



大型火电主厂房钢框排架 结构抗震性能与设计方法

薛建阳 刘祖强 著
梁炯丰 彭修宁



科学出版社

大型火电主厂房钢框排架 结构抗震性能与设计方法

薛建阳 刘祖强 梁炯丰 彭修宁 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统研究和阐述大型火电主厂房钢框排架结构及其中存在的异型节点的抗震性能 and 设计方法。全书共分 11 章,主要包括:第 1 章阐述大型火电主厂房钢框排架结构的研究背景及相关研究现状;第 2~4 章阐述大型火电主厂房钢异型节点的拟静力试验、抗剪承载力计算方法和受力性能有限元分析;第 5~6 章介绍大型火电主厂房钢框排架结构的拟静力试验和拟动力试验;第 7~9 章阐述大型火电主厂房钢框排架结构的弹性时程分析、弹塑性时程分析和静力弹塑性分析;第 10 章阐述大型火电主厂房钢框排架结构基于位移的抗震设计方法;第 11 章阐述大型火电主厂房钢框排架结构抗震优化设计方法。

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

大型火电主厂房钢框排架结构抗震性能与设计方法/薛建阳等著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-042112-8

I. ①大… II. ①薛… III. ①火电厂-厂房-钢结构-排架结构-结构设计-防震设计 IV. ①TU271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 231105 号

责任编辑:童安齐 / 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

*

2014 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 10 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:280 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

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

前 言

电力工业作为国家经济的命脉产业,对国家的经济发展乃至社会稳定起到十分关键的作用,发展电力工业是国家“十一五”发展规划和 2020 年远景发展目标的重点。火力发电作为电力工业的核心,一直受到国家的高度重视。为达到环保、节能和减排的目的,国家有关部门对火电厂采取“上大压小”的政策,1000MW 机组的大型火电厂已经成为目前建设的主流。

随着单机容量的不断增大,在高烈度区火电主厂房中采用传统的钢筋混凝土框排架结构已不大适合。因此,大型火电主厂房中必须采用更为合理的结构体系,才能既满足生产工艺的需求,又满足结构刚度及承载力的要求。

由于钢结构的自重轻、机械化施工程度高、抗震性能优越,钢框排架结构体系成为高抗震烈度区大型火电主厂房结构的首选。我国已经将钢框排架结构体系应用于 1000MW 机组大型火电主厂房,如安徽铜陵发电厂、江苏泰州发电厂等。但由于火电主厂房结构自身特殊的工艺要求,其结构形式存在先天的不足,如结构的质量和刚度分布不均匀、构件截面尺寸过大、异型节点普遍存在等问题,导致对已有结构性能的认识仍存在盲区,结构设计只能凭借经验进行,这些对结构的抗震均会产生不利的影响。因此,对大型火电主厂房钢框排架结构的研究势在必行,以弥补该研究领域的空白,为这一特殊结构体系的设计应用提供理论依据和技术支撑。

本书作者及其课题组于 2009 年对 6 个大型火电主厂房钢异型节点进行了低周反复加载试验,获得了该类型节点的破坏形态和抗震性能指标,揭示了节点核心区的受力机理,从理论和实际应用的角度提出了节点抗剪承载力计算公式,并采用 ABAQUS 软件对节点的受力性能进行了有限元模拟。在此基础上,于 2011 年对 1 榀大型火电主厂房钢框排架平面模型进行了拟动力试验及拟静力试验,揭示了该结构的破坏形态和破坏机制,获得了其加速度、位移等地震反应及滞回性能、延性、耗能能力、刚度退化等抗震性能指标。在试验研究的基础上,采用 MIDAS/GEN 软件对大型火电主厂房钢框排架空间模型进行了弹性时程分析、弹塑性时程分析和静力弹塑性分析,研究了结构的地震反应、破坏准则、薄弱部位、塑性铰的出现和发展规律、框架与排架的协同工作等受力性能;提出了大型火电主厂房钢框排架结构的抗震性能水平和性能目标,给出了结构对应不同性能水平的层间位移角限值,并将基于位移的抗震设计理论应用于大型火电主厂房钢框排架结构,给出了具体设计步骤;利用 ANSYS 软件,以构件截面尺寸为设计变量,对大型火电主厂房钢框排架结构进行了优化设计,在保证结构抗震能力的前提下获得了较大的经

济效益。我们进行上述研究工作,以期完善大型火电主厂房钢框排架结构的设计理论、推广其工程应用尽一点微薄之力。

本书由薛建阳、刘祖强、梁炯丰、彭修宁执笔撰写。作者的研究生胡宗波、史祝、温永强、茅荣华、陈俭勇、易孝强等在试验及理论分析过程中做了大量工作。本书的研究工作得到中国博士后科学基金(20080440814)、教育部“创新团队发展计划”(IRT13089)、陕西省重点科技创新团队发展计划(2014KCT-31)、西安建筑科技大学创新团队发展计划,以及广西电力工业勘察设计研究院的资助和支持,在此一并表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足与不妥之处,同时书中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 研究背景	1
1.2 国内外相关研究现状	2
1.2.1 火电主厂房结构抗震性能研究	2
1.2.2 钢节点抗震性能研究	3
1.2.3 钢框架抗震性能研究	5
1.3 本书的主要研究工作	7
1.3.1 大型火电主厂房钢异型节点抗震性能研究	7
1.3.2 大型火电主厂房钢异型节点抗剪承载力研究	7
1.3.3 大型火电主厂房钢异型节点受力性能有限元分析	7
1.3.4 大型火电主厂房钢框排架结构抗震性能研究	7
1.3.5 大型火电主厂房钢框排架结构受力性能有限元分析	7
1.3.6 大型火电主厂房钢框排架结构基于位移的抗震设计方法研究	8
1.3.7 大型火电主厂房钢框排架结构抗震优化设计研究	8
第 2 章 大型火电主厂房钢异型节点抗震性能试验研究	9
2.1 试验方案	9
2.1.1 试验目的	9
2.1.2 试验模型	9
2.1.3 材性试验	13
2.1.4 试件加载	13
2.1.5 测点布置	15
2.2 加载破坏过程及分析	17
2.2.1 加载破坏过程	17
2.2.2 破坏模式分析	19
2.3 试验结果分析	19
2.3.1 节点区应变分析	19
2.3.2 柱顶水平荷载与位移滞回曲线	22
2.3.3 柱顶水平荷载与位移骨架曲线	24
2.3.4 节点变形分析	26

2.3.5 节点核心区耗能能力分析	28
第3章 大型火电主厂房钢异型节点抗剪承载力计算	36
3.1 大型火电主厂房钢异型节点抗剪承载力理论计算	36
3.1.1 节点核心区形式及受力特点	36
3.1.2 节点核心区抗剪承载力理论计算	38
3.1.3 计算结果与试验结果对比	47
3.2 大型火电主厂房钢异型节点抗剪承载力实用计算	48
3.2.1 核心区受剪机理分析	48
3.2.2 节点核心区抗剪承载力实用计算	50
第4章 大型火电主厂房钢异型节点受力性能分析	54
4.1 有限元计算模型	54
4.2 有限元结果与试验结果的对比	55
4.3 核心区应力分析	56
4.3.1 弹性阶段的计算结果及分析	56
4.3.2 弹塑性阶段的计算结果及分析	58
4.4 核心区翼缘应力分析	59
4.4.1 弹性阶段的计算结果及分析	59
4.4.2 弹塑性阶段的计算结果及分析	60
4.5 梁端应力分析	61
4.5.1 弹性阶段的计算结果及分析	61
4.5.2 弹塑性阶段的计算结果及分析	63
4.6 核心区剪切变形分析	64
4.7 核心区平面外位移分析	65
第5章 大型火电主厂房钢框排架结构拟动力试验研究	67
5.1 模型设计与制作	67
5.1.1 模型相似关系	67
5.1.2 模型设计与制作	68
5.1.3 模型材料性能	71
5.2 试验方法和测试内容	72
5.2.1 试验方法原理	72
5.2.2 加载装置	72
5.2.3 试验输入参数	74
5.2.4 测试内容及方法	75
5.2.5 加载制度	75
5.3 试验过程及现象描述	76

5.4	试验结果及分析	77
5.4.1	加速度反应	78
5.4.2	位移反应	79
5.4.3	滞回特性与耗能分析	80
5.4.4	强度与刚度	83
5.4.5	阻尼	84
5.4.6	变形性能	85
5.4.7	应变反应分析	87
第6章	大型火电主厂房钢框排架结构拟静力试验研究	89
6.1	试验概况	89
6.2	试验结果与分析	90
6.2.1	试件破坏过程	90
6.2.2	破坏机制	92
6.2.3	滞回曲线	93
6.2.4	骨架曲线	94
6.2.5	延性	94
6.2.6	耗能	96
6.2.7	强度退化	98
6.2.8	刚度退化	99
6.2.9	变形能力	100
6.2.10	煤斗梁节点应变分析	101
第7章	大型火电主厂房钢框排架结构弹性时程分析	103
7.1	计算模型的建立	103
7.1.1	工程概况	103
7.1.2	单元类型分析与选择	105
7.1.3	分析模型的建立	107
7.2	火电厂主厂房结构的动力特性分析	108
7.3	空间框排架结构的动力反应	110
7.3.1	加速度反应	110
7.3.2	位移反应	111
7.3.3	地震作用	117
7.3.4	框排架协同工作	118
7.4	双向水平地震动输入对结构地震反应的影响	119
第8章	大型火电主厂房钢框排架结构弹塑性时程分析	123
8.1	弹塑性时程分析的基本方法	123

8.1.1	运动方程	123
8.1.2	结构计算模型	123
8.1.3	结构动力方程的求解	124
8.2	火电厂主厂房的弹塑性时程分析	126
8.2.1	分析模型	126
8.2.2	材料的本构关系与恢复力模型	129
8.2.3	塑性铰的定义与计算参数的设定	130
8.2.4	结构阻尼的确定	131
8.2.5	时程分析参数	131
8.3	计算结果与分析	132
8.3.1	加速度反应	132
8.3.2	位移反应	132
8.3.3	地震作用	134
8.3.4	塑性铰分布	135
8.3.5	框排架协同工作	138
第 9 章	大型火电主厂房钢框排架结构静力弹塑性分析	139
9.1	静力弹塑性分析的基本原理	139
9.1.1	基本假定	139
9.1.2	Pushover 分析的实施步骤	140
9.1.3	水平加载模式	140
9.1.4	目标位移	141
9.2	火电厂主厂房的 Pushover 分析	143
9.2.1	计算模型的建立	143
9.2.2	计算参数的确定	144
9.3	结果分析与讨论	145
9.3.1	基底剪力与顶点位移的关系	145
9.3.2	层剪力	148
9.3.3	层间位移角	149
9.3.4	结构塑性铰出铰分析	150
9.3.5	框排架结构协同工作	160
9.3.6	刚度退化	161
第 10 章	大型火电主厂房钢框排架结构基于位移的抗震设计	162
10.1	基于性能的结构抗震设计方法	162
10.1.1	基于性能抗震设计方法的基本内容	162

10.1.2	直接基于位移抗震设计的特点	163
10.2	火电厂主厂房钢框排架结构性能水准划分及性能目标	164
10.2.1	地震设防水准	164
10.2.2	结构性能水平划分	164
10.2.3	结构性能目标的量化	166
10.3	火电厂主厂房钢框排架结构基于位移的抗震设计	168
10.3.1	目标位移模式	168
10.3.2	等效单自由度体系的等效参数	169
10.3.3	位移反应谱	172
10.3.4	火电厂主厂房钢框排架结构基于位移的抗震设计步骤	173
10.4	算例及分析	174
10.4.1	按性能水平为“正常使用”设计	175
10.4.2	按性能水平为“基本使用”设计	177
10.4.3	按性能水平为“生命安全”设计	178
第 11 章	大型火电主厂房钢框排架结构抗震优化设计	180
11.1	引言	180
11.2	ANSYS 优化工具箱	181
11.2.1	ANSYS 优化模块	181
11.2.2	ANSYS 优化方法	182
11.3	钢框排架结构参数化有限元模型的建立	182
11.4	荷载与荷载组合	184
11.4.1	荷载类型	184
11.4.2	风荷载的计算	185
11.4.3	水平地震作用的计算	185
11.4.4	荷载组合	186
11.4.5	二阶效应	186
11.5	无支撑框排架结构的单目标优化设计	187
11.5.1	设计变量及目标函数	187
11.5.2	状态变量	187
11.5.3	优化分析文件	190
11.5.4	零阶优化结果	190
11.5.5	一阶优化结果	194
11.5.6	优化结果分析	197
11.6	支撑体系的多目标优化设计	198

11.6.1 设计变量及目标函数	198
11.6.2 状态变量	198
11.6.3 优化结果及分析	199
11.7 变形验算及对比	203
11.7.1 变形验算	203
11.7.2 优化后变形与试验变形的对比	204
主要参考文献	205

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

地震灾害被认为是威胁人类生存及发展的最大自然灾害之一,其中建筑物破坏及倒塌为地震灾害的主要表现形式。因此,如何最大限度减轻建筑物的地震破坏,使其抗震性能得到有效提高是工程师所肩负的重要任务。

火力发电厂是重要的生命线工程,其主厂房结构的安全直接决定了电力能源能否正常供应,因此主厂房的抗震设计尤其重要。在火电主厂房结构设计中,为了迎合生产工艺的需求,常常出现部分为多层、部分为单层的框排架结构体系,这种体系把单层排架及多层框架相互连为一体,但由于设备种类繁多,运行参数复杂,导致其整体结构布置复杂,空间整体性能较差,荷载传递路线不明确,从而导致该体系抗震性能不理想。钢筋混凝土框排架结构在过去中、小型机组主厂房中常被采用,而随着国家电力行业的发展,单机容量不断增大,结构高度、跨度、荷重也不断增大,使得结构动力特性更为复杂,结构所承受的地震作用也更大。此时,在高烈度区大容量机组主厂房中采用传统的钢筋混凝土框排架结构主厂房已不适合。因此,具有布置灵活、自重轻、强度高、施工快、抗震性能好等优点的钢结构,成为大型火电主厂房的主要结构形式,尤其成为抗震设防区建造大型火电厂的首选形式。

然而,由于生产工艺布置的需要,与钢筋混凝土框排架结构主厂房相同,钢结构主厂房同样存在整体结构布置复杂、刚度不均匀、荷载质量分布多样等问题,造成其抗震存在薄弱环节,大型火电主厂房钢结构设计是电力设计人员所面临的新课题。而由于火电主厂房抗震设计所具有的特殊性,我国现有的钢结构设计规范、抗震设计规范尚缺乏相关的针对性规定条款。

因此,结合我国国情,针对火电厂钢结构主厂房结构的特殊性及存在的问题,应着力研究这种形状不规则,平面布置不均匀,纵、横向立面布置不均匀,结构质量分布不规则,错层及柱截面缩进等情况较多的框排架结构体系的合理性,以揭示其在地震作用下的受力特点、抗震性能和破坏机理,从而寻求合理有效的主厂房钢框排架结构体系,并建立相应的设计方法。

1.2 国内外相关研究现状

1.2.1 火电主厂房结构抗震性能研究

陡河电厂钢筋混凝土框排架主厂房在唐山地震中部分倒塌,使得电力供应中断,造成了较大经济损失。自此以后,我国学者对火电厂钢筋混凝土框排架结构的抗震性能进行了深入研究,包括震害调查、结构动力特性实测和试验、振动台模型试验、构件和节点的模型试验、抗震计算分析等工作,从而完成了《火力发电厂土建结构设计技术规定》(DL5022—93)和《电力设施抗震设计规范》(GB50260—96)等规范的抗震设计内容。

然而,随着火电厂自动化水平不断提高,主厂房结构的体型以及单机容量不断增大,厂房高度、跨度、相邻结构的高差亦随之加大,按照上述规范中火电主厂房结构抗震设计规定设计得到的结构安全度偏低,已不能满足高参数大容量火电厂的抗震设计要求。为此,近年来,学者和工程技术人员又对大型火电主厂房结构的抗震性能进行了更为深入的研究,并取得了一定的研究成果。

孙香红等对一个6层7跨的大型火电主厂房纵向消能支撑框架体系1/8比例模型进行了拟静力试验研究,研究了结构的破坏过程、塑性铰出现顺序及滞回性能。试验结果表明,消能支撑框架体系具有较好的抗震性能,耗能系数达到5.25,耗能效果优于普通框架;结构的破坏主要集中在底层。

白国良等采用ETABS对某火电主厂房钢筋混凝土框排架结构进行了空间地震反应分析,研究了该结构的动力特性、层间变形、扭转效应及框架与排架的内力分配,并建议设计中应考虑双向地震作用的影响。

吴涛等对一个1/7比例的框排架子空间模型进行了拟动力和拟静力试验研究,结果表明,该类不规则结构裂缝分布广泛,由于整体结构“强梁弱柱”的特点,最终破坏时塑性铰主要出现在柱上。破坏最严重的是原型结构的第5层,主要原因为该处柱变截面及变梁变柱异型节点的存在。

白晓红等采用ANSYS建立了钢筋混凝土横向框排架、纵向框架-剪力墙结构的主厂房有限元模型,分析了该结构自振特性、平面模型与空间模型计算的差别,并提出了结构的空間作用比、考虑扭转作用的空間工作调整系数。

宋远齐等运用基于结构性能的抗震设计方法,对大型火电厂框排架结构进行了静力弹塑性地震反应分析,结果表明,主厂房框排架结构在7度罕遇地震作用下能满足变形要求,但结构存在较多薄弱环节,在设计时应引起高度重视。

马云玲等通过建立某火力发电厂主厂房结构的整体空間计算模型,分别进行了模态分析和水平双向地震作用下的弹塑性时程分析。结果表明,结构纵、横向刚

度相差较大,扭转效应明显,薄弱部位较多;结构的扭转效应可通过调整构件尺寸和位置来减小。

彭自强等采用静力弹塑性分析方法,对火电厂预应力框架在地震作用下的结构反应进行了分析,并与拟静力试验结果进行了对比。结果表明,结构最初出现塑性铰的位置均为柱端,结构的薄弱环节为柱底,最终因为底层柱失效造成结构破坏。

宋远齐等利用动力弹塑性时程分析方法对大型火电主厂房框排架结构进行了抗震研究。结果表明动力弹塑性时程分析方法能反映地震作用下主厂房结构的响应随时间变化的全过程;主厂房横向框排架和纵向框架存在较多的薄弱环节,分析结果可为设计提供重要依据。

火力发电主厂房结构中由于工艺布置的要求,常常会出现大量异型节点,其受力性能以及在地震作用下的破坏模式不同于普通节点,为此,白国良等对钢筋混凝土框排架异型节点进行了试验研究和计算分析,研究了该类异型节点的工作性能和受力特点,建立了异型节点抗剪承载力计算公式,提出了异型节点的设计方法。白建方等还利用神经网络方法研究了低周反复荷载作用下钢筋混凝土异型节点抗裂承载力与各主要影响因素之间复杂的非线性关系,建立了基于承载力的 BP 神经网络预测模型,给出了异型节点抗震性能预测方法和步骤。

针对火电厂钢筋混凝土主厂房结构难以满足在高烈度区抗震要求的现状,白国良提出了型钢混凝土框排架-钢筋混凝土分散剪力墙混合结构体系,并按照 1/7 比例对七层框排架子空间模型进行了拟动力试验及拟静力试验,结果表明,该结构较钢筋混凝土框排架结构具有更好的滞回性能和耗能能力,分散剪力墙和型钢混凝土柱对结构延性和耗能能力的提高显著且有较大安全储备。

关于火电厂钢结构主厂房抗震性能的研究较少,沈祖炎等进行了缩尺为 1/25 的大型火电厂钢支撑-框架主厂房结构的模型振动台试验,探讨了细部构造对整体模型的影响。张文元等进行了铰接中心支撑框架结构体系钢结构主厂房的抗震性能试验研究,结果表明,铰接中心支撑框架结构体系能够满足“小震不坏”和“大震不倒”的抗震设防要求,底层和顶层为结构抗震设计的薄弱部位。

1.2.2 钢节点抗震性能研究

Tsai 对 19 个梁柱连接节点进行了循环加载试验,包括 14 个翼缘连接和 5 个腹板连接。结果显示,全焊连接节点延性很好;栓焊连接节点因焊接工艺有两个试件发生脆性破坏;腹板连接节点延性较好,应该采用角焊缝对焊接衬板与柱翼缘的连接进行补焊;对于梁翼缘塑性模量和梁截面塑性模量之比小于 0.7 的栓焊连接节点,要采用角焊缝对腹板进行补强。Tsai 还对循环荷载作用下梁柱连接的性能进行了非线性有限元分析,结果表明,可以忽略柱轴力对节点核心区强度的影响。

王珊等通过 5 个工字梁与工字柱刚性连接节点的低周反复加载试验对节点核心区性能进行了研究。结果表明,梁柱节点核心区在周期荷载作用下变形能力较强,且核心区板材越薄,其延性越好;节点核心区的剪切变形在弹性阶段很小,进入弹塑性阶段后会显著增大;根据试验获得的变形曲线,通过计算机模拟提出了节点核心区的恢复力模型,它能很好地反映出节点核心区的剪切变形;节点核心区上下水平加劲肋的设计很重要。

Engelhardt 等完成了 12 个采用盖板加强梁柱节点的循环荷载试验,结果表明,通过盖板加强,可以使塑性铰的位置由梁端外移至盖板端部,改善节点的延性。但有两个试件发生了脆性破坏,原因可能为焊缝的韧性不足,也可能为盖板太长使梁端焊缝的应力增加。

Popov 等对 H 形柱的梁柱狗骨式连接进行了试验研究。结果表明,采用狗骨式连接的试件表现出良好的性能,破坏时梁的塑性转角达到了 0.03rad 。

Nakashima 等对 14 个梁柱连接试件进行了动力和拟静力试验,以研究两种新的腹板切角形式对节点性能的影响,并对采用陶瓷和钢引弧板的试件进行比较。结果表明,合理的切角形式可以使连接处的应力集中得到缓解,节点延性得到提高;采用陶瓷引弧板试件的塑性转动能力明显比采用钢引弧板试件的高。

Uang 等对 6 个梁柱十字形节点进行了低周反复加载试验,以验证经过梁翼缘削弱(RBS)或加腋处理的节点的抗震性能,其中 3 个试件的梁上浇有混凝土板,以考虑其组合效应。结果显示,除非采用韧性较高的焊接材料,否则仅仅对梁翼缘进行削弱处理的节点的破坏模式仍然是脆性破坏;两个采用高韧性焊接材料的 RBS 试件在试验中表现较好,其破坏模式是延性断裂;混凝土板对节点性能的影响不大,对梁抗弯强度仅能提高 10%;同样采用韧性较低的焊接材料,加腋试件的性能比 RBS 的强,有混凝土板的试件没有发生脆性断裂。

赵大伟等进行了四种类型 8 个足尺节点试件的循环加载试验,以研究不同形式节点的抗震性能。结果表明,“狗骨头”型节点、焊接孔扩大型节点以及带长槽型节点都不同程度地增加了节点的延性,但“狗骨头”型节点和带长槽型节点的刚度和承载能力比标准型节点低得多,而焊接孔扩大型节点不仅在这两方面降低不多,而且施工方便,焊接质量容易保证。因此,焊接孔扩大型节点是一种较理想的节点形式。

Chen 等对 7 个梁柱 T 型连接进行了低周反复加载试验,以验证梁截面削弱对节点性能的影响。结果表明,梁截面削弱后,节点承载力降低不多,但其塑性转动能力有显著提高;仅仅对梁下翼缘进行削弱,制作简单,不影响板的施工,又可提高节点的延性。

石永久等进行了 8 个新型梁柱节点的低周反复加载试验,其主要是针对焊接孔扩大型节点不同的构造形式进行研究。结果表明,节点局部构造尤其是焊接孔

形状尺寸对节点破坏模式和应力集中情况影响很大;较长的焊接孔可以改善节点的延性,缓解应力集中,使节点的破坏模式由对接焊缝的脆性破坏转变为梁翼缘的局部屈曲,且制作相对简便;剪切板附加焊缝可以增加节点的弹性刚度和弹性极限承载力。

苏明周等对4个常规全焊钢框架梁柱连接进行了循环加载试验,之后还对其两个试件破坏的焊缝修复后加腋重新进行试验。结果表明,常规全焊刚性连接的变形能力较差,达不到强震作用下的变形和耗能要求,破坏形式为脆性破坏;节点核心区的局部屈服会加剧连接处的应力集中,降低节点的承载能力和变形能力;梁翼缘宽厚比较大的试件表现出较强的变形能力;加腋可以提高全焊刚接节点的承载能力和变形能力。

余海群等对10个不同连接构造的足尺梁柱刚性连接钢节点进行了低周反复加载试验,研究了标准栓焊连接节点、标准全焊连接节点、梁翼缘加强型节点、梁翼缘局部削弱型节点以及梁贯通型节点的破坏过程、破坏形态、承载力和塑性变形能力等。结果表明,梁翼缘局部切割削弱节点和梁翼缘加盖板节点延性最好,梁贯通型节点、梁下翼缘加腋节点和梁翼缘打孔节点延性次之,其余类型节点延性不好。分析梁翼缘和腹板的应力分布表明,梁根部翼缘处于三向应力状态,是造成连接脆性断裂的原因之一。建议钢框架梁柱连接优先采用梁翼缘加梯形盖板节点和梁下翼缘加腋节点。

1.2.3 钢框架抗震性能研究

Tang 等对一个比例约为1/2的三层钢框架进行了振动台试验,研究了屈服力大小、节点核心区变形、基础变形、结构刚度分布等因素对恒载的影响,并采用双线性恢复力模型对结构进行了理论分析。结果表明,采用简单的计算模型分析结构的总体反应可以得出较精确的结果,但对于进入塑性阶段的局部反应则精度较差。

Kaya 等利用参数识别的方法对一个三层钢框架模型进行结构分析,并与其动力试验结果进行对比,发现楼层位移和节点转角相互独立,即梁和柱不能保持理想的连续性。Tagawa 等通过一个足尺组合钢梁抗弯框架的拟静力试验,提出了塑性铰处组合梁的滞回规律。

20世纪80年代日美联合进行了足尺钢框架模型抗震试验研究及一系列缩尺结构试验,并对此进行了理论分析。结果表明,空间抗弯框架很柔,节点核心区广泛屈服而没有断裂,滞回特性稳定,延性较大。

结构非弹性地震响应会受 $P-\Delta$ 效应严重影响,从而增大了结构向一侧倒塌的可能性。Challa 等对地震作用下平面钢框架考虑 $P-\Delta$ 效应的倒塌进行了非线性分析,结果表明,即使满足了规范规定的“强柱弱梁”,柱中仍会出现塑性铰,倒塌是由结构底部几层形成倒塌机制所引起的。Usami 等提出了基于推倒分析的钢框架

结构抗震设计方法,并指出简单双线性滞回模型的单自由度动力分析能可靠地预测整体最大位移。

国内学者也对钢框架抗震性能进行了大量研究,并取得了丰富的研究成果。李国强等对钢框架结构进行了地震反应分析,同时考虑了节点和杆件的剪切变形及轴力引起的二阶效应,给出了 H 形钢柱纯框架层间弯剪型模型,并对梁单元弹塑性刚度矩阵作了改进,提出了弹塑性模型,即将 Clough 梁单元弹塑性刚度矩阵计算的二杆模型推广为广义 Clough 模型,研究了梁柱连接变形和节点核心区剪切变形对钢框架抗震性能的影响。

冯健等采用综合离散法对平面钢框架进行弹塑性地震反应分析,提出了罕遇地震下多高层抗弯钢框架和中心支撑钢框架结构弹塑性位移验算的实用计算公式。

董宝通过将损伤累积原理引入到钢框架的弹塑性地震反应分析中,建立了钢材考虑损伤累积的滞回曲线和空间钢杆件的恢复力模型、弹塑性刚度矩阵,理论计算结果与空间钢框架模型振动台试验所测得的振动位移曲线比较吻合。

吴芸等通过狗骨式刚性连接钢框架的拟静力试验,研究了该类型结构的破坏形态、变形特点、滞回曲线、耗能性能等。结果表明,狗骨截面经合理设计,可使其对框架的抗震性能起到保险丝作用。

彭观寿等通过计算不同支撑类型及支撑布置方式下钢框架支撑结构的顶点位移,研究了多、高层钢框架结构抗侧刚度受支撑形式影响的情况。结果表明,对不同类型的支撑,沿竖向集中布置于中间跨的钢框架结构抗侧刚度好于将支撑布置在边跨及其他跨。支撑布置方式相同的情况下,不管是中心支撑,还是偏心支撑,人字形支撑框架在抗侧刚度和经济性方面,均优于单斜杆支撑框架。

完海鹰等通过对半刚性连接钢框架结构进行拟动力试验,分析了半刚性节点的初始刚度对钢框架的楼层刚度、基底剪力、楼层位移及楼层加速度的影响。结果表明,在结构侧向位移满足的前提下,结构作用效应将随半刚性连接刚度的降低而减弱。

石永久等进行了两个构造形式不同的钢框架偏心支撑结构的低周反复荷载试验,结果表明,偏心支撑框架在弹性阶段内具有良好的变形能力;偏心支撑框架能够控制框架破坏模式,地震作用下框架在耗能梁段屈服后破坏,破坏发生在耗能梁段端部翼缘、支撑与柱脚连接的节点板位置,降低了梁柱节点受力。

郭兵等进行了偏心支撑半刚接钢框架的动力特性测试及拟静力试验。动力特性测试表明,随着梁柱节点转动刚度的降低,结构自振频率减小,阻尼比增加。拟静力试验表明,节点刚度和承载力对偏心支撑框架结构的滞回性能有显著影响,节点刚度和承载力越高,滞回性能越好,节点刚度较低的偏心支撑框架不宜用于抗震设防区;偏心支撑显著增加了半刚接钢框架的抗侧刚度,使得节点刚度对框架刚度