

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.046



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



冷弯薄壁波纹钢板-泡沫混凝土组合墙体的轴压性能

石宇¹, 刘佳霖¹, 高畅¹, 熊刚¹, 彭雄²

(1. 重庆大学 土木工程学院; 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045;

2. 中阳建筑工业化研究院, 江西 抚州 344000)

摘要:为提高冷弯薄壁型钢组合墙体的轴压性能,提出一种冷弯薄壁波纹钢板-泡沫混凝土组合墙体(CTCFW)。为研究波纹钢板连接构造及布置方向对组合墙体轴压性能的影响,设计4个足尺墙体试件并开展轴压试验,获得其破坏模式、荷载-位移曲线及特征参数,分析不同构造形式对墙体承载力、刚度及延性的影响。结果表明,内嵌波纹钢板组合墙体主要发生局部屈曲破坏,而围板连接波纹钢板组合墙体主要表现为整体平面外失稳破坏;与内嵌波纹钢板组合墙体相比,围板连接试件 CTCFW-3 和 CTCFW-4 的轴压承载力分别提高 92.09% 和 78.58%,初始刚度分别提高 221.43% 和 121.43%;与横向波纹钢板试件相比,竖向波纹钢板试件 CTCFW-1 和 CTCFW-3 的轴压承载力分别提高 21.69% 和 30.90%,表明竖向布置的波纹钢板能更有效地参与轴压受力。基于冷弯薄壁型钢龙骨框架、波纹钢板与轻质泡沫混凝土共同作用,采用叠加原理提出 CTCFW 轴压承载力计算公式,计算值与试验值误差在 $\pm 10\%$ 以内。

关键词:冷弯薄壁型钢;组合墙体;波纹钢板;泡沫混凝土;轴压性能

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Axial compressive performance of cold-formed thin-walled corrugated steel plate with foam concrete composite walls

SHI Yu¹, LIU Jialin¹, GAO Chang¹, XIONG Gang¹, PENG Xiong²

(1. School of Civil Engineering; State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area,

Chongqing 400045, P. R. China; 2. Building Industrialization Research Institute, Zhongyang Construction Group,

Fuzhou 344000, Jiangxi, P. R. China)

Abstract: To improve the axial compressive performance of cold-formed thin-walled steel composite walls, a cold-formed thin-walled corrugated steel plate with foam concrete composite wall (CTCFW) was proposed. Four full-scale specimens were tested under axial compression to investigate the effects of connection details and

收稿日期:2026-03-14

基金项目:国家自然科学基金(52378132);西藏自治区重点研发及转化重点专项(XZ202501ZY0121)

作者简介:石宇(1978-),女,博士,教授,博士生导师,主要从事钢结构研究,E-mail:shiyu7811@163.com。

高畅(通信作者),男,博士生,E-mail:gaochang1432@163.com。

Received: 2026-03-14

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52378132); Key R&D and Transformation Project of the Xizang Autonomous Region (No. XZ202501ZY0121)

Author brief: SHI Yu (1978-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: steel structure, E-mail: shiyu7811@163.com.

GAO Chang (corresponding author), PhD candidate, E-mail: gaochang1432@163.com.

corrugation orientations on the axial behavior of the composite walls. The failure modes, load-displacement curves, and characteristic parameters were obtained, and the influences of different configurations on the load-bearing capacity, stiffness, and ductility were analyzed. The experimental results indicate that the specimens with embedded corrugated steel plates mainly failed by local buckling, whereas those with perimeter-plate-connected corrugated steel plates mainly exhibited global out-of-plane instability. Compared with the specimens with embedded corrugated steel plates, the axial compressive capacities of CTCFW-3 and CTCFW-4 increased by 92.09% and 78.58%, respectively, while the initial stiffness increased by 221.43% and 121.43%, respectively. Compared with the specimens with horizontally arranged corrugated steel plates, the axial compressive capacities of CTCFW-1 and CTCFW-3 with vertically arranged corrugated steel plates increased by 21.69% and 30.90%, respectively, indicating that vertically oriented corrugated steel plates participated more effectively in resisting axial compression. Based on the combined action of the cold-formed steel frame, corrugated steel plate, and foam concrete, a formula for predicting the axial compressive capacity of CTCFW was proposed using the superposition principle. The difference between the calculated and test results was within $\pm 10\%$.

Keywords: cold-formed thin-walled steel; composite wall; corrugated steel plate; foam concrete; axial compressive performance

冷弯薄壁型钢结构是一种力学性能良好、保温隔热性能优良、绿色节能且装配化程度高的结构体系^[1]。冷弯薄壁型钢墙体作为这类结构中的关键承重构件之一,不仅承受自重等竖向荷载,还承担地震和风荷载引起的水平荷载。提升冷弯薄壁型钢墙体的承载性能一直是相关研究重点,学者提出并研究了多种构造的组合墙体以提高其力学性能。

目前应用最广泛的是传统覆面板冷弯薄壁型钢墙体,相关研究主要集中在覆面材料和骨架截面两个方面。一方面,镁晶板、石膏纤维板等新型覆面材料被逐步引入。石宇等^[2]针对覆有镁晶板的冷弯薄壁型钢剪力墙进行试验,提出增加镁晶板厚度可提升墙体力学性能。另一方面,墙体立柱形式由单肢C形柱逐渐发展为拼合截面柱,已提出冷弯薄壁三角形拼合截面^[3]、十字形拼合闭口截面^[4]及I形截面等新型构造形式。Sonkar等^[5]对比了I形截面拼合柱与单肢C形柱墙体的轴压性能,结果表明,拼合柱的极限抗压强度高于单肢C形柱,但在考虑复杂屈曲耦合作用后,其承载力低于各单肢承载力之和,两者强度比值在1.05~1.3之间。

传统覆面板组合墙体仍存在空鼓现象及承载性能不足等问题。近年来,学者开始通过在墙体空腔内填充材料以提高构件整体刚度和承载能力。Wang等^[6]、郭风琪等^[7]对填充泡沫混凝土的拼合柱进行了轴压试验研究,并指出现行规范对填充型构件承载力预测存在一定偏差。Fang等^[8]进一步开展了填充泡沫混凝土组合墙体轴压试验,结果表明,填充泡沫混凝土可显著提高墙体承载能力。Bakran等^[9]采用压力注入聚氨酯泡沫填充材料与框架形成

填充与黏结,设计了冷弯型钢-聚氨酯组合墙体,与纯框架相比其轴压承载力提升234%,刚度提升147%,体现出填充材料和覆面板的协同作用。Peng等^[10]采用聚苯乙烯泡沫混凝土进行灌注,发现试件力学性能随泡沫混凝土密度提高而增长,当混凝土密度从400 kg/m³增加到600 kg/m³时,屈服荷载、极限荷载和抗压刚度分别提高36.95%、37.08%和19.03%。

除了填充材料外,改善墙的内部结构也能显著提高墙的力学性能。波纹钢板具有更好的面外刚度,且混凝土与波纹钢板之间具有良好的黏结效果,一些学者已经开始将波纹钢板用于钢板混凝土剪力墙。Yang等^[11]研究表明,增加波纹板厚度能显著提高承载和延性,而波形尺寸对其影响相对有限。Tong等^[12]和Yu等^[13]设计了两侧横肋波纹钢板的组合墙体,轴压试验结果中波纹板的垂直应变显著小于钢管,表明横向波纹板可视为不直接承受轴向载荷,但仍需考虑波纹板对灌浆混凝土的有效约束作用。黄真锋等^[14]采用闭口型压型钢板替换双钢板组合剪力墙的外侧双钢板,研究发现试件的轴压承载力可视为考虑屈曲后强度的钢板和混凝土承载力的简单叠加。赵秋红等^[15]针对双面竖肋波纹钢板组合剪力墙提出了波纹墙板的轴压屈曲荷载简化计算公式。

基于上述研究,笔者提出一种冷弯薄壁波纹钢板-泡沫混凝土组合墙体(CTCFW),设计并完成4个足尺组合墙体试件的轴压试验,对比分析不同波纹钢板方向及不同连接构造条件下的承载能力和破坏模式,并在此基础上建立CTCFW轴压承载力

计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计

为探究不同构造下 CTCFW 的轴压性能,共设计了 4 个足尺试件,分为内嵌波纹钢板轻质泡沫混

凝土组合墙体和围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体两类,具体设计参数如表 1 所示。其中,CTCFW-1~CTCFW-4 为 4 个足尺组合墙体试件,墙体尺寸均为 2400mm×1200mm(高×宽),以综合考虑冷弯薄壁型钢墙体常用工程模数、足尺试件受力特征以及实验室加载和安装条件等因素。

表 1 试件主要设计参数
Table 1 Design parameters of specimens

类型	试件编号	尺寸(高×宽)	钢板波纹方向	钢板波纹高度/mm	边柱类型	波纹钢板型号
第一类	CTCFW-1	2 400 mm×1 200 mm	竖向	85	U89×42×2.0	YX-85-290-854
	CTCFW-2	2 400 mm×1 200 mm	横向	85	U89×42×2.0	YX-85-290-854
第二类	CTCFW-3	2 400 mm×1 200 mm	竖向	35	C120×44×30×2.0	YX-35-130-815
	CTCFW-4	2 400 mm×1 200 mm	横向	35	C120×44×30×2.0	YX-85-290-854

CTCFW-1、CTCFW-2 为内嵌波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体,其具体构造如图 1 所示。试件通过 ST-4.8 自攻螺钉将上、下导轨、墙体拼合边柱 U89×42×2(腹板×翼缘×厚度)、梯形波纹钢板及镁晶板连接成整体。墙体内部波纹钢板选用规格为 YX-85-290-854(波高-波距-有效宽度)的梯形波纹钢板,厚度为 0.6 mm。为提高聚苯颗粒轻质泡沫混凝土与钢板之间的黏结性能,并便于混凝土浇筑,在梯形波纹钢板斜面上开设圆孔,孔径为 50 mm,孔距为 150 mm。

CTCFW-3 和 CTCFW-4 为围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体,其空框架整体布置如图 2 所示。墙体采用间距为 150 mm 的 ST-5.5 自攻螺钉,将双肢 C 形钢背靠背与双肢 L 形钢背靠背夹支围板连接成整体。其中,C 形钢截面规格为 C120×44×30×2(腹板×翼缘×卷边×厚度),L 形钢截面规格为 L110×44×30×15×2(腹板×翼缘×卷边×厚度)。墙体边柱和顶(底)钢梁之间采用 L 连接件和 M14 高强螺栓连接,所用 L 形连接件截面规格为 L96×60×36×2。试件围板一侧覆有厚度为 0.6 mm、规格为 YX-35-130-815 的梯形波纹钢板,由 1 250 mm 宽基板加工成型。为提高混凝土浇筑质量及各组成部分之间的协同工作性能,在波纹钢

板上开设直径为 30 mm 的圆孔,孔距为 150 mm。

1.2 材料性能

试件顶梁、底梁及立柱均采用厚度为 2.0 mm 的 Q355 钢材,波纹钢板则采用厚度为 0.6 mm 的 Q235 钢材。按照规范《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[16]进行材性试验,实测力学性能如表 2 所示,钢材单轴拉伸应力-应变曲线如图 3 所示。

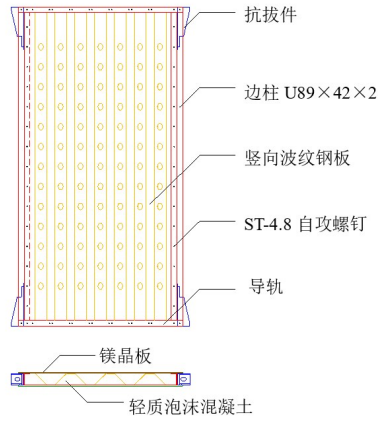
采用的内部填充料为轻质泡沫混凝土,在试件浇筑时预留 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体,并置于相同环境下养护 28 d 后根据《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357—2016)^[17]对试块进行轴心抗压强度测试,测得所用轻质泡沫混凝土的轴心抗压强度 f_{ck} 为 1.11 MPa。

1.3 加载制度

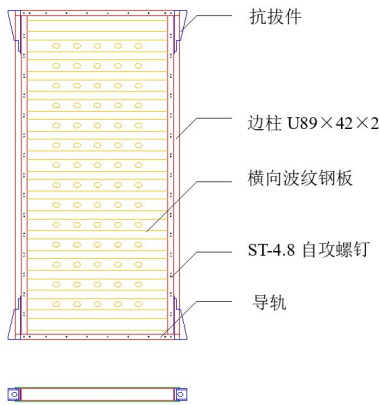
组合墙体轴压试验通过千斤顶对加载梁施加竖向荷载。正式试验前进行预加载,依据规范计算及有限元分析预估试件极限承载力,预加载采用预估极限荷载的 5%~10%,以消除试验装置与试件之间的缝隙,并检查仪器工作状态及试件是否处于轴心受压状态。预加载完成后卸载并静置 2 min,再进行正式加载。正式加载采用分级加载方式,加载前期每级荷载为 20 kN,每级荷载加载后持荷 2

表 2 钢材力学性能汇总表
Table 2 Material properties of steel

试件编号	厚度/mm	屈服强度 f_y /MPa		抗拉强度 f_u /MPa		弹性模量 E /MPa	
		试验值	平均值	试验值	平均值	试验值	平均值
PA-1	2.00	369.69		596.73		212 009	
PA-2	2.00	369.19	367.98	595.88	596.99	206 494	207 949.75
PA-3	2.00	364.43		592.65		210 236	
PB-1	0.60	251.44		513.93		243 687	
PB-2	0.60	258.81	253.31	532.75	522.73	267 836	234 202.33
PB-3	0.60	249.68		521.50		191 084	



(a) CTCFW-1



(b) CTCFW-2

图1 内嵌波纹钢板泡沫混凝土组合墙体试件

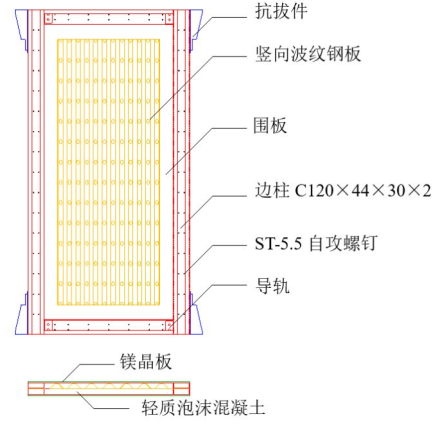
Fig.1 Foam concrete composite walls with embedded corrugated steel plate

min,以保证荷载均匀传递至墙体底部。待构件变形和应变发展稳定后进行数据采集。加载至试件破坏或竖向荷载降至峰值荷载的85%时停止试验。

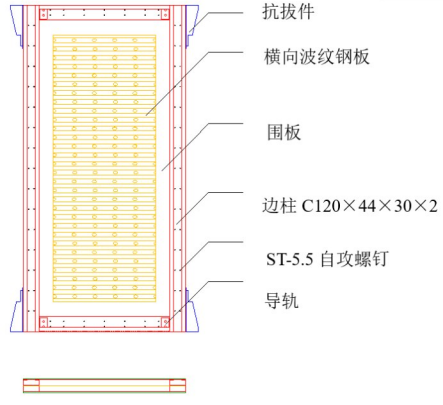
1.4 试验装置与测点布置

墙体试件试验加载装置整体外观如图4所示。加载装置主要由反力墙、反力门架、千斤顶、加载顶梁、侧向支撑、底梁和压梁等构件组成。试验采用额定容量为100 t的液压千斤顶进行加载,千斤顶安装于反力架上,最大加载力为1 000 kN,最大行程为100 mm。加载过程中千斤顶中心与分配梁及墙体试件的中心线对齐,以保证试件尽可能处于轴心受压状态。加载顶梁由两台手拉葫芦与反力门架相连。为避免墙体试件在水平加载过程中出现面外位移,在加载梁两侧设置带滑轮的侧向支撑。墙体试件通过端部抗拔件与加载顶梁和底梁连接,为防止底梁与反力架在加载过程中发生位移而影响试验结果,在底梁两端设置压梁,并通过锚固杆与地面连接固定。

试验共采用7个位移计,在试件中部布置位移计D1、D2,用于测量墙体平面外位移;在墙体四角



(a) CTCFW-3



(b) CTCFW-4

图2 围板连接波纹钢板泡沫混凝土组合墙体试件

Fig.2 Foam concrete composite walls with corrugated steel plate connected by perimeter plate

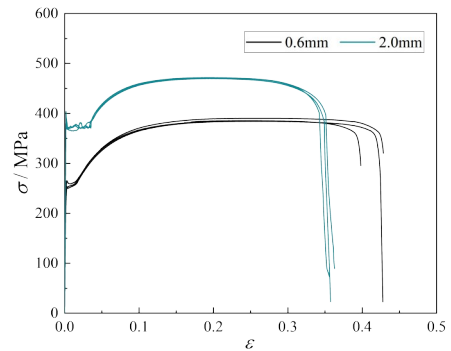


图3 单轴拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Uniaxial tensile stress-strain curves

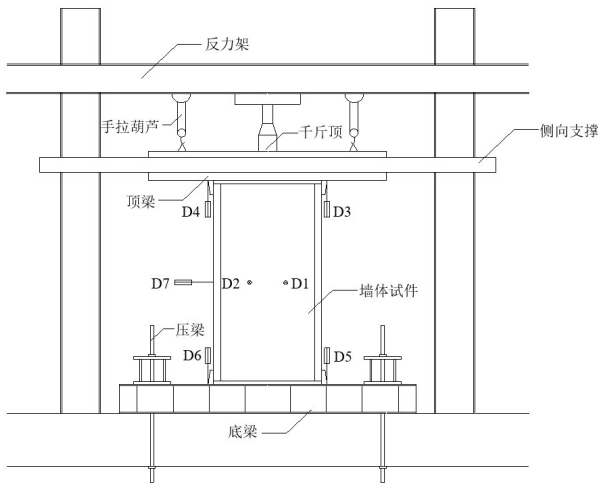
布置位移计D3、D4、D5、D6,用于测量墙体竖向位移,其中D3、D4用于测量加载顶梁及墙体顶部竖向位移,D5、D6用于测量底部底梁沉降;在试件侧面布置位移计D7,用于测量墙体横向位移。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

2.1.1 内嵌波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体

第1类内嵌波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体



(a) 示意图



(b) 现场图

图4 试验装置与测点布置

Fig.4 Test setup and measurement arrangement

的破坏模式表现为局部屈曲破坏,试件边柱在柱顶部出现显著局部屈曲,并在该位置发生面外弯折,如图5所示。

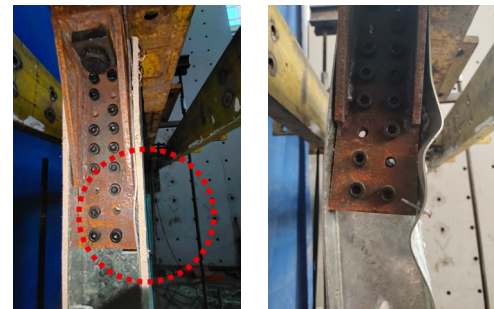
当轴压荷载加至峰值荷载的35%时,试件顶部螺钉孔洞扩展,如图5(a)所示,荷载持续增加中伴有轻质泡沫混凝土受压破碎滑落声。加载至峰值荷载的50%时,此时边柱顶端翼缘开始鼓曲变形,如图5(b)所示。由于端部效应以及抗拔件处缺乏足够约束,局部屈曲会在边柱顶端出现,加载到达峰值荷载的70%时,边柱于抗拔件附近可观察到明显的翼缘屈曲变形,如图5(c)所示,此后变形程度随荷载增加而不断加剧直至最终边柱局部屈曲破坏,对应位置镁晶板弯折开裂,如图5(d)、(e)所示。最终破坏形态如图5(f)所示。

2.1.2 围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合



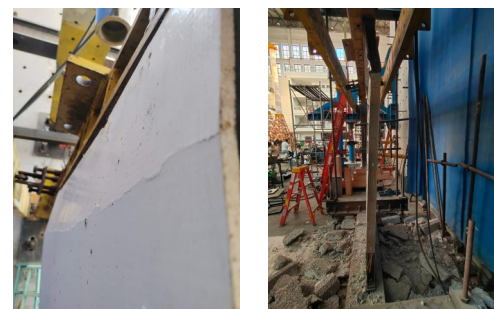
(a) 螺钉孔洞扩展

(b) 边柱翼缘变形



(c) 边柱屈曲

(d) 局部屈曲破坏



(e) 镁晶板弯折开裂

(f) 最终破坏形态

图5 试件CTCFW-1、CTCFW-2破坏特征

Fig.5 Failure diagram of CTCFW-1, CTCFW-2

墙体

第2类围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体的破坏模式为整体平面外失稳,试件中部整体鼓出并最终丧失承载力,如图6所示。施加轴压荷载后,从侧边观察围板首先出现波浪形弯曲,如图6(a)所示;当荷载增大至峰值荷载的60%时试件出现轻微面外弯曲,且边缘处螺钉剪出,镁晶板于螺钉处出现斜向开裂,如图6(b)、(c)所示。当荷载接近峰值荷载时,边柱开始出现局部屈曲,试件整体弯曲程度进一步加剧,镁晶板随着试件弯曲被顶出并逐渐与试件脱离,如图6(d)、(e)所示。随着荷载继续增加,试件最终发生整体平面外失稳破坏,如图6(f)所示。

加载结束后,拆除试件外覆镁晶板,轻质混凝土与波纹钢板仍保持整体,无明显开裂与滑移;敲除轻质泡沫混凝土后,可观察试件内部波纹钢板变形状态,如图7所示。对于竖向波纹钢板试件



图6 试件CTCFW-3、CTCFW-4破坏特征

Fig.6 Failure diagram of CTCFW-3, CTCFW-4

CTCFW-1、CTCFW-3,其内部波纹钢板均出现多处局部屈曲;而横向波纹钢板试件CTCFW-2、CTCFW-4,其波纹钢板仅随墙体整体变形而产生弯曲凸起,并未出现明显局部屈曲。由此可见,竖向波纹钢板在加载过程中能够参与承担墙体的竖向荷载,而横向波纹钢板对竖向受力参与程度较低。

需要指出的是,传统冷弯薄壁型钢墙体在轴压作用下的破坏模式主要包括局部屈曲破坏和整体失稳破坏,试件的破坏模式总体上仍属于上述范畴。但与传统墙体常见的覆面板开裂、螺钉连接破坏及单纯龙骨局部屈曲等现象相比,组合墙体由于引入波纹钢板和轻质泡沫混凝土,其破坏过程表现出更明显的组合受力特征。具体表现为:内嵌波纹钢板组合墙体主要发生边柱端部局部屈曲破坏,而围板连接组合墙体主要发生整体平面外失稳破坏,说明不同构造形式改变了墙体的整体刚度、边界约

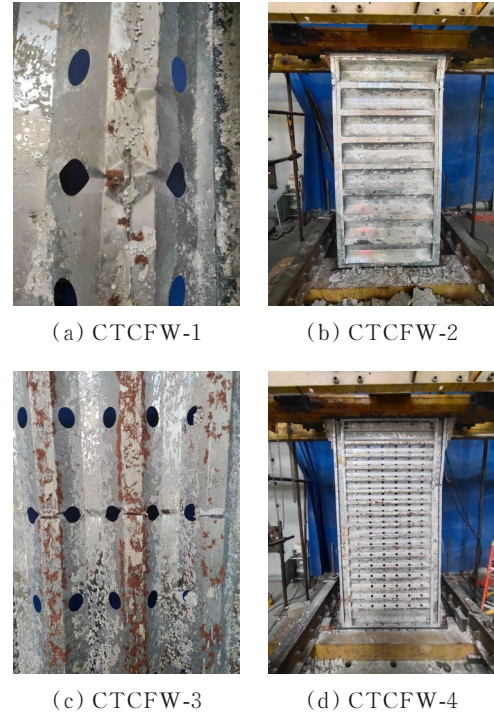


图7 波纹钢板变形情况

Fig.7 Deformation of corrugated steel plates

束条件及失稳发展路径。

2.2 荷载-位移曲线

各试件的荷载-位移曲线如图8所示,荷载-位移曲线局部存在一定锯齿波动,主要与试验过程中采用拉线式位移计进行位移测量有关,为数据采集过程中的正常测试波动。

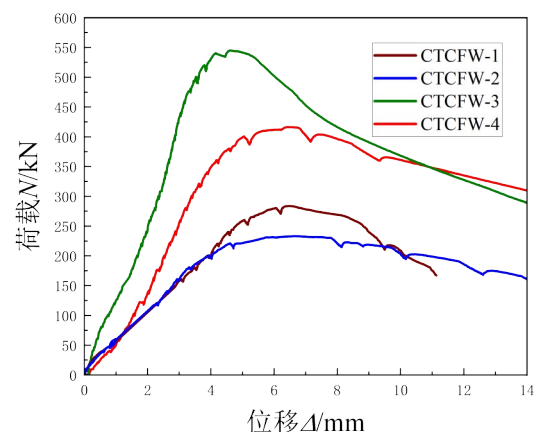


图8 荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves

加载初期试件处于弹性阶段,轴压刚度稳定,荷载-位移曲线基本呈线性上升趋势。随着轴压荷载进一步增大,曲线进入弹塑性阶段,试件边柱出现屈曲,曲线斜率逐渐减小,表明试件的轴压刚度逐渐降低。值得注意的是,CTCFW-1与CTCFW-2在加载初期的荷载-位移曲线基本重合。这主要是由于两者的墙体尺寸、边柱构造、材料参数及基

本连接方式相同,加载初期试件整体均处于弹性受力阶段,波纹钢板布置方向对墙体初始刚度的影响尚未充分显现。随着荷载持续增大,竖向与横向波纹钢板在轴压受力中的参与程度逐渐产生差异,进而导致两试件在刚度演化及极限承载力方面表现出明显不同。在弹性与弹塑性阶段,试件的竖向位移变化较小而荷载快速增大。达到峰值荷载后,曲线进入下降段。竖向波纹钢板试件 CTCFW-1、CTCFW-3 的下降段表现为较快下降,而横向波纹钢板试件 CTCFW-2、CTCFW-4 虽承载力低于前者,但下降段更为平缓,竖向位移明显增大而承载力变化幅度并不显著,表现出良好的延性破坏特征。这是由于竖向波纹钢板参与承担轴压承载力,

在试件破坏后波纹钢板发生屈曲并退出承载,峰值荷载后试件承载力随竖向位移增加而快速降低。

2.3 荷载特征参数

组合墙体荷载-位移曲线能反映试件的初始轴压刚度、承载力及延性等力学性能。依据实验数据及试件的荷载-位移曲线可得,荷载-位移曲线的峰值点对于坐标为试件的峰值承载力 N_{max} 与峰值位移 Δ_{max} 通过几何作图法^[18]可求得试件的屈服荷载 N_y 和屈服位移 Δ_y ;荷载下降至试件极限承载力 85% 时所对应的极限荷载和极限位移为 N_u 和 Δ_u ;延性系数 μ 为极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 之比,各试件荷载特征参数如表 3 所示。

表 3 特征参数
Table 3 Characteristic parameters

试件编号	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数 μ	初始刚度/ kN/mm
	N_y /kN	Δ_y /mm	N_{max} /kN	Δ_{max} /mm	N_u /kN	Δ_u /mm		
CTCFW-1	275.74	5.77	283.75	9.85	241.19	8.99	1.56	52.13
CTCFW-2	221.61	5.01	233.17	8.07	198.19	11.05	2.21	49.88
CTCFW-3	517.77	3.75	545.07	4.62	463.86	6.79	1.81	167.56
CTCFW-4	390.36	4.77	416.39	6.45	353.71	10.59	2.22	110.45

对于四面组合墙体,根据图 8 和表 3 可知:

1)不同构造形式对组合墙体轴压性能影响显著。围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体试件 CTCFW-3、CTCFW-4 较内嵌波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体试件 CTCFW-1、CTCFW-2 的轴压承载力分别提高 92.09% 和 78.58%,初始轴压刚度分别提高 221.43% 和 121.43%。总体来看,围板连接形式的组合墙体轴压承载力、刚度均优于内嵌波纹钢板组合墙体,且延性也有所提升。其原因在于围板连接形式通过围板将波纹钢板与冷弯龙骨框架有效连接,使轴压荷载传力路径更为合理,改善了波纹钢板连接约束较差的问题。需要指出的是,CTCFW-1、CTCFW-2 与 CTCFW-3、CTCFW-4 之间不仅波纹钢板连接构造不同,边柱截面形式也存在差异,因此试验结果所反映的是整体构造变化对组合墙体轴压性能的综合影响,而非单一连接形式变化所致。结合试验现象可知,CTCFW-1 和 CTCFW-2 边柱端部翼缘变形更为明显,而 CTCFW-3 和 CTCFW-4 边柱局部变形相对较轻,表明边柱截面形式的优化对改善墙体受压性能亦具有积极作用。此外,依据各墙体中冷弯薄壁型钢龙骨、波纹钢板及围板等钢构件的截面规格、长度、厚度及材料密度,对各试件总用钢量进行了统计。结果表明,CTCFW-1~CTCFW-4 的总用钢量分别为 48.05、48.74、80.16、80.95 kg。围板连接

构造的试件 CTCFW-3、CTCFW-4 较内嵌构造的试件 CTCFW-1、CTCFW-2 用钢量分别提升 66.82%、66.09%。综合其轴压承载力和初始刚度的提升幅度可知,围板连接构造在增加一定用钢量的同时,能够显著改善墙体轴压性能,因而具有较好的工程应用合理性。

2)波纹钢板布置方向对组合墙体轴压性能亦有明显影响。采用竖向波纹钢板的试件 CTCFW-1、CTCFW-3 较采用横向波纹钢板的试件 CTCFW-2、CTCFW-4,其轴压承载力分别提高 21.69% 和 30.90%,初始轴压刚度分别提高 4.51% 和 51.71%,但延性分别降低 29.41% 和 18.47%。表明竖向波纹钢板组合墙体具有更高的轴压承载力,而横向波纹钢板组合墙体则有着更优秀的延性。其原因在于竖向波纹钢板能够参与墙体轴压承载过程,并提供一定的轴压承载力贡献,但在试件破坏后竖向波纹钢板发生屈曲并退出承载,从而导致试件延性降低。另一方面竖向波纹钢板的波纹数量少于横向波纹钢板,墙体内部浇筑的轻质泡沫混凝土整体性更好,进一步提升了组合墙体的轴压承载能力。

综上分析,尽管围板连接形式试件用钢量有所增加,但其轴压力学性能显著提升。在实际工程应用中,建议优先采用围板连接波纹钢板的轻质泡沫混凝土组合墙体。

3 理论计算方法

对组合结构而言,所受轴压荷载由钢材与混凝土共同承担,因此 CTCFW 的轴压承载力需考虑冷弯薄壁型钢龙骨框架、波纹钢板以及轻质泡沫混凝土三者的协同作用。根据试验结束后拆除外覆板及填充材料后的观察结果,未发现明显界面脱开或整体相对滑移现象;同时,波纹钢板开孔构造有利于增强轻质泡沫混凝土与钢板之间的机械咬合及协同工作作用。因此,在理论计算中将冷弯薄壁型钢龙骨框架、波纹钢板与轻质泡沫混凝土按协同工作考虑,并参考《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[19],以叠加法为理论基础,并基于组合墙体试验数据,提出 CTCFW 的轴压承载力计算公式,具体形式为

$$N = N_s + N_c \quad (1)$$

式中: N_s 为冷弯薄壁钢材对组合墙体轴压承载力的贡献,由冷弯薄壁型钢龙骨框架和波纹钢板两部分组成; N_c 为轻质泡沫混凝土对组合墙体轴压承载力的贡献。

3.1 龙骨框架及波纹钢板对墙体承载力的贡献

龙骨框架及波纹钢板均为冷弯薄壁受压板件,考虑其局部屈曲对板件整体承载力的影响,因此,在轴压荷载作用下采用有效截面法计算其有效截面面积。其中轴压承载力受波纹钢板的波纹个数影响,计算时以单个波纹单元为基础计算有效面积再考虑波纹个数。试验结果表明,组合墙体最终破坏形式均为失稳破坏,故在龙骨框架贡献的轴压承载力部分加入稳定系数进行计算;组合墙体边柱均由单肢冷弯薄壁型钢拼合而成的双肢组合柱,其承载力依据《冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准》(JGJ/T 421—2018)^[20],拼合截面构件的稳定承载力可取整体截面构件的稳定承载力之和的 70%。因此,可以得到龙骨框架与波纹钢板贡献的墙体轴压承载力计算式为

$$N_s = 0.7n\varphi_s f_{fs} A_{fs,e} + \frac{L_c}{q} f_{cs} A_{cs,e} \quad (2)$$

式中: n 为边柱拼合柱的肢数; φ_s 为龙骨框架边柱的稳定系数,通过《冷弯型钢结构技术标准》(GB/T 50018—2025)^[21]查得; f_{fs} 为龙骨框架钢材抗压强度; $A_{fs,e}$ 为龙骨框架单肢柱的有效截面面积; L_c 为受压面波纹钢板长度; q 为波纹钢板单个波单元的宽度; f_{cs} 为波纹钢板钢材抗压强度; $A_{cs,e}$ 为单个波单元的有效截面面积。

3.2 轻质泡沫混凝土对墙体承载力的贡献

《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[19]中轻质泡沫混凝土的贡献参考混凝土正截

面受压进行计算,参照该规范提出轻质泡沫混凝土轴压承载力计算式。

$$N_c = f_c A_c \quad (3)$$

式中: f_c 为轻质泡沫混凝土轴心抗压强度设计值; A_c 为轻质泡沫混凝土正截面面积。

3.3 组合墙体轴压承载力计算

组合墙体中轻钢龙骨框架、内嵌波纹钢板与轻质泡沫混凝土对轴压承载力的贡献通过叠加法相加,最终即得到组合墙体的轴压承载力。将上述公式相加,初步得到轴压承载力计算式

$$N = 0.7n\varphi_s f_{fs} A_{fs,e} + \frac{L_c}{q} f_{cs} A_{cs,e} + f_c A_c \quad (4)$$

根据式(4)可计算得到 4 个试件的理论轴压承载力,结果见表 4。对于 CTCFW-1 和 CTCFW-2,理论计算值略大于试验值,主要是理论计算采用了理想化假定,而实际试件在加载过程中不可避免存在初始缺陷、端部连接影响、螺钉孔洞扩展以及局部屈曲提前发展等因素,从而导致其实测承载力低于理论预测值。对于 CTCFW-3 和 CTCFW-4,理论计算值小于试验值,说明围板连接构造在实际受力过程中对波纹钢板、边柱及轻质泡沫混凝土之间的协同工作和约束作用更为明显,而现有简化计算方法对此增强效应考虑不足,因此计算结果偏于保守。总体来看,计算值与试验值的误差均控制在 $\pm 10\%$ 以内,表明该计算方法具有较好的预测精度。

表 4 轴压承载力计算值与试验值对比

Table 4 Comparison between calculated values and test values of axial compressive capacity

试件编号	计算值 N/kN	试验值 N_{max}/kN	N/N_{max}
CTCFW-1	297.01	283.75	1.06
CTCFW-2	247.68	233.17	1.04
CTCFW-3	526.70	545.07	0.97
CTCFW-4	376.35	416.39	0.90

4 结论

提出了冷弯薄壁波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体(CTCFW),并通过 4 个足尺墙体试件的轴压试验对其受力性能进行研究,得到以下结论:

1) 内嵌波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体的破坏模式主要表现为局部屈曲破坏,而围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体表现为整体平面外失稳破坏。试验中竖向波纹钢板出现多处局部屈曲,而横向波纹钢板仅随着墙体面外鼓曲产生整体弯曲凸起,表明竖向波纹钢板在加载过程中能够参与承担墙体竖向荷载,而横向波纹钢板对竖向受

力贡献较小。

2)围板连接波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体 CTCFW-3、CTCFW-4 较内嵌波纹钢板轻质泡沫混凝土组合墙体试件 CTCFW-1、CTCFW-2 的轴压承载力分别提高 92.09% 和 78.58%。结果表明,围板连接构造能够显著提升组合墙体的轴压力学性能,工程应用中建议优先采用围板连接形式,并可参考试件 CTCFW-3 的构造设计。

3)在考虑冷弯龙骨框架、波纹钢板及轻质泡沫混凝土共同作用的基础上,基于叠加原理提出了 CTCFW 的轴压承载力计算公式。计算结果与试验结果吻合较好,可较准确预测该类组合墙体的轴压承载力。

参考文献

- [1] Hussein D B, Hussein A B. Numerical investigation of the axial load capacity of cold-formed steel channel sections: effects of eccentricity, section thickness, and column length[J]. *Infrastructures*, 2024, 9(9): 142.
- [2] 石宇,高畅,徐云鹏,等.钢框架-冷弯薄壁型钢剪力墙结构抗侧性能试验研究[J]. *工程力学*, 2026, 43(1): 219-229.
Shi Y, Gao C, Xu Y P, et al. Experimental study on lateral resistance of steel frame infilled with cold-formed thin-walled steel shear wall structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2026, 43(1): 219-229. (in Chinese)
- [3] 金路,郭俊洁,陈立平.三角形拼合截面冷弯薄钢柱轴压承载力研究[J/OL]. *建筑钢结构进展*, 2025-12-31. <https://doi.org/10.13969/j.jzgjgz.20250520001>.
JIN L, GUO J J, CHEN L P. Research on axial compression bearing capacity of cold-formed thin-walled steel columns with triangular built-up sections[J/OL]. *Progress in Steel Building Structures*, 2025-12-31. <https://doi.org/10.13969/j.jzgjgz.20250520001>. (in Chinese)
- [4] 江力强,刘若琪,杨华.冷弯型钢十字形拼合闭口截面立柱轴压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(增刊 2): 280-288.
Jiang L Q, Liu R Q, Yang H. Experimental study on compressive behavior of cold-formed steel built-up closed special-shaped cross-section columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(Sup 2): 280-288. (in Chinese)
- [5] Sonkar C, Dewangan A, Mittal A K, et al. Experimental investigation and design methodology of built-up I-section cold-formed steel wall panels with sheathing under axial loading[J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2023, 28(3): 04023019.
- [6] Wang L Y, Hu Y, Jiang L Q, et al. Axial compression experimental on T-section special-shape light-weight foam concrete-filled cold-formed steel built-up columns [J]. *Structures*, 2025, 76: 108911.
- [7] 郭风琪,关博友,龙秋亮,等.泡沫混凝土-索氏体不锈钢冷弯型钢拼合柱轴压性能与承载力计算方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(7): 3034-3049.
Guo F Q, Guan B Y, Long Q L, et al. Axial compressive performance and bearing capacity calculation method for foam concrete-filled cold-formed sorbite stainless steel composite columns[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2025, 56(7): 3034-3049. (in Chinese)
- [8] Fang H J, Qian Z H, Yao B, et al. Experimental studies on the mechanical behaviors of cold-formed thin-walled steel-foam concrete composite walls[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2024, 27(9): 1477-1489.
- [9] Bakran A, Krolo P, Lukačević L, et al. Experimental investigation of the CFS-PU composite wall panel under axial compression[J]. *Buildings*, 2023, 13(8): 1897.
- [10] Peng X, Liu K, Yao B, et al. Mechanical performance and sustainability assessment of cold-formed thin-walled steel-polystyrene foam concrete composite wall panels [J]. *Results in Engineering*, 2025, 28: 107323.
- [11] Yang Y Q, Kong F C, Mu Z G. An experimental study on the performance of L-shaped CFSTs connected by double-corrugated steel plates under axial compression [J]. *Buildings*, 2026, 16(2): 379.
- [12] Tong J Z, Yu C Q, Tong G S, et al. Experimental study on axial resistant behavior of multi-celled corrugated-plate CFST walls[J]. *Engineering Structures*, 2023, 295: 116795.
- [13] Yu C Q, Tong J Z, Zhang J M, et al. Axial compressive behavior of multi-celled corrugated-plate CFST walls: Tests and numerical simulations[J]. *Engineering Structures*, 2025, 322: 119033.
- [14] 黄真锋,孙志雄,张素梅,等.闭口型压型钢板混凝土组合剪力墙轴压性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(增刊 1): 84-90.
Huang Z F, Sun Z X, Zhang S M, et al. Mechanical behavior of dove-tail-shaped profiled steel concrete composite shear walls under axial compression[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(Sup 1): 84-90. (in Chinese)
- [15] 赵秋红,高俊秀,邱静.基于实际竖向荷载分布的波纹钢板剪力墙轴压屈曲分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(4): 391-401.
Zhao Q H, Gao J X, Qiu J. Axial compressive buckling of corrugated steel plate shear walls under actual vertical load distribution[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2022, 55(4): 391-401. (in Chinese)
- [16] 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)

[17] JC/T 2357—2016 泡沫混凝土制品性能试验方法[S].
JC/T 2357—2016 Test methods of properties of foam concrete product[S]. (in Chinese)

[18] 黄真锋. 闭口型压型钢板混凝土组合剪力墙力学性能研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2023.
Huang Z F. Mechanical behavior research on dovetailed profiled steel-concrete composite shear wall[D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)

[19] JGJ 383—2016 轻钢轻混凝土结构技术规程[S].
JGJ 383—2016 Technical specification of lightweight steel and lightweight concrete structures[S]. (in Chinese)

[20] JGJ/T 421—2018 冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准[S].
JGJ/T 421—2018 Technical standard for cold-formed thin-walled steel multi-storey residential buildings[S]. (in Chinese)

[21] GB/T 50018—2025 冷弯型钢结构技术标准[S].
GB/T 50018—2025 Technical standard for cold-formed steel structures[S]. (in Chinese)

(编辑 XXX)