 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i5.10271

Research on Stability Analysis and Reinforcement Technology of Steel Structure Engineering

Shengjie Zhao

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract

Steel structures have gained widespread application in engineering construction due to their advantages of high strength, lightweight self-weight, and construction convenience. However, stability issues become increasingly prominent under complex stress conditions, variable structural constraints, and external environmental influences. Once structural stability fails, it often manifests sudden and irreversible characteristics, posing significant risks to engineering safety. Therefore, systematic research on the stability characteristics of steel structure projects and in-depth analysis of component instability mechanisms along with structural interaction effects are crucial for enhancing engineering safety performance. This study focuses on discussing the stability of steel structure components, overall structural stability, and the impact of connection nodes on stability. Through engineering case studies, we explore the applicability, structural requirements, and safety benefits of various reinforcement technologies. Comparative analysis of reinforcement methods provides references for post-construction maintenance and performance improvement of steel structures, ensuring reliable operational conditions throughout their entire lifecycle.

Keywords

steel structure; stability analysis; element instability; global stability; reinforcement technology

钢结构工程稳定性分析及加固技术研究

赵圣杰

重庆交通大学，中国·重庆 400074

摘　要

钢结构以强度高、自重轻与施工便捷等优势在工程建设中得到广泛应用，但在受力复杂、构造约束多变及外界环境影响的条件下，其稳定性问题愈加突出。结构一旦发生稳定失效，常呈现突发性与不可逆性，给工程安全带来较大风险，因此，对钢结构工程的稳定性特征进行系统研究，对构件失稳机理及整体结构协同作用进行深入分析，对于提升工程安全性能具有重要价值。本研究围绕钢结构构件稳定、整体稳定及连接节点对稳定性的影响展开论述，并结合工程实例探讨不同加固技术的适用性、构造要求及安全效益。通过对加固方法的比较，可为钢结构工程后期维护与性能提升提供参考，使结构在全寿命周期内保持可靠工作状态。

关键词

钢结构；稳定性分析；构件失稳；整体稳定；加固技术

1 引言

钢结构在大型公共建筑、工业厂房及桥梁工程中应用频繁，其工程规模不断扩大，结构体系日益复杂，使稳定性分析成为工程领域关注的重点。稳定问题常涉及构件屈曲、整体侧移、节点柔度变化以及外荷载耦合作用等因素，任何一个环节出现偏差都可能影响整体承载能力。在现代工程实践中，结构安全不仅依赖设计阶段的理论计算，更依赖施工质量、材料性能、节点细部构造与运营期间的管理水平，稳定问题贯穿结构生命全过程。为避免结构进入危险状态，必须通过理论研究、工程经验与技术创新构建系统化稳定控制与加固策略。本研究旨在从力学机理、工程表现及加固措施三个层面展开论述，为钢结构稳定性能的提升提供理论支撑与工程依据。

【作者简介】赵圣杰（1999–），女，中国河南人，硕士，从事结构工程研究。

2 钢结构稳定性影响因素分析

2.1 构件受力特征对稳定性能的影响

钢结构构件的稳定性与受力方式密切相关，压弯构件、受压杆件、薄壁构件等类型在工程中均具有代表性。当构件在承受轴向压力时，局部初始缺陷、材料屈服特性及制造误差会导致应力分布出现偏移，使杆件更容易产生弯曲变形。在压弯状态下，附加弯矩会改变构件的应力轨迹，使失稳更早发生。薄壁型钢由于壁厚较小，受外压时容易形成局部凹

陷，局部屈曲与整体屈曲的相互耦合会使分析更加复杂。构件长度越大，细长比越高，越容易发生失稳，实际工程中需结合几何指标和约束条件综合评估构件的稳定性能。

2.2 整体结构布置与约束体系的影响

结构布置对稳定性的作用不仅体现在构件层面，还关系到整体体系受力路径的连续性。框架结构中，柱间支撑体系决定了结构的整体侧向刚度，支撑不足会导致侧移增加，使构件进入不利受力状态。屋盖体系中，檩条、横向水平杆、支撑系统等共同形成空间稳定体系，任何一个环节弱化都可能造成局部区域刚度不足。在多层钢结构中，楼层布置不规则、刚度突变或开洞结构，会使侧移模式发生变化，影响整体稳定性。基础约束条件同样不可忽视，若基础沉降不均会破坏结构的力学平衡，使构件出现附加内力，引发稳定问题。

2.3 节点构造与连接刚度的影响

节点作为钢结构能量传递的关键位置，其刚度与构造形式对稳定性能具有显著影响。刚接节点提供较大转动约束，可增强结构侧向刚度，使整体稳定性提高；而铰接节点则允许转动，对稳定的贡献较弱，需要通过布置支撑体系进行补偿。节点板厚度、连接螺栓数量、焊缝尺寸等构造因素会直接影响节点的抗变形能力。若节点刚度不足，构件受力路径会局部改变，使结构进入非设计状态，进而导致整体稳定性下降。在工程实践中，节点损伤或连接松动常是结构稳定性降低的重要诱因。

3 钢结构构件失稳机理与分析方法

3.1 构件整体屈曲机理

构件整体屈曲是钢结构稳定研究中的关键内容，在轴压荷载不断增加的过程中，构件内的弯曲刚度逐渐下降，当轴压力达到临界值时，结构平衡状态被破坏，构件会突然向某一侧发生弯曲变形。此类失稳属于几何变形引起的稳定破坏，而非材料失效，其发生时间与构件长度、细长比、截面形状和边界约束具有直接关系。欧拉屈曲理论为理想构件的屈曲分析提供基础，但实际工程中构件不可避免存在初始弯曲、残余应力、焊接变形和荷载偏心，使屈曲行为与理论预测存在差异，需要采用修正屈曲公式或非线性分析方法进行评价。不同受力特征的构件，如轴心受压构件、压弯构件或受剪构件，在屈曲模式与临界荷载方面存在显著差异，因此需要结合受力路径、支撑条件与构件几何特性进行分类分析，使整体屈曲研究能够更准确反映工程实际受力状态。

3.2 局部屈曲机理

局部屈曲通常发生在薄壁构件或由板件组成的截面中，其典型表现为局部区域产生波状凹陷，使板件在尚未发生整体屈曲之前出现失稳。当构件的宽厚比超出规范限值或受力区域板件受到集中压缩作用时，局部屈曲的风险显著提升。局部屈曲的发生不仅降低构件的有效承载面积，还会使截面整体刚度下降，导致内力重新分布，受力集中于未屈曲区域，从而引发新的薄弱点。随着局部屈曲的发展，构件可能逐渐演化为整体失稳，结构安全性受到严重影响。工程实践中为了改善板件稳定性能，常通过控制宽厚比、提高钢材强度、增加纵向或横向加劲肋、采用闭口截面或提高局部约束程度等方式来抑制局部屈曲的发展。通过对板件应力分布特征与屈曲模式的研究，可为构件设计提供更加可靠的稳定性控制策略，使其整体性能在长期荷载作用下保持稳定。

3.3 弹塑性稳定与几何非线性影响

构件在实际受力过程中往往并非在完全弹性阶段达到屈曲临界点，而是在一定程度的材料屈服下继续承载，使弹塑性效应成为影响稳定性能的重要因素。材料进入屈服阶段后刚度下降，使构件抵抗变形的能力减弱，屈曲可能提前发生或呈现不同的发展模式。在大变形条件下，几何非线性效应更加突出，构件弯曲变形与轴向压力相互作用，使应力分布不断变化，并导致屈曲行为呈现更强的敏感性。现代钢结构稳定性分析普遍采用非线性有限元方法，将材料非线性、几何非线性以及初始缺陷作为综合变量纳入计算过程，使分析结果能够更接近实际工程表现。基于数值模拟可观察构件从受力、变形到最终屈曲的全过程，为加固设计、截面优化与构造改进提供可靠依据。对于复杂受力构件，非线性分析能够揭示弹塑性阶段的真实稳定特征，使结构设计更加安全稳健。

4 钢结构整体稳定性及空间协同效应分析

4.1 钢框架结构的侧向稳定机理

钢框架结构在水平荷载作用下会产生整体侧移，而侧移幅度的扩大将改变构件内力分布，使结构逐渐接近失稳边界。框架柱的弯矩放大效应在侧移过程中不断累积，使压弯作用更加显著，从而削弱整体承载能力。侧向稳定性受框架整体刚度、层间刚度分布、节点转动约束及支撑体系的综合影响。如果结构在高度方向存在刚度突变，侧移模式容易出现不均匀放大，使局部区域的构件进入不利受力状态。高层钢结构在风荷载与地震作用下表现尤其敏感，通过核心筒、加强层、斜撑或框架 – 筒体协同体系等方式可以有效提高侧向抗力，使水平荷载在结构内部形成稳定的传递路径。合理的结构布置不仅提升局部构件强度，更能通过改善受力协同来降低整体侧移需求，使结构在复杂荷载作用下保持足够的稳定储备。

4.2 钢结构空间协同作用的影响

钢结构整体稳定性并不取决于单一构件性能，而是依靠各受力单元之间的协同作用形成空间体系。支撑构件、楼盖板、檩条、系杆以及水平联系杆等共同构成受力网络，使结构能够以三维模式抵抗水平荷载。空间协同效应使结构在外力作用下形成统一变形模式，当某一部分刚度提高时，其影响会通过构件之间的连接关系扩散至整体体系，使结构的稳定性能得到不同程度的提升。屋盖和大跨结构中，桁架体

系与屋面板协同承担横向作用，其整体刚度往往高于单构件叠加所得。空间协同亦会暴露体系中的薄弱环节，若某节点刚度不足、杆件失效或连接松动，受力路径便可能出现中断，引发局部甚至整体稳定性下降。

4.3 施工阶段的结构稳定问题

施工阶段的钢结构由于尚未形成最终的体系刚度，处于力学行为最为敏感的状态。部分构件在未完成全部连接时仅具有临时受力能力，节点刚度偏低，使结构更容易受到风荷载、振动或施工扰动的影响而产生不利变形。吊装顺序的不合理可能导致构件受力与设计工况不匹配，使局部杆件出现早期失稳风险。焊接施工造成的收缩变形也会对构件初始状态产生影响，使其在后续加载中更易形成弯曲或扭曲模式。施工现场若缺乏有效的临时支撑体系，会使局部结构处于自由长度过大的状态，从而增大屈曲可能性。

5 钢结构加固技术的应用及效果分析

5.1 构件加固方法及其适用性

钢结构构件在长期受力或外部环境作用下可能出现承载力衰减、稳定性能下降等问题，因此需要依据构件受力模式及失稳特征选择适宜的加固方法。截面增强通过焊接附加板件扩大受力面积，可有效提升构件的抗弯、抗压与抗剪能力，适用于承载力偏低但截面形式允许调整的构件；外包钢加固通过在构件外侧设置钢板与原构件形成整体，使其整体刚度显著提升，对轴压柱和受双向作用构件具有较高的适应性；薄壁构件或宽厚比较大的板件在局部受压下容易发生屈曲，通过增加纵向或横向加劲肋能够增强板件稳定性，使局部屈曲发展受到抑制。不同方法的选用需从构件实际受力状态、材料性能变化及构造约束条件等方面综合判断，使加固措施能够精准匹配构件的失效模式，并在不显著增加自重或施工干扰的前提下提升稳定性能。

5.2 节点与支撑体系的加固技术

节点与支撑体系是钢结构稳定性能的关键控制环节，其刚度水平直接影响结构侧向受力路径与整体变形模式。在工程运行过程中，节点承受的反复荷载可能造成焊缝疲劳、螺栓松动或构造柔度增大，使结构局部刚度下降。通过节点钢板增厚、加强连接板刚度、提高焊缝质量或增设高强螺栓等措施，可以有效改善节点的变形能力，使荷载传递更加顺畅。支撑体系的加固则多依赖截面置换、增设斜撑或调整支撑体系布置，使结构在水平作用下形成稳定的受力框架。支撑的存在不仅限制侧向位移，还能够减小构件弯矩放大效应，提高整体稳定储备。对于多层或大跨结构，支撑刚度的提升能够明显改善层间变形协调性，使体系更接近设计状态运作。

5.3 加固效果评估与工程实例分析

加固措施实施后需要通过系统化评估验证其在工程实际中的有效性，使构件与结构的性能变化能够得到量化认定。评估工作通常依托有限元分析、现场检测与必要的荷载试验展开，通过分析加固前后构件应力分布、节点转动刚度变化、整体侧移控制程度以及屈曲模式演变情况，判断加固措施是否实现预期效果。在工程应用中，通过外包钢方式加固钢柱能够显著降低细长比，柱的弹性屈曲承载力和稳定储备显著提高；对框架结构施加新的斜撑体系后，其水平变形模式得到明显改善，层间位移减小，使结构在风荷载或地震荷载作用下表现更加稳定。加固效果的判定不仅关注局部构件能力提升，更需结合结构整体受力体系进行综合评价，以确保加固措施在全结构范围内产生协同效应，使工程的长期安全性与耐久性得到全面保障。

6 结语

钢结构工程稳定性问题贯穿结构全寿命周期，其研究价值体现在工程安全、性能提升与成本控制的多重目标中。通过对构件受力特征、整体体系协同作用及节点约束影响的分析，可以更清晰地理解结构失稳的形成机制。在工程实践中，应根据结构受力特性开展稳定性验算，并结合构件状态与工程需求选择适宜的加固技术，使钢结构在使用期间保持可靠的力学性能。现代分析技术的发展为稳定性研究提供了更精确的工具，使结构性能评估更加科学严谨。未来工程中，加强材料研究、优化连接构造、完善加固体系，将有助于推动钢结构工程向更高水平发展，使其在复杂工程环境中仍具可靠性与耐久性。

参考文献

[1] 吕昆.路基桥梁结构稳定性问题及加固技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(18):103-105.

[2] 陆耀.石窟危岩体结构稳定性智能评估分析与加固技术设计[J].智能建筑与智慧城市,2024,(07):180-182.

[3] 王楠.地铁施工中支护结构稳定性监测与结构加固技术[J].科学技术创新,2023,(25):148-151.

[4] 韩基刚.钢结构桥梁检测与加固技术及其应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(02):107-108.

[5] 王新贵,张红,杜传金.钢结构加固技术的应用[C]//中国钢结构协会（China Steel Construction Society）,国家钢结构工程技术研究中心（National Engineering Research Center for Steel Construction）.'2013中国钢结构行业大会论文集.鹤壁天宏钢结构有限公司;,2013:361-365.