

引文格式:白正仙,李广飞,姜子钦,等. L形波形板钢异形柱轴压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(4): 76-82.

BAI Zhengxian, LI Guangfei, JIANG Ziqin, et al. Study on axial compression performance for L-shaped steel column with corrugated plate [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 76-82.

DOI:10.19815/j.jace.2024.01021

# L形波形板钢异形柱轴压性能研究

白正仙<sup>1,2</sup>, 李广飞<sup>1</sup>, 姜子钦<sup>1,2</sup>, 牛子尧<sup>1</sup>, 王刘浩翔<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;

2. 北京工业大学 北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:**为提高传统L形钢异形柱的整体稳定性及材料利用率,提出一种新型L形波形板钢异形柱,该柱由工字形钢、波形板及外侧翼板三部分构成。为研究该柱轴压性能及各部分截面参数的影响特征,设计6个模型,采用有限元软件ABAQUS进行弹性屈曲及非线性分析,研究各模型屈曲模式、荷载-位移曲线、破坏特征,以及整体稳定系数、极限荷载等关键性能指标变化率与截面参数变化率的关系;将各模型整体稳定系数与现行《钢结构设计标准》中的柱构件轴压稳定系数曲线进行对比分析。结果表明:L形波形板钢异形柱屈曲模式均为弯扭屈曲;各模型稳定系数均在b类柱构件轴压稳定系数曲线之上;稳定承压性能随外侧翼板、工字形钢翼缘面积增大而增强,随工字形钢腹板面积增大而减弱。

**关键词:**钢结构; L形异形柱; 波形板; 轴压稳定性; 数值模拟

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)04-0076-07

## Study on axial compression performance for L-shaped steel column with corrugated plate

BAI Zhengxian<sup>1,2</sup>, LI Guangfei<sup>1</sup>, JIANG Ziqin<sup>1,2</sup>, NIU Ziyao<sup>1</sup>, WANG Liuhaixiang<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of High-rise and Large-span Prestressed Steel Structure, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to improve the overall stability and material utilization of traditional L-shaped steel column, a new type of L-shaped steel column with corrugated plate was proposed, which was composed of I-shaped steel, corrugated plate and outer flange plate three parts. In order to study the axial compressive performance of the column and the influence characteristics of various section parameters, 6 models were designed and elastic buckling and nonlinear analysis were carried out by finite element software ABAQUS. The buckling modes, load-displacement curves, failure characteristics of models, as well as the relationship between the changing rate of key performance indicators such as overall stability coefficient and ultimate load and the rate of change of section parameters were studied. The overall stability coefficient of each model was compared with column curves of the current *Standard for Design of Steel Structures*. The results show

收稿日期: 2024-01-03

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078013)

作者简介: 白正仙(1968-), 女, 工学博士, 副教授, E-mail: zxbai@bjut.edu.cn。

通信作者: 姜子钦(1988-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jzqb2010@163.com。

that the buckling modes of the L-shaped steel columns with corrugated plate are all flexural torsional buckling. The stability coefficients are all bigger than that of class b cross-section column curve. The compressive performance increases with the increase of the areas of the outer flange plate and I-shaped steel flange and weakens with the increase of I-shaped steel web area.

**Key words:** steel structure; L-shaped column; corrugated plate; axial compressive stability; numerical simulation

**Author resumes:** BAI Zhengxian(1968-), female, PhD, associate professor, E-mail: zxbai@bjut.edu.cn; JIANG Ziqin(1988-), male, PhD, professor, E-mail: jzqbj2010@163.com.

## 0 引言

当代社会对建筑行业的要求越来越高,绿色与可持续发展已成为建筑领域的核心理念。在适用性、高效性、绿色节能及可持续发展等方面,钢结构建筑均具有突出优势<sup>[1-3]</sup>。近年来,在国家大力推动住宅产业化背景下,钢结构住宅体系已成为住宅建筑业的重要发展方向<sup>[4]</sup>。钢异形柱适用于钢结构住宅,其能够避免柱角突出墙面的问题,满足建筑美观要求,方便室内空间使用的同时可增加建筑使用面积。

目前国内外学者对钢异形柱的研究方兴未艾<sup>[5]</sup>。王明贵等<sup>[6-7]</sup>针对传统 L 形钢异形柱开展轴心受压承载性能试验研究与理论分析,得到偏保守的稳定承载力计算公式。张爱林等<sup>[8-10]</sup>通过数值模拟和试验方法,深入研究十字形、T 形及 L 形截面钢异形柱的抗震性能,为钢异形柱结构的抗震设计提出实质性建议。王萌等<sup>[11]</sup>提出一种新型 L 形钢异形柱,该异形柱由方形钢管柱与 T 形钢柱组成,采用数值模拟方法研究了其轴压性能,结果表明其承载力较改进前有了明显提升。Behzadi-Sofiani 等<sup>[12]</sup>研究了不同长细比和边界条件下的十字形钢异形柱的轴压力学特性,结果表明该异形柱的承载能力不仅与柱长细比有关,还和扭转与弯曲弹性屈曲荷载比有关。Chen 等<sup>[13]</sup>对十字形柱的扭转屈曲强度进行研究发现,初始扭转和残余应力均能显著降低十字形柱的极限扭转屈曲强度。Zhang 等<sup>[14-15]</sup>对带有边缘、腹板加劲肋和纵向加劲肋的冷弯型钢工字形开口截面柱进行了一系列试验,研究其破坏模式和极限强度,并通过可靠性分析对现行设计规范和改进后的直接强度法进行了评价。

传统钢异形柱的腹板为平板,其板厚受板件宽厚比限值<sup>[16]</sup>控制,导致板厚取值较大,降低了柱横截面材料的使用效率。相比平板,波形板一般由 2~3 mm 厚的薄板冷轧而成,具有较大的面外刚度,其宽厚比限值较大。已有研究表明<sup>[17]</sup>,波形板

与钢管组成的新型钢柱的承载力比平板与钢管组成的钢柱轴压失稳极限承载力提高 10%。本文将传统 L 形钢异形柱的平腹板替换为波形板,提出新型 L 形波形板钢异形柱。为研究该柱的轴压性能以及各截面参数对轴压性能的影响,采用有限元软件 ABAQUS 进行特征值屈曲分析和弹塑性非线性分析,获得屈曲模式、荷载-位移曲线、极限荷载等;计算稳定系数,并与《钢结构设计标准》中的柱构件轴压稳定系数曲线进行对比分析。

## 1 新型 L 形钢异形柱截面组成

本文提出的新型 L 形波形板钢异形柱由工字形钢、水平波纹波形板和外侧翼板三部分构成,各部分之间均采用焊接方式牢固连接,如图 1 所示,其中  $b_w$ 、 $t_w$  分别为工字形钢腹板的宽度和厚度,  $b_{f1}$ 、 $t_{f1}$  分别为工字形钢翼缘板的宽度和厚度,  $b_b$ 、 $t_b$  分别为波形板的宽度和厚度,  $b_{f2}$ 、 $t_{f2}$  分别为外侧翼板的宽度和厚度,  $B_L$ 、 $B_H$  分别为柱截面的宽度和高度。钢柱承受轴向及侧向荷载,其中轴向荷载主要由工字形钢与外侧翼板承担,波形板基本不承压<sup>[18]</sup>;波纹板具有较大的面外刚度,与其他两部分协同工作,能够提高柱的抗侧能力及整体稳定性能。

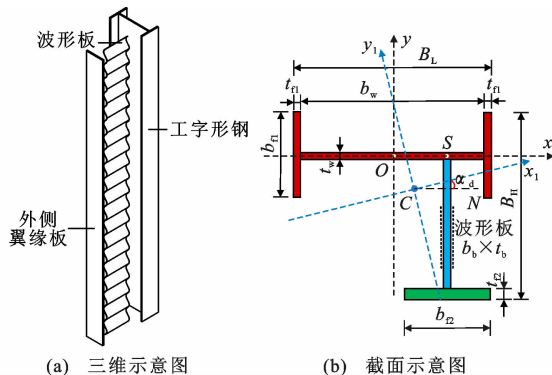


图 1 L 形柱构造

Fig. 1 L-shaped column construction

以工字形钢的腹板中点为坐标原点建立坐标系  $Oxy$ 。由于波形板几乎不承担竖向荷载,因此计算

截面形心(点 C)坐标时忽略波形板贡献。形心坐标表示为 $(x_c, y_c)$ ,其计算公式如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned} x_c &= \frac{b_{f2} t_{f2} (B_L - b_{f1})}{2(2b_{f1} t_{f1} + b_w t_w + b_{f2} t_{f2})} \\ y_c &= -\frac{b_{f2} t_{f2} (2B_H - b_{f1} - t_{f2})}{2(2b_{f1} t_{f1} + b_w t_w + b_{f2} t_{f2})} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

以形心 C 为坐标原点建立主坐标系  $Cx_1y_1$ , 从  $x$  轴到形心主轴  $x_1$  的夹角  $\alpha_d$  称为主轴旋转角, 以逆时针转向为正。

2 算例设计

为了研究新型钢异形柱的轴压性能及各参数的影响特征,本文共设计 6 个模型,模型详细参数如表 1 所示,其中  $H_c$  为柱长。以模型 LC-2 为基准模型,模型 LC-1 减小柱高,模型 LC-3 减小工字形钢翼缘板尺寸,模型 LC-4 减小外侧翼板尺寸,模型 LC-5 减小波形板宽度,模型 LC-6 减小工字形钢腹板尺寸。各板件截面尺寸均满足 S3 级板件宽厚比限值<sup>[16]</sup>要求。采用正弦波形板,波形幅值取 20 mm,波形单周期波长取 150 mm<sup>[19]</sup>,钢材牌号均为 Q355 钢。

3 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 建立新型 L 形波形板钢异形柱有限元模型(图 2),工字形钢、波形板及外侧翼板等各部件均采用壳单元 S4R 模拟,各部件间采用 Tie 连接模拟焊接。柱两端铰接,约束柱端水平面内转动自由度;加载点位于柱顶端截面形心处。钢材本构采用理想弹塑性模型,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 355 MPa。

首先进行弹性屈曲分析,研究在轴压工况下的屈曲模态,再考虑初始缺陷,进行稳定极限承载力分析。采用一致缺陷模态法引入初始缺陷,即利用一阶模态施加模型的初始等效缺陷,最大缺陷值取  $H_c/500$ <sup>[20]</sup>。采用位移加载方式,加载位移幅值取柱高的 1%,即最大轴向应变  $\epsilon=1\%$ 。

表 1 模型参数

模型编号	$H_c/\text{mm}$	$B_L/\text{mm}$	$B_H/\text{mm}$	$b_{f1}/\text{mm}$	$t_{f1}/\text{mm}$	$b_w/\text{mm}$	$t_w/\text{mm}$	$b_{f2}/\text{mm}$	$t_{f2}/\text{mm}$	$\alpha_d/(\text{^\circ})$
LC-1	3 000	368.0	399	200	12	375	12	200	12	-21.3
LC-2	3 900	368.0	399	200	12	375	12	200	12	-21.3
LC-3	3 900	343.0	395	150	10	375	12	200	12	-29.9
LC-4	3 900	366.0	399	200	12	375	12	150	10	-14.5
LC-5	3 900	305.5	399	200	12	375	12	200	12	-12.4
LC-6	3 900	367.0	274	200	12	250	10	200	12	33.3

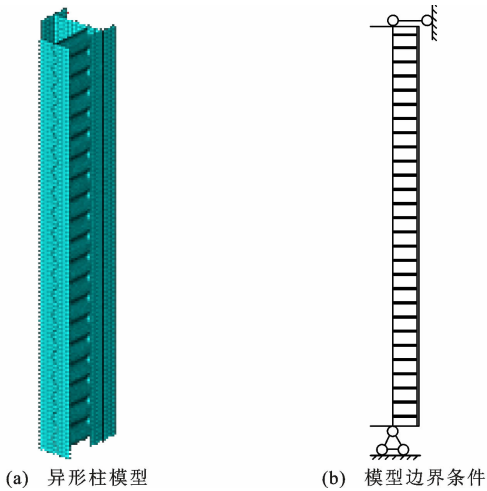


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

4 结果分析

4.1 特征值屈曲分析

各模型一阶模态如图 3 所示,均表现为弯扭屈曲。

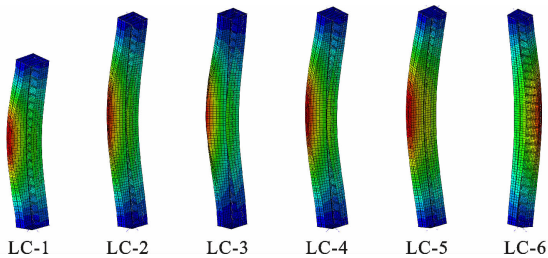


图 3 各模型一阶模态  
Fig. 3 First order mode of each model

模型 LC-1~LC-5 均发生绕  $x_1$  轴的弯扭屈曲,而模型 LC-6 发生绕  $y_1$  轴的弯扭屈曲。LC-6 相较基准模型 LC-2,工字形钢腹板尺寸减小,导致其绕形心主轴  $y_1$  轴的惯性矩减小,相应长细比增大,故发生绕  $y_1$  轴的弯扭屈曲。

为计算各模型的正则化长细比,提取各模型一阶临界屈曲荷载  $N_{cr}$ 、截面净面积  $A_n$  及全截面屈服荷载  $N_y$ ,求得正则化长细比  $\lambda_n$ ,如表 2 所示。各模型的全截面屈服荷载、正则化长细比的计算公式分

表 2 正则化长细比

Table 2 Normalized slenderness ratio

试件编号	$A_n/\text{mm}^2$	$N_{cr}/\text{kN}$	$N_y/\text{kN}$	$\lambda_n$
LC-1	12 060	19 538	4 281	0.47
LC-2	12 060	12 618	4 281	0.58
LC-3	10 260	8 853	3 642	0.64
LC-4	11 160	9 396	3 961	0.65
LC-5	12 060	9 385	4 281	0.68
LC-6	10 060	11 542	3 571	0.56

别如式(2)、(3)所示。

$$N_y = A_n f_y \tag{2}$$

$$\lambda_n = \sqrt{N_y / N_{cr}} \tag{3}$$

式中:  $f_y$  为钢材的屈服荷载。

4.2 破坏特征

为了评估新型钢异形柱受压承载性能,并了解其失稳行为和破坏机制,对 6 个模型进行弹塑性非线性分析,加载达到位移幅值时的应力云图如图 4 所示。

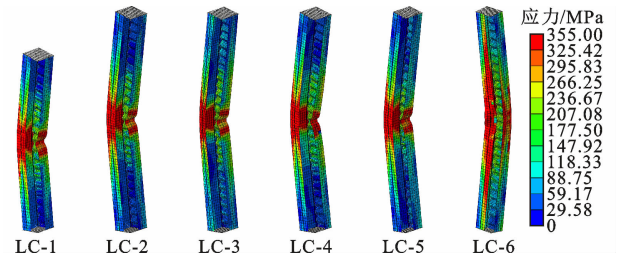


图 4  $\varepsilon=1\%$  时的应力云图

Fig. 4 Stress cloud diagram with  $\varepsilon=1\%$

由图 4 可知,模型 LC-1~LC-5 的破坏模式基本相同,随着轴压位移增大,异形柱的柱中轴压力逐渐增大,当轴压力增大到一定程度后外侧翼缘板首先发生屈服,进而导致柱发生整体弯扭失稳。模型 LC-6 由于工字形钢腹板尺寸减小,导致工字形钢的中部翼缘处先发生屈服。所有算例的破坏模式均与弹性屈曲分析的一阶模态相对应,均为弯扭失稳破坏模式。

模型 LC-1~LC-5 的受力过程基本相似,以 LC-2 为例,主要表现为:在加载初期,各板件并未发现明显变形,异形柱受到的轴压应力较小,处于弹性阶段;随着轴向压缩应变达到柱高的 0.15% 左右,异形柱达到极限荷载,同时荷载-位移曲线出现极值点,整体发生微小弯曲变形;随着压应变达到柱高的 0.25% 左右,柱的承载力呈下降趋势,外侧翼缘板的柱中处率先发生局部屈曲,工字形钢部件发生整体微小弯曲,如图 5(a) 所示;随着柱端位移的加载到  $\varepsilon=0.6\%$  左右,外侧翼缘板的变形范围逐渐扩大,周

边的波形板发生挤压变形,异形柱发生轻微的整体扭转,如图 5(b) 所示;加载结束时,柱中均出现明显的塑性变形集中现象,外侧翼缘板与波形板挤压变形严重,异形柱整体发生弯扭屈曲变形,其破坏形式见图 4。

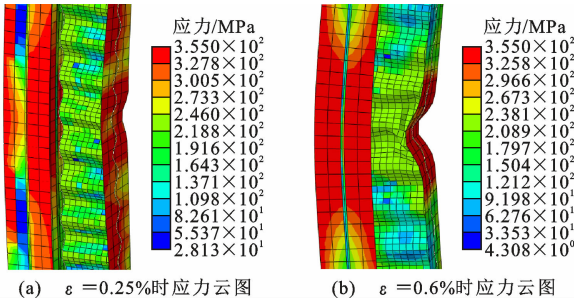


图 5 LC-2 加载应力云图

Fig. 5 Loading stress cloud diagram of LC-2

模型 LC-6 加载初期,各板件并未发现明显变形,异形柱受到的轴压应力较小,其处于弹性阶段;随着轴向压缩应变达到柱高的 0.15% 左右,异形柱达到极限荷载,同时荷载-位移曲线出现极值点,整体发生微小屈曲变形;随着压应变达到柱高的 0.25% 左右,柱的承载力呈下降趋势,远离波形板一侧的工字形钢翼缘柱中央处率先发生局部屈曲,外侧翼缘板也产生微小弯曲变形,如图 6(a) 所示;随着柱端位移的加载到  $\varepsilon=0.6\%$  左右,工字形钢翼缘变形范围逐渐扩大,并发生局部扭转现象,异形柱发生轻微整体扭转变形,如图 6(b) 所示;加载结束时,柱中工字形钢与外侧翼缘板出现明显的塑性变形现象,波形板整体状态良好,无明显塑性损伤,异形柱整体发生弯扭屈曲变形,其破坏形式见图 4。

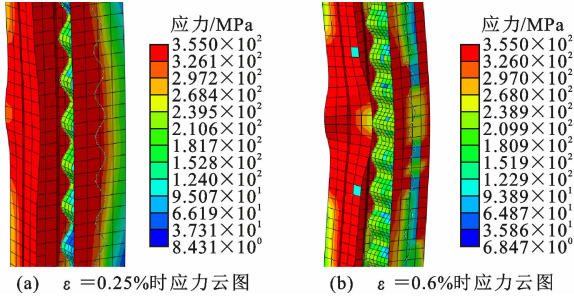


图 6 LC-6 加载应力云图

Fig. 6 Loading stress cloud diagram of LC-6

4.3 荷载-位移曲线

图 7 为模型 LC-1~LC-6 在位移加载点处的荷载-位移曲线。可以看出:LC-6 在加载初期,荷载-位移曲线基本呈线性变化,柱处于弹性阶段;随着荷载增加,曲线斜率略有降低,柱的刚度减小;达到极限荷载之后,相较于其他柱,LC-6 荷载-位移曲线的



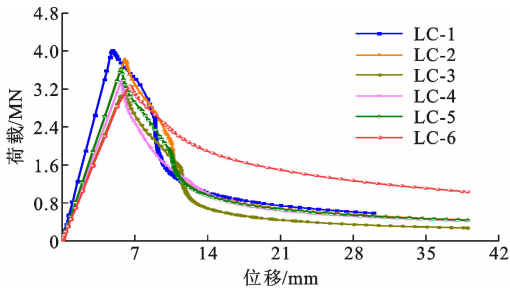


图 7 各模型荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of each specimen

下降速率较缓,加载结束时具有较高的剩余承载能力。本文提出的剩余承载能力为轴向压缩应变达到柱高 1%时的轴压荷载与其极限荷载的比值,比值越大,剩余承载能力越强,否则反之,剩余承载能力用  $\eta_0$  表示,后文不再赘述。模型 LC-1~LC-5 的荷载-位移曲线形状基本相似,加载初期呈线性上升,曲线峰值处出现尖锐形状,过峰值点后,承载力下降速率较模型 LC-6 更快,加载结束时的轴压荷载值较小,表明模型 LC-1~LC-5 的剩余承载能力较差。

4.4 关键性能指标

图 8 为各模型的稳定系数散点图,其中横坐标为正则化长细比  $\lambda_n$ ,纵坐标为轴压整体稳定系数  $\varphi_n$ 。 $\varphi_n$  计算公式如式(4)所示,其中  $N_u$  为异形柱轴压极限荷载。依据文献[16]在图 8 中补充绘制 a、b 两类截面柱构件稳定系数曲线。

$$\varphi_n = N_u / N_y \tag{4}$$

由图 8 可知,各模型稳定系数随着  $\lambda_n$  的增大呈

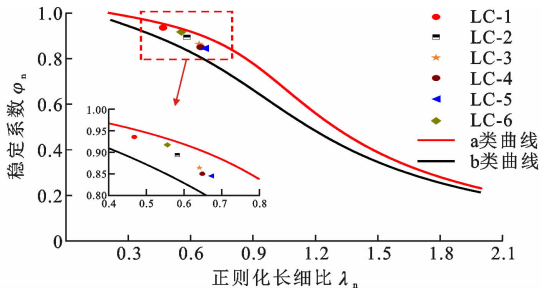


图 8 稳定系数散点图

Fig. 8 Scatter diagram of stability coefficients

现下降趋势。相对基准模型 LC-2,模型 LC-6 减小了工字形钢腹板面积,柱截面面积变小,但其稳定系数反而稍有提高。柱高对稳定系数的影响较为显著,柱越短,其长细比越小,稳定系数越高。模型 LC-1~LC-6 的稳定系数均在 a 类和 b 类曲线之间。

综合分析图 7 与图 8,提取各模型稳定系数、极限荷载、剩余荷载等关键性能指标,研究各参数尺寸变化率对受压性能的影响,结果如表 3 所示,表中  $N_r$  为剩余荷载,即加载结束时趋于平稳的轴压承载力, $\xi_\varphi$ 、 $\xi_u$ 、 $\xi_A$  分别为各模型的稳定系数  $\varphi_n$ 、极限荷载  $N_u$  及截面净面积  $A_n$  相对基准试件 LC-2 的变化率。

由表 3 可知,模型 LC-3 与 LC-6 面积相差不大,但 LC-6 的剩余承载力  $\eta_0$  约是 LC-3 的 3.5 倍,LC-6 的稳定系数  $\varphi_n$  较 LC-3 提升 5.8%,说明削弱工字形钢截面尺寸时,减小其翼缘尺寸相比减小腹板尺寸对异形柱稳定性的削弱程度更大。

表 3 主要参数变化率

Table 3 Changing rates of key parameters

模型编号	$\varphi_n$	$\xi_\varphi / \%$	$N_u / \text{kN}$	$\xi_u / \%$	$A_n / \text{mm}^2$	$\xi_A / \%$	$N_r / \text{kN}$	$\eta_0 / \%$
LC-1	0.94	5.6	4 005	4.7	12 060	0.0	589	14.7
LC-2	0.89	0.0	3 826	0.0	12 060	0.0	448	11.7
LC-3	0.86	-3.4	3 147	-17.7	10 260	-14.9	276	8.7
LC-4	0.85	-4.5	3 368	-12.0	11 160	-7.5	424	12.6
LC-5	0.85	-4.5	3 618	-5.4	12 060	0.0	438	12.1
LC-6	0.91	2.2	3 264	-14.6	10 060	-16.6	1 038	31.8

模型 LC-6 的剩余承载力较高,相较于其他柱,失稳破坏后荷载-位移曲线降低速率较缓。相较于模型 LC-2,模型 LC-6 的工字形钢腹板宽度减小,导致形心主轴  $y_1$  轴方向的惯性矩小于  $x_1$  轴的惯性矩,使得绕  $y_1$  轴方向的长细比增大,最终绕  $y_1$  轴发生弯扭失稳。该类失稳破坏模式相较绕  $x_1$  轴失稳破坏模式稳定性更强,剩余承载力更高。

为研究各设计参数对异形柱轴压性能的影响程度,以 LC-2 为基准,将 LC-3、LC-4、LC-6 的截面净

面积变化率  $\xi_A$  进行归一化处理,即将各模型的  $\xi_A$  单位化,求各模型单位用钢量变化率  $\mu_A$ 、单位用钢量变化所对应的极限荷载变化率  $\mu_u$  和稳定系数变化率  $\mu_\varphi$ ,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,模型 LC-4 与模型 LC-3、LC-6 相比,在减小同等用钢量前提下,外侧翼板的宽度对柱的承载能力和稳定系数影响比工字形钢翼缘宽度、工字形钢腹板的宽度变化更为显著。减小工字形钢腹板的面积时,柱的极限承载力虽会有所降低,但稳

表 4 主要参数归一化结果

Table 4 Normalization results of key parameters

模型编号	$\mu_{\varphi}/\%$	$\mu_u/\%$	$\mu_N/\%$
LC-3	-0.23	-1.19	-1
LC-4	-0.60	-1.60	-1
LC-6	0.13	-0.88	-1

定系数稍有提高;而当工字形钢外侧翼板的面积减小时,不仅柱的极限荷载会降低,其稳定系数也会随之减小。

5 结 语

(1)当工字形钢的腹板、翼缘以及外侧翼板的宽厚比均满足规范宽厚比限值时,能避免板件发生局部失稳,L 形波形板钢异形柱在轴压荷载下发生弯扭失稳。

(2)L 形波形板钢异形柱发生轴压失稳时,各试件稳定系数均在 b 类柱子曲线之上。

(3)设计 L 形波形板钢异形柱时,为提高其稳定性,建议适当减小工字形钢腹板宽度,增加工字形钢翼缘、外侧翼板宽度和厚度及波形板宽度。在减小同等用钢量前提下,外侧翼板的面积变化对柱的承载能力、稳定性能的影响比工字形钢翼缘、工字形钢腹板的面积变化更为显著。因此,在截面优化设计时,可以优先考虑调整外侧翼板尺寸。

参考文献:

References:

[ 1 ] 张爱林. 工业化装配式高层钢结构体系创新、标准规范编制及产业化关键问题[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 1-6, 38.  
ZHANG Ailin. The key issues of system innovation, drawing up standard and industrialization for modularized prefabricated high-rise steel structures[J]. Industrial Construction, 2014, 44(8): 1-6, 38.

[ 2 ] 郝际平,孙晓岭,薛 强,等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 1-13.  
HAO Jiping, SUN Xiaoling, XUE Qiang, et al. Research and applications of prefabricated steel structure building systems[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 1-13.

[ 3 ] SELVARAJ S, CHAN T M. Recommendations for implementing circular economy in construction; direct reuse of steel structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 214: 108439.

[ 4 ] 周绪红,王宇航. 我国钢结构住宅产业化发展的现状、问题与对策[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 1-7.

ZHOU Xuhong, WANG Yuhang. Status, problems and countermeasures of industrialization development of steel structural residence in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 1-7.

[ 5 ] 张紫千,施 刚,王 喆,等. 钢结构异形截面柱受压性能研究进展[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 16 届(ISSF-2018)学术交流会暨教学研讨会论文集. 青岛: 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会, 2018: 198-209.  
ZHANG Ziqian, SHI Gang, WANG Zhe, et al. Research progress on performance of steel special-shaped column under compression[C]//Institute of Structural Stability and Fatigue, China Steel Construction Society. Proceedings of the 16th Structural Stability and Fatigue Branch of the China Steel Structure Association (ISSF-2018) Academic Exchange Conference and Teaching Seminar. Qingdao: Institute of Structural Stability and Fatigue, China Steel Construction Society, 2018: 198-209.

[ 6 ] 王明贵,张莉若,谭世友. 钢异形柱弯扭相关屈曲研究[J]. 钢结构, 2006, 21(4): 35-37.  
WANG Minggui, ZHANG Liruo, TAN Shiyu. Research on the torsional-flexural interactive buckling of steel abnormity-section columns[J]. Steel Construction, 2006, 21(4): 35-37.

[ 7 ] 王明贵,王晓瑜,陈章华. 钢异形柱轴心受压承载力实用计算研究[J]. 钢结构, 2007, 22(6): 44-47.  
WANG Minggui, WANG Xiaoyu, CHEN Zhanghua. Research on the applied calculation method for steel abnormity-section columns under axial pressure[J]. Steel Construction, 2007, 22(6): 44-47.

[ 8 ] 张爱林,于 劲,徐 敏,等. 低周反复荷载作用下十字形截面钢异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 11-19.  
ZHANG Ailin, YU Jin, XU Min, et al. Experimental research on steel specially shaped columns with cruciform section under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 11-19.

[ 9 ] 张爱林,于 劲,徐 敏,等. 低周反复荷载作用下 T 形截面钢异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 20-28.  
ZHANG Ailin, YU Jin, XU Min, et al. Experimental research on steel specially shaped columns with T-section under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 20-28.

[10] 于 劲. 钢异形柱结构体系抗震性能的理论分析与试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.

- YU Jin. Theoretical and experimental research on seismic behavior of steel structure system with specially shaped columns[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [11] 王 萌, 樊 江, 焦 义. 钢异形柱 L 形截面的受力分析与改进方案[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(10): 2482-2486.
- WANG Meng, FAN Jiang, JIAO Yi. The mechanical behavior analysis and improvement scheme of L shaped steel columns[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(10): 2482-2486.
- [12] BEHZADI-SOFIANI B, GARDNER L, WADEE M A. Behaviour, finite element modelling and design of cruciform section steel columns[J]. Thin-walled Structures, 2023, 182: 110124.
- [13] CHEN G, TRAHAIR N S. Inelastic torsional buckling strengths of cruciform columns[J]. Engineering Structures, 1994, 16(2): 83-90.
- [14] ZHANG J H, YOUNG B. Compression tests of cold-formed steel I-shaped open sections with edge and web stiffeners[J]. Thin-walled Structures, 2012, 52: 1-11.
- [15] ZHANG J H, YOUNG B. Numerical investigation and design of cold-formed steel built-up open section columns with longitudinal stiffeners[J]. Thin-walled Structures, 2015, 89: 178-191.
- [16] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [17] NASSIRNIA M, HEIDARPOUR A, ZHAO X L, et al. Innovative hollow columns comprising corrugated plates and ultra high-strength steel tubes[J]. Thin-walled Structures, 2016, 101: 14-25.
- [18] 郭彦林, 童精中, 姜子钦. 波形腹板钢结构设计原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- GUO Yanlin, TONG Jingzhong, JIANG Ziqin. Design fundamentals and application of corrugated-web steel structures[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 波形钢板结构技术规程: T/CECS 290—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- Technical specification for steel corrugated-plate structures: T/CECS 290—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022.
- [20] 郭彦林, 张庆林, 王小安. 波浪腹板工形构件抗剪承载力设计理论及试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 45-52.
- GUO Yanlin, ZHANG Qinglin, WANG Xiaolan. A theoretical and experimental study of the shear strength of H-shaped members with sinusoidal corrugated webs[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 45-52.