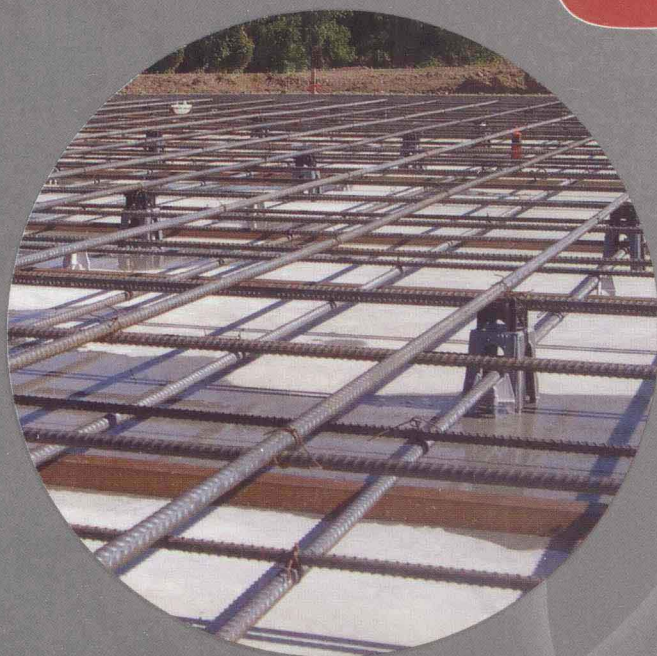




21世纪技术与工程著作系列·土木工程

型钢混凝土异形柱框架 抗震分析与设计

薛建阳 刘祖强 著



科学出版社

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



型钢混凝土异形柱框架 抗震分析与设计

薛建阳 刘祖强 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在型钢混凝土异形柱及其框架节点的研究基础上,系统研究和阐述型钢混凝土异形柱框架的抗震性能及基于位移的抗震设计方法。全书共分8章,主要包括:第1章阐述型钢混凝土异形柱结构的研究意义及异形柱结构体系的研究现状;第2章介绍型钢混凝土异形柱及其框架节点的抗震性能试验;第3~5章阐述型钢混凝土异形柱框架的拟静力试验、静力弹塑性分析、滞回性能及动力反应分析;第6章阐述损伤型钢混凝土异形柱框架的拟动力试验;第7章阐述型钢混凝土异形柱框架抗震性态水平及性能指标的量化;第8章介绍型钢混凝土异形柱框架基于位移的抗震设计方法。

本书可供从事土木工程领域研究的科技人员及高等院校相关专业的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

型钢混凝土异形柱框架抗震分析与设计/薛建阳,刘祖强著. —北京:科学出版社,2013

(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-037331-1

I. ①型… II. ①薛… ②刘… III. ①型钢混凝土—异形柱—框架结构—防震设计 IV. ①TU528.571 ②TU352.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第079082号

责任编辑:童安齐 闫洪霞/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年5月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年5月第一次印刷 印张: 13

字数: 250 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BZ08)

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



前 言

异形柱结构以 T 形、L 形、十形等异形截面柱代替传统的矩形截面柱，柱肢与填充墙等厚，柱棱在室内不凸出，建筑观瞻好，房间实际使用面积大，便于家具布置和室内装饰；同时，异形柱结构能够与墙体改革相结合，符合我国国情。目前，我国应用广泛的是钢筋混凝土异形柱结构。但工程实践和科学研究表明，钢筋混凝土异形柱结构具有明显的局限性，其承载力不足、轴压比限值过低、抗震性能不理想，在梁柱节点处钢筋密集，给布筋和浇筑混凝土造成极大困难。因此，异形柱结构的应用范围受到很大限制，仅适用于抗震设防烈度为 8 度及以下地区的多层建筑。

随着我国国民经济的发展以及城市人口的增长，在大中城市中建造高层乃至超高层住宅与办公楼，以减少城市建设过多占用耕地并降低建筑密度，将是一种必然的趋势。因而，为进一步推广异形柱结构的应用，研究承载力高、轴压比限值大、抗震性能好的新型异形柱成为一项重要课题。

型钢混凝土异形柱是指在异形（L 形、T 形、十形等）截面中主要配置型钢并配有适量纵向钢筋和箍筋的新型结构柱。它不仅具有异形柱的优点，同时还秉承了型钢混凝土结构承载能力高、抗震性能好等优越性，因而具有广阔的应用前景。型钢混凝土异形柱框架是以型钢混凝土异形柱作为竖向承重构件，由梁和板连接而成的空间结构。

笔者所在的课题组分别于 2006 年和 2008 年进行了 17 根型钢混凝土异形柱和 17 个型钢混凝土异形柱框架节点的低周反复加载试验，获得了型钢混凝土异形柱及其框架节点的破坏形态和抗震性能指标，提出了型钢混凝土异形柱正截面和斜截面承载力计算方法以及节点核心区的抗剪承载力计算方法。在此基础上，2011 年又进行了 3 榀型钢混凝土异形柱平面框架的低周反复加载试验，包括 1 榀实腹式配钢的型钢混凝土异形柱中框架、1 榀实腹式配钢的型钢混凝土异形柱边框架和 1 榀空腹式配钢的型钢混凝土异形柱中框架，揭示了该新型框架的

破坏形态和破坏机制,获得了其承载力、延性、耗能能力、层间位移角、刚度退化等抗震性能指标,提出了型钢混凝土异形柱框架的三折线恢复力模型。之后,对1榀损伤型钢混凝土异形柱框架进行了拟动力试验,获得了其位移、加速度、基底剪力等时程反应,揭示了型钢混凝土异形柱框架在遭受主震后抵抗余震的能力。根据试验研究结果,采用有限元软件对型钢混凝土异形柱框架进行了静力弹塑性分析、滞回性能分析以及动力反应分析,明确了其在水平荷载作用下的工作机理,获得了一些主要因素对型钢混凝土异形柱框架受力性能的影响规律;同时,探索并提出了型钢混凝土异形柱框架的抗震性能水平和性能目标,给出了其对应不同性能水平的层间位移角限值,进而将基于位移的抗震设计理论应用于型钢混凝土异形柱框架,并结合其结构特点给出了具体设计步骤。通过上述研究,期望能为促进型钢混凝土异形柱结构的推广和应用尽一点微薄之力。

本书由薛建阳、刘祖强执笔撰写。作者的研究生高亮、倪茂明、张昭祥在试验及理论分析中做了大量工作。特别感谢西安建筑科技大学土木工程学院的赵鸿铁教授,他对本书的内容提出了很好的建议。感谢广西大学土木建筑工程学院陈宗平教授和陕西省建筑科学研究院工程抗震研究所刘义工程师的支持。还要感谢中国建筑西北设计研究院有限公司高级工程师周鹏、葛鸿鹏、曾凡生等的帮助。本研究得到国家自然科学基金(项目编号:50978217)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号:20096120110005)、陕西省留学人员科技活动择优资助项目(陕外专发[2010]26号)、长江学者和创新团队发展计划资助项目、“八桂学者”专项经费资助项目、中建股份有限公司科技研发课题(项目编号:CSCEC-2009-Z-31)等科研项目的资助,在此一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,同时部分内容有一定的探索性质,敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出及研究的意义	1
1.2 异形柱结构体系的研究现状	2
1.2.1 钢筋混凝土异形柱结构体系的研究概况	2
1.2.2 型钢混凝土异形柱结构体系的研究概况	7
1.2.3 钢管混凝土异形柱结构体系的研究概况	10
1.2.4 钢异形柱结构体系的研究概况	11
1.3 本书的主要研究工作	12
1.3.1 型钢混凝土异形柱框架拟静力试验	12
1.3.2 型钢混凝土异形柱框架抗震性能指标分析	12
1.3.3 型钢混凝土异形柱框架静力弹塑性分析	12
1.3.4 型钢混凝土异形柱框架滞回性能和动力时程分析	12
1.3.5 损伤型钢混凝土异形柱框架拟动力试验研究	13
1.3.6 型钢混凝土异形柱框架性态水平及性能指标限值研究	13
1.3.7 型钢混凝土异形柱框架基于位移的抗震设计方法研究	13
第 2 章 型钢混凝土异形柱及其框架节点的抗震性能试验	14
2.1 试件的设计	14
2.1.1 型钢混凝土异形柱的设计	14
2.1.2 型钢混凝土异形柱框架节点的设计	16
2.2 试件的制作	19
2.2.1 钢骨架的制作	19
2.2.2 混凝土的制作	21
2.3 加载方案	21
2.3.1 试验方法	21
2.3.2 加载装置	21
2.3.3 加载制度	21
2.4 试验过程及破坏形态	23
2.4.1 型钢混凝土异形柱的破坏形态	23
2.4.2 型钢混凝土异形柱框架节点的破坏形态	23
2.5 试验结果及分析	26
2.5.1 滞回曲线	26

2.5.2 骨架曲线	30
2.5.3 承载力及位移	32
2.5.4 耗能能力	32
2.5.5 延性	35
第3章 型钢混凝土异形柱框架拟静力试验	41
3.1 试验目的	41
3.2 试件的设计及制作	41
3.2.1 模型选择	41
3.2.2 试件设计	42
3.2.3 试件制作	44
3.3 试验测试项目	48
3.3.1 主要测试内容	48
3.3.2 测试手段及方法	48
3.4 加载方案	51
3.4.1 加载装置	51
3.4.2 加载制度	52
3.5 试验过程	52
3.5.1 加载破坏过程	52
3.5.2 型钢应变	59
3.5.3 破坏特征分析	63
3.5.4 破坏机制	64
3.6 试验结果及分析	64
3.6.1 滞回曲线	64
3.6.2 骨架曲线	66
3.6.3 延性	68
3.6.4 耗能能力	68
3.6.5 位移角	69
3.6.6 刚度	71
3.6.7 强度	76
3.6.8 恢复力模型	78
3.6.9 $P-\Delta$ 效应影响分析	82
3.6.10 累积损伤	83
第4章 型钢混凝土异形柱框架静力弹塑性分析	87
4.1 概述	87
4.2 模型建立	87
4.2.1 材料本构关系	87
4.2.2 单元类型选取及网格划分	90

4.2.3 定义相互作用·····	92
4.2.4 施加边界条件和荷载·····	93
4.2.5 非线性方程的求解·····	93
4.3 计算结果与试验结果的对比分析·····	93
4.3.1 骨架曲线·····	93
4.3.2 出铰机制·····	96
4.4 型钢混凝土异形柱框架受力特性分析·····	97
4.4.1 混凝土应力分析·····	97
4.4.2 型钢应力分析·····	101
4.4.3 变形分析·····	109
4.5 型钢混凝土异形柱框架力学性能影响因素分析·····	110
第5章 型钢混凝土异形柱框架滞回性能及动力反应分析 ·····	119
5.1 型钢混凝土异形柱框架滞回性能分析·····	119
5.1.1 概述·····	119
5.1.2 模型建立·····	120
5.1.3 滞回性能计算结果验证·····	123
5.1.4 弯矩-曲率滞回曲线·····	125
5.1.5 $P-\Delta$ 效应对型钢混凝土异形柱框架滞回性能的影响分析·····	129
5.1.6 轴压比对型钢混凝土异形柱框架滞回性能的影响分析·····	130
5.2 型钢混凝土异形柱框架动力反应分析·····	131
5.2.1 模型建立·····	132
5.2.2 地震波选择·····	132
5.2.3 动力响应分析·····	132
第6章 损伤型钢混凝土异形柱框架拟动力试验 ·····	141
6.1 试验目的·····	141
6.2 试验模型·····	141
6.3 加载及量测方案·····	141
6.3.1 拟动力试验基本原理·····	141
6.3.2 地震波的选取·····	142
6.3.3 加载装置与加载制度·····	143
6.3.4 测点布置·····	143
6.4 加载过程·····	144
6.5 主要试验结果分析·····	144
6.5.1 应变·····	144
6.5.2 加速度反应·····	147
6.5.3 位移反应·····	148
6.5.4 承载力·····	150

6.5.5 滞回特性及耗能能力	151
6.5.6 刚度	153
6.6 损伤型钢混凝土异形柱框架抗震性能评估	153
第7章 型钢混凝土异形柱框架抗震性能水平及性能指标的量化	154
7.1 概述	154
7.2 型钢混凝土异形柱框架的性能水平和性能目标	155
7.2.1 地震设防水准	155
7.2.2 性能水平	156
7.2.3 性能目标	157
7.3 型钢混凝土异形柱性能指标的量化	158
7.3.1 型钢混凝土异形柱的性能水平及失效判别标准	158
7.3.2 型钢混凝土异形柱变形容许值的试验统计分析	159
7.3.3 型钢混凝土异形柱不同性能水平的变形容许值	163
7.4 型钢混凝土异形柱框架性能指标的量化	164
7.4.1 钢筋混凝土框架层间位移角限值	165
7.4.2 型钢混凝土矩形柱框架层间位移角限值	165
7.4.3 型钢混凝土异形柱框架层间位移角试验结果分析	166
7.4.4 型钢混凝土异形柱框架层间位移角限值	167
第8章 型钢混凝土异形柱框架基于位移的抗震设计	170
8.1 概述	170
8.2 型钢混凝土异形柱框架目标位移的确定	171
8.3 多自由度体系的等效过程	172
8.4 位移反应谱	174
8.5 基于位移的抗震设计步骤	175
8.6 型钢混凝土异形柱框架结构构件截面设计	176
8.6.1 型钢混凝土异形柱正截面承载力计算	177
8.6.2 型钢混凝土异形柱斜截面承载力计算	178
8.6.3 型钢混凝土异形柱框架节点核心区受剪承载力计算	181
8.7 算例及其分析	182
8.7.1 按“暂时使用”性能水平设计	183
8.7.2 按“正常使用”性能水平校核	187
8.7.3 按“接近倒塌”性能水平校核	188
主要参考文献	190

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出及研究的意义

异形柱是指截面形状为 L 形、T 形、十形或 Z 形的结构柱。异形柱结构是以异形柱代替传统的矩形柱作为竖向支承构件而形成的结构体系，主要包括异形柱框架结构和异形柱框架-剪力墙结构。

异形柱结构中柱肢与填充墙等厚，避免柱棱在室内凸出，建筑观瞻好，房间“得房率”高，实际使用面积大，便于家具布置和室内装修，为建筑设计及使用功能带来灵活性与方便性。同时，异形柱结构采用轻质、保温、隔热、高效的墙体材料作为填充墙及内隔墙，构成异形柱框架轻节能结构体系，符合墙体改革、节约能源的要求，并充分利用工业废料，减少环境污染。

由于异形柱结构优越性显著，深受国家的重视以及业主和房地产开发商的青睐。国家为保证异形柱结构健康顺利的发展、推广和应用，颁布了多项指导性文件，行业标准《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006) 也于 2006 年 8 月 1 日正式实施。从 20 世纪 70 年代开始，天津、广东、甘肃、上海等地已先后建成异形柱结构住宅，取得了可观的经济和社会效益。

必须指出，目前推广应用的异形柱结构，均是钢筋混凝土结构。科学研究和工程实践表明，钢筋混凝土异形柱结构具有明显的局限性，使异形柱结构的发展受到限制。

(1) 钢筋混凝土异形柱承载力不足。异形柱的柱肢与填充墙等厚，肢高肢厚比不大于 4，使得其截面面积有限，同时受到混凝土强度和截面配筋率的限制，导致钢筋混凝土异形柱的承载力较低。因此，规程规定的钢筋混凝土异形柱结构的最大适用高度较低，尤其是在较高抗震设防区，8 度设防时框架结构的最大适用高度仅为 12m。

(2) 钢筋混凝土异形柱的轴压比限值过低。由于截面不对称，配筋也很难做到对称，造成钢筋混凝土异形柱承受水平荷载作用时，延性出现明显的不对称，一个方向的延性很好，而相反方向的延性却很差。为保证延性，现行规程对钢筋混凝土异形柱的轴压比限值进行严格控制，即轴压比限值较低。

(3) 钢筋混凝土异形柱框架节点较为薄弱。由于柱肢较薄，造成节点核心区的截面较小，钢筋混凝土异形柱框架节点的抗剪承载力明显低于矩形柱框架节点。

同时,由于柱肢厚度一般与梁宽相同,梁和柱的受力钢筋在同一平面内相交,钢筋密集且位置不易错开,导致混凝土浇筑以及钢筋锚固很难保证施工质量。

(4) 钢筋混凝土异形柱结构的抗震性能不理想。与矩形柱相比,异形柱截面不规则使得其受力特性发生改变,造成钢筋混凝土异形柱结构的抗震性能较差。不同的荷载作用方向,异形柱的承载力、刚度、延性等抗震性能指标差异较大;异形柱截面周长较大,导致混凝土脱落面积大,受荷载作用时承载力下降较快;异形柱受扭时,在内拐角处容易出现应力集中现象。正是由于对其抗震性能的顾虑,我国规程规定钢筋混凝土异形柱结构的适用范围为设防烈度为 8 度及以下地区。

显而易见,要扩大异形柱结构的应用范围,建造高层及超高层的异形柱结构,或者在高地震烈度区建造异形柱结构,则研究承载力高、轴压比限值大、抗震性能好的新型异形柱结构已成为一个亟待进行的课题。

作者所在的科研团队多年来一直致力于型钢混凝土(SRC)结构的研究,经验丰富,理论水平高,近年来经过对异形柱结构进行反复研究和探索,提出 SRC 异形柱结构体系的概念并进行了较为系统的研究。前期主要针对 SRC 异形柱及其框架节点的基本力学行为和抗震性能进行研究,结果显示,和钢筋混凝土异形柱结构相比, SRC 异形柱结构的承载力高、抗震性能好、节点性能得到明显改善,在高层结构及高地震烈度区具有良好的应用前景。SRC 异形柱及其框架节点只是整体结构的一部分,其性能不能完全反映整体结构的性能,因此要更深入地了解该新型结构体系,则需要对 SRC 异形柱整体结构进行研究。本书在课题组前期研究的基础上,主要对 SRC 异形柱框架结构的抗震性能进行试验研究和理论分析。

1.2 异形柱结构体系的研究现状

1.2.1 钢筋混凝土异形柱结构体系的研究概况

1. 钢筋混凝土异形柱

由于异形柱在房间中不露出柱棱,美观适用,国外学者从 20 世纪 70 年代就开始对钢筋混凝土异形柱的力学性能及设计方法进行研究。委内瑞拉的 Joaquin Marin、印度的 Ramamurthy L N 和 Hafeez Khan T A 以及美国的 Cheng-Tzu 和 Thomas Hsu 等先后对 L 形柱、槽形柱和 T 形柱进行试验及理论研究,其他一些学者则通过计算机对钢筋混凝土异形柱进行数值模拟分析。研究分析主要针对异形柱双向偏心受压的承载力计算,得到一些经验公式和图表。国外学者的研究仅限于钢筋混凝土异形柱构件正截面承载力,而有关异形柱其他方面的研究,文献中尚未发现。

我国对钢筋混凝土异形柱的研究是从 20 世纪 90 年代开始的,各科研单位先

后进行了大量关于钢筋混凝土异形柱的试验（见表 1.1），对其正截面和斜截面承载力以及抗震性能进行了全面研究，水平较高，成果显著。目前，我国对上述的研究已处于国际前列。

表 1.1 我国钢筋混凝土异形柱试件形式及数量汇总

单位名称	正截面承载力				斜截面承载力			抗震性能				备注
	L	T	十	Z	L	T	十	L	T	十	Z	
华南理工大学	28	8			15			11				
	4	8	7									高温
河北工业大学								15	15	10		
天津大学	7	12	8		12	11						
					9							高强混凝土
	1	1										纤维混凝土
北京工业大学								7	7	7	3	带暗柱
广西大学	9											不等肢
		3										不等肢 高强混凝土
	6	5										不等肢 轻骨料
大连理工大学	7	10	4		7	7	2					
	5	7			5	7		5	8			不等肢
西安建筑科技大学								6	12	6		宽肢
同济大学								10	4		6	宽肢
沈阳建筑大学								4		2		宽肢
东南大学				10								
北京航空航天大学								6				

对钢筋混凝土异形柱正截面承载力的研究表明，截面应变基本符合平截面假定；破坏形态可分为大偏压、小偏压和界限偏压三种；截面中和轴一般既不与弯矩作用平面垂直，也不与截面边缘平行，其位置随截面尺寸、荷载作用方向、混凝土强度及配筋等因素的变化而变化；正截面承载力与截面尺寸、材料强度、配筋率以及荷载作用方向有关，加载方向不同，L形柱和T形柱的承载力差异较大，其设计应由最不利荷载作用方向的承载力控制，而十形柱的承载力则受加载方向的影响较小；正截面承载力计算主要有数值积分和简化计算两种方法，但这两种方法都不便于用于工程设计中，天津大学开发的CRSC配筋计算软件，为异形柱的设计带来了方便。

对钢筋混凝土异形柱受剪性能的试验研究表明，破坏特征为受剪斜裂缝，其

主要发生在腹板处,翼缘能使裂缝受到抑制;受剪承载力与剪跨比、轴压比、配箍率以及加载方式有关,根据试验结果,得出多种异形柱受剪承载力计算公式;双向受剪作用下,异形柱的承载力与水平荷载作用方向有关,翼缘的存在使其相关曲线呈外凸的梅花瓣形,可见只要异形柱边缘两个方向的受剪承载力分别满足要求,则斜向受剪承载力同样满足要求。

对钢筋混凝土异形柱抗震性能的研究表明,异形柱的抗震性能比矩形柱差;轴压比对异形柱抗震性能的影响较大,轴压比低,延性好,轴压比高,延性差;由于异形柱特殊的截面形式,其轴压比限值比矩形柱低得多;异形柱中配置暗柱可以提高其延性,改善其抗震性能;采用纤维混凝土同样对异形柱的抗震性能有所改善。

2. 钢筋混凝土异形柱框架节点

异形柱的柱肢较薄,导致梁柱节点的核心区较小,抗剪能力较差,同时梁柱交接处钢筋密集,混凝土不容易浇筑密实,因此钢筋混凝土异形柱框架节点成为此结构的薄弱环节。为了解决上述问题,国内各科研单位进行了大量试验及理论研究,系统分析了钢筋混凝土异形柱框架节点的受力特性,为异形柱结构的推广应用提供了参考。各单位的试验研究情况如表 1.2 所示。

表 1.2 我国钢筋混凝土异形柱框架节点试件数量汇总

单位名称	L 形		T 形		十形		备注
	顶层	中间层	顶层	中间层	顶层	中间层	
国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院		1		3		3	装配式
大连理工大学		2		2			
		2		2			不等肢
华南理工大学			5	5			
天津大学				3			板柱节点
	3	4		3	4	2	
	2				2		不等肢
				1		1	纤维混凝土
沈阳建筑大学				14			
广西大学		3					不等肢
重庆大学				4			
						4	错层节点
南昌大学			5				
西安建筑科技大学				6			
北京航空航天大学	2		2		2		分散式配筋梁

研究表明,钢筋混凝土异形柱框架节点的破坏特征与普通矩形柱框架节点相似,梁柱主筋在承受较大荷载时,部分钢筋会发生滑移,但不是很严重,可以满足黏结锚固要求。

由于翼缘的存在,异形柱(L形、T形和十形)框架节点的承载力比无外伸翼缘的扁柱框架节点高,但由于翼缘不能充分发挥作用,其承载力又比截面面积相同的矩形柱框架节点低(角节点低33%、边节点低18%、中节点低8%);影响异形柱节点抗剪强度的因素主要有混凝土强度、轴压比、节点区水平箍筋和加载方式(低周反复加载和双向加载);根据试验结果,提出多种节点核心区抗剪承载力计算公式,其形式随着研究的深入越来越合理,计算结果也越来越精确。

T形柱与十形柱的顶层节点可以采用适当将梁中部分钢筋分散到翼缘板中的方法解决节点区钢筋拥挤的问题,其承载力和抗震性能所受影响不大,但L形柱的顶层节点所受影响较大,不适合采用此种方法;采用聚丙烯纤维混凝土可以提高异形柱框架节点的抗裂荷载,减小累积损伤,改善抗震性能,但对耗能能力影响不显著。

3. 钢筋混凝土异形柱框架

为了充分了解钢筋混凝土异形柱框架的抗震性能,探索更为合理的设计方法,国内各科研单位进行了大量试验研究和理论分析工作。中国建筑科学研究院对2榀钢筋混凝土异形柱平面框架进行低周反复加载试验,研究其恢复力特性及抗震能力。

天津市建筑材料工业设计院和中国地震局工程力学研究所合作,对1个缩尺比为1:3的7层钢筋混凝土异形柱支撑框架结构模型进行地震模拟振动台试验研究。结果表明,该结构体系具有较好的抗震性能,斜杆开裂后仍能继续工作,而且具有较好的地震反应特性和抗震消能作用。

河北工业大学先后对3榀钢筋混凝土异形柱中框架(包括空框架、带门洞轻质填充墙框架和底层带支撑的轻质填充墙框架各1榀)、1榀轻质填充墙钢筋混凝土异形柱边框架和2个钢筋混凝土异形柱空间框架(1个空框架和1个带楼梯框架)进行抗震性能试验。结果显示,异形柱框架的破坏特征为梁铰破坏机制,抗震性能较好;支撑可以显著提高异形柱框架的层刚度,增强其耗能能力;轻质填充墙有较大的初始刚度,在计算框架层刚度时不能忽略;对异形柱框架结构,宜考虑楼梯对层刚度的贡献;异形柱边框架的层刚度小于中框架,但两者的滞回曲线形式一致,可采用共同的恢复力模型。

华南建设学院西院对1个缩尺比为1:6的5层基础隔震异形柱框架模型进行地震模拟振动台试验研究。结果表明,基础隔震异形柱框架结构的地震作用计算可以采用基础隔震普通框架结构的方法进行,能够满足工程要求。

东南大学先后对1个1:6的12层大开间钢筋混凝土异形柱框架模型和1个1:8的9层(带转换层)钢筋混凝土异形柱框架模型进行振动台试验,以及对

3 榀 2 跨 2 层的异形柱框架（包括 1 榀空框架和 2 榀 ALC 板材填充墙框架）进行低周反复荷载试验。结果表明，异形柱框架具有良好的抗震性能，破坏时呈梁铰机制；楼板角部破坏严重，设计时应采取相应措施；转换梁变形较大，但异形柱与转换梁的连接处没有发生破坏；ALC 板性能良好，对框架的承载力和抗侧刚度均有贡献。

郑州工业大学对 1 个几何相似比为 1:7 的 15 层钢筋混凝土异形柱斜撑框架结构进行模拟地震振动台试验。结果表明，异形柱斜撑框架结构在强震作用下的破坏主要发生在斜撑及框架梁上，柱端基本完好，为典型的梁铰破坏机制，表现出良好的抗震性能。

福州大学对 3 个底层抽柱的钢筋混凝土空间框架（2 个底部矩形柱上部异形柱框架和 1 个矩形柱框架）进行低周水平加载试验。结果表明，楼板破坏严重，这说明设计时假定楼盖刚度无限大和实际情况有所差别；异形柱框架的危险截面不在异形柱上，而是和矩形柱框架一样发生在底层，但异形柱仍比矩形柱薄弱，应力集中现象明显；异形柱框架的滞回曲线饱满，具有良好的耗能能力。

北京工业大学先后对 2 榀大开间异形柱框架（1 榀空框架，1 榀沿高变刚度设支撑）和 2 榀底部矩形柱上部异形柱框架（中框架和边框架各 1 榀）进行抗震性能试验。结果表明，采用带暗柱的异形柱，可以明显减轻结构底层柱底的破坏程度，提高承载力和延性，大开间的异形柱框架也具有良好的抗震性能；沿高设变刚度支撑可以延缓整个结构的破坏时间，提高抗侧能力，但支撑的破坏具有一定的脆性，须对其适用高度作必要限制；底部矩形柱上部异形柱框架结构为“强柱、弱梁、节点更强”型，底层采用矩形柱可以减轻其破坏程度，使各层刚度和变形分布更加均匀，矩形柱和异形柱转换处采用暗柱减轻了二层柱底的破坏程度，避免了薄弱层向二层的转移。

同济大学先后对 1 个 1:7 的 15 层钢筋混凝土异形柱框-桁架和 2 榀高性能钢筋混凝土异形柱边框架分别进行振动台试验和低周反复加载试验。结果表明，异形柱框架为“强柱弱梁”式结构；异形柱框-桁架结构的抗侧移能力比异形柱框架结构强，但其地震作用和地震内力也有所增大；采用高性能混凝土可以使异形柱边框架的水平承载力和变形性能明显提高，抗震性能显著改善。

北京航空航天大学对 2 榀由 L 形柱和 T 形柱组成的非对称钢筋混凝土框架进行低周反复加载试验。结果表明，异形柱框架具有良好的抗震性能，破坏呈梁铰机制；加载制度不同对结构承载力和延性影响不大。

南京工业大学对 1 个 12 层的钢筋混凝土异形柱框架-剪力墙结构模型进行模拟地震振动台试验。结果表明，该结构具有较强的抗震能力，满足强柱弱梁的要求，结构的受力和变形呈典型的弯剪型。

昆明理工大学对 8 度区的 1 个 6 层异形柱框架和 1 个 10 层异形柱框架-剪力

墙结构进行振动台试验。结果表明,两种结构均能够满足抗震设防目标,破坏形态为梁铰破坏;异形柱框架节点的承载力应当予以重视;高烈度区优先选用异形柱框架-剪力墙结构。

浙江大学对2个单层单跨的钢筋混凝土异形柱空间框架进行双向拟静力试验。结果表明,异形柱框架的破坏呈现“强柱弱梁,节点更强”的特点;异形柱框架节点需要加强,尤其是节点与楼板交界面处。

天津大学对4榀钢筋混凝土异形柱框架进行低周反复加载试验。结果表明,异形柱框架的破坏属于梁铰机制,满足抗震设计要求;底层层高对异形柱框架的性能有影响,层高低,承载力高,延性好;底层采用宽肢异形柱可以改善结构的抗震性能;采用纤维增强混凝土可以提高异形柱框架的抗震能力。

重庆大学对2个无黏结预应力平板-异形柱结构进行低周反复荷载试验。结果表明,该结构具有良好的抗震能力,破坏时形成梁端塑性铰-板屈服铰线屈服机构,为延性破坏,各项指标均满足抗震要求。

上海建筑科学研究院对1榀陶粒混凝土异形柱框架结构进行拟静力试验。结果表明,该框架符合“强柱弱梁,强剪弱弯”的抗震设计原则,延性与普通框架相当,极限变形能力略差。

西安建筑科技大学先对12层异形柱小型混凝土空心砌块组合结构进行拟动力试验。结果表明,该组合结构体系动力特性上更接近剪力墙结构体系,基本自振周期短,地震作用力较大。之后又对3榀单层钢筋混凝土宽肢异形柱框架(1榀空框架和2榀带砌块填充墙框架)和2榀4层钢筋混凝土宽肢异形柱框架(1榀空框架和1榀带砌块填充墙框架)进行拟静力试验。结果表明,宽肢异形柱框架抗震性能好,破坏时呈现梁铰破坏机制,混凝土空心砌块填充墙刚度对框架刚度影响较大,计算时不能忽略。

总观钢筋混凝土异形柱结构体系的研究,不难看出,钢筋混凝土异形柱的承载力较低,轴压比限值比矩形柱严格,延性、耗能能力等抗震性能不理想,导致其仅适用于抗震设防烈度为8度及以下地区。尽管通过设置斜撑、设暗柱或交叉筋、采用纤维混凝土等办法改善钢筋混凝土异形柱的性能,并在一定程度上取得较好效果,但其仍然存在不足。异形柱结构中设置斜撑在某些情况下会给建筑布置及施工带来困难,而设暗柱或交叉筋以及采用纤维混凝土对结构承载力的提高不显著。因此,要扩大异形柱的应用范围,研究承载力高、抗震性能好的新型异形柱结构十分必要,也非常有意义。

1.2.2 型钢混凝土异形柱结构体系的研究概况

1. 型钢混凝土异形柱

SRC异形柱是异形柱结构和SRC结构相结合产生的一种新型结构形式,

其性能值得研究。广西大学较早对此方面展开研究,其研究主要针对空腹式配钢的 SRC 异形柱,包括对 4 根不对称 T 形柱、3 根不等肢 L 形柱和 3 根不对称十形柱进行正截面承载力试验研究,初步掌握了 SRC 异形柱构件破坏的一般规律。试验结果表明,在截面配钢率不是很大的情况下,其极限承载力仍比钢筋混凝土异形柱明显提高。对 5 根等肢和 3 根不等肢的对称 T 形柱进行斜截面承载力试验研究,分析了影响 SRC 异形柱抗剪承载力的因素,给出了计算其单向抗剪承载力的表达式。对 4 根 L 形柱和 3 根不对称 T 形柱进行抗震性能试验研究,结果表明, SRC 异形柱的承载力高,延性好,抗震性能比钢筋混凝土异形柱优越。

西安理工大学主要对空腹式配钢的 SRC 异形短柱进行研究,包括对 3 根 L 形柱和 3 根 T 形柱进行轴向受压试验,得出的结论是 SRC 异形柱的轴向受压承载力不是将钢筋混凝土部分与型钢部分简单叠加,而是还要对其进行修正;对 3 根 L 形柱和 3 根 T 形柱进行不同轴压比下的水平周期性加载试验,结果表明轴压比越高, SRC 异形短柱的延性越差;对 15 根 L 形柱和 15 根 T 形柱进行抗震性能试验研究,分析了轴压力系数、剪跨比、配钢率、体积配箍率等对 SRC 异形短柱抗震性能的影响,提出了轴压比限值,得出了 L 形和 T 形短柱的抗剪承载力计算公式。

沈阳建筑大学主要对实腹式配钢的 SRC 异形柱进行正截面承载力研究,分别进行了 L 形柱、T 形柱和十形柱的轴心受压、单向小偏心受压、单向大偏心受压、双向小偏心受压和双向大偏心受压试验,获得了 SRC 异形柱在不同受压状态下的破坏特征。结果表明,异形柱中配置型钢可以明显提高其承载力和延性,且随配钢率增大,其承载力和延性均相应增大。

扬州大学分别对采用角钢加强的 3 根 L 形柱和 5 根十形柱进行抗震性能试验研究,结果表明,异形柱截面中加入角钢后,其承载力、延性和耗能能力等均得到提高,抗震性能明显改善。

西安建筑科技大学依靠多年对 SRC 结构的研究经验和对异形柱结构的独到见解,对 SRC 异形柱进行了系统的研究,分析了 SRC 异形柱的混凝土保护层厚度、截面配钢形式以及力学特性等基本理论问题,在此基础上对 4 根 L 形柱、9 根 T 形柱和 4 根十形柱进行了“建研式”加载试验,考虑了配钢形式、加载方向、剪跨比和轴压比的影响,观察了 SRC 异形柱的破坏特征,获得了滞回曲线、骨架曲线、承载力、延性、耗能能力以及刚度退化等力学性能,得出了 SRC 异形柱抗震性能良好的结论。根据试验结果,提出了 SRC 异形柱构件的正截面承载力计算方法、斜截面承载力计算公式、轴压比限值以及型钢与混凝土的黏结滑移本构关系,研究全面具体,为 SRC 异形柱的工程应用提供了可靠的参考资料。