

装配式钢结构梁柱节点抗震性能研究综述

董平霄, 董锦坤

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月10日; 发布日期: 2025年8月22日

摘要

装配式钢结构体系是未来建筑中重要的一环, 对其抗震性能的研究则是重中之重, 基于已有的材料和文献的分析, 对各种形式的装配式钢结构梁柱节点相关参数和力学性能进行整理, 得出了装配式节点相比较而言具有较好的抗震性能, 能有效提高钢结构抵抗破坏的能力, 同时剖析了目前装配式节点中仍存在的一些问题和困难, 并对此提出了相关改进措施和手段, 以期能为装配式钢结构梁柱节点抗震性能相关的研究提供参照。

关键词

钢结构, 抗震, 梁柱节点, 装配式

Review Research on Seismic Performance of Beam-Column Joints in Prefabricated Steel Structures

Pingxiao Dong, Jinkun Dong

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 10th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

Abstract

The prefabricated steel structure system is a crucial component of future construction, and researching its seismic performance is of paramount importance. Based on the analysis of existing data and literature, the relevant parameters and mechanical properties of various forms of prefabricated steel structure beam-column nodes are sorted out, and it is concluded that prefabricated nodes have better seismic performance in comparison, which can effectively improve the ability of

steel structure to resist damage. At the same time, some problems and difficulties that still exist in prefabricated nodes are analyzed, and corresponding improvement measures and methodologies are proposed, in order to provide a reference for the research on the seismic performance of prefabricated steel structure beam-column nodes.

Keywords

Steel Structure, Earthquake Resistance, Beam-Column Joints, Prefabricated

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,装配式钢结构因其施工高效、环保节能等优势,在建筑领域得到广泛应用。然而,多次强震灾害表明,传统钢结构梁柱节点在地震作用下易发生脆性破坏,导致结构整体倒塌,严重威胁建筑安全[1]。这一问题的根源在于传统焊接节点塑性变形能力不足,难以有效耗散地震能量。因此,如何提升装配式钢结构梁柱节点的抗震性能,成为当前工程界和学术界的研究重点。

现有研究普遍认为,理想的抗震节点应满足以下要求:首先是通过塑性铰外移使塑性变形发生在可控区域,而非脆弱的焊缝处,然后是具备高效耗能的能力,也就是说通过合理设计提高节点的能量吸收能力。再就是震后可恢复的能力,据此来减少结构损伤,以便于灾后修复[2]。

基于上述目标,目前主要发展出三类抗震节点设计方法:一类是加强型节点(如翼缘盖板、加腋构造),通过局部强化提升节点刚度,延缓屈服。第二类叫做削弱型节点(如狗骨式削弱、腹板开孔),引导塑性铰形成于预定位置,改善延性。最后一种是可恢复型节点(如可更换耗能元件),通过损伤集中设计来实现震后快速修复[3]-[10]。

尽管这些方法在理论上均能提升抗震性能,但其实际效果、经济性和施工可行性仍需系统评估。例如,加强型节点可能因刚度过高导致脆性破坏;削弱型节点对施工精度要求严苛;可恢复型节点的长期耐久性尚待验证。因此,本文通过整合国内外最新研究成果,系统分析三类节点的抗震机理、性能优劣及适用条件,旨在为装配式钢结构节点的优化设计提供理论依据和工程参考。

本文就以上各种方法进行拓展化阐述。通过使用不同的检索手段获取需要的参考内容。其一是利用近义词句检索,搜索与不同种类的节点抗震能力相关的概念,其二是在知网中进行高级检索,通过几个不同的关键词搭配搜索到想要的相关论文。最后是通过查找参考文献进行一个复合型的检索,找到合适的二次来源论文进行参考。从而确定出最适合提升结构抗震性能 of 节点构造。

2. 装配式钢结构梁柱节点的设计思路

装配式钢结构梁柱节点的设计思路主要是提高节点延性并外移塑性铰,即在地震作用下能够产生塑性变形而不发生脆性破坏。可以人为地对梁段进行削弱,使其产生对应的相对削弱区,把塑性铰产生的位置固定于此处,从而达到消耗地震能量的作用,对维护梁柱连接节点有利。通过促使塑性铰出现在相对稳固的梁上而非受力复杂且脆弱的焊缝区域,这种设计能够有效改善连接部位的破坏模式,使其转变为延性破坏。基于这一原理,可以进一步推导出以下三种各具特色的节点构造方案。

2.1. 加强型节点

在结构设计中,可采取扩大梁柱结合部位的截面尺寸的方法,使梁体其他区域形成强度降低段,从而引导塑性变形集中于该区域以吸收地震作用力,确保梁柱节点不受破坏。常见的加固措施有在梁翼缘部位安装附加盖板、侧向钢板、梁端扩大部以及设置加强肋板等。

通过在梁的上下翼缘增设加固构件(如盖板、侧板、梁腋及加劲肋),可以大幅提升连接节点的刚度,使结构在地震作用下具备更好的耗能性能。节点区域的能量耗散性能可通过两种机制得到提升:一是附加构件与主结构之间的摩擦效应,二是连接螺栓与构件孔壁之间的接触压力作用。这些机制协同工作,能够高效耗散地震作用产生的能量。通过增设辅助构件,节点区域的承载能力得到显著提升,避免了因连接强度不足引发的过早屈服现象,从而确保建筑结构的整体抗震性能。得益于辅助构件的补强效果,节点区域的强度得以提高,从而延缓了连接部位的屈服进程,确保结构在强震下仍能保持整体稳定性。此外,这种加固方式还优化了节点的延性,使结构能够通过塑性变形吸收地震能量,避免脆性破坏的发生,最终提升结构的抗震性能和可靠度。

2.2. 削弱型节点

通过梁翼缘的局部弱化设计,使塑性铰外移至梁段位置,避免出现在焊接节点区。这种构造措施能够将破坏模式由脆性破坏转化为延性破坏,显著提高节点的抗震性能。削弱型节点的实现主要依托两种典型构造工艺:其一是通过在腹板预设孔洞实现塑性铰外移的梁腹板开孔技术,其二是采用纵向切口削弱局部截面的梁腹板切缝技术前者通过在腹板开设圆形孔洞实现截面弱化,后者则采用沿翼缘轴线方向的双缝切割设计。这种构造措施能够形成扩展的塑性铰区域,有效耗散地震能量,防止梁端应力集中导致焊缝脆性破坏,其能量耗散效率显著优于传统节点形式。

2.3. 可恢复型节点

装配式钢结构可恢复节点的研发重点在于:通过创新性的构造设计和连接技术,在确保抗震安全性的前提下,实现震后功能快速修复。这种设计理念兼顾了结构安全性与使用功能性两大核心要求。

为了实现震后快速恢复功能,该设计理念的核心在于配置可替换的耗能元件,通过引导结构损伤向这些可更换构件集中,实现对主体结构的关键防护。例如,在悬臂梁段与开洞槽钢组合梁之间设置削弱型翼缘盖板连接,在对悬臂梁段加强的同时将翼缘盖板进行了狗骨式削弱处理,通过狗骨式构造引导塑性铰形成于盖板区域。利用多缝耗能装置集中吸收地震能量,这种设计确保主体结构保持弹性,实现损伤位置可控和快速修复的目标。

以上三种设计思路共同的目标是提高钢结构梁柱节点的抗震性能、施工效率和震后可恢复性。对后面更加具体的节点构造具有指导作用。

3. 装配式钢结构梁柱节点研究现状

3.1. 加强型钢结构梁柱节点研究现状

加强型节点是钢结构抗震设计一环的关键组成部分,根据其加强部位和构造特点主要可分为以下几类:翼缘加强型钢结构梁柱节点;肋、盖、侧板加强型钢结构梁柱节点和组合型加强节点。

翼缘加强型节点的设计原理在于通过扩展梁翼缘的尺寸——包括宽度、厚度和长度来增强构件的整体性能。此外,通过在梁端添加翼缘板,可以有效地提升节点的抗震能力和塑性变形能力。

赵洁^[11]等制备了 A、B、C、D 四种不同端板厚度的新型带 C 型悬臂段的装配式梁柱节点样本如图 1 所示,其中 A(25 mm),B(12 mm),C(35 mm),D(16 mm)。研究冲击载荷对装配式钢结构梁柱节点性

能的影响，并进行了不同等级的冲击载荷试验。使用 Abaqus 有限元软件建立梁柱节点的有限元模型，通过梁柱节点屈服准则确定双线性随动强化本构模型，模拟冲击载荷下的性能。

研究发现：随着循环加载次数的增加，样本 A 和 C 的强度退化系数均小于 0.5，而样本 B 和 D 的强度退化系数最高，表明端板厚度对梁柱节点的承载性能有显著影响。样本 A 和 C 的峰值载荷和极限载荷较高，屈服位移较小，表明端板较厚的样本具有更好的载荷性能。在极限载荷下，端板较厚的样本 A 的应力分布最均匀，表明端板厚度对梁柱节点的冲击载荷性能影响较大。实际装配中，使用较厚的端板进行梁柱节点装配，并结合工程实际情况选择翼缘板长度，可以保证梁柱节点的冲击载荷性能，提升钢结构建筑的使用性能和安全性。

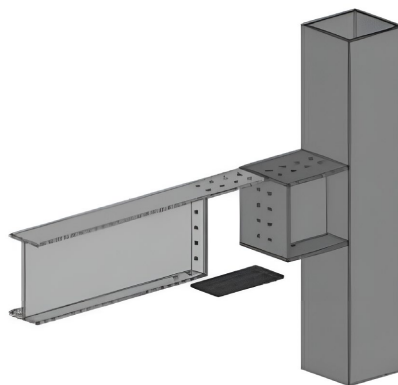


Figure 1. New beam-column joint with C-shaped cantilever section
图 1. 新型带 C 形悬臂段梁柱节点

肋、盖、侧板加固型钢结构梁柱节点通过提高节点的强度、刚度和抗剪能力，能够有效提升梁柱连接部位的性能，确保钢结构的安全性和稳定性，尤其在承受较大荷载或地震作用下具有重要作用。

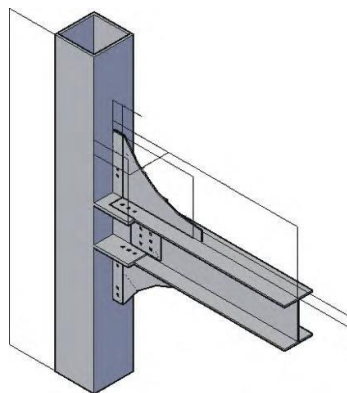


Figure 2. Reinforced assembled ribbed square steel tube joint
图 2. 加强型装配式带肋加腋方钢管节点

张效禹[12]研究团队针对预制半刚性连接节点的力学行为开展了系统的数值模拟研究。该研究选取了 8 组不同几何参数的节点试件，采用有限元方法进行了详细的数值分析。研究内容涵盖节点失效模式、应力应变分布特征、滞回性能、承载能力变化规律、刚度衰减特性以及能量吸收效率等多个方面。图 2 展示了带肋加腋节点的具体构造形式。数值分析结果显示，与传统刚性连接节点相比，采用肋板加强的加腋式节点在能量耗散性能方面具有明显优势。试验数据揭示，腋板尺寸参数、腹板连接点位置以及柱体

壁厚等因素会显著影响节点的抗震表现和承载性能。值得注意的是, 当仅增加腋板厚度而不改变柱壁厚度时, 调整腹板连接位置对节点的能量吸收能力、失效模式及承载性能影响较小。通过系统分析可以得出, 优化此类节点设计的关键在于合理增加柱壁厚度并选择恰当的腹板连接点位置, 这种设计方法不仅能够充分发挥连接螺栓的能量耗散效能, 同时符合“强柱弱梁”这一基本抗震设计准则, 最终实现节点性能的最优化配置。

靳幸福[13]等针对变电站钢结构梁柱栓焊节点的施工效率问题, 基于其力学特性研发了一种创新的 X 形插板装配式连接节点。研究团队通过设计 4 组不同参数的试件(梁端钢板厚度和螺栓直径存在差异), 开展了系统的力学性能试验。同时, 本研究基于 ABAQUS 有限元分析平台构建了数值仿真模型, 并采用试验实测结果对模型精度进行了验证。在确保模型可靠性的前提下, 重点探讨了柱端钢板厚度及螺栓配置数量对节点力学行为的影响规律。

研究显示: 钢梁与梁端钢板之间的焊接部位是节点破坏的主要区域。提升梁端钢板厚度及螺栓直径能够明显增强节点的转动刚度和承载能力, 但节点仍保持半刚性连接特性。加大柱端钢板厚度或增设螺栓数量可有效减轻柱端钢板的受损程度, 但对梁端钢板的损伤改善作用有限; 此外, 采用多螺栓布置方案还能进一步提升节点的承载性能。在确保抗剪能力的前提下, 采用小直径螺栓配合多螺栓排列的设计策略, 既可提高节点承载力, 又能减少柱端钢板的损伤程度。

曹万林[14]等开发了两种新型轻钢框架梁柱连接节点: 分别是装配式 π 形新式连接件和带斜向加劲肋的双 L 形新式连接件。针对这些新型节点, 曹万林团队试验了 10 个标准试件在低周反复荷载作用下的抗震性能试验。其中含有 7 个 π 形连接件节点、2 个双 L 形带斜向加劲肋连接件节点以及 1 个作为对照组的普通 H 型钢梁腹板栓接、翼缘焊接节点。设计参数包括节点构造、 π 肢长度以及框架柱的截面类型, 比较了不同节点的破坏形态、滞回特性、承载力、刚度退化、耗能能力及应变特征。

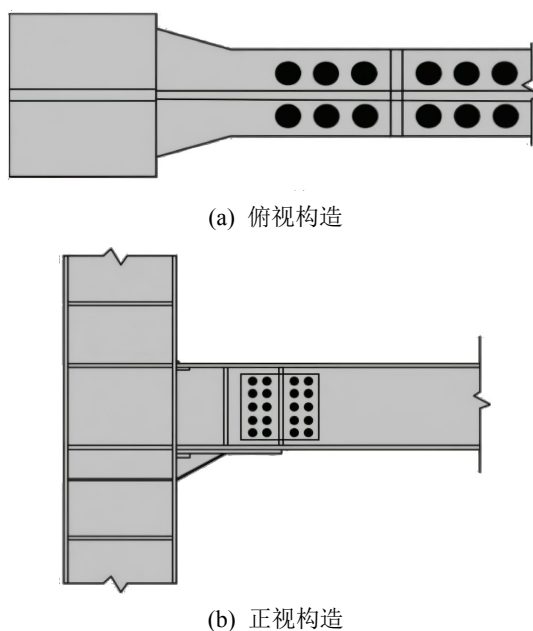


Figure 3. Haunch, cover, and wing-strengthened beam-column joint

图 3. 腋、盖板、扩翼加强型梁柱节点

研究结果表明: 采用 π 形连接件的节点相较于传统 H 型钢梁腹板螺栓连接、翼缘焊接节点, 其初始刚度和承载能力均有显著提升。与配置双 L 形斜向加劲肋的连接节点相比, π 形连接件在刚度和承载力

方面同样展现出明显优势。通过增加 π 形连接件的肢长尺寸, 可有效提升节点的初始刚度和承载性能; 相较于普通钢管柱节点, 钢管混凝土组合柱节点在刚度和能量耗散能力方面具有更优表现; 而 H 型钢柱节点的刚度参数则低于钢管混凝土组合柱节点。 π 形连接件与双 L 形加劲肋连接件均具有构造简洁、装配便捷及抗震性能突出等特点。所以这一设计方法可推广应用于各类预制装配钢框架结构系统。

袁素荣[15]等设计了钢结构在悬臂梁的上翼缘进行扩翼、下翼缘进行加腋和只加盖板这两种不同形式的加强型节点, 如图 3 所示。

基于“强节点弱构件”的抗震设计准则, 运用有限元数值模拟技术开展分析工作。在构建的数值模型中, 连接侧板的关键几何参数依据以下设计公式进行精确计算与确定:

$$a = \frac{h-b}{1.2h} \times \frac{12bt_f - 0.5ht_w}{t_w h + 12(b_f + b)t_f} \times L$$

$$\begin{cases} b/b_f \geq 0.3 \\ (b_f + 2b)/t_f \leq 13\sqrt{235/f_y} \\ b_f/t_f \leq 9\sqrt{235/f_y} \end{cases}$$

公式中各参数含义如下:

a 表示侧板的最大纵向尺寸;

b 代表侧板的横向宽度尺寸;

t_w 对应钢梁腹板的厚度;

t_f 为钢梁翼缘的厚度;

b_f 指钢梁翼缘的总宽度;

f_y 表示钢材的屈服强度标准值;

h 为钢梁截面的整体高度;

L 代表钢梁的跨度长度。

试验研究结果显示: 在梁端翼缘加宽区域, 应力集中现象呈现向外部转移的趋势, 这一现象验证了结构体系能够有效实现塑性铰外移的设计目标。通过对应力分布状态的分析发现, 翼缘根部区域存在显著的应力集中效应, 因此需要对该部位采取加固措施。对比研究表明, 采用加盖板的加固方式比单纯增加翼缘宽度具有更优的加固效果, 不仅能有效改善应力分布状态, 还能进一步提升结构的整体抗震性能。

3.2. 削弱型钢结构梁柱节点

针对钢结构在极端荷载作用下的连续性倒塌风险, 李晓东[16]研究团队提出了一种创新性的节点构造方案。该方案通过在钢梁段配置旋转耗能组件, 并在钢柱部位增设多向加劲肋(包括横向和斜向布置), 有效增强了节点区域的整体刚度, 达成了塑性铰外移的设计初衷。

这种新型的转动耗能构件包括单侧连接板组件、双向连接筒结构、摩擦阻尼装置、旋转调节螺栓、高强度连接螺栓、低屈服点翼缘板材和腹板开槽削弱构造, 如图 4 所示。

该节点体系具有三大特性: 明确的受力方向性, 优异的能量耗散能力, 可控的变形时程特性。

研究团队采用拟静力试验方法, 系统考察了节点的破坏形态、滞回性能、刚度退化曲线、骨架曲线及延性性能。探讨材料屈服强度、摩擦系数和削弱深度对节点性能的影响。借助 Abaqus 有限元分析平台, 研究人员模拟了节点在循环位移荷载作用下的力学响应, 准确预测了构件的最薄弱环节和可能的破坏路径。

破坏形态: 新型节点试件的破坏形态基本一致, 均为低屈服点翼缘板先发生屈服破坏。

耗能能力: 设置低屈服点翼缘板和在试件表面涂抹摩擦材料可以增加结构的耗能能力, 屈服强度和摩擦系数越大, 耗能能力越好。

延性性能: 节点的延性系数与腹板削弱深度呈正相关, 削弱深度越大, 延性表现越显著。随着摩擦系数的提高, 节点的变形能力相应增强, 表现出更优的延性特性。采用较低屈服强度的材料可有效提升节点的延性性能, 屈服点越低, 塑性变形能力越突出。

该创新节点设计展现出优异的能量吸收特性和延滞效应, 能够有效延缓建筑坍塌进程, 从而为灾后搜救工作提供宝贵时间。通过改变低屈服点翼缘板的材料强度、接触面摩擦参数以及腹板开孔尺寸等关键变量, 可显著提升节点的结构性能。在突发性灾害(如强震)作用下, 该节点能够高效耗散冲击能量并延缓破坏发生, 确保主体结构关键区域的安全, 大幅提高受灾人员的生还几率。

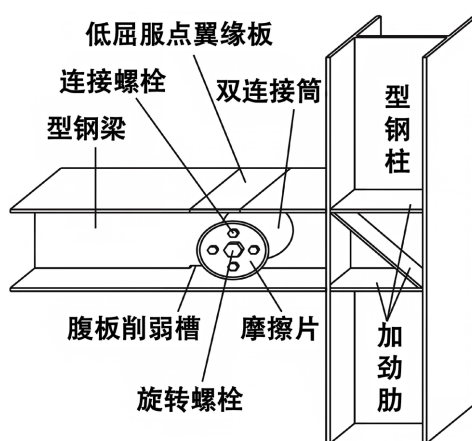


Figure 4. New type of assembled steel structure node
图 4. 新型装配式钢结构节点

3.3. 可恢复型钢结构梁柱节点

陈艳丹[17]等提出将装配式钢结构法兰盘组合节点作为一种新型钢结构梁柱螺栓连接节点, 其具有良好施工性能和可替换性。

该节点对整个钢框架结构的力学性能有直接影响, 尤其是在地震等极端荷载下。

通过拟静力加载试验, 对 4 个 1:2 缩尺模型节点进行测试, 变量包括法兰盘厚度和长度。测试了节点的滞回曲线、承载力、能量消散、延性及刚度退化等性能。

结论表明: 节点的失效模式主要是法兰盘外环板鼓屈, 破坏集中在梁端塑性铰区内, 该设计严格遵循“强柱弱梁”的抗震设计准则。当法兰盘的厚度与长度参数协调配置时, 节点在受力过程中将产生屈服现象, 并在距离柱壁 1/3 梁高位置形成塑性铰, 从而确保塑性铰远离关键节点区域。法兰盘组合节点展现出优异的力学性能, 包括较高的承载能力、良好的转动性能以及出色的能量耗散特性。通过增大法兰盘的截面刚度和延长其长度, 可显著提升节点的屈服荷载和极限荷载, 同时有效控制法兰盘的变形程度, 减缓节点的刚度衰减速率, 进而改善节点的延性性能和耗能效率。这些优化措施能够全面提升节点的抗震性能指标。

刘如月[18]等提出一种新型可修复型摩擦耗能节点如图 5 所示。该可恢复摩擦耗能节点基于“强化节点、弱化杆件”的抗震设计原则, 通过优化连接区翼缘滑移板的截面参数, 使其屈服承载力低于相邻构件。当地震发生时, 塑性铰会从钢节点核心区转移至预设的滑移板位置, 从而将损伤集中在该可更换

部件上。震后只需替换受损的滑移板, 即可快速恢复节点的承载能力, 显著提升结构的可修复性。

本研究为可恢复钢框架节点的工程设计提供了新的技术思路。所研发的装配式摩擦耗能节点采用工厂预制构件, 施工便捷且符合绿色低碳发展理念, 通过优化连接区域的翼缘-腹板构造, 使节点在地震作用下依次经历屈服、滑移和承压三个工作阶段, 形成多级耗能机制, 显著提升了结构的抗震性。

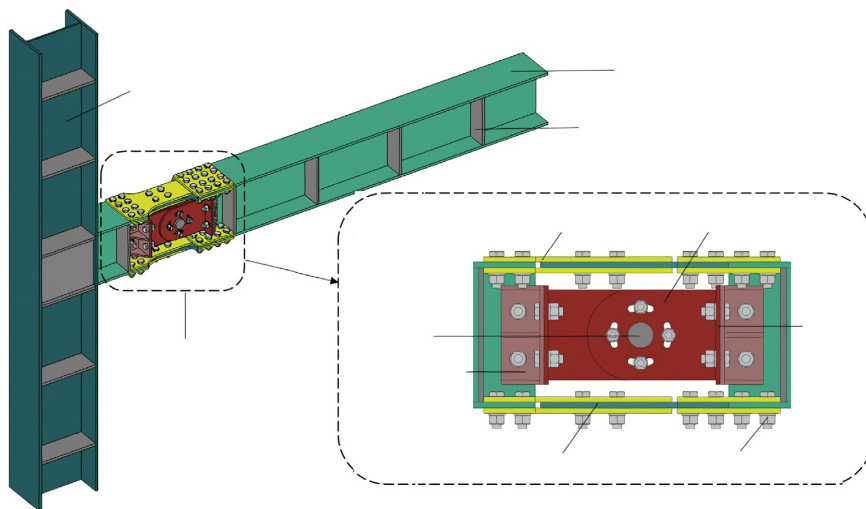


Figure 5. Repairable friction energy dissipation node
图 5. 可修复型摩擦耗能节点

4. 结语

本文以装配式钢结构梁柱连接节点为研究对象, 基于国内外最新研究成果, 系统分析了不同连接形式的抗震机理, 主要得出以下结论:

性能平衡: 加强型节点在提升抗震性能方面表现优异, 但需要注意避免过度加强导致的脆性破坏。削弱型节点和可恢复型节点则在保证结构安全性的同时, 提供了更好的耗能能力和震后恢复能力。

经济性: 削弱型节点可能在经济性上具有优势, 因为它们通过局部削弱而非增加材料来提升性能。可恢复型节点虽然初期投资可能较高, 但长远来看, 其快速恢复能力可能减少因灾害导致的停机时间和维修成本。

施工和维护: 可恢复型节点在施工和维护方面可能更为方便, 因为它们允许快速更换损坏部件。加强型节点和削弱型节点可能需要更复杂的施工技术和维护程序。

环境和可持续性: 可恢复型节点符合可持续发展的要求, 因为它们减少了结构在灾害后的废弃物和环境影响。

近年来, 钢结构梁柱连接节点的研究取得了显著进展。国内外研究者相继开发出多种高性能节点形式, 但在实际工程应用中仍面临若干技术难题需要突破。以加强型节点为例, 其过高的强度和刚度特性可能导致结构发生无预警的脆性失效; 同时, 工程实践中塑性较区的准确定位仍存在困难, 这在一定程度上制约了此类节点的推广应用。此外, 采用削弱工艺的节点虽然能改善延性, 但往往以牺牲结构初始刚度为代价[19]。同时对削弱部位的设计和施工精度要求较高。可恢复型节点可更换耗能部件的设计和制造可能增加成本[20]。而且对于可更换部件的耐久性和可靠性也需要长期验证。上述技术瓶颈在一定程度上制约了钢结构梁柱节点在工程实践中的推广应用。基于当前研究现状, 未来装配式钢结构连接节点的研发应重点关注以下几个关键方向:

- 1) 塑性铰区域精准控制: 通过系统研究强化结构中各关键部位的屈服特性, 实现塑性变形位置的精确调控, 从而优化整体结构性能。
- 2) 复合式协同设计: 整合截面削弱构造与可更换耗能元件等多元技术方案, 构建具有更高可靠性和稳定性的新型梁柱连接体系。
- 3) 抗震性能优化: 针对不同设防烈度地区, 优化钢结构节点设计, 避免材料浪费, 确保足够的抗震性能。
- 4) 工程实践与产业化应用: 重点开发具有实际工程价值的增强型钢结构体系, 促进其在建筑工程领域的规模化应用, 从而推动钢结构行业的技术革新与市场普及。
- 5) 损伤可控与快速修复性能: 研究和开发更多可恢复型节点, 实现震后快速恢复功能, 减少因灾害导致的损失。
- 6) 环境影响和可持续性: 考虑钢结构建筑在整个生命周期中对环境的影响, 推动绿色建筑和可持续发展的实践。
- 7) 连接工艺优化: 重点提升板件焊接工艺质量与螺栓连接精度, 确保节点连接的可靠性并延长其使用寿命。
- 8) 新材料和新技术的应用: 探索新型材料和技术在钢结构中的应用, 如高性能钢材、智能材料等, 以提高结构性能。
- 9) 通过以上部分的整合, 可以系统地推进钢结构研究的发展, 提高钢结构建筑的安全性、经济性和可持续性, 同时促进技术创新和国际合作。

参考文献

- [1] 钱骏巍, 梁汝鸣. 装配式钢结构全栓接刚节点的受力性能分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(2): 1474-1479.
- [2] 乔光华, 程远兵, 郭子龙, 戚福周. 装配式钢结构全栓接刚节点的抗震性能分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(1): 64-69.
- [3] 李波, 杨庆山, 茹继平, 等. 梁腹板开圆孔的钢框架抗震性能研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 64-73.
- [4] 王燕, 董立婷. 梁端腋板加强节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 9-17.
- [5] Kim, T., Whittaker, A.S., Gilani, A.S.J., Bertero, V.V. and Takhirov, S.M. (2002) Experimental Evaluation of Plate-Reinforced Steel Moment-Resisting Connections. *Journal of Structural Engineering*, **128**, 483-491. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2002\)128:4\(483\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:4(483))
- [6] 郁有升, 王燕, 刘秀丽. 钢框架梁翼缘削弱型节点循环荷载作用下的有限元分析及试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 162-169.
- [7] 王万祯, 童科挺, 泮威风. 折线隔板加强的箱形柱-翼缘削弱箱形梁与 H 形梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 64-74.
- [8] 王万祯, 王伟焘, 谢光杰. 隔板贯通式箱型柱-H 型钢梁节点循环加载试验和破坏机理分析[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 93-102.
- [9] Hu, F., Shi, G., Bai, Y. and Shi, Y. (2014) Seismic Performance of Prefabricated Steel Beam-to-Column Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **102**, 204-216. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.07.012>
- [10] 胡方鑫, 施刚, 石永久, 等. 工厂加工制作的特殊构造梁柱节点抗震性能有限元分析[J]. 工程力学, 2015, 32(6): 69-75.
- [11] 赵洁, 国丽荣. 冲击荷载对装配式钢结构梁柱节点性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(2): 91-95.
- [12] 张效禹, 韩明岚. 装配式带肋加腋加强型节点力学性能分析[J]. 山西建筑, 2024, 50(3): 56-61.
- [13] 靳幸福. X 形插板连接型钢结构梁柱节点受力性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 150-159.
- [14] 曹万林. 装配式高性能轻钢框架梁柱节点抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2022, 52(23): 46-55.
- [15] 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.

- [16] 李晓东. 具有特殊功能的钢结构节点的力学性能[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2023, 57(3): 522-529.
- [17] 陈艳丹, 文华. 钢结构法兰螺栓连接节点抗震性能试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(23): 126-131.
- [18] 刘如月. 钢结构梁柱节点研究现状及改进技术分析[J]. 河南科技, 2023, 42(21): 61-64.
- [19] 孙良君. 翼缘削弱型节点钢框架结构抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [20] 李坤. 一种新型可修复装配式钢结构节点力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.