

双肢梯形冷弯薄钢格构柱轴压承载力研究

金路¹, 钱晶晶¹, 徐冬², 张飞扬¹, 陈强¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中建二局第四建筑工程有限公司, 天津 300457)

摘要 目的 提出一种适用于轻钢厂房或大跨房屋的缀条式双肢梯形薄钢格构柱, 并研究其轴心受压承载性能。**方法** 采用 ABAQUS 有限元软件对梯形截面双肢格构柱数值模型进行非线性分析, 研究构件的应力发展趋势和破坏机理, 分析柱高和分肢腹板高度参数对格构柱轴压承载力的影响机制, 并采用现行规范有效宽度法对构件进行极限承载力计算分析。**结果** 随着柱高增加, 格构柱由强度破坏转为整体失稳破坏, 同时伴有斜卷边畸变屈曲耦合破坏, 轴压承载力下降速度先快后慢; 随着腹板高度增加柱由绕实轴失稳转为绕虚轴失稳, 承载力先增大后减小; 规范计算值对腹板高度在 80~120 mm 时, 结果偏于安全; 腹板高度为 140 mm 时, 结果偏不安全。**结论** 双肢梯形薄钢格构柱的截面形式布置灵活, 轴压承载力较高; 薄钢格构柱的分肢腹板高度取 100~120 mm 为宜; 建议修正稳定系数 φ , 得出适用于双肢梯形冷弯薄钢格构柱的承载力计算公式。

关键词 双肢格构柱; 冷弯薄钢; 轴压承载力; 整体稳定; 缀条

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

Study on Axial Compression Capacity of Double Limbs Cold-formed Thin Steel Trapezoid Lattice Columns

JIN Lu¹, QIAN Jingjing¹, XU Dong², ZHANG Feiyang¹, CHEN Qiang¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

Abstract: This paper proposed a laced double limbs thin steel trapezoid lattice column suitable for light steel factories or large-span buildings, and studied its axial compression performance. The finite element software ABAQUS was used to perform nonlinear analysis on the numerical model of the double limbs lattice column with trapezoidal section. The stress development and failure mechanism of the constructs were studied. The influence mechanism of column height and web height on axial compression capacity of the lattice columns was analyzed. The effective width method of the current code was used to calculate and analyze the ultimate bearing capacity of the constructs. With the increase of the column height, the failure mode of lattice column turned from strength to overall instability, accompanied by distortional buckling failure of oblique edge, and the

收稿日期: 2021-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978422)

作者简介: 金路(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事轻型钢结构及装配式结构方面研究。

speed of axial compression capacity decreased quickly and then slowly. With the increase of web height, the columns turned from instability around the real axis to instability around the imaginary axis, and the bearing capacity firstly increased and then decreased. The code calculated value was safe when the web height was in the range of 80 ~ 120 mm, whereas the result was not safe when the web height was at 140 mm. The section form of the double limbs thin steel trapezoid lattice columns was flexible, and the axial compression capacity was relatively high. The preferable web height of the thin steel lattice column was in the range of 100 ~ 120 mm. It is recommended to modify the stability factor φ to obtain the calculation formulas for the bearing capacity of the double limbs thin steel trapezoid lattice columns.

Key words: double limbs lattice column; cold formed thin steel; axial compression capacity; overall stability; lacing bar

冷弯薄钢具有质量轻、强度高、运输方便、绿色经济等优点,常用于低层轻型房屋中梁柱承重构件^[1-3]。随着轻型钢结构的广泛需求和涌现,常见的C形、U形、Z形等单肢或拼合实腹式冷弯薄壁柱不足以满足结构设计和使用寿命要求。相比实腹柱,格构柱具有材料分布合理、易满足等稳定性要求、构件抗扭性能和抗弯性能优异、工业化程度高等优点,现已被广泛应用于工业厂房、大跨度房屋、塔桅结构、海洋平台结构等体系。因此研究冷弯薄钢格构柱的承载性能和屈曲性能,提出相关设计方法和完善我国冷弯薄钢设计规范尤为重要。

现行北美 AISI 规范^[4-6]针对单肢和双肢拼合冷弯薄壁型钢构件提出了设计方法;我国《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ227—2011)^[7]对多肢拼合截面柱的轴压承载力计算提出了单肢立柱轴压承载力叠加方法。虽然国内外学者对于单肢或拼合的实腹式冷弯薄壁构件受力性能已有较为系统的研究^[8-9],但针对格构式冷弯薄钢构件的承载性能和整体稳定性能的研究较少,尚缺乏安全可靠的设计方法和相关规定。M. A. DAR 等^[10]对缀条式冷弯型钢拼合柱的试验研究表明缀条长细比、布置形式和端板宽度对 CFS 拼合柱的受力性能影响显著;A. P. BONAB 等^[11]通过数值模拟发现肢件的长细比和缀件截面形状可影响格构柱抗震

性能;詹齐涛等^[12]研究了轴心受压格构方柱的受力变化规律和影响因素,为格构式冷弯薄钢压杆的设计提供依据。

基于上述分析,笔者提出一种缀条式双肢梯形冷弯薄钢格构柱,采用有限元分析软件 ABAQUS 模拟构件在轴向荷载作用下的力学性能,分析其应力发展趋势和破坏机理;研究柱高和腹板高度参数变化对薄钢格构柱极限承载力的影响机制,并选用有效宽度法对构件进行轴压极限承载力计算,为双肢冷弯薄钢格构柱承载力计算及构件设计提供依据。

1 有限元模型

1.1 几何参数

一种缀条式双肢梯形冷弯薄钢格构柱具体截面形式如图1所示。该构件分肢为长卷边直角梯形,梯形截面上下翼缘尺寸可灵活布置,通过改变卷边长度调整截面绕虚轴的惯性矩,使得构件尽可能满足轴压荷载作用下等稳定性要求,同时提高构件的双向抗弯性能。

经试算,共设计5种格构柱高度 L : 900 mm、1 500 mm、2 100 mm、2 700 mm、3 300 mm 和 4 种薄钢格构柱腹板高度 h_w : 80 mm、100 mm、120 mm、140 mm 的 20 种工况,构件其他几何尺寸详见图1。缀条长×宽×厚为 212 mm×30 mm×2 mm。工况编号以 TC900-80 为例,代表梯形截面格构柱

柱长为 900 mm、腹板高度为 80 mm。

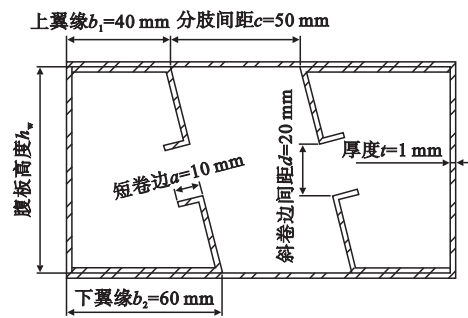


图1 缀条式梯形冷弯薄钢格构柱截面形式

Fig.1 Section form of laced cold formed thin steel trapezoid lattice column

1.2 模型的建立

通过有限元分析软件 ABAQUS 建立四肢梯形冷弯薄钢格构柱模型,进行轴压性能全过程数值分析。采用 Shell S4R 壳单元模拟格构柱和缀条;构件选取 Q235 钢材,钢材本构关系采用双线性强化弹塑性力学模型(见图2)。其中,屈服强度 $f_y=235$ MPa, ϵ_y 为屈服应变,弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ MPa,泊松

比 $\nu=0.3$,切线模量 E_t 取 $0.03E$ 。

双臂梯形冷弯薄钢格构柱缀条斜 45° 角连接构件两侧翼缘,缀条与分肢构件接触面选用绑定约束模拟二者连接。薄钢格构柱头和柱脚分别建立截面几何中心点,并将顶面和底面的六个自由度与几何中心点耦合。薄钢格构柱采用两端铰接约束。经试算网格尺寸划分为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 为宜,有限元模型如图3所示。

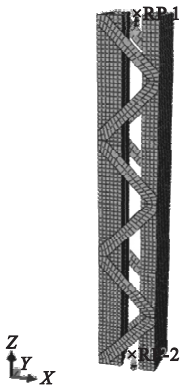


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

1.3 有限元模型验证

笔者选取文献[10]中四肢冷弯薄钢格构柱的轴压试件 SL-150-75-60-1705 进行有限元模型对比验证。试验破坏结果与有限元破坏结果如图4所示。有限元破坏结果与试验破坏模式基本一致,均为缀条连接处局压破坏。通过有限元计算得到的极限承载力为 118.1 kN,试件极限承载力为 121.0 kN,二者相差 5% 以内,且荷载 - 位移曲线吻合较好。由此证明文中有限元模型可靠合理。

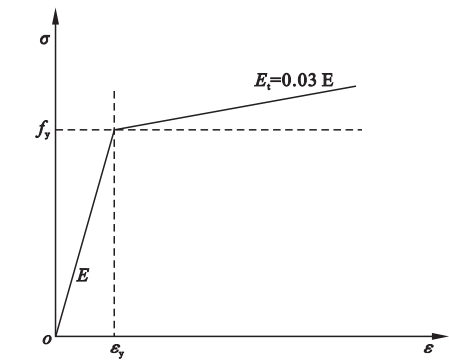


图2 钢材本构关系

Fig.2 Constitutive relation of steel

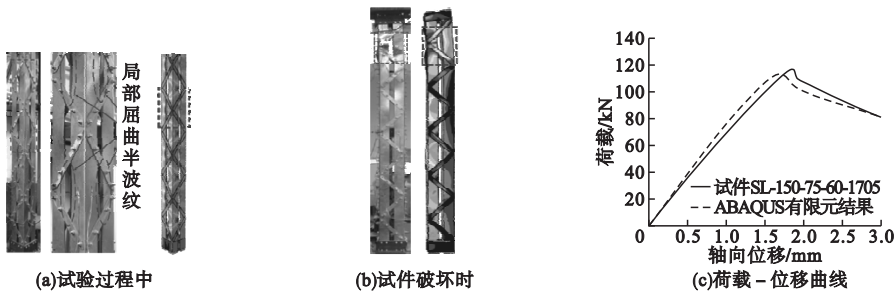


图4 模型验证结果

Fig.4 Model validation results

2 初始几何缺陷

对5组双肢梯形冷弯薄钢格构柱进行特征值屈曲分析,提取前四阶模态,分析结果作

为薄钢格构柱非线性屈曲分析的依据。以TC900系列为例,构件第一阶特征值屈曲模态如图5所示。由图可知,第一阶屈曲均发生在跨中腹板处。

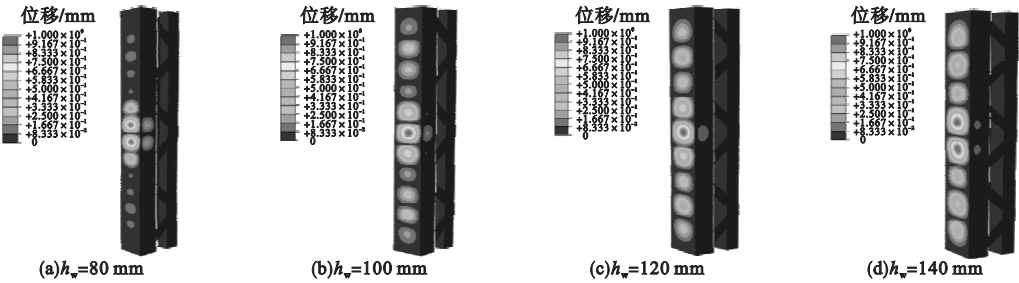


图5 TC900柱第一阶特征值屈曲模态

Fig. 5 The first-order eigenvalue buckling mode of TC900 columns

由于冷弯薄钢构件残余应力对其极限承载力影响可忽略不计^[13],因此笔者只考虑初始几何缺陷的非线性影响。初始几何缺陷以第一阶特征值屈曲模态施加,整体弯曲模态的比例因子取 $L/1\,000$,其中 L 为构件长度;截面局部屈曲模态的比例因子取 $0.005\,5\,h_w$,其中 h_w 为腹板高度^[14]。

迁移过程、极限承载力、刚度变化及破坏形态,以TC900、TC2100、TC3300系列构件为例,破坏时刻应力云图详见图6~图8所示。

由图6可知,TC-900柱主要破坏模式为局压强度破坏。加载初期 $P\leq 45\text{ kN}$ 时,构件整体应力分布均匀,随着轴压荷载持续增大,最大应力首先出现于跨中腹板处,且应力集中严重;当荷载达到 $P=100\text{ kN}$ 时,构件TC900-80和构件TC900-120均在跨中出现全截面应力集中,构件TC900-140腹板局部屈曲愈加明显,并伴有斜卷边畸变屈曲现象(见图6(d));所有构件均从分肢跨中腹板处局压破坏导致全截面屈服而发生破坏。

3 数值分析

3.1 应力分析

通过ABAQUS有限元模拟分析得到不同柱高及腹板高度变化下双肢梯形冷弯薄钢格构柱的轴压性能,得到各工况模型的应力

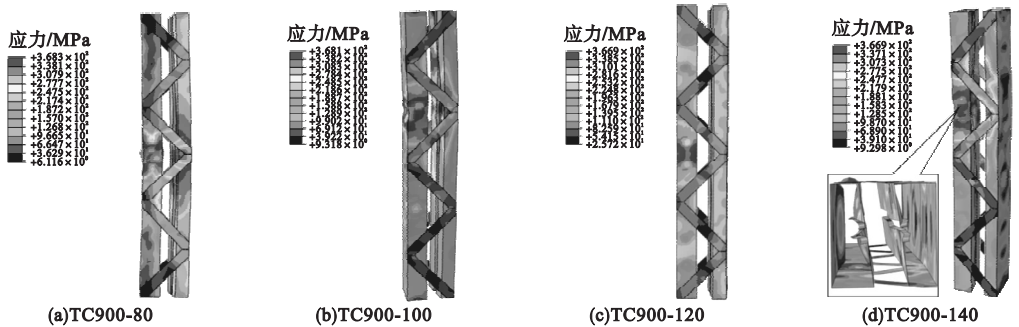


图6 TC900系列破坏时刻应力分布云图

Fig. 6 Stress distribution diagram of TC900 series at failure time

由图7可知,TC-2100系列构件在加载初期,构件整体受力均匀,最大应力首先发生在格构柱分肢较宽翼缘处;随着腹板高度的增加,构件绕实轴抗弯刚度逐渐加大,破坏模

式由绕实轴整体失稳转为局压破坏,两缀条间腹板及翼缘处出现局部屈曲,呈半波屈曲模式,随后最大应力发生在跨中截面,接着全截面屈服,整个构件逐渐丧失承载能力。

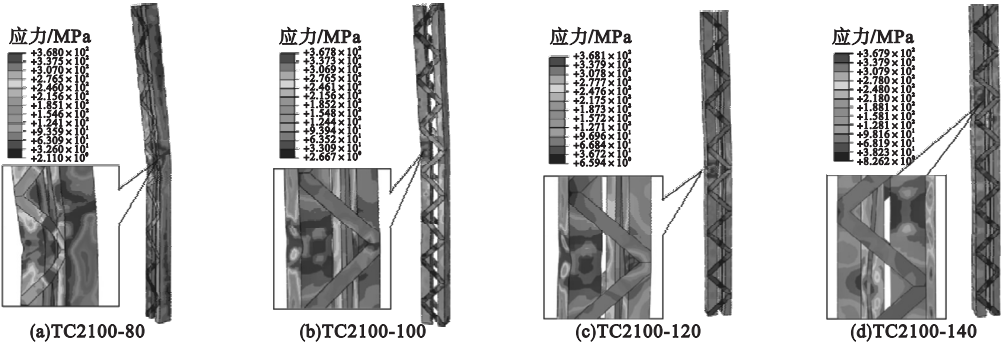


图 7 TC2100 系列破坏时刻应力分布云图

Fig. 7 Stress distribution diagram of TC2100 series at failure time

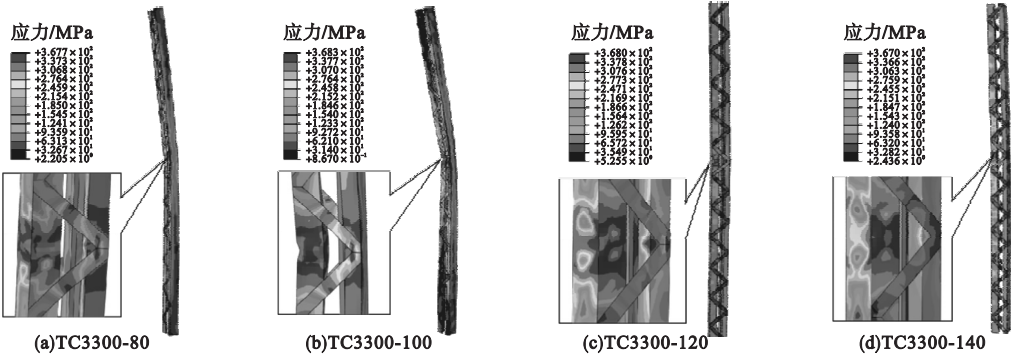


图 8 TC3300 系列破坏时刻应力分布云图

Fig. 8 Stress distribution cloud diagram of TC3300 series at failure time

由图 8 可知,TC-3300 系列主要发生整体失稳破坏。构件 TC3300-80 一侧翼缘应力持续增大,而另一侧变化较小,随着构件整体弯曲,在跨中处应力集中现象明显,截面内应力逐渐由翼缘迁移到相邻腹板处,此时轴压承载力达到最大 $P_{\max} = 61.89 \text{ kN}$ 。而当腹板高度 $h_w \geq 120 \text{ mm}$ 时,在加载上升阶段,构件整体受力均匀;荷载持续增加,腹板处应力逐

渐增大,构件内最大应力由整个截面迅速迁移到单肢截面内,最后绕虚轴发生失稳破坏。且随着腹板高度增加,柱跨中侧向位移明显降低,说明增大腹板高度能有效提高构件抗弯刚度,减小构件变形。

3.2 柱高影响

图 9 为不同柱高构件的荷载 - 位移曲线,图 10 为柱高对构件承载力的影响曲线。

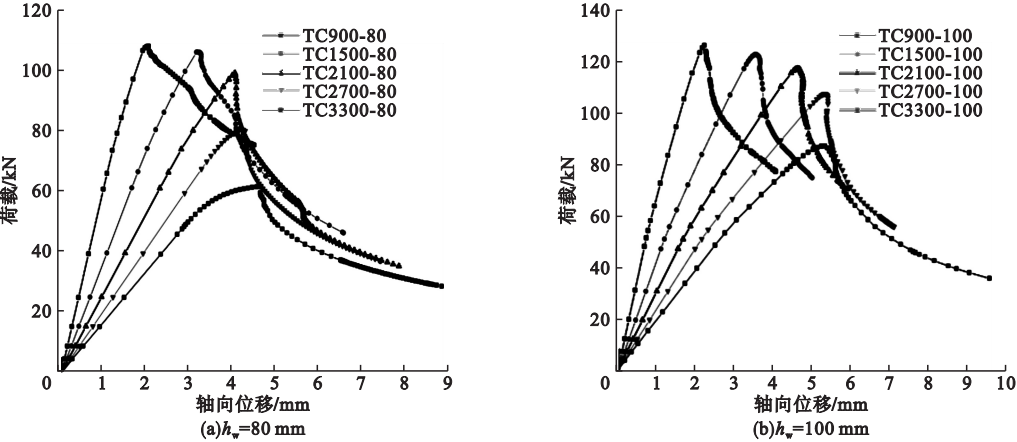


图 9 不同柱高构件荷载 - 轴向位移曲线

Fig. 9 Load-axial displacement curves of different column height

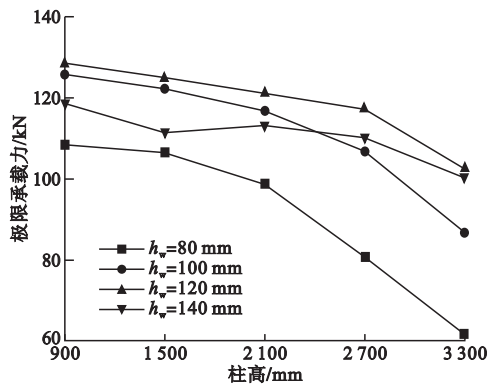


图 10 柱高对构件承载力的影响

Fig. 10 Influence of column height on bearing capacity of members

对比构件 TC900 - 80、TC1500 - 80、TC2100 - 80、TC3300 - 80, 极限承载力从

108.65 kN下降至 61.89 kN, P_{\max} 降幅依次为 1.71%、8.95%、25.48%、43.04%; 对比构件 TC900 - 100、TC1500 - 100、TC2100 - 100、TC3300 - 100, 极限承载力从 126.08 kN 下降至 86.96 kN, P_{\max} 降幅依次为 2.81%、7.17%、15.08%、31.03%。综上, 柱高对构件轴压极限承载力影响显著, 随着格构柱柱高增加, 相同截面构件轴压极限承载能力均有下降, 且下降趋势由缓转快。

3.3 分肢截面腹板高度影响

选取 TC900、TC2100、TC3300 系列柱荷载 - 位移曲线如图 11 所示, 截面腹板高度对构件承载力的影响曲线如图 12 所示。

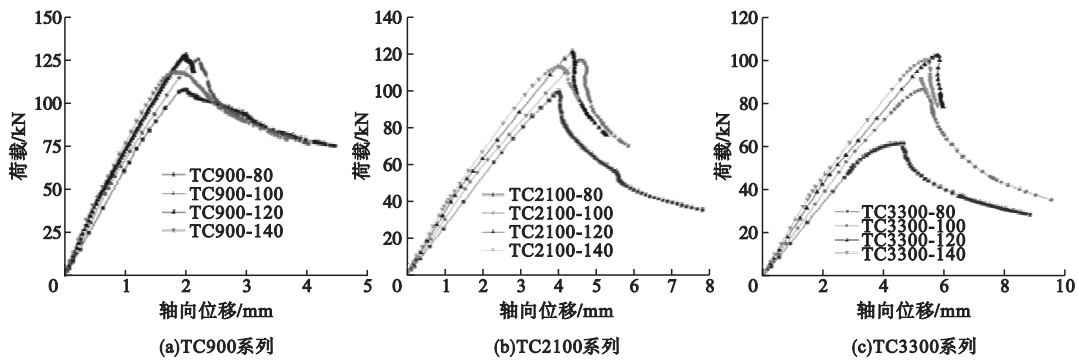


图 11 不同腹板高度荷载 - 轴向位移曲线

Fig. 11 Load - axial displacement curves of different web height

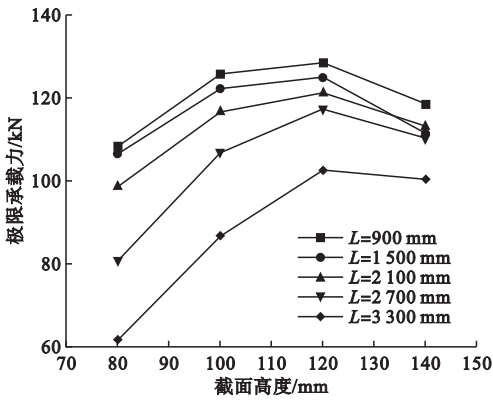


图 12 腹板高度对构件承载力的影响

Fig. 12 Influence of web height on bearing capacity of members

TC900 系列构件中, 当腹板高度 h_w 由 80 mm 增至 120 mm, 柱轴压承载力从 108.65 kN 增至 128.81 kN, 提高 18.55%; 当腹板高度 h_w 由 120 mm 增至 140 mm, 构件承载力反而降至 118.83 kN, 降低 7.75%。在 TC2100 系列中, 随着腹板高度增加, 承载力变化规律与 TC900 系列一致, 均表现为先增大后降低, 且总体变化幅度较小。其中构件 TC2100-120 相比构件 TC2100-80 承载力提高 22.83%, 构件 TC2100-140 相比 TC2100-120 承载力降低 7.04%。而 TC3300 系列构件当腹板高度 h_w 由 80 mm 增至 140 mm, 柱轴压承载力持续增长, 极限承载力 P_{\max} 由 61.89 kN 增至

式中: b 为板件宽度; t 为板件厚度; b_e 为板件有效宽度; α 和 ρ 为计算系数; b_c 为板件受压区宽度。其计算结果如表 1 所示。

表1 薄钢规范计算结果与有限元分析结果对比

工况编号	计算长度 L_0/mm	长细比 λ	稳定系数 φ	有效截面面积 A_e/mm^2	N_u/kN	P_A/kN	P_A/N_u
TC900-80	900	29.60	0.938	370	99.26	108.65	1.095
TC900-100	900	24.54	0.955	416	113.62	126.08	1.109
TC900-120	900	20.73	0.967	436	120.58	128.81	1.068
TC900-140	900	21.04	0.966	451	124.60	118.83	0.954
TC1500-80	1 500	49.34	0.861	373	91.25	106.79	1.170
TC1500-100	1 500	40.90	0.899	420	107.98	122.54	1.134
TC1500-120	1 500	34.56	0.920	439	115.51	125.26	1.084
TC1500-140	1 500	30.31	0.936	451	120.73	111.76	0.925
TC2100-80	2 100	69.07	0.757	377	81.62	98.93	1.212
TC2100-100	2 100	57.26	0.823	427	100.51	117.04	1.164
TC2100-120	2 100	48.38	0.865	449	111.07	121.52	1.094
TC2100-140	2 100	42.25	0.891	458	116.57	113.52	0.973
TC2700-80	2 700	88.80	0.628	382	68.61	80.96	1.180
TC2700-100	2 700	73.63	0.726	431	89.49	107.06	1.196
TC2700-120	2 700	62.21	0.797	447	101.89	117.55	1.154
TC2700-140	2 700	54.32	0.838	463	110.96	110.47	0.995
TC3300-80	3 300	108.55	0.502	388	55.71	61.89	1.111
TC3300-100	3 300	89.99	0.621	445	79.03	86.96	1.101
TC3300-120	3 300	76.00	0.714	453	92.50	102.83	1.112
TC3300-140	3 300	66.40	0.774	469	103.82	100.63	0.9690

注: N_u 为《冷弯薄壁型钢技术规范》中有效宽度法计算值; P_A 为ABAQUS模拟值。

由表1可知,当腹板高度 $h_w\leq 120\text{ mm}$ 时,规范有效宽度法计算值 N_u 与有限元模拟值 P_A 吻合较好,结果偏于安全;而当腹板高度 $h_w=140\text{ mm}$ 时,有限元模拟结果与规范计算结果比值 P_A/N_u 值依次为0.954、0.925、0.973、0.995、0.969,说明此时使用现行有效宽度法计算偏不安全。建议将式(1)中稳定系数 φ 进行修正,得出双肢梯形冷弯薄钢格构柱的承载力计算公式。

6 结 论

(1) 双肢梯形冷弯薄钢格构柱随柱高增加轴压极限承载力降低速率先慢后快,当柱高 $L\leq 2\text{ 100 mm}$ 时构件总体发生局部屈曲时同时伴有畸变屈曲耦合;当柱高 $L>2\text{ 100 mm}$ 时

破坏模式由强度破坏转为整体失稳破坏。

(2) 改变截面腹板高度对格构柱的轴压性能影响也较显著。当腹板高度增大时,截面抗弯刚度明显增大,轴压承载力呈上升趋势,但当腹板高度增至一定值,因构件发生腹板局部屈曲失稳,轴压承载力反而降低。为保证较优承载性能,建议分肢截面腹板高度 h_w 取 $100\sim 120\text{ mm}$ 。

(3) 采用规范中有效宽度法对构件进行轴压承载力计算,腹板高度 $h_w\leq 120\text{ mm}$ 时理论计算结果总体偏于安全;腹板高度 $h_w=140\text{ mm}$ 时,理论计算值偏不安全,建议修正稳定系数 φ ,得出适用于双肢梯形冷弯薄钢格构柱的承载力计算公式。

(4) 缀条式双肢梯形冷弯薄钢格构柱具

有轴压承载性能高,整体受力均匀,破坏模式明确,截面形式灵活等优点。在强化弱轴惯性矩、提高构件双向抗弯性能的情况下降低了构件钢材使用量,可在轻型工业厂房或大跨度轻钢房屋中应用。

参考文献

- [1] 武胜,魏源.腹板开孔新型冷弯薄壁构件受弯性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(1):29-37.
(WU Sheng, WEI Yuan. Bending behavior of new cold-formed thin-walled members web slotting [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(1): 29-37.)
- [2] 许金勇,贾润萍,徐家跃.装配式冷弯薄壁型钢轻钢建筑材料发展动态[J].应用技术学报,2017,17(4):289-294.
(XU Jinyong, JIA Runping, XU Jiayue. Research progress of fabricated light-gauge steel residential material [J]. Journal of technology, 2017, 17(4): 289-294.)
- [3] 周波.现代轻钢结构建筑及其应用分析[J].低碳世界,2018(9):209-210.
(ZHOU Bo. Modern light steel structure building and its application analysis [J]. Low carbon world, 2018(9): 209-210.)
- [4] 何子奇,周绪红,邹勃,等.冷弯薄壁型钢轴压构件畸变与整体相关屈曲承载力计算方法研究[J].建筑结构学报,2019,40(3):192-199.
(HE Ziqi, ZHOU Xuhong, ZOU Bo, et al. Calculation-method investigation on ultimate load-carrying capacities of cold-formed steel columns experiencing distortional-global buckling interaction under axial compression [J]. Journal of building structures, 2019, 40(3): 192-199.)
- [5] 崔瑶,陈宇彤,宋世聪.冷弯薄壁型钢多肢拼合柱轴压承载力计算方法对比分析[J].建筑钢结构进展,2019,21(6):89-96.
(CUI Yao, CHEN Yutong, SONG Shicong. Comparison analysis of calculation methods for axial compression capacity of cold-formed thin-walled steel columns with built-up sections [J]. Progress in steel building structures, 2019, 21(6): 89-96.)
- [6] 王春刚,孔德礼,张耀春.冷弯薄壁型钢构件承载力计算方法对比研究[J].建筑钢结构进展,2017,19(6):51-59.
(WANG Chungang, KONG Deli, ZHANG Yaochun. Comparative study on calculation methods of bearing capacity of cold-formed thin-walled steel members [J]. Progress in steel building structures, 2017, 19(6): 51-59.)
- [7] 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[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
(China Institute of Building Standard Design & Research. Technical specification for low rise cold-formed thin-walled steel buildings: JGJ227—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [8] 李元齐,李英磊,王树坤,等.冷弯薄壁型钢双肢拼合构件轴压承载力研究[J].建筑结构学报,2014,35(12):104-113.
(LI Yuanqi, LI Yinglei, WANG Shukun, et al. Investigation on ultimate capacity of built-up columns with double channel sections under axial compression [J]. Journal of building structures, 2014, 35(12): 104-113.)
- [9] 姚行友,郭彦利.腹板开圆孔冷弯卷边槽钢轴压构件畸变屈曲承载力试验及计算方法[J].工业建筑,2016,46(4):135-141.
(YAO Xingyou, GUO Yanli. Distortional buckling test and calculation method of load-carrying capacity of cold-formed thin-walled steel lipped channel columns with circle holes in web under axial compression [J]. Industrial construction, 2016, 46(4): 135-141.)
- [10] DAR M A, SAHOO D R, JAIN A K. Axial compression behavior of laced cold-formed steel built-up columns with unstiffened angle sections [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 162: 1-14.
- [11] BONAB A P, HASHEMI B H. Analytical investigation of cyclic behavior of laced built-up columns [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 73: 128-138.
- [12] 詹齐涛.格构轻钢方柱试验研究及有限元分析[D].武汉:武汉理工大学,2013.
(ZHAN Qitao. Experimental research and finite element analysis of lattice light steel square columns [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.)
- [13] MUTHURAMANA M, ANURADHA R. Numerical simulation and specification provisions for buckling characteristics of a built-up steel column section subjected to axial loading [J]. Engineering structures, 2020, 207: 1-8.
- [14] 王春刚,宋代军,张壮南.冷弯薄壁复杂卷边槽钢轴压固支构件稳定性性能分析[J].工业建筑,2012,42(2):120-124.
(WANG Chungang, SONG Daijun, ZHANG Zhuangnan. Stability behavior of cold-formed thin-walled steel fixed-ended channels with complex edge stiffeners under axial compressive load [J]. Industrial construction, 2012, 42(2): 120-124.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)