

# General Study on Mechanical Properties of Steel Columns Subjected to Compressive Buckling

Hongxian Li, Dianzhong Liu

College of Civil Engineering, Jilin University of Architecture, Changchun Jilin  
Email: 2062903454@qq.com

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2019; published: Dec. 9<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The buckling analysis of axial compression members in steel frame structure system is carried out. Taking steel column as an example, finite element modeling of ABAQUS is carried out, and the form of mechanical buckling model under different eigenvalues is obtained and theoretical knowledge is used. To investigate the instability buckling mechanism of steel column axial compression members, mainly from the two aspects of overall stability and local stability, theoretical calculations and analysis, also briefly introduce the axial compression members. The theory of strength and stiffness calculation, in which the overall stability problem is studied, is the stability study of three buckling modes of bending buckling, torsional buckling and bending-torsional buckling. The local instability is mainly studied by the local stability of the solid abdominal compression column and sexual correlation calculation theory.

## Keywords

Axial Compression Member, ABAQUS Finite Element, Steel Column, Overall Stability, Local Stability, Bending Buckling, Torsional Buckling, Bending-Torsional Buckling

---

# 钢柱受压失稳屈曲的力学性能一般研究

李红现, 刘殿忠

吉林建筑大学土木工程学院, 吉林 长春  
Email: 2062903454@qq.com

收稿日期: 2019年11月6日; 录用日期: 2019年12月2日; 发布日期: 2019年12月9日

---

## 摘 要

对钢框架结构体系中的轴心受压构件进行失稳屈曲分析, 以钢柱为例, 进行ABAQUS有限元建模, 并得

出在不同特征值下的力学屈曲模型形式, 并用理论知识来探究钢柱轴心受压构件的失稳屈曲机理, 主要是从整体稳定性以及局部稳定性两个大的方面进行理论计算阐述分析, 同样也简单的介绍了一下轴心受压构件的强度、刚度计算理论, 其中整体稳定性问题研究主要是弯曲屈曲、扭转屈曲、弯扭屈曲三个屈曲形式的稳定性研究, 局部失稳主要研究的是实腹式轴心受压柱的局部稳定性相关计算理论。

## 关键词

轴心受压构件, ABAQUS有限元, 钢柱, 整体稳定性, 局部稳定性, 弯曲屈曲, 扭转屈曲, 弯扭屈曲

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

在钢结构建筑当中, 梁、板、柱构件是其主要承重构件, 其结构支撑体系也主要由梁柱构件组成, 其中钢梁构件主要起抗弯作用, 钢柱主要起承压作用。众所周知, 钢框架结构体系的抗震性能相比钢筋混凝土结构比较优越, 自重也比较轻, 施工速度快, 装配式比例较高, 可以提前在工厂进行制造和拼接组装[1]。但是钢结构建筑自身也存在一些不足, 例如, 钢结构自身耐高温性能好, 但是耐火性能比较差、耐腐蚀性能比较差, 后期维护成本比较高[1]。另一方面, 因为钢结构自身的特点, 特别适合用于建造大跨度建筑及桥梁, 例如大跨度工业厂房建筑。但是在外荷载或者地震作用下, 钢结构自身容易发生失稳屈曲破坏, 这一破坏形式在钢结构建筑当中表现的比较明显[2]。造成这一现象的原因除了结构体系自身的承载力不足、强度和刚度不够之外, 还有钢结构自身容易发生失稳的原因, 而其中非常重要的一个原因就是钢柱在轴向压力或者偏心压力作用下发生失稳所造成的, 所以在钢结构抗震规范中规定, 钢结构建筑的抗震设计要遵循“强柱弱梁、强剪弱弯”的原则进行设计, 所以有必要研究钢柱失稳的问题[2]。

## 2. 有限元分析模型

### 有限元建模设计

利用 ABAQUS 软件分析在不同特征值下的钢柱变形情况, 钢柱高度为 4.2 m, 钢柱的材料特性: 弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 泊松比系数  $\mu = 0.3$ , 屈服强度  $f_y = 3.45 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 构架所用钢材为热轧工字钢, 截面尺寸如图 1 所示[3]。

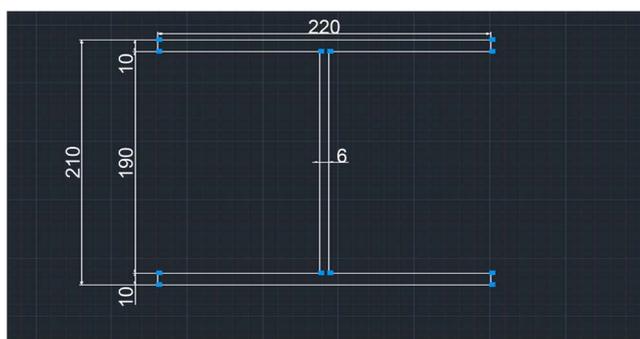


Figure 1. Schematic diagram of the cross-section dimensions of the I-shaped steel column

图 1. 工字形钢柱截面尺寸示意图

计算模型采用壳体、均质单元进行建模, 建模完成结果如图 2 所示为工字形截面的钢柱[3], 然后对其柱端两端施加荷载, 在对其两端进行施加铰接约束, 由变形图图 3, 应力云图图 4, 所示可知, 钢柱靠近跨中处截面位置弯曲变形位移最大, 应力应变也最为集中, 在不同的位移变形约束条件控制下, 结果基本相同如图 5 所示, 具体来看在二层及以上钢柱, 柱高最大弯曲变形位移发生在距离下端柱高处  $1/2 H$  左右范围内, 底层柱发生在距离下端柱高  $(1/2 \sim 2/3) H$  左右范围内, 这与理论研究的结果相符合[4]。

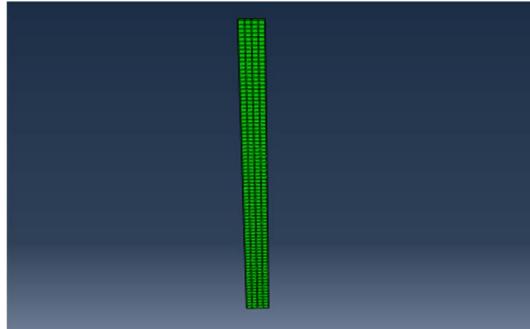


Figure 2. Steel column finite element modeling model diagram  
图 2. 钢柱有限元建模模型图

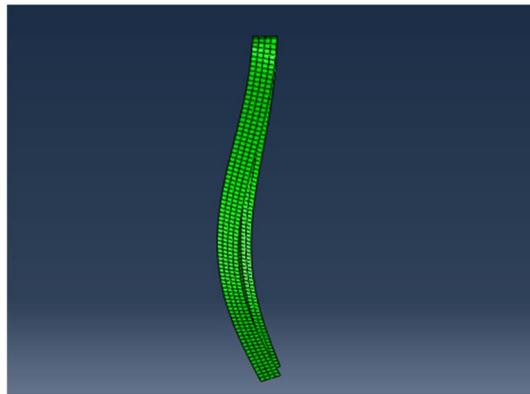


Figure 3. Finite element model after deformation of steel column  
图 3. 钢柱变形后的有限元模型

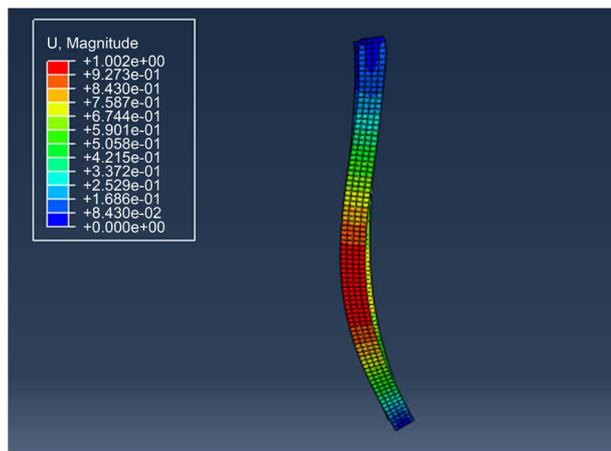
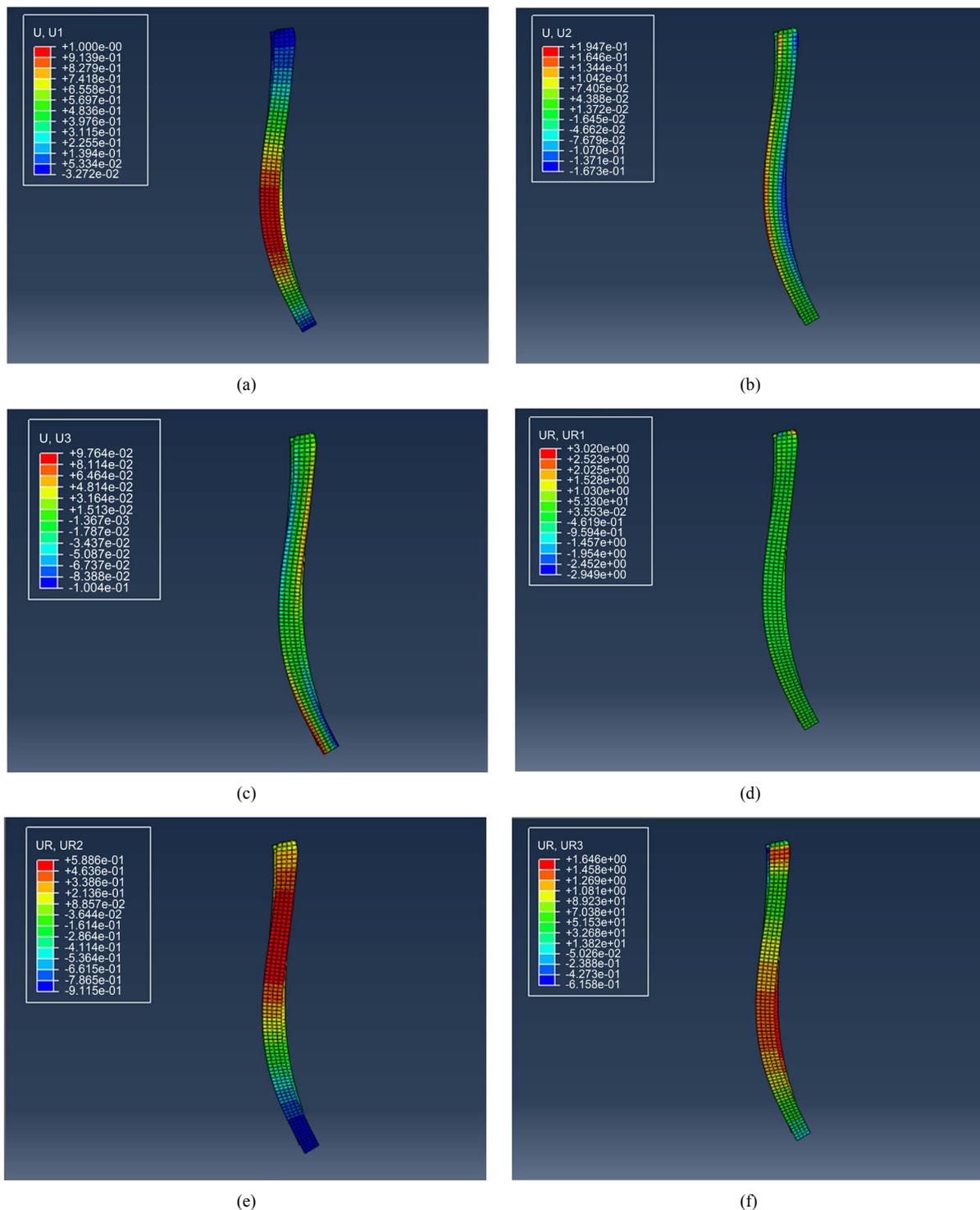


Figure 4. Stress cloud after deformation of steel column  
图 4. 钢柱变形后的应力云图



**Figure 5.** Deformation stress cloud diagram of model X, Y, Z, three directions. (a) Deformed stress cloud under the control of U1 variable; (b) Deformed stress cloud diagram under U2 variable control; (c) Deformed stress cloud diagram under U3 variable control; (d) Deformed stress cloud under UR1 variable control; (e) Deformed stress cloud under UR2 variable control; (f) Deformed stress cloud map under UR3 variable control

**图 5.** 模型 X、Y、Z、三个方向的变形应力云图。(a) U1 变量控制下的变形后的应力云图; (b) U2 变量控制下的变形后的应力云图; (c) U3 变量控制下的变形后的应力云图; (d) UR1 变量控制下的变形后的应力云图; (e) UR2 变量控制下的变形后的应力云图; (f) UR3 变量控制下的变形后的应力云图

由图 2, 图 3, 图 4, 图 5 所示可以得出, 在有限元模拟分析初期阶段, 构件整体受压, 这是因为此时构件的挠度小, 附加弯矩小, 此时的工字形截面处于全截面受压状态, 但是随着轴向压力的增大, 其挠度也在不断加大, 附加弯矩也在增大。此时弯矩产生的拉应力已经超过了轴向压力作用下产生的应力值, 构件已经接近于失稳破坏状态, 直到最后受压区先屈服, 构件发生失稳破坏, 在不同的边界以及荷载约束条件下均是发生如此的变化。

### 3. 工字形截面钢柱失稳屈曲分析理论阐述

#### 3.1. 轴心受压构件的强度及刚度简单介绍

钢结构框架中的钢柱属于轴心受压构件, 所以针对于钢柱的稳定性计算及失稳屈曲分析可以采用轴心受压构件的相关稳定性理论公式来进行计算与分析[5]。在介绍稳定性分析之前, 先简单的介绍一下轴心受压构件的强度及刚度计算理论, 首先是轴心受压构件的强度计算:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq f$$

式中:  $N$ —轴心压力设计值;

$A_n$ —构件的净截面面积;

$f$ —钢材的抗压强度设计值;

其次是轴心受压构件的刚度计算:

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \leq [\lambda]$$

式中:  $\lambda$ —构件的最大长细比;

$l_0$ —构件的计算长度;

$i$ —截面的回转半径;

$[\lambda]$ —构件的允许长细比由表 1 可查。

**Table 1.** Allowable slenderness ratio of steel structure compression members

**表 1.** 钢结构受压构件的允许长细比

序号	构件名称	容许长细比
1	柱、桁架和天窗架结构 柱的缀条、吊车梁或吊车桁架以下的柱间支撑	150
2	支撑(吊车梁或吊车桁架以下的柱间支撑除外) 用以减少受压构件长细比的杆件	200

#### 3.2. 轴心受压构件的整体稳定性理论计算

##### 3.2.1. 理想轴心受压构件的失稳屈曲形式

主要分为三种一种是弯曲屈曲, 另一种是扭转屈曲, 还有一种是弯扭组合屈曲形式[6]。首先介绍一下理想轴心受压构件的弯曲屈曲变形形式, 其实早在几百年前, 欧拉(Euler)就已经对轴心受压构件的整体稳定性问题进行了研究, 并提出了著名的欧拉 - 临界力, 以及欧拉 - 临界应力公式。

首先是欧拉 - 临界力计算表达式:

$$N_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{l}{i}, i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

式中:  $N_E$ —欧拉临界力;  
 $E$ —材料的弹性模量;  
 $A$ —压杆的截面面积;  
 $\lambda$ —压杆的长细比;  
 $i$ —截面的回转半径;  
 $I$ —截面的惯性矩。

按照切线模量理论:  $N_t = \frac{\pi^2 E_t A}{\lambda^2}$ 。

按照折算模量计算理论:  $N_r = \frac{\pi^2 (EI_1 + E_t I_2)}{l^2}$ 。

### 3.2.2. 实际轴心受压构件的弹性微分方程及弯曲屈曲计算理论

在实际中, 钢结构轴心受压构件一般都是开口薄壁杆件, 根据薄壁开口杆件的计算理论, 具有初始缺陷的轴心受压构件的弹性微分方程为:

$$EI_x (v^{IV} - v_0^{IV}) + Nv'' - Nx_0 \theta'' = 0$$

$$EI_y (u^{IV} - u_0^{IV}) + Nu'' + Ny_0 \theta'' = 0$$

$$EI_w (\theta^{IV} - \theta_0^{IV}) - GI_t (\theta'' - \theta_0'') - Nxv'' + Ny_0 u'' + r_0^2 N\theta'' - \bar{R}\theta'' = 0$$

式中:  $N$ —轴心压力设计值;

$I_x, I_y$ —一对主轴  $X$  和  $Y$  的惯性矩;

$I_w$ —扇性惯性矩;

$I_t$ —截面的抗扭系数;

$u, v, \theta$ —构件剪力中心的三个位移分量, 即在  $x, y$  两个方向的位移和绕  $z$  轴的转动角;

$u_0, v_0, \theta_0$ —构件剪力中心轴的三个初始位移分量, 即考虑初弯曲和初扭曲等初始缺陷;

$x_0, y_0$ —剪力中心的坐标;

$$r_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + x_0^2 + y_0^2$$

$$\bar{R} = \int_A \sigma_r (x^2 + y^2) dA$$

$\sigma_r$ —截面上的残余应力, 以拉应力为正。

双轴对称截面下的剪力中心与形心重合, 代入可得以下公式:

$$EI_x (v^{IV} - v_0^{IV}) + Nv'' = 0$$

$$EI_y (u^{IV} - u_0^{IV}) + Nu'' = 0$$

$$EI_w (\theta^{IV} - \theta_0^{IV}) - GI_t (\theta'' - \theta_0'') + r_0^2 N\theta'' - \bar{R}\theta'' = 0$$

要受到一些条件的的影响和制约, 例如, 柱子自身缺陷对轴心受压构件承载力的影响[6]。钢柱如果因为自身原因而产生缺陷, 那么它与理想轴心受压构件不同的是, 当外荷载作用在钢柱截面时, 发生的弯曲屈曲

形式是属于偏心受压, 显然偏心受压下的临界力要比轴心受压的临界力要低[6]。实际轴心受压构件的计算还要考虑到由于钢柱自身缺陷而引起的承载力不足以及残余应力的影响, 理论分析按如下公式进行计算。

$$\text{临界力计算公式: } N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} m;$$

$$\text{临界应力计算公式: } \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} m, \text{ 式中 } m = \frac{I_e}{I};$$

对于弱轴(y-y)屈曲时:

$$m = \frac{I_e}{I} = \frac{\frac{2t(kb)^3}{12}}{\frac{2tb^3}{12}} = k^3, \quad \sigma_{cr}^y = \frac{\pi^2 E}{\lambda_y^2} k^3;$$

对于强轴(x-x)屈曲时:

$$m = \frac{\frac{2tkbh^2}{4}}{\frac{2tbh^2}{4}} = k, \quad \sigma_{cr}^x = \frac{\pi^2 E}{\lambda_x^2} k;$$

轴心受压构件弯曲屈曲的整体稳定性计算: 轴心受压构件的所受最大应力不应超过整体稳定的临界应力允许值, 而且还要考虑分项系数  $\gamma_R$ , 公式如下所示:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \frac{\sigma_{cr}}{\gamma_R} = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} \frac{f_y}{\gamma_R} = \varphi f;$$

其中轴心受压柱应按下式计算整体稳定性:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi f} \leq f;$$

式中:  $N$ —轴心受压构件的压力设计值;

$A$ —构件的毛截面面积;

$\varphi$ —轴心受压构件的稳定性系数;

$f$ —钢材的抗压强度设计值。

### 3.2.3. 轴心受压构件的扭转屈曲和弯扭屈曲

前面所介绍的屈曲形态均只涉及到弯曲屈曲, 但是在特殊情况下, 轴心受压构件也可以表现为扭转屈曲与弯扭屈曲, 当截面的形心和剪切中心相重合的时候, 弯曲屈曲和扭转屈曲并不会发生耦合现象, 对于单轴对称下的轴心受压构件, 在绕非对称主轴失稳屈曲时不会出现弯扭组合屈曲形式, 但当其绕对称轴主轴失稳时会呈现弯扭屈曲形式破坏; 但是本次有限元模拟所采用的是双轴对称下的工字形截面轴向受压钢柱, 当其绕对称轴主轴失稳时也不会呈现弯扭屈曲形式破坏, 所以对于工字形截面轴心受压钢柱的弯扭屈曲就不做进一步理论计算分析与介绍, 只介绍与扭转屈曲破坏形式相关的理论计算。根据弹性稳定理论[6], 对于两端铰支的无翘曲现象发生的没有约束的构件其临界力按下式计算:

$$N_z = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l^2} \right)$$

式中:  $G$ —材料的切变模量;

$i_0$ —截面关于剪心的极回转半径;

$I_w$ —翘曲常数或扇性截面二次矩, 对于双轴对称工字形截面  $I_w = \frac{I_y h^2}{4}$ ;

$I_t$ —扭转常数或者扭转截面二次矩;

对于薄壁组合开口截面, 近似按下列公式进行计算:  $I_t = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n b_i t_i^3$ ;

对于热轧型工字钢截面扭转常数为:  $I_t = \frac{1}{3} k \sum_{i=1}^n b_i t_i^3$ ;

对于薄板组成的闭合箱型截面梁的扭转常数为:  $I_t = \frac{4A^2}{\oint \frac{ds}{t}}$ ;

式中:  $b_i$ —第  $i$  个板件的宽度;

$t_i$ —第  $i$  个板件的厚度;

$k$ —与截面形状有关的常数;

$A$ —闭合截面的板件中所围成的面积;

$\oint \frac{ds}{t}$ —沿壁板中线一周的积分。

工字形截面属于双轴对称截面, 因此工字形截面轴心受压柱只可能发生弯曲失稳或者扭转失稳。对于常见的非薄壁工字形截面, 其截面的抗扭刚度和翘曲刚度都非常大, 因此一般来说也不会发生扭转失稳。当构件未设置沿截面强轴的支撑时, 其绕强轴的惯性矩大于绕弱轴的惯性矩, 以此构件将会绕弱轴方向发生弯曲失稳屈曲破坏。

### 3.3. 实腹式工字形截面轴心受压构件的局部稳定性理论计算

#### 实腹式轴心受压柱的局部稳定性计算

首先进行轴心受压柱的截面设计, 根据下列公式进行设计截面尺寸:

$$A = \frac{N}{\varphi f}, \quad i_x = \frac{l_{0x}}{\lambda}, \quad i_y = \frac{l_{0y}}{\lambda};$$

接下来要验算构件是否需要局部稳定性计算, 利用公式:

$$\lambda_x = \frac{l_{0x}}{i_x} < [\lambda_x], \quad \lambda_y = \frac{l_{0y}}{i_y} < [\lambda_y];$$

如果符合只需要进行整体稳定性验算和刚度验算[6], 如果不满足上述要求则需要按下式验算局部稳定性。

对于轴心受压构件的翼缘来说, 其验算局部稳定性公式为:

$$\frac{b_1}{t} \leq (10 + 0.1\lambda) \sqrt{\frac{235}{f_y}};$$

对于轴心受压构件的腹板来说, 其验算局部稳定性公式为:

$$\frac{h_0}{t_w} \leq (25 + 0.5\lambda) \sqrt{\frac{235}{f_y}};$$

式中  $\lambda$ —为构件两个方向长细比的较大值, 当  $\lambda < 30$  时, 取  $\lambda = 30$ , 当  $\lambda \geq 100$  时, 取  $\lambda = 100$ 。

满足以上两个条件即轴心受压柱的局部稳定性验算满足要求[6]。

## 4. 结论

通过上述对工字形截面的轴心受压钢柱的稳定性屈曲分析研究, 可以得出对于轴心受压构件的稳定性应该考虑的因素以及应该所采取的防失稳措施, 我们在验算稳定性的时候, 既要考虑轴心受压构件的整体屈曲破坏, 还要考虑构件的局部屈曲破坏。一方面, 整体失稳破坏是轴心受压钢构件的主要失稳破坏形式, 当所加的外荷载或者轴向压力超过构件自身的临界力之后就会发生整体失稳破坏; 所以另一方面, 我们要通过增大轴心受压构件自身的临界力来提高轴心受压钢构件的整体稳定能力, 具体方法可以通过控制构件的长细比在合理范围以及提高构件自身的抗弯刚度、抗弯截面惯性矩来提高整体稳定性。然后从防止局部屈曲破坏的角度采取一些措施防止轴心受压钢柱的局部屈曲破坏, 例如可以控制工字形截面钢柱构件翼缘和腹板的宽厚比或者高厚比在其规范规定的允许范围之内来防止轴心受压钢柱的局部屈曲破坏。

## 参考文献

- [1] 牛秀艳, 刘伟. 钢结构基本原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2018: 31-56.
- [2] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一. 钢结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 78-113.
- [3] 王玉镯, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 85-93.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计规范 GB50017-2017 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [5] 曹平周, 朱召全. 钢结构[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 94-113.
- [6] 赵根田, 孙德发. 钢结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 68-90.