

文章编号: 1000-4750(2016)12-0001-11

组合截面冷弯薄壁型钢结构研究进展

陈 明, 黄骥辉, 赵根田

(内蒙古科技大学土木工程学院, 包头 014010)

摘 要: 冷弯薄壁型钢房屋抗震性能优越, 适合工业化建造, 在国内外建筑行业已占有一席之地, 符合国家“十三五”规划对房屋建筑发展提出的新要求。该文对国内外在冷弯薄壁型钢房屋受力性能的研究成果和相关规范的设计规定进行了全面的综述, 发现传统冷弯薄壁型钢房屋在传力机制、受力构件截面种类等方面的不足, 提出新型组合截面的冷弯薄壁型钢“非盒子”式的框架结构体系, 总结该体系中受力构件、节点以及整体框架受力性能的研究进展, 给出了组合柱稳定承载力、节点极限弯矩和初始刚度的计算公式。最后对该类组合截面冷弯薄壁型钢框架结构体系今后需要深入研究的问题提出了建议。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 组合截面; 框架结构; 组合柱; 节点; 受力性能

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.ST03

RESEARCH PROGRESS OF COMPOUND SECTION COLD-FORMED THIN-WALL STEEL STRUCTURES

CHEN Ming, HUANG Ji-hui, ZHAO Gen-tian

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Cold-formed thin-walled steel buildings are characterized by superior seismic behavior and suitable for industrialized construction. These features make it have a place in the construction industry at home and abroad. Meanwhile, it meets the new requirements of China's 'The thirteenth Five-Year Plan' for the development of building construction. Researches and design codes on the mechanical performance of cold-formed thin-walled steel buildings were comprehensively reviewed in this paper. Some deficiencies are found in traditional cold-formed thin-walled steel buildings in load-transfer mechanism and member section type. The 'non-box' type frame system using cold-formed thin-walled steel compound section was put forward. Summarizing the research progress in mechanical performance of the member, joint, and the overall frame, this paper present formulas of the composite column stability capacity, joint ultimate moment and joint initial stiffness. Finally, some future researches on the compound section cold-formed thin-walled steel frame system are proposed.

Key words: cold-formed thin-walled steel; compound section; frame structure; composite column; joint; mechanical performance

冷弯薄壁型钢房屋结构体系具有材料和建造绿色环保、抗震性能优越、工业化程度高等优势, 符合国家建筑行业的发展战略。在国家“十三五”

时期, 钢结构建筑和装配式建筑已然是明确的发展热点, 冷弯薄壁型钢房屋结构体系属于装配式钢结构房屋建筑, 在中低层房屋建筑中有着自己独特的

收稿日期: 2016-05-27; 修改日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368043); 内蒙古科技大学创新基金项目(2016YQL10)

通讯作者: 陈 明(1978-), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 硕导, 主要从事钢结构设计与理论研究(E-mail: cmlx-1978@163.com).

作者简介: 黄骥辉(1990-), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事钢结构的抗震性能研究(E-mail: 437346519@qq.com);

赵根田(1962-), 男, 山西人, 教授, 博士, 硕导, 主要从事钢结构与组合结构研究(E-mail: zhaogentian93110@sina.com).

优势,已经得到了广泛的发展,并出版了相应的设计规程。目前广泛应用的冷弯薄壁型钢房屋结构体系是由复合墙板与楼板、屋架组成的“盒子”式结构,其水平荷载由抗剪墙体承担,竖向荷载由承重墙体中的立柱承担^[1],结构形式如图1所示,应用于三层以下民用住宅房屋。

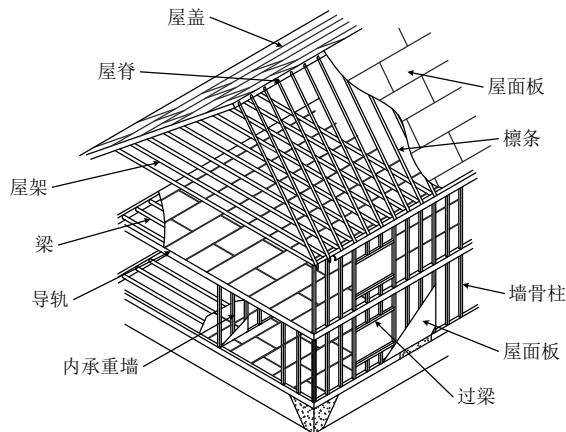


图1 冷弯薄壁型钢房屋结构体系组成^[2]

Fig.1 Composition of cold-formed thin-walled steel building system^[2]

“盒子”式的冷弯薄壁型钢房屋结构体系是一种非框架的结构,承载能力相对较低,主要承力构件之间连接不够可靠,而且承力构件的截面类型过于单一^[3],影响了该结构体系向多层建筑的发展,已经无法满足设计和使用要求。

本文首先对“盒子”式的冷弯薄壁型钢房屋结构体系的设计方法和国内外冷弯薄壁型钢组合截面构件的研究成果进行一定的综述分析,再提出新型组合截面结构体系的构成,最后将相关的研究进展进行总结。

1 低层冷弯薄壁型钢房屋的受力性能

1.1 冷弯薄壁型钢复合墙体的受力性能

“盒子”式的房屋结构中的复合墙体主要由钢骨架和墙板组成,是房屋水平刚度和承载力的主要来源,国内外学者对复合墙体的受力性能及设计指标进行了大量的研究。

Young-ki Lee 和 Thomas H Miller^[4]研究了 C 型钢与石膏板组成的复合墙板在轴向力作用下的屈曲行为,螺栓连接采用弹性分析,面板发生弯扭屈曲,采用差分平衡方程对屈曲荷载进行估算,墙体的强度与钢骨柱间距有关,而与北美钢铁协会 AISI 规定不一致。Yaip Telue 和 Mahen Mahendran^[5]进行了 40 个足尺墙架试验,选择无覆板、单面覆板和

双面覆板为研究参数,将试验结果与澳大利亚和美国的规范进行比较,得出了覆板情况对墙架承载力有明显提高作用的结论。Serrette 等^[6-7]进行了一系列 OSB 板与 C 型钢组合剪力墙动力时程分析试验,发现墙体的动力性能主要取决于护角材料、边柱的强度和螺钉的间距。滞回曲线有明显的捏缩现象,耗散了一定的地震能量,破坏现象中表现出墙体的连接滑移,基于试验结论,给出了相关的设计建议;研究了不同材质板覆面的轻型钢骨架墙体的受力性能,试验结果表明墙体破坏时发生了扭转,螺丝头部穿过了墙板,板边缘的紧固件断裂,紧固件破坏板面导致整片墙体最终破坏。Salenikovich 等^[8]进行了 16 个全尺寸覆 OSB 板的开洞和不开洞的冷弯型钢剪力墙在水平荷载作用下的抗震性能试验,选择覆板率从 30%~100%,结果表明覆板可以提高框架的刚度和强度,但会降低结构的延性。Gad 等^[9-11]研究了石膏板在冷弯薄壁型钢住宅结构的横向抵抗力中起到的作用,利用有限元软件建立了石膏板覆面的冷弯型钢组合墙体模型,考虑墙体间阴角、与天花板相连处、檐口等位置的边界条件,发现具有这些边界条件的墙体是同样尺寸单墙体承载力的 3 倍以上,说明墙体横向承载力与边界条件关系密切。Tian 等^[12]分析了冷弯型钢墙体的刚度构成,得到了支撑截面尺寸的大小对墙体刚度和极限承载力的影响。Fulop 和 Dubina^[13-17]分析了轻型薄壁型钢骨架墙体的滞回性能,提出了可预估墙体抗震性能的分析模型,发现这种墙体在地震作用下承载力退化稳定,延性较好,具有良好的抗震性能。发现墙体连接方式对房屋抗震性能的影响较大,提出了连接的设计标准。Landolfo 等^[18-19]针对采用冷弯薄壁型钢的轻型钢结构房屋,研究了房屋的受力性能和抗震性能,提出了快速施工的技术构造措施,为该体系的发展提出了建议。Liew 等^[20]分析了承担不同类型横向荷载的墙体在不同边界条件下的承载能力和失效模式,得到了墙体对房屋横向刚度的贡献。

周绪红院士^[21-27]团队将冷弯薄壁型钢组合墙体立柱改为背靠背槽钢,分析了该组合墙体的抗剪承载力、轴压承载力和抗侧刚度。随覆面材料刚度越大、钢骨架立柱越密、墙体高宽比越小、螺钉越密,组合墙体抗剪承载力越高,而冷弯薄壁型钢材料强度对抗剪承载力影响较小;组合墙体高宽比越小、连接螺钉间距越密、墙板厚度越厚,组合墙体

的抗侧刚度会明显提高；提出将墙板简化成斜向拉杆，用等代拉杆法计算组合墙体在弹性范围内抗侧刚度的方法。张其林等^[28-29]研究了无墙板带支撑和带墙板两种不同情况的冷弯薄壁型钢骨架墙柱体系的受力性能，给出了钢骨架立柱计算长度系数的建议取值和钢骨架极限荷载的计算公式。研究发现：双侧覆板可提升钢骨架的极限承载力 200%，是设置支撑和单侧覆板的 10 倍左右，说明冷弯薄壁型钢与墙板搭配使用，尤其是双侧覆板对钢骨架立柱的支撑作用是明显的。极限承载力计算时可将我国现行规范计算结果放大 1.2 倍。苏明周等^[30-31]也证明了墙面板的蒙皮效果是组合墙体的抗剪承载力的来源，工程应用中注意保证蒙皮体的完整性，墙板接缝要少，而且要交错接缝，避免横向通缝。王静峰等^[32]将冷弯薄壁管件组成桁架体系，覆上墙板，作为组合墙体承担水平荷载，通过拟静力试验发现该类组合墙体滞回性能良好，延性和耗能能力都比较高，采用 OSB 板材双面覆着能起到蒙皮效果，当墙体开洞时削弱墙体的承载力和刚度，可以采用一定的构造措施来弥补。

1.2 冷弯薄壁型钢房屋的受力性能

Kim 等^[33]进行了两层密柱式冷弯薄壁型钢房屋振动台试验研究，如图 2 所示，发现该密柱房屋结构具有良好的抗震性能，密柱在发生局部屈曲后仍具有一定的承载力。



图 2 足尺模型振动台试验^[33]

Fig.2 Shaking table test of a full scale model^[33]

石宇等^[34-35]以多层冷弯薄壁型钢房屋为研究对象，进行了弹塑性时程分析，找到了薄弱楼层，得到了影响弹塑性层间位移的因素。结构的弹性层间位移角为 1/750，弹塑性层间位移角为 1/100。总结研究成果，建议：8 度设防区可建到 6 层或 18 m

高，高宽比宜小于 2.5；7 度及以下设防区高宽比宜小于 3。黄智光等^[36]进行了三层冷弯薄壁型钢房屋的线性和非线性地震反应分析，发现结构的变形形式呈剪切型，9 度抗震设防时，结构在多遇地震和罕遇地震下的最大弹性和弹塑性层间位移角分别为 1/934 和 1/52。沈祖炎在李元齐完成的超高强薄壁冷弯型钢足尺结构模型振动台试验的基础上，认为底部剪力法、时程分析法和反应谱法适用于弹性状态的多遇地震结构分析，非线性 Pushover 分析和非线性时程分析法适用于罕遇地震结构分析^[37-38]。史艳莉等^[39]研究发现风荷载控制结构常遇地震下的弹性层间位移，地震作用控制结构罕遇地震下的弹塑性层间侧移，这两个位移值均满足现行抗震规范要求；双面覆 OSB 墙面板，并且加强角柱的情况下抗震性能最优。

这些研究还是以墙体结构作为房屋横向刚度的主要来源，并对影响墙体抗剪承载力的因素进行了详细的分析，对比国内外规范提出了相应的修正方案。低层冷弯薄壁型钢住宅在欧美发达国家与木质住宅形成了较大的竞争，低层住宅市场占有份额达到四分之一左右，国外相应的研究和应用比较早。发达国家在冷弯薄壁型钢建筑领域的应用研发上身先士卒，已基本掌握了冷弯薄壁型钢“盒子”式房屋结构体系的基本力学性能，并编著了相应的设计规范，推广冷弯薄壁型钢房屋在建筑领域的应用^[40]。

2 组合截面受力构件的设计方法

2.1 规范承载力计算

国外相关规范规定了组合截面构件的设计方法和承载力计算公式，我国现行规程中也给出了工字形、箱形和抱合箱形几类组合截面的设计公式。

北美钢铁协会 AISI 颁布文献^[41]给出了双肢拼合冷弯薄壁型钢截面柱轴压承载力的设计公式：

$$P_n = A_e F_n \quad (1)$$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y, \quad \lambda_c \leq 1.5 \quad (2a)$$

$$F_n = \frac{0.877}{\lambda_c^2} F_y, \quad \lambda_c > 1.5 \quad (2b)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (3)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad (4)$$

式中: F_n 为屈曲应力, 按式(2)确定; A_e 为有效截面面积; F_y 为钢材的屈服强度; E 为钢材弹性模量; k 为有效截面系数; F_e 为弹性弯曲应力、扭转应力及弯扭应力的最小值, 按式(4)确定。

当双肢柱由于局部屈曲变形而产生肢件剪力时, 应对上述长细比 kL/r 进行修正:

$$(kL/r)_m = \sqrt{(kL/r)_0^2 + (a/r_1)^2} \quad (5)$$

式中: $(kL/r)_0$ 为组合截面原始长细比; $(kL/r)_m$ 为组合截面修正长细比; r_1 为单肢构件最小回旋半径; a 为连接件的间距, a/r_1 应小于组合构件控制长细比的 1/2。

澳大利亚和新西兰规范也对双肢冷弯 C 型钢组合受压构件的长细比进行修正^[42]:

$$(l_e/r)_{bn} = \sqrt{[(l_e/r)_m^2 + (l_e/r)_c^2]} \quad (6)$$

式中: $(l_e/r)_m$ 为组合构件相对于连接平面轴线的长细比; $(l_e/r)_c$ 为单肢组件最大长细比。关于连接件间距与北美 AISI 规范规定相同。

文献[1]中列举拼合截面构件的强度和稳定性验算公式:

$$N \leq A_{en}f \quad (7)$$

$$N \leq N_u \quad (8)$$

式中: N 为轴压力; A_{en} 为有效净截面面积; N_u 为稳定承载力设计值。 N_u 的取值对于 x 轴, 取单个开口截面稳定承载力乘以截面个数; 对于抱合箱形截面, 当截面拼合连接处有可靠保证且构件长细比大于 50 时, 对绕 y 轴的稳定承载力取单个开口截面对自身形心 y 轴的弯曲稳定承载力乘以截面个数后的 1.2 倍。

2.2 组合截面受压构件受力性能

Peters^[43]对螺钉连接双肢抱合截面立柱承载力进行研究, 发现螺钉间距过大或过小都会降低立柱轴压承载力, 因此应当控制螺钉间距在合理范围内。李元齐等^[44]进行了 40 根高强冷弯薄壁型钢箱形组合截面柱试验, 按单肢截面计算承载力, 发现计算结果的简单叠加不能反映组合截面柱的承载力, 对比试验值偏低 10%~20%。周天华等^[45]拼合了四肢组合截面立柱, 单肢为冷弯型钢, 发现在轴向压力作用下四肢柱具有“1×4>4”的拼合效应, 减小长细比和翼缘宽厚比能显著提高立柱的轴压承载力。彭雄等^[46]通过对比组合截面和单肢构件的屈曲行为和破坏机理, 发现组合作用会明显提升其静力性能, 而构件上先于整体失稳的局部塑性屈曲降低

了构件的滞回性能。

3 组合截面节点受力性能

Dundu 和 Kemp^[47]通过螺栓将两个单肢 C 型钢背靠背相连, 形成门式刚架的屋檐节点, 使得梁柱略微偏心, 分析螺栓个数、支撑设置、翼缘宽度和钢材牌号四个因素对该节点受力性能的影响, 发现节点区域最终破坏形态为 C 型钢的局部屈曲。Lim 和 Nethercot^[48-49]在 C 型钢背靠背连接的基础上, 插入两块节点板, 组成门式刚架屋檐节点, 发现在竖向荷载作用下螺栓孔处的应力集中使 C 型钢腹板发生严重的局部屈曲, 翘曲使得节点板处出现平面外弯曲变形, 在设计中应增加必要构造措施避免此类破坏的发生。Chung 等^[50-53]对螺栓连接的冷弯型钢节点进行水平荷载下的试验研究, 如图 3 所示, 认为弯矩在螺栓-钢板连接梁柱节点间可以有效的进行传递, 节点的受力中心在螺栓的转动中心, 把远离柱翼缘一侧的螺栓截面作为关键截面, 提出了该节点承载力的计算公式并验证。



图3 钢板-螺栓连接节点^[52]

Fig.3 Joints of plate-bolt^[52]

4 新型组合截面冷弯薄壁型钢结构研究进展

通过分析国内外学者在冷弯薄壁型钢房屋结构受力性能上的研究成果, 对比国内外规范的设计规定, 为了提高冷弯薄壁型钢房屋结构的受力性能, 弥补目前“盒子”式结构的不足, 在 Chung 等^[53]研究的基础上结合国外的应用情况, 内蒙古科技大学的钢结构团队提出了新的截面组合方式, 构建出“非盒子”式的冷弯薄壁型钢框架结构体系, 以组合截面的梁柱作为主要承重构件, 可以更好的实现大开间的需求。组合截面构件由冷弯薄壁型钢构件通过加入连接钢板, 采用高强螺栓连接的方式拼合成如图 4 所示的 I 形、L 形、T 形或十字形等组合截面, 提高构件承载力, 方便梁柱构件之间的

连接,形成的框架结构(图 5)受力性能更佳。对于此类组合截面形式的冷弯薄壁型钢结构,国内外研究相对较少,缺少成熟的设计方法,因此对其主要受力构件、节点和框架结构进行受力性能分析,为此组合截面的发展奠定基础。

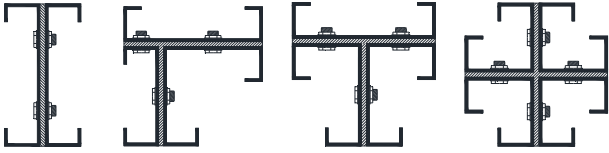


图4 组合截面形式

Fig.4 Compound section forms

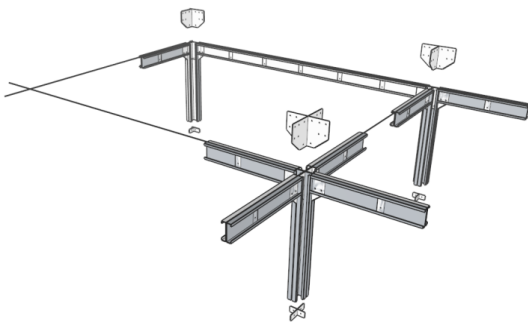
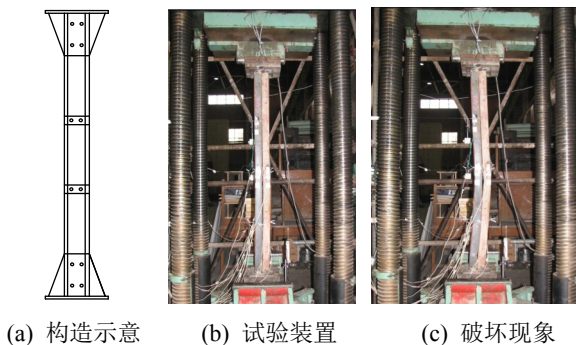


图5 组合截面框架示意

Fig.5 Compound section frame sketch

4.1 组合截面受压构件受力性能

两肢冷弯薄壁 C 型钢背靠背,在中间插入连接板,通过高强螺栓连接,组成带垫板的双肢冷弯薄壁 C 型钢组合柱,构造及试验情况如图 6 所示,通过 16 根组合柱的受压试验,并进行了相应的理论计算,分析了该类组合柱在轴向力作用下的力学性能^[54-55]。组合柱的破坏形态均为绕弱轴的弯曲屈曲,同时伴随着局部屈曲。



(a) 构造示意 (b) 试验装置 (c) 破坏现象

图6 组合柱构造及试验

Fig.6 Structure and test of compound section columns

组合柱的长细比是影响组合柱受压稳定性的主要因素,连接板的加入减小了组合柱弱轴方向的长细比,提高了组合柱的稳定性。连接板的间距应

该不大于 $40i$, i 为单根 C 型钢对与连接板平行的形心轴的回转半径。轴向压力的偏心会产生二阶效应,降低组合柱的稳定承载力。组合柱的承载力明显高于两个单肢截面承载力之和,平均高出 13%左右,与规程中乘以 1.2 倍^[1]相比,规程中略为保守。为了更好的考虑连接板对截面特性的影响,针对有效宽度法^[56]提出了组合柱稳定承载力的修正系数,修正后的计算结果偏差小于 5%,更接近试验值。组合柱稳定承载力计算公式为:

$$P_y = \mu P_e = \left(\frac{1}{h/i_y} + 1 \right)^2 P_e \quad (9)$$

$$\frac{P_e}{\varphi A_e} + \frac{\beta_m P_e e}{\left(1 - \frac{P_e}{N'_E} \varphi \right) W_e} \leq f \quad (10)$$

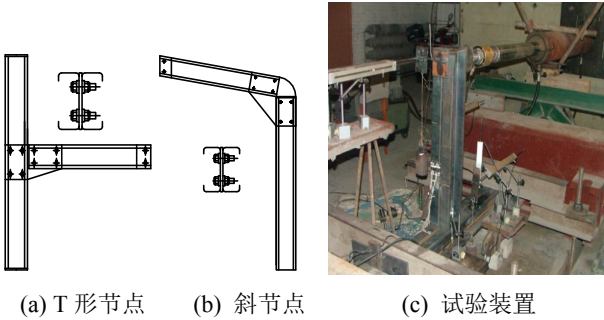
式中: μ 为承载力修正系数; h 为垫板间距,取两垫板最外排螺栓之间距离; i_y 为组合截面弱轴的回转半径; P_e 为冷弯薄壁型钢压弯构件平面内极限承载力; φ 为组合柱轴心受压稳定系数; β_m 为组合柱等效弯矩系数; N'_E 为参数; E 为钢材的弹性模量; W_e 为最大受压翼缘纤维的有效截面模量。

组合截面受压构件灵活多变,通过连接板拼合而成的组合截面受压构件设计计算各国规范涉及很少,而研究结果一致发现组合截面受压构件有“1+1>2”的效果,尤其是对弱轴承载力具有明显的提高。连接板的介入不仅提高了组合截面受压构件的承载能力,而且方便了梁柱在节点处的连接,是一种非常有效的截面构成方式。这里只对平面框架中的双肢背靠背组合柱的受力性能进行了分析,而对其他位置如角柱、中心柱等不同截面组合方式的组合柱的研究还需深入,为规程中组合构件的计算提供依据。

4.2 组合截面框架连接节点受力性能

针对组合截面冷弯薄壁型钢框架的抗弯节点的受力性能进行了 22 个节点试验及大量的有限元分析^[57-59],所选节点形式和试验概况如图 7 所示。发现该类节点的破坏形态主要有两种:一种是当节点板厚度大于 6 mm 时,梁端靠近节点域处的 C 型钢屈曲破坏,如图 8(a)所示;另一种是当节点板的厚度不大于 6 mm 时,产生节点板的屈曲,平面外变形较大,如图 8(b)所示,破坏产生在节点处不符合抗震“强节点弱构件”的设计要求。可见,节点板厚度是影响节点破坏形态的主要因素,经过有限

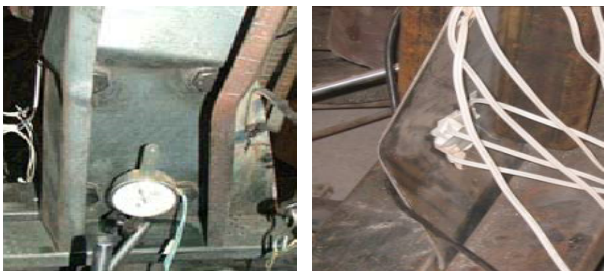
元的大量分析，最终得出对于在型钢表范围内的 C 型钢，此类节点保证强节点的节点板界限厚度为 6 mm，设计时建议取值到 8 mm。研究同时发现：在保证节点发生梁端 C 型钢屈曲破坏的条件下，节点板厚度对该类节点的抗震性能的影响很小。在第一种破坏形态下，组合截面节点的滞回环饱满(图 10(a))，滞回性能好，承载力退化稳定，转角延性系数 μ_{θ} 在 4.28~6.11，等效粘滞阻尼系数 h_e 在 0.34~0.37，具有良好的延性和耗能能力。



(a) T 形节点 (b) 斜节点 (c) 试验装置

图 7 组合截面节点及试验装置

Fig.7 Compound section joints and test device

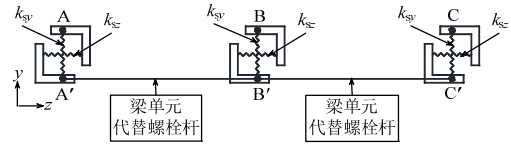


(a) C 型钢弯曲破坏 (b) 节点板屈曲

图 8 节点破坏形态

Fig.8 Joint failure modes

在有限元分析中，组合截面冷弯薄壁型钢结构涉及到大量螺栓连接，而螺栓滑移和抗剪在有限元模拟中多采用接触分析。接触分析是一种高度非线性的行为，动辄上百小时的运算时间和数十 G 的结果文件耗费了大量的计算资源。为了能够准确高效的模拟出组合截面冷弯薄壁型钢结构的受力性能和破坏形态，参考 James 等^[60]的分析方法，提出采用定义非线性弹簧的方法来模拟螺栓的滑移。模拟 C 型钢使用 Shell181，模拟螺栓杆使用 Beam188，弹簧与壳单元的相互作用原理如图 9 所示，建立了有限元模型如图 10 所示。确定螺栓孔壁滑移刚度的试验比较简单，通过此方法可以避免螺栓与 C 型钢的接触问题，节省大量的运算时间，运算结果通过与试验数据进行对比发现(图 11)，也达到了比较好的精度。



- 注：1) 节点 A 与 A'、B 与 B'、C 与 C' 实际上是同一节点，在定义节点位置时将其重叠；
 2) 重叠的节点弹簧刚度如下： $k_{sy}=k_{sy}=k_b$, $k_{sc}=k_b \times 10^6$, k_b 为螺栓孔壁滑移刚度，可采用螺栓滑移试验测定；
 3) x 方向未显示。

图 9 采用梁-弹簧单元螺栓连接工作原理

Fig.9 Bolt connection principle using beam-spring element

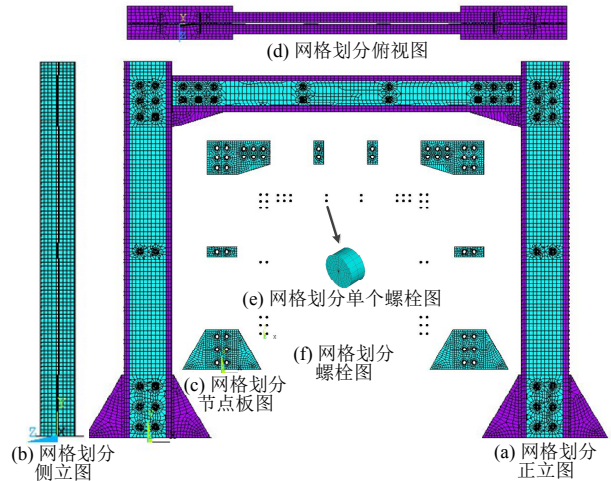
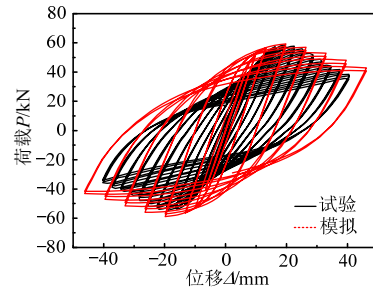
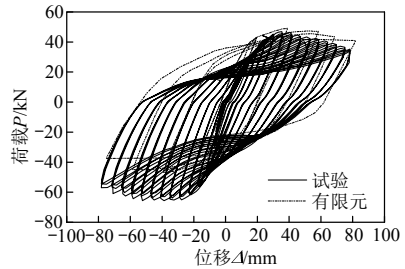


图 10 有限元模型

Fig.10 Finite element model



(a) 节点滞回曲线



(b) 框架滞回曲线

图 11 有限元与试验滞回曲线对比

Fig.11 Hysteretic loops comparison between FEA and test

通过大量的参数分析，发现螺栓间距、梁柱 C 型钢厚度和腹板高度对节点受力性能影响较大。当梁柱 C 型钢变厚或变高时，节点的极限承载力和初始刚度会增加。螺栓间距变大会增大节点域，节点

相应的抗震指标都会提高，然而螺栓间距不宜太大，否则会影响双肢构件在节点处的可靠连接，参考规范形式提出建议：在设计时螺栓间距取 $11d_0 \sim 13d_0$ ， d_0 为螺栓孔直径。得到该类节点的极限弯矩承载力、初始刚度以及刚度退化的计算公式为：

正向极限弯矩承载力：

$$M_u^+ = 0.0027s^{0.3356}t^{1.1255}h^{1.2341} \quad (11a)$$

负向极限弯矩承载力：

$$M_u^- = -0.0029s^{0.3659}t^{0.9825}h^{1.2504} \quad (11b)$$

正向初始刚度：

$$K_e^+ = 0.0088s^{0.5258}t^{0.7175}h^{1.7403} \quad (12a)$$

负向初始刚度：

$$K_e^- = 0.0068s^{0.5311}t^{0.6766}h^{1.7995} \quad (12b)$$

刚度退化：

$$K = ae^{b\theta} \quad (13)$$

式中： a 和 b 为与节点尺寸有关的系数； t 为连接板厚度； s 为螺栓间距； h 为腹板厚度。

$$a = 0.0060s^{0.6042}t^{0.5678}h^{1.7814} \quad (14a)$$

$$b = -0.4702s^{0.3374}t^{-0.6737}h^{0.5946} \quad (14b)$$

通过在单肢构件之间加入连接板，在节点处方便了梁柱的连接，使用高强螺栓也避免了焊接对薄壁构件截面造成伤害，该类节点具有较好的受力性能和弯矩传递能力，可以改善“盒子”式结构的连接方式，提高结构的承载能力。

4.3 组合截面框架受力性能

选取组合截面形式，设计 12 榀单层框架和 6 榀多层框架，如图 12 所示。对该类框架抗震性能进行分析，得到梁柱 C 型钢截面尺寸、连接板尺寸、支撑情况等对组合截面框架受力性能的影响，并提出相关框架设计建议^[61-63]。

在组合截面框架抗震性能分析中主要考虑支撑设置、轴压比和构件截面参数等因素，不论是单层还是多层框架均得到了一致的结论。

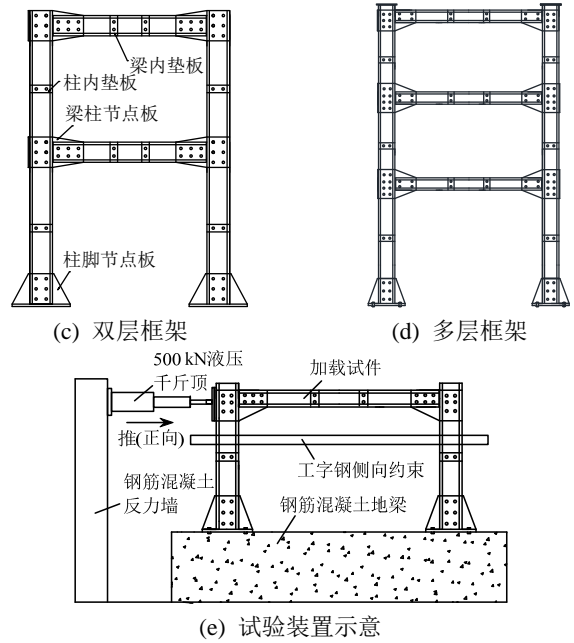
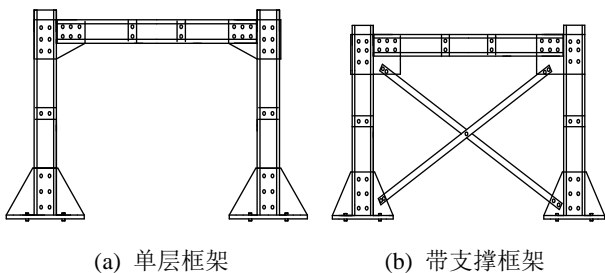


图12 组合截面冷弯薄壁型钢框架结构及试验装置
Fig.12 Compound section cold-formed thin-walled steel frame and test device

组合截面框架的破坏现象一致，在出现平面内整体失稳前均出现了梁柱的局部屈曲，整体破坏遵循先梁端、后柱脚的塑性铰出铰顺序，符合框架“强柱弱梁”的抗震设计原则，框架破坏情况如图 13 所示。

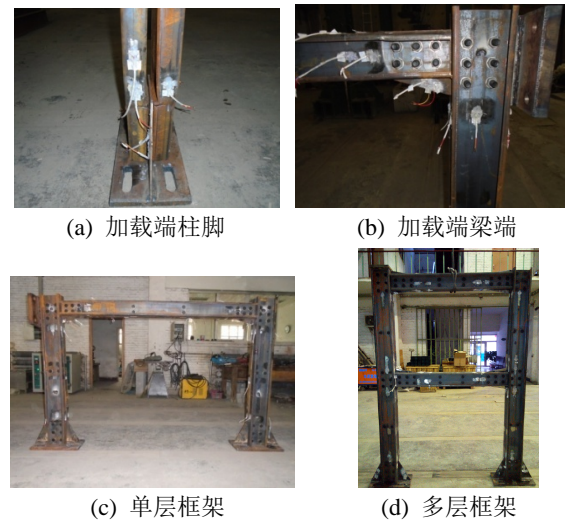


图13 组合截面框架破坏模式

Fig.13 Failure mode of compound section frame

框架在往复荷载作用下的滞回曲线呈明显的“梭形”(图 11(b))，承载力和初始刚度较高，且退化稳定。框架延性好，耗能能力强，位移延性系数 μ 在 2.47~5.16，等效粘性阻尼系数 h_e 在 0.25~0.45，验证了该类组合截面框架结构良好的抗震性能。

通过设置支撑可以提高框架的承载能力和抗侧刚度,承载力退化稳定,延性略有降低,但也比钢筋混凝土框架结构的延性好。为实现带支撑框架的延性破坏,只要保证柔性支撑先于框架梁柱屈服即可。根据理论分析带支撑框架中梁、柱及支撑之间的内力关系,定义框架梁或柱与支撑抗力储备 R 比值(框架梁或柱与支撑承载力的比值/框架梁或柱与支撑实际内力的比值),此值至少应大于 1,即可实现“强框架弱支撑”。采用轻钢结构常用的钢板条柔性支撑,得到在常用 C 型钢截面的范围内,钢板条的最优宽厚比为 4.0~5.0,结构的承载力高,各阶段刚度合理,刚度退化稳定,延性和耗能能力好,对应的 R 值在 1.8 左右。

在参数分析中,轴压比的变化会影响组合截面框架的受力性能,轴压比的增大会减缓框架的刚度退化,这点对框架结构又是有利的;但轴压比的增大框架承载力会略有降低,且退化较快,这主要是因为 C 型钢局部屈曲造成的。在保证强节点的前提下,连接板厚度对框架的受力性能基本没有影响。增大 C 型钢截面尺寸可以提高框架承载力和初始刚度。螺栓间距的变化主要体现在框架节点域的大小的变化上,当节点不先于构件破坏时,对框架承载力影响不如其他参数明显,节点域变小,会降低框架的延性,加速刚度的退化。节点采用加腋构造对框架的整体性能都有提高,会提高承载力、延性、初始刚度及耗能能力,减小刚度退化的速度,建议此类框架设计时采取加腋形式的节点。

对多层组合截面冷弯薄壁 C 形钢框架进行 Pushover 分析,发现节点刚度对框架自振频率和层间位移有显著的影响。对应之前节点的研究,此组合截面的节点属于半刚性节点。通过分析几种不同节点刚度的框架在多遇地震和罕遇地震下的抗震性能,均能满足抗震设计规范的限值要求,加设支撑后层间变形值更小。

5 结论

冷弯薄壁型钢房屋结构在国外已经得到了专家学者的认可,在建筑市场上已经具有了一定的份额,但国内还处于刚刚起步。为了冷弯薄壁型钢房屋更为广阔的应用,内蒙古科技大学团队通过对截面形式的变化,构建了一种组合截面冷弯薄壁型钢“非盒子”式的框架结构,对组合柱、组合截面节点和平面框架结构进行了受力性能分析,发现这样

一种加入连接板的组合截面形式能够较好将双肢 C 型钢联系起来,组合柱承载力高,节点弯矩传递可靠,整体框架抗震性能好,各项抗震指标良好,符合规范限值要求。分析得到的一些设计方法和构造要求为此类结构工程应用和设计提供了参考。但冷弯薄壁型钢组合截面形式灵活多变,且构造复杂,要使组合截面冷弯薄壁型钢房屋结构更为成熟,尚需解决以下问题:

(1) 由于冷弯薄壁构件截面形式多样,本文的研究还有一定的局限性,应开展对不同截面形式组合构件的研究,同时对截面形状、板组效应、加劲情况、材料强度及荷载条件等诸多因素的影响进行研究。

(2) 目前的研究还局限于平面框架,构建空间框架后会有角柱等特殊部位构件或框架,需要进行相应的研究。

(3) 该类框架房屋的装配性很强,可以在装配化、产业化、部件化等方面进行研究,有利于其更好的发展。

(4) 现有规范的设计方法并不能完全适用于该类框架结构的设计计算,需要加大研究的样本数量,为规范制定提供依据,同时注重连接构造要求的分析。

(5) 围护结构对框架的受力性能会有较大的提升,在今后的研究中要考虑围护结构体系在框架整体受力中的作用,考虑蒙皮效应对该类结构的影响,对空间框架进行动力分析。形成空间结构后对风荷载的敏感性分析也是对此类轻钢结构研究的重点之一。

参考文献:

- [1] JGJ227-2011, 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
JGJ227-2011, Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [2] National Association of Home Builders (NAHB) Research Center. Prescriptive method for residential cold-formed steel framing [M]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 1997: 8.
- [3] 赵一婕, 张其林. 冷弯薄壁型钢组合截面构件研究现状[J]. 施工技术, 2013, 42(15): 1-8.
Zhao Yijie, Zhang Qilin. State of the cold-formed thin-walled built-up section members [J]. Construction Technology, 2013, 42(15): 1-8. (in Chinese)
- [4] Young-ki Lee, Thomas H Miller. Axial strength

- determination for gypsum-sheathed, cold-formed steel wall stud composite panels [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(6): 608—615.
- [5] Yaip Telue, Mahen Mahendran. Behavior of cold-formed steel wall frames lined with plasterboard [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(4): 435—452.
- [6] Serrette R, Hall G, Nguyen H. Dynamic performance of light steel framed shear wall [C]. *Proceedings of the 13th International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*, St.Louis, MO, 1996: 487—498.
- [7] Serrette R, Encalada L, Juadines M, et al. Static racking behavior of plywood, OSB, gypsum, and fiberbond walls with metal framing [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(8): 1079—1086.
- [8] Salenikovich A J, Dolan J D, Easterling W S. Racking performance of long steel-frame Shear walls [C]. *Fifteenth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*, St. Louis, MO, 2000: 471—480.
- [9] Gad E F. Performance of brick-veneer cold steel-formed domestic structure subjected to earthquake loading [D]. Australia: Department of Civil and Environment Engineering, University of Melbourne, 1997.
- [10] Gad E F, Duffield C F, Chandler A M, et al. Testing of cold-formed steel-framed domestic structures [C]. *The Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake on Mechanics of Structures and Materials*, Melbourne, 1998: 323—329.
- [11] Gad E F, Adrian M Chandler, Colin F Duffield, Graeme Stark. Lateral behavior of plasterboard-clad residential steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(1): 32—39.
- [12] Tian Y S, Wang J, Lu T J. Racking strength and stiffness of cold-formed steel wall frames [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 60(7): 1069—1093.
- [13] Fulop L A, Dubina D. Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading Part 1: Experimental research [J]. *Thin-walled Structures*, 2004, 42(2): 321—338.
- [14] Fulop L A, Dubina D. Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading Part 2: Numerical modeling and performance analysis [J]. *Thin-walled Structures*, 2004, 42(2): 339—349.
- [15] Fulop L A, Dubina D. Design criteria for seam and sheeting-to-framing connections of cold-formed steel shear panels [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(4): 582—590.
- [16] Dubina Dan. Behavior and performance of cold-formed steel-framed houses under seismic action [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(7/8): 896—913.
- [17] Dubina Dan. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46(7): 741—764.
- [18] Landolfo R. Theoretical and experimental study on the seismic performance of lightweight cold-formed steel low-rise residential building [R]. Monza: Polimetrica International Scientific Publisher, 2004.
- [19] Landolfo R, Fiorino L, Corte G D. Seismic behavior of sheathed cold-formed structures: physical tests [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(4): 570—581.
- [20] Liew Y L, Duffield C F. The influence of plasterboard clad walls on the structural behavior of low rise residential buildings [J]. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2002, 2(1): 1—16.
- [21] 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.
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. (in Chinese)
- [22] 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 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. (in Chinese)
- [23] 周绪红, 苑小丽, 石宇, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体非线性滑移滞回模型研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(6): 224—233.
Zhou Xuhong, Yuan Xiaoli, Shi Yu, et al. Research on nonlinear pinching hysteresis model of sheathed cold-formed thin-walled steel stud walls [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(6): 224—233. (in Chinese)
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 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 Tianhua, Liu Xiangbin, Yang Li, 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)
- [26] 周绪红, 石宇, 周天华, 等. 冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体受剪性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2006, 27(3): 42—47.
Zhou Xuhong, Shi Yu, Zhou Tianhua, et al. Study on shear resistance of cold-formed steel stud walls in residential structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(3): 42—47. (in Chinese)

- [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.
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. (in Chinese)
- [28] 秦雅菲, 张其林, 秦中慧, 等. 冷弯薄壁型钢墙柱骨架的轴压性能试验研究和设计建议[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 34—41.
Qin Yafei, Zhang Qilin, Qin Zhonghui, et al. Experimental research and design suggestion on cold-formed wall-stud structures subject to centric axial loads [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3): 34—41. (in Chinese)
- [29] 张其林, 秦雅菲. 轻钢住宅墙柱体系轴压性能的理论试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(4): 23—29.
Zhang Qilin, Qin Yafei. Theoretical and experimental research of light-gauge steel residential building wall stud system subjected to centric axial loads [J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(4): 23—29. (in Chinese)
- [30] 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.
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. (in Chinese)
- [31] 黄智光, 王亚军, 苏明周, 等. 冷弯薄壁型钢墙体恢复力模型及房屋地震反应简化分析方法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 26—34.
Huang Zhiguang, Wang Yajun, Su Mingzhou, et al. Study on restoring force model of cold-formed steel wall panels and simplified seismic response analysis method of residential buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 26—34. (in Chinese)
- [32] 王静峰, 余波, 朱旭峰, 等. 足尺冷弯薄壁管桁架组合墙体抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 78—87.
Wang Jingfeng, Yu Bo, Zhu Xufeng, et al. Experimental study on seismic behavior of full-scale composite walls with cold-formed thin-walled steel tubular truss [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 78—87. (in Chinese)
- [33] Kim T W, Wilcoski J, Foutch D A, et al. Shake table tests of a cold-formed steel shear panel [J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1462—1470.
- [34] 石宇, 周绪红, 聂少锋, 等. 多层冷弯薄壁型钢结构住宅的地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5): 7—12.
Shi Yu, Zhou Xuhong, Nie Shaofeng, et al. Seismic dynamic response analysis for cold-formed steel framing system of mid-rise residential building [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5): 7—12. (in Chinese)
- [35] 吴函恒, 周天华, 石宇, 等. 地震作用下冷弯薄壁型钢结构房屋弹塑性位移简化计算研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 180—186.
Wu Hanheng, Zhou Tianhua, Shi Yu, et al. Simplified calculation of elastoplastic displacement for cold-formed thin-walled steel buildings under earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 180—186. (in Chinese)
- [36] 黄智光, 苏明周, 何保康, 等. 冷弯薄壁型钢三层房屋振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 72—81.
Huang Zhiguang, Su Mingzhou, He Baokang, et al. Shaking table test on seismic behaviors of three-story cold-formed thin-wall steel residential buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 72—81. (in Chinese)
- [37] 李元齐, 刘飞, 沈祖炎, 等. S350冷弯薄壁型钢住宅足尺模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 135—144.
Li Yuanqi, Liu Fei, Shen Zuyan, et al. Shaking table test of two full-scale models of S350 cold-formed thin-walled steel framing buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 135—144. (in Chinese)
- [38] 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 Zuyan, Liu Fei, Li Yuanqi, et al. 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)
- [39] 史艳莉, 王文达, 靳焱. 考虑墙体作用的低层冷弯薄壁型钢轻型房屋住宅体系弹塑性动力分析[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 186—195.
Shi Yanli, Wang Wenda, Jin Yao, et al. Elastic-plastic dynamic analysis of cold-formed thin-walled steel framing system of low-rise residential buildings with composite wall [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 186—195. (in Chinese)
- [40] 钟国辉. 冷弯薄壁型钢在房屋建筑中的研究与发展[J]. 建筑钢结构进展, 2002, 4(4): 31—38.
Chung K F. Research and development on building construction using cold-formed steel sections [J]. Progress in Steel Building Structures, 2002, 4(4): 31—38. (in Chinese)
- [41] AISI S100-2007, North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2007.
- [42] AS 4100-1998, Steel structures [S]. Sydney: Council of Standards Australia, 1998.
- [43] Peters G K. An investigation of the effects of fastener spacing in build-up cold-formed steel compression members [D]. Halifax: University of Dalhousie, 2003.
- [44] 李元齐, 姚行友, 沈祖炎, 等. 高强冷弯薄壁型钢抱合箱形截面受压构件承载力试验研究[J]. 建筑结构,

- 2011, 41(6): 36—41.
- Li Yuanqi, Yao Xingyou, Shen Zuyan, et al. Load-carrying capacity of 550MPa high-strength cold-formed thin-walled steel built-up box section columns [J]. Building Structure, 2011, 41(6): 36—41.
- [45] 周天华, 杨东华, 聂少锋, 等. 四肢拼合冷弯薄壁型钢截面立柱轴压性能试验研究及数值分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 77—85.
- Zhou Tianhua, Yang Donghua, Nie Shaofeng, et al. Experimental study and numerical analysis of the behavior of cold-formed steel quadruple-C built-up section members under axial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 77—85. (in Chinese)
- [46] 彭雄, 杨娜, 孟庆桐. 冷弯薄壁型钢组合截面构件试验研究与数值模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 272—277.
- Peng Xiong, Yang Na, Meng Qingtong. Experimental research and numerical analysis on the combination effects of cold-formed steel specimens [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 272—277. (in Chinese)
- [47] Dundu M, Kemp A R. Strength requirement of single cold-formed channels connected back-to-back [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006, 62(3): 250—261.
- [48] Lim J B P, Nethercot D A. Ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel members [J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(11): 1019—1039.
- [49] Lim J B P, Nethercot D A. Stiffness prediction for bolted moment-connections between cold-formed steel members [J]. Journal of Construction Steel Research, 2004, 60(1): 85—107.
- [50] Yu W K, Wong M F, Chung K F. Analysis of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(9): 1332—1352.
- [51] Chung K F, Ip K H. Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading [J]. Engineering Structures, 2000, 22(10): 1271—1284.
- [52] Wong M F, Chung K F. Structural behavior of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(2): 253—274.
- [53] Chung K F, Lawson R M. Structural performance of shear resisting connections between cold-formed steel sections using web cleats of cold-formed steel strip [J]. Engineering Structures, 2000, 22(10): 1350—1366.
- [54] 陈明, 边伟, 孙芳芳, 等. 带垫板双肢背靠背 C 型钢轴压短柱承载力分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(增刊 1): 1447—1450.
- Chen Ming, Bian Wei, Sun Fangfang, et al. Analysis on load-carrying behavior of axial compression short column with gusset plate between double back-to-back C steel [J]. Building Structure, 2013, 43(Suppl 1): 1447—1450. (in Chinese)
- [55] 陈明, 芦文文, 刘凯. 带垫板的双肢背靠背 C 型钢组合柱承载力分析[J]. 工业建筑, 2014, 44(1): 124—127.
- Chen Ming, Lu Wenwen, Liu Kai. Analysis of bearing capacity of double cold-formed thin-walled C steel back-to-back composite column with plate coupled [J]. Building Structure, 2014, 44(1): 124—127. (in Chinese)
- [56] GB50018-2002, 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- GB50018-2002, Technical code of cold-formed thin-wall steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)
- [57] 陈明, 马晓飞, 赵根田. 冷弯型钢组合截面 T 形节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 184—191.
- Chen Ming, Ma Xiaofei, Zhao Gentian. Seismic behavior of T-shaped joint using cold-formed compound section steel [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(1): 184—191. (in Chinese)
- [58] 陈明, 李梦琪, 马晓飞, 等. 双肢冷弯 C 型钢斜节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3): 192—202.
- Chen Ming, Li Mengqi, Ma Xiaofei, et al. Seismic behavior of oblique joint using cold-formed double C steel [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 192—202. (in Chinese)
- [59] 陈明, 孙芳芳. 双肢冷弯 C 型钢门式刚架节点抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(2): 83—89.
- Chen Ming, Sun Fangfang. Seismic behavior study of cold-formed double C steel portal frame joints [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(2): 83—89. (in Chinese)
- [60] James B P Lim, David A Nethercot. Finite element idealization of a cold-formed steel portal frame [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(1): 78—94.
- [61] 陈明, 李梦琪, 邓渤凡. 双肢冷弯薄壁型钢框架抗震性能分析[J]. 建筑钢结构进展, 2015, 17(2): 7—12, 51.
- Chen Ming, Li Mengqi, Deng Bofan. A study on the seismic behavior of cold-formed thin-walled steel frames [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(2): 7—12, 51. (in Chinese)
- [62] 李梦琪. 带垫板的双肢 C 型钢半刚性框架抗震性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- Li Mengqi. Study on seismic behavior of semi-rigid frames using double C steel with gusset plate [J]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [63] 陈明, 邓渤凡, 赵根田. 双肢冷弯 C 型钢低层住宅框架结构抗震性能分析[J]. 建筑科学, 2014, 30(11): 20—27.
- Chen Ming, Deng Bofan, Zhao Gentian. Analysis on seismic behavior of double back-to-back C steel low-rise residential frame [J]. Building Science, 2014, 30(11): 20—27. (in Chinese)

注: 该文在第 25 届结构工程学术会议(2016 包头)应邀作特邀报告