

模块化钢结构关键构件与结构整体性能研究进展

许峰*, 卢欣雅, 贾连光
(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 模块化钢结构建筑作为一种新型建筑结构形式,是由工厂预制独立模块单元并在施工现场组装而成的。其标准化的生产流程和灵活的装配方式,在施工效率和可持续性方面优势显著,契合国家推动建筑行业工业化发展的政策方向,现已在现代建筑领域实现快速发展。国内外学者围绕该结构体系开展了广泛研究,但我国模块化钢结构建筑的研究整体仍处于初步发展阶段,尚存在若干关键问题亟待解决,如关键构件间拼合协同的传力机制尚不明晰,结构整体性能及抗连续倒塌能力的研究仍存在明显不足等。文中系统梳理了近年来关于模块化钢结构建筑体系的研究进展,按照“从构件层面递进至体系层面”的逻辑展开论述,以柱类构件(单柱、拼合柱)、叠合梁以及结构整体性能为研究重点,首先聚焦方钢管柱、复杂角形截面柱等单个核心构件,分析其独立受力性能;在此基础上,进一步研究拼合柱、叠合梁等拼合类构件,探究构件间协同工作机制与力学响应规律;最终延伸至结构整体性能层面展开分析。最后,在总结现有研究成果的基础上,提出未来值得深入探索的研究方向,以期为该领域的持续发展提供参考。

关键词: 模块化钢结构; 模块柱; 模块梁; 结构整体性能; 协同工作机制; 研究进展

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)03-0001-16

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20251031003

Research Advances on Behavior of Key Components and Overall Structure of Modular Steel Structures

XU Feng*, LU Xinya, JIA Lianguang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

*Corresponding author: cefxu@sjzu.edu.cn

Abstract: Modular steel buildings represent an emerging structural system composed of factory-fabricated, self-contained modular units that are assembled on-site. Owing to their standardized production processes and flexible assembly methods, they demonstrate outstanding performance in terms of construction efficiency and sustainability. These advantages align well with national policies promoting the industrialization of the construction sector, leading to the rapid development of modular steel buildings in modern architecture. Extensive research has been conducted worldwide on this structural form. However, in China, studies on modular steel buildings are still at a preliminary stage, and several critical issues remain to be resolved. The collaborative load transfer mechanism between key structural components has yet to be clearly elucidated, and research on the overall structural behavior and progressive collapse resistance remains insufficient. This paper systematically reviews the recent research advances in modular steel building systems, and elaborates the discussion according to the logic of progressing from the component level to the system level. Focusing on column components (single columns and built-up columns), laminated beams and the overall structural performance, individual core components such as square steel tubular columns and complex angular section columns are first examined to analyze their independent mechanical performance. On this basis, the discussion is further extended to built-up components, including built-up columns and laminated beams, to

收稿日期: 2025-10-31

基金项目: 辽宁省住房和城乡建设厅项目(LNSJSKJ-2025-049)

作者简介:

许峰(1975—),男,博士,副教授,主要从事集成装配式钢结构方面的研究。E-mail: cefxu@sjzu.edu.cn。(通信作者)

explore the collaborative working mechanism and mechanical response characteristics between components. Finally, the overall structural performance level is then further addressed. In the end, based on the comprehensive review of existing research outcomes, potential directions for future studies are proposed to address the identified knowledge gaps and to support the continuous development and practical application of modular steel structures.

Keywords: modular steel structure; modular column; modular beam; overall structural performance; collaborative working mechanism; research progress

新时代以来,我国大力推进建筑工业化发展,在建筑施工过程中采用更简便、智能、环保的施工方式^[1-2],这对提高建筑工程质量、推动行业可持续发展具有重要意义。推动装配式建筑的规模化发展是实现建筑工业化转型的关键路径^[3-4]。模块化钢结构建筑作为装配式建筑的重要类型,以工厂预制、现场拼接为特点,兼具施工高效、绿色环保、抗震性能优异等优势^[5-7],凭借高度工业化、高效建造和绿色环保的特征,在高层建筑和大跨度结构中展现出显著的应用潜力。该结构形式是建筑装配化高度发展的成果,符合产业升级趋势和节能环保理念^[8-10],具备较强的竞争力和广阔的发展空间^[11]。

在我国建筑业向现代化转型的过程中,模块化钢结构建筑的技术规范体系已逐步构建,众多学者围绕该领域开展了大量研究,研究内容涵盖模块化钢结构关键构件的力学性能与整体结构性能。其中,关键构件的力学性能是决定整体结构稳定性、抗侧性能、抗震性等核心性能的基础,而整体结构的受力需求又反向对关键构件的设计标准形成约束。本文从方钢管柱、复杂角形截面柱、拼合柱与叠合梁等关键构件,以及模块化钢结构整体性能等方面,综述近年来模块化钢结构建筑体系的研究成果,最后对研究内容进行总结,并提出未来可能的

研究方向。

1 模块柱受力性能分析

在模块化钢结构体系中,柱类构件是承担荷载的关键单元,其力学性能直接关系到建筑结构的可靠性与安全性。当前相关研究主要聚焦于方钢管柱、开口截面柱与拼合柱等类型,围绕其受力机理、连接构造与设计方法展开探索,为模块化钢结构的体系化设计奠定了基础。

1.1 方钢管柱受力性能分析

方钢管柱是模块化钢结构中应用广泛的竖向承重构件,其受力性能与连接节点的构造设计,直接影响模块化钢结构建筑整体的受力性能。现有研究普遍关注方钢管柱与连接构造的协同受力机制,如表1所示。DENG等^[12]提出了带凸榫钢柱形式,研究了榫头尺寸对构件性能的影响,并讨论了相应的设计方法;张周等^[13]针对内套筒-对穿螺栓构造,研究了内套筒与螺栓相关参数对柱轴压受力性能的影响;KHAN等^[14-15]通过试验和有限元分析发现,剪切键几何参数对柱性能具有重要影响,且现行规范《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)、AISC 360-16等对其承载力的计算结果普遍高估超10%,存在一定工程安全隐患。

表1 方钢管柱受力性能分析

Table 1 Structural behavior analysis of square steel tubular columns

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献[12]		有限元模拟	研究了榫头参数对其轴压性能与屈曲行为的影响。研究表明:通过设计组合截面、降低屈曲长度、优化端部约束,可以系统性提升构件的稳定性和强度,同时组合截面设计可以增强构件整体的抗弯和轴向刚度。并建议采用EC3屈曲曲线对该新型钢柱进行设计。
文献[13]		有限元模拟	研究了柱宽厚比、方钢管是否开孔、内套筒的设置及其厚度等参数对柱构件的轴压受力性能的影响。研究表明:内套筒的设置使得柱端形成组合截面,初始刚度增大,提高了柱截面刚度与抗变形能力,套筒厚度的增加可增大组合截面的惯性矩和面积,同时改善应力分布;确定了适宜的内套筒高度、厚度以及螺栓间距取值范围。

续表

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献[14-15]		试验及有限元模拟	以柱长度、剪切键长度、剪切键宽度等为参数,研究了其在轴心受力下的力学性能;研究结果表明:增大剪切键的厚度和高度可以增强局部区域的刚度,改善传力路径,减小不利的应力集中和相对滑移,从而提升构件的承载力;提出了修正的承载力预测方程。

总体来看,插槽式榫头连接能有效提升柱的轴向承载力和整体刚度,且施工操作便捷,但其抗震性能有待深入验证;内套筒连接对提高截面刚度与承载力效果显著,尤其适用于宽厚比较小的柱,然而开孔会削弱构件局部强度,且相关抗震研究不足;剪切键连接在提供良好抗侧力与转动能力方面表现突出,适用于抗震要求较高的工程场景,但其非焊接形式会降低柱的轴向承载力,且对安装精度要求较高。综合而言,榫头连接在传力效率与施工便利性上优势明显,剪切键连接则在抗震方面具备更大发展潜力。目前,模块化建筑领域针对方钢管柱的系统性试验研究较少,且现有试验多聚焦于轴压性能,缺乏对偏压性能、抗震性能的分析,难以充分考虑施工缺陷、初始缺陷等实际工程情况。因此,方钢管

柱设计方法的标准化与施工可行性仍需进一步研究。

1.2 复杂卷边角形截面柱受力性能分析

除方钢管外,模块化钢结构中还常采用复杂卷边角形截面的开口截面柱作为竖向承重构件。与方钢管柱的闭口截面形式不同,开口截面便于在建筑中进行各类构造处理,因此得到了广泛应用。已有研究从多个角度对该类构件的轴压与偏压性能开展了系统探索,如表2所示。文献[16-20]分别对复杂卷边角形截面冷弯薄壁型钢柱的轴心受压性能进行研究,并提出了相应的设计计算公式;文献[21-23]分别对复杂卷边角形截面冷弯薄壁型钢柱的偏心受压性能进行研究,同样提出了相应的设计计算公式。

表2 复杂卷边角形截面柱受力性能分析

Table 2 Structural behavior analysis of complex angular section columns

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献[16]		试验及有限元模拟	明确了试件初始几何缺陷的分布规律、破坏模式与构件长度的关系,分析了各参数对构件轴心受压极限承载能力的影响,并验证了修正后直接强度法公式的适用性。
文献[17]		有限元模拟	对该轴心受压构件的弹性屈曲行为和稳定承载力进行了理论研究,提出其局部及畸变屈曲临界应力的计算方法,并利用遗传算法优化截面尺寸,验证了规范的适用性并给出直接强度法建议公式。

续表

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献[18]	<p> t: 板材厚度 r: 内角半径 B_{11}: 一次卷边长度 B_{12}: 二次卷边长度 B_1: 长翼缘宽度 B_2: 短翼缘宽度 x_0, y_0: 截面形心轴 x, y: 截面形心主轴 </p>	试验及有限元模拟	探究试件轴压下的破坏模式与极限承载力,分析加载轴对其的影响;基于试验数据,评估了各国现行设计规范对该类柱轴压承载力预测的适用性。
文献[19-20]	<p> x, y: 截面形心轴 x_0, y_0: 截面形心主轴 </p>	试验及有限元模拟	研究了构件长度、卷边比 d/c 和肢宽比 a/b 对构件轴压性能的影响规律,分析其畸变屈曲特性;基于现有直接强度法(DSM)提出改进设计方法,并验证了其预测适用性。
文献[21]	<p> x_0, y_0: 截面形心轴 x, y: 截面形心主轴 ECx_0+30: 刀较垂线偏向 x_0 正方向 30 mm </p>	试验及有限元模拟	明确试件初始缺陷分布,研究偏心方向、偏心距、构件长度和厚度对构件偏压性能的影响,基于直接强度法提出单/双向偏压承载力计算公式,并验证了公式的可靠性。
文献[22]	<p> x, y: 质心轴 x_+, x_-, y_+, y_-: 对于 x 轴向左/右偏移 40 mm, 对于 y 轴向上/下偏移 40 mm </p>	试验及有限元模拟	探究了偏心方向、截面厚度等参数对非对称复杂卷边角钢柱偏心受压性能的影响。基于直接强度法(DSM),提出了适用于不同偏心方向的承载力计算公式(分别针对局部屈曲和畸变屈曲)。
文献[23]	<p> t_1, t_2: 板材厚度 r: 内角半径 B_{11}, B_{12}: 长翼缘宽度 B_1, B_2: 短翼缘宽度 B_{111}, B_{112}: 简单卷边长度 B_{121}, B_{122}: 复杂卷边长度 x, y: 质心轴 x_+, x_-, y_+, y_-: 对于 x 轴向左/右偏移 40 mm, 对于 y 轴向上/下偏移 40 mm </p>	试验及有限元模拟	研究了长细比等因素对试件破坏模式和极限承载力的影响,发现加载轴位置和厚度影响显著。基于研究结果,提出了考虑相关屈曲的直接强度法设计公式。

现有研究通过试验与有限元相结合的方法,研究了该类构件在不同加载轴、不同偏心方向等工况下的承载力和破坏模式,通过揭示局部、畸变与整体屈曲之间的相互作用关系,提出了多种基于直接强度法(DSM)的修正

设计表达式,初步建立了适用于该类非对称复杂截面的设计体系,并指出现行规范在处理复杂卷边构造及截面非对称性方面存在的不足,为相关标准的修订提供了理论依据与试验支撑。但由于该类截面通常具有双轴不对

称及多次卷边的特点,其稳定性和屈曲模式表现出高度复杂性,且现有研究未考虑截面形心与剪心不一致带来的影响,提出的设计方法存在一定局限性。同时国内外现行规范尚未将此类复杂非对称截面构件纳入适用范围,因此,研究其稳定承载力及适用的设计方法,具有重要的理论意义和工程价值。

1.3 拼合柱协同受力性能分析

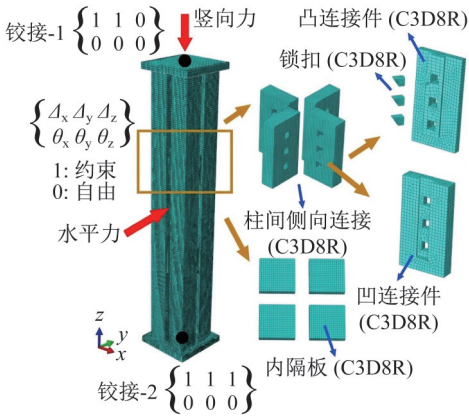
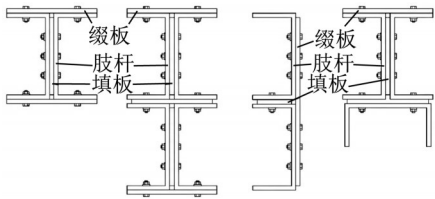
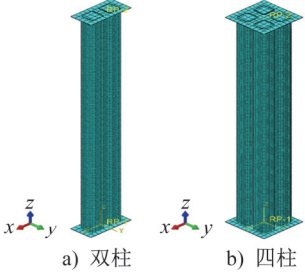
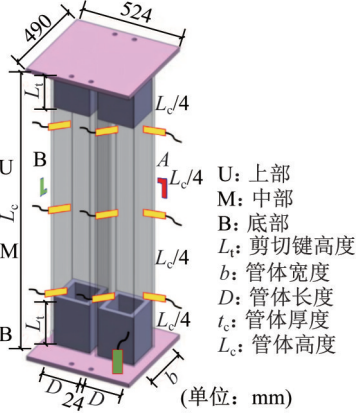
在柱构件设计中,国内外学者将多根单柱拼合形成“拼合柱”(如剪力键组合柱、外包钢板柱等),以提升竖向承载能力,并实现模块间力的协同传递。与传统独立钢柱相比,拼合柱的整体刚度与承载能力较高,如表3所示。

表3 拼合柱协同受力性能分析

Table 3 Analysis on collaborative mechanical behavior of built-up columns

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献[24]	<p>单肢柱 长肢拼合 短肢拼合 四肢拼合 (单位: mm)</p>	试验及有限元模拟	分析四种拼合柱在轴压作用下的失效模式,研究不同拼合模式对轴压承载力的影响;研究结果表明:短肢拼合柱中的拼合短肢比长肢拼合柱中的拼合长肢稳定性更好,使得短肢拼合柱的承载力大于长肢拼合柱的承载力;而四肢拼合柱由于承载柱肢较多,外伸肢段的变形对整体模块柱的影响较小,所以承载能力较高。明确了外伸长肢的稳定性对模块柱轴压性能的影响。
文献[25-26]		有限元模拟	提出一种外包钢板柱-柱组合构件,研究外包钢板对组合柱承载能力和耗能能力的影响。研究结果表明:外包钢板作为连接构件,能使各柱协同工作,约束柱间相对位移,同时在模块柱受力过程中提供反向作用力,抵消附加弯矩和水平荷载的作用,使构件的整体承载能力和整体抗侧刚度显著提升;外包钢板先于模块柱屈服,使得构件整体具有良好的耗能能力。
文献[27-28]	<p>a) C-T12 (0.8% rad) b) C-T12-中间开孔 (0.4% rad) c) C-T20-全部开孔 (0.4% rad) (单位: MPa)</p>	有限元模拟	为避免钢板的连接破坏先于钢板剪切破坏,优化外包钢板形式,提出“半圆形缺口钢板”,并分析不同连接形式对组合柱受力性能的影响。研究表明:不同连接形式对组合柱受力性能影响不大;开孔钢板延性较好,可在地震中率先屈服耗能,减小主体结构的损伤;全部开孔的形式更易保证钢板首先屈服,避免端部连接发生脆性破坏。
文献[29]	<p>预件组装 → 螺栓紧固 → 完成安装</p>	试验及有限元模拟	提出一种纯螺栓连接的四柱拼接组合柱,并对其轴心受力性能进行试验研究和有限元分析。结果表明:四柱拼接组合柱通过芯筒、缀板与螺栓将四根方钢管刚性连接为整体,使各柱协同受力;芯筒可以实现荷载均匀传递,缀板约束了板件的局部屈曲,使得组合柱的承载能力和抗弯刚度显著提升。

续表

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献[30]	 <p>铰接-1 $\begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}$ 竖向力 凸连接件 (C3D8R)</p> <p>$\begin{Bmatrix} \Delta_x & \Delta_y & \Delta_z \\ \theta_x & \theta_y & \theta_z \end{Bmatrix}$ 1: 约束 0: 自由</p> <p>水平力 锁扣 (C3D8R)</p> <p>柱间侧向连接 (C3D8R)</p> <p>凹连接件 (C3D8R)</p> <p>内隔板 (C3D8R)</p> <p>铰接-2 $\begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}$</p>	有限元模拟	<p>通过参数分析揭示了柱间侧向连接数目、构件长细比和锁扣数目对承载性能的影响规律。侧向连接的布置使独立箱形柱在水平方向形成刚性连接,在轴压或压弯状态下,荷载通过侧向连接和连接件在各柱之间重新分配,协同工作效果显著,整体承载能力提升。结果表明:该连接技术可在不破坏围护结构的前提下,有效解决模块柱协同受力问题。</p>
文献[31]	 <p>缀板 肢杆 填板</p>	有限元模拟	<p>研究分析了填板设置位置与间距对组合柱承载力与抗侧刚度的影响;结合剪切变形影响下的线弹性屈曲承载力,得出组合柱的换算长细比与截面惯性矩的计算式。</p>
文献[32]	 <p>a) 双柱 b) 四柱</p>	有限元模拟	<p>建立了簇柱的精细化有限元模型,分析了各参数对簇柱承载力、刚度的影响。轴心受压构件的承载力主要由材料屈服强度控制,钢材强度越高,簇柱的承载力也就越大;宽厚比越大,板件的局部屈曲临界应力降低,导致簇柱的承载力下降;长细比越大,构件整体屈曲临界力降低,使承载力逐渐降低。通过稳定系数计算与规范对比,提出了相关设计建议,为簇柱设计提供了理论依据。</p>
文献[33]	 <p>U: 上部 M: 中部 B: 底部 L_c: 剪切键高度 b: 管体宽度 D: 管体长度 t_c: 管体厚度 L_c: 管体高度</p> <p>(单位: mm)</p>	试验及有限元模拟	<p>探究剪力键组合管状柱在轴心受力下的力学性能,分析剪力键尺寸、柱参数等对其破坏模式和承载力的影响。在研究参数范围内,柱截面尺寸增大和柱数量增加会使截面面积和截面惯性矩增大,显著提高柱的极限承载力和抗弯刚度;剪切键厚度增加,柱端约束增强,延缓局部屈曲的发生,显著提高柱的极限承载力和抗弯刚度;最后提出修正预测公式并验证其可靠性。</p>

王霄翔等^[24]研究了单柱及不同拼合模式组合柱在轴压作用下的失效模式与承载力;徐亚冲^[25]、杨超等^[26]提出外包钢板柱-柱组合连接形式,分析了柱-柱组合的强度破坏与失稳破坏模式;杨超^[27]、杨超等^[28]在此基础上对外包钢板进行了优化,并对其开展受力机理分析;张昫路^[29]提出一种全螺栓连接的模块化装配式四柱拼接

组合柱,通过轴压试验与有限元模拟系统研究其受力性能,并提出了相应的稳定承载力设计方法;安琦等^[30]提出自锁式连接系统,研究发现该系统能显著提升模块柱间的协同工作性能和整体承载力;孙瑛志等^[31]通过理论推导与有限元验证,分析了填板对槽钢组合柱抗侧刚度的增强作用;邓恩峰等^[32]通过有限元模拟分析了模块化

钢结构“簇柱”的轴压性能,系统研究了钢材强度、宽厚比、长细比等参数对其力学性能的影响规律;KHAN等^[33]研究了4个不同剪切键高度和厚度的钢剪力键组合管状柱的轴压性能。

总结发现,现有拼合柱的构造形式均可在工厂预制,再于施工现场通过螺栓或连接板完成组装,施工便捷;不同拼合方式均能提升构件的整体承载力,其中外包钢板、自锁式连接的拼合柱承载能力提升效果更为显著,但自锁式连接锁扣加工对精度要求较高,施工成本相对偏高。当前关于拼合柱的研究已取得诸多阶段性成果:构造类型方面,涵盖了剪力键连接、外包钢板、自锁式连接等多种形式,体现出较强的结构适应性与工程应用潜力;研究手段方面,广泛采用足尺试验、有限元模拟及理论推导等方式,实现试验与数值分析的相互验证;此外,多项研究基于参数分析建立了相关稳定系数表达式、DSM修正方法及换算公式,初步形成了拼合柱设计理论雏形。但由于拼合柱存在构件几何复杂、屈曲机制多样等问题,其在设计理论与规范适用性方面仍面临挑战。因此,深入研究模块化钢结构中拼合柱的力学

性能、构造连接机制及规范设计方法,具有重要的理论意义与工程价值。

2 叠合梁协同受力性能分析

在模块化建筑的施工安装中,由于施工空间限制,上下模块的地板梁与天花板梁相互分离,模块间的相互约束较弱^[34-35],不仅无法保证模块化建筑的整体稳定性,也难以充分发挥构件的力学性能,为提高上下模块梁的协同受力性能,研究者提出通过螺栓、连接板等构造将地板梁与天花板梁连接,形成“叠合梁”结构,从而有效减少构件间的滑移,提升结构整体稳定性。

针对这一问题,国内外学者围绕梁与梁之间的连接形式开展了大量研究,主要通过静载试验与有限元分析,揭示了不同连接构造与截面配置下叠合梁的受力性能,相关内容如表4所示。对于方钢管梁,秦福阳^[36]、常鸿飞等^[37]提出将上下模块方钢管梁通过连接端板与对拉螺栓实现叠合受力的连接方法,研究其协同受弯性能与破坏机理;安琦等^[38]提出通过自锁式连接件连接上下模块单元梁,研究这一新型构件的传力机理及破坏模式。

表4 叠合梁协同受力性能分析

Table 4 Analysis on collaborative mechanical behavior of laminated beams

文献	插图	研究内容与主要结论
文献 [36-37]		<p>通过4组足尺试件的平面内受弯试验,探究连接位置、螺栓参数、连接板长度、焊缝位置等对叠合钢梁协同受弯性能的影响。研究结果表明:有连接叠合梁的抗弯承载力比无连接叠合梁的抗弯承载力提高了26.67%,在有连接叠合梁中,连接板和对拉螺栓起到了抗水平剪力的作用,连接作用的增强使得上下梁的中和轴区域趋于重合,构件的受力性能表现得更好;通过参数分析优化连接形式,并推导验证了叠合钢梁受弯承载力计算公式。</p>
文献 [38]		<p>探究竖向均布荷载、端弯矩荷载下,模块梁的破坏模式、荷载-位移曲线、极限承载力与延性;明确连接件(开孔抗剪板、锁扣)的传力路径,验证“挤压传力为主、剪力传递为辅”的协同机制;分析不同连接件参数对叠合模块梁承载力的影响,并对比协同受力模块梁与常规模块梁的承载力。</p>

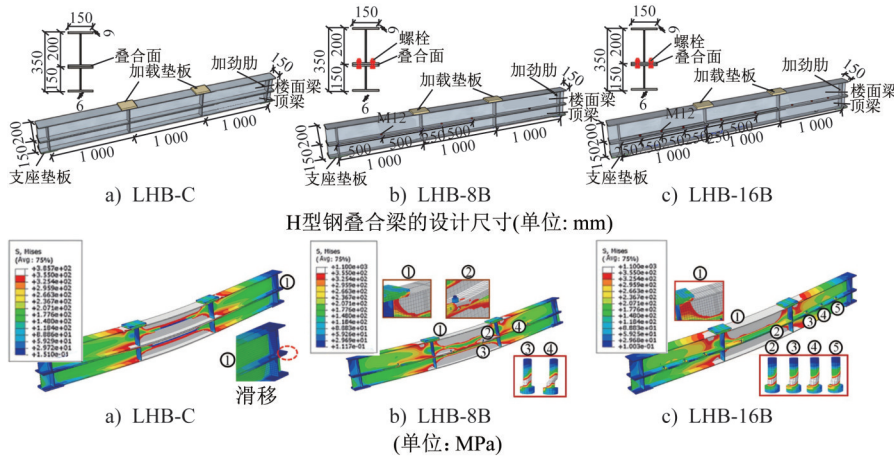
续表

文献

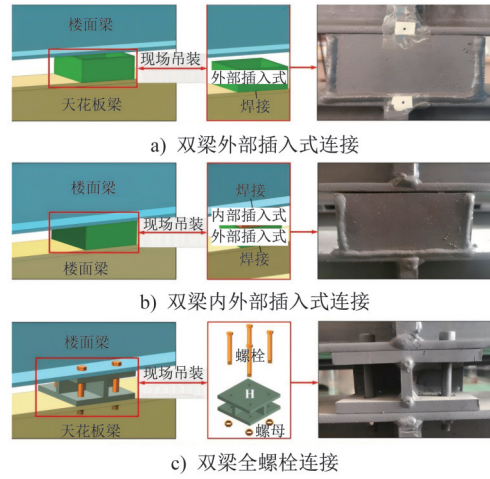
插图

研究内容与主要结论

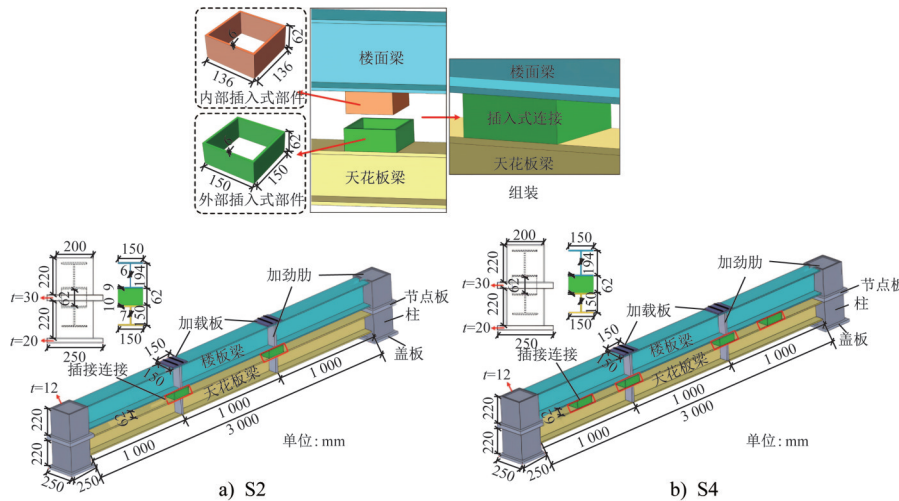
文献 [39]



文献 [40]

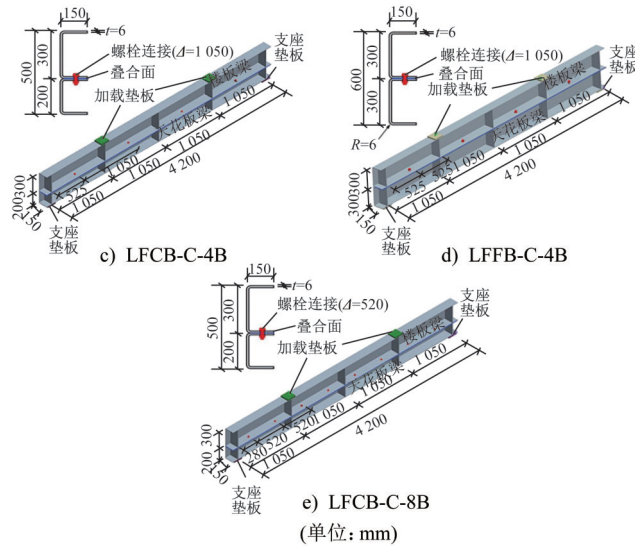


文献 [41]

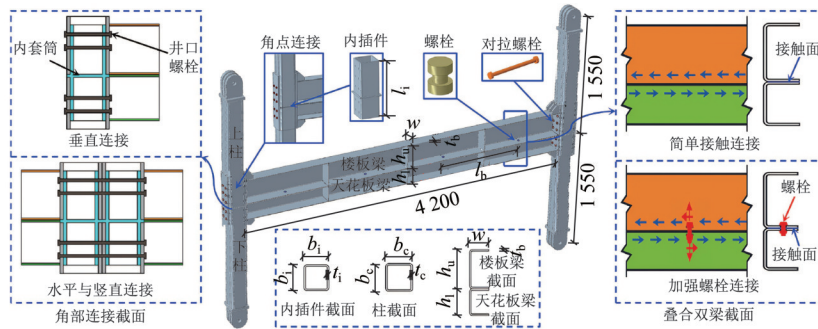


续表

文献	插图	研究内容与主要结论
----	----	-----------



文献 [42-47]



b_1 : 内插件宽度; t_1 : 内插件厚度; b_2 : 柱子宽度; t_2 : 柱子厚度;
 h_1 : 楼板梁高度; h_2 : 天花板梁高度; t_3 : 梁厚度(单位: mm)

聚焦模块化钢结构建筑中叠合钢梁的受弯性能及力学模型,通过试验与有限元模拟,揭示了叠合面滑移行为、叠合梁应变中性轴转移规律及其对结构整体性的关键影响。研究表明:相较于独立工作的双梁,叠合连接能显著提高叠合钢梁的竖向和水平受弯承载力、刚度及整体性;叠合面滑移是控制叠合效应的核心因素,其幅值随连接刚度增加而减小;螺栓连接促使上下梁中性轴向叠合面转移,增强了协同工作效应;该研究成功建立了叠合面滑移理论模型、叠合钢梁等效初始弯曲刚度模型及挠曲线理论模型,并分析了叠合梁在侧向荷载下的反对称弯曲性能、应变分布及界面滑移,为模块化钢结构建筑的优化设计提供了可靠的理论依据。

注:文献[36-37]、[39-47]均采用了试验及有限元模拟的研究方法;文献[38]采用了有限元模拟的研究方法。

对于H型钢梁,DENG等^[39]探究了螺栓连接的H型钢叠合梁的受弯性能,重点揭示了不同螺栓连接对叠合梁协同受力机制的影响规律;LIU等^[40-41]研究了模块化建筑中不同连接形式双梁结构的协同受力性能,重点探究了不同双梁连接形式以及模块间连接刚度对结构承载力、刚度及破坏模式的影响,并提出相应的设计方法与理论模型。对于槽钢梁,XU等^[42-47]系统性研究了模块化钢结构建筑中叠层槽钢梁的弯曲性能、界面滑移行为及其协同工作机制,形成了从试验、数值模拟到理论分析的全链条研究体系。并进一步开展了子框架试验,研究了双梁结构的叠合作用对模块化钢结构建筑的影响。

总结可知,各类叠合梁连接形式均具有良好的传力效率,有效提高了上下梁间的相互约束作用,增强了模块化结构的整体性;其中自锁式连接、内外插接连接的施工操作较为便捷,但自锁式连接的锁扣自锁式连接对加工工艺要求较高,施工成本偏高,而内外插接连接的抗弯承载力相较于螺栓连接的抗弯承载力较低。

当前关于模块化钢结构中叠合梁的研究,在构造形式、滑移机理、理论建模与试验验证等方面已取得一系列代表性成果。连接构造方面,学者们提出了外挂插件、内插插件、抗剪螺栓等多样化构造形式,拓展了叠合梁的工程适用范围;理论建模方面,建立了界面刚度表达式以及滑移刚度控制模型,逐步完善了叠合梁协同滑移分析体系;性能提升方面,多数叠合构造均可通过提供水平抗剪力,提高结构整体性,有效提升构件的初始刚度和极限承载力,同时改善其变形能力;试验方面,DIC等技术被应用于滑移监测与力学行为识别,试验方法逐步成熟。

叠合梁作为模块化钢结构中连接上下模块梁构件的重要形式,在提升连接刚度、控制滑移变形、增强结构整体协同性方面发挥着关键作用。但目前相关研究仍停留在构件层次,对叠合钢梁在框架体系中的力学行为研究较少,缺乏对模块梁、柱、节点之间协同受力机制的深入探讨。

3 模块化钢结构整体性能研究

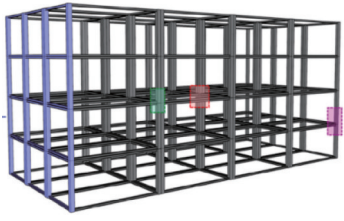
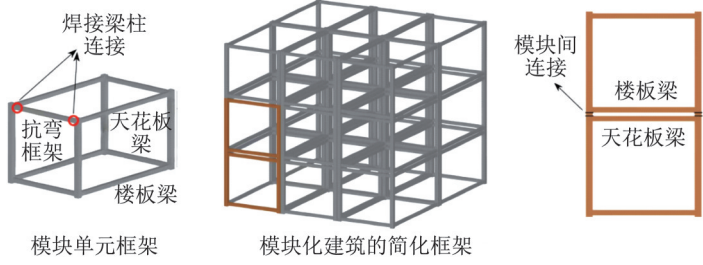
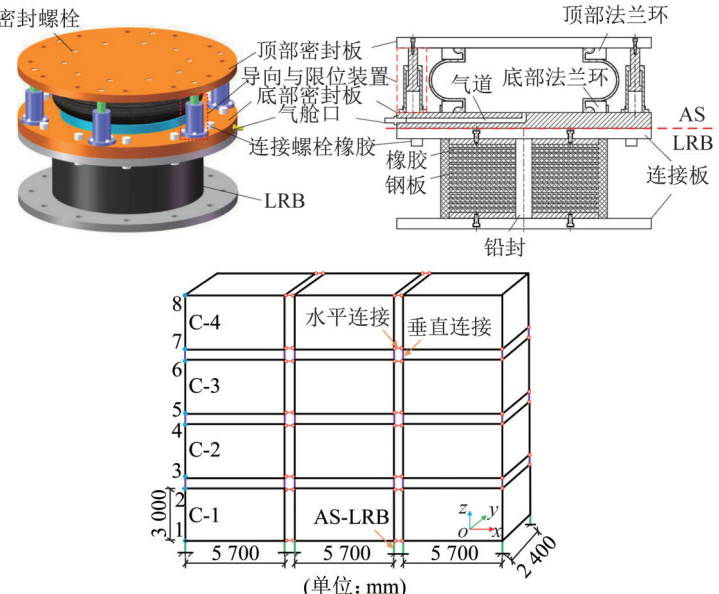
随着模块化钢结构在多层与高层建筑中的推广应用,其抗震安全性、抗连续倒塌能力以及整体结构鲁棒性受到越来越多的关注。模块结构由多个独立单元通过连接节点拼装形成,荷载传递路径复杂,加剧了极端荷载作用下结构整体响应的不确定性。因此,围绕模块化结构在地震、局部构件失效等情景下的性能开展研究,具有重要理论意义与工程应用价值。

抗震性能研究方面的相关研究成果如表5所示。文

献[48-50]均围绕模块化钢结构的抗震性能优化展开研究,分别从抗震响应参数化分析、分布式抗震设计验证、三维隔震技术创新三个方向开展探索。其中,传统抗震设计优化方法更适用于已有模块化结构的性能评估和局部优化,通过优化参数提升结构抗震性能;分布式抗震设计方法可以提高结构冗余度和抗震韧性,增强整体抗震性能,适用于中高层模块化建筑;三维隔震技术通过隔震装置隔离地震能量输入,采用竖向与水平隔震分离设计,适用于高层建筑或抗震要求较高的建筑工程。

表5 模块化钢结构抗震受力性能分析

Table 5 Analysis of seismic load-bearing performance of modular steel structures


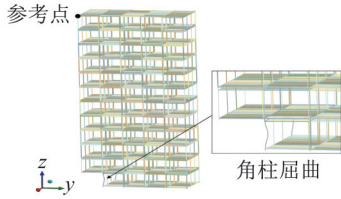
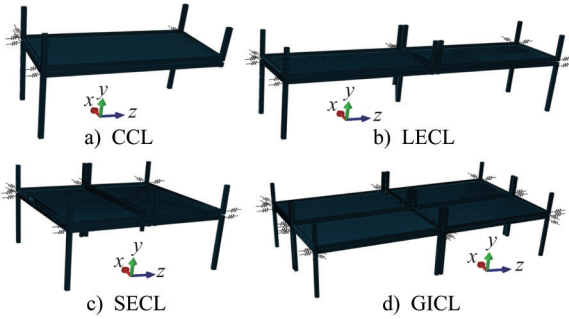
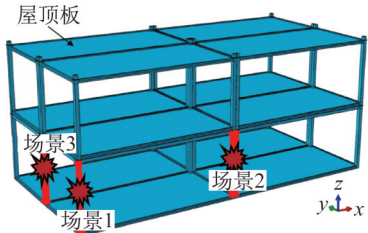
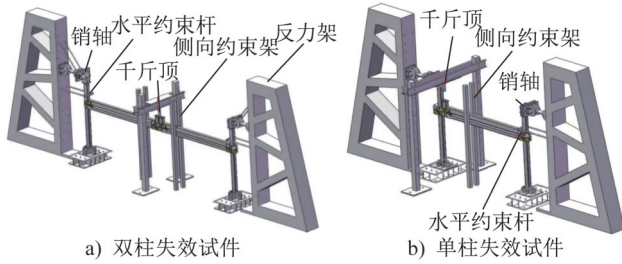
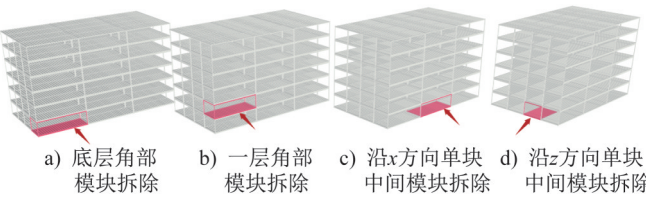
文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献 [48]		有限元模拟	分析模块间竖向转动刚度、双梁截面、模块数量对地震下层间位移角、顶点位移、屈服时序的影响;开展地震易损性分析,探究构件缺失对结构抗倒塌性能的影响;验证了分布式抗震设计方法的适用性。
文献 [49]		有限元模拟	针对模块化钢结构离散连接、楼板不连续特性,提出“分布式抗震设计方法”(利用所有模块抗侧力),以9层原型建筑为对象,建立24组参数模型,分析模块间连接转动刚度、抗震设计力水平、设计基底剪力高度分布对结构抗震性能的影响。
文献 [50]		试验及有限元模拟	提出新型空气弹簧-铅芯橡胶支座(AS-LRB)三维隔震装置(AS负责竖向隔震、LRB负责水平隔震),通过试验研究其力学性能,建立相应设计方法,对4层三跨模块化钢结构建筑在普通、近断层、远场地震下的隔震性能进行分析。

模块抗连续倒塌及鲁棒性方面的相关研究成果如表6所示。文献[51-63]以模块化钢框架结构的抗连续倒塌性能与结构鲁棒性为核心,通过试验、数值模拟及非线性

静力/动力分析方法,从局部构件或模块突然移除的情况出发,分析破坏触发后荷载重分布与破坏蔓延路径,并提出相应的结构性缓解构造措施。

表6 模块化钢结构抗倒塌性受力性能分析

Table 6 Analysis of load-bearing performance of modular steel structures for collapse resistance

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献 [51-52]	 <p>a) 角柱缺失子结构试件 b) 边柱缺失子结构试件</p>	试验及有限元模拟	<p>通过角柱缺失(S-CCL)和边柱缺失(S-SCL)的子结构试验,对比两种场景下的失效模式、承载力、双层梁相对滑移等指标;发现S-SCL弹性阶段承载力约为S-CCL的2倍,在弹塑性阶段因悬链线作用,S-SCL承载力约为S-CCL承载力的3倍,且S-SCL双层梁滑移更小。</p>
文献 [53]	 <p>参考点 角柱屈曲</p>	有限元模拟	<p>以12层模块化建筑为对象,研究柱缺失(角柱、边柱、中柱)和模块缺失场景,通过参数化分析探究柱截面、支撑系统、模块数量等对荷载重分布的影响;指出角柱/角模块缺失是最危险的工况,增设支撑可使结构鲁棒性提升88%,并提出5项抗倒塌设计建议。</p>
文献 [54]	 <p>a) CCL b) LECL c) SECL d) GICL</p>	有限元模拟	<p>分析多类柱缺失(内柱、边柱和角柱等)场景,研究柱缺失位置、楼板厚度、梁高对结构抗倒塌性能的影响,量化梁、板抗倒塌贡献;发现普通内柱缺失场景下结构的鲁棒性最强(楼板贡献35%)、角柱缺失下最弱(楼板贡献70%),且增加梁高是提升抗倒塌性能最经济有效的方式。</p>
文献 [55]	 <p>屋顶板 场景1 场景2 场景3</p>	有限元模拟	<p>针对角柱、长边边柱、短边边柱缺失场景,研究4层与12层复合模块化建筑的峰值响应与失效机制,提出动态放大系数(DIF),4层/12层建筑分别推荐1.90/1.60;且12层建筑在设计荷载下仅出现局部屈服,无倒塌趋势。</p>
文献 [56]	 <p>销轴 水平约束杆 侧向约束架 反力架 千斤顶 a) 双柱失效试件 b) 单柱失效试件</p>	试验及有限元模拟	<p>针对螺栓-角件连接的模块化钢梁柱子结构,开展单柱、双柱失效试验及数值模拟,探究水平连接板厚度对倒塌机制的影响。</p>
文献 [57]	 <p>a) 底层角部模块拆除 b) 一层角部模块拆除 c) 沿x方向单块中间模块拆除 d) 沿z方向单块中间模块拆除</p>	有限元模拟	<p>针对角部模块突然缺失场景,采用有限元法评估梁抗弯能力强度、混凝土填充柱、K形短支撑三种抗倒塌策略,提出损伤指数(DI)量化结构响应;结果显示,柱中点K形支撑的防倒塌效果最佳(DI降至0.06),混凝土填充柱适用于新建建筑,K形支撑更适合既有建筑改造。</p>

续表

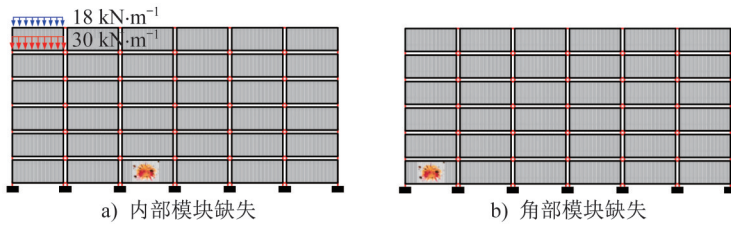
文献

插图

研究方法

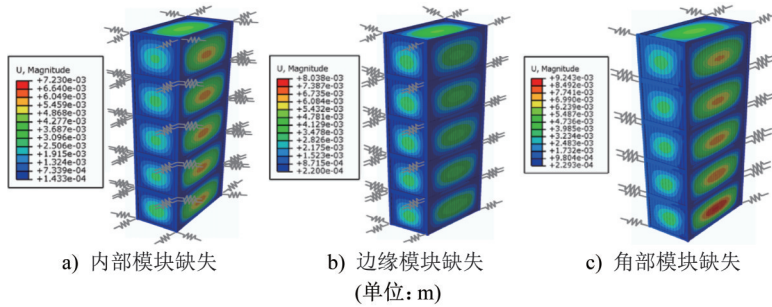
研究内容与主要结论

文献 [58]



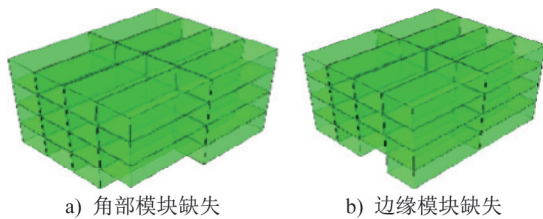
有限元模拟
聚焦内部与角部模块缺失场景,研究波纹板开口尺寸、厚度及水平连接对结构抗倒塌性能的影响;指出墙板开口尺寸的影响最为显著(开口减小50%,抗倒塌能力提升50%),并确定内部/角部模块缺失的动态放大系数(DAF)。

文献 [59]



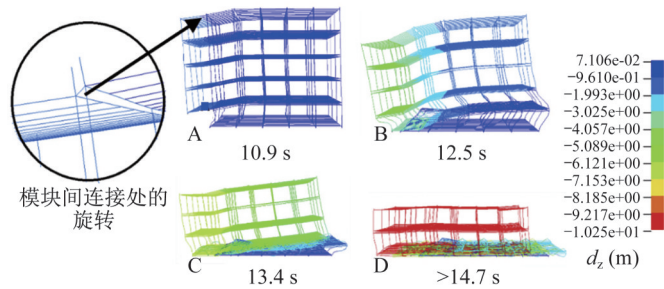
有限元模拟
对比角部、边缘、内部、双边缘模块缺失的3D与2D模型的分析差异(2D模型高估角部模块缺失位移达4倍),分析钢墙板对荷载传递的影响(贡献35%~66%,使部分连接从受拉转为受压),明确模块化框架与传统框架的传力差异。

文献 [60]



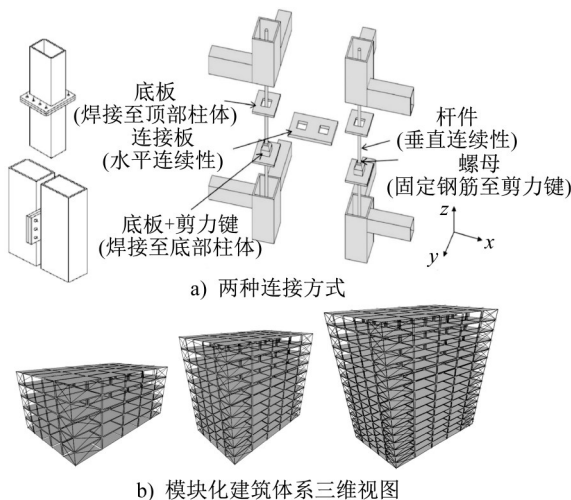
有限元模拟
针对单/双模块缺失(角部、内部模块)场景,采用宏观有限元模型模拟动态响应与静力推覆性能;发现模块化建筑抗倒塌能力强(4层建筑荷载系数达20),内部模块缺失场景下结构鲁棒性最优,高层层内部模块缺失因拱效应引发传播型倒塌。

文献 [61]



有限元模拟
以底部角模块缺失为基准工况,延伸至多模块缺失场景,探究模块数量、连接刚度、楼板等对倒塌过程的影响,识别4种最终状态(完全倒塌、带屈曲的倒塌抑制、无构件屈曲导致倒塌停止、部分倒塌);指出增加每层模块数量、强化节点连接可提升结构抗倒塌能力,边缘模块需额外进行加强处理。

文献 [62]



有限元模拟
以5、10、15层模块化钢结构建筑为对象,建立有限元模型,通过非线性静力推覆分析,探究螺栓式与后张拉杆式两种模块间连接(IMC)对结构抗连续倒塌鲁棒性的影响;基于易损性理论建立概率需求模型,量化了不同高度、不同连接类型建筑的倒塌概率。

续表

文献	插图	研究方法	研究内容与主要结论
文献 [63]	<p>a) 初始状态 b) 第一阶段结束时</p> <p>c) 火灾蔓延至2区 d) 最终倒塌状态</p> <p>(单位: MPa)</p>	有限元模拟	聚焦火灾场景下多层模块化钢框架的倒塌机制,以6层模块化建筑为原型(采用ABAQUS建模),分析单模块火灾与火灾蔓延工况下结构的变形、荷载传递及倒塌过程,并探究荷载比、柱截面尺寸、火灾位置对结构性能的影响。

目前关于模块化钢结构整体性能的研究,已在抗震性能、抗连续倒塌机制与鲁棒性评估等方面取得了显著进展。抗震性能方面,提出了多种连接刚度建模方法及三维隔震构造,试验证明相关方法和构造在减小层间位移、提升结构耗能能力方面效果显著;在倒塌路径方面,相关研究揭示了关键构件失效后,模块结构传力路径的重构规律及连续倒塌的演化机制,并提出了系统性的缓解策略;鲁棒性评估方面,学者们构建了基于脆性分析的概率评估方法,量化了连接构造、结构层数等因素对结构整体鲁棒性的综合影响;建模策略方面,提出了考虑连接柔性与非线性变形特征的多尺度模型,显著提升了结构在地震和倒塌情景下的响应分析精度。

尽管如此,相关研究仍面临诸多挑战:当前多数研究仍以数值模拟为主,缺乏足够的整体结构抗震及抗倒塌试验数据作为支撑;部分研究中的连接建模依然采用理想化的刚接或铰接模型,未能充分反映实际连接中的非线性滑移、残余变形等关键特性;此外,对于地震、火灾、爆炸等极端工况叠加效应的响应评估仍较为缺乏,尚未形成系统的设计策略;目前仍缺少面向模块化建筑整体性能的专门抗倒塌设计准则与鲁棒性评价标准,工程应用层面的规范支撑亟待完善。

4 结论

本文从柱类构件和叠合梁构造出发,系统梳理了各类关键构件在受力性能、连接构造、建模方法与设计方法方面的研究进展,同时结合近年来模块化钢结构在整体抗震性能、抗倒塌能力与鲁棒性评估方面的研究成果,全面呈现了该结构在构件与体系层面的发展现状。尽管现有研究取得了阶段性成果,但仍存在若干问题与挑战,未来可从以下方面开展深入研究:

方钢管柱方面,需要在偏压、受弯和循环荷载条件下开展系统性试验,完善对高长细比构件及施工缺陷的认知,同时推动设计方法的标准化,提升其工程适用性与安全性;复杂卷边角形截面柱方面,应加强对高长细比构件和复杂边界条件下稳定与破坏机理的探索,进一步完善适用于非对称截面的设计表达式,为相关规范修订提供支撑;拼合柱方面,应进一步扩大试验样本规模,涵盖更多构造形式与长细比类型,深入探讨组合柱在压弯和循环荷载下的应力状态;叠合钢梁方面,需开展叠合钢梁在框架体系中的力学行为研究,深入探讨模块梁、柱、节点之间协同受力机制,并设计出更贴合施工要求的双梁连接形式;整体体系方面,需开展大型足尺试验与多尺度建模研究,建立构件-节点-模块-体系全过程的一体化分析框架,深化对地震、火灾、爆炸等极端工况叠加效应的响应评估。同时推动性能化抗震与抗倒塌理念纳入相关规范体系。

参考文献:

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[J]. 建筑监督检测与造价, 2016, 9(6): 6-7. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3607.2016.11.002.

General Office of the State Council. Guiding opinions of general office of the state council on vigorously developing prefabricated buildings [J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2016, 9 (6) : 6-7. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-3607.2016.11.002.(in Chinese)

[2] 中共中央国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见[J]. 安装, 2024(12): 1-5.

Opinions of the CPC central committee and the state council on accelerating green transition in all areas of economic and social development [J]. Installation, 2024 (12) : 1-5. (in Chinese)

- [3] 周宽,杨丽,SARAh A.Salah,等.装配化盒子建筑的发展思考[J].住宅科技,2020,40(7):57-59,79.DOI:10.13626/j.cnki.hs.2020.07.012.
ZHOU Kuan,YANG Li,SALAH S A,et al.Thinking on the development of assembling box buildings [J].Housing Science,2020,40(7):57-59,79.DOI:10.13626/j.cnki.hs.2020.07.012.(in Chinese)
- [4] 陈金林,侯兆新,龚超,等.模块化钢结构建筑连接技术及鲁棒性研究进展与展望[J].建筑钢结构进展,2025,27(4):1-13.DOI:10.13969/j.jzgjgz.20231101001.
CHEN Jinlin,HOU Zhaoxin,GONG Chao,et al.State-of-the-art research and prospect of inter-module connections and robustness of modular steel buildings [J].Progress in Steel Building Structures,2025,27(4):1-13.DOI:10.13969/j.jzgjgz.20231101001.(in Chinese)
- [5] 刘常振,黄杰,邓恩峰,等.模块化钢结构建筑体系应用与研究进展[J].结构工程师,2024,40(1):217-226.DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2024.01.020.
LIU Changzhen,HUANG Jie,DENG Enfeng,et al.State-of-the-art on application and research of modular steel construction [J].Structural Engineers,2024,40(1):217-226.DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2024.01.020.(in Chinese)
- [6] LIU Y,TANG J,CHEN Z H,et al.A review on the mechanical properties of MSBs based on discontinuous members[J].Journal of Constructional Steel Research,2025,228:109388.DOI:10.1016/j.jcsr.2025.109388.
- [7] CHEN Z H,KHAN K,KHAN A,et al.Exploration of the multidirectional stability and response of prefabricated volumetric modular steel structures[J].Journal of Constructional Steel Research,2021,184:106826.DOI:10.1016/j.jcsr.2021.106826.
- [8] DENG E F,DU Y P,LIAN J Y,et al.Shear behavior of the fully prefabricated liftable connection for modular steel construction [J].Journal of Building Engineering,2024,92:109793.DOI:10.1016/j.jobee.2024.109793.
- [9] FERDOUS W,BAI Y,NGO T D,et al.New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings-A state-of-the-art review [J].Engineering Structures,2019,183:883-893.DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.061.
- [10] 陈力.预制装配整体式模块化建筑的应用与发展[J].广东建材,2019,35(3):67-70.DOI:10.3969/j.issn.1009-4806.2019.03.021.
CHEN Li.Application and development of prefabricated integrated modular building [J].Guangdong Building Materials,2019,35(3):67-70.DOI:10.3969/j.issn.1009-4806.2019.03.021.(in Chinese)
- [11] 胡向磊,王威.低碳建造模式在高层建筑的应用:以当代装配盒子住宅为例[J].建筑技艺,2020,26(8):43-45.DOI:10.3969/j.issn.1674-6635.2020.08.008.
HU Xianglei,WANG Wei.The application of low-carbon construction mode in high-rise building:Case study of modern residence with assembly box space [J].Architecture Technique,2020,26(8):43-45.DOI:10.3969/j.issn.1674-6635.2020.08.008.(in Chinese)
- [12] DENG E F,YAN J B,DING Y,et al.Analytical and numerical studies on steel columns with novel connections in modular construction [J].International Journal of Steel Structures,2017,17(4):1613-1626.DOI:10.1007/s13296-017-1226-5.
- [13] 张周,刘仲洋,杨晗,等.模块化钢框架组合柱轴压承载力数值模拟研究[J].河北建筑工程学院学报,2023,41(2):9-15.DOI:10.3969/j.issn.1008-4185.2023.02.002.
ZHANG Zhou,LIU Zhongyang,YANG Han,et al.Numerical simulation of axial pressure bearing capacity of modular steel frame composite column [J].Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering,2023,41(2):9-15.DOI:10.3969/j.issn.1008-4185.2023.02.002.(in Chinese)
- [14] KHAN K,CHEN Z H,LIU J D,et al.Experimental and analytical investigations on compressive behaviors of modular steel shear-keyed tubes [J].Engineering Structures,2023,279:115604.DOI:10.1016/j.engstruct.2023.115604.
- [15] KHAN K,CHEN Z H,LIU J D,et al.Axial compression behaviors of steel shear-keyed tubular columns: Numerical and analytical studies [J].Journal of Constructional Steel Research,2023,205:107894.DOI:10.1016/j.jcsr.2023.107894.
- [16] 周宜松.复杂卷边不等边三角形截面冷弯薄壁型钢柱轴压稳定承载力研究[D].郑州:郑州大学,2020.
ZHOU Yisong.Study on the stability capacity of cold-formed thin-walled steel column with complex edging unequal-edge angular section [D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2020.(in Chinese)
- [17] 庞士云.冷弯复杂卷边角形截面轴心受压构件稳定设计方法研究[D].郑州:郑州大学,2021.
PANG Shiyun.Stability design method of cold-formed angular axial compression members with complex edge [D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2021.(in Chinese)
- [18] ZHANG J F,PANG S Y,ZHOU Y S,et al.Axial compressive behavior of non-symmetric cold-formed angular column with complex edge [J].Thin-Walled Structures,2021,162:107625.DOI:10.1016/j.tws.2021.107625.
- [19] 徐步洲.双卷边不等肢角钢冷弯薄壁型钢柱轴压稳定承载力研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
XU Buzhou.Study on the axial compression stability bearing capacity of cold-formed thin-walled unequal leg angle steel columns with double lips [D].Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2017.(in Chinese)
- [20] ZHANG J F,FENG M M,DENG E F,et al.Numerical investigation and design of cold-formed steel angle columns with complex edges under axial compression [J].KSCE Journal of Civil Engineering,2023,27(2):630-642.DOI:10.1007/s12205-022-0039-z.
- [21] 王坤.复杂卷边不等边三角形截面冷弯薄壁型钢柱偏压稳定承载力研究[D].郑州:郑州大学,2020.

- WANG Shen. Stability bearing capacity of thin-walled cold-formed steel columns with complicated crimping and unequal angle cross-section under eccentric compression [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
- [22] ZHANG J F, WANG B, WANG S, et al. Eccentric compressive distortional buckling and design of non-symmetric cold-formed angular column with complex edges [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 165: 107981. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107981.
- [23] LIU J D, CAO X Y, CHEN Z H, et al. Eccentric compressive performance and design of asymmetric steel columns with complex edges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 221: 108875. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108875.
- [24] 王霄翔, 陈浩, 李再春, 等. 钢结构模块建筑非对称冷弯薄壁型钢柱轴压承载性能研究 [J]. 绿色建筑, 2024, 16(6): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1672.2024.06.001.
- WANG Xiaoxiang, CHEN Hao, LI Zaichun, et al. Research on axial compression bearing performance of asymmetric cold-formed thin-walled steel columns in modular steel buildings [J]. Green Building, 2024, 16(6): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1672.2024.06.001. (in Chinese)
- [25] 徐亚冲. 钢模块柱-柱组合框架结构及其抗震性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- XU Yachong. Steel modular column-column composite frame structure and its seismic performance analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] 杨超, 徐亚冲, 欧进萍. 装配式钢模块柱-柱和梁-梁组合的框架结构及其抗震性能分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(1): 34-45. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0104.
- YANG Chao, XU Yachong, OU Jinping. Fabricated steel modular column-column and beam-beam combination frame structure and its seismic performance analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 34-45. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0104. (in Chinese)
- [27] 杨超. 钢模块柱-柱及梁-梁组合耗能减震框架支撑结构分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- YANG Chao. Analysis of steel module column-column and beam-beam combined energy dissipation and vibration absorption frame brace structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [28] 杨超, 徐亚冲, 欧进萍. 模块化装配式钢框架组合柱及其抗侧与抗震滞回性能 [J]. 工程力学, 2022, 39(4): 65-75. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0098.
- YANG Chao, XU Yachong, OU Jinping. Modular prefabricated steel frame combination column and its lateral and seismic hysteretic performance [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(4): 65-75. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0098. (in Chinese)
- [29] 张昞路. 模块化装配式四柱拼接组合柱轴压稳定性试验研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- ZHANG Yunlu. Experimental study on axial compression stability of modular assembled four-column spliced composite columns [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023. (in Chinese)
- [30] 安琦, 王燕, 王修军. 模块建筑钢结构自锁式协同受力柱承载性能研究 [J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 68-75. DOI: 10.3724/j.gyjzG22110311.
- AN Qi, WANG Yan, WANG Xiujun. Research on the bearing capacity of novel self-locking cooperative load-bearing modular columns [J]. Industrial Construction, 2025, 55(5): 68-75. DOI: 10.3724/j.gyjzG22110311. (in Chinese)
- [31] 孙璞志, 杨晓杰, 陆烨, 等. 模块建筑槽钢组合柱长细比与截面惯性矩研究 [J]. 钢结构, 2016, 31(5): 1-5. DOI: 10.13206/j.jg201605001.
- SUN Yingzhi, YANG Xiaojie, LU Ye, et al. Research on the slenderness ratio and section moment of inertia of composite channel-column in modular architecture [J]. Steel Construction, 2016, 31(5): 1-5. DOI: 10.13206/j.jg201605001. (in Chinese)
- [32] 邓恩峰, 曹晨, 张俊峰, 等. 模块化钢结构“簇柱”轴心受压性能有限元分析 [C]//第29届全国结构工程学术会议论文集. 武汉, 2020.
- DENG Enfeng, CAO Chen, ZHANG Junfeng, et al. Finite element analysis on axial compression performance of "cluster columns" in modular steel structures [C]//The 29th National Academic Conference on Structural Engineering. Wuhan, 2020. (in Chinese)
- [33] KHAN K, CHEN Z H, LIU J D, et al. Compressive behaviors of modular steel shear-keyed grouped tubular columns [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105861. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.105861.
- [34] FATHIEH A, MERCAN O. Seismic evaluation of modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2016, 122: 83-92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.04.054.
- [35] LAWSON R M, RICHARDS J. Modular design for high-rise buildings [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2010, 163(3): 151-164. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151.
- [36] 秦福阳. 钢结构模块化建筑叠合钢梁协同受弯性能研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- QIN Fuyang. Study on collaborative bending behavior of composite steel beams in modular building with steel structure [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [37] 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. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20220113.
- CHANG Hongfei, HU Lei, SONG Xinyi, et al. Experimental test and parametric analysis on flexural performance of laminated square tubular beams in steel box module [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 540-549. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20220113. (in Chinese)
- [38] 安琦, 唐健, 刘洋, 等. 自锁式协同受力模块梁静力承载性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(10): 49-58. DOI: 10.

- 13969/j.jzgjgiz.20240516002.
- AN Qi, TANG Jian, LIU Yang, et al. Study on the bearing capacity of an innovative self-locking co-working modular beam[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2025, 27(10): 49-58. DOI: 10.13969/j.jzgjgiz.20240516002. (in Chinese)
- [39] DENG E F, YANG Y M, TIAN Y, et al. Flexural behavior of laminated H-beams in modular constructions: Numerical and analytical studies[J]. *Structures*, 2024, 66: 106891. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106891.
- [40] LIU Y, TANG J, CHEN Z H, et al. Flexural performance and simplified modelling of the double-beam structure between the vertical units in MSBs [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 103: 112056. DOI: 10.1016/j.jobee.2025.112056.
- [41] LIU Y, TANG J, CHEN Z H, et al. Collaborative bending performance of the double-beam between vertical units in modular steel buildings [J]. *Engineering Structures*, 2025, 332: 120024. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120024.
- [42] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. A comprehensive experimental-numerical investigation on the bending response of laminated double channel beams in modular buildings [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109737. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109737.
- [43] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. Flexural behaviour of pairs of laminated unequal channel beams with different interfacial connections in corner-supported modular steel buildings [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106792. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106792.
- [44] XU Bo, XIA Junwu, MA Renwei, et al. Investigation on interfacial slipping response of laminated channel beams with bolt connections in modular steel buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63(PA): 105441. DOI: 10.1016/J.jobee.2022.105441.
- [45] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. Numerical-analytical investigation on bending performance of laminated beams in modular steel buildings [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 217: 108630. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108630.
- [46] 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]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- XU Bo. Flexural behavior and mechanical model of laminated channel beams in modular steel buildings [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [47] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. Evaluation of superimposed bending behaviour of laminated channel beams in modular steel buildings subjected to lateral load [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 175: 109234. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109234.
- [48] DENG E F, WANG Y H, GAO J D, et al. Numerical study on seismic performance of modular steel structures with FPLC [J]. *Structures*, 2025, 71: 108076. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.108076.
- [49] WANG C, CHAN T M. Seismic design and parametric study of steel modular frames with distributed seismic resistance [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 182: 110325. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110325.
- [50] MO Z, LAI B L, SHU G P, et al. Enhancing seismic resilience in modular steel building through three-dimensional isolation [J]. *Engineering Structures*, 2025, 323: 119269. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119269.
- [51] YU Z W, MA W L, ZHANG J Z, et al. Comparative study on collapse behavior of modular steel buildings: Experiment and analysis [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 206: 112695. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112695.
- [52] 马炜林. 模块化钢结构倒塌性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2025.
- MA Weilin. Study on collapse behavior of modular steel structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2025. (in Chinese)
- [53] THAI H T, HO Q V, LI W Q, et al. Progressive collapse and robustness of modular high-rise buildings [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2023, 19(3): 302-314. DOI: 10.1080/15732479.2021.1944226
- [54] ZHANG J Z, DENG Y T, LI G Q, et al. Robustness of column-supported modular steel buildings in column loss: Role of double-layer beams and point-restrained slabs [J]. *Engineering Structures*, 2025, 329: 119786. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.119786.
- [55] PENG J H, HOU C, SHEN L M. Progressive collapse analysis of corner-supported composite modular buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103977. DOI: 10.1016/j.jobee.2021.103977.
- [56] 宗亮, 张一弛, 崔健, 等. 模块化钢结构梁柱子结构抗连续倒塌性能研究 [J]. *工程力学*, 2024, 41(8): 56-67. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0521.
- ZONG Liang, ZHANG Yichi, CUI Jian, et al. Progressive collapse analysis on beam-column substructure of modular steel construction [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(8): 56-67. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0521. (in Chinese)
- [57] MOEINI M E, YEKRANGNIA M, ALEMBAGHERI M. Damage mitigation strategies for progressive collapse of modular steel buildings following sudden corner module removal [J]. *Earthquake Engineering and Resilience*, 2024, 3(3): 372-387. DOI: 10.1002/eer2.88.
- [58] ZHANG J Z, YAM M C H, LI G Q, et al. Anti-collapse behavior of modular steel buildings with corrugated panels [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 193: 107279. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107279.
- [59] ZHANG J Z, CHEN X, LI G Q, et al. Collapse mechanism of three-dimensional modular steel buildings: Effect of steel wall and difference with traditional steel frame [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107197. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.107197.