

Refined analysis and optimization of seismic performance of steel column support nodes in industrial plants

Shuai Zhang

Huangyu Chuan Coal Mine Guoneng Yili Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

As the core load-bearing hub of the lateral force-resisting system in industrial plants, the steel column-brace joint directly determines the seismic safety and integrity of the structure under earthquake action. To address issues such as ambiguous identification of weak links and insufficient ductility control in traditional joint designs, this study adopts a refined analytical approach, systematically exploring the key seismic influencing factors of steel column-brace joints by examining their mechanical behavior and failure modes. By clarifying the stress transmission path and plastic development patterns in the joint zone, the formation mechanism of weak links in the connection area between braces and steel columns is revealed. Based on the damage control concept, an improvement scheme centered on joint construction reinforcement and energy dissipation path optimization is proposed. Through measures such as rational stiffener arrangement and connection form optimization, the seismic design objective of “strong joint-weak member” is achieved.

Keywords

industrial plant; steel column-support joint; seismic performance; refined analysis; joint optimization

工业厂房钢柱－支撑节点抗震性能精细化分析与优化

张帅

国能亿利能源有限责任公司黄玉川煤矿，中国·内蒙古鄂尔多斯 017000

摘 要

钢柱－支撑节点作为工业厂房抗侧力体系的核心传力枢纽，其抗震性能直接决定结构在地震作用下的安全性与整体性。为解决传统节点设计中存在的薄弱环节识别模糊、延性控制不足等问题，本文采用精细化分析思路，从节点受力机理、破坏模式入手，系统探讨钢柱－支撑节点的抗震关键影响因素。通过明确节点域应力传递路径、塑性发展规律，揭示支撑与钢柱连接区域的薄弱环节形成机制。基于损伤控制理念，提出以节点构造强化、耗能路径优化为核心的改进方案，通过合理设置加劲肋、优化连接形式等措施，实现“强节点弱构件”的抗震设计目标。

关键词

工业厂房；钢柱－支撑节点；抗震性能；精细化分析；节点优化

1 引言

工业厂房作为工业生产的核心载体，其结构安全对保障生产连续性与人员安全具有不可替代的作用。钢结构凭借自重轻、强度高、施工便捷等优势，已成为大跨度、重型工业厂房的主流结构形式，而钢柱－支撑体系作为钢结构厂房的核心抗侧力单元，在地震作用下承担着主要的水平荷载传递任务。钢柱－支撑节点作为连接钢柱与支撑的关键部位，既是力的传递枢纽，也是结构抗震的薄弱环节——历次震害调查显示，多数钢结构厂房的破坏并非源于主体构件失效，而是节点区域因应力集中、构造缺陷导致的过早破坏，进而引发整体结构坍塌。当前传统节点设计多基于整体结构的宏观分析，对节点域的局部受力特性、塑性发展路径等细节关

注不足，易导致节点延性不足、耗能能力薄弱等问题。随着抗震设计理念向“性能化”“精细化”转型，亟需突破传统设计的局限性，从微观受力机理出发，精准识别节点薄弱环节，提出针对性的优化策略。本文以工业厂房钢柱－支撑节点为研究对象，开展抗震性能精细化分析，揭示节点破坏机理，构建科学的优化体系，为提升工业厂房钢结构的抗震安全水平提供可靠依据。

2 钢柱－支撑节点抗震性能精细化分析体系构建

2.1 节点受力机理与破坏模式解析

钢柱－支撑节点的受力过程本质是应力在钢柱、支撑与连接部件间的传递与重分布过程。在地震作用初期，节点处于弹性阶段，应力沿连接焊缝或螺栓群均匀分布，荷载由钢柱与支撑协同承担；随着荷载增大，节点域率先出现应力集中，通常集中于支撑与钢柱的连接界面、焊缝端部及节点

【作者简介】张帅（1992－），男，中国内蒙古鄂尔多斯人，本科，助理工程师，从事工业建筑，房屋建筑研究。

板薄弱区域。当应力达到钢材屈服强度后,节点进入塑性阶段,塑性变形开始累积,此时若构造设计不合理,易出现三种典型破坏模式:一是节点板屈曲破坏,由于节点板厚度不足或宽厚比过大,在压力作用下发生平面外屈曲,导致荷载传递中断;二是连接焊缝撕裂破坏,焊缝质量不足或焊脚尺寸偏小,在反复荷载作用下出现疲劳撕裂;三是支撑端部屈服破坏,支撑与节点板连接区域因应力集中过早屈服,无法充分发挥主体构件的承载能力。从传力路径来看,合理的节点应保证应力从支撑平稳过渡到钢柱,避免出现应力突变。研究表明,支撑与钢柱的夹角、节点板的几何尺寸对传力效率影响显著——当支撑与钢柱夹角为 45° 左右时,应力传递路径最短,节点域应力分布最均匀;而节点板的宽厚比过大时,易产生局部应力集中,诱发早期破坏。此外,装配式节点的螺栓预紧力不足会导致连接滑移,破坏应力传递的连续性,进一步加剧节点的抗震性能劣化。

2.2 精细化分析方法的核心要点

相较于传统的宏观分析方法,精细化分析更注重节点构造细节与材料本构关系的精准模拟。在模型构建阶段,需完整还原节点的实际构造,包括节点板尺寸、加劲肋布置、焊缝尺寸、螺栓型号及布置方式等,避免因简化构造导致的分析误差。材料本构关系应采用弹塑性模型,充分考虑钢材的屈服强化、应变硬化及低周疲劳特性,以准确反映节点在反复地震作用下的塑性发展过程。在加载方式选择上,采用拟静力循环加载方法模拟地震作用下的往复荷载,通过逐级加载观察节点的刚度退化、承载力变化及塑性变形发展规律。分析过程中需重点关注节点域的应力云图分布、塑性铰出现的位置及发展顺序,判断节点的薄弱环节。同时,结合静力弹塑性分析方法,模拟节点从弹性到塑性破坏的全过程,明确节点的屈服机制与抗倒塌能力,为后续优化设计提供精准的靶向依据。

2.3 抗震性能评价的关键指标

节点的抗震性能需通过量化指标进行综合评价,核心指标包括承载力、延性、耗能能力及刚度退化特性。承载力反映节点抵抗地震荷载的极限能力,需保证节点的极限承载力不低于支撑或钢柱的承载力,避免节点先于主体构件破坏;延性作为衡量节点塑性变形能力的关键指标,通过延性系数体现,即节点极限位移与屈服位移的比值,较高的延性可使节点在地震作用下通过塑性变形耗散能量,避免脆性破坏;耗能能力通过节点的滞回曲线包围面积衡量,滞回曲线越饱满,说明节点的耗能能力越强,地震作用下的能量吸收效果越好;刚度退化反映节点在反复荷载作用下的性能衰减规律,合理的刚度退化应平缓有序,避免因刚度突变导致结构动力响应加剧。此外,节点的损伤控制效果也是重要评价指标,优质的节点应实现“损伤可控、修复便捷”,即塑性变形集中于预设的耗能部件,主体构件保持完好,震后仅需

更换耗能部件即可恢复结构功能。

3 钢柱—支撑节点抗震性能的关键影响因素分析

3.1 构造参数的影响

节点板作为钢柱—支撑节点的核心传力部件,其几何参数对节点抗震性能起决定性作用。节点板的厚度直接影响其承载能力与抗屈曲性能,厚度不足会导致节点板在压力作用下过早屈曲,而厚度过大则会增加节点自重与施工难度,需根据支撑轴力大小合理匹配。节点板的宽厚比是控制局部屈曲的关键指标,过大的宽厚比会使节点板自由边出现局部鼓曲,破坏应力传递的均匀性,通过设置加劲肋可有效约束节点板的屈曲变形,提升节点的整体刚度。加劲肋的布置方式与尺寸也会显著影响节点性能。在支撑与钢柱的连接区域设置横向加劲肋,可有效分散焊缝端部的应力集中,延缓焊缝撕裂破坏的发生;在节点板中部设置纵向加劲肋,能增强节点板的平面外刚度,抑制屈曲变形。此外,支撑与钢柱的夹角直接改变传力路径,夹角过大或过小都会导致节点域应力集中加剧,合理的夹角设置需结合厂房跨度、高度及抗侧力需求综合确定。

3.2 连接方式的影响

钢柱—支撑节点的连接方式主要分为焊接连接与螺栓连接,两种连接方式的抗震性能存在显著差异。焊接连接通过焊缝实现钢柱与支撑的刚性连接,传力直接、整体性好,但焊缝本身易存在缺陷,在反复地震荷载作用下易出现疲劳撕裂,尤其是角焊缝的端部的应力集中问题更为突出,需通过全熔透焊缝及焊缝补强措施提升其抗震可靠性。螺栓连接具有施工便捷、可更换性强的优势,其中高强度螺栓连接通过预紧力形成的摩擦力传递荷载,在地震作用下具有一定的延性。但螺栓布置方式会影响连接性能,螺栓群的排列应与应力传递方向一致,避免出现螺栓受力不均的情况。近年来,摩擦型螺栓连接结合焊缝的混合连接方式逐渐得到应用,通过焊缝承担主要荷载,螺栓提供额外的抗剪能力,可兼顾连接的刚性与延性,提升节点的抗震稳定性。

3.3 材料性能的影响

钢材的力学性能直接决定节点的抗震潜力,节点设计中应优先选用延性好、屈强比合理的钢材,确保节点在地震作用下能通过塑性变形耗散能量,避免脆性破坏。钢材的伸长率是衡量延性的关键指标,伸长率不足会导致节点在达到屈服强度后迅速发生断裂,无法发挥耗能作用。同时,钢材的焊接性能也至关重要,焊接性能差的钢材易在焊缝区域出现裂纹,影响连接的整体性。节点板、加劲肋等部件的材料匹配性也需要重视,若各部件钢材强度差异过大,会导致应力集中转移至强度较低的部件,引发过早破坏。此外,在腐蚀性较强的工业环境中,需采用耐候钢或通过防腐处理提升材料耐久性,避免材料性能退化导致节点抗震性能下降。

表 1 钢柱 – 支撑节点不同连接方式及抗震性能对比表

连接方式	核心连接特点	抗震不足
焊接连接	通过焊缝实现钢柱与支撑的刚性连接，传力直接，整体性强	1. 焊缝易存在焊接缺陷（如夹渣、气孔等）；2. 反复地震荷载下易发生疲劳撕裂；3. 角焊缝端部应力集中问题突出，易率先破坏
螺栓连接 (以高强度螺栓为例)	通过螺栓预紧力形成摩擦力传递荷载，施工便捷，可更换性强	1. 整体刚度较焊接连接低；2. 螺栓布置方式影响连接性能，若排列与应力传递方向不一致，易出现螺栓群受力不均；3. 长期使用后可能存在预紧力损失，影响传力效果
混合连接 (摩擦型螺栓 + 焊缝)	结合焊缝与摩擦型螺栓的优势，焊缝承担主要荷载，螺栓提供额外抗剪能力	1. 施工工序较单一连接方式复杂，需协调焊接与螺栓安装顺序；2. 两种连接形式的受力协同需精准设计，避免荷载分配不均

4 钢柱 – 支撑节点抗震优化策略与验证

4.1 构造优化策略

针对节点板屈曲问题，优化方案采用“增厚 + 加劲”的双重强化措施：根据支撑轴力计算确定节点板的最小厚度，同时在节点板自由边及应力集中区域设置加劲肋，加劲肋的高度与厚度需保证与节点板形成整体受力体系，抑制局部屈曲变形。对于支撑与钢柱连接区域的应力集中问题，通过扩大节点板与钢柱的连接面积，采用圆弧过渡替代直角过渡，减缓应力突变，同时在焊缝端部设置焊缝补强段，提升焊缝的抗撕裂能力。对于装配式节点，优化螺栓布置方式，采用对称排列的螺栓群，确保螺栓受力均匀，同时在螺栓孔周围设置环形夹紧圈，避免螺栓孔处出现应力集中导致的板材开裂。

4.2 连接方式优化策略

焊接连接优化以提升焊缝可靠性为核心，将传统角焊缝改为全熔透焊缝，通过无损检测确保焊缝质量，避免焊缝缺陷导致的早期破坏。在焊缝与母材的过渡区域进行打磨处理，减少应力集中，同时在焊缝附近设置焊缝垫板，提升焊缝根部的承载能力。对于螺栓连接，采用高强度摩擦型螺栓，通过精确控制预紧力确保连接的摩擦力传递效果，螺栓群布置采用“多排对称”方式，避免出现螺栓受力不均的情况。对于重要厂房的节点，采用“焊缝 + 摩擦型螺栓”的混合连接方式，焊缝承担主要的轴力与弯矩，螺栓承担部分剪力，同时利用螺栓的滑移特性提供一定的延性，形成“刚性传力 + 柔性耗能”的双重保障机制。

4.3 耗能机制优化策略

基于损伤控制理念，优化方案通过预设耗能区域实现

“强主体、弱耗能”的设计目标。在支撑端部设置削弱段，通过减小支撑截面尺寸或开设槽口，引导塑性变形集中于削弱段，避免节点板或钢柱出现塑性损伤。削弱段的尺寸需精确计算，确保其屈服强度低于主体构件，同时保证足够的延性与耗能能力。此外，可在节点域设置辅助耗能装置，如在节点板与钢柱之间设置摩擦阻尼器，利用摩擦耗能吸收地震能量，减少主体构件的受力。这种优化策略不仅提升了节点的耗能能力，还实现了震后快速修复，降低了灾害损失。

5 结语

钢柱 – 支撑节点的抗震性能是工业厂房钢结构安全的核心保障，精细化分析为节点性能评估与优化提供了精准手段。本文通过对节点受力机理、破坏模式的深入解析，明确了节点板几何参数、连接方式、材料性能等关键影响因素的作用机制，揭示了支撑与钢柱连接区域应力集中、节点板屈曲等薄弱环节的形成原因。

基于分析结果提出的构造强化、连接优化及耗能机制改进策略，可有效引导节点塑性变形发展，提升节点的承载力、延性与耗能能力，实现“强节点弱构件”的抗震设计目标。优化后的节点通过预设耗能区域，使塑性损伤集中于可控范围，既保证了结构的抗震安全性，又为震后修复提供了便利。

参考文献

- [1] 刘泽江.公路桥梁抗震性能的精细化数值模拟与损伤识别技术[J].交通世界,2025,(25):162-164.
- [2] 薛建阳,宋德军,吴晨伟.古建筑木结构斗拱力学性能研究现状及综述分析[J].建筑结构学报,1-17.
- [3] 周佳,童根树,刘宜丰,冯远,张磊.钢结构精细化抗震设计方法综述[J].建筑结构,2023,53(23):149-154.