

削弱型钢结构梁柱节点抗震性能研究

许志利, 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: 2025年5月27日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

抗震性能已成为目前钢结构领域的重要指标, 基于国内外相关文献的分析, 对学者们做出的削弱方式分为梁翼缘削弱, 翼缘开孔和腹板开孔3大类进行讨论, 探讨了相关参数对梁柱性能的影响, 同时提出不同削弱方式的钢结构梁柱节点可能存在的问题, 并对该类问题提出了相应的建议, 以期削弱型钢结构梁柱节点抗震性能的研究提供参考。

关键词

钢结构, 抗震性能, 削弱型

A Summary of Research on Seismic Behavior of Beam-Column Joints of Weakened Steel Structures

Zhili Xu, Jinkun Dong

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

Received: May 27th, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

Seismic performance has become a crucial indicator in the field of steel structures. Based on the analysis of relevant literature both domestically and internationally, this study discusses three major categories of weakening methods proposed by scholars: beam flange weakening, flange opening, and web opening. It explores the impact of related parameters on the performance of beam-column connections, identifies potential issues associated with different weakening methods in steel beam-column joints, and provides corresponding recommendations. The aim is to offer references for research on the seismic performance of weakened steel beam-column joints.

文章引用: 许志利, 董锦坤. 削弱型钢结构梁柱节点抗震性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1615-1623.
DOI: 10.12677/hjce.2025.146174

Keywords

Steel Structure, Seismic Performance, Weakened Type

Copyright © 2025 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

同济大学陈越时在 2015 年做了分层框架体系的三层足尺试验[1], 框架在经历 0.62 g (相当于 9 度大震)的地震加速度后, 除抗震支撑柱外, 其余框架结构均完好。通过分层框架体系的三层足尺试验, 体现出梁柱节点在抗震中的重要作用。实验模型结构如图 1 所示。国内的学者大多通过加强或削弱的方式实现“强柱弱梁”, 也有将两者同时采用的学者, 其目标都是提高其抗震性能。简单来说, “强柱弱梁”就是梁在已经破坏的前提下, 柱随后发生破坏的状态。



Figure 1. Structure of the experimental model

图 1. 实验模型结构

因现今对梁柱性能的要求更高, 在加强与削弱节点无法满足要求时, 又出现了组合节点这一概念, 在削弱梁的同时对节点进行加强。因为组合型梁柱节点的类别过多, 且加强型过多涉及焊接, 对工艺有要求。故本文只对削弱型及与削弱型有关的组合节点进行讨论。

2. 梁柱节点削弱方式分类

梁削弱型主要通过梁强度的降低来实现更早屈服。梁削弱的方式可以分为梁翼缘削弱, 腹板开孔和翼缘开孔 3 大类。翼缘削弱是对梁翼缘进行开孔或狗骨削弱, 腹板开孔大多采用开孔削弱的方式。二者相比其削弱目的相同, 都是为了实现“弱梁”, 但翼缘削弱的工艺较腹板削弱更难, 所开的孔更小, 所以精度难以掌握。削弱的方式也存在腹板开孔与梁翼缘削弱和腹板开孔的组合, 但是由于梁的过分削弱, 可能存在应力集中的现象, 所以本文的论述中削弱方式只涉及其中一种, 以便进行对照讨论。

3. 削弱型钢结构梁柱节点研究现状

3.1. 翼缘削弱型钢结构梁柱节点

翼缘削弱主要是通过削弱翼缘长度, 厚度和宽度进行适当的削弱, 在不改变承载能力的基础上, 增加其抗震耗能能力, 达到塑性较外移的目的, 从而达到理想的“弱梁”。

毛辉[2]在对比传统节点与翼缘加强狗骨式节点后, 得出新型翼缘加强狗骨式削弱在承载力和初始转动刚度均有所提高。随后对梁端翼缘加强段长度, 翼缘削弱长度, 翼缘削弱深度分别进行了 8 组对照实验, 来探究对力学性能的影响。结果表明: 扩翼段, 削弱长度和深度应满足以下的取值范围如式(1)~(3)所示。

梁端翼缘扩翼段长度:

$$a = (0.4 \sim 0.65) h_0 \quad (1)$$

梁翼缘削弱长度:

$$b = (0.7 \sim 0.95) h_0 \quad (2)$$

翼缘削弱深度:

$$c = (0.12 \sim 0.18) h_1 \quad (3)$$

h_1 为梁翼缘宽度, h_0 为梁截面高度。

狗骨式与梁端加强相结合的梁柱节点, 在不增大柱截面面积的情况下, 也能达到塑性较外移的目的。梁端翼缘扩翼段长度和翼缘削弱深度这两个参数对初始转动刚度影响较大。在初始转动刚度不变的情况下, 初始转动刚度与扩翼段长度成正比, 与削弱深度成反比。对于翼缘加强狗骨式削弱的节点, 如果考虑到对翼缘长度有要求的情况, 可以通过在梁端加盖板或加劲肋的方法达到加强的效果。并且新型结构只讨论了单跨模型, 未考虑在复杂钢框架中的抗震性能, 因此还需要进一步的实验研究。

郭志鹏等[3]通过改变翼缘开孔大小, 框架梁连接方式, 加劲肋设计了 4 个试件。结果表明: 在往复加载实验下, 通过实验现象和滞回曲线, 得出改变翼缘开大孔在实际生活中是一种可取的方式。槽钢连接相对于焊接来说弯矩过大, 所以导致了较早的失稳。受拉翼缘的最里排及最外排的螺栓拉力损失最大。为应对因螺栓变形而引起的滑移荷载降低和耗能能力下降的问题, 可以通过适当增大螺栓的半径来增大拉力。也可以通过在螺栓处加设盖板的方式, 使螺栓形成一个大的螺栓群, 既能提高螺栓拉力, 也增加了整体的稳定性。

郁曙光[4]在狗骨式削弱型梁柱节点的基础上还开展了一系列组合梁翼缘侧板加固狗骨型结构的研究, 破坏形态如图 2。结果表明: 水平加强侧板末端角度对滞回性能有影响, 建议倾斜角正切值取值范围为 0.27~0.59。郁曙光还在第五章还进行了端板变形的验算, 端板挠度计算如式(4)所示。



Figure 2. Reinforcement of flange side plates with dog-bone failure pattern
图 2. 翼缘侧板加固狗骨式破坏形态

$$K_{B_1} = \frac{Et^3}{48\alpha(1-\nu^2)e_\omega^2} \quad (4)$$

柱翼缘与螺栓变形计算如式(5)~(6)。

$$K_{B_1} = \frac{Et_c^3}{48\alpha(1-\nu^2)e_\omega^2} \quad (5)$$

$$K_L = \frac{EA}{L_b} \quad (6)$$

t 为端板厚度, e_ω 为端板 1/4 长度, d_b 为端板宽度, α 可由近似公式求得, t_c 为柱翼缘厚度, A 为螺栓的有效截面积, L_b 为螺栓的有效长度。

李坤[5]提出了一种震后可修复式钢结构, 该结构是在施刚的基础加入了狗骨式削弱结构。通过对滞回曲线和应力云图的分析, 得出该结构满足“强柱弱梁”。结果表明: 梁段翼缘厚度、耗能梁端腹板厚度、狗骨型削弱深度、狗骨型削弱区与柱面之间的间距等参数都对其性能有显著影响。得出可更换梁段翼缘宽厚比在 6.2~7.8 之间, 腹板高厚比在 28.6~37.2。狗骨削弱深度 c 与梁翼缘宽度比值在 0.18~0.24 范围内, 狗骨削弱区距柱面距离 D 和梁高度的比值在 0.6~0.85。模型安装效果图如图 3 所示。该模型的优势是在同等条件下, 即实现了削弱, 又能实现震后的可更换, 相较于普通的削弱也是一大改进。

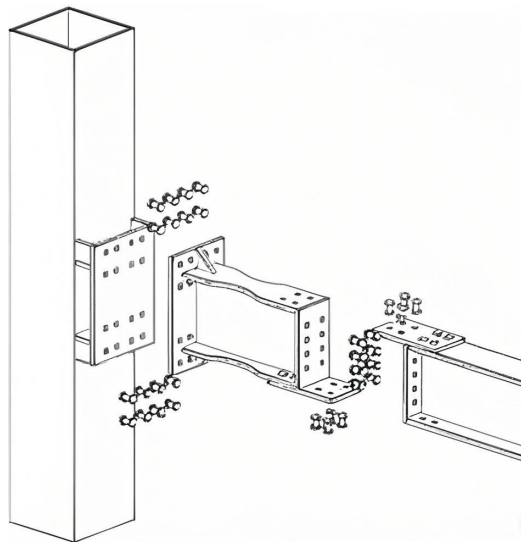


Figure 3. Installation effect diagram of the model
图 3. 模型安装效果图

李馨[6]将该节点与增强节点、削弱节点以及不加强不削弱的常规节点进行比较。结果表明: 该节点具有较好的承载力与变形耗能性能。梁翼缘的“狗骨型”截面削弱深度和“削弱长度”都能增强其耗能性能, 但削弱深度对耗能性能的提升更为显著。

该新型节点外环板件和内隔板的使用是加强与削弱并用的一大进步, 在装配更加简单的前提下, 还能提高承载能力。

郭宏超[7]对翼缘板进行锥形削弱的同时对梁端加强。结果表明: 锥形削弱能显著改善节点延性。破坏形式为平面外失稳, 此时削弱区梁腹板塑性较发展不完全, 可以通过合理削弱梁翼缘来扩大塑性屈服区域, 进一步提高节点抗震能力。

郑宏[8]提出一种装配式梁翼缘削弱型节点, 在此基础上进行了单调加载和往复加载。结果表明: 削弱长度, 可更换段长度的取值对力学性能有显著影响。其中削弱长度和可更换长度如式(7)~(8)所示。

削弱长度取值范围:

$$b = (0.7 \sim 0.9)h_b \quad (7)$$

可更换段长度:

$$c = (1.6 \sim 1.85)h_b \quad (8)$$

h_b 为梁截面高度。

由该新型节点示意图可知, 该结构可以通过螺栓的拆卸实现灾后的快速更换。同时为应对翼缘削弱程度过大的问题, 也可以通过腹板加劲肋来改善性能, 防止应力集中现象的发生, 避免过早的屈服。装配式翼缘削弱平面图如图 4 所示。

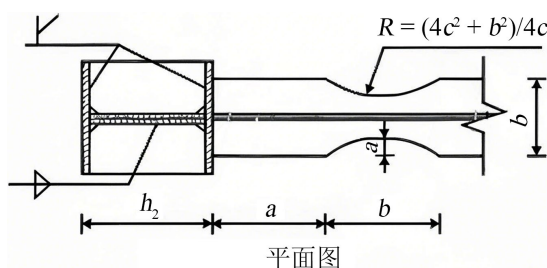


Figure 4. Node plan view

图 4. 节点平面图

Daniel Tomas Naughton [9]通过对框架结构进行研究, 将翼缘削弱型节点与普通节点应用于 4 层, 8 层, 12 层进行对比。结果表明: 翼缘削弱型节点能实现“强柱弱梁”, 且该节点更适用于低层建筑。

削弱型梁柱节点更多的应用于低层建筑中, 而对于高层建筑, 更多的采用加强型或组合节点。

Roudsari [10]在 Daniel Tomas Naughton 的基础上谈论了由于翼缘削弱而引起的应力集中, 为对应力集中设计了对角腹板加强筋, 通过 4 组实验对照。结果表明: 对角腹板加强筋不仅增加了延性, 而且对塑性铰的形成位置没有影响。

建议: 腹板安装对角腹板加强筋的方法可以近似的看作一种组合节点。削弱与加强的联合应用。在此基础上, 可以考虑在梁端进行加强, 进一步探讨对延性及滞回性能的影响。

3.2. 腹板开孔型钢结构梁柱节点

腹板开孔是通过开孔作为耗能元件, 在不改变承载力的前提下, 提高耗能能力主要通过半径大小, 开孔形状和开孔数量影响其抗震性能。

张郁[11]对梁腹板圆形开孔的同时对节点域箱型加强。结果表明: 开孔半径对节点滞回曲线影响较大。若开孔位置距离梁柱节点过长, 会导致梁柱节点焊缝在塑性铰形成之前受力增大, 易发生脆性破坏, 则削弱区起不到保护梁柱节点焊缝的作用, 建议开孔位置与蒙皮板的距离取 0.75 倍腹板高度到 1.15 倍腹板高度之间。开孔直径取值在 $0.45h \sim 0.6h$ (h 为梁腹板高度)。

建议: 该结构是由加强式工字钢分别与普通节点和腹板开孔节点相连接。在对照中, 腹板开孔在弹塑性阶段影响最大, 因此可通过开大孔的前提下, 适当提高钢材的强度, 引入加强筋或加劲肋来提高强度。

李君君[12]研究了腹板开孔式梁柱节点, 并探究开孔的不同位置、直径大小、面积不同对翼缘-腹板削弱型梁柱节点性能的差异。结果表明: 开孔距离为 0.6~0.7 倍梁翼缘宽度时, 可以更好的实现塑性较的外移。在相同开孔面积下, 可以开 3 个腹板孔来调整塑性较位置。

郑宏[13]在前期工作基础上, 提出在可替换梁腹板上开孔削弱节点, 具体模型如图 5。研究其开孔半径、开孔位置、两端板厚度、端板厚度等因素对其滞回特性的影响规律。结果表明: 开孔半径 $r = (0.225 \sim 0.25)h$; 开孔圆心至端板距离 $l = (0.7 \sim 0.8)h$ (h 为截面高度)。各参数中, 开口半径对节点的滞回特性有较大的影响。在腹板上有开孔的部位, 两端板的厚度与端部的厚度在取值范围上是相同的, 但二者的值都要比连接螺栓的直径大。

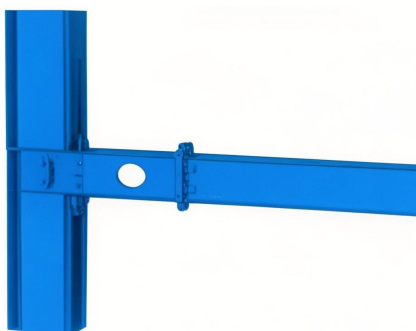


Figure 5. Node finite element model
图 5. 节点有限元模型

腹板开孔位置与端板距离的合理性对其延性有重要影响。如果开多孔的情况, 则应考虑开孔中心距的问题, 如果开孔中心距过小, 可能导致应力集中现象, 使可更换梁段提前屈服。或中心距过远, 则达不到削弱的目的。

唐诗杰[14]研究了一种新型的梁腹板设加劲肋的翼缘扩大腹板开孔型节点, 通过在腹板开孔的前提下设置加劲肋的方法解决了开孔而造成的应力集中。结果表明: 加劲肋板间距与开孔半径比值 L/R 为 3.8~5 区间时对试件的应力集中现象可以有一定程度的改善, 开孔半径超过 0.4 倍梁高时, 开孔两侧焊接加劲肋板会降低翼缘扩大腹板开孔型节点的延性。加劲肋间距在 300~350 mm 范围即加劲肋板间距与开孔半径比值 L/R 为 3.75~4.5 范围内时, 耗能能力提升快。模型如图 6 所示。

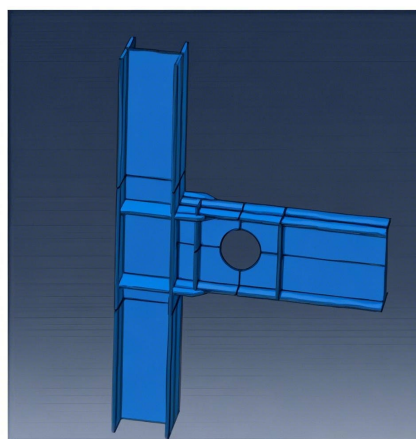


Figure 6. Test specimen model diagram
图 6. 试件模型图

新思路：在考虑了开孔半径，距梁的中心距的问题，还可以考虑可更换段的长度对性能的影响。如果条件允许的情况下，也可以对不同梁或不同柱的长宽或翼缘板等厚度进行讨论。

该设置腹板加劲肋的方式与 Roudsari 设置加强筋的方式类似，都是组合节点的演变。

徐奔[15]在装配式槽钢腹板开孔耗能支撑滞回性能试验研究中通过开三种不同槽钢腹板开孔方式进行对比。结果表明：试验中开孔数量相同的条件下，开椭圆形孔的耗能支撑能力更强。在开孔形状确定的前提下，减小高宽比可以提高其承载能力，高厚比对其影响不明显。在加载的过程中，H 型梁未发生失稳破坏，主要通过孔间板件的屈服耗能。

存在的问题：只讨论了椭圆形，长圆形和菱形 3 种开孔方式，还应谈论一些三边形以及多边形，该研究过于单一。

Tahamouliroudsari M 等[16]的削弱形式为翼缘板挖圆孔，并通过腹板加 H 形肋、斜肋补强。结果表明：翼缘板宽度与腹板高度比值过低会导致平面外失稳，翼缘板开孔会加剧平面外扭转的趋势。H 形肋和倾斜肋均能提高整个试件的延性，这两种肋对抗震性能的影响相似，且不会改变塑性铰形成的位置，说明抗震性能对腹板肋形状并不敏感。

Tahamouliroudsari M 所作的是对一些补强方式的总结，H 形肋或斜肋都是前文对角腹板加强筋或者加劲肋的一个总结。

Rania Salih 等[17]做的是有关混凝土结构，但是其腹板开孔也对钢结构有一定启发，通过对腹板开孔的位置和强化的研究。结果表明：在梁 1/3 设置开孔，不仅对本身承载力影响不大，而且还防止了裂缝的增加。对梁进行 EB 加固，其各项承载力大幅度增加。

Nor Salwanial Hashim 等[18]设计了 3 种尺寸，5 种形状的腹板开孔方式，包括六边形、c-六边形、八边形、方形和圆形。模型为一个开连续孔的工字钢，通过实验对不同开孔方式的位移进行研究，结果表明：c-六边形的位移最小，模型更优。

在多数学者考虑了不同开孔形状对位移的影响下，还可以考虑不同形状面积利用率的差别。

3.3. 翼缘开孔型钢结构梁柱节点

翼缘开孔主要通过半径大小，圆心到端板距离，开孔数量以及是否存在加劲肋来影响抗震性能。翼缘开孔主要是为了布置一些管线更加方便。翼缘开孔与腹板开孔的耗能机理相同，但因翼缘相对较薄，且宽度有限，翼缘开孔的尺寸均比腹板开孔小，且大多为对称分布。

刁莉莉[19]对开孔位置，距梁边边距，直径，形状以及开孔数量进行讨论，首次提出开半圆形孔。如图 7 所示。结果表明：开孔半径应在 40~50 mm 左右，开孔可以考虑 2 到 3 排孔，最后为了应对应力集中的问题，提出了补强，开椭圆形孔，半圆形孔的思路。

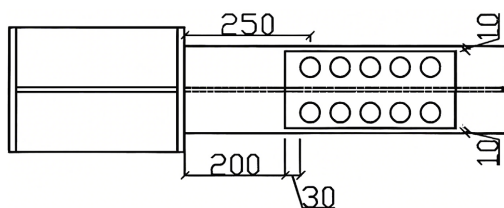


Figure 7. Shows a web with a semicircular hole
图 7. 腹板开半圆形孔

腹板开孔或者翼缘开孔在前文的叙述中，大多是开圆形，椭圆或者多边形。但是刁莉莉给我们提供了新的思路，只开半圆形或者不规则的图形，能极大提高施工效率。

郝润霞等[20]为了优化 H 型钢对刚性、柔性、半刚性连接的 H 型钢梁进行翼缘开孔模拟, 建议开孔后应进行补强。随后对开孔直径, 数量, 位置, 翼缘宽度, 钢梁取值进行分析结果表明: 开孔位置应靠近反弯点, 在梁段 1/6 处不建议开孔。如果开多组孔, 建议为对称结构。

开孔位置如靠近反弯点, 为既不受拉力, 也不受压力作用的点, 保证了形变全部用于耗能, 并且对称多组孔的建议也是为了使受力更加均匀, 提高滞回性能。

思路: 在考虑了翼缘开孔的对称性对本实验的影响下, 腹板开孔是否也受对称性的影响。

管欣旺[21]在对比分析传统梁柱焊接节点、装配式钢梁未削弱拼接型节点和新型节点。新型节点在单调荷载及循环荷载作用下力学性能和抗震性能有所加强, 并使塑性铰外移。随后改变开孔半径、开孔数量和开孔形状等参数, 研究参数不同取值对节点抗震性能的影响。分析结果表明: 开孔半径对节点性能影响较大, 开孔数量对节点性能影响不显著, 随开孔数量和开孔半径的增加, 其承载能力有所降低, 开孔形状对节点性能有一定的影响, 具体结构如图 8 所示。

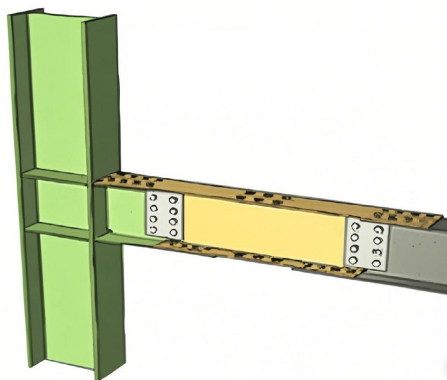


Figure 8. Schematic diagram of nodes
图 8. 节点示意图

建议: 该结构为翼缘开孔削弱型, 且可以观察出为互字形连接方式, 该种连接方式更加方便, 易于安装。腹板开孔的条件下可以设置加劲肋或对角加强筋提高强度, 翼缘开孔削弱也可采用该种方式补强。

4. 结论及展望

本文介绍了削弱型梁柱节点的发展。梁翼缘和腹板挖孔, 梁翼缘削弱设计等方式是改善钢梁柱节点抗震性能的有效方式, 并得出以下结论:

- 1) 翼缘削弱型受翼缘板削弱长度和削弱深度, 狗骨削弱深度, 削弱长度, 梯形侧板末端斜边的厚度和角度的影响,
- 2) 腹板开孔受开孔半径大小、圆心至梁端端板远近, 中心点到端板的距离、轴向压力比等因素的影响。
- 3) 翼缘开孔受开孔的合理性, 数量, 开孔形状及开孔距边缘的距离的影响。
- 4) 翼缘开孔, 翼缘削弱和腹板开孔可以通过设置加劲肋, 加强筋和补强板的方式解决因开孔造成的应力集中现象。

随着国内外学者对削弱型梁柱节点的不断深入研究, 科技的不断进步, 一些新思想, 新思路的出现将促使我们对削弱型梁柱节点的创新, 为此做出以下展望:

- 1) 通过更多的实验, 得出更加精准的削弱深度, 削弱长度, 开孔半径等的范围
- 2) 开孔后通过设置加劲肋.补强板, 可能成为削弱型今后发展的主要研究方向。

- 3) 装配式削弱型结构将成为大势所趋, 逐渐占据市场。
- 4) 开孔的最基本设想是为了实现布线的美观, 在今后的实践中, 希望实现更多的便利。

参考文献

- [1] 陈越时, 王伟, 陈以一. 三层足尺分层装配支撑钢框架结构的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 22-29.
- [2] 毛辉. 改进的梁柱装配式连接节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [3] 郭志鹏, 张爱林, 刘学春, 李超. 装配式钢框架节点带 Z 字形悬臂梁段和削弱梁段连接的抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 43-52.
- [4] 郁曙光. 装配式梁翼缘侧板加强-狗骨式削弱节点滞回性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019
- [5] 李坤. 一种新型可修复装配式钢结构节点力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020
- [6] 李馨. 新型装配式梁端加强与削弱并用节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2021
- [7] 郭宏超, 毛宽宏, 李国强, 等. Q690 板式加强与锥形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.
- [8] 郑宏, 尚永芳, 苏耀烜, 戴永超. 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.
- [9] Naughton, D.T., Tsavdaridis, K.D., Maraveas, C. and Nicolaou, A. (2017) Pushover Analysis of Steel Seismic Resistant Frames with Reduced Web Section and Reduced Beam Section Connections. *Frontiers in Built Environment*, **3**, Article 59. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00059>
- [10] Roudsari, M.T., Jamshidi K., H. and Moradi, S.H. (2018) Experimental and Numerical Assessment of Reduced IPE Beam Sections Connections with Box-Stiffener. *International Journal of Steel Structures*, **18**, 255-263. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0319-0>
- [11] 张郁, 孟春辉, 刘小华, 等. 节点域箱型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.
- [12] 李君君, 王海彦, 刘晓庆. 翼缘-腹板削弱型梁柱节点受力性能影响因素分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(4): 56-63.
- [13] 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.
- [14] 唐诗杰. 翼缘扩大腹板开孔型节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2023
- [15] 徐奔, 赵宝成, 顾晨姣. 装配式槽钢腹板开孔耗能支撑滞回性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1893.TU.20241021.1005.008.html>, 2025-06-26.
- [16] Tahamouliroudsari, M., Jamshidi, K.H., Torkaman, M., et al. (2018) Experimental and Numerical Investigations of Rigid IPE Beam Connections with Drilled Flange and Web Stiffener. *Structures*, **16**, 303-316.
- [17] Salih, R., Abbas, N. and Zhou, F.Y. (2021) Experimental and Numerical Investigations on the Cyclic Load Behavior of Beams with Rectangular Web Openings Strengthened Using FRP Sheets. *Structures*, **33**, 655-677. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.051>
- [18] Hashim, N.S. and De'nan, F. (2023) The Numerical Assessment of Stress Distribution of I-Beam with Web Opening. *World Journal of Engineering*, **21**, 986-1001. <https://doi.org/10.1108/wje-03-2023-0078>
- [19] 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
- [20] 郝润霞, 田志昌, 张安康, 苏丽丽. H 型钢梁翼缘开孔研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 786-795.
- [21] 管欣旺. 装配式可更换梁段翼缘开孔削弱型节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2024.