

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.03.001

冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗震性能研究进展

张铮,江忠画,陈笃海

(福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 与传统冷弯薄壁型钢墙体相比,冷弯薄壁型钢灌浆墙体具有优越的整体刚度和抗震性能。通过综述国内外具代表性试验与有限元分析结果,分别分析墙架柱、支撑、墙面板、抗拔件、砂浆、高宽比、加载方式、开洞情况、竖向荷载作用等影响因素对墙体抗震性能的规律,提出该类墙体在抗震性能方面的研究方向。

关键词: 冷弯薄壁型钢;灌浆墙体;研究进展;抗震性能;影响因素

中图分类号: TU392.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2020)03-0205-06

Research advance on seismic performance of cold-formed thin-walled steel grouting wall

ZHANG Zheng, JIANG Zhonghua, CHEN Duhai

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Compared with the traditional cold-formed thin-walled steel walls, the cold-formed thin-walled steel grouting walls have superior overall stiffness and seismic performance. By summarizing the representative tests and finite element analysis results at home and abroad, the effects of such factors as wall frame columns, bracings, wall panels, pull-out parts, mortar, height width ratios, loading modes, openings and vertical loads on the seismic performance of the wall were given respectively. The research direction on the seismic performance of this kind of wall was put forward.

Keywords: cold-formed thin-walled steel; grouting wall; research advance; seismic performance; influence factor

冷弯薄壁型钢结构于 19 世纪 80 年代引入中国,与传统的混凝土结构、砌体结构相比,在诸多方面的性能要优于砖混结构,如自重轻、基础造价低、抗震性能好、工业化程度高、施工安装方便、建造周期短等。然而,传统冷弯薄壁型钢墙体防火、隔音、保温以及抗冲击性能不甚理想,根深蒂固的“秦砖汉瓦”理念^[1]增加了国人对建筑结构“厚实感”的追求,限制了冷弯薄壁型钢结构建筑的推广应用。

冷弯薄壁型钢灌浆墙体是对冷弯薄壁型钢骨架进行轻质砂浆的喷涂,使冷弯型钢骨架被砂浆完全包裹。砂浆对骨架起到一定的支承作用,可

以有效限制其变形,防止其过早屈曲,从而增大墙体的整体刚度,提高墙体的稳定承载力,为冷弯薄壁型钢墙体的发展提供了一个新的方向。

1 冷弯薄壁型钢灌浆墙体构造做法

与常见的梁柱结构体系不同,冷弯薄壁型钢结构体系属于分散受力体系,主要由屋面、楼面、墙体组成。墙体是主要受力构件,承担由楼面、屋面传递的竖向荷载以及由风荷载和水平地震作用对结构产生的水平荷载。传统冷弯薄壁型钢墙体由冷弯薄壁型钢骨架和轻质墙面板(如石膏板、欧松板、硅酸钙板等)通过自攻螺钉连接而成。

冷弯薄壁型钢灌浆墙体在骨架中喷涂的轻质砂浆,是以建筑石膏、普通硅酸盐水泥、砂、EPS 颗粒或聚丙烯纤维等为原料制备的。建筑石膏和 EPS 颗粒分别使用的是脱硫石膏和回收聚苯乙烯白色泡沫颗粒,可降低对环境的污染,对室内空气湿度还可起到一定的调节作用。由此制备的墙体可明显改善保温、隔音、防火等性能,同时不会大幅度增加墙体作用于承重结构上的荷载。

冷弯薄壁型钢灌浆墙体的传统做法是在冷弯薄壁型钢骨架内外两侧安装模板,形成一面空腔墙体,再采用聚苯颗粒泡沫砂浆进行整体浇筑^[2]。该做法需要支撑模板,待砂浆养护完成后再拆除模板,繁冗复杂,且砂浆表面常因收缩而产生裂缝。如图 1 所示,采用钢丝网架的新式作法^[3]以冷弯薄壁型钢骨架作为框架,将钢丝网架覆于骨架外侧,二者共同形成骨架网,在内部填充聚苯乙烯泡沫板等保温材料,在另一侧喷涂石膏基砂浆,灌浆墙体以此成型。钢丝网架的设置进一步增强墙体的整体性能、提高墙体的结构强度,由此制备而成的填充层密实且不易收缩,凝结速度快(2h 终凝),可抑制墙体开裂,也减少支模、拆模等工序,从而方便施工。

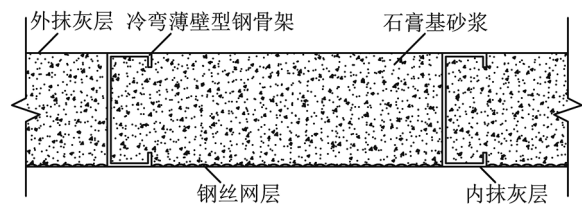


图 1 钢丝网架新式作法剖视结构示意图

Fig.1 Profile of steel wire frame made with the new method

2 墙体试验加载方法

试验测试对冷弯薄壁型钢结构这种分散受力体系是很重要的研究手段,能直观地反映出墙体在特定条件下最真实的受力情况。图 2 所示为冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗震性能试验研究的典型加载装置^[4-11],采用水平低周反复加载方式,竖向荷载通过千斤顶一次加满,然后施加水平荷载。竖向荷载经分配梁通过钢垫块传递给加载梁,以模拟均布荷载,钢垫块可确保墙体正确的竖向荷载传力路径。滑动导轨须保证摩擦力足够小,且可随构件水平移动,以使墙体在水平往复变形时其

竖向荷载作用位置不发生变化。侧向滚动支撑用于模拟楼板对墙体的支承作用,防止墙体发生平面外倾覆,大多采用圆形滚轴支撑^[4-8],也有学者采用圆形钢管支撑^[10],试验结果表明,二者无明显区别。

郝际平^[4-7]采用钢制底座和钢制加载梁,并与墙体采用高强螺栓进行连接。初明进^[11]采用钢筋混凝土底座与钢筋混凝土加载梁,并与墙体通过混凝土现浇连接。试验表明,底座和加载梁的材质以及二者与墙体的连接方式对测试结果无显著影响,前提是确保底座和加载梁的刚度足够大,在试验中的变形可忽略不计,且二者与墙体间的连接足够稳固,在试验过程中不发生破坏。

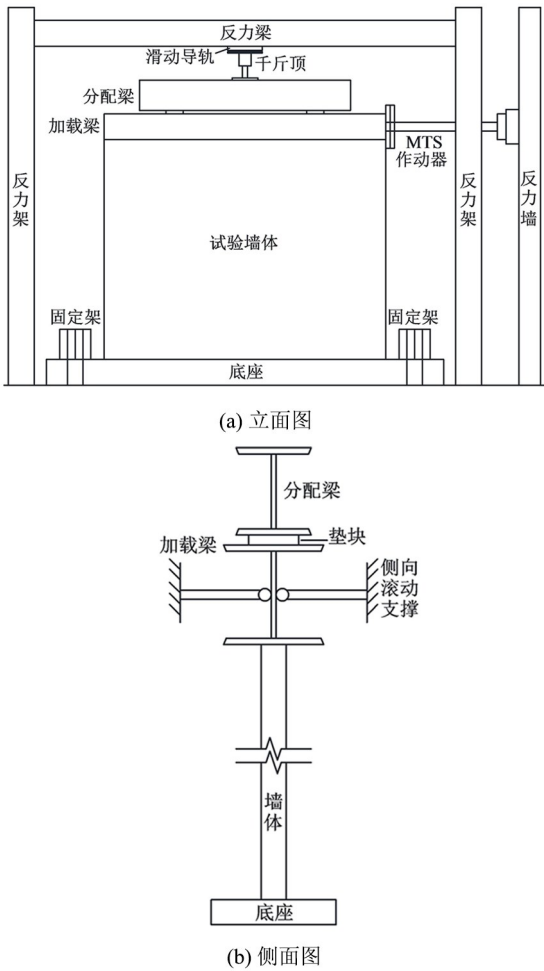


图 2 典型加载装置

Fig.2 Typical loading devices

底座通过地锚螺栓与地面固定连接,且两端均设固定架或千斤顶^[4-9],以保证试验过程中底座不发生滑移。底座抗滑移装置是采用千斤顶还

是采用固定架对试验结果基本没有影响。

3 墙体有限元分析方法

采用有限元方法对冷弯薄壁型钢结构进行仿真分析是全面把握和深入了解其受力机理和抗震性能的有效途径,但其难点是如何有效地处理墙体模型中的众多螺钉连接以及砂浆与骨架的粘结滑移。此外,选取合适的单元、简化接触单元、处理边界条件、有效划分网格等也都是墙体建模的关键。

冷弯薄壁型钢灌浆墙体的墙架柱、上下导轨由于填充材料的约束使得墙体的抗震性能得以提高,进入塑性发展阶段,因此墙架柱、上下导轨多采用塑性壳单元,轻质砂浆多采用实体单元。石宇^[12]在建模时将上下导轨模拟成一块矩形钢板,忽略了其翼缘,两侧背靠背的墙架柱简化成同等截面的工字型柱,墙架柱与上下导轨采用铰接,下导轨底面固接,上导轨平面外位移加以约束,耦合顶梁上所有节点在加载方向上的自由度。有限元计算结果证明这种简化建模方式是可行的,后继研究多借鉴了该建模方式。

自攻螺钉连接件接触单元的设置一直是冷弯薄壁型钢墙体有限元研究的一大难点,国外学者大多采用非线性弹簧单元模拟连接件,虽然结果精确,但是过程复杂、耗时长、不易于计算。石宇^[12]采用耦合的方式,在自攻螺钉连接处耦合冷弯型钢骨架和墙面板所有的平动自由度,忽略墙面板和骨架之间的滑移,使得连接处形成一个刚性区域,简化了模型,并与试验结果实现了较好的吻合,解决了原有模型复杂繁琐、计算缓慢的问题,并取得较好的拟合效果。长期以来,分析使用的自攻螺钉受力性能都是通过单调加载试验得到的,无法准确模拟墙体在低周反复荷载作用下的传荷特征及连接机理。为此,吴睿聪^[13]提出 Connector-Spring 组合模型,在循环加载下,单个自攻螺钉所得滞回曲线能呈现捏缩现象,可以模拟损伤开始后的刚度下降,组合墙体的非线性行为能够得到较好的反映。

杨逸^[2]将冷弯型钢骨架合并成一个部分,将冷弯型钢骨架嵌入到轻质砂浆中,内外墙面板绑定到冷弯型钢骨架上,拟合的破坏模式与试验基本一致,抗剪承载力较为接近,但抗侧刚度略大于试验值,得到的荷载-位移曲线未出现下降段。

由于没有考虑自攻螺钉与冷弯型钢骨架之间的滑移,模拟的位移值要小于试验结果。王奕钧^[14]通过试验研究冷弯薄壁型钢与轻质砂浆之间粘结滑移性能,提出二者间的粘结滑移本构模型,解决了轻质砂浆本构模型不准确的问题。邵大余等^[15]在此基础上,对外侧砂浆采用壳单元,内部与冷弯型钢骨架填充的砂浆采用实体单元,利用王奕钧^[14]提出的粘结滑移本构模型,对砂浆与冷弯型钢骨架之间的相互作用采用非线性弹簧单元进行模拟,得到的荷载-位移曲线、抗剪承载力与试验结果拟合较好,位移和抗侧刚度的误差在15%以内。

4 抗震性能影响因素分析

国内外学者通过试验和有限元分析进行了冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗震性能的研究^[2-21],结果表明,冷弯薄壁型钢灌浆墙体的抗震性能与墙架柱(截面特性、钢材强度、钢材厚度、间距)、支撑(特性、布置方式)、填充材料(类型、厚度)、墙面板、连接件、抗拔件、高宽比、加载方式(单调加载和循环加载)、开洞情况、竖向荷载作用等因素密切相关。

4.1 墙架柱

冷弯薄壁型钢结构的竖向荷载主要由冷弯薄壁型钢骨架承受,其中墙架柱的作用举足轻重,因此,研究墙架柱的受力性能尤其重要。

墙架柱常采用C形(卷边槽形截面)冷弯型钢构件,间距一般为400~600 mm,且在边柱底部常设置抗拔件以增强墙体的抗剪性能。Tissell^[16]对边墙架柱为单根柱的冷弯薄壁型钢墙体进行了试验,研究表明构件破坏模式为边柱屈曲或在锚栓连接处被拉断。由于边墙架柱的过早屈曲而导致墙体的抗剪性能得不到充分发挥, Serrette^[17]提出将边柱由单柱改为双柱形式,即由两根C型柱背靠背通过自攻螺钉连接组成工字型截面柱,并通过试验研究验证了其正确性。后续研究多引用此结论,在进行抗震性能研究时普遍采用双柱的形式。郭鹏^[18]对交叉扁钢拉条冷弯型钢骨架墙体进行了试验研究,发现边墙架柱与下导轨的畸变屈曲可导致试件破坏,边墙架柱的强度对墙体的抗剪承载力影响较大,建议在实际工程中对边墙架柱采取必要的加强措施。

研究表明^[15,18],墙体的抗剪承载力、抗侧移

刚度受墙架柱截面尺寸的影响很小。提高墙架柱的钢材强度,可以增加两侧墙架柱由于轴向拉、压力产生的倾覆力矩,从而增强墙体的抗剪承载力,但对墙体的初始抗侧刚度影响很小。钢材愈厚,墙体的抗剪承载力愈高,影响程度随着钢材厚度的增加而减小。邵大余等^[15]提出可以通过增加两侧墙架柱厚度、并适当减小中间墙架柱厚度,在保证墙体抗剪强度的前提下有效降低了材料用量。墙体抗剪承载力、初始抗侧刚度随墙架柱间距的减小变化甚微,而极限位移得以增大。

由于墙架柱与轻质砂浆的结合,冷弯型钢骨架的变形得以限制,墙架柱的承载力明显得到增强^[15],在结构计算中考虑填充材料对于墙架柱的支撑作用是可行的。单根墙架柱的抗剪性能与墙体整体抗剪性能相差很大^[19],因此在冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗震性能研究中,单根墙架柱受到的关注较少。

4.2 支撑

支撑的设置加强了冷弯薄壁型钢骨架的整体性和抗侧刚度,并减小了墙体的变形^[18]。

为了探究刚性斜撑和交叉钢带支撑对于墙体抗震性能的贡献,郝际平^[4-5]通过试验研究,提出带斜撑冷弯型钢骨架的主要破坏模式为横撑与斜撑节点处自攻螺钉的连接破坏和与斜撑连接处横撑翼缘的局部屈曲。交叉钢带支撑冷弯型钢骨架的破坏形式为墙架柱的整体弯扭屈曲,并伴随一定的局部屈曲,在循环荷载作用下的受力形式为一个方向钢带张紧,另一个方向钢带松弛,两个方向的钢带交替参与墙体抗侧受力。通过无斜撑灌浆墙体与有斜撑灌浆墙体的比较,说明斜撑的设置可以提高墙体的抗剪承载力和抗侧刚度。对于有斜撑灌浆墙体,对斜撑与墙架柱、导轨连接部位采用节点板进行连接加强,可以增大斜撑对墙体抗侧刚度的贡献,提高墙体的抗剪承载力。

柔性横撑对于墙体抗剪承载力没有明显帮助,而刚性横撑可以明显提高墙体抗剪承载力^[18],但由于砂浆与骨架的紧密结合,削弱了刚性横撑对冷弯型钢骨架的约束,因此刚性横撑对于冷弯薄壁型钢灌浆墙体的抗剪性能影响较小^[15]。两种横撑对于墙体的抗侧移刚度均基本无影响。

4.3 轻质砂浆

试验研究表明^[4-10],轻质砂浆与冷弯薄壁型

钢骨架的紧密结合,显著增强了墙体的抗侧刚度,对墙体抗剪承载力的贡献巨大,加载后期由于砂浆与冷弯型钢骨架之间会产生一定的滑移,避免了墙体裂缝的持续开裂和发展,具有良好的变形能力。

郝际平^[4-7]通过足尺试验研究,表明冷弯薄壁型钢灌浆墙体的主要破坏模式为两侧墙架柱底部的局部受压屈曲和冷弯型钢骨架与两侧轻质砂浆之间的滑移失效。由于轻质砂浆与冷弯型钢骨架的相互作用,灌浆墙体的承载能力约比冷弯型钢骨架提高 1 倍。对于交叉钢带支撑灌浆墙体,轻质砂浆的喷涂有效约束了受压钢带的平面外变形,提高了墙体的抗侧能力。

杨逸^[2]进行了五榀冷弯薄壁型钢灌浆墙体的足尺试验,发现墙体的破坏模式为聚苯颗粒泡沫砂浆表面逐渐出现裂缝,石膏板角部破坏严重且整体与冷弯型钢骨架脱离,最终墙架柱和龙骨下部局部屈曲。通过标准灌浆墙体与空框架墙体的比较,说明聚苯颗粒泡沫砂浆能显著增强墙体的抗剪性能,砂浆与冷弯型钢骨架的整体浇筑使得墙体产生“1+1>2”的增强效果。

赵欣等^[10]通过对冷弯型钢骨架之间采用焊接连接的轻钢龙骨泡沫混凝土组合墙体进行试验,发现墙体的破坏模式为下导轨屈服和墙架柱与下导轨焊缝撕裂。在墙体抗剪过程中,两侧的墙架柱主要起抗拉、抗压作用,对两侧的墙架柱底部进行固定加强可以提高墙体的抗剪承载力和变形能力。赵欣等^[10]与郭鹏^[18]的试验结果对比表明,冷弯薄壁型钢灌浆墙体的屈服荷载、抗剪承载力屈服荷载要明显高于传统冷弯薄壁型钢覆板墙体,前者抗侧刚度要低于后者,但延性系数相近。

郁琦桐等^[8]对两侧墙架柱采用方钢管、通过焊接与轻钢龙骨组成冷弯型钢骨架的轻钢龙骨玻化微珠保温砂浆墙体进行 1:1.25 缩尺比例的试验,结果说明墙体的破坏模式为剪切破坏,伴随着螺栓滑移、交叉拉条平面外失稳、墙架柱端部局部屈曲以及内墙板开裂和脱落等现象。得益于两侧方钢管柱的约束,墙体仍具有较好的延性和耗能能力。邵大余等^[15]通过有限元分析,说明增加两侧轻质砂浆厚度可以明显提高墙体的抗剪承载力。

由表 1 所列的试验数据可见,喷涂砂浆明显提高了组合墙体的抗剪承载力、抗侧移刚度,加强

了延性性能和耗能能力,无疑为冷弯薄壁型钢结 构的推广迈出了至关重要的一步。

表 1 轻质砂浆对冷弯薄壁型钢灌浆墙体抗剪性能的影响

Tab.1 Effects of light mortar on shear resistance of cold-formed thin-walled steel grouting wall

数据 来源	墙体类别	试件编号	墙高/ m	墙宽/ m	竖向力/ kN	抗剪承载力/ (kN·m ⁻¹)	极限位移/ mm	位移延 性系数
[5]	冷弯薄壁型钢骨架墙体	WHL-XB-1	3.0	2.4	30	11.23	29.12	1.43
	冷弯薄壁型钢灌浆墙体	WHL-XB-2			30	28.80	21.76	2.26
		WHL-XB-3			60	26.62	20.54	2.55
[2]	轻钢灌浆墙体	SW-1	3.0	3.0	100	51.92	55.56	5.37
	空框架墙体	SW-3			100	15.72	100.0	5.12
[10]	轻钢龙骨泡沫混凝土组合墙体	WB-2	2.8	2.4	0	23.66	71.20	2.03
[8]	轻钢龙骨玻化微珠保温砂浆墙体	SW-1	2.55	2.4	130	106.13	44.15	9.55
	带内外墙板轻钢龙骨墙体	SW-2			130	29.04	51.55	10.90

4.4 高宽比

为探究高宽比对墙体抗震性能的影响,杨逸^[2]与邵大余等^[15]进行了试验与有限元研究,结果表明,高宽比对墙体抗震性能的影响较大,随着墙体高宽比的增大,减小了冷弯薄壁型钢骨架与轻质砂浆的接触,墙体的抗剪强度和抗侧刚度逐渐降低,刚度退化愈发明显。

4.5 其他因素

杨逸^[2]通过有内外挂板与无挂板冷弯薄壁型钢灌浆墙体的对比,说明内外墙板对于聚苯颗粒泡沫混凝土的开裂能起到一定的抑制作用,有内外挂板使得墙体的抗剪性能得以增强。两侧墙架柱柱脚抗拔件的设置对于墙体抗震性能的提升有显著效果,但其受力机理复杂,有待进一步研究。加载方式不同,抗剪承载力也有显著变化,由于单调加载没有循环加载的累计损伤,得到的抗剪承载力要高于循环加载。洞口的设置明显削弱了墙体的抗剪承载力^[20-21],且洞口愈大,抗剪强度弱化得愈明显,但延性加强。竖向荷载的设置使得墙体抗剪承载力得以降低,但对墙体抗侧移刚度几乎没有影响。

综上所述,结构计算中考虑填充材料对于墙架柱的支撑作用是可行的,可以减少材料用量,降低造价。刚性横撑对于墙体抗震性能的影响较小,刚性斜撑的设置增强了墙体的抗剪承载力和抗侧刚度,提高了墙体的抗震性能,但施工不便。喷涂砂浆显著增强了墙体的抗剪承载力和抗侧刚

度,延性良好。结构设计与分析中应当考虑高宽比对墙体抗震性能的影响。

5 结论

通过对冷弯薄壁型钢灌浆墙体的现有研究进行综合分析,可以得到以下结论:

1)冷弯薄壁型钢灌浆墙体作为一种新型装配式墙体,集结构受力、保温隔热等功能于一身,具有绿色环保、经济实用等优点。但国内关于该类墙体的研究仍处于起步阶段,试验数据较少,也缺乏设计方法以供工程设计参考,还需开展更多试验研究并提出设计建议。

2)边墙架柱柱底抗拔件的设置可加强墙架柱与下导轨的连接,对减少墙架柱截面尺寸和提高墙体抗震性能都有一定贡献。但这个位置受力复杂,工作机理还未得到系统诠释,有待深入研究。

3)刚性斜撑、横撑和墙架柱通过节点板进行连接可增大墙体的抗剪承载力和抗侧刚度。但这种连接的受力机理复杂,节点板厚度、螺钉数量等的影响还不明确,相关有限元分析亟待开展。

4)自攻螺钉在往复荷载作用下的传荷特性、连接机理及受力性能缺乏研究,将单调加载试验得到的结果应用于反复加载下的模拟会导致偏差过大,还需开展自攻螺钉在循环荷载作用下的受力机理研究。

5)灌浆墙体的传统作法存在工序复杂、废工

废料、开裂空鼓等问题,采用钢丝网架可有效解决 必要对此新作法开展针对性研究并推广应用。
这些问题,并提高墙体的承载能力及抗震性能,有

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.
- [2] 杨逸.轻钢灌浆墙体抗震性能试验与设计方法研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [3] 胡凤翔.一种型钢网架整体喷筑速凝的复合墙体:CN 205329910 U[P].2016-01-05.
- [4] 刘斌,郝际平,钟炜辉,等.喷涂保温材料冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(1):85-92.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘斌,郝际平,邵大余,等.低周反复荷载作用下复合式冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2014,34(6):169-178.
- [8] 郁琦桐,潘鹏,苏宇坤.轻钢龙骨玻化微珠保温砂浆墙体抗震性能试验研究[J].工程力学,2015,32(3):151-157.
- [9] 冷江雪.带暗支撑冷弯型钢高强混凝土中高剪力墙抗震性能的试验研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [10] 赵欣,范宇岐,王舒扬.低周往复荷载作用下轻钢龙骨泡沫混凝土组合墙体性能试验研究[J].钢结构,2019,34(5):19-23.
- [11] 初明进.冷弯薄壁型钢混凝土剪力墙抗震性能研究[D].北京:清华大学,2010.
- [12] 石宇.低层冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体抗剪承载力研究[D].西安:长安大学,2005.
- [13] 吴睿聪.基于ABAQUS的冷弯薄壁型钢组合墙自攻螺钉连接仿真分析[D].广州:华南理工大学,2017.
- [14] 王奕钧.喷涂式轻质砂浆-冷弯薄壁型钢墙体立柱轴压性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [15] 邵大余,郝际平,刘斌.喷涂式轻质砂浆-冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能有限元分析[J].钢结构,2017,32(12):1-6.
- [16] TISELL J. Structural panel shear walls[R]. Washington: APA, 1993.
- [17] SERRETTE R. Light gauge steel shear wall tests[R]. Santa Clara: Santa Clara University, 1994.
- [18] 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.
- [19] 钟亚军.冷弯型钢低层住宅房屋体系墙体立柱的性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
- [20] 熊智刚.冷弯薄壁型钢结构住宅开洞组合墙体抗剪性能研究[D].西安:长安大学,2008.
- [21] 边超.大开洞冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能及承载力计算方法研究[D].重庆:重庆大学,2013.

(责任编辑:方素华)