

钢结构建筑节点设计与抗震性能优化

何 飞

天津房鉴院建筑工程质量检验检测有限公司 天津 300074

【摘要】：高层钢结构建筑抗震设计中，节点性能直接决定结构整体抗震安全，节点设计不当极易引发抗震薄弱问题。本文聚焦钢结构建筑节点抗震性能提升这一核心目标，系统分析节点设计现存的抗震性能短板，针对性提出节点抗震优化设计策略，为钢结构建筑节点抗震设计提供技术支撑，同时践行“强节点、弱构件”的抗震设计理念。

【关键词】：钢结构节点；抗震优化；节点设计；抗震验证

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.065

随着城镇化进程加快，高层钢结构建筑凭借轻量化、装配化的突出特性，在工程领域的应用日趋广泛。然而在地震作用下，节点往往成为结构抗震的薄弱环节，其性能优劣直接关联建筑整体安全。当前节点设计中普遍存在刚度匹配失衡、构造细节缺陷等问题，严重制约结构抗震能力的提升。在此背景下，开展钢结构建筑节点设计与抗震性能优化研究，探索科学的优化策略、实践适配路径与应用方案，对提升高层钢结构建筑的抗震可靠性、推动抗震设计技术发展具有重要现实意义，亦是当前结构工程领域的研究重点。

1 钢结构建筑节点设计的抗震性能短板

1.1 节点连接刚度不匹配的抗震隐患

节点连接刚度不匹配的抗震隐患，核心是钢结构体系内力传递失衡，瓦解整体协同抗震机制。梁柱节点连接刚度高于构件自身时，地震能量优先集中于节点区域，累积超出承载极限即引发突发性脆性破坏，无法借助结构塑性变形耗散地震能量，加剧震害影响。节点连接刚度低于构件时，地震荷载往复作用下节点区域易产生过度变形，导致构件连接松动甚至脱开，彻底破坏结构协同工作体系，显著降低整体抗震承载力。刚度不匹配改变结构固有振动特性，使自振周期趋近于地振动卓越周期，引发共振效应并放大震害程度，这类共振损伤从节点逐步蔓延至整个结构体系，最终造成更严重的破坏后果。

1.2 节点构造细节缺陷导致的抗震薄弱

节点构造细节缺陷引发的抗震薄弱问题，根源在于各组成部分衔接设计漏洞。梁柱节点域腹板厚度不足，难以有效传递梁端弯矩和剪力，地震荷载作用下易出现腹板屈曲，进而引发节点域剪切破坏，直接切断梁柱内力传递路径^[1]。节点螺栓布置间距不合理，造成螺栓群受力不均，部分螺栓承受超设计值荷载提前断裂，破坏节点连接整体性。焊缝焊接质量不佳，存在未焊透、夹渣等缺陷，焊缝部位即成为抗震薄弱环节，地震作用下易出现焊缝开裂，节点承载能力急剧下降。节点加劲肋设置位置不当或数量不足，无法有效增强节点区域刚度和强度，难以限制节点区域变形，进一步加剧节点抗震薄弱问题。

1.3 节点选型不当的抗震性能制约

节点材料选型不当对抗震性能的制约，源于材料力学性能与抗震需求的不匹配。节点区域钢材屈服强度高，塑性变形能力随之下降，地震作用下无法借塑性变形消耗地震能量，易发生脆性断裂，难以发挥钢结构延性抗震优势。钢材冲击韧性不足，地震荷载反复冲击下节点区域易生疲劳裂纹，裂纹扩展逐步削弱节点承载能力，最终导致节点破坏。节点连接高强度螺栓抗剪强度不足，地震剪力作用下会出现剪断情况，造成节点连接失效。钢材耐腐蚀性欠佳，长期使用中产生锈蚀，锈蚀减小钢材有效截面，降低节点强度与刚度，影响结构整体抗震性能，此类性能衰减随时间推移持续加剧。

1.4 复杂工况下节点抗震适应性不足问题

复杂工况下节点抗震适应性不足，体现在特殊荷载组合与环境条件对节点性能的影响。强震与风荷载耦合作用时，节点需同时承受往复水平地震力与周期性风力荷载，复合荷载令节点应力状态更复杂，易出现应力集中，超出设计承载能力。高烈度地震区地震动峰值加速度大，节点需承受更大惯性力，抗震设计未兼顾此需求时，承载与变形能力无法匹配实际抗震要求，易发生破坏^[2]。温度变化引发钢结构热胀冷缩，节点区域因构件变形差异产生温度应力，与地震应力叠加后，大幅增加节点受力负担，降低抗震可靠性。多遇与罕遇地震不同作用阶段，节点须具备不同性能表现，设计未实现多水准抗震目标，罕遇地震作用下会因性能不足引发结构倒塌，难以保障抗震安全性。

2 钢结构建筑节点抗震优化设计策略

2.1 基于刚度协调的节点连接形式优化

基于刚度协调的节点连接形式优化，核心目标为结构整体刚度分布均衡，精细化调整节点刚度特性，实现与梁柱构件刚度适配，保障地震作用下结构形成协同受力体系。传统刚性节点因刚度突变，节点域易产生显著应力集中引发脆性破坏，可采用半刚性节点连接优化。节点连接部位设置摩擦型阻尼器或滑移连接件，动态调控转动刚度，使节点刚度与梁柱构件抗弯刚度形成合理比例，确保地震作用下内力在节点与构件间均匀

传递, 规避局部刚度突变导致的应力集中, 提升节点抗震安全。门式刚架结构梁柱节点可采用改进型端板连接, 优化端板厚度参数、螺栓排列方式与间距, 增强节点抗剪承载能力与抗弯刚度, 使节点刚度特性精准匹配结构动力响应特性, 从根本上降低地震作用下结构因刚度不匹配引发的共振风险。优化思路打破传统刚性与铰接节点二元对立认知, 构建刚度连续可调的节点设计体系, 为不同抗震烈度区钢结构节点设计提供兼具针对性与可行性的技术方案, 细化技术路径可直接指导工程实践中节点连接形式选型与参数确定, 提升节点设计科学性与可靠性。

2.2 强化抗震性能节点构造和细节设计

强化抗震性能节点构造细节设计, 聚焦节点域应力薄弱区域, 通过多维度精细化构造处理, 提升节点延性储备与抗破坏能力, 确保地震荷载往复作用下保持稳定力学性能。梁柱节点域腹板易屈曲, 可采用腹板加劲肋优化布置, 合理设置横向与纵向加劲肋形成立体支撑体系, 增强节点域腹板抗剪刚度与整体稳定性, 防止地震荷载作用下腹板局部屈曲变形; 加劲肋端部采用圆弧过渡处理, 平滑衔接构件界面, 避免直角过渡引发的应力集中, 抑制裂纹萌生与扩展^[3]。节点焊缝连接采用坡口全熔透焊接, 保证焊缝与母材形成可靠传力界面; 焊接完成后精细打磨焊缝表面, 消除焊缝余高带来的应力集中隐患, 焊缝两侧预设焊接收缩槽, 释放焊接过程体积变化, 减少焊接残余应力对节点长期抗震性能的不利影响。螺栓连接节点采用螺栓群错列布置, 打破传统并列布置受力局限, 优化螺栓群受力分布, 避免边缘螺栓因应力集中过大提前失效; 螺栓孔处设置应力缓和槽, 降低孔边应力集中系数, 提升螺栓连接承载可靠性。这些构造细节优化措施从微观层面补齐节点抗震设计短板, 对应设计方法可弥补传统节点构造缺陷, 为高烈度地震区钢结构节点抗震设计提供关键技术支撑。

2.3 适配抗震需求的节点材料选型方案

适配抗震需求的节点材料选型, 核心在于材料力学性能与抗震需求匹配, 兼顾强度、延性及疲劳性能。节点主体钢材优先选用屈服强度适中、塑性变形能力强的低合金高强度结构钢, 地震作用下可借塑性变形消耗地震能量, 避免节点脆性破坏, 钢材需满足较高冲击韧性要求, 保障低温或动力荷载下力学性能稳定。节点连接用高强度螺栓, 选用抗拉与抗剪强度协同匹配材料, 规避螺栓强度高导致的延性不足问题, 同时须具备良好抗松弛性能, 防止长期使用中应力松弛引发节点连接松动。节点阻尼部件材料可采用高阻尼橡胶或形状记忆合金, 这类材料通过自身变形特性消耗地震能量, 提升节点耗能能力, 形状记忆合金的自复位功能可使节点震后恢复初始状态, 减少结构残余变形。材料选型策略实现材料性能与节点抗震功能深度耦合, 选型原则可为不同抗震等级钢结构节点提供科学材料选择依据。见图 1。



图 1 适配抗震需求的节点材料选型流程图

2.4 复杂工况下节点抗震适应性提升措施

复杂工况下节点抗震适应性提升措施, 需针对地震与其他荷载耦合场景, 构建多工况协同的节点抗震设计体系。强震与风荷载耦合工况下, 节点处设置耦合荷载受力缓冲装置, 连接部位增设弹性支座, 消解风荷载周期性振动对节点的影响, 避免荷载叠加效应引发节点应力超限^[4]。高烈度地震区节点设计采用性能化方法, 提升承载能力储备, 确保罕遇地震下仍保持稳定力学性能; 节点处设置塑性铰区, 引导塑性变形集中于预设区域, 避免核心区破坏。温度应力与地震应力叠加工况, 节点处设置温度变形补偿装置, 采用滑动式节点构造释放温度引发的结构变形, 降低温度应力对节点抗震性能的不利影响。多遇与罕遇地震不同作用阶段, 采用分级耗能节点设计方案, 使节点在多遇地震下具备足够刚度, 罕遇地震下通过耗能部件变形消耗能量, 实现多水准抗震性能目标。这些措施突破传统节点设计单一工况局限性, 为复杂环境下钢结构节点抗震设计提供系统性解决方案。

3 钢结构建筑节点优化设计的实践应用与适配性分析

3.1 优化设计在不同建筑类型中的实践适配

钢结构节点优化设计需紧密结合不同建筑类型的结构特性与抗震需求, 实现针对性适配应用^[5]。对于高层住宅钢结构建筑, 节点设计需兼顾居住舒适度与抗震安全性, 优化后的半刚性节点连接形式可有效降低结构振动传递, 减少地震作用下的室内振动响应, 同时通过加劲肋优化布置与低合金高强度钢材选型, 在保障抗震性能的前提下合理控制节点体积, 满足住宅室内空间利用需求。工业厂房钢结构因跨度较大、荷载条件复杂, 节点优化重点在于提升抗疲劳性能与荷载适应性, 采用错列布置的螺栓连接与坡口全熔透焊接工艺, 可增强节点连接整体性, 抵御厂房生产过程中设备振动与地震荷载的叠加作

用,高阻尼橡胶阻尼部件的应用则能有效消耗振动能量,保护节点核心区域。大跨度公共建筑如会展中心、体育馆等,节点需承担较大跨度带来的弯矩与剪力,改进型端板连接与温度变形补偿装置的组合应用,可平衡节点刚度与变形适应性,既满足大跨度结构的受力传递要求,又能释放温度变化引发的附加应力,避免节点因长期应力累积产生损伤。

3.2 不同抗震烈度区的优化设计参数适配调整

针对不同抗震烈度区的地震动特性,需对节点优化设计参数进行差异化调整,确保设计方案的针对性与有效性。低烈度地震区,地震作用相对温和,节点优化以经济性与基本抗震性能的平衡为核心,主体钢材可选用低合金高强度钢的基础型号,螺栓强度等级按常规抗震要求配置,节点连接形式采用简化版半刚性连接,在保障刚度协调的同时合理控制工程成本。中烈度地震区,需强化节点承载能力与延性储备,主体钢材选用冲击韧性更优的低合金高强度钢,节点域适当增加横向加劲肋密度,螺栓群采用错列布置并合理调整边缘螺栓间距,焊缝采用坡口全熔透焊接并优化焊脚高度,提升节点抗剪与抗弯能力,确保地震作用下不发生脆性破坏。高烈度地震区,节点优化需聚焦极限抗震性能,采用性能化设计思路,主体钢材选用高延性低合金高强度钢,节点处设置专门的塑性铰区与耗能部件,采用双面加强板焊接与高强度螺栓组合连接形式,大幅提升节点承载能力储备,同时配置形状记忆合金阻尼部件,实现震后自复位功能,减少结构残余变形,保障罕遇地震下结构不倒塌。

参考文献:

- [1] 崔灿.某超高层住宅结构设计及抗震性能分析[J].广州建筑,2025,53(12):35-40.
- [2] 李振亚.超长混合建筑设计优化与抗震性能提升研究[J].江苏建材,2025,(05):85-86.
- [3] 马兴成.钢结构高层建筑抗震性能分析与优化设计[J].中国建筑金属结构,2025,24(12):109-111.
- [4] 徐昕.高层建筑结构设计中抗震性能优化策略[J].城市开发,2025,(08):147-149.
- [5] 张文明,牛家乐.钢结构厂房抗震性能评估及减震设计优化[J].粘接,2025,52(03):173-176.

3.3 优化设计的长期耐久性与维护适配考量

节点优化设计不仅需满足短期抗震性能要求,还应兼顾长期使用中的耐久性与维护便捷性,延长结构整体服役寿命。在耐久性适配方面,针对节点易锈蚀部位,选用耐腐蚀性更强的低合金高强度钢,或对节点表面进行防腐涂层处理,螺栓连接处采用防腐密封垫圈,防止水分侵入引发锈蚀;对于高湿度、腐蚀性环境下的钢结构建筑,节点阻尼部件选用耐老化的高阻尼橡胶或不锈钢材质,避免长期使用中材料性能衰减。在维护适配设计方面,优化节点构造形式,减少隐蔽性连接部位,确保维护人员可便捷检测螺栓预紧力、焊缝完整性及钢材锈蚀情况;采用模块化设计的阻尼部件,便于后期更换与升级,无需对节点核心结构进行大规模拆解;建立节点性能长期监测机制,在关键节点处设置应力传感器与位移监测装置,实时追踪节点力学性能变化,为维护决策提供数据支撑,确保节点长期保持稳定的抗震性能。

4 结语

钢结构建筑节点设计与抗震性能优化,是保障高层钢结构抗震安全的核心环节。通过系统梳理节点抗震性能短板,针对性提出刚度协调优化、构造细节强化、材料精准选型及复杂工况适配等策略,并结合数值模拟、试验验证等多元技术手段完成效果核验,形成了完整的“问题分析—优化设计—实践适配”技术体系。该体系可有效提升节点及整体结构的抗震能力,践行“强节点、弱构件”设计理念,为不同工况及烈度区的钢结构节点设计提供可靠技术参考,助力提升高层钢结构建筑的抗震安全性与耐久性。