

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.048



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



结构保温一体板覆面冷弯薄壁型钢墙体的 抗侧性能

熊刚¹, 徐俊杰¹, 石宇¹, 鲁卫波¹, 周磊², 何跃洋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. 苏州兹安材料科技有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要:作为一种新型覆面板材, 结构保温一体板在建筑中具有良好的应用前景。为系统研究该面板覆面的冷弯薄壁型钢墙体抗侧性能, 首先进行用于连接结构保温一体板和型钢骨架的自攻螺钉连接试验, 主要研究螺钉端距对螺钉连接性能的影响, 结果表明: 所有自攻螺钉连接试件均发生板边撕裂破坏, 螺钉端距由 15 mm 增至 25 mm, 屈服荷载、峰值荷载平均值分别提升了 49.65%、48.31%, 螺钉端距的增加对螺钉连接性能有显著提升作用。进一步对 2 片足尺结构保温一体板覆面墙体开展单调以及低周往复加载试验, 得到组合墙体的破坏模式、荷载-位移曲线、抗剪承载力和抗侧刚度等抗侧性能指标, 结果表明, 2 片墙体试件均经历了受压边柱底部屈曲、斜撑退出工作、面板角部破坏严重以及面板周边自攻螺钉连接失效的情况。基于试验结果提出单面 75 mm 结构保温一体板覆面墙体的抗剪承载力及抗侧刚度, 建议分别取 5.74 kN/m、1 474.24 kN/m·rad。最后, 采用叠加原理提出了结构保温一体板覆面冷弯薄壁型钢墙体的弹性抗侧刚度计算方法, 并与试验结果对比, 验证了计算方法的合理性。

关键词:冷弯薄壁型钢; 结构保温一体板; 抗侧性能; 自攻螺钉连接; 弹性抗侧刚度

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Lateral resistance of cold-formed thin-walled steel wall systems clad with structural insulation composite panels

XIONG Gang¹, XU Junjie¹, SHI Yu¹, LU Weibo¹, ZHOU Lei², HE Yueyang²

(1. School of Civil Engineering; State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Suzhou Vantell Material Technology Co., Ltd, Suzhou 215128, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Structural insulation composite panels have emerged as a new type of cladding material with promising applications in the construction industry. To systematically investigate the lateral resistance of cold-formed thin-walled steel-framed walls clad with these panels, tests were first conducted on self-tapping screw

收稿日期: 2026-04-05

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: 熊刚(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构研究, E-mail: xionggang76@126.com。

鲁卫波(通信作者), 男, 博士生, E-mail: lwb386846613@163.com。

Received: 2026-04-05

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: XIONG Gang (1976-), PhD, professor, main research interest: steel structure, E-mail: xionggang76@126.com.

LU Weibo (corresponding author), PhD candidate, E-mail: lwb386846613@163.com.

connections used to join the structural insulation composite panels to the steel frame. The study primarily examined the effect of screw edge distance on the performance of the screw connections. The results indicate that: All self-tapping screw connection specimens failed due to edge tearing of the panels. When the screw edge distance was increased from 15 mm to 25 mm, the average yield load and peak load increased by approximately 49.65% and 48.31%, respectively. The increase in screw edge distance significantly improved the performance of the screw connections. Further monotonic and low-cycle loading tests were conducted on two full-scale structural insulation composite panel cladding walls. This yielded the failure modes of the composite walls, load-displacement curves, and lateral performance indicators such as shear strength and lateral stiffness. The results indicate that both wall specimens experienced buckling at the base of the compression-side columns, failure of the diagonal bracing, severe damage at the corners of the panels, and failure of the self-tapping screw connections around the panel periphery. Based on these results, recommended values of 5.74 kN/m and 1 474.24 kN/m·rad are proposed for the shear capacity and lateral stiffness, respectively, of single-sided 75 mm structural insulation composite panel-clad walls. Finally, a calculation method for the elastic lateral stiffness of cold-formed thin-walled steel walls clad with structural insulation composite panels was proposed using the superposition principle. This method was compared with experimental results to verify its validity.

Keywords: cold-formed thin-walled steel; structural insulation composite panels; lateral resistance; self-tapping screw connections; elastic lateral stiffness

绿色节能型建筑结构体系已成为建筑领域核心发展方向^[1]。冷弯薄壁型钢结构作为绿色建筑代表形式,凭借轻质高强、节能环保、可循环等优势,已广泛应用于低层和多层住宅、公共建筑等场景。随着冷弯型钢建筑向高层化不断发展,传统墙面板与轻钢骨架组合墙体的抗侧性能已难以满足结构要求。众多学者通过试验、模拟与理论分析对冷弯薄壁型钢墙体抗侧性能展开系统研究^[2-16]。周绪红等^[4]、石宇等^[5]、马全涛等^[6]开展了硅酸钙板、石膏板和定向刨花板等传统板材覆面墙体的抗侧性能试验,揭示了覆面板材自身性能对墙体整体性能的影响。Zhang 等^[7]、Xing 等^[8]、Shi 等^[9]以及一系列学者^[10-15]通过试验和数值模拟,研究了各类新型覆面板材(如胶合板、秸秆板和玄武岩纤维增强复合板等)覆面墙体的抗侧性能,给出了影响墙体性能的关键因素以及各类墙体的抗侧性能设计值。周天华^[16]研究了不同加载制度对墙体抗侧性能的影响,发现相同墙体在单调加载下的抗剪承载力值较低周反复加载有所提升,但提升程度并不显著。对于目前常用的覆面板材,石膏板虽具有良好的防火防水性能但抗侧能力较弱;定向刨花板虽具有较高的抗侧刚度,但防火与防水性能较差;硅酸钙板等水泥基板材抗侧刚度较高但韧性不足,会削弱墙体延性。上述板材往往难以同时兼顾力学、防火、防水、保温等多重需求,在实际工程中往往需要叠加使用,从而大大增加施工工序。因此,亟需探索一种能够满足上述多重需求的新型覆面板材。

结构保温一体板是一种新型一体化板材,由 4

部分组成,如图 1 所示,最内层硫氧镁板具有防火和控制墙板平整度的功能,中间层聚氨酯发泡保温板具有保温功能,外层硫氧镁板具有防火和提供一定的结构强度功能,最外侧防水透湿布具有防水、透湿以及控制气密性功能,该板材通过多层功能材料的工厂预制化复合,将防火层、保温层、结构层和防水透湿层集于一身,可以同时满足防火、防水、透湿、保温隔热、气密性良好和具有一定结构强度等要求,具有较为优越的工程应用优势。

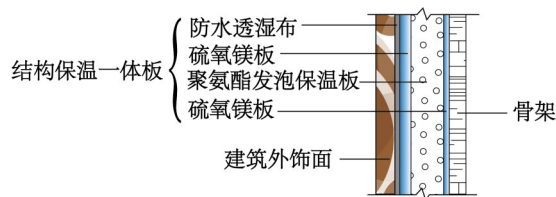


图 1 结构保温一体板构造

Fig.1 Construction of structural insulation composite panels

为系统研究该板材应用于冷弯型钢建筑之后的性能,笔者通过试验评估该板材覆面的冷弯薄壁型钢墙体抗侧性能,并基于叠加原理,推导适用于该类墙体的弹性抗侧刚度计算方法。

1 材性及自攻螺钉连接试验

1.1 材性试验

墙体骨架均采用厚度为 1.0 mm 的 Q550 冷弯薄壁型钢。依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[17]的规定,对骨架进行取样,材性试验结果如表 1 所示。结构保温

一体板的性能指标由生产厂家提供,如表 2 所示。

表 1 钢材材性试验结果

Table 1 Test results of steel material properties				
试件编号	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa	伸长率/%
S-1	596.0	747.0	2.37×10^5	28.0
S-2	601.0	745.0	2.29×10^5	28.0
S-3	604.0	750.0	2.41×10^5	27.0
平均值	600.0	747.0	2.36×10^5	27.7

表 2 结构保温一体板材性能参数

Table 2 Parameters of structural insulation composite panels				
弹性模量/MPa	吸水量/(g/m ²)	保温材料 氧指数	保温材料导热系数/(W/(m·K))	抗弯荷载/N
1 200	443	26	0.024	5467

1.2 自攻螺钉连接试验

冷弯薄壁型钢墙体的抗侧性能依赖于自攻螺钉连接的覆面板材与骨架协同工作机制。螺钉连接试件均由冷弯薄壁型钢与结构保温一体板通过自攻螺钉连接而成。结构保温一体板长度方向尺寸为 235 mm,宽度方向尺寸为 200 mm,厚度方向尺寸为 75 mm,各组成部分具体尺寸如图 2 所示。

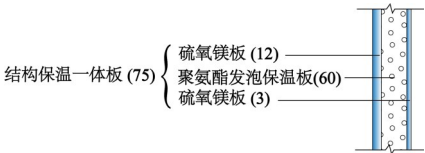


图 2 结构保温一体板厚度方向尺寸组成(单位:mm)

Fig.2 Dimensions of structural insulated panels in the thickness direction

4 片 C89 冷弯型钢长度为 120 mm。试件上端为固定端,下端为测试端。固定端采用 8 颗 ST4.8 螺钉连接,横向间距 60 mm,纵向间距 20 mm。测试端根据工况采用 2 颗 ST4.8 螺钉连接,横向间距 60 mm。试件通过两端的夹具与加载装置进行连接,夹具采用 10 mm 厚钢板制作成“T”字形,固定端和试验端夹具分别通过 4 颗和 5 颗 M12 高强螺栓与冷弯型钢进行连接,试件构造图如图 3 所示。

为考察螺钉端距对螺钉抗剪性能的影响,设计了螺钉距结构保温一体板端部边缘为 15 mm 和 25 mm 两种工况^[18-19],其中 15 mm 主要依据《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[20]中的规定:螺钉端距不得小于其直径的 3 倍,对于所用的 ST4.8 螺钉,其端距的最小值为 14.4 mm,同时考虑到墙体骨架采用 C89 型钢,其翼缘宽 38 mm,沿面板周边的螺钉中心至翼缘边缘的最大距离不超过 19 mm,结合安装方便考虑,端距取 15 mm;而 25

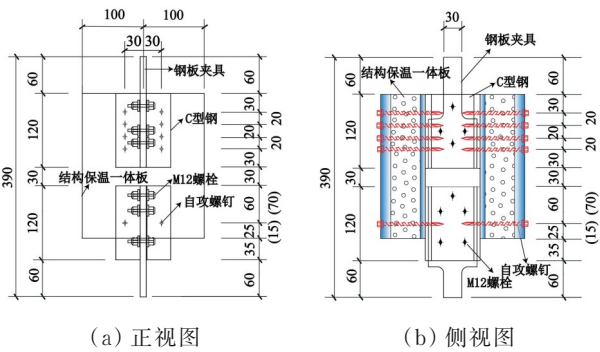


图 3 自攻螺钉连接试件构造
Fig.3 Details of screw connection specimens

mm 则对应墙体内部区域螺钉端距相对充裕的条件。两种工况各制作 3 个重复试件。

自攻螺钉连接试验结果显示所有试件破坏过程均较为相似:加载初期,自攻螺钉出现轻微倾斜;随后内层硫氧镁板靠近螺钉处出现 30°~60°细微裂纹,并向板边缘扩散,内层硫氧镁板端部出现轻微撕裂的现象,螺钉倾斜明显,随着加载位移继续增大,内层硫氧镁板端部完全撕裂,中间聚氨酯发泡保温板端部开始出现鼓曲现象,螺钉倾斜加剧,最终从螺钉孔位置形成 30°~60°裂缝并向着板材端部贯通,发展为聚氨酯发泡保温板边缘的局部豁口,破坏区域接近三角形状,同时钉头陷入外层硫氧镁板内,外层硫氧镁板端部出现裂纹。自攻螺钉连接试件典型破坏特征见图 4。

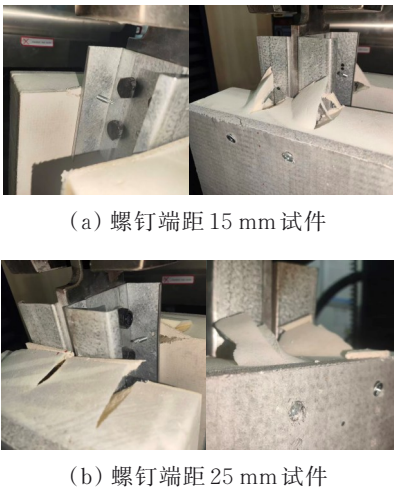
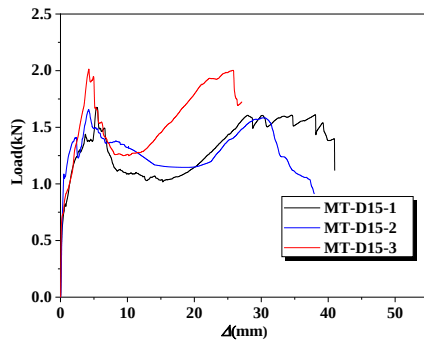


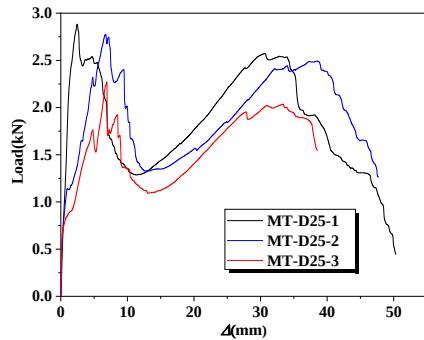
图 4 自攻螺钉连接试件破坏特征
Fig.4 Failure features of screw connection specimens

自攻螺钉连接试件的荷载-位移曲线及试验数据见图 5 与表 3。分析发现,端距为 25 mm 的试件承载力均明显高于对应端距为 15 mm 的试件。从平均值来看,屈服荷载、峰值荷载分别提升约 49.65%、48.31%,这是自攻螺钉冲剪面积随端距增加而增大导致的。同时由于采用的结构保温一

体板为多层复合材料,螺钉抗剪承载力在试验中出现两次下降:首次下降源于内层硫氧镁板端部完全撕裂,对螺钉失去约束;随后由于中间聚氨酯发泡保温板为螺钉提供约束,承载力得到短暂回升;最终因聚氨酯板从螺钉孔处产生贯通至板端的裂缝,对螺钉约束失效,承载力再次下降。



(a) 螺钉端距 15 mm 试件



(b) 螺钉端距 25 mm 试件

图 5 自攻螺钉连接试件荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curve of screw connection specimens

2 冷弯薄壁型钢墙体抗侧性能试验

2.1 试件设计

试验设计 2 片尺寸为 2 440 mm(宽)×3 000 mm(高)的结构保温一体板覆面冷弯薄壁型钢墙体,命名为 SW-1 和 SW-2,两片墙体的所有构造均

一致,分别用于研究在单调和低周往复荷载作用下的抗侧性能。

墙体骨架采用 Q550 冷弯薄壁型钢,中柱、中间立柱和斜撑均为单肢 C89(C89 mm×38 mm×10 mm×1.0 mm)型钢,边柱由双肢 C89 型钢通过双排水平间距为 39 mm、竖向间距为 300 mm 的 ST4.8×32 螺钉拼接而成。顶底导轨和横撑为 U91 型钢(U91×38×1.0 mm),所有杆件通过 ST4.8×16 拉铆钉连接。同时结合实际房屋中安装管线的需求,在距离顶导轨和底导轨 380 mm 以及中间位置处的立柱和斜撑腹板区域开有形状为椭圆形的高度为 80 mm 的走线孔。

墙体覆面板采用 75 mm 厚的结构保温一体板,覆面板拼接方式为 3 块横向面板拼接而成。其中上下两块面板尺寸为 2 440 mm(宽)×900 mm(高),中间面板尺寸为 2 440 mm(宽)×1 200 mm(高),面板与骨架均通过 ST4.8×100 螺钉进行连接,顶底导轨、最外侧边立柱及横向拼缝处螺钉间距为 100 mm,其余区域 300 mm,所有试件均为单面覆板。试件构造详图如图 6 所示。

2.2 试验装置及测点布置

试验加载装置如图 7 所示。墙体试件通过抗拔件、抗拔螺栓以及抗剪螺栓分别与加载顶梁和地梁进行连接,地梁两侧通过地锚螺杆与地面锚固。千斤顶的加载端与加载顶梁通过销轴相连,另一端固定于反力架,试验过程中通过千斤顶将水平荷载施加于墙体试件。加载顶梁两侧设置侧向约束矩管用于防止墙体发生平面外失稳,同时在加载顶梁与矩管之间放置聚四氟乙烯板用于减小二者之间的摩擦。由于本次试验是模拟墙体在平面内的水平地震作用,故仅施加水平方向荷载。

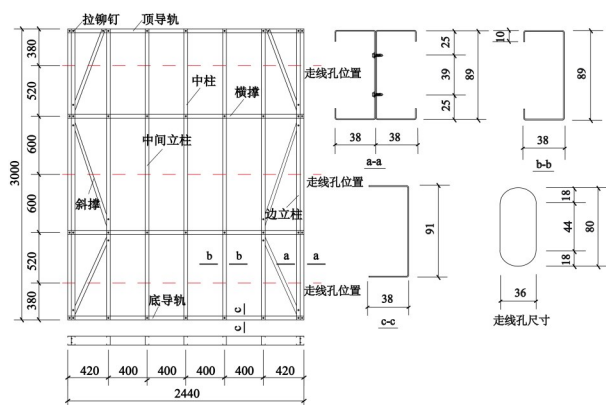
位移计用于测量墙体的整体变形与试验加载装置的可靠性,位移计布置如图 8 所示。其中,位移计 D1 和 D2 分别用于测量加载顶梁和墙体试件顶

表 3 自攻螺钉连接试验试件概况及试验结果

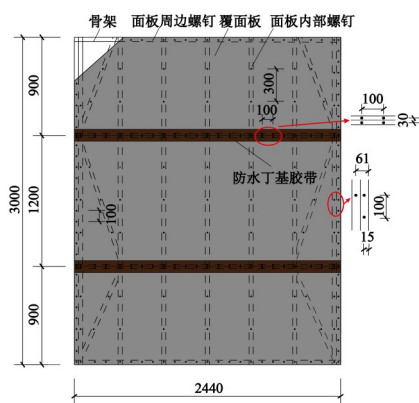
Table 3 Screw connection test specimen overview and test results

试件编号	螺钉端距/mm	$0.2P_{\max}/\text{kN}$	$\Delta_{0.2}/\text{mm}$	$K/(\text{kN}/\text{mm})$	P_y/kN	Δ_y/mm	$P_{\max}/\text{kN}$	$\Delta_{\max}/\text{mm}$
MT-D15-1	15	0.33	0.15	2.20	1.39	2.06	1.66	4.12
MT-D15-2	15	0.35	0.10	3.50	1.31	3.25	1.67	5.49
MT-D15-3	15	0.40	0.08	5.00	1.58	3.13	2.01	4.27
平均值		0.36	0.11	3.27	1.43	2.81	1.78	4.63
MT-D25-1	25	0.58	0.27	2.15	2.54	1.75	2.88	2.42
MT-D25-2	25	0.55	0.17	3.24	2.23	5.05	2.77	6.78
MT-D25-3	25	0.45	0.11	4.09	1.65	5.51	2.27	6.91
平均值		0.53	0.18	2.95	2.14	4.10	2.64	5.37

注: $P_{\max}$ 为峰值荷载, $\Delta_{\max}$ 为对应位移值;自攻螺钉初始刚度 K 取0.2倍 $P_{\max}$ 所对应的割线刚度, $\Delta_{0.2}$ 为对应位移值;屈服荷载 P_y 按能量等效面积法确定,对应为屈服位移 Δ_y 。 $P_{\max}$ 和 P_y 均为四颗螺钉的总承载能力,平均值按四颗螺钉计算。



(a) 试件骨架构造



(b) 试件覆面构造

图 6 墙体试件构造(单位:mm)

Fig.6 Details of wall specimens

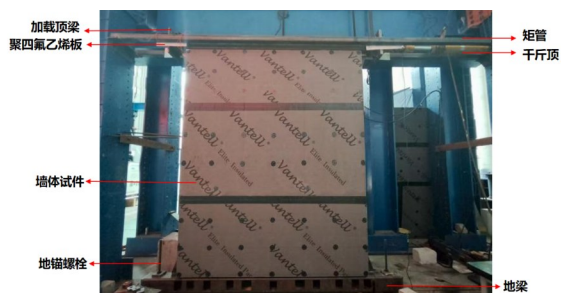


图 7 试验加载装置

Fig.7 Test loading setup

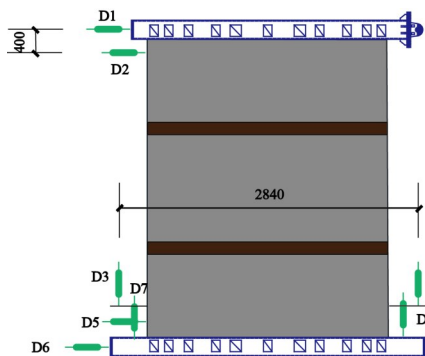


图 8 位移计布置

Fig.8 Arrangement of displacement meters

部的水平位移;D3和D4用于测量墙体两侧端点相对地梁的竖向位移;D5和D6用于测量地梁和墙体试件底部的水平位移;D7和D8用于测量接近墙体边柱地梁部分的竖向位移。

2.3 加载制度

加载制度分为单调与低周往复两种:单调加载采用力-位移双控制,先以2 kN为级差逐级递增,屈服之后,采用位移控制,每级位移增量10 mm,直至荷载降至峰值荷载的85%时终止试验;低周往复加载采用位移控制,其控制位移依据单调试验结果确定,先进行5圈屈服前单循环加载,屈服后按0.5倍屈服位移的幅值增量进行加载,每级位移循环3次,同样当荷载降至峰值荷载的85%时终止试验。

3 抗侧性能试验结果及分析

3.1 单调加载试件试验现象

试件SW-1为单调加载试件,试验现象如图9所示。荷载小于10 kN时无明显试验现象;加载至13 kN时,面板水平接缝出现轻微错动,相应位置处自攻螺钉轻微倾斜,受压侧边柱外侧C型钢下部发生轻微局部屈曲,屈曲位置位于走线孔附近翼缘处,这是由于走线孔的存在削弱了该处腹板截面面积,使其优先屈曲;荷载达到23 kN时,受压侧下部斜撑与中间立柱连接处螺钉严重倾斜,斜撑退出工作(图9(a));荷载达到25 kN时,受压侧边柱下部走线孔附近翼缘外张屈曲加剧(图9(b));荷载达到27 kN时,面板横向接缝错动显著,错动位移约40 mm,面板角部受螺钉挤压破坏严重,周边螺钉开始与面板分离(图9(c)),试件承载力开始下降。



(a) 受压侧下部斜撑与立柱连接处螺钉失效



(b) 受压侧边柱下部翼缘外张屈曲



(c) 面板周边螺钉与面板分离

图 9 试件SW-1破坏特征

Fig.9 Failure features of specimen SW-1

3.2 低周往复加载试件试验现象

试件SW-2为低周往复加载试件,试验现象如图10所示。总体试验现象与试件SW-1基本相同,在往复荷载的作用下,试件表现出典型的累积损伤特征。破坏同样始于受压边柱下部走线孔附近翼缘屈曲,随着循环次数和位移幅值的增加,表现为

自攻螺钉孔的反复挤压(图 10(a))、斜撑逐渐退出工作以及覆面板角部破坏(图 10(b))。最终因边柱屈曲严重、面板周边的自攻螺钉连接失效(图 10(c))导致承载力下降。

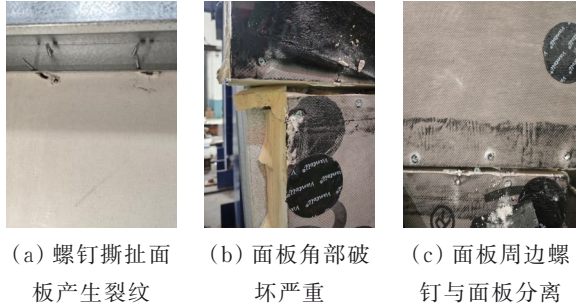


图 10 试件 SW-2 破坏特征

Fig.10 Failure features of specimen SW-2

3.3 试验结果分析

3.3.1 力学性能指标定义

墙体抗侧性能指标列于表 4。实际剪切位移为墙体顶部实测水平位移扣除水平滑动及转动位移

表 4 冷弯薄壁型钢墙体抗侧试验结果

Table 4 Lateral resistance test results of cold-formed thin-walled steel wall

试件编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$\Delta_{\max}/\text{mm}$	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ	E	$S_h/(\text{kN}/\text{m})$	$K/(\text{kN}/\text{m}\cdot\text{rad})$
SW-1	26.09	143.59	22.15	71.64	22.18	171.36	2.39		5.79	1 609.67
SW-2	26.94	141.09	22.31	67.33	22.90	157.10	2.34	1.29	5.74	1 474.24

3.3.2 荷载-位移曲线

单调加载试件荷载-位移曲线如图 12 所示。基于单调加载试验结果可知,加载初期刚度最大,荷载增大至 13 kN 左右时,受压边立柱底部走线孔附件开始出现翼缘屈曲变形,墙体试件的刚度逐渐开始降低,荷载位移曲线开始表现出弹塑性特征;此后由于边柱屈曲持续加剧,墙体荷载增长速率逐渐变慢;到达峰值荷载后,面板周边螺钉倾斜严重,逐渐与面板脱开,面板由于失去螺钉约束在水平接缝处产生较大的相对错动,荷载开始迅速降低。试件在受压边立柱屈曲后仍有较长的上升段,表现出较好的延性。

低周往复加载试件荷载-位移曲线如图 13 所示。从荷载-位移曲线中可以发现,加载初期,试件处于弹性阶段,滞回曲线呈现为饱满的“梭形”,曲线基本无捏缩现象;随着加载位移的增大,墙体两侧边柱最外侧 C 型钢底部受压屈曲,墙体面板横向接缝处螺钉出现倾斜变形,曲线出现了一定的捏缩现象,滞回曲线形状由梭形演变为“反 S”形;随着位移进一步增大,边柱屈曲加剧,面板水平错动更为明显,捏缩效应进一步加大,曲线形状由“反 S”形发展为“Z”形。

之和^[7]。延性系数 μ 取 Δ_u (破坏位移) 和 Δ_y (屈服位移) 之比,单调加载按荷载-位移曲线计算,低周往复加载按骨架曲线确定。单位长度的抗剪承载力 S_h 和单位长度的抗侧刚度 K 参考《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[20] 确定。能量耗散系数 E 通过式 (1) 和图 11 进行计算。

$$E = \frac{S_{ABC} + S_{ADC}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (1)$$

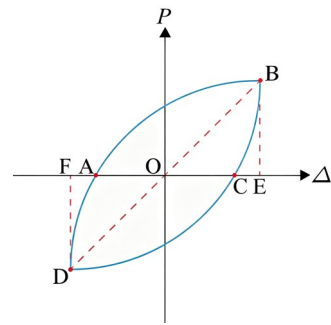


图 11 能量耗散系数 E 计算方法

Fig.11 Calculation method of energy dissipation coefficient E

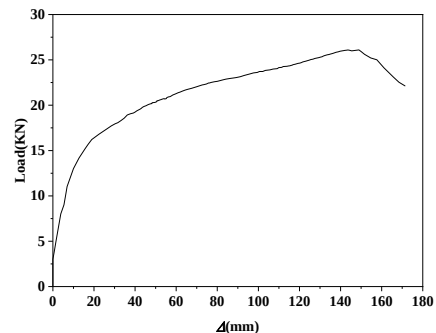


图 12 单调加载试件荷载-位移曲线

Fig.12 Load-displacement curve of monotonic loading specimens

3.3.3 强度、刚度退化曲线

基于低周往复试验数据,试件的强度退化系数 λ 由同一位移级下相邻循环的峰值荷载比值确定。 λ_2 (第 2 循环/第 1 循环) 与 λ_3 (第 3 循环/第 2 循环) 的变化规律如图 14 所示。 λ_2 分布区间 (0.74~1.0) 相比 λ_3 (0.79~1.0) 更宽且波动显著,表明第 2 循环承载力下降更为明显,这主要由首次加载造成的自攻螺钉处不可逆损伤导致;后续循环中损伤发展趋缓, λ_3 曲线因而趋于平缓。

低周往复加载试件刚度退化曲线如图 15 所示。加载初期,由于试件完好,荷载与位移之间呈现线

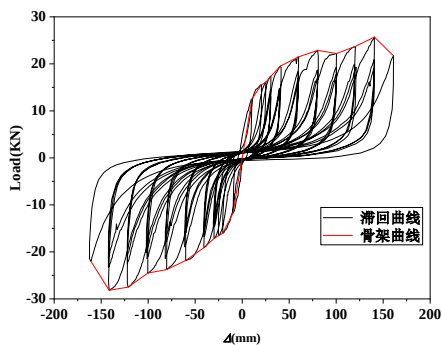


图 13 低周往复加载试件荷载-位移曲线

Fig.13 Load-displacement curve of low cyclic loading specimens

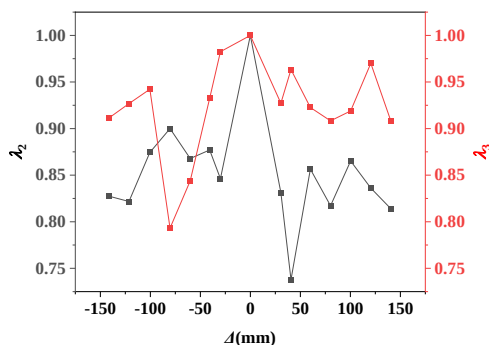


图 14 强度退化曲线

Fig.14 Skeleton degradation curves

性关系,此时试件的刚度较大,刚度退化曲线斜率同样较大,刚度退化较快。随着位移不断增大,由于面板与骨架间的螺钉连接性能降低,螺钉孔处发生滑移,试件的刚度随着位移的增加而降低,但退化速率不断减慢,曲线最终趋于平缓。

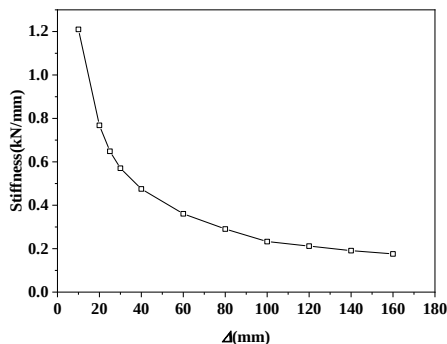


图 15 刚度退化曲线

Fig.15 Stiffness degradation curves

3.3.4 墙体抗侧性能取值建议

结构保温一体板覆面墙体的抗侧刚度和抗剪承载力建议值均取自试验结果的最小值,结果列于表 5。规范《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[20]中规定了单面覆定向刨花板和纸面石膏板的墙体抗侧刚度及抗剪承载力,结果列于表 6。

利用结构力学矩阵位移法可得到顶部总位移

表 5 单面结构保温一体板覆面墙体抗侧性能指标建议值

Table 5 Recommended shear capacity value of wall sheathed with single structural insulation composite panel clad walls

立柱材料	覆面情况	$S_h/$ (kN/m)	$K/$ (kN/m·rad)
Q550	单面 75 mm 结构保温一体板	5.74	1 474.24

表 6 规范 JGJ 227—2011 关于墙体抗侧性能指标的规定

Table 6 The performance indicators for lateral resistance of walls in provisions JGJ 227-2011

立柱材料	覆面情况	$S_h/$ (kN/m)	$K/$ (kN/m·rad)
Q550	单面 9 mm 定向刨花板	6.40	1 450
Q550	单面 12 mm 纸面石膏板	2.90	800

通过对比表 5 和表 6 可以发现:采用结构保温一体板覆面的组合墙体,其抗侧刚度较定向刨花板覆面墙体高 1.67%,较石膏板覆面墙体高 84.28%;其抗剪承载力较定向刨花板覆面墙体低 10.31%,较石膏板覆面墙体高 97.93%。表明结构保温一体板覆面墙体抗侧性能介于二者之间,建议单面 75 mm 结构保温一体板覆面的组合墙体 $S_h=5.74$ kN/m, $K=1\,474.24$ kN/(m·rad)。

4 墙体弹性抗侧刚度理论计算方法

由墙体试验现象可知,结构保温一体板与骨架之间的连接作用较强,试验加载初期水平方向荷载可视为由两者共同承担。基于变形协调关系,墙体弹性抗侧刚度可视为骨架和覆面板刚度直接叠加,即

$$K = K_s + K_b \quad (2)$$

式中: K 为整片墙体的弹性抗侧刚度; K_s 为骨架抗侧刚度, K_b 为覆面板抗侧刚度。

4.1 骨架抗侧刚度理论计算

边立柱与顶、底导轨除采用自攻螺钉连接外,在钢骨架 4 个角部还设置了抗拔件,假定边立柱与导轨之间为刚性连接;中立柱与上、下导轨仅通过自攻螺钉连接,假定为铰接^[21];普通斜撑由于只通过两个自攻螺钉与其他骨架构件连接,节点刚度较小^[22],且试验过程中同样表明斜撑退出骨架工作较早,对墙体的抗侧刚度影响较小,忽略不计;横撑数量对墙体刚度影响较小^[23],为了简化计算量将两道横撑简化为一道横撑。

基于以上假定,冷弯薄壁型钢骨架的计算简化模型如图 16 所示。

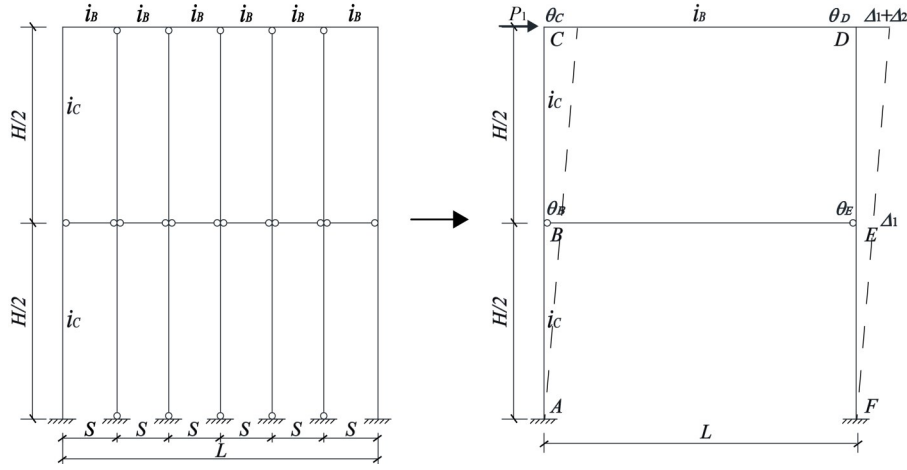


图 16 骨架简化模型

Fig.16 Skeleton simplification model

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{(3\frac{i_B}{i_C} + 1)P_1 H^2}{36i_B + 3i_C} \quad (3)$$

因此,骨架的弹性抗侧刚度可表示为

$$K_s = \frac{P_1}{\Delta} = \frac{36i_B + 3i_C}{(3\frac{i_B}{i_C} + 1)H^2} \quad (4)$$

式中: i_C 和 i_B 分别为边立柱和上导轨的线刚度, 计算式为 $i_C = 2E_s I_C / H$, $i_B = E_s I_B / L$, 其中 E_s 为钢材弹性模量, I_C 和 I_B 分别为边立柱和上导轨截面的惯性矩, H 为骨架高度, L 为边立柱间距。

4.2 覆面板抗侧刚度理论计算

覆面板的变形模式主要为剪切变形, 其剪切变

形包括两部分: 一部分是水平荷载作用下, 覆面板自身的弹性剪切变形 Δ_m ; 另一部分是自攻螺钉与骨架之间的摩擦力不足, 螺钉发生倾斜, 导致覆面板与骨架之间发生相对滑移引起的剪切变形 Δ_z 。

由于上下面板拼缝处自攻螺钉所受剪力大小相等, 方向相反, 故可等效为整块面板考虑, 覆面板计算简化模型如图 17 所示。由剪切胡克定律可得到

$$\Delta_m = \frac{P_2 H}{t L G} \quad (5)$$

式中: H 为覆面板总高度, mm; t 为覆面板总厚度, mm; L 为覆面板总宽度, mm; G 为面板剪切模量, MPa, 取弹性模量的 0.4 倍。

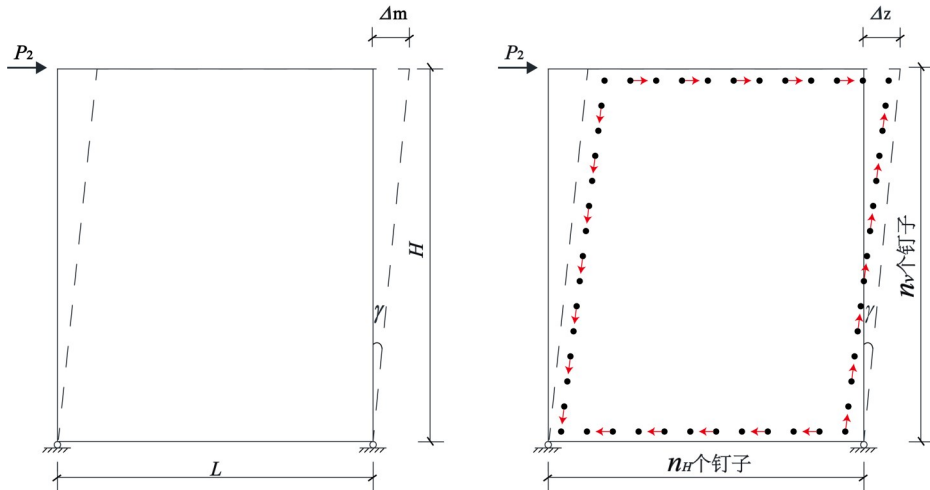


图 17 覆面板简化模型

Fig.17 Board simplification model

在计算 Δ_z 时作出如下假定: 只考虑覆面板周边自攻螺钉产生的滑移; 面板上下两侧自攻螺钉仅考虑水平方向受力, 左右两侧自攻螺钉仅考虑竖直方向受力, 且每个自攻螺钉均匀受力; 墙面板的水平方向和垂直方向的螺钉间距相同。

根据虚功原理可得到

$$\Delta_z = \frac{2P_2}{n_H K} \left(\frac{H}{L} + 1 \right) \quad (6)$$

式中: n_H 为水平方向上螺钉的总数量, 个; K 为单颗自攻螺钉的抗剪刚度, kN/mm。

由于计算 Δ_z 的假定成立条件是基于弹性小变形阶段的位移协调关系,在水平位移极小的弹性阶段,覆面板自身平面内剪切刚度较大,可近似将加载端的微小位移均匀地传递至覆面板周边自攻螺钉,使得各螺钉在其受力方向上的局部变形量趋于一致,进而可简化为受力均等,从而避免在计算中引入难以求解的螺钉群非均匀分布系数。

然而,对于所用结构保温一体板,因其厚度方向尺寸较大,自攻螺钉所承受的剪力会使其同时承受弯矩,产生额外的局部变形,以及面板内部螺钉的滑移量被忽略,这些因素均会造成理论计算值与试验实测值之间存在一定误差。为此结合试验结果引入 Δ_z 的修正系数 Φ_z

$$\Phi_z = \frac{t}{t_1 + t_2} - 1 \quad (7)$$

式中: t 为结构保温一体板总厚度, mm; t_1 为内层硫氧镁板厚度, mm; t_2 为外层硫氧镁板厚度, mm。

因此,覆面板的弹性抗侧刚度可表示为

$$K_b = \frac{P_2}{\Delta_m + \Phi_z \Delta_z} = \frac{1}{\frac{2\Phi_z}{n_H K} \left(\frac{H}{L} + 1 \right) + \frac{H}{tLG}} \quad (8)$$

将式(4)和式(8)直接叠加,可得到整个墙体的弹性抗侧刚度理论计算值

$$K = \frac{36i_B + 3i_C}{(3\frac{i_B}{i_C} + 1)H^2} + \frac{1}{\frac{2\Phi_z}{n_H K} \left(\frac{H}{L} + 1 \right) + \frac{H}{tLG}} \quad (9)$$

4.3 计算方法校验

墙体试验中弹性抗侧刚度取墙体荷载位移曲线位移达到 1/300 墙高(文中墙高为 3 000 mm)时,对应的荷载和位移的比值。将材性数据、自攻螺钉数据及墙体数据代入式(9),墙体抗侧刚度理论计算结果与试验结果对比见表 7。

表 7 墙体试件抗侧刚度试验值与理论值比较

Table 7 Comparison of test and theoretical values of lateral stiffness of wall specimens

试件编号	抗侧刚度/(kN/mm)		试验值/理论值
	试验值	理论值	
SW-1	1.30	1.26	1.03
SW-2	1.32	1.26	1.05

对比发现,理论值与试验值有一定误差,且理论值均偏小,原因在于:一方面,试验过程中存在安装误差及试验装置上的缺陷,且试件之间螺钉间距也存在细微差异;另一方面,计算模型中将斜撑和横撑进行简化处理,而二者在弹性阶段实际仍存在一定刚度贡献,因此会导致理论计算值略低于试验值,计算结果偏于保守。但总体误差均在 5% 以内,

说明该理论计算方法可以使用于该类墙体。

5 结论

1) 自攻螺钉连接试验显示当螺钉端距从 15 mm 增至 25 mm 时,所有试件破坏模式均为板边撕裂,屈服荷载、峰值荷载平均值分别提升约 49.65%、48.31%,螺钉端距对螺钉连接性能影响显著。

2) 由于走线孔对立柱腹板区域产生一定削弱,墙体抗侧性能试验中两片墙体的破坏均始于受压边柱底部走线孔附近的局部屈曲,在骨架设计时,在满足规范要求的前提下,可以考虑适当提高走线孔位置,或者在走线孔位置处做加强措施,更有利于发挥墙体抗侧性能。

3) 两片墙体在层间位移角达到 1/300 时,均处于弹性范围,在层间位移角达到 1/50 时,未发生较为严重的破坏,可以继续承载。提出的结构保温一体板覆面墙体满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设计目标。

4) 基于试验结果,提出了单面 75 mm 结构保温一体板覆面墙体抗剪承载力为 5.74 kN/m,抗侧刚度为 1 474.24 kN/(m·rad)。

5) 基于叠加原理提出的冷弯薄壁型钢组合墙体弹性阶段抗侧刚度计算方法,理论计算值与试验值误差在 5% 以内,验证了该计算方法的合理性。

参考文献

- [1] 李元齐,徐厚军.我国冷弯型钢结构发展现状 & 展望[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 91-101.
Li Y Q, Xu H J. Research and development of cold-formed steel structures in China[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 91-101. (in Chinese)
- [2] Serrette R, Ogunfunmi K. Shear resistance of gypsum-sheathed light-gauge steel stud walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 383-389.
- [3] Velchev K, Comeau G, Balh N, et al. Evaluation of the AISI S213 seismic design procedures through testing of strap braced cold-formed steel walls[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(10/11): 846-856.
- [4] 周绪红,石宇,周天华,等.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, 2010, 43(5): 38-44.
Zhou X H, Shi Y, Zhou T H, et al. Experimental study of the shear resistance of cold-formed steel stud walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 38-44. (in Chinese)
- [5] 石宇,周绪红,聂少锋,等.冷弯薄壁型钢组合墙体的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊 1): 124-129.

- Shi Y, Zhou X H, Nie S F, et al. Research on the seismic performance of cold-formed steel stud wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup 1): 124-129. (in Chinese)
- [6] 马全涛, 涂涛, 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(自科版), 2018, 15(17): 59-64, 6.
Ma Q T, Tu T, Yao X M, et al. Research on lateral resistance of gypsum sheathed cold-formed thin-walled steel wall[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(17): 59-64, 6. (in Chinese)
- [7] Zhang X H, Ren G S, Zhang E Y. Experimental study on seismic performance of thin-walled steel-straw board composite walls with built-in steel plate[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107407.
- [8] Xing Y H, Wang W Y, Zhao O. Experimental, numerical and analytical studies on full-scale cold-formed steel center-sheathed shear walls subjected to combined loading[J]. Engineering Structures, 2024, 307: 117910.
- [9] Shi Y, Ran X W, Xiao W, et al. Experimental and numerical study of the seismic behavior of cold-formed steel walls with diagonal braces[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159: 107318.
- [10] Ran X W, Shi Y, Li Z L, et al. Experimental, theoretical, and numerical investigation of a novel self-centering energy-dissipative brace[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 234: 109691.
- [11] Sun X F, Gan Z Z, Luo L, et al. Lateral performance of plywood-sheathed cold-formed steel shear wall: Experimental and numerical investigations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2026, 240: 110279.
- [12] Derveni F, Gerasimidis S, Peterman K D. Behavior of cold-formed steel shear walls sheathed with high-capacity sheathing[J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111280.
- [13] 刘述宏. 覆不同轻质复合面板的冷弯薄壁C型钢组合墙体抗震性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
Liu S H. Research on seismic performance of cold-formed thin-wall C type steel composite wall covered with different light composite panels[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 折志伟. 玄武岩纤维板覆面冷弯薄壁型钢组合墙体抗侧性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
She Z W. Study on lateral resistance of basalt fiberboard cladding cold-formed thin-walled steel composite wall[D]. Chongqing: Chongqing University, 2024. (in Chinese)
- [16] 周天华, 刘向斌, 杨立, 等. LQ550 高强冷弯薄壁型钢组合墙体受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 62-68.
Zhou T H, Liu X B, Yang L, et al. Experimental research on shear behavior of LQ550 high strength cold-formed steel composite walls[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(12): 62-68. (in Chinese)
- [17] 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—2010 Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [18] 石宇, 王身伟, 刘永健. 冷弯薄壁型钢单颗自攻螺钉抗剪连接性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 57-64.
Shi Y, Wang S W, Liu Y J. Research on shear behavior of single tapping screw connection in cold-formed thin-wall steel structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 57-64. (in Chinese)
- [19] 熊刚, 折志伟, 李环宇, 等. 冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 134-143.
Xiong G, She Z W, Li H Y, et al. Experimental study on self-tapping screw connection performance of cold-formed thin-walled steel-structure fireproof integrated board[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 134-143. (in Chinese)
- [20] JGJ 227—2011 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程[S].
JGJ 227—2011 Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings[S]. (in Chinese)
- [21] 彭志明, 陈忠范, 徐志峰, 等. 装配式冷弯薄壁型钢-泡沫混凝土组合墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 177-188.
Peng Z M, Chen Z F, Xu Z F, et al. Experimental study on seismic behavior of prefabricated cold-formed thin-walled steel-foam concrete composite walls[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(7): 177-188. (in Chinese)
- [22] 刘斌. 喷涂式轻质砂浆-冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能试验研究与理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
Liu B. Experimental research and theoretical analysis on seismic behavior of cold-formed-steel-framed shear walls sprayed with lightweight mortar[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)
- [23] 姚迎钦. 镁晶板覆面冷弯薄壁型钢组合墙体抗侧性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Yao Y Q. Study on lateral resistance of cold-formed steel frame shear walls sheathed with magnesium crystal plate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)