

多高层钢框架梁柱节点

—— 理论与设计

石永久 施刚 王元清 陈宏 著

DUOGAOCENG GANGKUANGJIA

LIANGZHU JIEDIAN

LILUN YU SHEJI

中国建筑工业出版社

多高层钢框架梁柱节点 ——理论与设计

石永久 施 刚 王元清 陈 宏 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多高层钢框架梁柱节点——理论与设计/石永久等著.
北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 1
ISBN 978-7-112-16121-8

I. ①多… II. ①石… III. ①钢梁-框架梁-节点
分析 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 273411 号

本书对多高层钢框架改进型节点、组合节点以及节点的加固、损伤退化等问题进行了较系统和深入的研究。在框架节点研究方面, 针对传统多高层钢结构节点在地震作用下发生脆性破坏问题, 发展了梁端改进型抗震节点并对节点的断裂机理进行深入的研究。在节点加固研究方面, 采用数值计算和理论分析相结合的方法, 研究多高层钢框架梁柱刚接节点负载加固相关的技术问题。在强震作用下节点的损伤退化性能研究方面, 采用试验以及断裂力学理论方法, 探讨材料强度、加载方式、板件厚度、宽度等参数对节点局部焊缝性能的影响, 重点研究焊缝开裂对节点损伤的影响, 对节点试件的焊缝损伤进行了理论分析和有限元模拟。

全书共 9 章, 分别为: 多高层钢结构梁柱节点的研究与应用、标准型节点受力性能和设计方法、“狗骨头”型节点受力性能和设计方法、带长槽型节点受力性能和设计方法、焊接孔扩大型节点受力性能和设计方法、节点断裂力学分析、梁柱节点负载下抗震加固的受力性能研究、梁柱组合节点受力性能和设计方法、梁柱节点在强震作用下的损伤退化性能。

本书可供钢结构设计人员、从事钢结构节点研究的科研人员及高等院校相关专业的教师和研究生使用。

责任编辑: 王 跃 聂 伟

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 赵 颖

多高层钢框架梁柱节点 ——理论与设计

石永久 施 刚 王元清 陈 宏 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25¼ 字数: 610 千字

2014 年 6 月第一版 2014 年 6 月第一次印刷

定价: 72.00 元

ISBN 978-7-112-16121-8

(24856)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

多高层钢框架结构具有抗震性能优良、施工速度快、材料可循环利用的优势,已成为现代建筑的重要结构形式,其连接节点的设计和施工是多高层钢框架结构体系需要解决的关键技术。针对传统的节点形式存在钢材用量多、现场焊接工作量大、强震作用下易发生脆性破坏等问题,本书对多高层钢框架改进型节点、组合节点以及节点的加固、损伤退化等问题进行较系统和深入的研究。

在框架节点研究方面,针对传统多高层钢结构节点在地震作用下发生脆性破坏问题,发展了梁端改进型抗震节点并对节点的断裂机理进行深入的研究。通过试验研究、理论分析和数值模拟相结合的方法,全面考察标准型节点、焊接孔扩大型节点、“狗骨头”型节点、开长槽型节点的抗震性能以及楼板对节点的组合作用;提出了钢框架节点抗震滞回模型、承载力计算方法和构造要求,建立了多高层钢框架新型节点抗震设计方法。

在节点加固研究方面,采用数值计算和理论分析相结合的方法,研究多高层钢框架梁柱刚接节点负载加固相关的技术问题。建立了采用盖板加固的梁柱刚接节点模型,模拟节点负载下加固的全过程。通过有限元分析,研究了多种可能因素对加固后节点受力性能的影响(包括加固时节点承受初始荷载以及加固过程中焊接的使用等),并且通过大量的参数分析,得出节点加固后受力性能随各参数变化的一般规律。在有限元分析和简化计算模型的基础之上,提出了相应的工程设计要求和设计计算方法。

在强震作用下节点的损伤退化性能研究方面,采用试验以及断裂力学理论方法,探讨材料强度、加载方式、板件厚度、宽度等参数对节点局部焊缝性能的影响,重点研究了焊缝开裂对节点损伤的影响,对节点试件的焊缝损伤进行了理论分析和有限元模拟。这为研究梁柱节点焊缝损伤性能提供了一种损伤判断方法和准则。

本书的研究工作得到国家自然科学基金重点项目(编号:51038006)的资助。研究人员根据研究成果在国内外发表学术论文100余篇,其中被SCI、EI、ISTP检索论文达40余篇,授权专利2项。本书主要成果内容获2011年国家科技进步二等奖、2010年山东省科技进步一等奖和2005年教育部提名国家科学技术(自然科学)二等奖。本书的研究成果发展了高效抗震节点形式,促进了多高层建筑钢结构的推广应用,产生了显著的经济效益和社会效益,为促进建筑钢结构体系的技术进步作出了贡献。

本书的出版是作者及其研究团队共同努力的结果,也离不开老一辈学者多年的关怀、指导和实验室同事及国内外高校和工程界广大专家学者的支持。同时感谢博士研究生熊俊,硕士研究生赵大伟、李兆凡、苏迪、杨文、奥晓磊等等相关课题研究中出色地完成了大量的试验、计算及分析工作,他们对本书的完成作出了重要的贡献。本课题组徐悦工程师、博士研究生王萌、王佼佼为本书的编辑出版也做了大量工作,在此,向她们表示衷心感谢。

限于作者的水平,书中的不足之处在所难免,需要在今后的研究工作中不断加以改进和完善,同时敬请专家和读者批评指正。

作者

2013年9月于清华园

目 录

第 1 章 多高层钢结构梁柱节点的研究与应用	1
1.1 概述	1
1.2 多高层钢结构梁柱节点的特点和分类	2
1.2.1 多高层钢结构梁柱节点的设计特点	2
1.2.2 多高层钢结构梁柱节点的分类	2
1.3 多高层钢结构梁柱节点的研究现状	5
1.3.1 国内外研究简况	5
1.3.2 需研究的主要技术问题	24
参考文献	27
第 2 章 标准型节点受力性能和设计方法	34
2.1 引言	34
2.2 标准型节点的抗震试验研究	35
2.2.1 标准型节点试验设计	36
2.2.2 两批节点试验装置和试验方案	38
2.2.3 标准型节点试验现象和破坏状态	43
2.2.4 标准型节点试验结果及分析	48
2.3 标准型节点抗震性能的数值模拟	53
2.3.1 标准型节点有限元模型	53
2.3.2 标准型节点数值模拟结果及分析	54
2.3.3 标准型节点数值模拟与试验结果的对比分析	57
2.4 标准型节点抗震性能和设计方法	58
2.4.1 标准型节点恢复力模型	58
2.4.2 标准型节点破坏模式	62
2.4.3 标准型节点设计方法	62
2.4.4 标准型节点试验、设计与计算承载力比较	63
参考文献	64
第 3 章 “狗骨头”型节点受力性能和设计方法	66
3.1 引言	66
3.2 “狗骨头”型节点的抗震试验研究	66
3.2.1 “狗骨头”型节点试验设计	66
3.2.2 “狗骨头”型节点试验装置和试验方案	67
3.2.3 “狗骨头”型节点试验现象和破坏状态	67
3.2.4 “狗骨头”型节点试验结果及分析	68
3.3 “狗骨头”型节点抗震性能的数值模拟	71
3.3.1 “狗骨头”型节点数值模拟结果及分析	71
3.3.2 “狗骨头”型节点数值模拟与试验结果的对比分析	74

3.4 “狗骨头”型节点抗震性能 and 设计方法	75
3.4.1 “狗骨头”型节点恢复力模型	75
3.4.2 “狗骨头”型节点破坏模式	77
3.4.3 “狗骨头”型节点设计方法	77
3.4.4 “狗骨头”型节点试验、设计与计算承载力比较	78
参考文献	79
第4章 带长槽型节点受力性能 and 设计方法	80
4.1 引言	80
4.2 带长槽型节点的抗震试验研究	80
4.2.1 带长槽型节点试验设计	80
4.2.2 带长槽型节点试验装置和试验方案	82
4.2.3 带长槽型节点试验现象和破坏状态	82
4.2.4 带长槽型节点试验结果及分析	83
4.3 带长槽型节点抗震性能的数值模拟	86
4.3.1 带长槽型节点数值模拟结果及分析	86
4.3.2 带长槽型节点数值模拟与试验结果的对比分析	89
4.4 带长槽型节点抗震性能 and 设计方法	90
4.4.1 带长槽型节点恢复力模型	90
4.4.2 带长槽型节点破坏模式	92
4.4.3 带长槽型节点设计方法	92
4.4.4 带长槽型节点试验、设计与计算承载力比较	94
参考文献	94
第5章 焊接孔扩大型节点受力性能 and 设计方法	96
5.1 引言	96
5.2 焊接孔扩大型节点的抗震试验研究	98
5.2.1 焊接孔扩大型节点试验设计	98
5.2.2 焊接孔扩大型节点试验装置和试验方案	99
5.2.3 焊接孔扩大型节点试验现象和破坏状态	99
5.2.4 焊接孔扩大型节点试验结果及分析	109
5.3 焊接孔扩大型节点抗震性能的数值模拟	120
5.3.1 焊接孔扩大型节点数值模拟结果及分析	120
5.3.2 焊接孔扩大型节点数值模拟与试验结果的对比分析	126
5.4 焊接孔扩大型节点抗震性能 and 设计方法	127
5.4.1 焊接孔扩大型节点恢复力模型	127
5.4.2 焊接孔扩大型节点破坏模式	131
5.4.3 焊接孔扩大型节点设计方法	132
5.4.4 焊接孔扩大型节点试验、设计与计算承载力比较	133
参考文献	135
第6章 节点断裂力学分析	136
6.1 引言	136
6.2 断裂力学有限元分析概述	136

6.2.1	断裂力学有限元分析的基本原理	136
6.2.2	断裂力学有限元分析程序	139
6.2.3	断裂力学有限元建模	142
6.3	断裂力学有限元分析	143
6.3.1	线弹性断裂力学有限元分析	143
6.3.2	弹塑性断裂力学有限元分析	150
6.4	节点断裂分析与控制	157
6.4.1	节点断裂分析	157
6.4.2	节点断裂控制	158
	参考文献	159
第7章	梁柱节点负载下抗震加固的受力性能研究	161
7.1	引言	161
7.2	梁柱节点加固的非线性有限元分析	161
7.2.1	负载下加固的有限元模拟	161
7.2.2	焊接过程的有限元模拟	165
7.3	负载下盖板加固节点力学性能的数值分析	169
7.3.1	有限元分析模型及主要参数	170
7.3.2	负载下加固节点的受力性能	170
7.3.3	负载下加固节点受力性能的参数分析	173
7.3.4	焊接过程对加固节点受力性能的影响	176
7.4	盖板加固简化力学模型	183
7.4.1	非负载下加固节点力学模型	183
7.4.2	负载下加固节点的力学模型	188
7.4.3	初始荷载大小的控制	189
7.5	负载下盖板加固设计方法	192
7.5.1	负载下加固的设计计算原则	192
7.5.2	设计计算步骤	192
7.5.3	设计算例	194
	参考文献	196
第8章	梁柱组合节点受力性能和设计方法	197
8.1	引言	197
8.2	普通组合节点的抗震试验研究	197
8.2.1	试验设计	197
8.2.2	试验装置和试验方案	201
8.2.3	试验现象和破坏状态	203
8.2.4	试验结果及分析	209
8.3	中高强度组合节点的抗震试验研究	214
8.3.1	试验设计	214
8.3.2	试验装置和试验方案	219
8.3.3	试验现象和破坏状态	221
8.3.4	试验结果及分析	226
8.4	组合节点的分析	236

8.4.1 有限元模型	236
8.4.2 影响参数的数值分析	239
8.5 组合节点的抗震性能和设计方法	249
8.5.1 节点恢复力模型	249
8.5.2 节点设计方法	260
参考文献	274
第9章 梁柱节点在强震作用下的损伤退化性能	277
9.1 引言	277
9.2 梁柱节点焊缝区域损伤断裂试验研究	278
9.2.1 试验设计	279
9.2.2 试验结果	282
9.2.3 试验结果分析	287
9.2.4 节点损伤原因分析	293
9.3 梁柱节点焊缝断裂损伤分析	298
9.3.1 断裂及损伤的有限元模拟方法	298
9.3.2 梁柱节点焊缝断裂简化计算	299
9.3.3 焊缝断裂有限元分析	300
9.3.4 焊缝损伤有限元分析	304
9.4 钢框架梁柱节点损伤机理试验研究	310
9.4.1 焊接节点损伤的量化	311
9.4.2 试验设计	314
9.4.3 试验结果	318
9.4.4 试验结果分析	329
9.4.5 节点损伤分析	331
9.5 梁柱节点损伤计算模型及有限元分析	337
9.5.1 钢框架节点损伤机理	337
9.5.2 焊接节点延性开裂损伤演化方程	339
9.5.3 节点循环荷载下损伤过程数值计算方法	342
9.5.4 试验节点循环加载损伤过程的有限元分析	343
9.5.5 含损伤的节点有限元计算滞回曲线	351
9.6 含损伤的钢框架梁柱节点计算模型及验证	353
9.6.1 以转角为指标的节点损伤演化方程	353
9.6.2 含损伤的节点简化计算模型	354
9.6.3 含损伤的节点计算模型验证	358
9.6.4 其他试验数据计算验证	361
参考文献	363
附录1 线弹性断裂力学分析程序 (应力强度因子 K 计算)	366
附录2 弹塑性断裂力学分析程序 (J 积分计算)	378

第 1 章 多高层钢结构梁柱节点的研究与应用

1.1 概 述

随着科学技术和经济条件的发展,人口的急剧增长,建筑结构越来越向高空发展。由于钢材轻质、高强,具有良好的延性和抵抗地震作用的能力,钢结构已成为高层和超高层建筑结构最好的、主要的结构形式。与此同时,随着城市人口的日益密集,高速电梯的完善,城市竖向交通效率的大大提高,世界许多大城市的建筑正向高空发展,为了抗风、抗震,减少结构占用面积,降低基础费用,缩短建设周期,钢结构将成为超高层建筑中无可争议的主要结构类型。

钢结构具有重量轻、强度高、延性大、抗震性能好、施工速度快、构件截面小、结构净空和跨度大、综合经济指标好等优点,其更适合于地震区和软土地基上的高层建筑。因此发达国家在高层和超高层建筑中普遍采用钢结构^[1]。

我国的高层钢结构建筑是从 1985 年开始建造的。1985 年上海采用钢框架结构体系建造 14 层的金沙江大酒店^[2],深圳采用钢框架-剪力墙建造 43 层的深圳发展中心大厦,这标志着我国高层建筑钢结构应用的开始^{[3][4]}。目前我国已建和在建的高层钢结构建筑达 30 栋,其中 88 层 365m 高的上海金茂大厦已建成使用,95 层 460m 高的上海环球金融中心为目前世界第三高楼。这些将使我国的高层钢结构建筑高度进入世界前列^[5-7]。

梁柱节点在高层钢结构中占有很重要的地位,其特性将直接影响钢结构的安全性、可靠性以及制造安装、经济指标和使用性能。美国 and 我国的高层钢结构的抗弯梁柱节点一般都采用柱贯通型刚性连接。在过去的几十年里,钢结构节点的性能,尤其是它们对结构构件和框架的影响已经成为一个有吸引力的研究领域。特别是近 20 年,在这一研究领域开展了很多工作。在总结长期基础研究和工程实践的基础上,我国已制定了《建筑抗震设计规范》^[8]、《高层民用建筑钢结构技术规程》^[9]等设计标准,用于指导这种结构形式的设计和应用,钢抗弯框架也被认为是最有效的抗侧力体系之一。但由于对钢结构在地震作用下破坏机理认识上的不足以及结构破坏本身的随机性,使得即使严格按现行规范设计的结构,也难以完全满足结构在地震作用下的塑性变形和耗能要求,结构破坏现象时有发生。在 1994 年 1 月 17 日美国 Northridge 地震和 1995 年 1 月 17 日日本 Kobe 地震中,大量的钢结构梁柱连接节点并没有像人们期待的那样形成塑性铰,而是发生了意想不到的脆性破坏。尽管两国的节点设计依据和施工方法有所区别,但节点的破坏呈现出同样的脆性破坏特征^[10]。这不仅引起了结构工程界的震惊,同时也使人们对钢结构节点的传统设计方法提出了质疑。因此进行节点地震脆断机理和抗震性能的研究,防止节点在地震作用下的脆性断裂及相关破坏,改善节点抗震性能,完善节点抗震设计理论和设计方法,提出抗震对策,成为目前迫切需要解决的问题;而这些问题的解决,都具有十分重要的理论价值和现

实的工程意义。

1.2 多高层钢结构梁柱节点的特点和分类

1.2.1 多高层钢结构梁柱节点的设计特点

梁柱连接节点的设计目标是：在强震作用下，在梁内而不是在柱内产生塑性铰，以耗散地震输入的能量，使节点区免于破坏，并保证结构的整体性使其不发生倒塌，也就是所谓的“强柱弱梁、强节点弱构件”的设计思想^[17]。针对 Northridge 地震和 Kobe 地震中钢结构节点发生如此众多的脆性破坏，国内外的研究者认为其中一个致命的原因：在设计中，尤其是在等截面梁与柱的栓焊连接节点设计中，没有采取任何加强连接构造措施^[11]。在这样的设计方法下，反倒成了“弱节点强构件”。所以这种用“常用设计法”设计出来的梁-柱连接节点，在较大地震作用下，在框架梁还没有塑性发展之前，由于梁端连接抗力大大低于梁截面的抗力，因此连接焊缝开裂并发生脆性破坏。基于这样的分析，研究者提出在设计刚性抗震节点时，必须排除在常规的等截面梁上未经任何加强或削弱就直接与柱连接的做法（不论是全焊接连接还是栓焊混合连接）。在构造上必须打破常规，采取一些改进措施来满足上述要求。总的来说改进措施分为两个方向，一为减缓节点区应力集中，改善应力分布；二为把容易破坏的部位从节点区往外移，使梁上合适的位置易出现塑性铰。

减小应力集中的措施主要是改进节点的构造细节，调整梁柱交界面附近的应力分布状况，具体做法包括改变焊接孔的形状与大小、调整焊接工艺等。

塑性铰外移是把塑性铰区从梁柱翼缘相接面外移，可以采取在梁上适合于塑性铰出现的位置进行局部削弱或加强节点的方法。其中“狗骨头”节点形式^[12]和腹板带长槽孔的节点形式^[12]等采取了局部削弱措施，加盖板、边板、腋梁、竖向肋^[12]等节点形式采取了局部加强措施。

1.2.2 多高层钢结构梁柱节点的分类

1. 钢结构节点

现代高层钢结构中普遍采用焊接 H 形或箱形截面柱和 H 形截面梁，美国多采用 H 形截面柱，而日本常采用箱形截面柱。梁柱的连接，按梁柱的约束刚度可分为三类：铰接连接、半刚性连接和刚性连接。高层钢结构框架的节点一般都采用刚性连接，梁柱刚性连接形式，美国通常采用柱贯通型（如图 1-1 所示）；而在日本，其连接形式为在梁翼缘平面

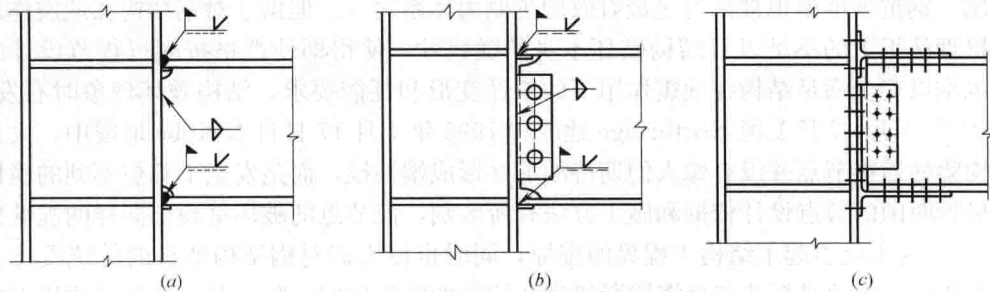


图 1-1 钢框架梁柱节点常用形式

(a) 全焊接连接；(b) 栓焊连接；(c) 螺栓连接

内焊接横隔板以保持梁翼缘的连续性,并将柱分隔成段,各柱端部与横隔板焊接^[16]。

我国及美国广泛采用的梁柱刚性连接可分为三类:①梁端与柱的连接全部采用焊缝连接(图 1-1a);②梁翼缘与柱的连接采用焊缝连接,梁腹板与柱的连接采用高强度螺栓摩擦型连接(图 1-1b);③梁端与柱的连接采用普通 T 形连接件的高强度螺栓连接^[18-20](图 1-1c)。

在以上几种连接方式中,全焊接连接形式是焊缝连接最充分的,不会存在滑移问题。从理论上,良好的焊接构造和焊接质量可提供足够的延性,但在实际施工过程中存在一定困难,而且要求对焊缝进行比较严格的探伤检查。此外,焊接残余应力和残余变形也给实际结构带来不利影响;高强度螺栓连接施工较方便,但存在接头尺寸过大、钢材消耗较多、螺栓价格昂贵等问题。所以栓焊混合连接应用最为普遍,节点形式简单、施工方便,可以提高效率,减少钢材用量。试验结果表明,栓焊混合连接具有良好的抗震性能,节点都表现出了很好的延性特征。安装施工时,先用螺栓定位然后对翼缘施焊,具有施工上的优点。试验表明其滞回曲线与完全焊接的相近。但是,翼缘焊接对螺栓的预拉力有一定影响,可使螺栓预拉力平均降低约 10%,因此高强度螺栓的实际应力应留有裕度。

焊缝熔敷金属应与母材相匹配,这是出于抗拉强度的考虑。焊缝的屈服点通常要比母材高出不少,其结果是,在母材中出现屈服时,焊缝应力还远低于其屈服点。在满足承载要求的前提下,应采用屈服强度较低的焊条,两种不同强度的材料焊接时,应按强度较低的材料选用焊条,使焊缝具有较好的延性。

2. 组合结构节点

近年来,组合结构开始广泛应用于我国民用高层、超高层建筑中。目前在北京、上海等大城市兴建了一大批以钢-混凝土组合结构为主体的高层建筑^[13]。虽然由于提供梁和楼板之间的剪力连接件而增加的成本可能会大于钢梁截面减小而节约的成本,但组合结构被普遍认为是多高层框架结构的有效形式之一,整个结构的整体性将得以很大改善。

在钢框架结构的楼盖中,多采用压型钢板与混凝土组合楼板,形成的梁柱组合节点主要包括钢节点部分以及覆盖其上的钢筋混凝土板,钢梁与混凝土板之间通常采用栓钉或型钢等剪力连接件以实现完全剪力连接或者部分剪力连接,并在对应于梁翼缘的位置设置柱腹板加劲肋,以保证节点受力时柱的腹板不致过早破坏。典型的组合节点形式如图 1-2 所示。

组合节点在结构中起着弯矩的传递,剪力到轴力或轴力到剪力的转化作用。其钢节点连接部分一般都采用如图 1-1 所示连接,通常为柱贯通型。

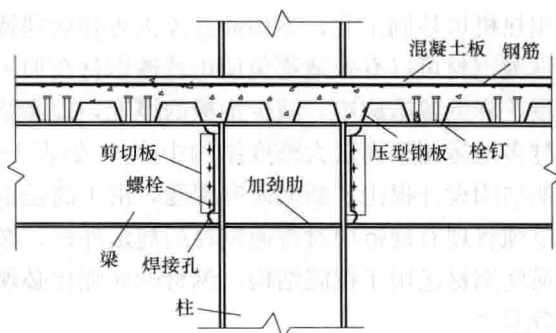


图 1-2 典型的梁-柱组合节点的构造形式

根据欧洲规范 EC4^[21],组合节点是指组合构件和其他构件之间的连接,具体到钢框架中,即钢-混凝土组合梁和 H 型钢柱的连接。Nethercot^[22]根据节点转动刚度与梁线刚度之比将梁柱节点划分为铰接节点、刚接节点与半刚性节点三种类型。通常,组合节点的性能多属于半刚性节点的范畴,其组合作用可使节点的初始转动刚度大大提高,能够承担

较大的弯矩，在合适的配筋率下还有较高的延性，能保证节点梁端弯矩的塑性重分配充分进行。

图 1-3 表示了组合节点的大致传力途径，节点的组合作用主要通过节点区楼板内连续的贯穿钢筋、足够的抗剪连接件以及混凝土与钢梁钢柱之间相互作用来实现，楼板通过混凝土受压、纵向钢筋受拉、横向分布筋受拉形成拉压杆系统。这样的受力形式决定了构件和材料的相关参数必然对节点性能有所影响，较为明显的是材料强度、混凝土楼板与钢梁之间的抗剪连接程度、配筋率等。另外，一些构造上的改进措施也对其影响较大，如节点连接形式、柱腹板加劲肋、梁塑性铰处的局部削弱或加强。由此可见，组合节点的受力和破坏均是多种因素共同作用下的结果，具有显著的不确定性和复杂性，如图 1-4 所示。

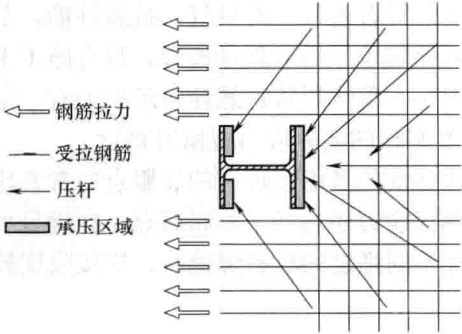


图 1-3 典型的组合节点传力途径



图 1-4 组合节点可能的破坏模式

3. 高强钢材料节点

近几年，国内外在钢结构中逐渐采用高强度钢材，我国《钢结构设计规范》GB 50017—2003^[23]已经提出了 Q420 钢材，欧洲设计中使用 S460 钢材，美国研究者也提出了多种高强度结构钢材，最高为 A913-70（相当于屈服强度为 480MPa）。在钢材生产中，使用热机械控制工艺，不用通过淬火等热处理就可以经济地得到高强度钢材。而且，采用高强度钢材可以有效地避免使用普通钢材在加工和焊接施工中产生的质量问题，减轻结构重量，降低建造成本，减少钢板的厚度，提高结构的可靠性，这些优点促使高强结构钢越来越多地运用于高层大跨度结构中^[24]，如表 1-1 所示。但是，高强度钢材有的采用给钢框架结构设计提出了新的研究课题，由于高强钢材材料性质与普通钢材有显著的不同，如果单纯将现有规范中对普通钢材的规定外推，必然会出现不符合实际的情况。而且，要将高强度钢材运用于抗震结构，钢材的屈强比必须有个限值，以保证足够的转动能力和能量耗散能力。

采用高强结构钢的工程

表 1-1

建筑名	所在城市	完成年份	层数	构件类型	钢材强度(MPa)
Grosvenor Place	悉尼	1988	50	钢骨混凝土	690
Central Park	佩斯	1989	50	钢骨混凝土	690
300 Latrobe St.	墨尔本	1990	30	钢骨混凝土	690

续表

建筑名	所在城市	完成年份	层数	构件类型	钢材强度(MPa)
Star City	悉尼	1997	20	钢骨混凝土	690
Latitude	悉尼	2005	55	钢管混凝土	690
Dai-Ichi	大阪	—	20	钢管混凝土	600
Shimizu SSHR	东京	待建	120	钢管混凝土	600
国家体育场	北京	2008	—	钢	460
中央电视台新台址	北京	在建	51	钢-型钢混凝土	420

目前,在多高层钢框架节点中,端板和角钢已经开始采用强度高达 690MPa 的钢材,并且以中高强度为主的结构钢材已经普遍应用。但是,对于中高强度钢材连接节点,尤其是考虑混凝土楼板作用的组合节点,目前仅有美国钢结构抗震设计规范^[25]对其抗震性能提出了明确的塑性极限转角的要求。对于中高强度钢材结构连接节点的承载力和抗震性能等真实受力特性,以及钢材强度对钢框架组合节点的承载力、刚度、延性以及混凝土组合作用发挥的影响,国内外还未开展研究。

1.3 多高层钢结构梁柱节点的研究现状

1.3.1 国内外研究简况

1. 强震下高层钢结构梁柱节点脆断研究与应用进展

伴随着高层钢结构的发展与应用,高层钢结构节点抗震性能的研究,一直受到各国工程界的重视。回顾高层钢结构节点抗震性能研究的发展与现状,可以粗略划分为两个历史阶段:第一阶段为美国 Northridge 地震和日本 Kobe 地震前,这一阶段的研究以保证节点的承载力为重点,主要通过试验研究和理论分析,并结合震害调查分析,侧重于防止节点屈曲破坏的研究,提出了保证节点抗震承载力的设计规定,如地震区梁柱翼缘与腹板宽(高)厚比的限值,节点板域抗震验算等。这一阶段的试验研究在初期主要以足尺试件为主,到后期由于高层钢结构的迅猛发展,结构构件向大型、重型方向发展,使得足尺试验不易进行,较少进行相应的足尺试验。研究的第二阶段为美国 Northridge 地震和日本 Kobe 地震以后,这两次地震造成钢结构节点出现意想不到的、以前未曾出现的大量脆性破坏,从而改变了结构工程界对这种节点的认识。为探讨梁柱节点脆性破坏机理,改善节点的抗震性能,寻求新型节点构造形式,大批国内外学者开始了广泛深入的研究工作,从而掀起钢结构节点抗震性能研究的高潮^[44]。

由于在上述两次地震中,钢结构节点的破坏以脆性断裂为明显特征,所以随之开展的研究工作在初期以震害分析、损伤评价、工程加固措施的研究为重点,随后转向节点抗震延性、节点断裂机理、节点在低周往复荷载作用下滞回特性和节点地震累积损伤等方面的研究,新型抗震节点构造形式的研究也是这一阶段的重点。

经过美国 Northridge 地震和日本 Kobe 地震以后的研究工作,国内外的研究者已经取得了大量研究成果,丰富了钢结构节点抗震性能研究的知识,为完善钢结构节点抗震

设计理论与计算方法提供了大量丰富的背景知识。但仍然有许多问题未能解决,进一步的研究还在进行中。

(1) 国外研究现状及进展

在钢结构节点抗震性能研究方面,美国加州大学伯克利分校的 Popov 教授及其助手在过去的三十年里,先后进行了大批钢结构梁柱节点在低周反复荷载作用下的试验研究。试验中大部分节点试件的滞回曲线饱满,恢复力性能良好,但试验中节点的脆性破坏也时有发生,脆性破坏时梁翼缘几乎没有屈服的迹象,破坏位置或在焊缝处,或在焊缝热影响区处,破坏时节点域无明显塑性变形,试件失效模式与 Northridge 地震中观察到的很类似^{[31][49][69][71][75-77]}。Popov 等人的试验还表明,节点脆性破坏对承载力的影响非常大,对节点延性的影响也很大。试验发现,试件发生脆性破坏时节点的承载力和延性指标难以满足设计要求。

Engelhardt 和 Husain 等人的研究^{[2][6]}表明焊接质量是影响节点性能的主要因素,即使严格按照设计规范设计、严格按照焊接规程焊接加工的试件,在循环往复荷载作用下,节点亦有可能发生突然的脆性断裂,这说明目前的设计规范尚难以完全保证节点的安全。Tsai 等人对栓焊混合连接梁柱节点腹板附加焊缝、腹板附加螺栓以及节点域对梁柱抗震性能的影响进行了研究,得出了一些有用的结论^[49]。

1994 年 Northridge 地震发生以后,美国随即组织了大批工程技术、科研人员,展开了地震损伤节点调查、节点破坏程度检查评价、修复和加固措施研究等应急研究工作。为进行有效的修复和加固,必须首先对结构的破坏状况和位置进行系统地评价,由于节点破坏的隐蔽性增加了破坏评价措施的难度。此外理论分析模型存在的不合理性,使得理论分析结果与实际破坏分布、程度并不完全一致,而节点破坏的实际调查也证实了这一结论。在美国 Northridge 地震以后,从大量实际调查工作中逐渐总结出一套有效的评价检查方法,包括详细评价部分,以及采取随机、定性和理论分析相结合的节点取样方法^[50]。

虽然结构节点脆性断裂已存在,钢框架有不同程度破坏,它一般仍能保持一定承载力,不致坍塌^[40]。钢框架仍是一种较为先进的抗震结构形式。因此,对现有结构破坏节点的修复加固工作十分重要。这方面曾进行过很多试验研究,一方面研究破坏节点的剩余强度,研究有效的修复和加固措施,使现有结构在未来地震作用下能保持良好的性能,另一方面探求更合理的新型节点形式,发展设计理论,改进设计规程,促进学科发展。

总的来说具体修复和改善措施分为两个方向,一为减小节点区应力集中的大小,改善应力分布,二为把破坏部位从节点区往外移,以便在梁上合适的位置易出现塑性铰。

1) 减小应力集中的措施

① 严格焊接工艺要求,减少焊接缺陷^{[55][56][59]}

首先要保证焊接材料本身的冲击韧性值^[57]。要求焊接过程中保证作业空间,控制焊接速度和焊接温度,防止局部热量无法消散,产生过大残余应力和残余变形,提高焊接质量。另外对试件焊前预热、焊后进行热处理,这些措施都有助于减少焊接残余应力和残余变形。

② 去掉焊接垫板

如前所述, 垫板和柱翼缘之间若未焊透, 会留下人为裂纹, 引起严重应力集中, 正确做法是去掉焊接垫板, 加以清根补焊。北京中国工商银行营业办公楼首次在国内工程实际中采取了这种措施^[64]。

③ 清除含裂纹部分^{[16][26]}

任何母材或焊缝体中的裂纹都应当切除, 经处理后用有冲击韧性保证的焊材和与母材性质相同的钢材加以补焊。

④ 构件部分替换

有时梁下翼缘因存在裂纹需较大部分切割, 或因修复柱的翼缘而造成梁翼缘的切割, 这时梁翼缘上应加焊一块板代替翼缘传力, 焊接位置选在原翼缘位置, 或在原翼缘表面^{[26][45]}。焊接时应注意代替板在钢材轧制过程的压延方向应与板件受力方向一致。

2) 塑性铰外移

把塑性铰区从梁柱翼缘相交的焊缝处外移, 可以采取加强节点的方法或在梁上适合于出现塑性铰的位置进行局部削弱。

① 加强措施^[36]

节点加强措施包括增加盖板、边板、腋梁、竖向肋等。我国《高层民用建筑钢结构技术规程》^[9]和相关文献^[65]中也推荐采用这些措施。这些辅助板件可用焊接也可用螺栓刚性连接于主体构件上^[38], 其中以腋梁 (如图 1-5 所示) 和盖板 (如图 1-6 所示) 作用最为显著, 工艺最成熟。

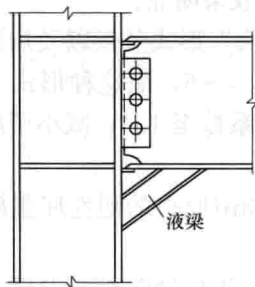


图 1-5 腋梁示意图

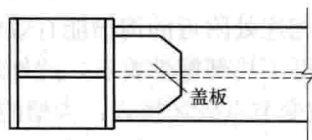


图 1-6 盖板示意图

根据腋梁试验结果分析, 它能明显提高塑性变形能力, 塑性转动能力由原来不足 0.018rad 可增至 0.025rad 以上, 最大可达 0.05rad ^[30], 而对一般刚性框架构件 0.03rad 即能满足要求。

另外针对传统作法中梁腹板与柱翼缘的纯螺栓连接, 提出附加焊缝连接, 以更好地帮助翼缘传力^[49]。试验结果证实了它对提高连接强度和塑性转动能力的作用, 而且施工并不复杂, 可在我国研究推广。

② 局部削弱措施

这种做法包括梁翼缘钻孔和变梁翼缘宽度等, 其中最典型的为“狗骨头”节点形式^[31]和腹板带长槽孔的节点形式^[39]。

a. “狗骨头”型节点

图 1-7 为“狗骨头”节点形式的示意图。在梁的上下翼缘 (或仅在下翼缘) 的每边都切去一圆弧, 造成局部削弱。这种节点的试验中, 节点承受了多次大变形下的应变循环而

没表现出脆性破坏特征, 塑性转动能力远远超过了 0.03rad , 证明这种节点形式具有良好的受力性能^[31]。但是翼缘的削弱造成结构的损伤, 必将影响结构的承载力和刚度分配, 这些问题都是确实存在且不容忽视的。

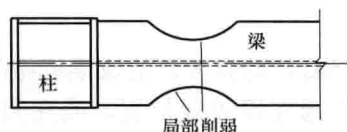


图 1-7 “狗骨头”节点形式示意图

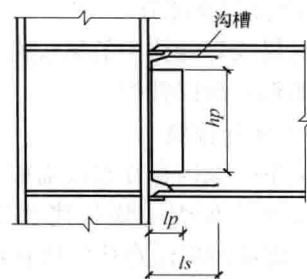


图 1-8 带长槽孔节点形式示意图

b. 带长槽型节点

图 1-8 为腹板带长槽孔的节点形式示意图。这种节点形式现已由美国 SSDA (The Seismic Structural Design Associates, Inc.) 申请专利。 ls 、 lp 、 hp 等尺寸都有具体的计算方法。其理论和试验分析证明, 沟槽对梁弹性阶段的力-变形特性的影响并不明显, 其具有以下优点:

① 塑性铰外移: 按照 SSDA 的设计方法, 一般可把塑性铰的位置从柱翼缘表面外移至距剪切连接板端部约一半梁高的位置, 试验结果证明其效果明显。

② 减小节点处的应力集中系数: 在常规节点、“狗骨头”形式节点以及加盖板和腋梁的节点中, 经有限元分析及试验量测, 其应力集中系数达 $4\sim 6$, 而这种形式节点中梁腹板与翼缘相连处附近的沟槽能有效地降低此处的应力集中系数至 1.4 , 减小了应力、应变梯度, 降低了局部塑性要求, 此外还降低了焊接残余应力。

③ 改变节点破坏模式: 沟槽的存在使节点附近的梁端由原来的塑性屈服破坏转变为梁翼缘局部屈曲破坏, 提高了塑性。

在随后的研究中, Kaufmann 等研究了焊接材料韧性、焊接缺陷对节点抗震性能的影响^[33]。试验结果表明, Northridge 地震以前所用钢材及焊接材料的冲击韧性值均较小, 梁柱连接处焊缝存在的类裂纹性的焊接缺陷, 是导致节点在地震作用下发生脆性断裂的直接原因。

Popov、Bertero、Whitaker、Uang、Engelhardt 和 Roeder 等进行了多组足尺节点试验, 节点试件包括普通型节点、修复后节点试件以及改进型节点试件。试验结果表明, 改进型节点的抗震性能普遍得到了提高^{[31][49][58][78][79]}。Krawinkler、Engelhardt、Ojdovic、Roeders 和 Chen 等^{[36][61-63][78][84][87][99]}等利用线性、非线性分析方法和断裂力学方法分析了节点的抗震性能, 探讨了利用数值方法预计节点损伤程度以及损伤部位的有效性。分析结果显示, 结构的抵抗地震能力远大于设计荷载, 分析结果与实际结构的破坏相差较大。究其原因, 结构分析模型在模拟结构初始缺陷、裂纹扩展方面的困难是造成这种差异的主要原因。发展有效的数值分析方法是节点抗震性能研究的一项重要内容。

20 世纪 70 年代以前, 日本采用的梁柱节点多为 H 形梁-H 形柱节点, 以武藤清教授为主的研究人员做了许多这种形式的足尺模型试验。试验结果表明, 焊接质量较好的试件

有足够的非弹性变形能力,而焊接缺陷足以使重型 H 形试件在常温下发生脆性断裂。20 世纪 70 年代中期以后,日本开始改用 H 形梁-箱形柱结构形式,同时构件尺寸不断增大,施工工艺也有所变化,但由于足尺试验的诸多困难,很少进行基于足尺模型的断裂试验^{[47][48]}。

Kobe 地震以后,日本学者 H. Akiyama 和 M. Nakashima 等对节点的脆性破坏进行了深入的研究。研究工作主要包括理论分析,节点试件在低周往复荷载作用下的试验研究等,此外还进行了箱形截面柱、H 形截面梁足尺节点试件的振动台试验研究^{[46][70][74][85][86][97][98]}。H. Akiyama 等重点研究了梁腹板焊接孔的构造形式、温度等因素对节点脆性破坏、耗能能力的影响,通过研究提出了改善节点抗震性能的初步建议。

欧洲国家在制定欧洲抗震设计规范(Eurocode-8)的过程中,对钢结构的抗震性能进行了深入的研究,Northridge 和 Kobe 地震后提出的另一个新课题是节点局部损伤后钢结构的剩余承载力和抗震性能。由于局部的断裂破坏并不会造成结构的明显破坏或倒塌,当前的科技水平还难以发现全部隐藏的裂纹,但“受伤”的结构,其安全性和可靠性大幅度下降,必须对其剩余性能作出评价,以便采取措施进行加固。

损伤力学是近 20 年发展起来的一门新的学科,它是材料和结构的变形与破坏理论的重要组成部分。在荷载和环境的作用下,由于细观结构的缺陷(如微裂纹、微孔洞)引起的材料或结构的劣化过程,称为损伤。损伤力学是研究含损伤介质的材料性质,以及在变形过程中损伤的演变发展直到破坏的力学过程的学科^[80-83]。

损伤是指材料、构件损伤的程度,表现为在应力作用下微观裂纹和微观空隙的产生和发展,宏观表现为有效工作面积的减少。损伤一般可以划分为三个阶段:连续滑移带的发展、永久损伤的开始和永久损伤的传播直到破坏。

钢结构的疲劳破坏是裂纹在重复或交变荷载作用下的不断开展以及最后达到临界尺寸而出现的断裂。结构的疲劳破坏可以分为两类:行动活荷载作用下结构应变小、破坏前循环次数多的高周疲劳;地震作用下结构应变大、破坏次数少的低周疲劳^{[67][68]}。

在土木工程中,有许多结构的破坏是由于高周疲劳引起的,如承受风、车辆、温度变幅荷载作用的桥梁;承受反复变化压力作用的管道;支撑振动机器的结构;近海平台结构等。材料及其连接、构造的高周疲劳问题,已得到比较广泛的研究。目前就土木工程而言,其高周疲劳理论已相当成熟。

低周疲劳问题与高周疲劳问题有相似之处,但其包括了材料的塑性问题,亦即循环荷载的主应力已经超过了材料的屈服应力,同时材料疲劳破坏时的荷载循环次数较少,通常少于 1 万次。相对于高周疲劳,对低周疲劳问题的研究还不够深入,而事实上,在地震作用下,大幅度循环荷载下的结构以及压力容器的疲劳破坏均属低周疲劳破坏。目前国内外对结构低周疲劳的研究正在深入。

重复或交变荷载会在构件内引起分布损伤,特别是在不同等级的高、低频交变或变幅交变应力的相继作用下,还会使损伤累计起来,造成累计损伤的疲劳断裂。Miner (1945) 研究这类疲劳问题时,最早引进了“损伤”这个名词^[81]。如果构件在某种幅度的交变应力 σ_1 作用下经受过 m_1 次循环,而在同样的受力状态下经历 N_1 次循环后材料就发生疲劳断裂。按照 Miner 的观点,构件已受到一次“损伤”,其损伤程度由下式表示: