

钢结构梁柱节点抗震韧性提升策略综述

韩雪琪, 董锦坤, 张玉桂

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月27日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

为提升钢结构梁柱节点的综合抗震性能, 本文综述了渐变式削弱与加劲肋协同作用的研究。目的在于阐明其协同增效机理, 梳理设计现状。方法上, 通过系统分析文献, 从塑性铰引导、应力重分布等方面剖析机理, 并对现有协同方案进行分类与性能比较。结果表明, 协同设计能精准引导并扩大塑性铰区, 优化应力流, 抑制局部屈曲, 从而全面提升节点的延性、耗能与损伤可控性; 削弱参数与加劲肋刚度、位置的匹配是影响性能的关键。然而, 该领域仍缺乏统一设计理论与规范, 在超低周疲劳和震后可修复性方面的研究不足。结论认为, 二者协同是提升节点韧性的有效途径。未来需发展精细化设计理论、建立涵盖可修复性的评估体系, 并推动相关设计纳入工程规范。

关键词

钢结构, 梁柱节点, 抗震性能, 协同作用, 震后可恢复

Review on Seismic Toughness Improvement Strategies for Steel Structure Beam-Column Joints

Xueqi Han, Jinkun Dong, Yugui Zhang

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: April 7, 2026; accepted: April 27, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

To enhance the comprehensive seismic performance of steel structure beam-column joints, this study reviews research on the synergistic effects of gradient weakening and stiffener reinforcement. The objective is to elucidate their cooperative mechanism and summarize current design practices. Methodologically, systematic literature analysis was conducted to examine mechanisms through

plastic hinge guidance and stress redistribution, followed by classification and performance comparison of existing synergistic schemes. Results demonstrate that collaborative design can precisely guide and expand plastic hinge zones, optimize stress flow distribution, and suppress local buckling, thereby comprehensively improving joint ductility, energy dissipation capacity, and damage controllability. The alignment of weakening parameters with stiffener stiffness and positioning proves critical for performance optimization. However, the field still lacks unified design theories and specifications, with insufficient research on ultra-low cycle fatigue and post-earthquake reparability. The study concludes that synergistic interaction between these approaches effectively enhances joint toughness. Future efforts should focus on developing refined design theories, establishing reparability assessment frameworks, and promoting integration of such designs into engineering standards.

Keywords

Steel Structure, Beam-Column Joint, Seismic Performance, Synergistic Effect, Post-Earthquake Recovery

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢结构因其优异的强度、延性和施工速度,在现代建筑中广泛应用。但是,1994年Northridge和1995年阪神地震中,大量传统梁柱刚性节点在梁翼缘焊缝处发生脆性断裂,暴露出“强节点”设计在极端荷载下的脆弱性[1]。这一震害促使工程界转向旨在实现“强柱弱梁”和塑性铰外移的延性节点设计。其中,渐变式削弱(RBS)与加劲肋是两种最具代表性的技术路径。RBS节点通过在梁翼缘距柱面一定距离处进行弧形或锥形削弱,人为制造一个“薄弱环节”,从而将塑性铰从应力集中的梁柱连接焊缝处引导至削弱区,有效保护节点核心区[2][3]。可是,截面削弱不可避免地导致该区域刚度下降,在循环荷载下易引发局部屈曲和侧向扭转失稳,进而导致承载力与耗能能力的过早退化[4][5]。另一方面,加劲肋(包括节点域加劲肋、梁翼缘侧向支撑等)通过提供额外的约束和传力路径,能显著提高节点域的剪切刚度、稳定性和整体承载力[6]。但单纯的加强可能导致塑性铰无法有效形成或转移至柱身,违背了“弱构件”的延性设计初衷。显然,单一的削弱或加强策略难以同时优化节点的强度、刚度、延性和耗能能力。因此,将削弱与加劲肋协同设计,取长补短,成为提升节点综合抗震性能,尤其是实现更高层次“韧性”或“可恢复功能”目标的必然趋势[7]。本文旨在系统梳理RBS与加劲肋协同作用的研究现状,深入剖析其协同增效的内在机理,评述现有设计的得失,并明确该领域未来亟待突破的关键科学问题与技术方向。

2. 协同作用的潜在机理与理论框架

协同设计的核心目标在于实现塑性变形能力、能量耗散效率与损伤可控性的最优平衡。其力学机理主要体现在以下四个层面:

2.1. 塑性铰区的精准引导与扩大

RBS的核心作用是引导塑性铰起始于预设的削弱截面。而加劲肋(特别是节点域加劲肋)能确保节点核心区在较大变形下仍保持弹性或仅发生有限屈服[8]。二者协同,一方面使塑性铰远离脆弱的焊缝,另

一方面通过加劲肋的约束,允许削弱区在发生较大塑性转动时不致过早失稳,从而形成一个更稳定、更广阔的塑性耗能区域。王春彩[9]的有限元分析发现,在削弱区合理布置加劲肋(如在削弱区起始端设置)可使塑性较更稳定地形成于削弱最深截面,符合设计意图。李军等人[5]的试验也证实,在梁翼缘削弱区设置加劲肋能有效引导塑性变形集中于预定区域。

2.2. 应力场的重分布与优化

梁端 RBS 削弱降低了梁翼缘传至柱翼缘的集中应力。与此同时,加劲肋(如梁翼缘侧向肋或节点域竖向肋)提供了补充的传力路径和约束,改变了节点区域的应力流。这种协同作用使得应力从传统的梁柱连接界面更平顺地扩散到更大的区域,缓解了应力集中,降低了高周与低周疲劳破坏的风险[10]。Zhu 等人[10]对预制钢-混凝土组合节点的研究表明,采用 RBS 设计后,节点连接处的应力集中得到缓解。Nouri 等人[11]针对梯形波纹腹板 RBS 节点的有限元分析进一步证实,合理的协同设计可使梁柱连接面附近的翼缘最大应变值显著低于单一 RBS 节点,优化了应力分布。

2.3. 局部屈曲与整体失稳的抑制

RBS 削弱区是局部屈曲的敏感区域。在削弱区腹板两侧设置水平加劲肋或侧向支撑,能有效约束腹板的出平面变形,延迟甚至防止局部屈曲的发生[12]。王安安等人[13]实验发现,设置加劲肋的 RBS 试件,其荷载-位移曲线在塑性阶段更为平稳,刚度退化速率明显减缓,如图 1。这对于维持节点在罕遇地震下的持续耗能能力至关重要。

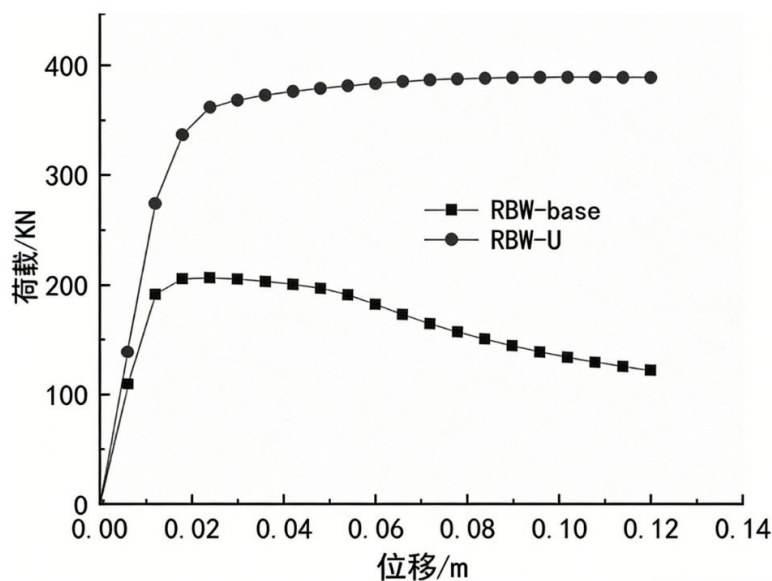


Figure 1. Load-displacement curve

图 1. 荷载 - 位移曲线

2.4. 损伤模式的主动控制

理想的抗震节点应将损伤引导至易于检查、修复或更换的部位。协同设计通过“削弱定位损伤” + “加劲控制损伤模式”的策略,主动将损伤控制在梁的削弱区段,并使其表现为可控的腹板或翼缘屈服与屈曲,而非灾难性的焊缝断裂或柱身破坏[14][15]。这为震后快速功能恢复提供了可能,符合韧性结构的设计哲学。

3. 协同设计方案的研究现状评述

尽管协同设计理念优越,但专门针对 RBS 与加劲肋系统结合的研究仍相对有限,现有工作主要集中于以下几类方案:

3.1. 标准 RBS 结合节点域加劲肋

这是最直接的协同方式。在采用 RBS 的同时,在节点域柱腹板上设置横向加劲肋,以保障节点核心区的抗剪强度和稳定性[8]。该方案能有效防止节点域过早屈服,确保塑性铰在梁削弱区充分发展。但其对改善 RBS 削弱区自身的局部稳定性和抗侧扭能力作用有限。

3.2. RBS 削弱区设置加劲肋

为直接应对削弱区的稳定问题,研究者在削弱区段内或端部设置加劲肋。青岛理工大学的研究[9]对比了在削弱区正中设一道肋、三分点处设两道肋以及在削弱区起始端各设一道肋等方案。结果表明,在削弱区起始端设置加劲肋(STF-2-2)的方案最为有效,它不仅能延缓局部屈曲,提高承载力,还能确保塑性铰稳定地形成于削弱最深截面,综合性能最优。李军等人[5]的试验也证实,在梁翼缘削弱区合理设置加劲肋,可以延迟局部屈曲,显著改善节点强度和刚度的退化问题。

3.3. 腹板开孔削弱与补强协同

此类研究将削弱对象从翼缘扩展至腹板。通过在梁腹板开圆孔或长槽实现塑性铰外移,同时在开孔部位设置环形加劲肋、套管或槽形钢板进行补强[13]。这种“孔洞削弱 + 环肋加强”的复合构造,既能实现塑性铰转移,又能补偿因开孔造成的承载力损失,有时还能为管线穿越提供空间,体现了功能与性能的协同[1]。

3.4. 关键设计参数的影响与建议取值

现有参数化分析揭示了协同性能对设计细节的敏感性,并给出了一些初步建议:

削弱参数:削弱深度、长度和起始位置依然是决定塑性铰位置和转动能力的首要因素。协同设计中,削弱参数需与加劲肋的布置相匹配。高钢规中给出了节点参数的取值范围,图 2 为高钢规中狗骨式节点图。图中 $0.5b_{fb} \leq a \leq 0.75b_{fb}$, $0.65d \leq b \leq 0.85d$, $c = 0.25b_{fb}$, 其中 d 为梁截面高度,梁翼缘削弱深度 c 取美国钢结构规范给定范围的最大值[2]。

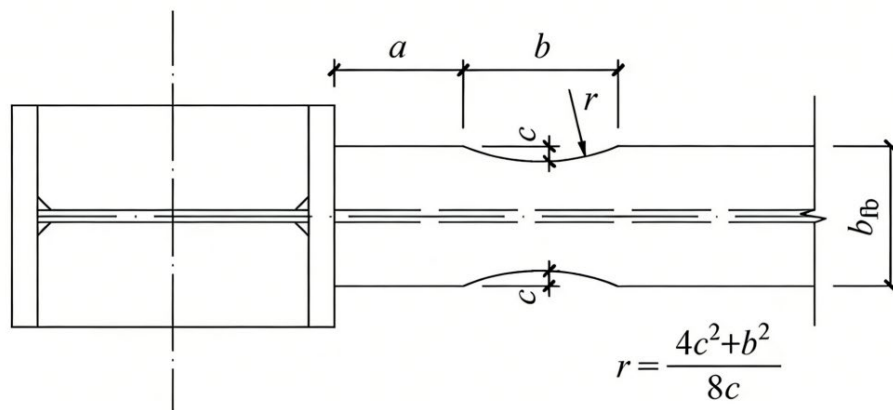


Figure 2. Dog-bone joint diagram in high steel specifications

图 2. 高钢规中狗骨式节点图

加劲肋刚度与位置：加劲肋的厚度、高度及其相对于削弱区的位置，直接影响其对局部屈曲的约束效果和应力重分布模式。起始端加劲肋被证明比削弱区内加劲肋更能有效控制变形。对于弱轴连接，有研究建议肋板厚度 $t \geq 1.5t_{bf}$ (t_{bf} 为梁翼缘厚度)，宽度 $b = 0.4a$ (a 为肋板长度)，配套肋板长度： $a = l + (0.5 \sim 0.6)h_b$ (l 为弱轴楔形加劲板的长度， h_b 为钢梁截面高度) [16]。

组合匹配关系：“强削弱”需配合“强加劲”以控制稳定，而“弱削弱”可能只需“弱加劲”或无需额外加劲。二者需作为一个整体系统进行优化。

Table 1. Performance comparison of typical collaborative design solutions

表 1. 典型协同设计方案性能对比

方案类型	示意图描述	主要优点	潜在缺点/关注点
RBS + 节点域竖肋	标准 RBS，柱腹板设竖向加劲肋	确保节点域强度，塑性较明确外移	对梁削弱区自身稳定改善有限
RBS + 削弱区起始端水平肋 (STF.2.2)	在 RBS 起始端(近柱侧)梁腹板两侧设水平短肋	有效抑制局部屈曲，塑性铰位置稳定，承载力高	焊接位置需精确，可能影响疲劳性能
腹板开圆孔 + 环形加劲肋/套管	梁腹板开孔，孔周焊接环形板或套入钢管	塑性铰转移，便于管线穿越，补强效果直接	构造较复杂，应力集中转移至孔边
装配式翼缘侧板加强 + RBS	在梁上下翼缘外侧附加梯形侧板，同时梁翼缘削弱	装配化程度高，加强效果显著，塑性铰可控	用钢量增加，连接构造设计关键

4. 协同设计原则与决策框架建议

基于前述协同机理与方案评述，本文尝试为“RBS-加劲肋”协同节点的工程设计提炼一套初步的决策框架与核心原则，旨在为工程实践提供更具操作性的参考。

4.1. 核心设计原则

塑性铰引导优先原则：协同设计的首要目标是确保塑性铰在预设的 RBS 削弱区稳定形成并充分发展。加劲肋的布置不得妨碍此目标，而应通过加强节点核心区等方式予以保障。

“薄弱环节”强化原则：RBS 创造的“薄弱环节”需通过针对性加劲来防止其过早失稳。加劲措施(如起始端水平肋、腹板加劲)应直接作用于削弱区或其邻域，以抑制局部屈曲和侧扭失稳。

性能匹配原则：“削弱”与“加劲”的强度、刚度需相互匹配。“强削弱”(如较大削弱深度)需配合“强加劲”(如较厚、位置关键的加劲肋)以控制变形；反之，“弱削弱”可考虑“弱加劲”。

损伤可控与可检原则：设计应使损伤主要集中于易于检查、修复或更换的梁削弱区段。加劲肋本身宜设计为非主要耗能构件，或探索其作为可更换耗能部件的可能性，以服务于震后可恢复目标。

4.2. 初步决策框架

工程设计人员可参照以下步骤进行协同方案决策与参数设计：

步骤 1：明确性能目标。确定节点所需的具体性能等级，包括目标延性系数、耗能能力、最大允许残余变形等，并评估是否对震后可修复性有特殊要求。

步骤 2：选择基础协同方案。参考表 1，根据主要矛盾选择方案类型：若首要保证节点域强度，可选“标准 RBS + 节点域竖肋”；若核心是提升削弱区稳定性与综合性能，首选“RBS + 削弱区起始端水平肋”；若需兼顾管线穿越等功能性需求，可考虑“腹板开孔 + 环形加劲肋”方案。

步骤 3：确定关键参数。

RBS 参数: 根据《钢结构设计标准》及既有研究, 初步确定削弱深度、长度和起始位置。一般削弱深度取梁翼缘宽度的 20%~40%, 削弱区长度取梁高的 0.65~0.85 倍。

加劲肋参数: 根据所选方案确定。对于起始端水平肋, 其刚度(厚度、宽度)应能有效约束腹板; 对于弱轴连接, 有研究建议肋板厚度不小于 1.5 倍梁翼缘厚度, 宽度约为肋板长度的 0.4 倍。

步骤 4: 校核与迭代优化。通过精细化有限元分析或参照既有试验数据, 校核节点的承载力、塑性铰形成位置、破坏模式及耗能能力是否满足步骤 1 的目标。若不满足, 返回步骤 2 或 3 调整方案与参数。

步骤 5: 评估经济性与施工便利性。在满足性能目标的前提下, 对比不同方案的用钢量增量、焊接工作量及构造复杂性, 进行技术经济比较, 选择最优方案。

4.3. 框架应用说明

本框架基于当前有限的研究成果提炼, 旨在提供一个系统化的设计思考路径。由于该领域尚缺乏统一的设计规范, 在实际重要工程应用中, 建议通过详细的数值模拟和必要的试验验证对设计结果进行最终确认。未来随着理论研究的深入和更多数据的积累, 此框架可进一步细化和量化。

5. 当前研究的不足与未来研究方向展望

5.1. 当前研究的不足

目前缺乏能够准确描述“削弱-加劲”协同工作机制的恢复力模型和承载力计算公式。现有设计主要依赖有限元参数分析和试验经验, 尚未形成系统化的、可供规范采纳的设计方法[17]。中美现行规范对 RBS 有初步规定, 但对协同设计均无涉及。

现有研究多聚焦于静力或拟静力下的承载力、延性和耗能, 对于超低周疲劳性能、断裂韧性以及动力荷载下的响应关注不够[18]。协同设计如何在保障静力性能的同时, 优化抗疲劳和抗断裂能力, 是亟待厘清的问题。

“韧性”要求节点震后易于修复。当前协同节点的研究大多止步于破坏模式观察, 尚未建立科学的可修复性评估指标(如残余变形限值、损伤构件可更换性)及对应的设计准则[19]。将加劲肋设计为可更换的耗能部件, 是一个值得探索的方向。

增设加劲肋必然增加用钢量和焊接工作量。协同方案带来的性能提升, 与其增加的成本和施工复杂度之间是否具有最优性价比, 缺乏全面的全生命周期经济性分析。这对于工程推广至关重要。

5.2. 未来研究方向展望

建立考虑材料非线性、几何非线性及接触效应的精细化有限元模型, 深入揭示协同机理。在此基础上, 发展基于性能的抗震设计(PBSD)方法, 提出涵盖强度、刚度、延性、耗能及可修复性的多目标优化设计框架和实用计算公式。

研究高强度、低屈服点钢、形状记忆合金等新材料在协同节点中的应用潜力。探索 3D 打印等先进制造工艺, 实现节点与加劲肋的一体化、拓扑优化设计, 在提升性能的同时简化构造。

将协同节点置于整体结构体系中, 研究其与自复位装置、可更换阻尼器等技术的集成, 发展真正意义上的可恢复功能钢结构体系。研究节点损伤与整体结构动力响应、残余变形之间的定量关系。

利用机器学习、深度学习算法, 基于海量数值模拟和实验数据, 训练节点性能快速预测模型。开发集成参数化建模、多目标优化和性能评估于一体的智能化设计平台, 大幅提升设计效率。

总结研究成果, 形成设计建议, 积极推动纳入《钢结构设计标准》等国家及行业规范。通过示范工程, 验证协同节点的可靠性、经济性和施工便利性, 加速其工程化进程。

6. 结论

渐变式削弱(RBS)与加劲肋的协同设计,代表了提升钢结构梁柱节点综合抗震性能,尤其是向震后可恢复的“韧性”目标迈进的重要技术路径。本文综述表明,协同作用通过应力重分布、塑性区扩大与稳定化、局部屈曲抑制等机理,能够有效弥补单一技术的不足,实现承载能力、变形能力与耗能能力的更优匹配。

当前研究已初步验证了协同方案的有效性,并探索了关键参数的影响规律,但总体上仍处于探索阶段,在理论模型、设计方法、性能评估维度和工程标准化方面存在显著空白。未来的研究工作需从机理深化、多目标优化、新材料新体系集成以及智能化工具开发等多维度发力,并将研究成果积极向设计规范和实践工程转化。协同节点的深入研究与推广应用,对于构建安全、经济、可持续的韧性城市基础设施具有重要的理论意义和工程价值。

参考文献

- [1] 郝进锋, 余非, 李璐璐, 等. 梁端削弱型节点力学性能与设计方法[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(1): 69-71.
- [2] 黄永强, 杨成栋. 梁柱刚性连接狗骨式节点设计方法研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(7): 59-65+29.
- [3] 陈廷国, 任伟宾, 曲激婷. RBS 节点钢框架设计方法与极限承载力理论研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(5): 499-512.
- [4] 王燕. 钢框架塑性铰外移新型延性节点的研究与进展[J]. 青岛理工大学学报, 2006(3): 1-6.
- [5] 李军, 于征, 厉凤香. 考虑局部屈曲影响的狗骨式连接性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(2): 6-10+38.
- [6] 刘远征, 袁波, 宋志丹. 加劲肋加强 T 型方管相贯节点抗震性能分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2015, 32(6): 112-117.
- [7] 赵俊贤, 蔡泽鑫, 邵旭东, 等. 基于悬挂连接的韧性钢框架梁柱节点抗震性能数值模拟[J]. 工业建筑, 2021, 51(8): 79-86.
- [8] 石永久, 王萌, 王元清. 不同焊接节点构造形式钢框架整体抗震性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 71-79.
- [9] 王春彩. RBS 钢梁设置加劲肋后的梁柱节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [10] Zhu, Z., Song, H.T., Fan, M.C., et al. (2024) Effect of RBS on Seismic Performance of Prefabricated Steel-Concrete Composite Joints. *Steel and Composite Structures*, **52**, 405-418.
- [11] Nouri, G., Rayegani, A., Lavasani, H.H., Tavakoli, L., Nasiri, M. and Soureshjani, O.K. (2023) Seismic Performance of the RBS Connection with Trapezoidal Corrugated Web (TCW-RBS). *Structures*, **56**, Article ID: 105003. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105003>
- [12] 刁莉莉. 翼缘开孔削弱型梁柱节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [13] 王安安, 董新元. 加强与削弱复合型节点力学性能研究[J]. 安徽建筑, 2020, 27(3): 101+201.
- [14] 冯世强, 杨勇, 薛亦聪, 等. 预制装配式混合框架屈曲约束狗骨式节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 59-68.
- [15] 潘志宏, 周智彬, 李爱群, 等. 混凝土柱-钢梁混合结构栓接节点的抗震性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(4): 813-826.
- [16] 徐莹璐, 苏耀烜, 尚永芳. 钢框架肋板加强型弱轴连接节点的有限元分析[J]. 工程力学, 2021, 38(S1): 31-38.
- [17] Du, H.-K., Yang, F.-X., Wang, Y.-D., Zhao, P.-F. and Wang, J.-Y. (2025) Retrofit Effect and Flexural Capacity of H-Section Beam- through Beam-Column Connections for Steel Modular Frames. *Advanced Steel Construction*, **21**, 125-135.
- [18] Chen, C., Qiao, H., Wang, J. and Chen, Y. (2020) Progressive Collapse Behavior of Joints in Steel Moment Frames Involving Reduced Beam Section. *Engineering Structures*, **225**, Article ID: 111297. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111297>
- [19] 温昊. 下翼缘可更换屈曲约束盖板连接的韧性钢框架梁柱节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.