

不同厚度轻钢桁架轻混凝土组合墙板轴压性能研究

董宏英¹, 李浩东¹, 杨兆源^{2*}, 曹万林¹, 徐涛³, 沈韦霞³

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;
3. 安徽四建控股集团有限公司, 合肥 230061)

摘要: 为研究轻钢桁架轻混凝土组合墙板的轴压性能, 设计了1个轻钢桁架足尺试件和2个轻钢桁架轻混凝土组合墙板足尺试件, 并对其进行了轴压性能试验, 分析了不同轻混凝土厚度对试件破坏特征、荷载-位移曲线、轴压承载力等的影响。还通过有限元模型进行了数值模拟, 阐明了轻钢桁架轻混凝土组合墙板轴压损伤的演化过程, 揭示了其屈服机制。研究表明: 轻钢桁架轻混凝土组合墙板的破坏形态主要为轻钢立柱局部变形屈曲和轻混凝土局部压溃破坏; 90 mm厚无面层和150 mm厚有面层组合墙板的峰值承载力较轻钢桁架试件的峰值承载力分别提高了65.2%和361.7%; 在轴压荷载作用下轻钢骨架与轻混凝土的协同工作性能较好, 轻混凝土在为墙板提供竖向承载力的同时, 通过对轻钢龙骨形成有效约束显著提升了其受压稳定性; 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 基于参数分析对轻钢桁架轻混凝土组合墙板开展了优化设计, 相关成果可为工程设计提供参考。

关键词: 轻钢桁架; 轻混凝土; 组合墙板; 轴压试验; 数值模拟; 参数分析

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)07-0044-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240310001

Research on Axial Compressive Performance of Lightweight Steel Truss and Lightweight Concrete Composite Wall Panels in Different Thicknesses

DONG Hongying¹, LI Haodong¹, YANG Zhaoyuan^{2*}, CAO Wanlin¹,
XU Tao³, SHEN Weixia³

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Anhui Sijian Holding Group Co., Ltd., Hefei 230061, China)

*Corresponding author: yang_zhaoyuan@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: In order to investigate the axial compressive performance of lightweight steel truss and lightweight concrete composite wall panels, one lightweight steel truss and two lightweight steel truss and lightweight concrete composite wall panel specimens in full size were designed and tested for axial compressive performance, and the effects of different lightweight concrete thicknesses on the failure modes, load-displacement curves, and axial compressive bearing capacity of the specimens were analyzed. Finite element models were established and numerical simulations were carried out to elucidate the axial

收稿日期: 2024-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(52378116)

作者简介:

董宏英(1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail: donghy@bjut.edu.cn。

李浩东(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事轻钢组合结构方面的研究。

通信作者:

杨兆源(1995—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事轻钢组合结构方面的研究。E-mail: yang_zhaoyuan@mail.tsinghua.edu.cn。

compressive damage evolution process of lightweight steel truss and lightweight concrete composite wall panels and reveal the yielding mechanism. The results show that the failure modes of lightweight steel truss and lightweight concrete composite wall panel mainly consist of local deformation and buckling of lightweight steel columns and local compression crushing of lightweight concrete. The peak bearing capacity of 90mm-thick wall panel without facing layer and 150mm-thick wall panel with facing layer is increased by 65.2% and 361.7% respectively compared with that of lightweight steel truss specimen. Under the action of axial compressive load, the lightweight steel skeleton and lightweight concrete work well together, and the lightweight concrete provides vertical bearing capacity for the wall panel while the constraint effect on the lightweight steel keel effectively improves its compressive stability. The numerical simulation results conform to the experimental results well, and the structural configuration of lightweight steel truss and lightweight concrete composite wall panel is optimized through parametric analysis, which can provide reference for engineering design.

Keywords: lightweight steel truss; lightweight concrete; composite wall panel; axial compressive test; numerical simulation; parametric analysis

在我国村镇住宅建设过程中仍存在房屋舒适度差、抗震能力弱、围护墙节能效率低等问题。因此,以工业化为依托,通过一系列的研究探索,积极推进村镇住宅产业化发展对提升村镇居住品质具有重要的现实意义。冷弯薄壁型钢房屋建筑具有结构自重轻、抗震性能好、装配率高、工期短、工业化生产程度高等优点^[1],在村镇低矮房屋中适用性较好。但传统冷弯薄壁型钢房屋墙体存在防火、隔音、保温性能差等缺点,因此近年来对冷弯薄壁型钢房屋墙体的研究方向逐渐向填充轻混凝土的冷弯薄壁型钢组合墙体转变,该组合墙体的刚度、强度和稳定性都有明显提高^[2],弥补了传统空腔冷弯薄壁型钢墙体的不足,提升了房屋居住的舒适感。

已有国内外学者对填充了轻质填料的冷弯薄壁型钢组合墙体的受力性能进行了相关研究。刘斌等^[3]、王静峰等^[4-5]分别对冷弯薄壁型钢组合墙体进行了抗剪、抗弯、抗震等力学性能的试验研究。部分学者对冷弯薄壁型钢组合墙体的轴压性能也进行了一些研究。MYDIN等^[6]、PRABHA等^[7]针对外包薄壁钢板内填轻质发泡混凝土组合墙体开展了轴压试验与理论研究,发现外包薄壁钢板对墙体的竖向承载力贡献较小,其主要起到约束泡沫混凝土变形进而提高强度的作用,还提出了该新型墙体轴压承载力的计算公式。李科龙等^[8]、徐志峰等^[9]、王静峰等^[10]针对冷弯型钢组合墙体,开展了对其填充不同种类轻质填料后的轴压性能对比试验,分析了有无覆板、填料强度、墙体厚度等因素对其轴压性能的影响,提出了填充不同轻质填料的冷弯型钢组合墙体轴压承载力的计算方法。宋慧慧等^[11]、戴素娟等^[12]对冷弯型钢组合墙体进行了非线性有限元分析,并与试验结果对比从而验证了数值模型的准确性,还通过参数分析对墙体构造进行了优化。

上述研究中,组合墙体内轻钢骨架的形式多为框架结构,轻型板材作为墙体两侧的结构覆板,用自攻螺钉与龙骨连接,骨架内部填充轻质填料从而形成整体,此类墙体的整体性较差,轻钢立柱翼缘与外覆面板间易发生崩开分离破坏,轻钢立柱受压易失稳。本文提出了一种新型装配

式填充轻混凝土的冷弯薄壁轻钢桁架组合墙板,通过骨架内部横向和斜向连接龙骨以抑制轻钢立柱的整体弯曲失稳破坏,核心区的轻混凝土与外部轻混凝土-钢丝网面层形成整体,有效提高了对轻钢立柱的约束作用,研究了不同轻混凝土厚度对其轴压性能的影响。建立了轻钢桁架轻混凝土组合墙板的有限元分析模型,采用ABAQUS有限元软件进行了计算分析,并与试验结果对比验证了数值模型的准确性。基于试验和数值模拟,阐明了轻钢桁架轻混凝土组合墙板在轴压荷载作用下内部轻钢龙骨和轻混凝土的损伤及应力发展规律,通过参数分析研究了不同轻钢立柱壁厚和轻混凝土强度对其轴压性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计制作了1个轻钢桁架足尺试件和2个轻钢桁架轻混凝土组合墙板足尺试件,试件高为3 000 mm,宽为600 mm。其中AC1为厚150 mm并有硬化面层的轻钢桁架轻混凝土组合墙板试件,AC2为厚90 mm且无面层的轻钢桁架轻混凝土组合墙板试件,AC3为厚90 mm(水平横截面厚度)的轻钢桁架试件。各试件主要设计参数如表1所示。

表1 试件设计参数

试件编号	试件构造	轻钢龙骨壁厚	轻混凝土厚度	硬化面层厚度	墙板总厚度
AC1	有面层试件	1.2	140	10	150
AC2	无面层试件	1.2	90	0	90
AC3	轻钢桁架	1.2	0	0	90

墙板内轻钢龙骨均采用C形截面冷弯薄壁型钢,尺寸为89 mm×41 mm×11 mm×1.2 mm(腹板高度×翼

缘宽度×卷边宽度×壁厚)。试件几何尺寸及构造如图1所示,标准型试件构造如下:内外叶均为5 mm厚高性能抗裂砂浆面层,内铺耐碱玻纤网格布,中间层由内外叶25 mm厚轻混凝土-钢丝网层以及90 mm轻钢龙骨-轻混凝土夹心层构成。

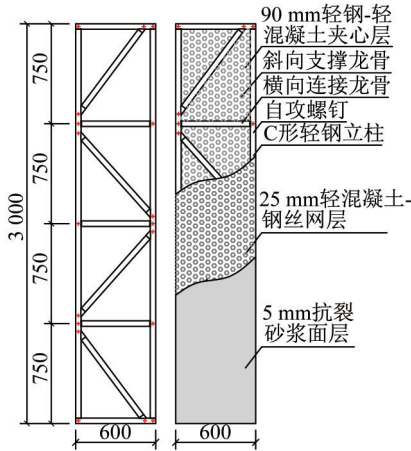


图1 试件几何尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Geometric dimensions and details of specimens (unit: mm)

1.2 材料性能

实测钢材力学性能如表2所示,实测水泥基材料力学性能如表3所示。

表2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

钢材类型	壁厚/ mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /GPa	伸长率 δ /%
DH89-1.20	1.2	396	526	208	25

表3 水泥基材料力学性能

Table 3 Mechanical properties of cement-based materials

材料类型	立方体抗压强度 f_{uk} /MPa	轴心抗压强度 f_{ck} /MPa	弹性模量 E_c /GPa
轻混凝土	1.36	1.14	0.29
高性能 抗裂砂浆	16.20	12.31	18.02

1.3 试验加载

试验采用300 t液压千斤顶对试件进行竖向加载,试验装置如图2所示。

墙板试件采用均布加载的方式进行加载,试验加载采用单向重复轴向加载的加载方式^[13-15]。在试验正式开始前,根据规范计算预估各试件的极限承载力,首先对试件进行5 kN预加载以测试加载装置是否可以正常使用及采集设备仪表读数的准确性。测试结束后随即开始正式加载,正式加载时采用先荷载控制后位移控制的加载

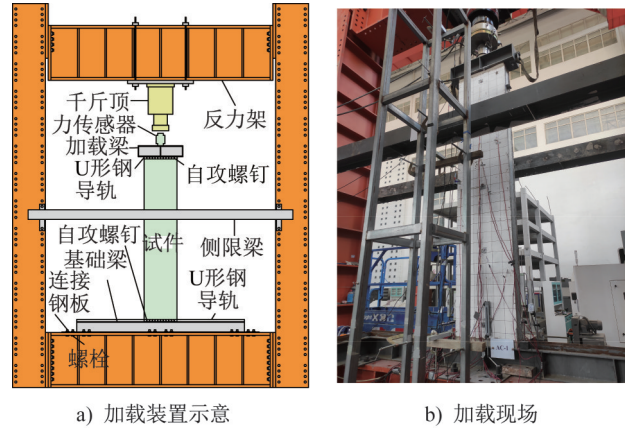


图2 试验装置
Fig. 2 Test setup

方式,第一阶段采用荷载控制加载,每级荷载级差5 kN,持荷时间为30 s,每级加载完成后卸载至5 kN,在确保试件没有发生明显破坏的情况下,保持稳定加载;当在某一级荷载试件的应变变化突然增大时,或试件的荷载-位移曲线出现明显弯曲时,采用位移控制加载,每级位移级差1 mm,持荷时间为60 s,每级加载完成后卸载至5 kN。当试件的承载力下降至峰值荷载的85%或平面外挠度过大时,结束加载。

1.4 测点布置

各试件均布置11个位移计,如图3a)所示,在试件4个侧面3 000 mm高度范围内布置测试墙板轴向变形的位移计D1、D2、D3、D4;在试件中部2 400 mm高度范围内布置位移计D5、D6以测试墙板较均匀受压段的轴向变形;在试件面外垂直墙板处均匀布置位移计D7、D8、D9、D10、D11用于测量墙板平面外弯曲变形。墙板内轻钢桁架龙骨应变片(S1~S15、B1~B8,其中B1~B8分别布置在龙骨右侧)布置如图3b)所示。

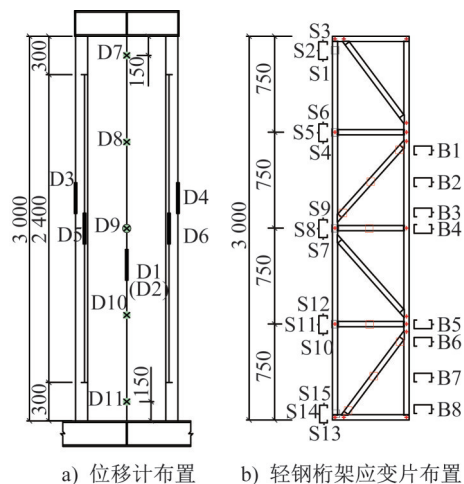


图3 测点布置(单位:mm)

Fig. 3 Arrangement of measuring points(unit: mm)

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

对于试件 AC1,当加载至峰值荷载 190 kN 时,轻钢立柱中部发生局部变形屈曲,轻混凝土面层与立柱分离,墙板有明显的平面外弯曲变形,最终墙板从跨中整体弯折破坏,墙板中部轻混凝土局部被压溃,如图 4a) 所示。对于试件 AC2,当加载至峰值荷载 68 kN 时,顶部轻混凝土被压溃,墙体角部沿轻钢立柱不断出现数条竖向裂缝;当加载至破坏荷载时,中部龙骨连接节点处立柱翼缘略微翘起,试件整体未有明显的平面外弯曲变形,如图 4b) 所示。对于试件 AC3,当加载至峰值荷载 41 kN 时,试件发生明显地整体扭转,最终轻钢立柱上部 1/4 节点处发生屈曲变形,如图 4c) 所示。各试件沿墙板高度方向的平面外弯曲变形曲线($H-D$)随轴向荷载变化的发展历程如图 5 所示。

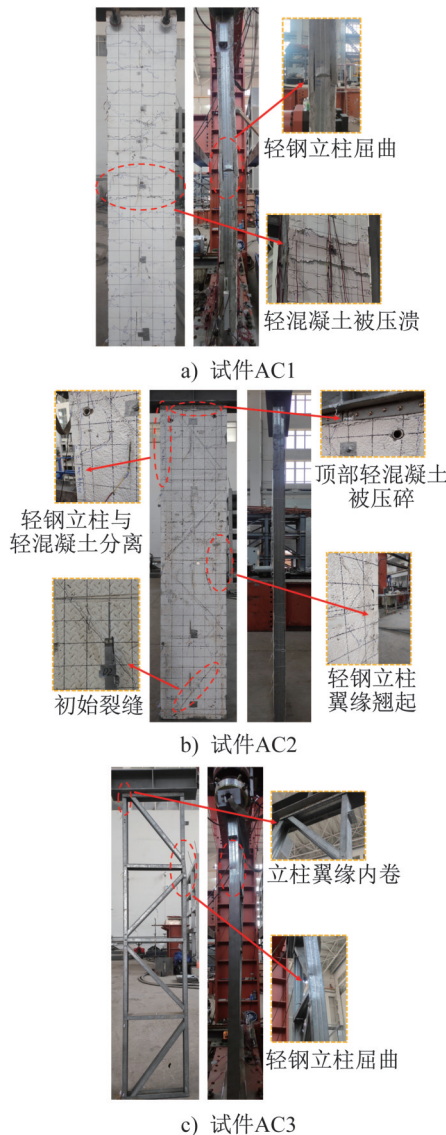


图 4 各试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of all specimens

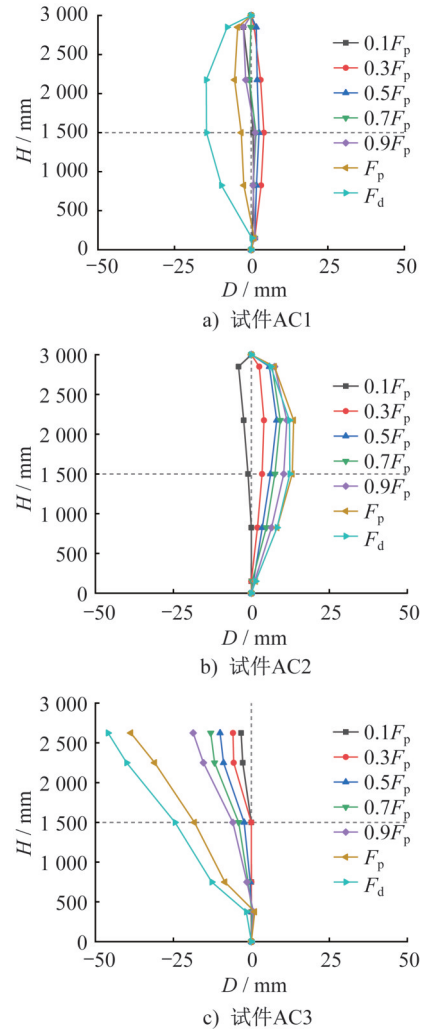


图 5 各试件平面外弯曲变形曲线

Fig. 5 Out-of-plane bending deformation curves of all specimens

由图 5 可知:轻钢桁架轻混凝土组合墙板试件 AC1 和 AC2 的平面外弯曲变形曲线近似于正弦半波曲线,其受力破坏模式较轻钢桁架试件 AC3 的受力破坏模式发生显著变化,由空腔轻钢桁架的失稳破坏转变为组合墙板全截面受压的强度破坏。

2.2 荷载-位移曲线及轴压承载力

将每个试验所测的荷载和位移进行均值处理并绘制各试件的荷载-轴向位移($F-\Delta$)曲线及骨架曲线,如图 6 和图 7 所示, Δ 取 4 个侧面轴向全长位移计实测值的平均值。各试件特征点荷载及位移如表 4 所示。其中 F_y 和 Δ_y 为试件的屈服荷载和屈服位移,由能量等值法确定; F_p 和 Δ_p 为试件的峰值荷载和峰值位移; F_d 为试件的破坏荷载,取当荷载下降至峰值荷载的 85% 时对应的荷载, Δ_d 为相应的破坏位移。

由图 7 和表 4 可知:试件 AC1 和 AC2 较试件 AC3 的峰值承载力 F_p 分别提高了 361.7% 和 65.2%,即轻混凝土

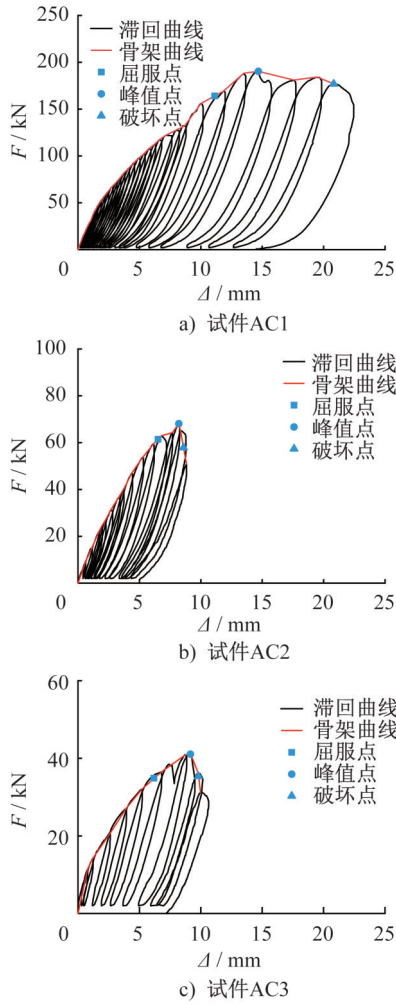


图6 各试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 6 Load-axial displacement curves of all specimens

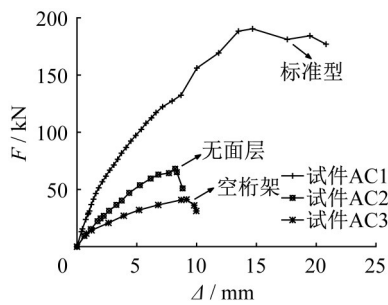


图7 各试件荷载-轴向位移骨架曲线

Fig. 7 Load-axial displacement skeleton curves of all specimens

填料厚度由0 mm增加到90 mm、再增加到140 mm时,轻钢桁架轻混凝土组合墙板轴压峰值承载力的提高并非呈简单的线性增长,其增长速度快于线性增长速度。试验结果表明,轻钢骨架与轻混凝土二者共同承压的协同作用较好,轻混凝土在为墙板提供竖向承载力的同时,对轻钢龙骨的握裹效应有效提高了其抗变形屈曲的能力,同时轻钢龙骨对轻混凝土的约束作用也提高了轻混凝土的

表4 各试件特征值

Table 4 Characteristic values of all specimens

试件编号	屈服点		峰值点		破坏点	
	F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_p/mm	F_d/kN	Δ_d/mm
AC1	164.13	11.13	190.39	14.68	176.96	20.82
AC2	61.44	6.52	68.10	8.21	57.89	8.59
AC3	34.73	6.16	41.23	9.16	35.05	9.84

抗压能力,二者协同受力使得组合墙板抗压能力显著提高。

2.3 应变分析

提取组合墙板内轻钢龙骨部分应变片数据,将各试件应变值进行均值处理并绘制轴向荷载-应变关系曲线,如图8所示(图8a)中应变片S9已损坏)。

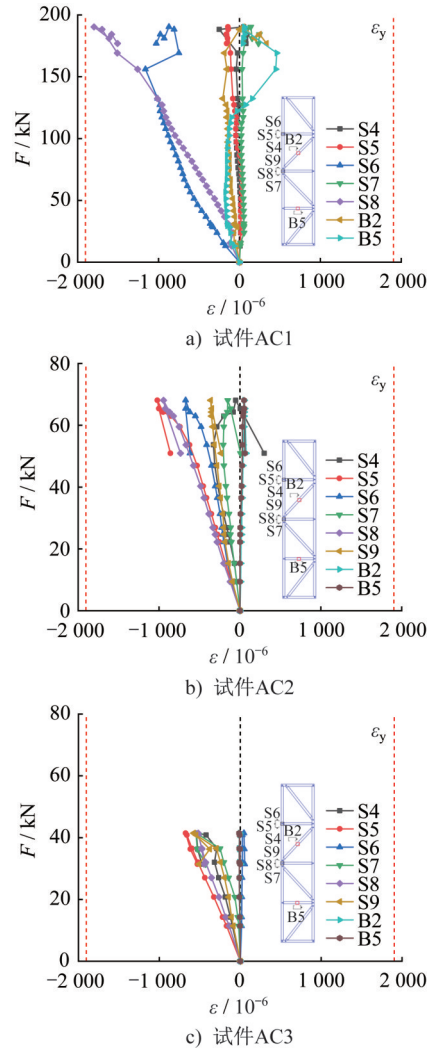


图8 各试件荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of all specimens

由图8可知:对于有面层试件AC1,在加载至峰值荷载时轻钢立柱局部破坏处的应变值与其屈服应变值 ϵ_y 相

近;对于无面层试件AC2和轻钢桁架试件AC3,在加载至峰值荷载时轻钢立柱应变值与其屈服应变值 ϵ_y 相差较远,表明轻钢立柱未充分发挥其承载能力。各试件内部连接龙骨的应变值均较小,表明其在墙板承压过程中对墙板轴压承载力的直接贡献较小。

2.4 恢复能力

当试件进入非弹性阶段后,试件上的损伤积累对墙板的轴压性能会产生影响。采用轴向变形恢复系数 $\eta = \Delta_m / \Delta_r$ 描述试件的恢复性能, Δ_m 为每级加载中最大位移; Δ_r 为每级卸载至5 kN的累积残余位移。 η 越大,试件的恢复能力越好。将各试件变形恢复系数进行均值处理绘制各试件变形恢复系数-轴向位移曲线如图9所示。

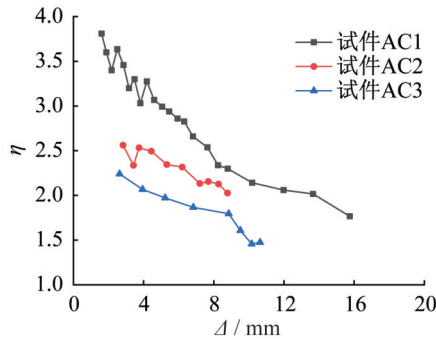


图9 各试件变形恢复系数-轴向位移曲线

Fig. 9 Deformation restoring coefficient-axial displacement curves of all specimens

由图9可知: Δ 相同时,试件AC1较AC2、试件AC2较AC3的 η 值逐步提高,表明随着轻混凝土厚度的增加,组合墙板的恢复性能逐渐变好。

3 有限元分析

3.1 有限元建模

本文采用有限元分析软件ABAQUS建立轻钢桁架轻混凝土组合墙板各部件的三维有限元模型,如图10所示,该模型主要由轻钢骨架和轻混凝土填料两部分组成。由试验结果可知,试验加载中墙板两侧5 mm厚硬化砂浆面层难以直接承压,受压过程中硬化砂浆面层发生与轻混凝土剥离的稳定性破坏,故认为其对墙板抗压承载力的贡献不大。为优化有限元模型的计算效率、简化建模过程并降低后期计算收敛难度,该有限元模型对实际试件进行了合理简化,忽略了内外叶硬化砂浆面层和钢丝网片对组合墙板轴压性能的影响。

墙板内部轻钢龙骨属于薄壁构件,采用四边形缩减积分壳单元S4R进行模拟。轻混凝土填料采用八节点缩减积分三维实体单元C3D8R进行模拟。钢材本构采用双折线等向强化模型^[16],泊松比取0.3。轻混凝土填料采

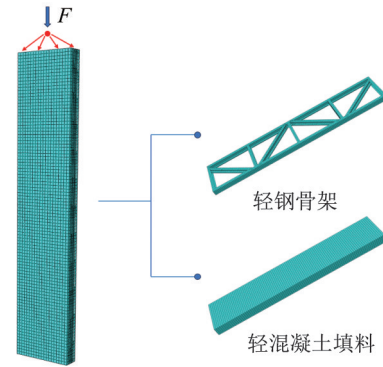


图10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

用双折线损伤塑性模型^[17],泊松比取0.2。其余相关参数采用材料力学性能试验的实测值。并采用结构网格划分技术对各部件进行网格划分,轻钢龙骨网格尺寸为22 mm,轻混凝土填料网格尺寸为30 mm。

3.2 相互作用及边界条件

由于轻钢骨架中立柱与内部连接龙骨之间均用自攻螺钉连接,试验过程中自攻螺钉未发生断裂现象,且轻钢龙骨间的连接处无明显滑移错动,故轻钢立柱与内部连接龙骨接触处均采用绑定约束(Tie)模拟。轻钢骨架顶部和底部处连接龙骨的腹板与轻混凝土填料对应顶底面之间、轻钢立柱腹板与轻混凝土填料对应侧面之间均采用绑定约束(Tie),以模拟加载过程中轻钢骨架与轻混凝土填料二者的协同承压。由于试件制作时将轻混凝土填料与轻钢骨架现浇成一体,故模型中将轻钢骨架内部的斜向及横向龙骨通过内置区域(embedded region)嵌入到轻混凝土填料中。

根据试验加载装置实际细部处理情况,对有限元模型的边界条件进行合理简化。墙板底部支座采用固定端约束进行模拟,即 $U_1=U_2=U_3=0, U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$ 。为方便荷载施加及顶端边界条件的设置,在墙板顶部设置参考点 R_{P1} ,并与顶部轻钢龙骨腹板耦合(coupling)。模拟采用位移控制加载,除参考点 R_{P1} 上施加的竖向位移,对其余方向的平动和转动自由度全部进行约束,即 $U_1=U_2=0, U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$ 。

3.3 有限元计算及分析

3.3.1 承载力及变形

将数值计算所得各试件轴压峰值承载力 F_{cp} 与试验结果进行对比,如表5所示,二者的相对误差范围为0.6%~7.5%。数值模拟所得轻钢骨架及轻混凝土填料的破坏形态与试验现象基本一致,各模型达到弹性极限点、峰值点、破坏点时对应的 von Mises 应力云图如图11~13所示。

表5 峰值承载力试验结果与模拟结果对比

Table 5 Comparison of peak bearing capacity between test results and simulation results

试件编号	试验值 F_p/kN	模拟值 F_{cp}/kN	F_p/F_{cp}
AC1	190.39	191.50	0.994
AC2	68.10	73.59	0.925
AC3	41.23	42.18	0.977

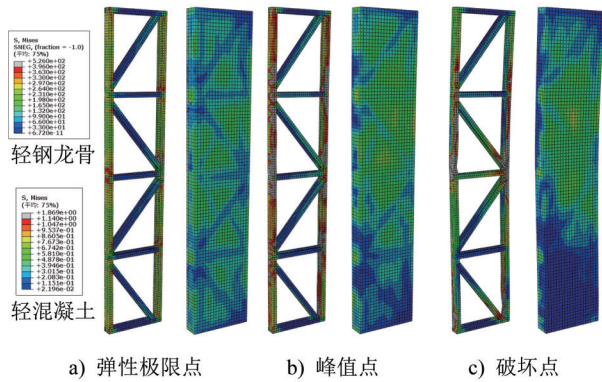


图11 试件AC1应力云图(单位:MPa)

Fig. 11 The stress contour of specimen AC1 (unit: MPa)

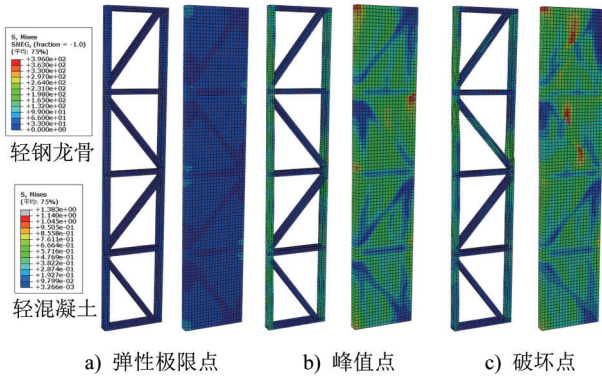


图12 试件AC2应力云图(单位:MPa)

Fig. 12 The stress contour of specimen AC2 (unit: MPa)

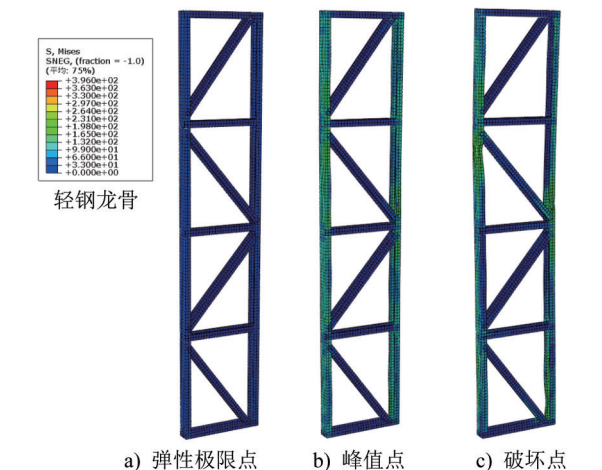


图13 试件AC3应力云图(单位:MPa)

Fig. 13 The stress contour of specimen AC3 (unit: MPa)

由图11~13可知:标准型试件AC1在达到弹性极限点时,轻钢骨架和轻混凝土应力分布较为均匀,二者均匀受压,轻钢立柱未出现明显屈曲;达到峰值点时,轻钢龙骨连接节点处立柱均达到屈服强度;达到破坏点时,随着墙板平面外弯曲变形的增大和试件薄弱区域损伤的不断发展,应力发生重分布,墙板两端的轻混凝土逐渐退出工作,轻钢立柱中部产生畸变屈曲。无面层试件AC2在加载全过程中,轻钢骨架和轻混凝土应力分布较为均匀,二者均匀受压,轻钢立柱未达到屈服强度,轻混凝土局部被压溃。轻钢空桁架试件AC3在达到破坏点时,轻钢立柱绕弱轴弯曲,未达到钢材屈服强度。

3.3.2 荷载-位移曲线

将数值模拟所得各试件的荷载和位移进行均值处理并绘制荷载-轴向位移曲线与试验曲线,二者的对比如图14所示。

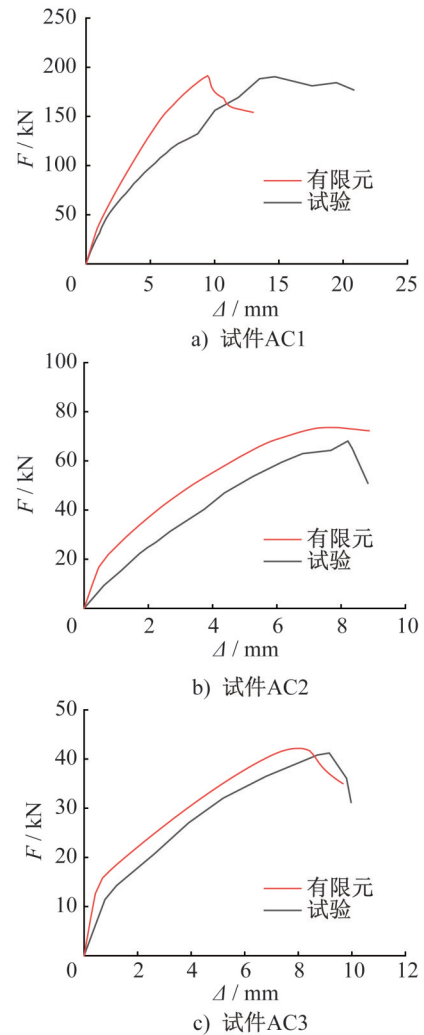


图14 各试件荷载-轴向位移曲线试验结果与模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of load-axial displacement curves of all specimens between test and simulation results

分析图 14 可知:轻钢桁架轻混凝土组合墙板数值模拟计算曲线和试验曲线吻合较好。加载初期,有限元的模拟刚度比试验值刚度偏大,主要由于墙板内轻钢龙骨间有拼接缝隙,且试件在装配时存在安装缝隙,故试验实测的轴向位移偏大。

3.4 设计参数影响

3.4.1 轻钢立柱壁厚

由上述试验及有限元计算结果可知,该组合墙板在轴压荷载的作用下,其轴压承载力主要由轻钢立柱和轻混凝土两部分承担,轻钢骨架内横向和斜向连接的龙骨直接承压的贡献较小,故本节基于与有面层试件 AC1 相同的有限元建模方法,选取轻钢立柱壁厚为 0.8 mm、1.0 mm、1.2 mm、1.4 mm 和 1.6 mm 的模型,分析不同轻钢立柱壁厚对其轴压性能的影响。各模型达到峰值承载力对应的 von Mises 应力云图如图 15 所示。不同轻钢立柱壁厚模型的荷载-位移曲线及承载力比较如图 16 所示。

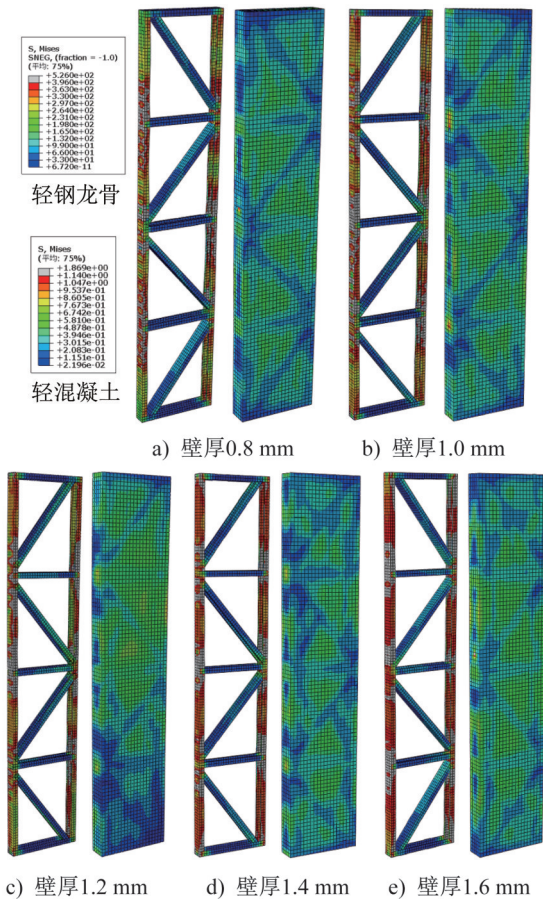


图 15 不同轻钢立柱壁厚模型应力云图(单位:MPa)

Fig. 15 Stress contour for models with different lightweight steel column wall thicknesses (unit:MPa)

由图 16 可知:轻钢立柱壁厚为 1.4 mm 和 1.6 mm 的模型其轴压承载力与壁厚为 1.2 mm 的模型相比,分别提

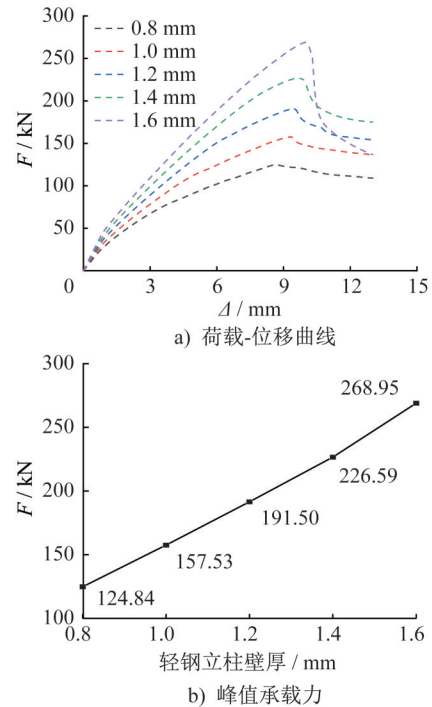


图 16 不同轻钢立柱壁厚对模型轴压性能的影响

Fig. 16 Effect of light weight steel column wall thicknesses on the axial compressive performance of models

高了 18.3% 和 40.4%;轻钢立柱壁厚为 0.8 mm 和 1.0 mm 的模型其轴压承载力与壁厚为 1.2 mm 的模型相比,分别降低了 34.8% 和 17.7%。组合墙板的轴压承载力和刚度随轻钢立柱壁厚的增大而显著提高,但其荷载-位移曲线的下降段变陡,破坏时脆性特征更显著,且轻钢骨架与轻混凝土的协同工作性能降低。

3.4.2 轻混凝土强度

轻钢骨架与轻混凝土填料之间具有较好的协同作用,为研究不同抗压强度的填料对组合墙板轴压性能的影响,本节以有面层试件 AC1 为原型,选取轻混凝土强度为 1.14 MPa、1.71 MPa、2.28 MPa、2.85 MPa 和 3.42 MPa 的组合墙板模型进行有限元分析,各模型达到峰值承载力对应的 von Mises 应力云图如图 17 所示。不同轻混凝土强度模型的荷载-位移曲线及承载力比较如图 18 所示。

由图 18 可知:轻混凝土强度从 1.14 MPa 依次增大到 3.42 MPa 时,各相邻模型的轴压承载力较前一模型的轴压承载力分别提高了 4.9%、7.5%、6.6%、4.3%。组合墙板轴压承载力的增速随轻混凝土强度的提高呈现先增加后减小的趋势;随着轻混凝土强度的提高,轻钢立柱的承载能力发挥更充分,对钢材的利用效率更高,轻钢立柱的破坏形式由局部屈曲破坏逐渐变为全截面屈曲破坏。

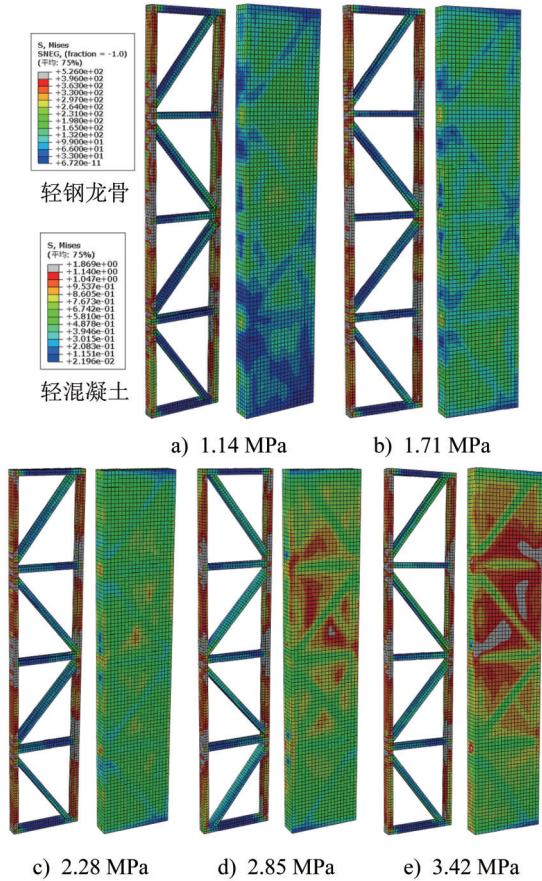
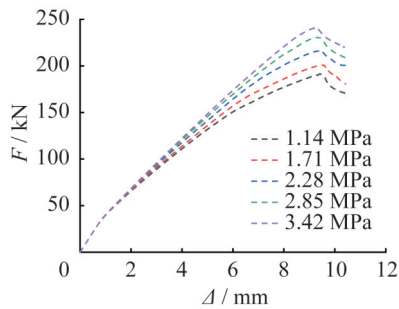
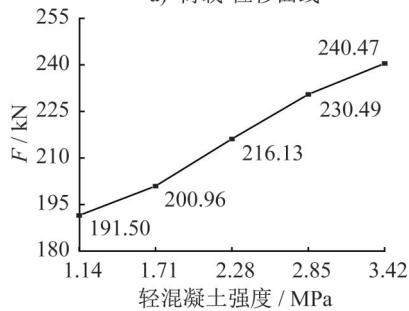


图 17 不同轻混凝土强度模型应力云图

Fig. 17 Stress contour for different lightweight concrete strength models



a) 荷载-位移曲线



b) 峰值承载力

图 18 不同轻混凝土强度对模型轴压性能的影响

Fig. 18 Effect of lightweight concrete strengths on the axial compressive performance of models

4 结论

(1) 轻钢桁架轻混凝土组合墙板的破坏形态为轻钢龙骨立柱局部变形屈曲和轻混凝土局部压溃破坏。

(2) 轻钢骨架与轻混凝土二者共同作用承压时的协同受力性能较好。轻混凝土厚度由 0 mm 增加到 90 mm、再增加到 150 mm 时(含每侧面层的 5 mm 强化砂浆),墙板轴压承载力显著提高。试验结果表明:轻混凝土在为墙板提供竖向承载力的同时对轻钢龙骨的约束效应也有效地提高了其抗变形屈曲的能力,轻钢龙骨对轻混凝土的约束作用也同样提升了轻混凝土的抗压能力。

(3) 各试件轴压加载过程数值模拟结果表明:试件破坏形态的模拟结果与试验结果吻合较好;轴压承载力的模拟结果与试验结果吻合较好,相对误差在 7.5% 以内。

(4) 轻钢桁架轻混凝土组合墙板的轴压承载力和刚度随轻钢立柱壁厚的增大而显著提高,随轻混凝土强度的增大而提升;轻钢桁架轻混凝土组合墙板随着轻混凝土强度的增大,轻钢立柱的破坏形式由局部屈曲破坏逐渐变为全截面屈曲破坏。

参考文献:

[1] 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)

[2] 曹万林,杨兆源,周绪红,等.装配式轻钢组合结构研究现状与发展[J].建筑钢结构进展,2021,23(12):1-15.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.001.
CAO Wanlin, YANG Zhaoyuan, ZHOU Xuhong, et al. Research and development on prefabricated lightweight steel composite structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(12): 1-15. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.001. (in Chinese)

[3] 刘斌,郝际平,李科龙,等.喷涂式轻质砂浆-冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能试验研究[J].土木工程学报,2015,48(4):31-41. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2015.04.007.
LIU Bin, HAO Jiping, LI Kelong, et al. Experimental study on shear resistance of cold-formed thin-wall steel framing walls with sprayed lightweight mortar[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 31-41. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2015.04.007. (in Chinese)

[4] 王静峰,庞帅,鲁萌萌,等.预制冷弯薄壁型钢-轻聚合物复合墙体抗弯性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2018,20(2):20-27. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.02.003.
WANG Jingfeng, PANG Shuai, LU Mengmeng, et al. Experimental study on the flexural behavior of precast cold-

- formed thin-walled steel framing(CTSF) composite walls infilled with light polymer material [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2018, 20(2): 20-27. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.02.003. (in Chinese)
- [5] 王静峰,赵鹏,汪皖黔,等.钢框架内嵌连接轻钢龙骨注浆复合墙板结构抗震性能试验研究[J].*建筑钢结构进展*,2021,23(4): 32-42.DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.04.005. WANG Jingfeng, ZHAO Peng, WANG Wanqian, et al. Experimental study on the seismic behavior of steel frames embedded with light steel-framed grouting (LSFG) composite wall panels [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(4): 32-42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.04.005. (in Chinese)
- [6] OTHUMAN MYDIN M A, WANG Y C. Structural performance of lightweight steel-foamed concrete-steel composite walling system under compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(1): 66-76. DOI: 10.1016/j.tws.2010.08.007.
- [7] PRABHA P, MARIMUTHU V, SARAVANAN M, et al. Effect of confinement on steel-concrete composite light-weight load-bearing wall panels under compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 81: 11-19. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.10.008.
- [8] 李科龙,郝际平,田黎敏,等.喷涂式轻质砂浆-冷弯薄壁型钢组合墙体立柱压弯性能研究[J].*建筑结构学报*,2016,37(11):97-105. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.11.013. LI Kelong, HAO Jiping, TIAN Limin, et al. Research on compression-bending behavior of cold-formed thin-walled steel framing composite wall stud with sprayed lightweight mortar [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(11): 97-105. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.11.013. (in Chinese)
- [9] 徐志峰,陈忠范,朱松松,等.秸秆板轻钢高强泡沫混凝土剪力墙轴心受压性能研究[J].*工程力学*,2018,35(7):219-231. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.03.0262. XU Zhifeng, CHEN Zhongfan, ZHU Songsong, et al. Study of lightweight steel high-strength foamed concrete shear wall covered with straw board subjected to axial loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(7): 219-231. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.03.0262. (in Chinese)
- [10] 王静峰,张荣,汪皖黔,等.填充轻质浆料的预制冷弯型钢组合墙板轴压性能试验和承载力计算方法[J].*工业建筑*,2021,51(8): 99-105. DOI: 10.13204/j.gyjzG20072110. WANG Jingfeng, ZHANG Rong, WANG Wanqian, et al. Experiments and calculation methods on performance of prefabricated cold-formed steel (CFS) composite walls filled with light mortar under axial compression [J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(8): 99-105. DOI: 10.13204/j.gyjzG20072110. (in Chinese)
- [11] 宋慧慧,王静峰,丁兆东,等.填充轻聚合物的轻钢结构墙体轴压性能数值分析[J].*合肥工业大学学报(自然科学版)*,2021, 44(4): 514-519. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2021.04.014. SONG Huihui, WANG Jingfeng, DING Zhaodong, et al. Numerical analysis of axial compressive behavior of cold-formed thin-walled steel composite wall sprayed with light polymer material [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(4): 514-519. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2021.04.014. (in Chinese)
- [12] 戴素娟,左益宁,成喆,等.轻钢与发泡混凝土组合墙体轴心受压性能研究[J].*混凝土*,2022(7):170-173,177. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2022.07.037. DAI Sujuan, ZUO Yining, CHENG Zhe, et al. Research on axial compression performance of lightweight steel-foam concrete composite walls [J]. *Concrete*, 2022(7): 170-173, 177. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2022.07.037. (in Chinese)
- [13] 曹万林,王如伟,殷飞,等.异形截面多腔钢管混凝土巨型柱偏压性能[J].*哈尔滨工业大学学报*,2020,52(6):149-159. DOI: 10.11918/202003036. CAO Wanlin, WANG Ruwei, YIN Fei, et al. Behavior of special-shaped multi-cell concrete-filled steel tube mega-columns under eccentric compression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 149-159. DOI: 10.11918/202003036. (in Chinese)
- [14] DONG H Y, QIN J, CAO W L, et al. Investigation on axial compressive behavior of pentagonal section steel-reinforced concrete columns [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 66: 105954. DOI: 10.1016/j.job.2023.105954.
- [15] DONG H Y, ZHU J, CAO W L, et al. Structural behavior of mega steel-reinforced high-strength concrete rectangular columns under axial compression [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 61: 105272. DOI: 10.1016/j.job.2022.105272.
- [16] 王静峰,张荣,汪皖黔,等.轻钢龙骨注浆复合墙板-钢框架结构抗震性能数值分析与试验研究[J].*建筑钢结构进展*,2022,24(3): 65-71, 79. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.007. WANG Jingfeng, ZHANG Rong, WANG Wanqian, et al. Numerical studies and tests on the seismic behavior of steel frames embedded with LSFG composite wall [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24(3): 65-71, 79. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.007. (in Chinese)
- [17] 胡习兵,张正武,黄纵威,等.轻钢龙骨泡沫混凝土轻质墙板抗弯性能研究[J].*建筑钢结构进展*,2022,24(9):67-75. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.09.007. HU Xibing, ZHANG Zhengwu, HUANG Zongwei, et al. Bending performance of cold-formed steel joist foam concrete wallboard [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24(9): 67-75. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.09.007. (in Chinese)