

装配式结构 节点抗震性能

张延年 汪青杰 著

SEISMIC PERFORMANCE OF
FABRICATED STRUCTURAL JOINTS



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

装配式结构节点抗震性能

张延年 汪青杰 著



机械工业出版社

本书系统地总结和阐述了作者在装配式结构方面的主要研究成果,主要论述了装配式结构节点的抗震性能。第1章论述了装配式结构节点的发展现状和存在的问题,第2章论述了阶梯钢板式节点的抗震性能,第3章论述了阶梯钢板式节点的受力机理,第4章论述了钩挂式节点的抗震性能,第5章论述了钩挂式节点的受力机理,第6章论述了加强环节点的抗震性能,第7章论述了加强环节点的受力机理。

本书可供土木工程、力学等相关专业的广大科技人员以及各设计院与施工企业参考,也可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

装配式结构节点抗震性能/张延年,汪青杰著. —北京:机械工业出版社,2018.10

ISBN 978-7-111-61171-4

I. ①装… II. ①张… ②汪… III. ①钢筋混凝土结构-结点(结构)-抗震性能-研究 IV. ①TU375.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第241427号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 李 帅

责任校对:张 薇 封面设计:张 静

责任印制:孙 炜

天津翔远印刷有限公司印刷

2019年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·8.25印张·154千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61171-4

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前言

随着我国“建筑工业化、住宅工业化”进程的加快,“人口红利”的不断减少,以及建筑行业用工荒的出现,住宅工业化的趋势日渐明显,装配式混凝土结构的应用重新成为当前的研究热点,全国各地不断涌现出装配式混凝土结构的新技术、新形式。装配式混凝土结构作为我国建筑结构重要的发展方向之一,它不仅有利于我国的建筑工业化发展和生产效率提高,还可以发展绿色环保建筑,并且有利于提高建筑工程质量。与现浇结构施工相比,装配式混凝土结构有利于采用绿色施工工艺,装配式结构的施工更加符合绿色施工要求,且降低了现浇施工对环境造成的负面影响,主要有降低噪声,减少环境污染,运输更加清洁,对场地干扰小,节约水、电和材料等资源。此外,装配式混凝土结构可不间断地按照顺序同时完成工程的多个或者全部工序,减少了工程机械的种类和数量,大大减少了工序衔接时间,使交叉作业得以实现,减少了施工人员数量,故提高了工效、降低了物料消耗,为绿色施工提供了有效保障。而且,装配式混凝土结构在很大程度上减少了建筑垃圾。在装配式混凝土结构建造过程中,可以实现全自动化生产和现代化控制,这在一定程度上可以促进建筑工业化生产。按标准严格检验出厂产品,质量保证率高,但装配式混凝土梁与柱的连接节点逐渐成为制约这种结构形式发展与推广的关键所在。梁柱节点作为混凝土框架结构中最为核心的结构部分,在框架结构中可以实现分配内力、传递弯矩和保证整个结构整体性能良好的作用。如果节点的设计不合理,将会影响整个混凝土结构的正常使用性能和安全性能等。因此,如何保证各预制构件间的连接性能和建筑物的整体性能,特别是抗震性能,仍需要不断地研究和探索。

因此,作者对几种新型装配式结构节点抗震性能进行了研究,主要包括:第1章论述了装配式结构节点的发展现状和存在的问题;第2章论述了装配式阶梯钢板式节点的抗震性能试验,并分析了节点的抗震承载力、强度退化、刚度退化和耗能等性能;第3章论述了在低周往复荷载作用下阶梯钢板式节点的受力机理,分析了穿心钢板、外加梁钢筋、节点核心区钢筋及外加梁混凝土等应力应变的变化规律;第4章论述了装配式钩挂式节点的抗震性能试验,并分析了节点的抗震承载力、强度退化、刚度退化和耗能等性能;第5章论述了在低周往复荷载作用下钩挂式节点的受力机理,分析了梁根部钢筋、后浇梁挂钩处钢筋、梁

根部混凝土和后浇梁混凝土等应力应变的变化规律；第6章论述了装配式加强环节点的抗震性能试验，并分析了节点的抗震承载力、强度退化、刚度退化和耗能等性能；第7章论述了在低周往复荷载作用下装配式加强环节点的受力机理，分析了加强环、钢梁翼缘、钢梁腹板、钢管壁和节点核心区等应力应变的变化规律。

作者在多年的研究中得到了辽宁省自然科学基金（批准号：201602634）和辽宁省“百千万人才工程”人选项目（2014921046）的大力资助，在此表示衷心的感谢！

在攻读硕士学位期间参加与本书相关内容课题研究的有赵金锋、郭晓磊和张馨心等，在此对他们为本书相关内容研究所做出的贡献表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，衷心希望读者批评指正。

作 者

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 装配式混凝土结构的发展	2
1.2.1 国外装配式混凝土结构的发展	2
1.2.2 我国装配式混凝土结构的发展	3
1.3 装配式混凝土结构节点的发展	4
1.3.1 国外装配式混凝土结构节点的发展	4
1.3.2 我国装配式混凝土结构节点的发展	6
1.4 问题提出	7
第 2 章 阶梯钢板式节点抗震性能	9
2.1 试验概况	9
2.1.1 模型选取	9
2.1.2 试件设计和制作	10
2.1.3 材料力学性能	12
2.1.4 试验装置设计	13
2.1.5 试验测量的内容及测点布置	14
2.1.6 加载制度	15
2.2 试验现象分析	16
2.3 试验结果与分析	18
2.3.1 梁端滞回曲线	18
2.3.2 梁端骨架曲线	19
2.3.3 承载力分析	20
2.3.4 强度退化分析	20
2.3.5 刚度退化分析	22
2.3.6 耗能分析	22
第 3 章 阶梯钢板式节点受力机理	24
3.1 应变分析	24
3.1.1 梁柱交接处穿心钢板应变分析	24
3.1.2 节点核心区穿心钢板应变分析	25

3.1.3	外加梁钢筋应变分析	27
3.1.4	外加梁混凝土应变分析	28
3.1.5	节点核心区柱钢筋应变分析	28
3.2	应力分析	31
3.2.1	应力计算	31
3.2.2	穿心钢板应力分析	32
3.2.3	外加梁钢筋应力分析	33
3.2.4	外加梁混凝土应力分析	34
3.2.5	节点核心区柱钢筋应力分析	35
3.3	阶梯钢板式节点外加梁的承载力验算	37
3.4	挠度测试的节点刚性分析	38
第4章	钩挂式节点抗震性能	40
4.1	试件设计与材料的力学性能	40
4.1.1	试件设计	40
4.1.2	材料的力学性能	42
4.2	加载装置与加载制度	43
4.2.1	加载装置	43
4.2.2	加载制度	43
4.3	量测内容及量测方法	44
4.3.1	量测内容	44
4.3.2	量测方法	44
4.3.3	试件制作与拼装	46
4.4	试验现象分析	46
4.5	试验结果分析	50
4.5.1	承载力分析	50
4.5.2	滞回曲线分析	51
4.5.3	骨架曲线分析	53
4.5.4	延性分析	53
4.5.5	耗能分析	54
4.5.6	刚度退化分析	55
4.5.7	变形恢复能力分析	56
第5章	钩挂式节点受力机理	57
5.1	应变分析	57
5.1.1	梁根部钢筋应变分析	57
5.1.2	后浇梁挂钩处钢筋应变分析	57
5.1.3	梁根部混凝土应变分析	59
5.1.4	后浇梁混凝土应变分析	60
5.2	应力分析	63

5.2.1 节点梁根部钢筋应力分析	63
5.2.2 后浇梁挂钩应力分析	64
5.2.3 梁根部混凝土应力分析	65
5.2.4 后浇梁混凝土应力分析	67
5.3 钢筋混凝土挂式节点梁的承载力验算	68
第6章 加强环节点抗震性能	70
6.1 试验概况	70
6.1.1 试件模型的选取	70
6.1.2 试件的设计和制作	70
6.1.3 材料力学性能	73
6.1.4 试验装置设计	75
6.1.5 试验测量的内容及测点布置	77
6.1.6 加载制度	79
6.2 试验现象分析	80
6.3 试验结果与分析	85
6.3.1 梁端滞回曲线	85
6.3.2 梁端骨架曲线	87
6.3.3 梁柱相对转角曲线	89
6.3.4 弯矩—曲率滞回关系曲线	92
6.3.5 承载力分析	94
6.3.6 强度退化分析	95
6.3.7 刚度退化分析	96
6.3.8 延性分析	98
6.3.9 耗能分析	98
第7章 加强环节点受力机理	100
7.1 应变分析	100
7.1.1 加强环板应变分析	101
7.1.2 钢梁翼缘应变分析	102
7.1.3 钢梁腹板应变分析	103
7.1.4 钢管壁应变分析	104
7.1.5 节点核心区应变分析	106
7.2 应力分析	108
7.2.1 应力计算	108
7.2.2 加强环板应力分析	109
7.2.3 钢梁翼缘应力分析	110
7.2.4 钢梁腹板应力分析	111
7.2.5 钢管壁应力分析	112
7.2.6 核心区应力分析	113



7.3 承载力验算	114
7.3.1 加强环节点的计算方法	114
7.3.2 钢梁屈服荷载和极限荷载的计算	116
7.3.3 节点极限承载力的理论值与试验值的比较	117
7.4 加强环节点的刚性分析	117
7.4.1 刚性判断准则	117
7.4.2 弯矩—转角曲线分析	119
7.4.3 挠度测试的节点刚性分析	120
参考文献	121

第1章

绪 论

1.1 引言

随着我国“建筑工业化、住宅工业化”进程的加快,“人口红利”的不断减少,以及建筑行业用工荒的出现,住宅工业产业化的趋势日渐明显^[1],装配式混凝土结构的应用重新成为当前的研究热点,全国各地不断涌现出住宅建筑装配式混凝土结构的新技术、新形式^[2-4]。

装配式混凝土结构以工厂化所生产的混凝土预制构件为核心,采用现场装配方法建造混凝土结构建筑。钢筋的连接可用灌浆的套筒连接,或者采用焊接和机械连接以及预留孔洞等连接方法^[5]。20世纪80年代,在我国流行的装配式预制大板住宅,由于结构整体性差、渗漏、楼板裂缝等原因存在许多影响结构安全及正常使用的隐患和缺陷,逐渐被现浇混凝土结构所取代^[6]。但随着新兴的装配式混凝土结构的应用,先后引进了许多国外先进技术,我国装配式混凝土结构建造新技术正逐步形成。

现浇混凝土结构体系施工,从搭脚手架、支模、绑扎钢筋到混凝土的浇筑,多数工作由手工完成。现浇混凝土结构现场施工存在着噪声扰民、粉尘污染、模板周转材料消耗大、施工人员多、手工劳动量大、劳动强度大、施工速度慢、建设周期长、受自然条件影响大、熟练程度要求较高、混凝土外观及内在质量控制难、建筑材料浪费严重等缺陷。装配式混凝土结构技术与传统现浇混凝土结构体系相比,具有以下优点^[7,8]:

- 1) 可以用各种轻质隔墙分割室内平面,房间布置可以灵活多变。
- 2) 施工方便,模板和现浇混凝土作业很少,预制楼板无须支撑,叠合楼板模板很少。采用预制及半预制形式,现场湿作业大大减少,有利于环境保护和减少施工扰民,更可以减少材料和能源浪费。
- 3) 建筑速度快,对周边工作生活影响小。
- 4) 建筑的尺寸符合模数,建筑构件较标准,具有较大的适应性。预制构件表面平整、外观好、尺寸准确,并且能将保温、隔热、水电管线布置等多方面功能要求结合起来,有良好的技术经济效益。这种特点可适用于制作外墙模板,也

适用于制作便于安装的结构构件。

5) 预制结构工期短, 投资回收快。由于减少了现浇结构支模、拆模和混凝土养护时间, 施工速度大大加快, 从而缩短了贷款建设的还贷时间, 缩短了投资回收周期, 减少了整体成本投入, 具有明显的经济效益。

6) 装配式建筑在设计和生产时还可以充分利用建筑废料, 变废为宝, 从而节约良田和其他材料。

7) 在预制装配式建筑建造的过程中, 可以实现全自动化生产和现代化控制, 这在一定程度上可以促进建筑工业的工业化大生产。工业化劳动生产效率高、生产环境稳定, 构件的定型和标准化有利于机械化生产, 而且按标准严格检验出厂产品, 因而质量保证率高。

近年来装配式混凝土结构日益发展, 在工程中的应用也日趋广泛, 但装配式混凝土柱与梁的连接节点也逐渐成为其制约这种结构形式继续发展与推广的关键所在。梁柱节点作为混凝土框架结构中最为核心的结构部分, 它在框架结构中可以实现分配内力、传递弯矩和保证整个结构良好整体性能的作用, 如果节点的设计不合理, 这将影响到整个混凝土结构的正常使用性能和安全性能等^[9]。所以, 简洁且合理的节点设计方法和更好的传力机制才是让这种新型结构形式更加有效被推动发展的关键。

1.2 装配式混凝土结构的发展

1.2.1 国外装配式混凝土结构的发展

国外对于装配式混凝土结构建筑的研究和探索比较多, 且发展相对更加成熟^[10-15]。在 20 世纪五六十年代, 装配式结构建筑开始成为东欧一些国家及法国等国家的主流建筑结构形式, 而后其逐步发展, 并且被推广到加拿大、美国及日本等国家^[16]。

目前, 装配整体式混凝土结构在发达国家的土木工程中应用密度比较高, 其基本数据表现如下: 美国占 35%, 俄罗斯占 50%, 而欧洲占 35%~40%^[17]。联合国的经济社会事务部于 1976 年在对欧洲各个国家的建筑工业化状况进行调查和研究时发现, 建筑的工业化是 20 世纪中不可被逆转的潮流趋向^[18]。

在以加拿大、美国为主的北美区域内, 由于预制混凝土协会长时期探究和推崇预制建筑, 关于预制混凝土结构的规范和标准比较完善。该地区装配式混凝土结构建筑应用相当普遍。其预制构件的共同特点是大型化和预应力结合, 能改善结构的配筋及连接的构造, 削减安置的工作数量, 缩短工期, 体现了工业化、标准化及经济性的特点。20 世纪时, 这些地区, 预制结构较多地用在低层、非抗

震设防地区。但处在地震区域的加州由于受到地震影响,因此特别注重此类结构的抗震。此外,预制混凝土协会编制的《预制混凝土结构抗震设计》从理论研究、实践角度,系统性地对预制结构建筑的抗震设计进行分析、探索,并归纳出很多有关预制结构在抗震设计方面的研究成果。这对于预制结构在设计时和实际工程中具有重要的指导性意义^[19]。目前,预制混凝土技术在民用、学校、医院和办公建筑及车库、厂房等建筑均得到广泛应用。大型预制混凝土构件技术在实际工程中的大范围应用,使其技术优越性得以充分发挥。这些均体现建筑工程中施工快、工程质量好和效率高,以及建筑经济、耐久等多方面的优势^[20]。

欧洲是预制结构建筑的发源地,在17世纪,就开始了建筑工业化的道路^[21]。第二次世界大战之后,因为缺乏劳动力资源,使欧洲更迫切地开始探究具有自己风格的建筑工业化的模式。这致使除了经济较为发达的西欧和北欧,以及经济较为滞后的东欧都积极地推广应用装配式混凝土结构。这些地区获得相当多的装配式建筑的设计和施工经验,形成了预制结构建筑的标准化。在此基础上,编制了与装配式混凝土结构工程有关的规范标准以及应用手册,这推动了装配式混凝土结构在全世界的推广应用^[22-27]。

日本从第二次世界大战之后开始研究和探索装配式混凝土结构建筑,在20世纪末依然保持着良好的发展态势,并且将该技术应用到地震区的高层、超高层建筑之中,历经许多次地震的考验。日本装配式混凝土建筑的相关标准和规范体系比较完备,工艺技术也非常先进^[28-30]。与日本类似,韩国也参考欧美国家的成功案例,在探究装配式建筑的标准设计、施工的同时,与本地区人民的要求紧密结合^[31]。目前,装配式混凝土建筑技术已经在澳洲发展得相当纯熟,并且得到了人们和建筑界的广泛认可和推广应用^[32]。

1.2.2 我国装配式混凝土结构的发展

我国装配式混凝土结构建筑的设计和施工研究是从20世纪50年代开始的,通过不断的研究和持续发展,形成了不同风格的装配式混凝土结构的建筑体系^[33]。其中,较为典型的建筑体系主要有装配式单层工业厂房、多层装配式混凝土框架及装配式混凝土大板建筑体系等。20世纪80年代,装配式混凝土结构的应用达到繁盛时期,形成了设计、加工、安装一体式的工业化建筑模式。装配式混凝土结构建筑及使用预制空心楼板的砌体建筑的应用普及率高达70%以上^[34]。然而该类建筑的功能和力学性能等方面还存在着诸多不足之处。到了20世纪90年代,装配式混凝土结构建筑,被现场浇筑混凝土结构建筑体系逐渐取代^[35]。装配式混凝土结构的抗震性能及有关设计、施工和管理专业化方面探究的不足导致装配式混凝土结构长时间停滞^[36]。

进入21世纪以来,我国借鉴了欧、美、日先进国家的成熟经验,特别是在

地震区建造装配式结构的经验,相关科研和企业单位根据我国国情,开展了很多研发和实验研究工作,研发了适应我国国情的建筑结构体系和相关技术,推动了装配式混凝土结构的技术进步。

2002年,陈平等人对一种新型的密肋复合墙板进行了相关研究^[37]。这种密肋式复合墙板在很大程度上不同于普通框架结构中的填充墙。它是由相对密实分布的钢筋混凝土框格和粉煤灰加气的砌块经过预制而形成。由于在制作过程中,密肋式复合墙板采用周边预留的钢筋与轻型的框架整体浇筑为一体的方法,这不仅明显地改善和优化了结构体系的抗侧力刚度,也显著提高了结构受力等方面的性能,使得该框架结构由原来的以整体剪切变形为主变为以弯曲变形为主,很大程度上减小了结构的整体变形。除此之外,由于该结构的墙板构造了复合的抗侧力结构体系,且形成了多道抗震防线,因而使得结构在抗震性能方面也得到有效的提升^[38]。

2006年,万科集团推出了首个市场化的项目——新里程,它集合了工业化生产资源,在东莞建成了国家住宅工业化基地^[39],在浙江宁波也逐步将装配式混凝土结构进行产业化推广^[40]。

2007年,国家住宅工业化基地引进德国先进且相对成熟的混凝土墙板和楼板等预制构件的生产工艺及配套生产线,并由合肥海恒集团住宅工业化促进中心和安徽建筑工业学院等多个单位所组成的课题研究组,完成了“新型叠合板式钢筋混凝土结构体系的研究探索及其设计与施工规程的编制”项目,主要对该结构体系的抗震性能进行研究^[41]。

2009年,沈阳铁西现代建筑产业园奠基开工。2010年,沈阳市人民政府印发《沈阳市现代建筑产业发展规划》。2011年沈阳成为国家现代建筑产业化试点城市,在推进装配式建筑工程建设、技术标准编制和完善、产业园区建设、扩大构件产能等方面取得了突破性进展,在全国率先进入了市场化应用的新阶段,正在向国家现代建筑产业化示范城市迈进。2013年全市实现现代建筑产业产值1536亿元,位于全市五大优势产业第三位,已经成为沈阳市重要的支柱产业,一些做法和经验已被国内许多城市采用,带动和引领了全国现代建筑产业蓬勃发展。

1.3 装配式混凝土结构节点的发展

1.3.1 国外装配式混凝土结构节点的发展

装配式混凝土框架结构力学性能的关键就是预制梁、板、柱的连接,这也是与现浇混凝土结构的主要区别之一,梁、板、柱的连接性能直接影响了装配式混

凝土框架结构的力学性能。大空间装配式混凝土框架结构在地震后的破坏较大,整个结构发生离散,甚至倒塌^[42],这种破坏形态都是由构件之间的连接破坏导致的,这说明装配式结构的抗震性能主要受构件连接影响,如果结构的构件连接比较薄弱,结构的抗震性能也随之降低。装配式混凝土框架节点主要有后浇整体式连接、预应力拼接、焊接连接和螺栓连接等常用的形式。节点的力学性能主要受连接形式和具体构造措施的影响。

1990年美国和日本合作开展了预制抗震结构体系研究项目(Precast Seismic Structural System Research Program)。该项目对节点的研究比较多,对装配式框架结构抗震研究起到推动发展的重要作用。该项目将装配式混凝土连接分为拉压屈服连接、库仑摩擦连接、剪切屈服连接、线弹性连接和非线性弹性连接。明尼苏达大学主要对非线性弹性连接与拉压屈服连接进行研究;得克萨斯大学主要对库仑摩擦连接和非线性弹性连接进行研究;加利福尼亚大学主要对预应力拼接节点进行研究;密歇根大学对纤维增强混凝土节点进行研究^[43]。明尼苏达大学研究表明,非线性弹性连接节点在大变形的条件下损失仍很小,并且残余变形也小;拉压屈服连接节点的变形较大,无论强度还是刚度衰减都较大,不过耗能性能良好。得克萨斯大学研究表明,非线性弹性连接节点的特性随着层间变形的增大有所不同,2%以内层间变形时其残余变形、耗能都较低,但是残余刚度却很高;当层间变形超过2%以后,耗能有所增加;库仑摩擦连接节点耗能能力很大。加利福尼亚大学研究表明,粘结预应力拼接节点即使在大变形后仍可保持良好的节点恢复能力且预应力筋仍可保持弹性,这种节点可以减少箍筋的用量,因为由于预应力的夹持作用节点的抗剪性能大大提高^[44],并且它的强度与刚度衰减很小,恢复能力也很强,性能很好。无粘结预应力节点相对于现浇混凝土节点损伤、强度损失、残余变形、耗能都较小。在经受大变形时,节点轻微损坏,但刚度有所下降。为了给此类结构整体分析提供依据,对考虑残余变形的无粘结预应力节点滞回模型和不考虑残余变形的无粘结预应力节点滞回模型进行对比。密歇根大学研究表明,即使钢筋在受力过程中产生较大滑移,对其粘结强度也没有太大影响,混凝土保护层没有断裂,结构在地震中有较好的耗能能力和结构整体性^[45]。在改善节点性能方面更为有效的是钢纤维聚乙烯纤维混凝土,它可以有效提高节点延性、抗剪强度,推迟破坏发生,因为这几种增强纤维均可提高钢筋与混凝土的粘结强度。在使用了增强纤维后,节点与普通混凝土节点相比较后有以下几方面改善:①节点的耗能能力增加了约350%;②变形能力增加了约30%;③强度增强了约65%;④50%节点区用量的箍筋所承受的剪力相当于3%体积含量的钢纤维混凝土承受的剪力^[46]。

1993年,美国标准化技术协会(National Institute of Standards and Technology,简称NIST)完成了一项装配式混凝土梁柱节点抗震研究项目^[47]。共制作了14

个节点试件,其中有预制节点 10 个和现浇节点 4 个。10 个预应力节点制作时考虑的不同参数分别有粘结、非粘结、预应力筋种类和预应力筋位置。试件为 1/3 的缩尺模型,采用预应力拼接,并在拼接面填充纤维砂浆。试件的主要破坏位置有预应力筋屈服、梁端混凝土压碎和梁柱拼接界面开裂等。试验结果表明,裂缝宽度的影响主要来源于预应力筋的位置,而预应力筋种类和粘结或非粘结对裂缝宽度来说影响并不明显。一般来说,非粘结预应力节点的延性系数为 14,而现浇节点大约为 6,非粘结预应力节点远远大于现浇节点。有粘结预应力节点的耗能性也明显高于无粘结预应力节点,具体表现为在同一次加载循环内,预应力节点的耗能大约为现浇节点的 30%~60%;达到破坏时的累计耗能大约为现浇节点的 80%~100%^[48]。

1995 年,新西兰根据本国国情设计制作了多个后浇装配式混凝土框架节点进行试验研究。泌水及骨料沉降等现象对节点区上部的混凝土质量产生影响,但试件的强度、延性和耗能能力都没有降低,各节点抗震性能达到或超过相应的现浇节点^[49]。根据试验和分析,Restrepo 给出了这类预制节点的设计方法,并对具体构造提出了建议^[50]。同年,澳大利亚也根据该国规范对框架节点进行了研究,分别对相同尺寸的带牛腿的后浇节点、不带牛腿的后浇节点、现浇节点进行对比,变化参数包括混凝土强度、钢筋强度和配筋率。试验结果表明,无牛腿的预制节点在延性与耗能方面均好于带牛腿的预制节点,而后浇整体节点的强度、耗能与延性又高于现浇节点^[51]。

2002 年,Alcocer 对节点区构件端部钢筋搭接的平面框架节点和空间框架节点进行了对比试验,节点的强度均比相应的现浇节点的强度低,当试件变形较大时,装配节点的承载力几乎完全丧失^[52]。

2006 年,土耳其对现浇节点、后浇整体节点,带牛腿的焊接节点和螺栓连接节点进行了对比研究。实验结果表明,这些装配式混凝土节点的抗震性能与现浇节点的抗震性能相同,均表现良好,后浇整体节点与螺栓连接节点的层间位移角可达到 3.5%,螺栓连接节点在四种节点中的性能最好,不仅有较强的强度、耗能能力,而且在施工方面更是方便快捷^[53]。

1.3.2 我国装配式混凝土结构节点的发展

随着装配式混凝土结构的再次兴起,我国学者也开始对装配式混凝土结构节点的抗震性能进行研究。

2005 年,赵斌等人采用足尺模型对比试验方法对现浇高强混凝土梁柱组合件、预制混凝土结构高强混凝土后浇整体式梁柱组合件和高强预制混凝土结构全装配式梁柱组合件在低周反复荷载作用下的开裂破坏形态、滞回特性、骨架曲线、强度与刚度退化特性、耗能能力、节点核心区域的剪切变形、梁端与柱端的

转动变形等抗震性能指标进行了系统研究。结果表明, 高强预制混凝土结构后浇整体式梁柱组合件与现浇高强混凝土结构梁柱组合件具有相同的抗震能力, 全装配式预制混凝土梁柱组合件的抗震性能和主要抗震性能指标与现浇高强混凝土梁柱组合件和预制混凝土结构后浇整体式梁柱组合件存在明显的差异, 并建议在实际工程应用中采取必要的措施来增加全装配式节点的耗能能力^[54]。

2012年, 陈适才等人为了研究高层预制装配式混凝土结构的抗震性能, 并为建立该类结构装配式节点的抗震设计方法提供依据, 采用足尺模型试验方法, 对结构底层不同连接方式的大尺寸、高轴压预制梁-柱-叠合板装配中节点试件在低周往复荷载作用下的开裂破坏形态、滞回特性、骨架曲线、延性性能、耗能能力、拼缝的影响等性能进行了研究。结果表明, 叠合板及预制梁纵筋、预制柱纵筋的连接方式对整体节点的抗震性能具有重要影响; 对于预制梁纵筋锚固连接的中节点, 钢筋存在滑移现象, 对于预制梁纵筋贯穿连接的中节点, 具有与现浇中节点相当的耗能能力与综合抗震性能^[55]。

2013年, 张大长等人提出了外壳核心现浇预制装配式钢筋混凝土T形边节点, 并进行了两个T形节点抗震性能的低周反复试验, 分析比较采用两种不同施工方法的T形边节点的破坏形态、滞回特性、位移延性、能量耗散、刚度退化等抗震性能。研究表明, 新型装配式T形节点与RC现浇T形节点相似, 具有良好的整体性和抗震性能, 可以满足RC框架结构的抗震设计要求^[56]。

刘昌永等人为解决钢柱或组合柱与钢筋混凝土梁连接节点构造复杂、施工难度大等问题, 提出了两种端部带工字钢接头的预制装配式钢筋混凝土梁, 并分别对两种新型梁及一个普通钢筋混凝土对比梁试件进行了受弯性能足尺试验。研究表明, 在三分点集中荷载作用下, 三个试件的变形性能和破坏形态基本一致, 两种新型梁的开裂弯矩和极限弯矩与规范计算结果吻合良好, 说明可按现行混凝土结构设计规范进行梁体的受弯承载力设计; 钢接头和混凝土梁体之间几乎没有滑移, 且钢接头在整个加载过程中处于弹性受力状态^[57]。

1.4 问题提出

梁柱节点作为混凝土框架结构中最关键的结构部分, 它在框架结构中可以实现分配内力、传递弯矩和保证整个结构良好整体性能的作用, 如果节点的设计不合理, 这将影响到整个混凝土结构的正常使用性能和安全性能等。因此, 如何对各预制构件之间的连接性能和建筑物的整体性能, 特别是抗震性能进行保证还需要不断的研究和探索。

装配式结构节点应具有以下特征:

- 1) 装配式结构节点的选型和设计应注重概念设计, 满足耐久性要求, 并通

过合理的连接节点与构造，保证构件的连续性和结构的整体稳定性，使整个结构具有必要的承载能力、刚性和延性，以及良好的抗风、抗震和抗偶然荷载的能力，并避免结构体系出现连续倒塌。

2) 应根据设防烈度、建筑高度及抗震等级选择适当的节点连接方式和构造措施。

3) 装配式结构的节点和连接应同时满足使用和施工阶段的承载力、稳定性和变形的要求；在保证结构整体受力性能的前提下，应力求连接构造简单，传力直接，受力明确；所有构件承受的荷载和作用，应有可靠的传向基础的连续的传递路径。

4) 承重结构中节点和连接的承载能力及延性不宜低于同类现浇结构，也不宜低于预制构件本身，应满足强剪弱弯，强节点设计理念。

5) 宜采取可靠的构造措施及施工方法，使装配式结构中预制构件之间或者预制构件与现浇构件之间的节点或接缝的承载力、刚度和延性不低于现浇结构，使装配式结构成为等同现浇装配式结构。

6) 预制构件的连接部位应满足建筑物理性能的功能要求。

由于我国对预制混凝土结构抗震性能认识不足，导致预制混凝土结构的研究和工程应用与国外先进水平相比还有明显差距，经济条件制约、机具设备落后对其造成很大局限，接头处处理不善，削弱其受力性能也是遏制装配式结构体系发展的主要原因之一。目前装配式结构节点应用和研究方面仍存在问题，节点力学性能和施工的简易性、经济性不能两全。在实际应用中，有些节点类型构造简单，施工方便，也较省材料，但其力学性能并不理想。有些节点类型力学性能较好，节点的整体刚度也高，但材料用量大，施工复杂。