

钢结构抗震设计中节点连接性能提升与参数优化研究

任盛鑫

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]钢结构在现代建筑工程领域中应用广泛,其高强度、延性好、施工便捷等优点使其在高层建筑、大跨度结构及重大公共设施中具有不可替代的地位。然而,在地震作用下,钢结构的抗震性能不仅取决于整体构件的受力体系,还受到局部节点连接性能的显著影响。节点作为钢结构的关键薄弱环节,其力学性能、变形能力、延性水平以及连接构造参数均直接决定了结构整体的抗震能力。节点连接若设计不当或参数配置不合理,可能导致地震作用下发生脆性破坏、承载力不足或耗能能力弱化,从而影响整个结构体系的安全性。基于此,文中从钢结构节点连接的力学特性、抗震性能提升方法、关键参数优化原则等方面展开研究,探讨不同节点形式在抗震作用下的性能差异,并从结构设计、构造细节与参数调整角度提出节点性能提升策略。研究结果显示,通过合理的节点设计方法与参数优化手段,可显著提升节点的延性性能、耗能能力和变形恢复能力,从而提高钢结构整体抗震能力。本研究可为钢结构节点优化设计、抗震性能提升以及工程实践中的参数控制提供理论参考与技术依据。

[关键词]钢结构; 节点连接; 抗震设计; 延性性能; 参数优化

DOI: 10.33142/ucp.v3i1.19215

中图分类号: TU391.5

文献标识码: A

Research on Improving Node Connection Performance and Parameter Optimization in Seismic Design of Steel Structures

REN Shengxin

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Steel structures are widely used in the field of modern construction engineering, and their advantages such as high strength, good ductility, and convenient construction make them irreplaceable in high-rise buildings, large-span structures, and major public facilities. However, under earthquake action, the seismic performance of steel structures depends not only on the overall load-bearing system of the components, but also on the significant influence of local node connection performance. As a key weak link in steel structures, the mechanical properties, deformation capacity, ductility level, and connection parameters of nodes directly determine the overall seismic resistance of the structure. Improper design or parameter configuration of node connections may lead to brittle failure, insufficient bearing capacity, or weakened energy dissipation capacity under earthquake action, thereby affecting the safety of the entire structural system. Based on this, this article conducts research on the mechanical characteristics of steel structure node connections, methods for improving seismic performance, and principles for optimizing key parameters. It explores the performance differences of different node forms under seismic action and proposes strategies for improving node performance from the perspectives of structural design, construction details, and parameter adjustment. The research results show that through reasonable node design methods and parameter optimization techniques, the ductility performance, energy dissipation capacity, and deformation recovery capacity of nodes can be significantly improved, thereby enhancing the overall seismic resistance of steel structures. This study can provide theoretical reference and technical basis for the optimization design of steel structure nodes, improvement of seismic performance, and parameter control in engineering practice.

Keywords: steel structure; node connection; seismic design; ductility performance; parameter optimization

引言

钢结构因其轻质高强、延性优良及施工效率高的特点,在现代结构工程领域获得广泛应用。特别是在地震多发地区,钢结构相较于其他结构形式更容易通过延性耗能的方式抵抗地震作用。然而,在钢结构受地震影响的复杂动力过程中,节点连接区域往往成为应力集中和变形累积的主要部位,是钢结构体系中最容易发生失效的环节之一。若节点性能不足,将显著削弱构件的整体受力能力,使结构在地震中出现连接断裂、构件屈曲提前、塑性耗能不足等

问题。因此,节点性能提升与参数优化是钢结构抗震设计中不可忽视的重要内容。为了进一步提高结构的整体安全性和抗震韧性,本文围绕钢结构节点的力学行为特征、抗震性能影响机制以及参数优化方法展开深入研究,以期在实际工程中的节点设计提供更科学的技术支撑。

1 钢结构节点连接的力学行为特征

1.1 节点连接在整体结构受力体系中的作用

钢结构节点连接作为结构体系中最关键的组成部分之一,承担着传递构件间内力、协调变形及确保结构整

体受力路径连续的作用。在地震作用等动力荷载作用下,节点连接的受力状态通常比普通构件更加复杂,其内部应力分布呈现高度集中与不均匀性,且节点不仅承担弯矩、剪力、轴向力等多种力的共同作用,还需要在构件屈服或结构塑性发展阶段保持足够的稳定性与延性,以确保结构不会由于节点提前破坏而失去整体性。由于节点连接往往位于梁柱相交处或受力转换区域,其变形特征对结构整体协同工作模式具有决定性影响。如果节点刚度不足,可能导致结构整体刚度降低,引起侧移增大;若节点强度冗余则容易限制构件塑性发展,使耗能机制无法充分发挥。

1.2 节点受力模式及其变形特征

钢结构节点在地震作用下的受力模式呈现显著的循环性、突变性与随机性。节点区域的力学行为受梁端弯矩峰值、柱端剪力集中及轴力变化耦合作用影响,其变形形态通常包括弯曲变形、剪切变形、局部屈曲、连接件滑移及焊缝塑性发展等多种模式。特别是在循环荷载作用下,节点滞回性能对结构耗能能力具有决定性作用,一个性能良好的节点应在多次循环中保持稳定的滞回曲线、有限的刚度退化以及适宜的残余变形水平。节点区域板件由于受压区集中容易出现局部屈曲,且螺栓孔附近、焊缝热影响区常成为应力集中和裂纹萌生的薄弱部位,若构造设计不合理,节点易出现脆性破坏,导致延性储备无法有效发挥。因此,研究节点受力模式不仅有助于理解其力学特性,还为构造改进与参数优化提供理论基础。

1.3 节点连接形式对结构性能的影响

不同节点连接形式决定了结构的受力路径、变形能力与整体抗震性能。焊接节点因其刚度大、传递力直接而被广泛应用于高层结构和抗震等级较高的工程中,但焊接热影响区的脆性问题可能使节点在强震中提前发生破坏;螺栓连接节点则具有一定的滑移耗能能力,有利于提高结构延性,但其初始刚度较低,可能引起结构过大侧移;焊螺混合连接结合了两者的优点,具有良好的滞回性能与耗能能力,是近年来研究与工程应用的重要方向。节点形式不仅决定构件连接性能,还关系到结构塑性机制的形成与分布,对提高整个结构的抗震韧性具有决定性意义。

2 钢结构节点抗震性能影响因素分析

2.1 材料性能对节点抗震能力的影响

钢材的强度、延性、屈强比及低周疲劳性能等材料参数直接决定节点在地震作用下的承载能力与耗能能力。高强钢可提升节点承载力与整体构件性能,但其较高的屈强比可能引起塑性发展困难,不利于延性机制的形成;普通结构钢虽然延性较好,但抗疲劳能力相对一般,因此对于易出现反复受拉受压的节点区域需谨慎选用。此外,焊接

材料与母材之间的匹配性、螺栓材料的抗滑移能力、节点板件的屈服及硬化性能,均会直接影响节点产生塑性变形的能力。材料在循环荷载作用下的性能退化机制也是影响节点抗震行为的重要因素,应通过材料试验与可靠性研究进行评估。

节点构造参数主要包括板件厚度、螺栓布置方式、焊缝尺寸、翼缘板过渡半径以及加劲肋布置方式等,它们共同决定节点在循环荷载下的强度发挥、刚度退化、捏拢效应(pinching)、耗能能力与延性发展。一般而言,板件厚度偏小会使剪切屈服区提前形成并诱发局部破坏,滞回曲线表现为“早期峰值后快速退化”;板件厚度偏大虽可抬升承载力并减小滑移,但往往导致塑性较外移困难、节点转角能力下降,延性不足。螺栓间距与布置形式会影响摩擦型连接的滑移阶段与能量耗散路径:间距过小易产生应力集中、孔边撕裂风险增加,间距过大则可能引起板件翘曲与局部屈曲,滞回曲线出现明显捏拢。焊缝尺寸与形式直接影响裂纹萌生位置与扩展速率,焊缝过大会使焊趾应力幅增大导致低周疲劳开裂,焊缝过小则可能引入更强的约束效应并增加残余应力,不利于延性发展。翼缘板过渡半径越合理越能削减几何突变带来的应力集中,改善循环加载下的抗裂能力与稳定滞回。加劲肋适度布置可抑制局部屈曲、提高稳定性并延缓强度退化,但若加劲过度会抑制塑性区发展,使耗能集中于少数薄弱部位,反而诱发脆性破坏或提前失稳。因此,构造参数配置应以“延性与耗能最优”为目标,在保证承载力与稳定性的同时,避免过度加劲与过度刚化造成的延性损失,如表1所示。

2.3 加载方式与地震动特性对节点性能的影响

地震动具有随机性、多频率、多方向性等特点,节点性能在不同地震动作用下差异显著。短周期强震会使节点经历大幅度高频往复荷载,易引起局部部件疲劳破坏;长周期地震则可能导致节点滞回曲线逐渐衰减,发生累积塑性变形。此外,竖向地震动对梁柱节点的轴力变化影响明显,会打破节点原有受力平衡状态,使其出现复杂的耦合受力模式,因此需要在分析中综合考虑地震动的动态特性,以避免节点评估偏差。

3 钢结构节点连接性能提升策略研究

3.1 优化节点构造以提高延性与耗能能力

提升节点延性首先应从构造层面进行优化。通过合理配置加劲肋,可约束板件局部屈曲,提高节点延性储备;采用合理的翼缘过渡圆角能够降低应力集中,提高焊缝区域的抗裂能力;通过增设抗屈曲构造措施,可推迟节点屈服时刻,使其在地震作用下具备更长的滞回循环能力。此外,优化节点板件尺寸比例、设置能量耗散构件、调整构造细节均可有效改善节点的变形协调性,使节点不仅具备承载能力,还具备可控且稳定的塑性耗能能力。

表 1 节点构造参数对抗震性能与滞回行为影响的总结

构造参数	取值偏小的典型表现	取值偏大的典型表现	对滞回曲线特征的影响	对延性/耗能的总体影响	设计关注点 (建议)
板件厚度 (端板/节点板)	易剪切屈服、孔边撕裂或局部屈曲; 强度峰值后快速退化	节点过刚, 塑性发展受限; 可能把破坏转移到焊缝/母材脆断	偏小: 滞回“瘦”、退化快; 偏大: 滞回“胖”但转角能力下降	偏小: 耗能不足且退化快; 偏大: 承载力高但延性降低	以“屈服机制可控”为导向, 避免薄弱剪切破坏或过度刚化
螺栓间距/布置	应力集中、孔边破坏风险上升; 滑移不稳定	板件翘曲、二次弯曲增大; 捏拢加剧	间距不合理易出现明显捏拢与滑移平台异常	影响耗能路径 (滑移耗能 vs 塑性耗能)	与摩擦面处理、预拉力水平协同设计, 兼顾滑移可控与孔边安全
焊缝尺寸/形式	焊趾应力幅大, 低周疲劳开裂; 抗裂不足	约束增强、残余应力大; 塑性区被“锁住”	焊缝缺陷会导致滞回突降、脆断特征明显	过小: 延性与寿命下降; 过大: 延性可能受抑制	控制缺陷、优化过渡与收弧; 关注焊趾应力集中与热影响区韧性
过渡半径 (翼缘板圆角/坡口过渡)	几何突变明显, 应力集中强, 易裂	过大占空间、加工成本增, 但应力集中降低	半径合理可减小滞回退化与裂纹扩展	通常利于延性与稳定耗能	重点用于高应力区的“圆滑过渡”, 与焊缝细节配合
加劲肋布置	局部屈曲明显, 强度退化快	约束过强, 塑性发展受限, 破坏可能转移并更脆	适度加劲使滞回更饱满; 过度加劲使转角能力下降	适度: 延性↑耗能↑; 过度: 延性↓	“适度加劲、机制可控”, 避免把塑性完全挤出节点区

3.2 通过改进连接技术提升节点稳定性

不同的连接技术对节点性能提升具有不同效果。对于焊接节点, 可采用多道焊接工艺或设置补强板, 提高焊缝抗裂能力; 采用改良坡口形式可改善焊缝热影响区韧性。对于螺栓连接节点, 通过采用高强度摩擦型螺栓可提高抗滑移能力, 使节点获得稳定的滞回性能; 通过改变螺栓布置方式, 使节点在受力过程中具备可控的滑移区间, 有助于提高延性。焊螺混合连接方式可使节点兼具焊接的高刚度和螺栓连接的滑移耗能优势, 成为近年来提升节点抗震性能的重要方向。

3.3 提升节点区域板件稳定性的综合措施

板件稳定性直接影响节点承载能力和延性性能。通过调整板件宽厚比、增加边缘约束、优化板件边界过渡关系可提高板件稳定性。在节点区域设置局部增强构造, 可有效抑制局部屈曲发展, 使节点具备更高的塑性储备; 同时, 通过优化板件连接形式、调整焊缝布局与增加局部支撑措施, 可以改善板件整体稳定性, 使节点在高强度地震作用下仍保持稳定的滞回性能。

4 钢结构节点参数优化方法研究

4.1 节点关键参数的敏感性分析方法

参数敏感性分析可从多维度揭示各连接参数对节点性能的影响程度。常用方法包括基于有限元模型的参数扫描分析、基于响应面的多参数交互分析及基于统计学回归模型的性能拟合分析。通过这些方法可确定影响节点抗震性能的关键因素, 如螺栓布置密度、焊缝尺寸、翼缘板厚度、加劲肋数量等。敏感性分析还可揭示参数变化对节点滞回性能、刚度退化速度、残余变形及延性系数的影响趋势, 为进一步优化提供有效理论依据。

4.2 节点优化设计中的多目标协调机制

节点优化设计涉及多目标之间的平衡, 如强度最大化、延性提升、重量最小化、制造成本控制等。通过建立多目

标优化模型, 可利用数学方法实现参数的最优组合。例如, 可通过设定性能权重, 将抗震性能置于主要目标, 将成本与材料利用效率置于次要目标, 从而确定在满足安全要求前提下的最优设计方案。多目标优化方法可显著提高设计效率, 使得节点不仅在强度上满足要求, 还可在耗能能力、延性水平和制造经济性方面实现综合优化。

4.3 基于性能的参数优化策略

基于性能的参数优化方法强调通过性能指标评价节点设计优劣, 如滞回性能指标、延性比、累积耗能系数等。通过建立参数与性能之间的函数关系, 可进行逐步优化, 实现节点性能的可量化控制。循环加载试验数据可用于标定与修正性能预测模型, 使参数优化结果更符合实际工程情况。此外, 基于性能的设计更关注节点在强震中的韧性表现, 可确保节点不会因局部失稳导致整体失效。

5 钢结构节点在抗震体系中的协同作用与应用前景

5.1 节点性能在结构体系协同中的关键性作用

节点在结构受力与变形传递过程中处于关键位置, 其性能不仅影响单个构件的受力状态, 更直接决定整体结构的变形协调能力。在地震作用下, 结构需要通过节点区域形成稳定、可控的塑性变形区, 使能量在特定部位被有效耗散。若节点无法承担这一角色, 塑性机制将难以按照设计预期发展, 抗震体系的整体效能随之削弱。节点性能的优劣, 直接关系到结构是否能够建立可靠的延性耗能体系, 是评价抗震等级和安全储备的重要依据。当节点承载力或延性不足时, 易发生脆性破坏, 导致塑性较转移至非预期部位, 使结构受力路径紊乱, 增加提前失稳甚至倒塌的风险。通过提升节点性能并合理引导塑性发展, 可确保结构在强震作用下保持整体协调工作, 提高抗震安全性和可靠性。

5.2 节点性能提升对体系抗震能力的促进作用

节点性能的提升对结构整体抗震行为具有重要影响。

高性能节点能够在强震作用下形成稳定、可控的塑性变形机制,使结构在屈服阶段持续耗散地震输入能量,减少不利内力向主体构件的传递。通过增强节点延性和承载能力,结构滞回曲线表现更加饱满,有利于延缓刚度和承载力的退化过程,从而提高结构的延性系数和耗能效率。节点受力性能的改善还能有效控制局部破坏范围,避免脆性失效对整体结构安全产生放大效应。当地震作用结束后,具备良好节点性能的结构往往能够保持较高的完整性和功能可恢复性,使修复和加固工作更加简便可控。通过针对性优化节点设计,结构抗震韧性和震后经济性可得到显著提升,为安全可靠的建筑体系提供重要保障。

5.3 未来钢结构节点设计的发展方向

未来结构节点研究将逐步向智能化、信息化与材料创新方向深化发展。随着传感技术和数据采集手段的进步,智能监测节点能够实时获取受力、变形和损伤信息,为结构健康监测和安全评估提供可靠数据支撑。新型高性能钢材与复合材料的应用,使节点在承载能力和延性表现上得到明显提升,有助于改善结构在复杂荷载条件下的整体受力性能。参数化设计和数字化建模技术的引入,使节点构造设计更加高效精准,能够快速响应不同结构形式和工况需求。未来节点研究还将更加关注可修复性和可替换性,通过优化构造形式,使节点在受损后能够快速修复或更换,

从而提高结构在地震等极端事件后的恢复能力,推动建筑结构向更高韧性水平发展。

6 结论

本文围绕钢结构抗震设计中节点连接性能的影响机制、性能提升方法及参数优化策略展开研究。研究表明,节点连接性能是钢结构抗震能力的核心控制因素,通过合理设计节点构造、优化连接技术、提升板件稳定性,可有效提高节点延性、耗能能力及整体稳定性。同时,通过敏感性分析与多目标参数优化方法,可进一步实现节点性能与材料效率的协同优化。未来研究可进一步结合新型材料技术、先进试验手段及智能监测系统,为钢结构节点的性能提升与抗震设计方法创新提供更加坚实的理论基础与技术保障。

[参考文献]

- [1]王景全,张建业.钢结构节点抗震性能分析与设计研究[J].建筑结构学报,2020,41(7):65-72.
- [2]李明哲,陈志华.钢结构连接节点受力机理与参数优化研究[J].土木工程学报,2019,52(4):88-96.
- [3]周文强,刘涛.钢结构节点滞回性能影响因素分析及改进设计[J].工程力学,2021,38(10):122-131.

作者简介:任盛鑫(1984.12—),男,汉族,毕业院校:石家庄铁道大学,现就职单位:中土大地国际建筑设计有限公司。