

内置钢板轻钢-稻草板组合墙体轴压试验研究

张秀华,李 想,申 奥,杨路琦,张茂花

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要 目的 研究内置钢板冷弯薄壁型钢-纸面稻草板组合墙体的轴压力学性能,弥补填充混凝土等材料造成自重过大以及型钢-纸面稻草板组合墙体抗侧刚度低的缺陷。**方法** 对3面组合墙体进行单调竖向加载轴压试验,得到组合墙体的受力过程、破坏形式、荷载位移-曲线及荷载-应变曲线;组合墙体的破坏模式是冷弯薄壁C型钢立柱局部屈曲破坏、纸面稻草板局部出现褶皱和钢板局部屈曲,通过试验数据分析,得到组合墙体轴心受压承载力、延性系数、刚度。**结果** 结果表明:内置钢板厚度及内置钢板面数对组合墙体的竖向承载力、刚度和延性均有较大的提升;纸面稻草板对钢骨架起到了良好的约束作用。**结论** 冷弯薄壁C型钢、纸面稻草板和钢板协同工作性能良好,可应用于单层或低层建筑工程中。

关键词 纸面稻草板;冷弯薄壁型钢;组合墙体;轴压试验;轴压承载力

中图分类号 TU392.1

文献标志码 A

Experimental Study on Axial Compression of Composite Wall by Cold-Formed Thin-Walled Steel with Built-in Steel Plate and Straw Board

ZHANG Xiuhua, LI Xiang, SHEN Ao, YANG Luqi, ZHANG Maohua

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

Abstract: In order to study axial compression mechanical properties of cold-formed thin-walled steel-paper straw board composite wall with built-in steel plate, and make up for the defects of the excessive self-weight caused by filling concrete and low lateral stiffness, monotonic vertical loading axial compression test on three composite wall specimens were conducted. The loading process, failure modes, load-displacement curves and load-strain curves of composite wall were obtained. The failure modes of composite wall are local buckling failure of cold-formed thin-walled C-section steel stud, local wrinkles of paper straw board and local buckling of steel plate. Through the analysis of test data, the axial compression bearing capacity, ductility coefficient and stiffness of composite wall were calculated. The experimental results show that the thickness and number of built-in steel plate have a great improvement on the vertical bearing capacity, stiffness and ductility

收稿日期:2020-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51878130);国家级大学生创新训练项目(202010225195)

作者简介:张秀华(1970—),女,副教授,博士,主要从事轻钢组合结构方面研究。

of composite wall. The paper straw board has a good restraint effect on cold-formed steel frame. In addition, the cold-formed steel frame, straw board and steel plate can work well together, and composite wall can be used in single or low rise building.

Key words: paper straw board; cold-formed thin-walled C-section steel; composite wall; axial compression experiment; bearing capacity

传统的轻钢组合墙体是低层或单层建筑的重要组成部分,是一种以冷弯薄壁型骨架和不同的墙面板通过自攻螺钉连接方式作为维护结构和承重的墙体系统^[1]。已广泛应用在美国、加拿大、日本等国家。国内外学者对组合墙体进行了大量研究:L. C. M. VIERIA 等^[2]通过对组合墙体轴压性能试验研究,结果表明:覆面板对钢墙柱局部屈曲无影响,对钢墙柱的整体屈曲和畸变屈曲有约束作用。Y. DIAS 等^[3]通过试件的试验分析,验证了带肋立柱工作性能优良。J. H. YE 等^[4]对 16 个冷弯薄壁型钢组合墙体进行轴压性能试验研究,结果表明:通过墙面板的约束,可以提高墙体立柱的极限载荷。石宇等^[5]对 6 块足尺组合墙体试件进行轴压试验,研究表明:CSB 板约束的墙架柱较单面 OSB 板约束的墙架柱稳定承载力大幅提高。徐志峰等^[6]对秸秆板轻钢高强泡沫混凝土剪力墙试件进行轴心受压试验,研究表明:填充了泡沫混凝土的墙体较未填充泡沫混凝土的墙体的竖向刚度和竖向承载力都有了大幅提高。高立等^[7]对填充 EPS—石膏基轻质材料的冷弯型钢组合墙体进行轴压性能试验,结果表明:随着填料强度和密度的提高,填充试件轴压承载力相应提高。H. H. WU 等^[8]对 8 个冷弯薄壁型钢组合墙体进行了轴压性能试验研究,结果表明:填充石膏的墙体较未填充石膏墙体承载力提高了 1.88~2.99 倍。

上述轻钢组合墙体覆面板材料主要为 EPS 板、OSB 板、石膏板、钢板等。为丰富组合墙体类型,东北林业大学张秀华团队提出了钢—纸面稻草板组合构件,纸面稻草板的导热系数仅为 0.108 W/(m·K),隔音能力

为 30 dB,耐火极限为 1 h,具有强度高、耐久性好和抗冲击能力强等特点。纸面稻草板作为一种绿色环保建筑材料,将具有广阔的发展前景^[9-10]。通过对该类组合墙体进行力学性能研究,已取得了阶段性成果^[11-16]。研究表明:钢—纸面稻草板组合构件不仅具有较高的刚度和承载力而且有着良好的协同工作性能和塑性变形能力,其延性和耗能系数等抗震指标均能满足工程需要。张义卓^[12]提出的冷弯薄壁型钢—纸面稻草板组合墙体具有较高的抗剪承载力,但抗侧刚度稍显不足。

为克服填充混凝土等材料造成自重过大以及型钢—纸面稻草板组合墙体抗侧刚度低的缺陷,笔者提出一种内置钢板冷弯薄壁型钢—纸面稻草板新型组合墙体,研究该组合墙体的轴心受压力学性能,对 3 面不同参数的组合墙体进行轴压试验,分析各组合墙体破坏特征、轴压承载力、延性、刚度和组合墙体工作性能,为该类型组合墙体设计 and 应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

笔者设计和制作了 3 面组合墙体,试件详细参数见表 1,详细构造及截面形式见图 1。

表 1 组合墙体设计参数

Table 1 Design parameters of composite wall		
试件编号	宽×高/mm	覆面板类型
WL-1	1 200×2 400	双面稻草板+0.8 mm 单面钢板
WL-2	1 200×2 400	双面稻草板+0.8 mm 双面钢板
WL-3	1 200×2 400	双面稻草板+1.0 mm 双面钢板

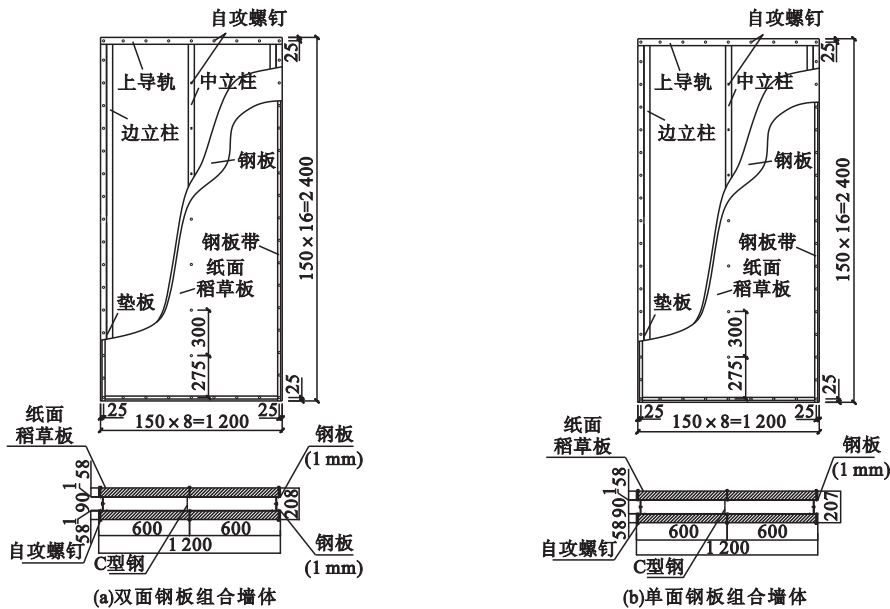


图1 组合墙体构造及截面形式

Fig. 1 Construction and cross section of composite walls

组合墙体由冷弯薄壁型钢骨架、双面稻草板和单面(双面)钢板组成,钢板放在稻草板内侧。稻草板的宽×高×厚为1 200 mm×2 400 mm×58 mm。龙骨采用 Q235 镀锌钢板,立柱型号为 C90 mm×40 mm×15 mm×1 mm,间距为 600 mm;在墙两端的边柱对两个 C 型钢进行拼接组合,通过腹板上的自攻螺钉背靠背连接,中柱 C 型钢位于墙体正中间位置。墙体的上下导轨采用冷弯薄壁 U 型钢,型号为 U93 mm×45 mm×1.5 mm。立柱与导轨通过 ST3.5×16 mm 的梅花沉头自攻螺钉连接,龙骨与稻草板通过 ST4.8×75 mm 的外六角自攻螺钉连接,其中,中间螺钉间距 300 mm,外围螺钉间距 150 mm。本试验中墙板是带有钢板的稻草板,钢板采用 Q235 镀锌钢板,厚为 0.8 mm 和 1.0 mm。为减轻稻草板与自攻螺钉的破坏,在稻草板与边立柱和上下导轨连接的自攻螺钉的下部垫一层宽 20 mm 钢板带,增加接触面积,使螺钉与墙板之间的剪切面积增大,螺钉与墙板连接处不会发生连接破坏^[17]。

1.2 材料力学性能

试验所用轻钢材料根据《金属材料拉伸

试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)中规定进行材性试验,得到钢材相关的力学性能见表 2。

表2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

厚度/ mm	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	伸长 率/%
0.8	260.3	344.7	197.6	31.64
1.0	274.3	372.7	198.3	31.97

根据《结构用人造板力学性能试验方法》(GB/T 31264—2014),得出试验稻草板的相关材料属性,见表 3。其中,沿着稻草板长度方向为抗压模式。

表3 纸面稻草板材料属性

Table 3 Material properties of paper strawboard

弹性模量 E/MPa	泊松比	抗压强度/ MPa
348	0.345	1.424

1.3 试验加载装置及加载制度

该试验加载装置采用 50t 螺旋千斤顶来施加竖向荷载,试验加载装置如图 2 所示。

为模拟组合墙体上端的均布荷载情况,采用二次分配加载方式。竖向荷载通过螺旋

千斤顶在反力架的作用下分配到一级分配梁上,再通过两个等高支座均匀地将荷载分配到二级分配梁上。试验采用几何对中,墙体全部安装完成后,用水平尺检测组合墙体的水平度和垂直度,确保组合墙体完全垂直于地面。为模拟实际工程中楼板对墙体的约束,故在试验中施加侧向支撑。

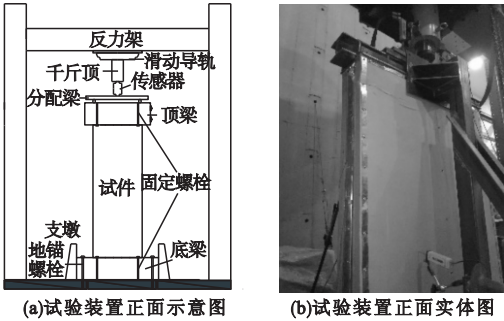


图 2 试验装置

Fig. 2 Test device

试验采用单调竖向加载,考虑稻草板的特殊性质,预加荷载仅设定为预估极限承载力的 5%。按 10 kN 分级加载,每级加载 5 min 并稳定后,读取位移和应变值。待荷载下降至极限荷载的 85% 时,停止加载。

1.4 测点布置

试件上共布置 5 个位移计,分别测量试件底梁相对于地面竖向位移值、试件相对于地面竖向位移,试件的平面外位移值。设置应变片 1~12。其中应变片 1~3、7~9 贴在边立柱和中立柱的腹板处,4~6、10~12 贴在钢板上,测点具体位置见图 3。

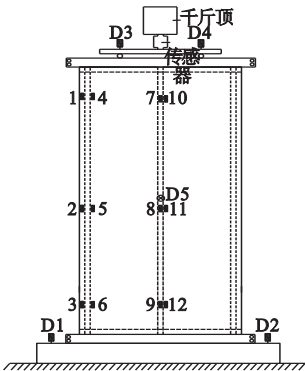


图 3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of settlement monitoring points

由于组合墙体是对称的,加载点是在墙体的正中,所以,应变片只布置在墙体一侧。

2 试验过程

2.1 WL-1 试件

在加载初期无明显现象,在荷载分别加到 40 kN、50 kN、70 kN、100 kN 时试件发出不同程度的吱吱声响。当荷载加至 110 kN 时,稻草板表面出现细小褶皱,继续加载则有延伸开展的趋势;当加载至 120 kN 时,稻草板表面褶皱长度延伸至 75 cm,钢板带有向平面外鼓出现象(见图 4(a)),边立柱腹板出现了局部屈曲(见图 4(b))。当加载至 145 kN 时,压力传感器读数不再增长,认为组合墙体达到极限承载力。加载结束以后,拆下一侧稻草板,观察到冷弯薄壁型钢骨架和钢板的破坏情况,发现中立柱上部出现局部屈曲(见图 4(c)),钢板顶部向下 10 cm 处出现折曲(见图 4(d))。在加载的过程中,稻草板与型钢骨架连接良好,所有自攻螺钉没有出现脱落、剪断现象。组合墙体破坏后仍保持完整性。

2.2 WL-2 试件

WL-2 试件与 WL-1 试件试验现象相似。在试验前期过程中无明显的现象。当加载至 110 kN 时,观察到稻草板上出现细小褶皱。随着荷载的增加,稻草板褶皱持续延伸并伴随连续响声。加载至 145 kN 时,此时边立柱顶部出现轻微屈曲(见图 5(a));当加载至 165 kN 时,荷载不再增长,认为达到极限承载力。当达到极限承载力时,边立柱局部屈曲(见图 5(b)),稻草板上部出现两条褶皱(见图 5(c));加载结束后,拆除一侧稻草板,观察到冷弯薄壁型钢骨架和钢板破坏情况,发现中立柱上部局部屈曲(见图 5(d)),钢板顶部向下 10 cm 处出现轻微折曲。

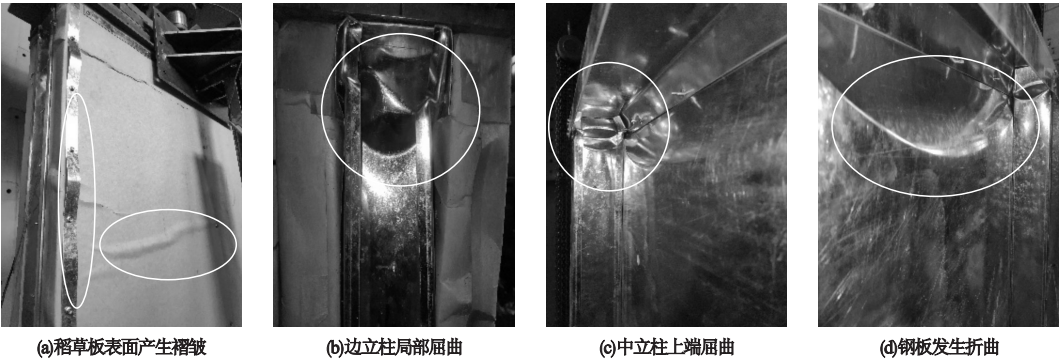


图4 试件 WL-1 破坏形态

Fig. 4 Failure modes of WL-1 specimen

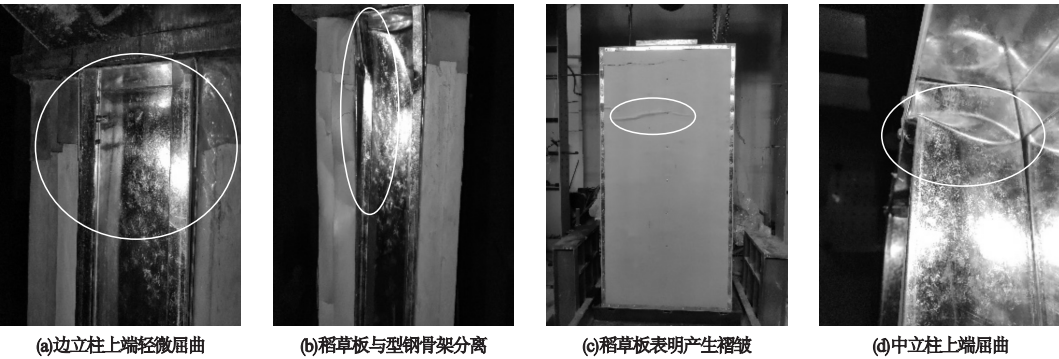


图5 试件 WL-2 破坏形态

Fig. 5 Failure modes of WL-2 specimen

2.3 WL-3 试件

在加载初期无明显现象,当加载至 130 kN 时,试件出现明显响声。但此时,稻草板表面未出现褶皱和鼓起现象。当加载至 170 kN 时,墙体出现持续响声,稻草板上部出现褶皱,长度约为 25 cm,但凸起不明显。当加载至 190 kN 时,稻草板表面的褶皱加剧且几乎横穿稻草板,其中突起高度最大可达 2 cm

(见图 6(a)),此时观察到边立柱距离墙体顶部 10 ~ 15 cm 处轻微屈曲。钢板带在平面外鼓起,鼓起最大处有 1.5 cm (见图 6(b))。当加载至 210 kN 时,压力传感器读数下降,则认为达到了极限承载力。当达到极限承载力时,边立柱顶部腹板出现屈曲变形,此时稻草板顶部出现外鼓现象,并与薄壁型钢骨架轻微脱离,其最大缝隙宽 2.5 cm

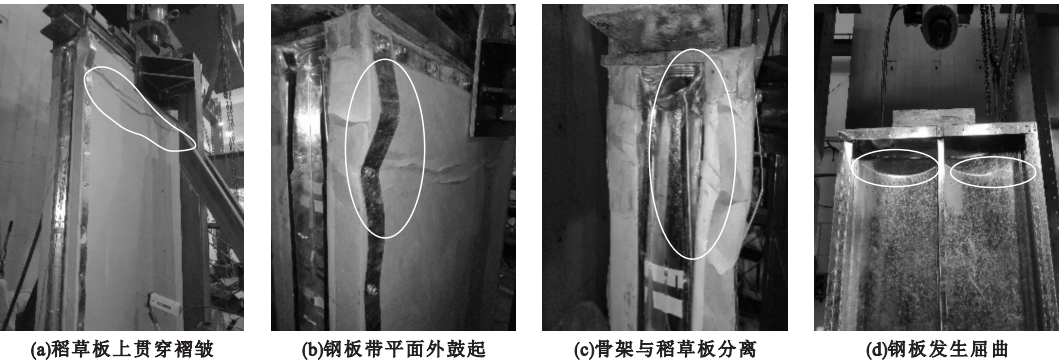


图6 试件 WL-3 破坏形态

Fig. 6 Failure modes of WL-3 specimen

(见图 6(c))。拆除一侧稻草板,观察到中立柱上部发生屈曲,钢板顶部向下 10 cm 处出现明显折屈(见图 6(d))。其余截面未产生明显变形。

3 试验结果分析

3.1 荷载-位移曲线

3 面组合墙体荷载位移对比曲线如图 7 所示。由图可知:3 面组合墙体的曲线变化趋势基本相同。组合墙体 WL-1、WL-2、WL-3 荷载分别达到 80 kN、100 kN、120 kN 时为线弹性阶段,在该阶段内,稻草板、钢板和钢骨架协同受力良好,稻草板表面未产生褶皱。随着荷载的增加,曲线斜率较之前开始逐步减小,但依然呈上升趋势,稻草板表面开始出现褶皱,该褶皱来自于稻草板自身受压和限制钢板与钢骨架变形的共同作用。

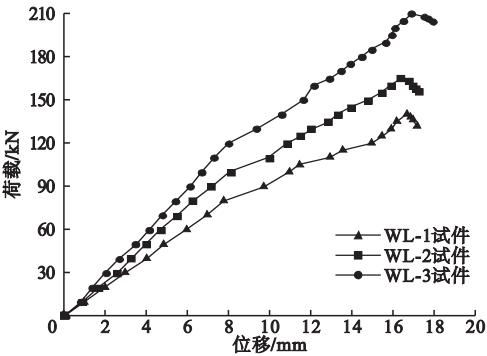


图 7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load displacement curve

在弹性阶段内,钢板和钢骨架在稻草板限制变形的作用下拥有承受更大荷载的能力,此阶段为弹塑性阶段。再继续加载,稻草板表面褶皱增多并发出吱吱声响,由于稻草板自身刚度较低而无法承担更大荷载的轴向压力,因此稻草板在此阶段主要起限制钢骨架、钢板变形的作用,组合墙体发生内力重分布,薄壁型钢骨架和钢板承担主要荷载,为承载力强化阶段。当加载至接近极限荷载时,荷载缓慢下降,此时型钢骨架边立柱出现局部屈曲。最终试件的破坏形态主要表现为边立柱两端柱顶局部屈曲,钢板屈曲。通过荷

载位移曲线在达到极限荷载后曲线下降缓慢可以得出组合墙体破坏是一种延性破坏。并没有出现瞬间失稳破坏现象,因此组合墙体在极限状态下不会突然失稳破坏。

轻钢-稻草板组合墙体组合效应显著,稻草板与薄壁型钢骨架在试验的整个过程中都未发生脱离掉落现象。通过观察荷载-位移曲线可知,试件 WL-2 承载力比试件 WL-1 承载力提高了 18%,WL-3 承载力比试件 WL-2 承载力提高了 27%。因此,相比于单面钢板,双面钢板能有效提高组合墙体承载力,另外,增加钢板的厚度也能显著增加组合墙体的承载力。这是由于钢板的存在可以承受竖向荷载,提高组合墙体竖向承载力,提高面板对自攻螺钉的握裹作用,从而提高组合墙体的竖向承载力。

根据 3 个试件位移计在极限荷载时测得试件平面外位移值:WL-1 平面外位移为 5 mm,WL-2 平面外位移为 3 mm,WL-3 平面外位移为 2 mm。相应的平面外转角 $\tan\theta$ 在 0.001 6~0.004 1 ($\tan\theta$ 等于位移计相对地面高度除以位移计所测得的平面外位移)。说明组合墙体在整个试验中并未发生整体失稳变形,与试验现象结果吻合。

3.2 荷载-应变曲线

因 3 个试件应变变化趋势相似,为研究组合墙体关键部位应变反应,现取试件 WL-3 立柱进行分析,荷载-应变曲线如图 8 所示。

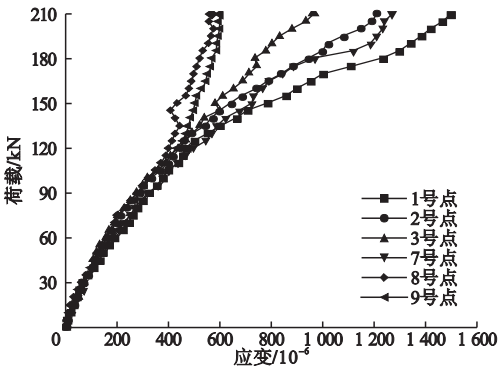


图 8 WL-3 试件立柱荷载-应变曲线

Fig. 8 Load strain curve of WL-3 steel stud

从图 8 可以发现,在试件弹性阶段,立柱上各测点均呈线性增长,应变大小值差异极小,表明组合墙体处于均匀受压状态,边立柱与中立柱能够协同受力,冷弯薄壁型钢骨架整体性好;当加载 120 kN(弹塑性阶段),各测点曲率逐渐变小。在同一水平高度的边立柱上测点数值始终大于中立柱上的测点,这是由于稻草板在中立柱和边立柱的蒙皮效应不同造成的应变差异。从图中还可以看出,1 号测点的应变值均大于其他测点应变值,说明边立柱腹板所受荷载较大,故最先发生屈曲,这与试验现象吻合。

选取试件 WL-3 中钢板来分析应变变化情况,荷载-应变曲线如图 9 所示。在加载前期,应变均呈现线性上升趋势,随着荷载增大,4、10 号测点应变值由负变正,即由受压变受拉。这是由于在加载前期,组合墙体发生弹性变形,内置钢板发生无屈曲现象的全截面受压,但随着荷载的增大,组合墙体发生局部屈曲,屈曲导致原本受压的截面突然受拉,应变值也就发生突变。由于钢板本身较薄,刚度较小,因此容易发生平面外的屈曲,但是在钢板外侧覆盖一层稻草板,能够明显抑制钢板的变形。

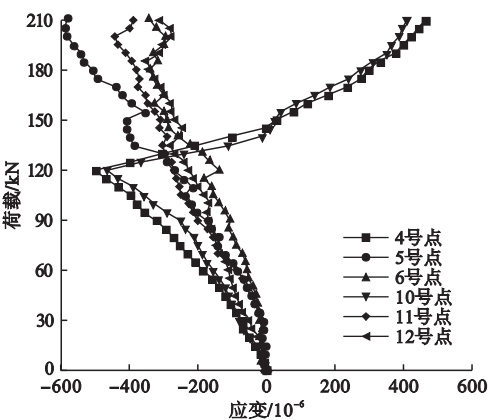


图 9 WL-3 试件钢板荷载-应变曲线

Fig. 9 Load strain curve of WL-3 steel plate

3.3 延性系数及刚度分析

通过位移延性系数 μ 来定量分析内置钢板冷弯薄壁型钢-稻草板组合墙体的变形能力,定义 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$,其中 Δ_u 为极限位移, Δ_y 为屈服位移。通过荷载-位移曲线上出现明显转折点来确定屈服位移。3 面组合墙体的位移、荷载及延性系数如表 4 所示。由表 4 可知,3 面组合墙体的延性系数在 2.088 ~ 2.114,说明内置钢板冷弯薄壁型钢-稻草板组合墙体有较好的变形能力。组合墙体的竖向刚度通过极限荷载与相应竖向位移之比,即刚度 K 来表示。经过计算可知 3 面组合墙体的竖向刚度如表 4 所示。

表 4 各组合墙体的特征值

Table 4 Eigenvalues of composite walls

试件编号	屈服荷载 N_y /kN	Δ_y /mm	极限荷载 N_u /kN	Δ_u /mm	延性系数 μ	$K/(kN \cdot m^{-1})$
WL-1	80	8.0	145	16.71	2.088	8.38
WL-2	100	8.32	160	16.99	2.092	9.71
WL-3	120	10.62	210	16.96	2.114	12.38

由表 4 可知,试件 WL-2 的竖向刚度比试件 WL-1 提高 15.9%,WL-3 试件的竖向刚度比试件 WL-2 提高 27%。试验表明:内置双面钢板组合墙体竖向刚度比内置单面钢板组合墙体竖向刚度高,增加钢板厚度对组合墙体竖向刚度有显著作用。

3.4 对比不同形式组合墙体的承载力和破坏模式

为了对比分析本试验组合墙体与其他组合墙体的轴压承载力、破坏模式等力学性能,将笔者得到试验结果与已有文献进行对比(见表 5)。

表5 文中组合墙体与其他文献组合墙体试验结果对比

Table 5 Comparison of test results of composite wall with that of other literatures				
文献	试件编号	试件类型	破坏荷载/kN	破坏模式
文中	WL-1	C型钢骨架+单侧钢板0.8 mm+双面稻草板	140	立柱两端柱顶局部屈曲
	WL-2	C型钢骨架+双侧钢板0.8 mm+双面稻草板	165	
	WL-3	C型钢骨架+双侧钢板1.0 mm+双面稻草板	210	
文献 [11]	W-1	C型钢骨架+双面稻草板	150	立柱两端柱顶局部屈曲
	W-2		175	
	W-3		195	
文献 [18]	WVL-3a	C型钢骨架+双面EPS板+喷涂轻质砂浆+抹灰	60.06	柱顶局部受压屈曲
	WVL-3b		66.46	
	WVL-4		57.66	
文献 [19]	VSS2	C型钢骨架+OBS板	50.95	立柱弯扭屈曲、端部局部屈曲
	VSS3		45.51	
	VSS4		53.33	

文中组合墙体与文献[11]组合墙体的覆面板均为稻草板,将两项试验数据进行类比分析。文献[11]中试件W-1组合墙体钢骨架由3根C型钢立柱组成,W-1墙体高厚比为7.14,承载力为150 kN,而文中WL-1试件高厚比为11.65,但承载力为140 kN。通过对比发现,W-1和WL-1的最终破坏模式相同且在高厚比增大63%的情况下承载力却只比W-1的承载力低6.6%。这说明内置钢板冷弯薄壁型钢-稻草板组合墙体相比于未置钢板的墙体能提供更高的稳定性承载力,从而能保证结构整体稳定性。与文献[18]中WVL-3b墙体相比,文中WL-1墙体承载力提高了216%。与文献[18]中墙体立柱发生多种破坏模式,文中均为边立柱柱顶局部受压屈曲,钢板对墙体的支撑作用使墙体具有更高的承载力和整体性。

4 结 论

(1)内置钢板冷弯薄壁型钢-稻草板组合墙体轴压性能良好,组合效应显著,具有良好的刚度和承载力,可用于单层或低层建筑工程中。

(2)对3面组合墙体试验研究,研究结果表明:相比于试件WL-1,双面钢板的试件WL-2竖向刚度提高了15.9%,承载力提高了18%;相比于试件WL-2,增加钢板厚度的WL-3试件竖向刚度提高了27.4%,承载力提高了27%。双侧钢板和钢板厚度的增加可以对墙体的延性有所提高。

(3)3面组合墙体在极限荷载作用下的平面外位移值都相对较小,相应的平面外转角在0.001 6~0.004 1,说明组合墙体在整个试验中并未发生整体失稳变形。

(4)在轴压荷载作用下,3面组合墙体破坏模式均为墙立柱局部受压屈曲、钢板局部屈曲并伴随着稻草板褶皱;组合墙体边立柱局部屈曲对构件整体稳定性的相关作用影响较大。

参考文献

[1] 周绪红,石宇,周天华,等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2005,22(2):1-14.
(ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Cold-formed steel framing system of low-rise residential building [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2005, 22 (2):1-14.)

[2] VIERIA L C M, SHIFFERAW Y, SCHAFFER B W. Experiments on sheathed cold-formed steel studs in compression[J]. Journal of constructional

- steel research,2011,67:1554-1566.
- [3] DIAS Y, MAHENDRAN M, POOLOGANATHAN K. Axial compression strength of gypsum plasterboard and steel sheathed web-stiffened stud walls [J]. Thin-walled structures, 2019, 134:203-219.
- [4] YE J H, FENG R Q, CHEN W, et al. Behavior of cold-formed steel wall stud with sheathing subjected to compression [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 116:79-91.
- [5] 石宇,周绪红,于正宁,等.冷弯薄壁型钢组合墙体墙架柱的轴压性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(2):60-67.
(SHI Yu, ZHOU Xuhong, YU Zhengning, et al. Experimental study on the axial behavior of cold-formed thin-wall steel framing wall studs [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(2):60-67.)
- [6] 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.
(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.)
- [7] 高立.填充EPS-石膏基轻质材料的冷弯型钢组合墙体轴压性能研究[D].西安:长安大学,2018.
(GAO Li. Study on axial compression performance of cold-formed steel composite walls with infilled lightweight EPS-gypsum based material [D]. Xi'an:Chang'an University, 2018.)
- [8] WU H H, CHAO S S, ZHOU T H, et al. Cold-formed steel framing walls with infilled lightweight FGD gypsum part II: axial compression tests [J]. Thin-walled structures, 2018, 132:771-782.
- [9] 杜婷,郭太平,周志强.利用农业废弃物生产绿色墙体材料[J].建筑技术,2006,37(9):707-708.
(DU Ting, GUO Taiping, ZHOU Zhiqiang. Making use of agricultural wastes to produce green wall materials [J]. Architecture technology, 2006, 37(9):707-708.)
- [10] 王秀彬.浅析我国草板建筑现状及发展前景[J].应用能源技术,2010(7):51-54.
(WANG Xiubin. Analysis of the current situation and development prospects of grass-panel construction in China [J]. Applied energy technology, 2010, (7):51-54.)
- [11] 李超然.C型钢-稻草板组合墙体轴压力学性能试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2018.
(LI Chaoran. Experimental study on the axial compression mechanical properties of C steel-strawboard composite walls [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.)
- [12] 张义卓.冷弯薄壁C型钢-稻草板组合墙体抗震性能试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2019.
(ZHANG Yizhuo. Experimental research on seismic performance of cold-formed thin-walled C-channel steel-strawboard composite walls [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.)
- [13] 张秀华,张恩源,徐嫚,等.稻草板单侧覆面组合墙体抗震试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(6):908-916.
(ZHANG Xiuhua, ZHANG Enyuan, XU Man, et al. Anti-seismic experimental study on composite wall with one-sided cladding of strawboard [J]. Journal of building materials, 2019, 22(6):908-916.)
- [14] 张秀华,张义卓,裴骏,等.压型钢板-稻草板组合楼板力学性能[J].建筑材料学报,2018,21(6):943-949.
(ZHANG Xiuhua, ZHANG Yizhuo, PEI Jun, et al. Mechanical behavior of profiled steel sheet-strawboard composite slabs [J]. Journal of building materials, 2018, 21(6):943-949.)
- [15] 张秀华,赵梓霖,孟毅豪,等.冷弯薄壁型钢-稻草板组合楼盖抗振性能[J].东北林业大学学报,2020,48(5):122-128.
(ZHANG Xiuhua, ZHAO Zilin, MENG Yihao, et al. Anti vibration performance of cold-formed thin-walled steel-strawboard composite floor [J]. Journal of northeast forestry university, 2020, 48(5):122-128.)
- [16] 张秀华,张恩源,于灏,等.冷弯薄壁方钢管-稻草板组合墙体轴压性能[J].科学技术与工程,2021,21(1):283-289.
(ZHANG Xiuhua, ZHANG Enyuan, YU Hao, et al. Axial compression performance of cold-formed thin-walled square steel stud-strawboard composite wall [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(1):283-289.)
- [17] 贾连光,姜勇,刘鑫,等.内置钢板的连梁与剪力墙节点试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(3):446-453.
(JIA Lianguang, JIANG Yong, LIU Xin, et al. Experimental study on joints of built-in steel plate reinforced concrete coupling beam and shear wall [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(3):446-453.)
- [18] 郝际平,王奕钧,刘斌,等.喷涂式冷弯薄壁型钢轻质砂浆墙体立柱轴压性能试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(5):615-621.
(HAO Jiping, WANG Yijun, LIU Bin, et al. Experimental research on the axial compression behavior of cold-formed thin-wall steel framing wall studs with sprayed lightweight mortar [J]. Journal of Xi'an university of architecture and technology (natural science edition), 2014, 46(5):615-621.)
- [19] 秦雅菲.冷弯薄壁型钢底层住宅墙柱体系轴压性能理论与试验研究[D].上海:同济大学,2006.
(QIN Yafei. Theoretical and experimental research of cold-formed steel residential building wall stud system subject to centric axial loads [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:唐玉兰)