

基于激光扫描的轻型模块柱初始缺陷分析及轴压稳定性能研究

余玉洁¹, 陈思凡¹, 王霄翔², 张艺川^{1*}, 蒋丽忠¹, 杨志刚³, 白金州³

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 湖南建工集团有限公司, 长沙 410008;

3. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 轻型模块化钢结构建筑常采用非对称冷弯薄壁型钢柱构件, 其轴压承载性能易受初始几何缺陷影响。文中针对轻型模块化钢结构建筑中常见的非对称冷弯薄壁单柱, 以及实际工程中端部通过螺栓紧固拼合的长肢、短肢组合柱, 开展了足尺轴压试验与初始几何缺陷影响效应研究。试验前采用三维激光扫描技术, 对模块柱安装前后的几何形貌进行高精度测量, 以提取初始缺陷特征并获取模块柱几何高程偏差。应用并验证了基于扫描点云模型向有限元模型转化的逆向重构法, 实现了构件实际初始缺陷的精准导入; 同时提出了基于扫描偏差的改进模态法, 与传统模态法展开对比分析, 研究初始缺陷的模态与幅值对轻型模块柱轴压失效模式及承载力发展趋势的影响机制。结果表明: 冷弯薄壁开口型模块柱的初始缺陷主要分为三类, 实际安装边界条件下, 模块柱的轴压失效模式主要为长肢板件发生压弯变形, 进而引发整体构件的弯扭失稳。对比分析证实, 逆向重建建模方法能有效预测模块柱的失效模式与承载力水平, 且改进模态法相较于传统模态法具有更高的承载力预测精度。

关键词: 模块化钢结构; 轴压承载性能; 初始几何缺陷; 激光扫描; 扫描点云模型; 逆向重建建模方法; 改进模态法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)03-0124-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20250429002

Initial Imperfection and Axial Compression Stability of Lightweight Modular Columns Based on Laser Scanning

YU Yujie¹, CHEN Sifan¹, WANG Xiaoxiang², ZHANG Yichuan^{1*},

JIANG Lizhong¹, YANG Zhigang³, BAI Jinzhou³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410008, China; 3. China Railway South Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

*Corresponding author: 224812314@csu.edu.cn

Abstract: Lightweight modular steel structures commonly use asymmetric cold-formed thin-walled steel columns, of which the axial compression bearing performance is significantly influenced by initial geometric imperfections. In this paper, full-scale axial compression tests are conducted on commonly used asymmetric cold-formed thin-walled single columns in lightweight modular steel structures, as well as on assembled columns combining long-limb and short-limb sections with practical end bolted connections, and the influence of initial geometric imperfection is also analyzed. Before

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(52278231), 湖南省自然科学基金(2023JJ40270), 湖南省科技创新计划(2023RC3038, 2022RC1185)

作者简介:

余玉洁(1990—), 女, 博士, 教授, 主要从事装配式钢结构方面的研究。E-mail: yujiesu@csu.edu.cn。

通信作者:

张艺川(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事模块化钢结构建筑方面的研究。E-mail: 224812314@csu.edu.cn。

testing, high-precision 3D laser scanning technology was utilized to measure the geometric morphology of modular columns before and after installation, to extract initial imperfection characteristics and obtain geometric elevation deviations. Reverse reconstruction modeling, which transforms scanned point cloud models into finite element models, was applied to introduce actual initial imperfections. An improved modal method was also proposed, and the results were compared with models using traditional imperfection involvement method. The results indicate that the initial imperfections of open-section cold-formed thin-walled modular columns can be categorized into three distinct types. The axial compression failure modes under practical installation boundary primarily involve global flexural-torsional buckling triggered by bending deformation of the long-limb plates. Comparative analysis demonstrates that the reverse reconstruction modeling method effectively predicts both the failure modes and bearing capacity of modular columns. Furthermore, the improved modal method exhibits higher accuracy in bearing capacity prediction compared to traditional approaches.

Keywords: modular steel building; axial compression performance; initial geometrical imperfection; laser scanning; scanned point cloud model; reverse reconstruction modeling method; improved modal method

近年来,轻型模块化钢结构体系日趋成熟,在应急救援、低层文旅建筑等工程领域得到快速应用,其中的典型代表为可拆装箱式房屋结构^[1-3]。轻型箱式房屋的模块柱多采用非对称卷边型冷弯薄壁钢柱,便于开展装配连接、管线及墙板安装等施工工序^[4-5]。但此类钢柱截面形状复杂,轴向承载时易出现复杂的屈曲模式,且屈曲模式与轴向承载性能受初始缺陷、边界约束等多种因素的共同影响^[6-7]。此外,轻型箱式房屋的立柱多采用壁厚为2~4 mm的冷弯薄壁构件,经薄壁板件弯折或多道辊轧成型,成型后还需在端部或柱身焊接辅助连接板件。因此钢柱在成型、后期焊接及整体运输等过程中,会引入板件变形、残余应力等初始缺陷,进而影响该类复杂截面卷边立柱的轴向承载性能^[8-9]。

针对轻型可拆装箱式房屋所用冷弯薄壁异型钢柱的承载性能,已有部分学者开展了相关试验研究。SHIFFERAW等^[10]对固定边界下冷弯薄壁卷边型钢的轴向承载性能进行数值分析,并提出考虑屈曲后性能的承载力计算方法。SHI等^[11]针对轻型箱式房屋中的非对称冷弯卷边构件,开展了万向铰边界下的轴压承载试验研究;ZHANG等^[12]完成非对称冷弯单柱在单向铰边界下的轴压和偏压试验;YAO等^[13]测试了不同截面参数的非对称卷边柱在端板直接承压约束下的轴压性能。上述系列试验,得到了不同边界条件、不同截面参数下,非对称卷边模块柱的轴压失效特征与承载性能规律,但相关测试多为单柱试验,或基于理想边界开展的构件稳定性分析。实际工程中,轻型模块柱通常在柱端焊接L形连接板,通过螺栓与箱体角部连接件相连,且多以双柱或多柱背靠式组合形式共同承载。王霄翔等^[14]针对某实际工程中应用的长肢拼合、短肢拼合和四肢拼合模块柱,开展模拟实际拼接边界的轴压试验研究,发现长肢拼合模块柱的轴压承载力水平较低,且受初始缺陷的影响较为显著。

轻型箱式房屋的非对称卷边冷弯薄壁钢柱,经多道辊轧、焊接工序加工而成,构件的几何变形呈现整体翘曲、扭转与局部鼓曲相互叠加的复杂模式。轴心受压构

件的稳定承载性能受几何缺陷影响显著^[15],传统初始缺陷量测方法多采用千分表沿关键轴线连续测量以获取变形特征。该方法仅能得到整体缺陷模式,难以准确捕捉局部鼓曲等变形,且量测精度受人为因素影响较大。近年来激光扫描技术飞速发展,并逐步应用于结构检测领域^[16-18]。

本文围绕轻型模块化钢结构常用的非对称开口卷边模块柱,结合实际构件的尺寸、构造与安装条件,开展模块柱的轴压稳定性试验研究,揭示轻型模块柱的轴压失效模式与破坏机理;通过三维激光扫描,获取模块柱实际安装前后的几何缺陷形态并完成特征提取;实现了激光扫描点云模型到有限元分析模型的逆向建模,构建考虑实际初始缺陷的精细化模型并开展轴压稳定性分析,评估不同初始缺陷导入方法的有效性。

1 冷弯薄壁型钢模块柱轴压承载试验

1.1 试件构造及选型

基于某实际轻型模块化钢结构工程项目,选取不同构造的非对称冷弯薄壁C型柱作为试验试件,如图1所示。模块柱采用Q355钢材,截面尺寸为210 mm×150 mm×30 mm×20 mm×3 mm;柱体上下端部在工厂预焊10 mm厚L形连接板,用于柱端螺栓连接,柱身约1/3高度处焊有2 mm厚L形挡板作为管线安装的辅助构件。现场装配模块柱时仅需将L形连接板与角部节点盒通过螺栓紧固即可。

该工程中应用的模块柱包含2 536 mm与2 940 mm两种柱高,实际箱式房屋中存在单柱(柱高2 536 mm)、双柱短肢相拼(柱高2 536 mm)、双柱长肢相拼I型(柱高2 536 mm)、双柱长肢相拼II型(柱高2 940 mm)四种模块柱及组合柱类型。结合实际工程工况,选取以上4组拼合式模块柱,开展模拟实际螺栓紧固边界条件下的轴压承载性能测试,拼合柱中的各单柱依次编号为L1~L6,如图2所示。

试验前截取制作模块柱的同批次钢板,制备标准拉

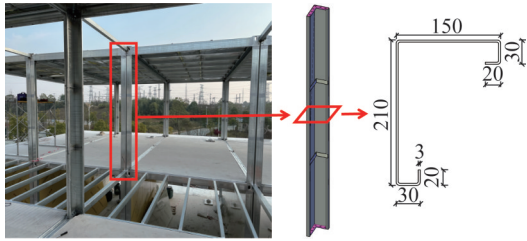


图1 轻钢模块住宅和冷弯薄壁钢柱(单位:mm)

Fig. 1 Lightweight steel modular housing and cold-formed thin-walled steel columns (unit:mm)

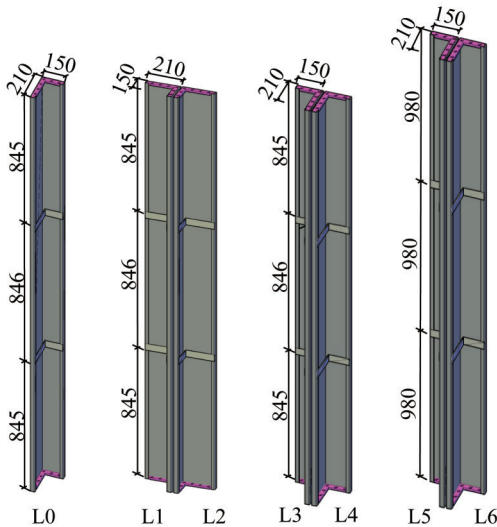


图2 试件编号和尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Numbering and dimension of specimens (unit:mm)

伸试件,参照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[19]开展拉伸试验研究。所得到应力-应变曲线如图3所示。试验测得钢材屈服强度 f_y 为365.6 MPa,极限强度 f_u 为497.9 MPa,弹性模量为218 GPa。

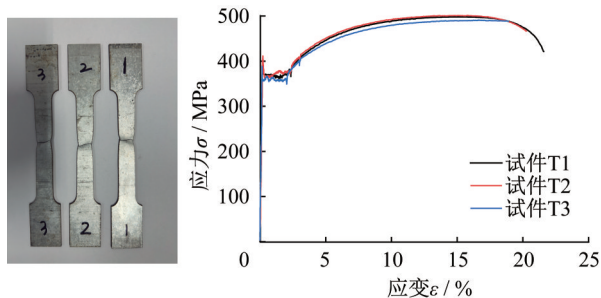


图3 材性试验试件破坏模式及应力-应变曲线

Fig. 3 Failure modes of material test specimens and stress-strain curves

1.2 试验方案

图4为模块柱轴压加载装置及试件安装情况。轴向加载采用由两个100 t竖向伺服作动器与水平加载梁组

成的平行四边形加载系统,L形加载梁平面外设置两对三角桁架,限制加载梁的平面外偏转。加载梁及地面预设辅助连接板,板上开设与柱端L形连接板匹配的螺栓孔,模拟实际工程中柱端的螺栓安装方式。模块柱安装前,采用激光仪调整校核辅助连接板的位置保证其上下对中。

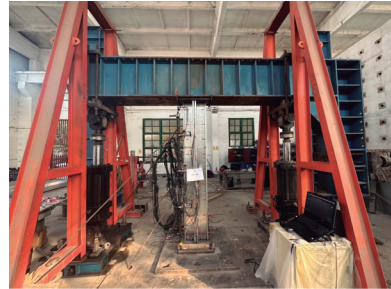


图4 试件加载安装

Fig. 4 Specimen loading setup

冷弯薄壁钢模块柱在辊轧成型、连接板焊接及安装运输等环节均会引发薄壁板件变形,使柱肢及板件在受压时处于偏压状态,加速构件的失稳破坏。此外,钢模块柱安装就位后,柱肢端部与上下辅助连接板紧固,柱端截面位形受到约束,会进一步改变柱内的变形状态。因此,本次试验对4组模块柱安装前后均开展柱肢形貌扫描:安装前,量测柱肢水平自由放置状态下的形貌特征;模块柱拼合安装后,对柱端约束状态下的各柱肢再次进行扫描。

轴压试验时采用力-位移混合控制方式加载,初期采用力控制,以 $10 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率加载,直至钢柱出现屈服或塑性变形特征;随后切换为位移控制,以 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率加载,直至整体拼合柱的轴向反力降至峰值承载力的85%,试验终止。

1.3 失效模式及承载力结果

图5为模块柱的轴压失效模式。轴压加载初期,模块柱首先表现为外伸长肢或拼合长肢的轻微侧弯变形;随着轴压力增大,长肢弯曲变形增大进而带动整体拼合柱产生轻微弯扭,同时两拼合短肢边的反对称面出现外侧弯曲,构件承载刚度显著下降,承载力呈非线性缓慢增长趋势;当轴压位移增大至一定程度,拼合柱发生整体弯扭失稳,柱身伴随出现板件鼓曲现象,承载力快速下降,模块柱丧失承载能力。

单柱与拼合柱表现出相似的失效模式,均为整体弯扭破坏叠加局部板件鼓曲。非对称冷弯薄壁型钢柱的长肢面外抗弯刚度较小,截面及柱端约束效应有限,且整体弯曲的初始缺陷幅值较大,在轴向压力作用下易率先产生弯曲变形;而箱式房屋中拼合柱仅在柱端连接区域通

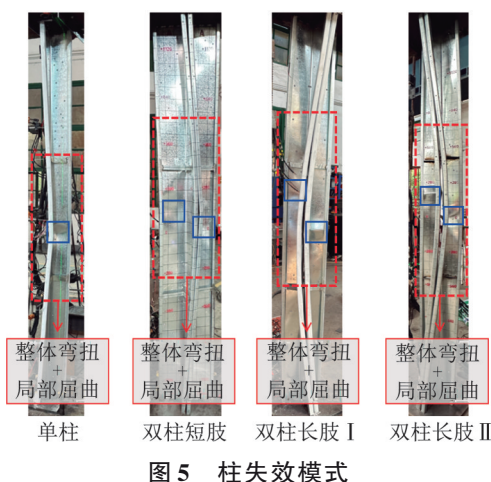


图5 柱失效模式

Fig. 5 Failure modes of columns

过单元间节点组合,柱肢中部区域相互独立,整体组合效应较弱,进一步加剧了上述变形特征。

图6对比了4组试件的轴向荷载-位移曲线,同时增加单柱承载力的2倍曲线作为拼合双柱组别的参照。结果显示,不同拼合方式下,模块柱的初始刚度、承载力发展模式及强度大小存在明显差异:双柱短肢相拼试件的初始刚度和承载力水平均为最高;两组长肢相拼柱的初始刚度相近,且均低于短肢相拼组的初始刚度;单肢承载力2倍曲线的初始刚度高于三组拼合柱的初始刚度,表明双肢拼合柱的轴向承载效率低于独立单肢柱的轴向承载效率。

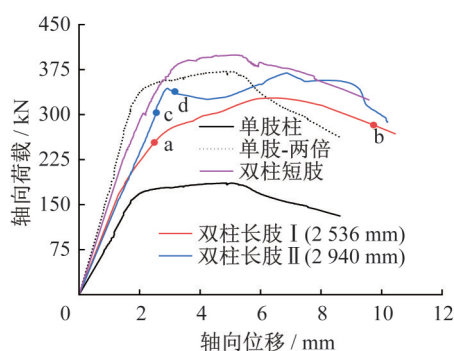


图6 模块柱轴向荷载-位移曲线

Fig. 6 Axial load-displacement curves of modular columns

单肢柱承载初期,随轴向变形增大外伸长肢呈现出弯曲变形趋势;当轴压变形达到2 mm时,整体柱肢表现出轻微弯扭变形,承载力表现出塑性特征;承载力到达极限时,柱身板件发生鼓曲,承载力开始下降。

短肢相拼试验组在轴压过程中,同样首先发生长肢弯曲变形,但拼合短肢的稳定性相对较好,轴压加载下模块柱整体保持竖直状态,仅表现出轻微弯扭变形,且整体弯扭变形的发生时机略晚于单柱弯扭变形的发生时机,

其承载水平高于单肢承载力的2倍;继续加载,双肢相拼试件的长、短肢中部出现局部屈曲,加速了组合柱的弯扭失稳变形,承载力持续降低,直至构件完全破坏。

两组长肢相拼试件均表现出较低的轴压刚度和承载力水平,其中长肢相拼II型(柱高2 940 mm)的轴压稳定性略优于I型(柱高2 536 mm)的轴压稳定性。图7为I型和II型试件在关键承载阶段的变形状态。图5~6中a点对应I型柱屈服时的状态,此时两拼合长肢出现同向弯曲变形;加载至b点时,右侧长肢变形较大,挤压左侧长肢并促使整体拼合柱发生弯扭变形,导致承载力水平较低。II型试件的承载力前期呈弹性增长特征,后期突然下降;图7中c点为II型柱承载力达到300 kN的状态,两拼合长肢呈相向弯曲并相互挤压,整体拼合柱肢保持竖直;加载至d点即承载力为338 kN时,左肢弯曲变形趋势大于右肢弯曲变形趋势,承载力突然下降;之后两长肢由相抵状态过渡为同向弯曲,形成新的受力模式,因此承载力下降幅度有限,且后继承载性能有所提升,最终承载力达到接近单肢柱承载力的2倍水平。

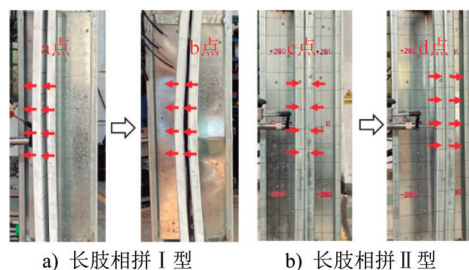


图7 双柱长肢相拼组合柱变形演变特征

Fig. 7 Deformation evolution of spliced long-limbed columns

1.4 实测结果与规范计算对比

目前在各国规范中,直接强度法因计算过程较简便,且充分考虑了不同屈曲形式的影响,已逐步发展与稳定系数法并行的稳定承载力计算方法。北美规范 AISI-S100-16^[20]和澳洲/新西兰规范 AS/NZS 4600:2018^[21]均采用该方法。本文参考北美规范,采用直接强度法计算模块单柱的稳定承载力;对于双柱拼合试件,因柱肢之间无实际连接构造,仅端部共同紧固于同一连接板,其稳定承载力的规范计算值取单柱承载力的两倍,计算结果见表1。

由表1可知,单柱、双柱短肢和双柱长肢II型试件的实测承载力略大于规范计算值,偏差幅值各有不同;而双柱长肢I型的极限承载力低于规范计算值。这表明,模块柱不同拼合方式下柱肢之间在承载变形过程中会产生相互作用影响。双柱长肢I型在轴压过程中,长肢板件之间的非协同变形和挤压效应加速了整体构件的失稳,最终导致实测承载力降低。

表1 试验与规范计算的稳定承载力对比

Table 1 Comparison of stability capacities between test and code calculation

组别	实测值 P_e /kN	规范计算值 P_u /kN
单柱	185.4	172.8
双柱短肢	398.2	345.6
双柱长肢 I	327.3	345.6
双柱长肢 II	369.4	273.1

2 基于三维激光扫描的模块柱初始几何缺陷分析

2.1 三维激光扫描及数据处理

非对称冷弯薄壁钢模块柱的初始缺陷,主要来源于制造和运输过程中产生的变形,而柱端安装时的端面位形变化,也会改变初始几何缺陷的形态。本次研究采用激光扫描技术,分别对模块柱安装前的自由状态和安装后的约束状态进行测量,全面掌握钢柱的整体及局部初始几何状态,为构件失效机理和承载性能分析提供数据支撑。

三维激光扫描的原理为:通过激光发射器向目标表面发射调制激光束,接收器记录反射信号的时间差,结合测量的距离和角度即可计算出被扫描点的三维空间坐标,最终生成三维点云模型。扫描前在构件表面按 10~15 cm 的间隔均匀随机布设高精度反光定位标记点,用于建立稳定的空间坐标系,提升多视角扫描数据的配准精度。

三维激光扫描仪对钢模块柱进行扫描时,可能会引入非目标对象(如背景物体、其他构件或扫描噪声),干扰扫描数据,影响后续分析的准确性。因此,扫描结束后,将点云数据导入点云处理软件,依次进行拼接、降噪、简化等初步处理,识别并剔除非目标对象的数据点,最终得

到完整的 C 型模块柱三维扫描点云模型,见图 8。

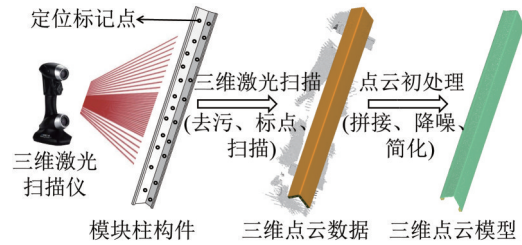


图8 试件扫描流程

Fig. 8 3D scanning process of specimens

2.2 初始缺陷分析

将过滤后的三维扫描重构模型点云数据进行网格化处理,保存为 stl 文件格式导入 GOM 后处理软件。首先在软件中进行预处理,消除试件自身的网格错误;同时在三维 CAD 软件中建立与被扫描模块柱尺寸、构造完全一致的理想模型,并导入 GOM 软件中;将重构模型与 CAD 理想模型在相同坐标系下进行特征轴线对齐,通过对比钢柱扫描表面形貌与设计表面的差异,识别构件整体和局部形态偏差。本次研究设定向内偏差为负、向外偏差为正,设置公差范围后自动标注超差区域,扫描模型与理想模型的正负偏差即为模块柱的几何初始缺陷。

图 9 为 4 组试件中所有单柱 L0~L6 在安装前后的高程偏差云图。结果表明:被测构件的初始缺陷形态可划分为三种典型模式:① 短肢向外鼓曲变形;② 长肢向外鼓曲变形;③ 短肢外鼓与长肢内凹组合的整体扭曲。实测数据显示,非对称冷弯薄壁钢模块柱的初始缺陷主要表现为柱肢板件的整体鼓曲或扭转,同时受模块柱端部焊接 L 形连接件产生的残余应力影响,连接节点区域还伴随有局部变形现象。其中,双柱长肢相拼组合 II (L5、L6) 的初始缺陷模式以②为主,其余三组试件初始缺陷模式以①、③为主。

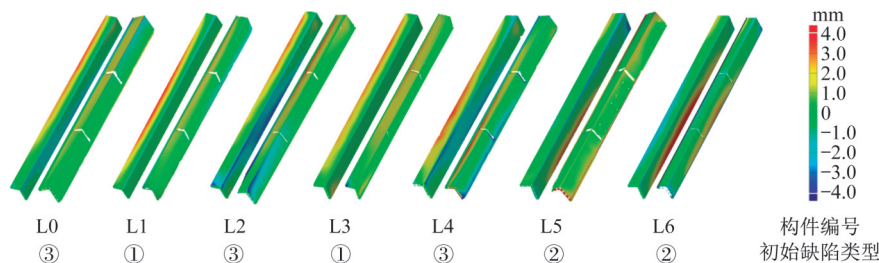


图9 初始缺陷模式

Fig. 9 Initial imperfection modes

为定量分析非对称截面冷弯薄壁钢柱的几何缺陷分布模式,对比安装过程对缺陷的演变影响,对四组模块柱中的 7 根单柱(L0~L6)分别在长肢肢端、长肢肢中、短肢肢端、短肢肢中四个特征轴线上,沿构件长度方向以

50 mm 为间距提取扫描点偏离其设计平面的偏差高程。考虑试验中存在不同柱高工况,将偏差高程按柱高范围比例绘制偏差分布曲线开展对比分析。

图 10 对比了四组试件长短肢板的变形特征:单柱组

合中的L0构件表现为中部区域向内鼓曲、长肢向内凹陷的变形特征,构件安装后,柱端偏差得到修正,但柱身中部区域的初始缺陷幅值未发生显著变化;双柱短肢相拼试件拼装前单柱(L1、L2)均表现出一侧柱端长肢向外、

短肢向内的整体扭转特征,安装后柱端偏转变形得到修正,长、短肢板转变为中部鼓曲模式,其中长肢板内凹峰值为-1.89 mm,短肢板外鼓峰值为4.53 mm,柱端板件中部还存在由焊接残余变形引发的局部翘曲。

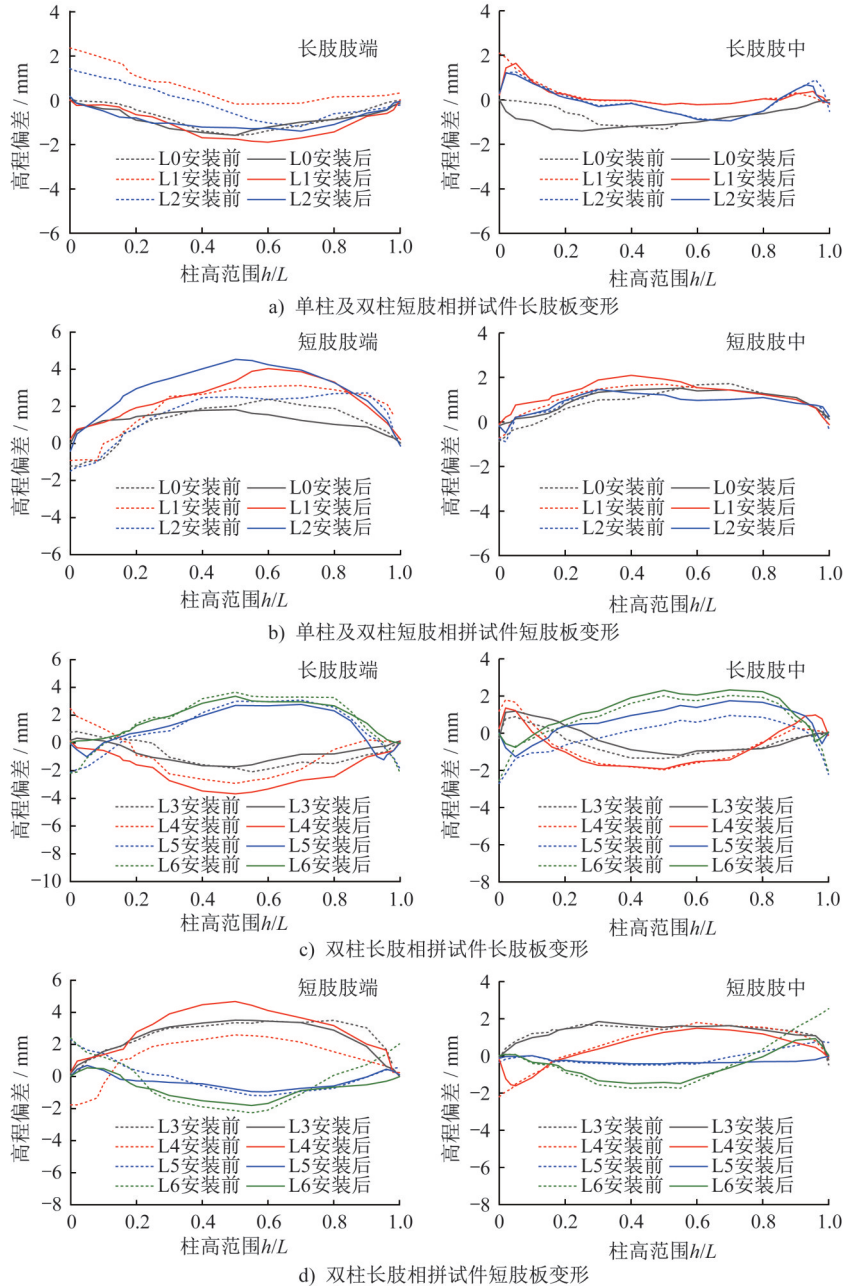


图10 纵向初始缺陷分布曲线

Fig. 10 Longitudinal initial imperfection curves

长肢相拼试件的长、短肢板均表现为中部鼓曲模式,且I、II型试件的鼓曲方向和幅度不同。安装前L3~L6柱均存在柱端面偏转变形,安装后该变形得到修正;长肢相拼I型试件中L3、L4柱的长肢向内凹陷、短肢向外鼓曲,且两柱肢板的鼓曲幅度不同;L3、L4柱中长肢内凹峰值分别为-1.72 mm和-3.68 mm,短肢外凸峰值分别为3.51 mm和4.68 mm。因此拼合柱在轴压过程中,

L4柱的弯曲变形更为显著,两柱受力不均,导致整体柱较早发生整体弯扭失稳。

长肢相拼II型试件中L5、L6柱均为长肢外凸、短肢内凹模式,拼合柱承载时长肢向外弯曲并相互挤压,且两柱长肢外凸幅度相近(约为3.3 mm),肢板轴压时的弯曲变形趋势相近并相互抵消,使整体拼合柱保持竖直承载状态。L5、L6柱的短肢内凹峰值分别为-0.94 mm和

-1.71 mm,当轴压荷载较大时L6柱的弯扭变形占据主导,迫使拼合柱发生整体弯扭变形。

3 三维扫描点云模型逆向重建

实测数据显示,安装后单柱肢板的最大偏差高程为1.83 mm,小于 $L/1\ 000$ (2.54 mm);短肢相拼组合与长肢相拼组合I的最大偏差高程分别为4.53 mm、4.68 mm,大于 $L/1\ 000$ (2.54 mm);双柱长肢相拼II的最大偏差高

程为3.36 mm,大于 $L/1\ 000$ (2.94 mm)。可见,实际工程中模块柱肢板的几何偏差大多超过分析设计中常用的 $L/1\ 000$ 建议值,且几何偏差也呈复杂的变形模式。因此,可利用扫描点云模型构建数值分析模型,充分考虑模块柱的真实几何缺陷状态。本次研究可通过Geomagic软件完成点云模型的逆向重建,主要步骤包括点云采样优化、网格修复及参数化曲面重构,各步骤处理效果如图11所示,具体过程如下:

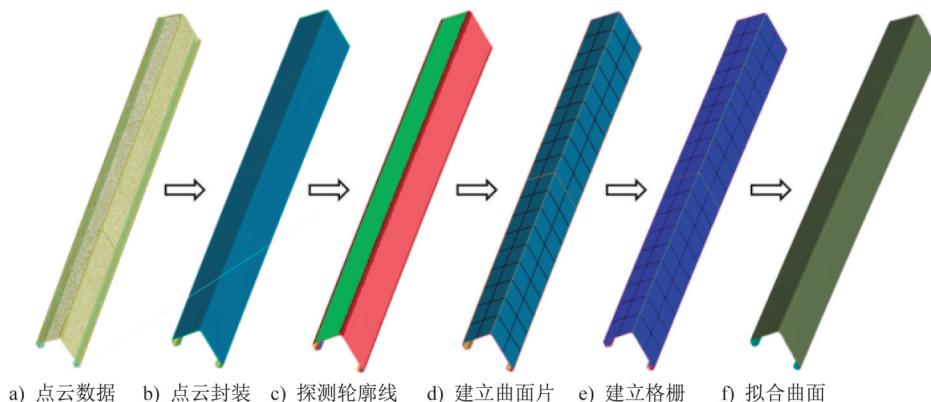


图11 模块柱点云逆向重建过程

Fig. 11 Reverse reconstruction process of point cloud for modular columns

(1) 点云优化阶段:首先结合非对称截面的几何特性,选取钢柱长肢平面、短肢平面及端部定位面建立3个基准特征面,通过手动粗略对准与智能识别最佳拟合功能相结合的方式,建立全局坐标系以实现点云数据的空间配准;采用自适应采样技术动态调节点云密度:对平面区域设置50%采样率以降低冗余数据,对转角过渡区保持原始采样密度以保留细节特征;最后进行点云封装,将离散点云转化为连续多边形网格。

(2) 网格修复阶段:针对扫描过程中因设备遮挡及构件转角处曲率突变导致的局部点云缺失问题,通过曲率连续性检测定位缺损区域的边界,选取曲率匹配方法对缺损孔洞进行填充。

(3) 曲面重构阶段:运用特征线提取功能,识别钢柱扫描模型的轮廓分界线,并基于该分界线划分曲面片,模块柱中各单柱的曲面片数量控制在230~250之间,平衡建模精度与计算效率;调整曲面片的 U - V 走向(Nurbs曲面片内部两个互相垂直的参数方向),确保曲面片路径不相交且形状规整;随后依次完成格栅构造与曲面拟合,实现从点云数据到Nurbs曲面的逆向重建。

4 有限元模型建立及模块柱轴压承载性能分析

4.1 基于逆向重建的实测钢柱模型建立

将逆向建模生成的高精度Nurbs曲面模型导入

Hypermesh软件,进行模块柱的几何特征匹配和有限元网格划分。前期开展了5 mm、10 mm和20 mm三种网格尺寸下的承载性能对比试验研究,结果表明,以10 mm网格划分为基准,5 mm与20 mm网格划分下的极限承载力偏差小于3%,且屈曲模态及应力集中区域的分析结果一致。为兼顾计算精度与计算效率,正式分析均采用10 mm网格尺寸,结合Smooth网格平滑功能生成尺寸和布局均匀的有限元单元网格。在Hypermesh中将网格划分后的模型以inp格式导入ABAQUS软件中,在Assembly模块中通过Instance功能创建四组模块柱的装配模型,系统将自动继承已划分的网格拓扑关系,无需在ABAQUS中重复网格划分操作。最终建立的拼合模块柱模型可真实反映构件实际的板件变形和翘曲特征,如图12所示。

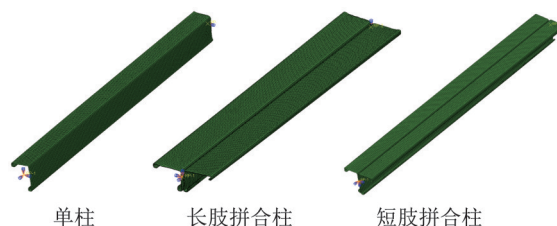


图12 逆向建模有限元模型

Fig. 12 Reverse modeling finite element model

基于实测钢板的力学性能,确定双线性钢材本构模型参数并赋予钢柱模型。为降低构件转角的冷弯强化效

应,本次试验的模型柱采用多道辊压成型工艺加工,可降低构件转角的冷弯强化效应,且在试验参数下,转角冷弯强化效应的影响较低^[22],因此有限元模型中未考虑弯角冷弯导致的局部材料强化效应。在钢柱两端截面形心处分别建立参考点,将柱端处的网格节点自由度耦合至对应参考点,通过参考点施加边界条件:柱底参考点施加三向位移和转动约束,柱顶参考点释放轴向位移,其余自由度施加约束以模拟实际加载的柱端边界条件。

4.2 基于屈曲模态修正的有限元模型建立

为评估逆向重建建模方法的分析效率,本次研究同步采用传统分析方法中基于屈曲模态的初始几何缺陷导入方法建立数值模型,并与逆向重构模型展开对比分析。在ABAQUS中基于图1的截面构形建立轻型模块柱的有限元理想模型,采用S4R壳单元模拟并设置10 mm单元尺寸进行网格划分,材料属性定义、边界条件设置与逆向建模方法保持一致。对理想模型开展特征值屈曲分析,采用Lanczos法求解得到模块柱的前10阶屈曲模态。

传统钢柱轴压承载性能模拟时,常采用模态叠加法导入初始缺陷,即取 $L/1000$ 作为整体屈曲模态的比例因子,取0.25倍构件厚度作为局部屈曲模态的比例因子^[12],将叠加后的变形作为初始缺陷导入模型,完成有限元模型的修正。但激光扫描结果表明,非对称截面冷弯薄壁钢模块柱的初始缺陷分布具有较强的随机性,且板件变形幅度较大,按照上述经验比例因子确定初始缺陷,会低估缺陷幅值,从而导致有限元计算结果不够精确。

针对以上问题,本文提出一种基于实测偏差幅值修正的初始缺陷导入改进方法,如图13所示。该方法首先根据图9中的实测变形模态,在特征值屈曲分析结果中找到相近的整体屈曲模态,将实测板件偏差峰值作为对应屈曲模态的比例因子;局部屈曲模态的比例因子采用相同方法确定。此方法以扫描数据为指导,修正了传统初始缺陷导入方法的比例因子,提高了初始缺陷分布特

征的精确性,且操作过程无需复杂的点云重构及转换步骤。

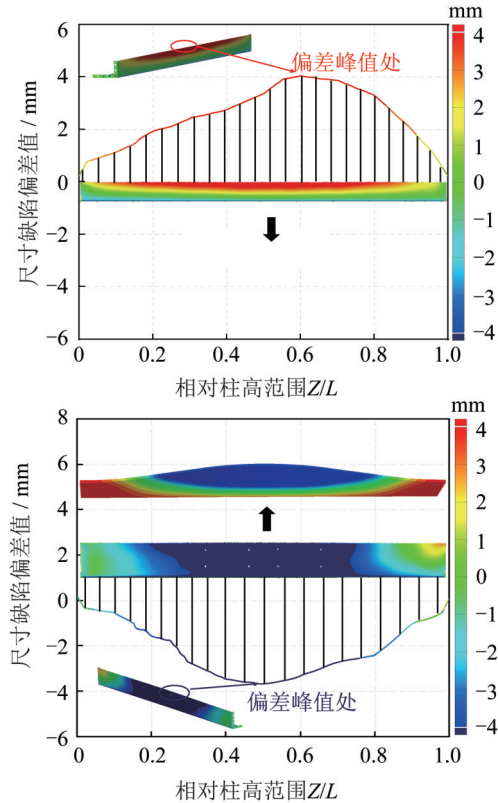


图13 初始缺陷导入改进方法

Fig. 13 Improved initial defect import method

4.3 有限元模型验证

分别采用逆向重建法、改进模态法、模态法对四组模块柱进行数值模拟,得到各方法下模块柱的荷载-轴向位移曲线及试件变形特征,并与试验结果进行比对分析。表2列出了四组模块柱的数值模拟结果与实测结果对比:极限承载力方面,逆向重建法的计算结果与试验值最为接近,承载力比值为1.02;模态法和改进模态法的承载力比值分别为1.07和1.03,表明基于实测偏差的改进比例因子,可有效提高承载力分析的精度。

表2 试验结果与有限元结果的轴向抗压能力比较

Table 2 Comparison of axial compressive capacities between test results and finite element results

组别	实测值 P_e/kN	逆向重构		改进模态法		模态法	
		P_{f1}/kN	P_{f1}/P_e	P_{f2}/kN	P_{f2}/P_e	P_{f3}/kN	P_{f3}/P_e
单柱	185.4	191.3	1.03	200.2	1.08	195.8	1.06
双柱短肢	398.2	391.8	0.98	418.4	1.05	459.3	1.15
双柱长肢 I	327.3	342.1	1.05	330.7	1.02	355.7	1.08
双柱长肢 II	369.4	374.0	1.01	353.2	0.96	358.4	0.97

注: P_e 为试验极限荷载; P_{f1} 、 P_{f2} 、 P_{f3} 分别为三种有限元分析极限荷载。

图14对比了四组模块柱的试验结果与三种数值模拟方法的荷载-轴压变形曲线。在弹性加载阶段,三种数值模拟方法得到的构件刚度基本相同,且均略大于实测刚度;进入弹塑性转换阶段后,三种方法的模拟结果开始表现出明显差异。模态法和改进模态法的模拟结果大多表现为模块柱突然失稳、承载力突降,而实测的失效过程

为模块柱由整体弯扭变形引发承载力的弹塑性渐变,直至柱身中部板件发生局部鼓曲,承载力开始显著下降。逆向重构法的模拟结果,其承载力变化过程与实测结果相近,能更准确地反映模块柱从弹性变形到塑性破坏的全过程工作机制。

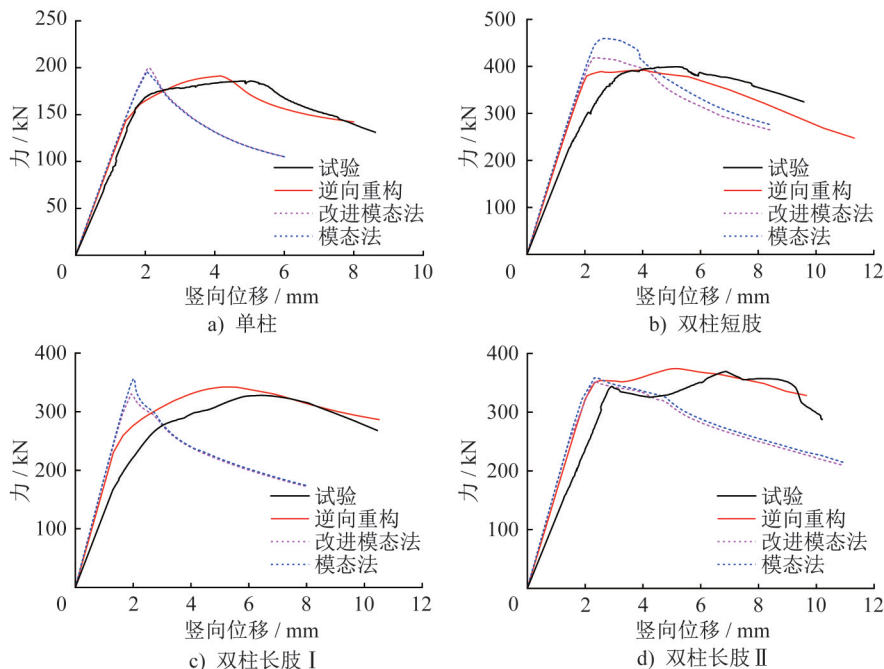


图14 试验与有限元模拟荷载-轴向位移曲线对比

Fig. 14 Comparison of load-axial displacement curves between test and finite element simulation

图15给出了四组模块柱在承载力降至85%峰值时,失效模式下应力和变形模式对比。对于单柱和短肢相拼试件,模态法和改进模态法的模拟结果,均表现为长、短肢的整体弯曲变形以及较大板件区域的多波鼓曲变形;而实

际试件的失效特征与逆向重构法的模拟结果一致,均表现为长、短肢板在柱身中局部区域的板件压溃翘曲。对于双柱长肢相拼I型和II型试件,两种模态法的模拟结果均为长肢中部区域的集中弯曲变形,短肢板件变形相对较小。

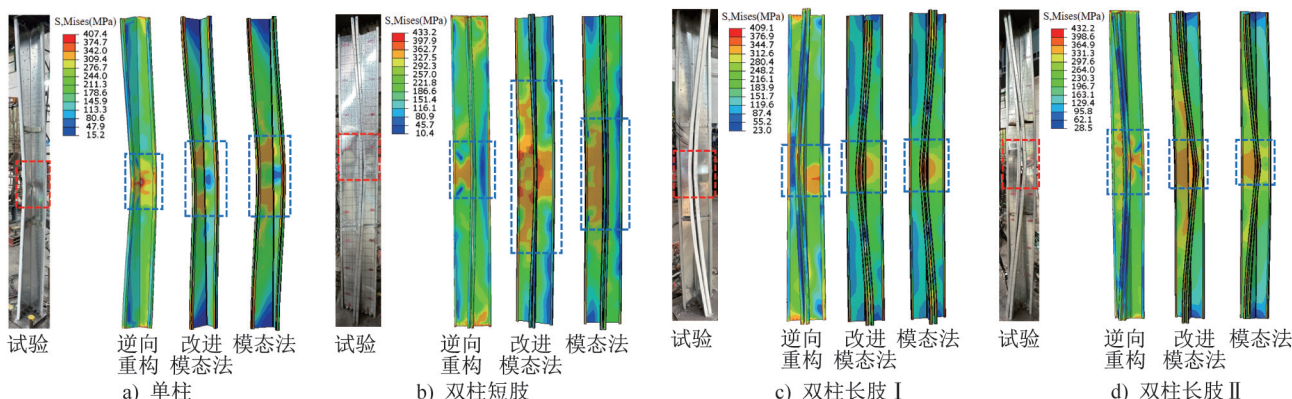


图15 试验与逆向建模有限元分析的失效模式比较(单位:MPa)

Fig. 15 Comparison of failure mode between test results and reverse modeling finite element analysis (unit: MPa)

试验和逆向重构模拟结果均表现为长肢整体弯曲变形和短肢中部区域的局部压溃。相较于传统模态法,改

进模态法的整体柱肢板变形模式与模态法一致,但失效变形特征与实测结果更为接近。基于预设模态的初始缺

陷导入方法,会限定构件及板件的变形模式,当预设模式与实际初始缺陷模式不符时,易导致模拟结果失真;而逆向重构法基于实测偏差真实引入初始缺陷模式,能更真实地还原试件受力过程中的变形特征。当工程中无三维扫描条件和点云模型时,基于实测偏差峰值的改进模态法可作为简化的替代方案。

5 结论

(1) 文中基于三维激光扫描技术对非对称冷弯薄壁模块柱安装前后的几何形貌进行测量,得到其初始缺陷的分布模式:轻型模块柱安装前的初始缺陷主要表现为短肢向外鼓曲、长肢向外鼓曲、短肢外鼓与长肢内凹的整体扭曲三种模式;模块柱的安装过程可有效修正柱端形态偏位,但柱身中部的鼓曲幅度保持不变或增大。

(2) 非对称冷弯薄壁钢模块柱的轴压失效模式主要为长肢板件发生压弯变形,进而引发整体构件的弯扭变形,承载力呈塑性发展,当柱身中部局部板件发生压溃鼓曲时,承载力达到峰值。表现为整体弯扭失稳叠加柱中局部屈曲的失效模式;双柱短肢相拼的轴压承载刚度和极限承载力水平高于双柱长肢相拼的对应值。

(3) 轻型模块柱的几何缺陷峰值大多超过 $L/1\ 000$ 的经验取值。本文提出的基于三维激光扫描点云模型的逆向重建建模方法,可建立反映真实偏差模式和变形水平的数值分析模型;同时提出了一种改进模态法。对比分析证实了逆向重建建模方法能够有效预测模块柱的失效模式和承载力水平。改进模态法相较于传统模态法具有更高的承载力预测精度。

参考文献:

- [1] 杨晓杰,陆焯,顾超,等.新型多高层钢结构箱式模块建筑的设计[J].建筑钢结构进展,2016,18(5):41-47,72.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.05.006.
YANG Xiaojie, LU Ye, GU Chao, et al. Structural design of steel modular high-rise and multi-story buildings[J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(5): 41-47, 72. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.05.006. (in Chinese)
- [2] LANDOLFO R. Lightweight steel framed systems in seismic areas: Current achievements and future challenges [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 140: 114-131. DOI: 10.1016/j.tws.2019.03.039.
- [3] 岳清瑞,吴朝响,刘晓刚,等.多高层模块化结构及建造技术研究进展与未来趋势[J].建筑结构学报,2024,45(8):1-19. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.0619.
YUE Qingrui, WU Zhaoyun, LIU Xiaogang, et al. Progress and future trends in development of multi-story and high-rise modular structures and construction technology [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(8): 1-19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2023.0619. (in Chinese)
- [4] LENG J Z, GUEST J K, SCHAFFER B W. Shape optimization of cold-formed steel columns [J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(12): 1492-1503. DOI: 10.1016/j.tws.2011.07.009.
- [5] 邓露,钟玉婷,杨远亮,等.冷弯薄壁型钢受弯构件承载力与延性优化研究[J].工程力学,2021,38(4):93-101. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.0327.
DENG Lu, ZHONG Yuting, YANG Yuanliang, et al. Optimization on bearing capacity and ductility of cold-formed thin-walled steel flexural member [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 93-101. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.0327. (in Chinese)
- [6] 何子奇,周绪红,邹勃,等.冷弯薄壁型钢轴压构件畸变与整体相关屈曲承载力计算方法研究[J].建筑结构学报,2019,40(3):192-199. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.03.020.
HE Ziqi, ZHOU Xuhong, ZOU Bo, et al. Calculation-method investigation on ultimate load-carrying capacities of cold-formed steel columns experiencing distortional-global buckling interaction under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 192-199. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.03.020. (in Chinese)
- [7] 黄丹,王卫永.装配式钢结构建筑体系研究及应用综述[J].建筑钢结构进展,2022,24(8):1-18. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.08.001.
HUANG Dan, WANG Weiyong. Review on research and application of prefabricated steel structure building system [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(8): 1-18. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.08.001. (in Chinese)
- [8] SCHAFFER B W, LI Z, MOEN C D. Computational modeling of cold-formed steel [J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(10/11): 752-762. DOI: 10.1016/j.tws.2010.04.008.
- [9] JERATH S. Structural stability theory and practice: Buckling of columns, beams, plates, and shells [M]. Hoboken: Wiley, 2020.
- [10] SHIFFERAW Y, SCHAFFER B W. Cold-formed steel lipped and plain angle columns with fixed ends [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 80: 142-152. DOI: 10.1016/j.tws.2014.03.001.
- [11] SHI Y J, LIN B, ZHANG Q Y, et al. Experimental investigation on double lipped channel cold-formed thin-wall steel column under compression loading [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 358(5): 052050. DOI: 10.1088/1755-1315/358/5/052050.
- [12] 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.
- [13] YAO X Y, NIE Z Y, HU C L, et al. Experimental study and design methods of cold-formed steel unequal-leg lipped angles under axial compression [J]. Structures, 2025, 73: 108407. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108407.

- [14] 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)
- [15] ELLOBODY E, YOUNG B. Behavior of cold-formed steel plain angle columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(3): 457-466. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(457).
- [16] ZHAO X, TOOTKABONI M, SCHAFFER B W. Development of a laser-based geometric imperfection measurement platform with application to cold-formed steel construction [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(9): 1779-1790. DOI: 10.1007/s11340-015-0072-7.
- [17] FENG P, ZOU Y C, HU L L, et al. Use of 3D laser scanning on evaluating reduction of initial geometric imperfection of steel column with pre-stressed CFRP [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109527. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109527.
- [18] FENG P, ZOU Y C, HU L L, et al. Use of 3D laser scanning on evaluating reduction of initial geometric imperfection of steel column with pre-stressed CFRP [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109527. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109527.
- [19] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [20] AISI-S100-16 North American specification for the design of cold-formed steel structural members[S].
- [21] AS/NZS 4600:2018 Cold-formed steel structures[S].
- [22] DUBINA D, UNGUREANU V. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members [J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40(3): 239-262. DOI: 10.1016/S0263-8231(01)00046-5.
-
- (上接第 103 页)
- [2] YU Y J, ZHANG Y C, WANG X X, et al. Effect of inter-module connection properties on structural sway of high-rise modular buildings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 220: 108860. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2024. 108860.
- [3] LAWSON M, OGDEN R, et al. Design in modular construction[M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2014.
- [4] YANG T Y, ZHUO S R, LI Y J. Seismic behavior and design of innovative modular steel floor system [J]. Key Engineering Materials, 2018, 763: 287-294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.763.287.
- [5] CHEN Z H, ZHONG X, LIU Y, et al. Numerical study on modular slab-column steel structure based on simplified integrated floor [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(6): 1195-1208. DOI: 10.1177/1369433219891582.
- [6] LOSS C, PIAZZA M, ZANDONINI R. Connections for steel-timber hybrid prefabricated buildings. Part II: Innovative modular structures [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 796-808. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.001.
- [7] BOADI-DANQUAH E, ROBERTSON B, FADDEN M, et al. Lightweight modular steel floor system for rapidly constructible and reconfigurable buildings [J]. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, 2017, 5(4): 562-573. DOI: 10.2495/cm-em-v5-n4-562-573.
- [8] LI S, GONDOKUSUMO G S, VENKATESHWARAN A, et al. Structural behaviour of steel fibre-reinforced concrete floor system for modular construction [J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116437. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2023.116437.
- [9] 王莉萍,周博洋,李健,等.冷弯薄壁型钢梁-水泥纤维板组合楼盖受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊 2): 65-73. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0008.
WANG Liping, ZHOU Boyang, LI Jian, et al. Experimental study on flexural performance of cold-formed thin-walled steel beam-cement fiberboard composite slabs [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42 (Suppl. 2): 65-73. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0008. (in Chinese)
- [10] 张绍栋,鲁晓通,周若洋,等. 高层工业厂房人致振动舒适度试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(增刊 1): 344-347.
ZHANG Shaodong, LU Xiaotong, ZHOU Ruoyang, et al. Comfort test and finite element analysis of human-induced vibration in high-rise industrial workshop [J]. Industrial Construction, 2023, 53(Suppl.1): 344-347. (in Chinese)
- [11] JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S].
JGJ/T 441—2019 Technical standard for human comfort of the floor vibration[S]. (in Chinese)
- [12] ISO 10137-2017 Bases for design of structures-Serviceability of buildings and walkways against vibrations[S].