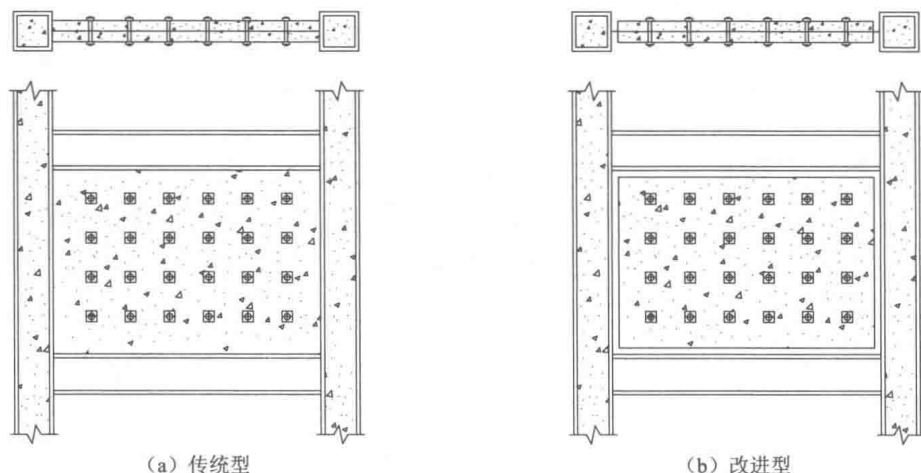


图 1.5 钢板-混凝土组合剪力墙的形式

1.2 国内外研究现状

1.2.1 非加劲钢板剪力墙的研究现状

早期的研究主要集中在厚钢板剪力墙，以钢板剪力墙的面外弹性屈曲作为设计极限状态，未充分发挥钢板剪力墙的承载能力。直到 1983 年，加拿大学者 Thorburn 等^[14]首先提出利用钢板剪力墙屈曲后强度的概念，建立了非加劲薄钢板剪力墙的拉杆条分析模型，提出了拉杆倾角计算公式，为薄钢板剪力墙的分析与设计提供了理论依据。随后，Berman 等^[15]基于拉力带模型，利用塑性分析方法分析了单层和多层薄钢板剪力墙的破坏机制，提出了偏于安全的极限承载力计算公式。Sabouri-Ghomi 等^[16]提出了分别考虑钢板和框架单独作用，然后叠加得到钢板剪力墙总体性能的 M-PFI 方法。Kharrazi 等^[17]对该方法进行了修正。20 世纪 90 年代初，Roberts 等^[18,19]和 Sabouri-Ghomi 等^[20]对不同高宽比、宽厚比及开孔尺寸的 22 个小比例非加劲薄钢板剪力墙进行了纯剪切荷载下的滞回性能研究。结果表明，所有试件都具有很好的延性和稳定的 S 形滞回环，初步提出了薄钢板剪力墙的非线性动力分析滞回理论模型。Caccese 等^[21]、Elgaaly 等^[22,23]、Driver 等^[24]针对非加劲薄钢板剪力墙进行了拟静力试验研究。Rezai^[25]对两个单跨四层 1:4 的非加劲薄钢板剪力墙模型进行了拟动力试验并实现了首次振动台试验，研究了钢板剪力墙的屈曲、屈服、焊缝开裂等对钢板剪力墙动力特性的影响。Qu 等^[26]对足尺单跨两层采用狗骨式梁柱连接节点、带组合楼板的薄钢板剪力墙进行了拟动力和拟静力试验研究。结果表明，钢板剪力墙试件具有稳定的承载力和优异的耗能能力，“狗骨式”节点能够使结构破坏时达到良好的破坏形态。

国内学者针对薄钢板剪力墙也开展了大量的研究工作。苏幼坡等^[27]对 4 个钢筋混凝土框架内填薄钢板剪力墙试件进行了拟静力试验。研究表明,框架中的钢板剪力墙可显著提高结构的刚度和承载力,并具有较好的延性和耗能能力。邵建华等^[28,29]利用有限元方法研究了钢板剪力墙高厚比对钢板剪力墙水平极限承载力的影响。研究发现,随着加载位移的增加,薄钢板剪力墙的耗能效率逐渐高于厚钢板剪力墙,薄钢板剪力墙的侧向刚度和水平极限承载力小于厚钢板剪力墙,但具有比厚钢板剪力墙更好的延性。王先铁等^[30]基于钢框架-钢板剪力墙的理想破坏机制,推导了钢板剪力墙边缘构件的计算公式,给出了钢板剪力墙、梁和柱之间的强度关系,并利用有限元软件 ABAQUS 对单跨五层钢框架-钢板剪力墙模型进行了数值分析。结果表明,按提出的计算公式确定的边缘构件能够为钢板剪力墙提供足够的锚固强度,有效控制受压柱的塑性铰位置,防止柱中部形成塑性铰,使钢框架-钢板剪力墙实现理想的破坏机制。曹万林等^[31]和郭兰慧团队^[32,33]分别对方钢管混凝土框架、圆钢管混凝土框架内置薄钢板剪力墙模型进行了试验研究。结果表明,钢板剪力墙结构具有良好的延性和耗能能力,采用“强框架弱墙板”设计原则,可充分发挥该结构体系的双重抗震设防目标。

1.2.2 加劲钢板剪力墙的研究现状

1973 年,日本学者 Takahashi 等^[34]首次进行了加劲钢板剪力墙在往复循环荷载作用下的抗震性能试验研究,验证了加劲钢板剪力墙性能优于非加劲钢板剪力墙性能,并采用有限元方法对其在单向荷载作用下的平面内力学性能进行弹性分析和验证。Alinia 等^[35]采用有限元方法分析了加劲形式(单向或双向)、加劲肋刚度、间距等对加劲薄钢板剪力墙性能的影响,以及单侧设置加劲肋的薄钢板剪力墙在单向荷载作用下的加劲肋设计。Alavi 等^[36]对 3 个 1:2 比例的单层钢板剪力墙试件进行了拟静力试验,其中一个试件为非加劲钢板剪力墙,另外两个试件为斜加劲钢板剪力墙,斜加劲钢板剪力墙中有一个试件在钢板剪力墙中间开了直径为钢板墙高度 1/3 的洞。结果表明,斜加劲形式非常适用于中间开洞钢板剪力墙,该形式不仅可以提高强度、刚度,而且施工简单方便。在国内,陈国栋等^[37-39]采用有限元方法分析了各种参数对非加劲、十字加劲和全加劲两侧开缝薄钢板剪力墙抗剪性能的影响,初步提出了薄钢板剪力墙承载力的简化设计公式。对 6 个 1:3 比例的非加劲、十字加劲和斜加劲薄钢板剪力墙模型进行了低周反复荷载试验。结果表明,边柱不出现局部屈曲是薄钢板剪力墙发挥极限承载力的重要保证,斜加劲薄钢板剪力墙的承载力和滞回性能最佳。郝际平团队^[40-43]分别对不同加劲形式、不同边框形式及多层非加劲薄钢板剪力墙进行了拟静力试验和理论研究,提出了薄钢板剪力墙的弹塑性刚度计算方法和极限承载力计算公式,采用修正的三

线性斜拉杆模型模拟了试验骨架曲线。研究表明, 框架边框柱不失稳是薄钢板剪力墙发挥屈曲后强度的重要保证, 方形边框内填十字加劲薄钢板剪力墙是一种合理的构造形式。王先铁等^[44]采用 ABAQUS 分别对方钢管混凝土框架十字加劲薄钢板剪力墙和非加劲薄钢板剪力墙进行了数值分析, 对二者的受力特征、刚度、极限承载力、剪力分配及柱子的受力特征进行了研究。结果表明, 肋板刚度比为 30 时, 十字加劲能够提高钢板剪力墙结构的弹性屈曲荷载、刚度和承载力。加载初期钢板剪力墙承担了大部分剪力, 随后墙板承担剪力比例下降, 框架承担比例上升。

目前国内外的规范、规程中均认为钢板剪力墙结构仅承受水平荷载, 未考虑竖向荷载作用下钢板剪力墙的屈曲问题, 而钢板剪力墙在竖向荷载作用下若提前发生屈曲, 将影响其抗震性能。聂建国等^[45]根据能量原理推导了竖向加劲钢板剪力墙弹性屈曲应力的简化计算公式, 分析了钢板剪力墙高宽比、加劲肋数量、肋板刚度比、肋板面积比等因素对钢板剪力墙竖向屈曲系数的影响。结果表明, 在竖向加劲肋刚度阈值内配置加劲肋, 可有效防止钢板剪力墙在竖向荷载作用下发生屈曲, 相关研究成果已成功用于天津津塔工程。童根树等^[46]采用有限元法, 对处于局部承压与剪切共同作用、局部承压与弯曲共同作用、剪切与弯曲共同作用下的四边简支矩形板进行分析, 并进行了各种应力作用下屈曲波形的形状分析, 局部承压、弯曲与剪切共同作用下钢板剪力墙的弹性屈曲分析, 提出了相关关系公式。宋文俊^[47]利用有限元软件 ABAQUS 研究了竖向荷载对钢板剪力墙性能的影响, 分析了加劲钢板剪力墙在剪力和非均匀压力共同作用时加劲肋的阈值刚度, 提出了相应的计算公式。结果表明, 加劲钢板剪力墙中竖向荷载的存在会降低其水平承载能力和初始刚度。

钢板剪力墙的加劲肋常采用板条形式。试验研究表明, 钢板剪力墙屈曲后加劲肋本身破坏很严重, 对钢板剪力墙后期的强度和刚度会产生不利影响, 即屈曲后阶段的加劲效果不理想。在天津津塔和天津国际金融酒店会议中心工程中, 首次采用竖向槽钢作为钢板剪力墙的加劲肋, 槽钢加劲肋可对钢板剪力墙提供扭转约束, 显著提高钢板剪力墙的剪切临界应力。童根树等^[48]研究了采用竖向槽钢加劲肋钢板剪力墙的屈曲性能, 得到了合理的竖向槽钢加劲肋门槛刚度。

1.2.3 开洞钢板剪力墙的研究现状

欲充分发挥薄钢板剪力墙的屈曲后强度, 要求柱子必须具有足够的强度和刚度, 柱子过早失效将严重影响钢板剪力墙性能的充分发挥。为防止钢板剪力墙“拉力场”水平分力导致框架柱产生“沙漏”现象, 1994 年, Xue 等^[49]进行了 4 个 3 跨 12 层薄钢板剪力墙的试验研究。4 个模型的边柱与梁都采用刚性连接, 中柱与