

模块化钢结构建筑结构的拼接节点抗侧刚度与整体性能优化

刘 翠

江西省绿建建设工程有限公司 江西赣州 341001

摘 要：模块化钢结构建筑作为一种高效、绿色的建造方式，其拼接节点的性能对整体结构的安全性与经济性具有决定性影响。本文聚焦于模块化钢结构建筑结构的拼接节点抗侧刚度与整体性能优化，首先阐述了拼接节点在模块化钢结构体系中的关键作用及其抗侧刚度的重要性；随后，系统分析了影响拼接节点抗侧刚度的主要因素，包括节点连接形式、构件截面特性、材料性能及构造细节等；在此基础上，探讨了提升拼接节点抗侧刚度的设计策略与优化方法，旨在通过合理的节点设计增强其抵抗侧向力的能力；进而，研究了拼接节点抗侧刚度对结构整体性能的影响机制，包括对整体刚度、稳定性、动力特性及抗震性能的作用；最后，提出了基于整体性能提升的拼接节点与结构体系协同优化思路，强调在保证节点局部性能的同时，实现模块化钢结构建筑整体受力性能的最优化，为模块化钢结构建筑的设计与应用提供理论参考。

关键词：模块化钢结构建筑；拼接节点；抗侧刚度；整体性能

引言

随着现代建筑工业化与绿色化发展，模块化钢结构建筑因工厂化预制率高、装配快、资源消耗低、污染小等优势，在国内外建筑领域受广泛关注与应用。与传统建筑结构不同，它由工厂预制的独立模块单元通过拼接节点连接成整体受力体系。拼接节点是力流传递枢纽，其抗侧刚度直接影响结构在侧向荷载下的变形、承载安全与整体稳定性。因此，研究拼接节点抗侧刚度特性、揭示影响规律并优化节点设计与整体性能，对提升结构性能、拓展应用范围有重要意义。目前，模块化钢结构拼接节点研究有进展，但在抗侧刚度精细化分析、多因素耦合影响机制及节点与结构协同优化等方面待深化。

一、模块化钢结构拼接节点抗侧刚度特性分析

（一）典型拼接节点的构造形式与受力机理

模块化钢结构建筑的拼接节点是决定其整体结构性能的关键部件，其构造形式直接关联到模块单元间的力流传递路径与结构整体性。典型的拼接节点可分为角部连接、边部连接和内部连接，其中角部节点因其复杂的受力状态而最为关键。根据连接方式，主要分为螺栓连接、焊接连接以及栓焊混合连接。螺栓连接因其现场安装便捷、可拆卸性强而成为主流应用，其构造通常通过在模块角柱处设置外伸端板或内置连接板，利用高强度螺栓群将相邻模块的角部构件紧固。在侧向荷载（如风

荷载或地震作用）下，节点的受力机理表现为复杂的空间受力状态：梁端弯矩通过螺栓群的拉压作用转化为端板或连接板的弯曲变形和剪切变形，并传递至柱子；剪力则主要通过螺栓的抗剪承载力以及连接板与柱翼缘间的摩擦力传递。焊接连接虽能提供更高的刚度和整体性，但其现场作业质量难以控制且不适用于可拆卸建筑，其受力机理表现为通过焊缝直接传递拉、压、剪应力，力流更为直接。栓焊混合连接则试图结合两者的优点，例如翼缘采用焊接以传递主要弯矩，腹板采用高强度螺栓以传递剪力，其受力机理是两种连接方式的协同工作。

（二）影响节点抗侧刚度的关键几何与材料参数

节点抗侧刚度并非一个恒定值，而是受到一系列几何与材料参数的显著影响。几何参数方面，螺栓的直径、等级、排列方式（如单排、双排）、间距和边距直接决定了螺栓群的抗拉、抗剪和抗撬刚度。端板或连接板的厚度是影响节点弯曲刚度的核心参数，较厚的端板能显著减小其在受力下的弯曲变形，从而提高节点整体刚度。此外，柱翼缘厚度、加劲肋的设置与否及其尺寸，也直接影响柱子节点域的局部变形能力，进而影响节点的宏观抗侧性能。材料参数方面，高强度螺栓的屈服强度和预拉力大小是控制节点滑移和受力行为的关键，足够的预拉力能保证连接板件间紧密接触，依靠摩擦力传递一部分剪力，延迟螺栓杆与孔壁的接触，从而提升初始刚

度。钢材的屈服强度和弹性模量决定了构件本身的变形能力,采用更高强度的钢材可以在相同截面下提供更高的承载力,但其弹性模量变化不大,因此对弹性阶段的刚度贡献有限^[1]。

(三) 节点域的变形模式与刚度退化规律

在循环荷载或单调荷载作用下,模块化钢结构拼接节点的变形并非均匀的弹性变形,而是呈现出多种模式的复合,并伴随刚度的逐渐退化。节点的总变形主要由几部分构成:螺栓的伸长与弯曲变形、连接板(端板)的弯曲变形、柱翼缘的局部屈曲变形、以及核心区柱腹板的剪切变形。在荷载初期,变形以弹性变形为主,节点表现出较高的初始刚度。随着荷载增加,螺栓孔壁被挤压、连接板发生塑性铰、柱翼缘出现局部屈服,塑性变形开始累积,节点的荷载-位移曲线逐渐进入非线性阶段,刚度开始明显下降。刚度退化的规律与节点的具体构造和材料特性密切相关。对于设计合理的强节点弱构件连接,刚度退化过程相对平缓,具有良好的延性和耗能能力;而对于存在构造缺陷的节点,如端板过薄或螺栓布置不合理,可能在某个薄弱环节过早发生局部破坏,导致刚度急剧衰减,甚至脆性破坏。通过试验或精细化有限元分析,可以识别出节点在不同受力阶段的主导变形模式,并建立能够描述其刚度退化路径的数学模型(如考虑塑性发展的修正刚度模型)。

二、拼接节点抗侧刚度对结构整体性能的影响

(一) 节点刚度对结构整体抗侧力与位移响应的影响

拼接节点的抗侧刚度是连接模块单元形成整体抗侧力体系的核心要素,其数值大小直接决定了结构在侧向荷载作用下的整体力学行为。在传统的框架结构分析中,节点常被理想化为完全刚接或理想铰接,但在模块化钢结构中,拼接节点实质上是一种半刚性连接。这种半刚性特性使得结构在受力时,梁柱之间会发生相对转动,从而改变了结构的内力分配和变形模式。节点的抗侧刚度越低,结构的整体抗侧刚度也随之降低,导致在相同水平荷载作用下,结构的层间位移和顶点位移显著增大。这不仅可能超出规范的位移限值,影响建筑的正常使用功能和非结构构件的安全,同时也会改变框架中的弯矩分布,使得梁端弯矩减小而跨中弯矩增大,柱端弯矩也随之变化,从而影响构件的截面设计^[2]。

(二) 节点刚度分布不均匀性对结构扭转效应的影响

当结构平面布置不规则或各模块单元的拼接节点刚度存在显著差异时,会引发结构在侧向荷载下的扭转效

应,这是影响结构安全性的一个关键因素。结构的刚度中心是其抗侧刚度的加权中心,而质量中心则是其质量的加权中心。在理想状态下,两者应尽可能重合。然而,若建筑某一侧的节点由于构造、施工质量或材料差异导致其抗侧刚度普遍低于另一侧,则会造成结构的实际刚度中心向刚度较大的一侧偏移。在风荷载或地震作用下,侧向力的合力通常作用于质量中心,当刚度中心与质量中心不重合时,会产生一个绕刚度中心的扭转力矩。这个扭转力矩会导致结构发生扭转振动,使得距离刚度中心较远的边缘部位产生更大的位移和加速度。这种扭转效应不仅会加剧边缘构件的受力,可能导致其提前进入塑性或发生破坏,还会引起建筑内部空间的非均匀变形,影响使用舒适度。

(三) 节点刚度与结构整体稳定性的内在联系

结构的整体稳定性,特别是在其极限荷载下的承载能力,与拼接节点的抗侧刚度存在着深刻的内在联系。在框架结构中,柱的计算长度系数是衡量其稳定性的关键参数,该系数的大小直接取决于柱端受到的转动约束程度。在模块化钢结构中,拼接节点正是提供这种转动约束的来源。节点的抗侧刚度越高,对柱端的转动约束就越强,柱的计算长度系数就越小,其稳定承载力也就越高。反之,若节点刚度不足,对柱端的约束较弱,柱的计算长度系数会显著增大,导致柱在较低的轴向压力下就可能发生弹性或弹塑性失稳,从而降低整个结构的极限承载能力。这种影响在高层模块化建筑中尤为突出,因为高宽比较大的结构对二阶效应更为敏感。节点刚度的降低会放大结构的侧向位移,进而增加由竖向荷载在侧移结构上产生的附加弯矩(即P-Δ效应),进一步削弱结构的整体稳定性^[3]。

三、基于节点优化的结构整体性能提升策略

(一) 提升节点抗侧刚度的构造优化方法

提升节点抗侧刚度需针对模块化钢结构拼接节点的核心受力部件(连接板、螺栓组、加劲肋)进行构造调整,确保节点在水平荷载下变形可控,某市模块化办公楼项目(共12层,采用钢框架模块化体系,单模块尺寸3.6m×6.0m×3.0m,原拼接节点采用12mm厚连接板、4颗M20高强螺栓,抗侧刚度仅 $2.5 \times 10^5 \text{ kN/m}$,水平荷载下节点变形超规范限值)。项目通过三项构造优化:一是将节点连接板厚度从12mm增至16mm,增大连接板的抗剪与抗弯截面;二是将螺栓数量从4颗增至6颗,按“2×3”矩阵布置,螺栓间距控制在100mm(满足规范

最小间距要求),提升螺栓组的抗拔与抗剪承载力;三是在连接板两侧增设8mm厚三角形加劲肋(加劲肋高度与连接板一致,底边长度150mm),约束连接板平面外变形。优化后,节点抗侧刚度提升至 $4.2 \times 10^5 \text{kN/m}$,较原节点提升68%;结构在水平地震作用下的顶点位移从原18mm降至11mm,层间位移角从1/520降至1/780,完全满足《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)中模块化结构层间位移角 $\leq 1/500$ 的要求,节点变形控制效果显著^[4]。

(二)考虑节点半刚性特性的结构整体设计方法

考虑节点半刚性特性需摒弃“节点完全刚接”的简化假设,通过量化节点转动刚度,将其纳入结构整体计算模型,避免因设计偏差导致结构安全储备不足或材料浪费。原设计按完全刚接模型计算,忽略节点实际存在的转动变形(实测节点转动刚度为 $8.0 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$),导致结构内力计算值与实际受力偏差达15%。项目采用“弹簧-刚架”混合模型进行整体设计:通过节点加载试验获取不同荷载下的转动刚度曲线,将节点模拟为具有非线性刚度的弹簧单元,嵌入整体计算模型;在设计中调整构件截面参数,如将原框架梁截面 $\text{H}300 \times 150 \times 6 \times 8$ 调整为 $\text{H}350 \times 175 \times 7 \times 10$,匹配节点半刚性带来的梁端弯矩分配变化。考虑半刚性特性后,结构整体弯矩分布更均匀,梁端最大弯矩从原 $280 \text{kN} \cdot \text{m}$ 降至 $240 \text{kN} \cdot \text{m}$,柱端轴力波动幅度从12%缩小至5%;同时避免过度设计,框架梁钢材用量较原完全刚接设计减少8%(单栋楼节省钢材约12t),在保障结构安全的前提下提升经济性。

(三)结构体系与节点性能的协同优化设计原则

结构体系与节点性能的协同优化需确保节点性能与结构体系的受力需求、抗震等级相匹配,避免节点性能与体系承载力“错配”(如节点过强导致构件先破坏,或节点过弱导致提前失稳)。项目根据模块化钢结构“整体抗侧依赖框架节点、竖向承重依赖柱节点”的特点,制定差异化协同优化原则:一是框架梁-柱拼接节点(承担水平剪力与弯矩)按“强节点弱构件”设计,节点抗侧刚度需比相邻构件抗侧刚度高30%(优化后节点抗侧刚度 $4.2 \times 10^5 \text{kN/m}$,相邻梁抗侧刚度 $3.2 \times 10^5 \text{kN/m}$),确保地震作用下构件先于节点屈服;二是柱-基础拼接节点(承担竖向荷载与部分水平力)按“节点与构件等强”设计,节点竖向承载力(1800kN)与柱竖向承载力(1850kN)基本持平,避免节点竖向失稳;三是模块间

次要拼接节点(如墙板与框架连接)按“弹性变形”设计,节点转动刚度控制在 $1.5 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$,允许小变形以释放温度应力。协同优化后,结构整体抗震承载力较原设计提升22%,在多遇地震作用下的动力响应峰值加速度从0.25g降至0.18g;同时模块安装效率提升15%(单模块安装时间从4小时缩短至3.4小时),实现结构性能与施工效率的双重提升^[5]。

结语

模块化钢结构建筑的拼接节点性能优化是提升结构整体性能的关键环节。从节点的构造形式与受力机理出发,深入分析其抗侧刚度的影响因素、变形模式及刚度退化规律,为工程实践提供了重要的理论支撑。在设计过程中,通过合理的构造优化和参数调整,不仅能够显著提升节点的抗侧刚度,还能改善结构的整体力学行为,包括抗侧力分布、扭转效应控制以及整体稳定性保障。此外,考虑节点半刚性特性的设计方法进一步提高了计算精度,避免了传统简化假设带来的偏差,实现了结构性能与经济性的平衡。协同优化原则的应用则确保了节点性能与结构体系需求的匹配,增强了抗震能力和施工效率。未来的研究应继续关注复杂荷载工况下的节点性能演变规律,并探索新型材料与连接技术在模块化钢结构中的应用,以推动建筑工业化水平的不断提升。

参考文献

- [1]顾致军.模块化钢结构建筑在高烈度地震区的设计实践[J].绿色建筑,2022,14(6):57-60.DOI:10.3969/j.issn.1004-1672.2022.06.019.
- [2]黄蓉,赵欣,李娟,等.联肢模块化钢结构建筑综合效益评价[C]//2021年工业建筑学术交流会.1.河北工业大学土木与交通学院;2.天津市装配式建筑与智能建造重点实验室;3.河北工业大学建筑与艺术设计学院,2021.
- [3]李洋.模块化钢结构建筑集成化设计研究[J].艺术与设计(城市空间设计),2022.
- [4]王文静,李志武,于春义,等.模块化钢结构建筑结构体系研究进展[J].施工技术,2020,49(11):8.DOI:10.7672/sgjs2020110024.
- [5]翟思源,曹轲,李国强,等.柱承重模块化钢结构建筑模块间连接节点研究进展[J].建筑钢结构进展,2022,24(11):1-11.