

# 型钢混凝土边框柱 密肋复合墙体结构



何明胜 王玉山 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

# 型钢混凝土边框柱 密肋复合墙体结构

何明胜 王玉山 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构/何明胜,王玉山著. —武汉:  
武汉大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-307-19750-3

I. 型… II. ①何… ②王… III. 型钢混凝土—混凝土框架—墙  
体结构 IV. TU375.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 247923 号

责任编辑:方竞男 路亚妮

责任校对:杨赛君

装帧设计:吴 极

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu\_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:10.75 字数:208千字

版次:2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19750-3 定价:60.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 前 言

密肋复合墙体结构体系是一种轻质、生态、节能并具有良好抗震性能的建筑结构新体系。它主要由复合墙板与隐形框架构成。作为主要承力构件的复合墙板,可根据竖向及水平力的不同进行框格优化配比设计,隐形框架在中高层建筑中依据受力计算确定截面及配筋,在多层建筑中按构造设计;楼板在中高层建筑中均采用现浇钢筋混凝土,在多层建筑中可根据抗震设防烈度不同选用现浇钢筋混凝土或密肋复合楼板。

型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构是以密肋复合墙结构为基础而派生的一种新型结构形式,是对密肋复合墙结构研究的延续与深入。通过密肋复合墙体与隐形型钢混凝土框架结合,在保持原有密肋复合墙结构诸多优点的基础上,发挥型钢混凝土隐形边框柱承载力高、抗震性能好的特点,改善密肋复合墙结构的受力性能,这对于该结构在中高层的应用将发挥重要的作用。

密肋复合墙体结构在我国大力推广的装配式结构体系中具有一定的优越性,国内开展了大量的研究工作。这些研究大量集中于结构的单调受力性能和低周反复加载试验,对于结构承载力研究,大部分是基于结构试验现象,通过统计方法提出相应承载力计算方法。由于密肋复合墙体结构由外部边框、内部肋梁、肋柱以及填充到其中的砌块共同受力,因此受力特性非常复杂。型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构在边框柱中增加了型钢,增加了该结构形式受力特性的复杂性。这就需要对该结构形式的承载力计算提出合理的理论计算模型,能够计算每一个组件,从而在理论上彻底解决该结构形式承载力计算的问题。

为了解决上述问题,著者开展了大量的研究工作,着重解决该结构承载力计算的理论问题,提出墙体在竖向荷载作用下的弹性地基梁力学模型及在水平荷载作用下的夹层复合结构力学模型,根据变形协调原理,建立结构平衡微分方程,进而求解结构的内力表达式,定量给出边框柱与复合墙板承担竖向荷载及水平荷载的比例关系,且在这些理论基础上提出了精确且实用的承载力计算方法。

本书共分7章:第1章介绍密肋复合墙体结构的优越性、研究现状、工程应用以及存在的问题;第2章介绍型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构受力机理;第3



章介绍型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构在竖向荷载及水平荷载作用下的协同工作分析;第4章介绍型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构的有限元分析方法;第5章介绍型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构承载力计算方法;第6章介绍型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构抗震计算方法;第7章介绍型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构设计及施工基本要求。

由于作者水平和知识范围有限,书中不当和错误之处在所难免,敬请读者批评、指正。

何明胜

2017年6月

# 目 录

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| 1 绪论 .....                          | (1)  |
| 1.1 密肋复合墙体结构的特点 .....               | (1)  |
| 1.1.1 密肋复合墙体结构特性 .....              | (1)  |
| 1.1.2 密肋复合墙体结构的受力性能 .....           | (3)  |
| 1.2 密肋复合墙体的研究现状 .....               | (4)  |
| 1.2.1 试验研究 .....                    | (4)  |
| 1.2.2 理论研究 .....                    | (5)  |
| 1.3 计算方法 .....                      | (6)  |
| 1.3.1 密肋复合墙体弹性抗侧刚度的研究 .....         | (6)  |
| 1.3.2 密肋复合墙体斜截面承载力公式的研究 .....       | (8)  |
| 1.4 密肋复合墙板的工厂化生产 .....              | (9)  |
| 1.5 密肋复合墙体中引入型钢混凝土边框柱的意义 .....      | (11) |
| 1.6 型钢边框柱密肋复合墙体与普通密肋复合墙体结构的异同 ..... | (12) |
| 1.7 型钢边框柱密肋复合墙体结构力学特性 .....         | (13) |
| 参考文献 .....                          | (14) |
| 2 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体受力机理研究 .....        | (16) |
| 2.1 试验简介 .....                      | (16) |
| 2.1.1 试件的设计与制作 .....                | (16) |
| 2.1.2 试验方法 .....                    | (23) |
| 2.2 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体抗震性能试验结果分析 .....  | (27) |
| 2.2.1 破坏现象 .....                    | (27) |
| 2.2.2 破坏机理分析 .....                  | (31) |
| 2.2.3 试件的承载力、延性及耗能分析 .....          | (32) |
| 2.2.4 试件变形分析 .....                  | (37) |
| 2.2.5 试件中各构件受力性能试验结果分析 .....        | (38) |
| 2.2.6 正应变沿墙体截面高度的分布 .....           | (41) |
| 2.3 竖向荷载作用下试验结果分析 .....             | (42) |
| 参考文献 .....                          | (45) |



|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| <b>3 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构协同工作性能分析</b> ..... | (47)  |
| 3.1 竖向荷载作用下协同工作分析.....                  | (47)  |
| 3.1.1 理论研究.....                         | (48)  |
| 3.1.2 试验结果对比.....                       | (51)  |
| 3.1.3 竖向荷载分配比例影响因素分析.....               | (53)  |
| 3.2 水平荷载作用下协同工作分析.....                  | (55)  |
| 3.2.1 单跨复合墙结构计算.....                    | (56)  |
| 3.2.2 多跨复合墙结构计算.....                    | (62)  |
| 3.2.3 计算分析.....                         | (68)  |
| 参考文献 .....                              | (69)  |
| <b>4 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体非线性有限元分析</b> .....   | (71)  |
| 4.1 复合墙体非线性有限元理论基础.....                 | (71)  |
| 4.1.1 墙体中不同材料的本构模型.....                 | (71)  |
| 4.1.2 复合墙体中裂缝的处理.....                   | (80)  |
| 4.1.3 复合墙体中不同材料的联结问题.....               | (83)  |
| 4.2 计算模型选取.....                         | (84)  |
| 4.2.1 单元及材料模型.....                      | (84)  |
| 4.2.2 计算模型.....                         | (85)  |
| 4.3 有限元分析程序验证及分析.....                   | (86)  |
| 4.3.1 三维实体单元模型.....                     | (86)  |
| 4.3.2 水平单调加载的非线性有限元分析.....              | (87)  |
| 4.3.3 竖向加载下墙体非线性有限元分析.....              | (97)  |
| 参考文献 .....                              | (98)  |
| <b>5 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体承载力研究</b> .....      | (99)  |
| 5.1 轴压承载力计算.....                        | (99)  |
| 5.1.1 密肋复合墙体在轴压作用下的试验研究.....            | (99)  |
| 5.1.2 密肋复合墙体轴压承载力计算方法 .....             | (102) |
| 5.1.3 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体轴压承载力计算方法 .....     | (106) |
| 5.2 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体抗剪承载力研究 .....         | (112) |
| 5.2.1 复合墙体开裂荷载计算 .....                  | (112) |
| 5.2.2 破坏机理 .....                        | (115) |
| 5.2.3 剪切承载力的组成 .....                    | (116) |

|       |                                |       |
|-------|--------------------------------|-------|
| 5.2.4 | 复合墙体各部分抗剪承载力计算模式 .....         | (116) |
| 5.2.5 | 影响因素分析 .....                   | (120) |
| 5.2.6 | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体斜截面承载力计算 .....   | (121) |
| 5.3   | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体正截面承载力研究 .....   | (123) |
| 5.3.1 | 基本假定 .....                     | (123) |
| 5.3.2 | 等效矩形应力图形 .....                 | (124) |
| 5.3.3 | 正截面承载力实用计算公式 .....             | (125) |
|       | 参考文献 .....                     | (129) |
| 6     | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构抗震设计方法研究 ..... | (132) |
| 6.1   | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体延性及轴压比限值研究 ..... | (132) |
| 6.1.1 | 位移延性计算方法 .....                 | (132) |
| 6.1.2 | 位移延性比影响因素分析 .....              | (135) |
| 6.1.3 | 轴压比限值 .....                    | (137) |
| 6.2   | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构层间位移角限值 .....  | (138) |
| 6.2.1 | 弹性层间位移角限值的控制目标 .....           | (138) |
| 6.2.2 | 弹性层间位移角限值 .....                | (139) |
| 6.2.3 | 弹塑性层间位移角限值 .....               | (140) |
| 6.3   | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体抗震设计方法 .....     | (140) |
| 6.3.1 | 基本规定 .....                     | (141) |
| 6.3.2 | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体抗震极限承载力计算 .....  | (143) |
| 6.3.3 | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体抗震构造措施 .....     | (145) |
|       | 参考文献 .....                     | (146) |
| 7     | 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体结构设计和施工 .....    | (148) |
| 7.1   | 材料与节能 .....                    | (148) |
| 7.1.1 | 材料 .....                       | (148) |
| 7.1.2 | 节能 .....                       | (148) |
| 7.2   | 荷载和地震作用 .....                  | (149) |
| 7.2.1 | 竖向荷载 .....                     | (149) |
| 7.2.2 | 风荷载 .....                      | (150) |
| 7.2.3 | 地震作用 .....                     | (150) |
| 7.3   | 结构计算分析 .....                   | (150) |
| 7.3.1 | 一般要求 .....                     | (150) |



|       |                      |       |
|-------|----------------------|-------|
| 7.3.2 | 薄弱层弹塑性变形验算 .....     | (152) |
| 7.4   | 密肋复合墙体结构设计要求 .....   | (153) |
| 7.4.1 | 一般要求 .....           | (153) |
| 7.4.2 | 房屋适用高度和高宽比 .....     | (153) |
| 7.4.3 | 结构布置 .....           | (154) |
| 7.4.4 | 楼盖结构 .....           | (156) |
| 7.4.5 | 密肋复合墙板设计 .....       | (156) |
| 7.4.6 | 多层密肋复合墙体结构连接构造 ..... | (157) |
| 7.5   | 高层密肋复合墙体结构设计 .....   | (158) |
| 7.5.1 | 房屋适用高度和高宽比 .....     | (158) |
| 7.5.2 | 结构布置 .....           | (159) |
| 7.5.3 | 抗震要求 .....           | (160) |
| 7.5.4 | 构件设计与构造 .....        | (161) |

# 1 绪 论

## 1.1 密肋复合墙体结构的特点

密肋复合墙体结构体系是以姚谦峰教授为首的课题组研究开发的一种轻质、生态、节能及具有良好抗震性能的建筑结构新体系。密肋复合墙构造示意图如图 1-1 所示。它主要是由复合墙板与隐形框架构成。作为主要承力构件的复合墙板可根据竖向力及水平力的不同进行框格优化配比设计,隐形框架在中高层建筑中依据受力计算确定截面及配筋,在多层建筑中按构造设计,楼板在中高层建筑中均采用现浇,在多层建筑中可根据抗震设防烈度不同选用现浇钢筋混凝土或密肋复合楼板。

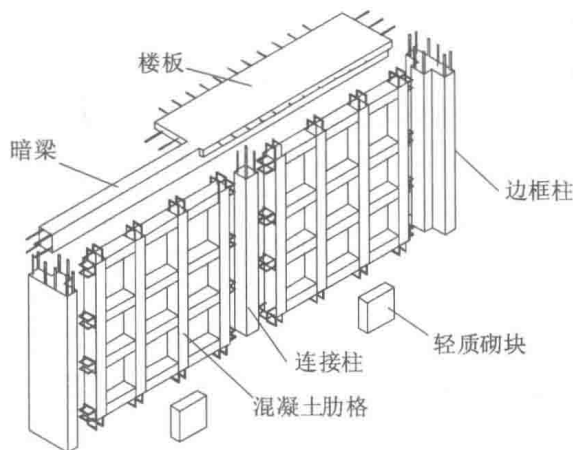


图 1-1 密肋复合墙构造示意图

此种结构体系的优点在于:①取代传统黏土砖,提高住宅建筑节能标准;②结构具有多道抗震防线,可分阶段释放地震能量;③采用生态墙体,因地制宜,节能环保;④墙板可工厂化生产,也可现场制作,造价低。

### 1.1.1 密肋复合墙体结构特性

(1)结构自重轻。该结构比砖混结构自重轻近 35%,比空心砖填充墙框架自重轻 30%,比剪力墙结构自重轻 33%,从而减小地震作用,材料用量和地基处理费用降低。



(2)抗震性能好。该结构体系属于中等刚性结构,其受力介于框架和剪力墙结构之间。与框架结构相比,该结构变形能力稍低,承载能力有较大提高;与剪力墙结构相比,该结构承载能力稍低,变形能力有显著改善;与砖混结构相比,该结构承载能力提高 1.6~1.8 倍,极限变形为砖混结构 2 倍以上。

(3)施工速度快。复合板制作简单,既可工厂化生产,也可现场制作,大大减少了传统结构高空作业的工作量,加快了施工速度,缩短工期 1/4~1/3。

(4)节能效果佳。新型复合外墙板 225mm 厚,其总热阻大于 615mm 厚黏土实心砖墙,接近于 490mm 厚空心砖墙,可达到现阶段国家节能建筑标准(节能 50%),采用整体式外保温技术后,已实现 2010 年国家规划的建筑节能 65%的标准。

(5)结构适应性强。该结构适用于多层、中高层住宅,也可和其他结构体系组合使用,且平面布置灵活,刚度可按需调整。

(6)社会及环境效益明显。据统计,每建 1 万平方米的建筑,可避免挖土毁田 1.2 亩,消耗工业废渣 2000~3000m<sup>3</sup>,既保护了环境,又维持了生态平衡。

(7)经济效益显著。工程实践证明,该结构土建造价比砖混结构低 4%~6%,比框架结构低 10%~12%,比剪力墙结构低 15%以上,同时因墙体厚度减小,故可增加营房实际使用面积 6%~8%。

密肋复合墙体结构与其他功能相同的结构体系比较见表 1-1。

表 1-1 密肋复合墙体结构与其他功能相同的结构体系比较

| 结构形式       | 本结构         | 砖混结构                 | 框架结构      | 剪力墙结构 |
|------------|-------------|----------------------|-----------|-------|
| 主要墙体材料     | 轻质、高性能混凝土材料 | 黏土砖                  | 黏土砖或加气混凝土 | 混凝土   |
| 施工工艺       | 工厂预制与装配整浇   | 手工砌筑                 | 现场浇筑      | 现场浇筑  |
| 结构自重比      | 1.00        | 1.53                 | 1.33      | 1.43  |
| 抗震性能       | 刚柔并济        | 脆                    | 柔         | 刚     |
| 施工工期比      | 1.00        | 1.50                 | 1.33      | 1.33  |
| 相同热阻时墙厚/mm | 225         | 空心砖墙:490<br>实心砖墙:610 | —         | —     |
| 土建单方造价比    | 1.00        | 1.05                 | 1.11      | 1.17  |
| 钢材用量比      | 1.00        | 1.00                 | 1.66      | 2.00  |



### 1.1.2 密肋复合墙体结构的受力性能

密肋复合墙板是以截面及配筋较小的钢筋混凝土为肋格,内嵌以炉渣、粉煤灰等工业废料为主要原料的加气硅酸盐砌块(或其他具有一定强度的轻质骨料)预制而成。在密肋复合墙体结构体系中,密肋复合墙板不仅起围护、分隔空间和保温作用,还与隐形框架一起承担结构的竖向及水平荷载。一方面,墙板中砌块与肋格共同工作,砌块受到肋格的约束,密肋又受到块体的反约束,两者相互作用,共同受力,充分发挥各自性能;另一方面,墙板与隐形框架整浇为一体,形成具有共同工作性能的增强密肋复合墙体。

墙体中砌块由于受到框格(包括肋格和外框)的约束,其裂缝被限制在一定范围之内,在反复荷载作用下,某一方向荷载产生的裂缝在反方向加载时将趋于闭合,并能继续有效地承受荷载。这首先使得砌块有效参与试件的抗侧力体系成为可能,不仅墙体承载能力不会明显降低,还可以提高墙体的抗侧刚度;其次,众多砌块在约束条件下的开裂与非弹性变形,类似一耗能装置,从而有效地提高了结构的变形能力和延性。

密肋复合墙体结构独特的构造特点使其承力体系的三部分构件(砌块、肋格及外框)能够在小震、中震及大震作用下依次发挥主要作用,分阶段释放地震能量,具有多道抗震防线,是一种基于结构地震反应控制技术的新型耗能结构体系。①在多遇地震作用时,密肋复合墙体中填充砌块由于受到框格的约束,可能没有裂缝或裂缝被限制在一定范围之内,在反复荷载作用下,荷载产生的微小裂缝在反方向加载时将趋于闭合,并能继续有效地承受荷载,其力学模型可以看作等效弹性板,故结构无明显破坏。②在中等强度地震作用时,墙体内填充砌块由于强度较低,普遍开裂,砌块的刚度和承载能力下降较快,而由框格和开裂砌块构成的刚架斜压杆受力体系此时成为抵抗地震作用的主要构件。主体结构无明显破坏,破坏主要集中在填充块体,震后容易修复。③在强烈地震作用时,众多砌块在约束条件下破坏严重,甚至剥落,使得墙体类似一耗能装置,一方面,可以积极耗散地震能量;另一方面,使结构从一种稳定体系过渡到另一种新的稳定体系,实现周期调整以避开地震所引起的共振效应,可保证结构最低限度的安全。试验研究表明,在强烈地震持续作用下,砌块严重破坏、剥落,墙板最终退化成仅由肋格和外框组成的梁铰框架模型,此时的墙体作为密肋复合墙体结构体系的主要抗侧力构件已经达到极限状态,但仍可以承担全部的竖向荷载,具有良好的抗倒塌能力。



## 1.2 密肋复合墙体的研究现状

### 1.2.1 试验研究

姚谦峰、黄炜等进行 12 块墙板试验,其中有 10 块发生剪切破坏,2 块发生弯曲破坏,2 块发生弯曲破坏的试件是在总宽度不变的情况下增加了一道竖肋,把填充砌块板的尺寸缩小了。因此,从这些试验可以看出,砌块板的尺寸是影响密肋复合板破坏形式的一个因素。通过对边框、肋梁和肋柱上钢筋应变分析发现,边框主要承受弯曲荷载,边肋柱开始为拉压型,最后过渡为受拉型,中肋柱钢筋屈服晚于肋梁钢筋,当大部分肋梁钢筋屈服时,墙体达到屈服荷载,在大位移循环时,肋梁全部屈服,有的甚至被拉断。从试验中还发现,砌块的大量开裂,以及肋梁、肋柱的开裂未能引起承载力的降低,而大量肋梁钢筋退出工作引起承载力降低,并使得墙体的抗剪承载力下降。通过试验得出以下结论:肋梁主要承担水平剪力,并对砌块形成约束,限制框格内砌块裂缝的延伸和发展;边肋柱在弹性阶段分担部分整体弯矩,在弹塑性阶段分担部分水平荷载;砌块对墙体的抗侧刚度贡献最大。

文献[3]、[4]进行了 7 块墙板的轴压试验,通过试验数据分析得出,外框柱、肋柱的竖向应变远大于中间砌块及肋梁上的主应变,外框柱、边肋柱、中肋柱的竖向应变依次递减,表明上部竖向荷载向下传递中向两端的外框集中。中肋梁上的横向应变始终为拉应变,且两端数值小,中间数值大,表明中肋柱主要受水平拉应力。试验后期,底层中砌块及中肋梁上出现竖向裂缝。

文献[5]进行了 5 块墙板的轴压试验,试验现象与上述文献不太相同,边框柱的应变小,而越往中间,肋柱应变越大。

王爱民模拟 12 层建筑的底部两层受力情况,进行了两榀两层两跨密肋复合墙体(MLQT-M1、MLQT-M2)在竖向荷载、水平荷载及弯矩共同作用下的水平单调加载试验,其中 MLQT-M2 比 MLQT-M1 边框柱截面面积增加 40%,纵向配筋增加 4%。MLQT-M1 破坏形式为受压端边框柱柱脚被压碎,受拉边框柱纵筋被拉断;MLQT-M2 破坏形式为受压侧底层边框柱翼缘混凝土被压碎。通过两者的试验现象发现,在边框柱发生破坏时,砌块及肋梁、肋柱均未发生大的破坏,肋梁和肋柱的钢筋也未达到屈服,砌块只是在施力端的右上角和未施荷的左下角被压碎。MLQT-M2 比 MLQT-M1 的极限水平荷载大 140%,并且从荷载-位移曲线上发现,两者从受荷到破坏均未有明显的拐点。通过分析可知,边框柱纵筋的配筋率对弯压破坏墙体的承载力有较大影响,当纵筋配置适当时,墙体的承载力随边框柱纵筋配筋率的增大而增大;并认为之所以没有发生墙板先于边框柱破坏,是由于出现

了“强板弱柱”现象。

姚谦峰、袁泉参照结构原型为 10 层,总高 30m,按 8 度抗震设防烈度进行了 1/10 比例密肋复合墙结构模型的振动台试验。通过试验现象发现,此结构体系的薄弱部位是墙中砌块拼缝及砌块与柱的连接处。结构的变形以剪切变形为主,弯曲变形只占很少一部分。

姚谦峰、贾英杰进行了一栋 12 层 1/3 比例密肋复合墙结构的房屋模型拟动力试验。通过试验结果分析,模型结构在初始状态时,墙板的框格与填充砌块之间黏结良好,变形协调,能够保证共同工作性能;模型的侧移曲线属于弯剪型,弯曲变形占主要成分,墙板主要抵抗水平剪力,边框柱则主要抵抗整体弯矩,整个结构发生的破坏为弯曲破坏。

通过王爱民、黄炜和贾英杰试验中发生弯曲破坏和剪切破坏的试件分析出现,框格宽度与总宽度的比值越小,发生弯曲破坏的可能性越大。

俞磊对 34 个 1/2 比例密肋复合墙板单元的模型试件进行对角线斜向、水平单调、重复加载试验,研究了复合墙板中肋梁柱与内部填充砌块的相互作用。他通过试验分析提出:增加混凝土构件的截面刚度,框格单元初始刚度、抗裂承载力提高,当混凝土构件的截面刚度超过某一限值后,框格单元极限承载力不再随框格构件截面刚度的增加而增加;混凝土构件的弯矩-曲率性能对结构的延性有显著影响,混凝土框格构件弯曲性好时可提高结构延性;过度的侧向约束不会提高砌体构件的强度,框格刚度大,则变形小,不及砌体充分发挥作用已提前破坏。

### 1.2.2 理论研究

文献[11]通过对破坏现象和机理的研究,提出了三阶段破坏模型,提出了在不同破坏阶段采用不同破坏模型(在弹性阶段按等效弹性板模型,在弹塑性阶段按刚架斜压杆模型,在破坏阶段按梁铰框架模型),并进行了密肋复合墙体剪切破坏机理的分析,提出可将刚架斜压杆模型作为极限抗剪计算模型,并对影响密肋复合墙体斜截面抗剪能力的主要因素进行了探讨。以统一剪摩理论来确定混凝土、砌块开裂区与未开裂区的抗剪强度,依据极限平衡理论建立了密肋复合墙体的抗剪极限承载力计算公式。

现行的砌体抗剪强度计算中主要有两种理论:主拉应力破坏理论和库仑破坏理论(剪摩理论)。这两种理论各有优缺点,对于干砌(无砂浆)砌体也具有相当的抗剪强度,库仑理论可以解释,最大主拉应力理论不能解释;反过来,阶形裂缝刚出现时,墙体中某一“点”的破坏,主拉应力推导的公式可以解释,但库仑理论不行。当竖向应力比较大时,主拉应力理论未考虑材料的物理性质而低估了砌体抗剪能力,而库仑理论却因忽略开裂后抗剪强度随竖向压应力增大而降低,高估了抗剪能

力。施楚贤提出的最小耗能原理建立砌体受剪破坏的强度准则克服了两者的缺点,是个不错的方法,在进行密肋复合墙体的抗剪承载力计算时可以借鉴。

文献[12]、[13]以15层密肋复合墙结构住宅建筑为计算单元,通过非线性有限元分析,研究了整体弯曲对边框柱、复合墙板及边框柱与复合墙板协同工作的影响。通过计算结果指出,墙体整体弯曲产生的轴向压力随剪跨比的增加,增加幅度很大,对边框柱轴力的影响显著;剪跨比对墙板剪力影响不大。剪跨比增大,复合墙板承受的抗剪承载力随之降低,但抗弯承载力不变,墙体的破坏均为正截面弯曲破坏。墙体的抗弯承载力对墙体的极限承载力起控制作用,并指出,对于剪跨比大于1.95的复合墙体,破坏形式均为弯曲破坏。

文献[14]以整个截面符合平截面假定为依据,采用力平衡方法提出密肋复合墙板正截面压弯承载力计算公式,在计算中考虑中肋柱参与工作,但其应力按平均应力计算,不考虑墙板参与工作。文献[14]也进行了墙体正截面压弯承载力实用计算公式的推导,但其不考虑中间肋柱的作用而考虑了填充墙体参与工作。在推导过程中,假定整个墙板两边为边框柱,中间为均质墙体,采用了进行一般混凝土剪力墙压弯构件承载力计算的思路,并提出了中和轴在不同情况下的计算方法。

田英侠对密肋复合墙体中肋梁柱进行离散化处理,将密肋复合墙体假定为复合材料,以复合材料力学方法推导了密肋复合墙体刚度计算公式。

## 1.3 计算方法

### 1.3.1 密肋复合墙体弹性抗侧刚度的研究

由于密肋复合墙体中的两种材料——混凝土与砌块,其弹性常数相差较大,故不能直接按均质墙体计算其弹性抗侧刚度。目前,较为合理的计算方法有两种:前期提出的面积等效法和本书提出的复合材料法。两种方法的共同点是先将密肋复合墙体等效为均质材料,并采用均质墙体的抗侧刚度公式进行弹性刚度计算;其不同点是等效的原理与方法不同。

#### 1. 面积等效法

所谓面积等效法,就是保持墙体的宽度不变,按弹性抗弯刚度相等的原则将包含混凝土和砌块两种材料的密肋复合墙体等效为均匀砌块墙体,一般分为一次面积等效法和二次面积等效法。

本书著者最早提出的是一次面积等效法。一次面积等效法就是采用抗弯刚度相等的原则,按照混凝土与砌块弹性模量 $E$ 的比值将肋柱和外框柱(连接柱)的截面面积等效为砌块的面积,原砌块的面积不变,等效后总面积分布均匀,并且关于

墙体厚度方向的轴线对称。一次面积等效等价于抗弯刚度等效,其刚度计算公式仍采用均质墙体的计算公式,但由于等效后的墙体截面形状已不再是矩形,刚度的计算要分段进行,比较烦琐。

随后,又提出二次面积等效法。二次面积等效法就是在一次面积等效法的基础上,按照截面面积不变的原则,将一次面积等效的不规则截面再次等效为矩形,墙体截面长度  $h$  保持不变,  $b_2$  为等效后砌块墙体的厚度。密肋复合墙体的弹性抗侧刚度以二次面积等效后所得砌块矩形截面墙体作为计算依据,采用均质墙体的弹性抗侧刚度公式,同时考虑墙体微裂缝及轴压的影响。墙体的弹性刚度实用计算公式如下:

$$K = \frac{0.3E_q b_2}{\left(\frac{H}{h}\right)^3 + 3\frac{H}{h}} (2\eta + 0.4) \quad (1-1)$$

式中  $b_2$ ——墙体截面等效厚度,  $b_2 = \frac{A_e}{h}$ ;

$H$ ——墙体高度;

$h$ ——墙体截面长度;

$A_e$ ——截面等效面积,  $A_e = \frac{E_c}{E_q} A_c + A_q$ ;

$A_c$ ——验算截面肋柱、框架柱混凝土面积之和;

$A_q$ ——验算截面砌块面积之和;

$E_c$ ——混凝土的弹性模量;

$E_q$ ——砌块的弹性模量;

$\eta$ ——轴压比 ( $0.3 \leq \eta \leq 0.6$ ),  $\eta = \frac{N}{f_c A_c}$ , 当  $\eta < 0.3$  时, 取  $\eta = 0.3$ , 当  $\eta > 0.6$

时, 取  $\eta = 0.6$ ;

$f_c$ ——混凝土抗压强度设计值。

上述两种面积等效法均忽略墙体肋梁作用,并采用了抗弯等效原理。由墙体的受力特点可以看出,墙体内肋梁不仅能有效地提高框格自身的抗侧刚度,还能加强框格与砌块的共同工作能力,因而在计算中不应忽略肋梁的作用;同时试验证明,对于高宽比较小的墙体,其变形主要以剪切变形为主,因而采用抗弯等效有不妥之处。一次面积等效法严格遵从抗弯等效原理,但等效后的墙体截面形状比较复杂,剪应力分布不均匀系数难以确定,刚度的计算要分段进行,不适用于工程设计计算。二次面积等效法的计算过程相对简单,但从严格的理论推导可以看出,二次面积等效后所得砌块矩形截面墙体的抗弯刚度并不等于密肋复合墙体的抗弯刚度,只是简化地按面积等效,缺乏理论依据,因而其误差相对较大,有待于进一步研究。



## 2. 复合材料等效法

针对面积等效法存在的诸多问题,本书提出复合材料等效法,将密肋复合墙体等效为正交各向异性的复合材料等效弹性板,其抗侧刚度采用均质墙体的公式,只是公式中的  $E$ 、 $G$  应分别采用复合材料模型的计算结果。

### 1.3.2 密肋复合墙体斜截面承载力公式的研究

钢筋混凝土剪力墙的斜截面破坏机理和计算理论主要有拉杆拱模型、平面比拟桁架模型、变角桁架模型、拱-梳状齿模型、极限平衡理论等。各种理论的计算结果不尽相同,某些计算模型过于复杂,还无法在实际设计中应用。鉴于剪切破坏问题的复杂性,至今仍未提出在不同情况下均能够符合实际又方便实用的计算理论。姚谦峰教授课题组前期给出了两组不同的密肋复合墙体斜截面承载力计算公式,其实质都是在大量试验的基础上,依据极限平衡理论,采用理论与经验相结合的方法建立起来的。

在第一批密肋复合墙体模型试件的基础上,提出的公式为:

$$V_{gk} = \eta_1 \sum V_g + \sum V_k + \eta_2 \sum V_j \quad (1-2)$$

式中  $V_{gk}$ ——墙体的剪切承载力;

$V_g$ ——单块非约束砌块剪切承载力;

$V_k$ ——框架柱剪切承载力;

$V_j$ ——外加混凝土板剪切承载力;

$\eta_1$ ——约束砌块剪力提高系数,  $\eta_1 = 1 + 0.4(n-1)$ ,  $n$  为墙体中砌块块数;

$\eta_2$ ——水平及竖向荷载偏心系数,由试验取 0.8。

$$V_g = \frac{1}{10\xi} \cdot f_0 \cdot A \quad (1-3)$$

式中  $\xi$ ——砌块应力不均匀系数;

$f_0$ ——砌块棱柱体抗压强度。

在第二批密肋复合墙体模型试件的基础上,提出的公式如下。

偏心受压密肋复合墙体无地震作用组合时:

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.4f_t A_c + 0.25f_{qt} A_q + 0.1N) + f_y A_s \quad (1-4)$$

式中  $\lambda$ ——计算截面处墙体的广义剪跨比,  $\lambda = M/(Vh)$  ( $1.5 \leq \lambda \leq 2.5$ )。  $\lambda < 1.5$  时,取  $\lambda = 1.5$ ;  $\lambda > 2.5$  时,取  $\lambda = 2.5$ 。

$f_t$ ——墙板内混凝土的抗拉强度设计值。

$A_c$ ——墙板内肋柱、中间连接柱及不考虑翼缘的边框柱的截面面积之和。

$f_{qt}$ ——墙板内砌块的抗拉强度设计值。