



土木工程结构研究新进展丛书

冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙 抗震性能研究

Seismic Behavior of Cold-Formed Thin-Walled
Steel Reinforced Concrete Shear Walls

初明进◎著

Ming-Jin CHU

中国建筑工业出版社

土木工程结构研究新进展丛书

冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙 抗震性能研究

Seismic Behavior of Cold-Formed Thin-Walled
Steel Reinforced Concrete Shear Walls

初明进 著

Ming-Jin CHU

中国建筑工业出版社

前 言

近年来,随着城镇化进程的加快,我国住宅建造规模发展迅速。住宅产业化是住宅建设发展的重要方向,核心是建立适合工业化的结构技术体系。冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙结构是一种新型工业化住宅结构体系,具有工业化程序高、受力性能好等优点,以及良好的应用前景。

本书对冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙结构的受力性能进行了一系列研究,主要工作包括模型试验、数值模拟和理论分析,揭示了新型剪力墙的受力特征、破坏机理,提出了承载力理论分析模型和恢复力模型等,为冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙结构的工程设计应用提供了可靠依据。

本书研究发现冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙具有自适应分缝性能。在水平地震作用下,墙体在弹性阶段为整截面墙受力阶段,进入弹塑性阶段后,沿冷弯薄壁型钢与混凝土的交界处出现竖向裂缝,墙体演变为分缝墙体受力阶段;竖向裂缝的演变和形态与水平作用相适应,具有自适应特性,可避免墙体剪切破坏,把损伤集中在预期的部位,防止剪力墙损伤集中在塑性铰区域。冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙为提高剪力墙结构的抗震性能提供了新颖的技术手段。

本书的研究工作是在清华大学陈肇元院士和叶列平教授指导下完成的,冯鹏博士也参与指导了本书的工作;在研究过程中还得到了清华大学陆新征博士、侯建群研究员等的帮助和支持。在此表示衷心的感谢!此外感谢黄勤翼、曲哲、齐玉军、李易、马千里、缪志伟和卢啸等同志的热心帮助和支持!

本书的研究工作得到“国家自然科学基金(51078321)”、“长江学者和创新团队发展计划项目(IRT00736)”和“山东省自然科学基金(Y2008F43)”等项目的资助,特此致谢!并感谢清华大学“土木工程安全与耐久教育部重点实验室”提供实验研究条件。

冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙是处于发展中的新型结构,要将其应用到实际工程中,有待于进一步补充、完善和发展。由于作者水平有限,本书不可避免存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

2012年4月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 主要研究内容	3
第 2 章 剪力墙受力特性	5
2.1 剪力墙的抗震性能	5
2.2 剪力墙的破坏模式	6
2.3 低矮剪力墙试验研究	8
2.4 改善剪力墙受力性能的研究	10
2.5 本章小结	14
第 3 章 钢网构架混凝土复合结构多层住宅抗震性能研究	15
3.1 多层住宅的墙体构造	15
3.2 墙体试验	15
3.3 多层结构模型抗震试验	26
3.4 足尺模型试验结论	44
3.5 钢网构架混凝土复合结构多层住宅设计建议	44
3.6 结论	46
第 4 章 不同构造措施的 CTSRC 剪力墙受剪性能试验研究	47
4.1 试验设计	47
4.2 试验方法	51
4.3 试验现象	52
4.4 试验结果	57
4.5 试验结果分析	67
4.6 本章小结	69
第 5 章 CTSRC 剪力墙受剪性能试验研究	70
5.1 试验设计	70
5.2 试验方法	71

5.3 试验现象	72
5.4 CTSRC 剪力墙受力特点	78
5.5 试验结果与分析	79
5.6 本章小结	89
第 6 章 CTSRC 剪力墙受剪承载力计算	90
6.1 既有剪力墙受剪承载力计算公式和分析模型	90
6.2 软化拉压杆模型	94
6.3 拉压杆-滑移模型	100
6.4 承载力退化	103
6.5 CTSRC 剪力墙设计原则	104
6.6 本章小结	105
第 7 章 CTSRC 剪力墙恢复力模型	106
7.1 骨架曲线的确定	106
7.2 恢复力模型	115
7.3 承载力退化规律	120
7.4 竖向裂缝开裂荷载	120
7.5 本章小结	122
第 8 章 CTSRC 剪力墙受弯性能分析	123
8.1 CTSRC 剪力墙受弯试验简介	123
8.2 试验结果分析	128
8.3 结论	128
第 9 章 CTSRC 剪力墙设计建议	129
9.1 一般规定	129
9.2 截面设计	129
9.3 构造规定	130
第 10 章 结论与展望	131
10.1 本书主要研究成果	131
10.2 研究展望	132
附录 拉压杆-滑移模型应用算例	133
附录 A 计算整截面墙的受剪承载力 V_{wh1}	133
附录 B 计算沿竖向裂缝发生滑移时的受剪承载力 V_{wh2}	134
参考文献	136

第1章 引言

1.1 研究背景

我国社会总能耗量中,建筑能耗所占比重已达30%以上。未来10年,我国住宅建造量超过50亿 m^2 ,发展住宅产业化是降低住宅的能源和资源消耗、提升质量、保持可持续发展的必由之路。

我国住宅生产长期处于粗放发展阶段,能源、资源消耗是发达国家的3~4倍,住宅功能质量和环境质量不高。目前国内住宅产业化水平仅为10%左右,美国和日本达到80%^[1],差距较大。随着资源日益匮乏,劳动力成本上升,全社会认识到推进住宅产业化的紧迫性;国务院办公厅1999年就颁布了《关于推进住宅产业化提高住宅质量的若干意见》,随后建设部颁布了《商品住宅性能认定管理办法》等文件,鼓励和引导企业走住宅产业化之路。

近年来,随着城镇化进程的加快,我国住宅建造规模发展迅速。住宅产业化是住宅建设发展的重要方向,核心是建立适合工业化的结构技术体系。目前制约我国住宅产业化发展的关键是结构体系的问题。

我国正在推广应用的产业化住宅结构体系主要有配筋混凝土空心砌块体系、预制混凝土结构体系、轻钢结构住宅体系和采用模网技术的现浇剪力墙结构体系等。

(1) 配筋混凝土空心砌块体系

配筋混凝土空心砌块体系是建设部建议推广的一种砌体结构体系。与钢筋混凝土剪力墙结构相比,配筋混凝土砌块砌体剪力墙结构能降低造价,节约钢材,缩短工期^[2],可用于建造多层和高层结构。但是砌块建筑在使用过程中存在一些缺点,主要有易开裂、保温隔热性能差、防渗性能差等几个方面。

(2) 预制混凝土结构体系

预制混凝土技术是工业化的建筑生产方式^[3],是国内外较早研究并应用于住宅建设的工业化结构体系。与现浇结构相比,预制混凝土结构构件质量好、生产效率高,具有突出的节能、环保等特点。住宅建设中采用的预制混凝土结构主要包括框架结构和剪力墙结构^[4]。前者一般用在多层住宅,后者可建设高层住宅。

(3) 轻钢结构住宅体系

轻钢结构是以轻型冷弯薄壁型钢,或轻型焊接和高频焊接型钢,薄钢板、薄壁钢管,轻型热轧型钢及以上各构件拼接、焊接而成的组合构件等为主要受力构件,采用轻质围护材料的低层和多层建筑。轻钢建筑具有布局灵活、工业化程度高、设计制造安装工期短、自重轻等优点^{[5][6]}。限制轻钢结构住宅发展的因素有造价高、配套部品不完备、维护费用高等。

(4) 采用模网技术的现浇剪力墙结构体系

采用模网技术的现浇剪力墙结构是建设部在住宅产业化技术领域建议推广的混凝土结构体系。采用模网技术现浇剪力墙,可以保证结构的整体性,结合使用保温技术,可满足节能要求,施工简便,速度快。该结构体系一般适用于多层建筑,可显著提高生产效率。但竖向镀锌加劲肋会锈蚀,影响剪力墙的受力性能;墙体骨架间接缝位置不连续,无法布置水平钢筋,影响墙体的受力性能^[7]。

冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙(简称为“CTSRC 剪力墙”)结构是一种新型的工业化住宅结构。该结构采用钢骨架作为主要受力骨架,外侧固定水泥板或钢模网(图 1.1(a))等免拆模板,或者采用传统可拆模板,其间浇筑混凝土,构成墙体和楼板等结构构件,形成住宅建筑结构体系。钢骨架是由冷弯薄壁型钢和扁钢或钢拉条连接在一起构成的受力骨架,可承受施工阶段的荷载;骨架表面覆盖的钢模网或水泥板等充当永久模板。钢模网是由镀锌薄钢板加工而成的蛇皮网,上有等间距平行排列的 V 形肋(如图 1.1(b));冷弯薄壁型钢的腹板上开有圆孔(方孔或三角孔),在开孔周边带有加强卷边(如图 1.1(c))。钢骨架和免拆模板的组合体在工厂制作,实现了工业化生产。当 CTSRC 剪力墙结构采用钢模网做免拆模板时,称之为钢网构架混凝土复合结构体系。

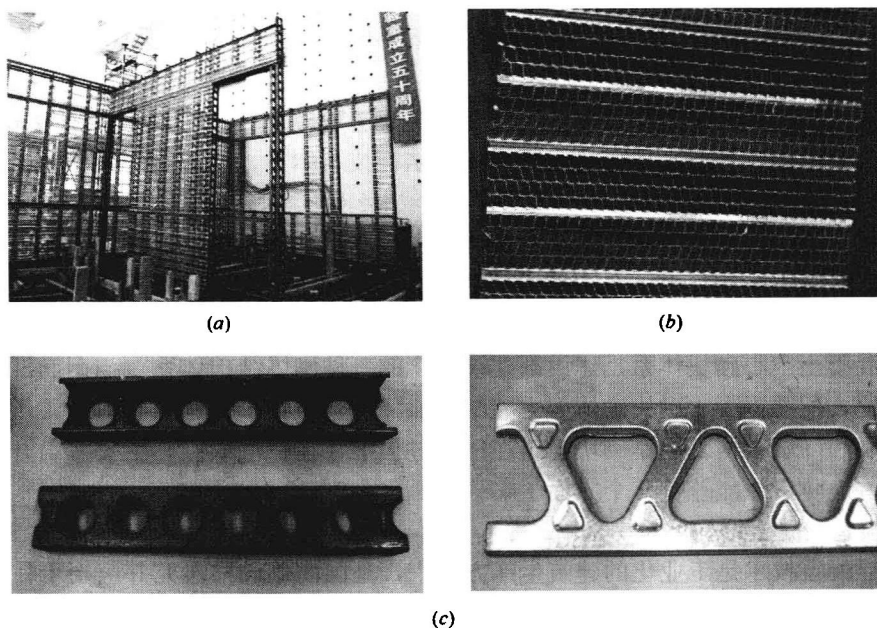


图 1.1 CTSRC 剪力墙结构

(a)钢骨架和钢模网组合体;(b)钢模网;(c)开孔冷弯薄壁型钢

与其他住宅结构体系相比,CTSRC 剪力墙结构住宅体系具有以下优点:

- (1) 该住宅体系是一种现浇钢筋(骨)混凝土剪力墙体系,结构整体性好,抗震性能优越。
- (2) 该住宅体系生产过程的主要环节可实现工业化生产,大大提高了劳动生产率,工程质量有保证。
- (3) 该住宅体系在施工阶段具有轻钢结构体系的特点,装配单元重量轻,运输、安装

方便；钢骨架能够承受施工荷载，方便构件定型、定位，可以取消脚手架；采用免拆模板可代替传统模板，取消了模板工程，极大减少了现场作业量。

(4) 该住宅体系采用自密实混凝土浇筑，减少施工噪声污染；无需搭设脚手架和模板、砌筑墙体、搅拌混凝土等，因此施工辅助区域面积小，保护了周围环境。

(5) 该住宅体系的应用可减少资源消耗，降低造价。主要体现在三个方面：①用钢量与传统现浇混凝土结构基本持平，无模板和脚手架工程；②现场人工作业量少，劳动生产效率；③生产管理和建造效率高。

目前在江苏南京和北京通州已建成了多栋钢网构架混凝土复合结构住宅试点工程。试点工程的用钢量与传统建筑体系基本持平；在南京的试点工程中装配单元的面积平均为 10m^2 ，质量仅为 125kg 左右，最大一片装配单元的面积达到 21m^2 ，运输、现场安装效率非常高，明显高于轻钢结构住宅体系，远大于预制混凝土装配结构体系。

1.2 研究目的

CTSRC 剪力墙结构的基本构件为 CTSC 剪力墙和 CTSC 楼板，可应用于多层住宅和高层住宅，其中的关键技术问题主要有：

- (1) 墙体受力性能与设计计算方法；
- (2) 楼板受力性能与设计计算方法；
- (3) 楼板与墙体的连接构造措施；
- (4) 楼层间墙体的连接构造措施；
- (5) 墙体中的构造措施；
- (6) 整体结构受力性能和设计方法等。

本书将通过试验，研究 CTSC 剪力墙多层住宅墙体及整体结构的受力性能，提出结构设计计算方法和构造措施建议；通过试验和理论分析研究高层结构 CTSC 墙体的受力性能，提出墙体的设计计算方法和构造措施建议；高层结构 CTSC 剪力墙典型构造如图 1.2 所示。本书的研究将为技术规程的编制和工程设计应用提供可靠依据。

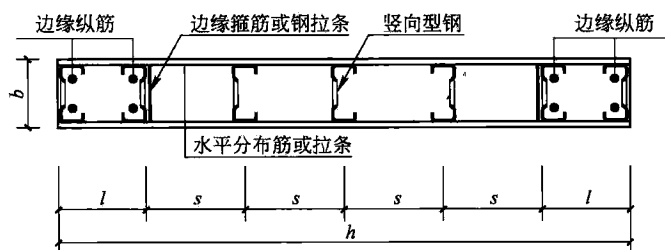


图 1.2 CTSC 剪力墙截面

1.3 主要研究内容

本书对冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙结构进行研究，主要研究工作如图 1.3 所示。根据研究对象可分为两大部分。

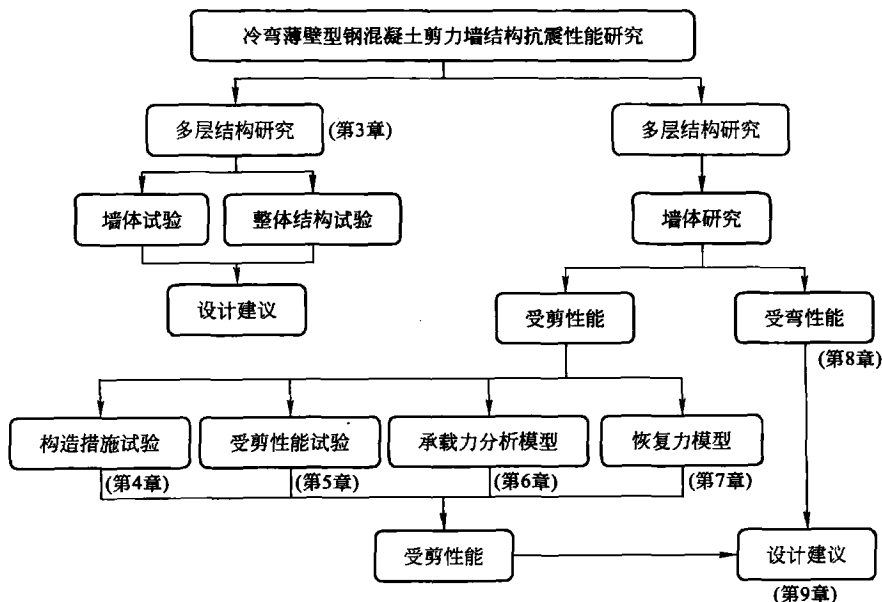


图 1.3 本书研究思路

(1) 钢网构架混凝土复合结构多层住宅结构的研究，为文中第 3 章，包括：

- 根据钢网构架混凝土复合结构多层住宅的构造方法，进行多层结构中 CTSRC 墙体的抗震性能试验；
- 依据多层结构的构造方法和建造工艺，建造一栋钢网构架混凝土复合结构住宅足尺模型，通过拟静力试验，研究结构的破坏过程，验证构造措施；
- 分析钢网构架混凝土复合结构多层住宅的抗震性能，提出设计建议。

(2) 冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙的研究，为文中第 4～9 章，重点研究了高层结构 CTSRC 剪力墙的受剪性能。具体包括：

- 第 4 章和第 5 章为试验研究，研究墙体边缘构件纵筋数量、表面钢模网配置、冷弯薄壁型钢的底部锚固情况等构造对 CTSRC 剪力墙受力性能的影响规律，建议用于实际工程的合理构造措施；研究剪跨比、水平分布钢筋配筋量、轴压比、混凝土强度和竖向型钢截面积等参数对墙体受力性能的影响，分析 CTSRC 剪力墙的破坏机理，总结 CTSRC 剪力墙的受力特点和性能优势。
- 第 6 章和第 7 章为理论研究，建立 CTSRC 剪力墙的受力分析模型，获得承载力的计算方法，构建 CTSRC 剪力墙的骨架曲线模型和恢复力模型，建议 CTSRC 剪力墙的设计原则。
- 第 8 章基于本课题组其他研究人员的试验结果，提出 CTSRC 剪力墙受弯承载力设计建议。
- 第 9 章综合 CTSRC 剪力墙的构造、受剪性能、受弯性能的研究成果，提出 CTSRC 剪力墙的设计建议。

第 2 章 剪力墙受力特性

2.1 剪力墙的抗震性能

剪力墙的刚度大，承载力高，地震作用下可有效控制结构层间变形。在汶川地震中，剪力墙结构和框架-剪力墙结构大多震害较轻^{[8]~[11]}，而很多框架结构遭受严重的破坏，甚至发生倒塌^{[9][12]~[14]}，建筑结构震害如图 2.1 所示^[9]。



图 2.1 汶川地震震害照片
(a) 框架结构；(b) 框架-剪力墙结构

Fintel 考察了从 1960 年智利地震到 1988 年亚美尼亚地震近 30 年世界上发生的几次较大地震，发现虽然剪力墙开裂和损伤程度不同，但是没有一栋含剪力墙的结构倒塌^[15]。剪力墙在地震中的主要震害经验有^[15]：

- (1) 1960 年智利地震(里氏 8.9 级)：配筋不满足规范规定的剪力墙可以控制结构破坏和非结构破坏，墙体开裂对结构性能的影响很小。
- (2) 1963 年马其顿共和国斯科普里地震(里氏 6.2 级)：含有素混凝土墙的框架结构虽

然墙体破坏严重,但是整体结构避免了倒塌;一座含少量素混凝土筒体的14层框架结构破坏非常轻微。而框架结构破坏较严重,有的发生倒塌。

(3) 1967年委内瑞拉的加拉斯加地震(里氏7级)和1971年加利福尼亚地震(里氏6.8级):在地震中含剪力墙结构具有良好的承载力,可以提供足够的刚度,避免结构和非结构破坏,抗震性能显著优于框架结构。

(4) 1972年尼加拉瓜地震(里氏6级):大量建筑物破坏,剪力墙结构表现出良好的抗震性能,推动了美国抗震规范的变化——逐渐接受剪力墙结构和框架-剪力墙结构作为一种优越的抗震体系。

(5) 1977年罗马尼亚地震(里氏7.2级):在这次地震中,装配式大板(剪力墙)结构经受住了地震考验,基本没有破坏。

(6) 1985年墨西哥地震(里氏8.1级):框架结构大量倒塌,特别是学校和停车场破坏严重;设置剪力墙的结构性能较好,一个角部设置少量剪力墙的停车场基本完好。

(7) 1985年智利地震(里氏7.5级):由于混凝土剪力墙被广泛的应用,这次地震造成的灾害比较轻;虽然大部分墙体没有采取延性构造措施,但是仍可以有效控制层间变形,防止结构发生严重破坏。在这次地震中,一些剪力墙出现局部破坏,主要有施工缝滑移、墙趾混凝土受压剥落和边缘纵筋压屈等^[16]。

(8) 1988年亚美尼亚地震(里氏6.9级):这次地震造成超过5万人死亡,大量建筑物倒塌,有的地区95%的建筑物倒塌或震后拆除,震害统计如表2.1所示;装配式大板(剪力墙)结构表现出良好的抗震性能,绝大多数破坏轻微,少数经加固或修复后继续使用,没有一栋发生严重破坏或倒塌。与之相对的是大量装配式框架结构、框架-砌体混合结构和砌体结构倒塌或严重破坏。

亚美尼亚地震建筑震害统计(按结构形式分类)^[15]

表 2.1

	倒塌	震后拆除	修复后使用	可以使用
装配式大板结构	0(0%)	0(0%)	13(17%)	65(83%)
装配式框架结构	72(21%)	57(17%)	130(39%)	77(23%)
框架-砌体混合结构	137(9%)	288(20%)	719(50%)	307(21%)
砌体结构	104(10%)	317(29%)	402(37%)	263(24%)

设置剪力墙是提高结构抗震性能的最经济有效的措施;在住宅结构中设置一定数量的剪力墙,包括素混凝土墙、无延性构造措施的墙,可以避免结构发生严重的破坏和倒塌^[15]。

2.2 剪力墙的破坏模式

剪力墙的破坏模式与墙体高宽比(剪跨比)、钢筋配置、轴压比、截面形状等有关。普通钢筋(骨)混凝土剪力墙在轴力和水平作用下,破坏模式由受弯承载力和受剪承载力相对强弱关系决定,常见的破坏模式有:弯曲破坏、剪切破坏或施工缝剪切错动破坏等。

弯曲破坏的剪力墙具有较好的延性, 剪切破坏的剪力墙峰值荷载后承载力退化迅速, 延性很差。剪切破坏的剪力墙受剪承载力劣化的主要原因有: (1) 反复荷载作用下斜裂缝处骨料间咬合力减小; (2) 纵筋销栓力逐渐减小; (3) 斜裂缝间混凝土受压承载力软化等^[17]。

剪力墙的受剪承载力如果低于受弯承载力, 则在水平力作用下, 纵筋屈服前就发生剪切破坏, 表现出脆性性质, 如图 2.2 中的 a 曲线。增加水平分布钢筋数量和轴压力等, 可提高剪力墙的受剪承载力。当受剪承载力增加到一定程度, 可使剪力墙成为“强剪弱弯”构件。根据“强剪弱弯”程度从小到大, 其破坏特征仍有所差别, 主要表现为弯曲屈服后的剪切破坏、弯曲破坏。弯曲屈服后的剪切破坏是由于剪力墙达到极限抗弯强度后, 随着荷载循环次数的增加和位移的增大, 墙体受剪承载力退化, 使墙体在一定弯曲变形后发生剪切破坏, 这种剪切破坏可称之为延性剪切破坏, 如图 2.2 中的 b 曲线。继续提高墙体的抗剪承载力, 可使墙体成为充分“强剪弱弯”构件, 在水平荷载下墙体发生延性较好的弯曲破坏, 如图 2.2 中的 c 曲线。

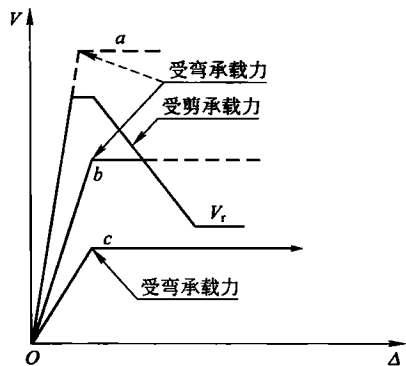


图 2.2 受弯承载力和受剪承载力的关系^[18]

剪跨比是影响剪力墙破坏模式的重要参数, 剪跨比大于 2 时一般由受弯性能控制, 小于 1 时由受剪性能控制, 在 1.5 左右时受弯剪共同控制^{[19][20]}。

根据剪跨比的不同, 可将剪力墙分为剪跨比大于 2 的高墙, 剪跨比小于 2 的低矮剪力墙。低矮剪力墙的剪切破坏模式一般有三种, 即斜拉破坏、斜压破坏和滑移破坏^{[21][22]}。斜拉破坏是墙体在弯剪作用下水平分布钢筋屈服, 出现一条主斜裂缝而破坏, 配置足够的水平钢筋可以防止斜拉破坏。当水平分布钢筋较多时, 墙体在往复荷载下两个方向的斜裂缝交替开合, 斜裂缝间的混凝土压杆的强度逐渐降低, 当压杆的压应力超过混凝土抗压强度时发生斜压破坏; 防止斜压破坏须限制墙体的剪压比。滑移破坏是剪力墙在基础或水平裂缝区域发生过大的剪切滑移变形, 在往复荷载作用下, 沿水平裂缝的抗力机制(骨料咬合力、剪摩力等)发生退化, 形成滑移面, 这时墙体剪力主要通过纵筋的销栓作用传递, 刚度较小, 沿剪切面产生过量的滑移变形; 通过设置足够的竖向钢筋可以控制滑移破坏。

虽然弯曲破坏是剪力墙的设计目标, 但是由于结构几何参数的限制或其他条件的制约, 不但低矮剪力墙难以避免发生剪切脆性破坏, 而且高墙也会出现剪切破坏现象^{[23][24]}。图 2.3 是地震导致高墙剪切破坏的现象, 图 2.3(a) 发生在 1986 年 Kalamata 地震^[23], 图 2.3(b) 是 2008 年汶川地震中某十层框架-剪力墙结构中剪力墙发生的斜向-剪切滑移开裂^[9], 图 2.3(c) 是 2010 年智利地震中墙体的剪切破坏。

剪力墙沿弯曲裂缝或施工缝等位置产生水平剪切滑移错动破坏的情况也不容忽视。滑移变形在剪力墙总变形所占的比例在边缘纵筋屈服后逐渐增大, 导致荷载-位移滞回曲线的捏拢, 墙体的耗能能力降低, 对结构抗震性能不利^{[20][25]}。震害调查也发现了剪力墙的滑移破坏现象, 如图 2.4 所示。

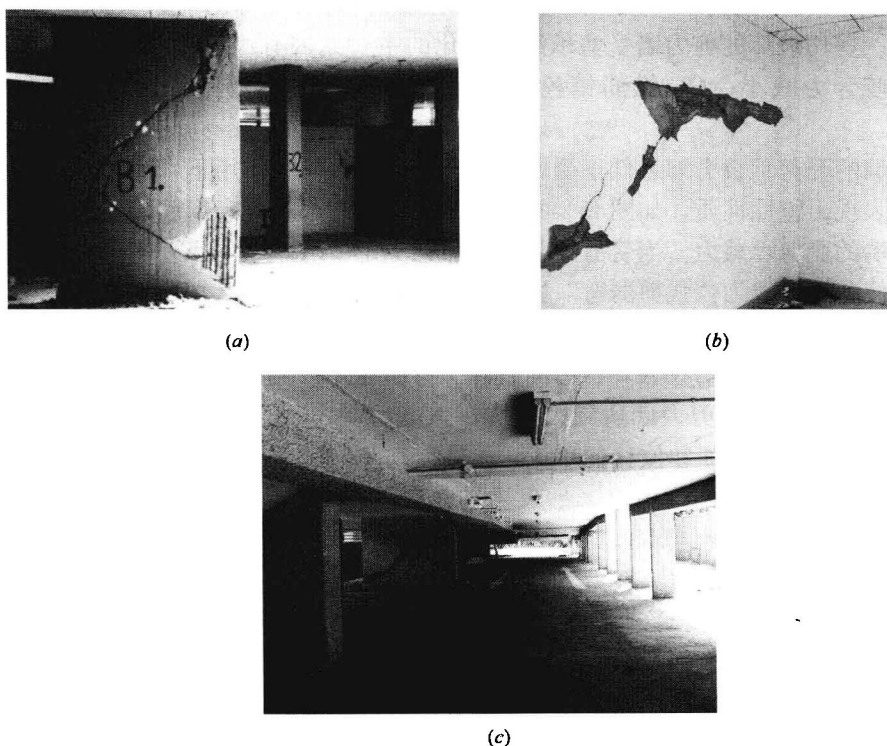


图 2.3 高墙的剪切破坏

(a)1986 年 Kalamata 地震; (b)2008 年汶川地震; (c)2010 年智利地震(来自 Moehle)

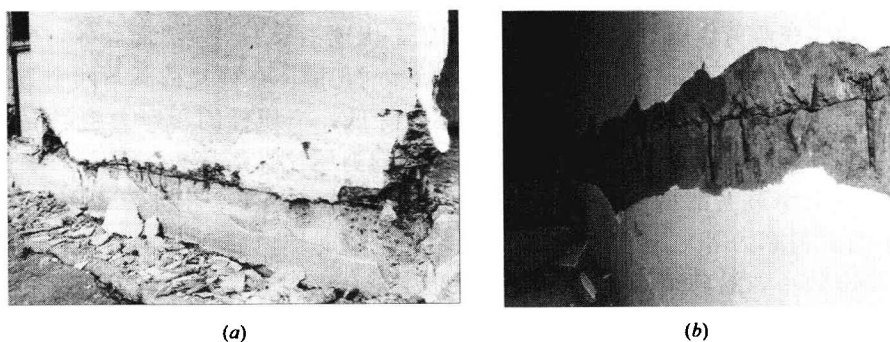


图 2.4 剪力墙滑移破坏

(a)1985 年智利地震^[16]; (b)2008 年汶川地震^[9]

2.3 低矮剪力墙试验研究

从 20 世纪 50 年代开始,国内外学者对低矮剪力墙的受力性能进行了大量的研究。

1949 年美国 MIT 和斯坦福大学^[26]研究了高宽比 0.33~1.11 的剪力墙的极限承载力、荷载-变形曲线和破坏过程等,提出钢筋混凝土墙的纵向和水平方向的最小配筋率为 0.8%;认为试件比例对受力性能影响不明显,矮墙中竖向分布钢筋比水平分布钢筋更有效;随着高宽比减小,承载力增大;墙体未开裂时刚度与配筋率无关。

Barda^[27]研究了8个带翼缘混凝土墙的受力性能,高宽比为0.21~0.96,试验参数包括受弯钢筋、墙体水平和竖向钢筋和高宽比等。结果表明翼缘配筋率对抗剪强度影响不明显;试件在反复荷载作用下承载力比单调加载低10%;抵抗水平荷载时竖向分布钢筋比水平分布钢筋更有效;随着高宽比减小墙体承载力提高,但是趋势减缓。

Cardenas等人^[28]研究了7个矩形截面、高宽比为1.0墙体的受力性能,结果表明反复加载下墙体的承载力比单调加载的情况低7%;水平分布钢筋和竖向分布钢筋对矮墙承载力都有贡献。

Pauly等人^[21]对4片高宽比为0.5的矮墙进行了试验研究,有两个配置斜向正交钢筋。结果表明基础滑移控制了墙体的破坏模式,墙体总位移中相当大比例由基础滑移引起,导致荷载-位移曲线捏拢,减少了墙体刚度和耗能能力;增加对角钢筋可显著减少墙体滑移,改善滞回特性;有翼缘墙体(或钢筋在墙端部集中配置)更容易产生基础滑移;防止低矮剪力墙滑移破坏,可配置斜向钢筋或者施加较大的轴压力。

Maier^[29]进行了10个高宽比为1.0的钢筋混凝土墙体试验,发现墙体的变形能力随着水平钢筋增加而增加;相对于单调加载,反复加载对承载力和变形能力影响不大;随着轴压力和分布钢筋配筋率的增加,最大荷载对应的水平变形减少。

Saatcioglu等人^[30]研究了8个钢筋混凝土矮墙的受力性能,研究表明矮墙受力性能主要受高宽比影响;随着高宽比减小,普通配筋墙体更容易发生滑移,设置基础插筋可以减小剪切滑移,提高墙体承载力和延性;当高宽比小于1时,纵向钢筋对提高墙体弯曲能力和混凝土斜向抗压能力很重要,水平钢筋可改善墙体裂缝分布,但不会显著提高墙体的承载力。

Wood^[31]分析了文献中的143个钢筋混凝土剪力墙的受力性能,得到以下结论;随着分布钢筋配筋率的提高,墙体平均应力提高;剪力墙尺寸不影响受剪承载力;试验加载制度对墙体承载力的影响不明显。

Lefas等人^{[32][33]}进行了17个高宽比分别为1.0和2.0的钢筋混凝土剪力墙的试验,研究表明提高轴压力可以提高墙体侧向刚度和承载能力,降低极限荷载下的水平变形;水平钢筋对受剪承载力的影响不明显;墙体受剪承载力主要由受压区混凝土提供;加载制度不改变墙体的承载力和变形特征。

Hidalgo等人^[23]研究了反复荷载作用下26个剪跨比0.35~1.0的钢筋混凝土剪力墙的受力性能。试验参数是剪跨比、水平和竖向钢筋配筋率、边缘纵向钢筋和混凝土抗压强度等。研究表明反复荷载下墙体的承载力退化随高宽比、水平和竖向分布钢筋配筋率降低而增加;高宽比、水平和竖向钢筋配筋率对墙体耗能能力影响不明显;剪跨比减小,变形能力降低。

Gulec^[29]分析了文献中的9组墙体的试验结果,研究了加载制度对墙体受剪承载力的影响,结果表明反复加载下墙体的受剪承载力是单调加载时承载力的94.2%。

根据上述研究可以得到如下主要结论:

(1)高宽比(剪跨比)是影响剪力墙的受力性能的最重要因素。随着高宽比(剪跨比)减小,墙体承载力提高,变形能力降低,承载力退化程度加快。

(2)水平分布钢筋和竖向分布钢筋对矮墙的受剪承载力都有贡献,随着高宽比(剪跨比)的减少,竖向钢筋的作用越来越明显;增加水平钢筋可以改善墙体的裂缝分布,延缓

墙体的承载力和刚度退化。

- (3) 提高轴压力可以提高墙体侧向刚度和承载能力,降低极限荷载下的水平变形。
- (4) 低矮剪力墙的滑移变形在总变形中所占比例较大,特别是在墙体纵筋屈服后。
- (5) 墙体的受剪承载力主要由受压区混凝土提供。
- (6) 试件尺寸对墙体的受剪承载力影响不明显。
- (7) 相对于单调加载,反复加载下墙体的受剪承载力降低不明显。

2.4 改善剪力墙受力性能的研究

地震震害调查和试验研究表明,剪力墙在小震下的性能可以保证,但是在大震下的性能还存在一些问题,主要包括:

- (1) 剪力墙的破坏模式不易控制,易发生剪切破坏。

(2) 剪力墙即使实现了预期的弯曲破坏模式,由于损伤和耗能一般集中于底部塑性铰区域,整个墙体性能难以充分发挥,而且竖向承载力和塑性铰区域的抗剪能力损失较大。虽然将塑性铰区作为底部加强区来设计,但是不能改变破坏损伤区域集中在底部的不利状况^[34]。

震害调查和相关研究表明,大震时结构的弹塑性变形能力和耗能能力是保证结构安全性的关键因素。要提高剪力墙的大震时的性能,主要是避免发生剪切破坏和改善塑性铰区域的性能,一般通过3个途径:(1)在墙体内设置内部传力机制直接承担水平力,减少混凝土的剪应力水平,相当于提高墙体的剪跨比,主要包括设置斜向钢筋或暗支撑的剪力墙、钢骨混凝土剪力墙以及内藏钢桁架组合剪力墙等;(2)将剪跨比较小的剪力墙设计成大剪跨比墙柱的组合物,例如各种带缝剪力墙;(3)延缓墙趾混凝土压溃,提高塑性铰区域延性,提高抗弯性能,例如钢骨混凝土剪力墙,设置边缘构件也是基于这样的考虑。前两个途径主要避免墙体剪切破坏,第3个途径是改善弯曲破坏时剪力墙塑性铰区域的性能。

2.4.1 设置内部传力机制直接承担水平力

2.4.1.1 配置斜向钢筋、暗支撑或钢桁架的剪力墙

对于易发生剪切破坏的剪力墙,增加水平或者竖向分布钢筋对改善墙体的受力性能的效果不明显。配置斜向钢筋、暗支撑或钢桁架可以避免剪切破坏,减少墙体底部的滑移变形,提高延性和耗能能力,显著改善墙体抗震性能。

Iiya 等人^[35]研究了传统正交配筋和斜向配筋的剪力墙的受力性能,表明配置斜向钢筋可以形成更有效的剪力传递机制,提高墙体耗能能力,减缓刚度退化;可以避免剪切破坏,实现预期的弯曲破坏。

Pauly^[21]通过对高宽比为0.5低矮剪力墙的试验研究发现,配置斜向钢筋能有效地减少滑移变形,改善墙体变形性能,提高耗能能力。Salonikios 等人^{[20][25]}通过11个剪跨比分别为1.0和1.5的墙体的试验研究得到了相同的结论。

Sittipunt 等人^[36]研究了配置斜向钢筋的高宽比为1.5的带边柱墙体的受力性能,研究表明边柱导致墙体剪应力较大,容易发生斜压破坏,传统配筋方式无法提高墙体的性

能;而斜向钢筋改变了墙体的传力机制,减少墙底部剪应力,避免斜压破坏,提高了耗能能力。Shaingchina 等人^[19]对比了轴力作用下配置斜向钢筋的墙体与传统配筋剪力墙的受力性能,得到了相同的结论。

斜向钢筋可以避免剪力墙腹板斜压破坏,但是当斜向钢筋的压应力比较大时,容易发生屈曲,导致墙体承载力的降低^{[19][37]}。曹万林^{[38]~[44]}用暗支撑代替斜向钢筋,提出了带暗支撑剪力墙,暗支撑是由纵筋和箍筋及其周围的混凝土形成的钢筋混凝土核芯束,可以避免斜向钢筋的屈曲;设置暗支撑可以明显地提高剪力墙的承载力,特别是显著提高耗能能力,侧移刚度退化慢,延性明显改善,抗震能力有较大的提高。

配置斜向钢筋可以显著改善墙体的受力性能,特别是可以控制墙体底部滑移变形,Eurocode 8^[45]中规定高宽比小于 2 的剪力墙底部至少 50%的剪力(在其他潜在的滑移面为 25%,例如施工缝位置)由斜向钢筋承担。

2.4.1.2 配置钢骨或钢板的混凝土剪力墙

在钢筋混凝土剪力墙特别是低矮剪力墙中配置钢骨或钢板承担水平和竖向荷载,可改善剪力墙的破坏形态,提高承载力,延性和耗能能力。

赵世春等人^{[46]~[48]}进行了带 SRC 边框的低剪力墙低周反复荷载试验,试验表明带 SRC 边框低剪力墙延性较好,试件坏而不倒;剪力墙受剪承载力由边框、腹板内钢筋和腹板混凝土三部分共同提供。

刘航等人^[49]进行了 6 片带劲性边框的钢筋混凝土低剪力墙的抗震性能试验,研究表明型钢骨架可以改善剪力墙的破坏形态,提高墙体的后期刚度和承载力。

王曙光等人^[50]进行了 10 片劲性钢筋混凝土开洞低剪力墙拟静力试验研究,试验结果表明:劲性钢筋混凝土低剪力墙延性更好,承载力有较大的提高,滞回曲线丰满,有较强的塑性变形能力,可显著提高低剪力墙的抗震性能。

廖飞宇等人^{[52][53]}研究了带圆钢管混凝土、方钢管混凝土、型钢混凝土和钢筋混凝土边框柱的低矮剪力墙的抗震性能,结果表明钢管混凝土剪力墙具有更好的抗震性能。

在 SRC 边框的基础上,进一步在截面中部配置型钢,发现中间型钢可以抑制主斜裂缝出现与开展,从而显著提高墙体抗震性能^{[54][55]}。

吕西林等人^[56]研究了内置钢板的钢筋混凝土剪力墙的受力性能,表明内置钢板可以改善剪力墙的破坏模式,显著提高峰值承载力和极限变形能力,增强延性和耗能能力,明显提高构件的抗震性能。

Katsuhiko^[57]对双层钢板内填混凝土剪力墙进行了研究,这种剪力墙相当于在一个钢盒子中内填混凝土,试验表明试件具有较高的承载力和良好的延性。

在钢筋混凝土剪力墙中配置的斜向钢筋、暗支撑、钢桁架、钢骨(板)等可直接承担水平力,形成有效的内部传力机制,减少混凝土的剪应力水平,避免发生剪切破坏,提高延性和耗能能力。

但在高轴压比下,在低矮剪力墙中配置钢骨对提高抗震性能不明显,魏勇等人^[58]的研究证明了这一点。

2.4.2 将剪跨比较小的剪力墙设计成大剪跨比墙柱的组合物

将剪跨比较小的剪力墙设计成大剪跨比墙柱的组合物,形成带缝剪力墙,可以引导剪

力墙的破坏模式,将剪切型破坏模式转变为弯曲型或弯剪型,提高抗震性能。

带竖缝剪力墙最先由武藤清在1965年提出^[59],即在整体墙上设置若干条竖向平行的通缝,缝中钢筋断开,墙体转变为一系列墙柱组成的通缝墙,墙体的破坏模式由整体墙的剪切破坏转变为墙柱的弯曲破坏,提高了抗震性能。带竖缝剪力墙虽然提高了延性,但是初期刚度和承载力降低较多^[59]。

在通缝墙的基础上,国内研究者改变通缝部位的构造形成不同类型的剪力墙。

夏晓东^[60]提出了带缝槽剪力墙,即墙体中设置若干竖向缝槽,缝槽处混凝土厚度为墙体厚度的一半,钢筋不截断。带缝槽剪力墙兼有整体墙和通缝墙的优点,承载力和早期刚度比整截面墙降低不多,显著提高了延性。但是破坏时墙肢的剪切斜裂缝较多,在后期承载阶段缝槽处的混凝土没有显著退出工作。

戴航^[61]提出了开水平缝的剪力墙,即在墙体上沿对角线方向设置首尾连接的阶梯状水平缝槽。这种剪力墙弹性阶段刚度较大,弹塑性阶段预设水平缝槽起到引导裂缝走向的作用,避免剪切斜裂缝迅速扩展,提高了墙体的延性和承载力稳定性,而承载力降低较少。

李爱群开发了竖缝内设置摩阻装置的剪力墙^[62],这种剪力墙是在墙板中沿整个高度开设一定数量的竖向通缝,整截面墙转变为若干墙柱的组合物,通过通缝处的摩阻控制装置把竖缝两侧的墙柱联结起来,组成摩阻装置的两层钢夹板在地震作用下的往复错动耗散地震能量。这种墙体耗能性能较好,具有良好的工作性能。

吕西林等人^[34]研究了竖缝内填充氯丁橡胶带的剪力墙,在地震作用下通过橡胶和混凝土间的摩擦以及橡胶的变形来耗能。这种墙体具有较好的塑性变形能力和较稳定的滞回特性,但是初期刚度和承载力有一定的损失。

高小旺等人^[63]对竖缝内放置预制混凝土板的剪力墙进行研究,表明其弹性刚度和承载力比整体墙降低不多,变形和耗能能力得到提高。

叶列平^{[64][65]}提出了在通缝墙的开缝部位设置钢筋混凝土连接键而形成的双功能带缝剪力墙。通过设置连接键,使剪力墙在正常使用荷载下表现出整体墙的工作性能,具有较大刚度和承载力,在强震作用下连接键退出工作,双功能墙自动转变为通缝墙,获得与通缝墙基本一致的变形能力。在此基础上,曹万林等人^{[66][67]}提出了钢筋混凝土带暗支撑双功能低矮剪力墙,具有与双功能带缝剪力墙相似的受力性能。

王新杰^[68]提出了内藏竖向软钢耗能带缝低矮剪力墙,通过开竖缝把整体墙分开,使低矮墙体破坏状态由剪切破坏转变为弯剪破坏或弯曲破坏,同时在竖缝内设X形软钢和剪切铅块耗能装置,通过竖缝两边墙肢的错动实现耗能,消耗地震输入能量。

李惠等人^[69]提出了钢管混凝土耗能低矮剪力墙,把普通钢筋混凝土低矮剪力墙中部沿横向断开,用钢管混凝土柱联系,利用钢管混凝土柱的塑性变形消耗地震能量。钢管混凝土耗能低矮剪力墙可以明显提高抗震性能,弹性刚度和极限承载力较普通剪力墙降低不多,变形和耗能能力大大提高。

上述改进方案能够改变剪力墙特别是低矮剪力墙的破坏形态,提高剪力墙的弹塑性变形能力和耗能能力,但在一定程度上削弱了剪力墙的承载力和刚度^[70],不利于结构在风荷载和小震下抗震性能目标的实现,而且构造较为复杂,施工难度较大;同时预设缝往往会导致正常使用状态下出现裂缝,影响结构正常使用功能目标。