

钢结构基本原理

Basic principles of steel structures

赵宪忠

x.zhao@tongji.edu.cn



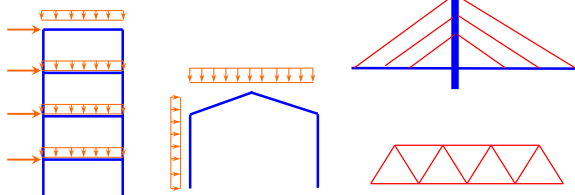
压弯构件 主要内容

- ◇ 概述
- ◇ 压弯构件的截面强度
- ◇ 压弯构件的整体稳定
- ◇ 压弯构件的局部稳定
- ◇ 压弯构件的刚度

压弯构件 概述

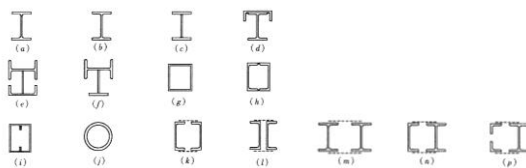
实际结构中的压弯构件

- 刚架中的柱子
- 斜梁
- 斜拉桥中的纵梁
- 桁架中的杆件



压弯构件 概述

截面类型



截面选择

受力状态	截面类型与选择
- 轴压为主, 弯矩为辅	双轴对称, 两主轴长细比接近 ($\lambda_x \approx \lambda_y$)
- 单向弯矩为主	双轴对称或单轴对称
- 双向压弯	

压弯构件 失效模式

截面强度破坏

钢材屈服, 钢材断裂(?), 连接破坏

构件整体失稳破坏

两种模式: 弯曲平面内与弯曲平面外的杆件整体失稳

板件局部失稳破坏

构件中板件的局部失稳

构件刚度不足

变形不满足要求或丧失刚度

压弯构件的截面强度 屈服破坏模式

截面强度: 主要以正应力状态控制破坏

— 受压边缘屈服

$$\frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_{x1}} \leq f_y$$

— 受拉边缘屈服

$$\left| \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_{x2}} \right| \leq f_y$$

— 截面极限强度

$$A \left(\frac{N}{N_p} + n \right)^\alpha + B \left(\frac{M_x}{M_{px}} + m \right)^\beta = 1$$

压弯构件的截面强度 截面强度的工程计算

☑ 弹性准则

$$\left| \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{W_{xn}} \pm \frac{M_y}{W_{yn}} \right| \leq f_d$$

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{W_{xn}} \pm \frac{M_y}{W_{yn}} \leq f_d$$

☑ 截面部分塑性准则

$$\left| \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{xn}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{yn}} \right| \leq f_d$$

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{xn}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{yn}} \leq f_d$$

☑ 全截面塑性准则(工字形绕强轴弯曲)

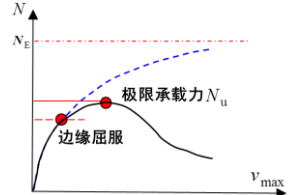
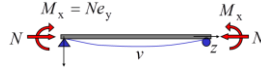
若 $\frac{N}{A_n f_d} \leq 0.13$ $M_x \leq W_{pnx} f_d$

Equ.(4.18), pp85

若 $\frac{N}{A_n f_d} > 0.13$ $M_x \leq 1.15(1 - \frac{N}{A_n f_d}) W_{pnx} f_d$

压弯构件的整体稳定

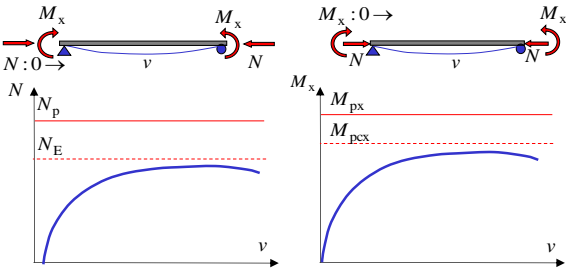
☑ 单向压弯构件的平面内失稳



- 边缘屈服后材料塑性发展
- 荷载效应(弯矩)增长的非线性: 二阶效应
- 弯矩效应增长和截面抗力增长的不平衡导致必须降低荷载(压力)才能保持弯曲平衡

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

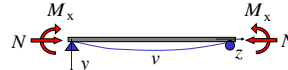
☑ 平面内整体失稳现象



受弯构件是否存在平面内失稳? 为何压弯构件会在平面内失稳?

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 压弯构件考虑轴压力作用的弹性弯曲平衡方程



对任意截面绕x轴的
弯曲平衡

$$EI_x v'' = -(M_x + Nv)$$

$$EI_x v'' + Nv + M_x = 0$$

对比仅有弯矩作用时
弯曲平面内平衡方程

$$EI_x v'' + M_x = 0$$

若 $M_x = Ne_y$

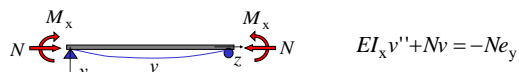
称为偏压受压问题

在图示坐标系和支座约束下
任意截面的平衡方程

$$EI_x v'' + Nv = -Ne_y$$

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 偏压受压问题的弹性解



$$EI_x v'' + Nv = -Ne_y$$

设 $\alpha = \sqrt{N/EI_x}$, 则有解

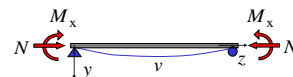
$$v = \frac{e_y}{\cos(\alpha l/2)} [\cos(\alpha l/2 - \alpha z) - \cos(\alpha l/2)]$$

$$v'' = -\frac{e_y \alpha^2}{\cos(\alpha l/2)} \cos(\alpha l/2 - \alpha z)$$

上述解满足边界条件: $v_0 = v_l = 0$ $v_0'' = v_l'' = -\frac{M_x}{EI_x}$

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 偏压受压问题的弹性曲线

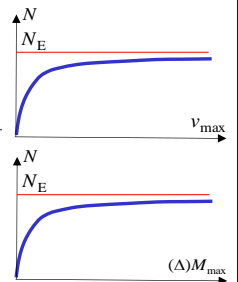


$$v = \frac{e_y}{\cos(\alpha l/2)} [\cos(\alpha l/2 - \alpha z) - \cos(\alpha l/2)]$$

$$v_{\max} = e_y \left[\frac{1}{\cos(\alpha l/2)} - 1 \right] \quad v_{\max}' = \frac{e_y \alpha^2}{\cos(\alpha l/2)}$$

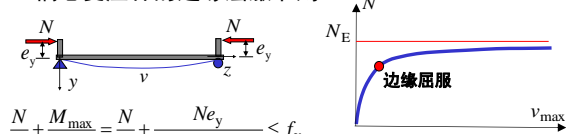
$$M_{\max} = \frac{Ne_y}{\cos(\alpha l/2)} = \frac{M_x}{\cos(\alpha l/2)}$$

$$N \Rightarrow N_E = \frac{\pi^2 EI_x}{\ell^2}, \quad \cos \frac{\alpha \ell}{2} \Rightarrow \cos \frac{\pi}{2} = 0$$



压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 偏心受压杆的边缘屈服准则



$$\frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{N}{A} + \frac{Ne_y}{W_x \cos(\alpha l/2)} \leq f_y$$

$$\frac{N}{A} \left[1 + \frac{Ae_y}{W_x} \sec(\alpha l/2) \right] \leq f_y$$

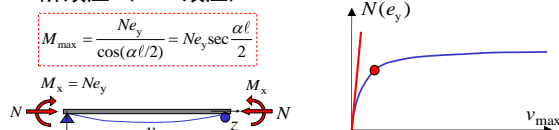
$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \frac{f_y}{1 + \varepsilon_{0y} \sec(\alpha l/2)}$$

其中, $\varepsilon_{0y} = \frac{Ae_y}{W_x}$

边缘屈服之前荷载-变形曲线不是直线, 是否正确?

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 二阶效应 (P-Δ效应)



$$M_{\max} = \frac{Ne_y}{\cos(\alpha l/2)} = Ne_y \sec \frac{\alpha l}{2}$$

1阶弯矩 $M_1 = Ne_y$

2阶弯矩 $M_2 = Ne_y (\sec \frac{\alpha l}{2} - 1)$

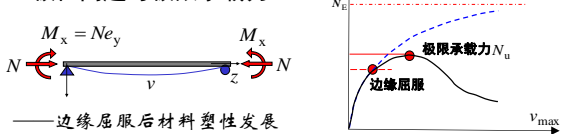
弹性阶段反映2阶效应的放大因子(弯矩放大系数): $\sec \frac{\alpha l}{2}$

边缘屈服之前压弯构件荷载-变形曲线的非线性(2阶效应)

压弯构件之平面内稳定的边缘屈服准则是考虑了二阶效应之后的强度问题, 其与构件整体变形有关而不仅是截面问题

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 极值问题与极限承载力



— 边缘屈服后材料塑性发展

— 荷载效应(弯矩)增长的非线性

— 弯矩效应增长和截面抗力增长的不平衡导致必须降低荷载(压力)才能保持弯曲平衡

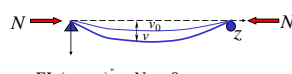
— 压弯构件的极值问题与极限承载力

压弯杆件平面内失稳表现为荷载-变形曲线的极值现象, 源于压力与平面内弯曲变形产生的2阶效应, 压弯杆件平面内失稳不同于截面的强度问题

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 按边缘屈服准则确定平面内稳定承载力设计公式

■ 回顾: 有初变形的压弯杆件 (有初弯曲的轴心受压构件)



$$EI_x(v - v_0)'' + Nv = 0$$

$$v_0 = v_{0m} \sin(\pi z / \ell)$$

$$v = \frac{v_{0m}}{1 - N/N_{Ex}} \sin(\frac{\pi z}{\ell})$$

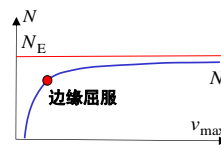
2阶效应放大因子(挠度放大系数)

$$\frac{1}{1 - N/N_{Ex}}$$

$$M_{\max} = \frac{Nv_{0m}}{1 - N/N_{Ex}}$$

边缘屈服准则

$$\frac{N}{A} + \frac{Nv_{0m}}{W_x(1 - N/N_{Ex})} \leq f_y$$



压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 按边缘屈服准则确定平面内稳定承载力设计公式

■ 回顾: 压弯构件挠度及弯矩放大系数

$$v_{\max} = e_y \left[\frac{1}{\cos(\alpha l/2)} - 1 \right] = \frac{M_x l^2}{8EI} \left(\sec \frac{\alpha l}{2} - 1 \right) = \delta_1 \left[\frac{2 \left(\sec \frac{\alpha l}{2} - 1 \right)}{(\alpha l/2)^2} \right]$$

$$= \delta_1 \times \left[1 + 1.028 \frac{N}{N_{Ex}} + 1.0316 \left(\frac{N}{N_{Ex}} \right)^2 + \dots \right] = \frac{\delta_1}{1 - N/N_{Ex}}$$

$$\sec \alpha = 1 + \frac{1}{2!} \alpha^2 + \frac{5}{4!} \alpha^4 + \frac{61}{6!} \alpha^6 + \dots$$

$$M_{\max} = Ne_y \sec(\alpha l/2) = Ne_y + Nv_{\max} = M_x + \frac{N\delta_0}{1 - N/N_{Ex}} = \frac{M_x}{1 - N/N_{Ex}} \left(1 - N/N_{Ex} + \frac{N\delta_0}{M_x} \right)$$

$$= \frac{M_x}{1 - N/N_{Ex}} \left[1 + \left(\frac{N_{Ex}\delta_0}{M_x} - 1 \right) \frac{N}{N_{Ex}} \right] = \frac{\beta_{mx} M_x}{1 - N/N_{Ex}}$$

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

☑ 按边缘屈服准则确定平面内稳定承载力设计公式

$$M_{\max} = Ne_y \sec(\alpha l/2) = \frac{M_x}{1 - N/N_{Ex}} \left[1 + \left(\frac{N_{Ex}\delta_0}{M_x} - 1 \right) \frac{N}{N_{Ex}} \right] = \frac{\beta_{mx} M_x}{1 - N/N_{Ex}}$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{W_{1x}} = \frac{N}{A} + \frac{\beta_{mx} M_x + Nv_0}{W_{1x}(1 - N/N_{Ex})} = f_y$$

$M_x = 0$

$$v_0 = \frac{W_{1x}(Af_y - N_{ox})(N_{Ex} - N_{ox})}{AN_{ox}N_{Ex}}$$

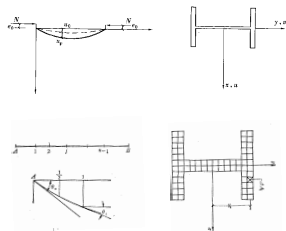
$$\frac{N}{\varphi_x Af_y} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} f_y \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N_{Ex}} \right)} = 1$$

边缘屈服

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

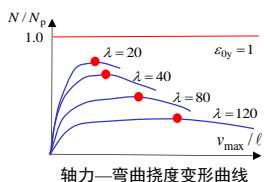
按极限承载力准则确定平面内稳定承载力设计公式

■ 极限承载力：考虑材料非线性的数值解法概念 pp.191-193



$$-M_{iy} + N(u_p + u_0 + e_y) = 0$$

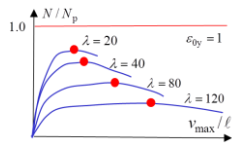
$$-M_{iy} = EI_y u'' \rightarrow \int_A \sigma x dA$$



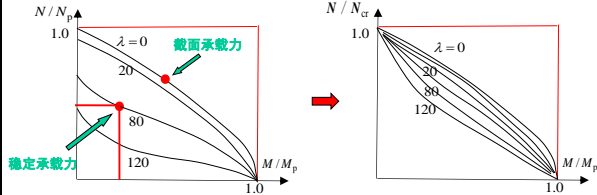
轴力—弯曲挠度变形曲线

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

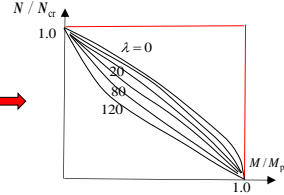
按极限承载力准则确定平面内稳定承载力设计公式



轴力—弯曲挠度变形曲线
(以长细比为参数)



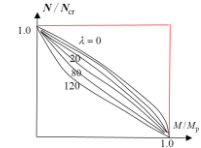
稳定承载力



压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

按极限承载力准则确定平面内稳定承载力设计公式

■ 极限承载力：轴力和弯矩相关关系式



$$\frac{N}{N_{cr}} + \frac{M_x}{\gamma_p M_{ex}} \leq 1$$

$$\frac{N}{\varphi \cdot N_p} + \frac{M_x / 2 \text{ 阶效应放大因子}}{\gamma_p M_{ex}} \leq 1$$

$$\frac{N}{\varphi_x \cdot A} + \frac{M_x}{\gamma_x W_{x1} (1 - N/N_E)} \leq f_d$$

$$\frac{N}{\varphi_x \cdot A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{x1} (1 - 0.8 N/N_E)} \leq f_d$$

M_x : 1阶弯矩
 β_{mx} : 平面内稳定的弯矩等效系数
 W_{x1} : 受压较大侧的截面抗弯模量
0.8 : 由试验和分析数据确定的系数
考虑弹性开展

按“构件段”应用公式

压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

平面内稳定的弯矩等效系数

弯矩作用平面内两端有相对侧移的压弯杆
弯矩作用平面内两端无相对侧移的压弯杆

1.0

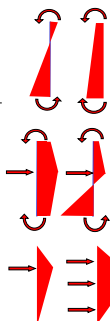
— 无横向荷载
 $0.65 + 0.35 \frac{M_2}{M_1}$

— 有端弯矩和横向荷载

1.0
0.85

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{x1} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{EX}}\right)} = f_y$$

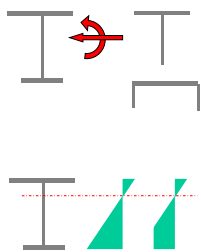
— 一端弯矩、有一个或几个跨中横向荷载或横向均布荷载
1.0



压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

不对称实腹式截面，弯矩使较大翼缘受压时的补充计算公式

$$\left| \frac{N}{A} - \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{x2} \left(1 - 1.25 \frac{N}{N_{EX}}\right)} \right| \leq f_y$$



压弯构件的整体稳定 单向压弯构件的平面内失稳

压弯构件平面内稳定的工程计算公式

■ 绕虚轴弯曲的格构式压弯构件和冷弯薄壁实腹式压弯构件

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{x1} \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N_{EX}}\right)} \leq f_d$$

■ 实腹式压弯构件

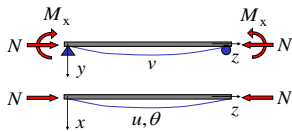
$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{x1} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{EX}}\right)} \leq f_d$$

■ 不对称实腹式截面补充计算公式

$$\left| \frac{N}{A} - \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{x2} \left(1 - 1.25 \frac{N}{N_{EX}}\right)} \right| \leq f_d$$

压弯构件的整体稳定
单向压弯构件的平面外失稳

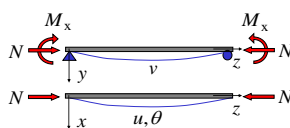
☑ 平面外失稳的特征



- 与受弯构件整体失稳的相似点：
弯曲平面之外发生挠曲和扭转
- 与受弯构件整体失稳的不同点：
弯扭失稳在轴力和弯矩共同作用下发生
- 与轴压构件弯扭失稳的不同点：
双轴对称截面平面外弯扭变形同时产生

压弯构件的整体稳定
单向压弯构件的平面外失稳

☑ 压弯构件弯扭失稳的弹性平衡方程



$$EI_y u'' + M_x \theta'' = 0$$

$$EI_y u^{IV} + Nu'' = 0$$

$$EI_y u^{IV} + Nu'' + M_x \theta'' = 0$$

$$EI_\omega \theta^{IV} - GI_t \theta'' + M_x u'' + (Nr_0^2 - \bar{R}) \theta'' = 0$$

$$EI_\omega \theta^{IV} - GI_t \theta'' + (Nr_0^2 - \bar{R}) \theta'' = 0$$

$$EI_\omega \theta'' - GI_t \theta'' + M_x u'' = 0$$

压弯构件的整体稳定
单向压弯构件的平面外失稳

☑ 压弯构件弯扭失稳弹性平衡方程的解

$$EI_y u^{IV} + Nu'' + M_x \theta'' = 0$$

$$EI_\omega \theta^{IV} - GI_t \theta'' + M_x u'' + (Nr_0^2 - \bar{R}) \theta'' = 0$$

求解过程详见 pp197

方程解： $(1 - \frac{N}{N_{Ey}})(1 - \frac{N}{N_\theta}) - \frac{M_x^2}{M_{crx}^2} = 0$ (7-18)

其中： $N_{Ey} = \pi^2 EI_y / \ell_{oy}^2$
 $N_\theta = (\pi^2 EI_\omega / \ell_{o\theta}^2 + GI_t + \bar{R}) / r_0^2$

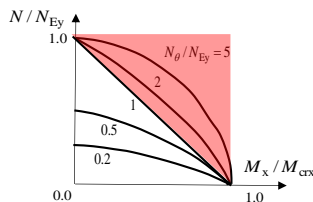
满足方程(7-18)的轴力解为平面外弯扭失稳临界轴力

讨论：压弯构件是否在压力达到 N_{Ey} 、 N_θ 时失稳？

压弯构件的整体稳定
单向压弯构件的平面外失稳

☑ 压弯构件弯扭失稳临界力的图形表达

方程解： $(1 - \frac{N}{N_{Ey}})(1 - \frac{N}{N_\theta}) - \frac{M_x^2}{M_{crx}^2} = 0$



大多数工程构件
 $N_\theta / N_{Ey} > 1$

即 $N / N_{Ey} + M_x / M_{crx} = 1$
可视为压弯杆件平面外稳定的下限值

压弯构件的整体稳定
单向压弯构件的平面外失稳

☑ 压弯杆件平面外稳定工程计算公式的表达

无初始缺陷时的理论解(下限)： $\frac{N}{N_{Ey}} + \frac{M_x}{M_{crx}} = 1$

实际工程构件与理论解的差别：

- 截面非双轴对称引起的变化
- 非弹性引起的变化
- 初始几何缺陷产生了轴稳定平衡方程的耦联

工程计算公式：

$$\frac{N}{\varphi_y \cdot Af_y} + \frac{\beta_{tx} \cdot M_x}{\varphi_b \cdot W_x f_y} \leq 1$$

压弯构件的整体稳定
单向压弯构件的平面外失稳

☑ 压弯构件平面外稳定工程计算公式的说明

$$\frac{N}{\varphi_y \cdot A} + \eta \frac{\beta_{tx} \cdot M_x}{\varphi_b \cdot W_x} \leq f_d$$

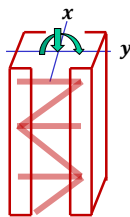
- 弯曲平面外稳定(弯曲平面外的轴压稳定系数)
- 弯矩值是构件计算段内(侧向支承点间)的最大弯矩
- 弯矩等效系数与平面内弯矩等效系数具有相同含义 p.199
- 受弯构件的整体稳定系数,按均匀受弯构件考虑,参见p.200,取 $\varphi_b = 1.07 - \frac{\lambda_y^2}{44000} - \frac{f_y}{235}$ (仅对工字钢)
- η — 开口截面取1.0
闭口截面取0.7

压弯构件的整体稳定
格格式构件单向压弯的整体稳定

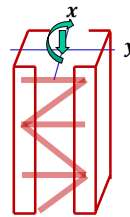


压弯构件的整体稳定
格格式构件单向压弯的整体稳定

☑ 弯矩绕虚轴作用时 M_x ☑ 弯矩绕实轴作用时 M_y



- 平面内整体稳定
- 平面外整体稳定



- 平面内整体稳定
- 平面外整体稳定

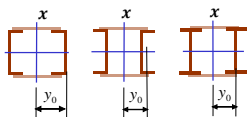
压弯构件的整体稳定
格格式构件单向压弯的整体稳定

☑ 弯矩绕虚轴作用时的平面内整体稳定计算公式

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{x1} \left(1 - \varphi_x \frac{N}{N_{EX}} \right)} \leq f_d$$

- φ_x : 按换算长细比 λ_{0x} 计算
- 受压侧截面弹性模量的定义:

$$W_{x1} = I_x / y_0$$



压弯构件的整体稳定
格格式构件单向压弯的整体稳定

☑ 弯矩绕虚轴作用时的平面外整体稳定计算公式

只需验算单肢的稳定

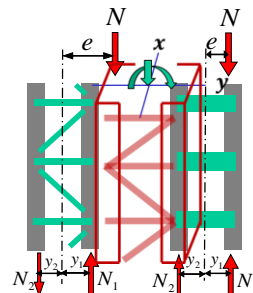
☑ 单肢承受的轴力

$$e = \frac{M}{N}$$

M 取构件段最大弯矩

$$N_1 = N \frac{y_2 + e}{y_1 + y_2}$$

$$N_2 = N - N_1$$



压弯构件的整体稳定
格格式构件单向压弯的整体稳定

☑ 缀条式构件的单肢稳定

1. 单肢作为两端铰接轴压杆件承受 N_1 或 N_2

2. 计算长度

平面内: 相邻节间长度

$$\frac{N_1}{\varphi A_1} \leq f_d \quad \lambda_1 = \frac{l_1}{i_1}$$

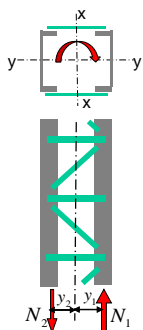
平面外: 侧向支承点间距

3. 单肢稳定

平面内: 轴心受压杆件

平面外: 轴心受压杆件

Q/A: 缀条式构件是否需要考虑剪力作用?



压弯构件的整体稳定
格格式构件单向压弯的整体稳定

☑ 缀板式构件的单肢稳定

1. 肢杆作为刚接杆件除承受 N_1 或 N_2 还承受局部弯矩和剪力

2. 压弯杆剪力

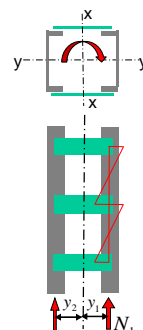
$$V = \max\{\Delta M_x / \Delta H, (A f_d / 85) \sqrt{f_y / 235}\}$$

该剪力 V 分配到肢杆上, 引起局部弯矩

3. 计算长度及其单肢稳定

平面内(压弯构件): 相邻缀板间净长度

平面外(轴压构件): 侧向支承点间距

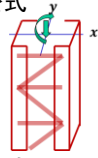


压弯构件的整体稳定 格格式构件单向压弯的整体稳定

☑ 弯矩绕实轴作用时的平面内整体稳定计算公式

- 与实腹式压弯构件相同

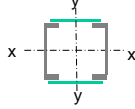
$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{yx} (1 - 0.8 N/N_{Ex})} \leq f$$



☑ 弯矩绕实轴作用时的平面外整体稳定计算公式

$$\frac{N}{\varphi_y A} + \eta \frac{\beta_{tx} \cdot M_x}{\varphi_b \cdot W_{yx}} \leq f_d$$

- 与实腹式压弯构件基本相同，但是：
 - 计算 φ_y 时，长细比取换算长细比
 - φ_b 取1.0

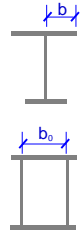


压弯构件的局部稳定 不允许局部失稳时的宽厚比限值

☑ 受压翼缘 (宽厚比限值)

外伸翼缘: $\frac{b}{t} \leq 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

周边支承翼缘: $\frac{b_0}{t} \leq 40 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$



压弯构件的局部稳定 不允许局部失稳时的宽厚比限值

☑ 腹板 (宽厚比限值)

工字型截面: $0 \leq \alpha_0 \leq 1.6, \frac{h_w}{t_w} \leq (16\alpha_0 + 0.5\lambda + 25) \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$1.6 < \alpha_0 \leq 2, \frac{h_w}{t_w} \leq (48\alpha_0 + 0.5\lambda - 26.2) \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

λ 为弯曲平面内的长细比，取值范围30~100

箱型截面: $\frac{h_w}{t_w} \leq \max(\text{以上两式} \times 0.8, 40 \sqrt{\frac{235}{f_y}})$

T型截面: 自由边受压 $\alpha_0 \leq 1.0, \frac{h_w}{t_w} \leq 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

$\alpha_0 > 1.0, \frac{h_w}{t_w} \leq 18 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

自由边受拉 $\frac{h_w}{t_w} \leq (15 + 0.2\lambda) \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ (热轧部分)

$\frac{h_w}{t_w} \leq (13 + 0.17\lambda) \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ (焊接T型钢)

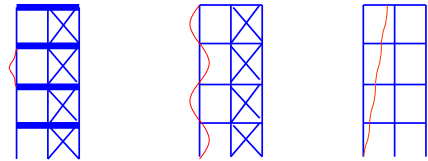
压弯构件的刚度 构件设计时的刚度控制指标

☑ 长细比

如轴压构件，最大长细比150~200

☑ 压弯构件在弯曲平面内的侧向变形

- 实际结构中的长细比确定



压弯构件的长细比确定 桁架结构

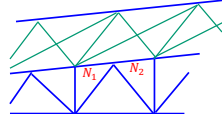
☑ 桁架结构

☑ 桁架结构中构件的计算长度

- 弦杆:

平面内计算长度 $l_0 = l_1$

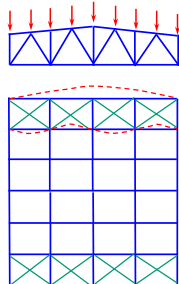
平面外计算长度 $l_0 = l_1 (0.75 + 0.25 \frac{N_2}{N_1})$



- 腹杆:

平面内计算长度 $l_0 = 0.8l_1$ 或 l_1

平面外计算长度 $l_0 = l_1$



压弯构件的长细比确定 刚架结构

☑ 刚架结构

☑ 刚架结构中构件的计算长度

- 计算梁柱线刚度比 (P283, 式9-7.9-8)

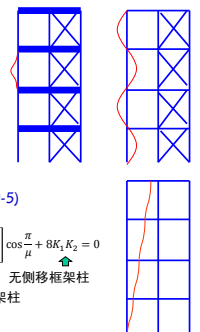
$$K_1 = \frac{\sum i_{b1}}{i_c + i_{c1}} \quad K_2 = \frac{\sum i_{b2}}{i_c + i_{c2}}$$

- 确定构件计算长度系数 (P283, 式9-4.9-5)

$$\left[\left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2 + 2(K_1 + K_2) - 4K_1 K_2 \right] \frac{\pi}{\mu} \sin \frac{\pi}{\mu} - 2 \left[(K_1 + K_2) \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2 + 4K_1 K_2 \right] \cos \frac{\pi}{\mu} + 8K_1 K_2 = 0$$

$$\left[36K_1 K_2 - \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2 \right] \sin \frac{\pi}{\mu} + 6(K_1 + K_2) \left(\frac{\pi}{\mu} \right) \cos \frac{\pi}{\mu} = 0 \quad \leftarrow \text{有侧移框架柱}$$

- 确定构件计算长度 $l_0 = \mu l_1$



压弯构件设计 计算内容小结

☑ 截面选择

整体稳定性要求、局部稳定要求、易于施工要求等

☑ 强度计算：截面承载力

☑ 构件稳定计算（整体稳定）

实腹式：平面内（双轴对称截面和单轴对称截面）
平面外

格构式（弯矩绕虚轴作用）：

绕虚轴的整体稳定

单肢稳定：区分平面内与平面外 / 区分缀条式和缀板式

☑ 板件稳定计算（局部稳定）

宽厚比值

☑ 刚度计算