

冷弯薄壁 C 和 Z 型钢组合框架低层住宅的承载能力比较

赵伟欣¹, 李发超¹, 黄栩浩², 叶文华¹, 朱珏^{1*}

(1. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 利用遗传算法和直接强度法(DSM)得到轴压下优化后的冷弯薄壁卷边 C 和 Z 型钢, 取相同截面积时两者的最优尺寸相同. 利用有线条(CUFEM)和 DSM, 验证了单根冷弯 C 和 Z 型钢的临界屈曲荷载和极限承载力基本对应相等. 随后, 基于有限元软件 SAP2000 对冷弯薄壁型钢单层住宅整体建模, 将优化后尺寸相同的 C 和 Z 型钢应用于结构中, 施加相同的荷载, 发现两者整体结构的临界屈曲荷载不同, Z 型钢房屋框架屈曲后承载能力更高; 承载薄弱的风向角所对应的 Z 型钢房屋组合框架屋檐等薄弱区域所承受的轴力较 C 型钢房屋更小, 因此认为在用钢量相同的前提下, 低层房屋建设选择 Z 型截面更优.

关键词: 冷弯薄壁卷边 C 和 Z 型钢构件; 临界屈曲荷载; 极限承载力; 有限元; 低层房屋

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0085-06

冷弯薄壁型钢结构建筑具有重量轻、材料省、节能、抗震性能好、便于工厂化制作、施工速度快、基础造价低等优点, 在北美、澳洲等地被广泛用于低层民用建筑^[1]. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系是一种以冷弯薄壁型钢构件和轻型面板共同作为承重和维护结构的新型住宅体系, 主要构成包括屋面、组合墙体、楼盖和门窗等, 该框架结构主要用于 3 层以下的独立和联排式住宅.

低层冷弯薄壁型钢住宅的框架结构如图 1 所示, 该结构住宅与传统住宅相比具有诸多优点^[2-3]: (1)结构材料主要为钢材, 用钢量经济, 且钢材可回收利用; (2)冷弯薄壁型钢结构轻质高强, 自重的减轻使资源消耗大大减少, 同时对地基承载力的要求也大为降低; (3)工地施工主要为构件安装, 不受季节干扰, 施工周期短、工地垃圾少、噪音小; (4)住宅体系配套性好, 并且质量有保障, 可供标准化生产, 满足市场化采购.

冷弯薄壁型钢结构采用的钢材等级一般为 Q235 或 Q345. 钢材厚度为 0.45~2.50 mm, 顶梁、边梁、底梁和承重构件的钢板厚度不小于 0.85 mm^[4].

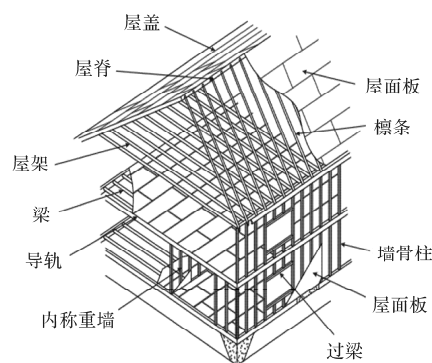


图 1 低层冷弯薄壁型钢结构住宅的框架结构

国内外学者研究钢结构的稳定性大多是基于框架柱的稳定性, 进而分析钢框架的稳定性. 目前对钢框架空间整体结构的稳定性能研究报道较少, 而实际的框架结构均是空间结构.

本文将优化后的冷弯薄壁 C 和 Z 型钢应用于结构中, 从钢结构框架的整体稳定性出发, 研究不同截面的框架结构的整体承载能力.

1 直接强度法(DSM)

利用有线条(CUFEM)软件计算得到单根 C 和

收稿日期: 2018-08-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11572162); 浙江省自然科学基金(LY13A020007).

第一作者: 赵伟欣(1990—), 女, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 钢结构的稳定性. E-mail: zhaoweixin220283@163.com

*通信作者: 朱珏(1979—), 女, 浙江金华人, 教授, 主要研究方向: 钢结构的稳定性. E-mail: zhujue@nbu.edu.cn

Z 型钢构件在轴压情况下的临界屈曲荷载, 结合 Schafer 等^[5]提出的直接强度法, 得到单根构件的极限承载力. 轴压条件下构件的局部屈曲极限承载力的计算公式^[5]为:

$$P = \begin{cases} P_u, \lambda_1 \leq 0.776, \\ \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_u} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_u} \right)^{0.4} P_u, \lambda_1 > 0.776, \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{P_u / P_{cr1}}, \quad P_{cr1} = A \sigma_{cr1}, \quad P_u = \phi_{xw} A f_y, \quad (2)$$

$$\phi_{xw} = \begin{cases} 0.625 \lambda^2, & \lambda \leq 1.5, \\ 0.877 / \lambda^2, & \lambda > 1.5, \end{cases} \quad \lambda = \frac{f_y}{\sigma_{cr}}$$

其中: A 为单根冷弯薄壁型钢的横截面积; f_y 为材料的屈服强度; P_{cr1} 为弹性局部屈曲荷载; P_u 为整体屈曲承载力; ϕ_{xw} 为折减系数.

构件畸变屈曲极限承载力公式为:

$$P_d = \begin{cases} P_y, \lambda_d \leq 0.561, \\ \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y, \lambda_d > 0.561, \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}}, \quad P_{crd} = A \sigma_{crd}, \quad P_y = A f_y,$$

其中: P_y 为弹性弯曲屈曲荷载; P_{crd} 为畸变屈曲临界屈曲荷载; σ_{crd} 为畸变屈曲临界应力.

2 单根冷弯钢的承载能力比较

Zhou 等^[7]在 Hancock 模型基础上提出修正模型; 张旭等^[6]在修正模型的前提下, 推导得到卷边 C 型钢畸变屈曲临界屈曲应力的简化公式. 利用上述成果, 结合遗传算法, 将 C 型钢构件在轴压、纯弯条件下的承载力作为目标函数进行优化:

$$P = -\min(P_l, P_d), \quad M = -\min(M_l, M_d), \quad (4)$$

其中: P_l 为局部屈曲极限承载力; P_d 为畸变屈曲极限承载力; M_l 为局部屈曲极限弯矩; M_d 为畸变屈曲极限弯矩.

将原尺寸截面积 ($1\,800\text{ mm}^2$) 作为约束条件, 给定构件长度, 并将卷边 C 型钢腹板高度 h 、翼缘宽度 b 、卷边长度 d 、厚度 t 设置为设计变量, 约束条件的上下限区间为 $[30, 18, 5, 0.48]$ 和 $[400, 140, 30, 3.5]$. 利用遗传算法使得构件极限承载力为最大时

停止运算, 由此获得最优截面尺寸.

研究发现, 截面积相同而长度不同的构件优化的结果也不同, 随着构件长度的增加, 优化得到的构件的极限承载力呈下降趋势. 本研究框架中构件长度有多种, 逐一优化不现实, 且房屋建设通常标准化, 因此模型采用使用较多的檩条长度进行截面尺寸的优化.

黄栩浩等^[8]利用遗传算法和直接强度法, 分别研究了冷弯薄壁卷边 C 型钢受压和受弯 2 种情况, 将截面尺寸设为定值而将卷边角度 θ 作为设计变量, 其卷边角度约束范围为 $30^\circ < \theta < 170^\circ$. 将槽钢受压和受弯条件下的极限承载力作为目标函数, 利用遗传算法工具箱使得构件发生畸变屈曲的承载力最大时停止运算, 得到最优卷边角度为 100° .

研究发现, 单根冷弯薄壁 C 和 Z 型钢优化的原理相同. 选取优化后同等截面尺寸的冷弯薄壁 C 和 Z 型钢的 h 、 b 、 d 、 t , 卷边角度统一采用 100° (图 2), 优化后的尺寸按文献^[6]选择, 结合 DSM 计算, 结果见表 1.

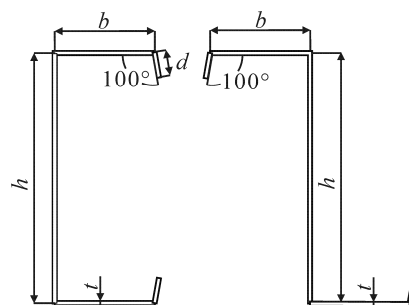


图 2 优化后模型示意图

表 1 单根冷弯钢的临界屈曲载荷

面积/ mm ²	h - b - d - t / mm	C 型钢屈曲 荷载/kN	Z 型钢屈曲 荷载/kN	极限载荷 差值/%
560	85-45-25-2.5	472.50	477.50	0.17
600	90-50-25-2.5	452.30	453.20	0.06
700	105-60-25-2.5	380.43	380.38	0.00
650	110-50-25-2.5	336.34	336.34	0.00
700	110-60-25-2.5	355.01	355.19	0.02
750	110-70-25-2.5	372.07	372.27	0.03
650	110-55-20-2.5	332.90	332.73	0.02
850	140-60-40-2.5	273.50	276.55	1.12
1 600	160-120-40-3.3	624.02	624.40	0.04

从表 1 可知, 当 h 、 b 、 d 、 t 分别对应相等, 且

卷边角度均设为 100° 时,单根 C 和 Z 型截面的钢构件在 CUFSM 中计算得到的临界屈曲荷载相差不到 2%。进一步结合直接强度法,得到极限承载力基本相等。因此,得出单根冷弯 C 和 Z 型钢在截面尺寸相同,且卷边角度均为 100° 的情况下,其临界屈曲荷载和极限承载力基本对应相等。

3 冷弯钢房屋框架承载力比较

本文主要研究单根冷弯薄壁 C 和 Z 型钢在截面尺寸相同,且卷边角度也相同的条件下,其低层房屋组合框架的整体稳定性。

3.1 有限元建模

冷弯薄壁型钢房屋结构的抗剪墙体主要承担水平荷载,立柱主要承担竖向荷载。采用有限元软件 SAP2000 建立单层冷弯钢房屋有限元模型(图3)。模型房屋正面有左右 2 扇窗,中间有 2 道门,整个房屋底部采用铰接约束方式。平面尺寸为 $10\text{ m} \times 8\text{ m}$,其中进深为 8 m ,开间为 10 m ,层高为 3 m ,双侧屋面坡度为 11.3° 。组合框架材料选 Q345,以腹板高度 h 、翼缘宽度 b 、卷边长度 d 、厚度 t ,卷边角度为 100° 的冷弯薄壁 C 和 Z 型钢为例,整个组合框架的截面尺寸($h-b-d-t$)按优化后结果^[6]选为 256-115-38-3.20(单位 mm),横截面积为 $1\,800\text{ mm}^2$ 。设弹性模量为 200 GPa ,剪切模量为 79 GPa ,泊松比为 0.3。

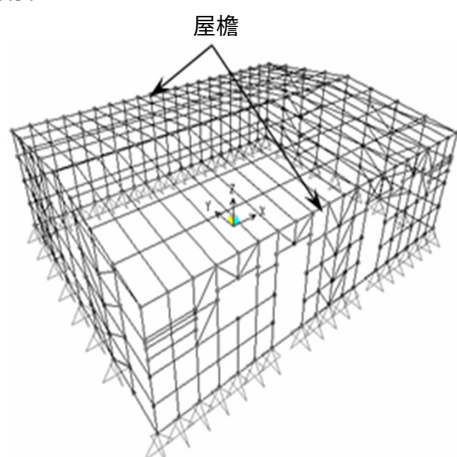


图3 冷弯薄壁型钢房屋组合框架模型

3.2 风压系数

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012),在地面粗糙度等级为 B 类条件下,单层房屋的高度低,且高宽比小于 1.5,可不考虑风压高度变化

系数与风振系数。国外有很多学者对低矮房屋表面风压进行了系列研究,得到了低矮房屋表面的风压分布特征^[9-12]。

一般屋面风压系数定义为^[13]:风在建筑物表面引起的实际压力与来流未绕动风速压力的比值,其与建筑物的体型和尺寸、地面粗糙度等因素有关。风力使受力面受压力即为正,使受力面受吸力即为负,风压系数计算公式为:

$$C_p = \frac{P(t) - P_{\text{ref}}}{1/(2\rho U_{10}^2)} = \frac{\Delta P(t)}{1/(2\rho U_{10}^2)}, \quad (5)$$

式中: $P(t)$ 为实际风压值; P_{ref} 为相对参考静压; $\Delta P(t)$ 为实测压差值; ρ 为实测环境下的空气密度; U_{10} 为测风塔来流方向未绕动的房屋屋檐高度的实测 10 min 的平均风速。

模型按照封闭式双坡屋面设计。

3.3 载荷

整个房屋框架施加的载荷,包括屋面恒载、活载和风荷载。根据实际情况进行相应载荷的具体值设计。屋盖恒载设为 $0.3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,包括屋面板重量、檩条重量、防水层重量和瓦重;由于屋顶不会上人,故活载设为 $0.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$;风荷载按 50 年一遇设置,为 $0.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$;地面粗糙度为 B 类。按风荷载效应起控制效应设计,其荷载组合为 $1.2D_L + 0.7 \times 1.4L_L + 1.4W_L$,其中 D_L 为恒荷载, L_L 为活荷载, W_L 为风荷载。

由于空间风向角的不确定性,风向角分别设为 0° 、 90° 、 180° ,方向如图4所示。风向分别垂直作用于屋面的正前方、左侧方和正后方。风荷载使房屋产生侧移,通过研究不同风向角的风压分布,得到该组合房屋框架的临界屈曲荷载,并进行比较。

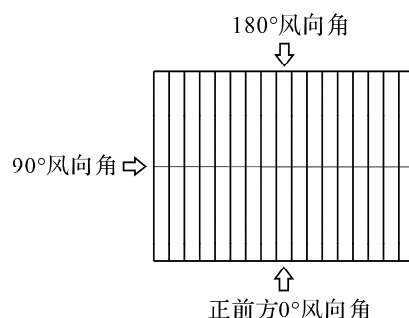


图4 各风向角示意图(房屋框架俯视方向)

3.4 冷弯薄壁 C 和 Z 型钢组合梁承载能力对比

在 0° 风向角的作用下,冷弯薄壁型钢房屋组

合框架的正面表现为压力, 其他三面和上方均表现为吸力, 得到冷弯薄壁C和Z型钢截面房屋组合框架在活荷载和风荷载作用下的12阶临界屈曲因子, 如图5和图6所示。

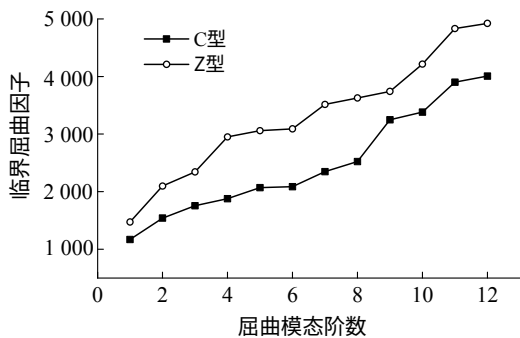


图5 房屋临界屈曲因子对比(活荷载)

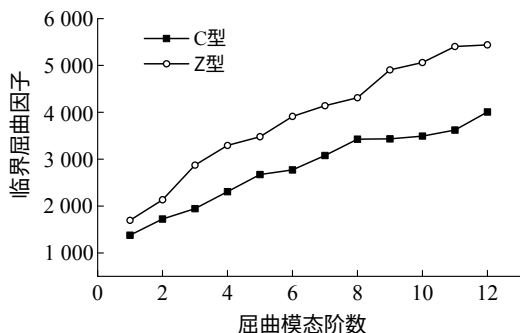


图6 房屋临界屈曲因子对比(0°风向角风荷载)

从图5可知, 风向角为0°的情况下, 虽然单根冷弯薄壁型钢的截面尺寸相同, 但不同截面形状的房屋组合框架的整体临界屈曲因子不同。对比各自前6阶的屈曲因子数据可知, 在风向角为0°, 且相同的风力和竖直向下的活荷载作用屋顶时, Z型钢的组合框架的整体临界屈曲因子大于C型钢组合框架。同理, 从图6可知, 在风向角为0°, 且相同风荷载作用于房屋四周时, Z型钢的房屋组合框架的整体临界屈曲因子同样大于C型钢组合框架, 由此表明, 在截面尺寸相同, 即用钢量相同的情况下, Z型钢的组合框架在同样的荷载条件下的承载能力优于C型钢的组合框架。

当风向角变为90°和180°时, 该房屋组合框架的临界屈曲因子和风向角为0°时相比有一定的差异, 结果如图7和图8所示。从图7和图8可发现, 虽临界屈曲因子不同, 但冷弯薄壁C和Z型钢组合框架对比的屈曲因子走势基本相同。比较前6阶屈曲因子, 在180°和90°风向角的前提下, Z型钢组合

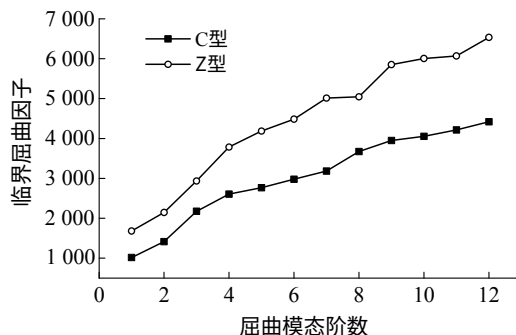


图7 房屋临界屈曲因子对比(90°风向角风荷载)

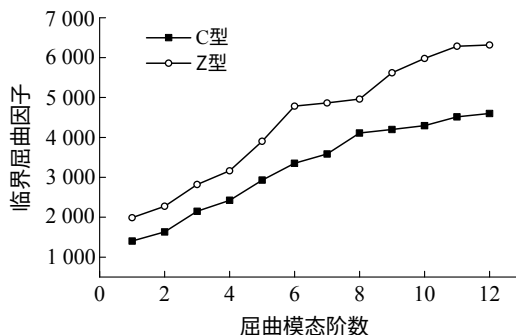


图8 房屋临界屈曲因子对比(180°风向角风荷载)

框架的临界屈曲因子均大于C型钢的房屋组合框架, 说明改变风向角几乎没有影响Z型钢组合框架相对于C型钢组合框架承载能力的优势。

将Z型钢房屋组合框架在3种风向角下的承载情况进行比较, 研究3种风向角中最不利的风压状态, 结果如图9和表2。从图9可发现, 180°风向角情况下的临界屈曲因子最大, 即承载能力最高; 90°风向角下的房屋承载能力最弱。

根据李秋胜等^[14]研究, 在风荷载和屋面活荷载、恒荷载的作用下, 轴压主要集中在低矮房屋屋面屋脊区域、角部屋檐区域。通过计算, 取角部屋檐区域进行比较可知, 整个房屋框架结构在90°风向角的风荷载作用下, 整个结构的承载能力最

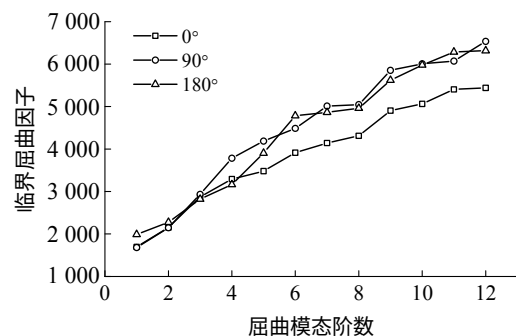


图9 不同风向角下房屋临界屈曲因子对比

表 2 C 和 Z 型截面房屋屈曲因子对比

风向角/(°)	阶数	C 型截面	Z 型截面	屈曲因子增加百分比/%
0	1	1 378.16	1 695.48	23.02
	2	1 721.39	2 153.52	23.94
	3	1 942.58	2 873.03	47.90
90	1	1 213.71	1 680.41	38.45
	2	1 512.73	2 146.53	41.90
	3	2 173.97	2 934.55	34.99
180	1	1 401.97	1 989.00	41.87
	2	1 630.80	2 275.19	39.51
	3	2 149.47	2 820.66	31.22

低. 结合轴力图(图 10), 可以观察到 C 和 Z 型钢低层房屋在活载、恒载和 90°风向角风荷载作用下, 其正面屋檐区域所承受的轴压. 从图 10 可看出, 在风载和屋面恒、活载作用下, 整个房屋组合框架承受的轴压主要表现在屋檐等角部区域. 分别将 C 和 Z 两种截面条件下的正前方屋檐区域划分为 20 小段进行轴压对比, 结果如图 11 所示.

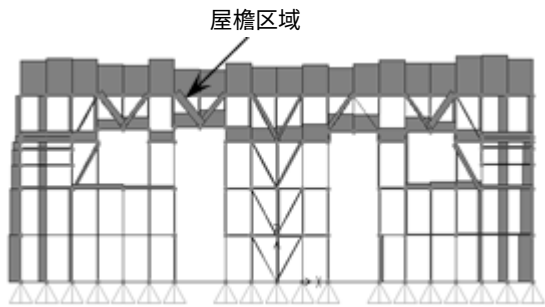


图 10 房屋正面轴力图(90°风向角风荷载)

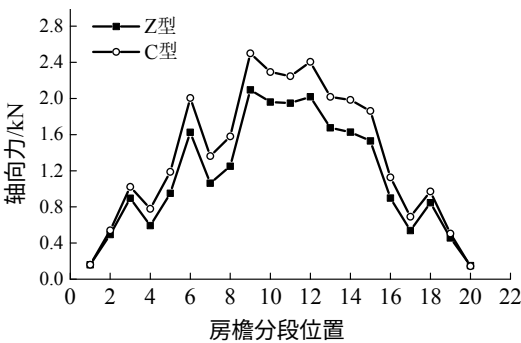


图 11 房屋屋檐处 20 段轴力对比(90°风向角风荷载)

从图 11 可知, 冷弯薄壁卷边 C 型钢组合框架的屋檐轴力大于 Z 型钢的房屋组合框架, 最高点比 Z 型钢高 21.9%. 对比其他 2 种风向角下 C 和 Z 型截面房屋的屋檐区域的轴压, 得到了相同的结果.

同时, 通过节点位移发现, C 型钢房屋的屋脊中心处节点位移最大, 最大竖向位移为 8.10 mm, 而 Z 型钢房屋为 6.46 mm, 两者最大水平侧向位移均保持在 2 mm 以内. 根据文献[15], 结构变形的挠度值小于结构跨度的 1/400 (本文中跨度为 8 m)且结构的侧向位移也小于房屋高度的 1/200 (本文中高度为 3 m), 因此均满足规范要求, 不需要验算承载力. 这进一步验证了同等截面尺寸前提下, 冷弯薄壁 Z 型钢房屋组合框架相比于 C 型钢房屋组合框架具有优势.

4 结论

(1)通过有线条软件计算冷弯薄壁卷边 C 和 Z 型钢单根构件表明, 在截面尺寸相同的情况下, 其临界屈曲应力与结合直接强度法得到的极限承载力基本对应相等.

(2)0°、90°和 180°风向角所对应的冷弯薄壁卷边 Z 型钢房屋组合框架屋檐等薄弱区域所承受的轴力相较于 C 型钢更小, 即承受同样的载荷, 由于截面形式不同, Z 型钢房屋框架更安全.

(3)通过 SAP2000 软件分析得到冷弯薄壁 C 和 Z 型钢组合框架的临界屈曲载荷, 对比前 3 阶临界屈曲因子表明, 在风向角分别为 0°、90°和 180°的情况下, 冷弯薄壁 Z 型钢的组合框架的临界屈曲因子均大于 C 型钢组合框架, 其值增大了 20%以上, 在实际工程中可以节约用钢量, 提高承载力.

(4)低层房屋组合梁框架的最不利风向角是 90°, 180°风向角的承载能力最高. 因此, 在实际工程中可以根据当地常见的风向合理设置房屋的朝向和各方向的尺寸.

参考文献:

[1] 中国建筑标准设计研究院. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程(JGJ227-2011)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011:1-118.

[2] 周绪红, 石宇. 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.

[3] 段君瑛. 冷弯薄壁型钢结构房屋及其在我国的发展应用[J]. 山西建筑, 2008, 7(34):84-85.

[4] 赵一捷, 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, 8(42):1-8.

[5] Schafer B W, Pekiz T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic

- buckling solutions[C]//Second International Conference on Thin-walled Structures. Singapore: Elsevier Science Ltd, 1998:137-144.
- [6] 张旭, 吴梦景, 黄栩浩, 等. 冷弯薄壁卷边槽钢尺寸优化设计研究[J]. 工业建筑, 2016, 46:293-296.
- [7] Zhou X H, Liu Z K. An analytical model for analyzing distortional buckling of cold-formed steel section[J]. Thin-walled Structure, 2008, 64:1430-1436.
- [8] 黄栩浩, 孙国军, 吴梦景, 等. 冷弯薄壁卷边槽钢卷边角度优化设计[J]. 工业建筑, 2015, 45(11):167-171; 180.
- [9] Sill B L, Cook N J, Fang C. The aylesbury comparative experiment: A final report[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36(2):1053-1062.
- [10] Richardson G M, Robertson A P, Hoxey R P, et al. Fullscale and model investigations of pressures on an industrial/agricultural building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/2/3):1553-1564.
- [11] Levitan M L, Mehta K C. Texas tech field experiments for wind loads Part I: Building and pressure measuring system[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/2/3):1565-1576.
- [12] Levitan M L, Mehta K C. Texas tech field experiments for wind loads Part II: Meteorological instrumentation and terrain parameters[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/2/3):1577-1588.
- [13] 邹晓旭. 空间桁架大型临时看台风荷载分析方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [14] 李秋胜, 戴益民, 李正农. 低矮房屋风荷载实测研究(II)——双坡屋面风压特征分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4):1-8.
- [15] 四川省住房和城乡建设厅. 民用建筑可靠性鉴定标准(GB50292-2015)[M]. 北京: 中国建设出版社, 2015:1-102.

Comparison of load-bearing capacity of low level residential buildings with cold-formed thin-walled C and Z steel composite frames

ZHAO Wei-xin¹, LI Fa-chao¹, HUANG Xu-hao², YE Wen-hua¹, ZHU Jue^{1*}

(1. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: By using genetic algorithm and Direct Strength Method (DSM), the optimized cold-formed thin-walled lipped C and Z steel sections after axial compression are obtained. The same optimal size is obtained when considering the same cross-sectional area. Using the linear (CUFSM) and DSM, the conclusion was verified that the critical buckling load and ultimate bearing capacity of single cold-formed C and Z steel are almost equal. Then, based on the finite element software SAP2000, the overall modeling of cold-formed thin-walled steel single-storey house is conducted. C and Z beams of the same optimized size are utilized in the structure, and the same loads are applied. It is found that the critical buckling loads of the two structures are different, and the bearing capacity of the Z-beam housing frame is higher after buckling. Under the wind direction with weak bearing capacity, the axial force in eaves and other weak areas of the combination frame of Z-shaped steel house is smaller than that of C-shaped steel house. Therefore, it is considered that under the premise of the same amount of steel used in low-rise housing construction, it is better to choose the Z-shaped section.

Key words: cold-formed thin-walled C- and Z- steel sections; critical buckling load; ultimate bearing capacity; finite element; low-level housing

(责任编辑 史小丽)