

部分包覆T形钢 - 混凝土组合梁抗震性能研究综述

苏磊, 刘猛

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9日; 录用日期: 2026年3月29日; 发布日期: 2026年4月9日

摘要

部分包覆T形钢 - 混凝土组合梁(Partially Encased T-shaped Steel-Concrete Composite Beam)作为一种新型组合构件, 融合了钢材与混凝土的材料优势, 具有承载力高、延性好、施工便捷等特点, 在装配式建筑与抗震设防区结构中具有广阔应用前景。本文系统综述了该类组合梁抗震性能的研究现状, 重点梳理了其在低周往复荷载作用下的滞回特性、刚度退化规律、耗能机制及典型破坏模式, 分析了混凝土包覆形式、T形截面构造、连接件布置方式等关键参数对抗震性能的影响规律。进一步总结了试验研究与数值模拟的主要成果, 指出当前研究中存在的理论模型不完善、设计方法不统一等不足。最后, 从新型构造形式开发、高性能材料应用、梁柱节点抗震性能提升及全寿命抗震韧性评估等方面提出未来研究重点, 为部分包覆T形钢 - 混凝土组合梁的抗震设计与工程推广提供理论支撑。

关键词

部分包覆钢 - 混凝土组合, T形截面, 梁柱节点, 可恢复功能

Research Review on the Seismic Performance of Partially Encased T-Shaped Steel-Concrete Composite Beams

Lei Su, Meng Liu

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

Received: March 9, 2026; accepted: March 29, 2026; published: April 9, 2026

Abstract

As a new type of composite component, partially encased t-shaped steel-concrete composite beam

combines the material advantages of steel and concrete, with the characteristics of high bearing capacity, good ductility and convenient construction, it has broad application prospects in prefabricated buildings and seismic fortification zone structures. This article systematically reviews the current research status of the seismic performance of this type of composite beam, with a focus on sorting out its hysteresis characteristics, stiffness degradation law, energy dissipation mechanism and typical failure modes under low-cycle reciprocating loads. It also analyzes the influence laws of key parameters such as concrete coating form, T-section structure and connection piece arrangement on seismic performance. It further summarizes the main results of experimental research and numerical simulation, and points out the shortcomings of imperfect theoretical models and inconsistent design methods in the current research. Finally, the future research focus is put forward in terms of the development of new structural forms, the application of high-performance materials, the improvement of the seismic performance of beam and column nodes and the evaluation of the full-life seismic toughness, which provides theoretical support for the seismic design and engineering promotion of some coated T-shaped steel-concrete composite beams.

Keywords

Partially Covered Steel-Concrete Composite, T-Shaped Section, Beam-Column Joint, Recoverable Function

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

随着我国城市化进程的不断加快和建筑工业化的全面推进, 钢-混凝土组合结构在现代建筑领域中获得了广泛应用。部分包覆钢-混凝土组合结构(Partially Encased Composite, 简称 PEC)作为一种新型组合结构形式, 通过在型钢翼缘间浇筑混凝土, 并在腹板两侧设置连接件, 使钢与混凝土协同工作, 充分发挥两种材料的优势。此类结构不仅具有承载力高、抗震性能好、施工效率高的特点[1], 还显著提升了结构的抗火性能和耐久性。近年来, 为满足建筑美学和空间功能需求, 异型截面结构构件如 T 形、L 形截面柱梁的应用日益广泛, 这类构件能有效避免室内棱角突出, 提高空间使用率, 增强建筑美观性。

在抗震研究领域, 我国作为地震多发国家, 建筑结构的抗震性能直接关系到人民生命财产安全。传统的钢筋混凝土结构在强震作用下易发生脆性破坏, 而纯钢结构则存在稳定性差、防火性能不佳等问题。部分包覆钢-混凝土组合结构融合了两种材料的优点, 钢部件提供良好的延性和耗能能力, 混凝土部件则提高了整体稳定性和承载力, 形成了理想的抗震结构体系。特别是 T 形截面组合梁, 在框架结构中作为关键水平受力构件, 其抗震性能直接影响整体结构的抗震能力。

目前, 国内外对部分包覆钢-混凝土组合结构的研究主要集中在柱构件和常规矩形截面梁方面, 对 T 形截面组合梁的抗震性能研究相对缺乏。T 形截面梁因其不对称特性, 受力性能更为复杂, 尤其是在循环荷载作用下的破坏机制、耗能能力和变形特性尚未系统掌握。同时, 现有的设计规范对这类异形截面组合构件的设计指导不足, 制约了其在工程中的推广应用。

2. T 形截面 PEC 梁抗震性能研究进展

T 形截面部分包覆钢-混凝土组合梁的研究, 是在常规 PEC 构件研究基础上的深化与拓展。为系统阐述其研究现状, 本部分将融合常规 PEC 构件与 T 形截面构件的相关成果, 按关键科学问题分专题进行论述。

2.1. 滞回性能与耗能能力

滞回曲线是评价构件抗震性能最直观的指标。现有研究表明, PEC 构件在往复加载下普遍表现出饱满的滞回曲线, 捏缩现象不明显, 显示出优良的抗震耗能能力。赵必大等[2]对 T 形 PEC 柱的试验发现, 所有柱试件的荷载 - 位移滞回曲线均较饱满, 同一加载级下的三个滞回环几乎重合, 展现出良好的抗震耗能能力和承载力稳定性。李炜和陈以一[3]对 H 形钢翼缘间填充混凝土的部分组合梁的研究也表明, 部分组合梁在往复加载条件下的滞回性能类似于钢梁, 其滞回曲线饱满, 捏缩现象不明显。这些研究证实, 混凝土的填充有效抑制了钢翼缘的局部屈曲, 使钢与混凝土能够协同工作, 从而保证了稳定的耗能能力。

针对 T 形截面梁, 因其具有良好的延性和变形能力, 这为其在抗震中的延性表现提供了基础。然而, 相较于柱构件和矩形截面梁, 专门针对 T 形 PEC 梁在循环荷载下滞回性能的试验研究仍较为匮乏。现有研究多集中于静力单调加载, 对于非对称截面在往复荷载下可能产生的刚度非对称退化、残余变形累积等特性缺乏深入探讨。

2.2. 破坏模式与机理

破坏模式是揭示构件受力机理的关键。综合现有研究, PEC 构件的破坏模式主要受剪跨比、轴压比、截面形式及构造措施等因素影响。

在梁构件方面, 剪跨比是决定破坏模式的主要因素。Peng Jia 等[4]对采用砖 - 混凝土再生骨料的 PEC 梁(PEC-BCRC 梁)的研究发现, 试件破坏模式主要包括斜压破坏、剪压破坏、弯剪破坏和弯曲破坏, 与剪跨比密切相关。在弯曲破坏模式下, 张学智等[5]对 T 形蜂窝钢 - 混凝土组合梁(PECCS-T 梁)的试验研究表明, 其破坏模式表现为受拉钢翼缘屈服后, 受压区混凝土被压碎, 组合梁中的受压钢翼缘能有效地约束混凝土, 显著提高抗弯承载力和延性。这与常规矩形截面 PEC 梁的破坏模式存在差异, 凸显了 T 形截面中受压翼缘的约束作用。

在柱构件方面, 陶书庆[6]对 T 形、L 形截面 PEC 短柱的研究表明, 试件最终破坏模式表现为混凝土被压碎, 系杆间翼缘发生局部鼓曲。Shen J 等[7]对 T 形截面钢 - 混凝土组合异形柱的试验也证实, 所有试件均发生弯曲破坏, 型钢的加入显著提高了承载能力、变形能力及延性。戴中辉[8]的对比研究进一步指出, 钢 - 混凝土组合 T 形截面异形柱(SCC)相比于普通钢筋混凝土 T 形截面异形柱(RC), 其破坏始于翼缘, 腹板具有良好的变形能力, 有效改善了 RC 试件腹板肢端薄弱的缺陷。

2.3. 承载力计算与刚度退化

承载力和刚度是结构设计的核心参数。现有研究通过试验和数值模拟, 探讨了各类参数对 PEC 构件承载力和刚度的影响规律。

金振奋等[9]从设计方法角度指出, PEC 结构是一种性能优越的全装配式结构, 具有连接可靠、经济合理等优点。王海[10]的研究发现, PEC 梁的截面刚度随混凝土强度等级的增大而提高, 梁跨中挠度随之减小。肖锦等[11]通过对两根 T 形截面 PEC 梁的静力加载试验, 研究了其抗弯刚度及承载力, 发现达到极限荷载时, 型钢受拉翼缘和腹部纵向受拉钢筋均进入屈服状态, 且腹部混凝土与钢梁间的滑移量较小, 可忽略不计。这表明在极限状态下, T 形 PEC 梁能实现较为充分的材料强度利用。

关于刚度退化, 戎贤等[12]的研究表明, 对于 T 形截面组合异形柱, 轴压比较大时, 试件承载能力提高, 但达到极限承载力后刚度退化较快, 延性降低。这一规律揭示了轴压比作为双刃剑的特性, 为抗震设计中轴压比的限值提供了依据。数值模拟方面, 余祖国和王伟[13]对 T 形截面外包钢组合梁的全过程分析, 成功模拟了组合梁的极限承载力、挠度及应力应变分布, 验证了数值方法在参数分析中的有效性。

2.4. 关键参数影响分析

通过参数分析识别关键影响因素, 是优化构件性能的重要途径。现有研究围绕材料强度、含钢率、截面构造等开展了系统工作。

在材料与截面参数方面, Margot F. Pereira 等[14]通过有限元参数研究, 评估了钢筋型材厚度、混凝土和钢筋强度对 PEC 柱轴压性能的影响。王帅起[15]针对 PEC 空腹结构, 通过 ABAQUS 模拟确定了较优构造形式, 并对其受剪性能进行了理论分析。

综合来看, 现有参数分析已识别出影响 PEC 构件性能的关键因素, 但针对 T 形 PEC 梁的抗震性能, 尚缺乏一个涵盖多参数(如加载制度、混凝土强度、钢材强度、含钢率、T 形截面特有的翼缘宽度比等)的系统性参数分析框架。

然而, 上述节点研究大多针对特定的截面组合, 直接针对 T 形 PEC 梁与 PEC 柱或钢柱连接节点的抗震性能研究仍显不足。特别是 T 形梁的非对称性在节点区产生的复杂应力分布、节点核心区的传力机制、以及适用于 T 形 PEC 梁的可恢复功能节点的构造形式, 均有待深入探索。

3. 梁柱节点及可恢复功能研究

梁柱节点作为框架结构中的关键部位, 其性能直接影响整体结构的抗震能力。近年来, 随着可恢复功能结构理念的发展, 节点研究也呈现出新的方向。

部分包覆钢-混凝土组合梁柱节点的研究取得了一定进展。焦志安等[16]提出新型可恢复功能半刚性节点, 试验表明其比焊接节点具备更好的承载能力、耗能能力和延性。张爱林等[17]-[19]提出一种震后功能可快速恢复的装配式中柱节点和开洞槽钢梁柱节点, 研究结果表明, 设计合理的节点具有良好的承载性能和滞回特性, 通过设置翼缘连接盖板、合理设计螺栓间距和梁段间隙, 可实现塑性铰转移, 震后通过更换连接装置实现功能恢复。

在 T 形截面构件的节点研究方面, 刘记雄等[20]提出一种 T 形截面钢管混凝土组合柱-钢筋混凝土梁加强环筋节点, 拟静力试验结果表明, 该节点抗震性能良好, 能够实现“强节点弱构件”的抗震设计目的。Liu Xue-Chun 等[21]提出了一种在现场仅使用螺栓连接的 L 形件梁柱螺栓连接节点, 适用于工字形截面梁和 T 形截面柱的连接, 试验结果表明该节点在小震下表现为刚性节点, 在中震或大震下通过滑移和塑性变形发展出延性和耗能能力。这些研究为 T 形截面 PEC 梁-柱节点的设计提供了有益的参考。

4. 当前研究评述

综合上述文献分析, 当前关于部分包覆 T 形钢-混凝土组合梁抗震性能的研究已取得一定进展, 但在认识深度和系统性方面仍存在显著的不平衡。

研究共识与突破:

学界普遍认同, 混凝土的填充有效约束了钢翼缘的局部屈曲, 使钢与混凝土能协同工作, 赋予 PEC 构件优良的滞回性能和耗能能力。对于梁构件, 弯曲破坏模式下的破坏机制(受拉翼缘屈服、受压区混凝土压碎)已通过试验验证。在参数影响方面, 混凝土强度、钢材强度、含钢率和轴压比等关键因素对承载力、刚度和延性的影响规律已初步明确。

主要争议与难点:

现有研究的核心难点在于: 其一, 截面非对称性的影响机理尚不清晰。T 形截面的非对称性导致其在循环荷载下可能产生复杂的扭转效应和应力分布, 而现有研究大多沿用了对称截面的分析框架, 未能充分揭示其独特的受力行为。其二, 精细化数值模型的构建缺乏统一标准。如何准确模拟钢-混凝土界面滑移、混凝土在复杂应力路径下的损伤演化、以及非对称截面的局部屈曲行为, 仍是数值分析中的挑

战。其三,设计理论与方法滞后于工程实践。针对 T 形 PEC 梁的承载力、刚度及节点设计,尚缺乏统一、可靠的计算模型和设计公式,难以直接指导工程设计。

5. 总结与展望

本文综述了部分包覆 T 形钢-混凝土组合梁在抗震性能方面的研究进展。现有研究表明,该类构件在循环荷载作用下具有良好的滞回性能和耗能能力,混凝土对钢翼缘的约束作用显著提升了构件的稳定性和延性。试验与数值模拟手段已被广泛用于揭示其受力机理和破坏模式,参数分析涵盖混凝土强度、钢材强度、含钢率、连接件配置等因素。然而,当前研究仍存在理论模型不完善、设计方法不统一等不足。基于上述分析,未来研究应从以下几个方面深入开展:

(1) 开发高保真数值模型:针对 T 形截面翼缘-腹板交界处应力集中及循环荷载下非对称截面可能引发的扭转效应,建议开发壳-实体混合有限元模型,引入考虑接触与损伤的界面单元,以精确模拟钢-混凝土界面滑移、混凝土受压损伤及受拉开裂的全过程,为参数分析和机理揭示提供可靠工具。

(2) 开展系统性的参数分析与试验研究:补充 T 形 PEC 梁在低周往复荷载下的试验数据,建立包含加载制度、混凝土强度、钢材强度、含钢率、翼缘宽度比、连接件布置方式等参数的数据库,系统揭示各参数对其滞回性能、刚度退化规律及耗能能力的影响规律,并基于此提出关键参数的合理取值范围。

(3) 建立统一的承载力与刚度计算理论:在深入揭示 T 形 PEC 梁破坏机理的基础上,考虑非对称截面在压弯剪复合受力下的协同工作机理,提出适用于 T 形 PEC 梁的正截面承载力、斜截面承载力及长期与瞬时刚度计算的统一理论模型与简化设计公式。

(4) 聚焦节点区域抗震性能与可恢复功能设计:开展 T 形 PEC 梁-柱节点在低周往复荷载下的足尺试验与精细化模拟研究,明确节点核心区的传力机制与破坏模式。在此基础上,探索适用于该节点形式的自复位、可更换构件等新型构造,建立基于性能的节点抗震韧性设计方法,确保实现“强节点、弱构件”的设计目标。

通过上述研究,有望为部分包覆 T 形钢-混凝土组合梁的抗震设计提供系统理论支撑,推动其在装配式结构和抗震设防区的工程应用。

参考文献

- [1] 丁发兴, 许云龙, 王莉萍, 等. 钢-混凝土组合结构抗震性能研究进展[J]. 钢结构(中英文), 2023, 38(12): 1-26.
- [2] 赵必大, 慎天池, 朱雄, 等. T 形截面部分包覆钢-混凝土组合柱的抗震性能[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250812.1153.003>, 2025-12-01.
- [3] 李炜, 陈以一. H 形钢翼缘间填充混凝土的部分组合梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S1): 330-336.
- [4] Peng, J., et al. (2025) Mechanical Performance of Partially Encased Composite (PEC) Beams Made with Brick-Concrete Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, **494**, Article ID: 143360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143360>
- [5] 张学智, 王颖贺, 傅林峰, 等. 部分包覆 T 形蜂窝钢-混凝土组合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(16): 31-37.
- [6] 陶书庆. T 形、L 形截面部分包覆钢-混凝土组合短柱受压性能与设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [7] Shen, J., Zhang, X., Wu, P., Yue, K. and Chen, J. (2025) Experimental and Finite Element Analysis of Bending Performance of Web-Embedded Double Inverted T-Shaped Steel-Concrete Composite Beams. *Buildings*, **15**, Article No. 717. <https://doi.org/10.3390/buildings15050717>
- [8] 戴中辉. 钢-混凝土组合 T 形截面异形柱抗震性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [9] 金振奋, 李少华, 肖志斌, 等. 部分包覆钢-混凝土组合结构设计方法及实践[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(2):

- 94-101.
- [10] 王海. 部分包覆钢-混凝土组合梁在装配式屋盖中的应用研究[J]. 特种结构, 2021, 38(4): 12-16.
- [11] 肖锦, 李杰, 陈以一. T形截面部分包覆钢-混凝土组合梁抗弯刚度及承载力试验研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(2): 149-156.
- [12] 戎贤, 王浩, 张健新. T形截面钢-混凝土组合异形柱抗震性能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(5): 408-413.
- [13] 余祖国, 王伟. T形截面外包钢组合梁抗弯强度的数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(4): 682-685.
- [14] Pereira, M.F., De Nardin, S. and El Debs, A.L.H.C. (2016) Structural Behavior of Partially Encased Composite Columns under Axial Loads. *Steel and Composite Structures*, **20**, 1305-1322. <https://doi.org/10.12989/scs.2016.20.6.1305>
- [15] 王帅起. 部分包覆钢-混凝土组合空腹梁受剪性能试验与理论研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [16] 焦志安, 魏建鹏, 郭杨, 等. 新型可恢复功能半刚性节点抗震性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(6): 1090-1099+1119.
- [17] 张爱林, 程魁魁, 姜子钦, 等. 可恢复功能装配式开洞槽钢梁柱节点力学性能及受力机理研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 29-35.
- [18] 刘如月, 薛潘荣, 颜桂云. 带可恢复功能节点的装配式框架结构抗震性能[J]. 福建工程学院学报, 2020, 18(6): 553-559.
- [19] Zhang, A., Wu, Y., Jiang, Z., Zhang, X. and Dou, C. (2017) Seismic Behaviour of an Earthquake-Resilient Prefabricated Beam-Column Cross Joint. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, **18**, 927-941. <https://doi.org/10.1631/jzus.a1700358>
- [20] 刘记雄, 戴绍斌, 黄俊, 等. T形截面钢管混凝土组合柱-钢筋混凝土梁加强环筋连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 23-32.
- [21] Liu, X., Meng, K., Chen, X., Li, Y. and Cui, Y. (2023) Seismic Performance of Bolted Connection between T-Shaped Section Column and I-Section Beam with L-Stub. *Engineering Structures*, **285**, Article ID: 116022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116022>