

中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪性能研究

袁泉^{1†}, 王泽辉¹, 杨逸², 索妮¹, 朱洪磊¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 为了提高 C 形冷弯薄壁型钢墙体抗剪承载力和抗侧刚度, 提出了一种新型中间“Z”字形支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体, 并基于低周反复试验, 采用 ABAQUS 有限元软件建立了墙体模型, 通过墙体破坏特征、荷载-位移曲线和墙体最大抗剪承载力三方面验证了模型的准确性, 进一步分析了“Z”字形斜撑、钢材厚度、横撑以及竖向荷载对墙体抗剪性能的影响。研究表明: 墙体抗剪承载力主要由“Z”字形斜撑、填充材料、内墙板三部分承担, 墙面板、填充材料与钢框架相互约束, 共同工作; “Z”字形斜撑可以有效提高墙体抗剪承载力, 在空框架墙体中作用尤其明显; 随着钢材厚度的增大, 墙体抗剪承载力逐渐提高, 但影响程度随着钢材厚度的增加而减小; 横龙骨和竖向荷载对墙体抗剪承载力的影响较小; 竖向荷载的增大会降低墙体抗剪承载力, 但较低幅度较小; 推导出了适用于新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体的抗剪承载力计算公式, 并提出了墙体构造要点。

关键词: 冷弯薄壁型钢灌浆墙体; 格构式钢龙骨; 有限元分析; 抗剪承载力; 构造要点

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Study on Shear Resistance of Cold-formed Thin-walled Steel Grouting Wall with Intermediate Support

YUAN Quan^{1†}, WANG Zehui¹, YANG Yi², SUO Ni¹, ZHU Honglei¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Construction Third Engineering Bureau Green Industry Investment Co Ltd, Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to improve the shear bearing capacity and lateral stiffness of C-shaped cold-formed thin-walled steel structure, a new type of Z-shaped cold-formed thin-walled steel grouting wall with intermediate support is proposed. Based on cyclic loading experiment, the wall model is established by ABAQUS finite element software. Then, the accuracy of the model is verified through three aspects, namely, the wall failure characteristics, load-displacement curve and the maximum shear bearing capacity of the wall. The influence of Z-shaped diagonal brace, steel thickness, transverse brace and vertical load on the shear performance of the wall is analyzed. The results show that the shear bearing capacity of the wall is mainly provided by three parts: Z-shaped diagonal brace, filler material and inner wall panel; the wall panel, filler material and steel frame are mutually constrained and work together; Z-shaped diagonal brace can effectively improve the shear bearing capacity of the wall, which is especially obvious in the empty

* 收稿日期: 2020-06-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701609), National Key Research and Development Projects(2016YFC0701609); 北京交通大学 2019 年研究生教育教学研究项目, 2019 Graduate Education and Teaching Research Project of Beijing Jiaotong University

作者简介: 袁泉(1974—), 男, 陕西汉中, 北京交通大学副教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: qyuan@bjtu.edu.cn

frame wall; with the increase of steel thickness, the shear bearing capacity of the wall gradually increases, but the influence decreases with increase of the steel thickness; the transverse keel and vertical load have little influence on the shear bearing capacity of the wall; with the increase of vertical load, the shear bearing capacity of the wall reduces, but the reduce range is small; the shear bearing capacity calculation formula that is applicable to the new type of cold-formed thin-walled steel grouting wall with intermediate support is deduced, and the key points of the wall structure are put forward.

Key words: cold-formed thin-walled steel grouting wall; lattice steel keel; finite element analysis; shear bearing capacity; key points of the structure

冷弯薄壁型钢结构是美国、日本等发达国家重要的住宅形式,是一种公认的绿色结构体系,但在我国冷弯薄壁型钢结构使用较少,接受程度低,住宅比例不足1%^[1],究其原因主要是冷弯薄壁型钢结构存在抗剪承载力低、建筑质量通病多、隔音保温效果差、敲击“空鼓”等问题^[2-3]。针对目前冷弯薄壁型钢结构现存的问题,本文提出了一种具有高抗剪性能、防火防腐、保温隔热一体化等特点的新型装配式建筑结构体系——新型中间支撑冷弯薄壁型钢结构体系。该体系对传统的钢带斜撑进行改良,优化龙骨形式,采用格构柱式竖龙骨,在竖龙骨中间插入“Z”字形斜撑,提高龙骨的整体抗剪能力。通过灌注轻质保温浆体材料与钢骨架形成一体的复合墙板,能显著提高钢骨架的承载力,并对冷弯薄壁型钢有良好的支撑作用,防止其过早屈曲。

为了研究中间支撑对冷弯薄壁型钢墙体抗剪性能的影响,国内外学者针对带中间支撑冷弯薄壁型钢墙体及其组合墙体做了一系列的试验研究。Serrette^[4-5]、Tian^[6]、Fülöp^[7]等通过试验研究发现,“X”型钢拉条可以提高墙体抗剪承载力,但滞回曲线存在严重的“捏拢”效应,并且单边使用会引起墙体偏心受力;王宇航^[8]、徐云鹏^[9]等分别对墙体设置了不同形式的斜撑,试验结果表明,增加斜撑能够有效提高冷弯薄壁型钢墙体的承载力、刚度和耗能能力等抗震性能;郝际平等^[10-11]通过对带钢拉条和斜撑的两种墙体进行低周反复加载试验发现,在钢框架墙体中两个方向的钢带交替受力,而在喷涂轻质砂浆墙体中,外侧砂浆可以限制受压钢带的面外变形,提高墙体抗侧能力,斜撑对墙体抗剪性能的贡献则取决于连接节点的强度;周绪红等^[12]对低层轻钢房屋进行了有限元模拟,指出增设斜撑的墙体构造形式可有效提高房屋的动力特性,减小其加速度及位移响应。

目前,国内一些学者^[13-20]分别围绕冷弯薄壁型钢结构中楼盖的计算方法、不同形式墙体的抗剪性能和有限元模拟以及整体结构的设计方法进行了一系列试验研究与理论分析,得到了较为完善的设计方法,但对于带中间支撑冷弯薄壁型钢墙体抗剪性能的研究尚处于起步阶段,并且缺乏统一的抗剪承载力计算方法。因此,本文在已完成试验的基础上^[21],对墙体抗剪性能进行了进一步研究,通过ABAQUS有限元软件对墙体抗剪承载力影响因素进行变参数分析,结合试验结果,分析了各参数对于墙体抗剪承载力的贡献,推导出适用于本文新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪承载力简化计算公式,并提出了墙体构造要点。

1 墙体概况及受剪机理分析

1.1 新型冷弯薄壁型钢龙骨概况

本文提出的新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体对钢龙骨进行了优化创新,其改变了传统钢龙骨形式。在传统冷弯薄壁型钢墙体中,钢龙骨主要包含C形钢和U形钢两种,其中C形钢常用作墙龙骨,其截面腹板垂直于墙表面,顶梁、底梁或边梁等非承重构件则多采用U形钢,钢框架内部以及钢框架与墙面板之间常采用自攻螺钉进行直接连接;而本文墙体提出了一种格构式钢龙骨,其截面为组合截面,通过自攻螺钉将内部的连接件和外侧的分肢连接为整体,连接件的间距根据外侧板材的尺寸可自由调整,如图1所示。其中竖龙骨为双肢构件,其分肢截面形式为“帽”形,内部连接件为矩形钢管;立柱为四肢构件,其分肢截面形式为“W”形,内部连接件为方钢管。与传统单一龙骨相比,格构式龙骨具有更高的承载力和抗扭刚度,在同等承载力要求下,所用钢材也少

于传统龙骨.

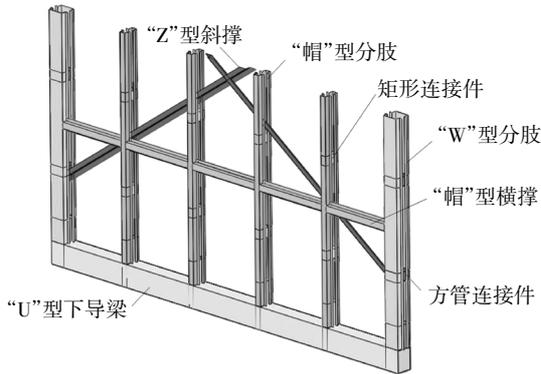


图1 新型钢龙骨

Fig.1 New steel keel

此外, 本文墙体钢龙骨采用了一种新型刚性中间支撑——“Z”字形斜撑. 上述学者^[4-12]通过试验研究与理论分析发现, 墙体中通过设置支撑可以明显

提高抗剪承载力, 但现有钢支撑都存在一定弊端, 例如钢拉条单边使用时会引起墙体偏心受力, 并且由于墙体角点处构造复杂, 施工不便; C形钢支撑由于构造形式不同, 会削弱钢框架的整体性或造成钢材的浪费. 为了解决这些弊端, 提高墙体的抗剪性能, 本文提出了“Z”字形斜撑, 其巧妙地由格构式龙骨中间穿过, 位于钢骨架中心, 通过螺钉与龙骨连接在一起, 有效解决了钢拉条偏心、角点连接复杂等问题, 进一步增强了钢框架的整体稳定性, 显著提高了墙体的抗剪承载力, 并且“Z”形钢自重轻, 便于安装运输, 具有一定的经济性.

1.2 试验结果

课题组前期进行了5片1:1冷弯薄壁型钢灌浆墙体的低周往复荷载试验^[21], 试验简介如表1所示, 试件破坏特征及骨架曲线如图2所示.

表1 试验简介

Tab.1 Brief introduction of experiment

试件编号	试件描述	$b_w \times h_w \times t_w / (m \times m \times mm)$	抗侧刚度 / $(kN \cdot mm^{-1})$	最大抗剪承载力 / kN	层间位移角 θ_n	延性系数 μ
SW-1	标准墙体	3×3×220	12.46	155.75	1/54	5.37
SW-2	外挂玻璃墙体	3×3×220	12.94	157.71	1/50	7.11
SW-3	无填充材料墙体	3×3×220	2.46	47.17	1/30	5.12
SW-4	无内外挂板墙体	3×3×200	9.03	109.00	1/70	5.49
SW-5	高宽比为1.5墙体	2×3×220	7.43	75.64	1/63	5.15

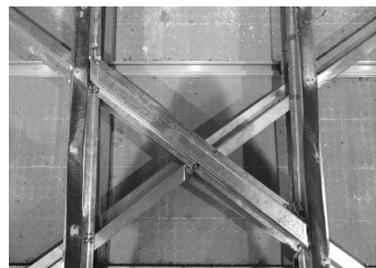
注: b_w, h_w, t_w 分别为墙体宽度、高度和厚度.



(a) 试件 SW-1 立柱撑屈曲



(b) 试件 SW-2 面板错动



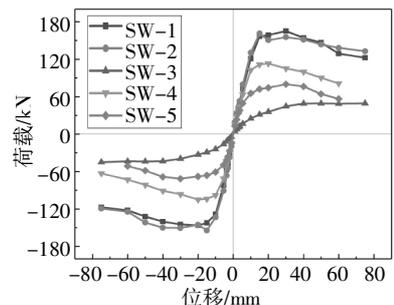
(c) 试件 SW-3 中部斜撑断裂



(d) 试件 SW-4 墙面裂缝分布



(e) 试件 SW-5 墙面板与墙体脱离



(f) 试件骨架曲线对比

图2 试件破坏特征和骨架曲线

Fig.2 Failure characteristics and skeleton curve of specimens

将本文墙体试验结果与文献[11]、文献[22]中墙体的进行对比,结果如表2所示.从表2可知,本文提出的墙体与传统钢龙骨填充墙体相比,抗震性能明显提高.墙体单位抗剪承载力分别比文献[11]、文献[22]中的墙体提高了79%、122%,抗侧刚度分别提高了142%和141%,而延性系数与文献[22]中的墙体相比降低了31%,这是因为斜撑的设置能够显著提

高墙体的抗侧刚度,减小墙体在水平作用下的变形,当同时设置斜撑时,本文中的新型龙骨墙体延性系数比文献[11]中的墙体提高了123%,这表明本文提出的新型龙骨墙体不仅具有较好的抗剪承载力,同时其在水平作用下的延性也较为突出,具有优越的抗震性能.

表2 试验结果对比

Tab.2 Comparison of test results

墙体来源	龙骨形式	填充材料	墙面板材料	钢材类型	单位抗剪承载力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	抗侧刚度/ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	延性系数 μ
本文	新型钢龙骨+斜撑	聚苯颗粒泡沫混凝土	石膏板+瓷砖	Q235	51.92	12.46	5.37
文献[11]	传统钢龙骨+斜撑	EPS板+喷涂轻质砂浆	喷涂轻质砂浆+抹灰	Q235	28.96	5.14	2.41
文献[22]	传统钢龙骨	轻质脱硫石膏改性材料	石膏板+OSB板	Q235	23.35	5.17	7.82

1.3 墙体受剪机理分析

在水平作用下,钢框架、填充材料和墙面板三部分相互约束,共同工作.其中,墙面板与墙体依靠螺钉连接,然而螺钉通常会发生内陷、滑移等现象,一旦螺钉破坏,墙面板则退出工作,而在本文墙体中,墙面板破坏严重,这表明墙面板与墙体连接较好,墙面板充分受力.聚苯颗粒泡沫混凝土作为一种脆性材料,其自身刚度低,力学性能较差,但通过与钢框架浇筑在一起,两者相互约束,充分发挥二者的优点,对墙体的刚度贡献超过其自身刚度,起到“1+1>2”的作用,可以有效提高墙体承载力.此外,在钢框架中,上下导梁与横撑主要作用是为墙体各构件提供更好的连接,并不直接承受侧向力,只有立柱和斜撑作为主要构件承担水平作用,通过应变分析可知,立柱受力沿高度变化较大,在加载过程中荷载主要集中于底端,并形成“塑性铰”,最终发生破坏.而斜撑沿长度受力均匀,在水平作用下承受较大剪力,这说明斜撑对墙体抗剪承载力的贡献程度优于立柱,斜撑的布置方向呈“X”形,可以有效抵挡斜裂缝的展开与延伸,在无填充材料或墙面板的墙体中,斜撑出现被剪断现象,表明斜撑承担的水平作用明显增大,其对墙体抗侧刚度的提高具有显著作用.

2 新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体有限元模拟

2.1 有限元模型建立

本文采用ABAQUS建立模型.冷弯薄壁型钢构

件、瓷砖、石膏板均采用S4R壳体单元;聚苯颗粒泡沫混凝土采用C3D8R实体单元.在本文提出的新型龙骨墙体中,填充材料连通为整体,而不是被传统立柱分割为若干单元格的形式,并且试件破坏时,填充材料与钢框架未发现明显接触破坏,因此模型忽略接触的影响,通过merge命令将钢框架合并成一个part,再内置(embedded)到填充材料中,模拟钢框架中现浇聚苯颗粒泡沫混凝土.外墙板采用断桥可调式定位部件进行安装,试验过程中未发现明显破坏,分析可知,外墙板对墙体承载力贡献较少,因此采用绑定(tie)约束到钢框架上.而内墙板与钢框架间的自攻螺钉连接模拟采用创建WireFeature的方法模拟,先将螺钉连接两点进行WireFeature定义,再赋予WireFeature连接属性,连接属性参考课题组前期所做自攻螺钉抗剪试验,该方法可以有效模拟弹簧连接,并且定义三个方向的刚度.结合试验装置,约束墙体下主梁底面 X 、 Y 、 Z 三个方向的平动自由度和绕 X 、 Y 、 Z 的转动自由度;约束顶梁沿 X 和 Z 方向的平动自由度.此模型中对加载方式进行了简化,墙体上主梁顶面与分配梁底面采用绑定(tie)约束,并将分配梁顶面耦合于一点,对耦合点施加水平位移;竖向荷载以均布荷载形式作用在分配梁上.钢材的本构模型采用理想弹塑性模型,其材料特性按照材性试验实测值输入,弹性模量 E 为 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比取为0.3.聚苯颗粒泡沫混凝土采用ABAQUS软件自带的混凝土损伤模型,受压曲线根据材性试验结果输入,受拉曲线参考受压曲线,取受压应力的1/10,泊松比近似取为0.3.石膏板和瓷砖的材料特性

见表3.此外,考虑模型几何非线性,在分析步中打开几何大变形开关.

表3 墙面板的材料特性

Tab.3 Material behavior of wall panels

材料	弹性模量/MPa	材料强度/MPa	泊松比
石膏板	3 036.67	5.59	0.3
瓷砖	7.2×10^4	35	0.3

2.2 有限元模型验证

按照上述建模方式,分别对试件SW-1、SW-3以及SW-4进行单调荷载作用下的有限元分析,应力云图与试验破坏特征对比如图3所示.从应力图中可以看出,SW-1钢骨架立柱与斜撑连接处发生破坏,竖龙骨下部屈曲,墙面板与钢骨架在东侧底部螺钉连接处应力较大;SW-3钢骨架受拉斜撑在立柱连

接处以及中部受力较大,而受压斜撑则失稳屈曲;SW-4填充材料下部破坏较为严重,沿对角线形成斜向受压区.与试验结果对比可知,模拟得到的破坏现象与试验中墙体的破坏特征基本吻合,能够较好反应墙体的受力特性.

从图4可以看出,有限元模拟得到的荷载-位移曲线与试验所得曲线走势基本一致,其中SW-1、SW-4仅在下陷段与试验结果存在较大差异.初步分析其主要由两部分原因造成,一是忽略了墙板间的拼接影响.实际墙体一旦墙板拼接处发生破坏,相应墙板随即退出工作,导致墙体承载力下降较快;二是简化的将钢框架嵌入填充材料中,填充材料的开裂破坏会导致钢骨架失去约束,进而影响墙体的承载能力.此外,墙体极限荷载相差较小,误差在5%以内,如表4所示.总体而言,本文模拟结果与试验结果吻合较好,墙体模型的建立方法较为合理.

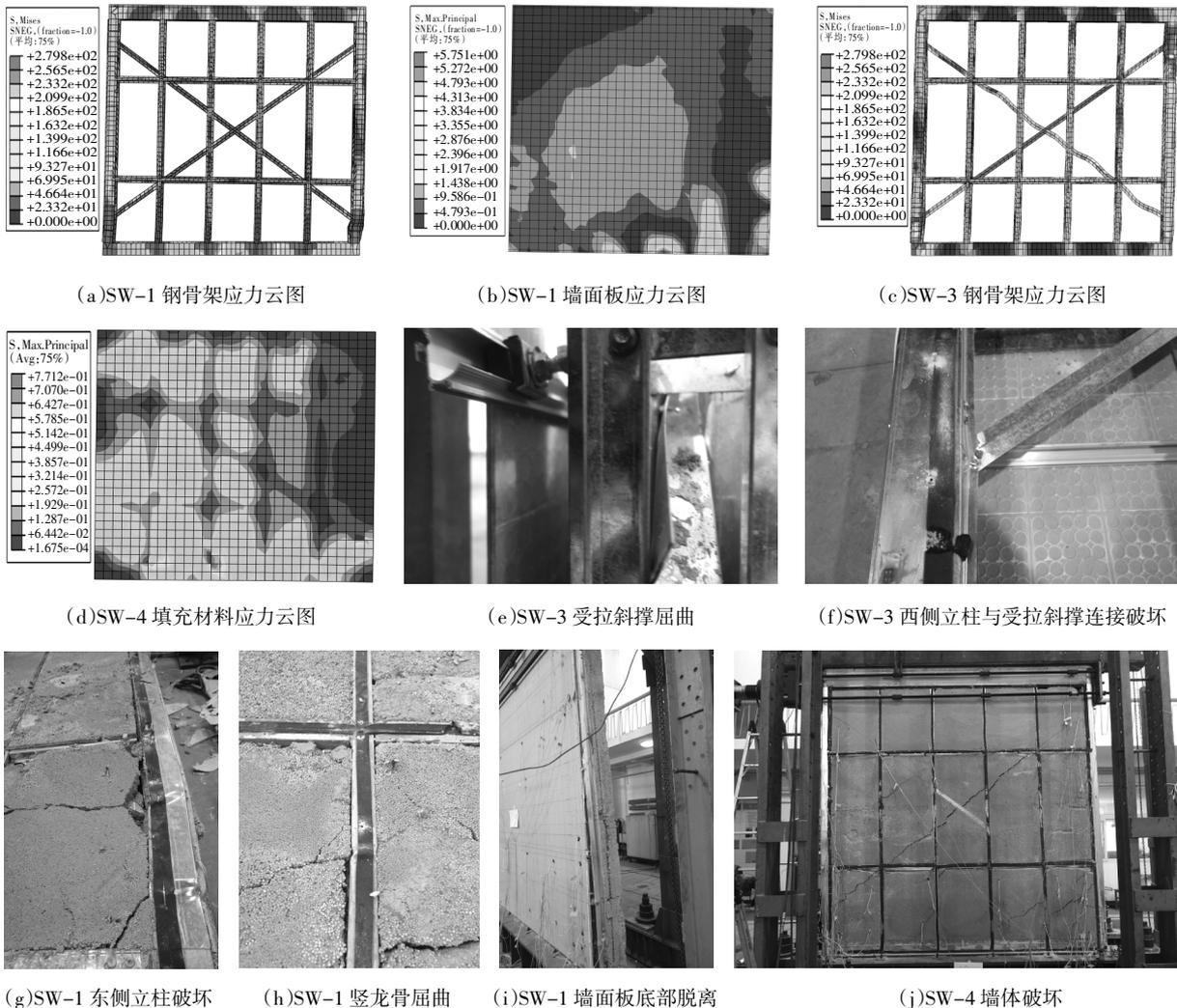


图3 墙体应力云图与试验破坏特征对比

Fig.3 Comparison of wall stress nephogram and experimental failure characteristics

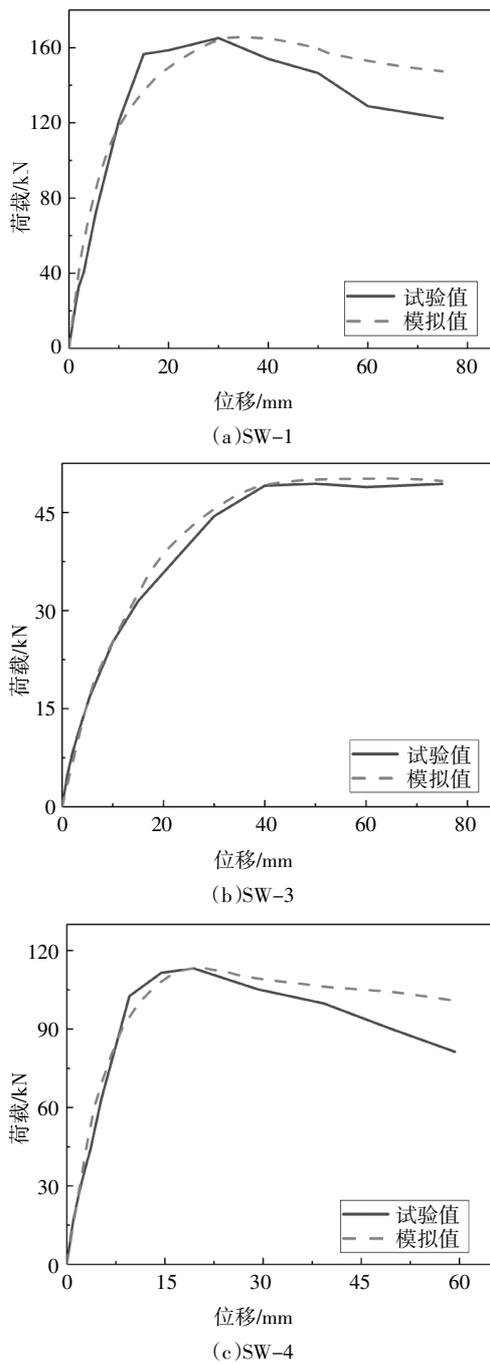


图 4 各墙体试验与模拟结果对比

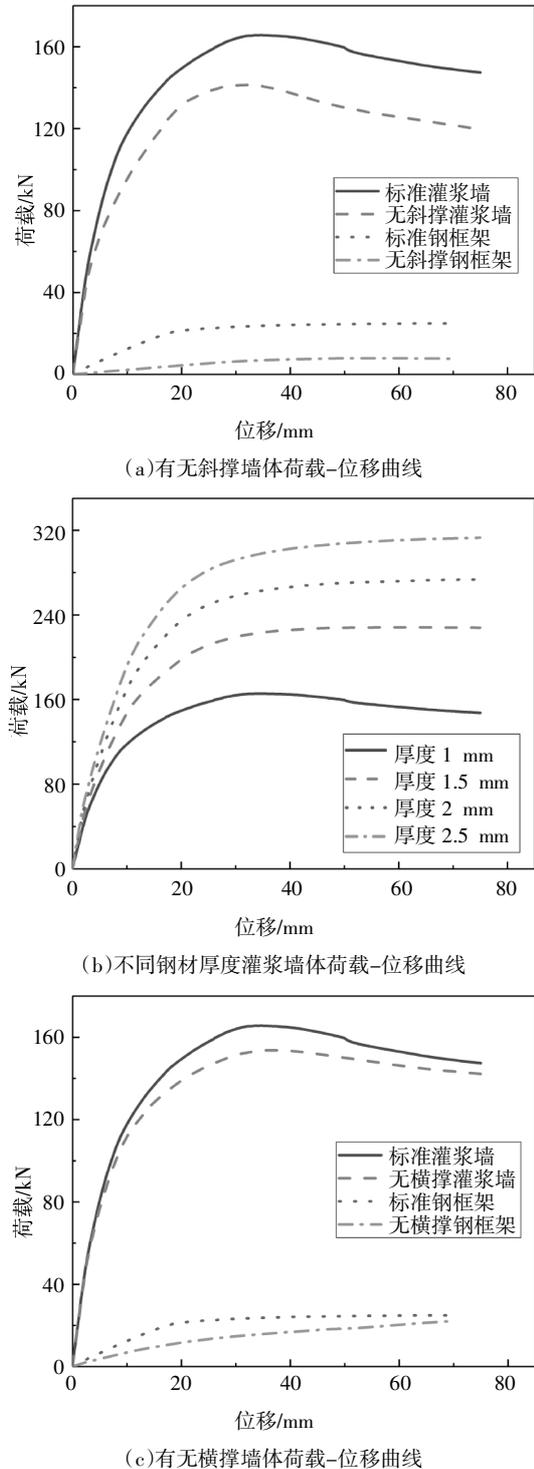
Fig.4 Comparison of test and simulation results of each wall

表 4 各墙体极限荷载及对应位移对比
Tab.4 Comparison of ultimate load and corresponding displacement of each wall

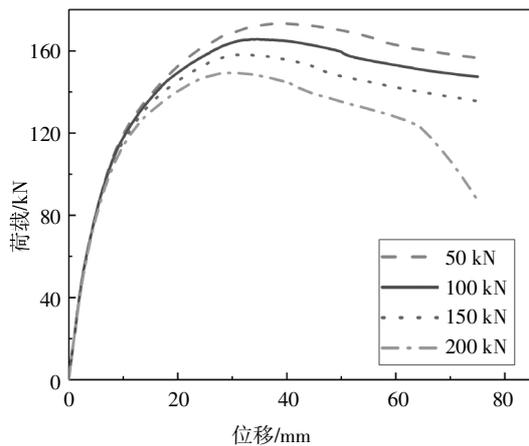
	SW-1		SW-3		SW-4	
	P/kN	Δ/mm	P/kN	Δ/mm	P/kN	Δ/mm
试验值	165.19	29.92	49.38	49.81	113.19	19.42
模拟值	165.63	33.65	50.18	64.56	113.39	20.18
误差/%	0.27	12.46	1.62	29.61	0.18	3.91

2.3 墙体抗剪承载力影响因素分析

本文通过墙体破坏特征、荷载-位移曲线和墙体最大抗剪承载力三方面对比分析,验证了有限元模型的准确性,并基于此模型分析了斜撑、钢材厚度、横撑、竖向荷载等因素对墙体抗剪承载力的影响,得到的墙体荷载-位移曲线如图 5 所示。



(c) 有无横撑墙体荷载-位移曲线



(d)不同竖向荷载作用灌浆墙体荷载-位移曲线

图5 墙体荷载-位移曲线对比图

Fig.5 Comparison of wall load displacement curves

通过对有限元结果分析可知,水平作用下,斜撑对墙体抗剪能力的提高具有显著作用,通过设置中间“Z”字形斜撑,可以有效抵抗墙体在加载过程中受到的剪力,在空框架墙体中尤其明显,与无斜撑空框架墙体相比,带斜撑的墙体抗剪承载力提高幅度达215%,而在灌浆墙体中,虽然填充材料与钢框架的相互作用在一定程度上削弱了斜撑对于墙体抗侧刚度的贡献,但是斜撑的设置有效地抑制了斜裂缝的发展与延伸,使得墙体的抗剪承载力提高了17.2%,并且从钢骨架应力图中(图3(a))可以明显看出,墙体发生破坏时,斜撑早已达到屈服强度,并且受力充分;随着钢材厚度的增大,墙体抗剪承载力也逐渐提高,但影响程度随着钢材厚度的增加而减小,如图5(b)所示,钢材厚度由1 mm增大到1.5 mm后,墙体抗剪承载力提高了37.8%,而由2 mm增大至2.5 mm时仅提高了14.4%;此外,横龙骨和竖向荷载对墙体抗剪承载力的影响较小,竖向荷载的增大甚至会对新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪承载力产生负面影响。

3 新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体设计方法研究

3.1 抗剪承载力计算公式

3.1.1 轻钢墙体规范中抗剪承载力计算公式

中国《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》^[23]、北美 AISI S400—15^[24]以及日本《薄板轻量形鋼造建築物设计の手册引ま》^[25]中均未给出明确的抗剪承载

力计算公式,仅仅给出部分带墙面板墙体的单位抗剪承载力.而《轻钢轻混凝土结构技术规程》JGJ 383—2016^[26]中则规定,在地震状况下,填充墙体斜截面受剪承载力应符合式(1):

$$V \leq \left[\frac{1}{\lambda - 0.5} \left(n f_t A_c + 0.06 N \frac{A_w}{A} \right) + 0.2 f_a \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right] / \gamma_{RE} \quad (1)$$

式中: λ 为计算截面的剪跨比,当 $\lambda < 1.5$ 时,取1.5,当 $\lambda > 2.2$ 时,取2.2; f_t 为轻混凝土轴心抗拉强度设计值; N 为与剪力设计值相应的轴向压力设计值,当 $N > 0.2 f_c A_c$ 时,取 $0.2 f_c A_c$; A_c 为剪力墙截面净面积; A 为剪力墙截面面积; A_w 为T形、I形截面剪力墙腹板的截面面积,对矩形截面,取为 A ; A_{sh} 为剪力墙同一截面水平分布轻钢截面面积; f_a 为轻钢抗拉强度设计值; h_{w0} 为截面有效高度,即受拉端轻钢合力点至受压边缘的距离; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数,取0.85;当轻混凝土为聚苯颗粒混凝土时, n 取0.3,当轻混凝土为泡沫混凝土时, n 取0.4。

从表5中可以明显看出,按照《轻钢轻混凝土结构技术规程》计算得出的墙体抗剪承载力远远小于试验值,最大相差55%。聚苯颗粒泡沫混凝土强度低于规范给出的两种轻混凝土,所以规范中轻混凝土的调整系数并不适用于聚苯颗粒泡沫混凝土.此外,通过试验结果及有限元分析可知,新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体的抗剪承载力主要由斜撑、填充材料、内外墙板三部分提供,横龙骨的主要作用是为内墙板与钢骨架提供更好的连接,不直接承受侧向力;而在规程中,抗剪承载力公式只考虑了填充材料、轴压力以及水平轻钢构件的贡献,忽略了主要的“Z”字形斜撑和墙面板的贡献,这与实际试验得到的结论是不相符的,也是造成误差过大的主要原因。

表5 试验值与规程公式计算值对比

Tab.5 Comparison between test value and calculated value of regulation formula

试件编号	试验值 P/kN	中国规程式 1		中国规程式 2	
		P_1 /kN	P_1/P	P_2 /kN	P_2/P
SW-1	155.75	71.09	0.46	82.87	0.53
SW-2	157.71	71.09	0.45	82.87	0.53
SW-3	47.17	35.75	0.76	35.75	0.76
SW-4	109.00	71.09	0.65	82.87	0.76
SW-5	75.64	49.24	0.65	56.99	0.75

注:中国规程式1中轻混凝土为聚苯颗粒混凝土,中国规程式2中轻混凝土为泡沫混凝土。

综上,规范中公式并不能较好地反映本文墙体各组成部分对墙体抗剪承载力的贡献,计算结果与试验值误差较大,不适用于本文墙体.因此有必要推导出适用于本文墙体的抗剪承载力计算公式.

3.1.2 新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪承载力计算公式

结合试验与有限元结果可知,新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体的抗剪承载力主要由斜撑、填充材料、内外墙板三部分提供,其中,外挂板因其特殊的挂板体系,在试验中并未完全受力,其所承受的水平力并不能直接按屈服强度乘以相应的截面积来获得,因此,本文将外挂板对墙体抗剪承载力的贡献体现在调整系数中.

在推导新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪承载力时,遵循以下基本假定:

1)当墙体达到最大抗剪承载力时,聚苯颗粒泡沫混凝土、冷弯薄壁型钢骨架及内外墙面板变形协调,承载力计算满足叠加原理;

2)忽略竖向荷载对聚苯颗粒泡沫混凝土的影响.

提出新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙抗剪承载力基本公式为:

$$V = \eta_1(V_{xc} + V_{tc}) + V_{nb} \quad (2)$$

因为斜支撑通过自攻螺钉与竖龙骨翼缘相连,在加载过程中自攻螺钉滑移,加之斜支撑横截面为“Z”字形,易发生扭转,加载时拉压斜杆不一定完全发挥作用,故对斜支撑水平承载力公式乘以折减系数 η_2 进行修正.由于钢骨架、内外面板对填充材料的相互约束作用,对填充材料抗剪承载力乘以放大系数 η_3 进行修正,修正后的公式为:

$$V = \eta_1(\eta_2 V_{xc} + \eta_3 V_{tc}) + V_{nb} \quad (3)$$

式中: V 为新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙抗剪承载力; η_1 为外挂板体系对墙体抗剪承载力提高系数; η_2 为斜支撑抗剪承载力折减系数; η_3 为填充材料抗剪承载力修正系数; V_{xc} 为斜支撑抗剪承载力; V_{tc} 为填充材料抗剪承载力; V_{nb} 为内墙板抗剪承载力.

通过材料力学基本公式和力平衡条件得出斜支撑的水平承载力为:

$$V_{xc} = kA_s f_y \cos \alpha \quad (4)$$

式中: k 为斜支撑数量; A_s 为斜支撑横截面面积; f_y 为斜支撑抗拉强度设计值; α 为斜支撑与上主梁水平面夹角.

填充材料提供的抗剪承载力公式参照钢筋混凝土剪力墙承载力公式,基本公式为:

$$V_{tc} = \alpha_{av} f_t b h = \frac{0.5}{\lambda - 0.5} f_t b h \quad (5)$$

式中: λ 为剪跨比,当 $\lambda < 1$ 时,取 $\lambda = 1$,当 $\lambda > 1.5$ 时,取 $\lambda = 1.5$; f_t 为填充材料抗拉强度,此处近似取 $f_t \approx 0.1 f_c$; b 为墙厚; h 为墙肢截面有效高度.

石膏板提供的抗剪承载力为:

$$V_{nb} = l f_{vb} \quad (6)$$

式中: l 为内墙板水平宽度; f_{vb} 为内墙板抗剪强度.

将式(4)(5)(6)代入式(3)得到新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪承载力公式为:

$$V = \eta_1(\eta_2 k A_s f_y \cos \alpha + \eta_3 \frac{0.5}{\lambda - 0.5} f_t b h) + l f_{vb} \quad (7)$$

根据试验结果及有限元模拟,给出系数 η_1 、 η_2 、 η_3 的取值方法,如表6所示.

表6 系数 η_1 、 η_2 、 η_3 的取值方法

Tab.6 Accessor methods of coefficient η_1, η_2, η_3

系数	取值方法
η_1	有外挂板的墙体 η_1 取1.25,无外挂板墙体 η_1 取1.0
η_2	灌浆墙体 η_2 取0.8,填充岩棉等轻质填充材料或无填充材料的墙体 η_2 取0.5
η_3	当竖龙骨间距为600mm时,有蒙皮灌浆墙体 η_3 取1.7,无蒙皮灌浆墙体 η_3 取1.6

按式(7)对5片试验墙体抗剪承载力进行计算,并与墙体试验结果进行对比.由表7可知,按式(7)计算求得的墙体抗剪承载力与试验值吻合较好,最大误差为5.8%,可以满足一般工程设计的要求,证明本文推导的抗剪承载力公式较为合理.

表7 墙体抗剪承载力

Tab.7 The maximum shear bearing capacity of specimens

编号	试验值/kN	计算值/kN	误差/%
SW-1	155.75	150.68	3.4
SW-2	157.71	150.68	4.7
SW-3	47.17	45.48	3.7
SW-4	109.00	102.99	5.8
SW-5	75.64	79.55	-4.9

3.2 新型墙体构造要点

根据试验现象、试件破坏特征和有限元分析,本文对新型墙体的构造提出以下要点:

1)加强各龙骨间的连接构造措施.由于试验中各龙骨间的连接较弱,多片试验墙体在试验初期龙

骨连接处就已豁开,如图6(a)(b)所示,过早地破坏了墙体的整体性,降低了承载力.为了避免此类现象的产生,建议在各龙骨连接处设置连接角码进行加强,保证墙体各构件性能的充分发挥.

2)适当减小内墙板上自攻螺钉间距,保证墙板与钢框架间的整体性,避免过早出现墙板与钢框架分离、墙板破坏等现象,使墙板退出工作,如图6(c)所示.

3)浇筑墙体填充材料时应振捣均匀,否则在地震作用下,墙体易在缺陷处过早发生破坏,影响墙体的抗震性能,如图6(d)所示.

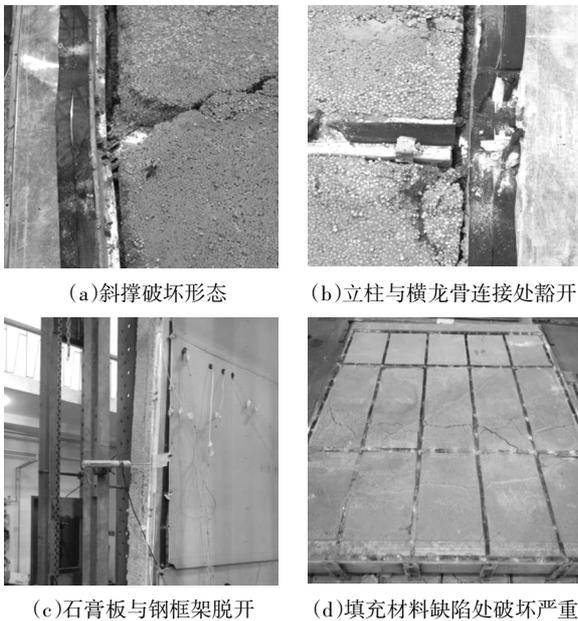


图6 墙体破坏特征

Fig.6 Wall failure characteristics

4 结论

本文进一步研究了新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体的受力机理,并采用ABAQUS软件进行变参数分析,结合试验结果对墙体抗剪承载力影响因素进行了探讨,并对墙体抗剪承载力计算方法进行了研究,得出如下结论:

1)钢框架、填充材料和墙面板三部分相互约束,共同工作,填充材料和墙面板对钢框架的变形具有约束作用,能够充分发挥材料的抗剪作用.

2)“Z”形斜支撑可有效解决钢拉条引起的墙体偏心受力问题,且可以显著提高墙体的抗剪承载力;与空框架墙体相比,灌浆墙体由于填充材料的存在会使斜撑对墙体抗侧刚度的贡献减弱.

3)钢材厚度对新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆

墙体抗剪承载力有显著影响,但影响程度随着钢材厚度的增大而减小;横龙骨,竖向荷载对墙体抗剪承载力影响较小.

4)提出了新型中间支撑冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪承载力计算公式,计算结果与试验吻合较好,可以满足一般工程设计要求.

5)根据试验现象发现,墙体的薄弱环节主要集中在各龙骨以及墙面板与钢框架的连接处,建议实际工程中在各龙骨连接处设置连接角码进行加强;墙面板与钢框架间自攻螺钉间距也应适当减小,保证两者的有效连接.此外,还应保证填充材料的浇筑质量,避免产生缺陷.

参考文献

- [1] 余宾宁. 筑巢轻钢龙骨体系桁架梁试验研究及分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 3.
YU B N. Experimental investigation and analysis on truss beam of nest light-gauge steel system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 3. (In Chinese)
- [2] ZHOU X H. Research progress on cold-formed steel structural framing [J]. Steel Construction, 2020, 35(01): 1-19.
- [3] 李元齐, 徐厚军. 我国冷弯型钢结构发展现状及展望 [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)
- [4] SERRETTE R, HALL G, NGUYEN H. Additional shear wall values for light weight steel framing [R]. Washington D C: American Iron and Steel Institute, 1997: 1-78.
- [5] SERRETTE R, OGUNFUNMI K. Shear resistance of gypsum-sheathed light-gauge steel stud walls [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 383-389.
- [6] TIAN Y S, WANG J, LU T J. Racking strength and stiffness of cold-formed steel wall frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1069-1093.
- [7] FÜLÖP L A, DUBINA D. Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading: Part I: Experimental research [J]. Thin-Walled Structures, 2004, 42(2): 321-338.
- [8] 王宇航, 邓锐, 姚欣梅, 等. 带斜撑冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 30-38.
WANG Y H, DENG R, YAO X M, et al. Experiment on seismic behavior of cold-formed thin-walled steel walls with diagonal braces [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 30-38. (In Chinese)
- [9] XU Y P, ZHANG H B, XIA X, et al. Seismic performance of diagonally braced cold-formed thin-walled steel composite walls [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 120-136.

- [10] 郝际平,刘斌,邵大余,等.交叉钢带支撑冷弯薄壁型钢骨架-喷涂轻质砂浆组合墙体受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(12):20—28.
HAO J P, LIU B, SHAO D Y, *et al.* Test on shear resistance of cold-formed thin-walled X-shaped steel strap-braced framing walls with sprayed lightweight mortar [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12):20—28. (In Chinese)
- [11] 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.
LIU B, HAO J P, LI K L, *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. (In Chinese)
- [12] 周绪红,姚欣梅,管宇,等.结构参数对低层轻钢房屋抗震性能影响分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(1):1—9.
ZHOU X H, YAO X M, GUAN Y, *et al.* Influence analysis of different structural parameters on seismic performance of low-rise lightweight steel buildings [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1):1—9. (In Chinese)
- [13] 管宇,周绪红,石宇,等.轻钢组合楼盖面内刚度和承载力计算方法研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(9):31—43.
GUAN Y, ZHOU X H, SHI Y, *et al.* Study on calculation method for in-plane stiffness and bearing capacity of thin-walled steel composite floor [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(9):31—43. (In Chinese)
- [14] 周绪红,邹昱瑄,徐磊,等.冷弯薄壁型钢-钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(5):65—75.
ZHOU X H, ZOU Y X, XU L, *et al.* Seismic behavior of cold-formed thin-walled steel plate shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5):65—75. (In Chinese)
- [15] 沈祖炎,刘飞,李元齐.高强超薄壁冷弯型钢低层住宅抗震设计方法[J].建筑结构学报,2013,34(1):44—51.
SHEN Z Y, LIU F, LI Y Q. Seismic design method of low-rise high-strength cold-formed thin-walled steel framing buildings [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1):44—51. (In Chinese)
- [16] 李元齐,马荣奎.冷弯薄壁型钢龙骨式剪力墙抗震性能简化及精细化数值模拟研究[J].建筑钢结构进展,2017,19(6):25—34.
LI Y Q, MA R K. Simplified and refined numerical simulation on seismic behavior of cold-formed thin-walled steel framed shear walls [J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(6):25—34. (In Chinese)
- [17] 叶继红,陈伟,许阳.冷弯薄壁型钢复合墙体受剪性能数值模拟及简化力学模型研究[J].建筑结构学报,2018,39(11):94—103.
YE J H, CHEN W, XU Y. Numerical simulation and simplified mechanical model on shear behavior of enhanced cold-formed steel composite wall [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11):94—103. (In Chinese)
- [18] 陈伟,叶继红,许阳.夹芯墙板覆面冷弯薄壁型钢承重复合墙体受剪试验[J].建筑结构学报,2017,38(7):85—92.
CHEN W, YE J H, XU Y. Shear experiments of load-bearing cold-formed thin-walled steel wall system lined with sandwich panels [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(7):85—92. (In Chinese)
- [19] 田稳苓,温晓东,彭佳斌,等.新型泡沫混凝土轻钢龙骨复合墙体抗剪承载力计算方法研究[J].工程力学,2019,36(9):143—153.
TIAN W L, WEN X D, PENG J B, *et al.* Study on shear strength analysis for a new type light steel-framed composite wall filled with foam concrete [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9):143—153. (In Chinese)
- [20] 闫维明,雷西洋,谢志强,等.不同混合连接的冷弯薄壁型钢组合墙抗震性能试验研究[J].北京工业大学学报,2020,46(3):280—288.
YAN W M, LEI X Y, XIE Z Q, *et al.* An experimental study of seismic performance of cold-formed thin-walled steel composite walls with different hybrid connections [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(3):280—288. (In Chinese)
- [21] 袁泉,杨逸,吕东鑫,等.轻钢聚苯颗粒泡沫混凝土组合墙体受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(11):104—111.
YUAN Q, YANG Y, LÜ D X, *et al.* Experimental study on shear resistance of light steel polystyrene foam concrete wall [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11):104—111. (In Chinese)
- [22] 吴函恒,晁思思,刘向斌,等.轻质脱硫石膏改性材料填充冷弯型钢组合墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(1):42—50.
WU H H, CHAO S S, LIU X B, *et al.* Experimental study on seismic behavior of cold-formed steel framing walls infilled with lightweight modified FGD gypsum [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1):42—50. (In Chinese)
- [23] 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程:JGJ 227—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2011:40—41.
Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings: JGJ 227—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011:40—41. (In Chinese)
- [24] North American standard for seismic design of cold-formed steel structural systems: AISI S400—15 [S]. US: American Iron and Steel Institute, 2015:19—53.
- [25] 日本铁钢连盟.薄板轻量形钢造建筑物设计的手册引ま [M]. 东京:技报堂出版株式会社,2002:35—55.
Japan iron & steel federation. Manual of thin steel plate structure [S]. Tokyo: Tech Note Publishing Co Ltd, 2002:35—55. (In Japanese)
- [26] 轻钢轻混凝土结构技术规程:JGJ 383—2016 [S].北京:中国建筑工业出版社,2016:17—18.
Technical specification of lightweight steel and lightweight concrete structures: JGJ 383—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016:17—18. (In Chinese)