

# 梁柱削弱型节点抗震性能发展与展望

李响, 董锦坤

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月5日; 发布日期: 2026年4月17日

## 摘要

梁柱节点抗震性能已成为钢结构领域最重要指标之一, 本文通过对国内外相关文献进行分析, 对不同类型的削弱型钢结构梁柱节点进行梳理, 得出削弱型梁柱节点具有较好的抗震性能, 可以有效提升钢结构的抗震性能的结论, 同时指出目前削弱型节点存在的一些问题, 并提出相关建议, 以期为削弱型节点的未来研究发展提供参考。

## 关键词

抗震性能, 钢结构, 削弱型

# Development and Prospect on Seismic Performance of Reduced Beam-Column Connections

Xiang Li, Jinkun Dong

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

Received: March 15, 2026; accepted: April 5, 2026; published: April 17, 2026

## Abstract

The seismic performance of beam-column connections has become one of the most important indicators in the field of steel structures. Based on the analysis of relevant literature at home and abroad, this paper sorts out different types of reduced beam-column connections in steel structures. It is concluded that reduced beam-column connections exhibit favorable seismic performance and can effectively improve the seismic behavior of steel structures. Meanwhile, existing problems of current reduced connections are pointed out and corresponding suggestions are proposed, aiming to provide a reference for the future research and development of reduced connections.

## Keywords

Seismic Performance, Steel Structure, Reduced

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

在上世纪 90 年代的北岭地震与阪神地震后, 各国学者在对地震中损坏的钢结构建筑的研究中发现, 钢结构梁翼缘与柱连接处发生脆性破坏, 在那之后对钢结构建筑进行了新一轮研究[1]-[3]。在此之前各国学者均认为钢结构建筑具有较好的抵抗变形与破坏的能力, 但在实际中却并没有达到预期的效果[4] [5]。

在北岭地震与阪神地震后, 各国学者们开始对钢结构连接性能与组合形式有了更多的关注, 加速了装配式钢结构的发展, 进而加速了钢结构建筑行业的产业化[6]-[8]。在如何增强钢结构的抗震性能这一点上, 各国学者不断提出各种方法, 例如加强型梁柱节点, 削弱型梁柱节点, 可恢复型梁柱节点等。本文就削弱型钢结构梁柱节点的抗震性能设计进行阐述。

## 2. 梁柱节点的设计方式

梁柱削弱型节点主要通过人为的在靠近节点的梁端区域进行截面削弱, 以此来提升结构的抗震性能, 目的是将塑性铰从薄弱的梁柱连接焊缝处, 外移至延性更好的梁段区域。

根据不同的削弱部位与形式, 设计方法与关键参数也有所不同。例如在梁翼缘进行切割削弱的狗骨式节点; 在梁翼缘进行开孔的翼缘削弱型; 在腹板进行开孔削弱的腹板开孔型; 以及在箱型钢梁的盖板上开设长槽孔的箱型梁槽孔削弱型等。

## 3. 梁柱削弱型节点的研究进展

### 3.1. 翼缘削弱型梁柱节点

翼缘削弱型节点, 是在钢梁靠近柱端的翼缘部位, 进行局部对称削弱, 使节点在地震作用下, 塑性铰外移到梁上、避免焊缝与柱连接处脆性破坏的一种延性抗震节点形式。因削弱后外形像狗骨, 也叫狗骨式节点。为保证剪力的传递, 只削弱梁翼缘, 不削弱腹板, 满足抗震设计要求。

王羨农等[9]为了研究不同削弱参数对翼缘开孔削弱型节点抗震性能的影响, 通过改变梁翼缘削弱起始距离, 梁翼缘孔中心至翼缘边缘距离, 梁翼缘开孔直径, 相邻翼缘孔沿梁长度方向的中心间距四个参数, 共设计 12 个有限元模型, 与未开孔的普通节点在低周荷载作用下进行对比。结果表明: 相较于普通节点, 在合理范围内选择削弱参数, 可使翼缘开孔削弱型节点的耗能能力明显提高, 抗震性能显著改善, 同时可保证极限承载力和延性只有较小程度的下降。

徐莹璐等[10]设计了一种新型的节点域箱型加强式工字形柱弱轴连接, 并在此节点基础上进行梁翼缘削弱型节点变参数分析, 研究在低周荷载作用下各削弱参数对节点滞回性能的影响。研究结果建议各参数取值如下: 削弱部位距蒙皮板的距离取值为 0.5~0.75 倍翼缘宽度, 削弱区端长度取值 0.65~0.85 倍梁截面高度, 削弱深度取值 0.2~0.25 倍翼缘宽度。

刘明明等[11]利用 ABAQUS 软件, 对两个系列共计 10 个不同取值的削弱参数的楔形削弱型节点模

型进行了分析研究, 结果表明: 楔形削弱型节点与翼缘狗骨式削弱型节点在承载能力上相当, 滞回曲线饱满程度相当, 具有较好的耗能能力与滞回性能。楔形削弱型节点的滞回曲线呈现不对称, 且随着梁腹板削弱高度  $b$  增大, 不对称现象加剧。承载能力随着参数  $b$  的增大呈现先增大后减小, 当  $b/h_b$  为 0.14 时, 节点的承载能力最大, 但此时不能有效实现塑性铰外移, 当  $b/h_b \geq 0.17$  时, 塑性铰外移明显( $h_b$  为梁高)。

郑宏等[12]设计了一种带可更换梁段的翼缘削弱新型节点, 并将其与普通端板连接节点在单调与循环荷载下的力学性能进行比较, 节点如图 1 所示。结果表明: 该节点的滞回性能明显优于普通端板连接节点, 大震后可轻松更换; 随着翼缘削弱长度的增加, 节点的承载能力将逐渐下降, 延性系数先增大后减小, 耗能能力虽有提升但强度、刚度退化效果并不理想, 建议翼缘削弱段长度  $b = (0.7 \sim 0.9) h_b$  ( $h_b$  为钢梁截面高度), 而可更换梁段长度  $l$  建议取值  $(1.6 \sim 1.85) h_b$ 。

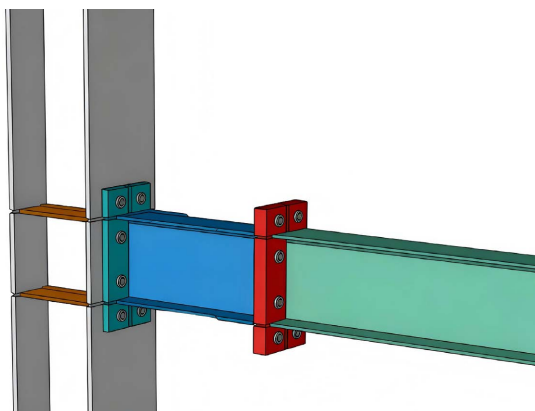


Figure 1. New replaceable reduced beam segment connection  
图 1. 新型可更换梁段削弱型节点

熊晓莉等[13]提出了一种如图 2 所示的新式可更换翼缘开孔削弱型节点, 借助 ABAQUS 软件进行有限元分析, 并将其与传统梁柱焊接型节点, 装配式钢梁未削弱节点进行对比分析。通过改变开孔数量与半径, 探讨其对节点抗震性能的影响。结果表明: 新型节点可有效使塑性铰外移至可更换梁段, 在地震作用下保持延性, 震后可更换。随着开孔半径的增大, 节点承载能力逐渐下降, 尽管耗能能力增强, 但刚度退化, 延性系数并不理想。建议开孔半径取梁翼缘外伸宽度的 0.26 倍。考虑施工因素, 开孔数量建议在 4 个左右。

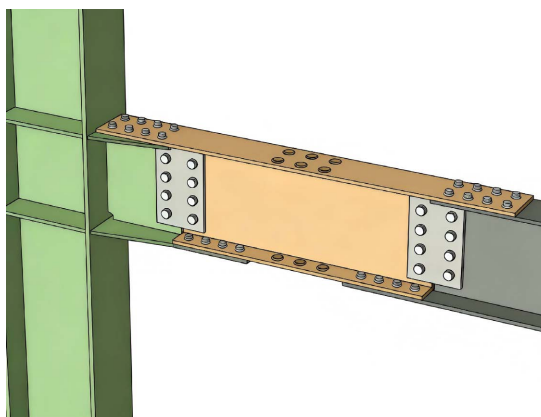


Figure 2. New replaceable reduced beam section connection with flange openings  
图 2. 新式可更换翼缘开孔削弱型节点

郑居焕等[14]提出了一种适用于装配式混凝土节点的新型翼缘狗骨式削弱型钢制铰连接, 如图 3 所示。基于有限元分析, 分析了不同设计参数: 翼缘长宽比, 翼缘狗骨削弱范围与翼缘狗骨削弱程度对该连接的滞回性能的影响。研究结果表明: 翼缘长宽比与翼缘狗骨削弱范围对钢制铰影响范围较大, 翼缘削弱范围对初始刚度、峰值承载力和截面转动能力系数影响较小。建议取值: 翼缘长宽比为 1.5~2; 翼缘狗骨削弱范围为 0.5~0.7; 翼缘狗骨削弱程度为 0.15~0.3。

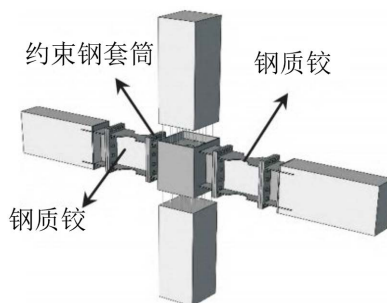


Figure 3. New flange dog-bone reduced steel hinge connection  
图 3. 新型翼缘狗骨式削弱型钢制铰连接

### 3.2. 腹板削弱型梁柱节点

腹板削弱型节点, 是通过在钢梁靠近柱端的腹板部位进行局部削弱, 使塑性铰外移、保护梁柱连接焊缝, 从而提升节点延性与抗震性能的一种钢结构抗震节点形式。通过削弱梁腹板而非翼缘, 保证剪力与弯矩的合理传递, 从而满足抗震需要。

马江萍等[15]提出了一种梁腹板中心不削弱, 仅腹板上下开半圆孔的削弱型节点(TSCR), 使削弱处有更多的梁截面弯曲发展变形。运用 ABAQUS 软件对现有的腹板开圆孔削弱型节点进行循环荷载作用下的模拟验证, 并对不同梁腹板削弱形式梁柱节点滞回性能进行对比, 最后对 TSCR 节点的两个关键参数进行分析, 结果表明: 梁腹板削弱采取不同形式不会明显降低节点的承载能力, TSCR 节点有更多的梁截面用于发展变形能较好地缓解焊缝处 Mises 应力集中程度, 节点承载力与 Mises 应力随半圆孔高度  $h$  或半径  $r$  增大而减小, 建议  $h = (0.58 \sim 0.65)r$ ,  $r = 0.35 h_b$ ,  $l = (0.85 \sim 1.10) h_b$ ,  $h_b$  为梁截面高度。

卢林枫等[16]在节点域箱型加强工字形梁柱弱轴连接与钢管腹板削弱型连接的基础上, 提出了一种结合工字形柱和 H 形梁的钢管腹板削弱型弱轴连接, 如图 4 所示。设计 3 个系列共 14 个节点模型, 采用有限元软件 ABAQUS 对钢管直径, 厚度与钢管中心距蒙皮板外边缘的距离进行变参数分析。结果表明: 在合理的取值范围内, 该节点的延性系数能达到 3.0 以上, 塑性转动能力不小于 0.03 rad, 能有效实现塑性铰外移。在进行分析时, 所有模型均处于弹性阶段, 符合“强柱弱梁”和“强节点弱构件”的抗震设计理念。

唐兵等[17]为解决普通平面腹板梁柱连接节点抗震性能不足的问题, 提出用波纹腹板代替普通腹板, 并用 ABAQUS 软件进行非线性有限元分析。对波纹腹板长度、波纹腹板到梁柱节点距离、波纹腹板厚度和梁高对梯形削弱型、折线形削弱型以及正弦形削弱型三类节点的破坏形式、滞回性能以及耗能能力的影响进行研究。结果表明: 梁高和波纹腹板厚度对梁柱节点滞回性能影响最大, 其次是波纹腹板长度, 波纹腹板到梁柱节点距离对节点的抗震性能影响最小; 而折线形波纹腹板削弱型梁柱节点的滞回曲线稳定饱满, 具有较好的耗能性能。波纹腹板削弱型节点的强度破坏出现在腹板截面, 连接处焊缝并未出现问题, 塑性铰实现外移。

刘盼盼等[18]提出了三种节点, 如图 5 所示: 三角形削弱节点(NTWJ), 折线形削弱节点(NLWJ), 圆

形削弱节点(NRWJ), 并将它们与传统节点(TWJ)通过 ABAQUS 软件进行单调加载与循环加载。通过对比四种节点破坏状态下的应力云图、滞回曲线、骨架曲线、承载力等来对比分析削弱型节点与传统节点的性能。结果表明: 折线形削弱节点与三角形削弱节点能有效实现塑性较外移, 降低了梁柱连接处脆性破坏的风险, 圆形削弱节点则相反, 并通过对比得出折线削弱型节点削弱形式在滞回曲线的饱满程度、承载力、刚度退化等方面是最佳削弱形式的结论。

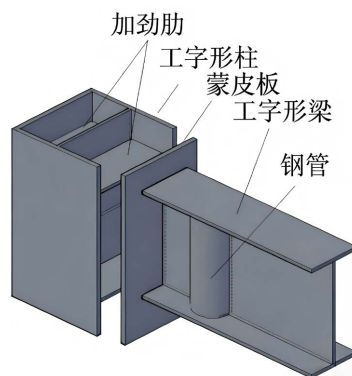


Figure 4. Weak-axis connection with steel tube web reduction for H-shaped column and H-beam

图 4. 工字形柱和 H 形梁的钢管腹板削弱型弱轴连接

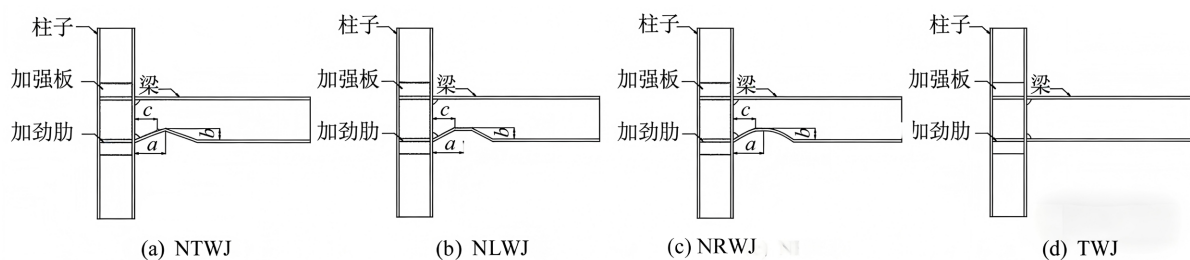


Figure 5. Four types of joint configurations

图 5. 四种节点构造

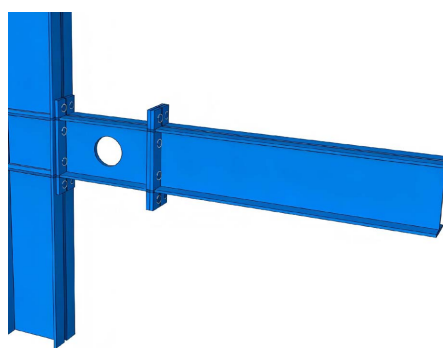


Figure 6. Finite element model of joint

图 6. 节点有限元模型

郑宏等[19]为使塑性较出现在可更换梁端出现处, 提高节点受力性能, 提出了如图 6 所示装配式可更换梁段腹板开孔削弱型节点, 并通过 ABAQUS 软件对该节点进行循环荷载下的受力性能分析, 研究了腹板开孔半径、腹板开孔位置、梁端端板厚和连接端板厚对该新型节点滞回性能的影响。结果表明: 腹板开孔半径对节点滞回性能影响较为显著, 孔径过大过小都会造成不利影响, 建议开孔半径  $r =$

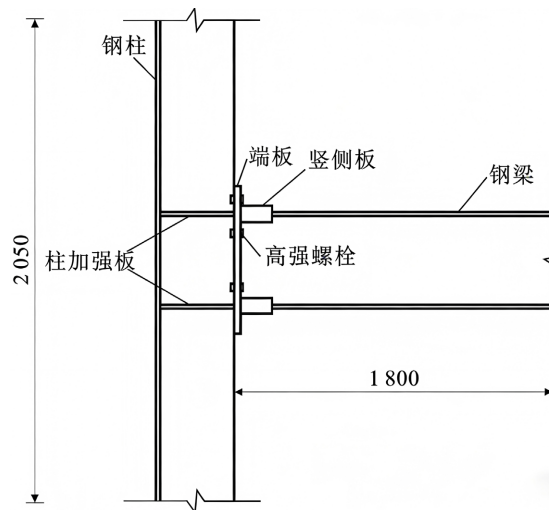
( $0.225\sim 0.25$ ) $h$  ( $h$  为梁截面高度); 开孔半径距离 1 梁端端板过小时不利于保护焊缝, 而过大时又无法实现塑性较外移, 建议  $l = (0.7\sim 0.8)h$ ; 连接端板板厚与梁端端板板厚取值一致或适当减小, 但不宜小于连接螺栓直径。

### 3.3. 削弱与加强并用型节点

削弱与加强并用型节点, 是一类在钢梁端部同时采用局部截面削弱与关键部位加强的复合式钢结构梁柱节点, 通过“一弱一强”的组合设计, 实现塑性较可控外移, 同时提高节点承载力、刚度与耗能能力, 兼顾抗震延性与结构效率。在梁翼缘或腹板适当位置做局部削弱(如狗骨式、开槽、开孔等), 引导塑性较外移, 保护梁柱连接焊缝与柱壁, 避免脆性破坏。对节点核心区、焊缝区域、梁端或侧板等部位进行补强(如加侧板、加劲肋、贴板、套管加强等), 提高连接强度与刚度, 抗震性能优于单一加强型或削弱型节点。

张郁等[20]采用 ABAQUS 软件对梁腹板开孔削弱与节点域箱式加强并用型节点进行有限元分析, 研究开孔参数、轴压比、钢材强度对节点滞回性能的影响。结果表明: 弹性阶段下开孔参数对节点骨架曲线影响不大, 进入弹塑性阶段后, 开孔参数尤其是开孔直径对节点的滞回性能影响最大, 其次是开孔位置; 轴压比对节点滞回性能几乎无影响; 随着钢材强度提高, 节点的屈服承载力与极限承载力随之提高, 延性降低, 可通过提升钢材强度来提高抗震性能。

郑宏等[21]提出了一种如图 7 所示的新型装配式梁翼缘侧板加强与狗骨式削弱并用节点, 利用 ABAQUS 软件对该节点进行静力与拟静力分析, 对端板厚度、梯形侧板末端倾斜角度与削弱区削弱深度三个参数进行分析。结果表明: 端板位置对节点滞回性能影响较大, 对塑性较形成的位置起关键作用; 梯形侧板末端倾斜角度对节点的承载能力与耗能性能起较大作用削弱区削弱深度对承载力与延性系数等多项指标也有影响, 通过调整均能达到塑性较外移。



**Figure 7.** Stiffened flange side plates of fabricated beam flange side plate strengthened dog-bone weakened joints  
**图 7.** 装配式梁翼缘侧板加强与狗骨式削弱并用节点

郭宏超等[22]对节点采取翼缘锥形削弱的情况下, 使用 Q690 板在梁端进行加强, 使用 ABAQUS 软件进行低周往复试验, 结果表明: 该组合节点的塑性变形主要集中在锥形削弱区域, 削弱降低了节点承载力但提升了延性。在梁端进行板式加强, 提高了节点的变形和耗能能力, 并保护柱面梁端焊缝不发生脆性断裂。节点的延性, 耗能性能, 承载力等仍有较大空间。

## 4. 结语

本文阐述了梁柱削弱型节点的发展历程与概况, 将削弱型节点分为翼缘削弱型节点, 腹板削弱型节点及削弱与加强并用型节点, 得出以下结论:

1) 削弱型节点通过在靠近梁端的截面进行削弱, 使塑性铰在预定位置形成, 提升节点延性, 保护节点核心区焊缝, 避免发生脆性破坏。翼缘削弱型节点受到翼缘板削弱长度, 深度, 狗骨削弱深度与长度的影响, 以及梯形侧板末端斜边厚度与角度的影响。翼缘开孔削弱受开孔数量, 开孔形状及开孔位置影响。腹板削弱主要方式为开孔削弱, 削弱效果受开孔半径数量, 开孔形状, 开孔与边缘距离以及开孔合理性的影响。

2) 当前削弱型节点研究局限性依然较大, 其容易造成承载力不足, 危害结构安全的问题, 对精度要求较高。理论模型不够完善, 难以精准反应材料应变硬化、几何非线性、焊接残余应力、初始缺陷等实际因素的综合影响。震后修复困难, 不符合可恢复结构的发展趋势, 装配式结构的研究仍然不足。

随着梁柱削弱型节点的不断发展, 国内外学者对削弱型节点的不断研究和科技的不断进步, 削弱型节点有着长足的发展, 对其作出以下展望:

1) 加强与削弱并存型节点将越来越重要, 其取长补短的方式在引导塑性铰形成的过程中保证了承载力的要求。

2) 削弱形式的探索将向着更高效, 规则的几何形状改变, 并尝试在局部削弱中采用更高效的新型材料。

3) 装配式结构的应用将更加广泛, 研究将更重视将损伤控制在可更换构件上, 从而实现震后快速修复。

## 参考文献

- [1] Mahin, S.A. (1998) Lessons from Damage to Steel Buildings during the Northridge Earthquake. *Engineering Structures*, **20**, 261-270. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(97\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(97)00032-1)
- [2] Iwankiw, N. and Zoruba, S. (2002) Steel Moment Frames: Resolution of Recent Seismic Detailing and Material Shape Issues. *Journal of Constructional Steel Research*, **58**, 495-510. [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(01\)00080-3](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(01)00080-3)
- [3] Kako, M. and Ikeda, S. (2009) Volunteer Experiences in Community Housing during the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Japan. *Nursing & Health Sciences*, **11**, 357-359. <https://doi.org/10.1111/j.1442-2018.2009.00484.x>
- [4] Miller, D.K. (1998) Lessons Learned from the Northridge Earthquake. *Engineering Structures*, **20**, 249-260. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(97\)00031-x](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(97)00031-x)
- [5] 周炳章. 日本阪神地震的震害及教训[J]. 工程抗震, 1996(1): 39-42+45.
- [6] 白明. 装配式绿色建筑梁柱节点固定方法研究[J]. 门窗, 2023(2): 16-18.
- [7] 张爱林. 工业化装配式高层钢结构体系创新, 标准规范编制及产业化关键问题[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 1-6.
- [8] 吕西林, 武大洋, 周颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 1-15.
- [9] 王羨农, 孟庆轩, 邵珠腾, 等. 翼缘开孔削弱型节点受力性能分析[J]. 钢结构, 2017, 32(11): 80-83.
- [10] 徐莹璐, 卢林枫, 马蓬渤. 节点域箱形加强式工字形柱弱轴连接梁端加强与削弱并用节点滞回性能有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(2): 17-25.
- [11] 刘明明, 蒋红英, 董芳菲, 等. 楔形削弱型节点滞回性能有限元分析[J]. 钢结构, 2017, 10(32): 67-73.
- [12] 郑宏, 尚永芳, 苏耀烜, 等. 带可更换梁段的翼缘削弱型节点滞回性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(6): 74-86.
- [13] 熊晓莉, 管欣旺, 李飞平, 李璐. 装配式可更换梁段翼缘开孔削弱型节点抗震性能研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(1): 100-111.
- [14] 郑居焕, 刘如月, 魏常贵, 卢健, 林恩. 装配式梁柱节点狗骨削弱型钢质铰连接滞回性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 494-501+562.

- [15] 马江萍, 刘清颖, 赵冉. 钢框架梁腹板两半圆孔削弱型节点滞回性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 34-41+69.
- [16] 卢林枫, 张廷强, 吕品. 钢管腹板削弱型梁柱弱轴连接的抗震性能影响因素分析[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(3): 77-86.
- [17] 唐兵, 王作文, 李宛河. 波纹腹板削弱型端板连接节点抗震性能分析[J]. 工程建设, 2019, 51(9): 6-15.
- [18] 刘盼盼, 张海风, 贺海洋. 梁腹板削弱型节点滞回性能研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(6): 17-25.
- [19] 郑宏, 苏耀烜, 尚永芳, 刘智超, 江力强. 装配式可更换梁段腹板开孔削弱型节点滞回性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 25-35.
- [20] 张郁, 孟春辉, 刘小华, 等. 节点域箱形加强式工字形柱弱轴连接腹板开孔型节点的滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(3): 66-73.
- [21] 郑宏, 杨瑞鹏, 戴永超, 等. 装配式梁翼缘侧板加强-狗骨式削弱节点滞回性能及变参研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 88-96.
- [22] 郭宏超, 毛宽宏, 李国强, 等. Q690 板式加强与锥型削弱组合节点抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 57-68.