

冷弯薄壁钢管-稻草板组合墙体抗剪性能试验

张秀华¹,陆希林¹,屈东磊²

(1. 东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

摘要 目的 研究冷弯薄壁钢管-稻草板组合墙体的抗剪性能,为该类墙体在实际工程中的应用提供理论依据。**方法** 组合墙体由钢骨架和稻草板通过 ST4.8×85 mm 的外六角自攻螺钉连接而成,其中钢骨架由钢管和 U 型导轨通过 ST3.5×16 mm 的梅花沉头自攻螺钉连接。对 3 面组合墙体进行水平单调加载试验,分析各试件的破坏过程和破坏机理,得到组合墙体的屈服荷载、延性系数和抗侧刚度等抗剪性能指标。**结果** 组合墙体主要的破坏模式为受压侧钢管底部局部屈曲,稻草板表面出现斜向褶皱;无竖向荷载的组合墙体比竖向荷载为 15 kN 和 30 kN 的组合墙体在屈服荷载上分别提高了 8.11% 和 14.87%,在抗侧刚度上降低了 32.86% 和 70.18%。**结论** 稻草板对钢骨架起到了良好的约束作用,组合墙体整体性良好且具有较高的抗剪承载力。组合墙体的抗剪承载力随着上部竖向荷载的增加而逐渐降低,但同时提高了组合墙体的延性系数和抗侧刚度,增加了墙体的稳定性。

关键词 冷弯薄壁钢管;稻草板;组合墙体;抗剪承载力

中图分类号 TU392.1

文献标志码 A

Experimental on Shear Performance of Cold-formed Thin-walled Steel Tube-Straw Board Composite Walls

ZHANG Xiuhua¹, LU Xilin¹, QU Donglei²

(1. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureall, Tianjin, China, 300457)

Abstract: In order to observe the shear properties of the cold-formed thin-walled steel tube-straw board composite walls and provide theoretical basis for the application of this kind of wall in practical engineering, a monotonic shear performance test was carried out on 3 composite wall specimens. The composite wall is composed of steel frame and straw board connected by ST4.8×85 mm external hexagonal tapping screws and the steel frame is composed of steel tube and the U guide rail connected by ST3.5×16 mm countersunk head tapping screws. The failure processes and failure mechanism of each specimen were analyzed. The performance indexes such as yield

收稿日期:2021-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51878130)

作者简介:张秀华(1970—),女,副教授,博士,主要从事钢结构和组合结构等方面研究。

load, ductility coefficient and lateral stiffness of the composite wall were received. The consequences demonstrate that the main failure mode was local buckling of steel tube ends on compression side and the oblique wrinkling of straw boards surface. No vertical load composite wall than the composite wall of vertical load of 15 kN and 30 kN on the yield load respectively increased by 8.11% and 14.87%, on the lateral stiffness was respectively reduced by 32.86% and 70.18%. The straw board plays a good role in restraining the steel frame, so that the composite walls have good integrity and higher shear bearing capacity. With the increase of the upper vertical load on the composite wall, its shear bearing capacity decreases gradually, the ductility coefficient and lateral stiffness of the composite walls are improved at the same time, the stability of the composite wall is enhanced.

Key words: cold-formed thin-walled steel tube; straw board; composite walls; shear bearing capacity

当下,中国正面临“碳达峰、碳中和”的重要目标。建筑行业面临普遍的碳排放总量大、用能技术和效率低等问题,在实现“碳达峰、碳中和”目标要求下实现可持续发展仍面临较大压力。随着中国城市化进程加快,推动建筑行业绿色转型,对实现“碳达峰、碳中和”目标意义重大^[1]。因此,在实际工程设计中,要将节约能源放在首位,追求将绿色建筑回归自然。稻草板作为一种以天然稻草为原料,集轻质、高强、耐火、隔音、保温、隔热于一体的多功能新型绿色环保建材,用其取代传统的建筑板材,可以有效地节约资源、保护生态环境,符合我国推动绿色建筑普及的理念。

随着木结构住宅中木材价格上涨,冷弯薄壁型钢结构住宅作为一种替代产品应运而生^[2]。作为未来建筑体系发展的一个重要方向,冷弯薄壁型钢住宅体系与其他建筑体系相比,具有诸多优势。从20世纪开始,国外学者对轻钢复合墙体的抗剪性能做了诸多研究^[3-6],分析了不同墙面板材料、高宽比、立柱厚度、支撑形式等因素对于组合墙体抗剪承载力的影响。进入到21世纪,随着我国对于装配式建筑的推崇与发展,国内学者也开始对轻钢组合墙体展开了研究。郭鹏^[7]利用ANSYS软件对覆带肋钢板高强冷弯薄壁型钢骨架墙体的抗剪性能进行了模拟分析,结果表明,墙面板拼缝处是墙体抗剪承载

能力最薄弱的位置。周天华等^[8]对覆夹芯钢板的复合墙体开展抗剪性能试验,结果表明,夹芯钢板配套交叉钢带是较理想的墙体组合形式。许阳^[9]对12面施加竖向荷载的冷弯薄壁型钢组合墙体进行了抗剪性能研究,结果表明,墙体抗剪承载力与面板外围螺钉间距关系极大,而与中立柱螺钉间距关系不大。其他学者对同类墙体的研究^[10-16],墙面板材料也普遍集中在OSB板、石膏板、泡沫混凝土等。

为了倡导国家提出的绿色建材和绿色建筑,东北林业大学张秀华团队提出了轻钢-稻草板这一新型组合墙体^[17-21],并对此类墙体展开了试验与理论研究,研究表明,此类墙体具有较大的承载力,能够满足实际工程要求。笔者在已有研究的基础上,对3面冷弯薄壁钢管-稻草板组合墙体进行水平单调加载试验,分析其破坏过程和破坏机理,得到了组合墙体抗剪承载力、延性系数、抗侧刚度等抗剪性能特征值,并与同类组合墙体进行对比分析,为该类墙体在实际工程中的应用和推广提供理论依据。

1 试验

1.1 试件设计

试验共设计了3面宽×高为1.2 m×2.4 m的足尺试件,试件编号为W1、W2和W3。组合墙体由钢骨架与稻草板通过自攻

螺钉连接而成,稻草板分别覆在钢骨架左右两侧。钢骨架由3根高度为2 400 mm的冷弯薄壁钢管和上下两根长度1 200 mm的U型导轨通过ST3.5×16 mm的梅花沉头自攻螺钉连接而成,钢管横截面长×宽为60 mm×80 mm,壁厚为1.5 mm;U型导轨截面腹板高度×翼缘宽度×截面厚度为U80 mm×45 mm×1.5 mm。钢骨架与稻草板之间通过ST4.8×85 mm的外六角自攻螺钉连接。两侧自攻螺钉间距150 mm,中间间距300 mm。为防止加载时自攻螺钉陷入到稻草板中,需在自攻螺钉与稻草板之间放置钢板带,钢板带厚1 mm、宽20 mm。试件通过M18的10.9级高强螺栓和抗剪连接件与顶、底梁固定。抗剪连接件与钢管之间采用直径6 m的8.8级高强螺栓连接。在其他参数相同的情况下,对试件在0 kN、15 kN、30 kN三种不同竖向力作用下施加水平荷载,观察其破坏过程、分析破坏机理,得到组合墙体抗剪承载力、抗侧刚度等抗剪性能特征值。组合墙体构造及截面形式见图1,抗剪连接件构造见图2。

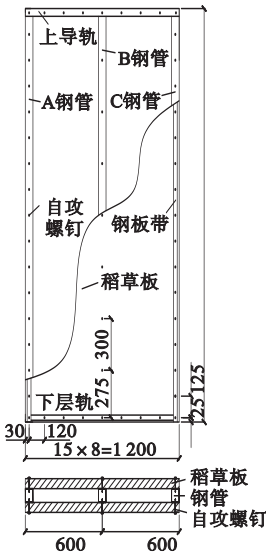


图1 组合墙体构造及截面形式

Fig. 1 Construction and cross section of composite walls

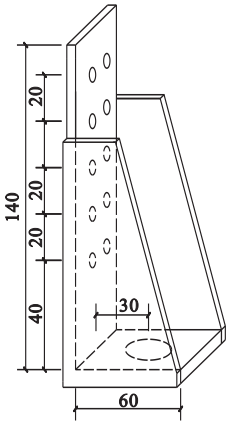


图2 抗剪连接件构造

Fig. 2 Construction of shear connection specimen

1.2 材料属性

试件钢骨架所用钢材为Q235B镀锌矩形钢管和U型钢。参考《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)的规定进行材性试验^[22],得到其力学性能,结果见表1。

表1 钢材力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel

材料	厚度/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
U型钢	1.5	274.3	372.7	197.6
钢管	1.5	280.6	378.4	201

稻草板材料属性根据《结构用人造板力学性能试验方法》(GB/T 31264—2014)^[23]确定,通过试验测得稻草平行于长度方向的稻草板抗弯弹性模量为400.6 MPa,抗弯强度为1.87 MPa。

1.3 试验装置及加载制度

试验采用50 t的电液伺服程控结构试验机(MTS)进行水平加载,量程为±250 mm,水平荷载由顶梁传递给墙体。同时为与实际情况保持一致,采用液压千斤顶分别对组合墙体施加15 kN和30 kN的竖向力。为确保力能均匀地传递给墙体,需在顶梁上加设分配梁。底梁通过两侧支墩固定在地面,支墩由地锚螺栓紧固。同时为防止墙体在加载时发生前后倾倒,需在墙体两侧安装侧向支撑,

并通过地锚螺栓固定。

试验加载制度参照美国标准《建筑墙体循环荷载作用下抗剪性能试验标准》(ASTM E2126—07)^[24],并参考同类墙体抗剪性能试验进行制定。对试件正式加载前,为检查试验所用各仪器灵敏度,需要先对其进行预加载,预加载荷载值取预估极限荷载的10%。正式加载时采用位移控制加载,加载速度为10 mm/min。加载初期,对试件每10 mm加载一次,当试件出现明显破坏现象时,改为2 mm加载一次,直至试件破坏。加载的过程中要实时观察并记录不同荷载、位移值所对应的试验现象,各测点的应变数据通过静态应变箱的定时采集方式来实时记录。

1.4 测点布置

为得到组合墙体中钢管主要部位的应变值和组合墙体的净剪切变形值,需要布置应变片和位移计,布置方式见图3。每面组合墙体均需布置5个位移计,编号为D1~D5,其中D1、D2用于测量试件上部和下部的水平位移值;D3、D4用于测量试件在垂直方向上相对于底梁的位移值;D5用于测量试件平面外的侧移值。同时为观察试验中钢管主要部位的应变变化,在钢管上粘贴5个应变片。通过整理试验中所测出的荷载和应变值,可以得到荷载-应变曲线,进而得出在加载过程中钢管主要部位的应变变化规律。

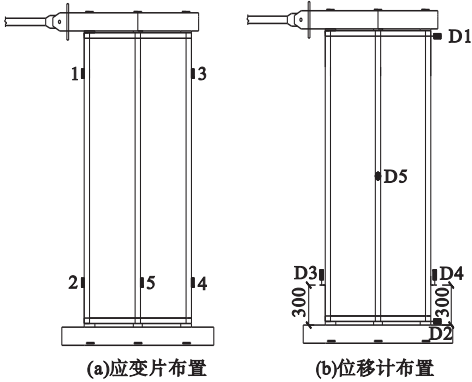


图3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of settlement monitoring points

2 试验现象

3面组合墙体试验现象基本相同,只是在发生破坏时所对应的荷载与位移值不同。笔者以试件W3为例进行分析,W3为施加上部竖向荷载30 kN的试件。在试验加载初期,组合墙体并无明显现象。当位移达到33.67 mm时,受压侧稻草板底部出现轻微斜向褶皱。当位移达到56.19 mm时,稻草板褶皱加剧,并逐渐开始向中部延伸(见图4(a))。当位移达到69.35 mm时,C钢管底部开始出现轻微屈曲,同时钢板带由于稻草板褶皱逐渐增多也开始发生屈曲(见图4(b))。当位移达到91.26 mm时,受压侧稻草板底部的牛皮纸被内部稻草撑开,但是由于钢板带的紧固支撑作用,自攻螺钉并没有嵌入到稻草板中。当位移达到119.32 mm



(a)稻草板出现斜向褶皱



(b)钢板带屈曲、牛皮纸被撑开



(c)C钢管底部屈曲



图4 试件 W3 破坏形态

Fig. 4 Failure modes of W3 specimen

时,C 钢管底部屈曲破坏进一步加剧(见图 4(c)),同时 A 钢管底部抗剪连接件处螺钉发生松动,导致 A 钢管与下导轨出现轻微分离。当位移达到 151.66 mm 时,组合墙体发生严重倾斜不适合继续加载(见图 4(d)和图 4(e)),且此时荷载值已降至峰值荷载的 85% 以下,此时停止加载。将组合墙体卸载后,去掉一面稻草板,发现 A 钢管底部 U 型导轨的左右两侧发生屈曲变形(见图 4(f)),但钢骨架的上部区域基本完好。

3 试验结果分析

3.1 荷载-位移曲线分析

对墙体水平单调加载,墙体的水平位移为其净剪切变形,即墙体上部净水平位移 Δ 。计算如下:

$$\Delta = \Delta_0 - \Delta_\varphi - \Delta_1. \tag{1}$$

式中: Δ_0 为墙体顶部实测水平位移; Δ_φ 为墙体转动产生的水平位移; Δ_1 为墙体相对底梁的滑动位移,即位移计 D2 采集数据。

墙体顶部实测水平位移计算如下:

$$\Delta_0 = \frac{Hd_1}{(H-A)}. \tag{2}$$

式中: H 为墙体高度; A 为墙体顶部距离位移计 D1 的距离; d_1 为墙体的水平位移值,即位移计 D1 所采集的数据。

若墙体发生转动,假设其高度与宽度转

动角度均为 α ,则墙体顶部因转动而产生的水平位移 Δ_φ 计算如下:

$$\Delta_\varphi = \frac{H}{L + E_1 + E_2} \cdot \Delta_\alpha. \tag{3}$$

式中: L 为墙体宽度; E_1 、 E_2 为位移计 D2、D3 距钢管的水平距离; Δ_α 为墙体转动使位移计 D3、D4 出现的高度差,即 D3、D4 采集数据的差值。

3 组墙体的荷载-位移曲线见图 5。从图中可以看出,3 组曲线具有相似的变化趋势。加载初期,钢骨架与稻草板协同受力,曲线基本呈线性关系且斜率较大,墙体处于弹性阶段。继续施加位移,墙体受力由钢骨架与稻草板协同受力转变为钢骨架承受主要荷载,稻草板只起到约束支撑作用。由于此时

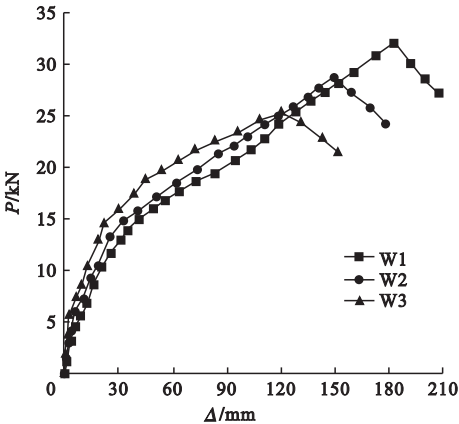


图5 组合墙体荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of composite walls

C 钢管底部已开始发生屈曲,因此曲线斜率逐渐减小,试件也由此进入到弹塑性阶段。加载至最大位移时,由于 C 钢管底部屈曲破坏加剧、A 钢管底部抗剪连接件连接处螺钉松动等破坏现象的出现,使得墙体的整体受力性能不断减弱,此时墙体处于极限状态。继续施加位移,荷载-位移曲线出现下降趋势,表明墙体已进入破坏阶段。

3.2 荷载-应变曲线分析

3 组墙体荷载-应变曲线如图 6 所示。

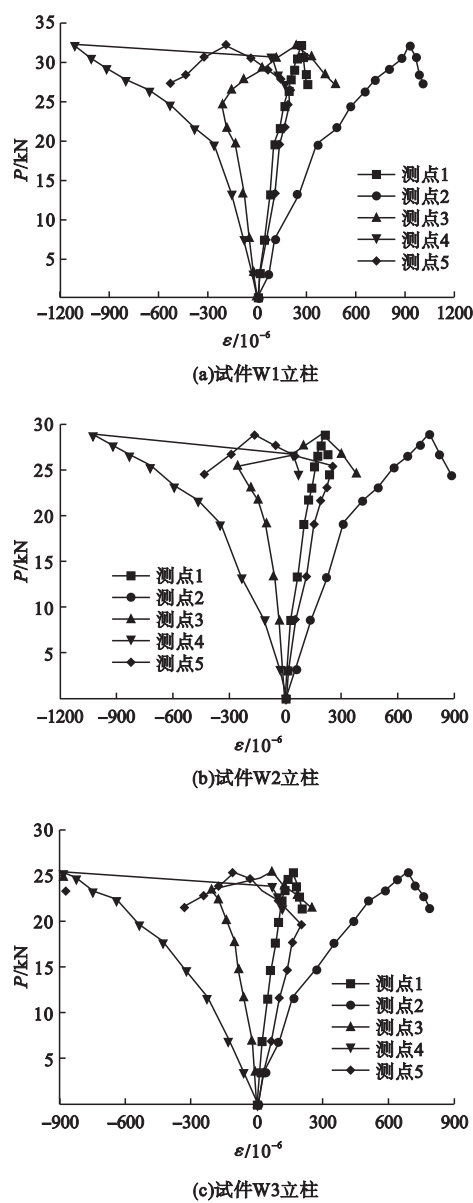


图 6 组合墙体荷载-应变曲线

对比分析 3 组曲线可知,当荷载到达一定值时,试件 W1 ~ W3 中 C 钢管底部发生屈曲破坏,因此应变较大。但 A 钢管、B 钢管上的应变仍然较小,处于弹性工作阶段。A 钢管、C 钢管呈现一拉一压的状态,说明组合墙体主要依靠左右两侧钢管拉压所产生的抗倾覆力矩抵抗部分水平荷载。对于 C 钢管,加载初期为弹性变形,钢管截面会发生无屈曲现象的全截面压缩,此时应变为负。随着水平荷载增大,钢管截面变形随之增大,钢管发生屈曲破坏,这会使原先受压截面突然受拉,因此应变由负变正。而 B 钢管在加载初期呈现受拉的状态,随着水平荷载增大,C 钢管底部屈曲破坏加剧,B 钢管底部的应变明显增大,表明 B 钢管分担了一部分原先 C 钢管所承担的荷载。因此,B 钢管由原本的受拉转变为受压,应变出现由正变负的情况。

3.3 延性系数与抗侧刚度

组合墙体屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y 参照美国标准《建筑墙体循环荷载作用下抗剪性能试验标准》(ASTM E2126—07)^[24] 确定。最大荷载 P_{max} 和最大位移 Δ_{max} 为荷载-位移曲线峰值点,极限荷载 P_u 和极限位移 Δ_u 为曲线最后一点。当 $0.8P_{max}$ 大于曲线最后一点对应的荷载时,最后一点取 $0.8P_{max}$ 对应的点,反之,取曲线最后一点。屈服荷载 P_y 根据式(4)确定:

$$P_y = (\Delta_u - \sqrt{\Delta_u^2 - \frac{2A}{K_e}}) K_e. \tag{4}$$

式中: A 为荷载-位移曲线 $0 - \Delta_u$ 段所围面积; K_e 为荷载-位移曲线上 $0.4P_{max}$ 的点与原点连线的斜率;抗侧刚度 $K_e = 0.4P_{max} / \Delta_e$, 其中 Δ_e 为曲线上 $0.4P_{max}$ 对应的位移值。

延性系数 μ 根据《建筑抗震试验规程》(JGJ 101—2015)^[25] 计算:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}. \tag{5}$$

式中: Δ_u 为极限位移; Δ_y 为屈服位移。

试验结果见表 2。对比表中 3 面组合墙

Fig. 6 Load-strain curves of composite walls

体试验结果可以得出,试件 W1 比试件 W2 在屈服荷载和屈服位移上分别提高了 8.11% 和 23.01%,延性系数和抗侧刚度降低了 6.55% 和 32.86%;试件 W1 比试件 W3 在屈服荷载和屈服位移上分别提高了 14.87% 和 72.91%,延性系数和抗侧刚度降低了 27.38% 和 70.18%。因此,增加组合墙体上部竖向荷载会使其抗剪承载力有所降

低,但同时提高了组合墙体的延性系数和抗侧刚度,提升了组合墙体的稳定性。通过文献[15]可知,当延性系数 $\mu > 3.5$ 时,试件变形能力为高; $\mu \leq 1.5$ 时,变形能力为低;当 μ 在 1.5~3.5 时,变形能力为中等。本试验 3 面冷弯薄壁钢管-稻草板组合墙体的延性系数均在 1.5~3.5,因此该类组合墙体具有一定的塑性变形能力和抗侧刚度。

表2 组合墙体试验结果
Table 2 Test results of composite walls

试件编号	屈服荷载		最大荷载		极限荷载		延性系数	抗侧刚度/ (kN·m ⁻¹)
	P_y /kN	Δ_y /mm	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm	P_u /kN	Δ_u /mm		
W1	24.80	122.85	32.16	182.21	27.26	206.89	1.68	426
W2	22.94	99.87	28.73	149.20	24.20	178.31	1.79	566
W3	21.59	71.05	25.24	120.20	21.44	151.79	2.14	725

3.4 对比分析

将本次试验结果与文献[16-18]中同类组合墙体试验结果进行比较,对比分析不

同参数下组合墙体的屈服荷载、屈服位移、抗侧刚度和抗剪承载力等抗剪性能指标,结果见表3。

表3 文中组合墙体与其他文献组合墙体试验结果对比

Table 3 Comparison of test results of composite walls with that of other literatures

数据来源	试件编号	覆面板类型	支撑形式	竖向荷载/ kN	屈服荷载/ kN	屈服位移/ mm	抗侧刚度/ (kN·m ⁻¹)	抗剪承载力/ (kN·m ⁻¹)
文中	W1	双面稻草板	无	0	24.80	122.85	426	20.67
	W2			15	22.94	99.87	566	19.12
	W3			30	21.59	71.05	725	17.99
文献[16]	W-A1	单面 OSB 板	无	0	28.51	53.93	352	11.88
文献[17]	W1	双面稻草板	无	30	16.38	61.59	503	13.65
文献[18]	W-DAS-1	双面稻草板	横撑	0	20.13	115.27	348	16.78
	W-DAS-3			30	14.05	51.61	518	11.71

表3中的抗剪承载力为组合墙体单位宽度抗剪承载力。将本试验试件 W1 与文献[16]中试件 W-A1 试验结果进行对比,屈服荷载提高了 69.3%,抗侧刚度提高了 21.02%,单位宽度抗剪承载力提高 73.99%。说明稻草板对钢骨架起到了良好的约束支撑作用,且稻草板作为覆面板,其性能要优于 OSB 板。文献[17]中 W1 试件的钢骨架是由 5 根 C 型钢组成,将本试验试件 W3 与文献[17]中试件 W1 试验结果进行对

比,屈服荷载提高 31.81%,屈服位移增大 15.36%,抗侧刚度提高 44.13%,单位宽度抗剪承载力提高 31.79%。这是由于相比于 C 型钢,矩形钢管为对称的截面形式,截面面积增大,受力性能更好。同时矩形钢管具有更大的惯性矩,抗弯刚度增大,使得其能承担更大的弯矩。因此,组合墙体的屈服荷载、屈服位移以及抗侧刚度都有明显的提高。从用钢量的角度进行分析,组合墙体 W3 用钢量为 3.693 m³,组合墙体 W1 用钢量为

3. 103 m³,用钢量虽然提升 19%,但刚度却有显著提升。文献[18]中 W-DAS-3 试件的钢骨架同样由 5 根 C 型钢组成,并在钢骨架中加入了横撑,将本试验试件 W3 与文献[18]中试件 W-DAS-3 试验结果进行对比,屈服荷载提高 53.66%,屈服位移增大 37.67%,抗侧刚度提高 39.96%,单位宽度抗剪承载力提高 52.63%。分析原因是由于在稻草板的外侧加入了钢板带,避免了自攻螺钉在受力过程中陷入到稻草板中,这使得稻草板与钢骨架的连接越发紧密,可以有效地防止受压侧钢管过早屈曲,试件的整体性也更加良好。因此,组合墙体的屈服荷载和抗侧刚度都有较大的提高。从用钢量的角度进行分析,组合墙体 W3 用钢量为 3.693 m³,组合墙体 W-DAS-3 用钢量为 3.28 m³,用钢量提升 12.6%,但抗侧刚度提高了 39.96%。因此,在实际工程应用中,为提升墙体的抗侧刚度,可采用冷弯薄壁矩形钢管代替冷弯薄壁 C 型钢和横撑的组合形式。

4 结 论

(1)组合墙体虽然用钢量较大,但其延性、抗侧刚度等抗剪性能指标均表现良好,组合墙体具有较好的变形及抗侧移能力,可应用于低层建筑工程中。

(2)增加组合墙体上部竖向荷载,会导致组合墙体抗剪承载力有所降低,但可以提高组合墙体的延性和抗侧刚度。

(3)钢板带可以有效避免在加载过程中自攻螺钉陷入到稻草板中,但考虑到用钢量的问题,在今后试验以及实际工程应用中,可采取钢垫片代替钢板带。

(4)冷弯薄壁钢管-稻草板组合墙体在水平单调加载时表现为良好的延性破坏,在达到极限荷载前会承受较大的塑性变形,破坏现象显著。

参考文献

[1] 李张怡,刘金硕.双碳目标下绿色建筑发展和

- 对策研[J].西南金融,2021,42(10):55-66.
(LI Zhangyi, LIU Jinshuo. Green building development and countermeasure research under dual carbon target [J]. Southwest finance, 2021, 42(10): 55-66.)
- [2] 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):5-18.
(ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Cold-formed steel framing system of lowrise residential building [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2005, 22(2): 5-18.)
- [3] GERAMI M, LOTFI M, NEJAT R. Inelastic behavior of cold-formed braced walls under monotonic and cyclic loading [J]. International journal of advanced structural engineering, 2015, 7: 181-209.
- [4] MOHSEN G, MOHSEN L, ROYA N. Inelastic behavior of cold-formed braced walls under monotonic and cyclic loading [J]. Original research, 2015, 7: 181-209.
- [5] BAHREBAR M, KABIR M Z, ZIRAKIAN T, et al. Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 122: 584-594.
- [6] MACILLO V, FIORINO L, LANDOLFO R. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: experimental tests [J]. Thin walled structures, 2017, 120: 161-171.
- [7] 郭鹏.冷弯型钢骨架墙体抗剪性能试验与理论研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
(GUO Peng. Experimental and theoretical study on shear performance of cold-formed steel framing walls [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and technology, 2008.)
- [8] 周天华,吴函恒,蒋路,等.夹芯钢板冷弯型钢组合墙体抗剪性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(11):22-28.
(ZHOU Tianhua, WU Hanheng, JIANG Lu, et al. Experimental study on the shearing performance of sandwich board cold-formed steel composite wall [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(11): 22-28.)
- [9] 许阳.新型冷成型钢承重组合墙体抗剪性能试验研究[D].南京:东南大学,2016.
(XU Yang. Experimental research on shear performance of new-type cold-formed steel load bearing walls [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [10] WANG Chungang, YANG Zhenyu, ZHANG Zhuangnan, et al. Experimental study on shear behavior of cold formed steel shear walls with bracket [J]. Structures, 2021(34): 448-460.
- [11] 马全涛,徐涛,姚欣梅,等.冷弯薄壁型钢-石膏板组合墙体抗侧性能研究[J].长江大学学报,2018,15(17):59-64.
(MA Quantao, XU Tao, YAO Xinmei, et al. Experimental research on shear performance of cold-formed thin-walled steel-plasterboard

- composite walls [J]. Journal of Yangtze university (natural science edition), 2018, 15 (17): 59 - 64.)
- [12] 褚云朋,王秀丽,姚勇. 冷弯薄壁型钢双层组合墙体抗剪性能试验研究[J]. 工程科学与技术,2019,51(2):45-52.
(CHU Yunpeng, WANG Xiuli, YAO Yong. Shearing Experiments of cold-formed steel thin-wall panels under cyclic load [J]. Advanced engineering sciences, 2019, 51(2): 45 - 52.)
- [13] 李国华,王权,董军,等. 冷弯薄壁型钢轻混凝土组合墙体抗弯性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):218-226.
(LI Guohua, WANG Quan, DONG Jun, et al. Finite element analysis on flexural behavior of cold-formed thin-wall steel framing walls infilled with lightweight concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2): 218 - 226.)
- [14] 杨立. OSB板覆面高强冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能研究[D]. 西安:长安大学,2011.
(YANG Li. Study on shear resistance of high strength cold-formed steel framing wall with OSB board [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [15] 高宛成. 冷弯薄壁型钢竹胶板组合墙体抗震性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
(GAO Wancheng. Research on seismic performance of cold-formed thin-walled steel composite walls with ply-bamboo sheathing panels [D]. Changsha: Hu'nan University, 2014.)
- [16] 梁丰菊. 冷弯薄壁型钢结构组合墙体抗侧移刚度研究[D]. 西安:长安大学,2008.
(LIANG Fengju. Study on the lateral stiffness of cold-formed steel stud composed wall [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.)
- [17] 于灏. 冷弯薄壁型钢-稻草板复合钢板剪力墙抗剪性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020.
(YU Hao. Research on shear performance of cold-formed thin-walled steel-straw board composite steel shear wall [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.)
- [18] 杨景程. 冷弯薄壁型钢-稻草板组合墙体抗剪性能试验研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2018.
(YANG Jingcheng. Experimental research on shear performance of cold-formed thin-walled steel-strawboard composite walls [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.)
- [19] 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.)
- [20] 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.)
- [21] ZHANG Xiuhua, ZHANG Enyuan, ZHANG Yizhuo. Study on shear performance of cold-formed thin-walled steel walls sheathed by paper straw board [J]. Engineering structures, 2021, 245(15):1-14.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2011.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing, 2011.)
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 结构用人造板力学性能试验方法:GB/T 31264—2014 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for mechanical properties of structural wood-base panels: GB/T 31264—2014 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing, 2015.)
- [24] American National Standards Institute. ASTM E2126-07 Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of walls for buildings [S]. New York: American Society for Testing and Materials, 2007.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程:JGJ 101—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture Publishing, 2015.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)