

冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体受力性能研究综述

高超^{1,2}, 方浩杰², 王卫永^{2,3*}

(1. 中国华冶科工集团有限公司, 北京 100176; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 随着可持续发展理念的不断推广与建筑工业化水平的不断提高,冷弯薄壁型钢结构体系被广泛应用于建筑结构当中。墙体是结构体系的重要组成部分,对结构抵抗外荷载起着至关重要的作用。传统冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体主要适用于低层建筑结构体系,然而在多高层建筑结构中,复合墙体需要具有更高的承载力和满足更多元化的功能需求。本文首先总结了目前已有冷弯薄壁型钢复合墙体的主要形式及其受压和受剪性能的相关研究。之后总结了国内外相关规范中关于混凝土复合墙体的设计方法,用一个算例对比了不同设计方法的差异,指出了目前冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体存在的主要问题,并对其未来的研究趋势进行了展望,可为我国发展多高层冷弯薄壁型钢结构体系提供参考。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 复合墙体; 轻混凝土; 受力性能; 研究进展

中图分类号: TU398^{+.9}

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0001-12

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240503001

Review of Study on Mechanical Performance of Cold-Formed Thin-Walled Steel-Lightweight Concrete Composite Walls

GAO Chao^{1,2}, FANG Haojie², WANG Weiyong^{2,3*}

(1. China Huaye Group Company Limited, Beijing 100176, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing 400045, China)

*Corresponding author: wywang@cqu.edu.cn

Abstract: With the continuous promotion of the concept of sustainable development and the increasing level of industrialization in construction, the cold-formed thin-walled steel (CFS) structural system has been widely applied in building structures. As a crucial component of building structures, walls play a pivotal role in resisting external loads. Traditional CFS-panel composite walls are mainly suitable for low-rise building structures. However, the composite walls need to have higher bearing capacity and more diversified functions to be suitable for multi-story and high-rise building structures. This paper summarizes the current main forms of CFS composite walls and related research on their compressive and shear mechanical performance. The design methods of concrete composite walls in relevant domestic and foreign specifications are summarized, and a design example is presented to compare these design methods. The main problems and research trends of current CFS-lightweight concrete composite walls are noted, which are useful for the development of multi-story and high-rise CFS structural systems in China.

收稿日期: 2024-05-03

作者简介:

高超(1982—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事组合结构方面的研究。E-mail: gaochao5362@163.com。

方浩杰(2001—),男,硕士研究生,主要从事组合结构方面的研究。

通信作者:

王卫永(1982—),男,博士,教授,主要从事结构防灾减灾方面的研究。E-mail: wywang@cqu.edu.cn。

Keywords: cold-formed thin-walled steel; composite wall; lightweight concrete; mechanical performance; research progress

冷弯薄壁型钢结构体系因绿色环保、施工便捷而广泛受到建筑行业的青睐^[1-3]。相比于传统混凝土结构与砌体结构的构件,冷弯薄壁型钢构件可实现模数化、工厂化和标准化生产;采用冷弯薄壁型钢结构体系能够提高施工效率、缩短建造工期、降低建造成本;冷弯薄壁型钢结构轻质高强,对地基承载力要求低,受到的地震作用小;冷弯薄壁型钢属于可回收材料,结构在施工过程中产生的建筑垃圾少,符合绿色建筑和可持续发展的要求^[4-5]。2021年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推动城乡建设绿色发展的意见》,重点提到要建设高品质绿色建筑,实施建筑领域碳达峰、碳中和行动,实现工程建设全过程绿色建造。冷弯薄壁型钢结构体系也符合国家相关政策要求,具有极大的发展优势与良好的应用前景。

冷弯薄壁型钢结构体系最早兴起于二十世纪初,随着经济水平与生产技术的不断发展与提高,冷弯薄壁型钢结构的研究已经取得了大量的成果,多个国家已经颁布了冷弯薄壁型钢结构体系设计标准或规范,如北美冷弯钢结构设计规范 AISI S100-16^[6],澳大利亚和新西兰冷弯钢结构标准 AS/NZS 4600:2005^[7]、欧洲钢结构设计规范 EN1993-1-3^[8]以及中国的《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)^[9]、《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[10]和《冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准》(JGJ/T 421—2018)^[11]等。目前,冷弯薄壁型钢结构体系在国内外得到了广泛的应用,如图1所示。然而由于冷弯薄壁型钢结构的刚度与稳定性较差,以及在结构抗风、抗震和抗火等方面存在的诸多技术限制,其应用仍主要集中于低层建筑^[12]。

本文对国内外关于冷弯薄壁型钢结构复合墙体受力性能的相关研究进行了文献综述,对国内外相关规范中关于混凝土复合墙体的设计方法进行了归纳和分析,指出了目前研究中存在的主要问题,并对未来的研究趋势进行了展望。

1 复合墙体的形式

随着城市化进程的不断加快,多高层建筑更有利于提高土地利用效率、节约能源,更能适应城市规划与发展需求。墙体作为结构体系的重要组成部分,主要承受竖向荷载、风荷载和地震作用。为了将冷弯薄壁型钢结构体系向多高层建筑领域推广,近年来国内外学者采取了多种措施以提高冷弯薄壁型钢墙体的力学性能,主要包括:(1)设置面板(图2a)),如石膏板(GWB)、硅酸钙板(CSB)、定向刨花板(OSB)、镁晶板(GMB)、钢板和秸秆板等;(2)设置内部支撑(图2b));(3)加强边柱



a) 中国冷弯薄壁型钢结构厂房



b) 加拿大冷弯薄壁型钢住宅

图1 冷弯薄壁型钢结构体系的应用

Fig. 1 Application of the cold-formed thin-walled steel structural system

(图2c));(4)填充轻质混凝土材料(图2d)),例如泡沫混凝土、聚苯颗粒混凝土、陶粒混凝土、轻质聚合物材料等。

2 受压力学性能研究

2.1 冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体

传统冷弯薄壁型钢复合墙体通常由冷弯薄壁型钢框架和墙面板通过自攻螺钉连接组成。墙面板可以约束立柱的旋转与平面外变形,自攻螺钉可以减小立柱平面内的计算长度。许多学者开展了单面或双面覆板的冷弯薄壁型钢复合墙体受压性能研究,如表1所示。何永康等^[17]对双面覆板(带肋钢板+GWB)和单面带肋钢板复合墙体的轴压性能开展了试验研究;石宇等^[18]对OSB和CSB冷弯薄壁型钢墙架柱的轴压性能开展了试验研究;ZHANG等^[19]对秸秆板冷弯薄壁型钢复合墙体受压性能开展了试验研究;YE等^[20]对OSB、CSB、GWB、GMB、GMB+GWB冷弯薄壁型钢复合墙体开展了受压试验研究。

上述研究文献表明,在冷弯薄壁型钢框架外侧铺设面板可改变墙体的破坏模式,对于单面覆板复合墙体,主要发生立柱的畸变屈曲以及整体弯扭失稳破坏;对于双面覆板复合墙体,主要发生立柱的局部屈曲破坏。墙面板可以提高墙体的受压承载能力,提高幅度通常在15%~200%范围内,与面板的类型、面板的铺设方式、自攻螺钉的间距以及墙柱的计算长度等因素密切相关^[17-20]。

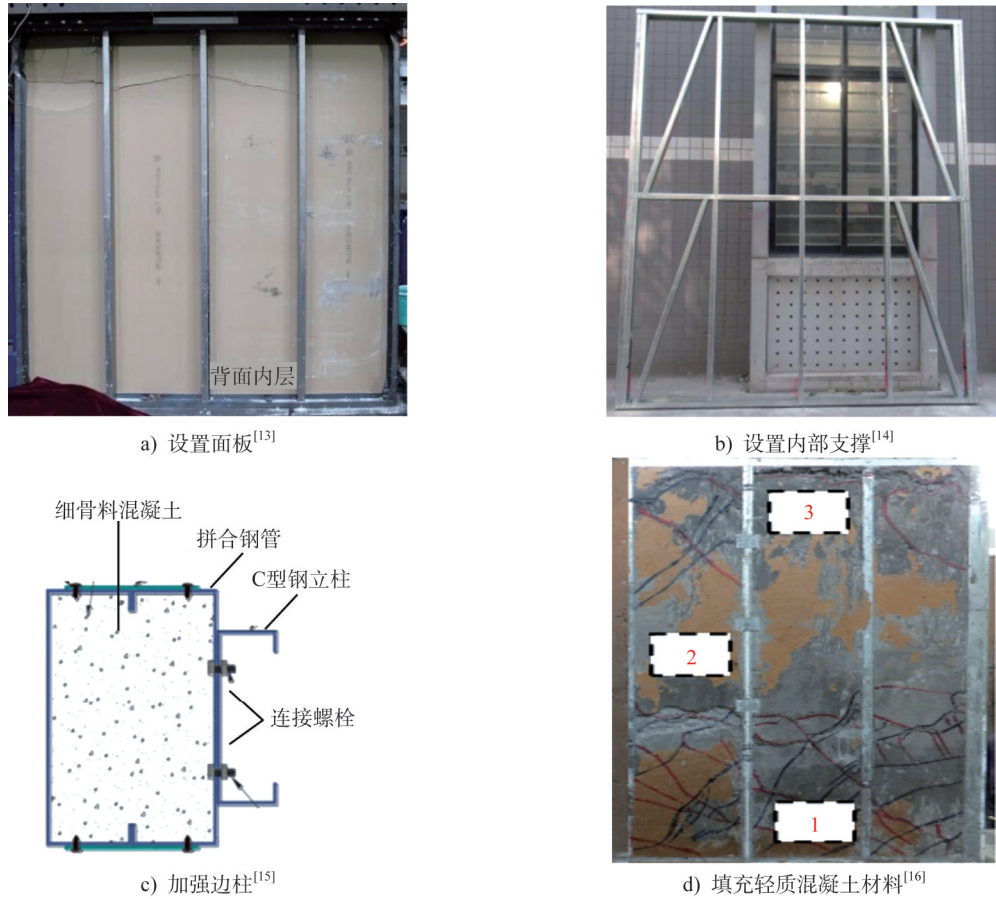


图2 冷弯薄壁型钢复合墙体主要形式

Fig. 2 Main forms of cold-formed thin-walled steel composite walls

表1 冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体受压力学性能研究概况

Table 1 Review on the compressive performance of CFS composite walls with sheathing

文献来源	墙体尺寸(宽×高)/m	墙板类型
何保康等 ^[17]	1.2×3.0	单面带肋钢板,带肋钢板+GWB
石宇等 ^[18]	0.8×3.0,1.2×3.0	单面OSB,单面CSB,OSB+CSB
ZHANG等 ^[19]	1.2×1.4	双面秸秆板
YE等 ^[20]	1.2×3.0	单面CSB,单面GWB,单面GMB,单面OSB,GMB+GWB

2.2 冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体

在冷弯薄壁型钢框架内填充轻混凝土可使钢框架与轻混凝土协同受力,轻混凝土与墙柱能够共同承担竖向荷载,且轻混凝土对墙柱具有约束作用,能抑制墙柱的整体屈曲和局部屈曲,因此可极大地提高复合墙体的受压承载力。国内外学者针对冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体受压性能开展了大量研究,如表2所示。陈大鸿等^[21]对轻钢-泡沫混凝土复合墙体进行了受压试验研究;高立^[22]对填充聚苯乙烯泡沫(EPS)-石膏基轻质材料的冷弯型钢复合墙体轴压性能开展了研究;XU等^[23]对高强泡沫混凝土冷弯薄壁型钢复合墙体开展了受压力学性能研究;WANG等^[24]对轻质聚合物材

料(LPM)复合墙体开展了试验研究;WU等^[25]对轻质烟气脱硫(FGD)石膏复合墙体的受压力学性能开展了研究;此外,HEGYI等^[26]也对冷弯薄壁型钢-轻质聚丙烯骨料混凝土(PAC)组合立柱的受压性能开展了试验研究。

上述文献表明,冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体在竖向荷载下主要发生边柱局部屈曲和混凝土局部压溃破坏。轻混凝土能显著提高复合墙体的承载力、刚度和延性。其承载力提高的原因主要有两点:(1)轻混凝土本身具有一定承载力,能够分担大部分竖向荷载;(2)轻混凝土对冷弯薄壁型钢框架具有约束作用,能够限制立柱局部屈曲,进而提高复合墙体受压承载能力。

表2 冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体受压性能研究概况

Table 2 Review on the compressive performance of CFS-lightweight concrete composite walls

文献来源	墙体尺寸(宽×高)/m	轻混凝土类型
陈大鸿等 ^[21]	0.8×2.4	泡沫混凝土
高立 ^[22]	1.2×3.0	EPS-石膏基轻质材料
XU等 ^[23]	1.2×3.0	高强泡沫混凝土
WANG等 ^[24]	1.2×2.7	轻质聚合物材料
WU等 ^[25]	1.2×3.0	轻质烟气脱硫石膏

3 受剪力学性能研究

3.1 冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体

传统冷弯薄壁型钢复合墙体依靠墙面板和自攻螺钉承载水平荷载。墙面板类型是复合墙体抗剪力学性能的

重要影响因素,国内外许多学者对使用不同墙板的复合墙体抗剪力学性能进行了试验研究,如表3所示。周绪红等^[27]对单面OSB和单面CSB冷弯薄壁型钢复合墙体抗剪性能开展了试验研究;苏明周等^[28]对双面覆板(OSB+GWB)冷弯薄壁型钢复合墙体抗剪性能开展了试验研究;马杰^[13]对钢框外敷混凝土和GWB复合墙体的受剪性能开展了研究;石宇等^[29]对新型冷弯薄壁型钢板剪力墙抗剪性能开展了试验研究,该复合墙体在抱合边柱之间设置薄钢板来承受剪切荷载;高宛成^[30]对冷弯薄壁型钢竹胶合板复合墙体抗剪性能开展了试验研究;ZHANG等^[31]对以秸秆板为面板的冷弯薄壁型钢复合墙体抗剪性能开展了研究;石宇^[32]对冷弯薄壁型钢复合墙体抗剪性能开展了大量的试验与数值研究,其复合墙体采用了单面GWB、单面OSB以及双面覆板(GWB+OSB)等形式;李元齐等^[33]对以带肋波纹钢板、OSB和GWB为面板的冷弯薄壁型钢复合墙体开展了抗剪试验研究。

表3 冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体受剪性能研究概况

Table 3 Review on the shear performance of CFS composite walls with sheathing

文献来源	墙体尺寸(宽×高)/m	加载方式	墙板类型
周绪红等 ^[27]	2.4×3.0	单调加载,低周反复加载	单面OSB,单面CSB
苏明周等 ^[28]	2.7×4.9,2.7×5.1	低周反复加载	OSB+GWB
马杰 ^[13]	2.4×2.4	低周反复加载	双面GWB,GWB+混凝土板
石宇等 ^[29]	0.625×3.0,1.25×3.0	单调加载,低周反复加载	夹支薄钢板
高宛成 ^[30]	1.22×2.44	单调加载,低周反复加载	单面竹胶合板
ZHANG等 ^[31]	1.2×2.4	单调加载,低周反复加载	单面秸秆板
石宇 ^[32]	2.4×3.0,2.4×3.3	单调加载,低周反复加载	单面GWB,单面OSB,GWB+OSB
李元齐等 ^[33]	2.4×3.0	单调加载,低周反复加载	GWB+OSB,GWB+带肋波纹钢板

上述文献表明,冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体主要发生面板局部承压破坏、面板周边和拼缝处的螺钉失效破坏以及立柱局部屈曲破坏等。此外,大量的数值分析结果表明增大面板厚度、减小立柱间距、减小自攻螺钉间距均可显著提高墙体的抗剪承载力^[34-37]。然而,覆面板复合墙体的承载力和抗侧刚度十分有限,并且其隔热、隔音和抗冲击性能较差,难以满足多高层建筑结构对复合墙体的承载力与功能需求。

3.2 设置内部支撑的冷弯薄壁型钢复合墙体

在冷弯薄壁型钢框架内部设置支撑也能有效提高墙体抗剪性能。工程中通常在冷弯薄壁型钢框架内部设置支撑,同时在外侧铺设面板,使面板与内部支撑共同承担水平剪力。熊刚等^[38]对足尺镁晶板覆面的带刚性斜撑冷弯薄壁型钢复合墙体开展了受剪性能试验;苏明周等^[28]对双面覆板(OSB+GWB)带斜撑的复合墙体开展

了受剪性能试验;刘斌等^[39]对以聚苯乙烯泡沫板作为面板的带斜撑复合墙体开展了受剪性能试验;WANG等^[40]对以OSB或GWB为面板的带斜撑复合墙体开展了受剪性能试验;MIRZAEI等^[41]对交叉支撑冷弯薄壁型钢墙体开展了受剪性能试验;BARAN等^[42]对以OSB为面板的带斜撑冷弯薄壁型钢复合墙体开展了受剪性能试验;LIU等^[43]对以轻质砂浆为面板的X形斜撑冷弯薄壁型钢复合墙体开展了受剪性能试验。研究表明,在冷弯薄壁型钢框架内部设置斜撑可以提高墙体的抗剪性能,然而当墙体存在面板时,斜撑对墙体抗剪承载力的提高作用较小。通常斜撑与立柱连接处为薄弱部位,在该处很容易发生自攻螺钉剪切破坏和立柱的局部屈曲破坏。

3.3 边柱加强的冷弯薄壁型钢复合墙体

前述研究表明,冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体易发生边柱局部屈曲破坏,造成墙体承载力和延性降低。

因此一些学者考虑对墙体边柱进行加强,以进一步提高复合墙体的力学性能。WANG等^[44-45]提出将双拼闭口钢管柱作为边柱,并在其中充填细骨料混凝土。试验结果表明,该墙体主要发生螺钉拔出与面板开裂破坏;相比于相同尺寸的传统覆面板复合墙体,边柱加强复合墙体具有更高的抗剪承载力、刚度和延性。SHI等^[46]提出采用帽形截面柱或者箱形截面柱作为复合墙体边柱,以提高墙体在水平往复荷载下的承载力。研究表明,使用帽形截面柱作为边柱能够显著提高墙体抗剪承载力;使用方钢管作为边柱可以有效避免立柱的扭转失效破坏。

3.4 冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体

国内外学者针对冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体受剪性能开展了大量研究,如表4所示。XU等^[16,47-48]对轻钢-高强泡沫混凝土复合墙体受剪性能开展了大量试验研究;WANG等^[49-50]对轻质陶粒混凝土复合墙体受剪

性能开展了研究;WU等^[51]对轻型烟气脱硫石膏复合墙体受剪性能开展了试验研究;WANG等^[52-53]对填充轻质聚合物材料(LPM)的冷弯薄壁型钢复合墙体的受剪力性能开展了试验研究;丁小蒙^[54]对冷成型钢-泡沫混凝土复合墙体抗震性能开展了研究;王彤彤等^[55]对以泡沫混凝土或聚苯颗粒泡沫混凝土为填充材料的复合墙体抗剪性能开展了试验研究;田稳苓等^[56]对设置方钢管连接件的聚苯颗粒泡沫混凝土轻钢龙骨复合墙体抗剪性能开展了试验研究;赵欣等^[57]对轻钢龙骨泡沫混凝土复合墙体抗剪性能开展了试验研究;袁泉等^[58]对轻钢聚苯颗粒泡沫混凝土复合墙体受剪性能开展了试验研究。结果表明,冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体主要发生混凝土与型钢之间的黏结滑移破坏、混凝土压溃破坏、边柱局部屈曲破坏、面板开裂破坏和自攻螺钉剪断破坏等。填充不同类型的轻混凝土均能提高复合墙体的抗侧刚度、受剪承载力、延性和滞回耗能性能。

表4 冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体受剪性能研究概况

Table 4 Review on the shear performance of CFS-lightweight concrete composite walls

文献来源	墙体尺寸(宽×高)/m	加载方式	轻混凝土类型
XU等 ^[16,47-48]	2.4×3.0,3.6×3.0	低周反复加载	高强泡沫混凝土
WANG等 ^[49-50]	2.4×3.0,3.3×3.0	低周反复加载	轻质陶粒混凝土
WU等 ^[51]	2.4×3.0	低周反复加载	轻质烟气脱硫石膏
WANG等 ^[52-53]	3.0×2.755	低周反复加载	轻质聚合物材料
丁小蒙 ^[54]	2.4×3.0,3.0×3.6	低周反复加载	泡沫混凝土
王彤彤等 ^[55]	1.5×3.0	低周反复加载	泡沫混凝土,聚苯颗粒泡沫混凝土
田稳苓等 ^[56]	2.4×2.8	单调加载,低周反复加载	聚苯颗粒泡沫混凝土
赵欣等 ^[57]	2.4×2.8	低周反复加载	泡沫混凝土
袁泉等 ^[58]	3.0×3.0	低周反复加载	聚苯颗粒泡沫混凝土

4 现行规范的设计方法

4.1 轻钢轻混凝土结构技术规程 JGJ 383—2016

《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]给出了剪力墙正截面轴心受压承载力计算公式,如式(1)。其受压承载力由混凝土和型钢共同组成,并考虑了墙体的稳定系数。

$$N_u = 0.7\varphi(f_c A_c + f_a A_a) \quad (1)$$

式中: N_u 为轴向压力设计值; φ 为稳定系数; f_c 和 f_a 分别为轻混凝土轴心抗压强度与轻钢抗压强度; A_c 和 A_a 分别为轻混凝土截面面积与轻钢立柱截面面积。

《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]给出了轻钢轻混凝土剪力墙的受剪承载力计算公式,如式(2)和式(3)。该公式以混凝土轴心抗拉强度计算混

土部分对墙体受剪承载力的贡献,同时考虑了剪力墙所受竖向压力和水平分布轻钢对抗剪承载力的影响。值得注意的是,该规程认为只有25%的水平分布轻钢对墙体的抗剪承载能力起作用。

对于持久设计工况和短暂设计工况:

$$V_u = \frac{1}{\lambda - 0.5} \left(\alpha f_t A_c + 0.08N \frac{A_w}{A} \right) + 0.25f_a \frac{A_{ah}}{s} h_{w0} \quad (2)$$

对于地震设计工况:

$$V_u = \left[\frac{1}{\lambda - 0.5} \left(\beta f_t A_c + 0.06N \frac{A_w}{A} \right) + 0.2f_a \frac{A_{ah}}{s} h_{w0} \right] / \gamma_{RE} \quad (3)$$

式中: V_u 为受剪承载力; λ 为组合墙体的剪跨比; α 和 β 为与轻混凝土类型相关的系数,对于聚苯颗粒混凝土,取

$\alpha=0.4, \beta=0.3$, 对于泡沫混凝土, 取 $\alpha=0.5, \beta=0.4$; f_t 为混凝土轴心抗拉强度; N 为墙体所受竖向压力, 且 $N \leq 0.2f_c A_c$; A_w 为 T 形或 I 形墙体腹板截面面积, 对于矩形墙体取为毛截面面积 A ; A_{sh} 为同一截面内的水平分布轻钢的截面面积; s 为水平分布轻钢间距; h_{w0} 为截面有效高度, 取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。

4.2 组合结构设计规范 JGJ 138—2016

《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60] 给出了组合结构正截面受压承载力计算方法, 如式(4)所示。其承载力由混凝土、型钢以及钢筋共同贡献, 并考虑了结构的稳定系数。其中系数 0.9 为可靠度调整系数, 主要是考虑实际结构中荷载的偶然偏心。

$$N_u = 0.9\varphi(f_c A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (4)$$

式中: f_y 为钢筋屈服强度, A_s 为纵向钢筋截面面积。

《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60] 给出了型钢混凝土组合墙体受剪承载力计算公式, 如式(5)和式(6)所示。该公式以混凝土轴心抗拉强度计算混凝土部分对墙体受剪承载力的贡献, 考虑了剪跨比、水平分布钢筋以及竖向压力及边柱对抗剪承载力的影响。与《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59] 相比, 该规程认为所有的水平分布钢筋均能完全屈服。

对于持久设计工况和短暂设计工况:

$$V_u = \frac{1}{\lambda - 0.5} \left(0.5f_t b_w h_{w0} + 0.13N \frac{A_w}{A_g} \right) + f_{yh} \frac{A_{sh1}}{s} h_{w0} + \frac{0.4}{\lambda} f_a A_{al} \quad (5)$$

对于地震设计工况:

$$V_u = \left[\frac{1}{\lambda - 0.5} \left(0.4f_t b_w h_{w0} + 0.1N \frac{A_w}{A_g} \right) + 0.8f_{yh} \frac{A_{sh1}}{s} h_{w0} + \frac{0.32}{\lambda} f_a A_{al} \right] / \gamma_{RE} \quad (6)$$

式中: b_w 为组合墙体宽度; h_{w0} 为墙体受压侧边缘至受拉侧型钢形心之间的距离; f_{yh} 为水平分布钢筋抗拉强度; A_{sh1} 为同一水平截面内的水平分布钢筋的截面面积; s 为水平分布钢筋间距; f_a 为型钢抗拉强度; A_{al} 为墙体一端边柱的截面面积; A_g 为墙体毛截面面积。

4.3 美国混凝土结构设计规范 ACI 318—19

美国混凝土结构设计规范 ACI 318—19^[61] 给出了混凝土墙体轴向受压承载力计算公式, 如式(7)所示。其承载力由混凝土和纵向钢筋共同贡献。其中 0.8 为考虑荷载偶然偏心的调整系数。

$$N_u = 0.8(0.85f'_c A_c + f_y A_s) \quad (7)$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

美国混凝土结构设计规范 ACI 318—19^[61] 给出了混凝土墙体受剪承载力计算公式, 如式(8)所示。该公式根据混凝土圆柱体抗压强度计算混凝土部分对受剪承载力的贡献, 考虑了剪跨比与水平钢筋对抗剪承载力的影响, 但是忽略了竖向压力对抗剪承载力的有利影响。该规范也认为所有的水平分布钢筋均能完全屈服。值得注意的是, 在计算受剪承载力时, 应力单位应转换为英制压强单位。

$$V_u = (\alpha_c \eta \sqrt{f'_c} + \rho_h f_{yh}) A_g \quad (8)$$

式中: α_c 为与剪跨比 λ 有关的系数, 当 $\lambda < 1.5$ 时取 3, 当 $\lambda > 2.0$ 时取 2, 当 $1.5 < \lambda < 2.0$ 时, α_c 按线性插值获取; η 为轻质混凝土强度折减系数, 取 0.75; ρ_h 为水平分布钢筋配筋率, $\rho_h = A_{sh} / (b_w h)$, 其中 A_{sh} 为水平分布钢筋总截面面积, h 为墙体高度。

4.4 美国钢结构建筑规范 AISC 360—22

美国钢结构建筑规范 AISC 360—22^[62] 给出了钢骨混凝土组合构件受压承载力计算方法, 如式(9)~式(14)所示。其受压承载力由混凝土、纵向钢筋和型钢共同贡献, 并考虑了结构屈曲对受压承载力的影响。

$$\text{当 } \frac{N_{u0}}{N_{cr}} \leq 2.25 \text{ 时}$$

$$N_u = N_{u0} (0.658^{N_{u0}/N_{cr}}) \quad (9)$$

$$\text{当 } \frac{N_{u0}}{N_{cr}} > 2.25 \text{ 时}$$

$$N_u = 0.877N_{cr} \quad (10)$$

$$N_{u0} = f_a A_a + f_y A_s + 0.85f'_c A_c \quad (11)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{\text{eff}}}{l_0^2} \quad (12)$$

$$(EI)_{\text{eff}} = E_s I_s + E_a I_a + C_1 E_c I_c \quad (13)$$

$$C_1 = 0.25 + 3 \left(\frac{A_a + A_s}{A_g} \right) \leq 0.7 \quad (14)$$

式中: N_{u0} 为不考虑屈曲影响的正截面受压承载力; N_{cr} 为弹性临界承载力; $(EI)_{\text{eff}}$ 为有效截面刚度; l_0 为结构有效计算长度; E_c 、 E_s 和 E_a 分别为混凝土、钢筋和型钢的弹性模量; I_c 、 I_s 和 I_a 分别为混凝土、钢筋和型钢的截面惯性矩; A_g 为组合结构的毛截面面积。

4.5 欧洲钢与混凝土组合结构设计规范 EN 1994—1—1

欧洲钢与混凝土组合结构设计规范 EN 1994—1—1^[63] 给出了外包混凝土或部分外包混凝土组合结构的正截面受压承载力计算公式, 如式(15)所示。其受压承载力由混凝土、纵向钢筋和型钢共同贡献, 并考虑了结构稳定性系数的影响。结构的稳定性系数可根据相对长细比来确定, 如式(16)~式(20)所示。

$$N_u = \varphi(f'_c A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (15)$$

$$\varphi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (16)$$

$$\Phi = 0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2) \quad (17)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f'_c A_c + f_y A_s + f_a A_a}{N_{cr}}} \quad (18)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{l_0^2} \quad (19)$$

$$(EI)_{eff} = E_s I_s + E_a I_a + 0.6 E_c I_c \quad (20)$$

式中： $\bar{\lambda}$ 为相对长细比； α 为与截面类型相关的缺陷系数； N_{cr} 为弹性临界承载力。

4.6 算例分析与讨论

为了对比不同设计方法计算结果的区别,设计一冷弯薄壁型钢-泡沫混凝土复合墙体,墙体宽度为1 800 mm,高度为3 000 mm,厚度为140 mm,立柱采用Q355冷弯薄壁型钢,间距为600 mm,截面型号为C140×50×20×1.5,导梁采用Q355冷弯薄壁型钢,截面型号为U144×35×1.5,墙体中部布置一道横向支撑,横向支撑采用Q355冷弯薄壁型钢,截面型号为C144×50×20×1.5,泡沫混凝土强度等级为FC5,密度为1 200 kg·m⁻³,其立方体抗压强度为5.0 MPa,轴心抗压强度和圆柱体抗压强度根据式(21)和式(22)计算^[64-65],分别为3.34 MPa和3.95 MPa,抗拉强度和弹性模量可根据式(23)和式(24)计算得到^[16,66-67],分别为0.58 MPa和3 852 MPa。

$$f_c = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu} \quad (21)$$

$$f'_c = 0.79f_{cu} \quad (22)$$

$$f_t = 0.23(f'_c)^{0.67} \quad (23)$$

$$E = 1.70 \times 10^{-6} \rho^2 (f'_c)^{0.33} \quad (24)$$

式中： f_c 、 f'_c 和 f_{cu} 分别为混凝土棱柱体抗压强度、混凝土圆柱体抗压强度和混凝土立方体抗压强度； f_t 为混凝土抗拉强度； E 为混凝土弹性模量； α_{c1} 为棱柱体抗压强度与立方体抗压强度之比,取为0.76； α_{c2} 为混凝土脆性折减系数,取为1.00； ρ 为混凝土密度。

分别采用前面介绍的《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]、《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]、美国混凝土结构设计规范ACI 318-19^[61]、美国钢结构建筑规范AISC 360-22^[62]和欧洲钢与混凝土组合结构设计规范EN 1994-1-1^[63]对复合墙体的抗压承载力进行计算,计算结果如表5所示。从表中可以看出采用《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]、美国钢结构建筑规范AISC 360-22^[62]和欧洲钢与混凝土组合结构设计规范EN 1994-1-1^[63]计算的结果比较接近,差别在5%的范围内。采用《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]计算的结果比平均值大3%,而采用《轻钢轻混凝土结构技

术规程》(JGJ 383—2016)^[59]计算的结果比平均值小26%,其原因主要在于《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]采用了更小的初偏心可靠性调整系数。采用美国混凝土结构设计规范ACI 318-19^[61]计算的结果比平均值大19%,其主要原因是美国混凝土结构设计规范ACI 318-19^[61]在计算截面受压承载力时没有考虑结构稳定系数。

表5 采用不同规范计算得到的受压承载力对比

Table 5 Comparison of compressive bearing capacities calculated using different codes

规范名称	JGJ 383—2016	JGJ 138—2016	ACI 318-19	AISC 360-22	EN 1994-1-1
受压承载力/kN	719.76	996.59	1 153.99	990.58	989.70
与平均值之比	0.74	1.03	1.19	1.02	1.03

分别采用《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]、《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]和美国混凝土结构设计规范ACI 318-19^[61]计算复合墙体的受剪承载力,只考虑持久设计工况和短暂设计工况,假定轴压比为0.2,即墙体所受竖向荷载为200 kN,计算结果如表6所示。由此可见不同规范的计算结果相差非常大,采用《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]计算的结果最小,其原因主要是该规范在计算横向支撑对受剪承载力的贡献时考虑了0.25的折减系数,而《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]和美国混凝土结构设计规范ACI 318-19^[61]认为横向支撑完全有效。采用《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]计算的结果最大,其原因主要是该规范认为横向支撑能完全发挥作用,并且考虑了墙体边柱对受剪承载力的贡献。

表6 不同规范得到的受剪承载力对比

Table 6 Comparison of shear bearing capacities calculated using different codes

规范名称	JGJ 383—2016	JGJ 138—2016	ACI 318-19
受剪承载力/kN	112.70	302.15	173.89
与平均值之比	0.61	1.52	0.87

5 目前存在的主要问题

5.1 相关设计规范不完善

《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[60]、美国混凝土结构设计规范ACI 318-19^[61]、美国钢结构建筑规范AISC 360-22^[62]以及欧洲规范EN 1994-1-1^[63]给出了混凝土组合结构的承载力设计方法,但这些规范仅适用于普通混凝土结构,不能准确地反映轻混凝土复合墙体的

受力机理。《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)^[59]仅给出了聚苯颗粒混凝土和泡沫混凝土复合墙体的承载力设计方法,然而近年来工程中常见的轻质混凝土还包括蒸压加气混凝土、陶粒混凝土、膨胀珍珠岩混凝土以及膨胀矿渣混凝土等。

5.2 复合墙体边柱易发生局部屈曲

图3为典型的冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体剖面图,由图可见复合墙体的中柱腹板完全约束,而边柱腹板并没有被完全约束,轻混凝土对边柱的约束效应远低于中柱,导致边柱成为复合墙体的薄弱部位。冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体在受压或受剪荷载下很容易发生边柱局部屈曲破坏。为了进一步提高复合墙体的力学性能,有必要采取相应措施对边柱进行加强,例如采用厚度更大的钢材和承载力更高的截面形式。

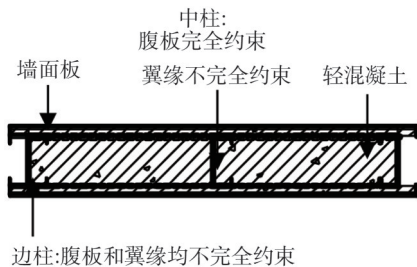


图3 复合墙体剖面图

Fig. 3 Cross section of composite wall

5.3 轻混凝土与冷弯薄壁型钢之间的黏结滑移性能较差

在复合墙体浇筑过程中,冷弯薄壁型钢框架与墙面板可以起到混凝土模板的作用,因此冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体具有节约成本、施工便捷等优势。然而冷弯薄壁型钢框架也将轻混凝土分割成为多个互不关联的区域,使得轻混凝土整体性降低。当墙体受到往复水平荷载时,轻混凝土与冷弯薄壁型钢框架之间普遍发生黏结滑移破坏,使得冷弯薄壁型钢框架与轻混凝土之间的相互作用减弱,造成墙体承载力的降低。

5.4 忽略结构装配对复合墙体力学性能的影响

目前针对冷弯薄壁型钢复合墙体的研究还主要集中于单一墙体的力学性能。然而在实际结构中,复合墙体通常会与梁、柱或其它墙肢进行连接,因此实际结构中的复合墙体受力更复杂。在试验中,当结构承受剪切荷载时,受压侧的边柱与混凝土承担压力,受拉侧的抗拔件承担拉力,而在实际结构中,翼缘墙肢会承担大部分的竖向力,并且边柱所受约束效应也比试验中更强。因此实际结构中的复合墙体承载力可能会比试验结果更高,故而

需要更准确地考虑实际结构中墙体的受力特性。

6 研究展望

为了将冷弯薄壁型钢结构体系向多高层建筑领域推广,冷弯薄壁型钢复合墙体的下列方面应被重点关注。

6.1 复合墙体防火性能研究

多高层建筑火灾风险大、蔓延途径多、人员疏散困难。轻混凝土通常导热系数低,具有较好的隔热防火性能。轻混凝土的包裹作用可以有效提高钢框架的耐火能力,其低导热性也可以有效减缓火灾的蔓延速度,提高整体结构的耐火极限。然而目前针对轻混凝土复合墙体耐火性能的研究还较少,为了进一步推广冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体在多高层建筑领域中的应用,有必要对该类复合墙体在火灾下的力学性能开展研究。

6.2 复合墙体装配化研究

为了推动冷弯薄壁型钢结构体系的进一步发展,提高其装配化率,有必要针对复合墙体的装配化性能开展研究。装配式复合墙体的主要优势是工厂化生产与加工,运送至现场后可以直接通过高强螺栓进行连接,施工效率高,施工现场的噪音、粉尘污染小。然而目前针对复合墙体装配化的研究还相对较少,因此有必要针对不同装配形式的复合墙体开展深入研究。通过深入探究各种装配技术的可行性与优势,开发出更多适合不同场景的装配式复合墙体产品。

6.3 复合墙体集中受压力学性能研究

前述大部分文献只考虑了复合墙体在均布受压状态下的力学性能,然而建筑结构中楼面荷载主要通过梁传递至立柱,再传至基础,楼面梁荷载按其从属面积计算,此时复合墙体处于集中受压状态,复合墙体中柱所受荷载为边柱的2倍。目前对复合墙体在集中受压状态下的力学性能研究较少,特别是针对新型的冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体。多高层建筑结构受力复杂,为了推广冷弯薄壁型钢复合墙体在多高层建筑领域中的应用,有必要进一步开展复合墙体集中受压力学性能的试验与设计方法研究。

6.4 开洞轻钢-轻混凝土复合墙体力学性能研究

目前针对开洞冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体的构造与力学性能研究还相对较少。由于建筑使用功能的需要,墙体不可避免地需要开设门窗洞口。然而这些洞口处往往成为应力集中的区域,成为复合墙体的薄弱部位,会显著降低复合墙体的整体承载力。因此,有必要深入研究门窗洞口对冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体力学性能的影响。

6.5 整体结构抗震性能研究

目前针对冷弯薄壁型钢复合墙体的分析和试验研究较多,但对整体结构抗震性能的研究还相对较少。相比于单一复合墙体的拟静力试验,实际结构中复合墙体通常与其它结构或非结构构件相互作用,所承受的荷载也更加复杂多变。因此,有必要针对冷弯薄壁型钢整体结构开展足尺振动台试验,以更精确地探究复合墙体与主体结构或其它非结构构件之间的相互影响,来揭示整体结构在地震作用下的工作状态与破坏机理,判断结构形式是否满足小震不坏、中震可修、大震不倒的设计需求,为结构的优化设计和安全评估提供依据。

7 结论

本文总结了国内外关于冷弯薄壁型钢复合墙体的主要形式,并对其受压和受剪力学性能相关研究进行文献综述。本文还梳理了中国、美国和欧洲有关规范中关于混凝土复合墙体受压和受剪承载力的计算方法,以一个复合墙体算例分析了不同设计方法的差异,指出了目前冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体存在的主要问题,并探讨了未来的主要研究趋势,可以得到以下主要结论:

(1) 传统冷弯薄壁型钢-覆面板复合墙体承载力有限,并且其隔热、隔音和抗冲击性能较差,主要应用于低层冷弯薄壁型钢住宅,难以满足多高层建筑结构对复合墙体的承载力与功能需求。冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体具有抗侧刚度更大、承载力更高、延性及滞回耗能性能更好、隔热隔声性能更好等优点,更适合用于多高层冷弯薄壁型钢结构体系。

(2) 目前针对冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体的相关设计规范较少,这在一定程度上限制了该类复合墙体的广泛应用。现有的《轻钢轻混凝土结构技术规程》(JGJ 383—2016)仅给出了泡沫混凝土和聚苯颗粒混凝土复合墙体的设计方法,还需进一步补充其它常用的新型轻混凝土复合墙体设计方法。

(3) 目前针对冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体装配化的相关研究还较少,现有研究主要集中于单片复合墙体力学性能,忽略了复合墙体装配对墙体力学性能的影响。为了加快推进装配式冷弯薄壁型钢结构体系的发展,有必要针对不同装配形式的复合墙体开展研究。

(4) 为了推广冷弯薄壁型钢-轻混凝土复合墙体在多层建筑领域中的应用,应进一步深入研究复合墙体的防火性能、复合墙体集中受压力学性能、门窗洞口对复合墙体力学性能的影响以及整体结构抗震性能等,同时也要重视复合墙体边柱易发生局部屈曲、轻混凝土与冷弯薄壁型钢黏结性能差等现存问题。

参考文献:

- [1] 王元清,石永久,陈宏,等.现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J].建筑结构学报,2002,23(1):2-8.DOI:10.3969/j.issn.1671-3362.2002.01.017.
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, CHEN Hong, et al. Contemporary lightweight steel structure and its application in China[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 2-8. DOI:10.3969/j.issn.1671-3362.2002.01.017.(in Chinese)
- [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 low-rise residential building [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 5-18.(in Chinese)
- [3] WILLIAMS L W. Introduction to recent trends in cold-formed steel construction[M].Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.
- [4] 南晶晶,凌利改,田国平.冷弯型钢在国内的发展及其在建筑结构中的应用[J].水利与建筑工程学报,2009,7(2):117-119,135.
NAN Jingjing, LING Ligai, TIAN Guoping. Development of cold bending steel at home and abroad and its application in construction[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(2): 117-119, 135.(in Chinese)
- [5] 舒赣平,孟宪德,王培.轻钢住宅结构体系及其应用[J].工业建筑,2001,31(8):1-4.
SHU Ganping, MENG Xiande, WANG Pei. Development and application of light steel structure for residential buildings[J]. Industrial Construction, 2001, 31(8): 1-4.(in Chinese)
- [6] American Iron and Steel Institute. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members: AISI S100-16[S].Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2016.
- [7] Standards Australia. Cold-Formed Steel Structures: AS/NZS 4600:2018[S].Sydney: Standards Australia, 2018.
- [8] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-3: General Rules—Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting: EN 1993-1-3[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.冷弯薄壁型钢结构技术规范:GB 50018—2002[S].北京:中国计划出版社,2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code of Cold-Formed Thin-Wall Steel Structures: GB 50018—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.(in Chinese)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.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

- 版社,2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Buildings: JGJ 227—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准: JGJ/T 421—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Standard for Cold-Formed Thin-Walled Steel Multi-Storey Residential Buildings: JGJ/T 421—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [12] 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.DOI:10.19701/j.jzjg.2019.19.011.
- LI Yuanqi, XU Houjun. Research and development of cold-formed steel structures in China[J]. Building Structure, 2019, 49(19):91-101.DOI:10.19701/j.jzjg.2019.19.011. (in Chinese)
- [13] 马杰.钢框外敷混凝土和石膏板复合墙体受力性能研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- MA Jie. Study on the mechanical performance of steel frame sheathing with concrete and plasterboard composite wall[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [14] 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 Bin. 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)
- [15] WANG X X, WANG W, FEI H J. Shear performance degradation of cold-formed steel shear walls sheathed with gypsum boards under multi-cycle reversed loading[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 161: 107521. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107521.
- [16] XU Z F, CHEN Z F, YANG S H. Effect of a new type of high-strength lightweight foamed concrete on seismic performance of cold-formed steel shear walls[J]. Construction and Building Materials, 2018, 181: 287-300. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.067.
- [17] 何保康,郭鹏,王彦敏,等.高强冷弯型钢骨架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),2008,40(4):567-573,579. DOI:10.3969/j.issn.1006-7930.2008.04.021.
- HE Baokang, GUO Peng, WANG Yanmin, et al. Experimental investigation on high strength cold-formed steel framing wall studs under axial compression loading[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(4): 567-573, 579. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2008.04.021. (in Chinese)
- [18] 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. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2012.02.018.
- 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. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2012.02.018. (in Chinese)
- [19] ZHANG X H, ZHANG E Y, LI C R. Study on axial compression mechanical behavior of cold-formed thin-walled C-shaped steel composite wall sheathed with straw board on both sides[J]. Structures, 2021, 33: 3746-3756. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.06.071.
- [20] 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. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.028.
- [21] 陈大鸿,王建超,潘美旭,等.轻钢泡沫混凝土组合墙体竖向承载力试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):275-285.
- CHEN Dahong, WANG Jianchao, PAN Meixu, et al. Tests on vertical bearing capacity of steel-foamed concrete-fiber cement pressure plate composite walls[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(2): 275-285. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese)
- [23] XU Z F, ZHANG J, CHEN Z F, et al. Axial compressive behavior of new HFC-filled CTS composite walls sheathed with straw-fiber boards[J]. Structures, 2020, 28: 2582-2595. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.10.065.
- [24] WANG W Q, WANG J F, ZHAO P, et al. Axial compressive experiments and structural behaviour estimation of CFS composite walls sprayed with LPM[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101305. DOI: 10.1016/j.job.2020.101305.
- [25] 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. DOI: 10.1016/j.tws.2018.06.034.
- [26] HEGYI P, DUNAI L. Experimental investigations on ultra-lightweight-concrete encased cold-formed steel structures: Part II: Stability behaviour of elements subjected to compression[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 101: 100-108. DOI: 10.1016/j.tws.2016.01.003.
- [27] 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. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.05.018.
- ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Experimental study of the shear resistance of cold-formed steel stud walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 38-44. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.05.018. (in Chinese)
- [28] 苏明周, 黄智光, 孙健, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体循环荷载下抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 42-51. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.08.016.
- SU Mingzhou, HUANG Zhiguang, SUN Jian, et al. Experimental study of the shearing behavior of cold-formed steel wall panels under cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 42-51. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.08.016. (in Chinese)
- [29] 石宇, 曾乐, 向弋, 等. 新型冷弯薄壁型钢剪力墙抗侧性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(7): 21-30. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.07.003.
- SHI Yu, ZENG Le, XIANG Yi, et al. Experimental study on the lateral performance of new cold-formed thin-walled steel plate shear walls[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(7): 21-30. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.07.003. (in Chinese)
- [30] 高宛成. 冷弯薄壁型钢竹胶合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: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [31] ZHANG X H, ZHANG E Y, ZHANG Y Z. Study on shear performance of cold-formed thin-walled steel walls sheathed by paper straw board[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112873. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112873.
- [32] 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.
- SHI Yu. Study on the shear bearing capacity of low rise cold-formed thin-walled steel structure residential composite walls. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [33] 李元齐, 刘飞, 沈祖炎, 等. S350冷弯薄壁型钢龙骨式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 83-90. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.12.016.
- LI Yuanqi, LIU Fei, SHEN Zuyan, et al. Experimental investigation on seismic behavior of S350 light-gauge composite framing walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 83-90. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.12.016. (in Chinese)
- [34] 陈德. 冷弯薄壁型钢新型面板组合墙体抗剪承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- CHEN De. Cold-formed thin-wall steel new type panel composite wall shear bearing capacity[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [35] 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. (in Chinese)
- [36] 董海涛. 夹芯钢板冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- DONG Haitao. Research on the shear resistance of sandwich plate cold-formed steel composite wall[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [37] 徐敬文. 薄钢板覆面冷弯薄壁型钢墙体抗剪性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- XU Jingwen. Research on shear performance of thin-steel plate sheathed cold-formed steel wall[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [38] 熊刚, 吴稼丰, 杨秀红, 等. 带刚性斜撑的冷弯薄壁型钢剪力墙抗侧性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(7): 11-20. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.07.002.
- XIONG Gang, WU Jiafeng, YANG Xiuhong, et al. An experimental study on the lateral performance of the cold-formed thin-walled steel shear wall with rigid bracing[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(7): 11-20. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.07.002. (in Chinese)
- [39] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.01.012.
- LIU Bin, HAO Jiping, ZHONG Weihui, et al. Experimental research on seismic behavior of cold-formed thin-wall steel framing walls with sprayed thermal insulation material[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 85-92. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.01.012. (in Chinese)
- [40] WANG C G, YANG Z Y, ZHANG Z N, et al. Experimental study on shear behavior of cold-formed steel shear walls with bracket[J]. Structures, 2021, 32: 448-460. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.064.
- [41] MIRZAEI A, SANGREE R H, VELCHEV K, et al. Seismic capacity-based design of narrow strap-braced cold-formed steel walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 115: 81-91. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.023.
- [42] BARAN E, ALICA C. Behavior of cold-formed steel wall panels under monotonic horizontal loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79: 1-8. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.07.020.
- [43] LIU B, HAO J P, ZHONG W H, et al. Performance of cold-formed-steel-framed shear walls sprayed with lightweight mortar under reversed cyclic loading[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 98: 312-331. DOI: 10.1016/j.tws.2015.09.024.
- [44] WANG X X, WANG W, LI Y C. Cyclic performance of K-braced cold-formed steel shear walls with concrete-filled steel-

- tubular struts [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 173: 106249. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106249.
- [45] WANG X X, WANG W, YE J H, et al. Synergistic shear behaviour of cold-formed steel shear walls and reinforced edge struts [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 184: 106779. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106779.
- [46] SHI Y, LUO Z Q, XU Y P, et al. Experimental study on the seismic behavior of high-performance cold-formed steel plate shear walls [J]. *Engineering Structures*, 2022, 251: 113552. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113552.
- [47] XU Z F, CHEN Z F, OSMAN B H, et al. Seismic performance of high-strength lightweight foamed concrete-filled cold-formed steel shear walls [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 143: 148-161. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.12.027.
- [48] XU Z F, CHEN Z F, YANG S H. Seismic behavior of cold-formed steel high-strength foamed concrete shear walls with straw boards [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 124: 350-365. DOI: 10.1016/j.tws.2017.12.032.
- [49] WANG J Q, ZHOU T H, NIE S F, et al. Behavior of CFS shear walls infilled with lightweight ceramsite concrete under cyclic loading [J]. *Structures*, 2022, 45: 1833-1849. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.099.
- [50] WANG J Q, ZHOU T H, WU H H, et al. Cyclic performance of steel frame fabricated with cold-formed steel composite wall structure [J]. *Engineering Structures*, 2022, 270: 114892. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114892.
- [51] WU H H, CHAO S S, ZHOU T H, et al. Cold-formed steel framing walls with infilled lightweight FGD gypsum Part I: Cyclic loading tests [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 132: 759-770. DOI: 10.1016/j.tws.2018.04.003.
- [52] WANG W Q, WANG J F, GUO L, et al. Seismic response investigation and analytical model of light polymer material-filled CFS shear walls [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20 (2) : 59. DOI: 10.1007/s43452-020-00057-7.
- [53] WANG W Q, WANG J F, YANG T Y, et al. Experimental testing and analytical modeling of CFS shear walls filled with LPM [J]. *Structures*, 2020, 27: 917-933. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.06.016.
- [54] 丁小蒙.冷成型钢-泡沫混凝土粘结锚固及复合墙体抗震性能研究[D].南京:东南大学,2020.
DING Xiaomeng. Bond-anchorage between cold-formed steel and foamed concrete and seismic behaviors of composite walls [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [55] 王彤彤,周学军,王卫东,等.装配式轻钢复合墙体抗震性能试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(5): 22-30. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.003.
WANG Tongtong, ZHOU Xuejun, WANG Weidong, et al. Experiment on seismic performance of prefabricated light steel composite wall [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26 (5) : 22-30. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.003. (in Chinese)
- [56] 田稳苓,温晓东,彭佳斌,等.设置方钢管连接件的泡沫混凝土轻钢龙骨复合墙体受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(3): 124-133. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0408.
TIAN Wenling, WEN Xiaodong, PENG Jiabin, et al. Experimental study on mechanical property for light steel-framed composite wall with square steel pipe fitting filled with foam concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42 (3) : 124-133. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0408. (in Chinese)
- [57] 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(中英文)*, 2019, 34(5): 19-23. DOI: 10.13206/j.gjg.201905004.
ZHAO Xin, FAN Yuqi, WANG Shuyang. Experimental research on performance of composite wall of foamed concrete with lightweight steel keel under quasi-static loading [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2019, 34 (5) : 19-23. DOI: 10.13206/j.gjg.201905004. (in Chinese)
- [58] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.11.012.
YUAN Quan, YANG Yi, LYU Dongxin, et al. Experimental study on shear resistance of light steel polystyrene foam concrete wall [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39 (11) : 104-111. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.11.012. (in Chinese)
- [59] 中华人民共和国住房和城乡建设部.轻钢轻混凝土结构技术规范: JGJ 383—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification of Lightweight Steel and Lightweight Concrete Structures: JGJ 383—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [60] 中华人民共和国住房和城乡建设部.组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Composite Structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [61] American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete: ACI 318-19 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [62] America Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-22[S]. Chicago: America Institute of Steel Construction, 2022.
- [63] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1994-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.