

钢结构叠合梁整体性能分析研究概述

谭欣葵, 张再华*

湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

随着建筑工业化与空间模块化技术的快速发展, 采用离散节点拼装的“钢结构叠合梁”在模块化装配钢结构工程中应用日益广泛。然而, 离散连接不可避免地会引发层间滑移与部分组合作用, 传统基于“完全刚接”或“无组合”的极端设计假设已无法准确评估其力学性能。针对这一新型叠合梁体, 本文概况总结了其整体受力性能的分析研究现状。首先, 剖析了离散约束下的部分组合受弯力学模型与有效抗弯刚度解析方法, 阐明了节点构造对界面滑移的协同控制机制; 其次, 总结了构件的典型破坏演化模式与屈曲失稳特征; 最后, 深入探讨了叠合效应对模块化框架整体抗侧刚度、内力重分布及抗连续倒塌性能的影响。本文梳理的等效力学模型与分析方法, 有助于纠正现有工程设计的理论误差, 能有效推动钢结构叠合梁的工程应用。

关键词

钢结构叠合梁, 界面滑移, 部分组合作用, 有效抗弯刚度

An Overview of Research on the Overall Performance Analysis of Composite Steel Beams

Xinkui Tan, Zaihua Zhang*

College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang Hunan

Received: April 26, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

With the rapid development of building industrialization and spatial modularization technology,

*通讯作者。

“steel structure composite beams” assembled with discrete nodes are increasingly widely used in modular assembly steel structure projects. However, discrete connections inevitably induce inter-layer slip and partial composite effects. Traditional extreme design assumptions based on “full rigid connection” or “non-composite action” can no longer accurately evaluate their mechanical properties. For this new type of composite beam, this paper summarizes the current research status on the analysis of its overall mechanical performance. First, it analyzes the mechanical model of partial composite flexural behavior under discrete constraints and the analytical method for effective flexural stiffness, and clarifies the synergistic control mechanism of joint details on interface slip. Second, it summarizes the typical failure evolution modes and buckling instability characteristics of the members. Finally, it discusses in depth the influence of composite action on the overall lateral stiffness, internal force redistribution and progressive collapse resistance of modular frames. The equivalent mechanical models and analysis methods reviewed in this paper help to correct theoretical errors in existing engineering design and can effectively promote the engineering application of steel composite steel beams.

Keywords

Steel Laminated Beams, Interfacial Slip, Partial Composite Action, Effective Bending Stiffness

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

近年来, 随着建筑工业化与预制装配式技术的高速发展, 钢结构(特别是高强钢体系)凭借其轻质高强、加工精度高及经济环保等显著优势, 在全球众多的现代多高层建筑、桥梁及大跨度空间结构中得到了广泛的应用[1]。为了满足工厂预制与现场快速装配的需求, 特别是在以空间模块化为代表的高集成体系中, 相邻构件往往通过角部或跨中的高强螺栓等机械节点离散拼装, 在空间上形成了一组组平行的双钢梁系统(图 1(b)), 即“钢结构叠合梁”[2]。与依靠连续抗剪连接件协同工作的传统整体梁不同, 叠合梁由于层间连接无法实现完全刚接, 其受力协同高度依赖于离散节点的约束特征, 不可避免地会产生层间相对滑移与部分组合作用[3]。

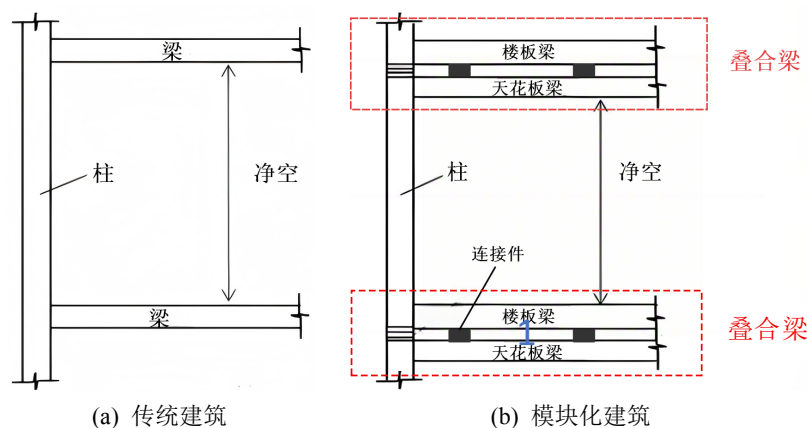


Figure 1. Elevation views of traditional and modular buildings

图 1. 传统建筑与模块化建筑的立面视图

然而, 现行主流钢结构设计规范尚缺乏针对此类离散约束双钢梁系统的专项设计导则。目前的工程设计中通常采用两种极端简化假设: 一是将其视为无组合作用的独立受力系统, 该假设导致结构整体刚度被严重低估, 制约了其向高层发展; 二是将其等效为理想的完全组合梁, 这种假设忽略了离散节点导致的界面滑移效应, 极易高估其抗弯承载力[4]。

为突破上述理论局限, 量化叠合梁与整体梁在受弯力学特性上的差异, 本文概括分析了叠合梁受弯整体工作性能的分析研究进展。首先, 深入剖析基于部分组合效应的受弯力学模型及有效抗弯刚度解析方法; 其次, 探讨连接构造对界面滑移与协同工作机制的影响; 最后, 总结叠合梁的破坏模式与结构整体抗侧性能。本文旨在为未来制定和完善钢结构叠合构件的统一专项设计导则提供支撑, 进一步推动这类新型叠合梁的工程实践应用。

2. 叠合梁的部分组合受弯机理与有效抗弯刚度分析

由于模块间离散连接难以实现理想的完全刚接, 叠合梁在受弯过程中的力学性能与整体梁存在显著差异。准确量化界面的部分组合作用, 是推导叠合梁有效抗弯刚度与极限承载力的关键前提。

2.1. 离散约束下的部分组合受弯力学模型

在评估叠合梁受弯性能时, 首先必须明确其力学边界。孙文彬等[5]的通过对均布荷载作用下上下层梁完全单独工作与完全协同工作两种不同状态下的简支叠合梁进行力学分析, 得出整体梁的截面正应力为叠合单根梁的 1/2 倍, 整体弯曲刚度为单根梁的 4 倍, 挠度降为 1/4。这说明可靠的层间连接能显著提升构件的强度与刚度, 而实际工程中的叠合梁受力状态往往介于这两种极端情况之间。

为精确描述由层间滑移(图 2)引发的中间状态, 众多学者建立了相应的变形控制微分方程。谢丽君[6]针对双层光滑接触复合梁在集中力作用下的变形问题, 基于梁挠度近似微分方程推导了上下梁截面转角的解析表达式, 提供了简明的计算方法。Francesca Campi 等[7]提出了基于线弹性 Timoshenko 梁假定的层间滑移分析模型, 假设界面竖向可靠连接且纵向允许滑移, 并采用线性非比例关系描述剪力与滑移的耦合行为。在此基础上, 周勇超等[8]基于最小势能原理与变分法建立了界面相对滑移控制微分方程, 揭示了相对滑移与抗滑移刚度、截面剪力的解析关系。S. Schnabl 等[9]则开发了基于无锁应变的有限元公式, 为叠合梁层间滑移的高效线性静力分析提供了新手段。

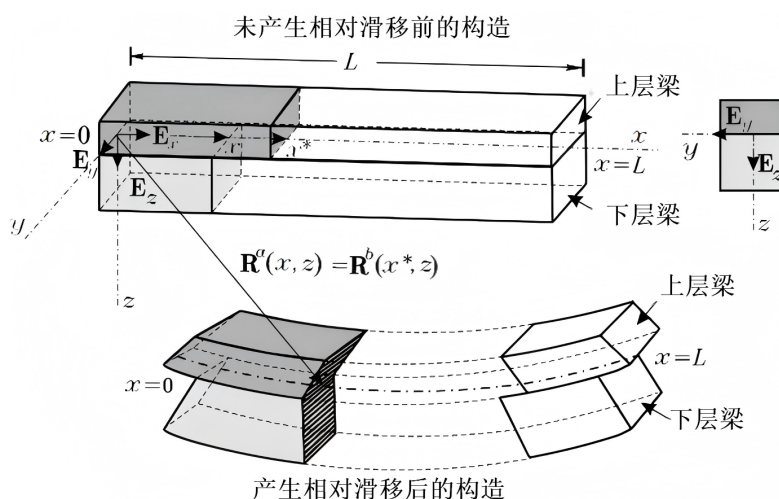


Figure 2. Comparison of the stacked beam before and after sliding
图 2. 叠层梁的滑移前后对比

2.2. 连接构造对界面滑移与协同工作的影响机制

叠合梁的协同受弯机制高度依赖于节点连接的抗剪刚度与物理构造, 图3列举了几种新型连接构造。李杰等[10][11], Ye等[12]针对模块拼合存在的间隙问题设计了新型双梁层间连接构件, 试验表明, 采用该连接方式的叠层梁基本符合平截面假定, 且相较于非连续横截面, 其整体性表现更为优越。类似地, 张爱林等[13]在背靠背双槽钢梁腹板设置螺栓连接形成叠合槽钢梁, 研究了叠合槽钢梁的整体抗弯性能。

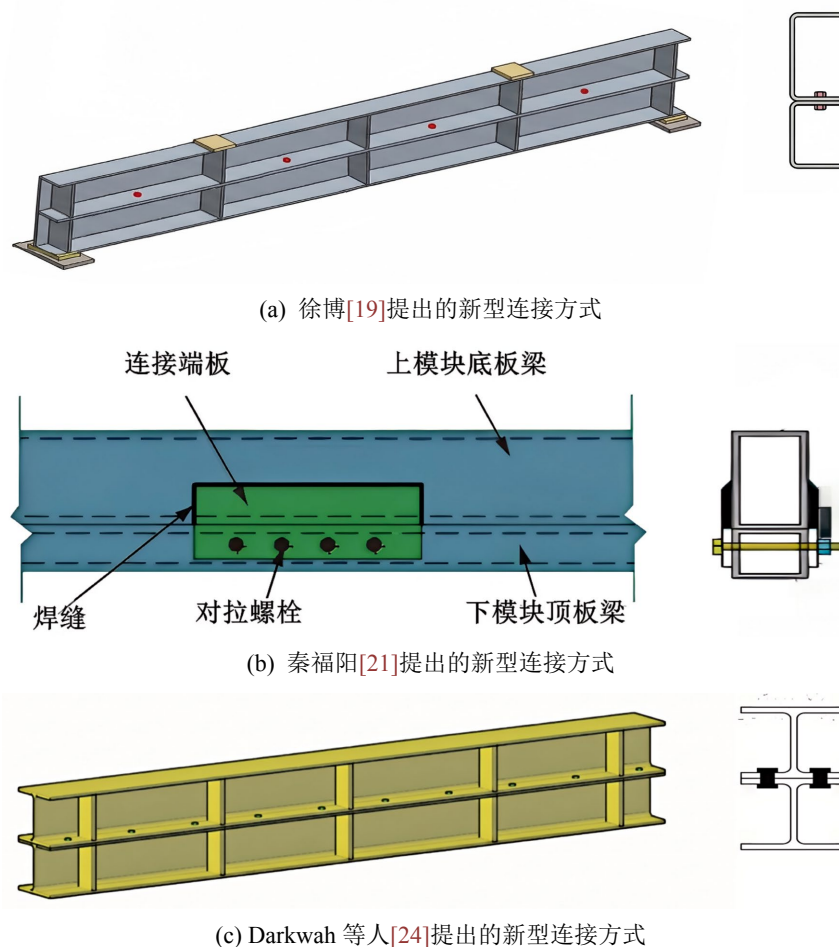


Figure 3. Connection designs for composite steel beams

图3. 叠合钢梁连接构造

在具体连接形式对受弯性能的量化影响方面, 常鸿飞等[14]通过夹板-对拉螺栓连接的试验发现, 有效的层间抗剪连接能显著抑制相对滑移, 使上、下梁分别产生偏心压力与偏心拉力, 其协同工作性能主要受螺栓数量控制。Xu, B等[15]利用数字图像相关(DIC)光学测量技术对螺栓连接叠合槽钢梁进行弯曲试验, 结果表明, 增加界面螺栓数量可明显限制滑移行为, 但这种抗滑机制的改善是非线性的, 表明实际工程需优化螺栓布置以实现最佳效益。此外, 丁昊等[16]对不同抗剪键布置的研究表明, 随着离散连接件数量的增加, 叠合构件的极限承载力与延性系数将逐渐逼近连续整体构件的力学表现。国外研究也表明, 连接方式对拼合梁的协同工作性能具有重要影响。Ungureanu等[17]针对电阻点焊连接的冷弯薄壁拼合梁开展了试验研究, 结果表明, 点焊连接能够有效增强构件整体性, 并在受弯性能和工业化制造方面表现出较好潜力。该研究说明, 钢叠合梁的整体受力性能不仅受连接数量影响, 也与连接工艺密切相关。

2.3. 有效抗弯刚度及承载力评估方法

基于上述力学机理与试验现象, 构建可靠的叠合梁受弯承载力预测模型是指导工程设计的关键。邹杨等[18]基于层梁同曲率、界面剪力与滑移成正比的假定, 推导了交界面滑移应变理论公式, 并引入了应力增大系数 η , 以量化考虑滑移对组合弯曲承载力的影响。徐博[19]在足尺受弯试验的基础上构建了剪切滑移的理论模型, 并通过 276 组参数分析提出了叠合梁初始弯曲刚度及受弯承载力的预测模型, 经有限元对比验证了其可靠性。在承载力评估方面, Rezaeian 等[20]对创新型冷弯钢叠合梁截面开展了试验与参数分析, 指出截面组合形式、板件厚度及封板设置对抗弯承载力影响显著, 并认为采用完全组合、部分组合和非组合三类假定进行对比分析, 有助于更合理地评估实际拼合梁的受弯性能。该研究表明, 钢叠合梁承载力分析应充分考虑连接条件与组合程度的影响。

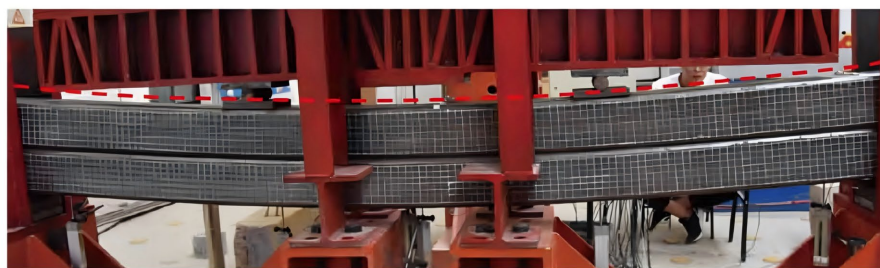
针对新型连接的承载力计算, 秦福阳[21]开展了平面内受弯试验及 ABAQUS 有限元分析, 推导并验证了新型叠合梁受弯承载力的计算公式, 其误差控制在 15% 以内, 采用该新型连接的叠合梁相较于独立双梁可节省约 15% 的用钢量。此外, 为进一步优化承载力并减轻自重, 黄仁锋和赵金城[22]探讨了混合钢种工字形叠合梁的可行性, 通过理论推导证实, 在下翼缘采用高强度钢、其他板件采用较低强度钢的配置下, 可充分发挥钢材强度, 在保证安全储备的同时明显提高抗弯承载力。此外, Selvaraj 等[23]对背靠背 σ 型截面拼合梁进行了试验与数值研究, 结果表明该类构件的受弯性能与畸变屈曲密切相关, 且现行直接强度法对其承载力预测总体偏保守。该研究表明, 钢叠合梁的承载力分析与稳定问题具有明显耦合关系。

3. 叠合梁构件的破坏模式与屈曲稳定性分析

复杂受力状态下, 叠合梁的极限状态不仅取决于材料自身的本构屈服, 还受离散连接约束与空间屈曲行为的耦合影响。面对存在层间滑移与界面分离趋势的双梁系统, 传统单一构件的强度与屈曲评估准则往往表现出显著的局限性。

3.1. 叠合梁平面内的典型破坏模式演化

叠合梁受弯极限状态的演化, 本质上是连接件抗剪失效与截面塑性屈服之间的力学竞争。常鸿飞等[14]指出, 构件主要呈现出两种典型破坏模式(图 4): 钢梁受弯屈服与连接件剪切破坏。当离散连接件提供的抗剪承载力高于双梁协同所需的层间剪力需求时, 结构表现为延性的钢梁受弯屈服; 反之, 若连接件数量不足, 界面会发生脆性的剪切破坏, 导致上下梁瞬间丧失协同工作能力。秦福阳[21]通过有限元验证了构件在达到极限状态时的截面应力分布, 强调连接构造的优化是防止局部应力集中、确保叠合梁展现延性破坏的关键。



(a) 梁受弯屈服



(b) 连接件剪切破坏

Figure 4. Test phenomena and failure modes

图 4. 有关试验现象及破坏形态

3.2. 离散扭转约束下叠合双梁的屈曲分析

离散连接导致的另一个严峻挑战是整体稳定性。Darkwah 等[24]通过对新型 H 形螺栓叠合梁的研究表明, 高强螺栓能显著提升构件的抗侧扭屈曲性能, 当螺栓间距控制在跨度的 1/15 时, 其承载力可达同等焊接构件的 93.3%, 但界面纵向滑移的控制仍需进一步优化。同时, Meza 等[25]通过对冷弯薄壁钢叠合梁相关试验揭示了局部屈曲模式间的复杂交互机制, 并指出当构件发生局部失稳破坏时, 仅调整连接件间距难以大幅提高其抗弯承载力。针对这种复杂机制, 徐博[19]通过在截面设计中引入相关系数, 提出简支叠合钢梁等效初始弯曲刚度理论模型(如式(1)所示), 从而量化研究双梁结构叠合受弯效应。

$$EI_e = \sum_{i=f}^c \left[EI_i + EA_i \left(\frac{\alpha \mu_i h_0 L (e^{\alpha L} + 1)}{2\varphi (e^{\alpha L} - 1) + \alpha L (e^{\alpha L} + 1)} + \lambda_i \right)^2 h_i^2 \right] \quad (1)$$

4. 基于叠合效应的模块化框架整体抗侧性能分析

从系统层面上看, 叠合梁对模块化框架整体抗侧性能也会产生一定的影响, 模块化建筑的整体抗侧刚度不仅取决于竖向连续柱, 还受制于叠合梁由于离散连接所展现出的复杂横向响应与传力机制, 不少学者对此做出了研究。

在横向变形控制与侧向刚度评估方面, 现有研究已证实相邻楼板与顶梁的协同作用可显著提升装配式钢结构建筑的整体抗侧性能。Xu B.等[26]针对侧向荷载下叠合双梁力学机理进行了分析, 综合试验、有限元与理论推导, 系统评估了其叠加弯曲行为。结果表明, 增大顶梁尺寸并强化机械连接能显著提高高层合梁的惯性矩与界面剪切刚度, 进而增强其反对称弯曲特性。在变形机制上, 界面螺栓促使双梁应变中性轴向接触面偏移, 直观验证了强烈的叠加协同效应。同时, 该研究揭示了呈对称抛物线分布的界面滑移模式, 指出滑移荷载率的激增会加速构件屈服。基于此, 该研究建立了考虑中性轴偏移的有效弯曲刚度解析模型, 成功量化了叠加刚度效应, 为整体横向刚度评估提供了精细化的理论工具。

在节点内力传导路径方面, 受模块柱竖向不连续性的影响, 侧向内力使柱体结构呈现弹性侧向弯曲变形, 双梁结构则表现出平面反对称弯曲变形。Liu 等[27]关于反对称弯矩下模块间双梁受弯行为的研究指出双梁间的协同受力经历了从“界面摩擦”到“螺栓抗剪”的演化过程, 揭示了双梁结构的协同弯曲机制, 但这种协同效应高度依赖于连接件的布置位置, 若过于靠近角部节点则会明显削弱对叠合梁的协同增效作用。

在等效力学模型构建方面, 为将复杂的实体滑移响应应用于大型框架分析, Liu 等[28]针对仅靠柱间连接易致整体坍塌的痛点, 对叠合双梁开展了深度的系统分析。该研究基于微分方程建立了兼顾摩擦与螺栓连接的界面滑移应变理论模型, 推导出含滑移效应的弯曲曲率表达式, 并构建了等效初始弯曲刚度的计算流程。研究证实, 引入螺栓连接可使构件抗弯承载力与初始刚度分别提升约 8%和 17%~28%。在构件级解析的基础上, 为简化三维实体计算, 徐博[15][19]等提出了引入刚度降效系数的宏观等效力学分析模型。该模型能有效捕捉界面的非线性行为, 便于利用常规有限元软件准确预测框架的侧移。

在结构稳定边界条件方面, 叠合双梁的刚度折减不仅增加框架整体侧移, 更直接改变了模块柱的计算约束。张鹏飞[29]系统推导了多层模块化体系中叠合双梁的等效刚度, 并给出了有侧移与无侧移工况下模块柱计算长度系数的修正公式。基于此进行了 MIDAS 有限元分析验证, 引入等效刚度后, 体系的周期振型、顶点位移及层间位移角等核心动力学指标均符合《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) [30]的要求, 为工程设计提供了量化依据。

在极端工况的抗连续倒塌性能方面, 宏观刚度评估同样关键。Luo 等[31]通过非线性动力分析明确指出, 在底层角部模块移除时, 结构受力模式将发生本质反转。这深刻表明, 叠合双梁的刚度协同效应是

维持荷载二次重分布、保证模块化建筑整体结构鲁棒性的核心防线。

5. 现有研究成果与国际主流设计规范的对比分析

钢结构叠合梁的实际受力状态通常介于完全组合与非组合两种极端情况之间, 界面滑移是影响其抗弯刚度与承载力的关键因素[19][28]。现有研究主要围绕滑移协调关系、等效抗弯刚度及受弯承载力计算等展开, 逐步揭示了离散连接条件下双梁协同工作的基本规律。相比之下, 国际主流设计规范更强调通过连接设计、构件分类及参数化方法实现设计表达[32][33]。因此, 现有研究虽已对部分组合作用形成一定认识, 但在设计参数统一化及设计表达方面仍有待完善。

在抗滑移连接设计方面, 已有研究表明, 连接件数量、连接间距及构造形式均会显著影响钢结构叠合梁的界面滑移与协同受力性能[15][17]。合理的连接构造能够提高层间协同作用, 进而改善构件整体刚度及受弯性能。相比之下, 国际主流钢结构设计规范已围绕截面分类、长细比控制及稳定折减建立了较成熟的验算框架[34]。这说明, 现有研究成果仍需进一步向连接性能分级方法和设计指标转化。

除界面滑移和协同受力问题外, 构件稳定性也是钢结构叠合梁研究的重要内容。已有研究指出, 钢结构叠合梁在受弯过程中可能发生局部屈曲、畸变屈曲及侧扭屈曲等失稳形式, 且离散连接会影响其稳定边界条件[23][24]。相关研究主要集中于失稳模式识别、影响因素分析及极限状态评估等方面。相比之下, 国际主流钢结构设计规范已围绕截面分类、长细比控制及稳定折减建立了较成熟的验算框架[32][33]。相较而言, 现阶段钢结构叠合梁研究虽已关注稳定问题, 但相关设计方法仍不够统一。

综合来看, 钢结构叠合梁在部分组合作用、抗滑移连接及构件稳定等方面已具备一定研究基础。现有研究侧重于揭示离散连接条件下的受力机理及影响因素, 而国际规范则更注重将相关问题转化为可操作的设计参数与验算流程。因此, 未来我国相关规范修订可重点围绕部分组合作用表征、抗滑移连接设计指标及离散连接双梁体系稳定验算方法等方面展开。

6. 结论

模块化装配式钢结构叠合梁的出现, 是建筑工业化向空间三维模块演进的必然产物。总体而言, 针对叠合梁的研究已从单一的理想化假设, 逐步向精细化的部分组合效应量化与整体结构协同演进, 本文系统梳理了钢结构叠合梁整体分析方法, 得出以下主要结论:

(1) 受力机理与理论边界: 叠合梁的受力特征突破了传统“独立受力”与“完全刚接”的二元假设。由离散连接引发的界面滑移与掀起变形, 使其展现出显著的非线性部分组合效应。

(2) 刚度与承载力的协同控制: 界面节点构造(如螺栓数量、预紧力及初始间隙)直接决定了层间滑移的发展程度。合理的离散连接可通过促使中性轴偏移, 显著提升构件的有效抗弯刚度, 并引导其发生延性破坏。

(3) 屈曲失稳与整体抗侧行为: 离散约束会加剧薄壁叠合构件的弯扭屈曲与局部畸变失稳风险。在宏观框架层面, 叠合梁的刚度折减与模块柱的不连续性相耦合, 改变了结构的抗侧传力路径; 因此, 在抗风、抗震与防连续倒塌设计中, 亟需引入节点-构件协同评估模型。

然而, 现行规范尚缺乏针对叠合梁的专项导则, 当前计算模型大多基于确定性参数, 未来亟需引入可靠度理论应对安装公差带来的强随机性, 并进一步深化叠合系统在强震、强风等复杂动载下的滞回耗能及损伤演化机理, 尽早促成统一的《钢结构叠合梁专项设计导则》落地, 为大型装配式钢结构向超高层与大跨度方向的演进提供坚实的理论支撑。

参考文献

- [1] Shi, G., Hu, F. and Shi, Y. (2014) Recent Research Advances of High Strength Steel Structures and Codification of

- Design Specification in China. *International Journal of Steel Structures*, **14**, 873-887.
<https://doi.org/10.1007/s13296-014-1218-7>
- [2] Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2019) Review of Bolted Inter-Module Connections in Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering*, **23**, 207-219. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.035>
- [3] Yang, C., Xu, B., Xia, J., Chang, H., Chen, X. and Ma, R. (2023) Mechanical Behaviors of Inter-Module Connections and Assembled Joints in Modular Steel Buildings: A Comprehensive Review. *Buildings*, **13**, Article No. 1727.
<https://doi.org/10.3390/buildings13071727>
- [4] Corfar, D. and Tsavdaridis, K.D. (2022) A Comprehensive Review and Classification of Inter-Module Connections for Hot-Rolled Steel Modular Building Systems. *Journal of Building Engineering*, **50**, Article ID: 104006.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104006>
- [5] 孙文彬. 部分剪力连接钢-混凝土简支组合梁滑移性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2001.
- [6] 谢丽君. 简支双层叠合梁的变形计算[J]. 机械强度, 2012, 34(5): 777-780.
- [7] Campi, F. and Monetto, I. (2013) Analytical Solutions of Two-Layer Beams with Interlayer Slip and Bi-Linear Interface Law. *International Journal of Solids and Structures*, **50**, 687-698. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.10.032>
- [8] 周勇超, 李亮亮, 李子青. 钢-混凝土组合梁界面滑移效应变分法求解[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(1): 39-44.
- [9] Schnabl, S., Saje, M., Turk, G. and Planinc, I. (2007) Locking-Free Two-Layer Timoshenko Beam Element with Inter-layer Slip. *Finite Elements in Analysis and Design*, **43**, 705-714. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.03.002>
- [10] 李杰, 邓林强, 桑丹, 等. 叠层钢梁整体抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(5): 115-118.
- [11] 李杰, 桑丹, 王涤平, 等. 非连续连接的叠层钢梁试验研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(4): 125-131.
- [12] Ye, J., Mojtabaei, S.M., Hajirasouliha, I., Shepherd, P. and Pilakoutas, K. (2018) Strength and Deflection Behaviour of Cold-Formed Steel Back-to-Back Channels. *Engineering Structures*, **177**, 641-654.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.064>
- [13] 张爱林, 郭志鹏, 刘学春, 等. 装配式建筑双槽钢组合截面梁整体稳定系数研究[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 67-75.
- [14] 常鸿飞, 胡磊, 宋心怡, 等. 钢箱模块叠合方钢管梁受弯性能试验与参数分析[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 540-549.
- [15] Xu, B., Xia, J., Ma, R., Chang, H., Yang, C. and Zhang, L. (2023) Investigation on Interfacial Slipping Response of Laminated Channel Beams with Bolt Connections in Modular Steel Buildings. *Journal of Building Engineering*, **63**, Article ID: 105441. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105441>
- [16] 丁昊. 新梁旧板叠合构件受弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [17] Ungureanu, V., Both, I., Burca, M., Radu, B., Neagu, C. and Dubina, D. (2021) Experimental and Numerical Investigations on Built-Up Cold-Formed Steel Beams Using Resistance Spot Welding. *Thin-Walled Structures*, **161**, Article ID: 107456. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107456>
- [18] 邹杨, 周志祥, 唐亮. 考虑滑移效应组合梁弯曲应力和界面剪力分析[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 173-179.
- [19] 徐博. 模块化钢结构建筑叠合钢梁受弯性能及力学模型研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [20] Rezaeian, H., Andarini, R., Bock, M. and Yekrangnia, M. (2024) A Parametric Study on the Flexural Capacity of Cold-Formed Steel Stacked Built-Up Sections. *International Journal of Steel Structures*, **24**, 1142-1153.
<https://doi.org/10.1007/s13296-024-00895-8>
- [21] 秦福阳. 钢结构模块化建筑叠合钢梁协同受弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [22] 黄仁锋, 赵金城. 混合钢种工字形叠合梁抗弯承载力研究[J]. 钢结构, 2015, 30(3): 12-17.
- [23] Selvaraj, S. and Madhavan, M. (2021) Design of Cold-Formed Steel Back-to-Back Connected Built-Up Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **181**, Article ID: 106623. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106623>
- [24] Darkwah, K.K., Lu, L., Liu, B., Huang, Z. and Hao, H. (2025) Lateral-Torsional Buckling Behavior of Low-Carbon H-Shape Bolted Composite Beams. *Buildings*, **15**, Article No. 688. <https://doi.org/10.3390/buildings15050688>
- [25] Meza, F.J., Becque, J. and Hajirasouliha, I. (2020) Experimental Study of Cold-Formed Steel Built-Up Beams. *Journal of Structural Engineering*, **146**, Article ID: 04020124. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002677](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002677)
- [26] Xu, B., Xia, J., Chang, H., Ma, R. and Zhang, L. (2022) Evaluation of Superimposed Bending Behaviour of Laminated Channel Beams in Modular Steel Buildings Subjected to Lateral Load. *Thin-Walled Structures*, **175**, Article ID: 109234.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109234>
- [27] Liu, Y., Lin, X., Chen, Z., Liu, J., An, Q., Li, X., et al. (2025) Bending Behavior of Inter-Module Double-Beam Structure under Antisymmetric Bending Moment in MSBs. *Structures*, **82**, Article ID: 110656.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110656>

- [28] Liu, R., Liu, Y., Li, L., *et al.* (2025) Theoretical and Experimental Evaluations on Cooperative Bending Behavior of Laminated Channel Beams in Modular Steel Buildings. *Buildings*, **15**, Article No. 4221.
- [29] 张鹏飞. 多层钢结构模块结构设计与力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范(2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [31] Luo, F.J., Bai, Y., Hou, J. and Huang, Y. (2019) Progressive Collapse Analysis and Structural Robustness of Steel-Framed Modular Buildings. *Engineering Failure Analysis*, **104**, 643-656.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.044>
- [32] American Institute of Steel Construction (2022) ANSI/AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings. AISC.
- [33] European Committee for Standardization (2022) EN 1993-1-1:2022 Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. CEN.
- [34] European Committee for Standardization (2024) EN 1993-1-8:2024 Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-8: Joints. CEN.