



土木工程结构研究新进展丛书

钢框架梁柱抗震节点 试验研究 和 有限元分析实例

The Experiment and Finite Element Instance of Anti-Seismic
Beam-Column Connection of Steel Frame

张艳霞◎编著

中国建筑工业出版社

土木工程结构研究新进展丛书

钢框架梁柱抗震节点 试验研究和有限元分析实例

The Experiment and Finite Element Instance of
Anti-Seismic Beam-Column Connection of Steel Frame

张艳霞 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢框架梁柱抗震节点试验研究和有限元分析实例/张
艳霞编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 11
(土木工程结构研究新进展丛书)
ISBN 978-7-112-17193-4

I. ①钢… II. ①张… III. ①钢梁-框架梁-抗震结
构-节点分析 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 194121 号

本书根据试验研究结果, 系统地阐述钢结构梁柱抗震节点各种改进方
式的优势与不足, 同时书中给出 ABAQUS 有限元分析实例, 对比试验结
果。全书共分 5 章, 第 1 章绪论、第 2 章钢框架梁柱 T 字形抗震节点试验
研究、第 3 章钢框架梁柱 T 字形抗震节点非线性有限元分析、第 4 章钢框
架梁柱十字形抗震节点试验研究及非线性有限元分析、第 5 章框架梁柱十
字形抗震节点 ABAQUS 非线性有限元分析实例。本书可供科研教学人
员、工程技术人员和相关专业在读研究生阅读参考。

* * *

责任编辑: 王 梅 武晓涛

责任设计: 张 虹

责任校对: 李欣慰 刘 钰

土木工程结构研究新进展丛书

钢框架梁柱抗震节点试验研究和有限元分析实例

The Experiment and Finite Element Instance of
Anti-Seismic Beam-Column Connection of Steel Frame

张艳霞 编著

*

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

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 245 千字

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-17193-4

(25978)

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

1994年美国北岭地震和1995年日本阪神地震后,大量钢结构梁柱节点出现了脆性破坏,引起了国内外学者和工程师对于传统钢结构梁柱节点抗震性能的重新认识和思考。为了解决这一问题,需要对传统钢框架梁柱节点进行改进,将梁端塑性铰外移保护梁柱焊缝进而避免脆性破坏成为国内外学者关于钢框架梁柱节点改进的主要思想。

本书作者对该领域进行了多年的研究,先后对钢框架梁柱加强型、削弱型及加强和削弱并用等改进型抗震节点进行了T字形节点和十字形节点两次足尺试验研究。利用ABAQUS有限元软件对所有节点试验过程进行了分析模拟,分析结果与试验结果较为吻合。书中系统地阐述和总结了钢结构梁柱抗震节点各种改进方式的优势与不足及研究现状,为工程应用提供参考。同时书中给出了ABAQUS有限元分析实例,供广大工程技术人员、科研人员和研究生参考。全书共分5章,第1章绪论、第2章钢框架梁柱T字形抗震节点试验研究、第3章钢框架梁柱T字形抗震节点非线性有限元分析、第4章钢框架梁柱十字形抗震节点试验研究及非线性有限元分析、第5章钢框架梁柱十字形抗震节点ABAQUS非线性有限元分析实例。

本书中的研究工作先后得到了“北京市教委科技面上项目(项目编号:KM200710016003)”、“北京市科技计划项目(项目编号:Z121110002912106)”、“北京市属市管高等学校人才强教计划—工程结构抗震新技术研究学术创新团队项目(项目编号:PHR200907126)”的支持,特此致谢!并感谢北京建筑大学结构实验室、工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心吴徽、韩青、唱锡麟、苏丹、张国伟、杜红凯和陈嵘老师提供的支持与帮助!

作者已毕业研究生王路遥为本书T字形节点的试验和有限元分析做了大量工作,特在此表示衷心感谢!研究生李瑞为十字形节点有限元分析、有限元分析实例及全书校对修改做了大量工作,研究生孙文龙、赵微、刘景波为十字形节点试验做了较多的工作,研究生陈媛媛、赵文占、李佳睿为本书文献检索、插图和有限元分析实例也做了较多工作,在此一并表示由衷的谢意!

由于作者水平有限,书中肯定存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

张艳霞

2014年3月于北京建筑大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地震灾害和传统钢框架梁柱刚性节点形式	1
1.2 传统型钢框架梁柱刚接节点脆性破坏的原因	2
1.3 国内外研究概况	3
1.4 本书研究内容	21
第 2 章 钢框架梁柱 T 字形抗震节点试验研究	23
2.1 钢框架梁柱 T 字形抗震节点试验设计	23
2.1.1 构件设计	23
2.1.2 节点细部构造	23
2.1.3 试验装置设计	27
2.1.4 加载制度	27
2.1.5 测量内容	28
2.2 材性试验	29
2.3 钢框架梁柱 T 字形抗震节点试验研究	30
2.3.1 SP1-1 梁端加宽(焊接)-翼缘削弱型节点	30
2.3.2 SP1-2 梁端加宽(非焊接)-翼缘削弱型节点	34
2.3.3 SP1-3 梁端加厚-翼缘削弱型节点	39
2.3.4 SP1 系列节点小结	41
2.3.5 SP2 梁端梯形加宽节点	42
2.3.6 SP3-1 梁端加厚-翼缘单盖板削弱型节点	46
2.3.7 SP3-2 梁端加厚-翼缘单盖板削弱型节点	49
第 3 章 钢框架梁柱 T 字形抗震节点非线性有限元分析	55
3.1 钢框架梁柱 T 字形抗震节点有限元模型的建立	55
3.1.1 ABAQUS 有限元分析方法概述	55
3.1.2 试件材料参数的选取	58
3.1.3 单元选取及网格划分	58
3.1.4 边界条件及加载制度	59
3.2 SP1-1 梁端加宽(焊接)-翼缘削弱型节点	59
3.2.1 试件模型图	59
3.2.2 塑性铰形成及发展	60

3.2.3 应力分布规律	61
3.2.4 滞回性能对比分析	62
3.2.5 主要参数对比分析	62
3.3 SP1-2 梁端加宽(非焊接)-翼缘削弱型节点	63
3.3.1 试件模型图	63
3.3.2 塑性铰形成及发展	64
3.3.3 应力分布规律	65
3.3.4 滞回曲线对比分析	66
3.3.5 主要参数对比分析	67
3.4 SP1-3 梁端加厚-翼缘削弱型节点	67
3.4.1 试件模型图	67
3.4.2 塑性铰形成及发展	68
3.4.3 应力分布规律	69
3.4.4 滞回性能对比分析	71
3.4.5 主要参数分析	72
3.5 SP2 梁端梯形加宽节点	72
3.5.1 试件模型图	72
3.5.2 塑性铰形成及发展	72
3.5.3 滞回性能对比分析	74
3.5.4 主要参数对比分析	74
3.6 SP3-1 梁端加厚-翼缘单盖板削弱型节点	75
3.6.1 试件模型图	75
3.6.2 塑性铰形成及发展	75
3.6.3 梁翼缘应力分布规律	75
3.6.4 滞回性能对比分析	77
3.6.5 主要参数对比分析	77
3.7 SP3-2 梁端加厚-翼缘单盖板削弱型节点	78
3.7.1 试件模型图	78
3.7.2 塑性铰形成及发展	78
3.7.3 梁翼缘应力分布规律	80
3.7.4 滞回性能对比分析	80
3.7.5 主要参数对比分析	80
3.8 本章小结	81
3.8.1 梁端加强式与削弱式并用节点的优势分析小结	81
3.8.2 梯形加宽扩翼型节点的优势分析小结	81
第4章 钢框架梁柱十字形抗震节点试验研究及非线性有限元分析	82
4.1 试验构件设计	82
4.2 节点细部构造	82

4.3 试验装置设计	85
4.4 SPC1-1 梁端加宽-翼缘削弱型节点	85
4.4.1 试验过程及有限元分析对比	85
4.4.2 应力、应变规律	87
4.4.3 试验与有限元滞回性能对比分析	88
4.5 SPC1-1 梁端加宽-翼缘削弱型节点与 SPC1-2 单纯削弱型节点对比分析	89
4.5.1 试验过程及有限元分析对比	89
4.5.2 应变对比分析	90
4.5.3 滞回性能对比分析	91
4.6 SPC1-1 梁端加宽-翼缘削弱型节点与 SPC1-3 梁端加宽型节点对比分析	93
4.6.1 试验过程及有限元分析对比	93
4.6.2 滞回性能对比分析	95
4.7 SPC2-1 梁端加厚-翼缘削弱型节点	96
4.7.1 试验过程及有限元分析对比	96
4.7.2 破坏形态	97
4.7.3 应变变化规律	97
4.7.4 应力变化规律	98
4.7.5 滞回曲线对比分析	99
4.7.6 主要指标对比分析	100
4.8 SPC2-2 梁端加厚-短梁螺栓全拼接型节点	100
4.8.1 试验过程及有限元分析对比	100
4.8.2 破坏形态对比	100
4.8.3 应变变化规律	101
4.8.4 应力变化规律	102
4.8.5 滞回曲线对比分析	103
4.9 SPC2-3 梁端上下加腋型节点	104
4.9.1 试验过程及有限元分析对比	104
4.9.2 破坏形态对比	104
4.9.3 应变变化规律	106
4.9.4 滞回曲线对比分析	106
4.9.5 主要指标对比分析	108
第5章 框架梁柱十字形抗震节点 ABAQUS 非线性有限元分析实例	109
5.1 问题描述	109
5.2 启动 ABAQUS/CAE	110
5.3 创建部件	111
5.3.1 柱	111
5.3.2 梁	114
5.3.3 隔板	119

5.3.4 剪切板	119
5.3.5 螺栓	120
5.4 创建材料和截面属性	122
5.4.1 创建材料	122
5.4.2 创建截面属性	123
5.4.3 分配截面	123
5.5 定义装配件	124
5.5.1 装配梁、柱	124
5.5.2 装配隔板	126
5.5.3 装配剪切板	127
5.5.4 装配螺栓	127
5.6 定义分析步	128
5.7 定义相互作用	130
5.7.1 定义接触面名称	130
5.7.2 定义相互作用	132
5.8 定义边界条件和荷载	134
5.8.1 施加载荷	135
5.8.2 创建振幅	136
5.8.3 定义边界条件	137
5.8.4 定义加载	138
5.9 划分网格	138
5.10 提交分析作业	142
5.10.1 创建分析作业	142
5.10.2 提交分析	142
5.11 后处理	142
5.11.1 显示变形图	143
5.11.2 显示云纹图	144
5.11.3 坐标形式显示应力、位移随时间的变化情况	144
参考文献	147

第 1 章 绪 论

1.1 地震灾害和传统钢框架梁柱刚性节点形式

我国地处环太平洋地震带和地中海-喜马拉雅地震带上,地震活动频繁,汶川和玉树等地震给我国带来了惨痛的教训。因此,提高房屋结构的抗震能力,是我们结构工程师和学者义不容辞的责任。以首都北京为例,北京新建的高层和超高层建筑如国贸三期、中央电视台新址、北京电视台新址,体育场馆如国家体育馆、鸟巢,北京各大医院如北京医院新病房楼、中国人民解放军总医院、北京协和医院、人民医院新楼等医院建筑和即将建设的第一高楼中国尊均采用钢结构体系(包括钢结构和钢-混凝土混合结构体系),以增强结构的抗震能力。然而回顾 1994 年美国的北岭地震、1995 年的阪神地震,钢结构节点在地震下会出现脆性破坏,即延性好的钢材未必得到延性好的钢结构建筑,从而不一定取得预期的抗震效果。因此对钢结构建筑如何设计使其在高烈度设防地区充分发挥好的延性性能成为关注的焦点,而对钢结构而言,梁柱节点的连接构造是其中的重中之重。

传统的钢框架梁柱刚接节点分为两种形式^[1],第一种为栓焊混合连接,这种连接方式为梁翼缘与钢柱翼缘采用工地焊接,梁腹板与剪切板通过高强度螺栓连接,剪切板与钢柱翼缘工厂焊接,如图 1-1 (a) 所示;第二种为焊接短梁式,这种连接形式为短梁与钢柱在工厂全焊连接,短梁与框架梁在工地栓焊混合连接或全栓连接,如图 1-1 (b) 所示。一般认为,这两种传统的刚接节点屈服后会在梁上产生塑性铰,并有能力产生至少 0.02rad 的塑性转角,用以在地震中消耗能量。

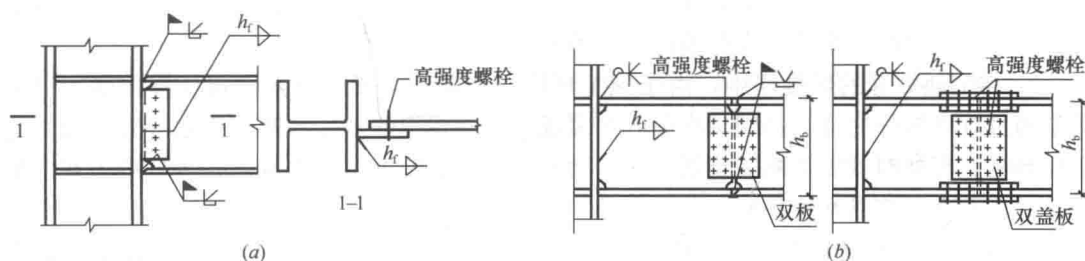


图 1-1 传统的钢框架梁柱刚接节点

(a) 栓焊混合连接; (b) 焊接短梁式

然而,在 1994 年美国北岭地震后,调查发现大量的传统梁柱栓焊混合连接节点发生了脆性破坏,并没有发挥其预期的延性及耗能能力。大部分的脆性断裂始于节点梁端的下翼缘焊缝,有些裂缝贯通了整个焊缝 [如图 1-2 (a) 所示],更有一些脆断沿焊缝方向发生在柱翼缘上 [如图 1-2 (b) 所示]。这些发现给整个工程界带来了巨大的冲击。

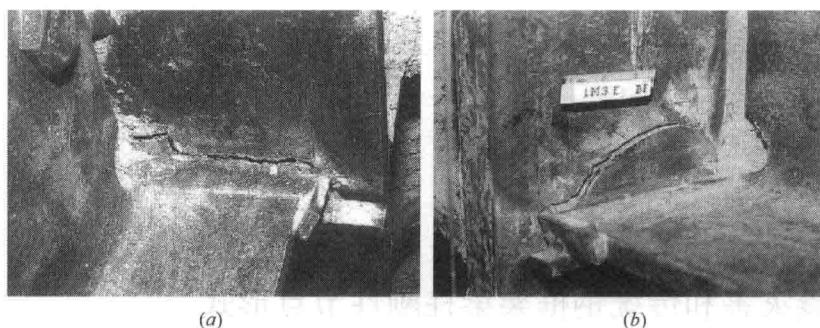


图 1-2 传统梁柱栓焊混合连接节点震害裂缝

(a) 下翼缘焊缝破坏; (b) 柱翼缘破坏

巧合的是,在一年后的同一天,日本神户市的阪神也发生了 7.2 级大地震。在这次地震中,传统钢框架梁柱刚接节点同样也没有经受住地震的考验。震害调查发现,钢框架节点的破坏主要表现在扇形切角工艺孔部位,与北岭地震震害不同的是,上述连接破坏发生时,梁翼缘已有显著屈服和局部屈曲现象。

我国钢框架梁柱节点依然较多采用传统刚接节点形式,抗震能力明显不足,无法经受住大地震的考验。因此,改进钢框架梁柱节点的抗震性能,进而改善钢结构的抗震性能,减轻城乡钢结构建筑的地震灾害,具有十分重要的现实意义。

1.2 传统型钢框架梁柱刚接节点脆性破坏的原因

北岭地震之后,美国联邦救灾总署 FEMA 等研究机构进行了大量的研究分析,总结了传统型钢框架梁柱刚接节点产生脆性破坏的几个原因:

1. 梁柱连接处存在较为集中的应力状态。因此,此部位成为了整个节点中最薄弱的环节。梁承受的弯矩通过梁柱翼缘的焊缝传递给柱,梁承受的剪力则通过剪力板传递给柱,但由于焊缝和剪力板的截面面积与弹性模量一般都小于梁,因此连接梁柱翼缘的焊缝就会产生较大的应力集中,引起脆性破坏的发生;

2. 在工地焊缝的焊接当中,由于施工环境受到限制,梁的下翼缘与柱连接的焊缝通常是通过现场俯焊完成,即焊工在梁的上翼缘进行施焊作业。这种施焊方法导致每道焊缝在焊到梁腹板处时就要中断和重新引弧,致使该部位焊缝存在较多缺陷,一旦应力在此处集中时,就会很容易发生脆断;

3. 由于梁柱连接基本构造的限制,导致很难对梁柱翼缘连接焊缝根部隐藏的缺陷进行检查。目前国内普遍使用超声波探伤法对焊缝质量进行检查,但其受到节点几何形状的限制,超声波探伤无法对所有部位进行全面系统检查。且通常引弧板在施焊完毕后都会留在原处,对焊根的检查也造成了影响,使得很多焊缝缺陷无法检测到,成为导致脆断的原因之一;

4. 在进行节点设计时,假设弯矩全部由梁的翼缘承担,剪力全部由梁的腹板承担。但是在实际受力中,由于柱发生了变形,导致梁的翼缘不仅承担了弯矩,同时还承担了剪力,使焊缝产生了很大的次应力,加之焊缝中存在很多缺陷,更加容易在此处发生脆断;

5. 为了有利于施焊, 且保证焊缝在跨越腹板处保持连续, 在梁的腹板上设计了焊接工艺孔。传统的焊接工艺孔为扇形, 位于梁腹板与梁翼缘交接处, 经机械切割后造成该处几何形状不连续, 在节点受力时容易产生应力集中, 造成此区域初始裂缝的产生。

除以上所述原因之外, 钢材的生产、节点形式以及焊接工艺等因素, 都有可能成为导致节点产生脆性破坏的原因。

1.3 国内外研究概况

北岭地震和阪神地震之后, 国内外的工程师和研究学者们对钢框架梁柱节点进行了大量的试验和理论研究。实现梁柱节点的梁端塑性铰外移成为改善钢框架梁柱节点抗震性能的主要途径。塑性铰外移可以分为两种基本形式, 即节点加强型和节点削弱型。两种方式的目的都是为了让塑性铰发生在距梁端一定距离的梁上, 避免塑性铰出现在焊缝附近, 以保护梁端焊缝。

(1) 加强型节点

加强型节点包括梁端翼缘加盖板、加肋、加腋、加边板、扩翼等具体构造做法, 如图 1-3 所示。

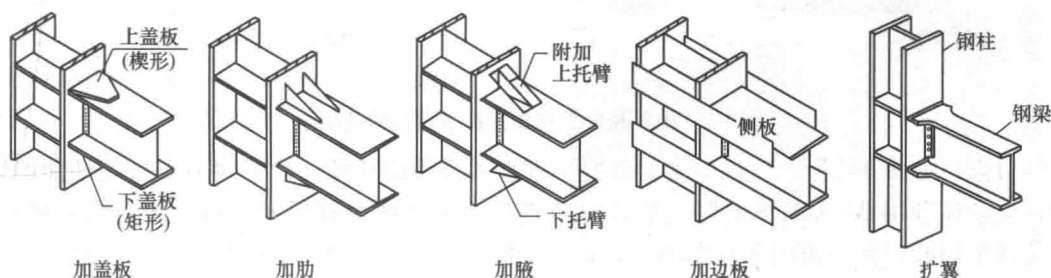


图 1-3 加强型节点

1998 年 Chia-Ming Uang 等对四个已破坏的栓焊混合节点 (北岭地震前) 试件在梁底加腋修复后进行了动力和静力试验, 试验结果显示, 加腋修复后试件在动力和静力试验下的滞回性能明显提高, 能够实现塑性铰外移, 提高钢框架梁柱节点的抗震性能。

2003 年 Cheol-Ho Lee 等在总结了前人对加腋型节点的研究基础之上对三个矩形加腋节点进行了低周往复实验研究。研究结果表明, 矩形加腋节点能够实现塑性铰外移的设计目的, 同时试验还验证了采用将矩形腋的外边缘做成斜坡或在梁腹板处与矩形腋外边缘对应的位置上设置加劲肋两种方法都可以有效保护加腋板 (如图 1-4 所示), 避免在矩形腋板端部发生脆性断裂。

2004 年 Cheng-Chih Chen 等对 6 个梁翼缘加垂直加强板节点 (如图 1-5 所示), 进行了低周往复试验以及有限元分析。试验及分析结果显示: 箱形柱节点承载能力高于 H 形柱节点; 翼缘上的加长肋板可显著提高节点的滞回性能, 防止梁柱节点的脆性开裂; 焊接工艺对连接性能至关重要, 保证箱形柱内隔板的焊接质量才能确保梁上的力传递到节点。

2011 年 A. DEYLAMI 等^[6]研究了箱柱与工字形梁连接节点在低周往复荷载下的性能, 试件包括普通节点、单盖板型节点、双盖板型节点以及在双盖板基础上加单腋与加双

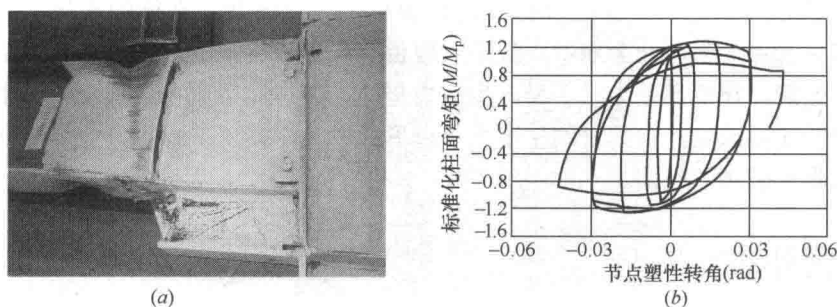


图 1-4 加矩形腋节点试验现象及结果

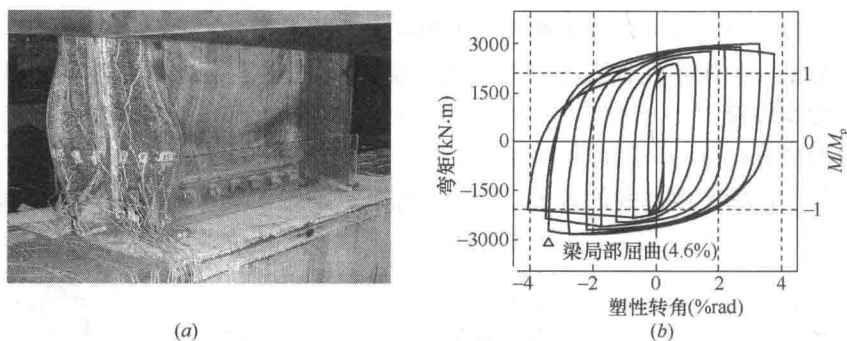


图 1-5 梁翼缘加垂直加强板节点试验及结果

腋的节点,如图 1-6 所示。试验主要研究了垂直加强板的尺寸、位置对节点抗震性能的影响,文章还利用 ABAQUS 有限元软件对节点进行了非线性有限元分析。研究结果显示,试验现象与有限元分析结果基本吻合,垂直盖板的加强作用可明显提高梁柱节点的性能。

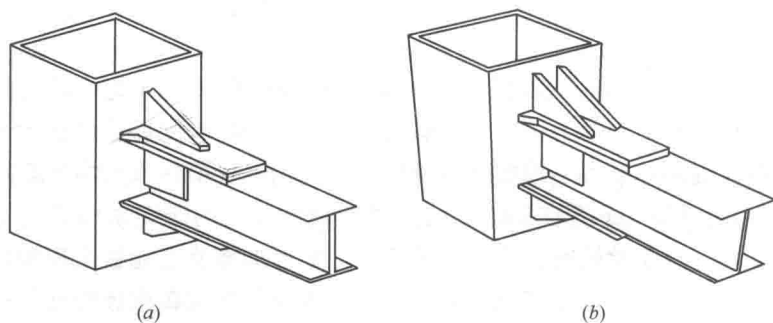


图 1-6 梁翼缘加垂直加强板示意图

2011 年 Christopher D. Stoakes 等^[7]对 8 个三种连接形式不同的梁上翼缘加角撑板的大比例尺钢框架梁柱节点进行了低周往复荷载作用下的试验研究,如图 1-7 所示。试验结果表明,该类节点均能增加节点的抗弯强度和刚度,但角撑板和柱通过端板用螺栓连接的节点由于螺栓的破坏而导致转动能力受限,仅用角撑板和柱连接的节点虽有较高的强度和刚度,但是强度退化明显。同时梁下翼缘角钢连接于柱表面型节点在强度和变形能力上都表现出了良好的性能。

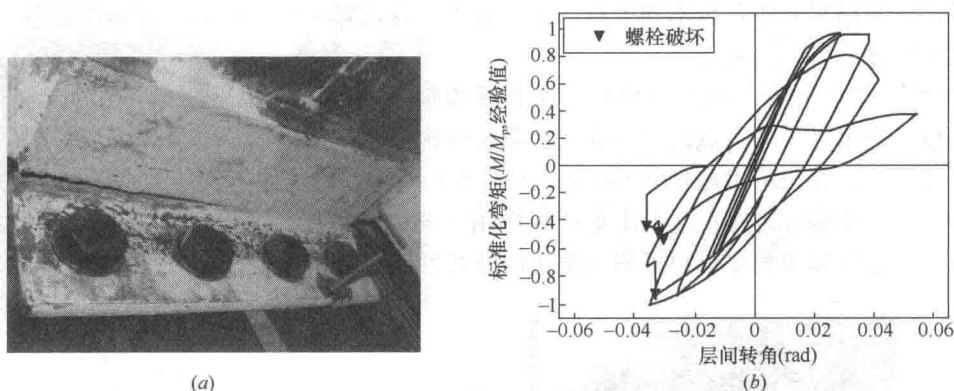


图 1-7 加角撑板节点试验现象及结果

2005 年 Cheol-Ho Lee 等^[8]研究了加腋型节点的一种简化设计方法,并研究设计了腋板端部断裂的方案。之后,通过试验证明了理论方法的正确性,所有按照设计方案流程设计的节点塑性转动能力均满足要求。试验与研究表明,加腋与梁翼缘局部削弱并用的连接方式,实现了塑性铰外移并且远离了腋板端部,有效的降低了腋板端部开裂可能性。

2002 年 Kim 等^[10]对五个盖板式和五个翼缘板式加强钢框架梁柱节点进行了大比例尺低周往复加载试验,如图 1-8 所示。结果表明,所有节点梁能够实现塑性铰外移,表现出了较好的受力性能。当梁上翼缘采用矩形加强板和三面围焊角焊缝时,节点的性能最好。减小梁腹板的高厚比可以延缓梁柱节点强度和刚度的退化。



图 1-8 翼缘板式加强节点

2002 年 Stephen P. Schneider 等^[10]对梁与柱通过梁翼缘板螺栓连接型节点进行了研究,如图 1-9 所示。该系列节点有两种主要的受力机制:在翼缘板上形成塑性铰和在梁腹板上形成塑性铰。作者设计了八种类型的该系列节

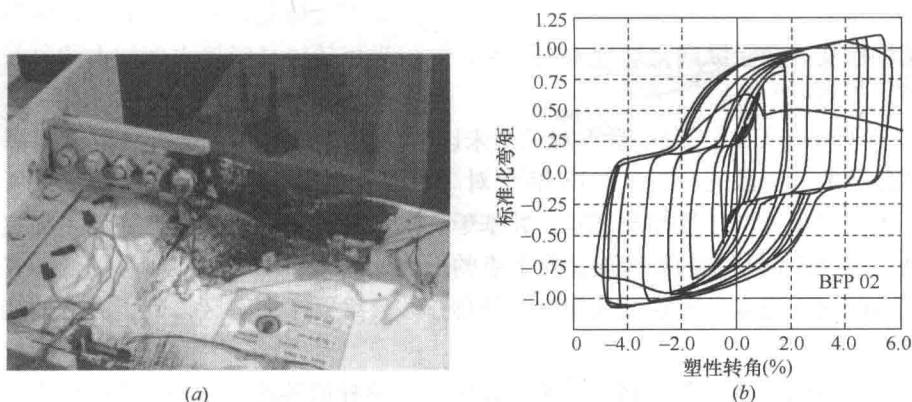


图 1-9 螺栓连接翼缘式节点试验现象及结果

点, 最终试验结果表明, 该系列节点的塑性转角可以达到 $2.5\% \sim 3\%$, 能够提供节点所需的强度和延性。

2008 年周中哲等^[11]提出一种新型梁翼缘盖板削弱螺栓拼接梁柱节点, 如图 1-10 所示, 进行了四组足尺的节点试验研究及有限元分析。试验结果显示: 梁翼缘盖板削弱节点在往复加载下位移角均可超过 0.04rad ; 塑性变形发生在削弱盖板处; 利用有限元分析程序 ABAQUS 可模拟试验节点在往复荷载作用下的受力性能, 满足刚性节点的刚度要求; 削弱盖板的塑性屈服强度可根据研究提出的非线性回归分析模型进行预测。

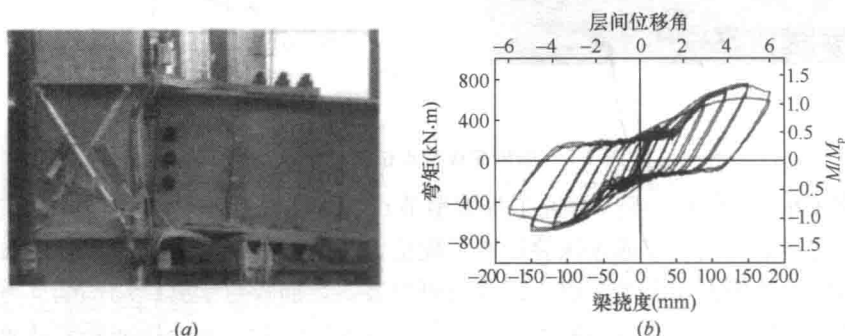


图 1-10 加削弱盖板式节点试验现象及结果

2011 年 A. DEYLAMI 等^[12], 研究了盖板加强型节点 (如图 1-11 所示) 的抗震性能。实验结果显示: 盖板加强型节点的塑性铰发生在梁上, 节点域没有明显的塑性变形; 盖板

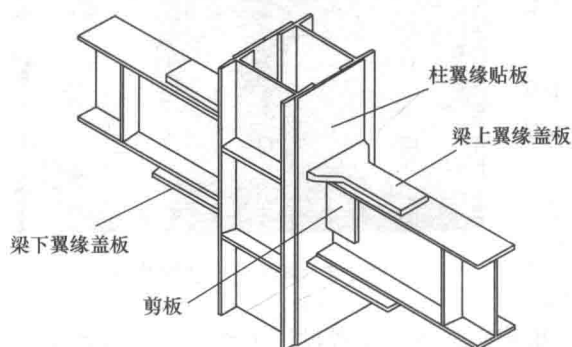


图 1-11 盖板加强型节点示意

加强型节点满足构件使用所需的刚度与延性; 相比于传统节点, 盖板加强型节点表现出了更好的刚度特性。

2013 年 M. Gholami 等^[13]人对三个足尺梁盖板加强型箱柱 T 形节点试件进行了试验 (如图 1-12 所示) 及有限元分析。结果显示: 盖板加强型节点的塑性铰都发生在盖板末端, 远离梁柱连接焊缝; 盖板末端与梁翼缘的横向角焊缝会降低盖板与梁翼缘的纵向角焊缝

的等效塑性应变, 防止纵向角焊缝末端撕裂; 建议采用较短且焊接强度较大的材料作为梁翼缘盖板。

2006 年 Cheng-Chih Chen 等^[14]对三个未设置焊接工艺孔加宽全拼接节点的滞回性能进行了试验研究和有限元分析。2013 年^[15]对 7 个翼缘板加宽式节点 (如图 1-13 所示) 试件进行了大比例尺低周往复加载试验, 并基于有限元分析的参数研究, 检测了加宽型节点的实用性, 以及不同尺寸的翼缘加宽对节点的影响。试验结果表明, 所有翼缘加宽型节点都满足安全的延性要求, 实现梁端塑性铰外移; 并且梁翼缘加宽区得到了充分的变形, 节点耗能良好。

2014 年 Cheng Fang 等^[16]研究了采用记忆合金螺栓的翼缘加宽型节点的抗震性能, 并采用初步的数值模拟进行了验证计算, 如图 1-14 所示。试验采用 8 个大比例尺试件, 其

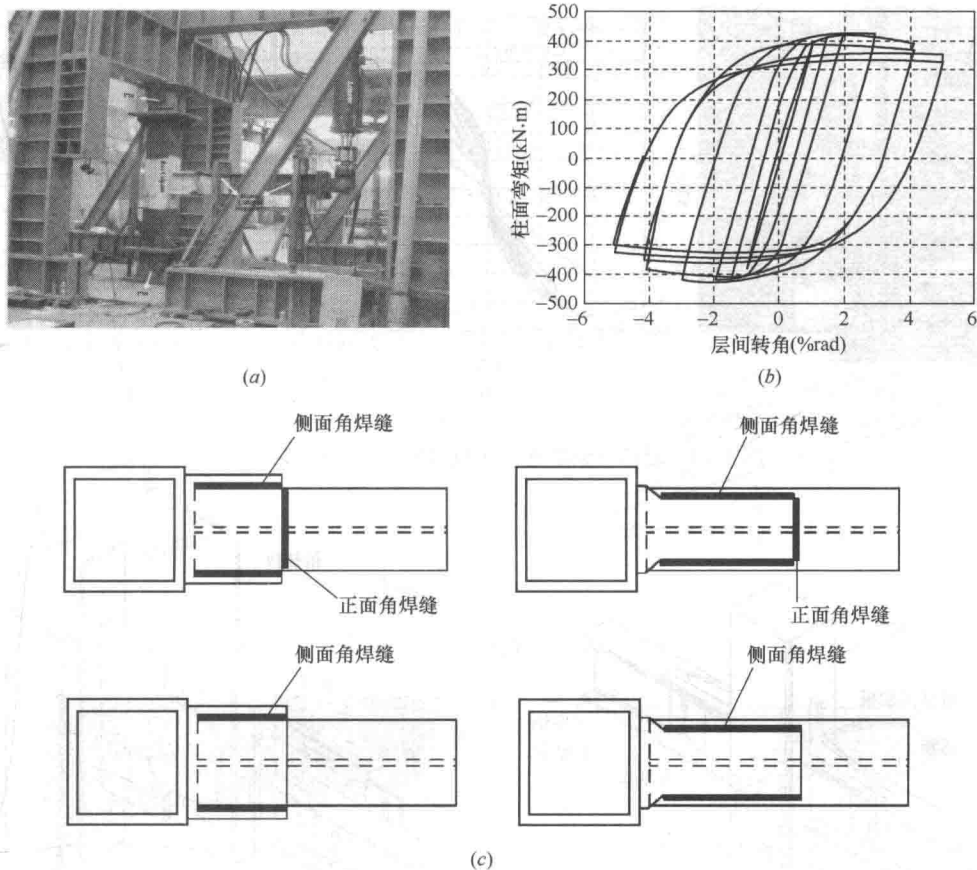


图 1-12 盖板加强型箱柱 T 形节点示意图及试验结果

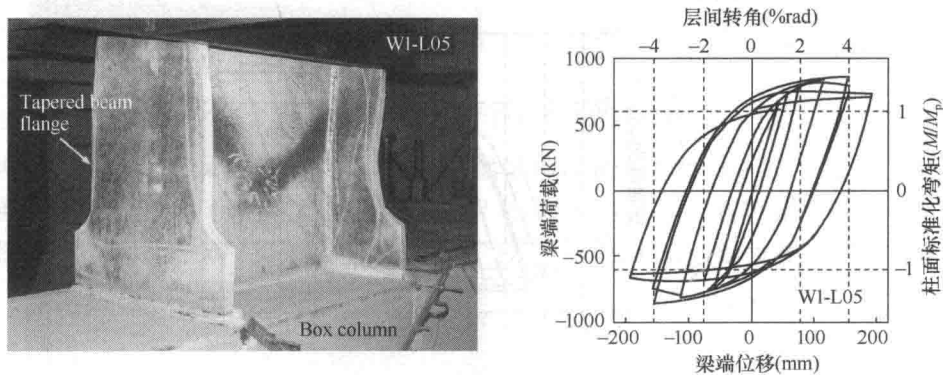


图 1-13 加宽节点试验现象及试验结果

中 7 个为采用新型螺栓的翼缘加宽节点，一个为普通高强螺栓的翼缘加宽节点。试验结果表明，新型螺栓节点的等效阻尼达到 17.5%，表现出较好的耗能能力。试验中新型螺栓节点大部分处于半刚性状态。

2010 年 Seyed Rasoul Mirghaderi 等^[17]设计了一种新型箱形柱工字型梁的节点，如图 1-15 所示，节点采用一块垂直板贯穿箱柱并与柱翼缘焊接。Seyed Rasoul Mirghaderi 等对

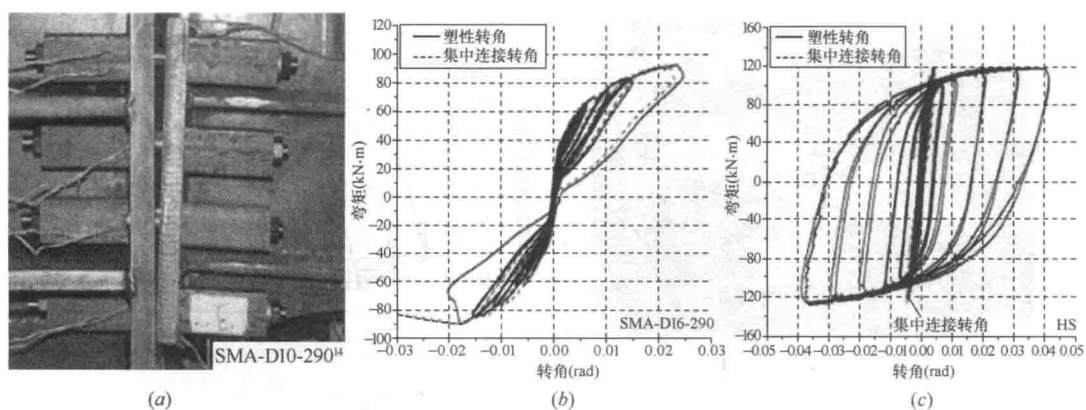


图 1-14 记忆合金螺栓 (a) 及试验结果对比 (b)、(c)

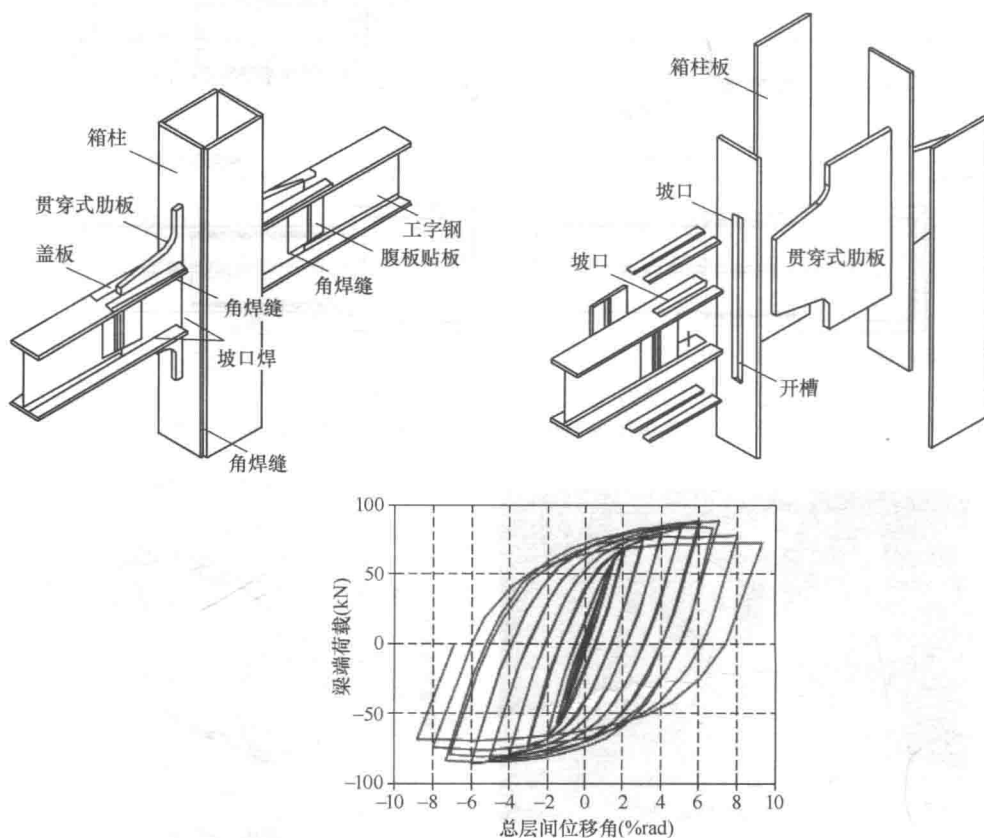


图 1-15 节点构造示意及试验结果

这种新型节点进行了试验, 并且对节点的受力性能可能受到的一系列参数影响, 包括构件大小及贯穿板的尺寸都进行了有限元模型分析。试验对两个构造相同, 但贯穿板尺寸不同的试件采用相同加载, 并评估了试件节点的抗震性能。试验结果显示, 试件加载到 0.06rad 层间转角时, 节点强度才开始下降。新型节点具有良好的弹塑性性能, 并且试验结果与有限元分析基本吻合, 均满足对节点的基本设计规定。

传统的节点箱柱内侧隔板都采用人工焊接, 2012 年 Shahabeddin Torabian 等^[18]考虑到这种传统节点的成本与人工焊接的不确定性, 设计研究了一种新型贯穿板式节点 (如图 1-16 所示) (a diagonal through-plate connection)。通过试验与有限元分析结果表明, 箱柱内的贯穿板提高了节点区域的刚度与强度, 并且在整个试验过程中节点区域一直保持着相对线弹性状态, 如图 1-17 所示。箱柱内贯穿板有效地传递了梁上应力, 使节点域刚度增加。

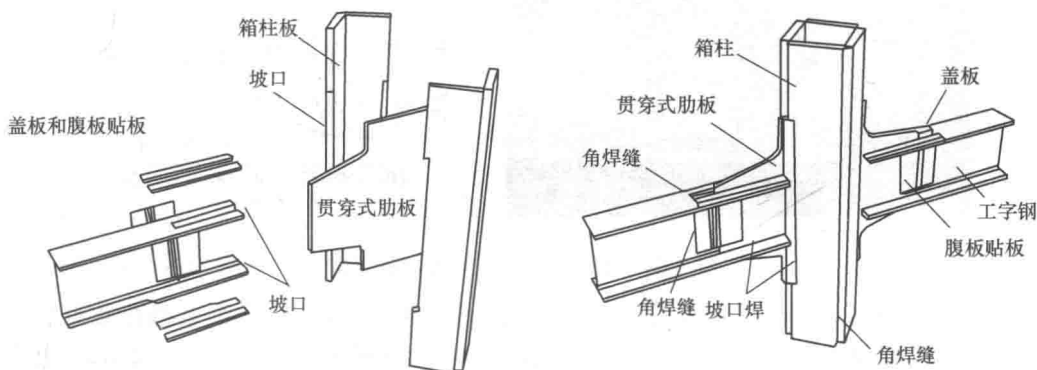


图 1-16 贯穿板式节点构造示意图

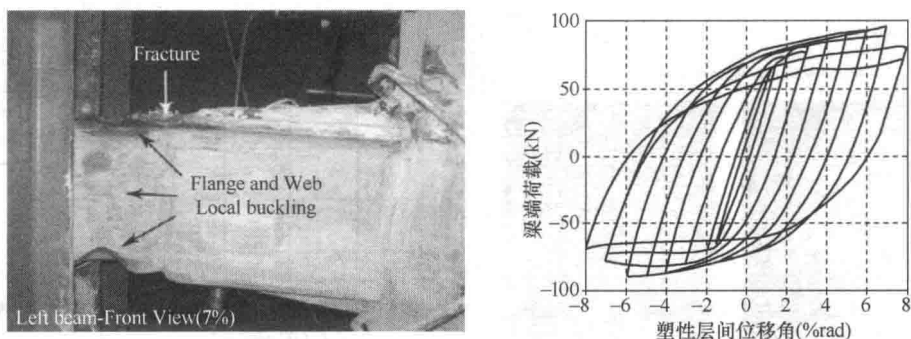


图 1-17 贯穿板式节点试验现象及结果

2013 年 Chung-Che Chou 等^[19]对一个普通试件以及三个加强板尺寸不同的梁翼缘内侧加强板型节点进行了低周往复试验, 并采用 ABAQUS 进行了有限元分析。加强板形式有矩形 (如图 1-18 所示) 和梯形 (如图 1-19 所示)。试验和分析结果显示, 普通螺栓焊接

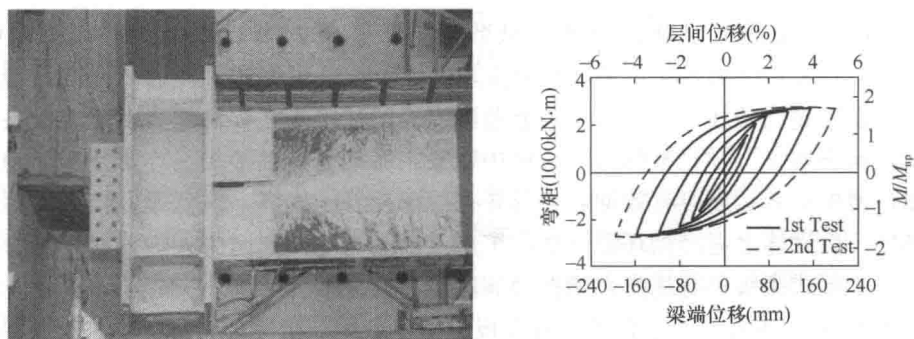


图 1-18 矩形加强板节点照片及试验结果