

模块化钢结构建筑的连接节点性能及整体稳定性分析

汪晓英

江西可欣建设工程有限公司 江西九江 332000

摘 要：模块化钢结构建筑因建造快、工业化程度高、质量可控等优势在建筑领域广泛应用。其结构性能核心是连接节点，节点力学行为决定建筑整体安全与稳定。本文系统研究连接节点性能特征，分析不同节点构造与力学响应，探讨其荷载作用下的破坏模式。同时从整体层面阐述模块化建筑稳定性机制，分析结构体系、荷载路径对稳定性的影响。研究重点揭示连接节点性能与建筑整体稳定性的内在耦合关系，明确节点刚度、强度、延性对结构整体失稳模式、极限承载力和安全储备的决定性作用。通过理论分析、数值模拟与试验数据结合，提出优化节点设计提升整体结构稳定性的技术路径。研究成果为模块化钢结构建筑安全设计、性能评估与工程实践提供理论依据和技术参考，对推动其健康、高质量发展有重要工程价值。

关键词：模块化建筑；钢结构；连接节点；力学性能

引言

模块化钢结构建筑代表建筑工业化方向，其核心是将建筑结构划分为标准化三维模块单元，在工厂预制生产后运至现场吊装连接。这种方式缩短施工周期、减少环境干扰、提升构件精度。但与传统整体钢结构不同，模块化建筑结构完整性依赖现场连接节点，节点需传递竖向、水平荷载和弯矩，其性能关乎结构安全。目前，工程实践和学术研究对模块化钢结构连接节点力学行为及对整体稳定性影响机制缺乏系统认识，部分设计沿用传统理念，未考虑模块化连接特殊性，可能造成结构安全评估盲区。因此，剖析节点性能、揭示其与整体稳定性联系并形成科学设计优化方法，是保障建筑安全、推动技术进步的迫切需求。

一、模块化钢结构建筑连接节点性能分析

（一）连接节点的类型与构造特征

模块化钢结构连接节点依其在模块中位置和受力特点，主要分模块间角柱连接、模块间梁-梁连接及模块与基础连接。角柱连接是传力关键，构造多样，常见有内置螺栓连接、外置套筒连接和端板螺栓连接。内置螺栓连接通过在模块角柱内预设高强螺栓，现场对位拧紧，外观整洁，但对构件制造和安装精度要求高；外置套筒连接在角柱外以钢套筒包裹上下模块角柱，用螺栓贯穿紧固，对安装误差容忍度高，但节点外露或影响建筑美观与使用空间；端板螺栓连接在模块梁柱端部焊端板，现场用高强螺栓夹紧，力学性能明确，便于标准化生产。

这些构造特征决定节点初始刚度、承载和变形能力，是后续性能分析基础。

（二）连接节点的力学性能与影响因素

连接节点力学性能主要体现在弯矩-转角关系上，该曲线是评价节点刚度、强度和延性的核心依据。节点力学性能受多种因素影响，首先是螺栓预紧力，足够预紧力可保证连接板件紧密接触，通过摩擦力传荷，提升节点初始刚度和承载力；其次是连接板厚度与尺寸，较厚端板或套筒能减小板弯曲变形，提高节点刚度；焊缝质量也重要，工厂焊缝连接有缺陷会成节点破坏起源点；此外，构件制造公差和现场安装误差导致的几何缺陷，会降低节点实际性能，使其达不到设计预期^[1]。

（三）连接节点的试验与仿真研究现状

目前，对连接节点性能的研究主要采用试验测试和有限元仿真两种手段。试验研究方面，国内外学者已对多种典型节点形式进行了单调加载和低周反复加载试验，获取了其极限承载力、破坏模式和滞回特性等关键数据。这些试验结果验证了节点设计的可行性，并揭示了节点在地震作用下的耗能能力。然而，物理试验成本高、周期长，且参数化研究能力有限。随着计算力学的发展，有限元仿真成为研究节点性能的有力工具。通过建立精细化的三维实体模型，可以考虑材料非线性、接触非线性以及螺栓预紧力等复杂因素，准确模拟节点从弹性受力到塑性发展直至最终破坏的全过程。仿真研究能够系统性地分析各参数（如螺栓直径、端板厚度、材料强度等）对节点性能的影响规律，为节点优化设计提供大量

数据支持,但其计算结果的准确性高度依赖于本构模型和参数设置的合理性,需要与试验数据进行相互验证。

(四) 节点性能评价的关键指标与方法

评价一个连接节点性能的优劣,需要一套科学、量化的指标体系。关键指标包括:初始转动刚度,它决定了结构在正常使用状态下的变形大小,是控制结构舒适度和非结构构件损伤的重要参数;极限弯矩承载力,它代表了节点的最大抗弯能力,是结构安全设计的强度保证;延性系数,即节点极限破坏时的转角与屈服转角的比值,高延性意味着节点在进入塑性后仍能维持承载能力并消耗大量能量,对结构抗震至关重要;以及耗能能力,通过滞回曲线所包围的面积来衡量,反映了节点在地震等动力荷载下的能量耗散水平。评价方法上,除了通过试验和仿真直接获取上述指标外,还引入了组件法,该方法将节点拆解为若干个基本受力组件(如受拉螺栓区、受压柱翼缘区、受剪螺栓群等),通过计算各组件的力学特性来组合预测节点的整体性能,为节点设计提供了一种理论化的工具。

二、模块化钢结构建筑整体稳定性机制

(一) 整体稳定性的基本理论

模块化钢结构建筑的整体稳定性,是指结构在荷载作用下,能够维持其原有的平衡形态而不发生失稳(如屈曲)的能力。其基本理论源于弹性稳定理论和弹塑性稳定理论。对于常规的多层模块化建筑,整体失稳通常表现为有侧移的框架屈曲模式,即结构在水平荷载或竖向荷载的微小扰动下,产生不可恢复的侧向位移,最终导致承载能力丧失。结构的临界失稳荷载(欧拉荷载)是其稳定性的理论极限,该值与结构的抗侧刚度直接相关。抗侧刚度由两部分组成:一是框架梁柱自身的抗弯刚度,二是连接节点提供的转动刚度。在模块化建筑中,节点刚度往往成为影响整体抗侧刚度的关键因素^[2]。

(二) 结构体系对稳定性的影响

模块化建筑的结构体系布置方式对其整体稳定性有决定性影响。根据模块的堆叠方式,可分为非交错堆叠和交错堆叠。非交错堆叠结构,其上下模块的柱网完全对齐,荷载传递路径直接,但抗侧力体系需要依赖模块内部的支撑或剪力墙,以及模块间连接形成的整体框架效应。这种体系的稳定性对角柱连接的性能极为敏感。交错堆叠结构,如“花篮式”堆叠,上层模块的角柱坐落于下层模块的梁上,形成了类似搭积木的结构。这种布置使得荷载传递路径更为复杂,梁需要承受来自上层柱的集中荷载,其受力状态类似于承重梁。交错堆叠体

系通过模块间的相互搭接,自身具有一定的几何稳定性,但其整体稳定性分析必须考虑梁的局部屈曲和模块间连接的剪切性能,分析模型更为复杂。

(三) 荷载作用下的稳定性响应

在实际工程中,模块化建筑承受的荷载是复杂多样的。竖向恒载与活载是结构失稳的基本驱动力,它们通过柱子传递,使柱子处于受压状态。当竖向荷载接近临界值时,任何微小的水平扰动(如风荷载)都可能触发整体失稳。风荷载作为主要的水平荷载,其作用使结构产生侧移,在柱中引起附加弯矩,即P- Δ 效应。这种二阶效应会显著降低结构的稳定性。地震作用则更为复杂,它是一种强烈的动力荷载,不仅会引起结构的水平振动,还会产生竖向振动。在地震作用下,连接节点进入塑性是允许且期望的,通过节点的塑性变形来耗散地震能量,保护主体结构。但节点的塑性变形会降低其刚度,进而影响结构的整体稳定性,因此需要精确评估节点在循环荷载下的刚度退化规律及其对结构动力稳定性的影响^[3]。

(四) 稳定性分析中的关键技术难点

进行模块化钢结构建筑的整体稳定性分析,面临若干关键技术难点。首先是节点模型的合理简化。在整体结构模型中,如果对每个节点都进行精细的实体单元模拟,计算量将无法承受。因此,需要发展能够准确反映节点弯矩-转角关系的宏观模型,如弹簧单元或虚拟梁单元,如何确定这些宏观模型的参数是技术难点。其次是初始几何缺陷的考虑。实际结构必然存在制造和安装误差,这些缺陷会降低结构的稳定承载力。如何在模型中引入符合统计规律的初始缺陷,是保证分析结果贴近实际的关键。再次是几何非线性和材料非线性的耦合分析。结构的失稳是一个大变形、大转动问题,属于几何非线性;而节点和构件在达到极限承载力前会进入塑性,属于材料非线性。准确求解这两者耦合作用下的结构响应,对求解算法和计算能力提出了很高要求。

三、连接节点性能与整体稳定性的耦合关系

(一) 节点刚度对整体稳定性的影响机制

连接节点转动刚度是影响模块化建筑整体稳定性的核心参数。传统框架结构分析中,节点常简化为刚接或铰接,而模块化建筑连接节点为半刚性,其刚度介于两者之间,允许一定转动并传递弯矩。节点刚度变化会改变结构计算长度系数和抗侧刚度,影响整体失稳模式和临界荷载。节点刚度低时,结构抗侧靠柱子,计算长度系数增大、临界荷载降低,失稳模式接近铰接框架侧移

失稳；节点刚度高时，结构整体性增强，计算长度系数减小、临界荷载提高，失稳模式接近无侧移梁柱屈曲。所以，精确量化节点刚度并输入整体结构模型，是可靠性稳定性分析的前提。

（二）节点失效模式与结构安全性的关联

节点失效模式关系到结构安全性。节点可能的失效模式有螺栓拉断、连接板弯曲变形或撕裂、焊缝开裂等。不同失效模式对结构影响不同。节点因螺栓拉断或焊缝开裂发生脆性破坏，承载力瞬间丧失，可能引发连续性倒塌；节点因连接板塑性发展发生延性破坏，破坏前产生较大变形，为结构内力重分布提供时间，相邻构件和节点可分担部分荷载，避免结构立即崩塌，安全冗余度更好。因此，节点设计应优先选延性破坏构造形式，遵循“强节点、弱构件”原则，确保节点在构件屈服后仍能传力，为结构提供安全储备^[4]。

（三）节点-结构协同作用下的稳定性表现

模块化建筑的整体稳定性是所有节点与结构构件协同作用的结果。在荷载作用下，结构内力会根据各部分的刚度进行分配。刚度较大的节点和构件会承担更多的内力。这种协同作用使得结构的失稳过程表现出复杂的整体行为。例如，在非对称荷载或结构布置不规则的情况下，某些角部的节点可能首先进入塑性，其刚度退化会导致结构刚度分布不均，进而改变结构的振动特性和失稳模态，可能使结构在未达到理论整体临界荷载时，就因局部区域的过大变形而丧失使用功能。因此，稳定性分析不能孤立地看待单个节点，而必须将节点置于整个结构系统中，考察其在不同荷载阶段与周围构件的相互作用，以及这种相互作用对结构整体稳定性能的演变过程。

（四）提升节点性能以优化整体稳定性的路径

基于以上分析，可以通过优化节点性能来有效提升模块化建筑的整体稳定性。第一条路径是提高节点刚度。通过选用更高强度的螺栓、增加连接板厚度、优化焊缝设计等措施，可以使节点的力学行为更接近理想刚接，从而显著提高结构的整体抗侧刚度和临界荷载。第二条路径是增强节点延性。在保证足够承载力的前提下，通过构造设计，如设置加劲肋、采用软钢材料等，引导节点在破坏前发生可控的塑性变形，提高其耗能能力和安全冗余度。第三条路径是实现节点性能的标准化与可预

测性。通过大量的试验和仿真，建立标准节点库，明确每种标准节点在不同工况下的力学性能参数，为设计人员提供准确可靠的选用依据，避免因性能不确定性导致的设计偏差。这些优化路径的实施，能够将节点设计从被动的满足强度要求，转变为主动地、系统地提升结构整体性能，是实现模块化钢结构建筑高性能、高安全性的关键所在^[5]。

结语

模块化钢结构建筑的连接节点性能及其与整体稳定性的耦合关系是确保结构安全性和可靠性的核心问题。从节点的构造特征到力学性能，再到其在整体结构中的作用，每一个环节都直接影响着建筑的承载能力和抗灾表现。通过试验研究和仿真分析，逐步揭示了节点在不同荷载条件下的响应规律，为优化设计提供了科学依据。同时，节点刚度、延性及失效模式的合理控制，不仅是提升单个节点性能的关键，也是增强整体结构稳定性的有效途径。未来的研究应进一步聚焦于节点性能的标准化和精细化建模，结合先进的计算方法与实验技术，推动模块化钢结构建筑向更高效、更安全的方向发展。这将为建筑工业化进程提供强有力的技术支撑，并助力实现高性能建筑的广泛应用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 丁阳, 邓恩峰, 宗亮, 等. 模块化钢结构建筑连接节点研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 8. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.03.003.
- [3] 许峰, 张卓, 张玉波, 等. 模块化盒子建筑及其连接节点研究进展[C]//2022年工业建筑学术交流会. 1. 沈阳建筑大学土木工程学院; 2. 沈阳兆震现代建筑构件有限公司, 2022.
- [4] 李志武, 王文静, 于春义, 等. 模块化钢结构建筑模块单元间连接节点应用研究[J]. 施工技术, 2020, 49(11): 7. DOI: 10.7672/sjgs2020110006.
- [5] 朱谢雨, 晏景通, 吴继华. 钢结构模块化建筑连接节点最新进展[J]. 建筑结构, 2022(S2): 1532-1538.