

DOI: 10.7672/sgjs2022110065

装配式钢结构带悬臂梁段梁柱连接节点研究进展*

时建华¹, 韩明岚², 张效禹³, 史震海¹, 王 燕¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266525; 2. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266525;
3. 山东省建筑科学研究院有限公司, 山东 济南 250031)

[摘要] 结合国内外研究现状, 整理装配式结构中带悬臂梁段梁柱连接节点的相关研究, 按照带悬臂梁段的传统梁柱连接节点、新型梁柱连接节点、削弱型及加强型节点与考虑楼板和填充墙组合作用的组合节点梳理研究内容, 对各类节点的构造形式、设计方法和抗震性能进行阐述和总结, 通过试验及有限元分析研究各构造参数对带悬臂梁段节点力学性能的影响, 分析表明该节点形式具有装配程度高、抗震性能好等优点, 并提出带悬臂梁段梁柱连接节点尚待解决的问题与未来研究工作展望。

[关键词] 装配式; 钢结构; 悬臂梁段; 梁柱节点; 绿色建筑

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2022)11-0065-08

Research Progress of Prefabricated Steel Structures Beam-column Connection Joint with Cantilever Beam

SHI Jianhua¹, HAN Minglan², ZHANG Xiaoyu³, SHI Zhenhai¹, WANG Yan¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266525, China;
2. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266525, China;
3. Shandong Provincial Academy of Building Research Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China)

Abstract: Combining with the research status at home and abroad, the related research on beam-column connection joint with cantilever beam in prefabricated structure was sorted out according to the type of joint, including traditional beam-column connection joint with cantilever beam, new beam-column connection joint, reduced beam section and reinforced joint, and combined joint considering the combined action of floor and infill wall. The structural form, design method and seismic performance of various joints were described and summarized. The influence of structural parameters on the mechanical properties of the joint with cantilever beam is studied by test and finite element analysis. The analysis shows that the joint has the advantages of high assembly degree and good seismic performance. The problems to be solved and the prospect of future research work were proposed about beam-column connection joint with cantilever beam.

Keywords: prefabricated; steel structure; cantilever beam; beam-column joint; green building

0 引言

装配式建筑是指主要构件预先在工厂加工完成,再运输到现场安装,形成具备预定功能要求的建筑物。装配式钢结构具有构件生产工厂化、现场施工机械化、可减少建筑垃圾、节约劳动力、建造周期短、钢结构建筑容易改建和拆迁、材料回收再生

利用率高等优点,契合绿色环保发展理念,在国家大力推行建筑节能与绿色建筑的背景下,装配式建筑进入新的发展阶段。

在钢结构建筑中,节点性能对框架的受力性能和破坏形式具有重要影响,梁柱节点受力复杂,起传递弯矩、剪力、轴力和扭矩等作用,是钢结构工程设计中的重要环节。传统梁柱节点以栓焊刚性连接为主,1994年美国北岭地震及1995年日本阪神地震发现栓焊节点的梁下翼缘与柱翼缘焊接部位普遍发生脆性断裂,钢材高强特点及良好的延性性

* 国家自然科学基金面上项目(52078258)

[作者简介] 时建华, 硕士研究生, E-mail: 1227984500@qq.com

[通信作者] 韩明岚, 博士, 副教授, E-mail: zihanc@163.com

[收稿日期] 2022-02-15

能并未达到预期^[1-4],由此引起结构工程界的关注。国内外学者通过大量调查和试验,研究钢结构梁柱节点的破坏机理及避免钢结构节点脆性破坏的方法,其中提出外移梁柱节点塑性铰,由梁柱节点脆性破坏转化为梁延性破坏的方法,而带悬臂梁段梁柱连接节点是实现塑性铰外移的节点形式之一。

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[5]与 JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》^[6]推荐采用焊接柱与悬臂梁段,再使用高强螺栓与中间梁段连接悬臂梁段的方式。因悬臂梁段与柱连接,柱呈树状而被命名为树状柱^[7],具有安装方便、施工周期短、耗能能力好、塑性转动能力强等优点,是具有良好经济效益的节点形式。为此,本文针对装配式钢结构带悬臂梁段梁柱连接节点的研究进展进行综述。

1 传统带悬臂梁段梁柱连接节点研究现状

目前,国内外学者对带悬臂梁段梁柱连接节点的抗震性能做了大量研究,通过低周往复循环加载试验和有限元分析探究该类节点的耗能机理及不同构造参数与设计方法对节点抗震性能的影响。李启才等^[8-9]通过低周往复循环加载试验研究带悬臂梁段梁柱拼接节点的抗震性能,节点构造如图1所示。研究表明梁柱螺栓拼接节点比梁柱焊缝连接节点的延性更好,应尽量将拼接节点设计的弱些,以产生较大的塑性变形,提高梁柱连接的转动能力。节点拼接区接触面的滑移摩擦、螺栓杆与孔壁挤压和翼缘拼接板的变形都能有效实现耗能,可延缓地震作用对梁柱节点连接焊缝的破坏。

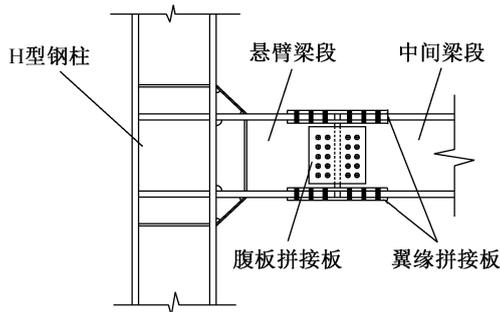


图1 带悬臂梁段梁柱拼接节点

为比较采用不同设计方法,带悬臂梁段拼接节点对抗震性能的影响^[10-11],按摩擦耗能设计节点的可行性^[12],分别对试件进行有限元数值模拟和低周往复循环加载试验。结果表明带悬臂梁段拼接节点可按节点拼接处的实际受力进行设计,节省拼接用料和施工时间。适当减少翼缘高强螺栓数量,整个连接结构的弹性阶段承载力虽有所下降,但极限

承载力并不会减小,反而略有增加,这是由于在往复循环荷载下优先发生螺栓滑移,接触面间的摩擦和螺栓杆与孔壁间发生挤压变形,这些耗能作用减少能量输入梁柱对接焊缝,延缓梁柱焊缝开裂。

常鸿飞等^[13-14]利用 ANSYS 有限元软件对带悬臂梁段拼接节点进行有限元分析,研究该节点在弹性极限状态和塑性状态下的应力分布规律,并比较普通全焊连接节点受力性能与变形能力。结果表明相比普通全焊连接节点,带悬臂梁段拼接节点的弹性极限承载力和初始刚度略有降低,塑性极限承载力差别不大,但节点弹性刚度和转动能力显著提高。通过算例分析发现,带悬臂梁段拼接节点用常规设计方法进行设计达不到抗震要求,从而提出整体设计此类节点的必要性。

王湛等^[15-16]对带悬臂梁段拼接连接和栓焊连接节点进行理论计算、试验研究和有限元模拟,研究带悬臂梁段连接的梁柱节点受力性能及初始转动刚度,并与普通全焊梁柱节点进行比较。研究表明,在保证拼接区具有足够强度的条件下,带悬臂梁段连接节点与普通全焊连接节点的初始转动刚度和力学性能差别不大,拼接区的主要设计参数对梁柱连接处的初始转动刚度影响较小;普通全焊连接节点初始转动刚度介于铰接连接和刚性连接间,具有一定半刚性性能。通过精确设计拼接区及减小高强螺栓的预拉力,可增强节点延性。

Kangmin Lee 等^[17]为研究带悬臂梁段拼接节点在钢框架中的抗震性能,设计3个足尺试件,拼接长度分别约为7500mm梁跨长度的1/6,1/7,1/8,通过试验研究梁拼接长度对带悬臂梁段拼接节点抗震性能的影响。试验结果表明,节点位置变化会改变节点处的弯矩和剪力,从而影响柱形节点抗震性能;在5%的层间位移角范围内,所有试件均能顺利发展延性行为,且无脆性断裂;试件最大抗弯承载力差异不大,拼接长度为1300mm的试件梁拼接处的弯矩最小,抗螺栓滑移性能优于其他试件。

传统带悬臂梁段连接节点可通过拼接区接触面的滑移摩擦、螺栓杆与孔壁挤压及翼缘拼接板的变形实现耗能。相比梁柱焊接节点,传统带悬臂梁段连接节点的承载力和初始刚度略有降低,但转动能力显著提高,具有较好的延性和耗能能力。

2 新型带悬臂梁段梁柱连接节点研究现状

何敏娟等^[18-19]提出新型带悬臂梁段栓-焊拼接节点,构造如图2所示。为研究该节点的力学性能,设计3个试件并进行静力加载、低周往复循环加载试验及有限元模拟。结果表明,在往复循环荷载作

用下,下翼缘两法兰板间的缝隙逐渐发展,从而使连接法兰板的螺栓松动,完全丧失预应力,导致构件失去承载力。静力加载作用下,当法兰板厚度 $>20\text{mm}$ 时,节点初始刚度和极限承载力明显增大,在往复循环荷载作用下,法兰板厚度变化对节点并没有较大影响,在往复循环荷载作用下,法兰板处的螺栓孔周围有明显的应力集中现象,高强螺栓逐渐由摩擦型转化为承压型。

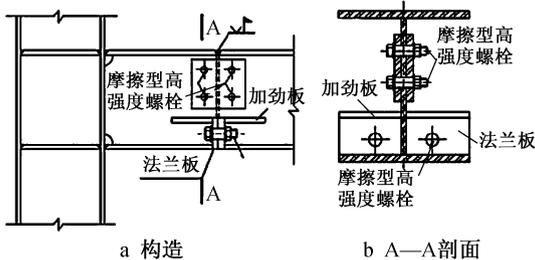


图2 新型带悬臂梁段栓-焊拼接节点

郁有升等^[20-21]提出“互”字形装配式梁柱拼接节点,如图3所示。利用 ABAQUS 有限元软件进行静力和拟静力分析,研究螺栓数目、盖板宽度及厚度、悬臂梁段长度等参数对节点力学性能的影响。结果表明,相比精确设计法和简化设计法,等强度设计方法设计的基本试件滞回性能更好,根据有限元分析结果,给出该节点拼接参数合理的取值范围,盖板横截面积宜大于梁翼缘横截面积,比值宜控制在 $1.05\sim 1.30$,悬臂梁段长度宜取 $1.7\sim 2.0$ 倍梁高。由于上翼缘拼接板的存在使梁上翼缘不是平面,不利于楼板施工,郁有升等^[22-23]进行改进,形成梁柱上焊下栓节点。此节点拼接区的梁上翼缘采用焊接连接,下翼缘通过拼接板进行螺栓连接。利用 ABAQUS 有限元软件研究该节点的抗震性能,并对比分析相同设计参数的上焊下栓节点、“互”字形节点和栓焊混合节点的滞回性能。结果表明,地震作用下,梁柱上焊下栓节点具有良好的耗能能力,耗能能力和变形能力低于相同设计参数的“互”字形节点,但略高于栓焊混合节点。

张爱林等^[24-25]提出 Z 字形悬臂梁段拼接节点,如图4所示。基于2种框架梁装配形式及螺栓数目、螺孔直径、节点加劲肋参数变化,对6个节点试件进行低周往复循环加载试验,并利用 ABAQUS 软件进行拟静力和静力有限元分析,以研究节点抗震性能。结果表明,节点拼接区的接触面滑移、螺栓杆和孔壁挤压变形及板件屈服均能有效实现耗能,破坏模式为悬臂梁段下翼缘螺栓孔截面撕裂或螺栓孔发生大变形,靠近拼接区域的钢梁翼缘发生局部屈曲,实现塑性铰外移。在翼缘和腹板处开大螺

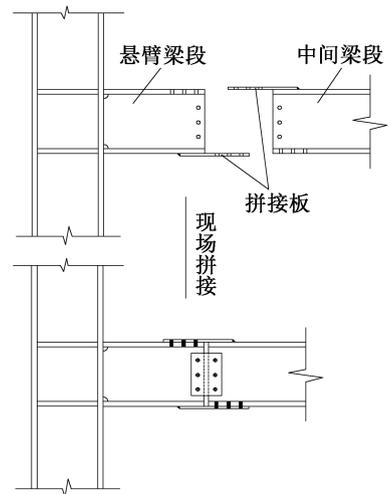


图3 “互”字形装配式梁柱拼接节点

栓孔,三角形垂直加劲肋对节点抗震性能影响很小,因此,可适当开大螺栓孔及使用三角形垂直加劲肋代替内隔板,以便现场装配和工厂加工。上下翼缘拼接区板件间的滑移不是同时开始的,且加载过程中大部分螺栓拉力都有一定程度的损失。

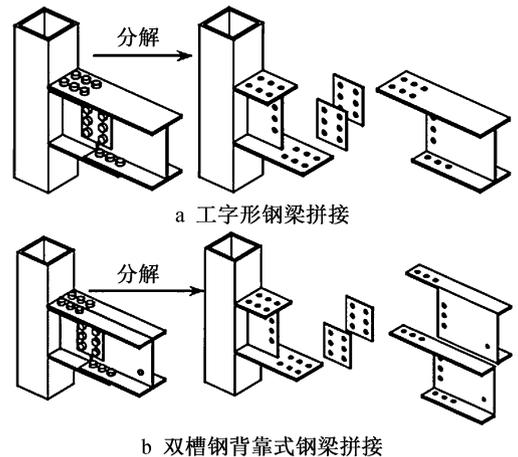


图4 带 Z 字形悬臂梁段梁柱拼接节点

黄鹏刚等^[26]研究与柱弱轴连接的带悬臂梁段异形节点抗震性能。节点构造如图5所示。利用 ABAQUS 软件对异形节点进行拟静力分析,研究带悬臂梁段异形节点的破坏形态、滞回性能、刚度退化、承载力及延性性能等,并与标准异形节点进行对比。结果表明,带悬臂梁段异形节点的初始刚度和承载力比标准异形节点有所降低,但耗能能力和延性性能明显提高。

柴琦琛^[27]结合端板连接节点和带悬臂梁段拼接节点,提出新型装配式带悬臂梁段拼接节点,如图6所示。利用 ABAQUS 软件对8组试件进行静力和拟静力有限元分析,研究各参数对滞回性能的影响。结果表明,在静力荷载作用下,盖板厚度对

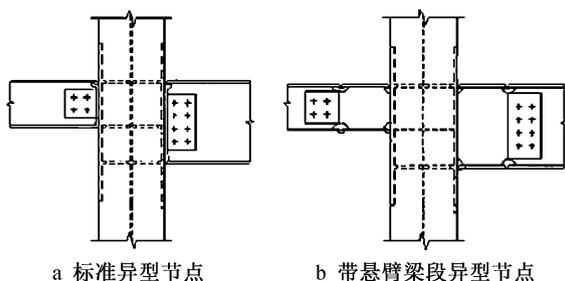


图5 节点构造示意

节点承载力和转动能力影响较大,在循环荷载作用下,盖板厚度与宽度及悬臂梁段长度对滞回性能影响较明显,设计该节点时,盖板横截面积宜大于梁翼缘横截面积,比值宜控制在1.2~1.4,且盖板厚度不应小于梁翼缘厚度,拼接位置宜设置在梁反弯点附近。

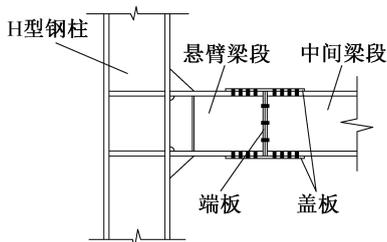


图6 新型装配式带悬臂梁段拼接节点构造

试验研究表明LY315钢材具有优越的滞回性能及延性^[28]。李志林等^[29]通过高强度螺栓抗滑移系数试验及梁柱拼接节点往复循环加载试验,得到该节点的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线及延性系数等,研究利用LY315钢材的带悬臂梁段长度对该节点抗震性能的影响。结果表明,LY315钢材制作的带悬臂梁段拼接节点试件具有良好的耗能能力、变形能力及延性性能,增加悬臂梁段长度,试件耗能能力有所降低,而承载力略有提高,悬臂梁段长度变化对试件延性性能和刚度退化影响不大。

新型节点不仅要改变节点构造,简化施工工序,提高装配效率,更要通过严谨的理论公式计算,保证节点受力性能,推动装配式钢结构带悬臂梁段梁柱连接节点的发展。但新型节点存在构件设计不统一、缺少制作和建造标准等问题,实际应用并不广泛。

3 带悬臂梁段削弱型及加强型节点研究现状

削弱型带悬臂梁段梁柱连接节点指梁翼缘削弱的狗骨式连接节点,加强型带悬臂梁段梁柱连接节点包括梁端扩大翼缘、设置盖板、加劲肋或加腋等形式。通过试验和有限元分析,对带悬臂梁段削弱型及加强型节点的抗震性能开展研究。McMullin

等^[30]对带悬臂梁段拼接节点抗弯钢框架的抗震性能进行理论研究,并对削弱翼缘拼接板截面的节点试件进行低周往复循环加载试验。结果表明,4、24层的建筑从刚性结构转为半刚性结构,整体性能得到提高,削弱截面的拼接板屈曲导致强度退化,但当控制最大屈曲变形后,其行为在几个连续循环中趋于稳定。削弱截面的拼接板和螺栓滑移可提高节点塑性变形性能,在强地震作用下,半刚性节点的拼接区能提供稳定耗能,减少地震能量向梁柱连接处输入,避免梁柱连接处发生脆性破坏。

Keunyeong Oh等^[31]为研究削弱翼缘拼接板截面对带悬臂梁段连接节点抗震性能的影响,对2个削弱翼缘拼接板截面的节点试件和按照等强度设计法设计的节点试件进行低周往复循环加载试验,以得到弹塑性行为和破坏模式。结果表明,节点试件均达到0.05rad层间位移角,没有发生脆性断裂,均为梁翼缘局部屈曲,当设计带悬臂梁段拼接节点时,由于梁拼接位置设置在距柱面一定距离处,因此梁拼接位置的塑性弯矩承载力不必大于梁塑性弯矩承载力。削弱翼缘拼接板截面的节点试件抗弯承载力没有明显降低,且耗能能力也优于按等强度设计法设计的试件。Keunyeong Oh等^[32]又研究柱弱轴与削弱型悬臂梁段连接节点抗震性能。设计3个柱弱轴与悬臂梁段连接节点,分别是悬臂梁段为等截面梁柱连接节点(CT-BASE)、悬臂梁段为圆弧形削弱截面的梁柱连接节点(CT-RBS)、悬臂梁段为锥形削弱截面的梁柱连接节点(CT-DRBS),并进行低周往复循环加载试验,如图7~9所示。结果表明,悬臂梁段为圆弧形削弱截面和锥形削弱截面的试件,在5%层间位移角下成功发展出延性行为,而不发生脆性断裂,悬臂梁段为等截面节点的试件也成功达到5%的层间位移角,但在梁柱节点焊接处发生脆性断裂。悬臂梁段为圆弧形削弱截面的试件相比其他2个试件,塑性和耗能能力更稳定。

郭志鹏等^[33]研究带Z字形悬臂梁段和削弱梁段拼接节点的抗震性能,基于2种框架梁设计4个装配式试件,并进行低周往复循环加载试验及静力和拟静力的有限元分析,节点形式如图10所示。结果表明,节点主要由削弱梁段的塑性变形和拼接区接触面滑移实现耗能。削弱梁段宜弯扭失稳提前发生破坏,应在削弱处增加侧向约束,保证节点充分耗能。

袁素荣等^[34]研究带悬臂梁段加强型节点抗震性能,设计2种加强形式的带悬臂梁段连接节点,即

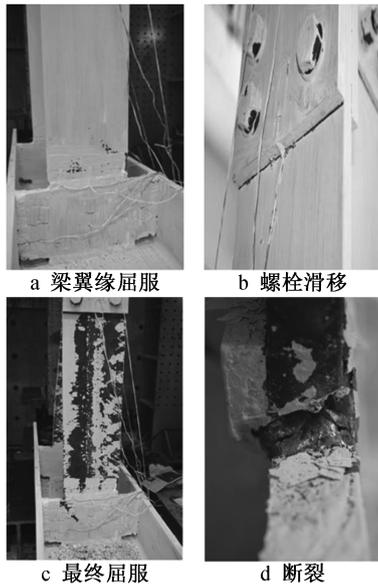


图7 试件 CT-BASE 破坏过程

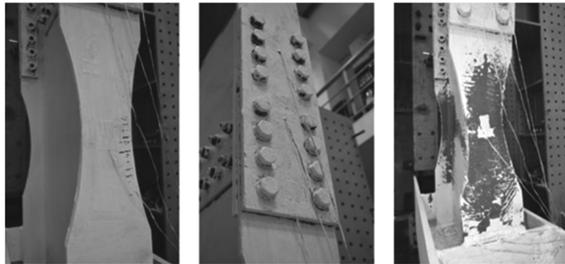


图8 试件 CT-RBS 破坏过程



图9 试件 CT-DRBS 破坏过程

在梁下翼缘处加腋,上翼缘进行扩翼和加盖板。通过 ANSYS 有限元软件进行拟静力数值分析,并对比分析无加强措施的带悬臂梁段梁柱节点。结果表明,相比悬臂梁段无加强的梁柱节点,节点加强后的承载力明显提高,并且将节点附近的应力集中区外移,说明这 2 种加强型节点抗震性能良好,能将塑性铰外移;相比翼缘扩翼型节点,加盖板型节点抗震性能略好,且梁上翼缘处应力集中程度较小。

理素杰等^[35]为有效控制塑性铰位置,设计悬臂梁段为梯形截面和等截面的梁柱节点,通过低周往复循环加载试验分析 2 组节点抗震性能。结果表

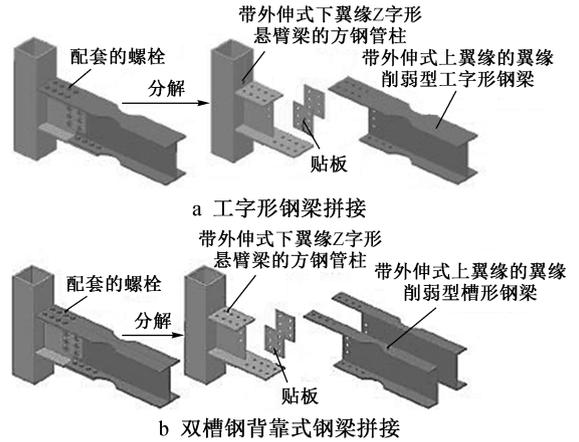


图10 带 Z 字形悬臂梁和削弱梁拼接节点

明,悬臂梁段梁端采用梯形截面加强处理后,可将塑性铰的形成位置外移,提高节点延性性能,改善加强处理后的梁端应力分布,使梁柱连接处的焊缝应力低于梁拼接处的焊缝应力,防止梁柱焊缝发生脆性断裂,从而加强节点。

Chen 等^[36-37]从低周往复循环加载试验和有限元数值模拟方面阐述带悬臂梁段扩翼加强型梁柱节点受力性能。利用有限元研究悬臂梁扩大翼缘的有效性,及几何变量对连接性能的影响程度,此外,对 7 个足尺试件进行低周往复循环加载试验,以研究滞回性能,节点构造如图 11 所示。结果表明,无论是采用全焊连接还是栓焊混合连接的梁翼缘扩翼放坡型试件,都在远离柱面的梁截面上形成塑性铰,并具有良好的延性性能。梁翼缘扩翼放坡型试件的放坡区发生明显屈服,具有稳定能量耗散能力。梁翼缘扩翼放坡型节点性能主要受梁柱节点扩翼宽度和放坡区长度影响,增加扩翼宽度可提高梁柱焊缝处的承载力,从而提高梁柱节点处的安全富裕度,梁翼缘放坡区可有效降低梁柱焊缝处的塑性应变。

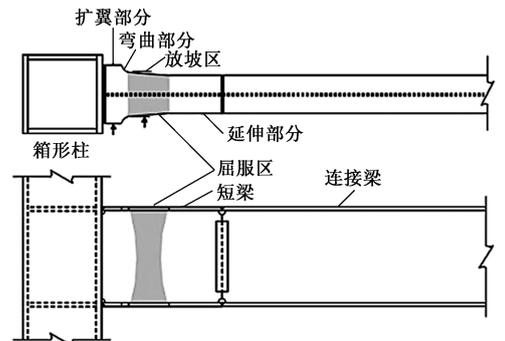


图11 梁端扩翼放坡型节点

黄鹏刚^[38]研究节点域箱形加强式工字形柱弱轴悬臂梁段连接节点的抗震性能,节点构造如图 12

所示。对 2 个悬臂梁段不同钢材材性节点进行低周往复循环加载试验,并通过 ABAQUS 软件研究蒙皮板厚度、悬臂梁段钢材材性、梁端加强形式和悬臂梁长度对节点抗震性能的影响。结果表明,试件悬臂梁与柱翼缘连接的焊缝应力和梁与梁拼接处的焊缝应力均较大,要严格保证该处的焊缝质量。蒙皮板厚度对节点初始刚度和承载能力影响较小,对节点破坏形态和延性性能有显著影响。悬臂梁段采用较高强度钢材可提高节点初始抗侧刚度和极限承载力,悬臂梁段梁端加强处理后,节点刚度和承载力明显提高,但延性及耗能能力有所降低。当该节点采用栓焊混合连接时,悬臂梁段长度宜取 1~2 倍梁高,但应 $\leq 1.6m$ 。

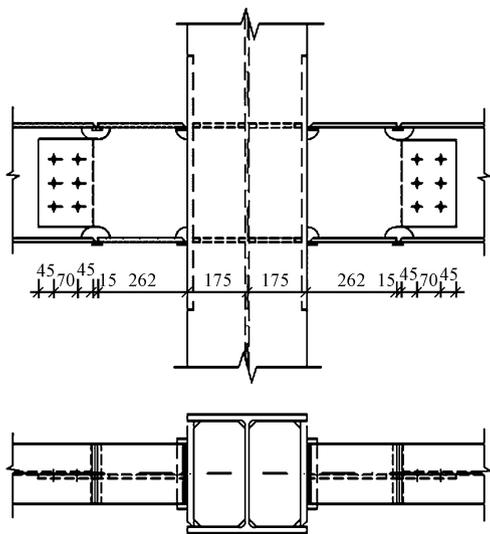


图 12 节点域箱形加强式工字形柱弱轴悬臂梁段连接节点

Baharmast 等^[39]对带悬臂梁段梁柱拼接节点抗震性能进行数值分析,并比较 4 种改进节点,包括单劲肋加强型节点、双劲肋加强型节点、盖板加强型节点和圆弧削弱型节点。利用 ABAQUS 软件进行分析,结果表明,改进后的加强型节点提高承载能力、抗弯能力,改善滞回性能及增强能量耗散。圆弧削弱型节点由于截面减小,相比具有相同几何特性的试样承载能力降低,但改善节点的循环响应,在远离梁柱截面的削弱区形成塑性铰,有助于框架实现塑性铰外移。改进后的加强型节点在弹性分析状态下,梁柱截面焊接区的应力值较低,梁翼缘应力增加,从而降低梁柱发生脆性断裂的可能性。

削弱型及加强型带悬臂梁段梁柱连接节点可很好地外移塑性铰,减小梁端应力集度,避免梁柱焊接处发生脆性破坏,具有较好的耗能能力和延性。翼缘削弱型连接节点的削弱区长度、削弱深度

及削弱区距柱边距离的确定尤为重要,加工难度较大,易导致钢梁发生平面外屈曲,加强型连接节点梁端截面抵抗弯矩增大,根据强柱弱梁强节点的设计原则,应加大柱截面尺寸,另外,盖板、加劲肋和腋板设置不仅增多节点处的焊缝,且不利于楼板安装。

4 带悬臂梁段组合节点研究现状

装配式钢结构节点研究对象多为纯钢节点,考虑楼板和填充墙组合作用的带悬臂梁段梁柱连接节点研究相对较少,通过试验和有限元模拟,探讨混凝土楼板及填充墙对节点抗震性能的影响。马良^[40]为研究楼板组合作用对带悬臂梁段拼接点抗震性能的影响,设计 3 个钢框架带楼板的钢梁拼接节点,并进行低周往复循环加载试验,分析试件的承载力、滞回性能、耗能能力、延性性能和刚度退化等抗震性能指标。结果表明,相比纯钢结构拼接节点,考虑楼板组合作用的节点试件承载力和刚度有所提高,并且具有良好的延性和耗能能力。增大楼板配筋率或厚度可提高节点试件刚度和承载力,当抗剪栓钉较少且混凝土板较厚时,抗剪栓钉被剪断,而当混凝土板较薄时,抗剪栓钉会压碎周围混凝土。

Keunyeong Oh 等^[41]探究带悬臂梁段梁柱节点与楼板组合后的抗震性能,设计 4 个不同形式带悬臂梁段梁柱连接节点足尺试件,分为节点小组 1,2,如图 13 所示,节点小组 1 为不考虑楼板组合作用与柱强轴和弱轴连接的带悬臂梁段梁柱节点,节点小组 2 为考虑楼板组合作用与柱强轴和弱轴连接的带悬臂梁段梁柱节点。对节点进行低周往复循环荷载试验,以评估 4 个带悬臂梁段梁柱连接节点的滞回性能。结果表明,节点小组 1 达到 5% 的层间位移比,但梁柱连接处出现微小的裂缝,而节点小组 2 梁柱连接底部翼缘处虽未发生脆性断裂,但梁柱连接处混凝土板发生严重挤压,且梁柱连接底部翼缘处承受很大的应力,脆性断裂的潜在风险仍然存在,因此,设计时应考虑楼板组合作用。4 个节点试件螺栓都发生滑移,且节点小组 2 的螺栓滑移量最大,表明楼板组合作用对螺栓滑移影响不大,且通常发生在带悬臂梁段梁柱连接类型中。由于钢梁翼缘和混凝土板间的分离,抗剪螺栓在钢梁翼缘上断开,比较试件滞回曲线得知,节点小组 1 的试件比节点小组 2 的试件耗能能力更好,表明楼板组合作用降低延性性能。

夏军武等^[42]研究带悬臂梁段梁柱拼接节点对带填充墙钢框架抗震性能的影响。设计 1 榀 1:2 缩

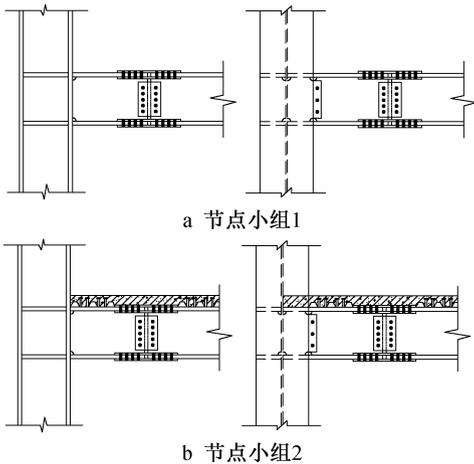


图 13 带悬臂梁段梁柱连接节点足尺试件

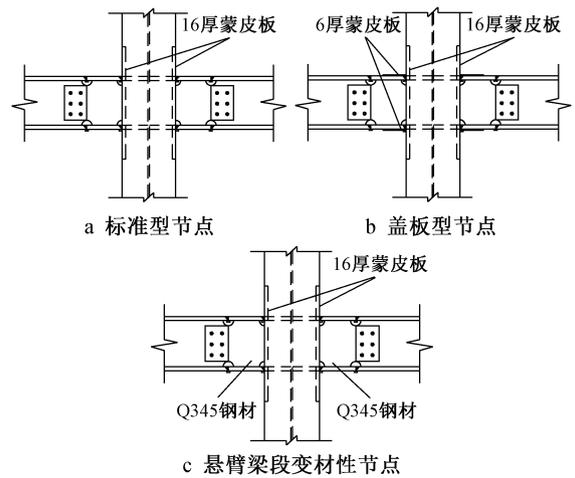


图 14 纯钢节点构造示意

尺带砌体填充墙的悬臂梁拼接钢框架,并进行低周往复循环加载试验及 ANSYS 有限元数值分析,分析该结构的破坏形态、滞回性能、延性性能、耗能能力和刚度退化等抗震性能指标。结果表明,带砌体填充墙的悬臂梁拼接钢框架具有良好的承载力和位移延性。加载过程中,填充墙先于拼接节点发生破坏,对节点起保护作用,悬臂梁拼接节点和填充墙构造提高结构抗震性能。结果表明,墙体厚度和框架跨度对结构耗能能力影响明显,而框架层高等对结构耗能能力影响较小。

卢林枫等^[43]研究考虑楼板组合作用,对与柱弱轴箱型节点域连接的带悬臂梁段拼接节点滞回性能的影响,设计 3 个纯钢节点试件和对应设计的 3 个组合节点试件,纯钢节点构造如图 14 所示。通过低周往复循环加载试验分析对比试件破坏现象、滞回曲线、应变分布、刚度退化和耗能能力等。结果表明,相比纯钢节点,组合节点使梁的中和轴上移,从而保护梁上翼缘焊缝,但增大梁下翼缘焊缝破坏的风险,组合节点滞回曲线更加饱满,承载性能更加稳定,刚度也有明显提高。从 3 种悬臂梁段的不同处理方式来看,标准型与盖板型试件受力性能相当,而变材性试件的承载力最高。另外,各试件耗能能力从滞回曲线包围面积与能量耗散系数指标分析得到相悖的结论,耗能能力评价方法有待商榷。

楼板和填充墙对带悬臂梁段梁柱连接节点的抗震性能有较大影响,相比纯钢节点,考虑组合作用的节点承载力和刚度有所提高,耗能能力及延性略有降低。考虑楼板组合作用会使钢梁的中和轴上移,对梁上翼缘焊缝起一定保护作用,但增大梁下翼缘焊缝发生破坏的风险。

5 结语

本文简要阐述对装配式钢结构带悬臂梁段梁

柱连接节点,如带悬臂梁段传统梁柱连接节点、新型梁柱连接节点、削弱型及加强型节点及考虑楼板和填充墙组合节点的研究内容。

随着国内外学者不断深入研究,性能良好的新型带悬臂梁段梁柱连接节点被提出,但仍存在尚待解决的问题,如带悬臂梁段不易运输,增加运输成本;为防止柱壁受拉或受压发生屈曲,通常在悬臂梁段上下翼缘处的钢管柱内侧设置内隔板,方钢管柱中的内隔板设置受钢管柱边长限制,当钢管柱边长较小或采用成品钢管时,存在施焊困难、混凝土浇灌质量降低等问题。上述问题使装配式钢结构带悬臂梁段梁柱连接节点在工程应用中受一定限制。为此,未来还需广大学者从以下方面进行深入探索和研究。

1) 提出传力明确、力学性能可靠、运输和安装更方便的新型带悬臂梁段梁柱连接节点。

2) 注重震后可恢复功能装配式钢结构的研发,在带悬臂梁段连接节点中加入耗能元件或可更换构件,研究节点抗震性能。

3) 目前对采用新型带悬臂梁段连接节点的框架理论和试验研究较少,可开展对该类框架结构的理论分析,采用直接分析法研究结构整体强度和稳定性。另外,开展可采用带悬臂梁段连接节点的三维空间框架理论研究。

4) 大力研发装配式钢结构体系,实行结构、围护和内装系统协同设计,推动建造方式创新,使装配式钢结构产业化,促进建筑产业转型升级。

参考文献:

- [1] MILLER D K. Lessons learned from the Northridge earthquake [J]. Engineering structures, 1998, 20(4): 249-260.
- [2] MAHIN S A. Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake [J]. Engineering structures, 1998, 20

- (4):261-270.
- [3] 周炳章.日本阪神地震的震害及教训[J].工程抗震,1996(1):39-42,45.
- [4] KAKO M, IKEDA S. Volunteer experiences in community housing during the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Japan[J]. Nursing and health sciences, 2009,11(4):357-359.
- [5] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [6] 中国建筑标准设计研究院有限公司.高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [7] ASTANEH-ASL A. Seismic design of steel column-tree moment resisting frames[M]. Berkeley, California: structure steel educational council, 1997.
- [8] 李启才,苏明周,顾强,等.带悬臂梁段拼接的梁柱连接循环荷载试验研究[J].建筑结构学报,2003,24(4):54-59.
- [9] 李启才,顾强,苏明周,等.带悬臂梁段拼接的梁柱连接节点试验分析[J].工业建筑,2004,34(6):74-76.
- [10] 李启才,顾强.树状柱框架中钢梁拼接的抗震设计有限元模拟对比[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2006,19(2):1-5.
- [11] 李启才,顾强,申林,等.树状柱钢梁拼接节点抗震设计改进[J].建筑结构,2010,40(6):23-25.
- [12] 李启才,刘刚,胡安吉,等.钢框架中钢梁高强螺栓拼接摩擦耗能的试验研究[J].建筑结构,2011,41(5):78-81.
- [13] 常鸿飞,夏军武,吴渭,等.钢框架树状柱节点整体设计研究[J].建筑钢结构进展,2005,7(3):49-51.
- [14] 夏军武,常鸿飞.钢框架带悬臂梁段拼接节点的弹塑性分析[J].中国矿业大学学报,2006,35(5):596-601.
- [15] 王湛,潘建荣,郑霖强,等.带悬臂梁段连接的梁柱节点初始转动刚度研究[J].建筑结构学报,2014,35(S1):9-17.
- [16] 郑霖强.带悬臂梁段拼接的梁柱连接节点初始转动刚度研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [17] LEE K, LI R, CHEN L, et al. Cyclic testing of steel column-tree moment connections with various beam splice lengths[J]. Steel and composite structures, 2014,16(2):221-231.
- [18] 何敏娟,焦燊烽,马人乐.钢梁栓-焊混合连接节点性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(12):1787-1792.
- [19] 焦燊烽,何敏娟,马人乐.新型带悬臂梁段栓-焊拼接节点力学性能研究[J].建筑钢结构进展,2015,17(4):10-18.
- [20] 郁有升,魏丽,付国贤,等.一种新型梁柱装配式刚性节点的非线性静力分析[J].世界地震工程,2014,30(1):50-56.
- [21] 郁有升,张颜颜,李建峰,等.一种新型梁柱装配式刚性节点滞回性能研究[J].建筑钢结构进展,2014,16(2):1-5.
- [22] 郁有升,袁鹏程,王胜.梁柱“上焊下栓”节点受力性能[J].建筑科学与工程学报,2019,36(5):106-118.
- [23] 郁有升,袁鹏程,刘鑫宇,等.梁柱“上焊下栓”节点耗能机理有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):428-436.
- [24] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等.带Z字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能分析[J].北京工业大学学报,2016,42(11):1669-1680.
- [25] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等.带Z字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(8):31-41.
- [26] 黄鹏刚,卢林枫,张顺.带悬臂梁段拼接的异形节点弱轴连接的抗震性能有限元分析[J].建筑技术,2017,48(4):371-374.
- [27] 柴琦琛.新型装配式带悬臂梁段拼接节点性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [28] 杨璐,卫璇,施刚,等.LY315 钢屈曲约束支撑耗能性能试验研究[J].工程力学,2019,36(1):200-206.
- [29] 李志林,杨璐,王萌,等.LY315 钢材带悬臂梁段拼接梁柱节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(11):21-28.
- [30] MCMULLIN K M, ASTANEH-ASL A. Steel semirigid column-tree moment resisting frame seismic behavior[J]. Journal of structural engineering, 2003,129(9):1243-1249.
- [31] OH K, LI R, CHEN L, et al. Cyclic testing of steel column-tree moment connections with weakened beam splices[J]. International journal of steel structures, 2014,14(3):471-478.
- [32] OH K, LEE K, CHEN L, et al. Seismic performance evaluation of weak axis column-tree moment connections with reduced beam section[J]. Journal of constructional steel research, 2015,105:28-38.
- [33] 郭志鹏,张爱林,刘学春,等.装配式钢框架节点带Z字形悬臂梁段和削弱梁段连接的抗震性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(6):43-52.
- [34] 袁素荣,李启才.树状柱钢框架梁柱连接节点加强形式的有限元分析[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2008,21(2):27-29,34.
- [35] 理素杰,王珊,白玉星,等.高层钢框架新型梁柱节点抗震性能试验研究[J].工业建筑,2010,40(S1):524-528,513.
- [36] CHEN C C, LIN C C, LIN C H. Ductile moment connections used in steel column-tree moment-resisting frames[J]. Journal of constructional steel research, 2006,62(8):793-801.
- [37] CHEN C C, LIN C C. Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with tapered beam flanges[J]. Engineering structures, 2013,48(3):588-601.
- [38] 黄鹏刚.节点域箱形加强式工字形柱弱轴悬臂梁段连接节点的抗震破坏机理及设计对策[D].西安:长安大学,2017.
- [39] BAHARMAST A, RAZZAGHI J, KAMOUNEH S. Modification of pre-Kobe column-tree moment resisting connection[J]. Asian journal of civil engineering, 2018,19(2):223-237.
- [40] 马良.带楼板的钢框架中钢梁拼接节点耗能试验及理论研究[D].苏州:苏州科技学院,2010.
- [41] OH K, SO J, HA H, et al. Seismic performance evaluation of Korean column-tree steel moment connections[J]. International journal of steel structures, 2016,16(4):1287-1298.
- [42] 夏军武,徐博,张海威,等.带填充墙的悬臂梁拼接钢框架抗震性能研究[J].建筑结构学报,2016,37(11):113-120.
- [43] 卢林枫,徐莹璐,郑宏,等.带悬臂梁段的弱轴连接组合节点循环荷载试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(7):66-75.