

## 节点刚度对钢框架结构设计的影响

许建勋<sup>1</sup>,赵滇生<sup>1</sup>,吾独龙<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 建工学院, 浙江 杭州 310014; 2. 衢州市建筑设计院, 浙江 衢州 324000)

**摘 要:** 介绍了常用半钢框架节点分析模型,分析了节点变形的主要性能因素;并结合一些算例分析研究了节点刚度变化对框架结构性能的影响。

**关键词:** 钢框架; 半刚性; 节点刚度; 影响

**中图分类号:** T4311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-7680(2001)04-0007-04

在进行钢框架结构内力分析时,一般都将梁柱节点简化为铰接或刚接.但大量的实验分析表明,节点的受力性能一般都介于刚接和铰接之间,呈现半刚性连接的特点.如果以刚性节点考虑,则忽略了连接柔性降低梁柱之间的约束,结构产生的实际变形会大于计算结果.目前,针对我国半刚性连接的尚无具体设计方法,有必要研究节点刚度对框架的影响,以便在钢架设计时考虑.

### 1 半刚性节点分析模型及节点性能的影响因素

当前,国内外学者建立半刚性节点模型最常用的方法就是通过大量的试验数据分析回归,然后用一个简单的数学表达式来模拟.常用的模型是 Colson 模型<sup>[1,2]</sup>.

$$M = \frac{K_0 \theta_r}{[1 + (\theta_r + \theta_0)^n]^{1/n}} \quad (1)$$

其中:  $M$ —约束弯矩;  $\theta_0 = M_u/K_0$ ;  $M_u$ —极限抗弯承载力;  $\theta_r$ —梁柱相对转角;  $n$ —考虑曲线曲率的参数;  $K_0$ —连接初始刚度,是指连接弯矩和转角之间为线形关系时的刚度.初始连接刚度与连接节点的各个构件的初始变形有关,关系式为<sup>[1]</sup>

$$K_0 = \frac{M_i}{\theta_i} = \frac{F_i(h_b - t_b)^2}{\Delta_{db} + \Delta_{xy} + \Delta_{ls}} \quad (2)$$

式中:  $M_i$ —连接初始弯矩;  $\theta_i$ —初始转角;  $\Delta_{db}$ —端板变形;  $\Delta_{xy}$ —柱翼缘变形;  $\Delta_{ls}$ —螺栓变形;  $h_b$ —梁截面高度;  $t_b$ —梁翼缘厚度;  $F_i$ —翼缘力.

从(2)式可以看出,影响节点性能的主要因素有端板变形、柱翼缘变形、螺栓变形等.下面则通过一个题例来具体分析一下端板对节点性能的影响,题例如图1所示.

为了突出端板对变形的影响,并考虑到柱加劲肋的作用,不妨先忽略柱翼缘及螺栓等变形的影

收稿日期: 2001-03-27

作者简介: 许建勋(1977-),男,河南南阳人,浙江工业大学硕士研究生,主要从事结构工程研究.

响. 并设端板厚为  $t$ , 承受弯矩为  $M$ , 钢材为 Q235, 两列螺栓间距  $L$  为 100 mm, 在弹性范围内, 中和轴位于端板下部, 轴以上拉力由螺栓提供, 中和轴以下为端板和柱翼缘间的压应力, 近似取为线形分布, 斜率为  $k$ , 计算模型取图 1(c), 最上排螺栓  $n_1$  受最大拉力, 为了求出端板的最大变形, 在  $n_1$  排螺栓处取上下宽 100 mm 的板带来分析变形, 如图 1(b) 中线框所示, 进而将其计算模型取为图 1(d).

利用两个平衡方程(端板):  $\sum X = 0$ ;  $\sum M = 0$

可解得受压区高度  $h_0$  及  $N_1$

$$h_0 = 74.29 \text{ mm}; I_x = 2.53 \times 10^8 \text{ mm}^4; k = M/I_x; N_1 = kA_e(h_1 - h_0) = 0.48 M$$

这里,  $A_e$  是螺栓面积 254.5 mm<sup>2</sup>.

利用结构力学的单位荷载法, 可求出端板  $N_1$  处的变形为

$$\Delta = \frac{N_1 L^3}{192 EI} = \frac{1.46 M}{t^3}$$

$$\text{则节点相对转角可近似表示为 } \theta_r = \frac{\Delta \times 10^3}{550 - 74.29} = \frac{3.07 M}{t}$$

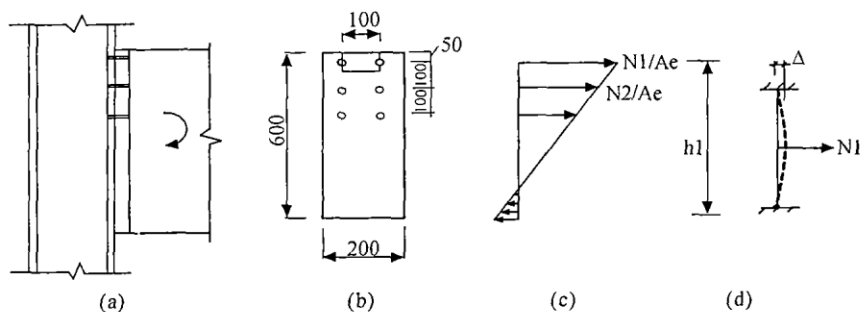


图 1 端板对节点性能影响图

通过改变端板厚度来分析端板对节点变形的影响. 计算结果如图 2 所示. 显然, 端板厚度对节点变形有很重要的影响. 但计算表明, 当端板厚度大于 40 mm 时, 端板厚度对节点变形的影响微小, 可以忽略. 设计中一般端板厚度大于 30 mm 即具有足够的强度.

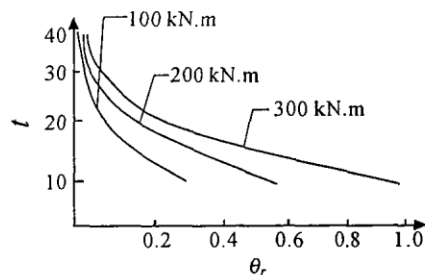


图 2 端板对节点变形影响图

## 2 半刚性连接刚度对框架设计的影响

为了分析问题的方便, 通常用梁两端带抗弯弹簧来模拟

节点的半刚性. 弹簧刚度为节点初始刚度(忽略轴力的影响), 由结构力学的一般方法可得到半刚性梁单元的刚度方程如下<sup>[3]</sup>:

$$[K] = \frac{2EI}{L^3} \begin{bmatrix} 6g_1(\alpha) & 3L_1(\alpha) & -6g_1(\alpha) & 3g_1(\alpha) \\ 3g_1(\alpha) & 2L^2g_2(\alpha) & -3Lg_1(\alpha) & L^2g_3(\alpha) \\ -6g_1(\alpha) & -3L_1(\alpha) & 6g_1(\alpha) & -3g_1(\alpha) \\ 3Lg_1(\alpha) & L^2g_3(\alpha) & -3g_1(\alpha) & 2L^2g_2(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$g_1(\alpha) = 1/(1+3\alpha); \quad g_2(\alpha) = (1+3\alpha/2)/(1+4\alpha+3\alpha^2)$$

$$g_3(\alpha) = 1/(1+4\alpha+3\alpha^2); \quad \alpha = 2EI/K_0L$$

## 2.1 刚性连接对框架弯矩分布的影响

现通过图3题例来分析节点连接刚度对框架弯矩分布的影响. BC梁上作用均布荷载 $q$ ,将平面框架通用程序作以下修改:梁单元刚度矩阵按(3)式修正;固端弯矩按文献[3]中的表1修正.修正后的程序可用来计算半刚性框架内力.为了便于比较,本题例先按刚节点计算,再按半刚性计算.计算结果如表1,关系图线见图4.

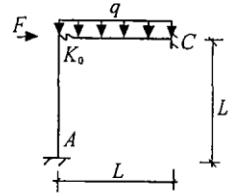


图3 框架弯矩分布图

弯矩类型	刚接( $\alpha=0$ )	半刚接( $\alpha=1$ )	半刚接( $\alpha=2$ )	半刚接( $\alpha=3$ )
$M_A$	0.0208	0.0159	0.0117	0.0092
$M_{BA}$	0.0417	0.0317	0.0233	0.0183
$M_{BC}$	0.0417	0.0317	0.0233	0.0183
$M_{BC中}$	0.0521	0.0873	0.0992	0.1053
$M_{CB}$	0.1042	0.0438	0.0283	0.0211

从图4可以看出, $\alpha$ 表示梁线刚度与节点抗弯刚度的比值.当 $\alpha$ 增大时,梁端负弯矩减小,跨中弯矩则增大.如果设计中节点按刚性则会低估跨中弯矩而高估梁端负弯矩,对跨中的抗弯强度和整体稳定均不利.

## 2.2 半刚性连接对框架位移的影响

分析如图5的框架结构,忽略轴力和剪切变形影响

并假设:  $\frac{I_b}{L_b} = \frac{I_c}{L_c} \quad \alpha = \frac{2DI_c}{K_0 L_c}$

这里, $I_b, I_c$ 分别是梁和柱截面惯性矩; $L_b, L_c$ 分别是梁和柱的几何长度. $K_0$ 为节点初始抗弯刚度利用结构力学的方法,依次建立梁和柱单元的刚度方程:

$$\begin{cases} M_B \\ M_C \end{cases} = \frac{2EI_c}{L_c} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_B \\ \theta_C \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} Q_B \\ M_{BA} \end{cases} = \frac{2EI_c}{L_c} \begin{bmatrix} 6/L_c^2 & -3/L_c \\ -3/L_c & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \theta_{BA} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Q_C \\ M_{CD} \end{cases} = \frac{2EI_c}{L_c} \begin{bmatrix} 6/L_c^2 & -3/L_c \\ -3/L_c & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \theta_{CD} \end{Bmatrix}$$

由于半刚性, $\theta_B \neq \theta_{BA}; \theta_C \neq \theta_{CD}$ 则建立两端带节点域梁的刚度方程:

$$\begin{Bmatrix} M_B \\ M_C \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \theta_{BA} \\ \theta_{CD} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

联立(4)式和(5)式,可得出

$$[K] = \frac{1}{3\alpha^2 + 4\alpha + 1} \begin{bmatrix} 6\alpha + 2 & 2 \\ 2 & 6\alpha + 4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由图6可列出静力平衡方程条件:

$$\begin{cases} M_B + M_{BA} = 0 \\ M_C + M_{CD} = 0 \\ Q_B + Q_C = F \end{cases} \quad (7)$$

则由(7)式可解出:

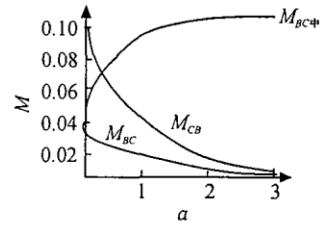
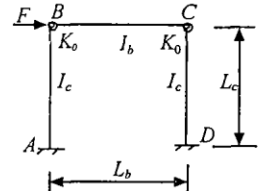
图4 M- $\alpha$ 关系图

图5 框架结构图

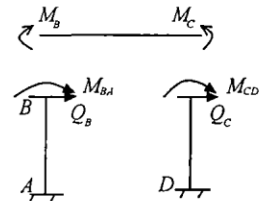


图6 静力平衡关系图

$$u = \frac{6\alpha^2 + 11\alpha + 5}{12(3\alpha^2 + 10\alpha + 7)} \frac{FL_c^3}{EI_c}$$

节点为刚接时,  $\alpha = 0$ .  $B$ 、 $C$  节点侧移

$$u_1 = \frac{5FL_c^3}{84EI_c}$$

节点为铰接时,  $\alpha = \infty$ .  $B$ 、 $C$  节点侧移

$$u_2 = \frac{FL_c^3}{6EI_c}$$

由图 7 可见, 节点刚度变化对结构侧移影响明显. 节点刚度愈大, 框架侧移愈小.

如果在设计时, 忽略了半刚性的影响, 以刚接计算, 则计算的结果将小于结构的实际变形. 同理, 可分析出半刚性节点对框架挠度的影响.

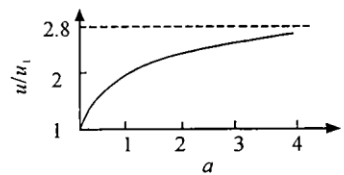


图 7 节点刚度与框架侧移关系图

### 2.3 半刚性连接对框架塑性极限荷载的影响

研究图 8 框架的极限载荷. 先设梁端半刚性节点的极限弯矩为定值  $\gamma M_y$ , 其他部位极限弯矩为  $M_y$ , 在图 8 所示的破坏机构下, 可由虚位移原理求出极限荷载为

$$\begin{aligned} F \times 2\theta \times L + 2F \times \theta \times L &= M_y \times 2\theta + M_y \times 2\theta + \gamma M_y \times 2\theta \\ &= 2M_y \times \theta \times (2 + \gamma) \end{aligned}$$

$$\text{可得: } F_J = \frac{M_y \times (2 + \gamma)}{2L}$$

同样原理可求得相应的刚接点框架的极限荷载:

$$F_g = \frac{3M_y}{2L}$$

$\gamma = 0$  表示铰接;  $\gamma = 1$  表示梁柱刚接.  $F_J$  随  $\gamma$  的增大而增大. 亦即, 节点的刚度愈大, 框架的极限荷载在一定范围内愈大.

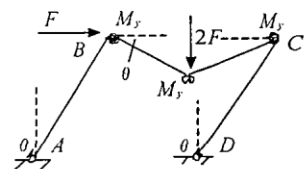


图 8 框架极限载荷图

## 3 结 论

本文对节点性能的主要影响因素和节点刚度变化对框架结构性能的重要影响作了分析. 分析了节点刚度变化对框架内力分布, 结构变形, 极限荷载等的不利影响, 这对结构的合理设计和安全使用有重要的意义. 但影响节点刚度的因素较多, 节点刚度对框架性能的影响值得进一步更深入研究.

### 参考文献:

- [1] Kishi N, Chen W F. Moment-rotations of semi-rigid connections with angles[J]. Journal of structure engineer, 1990, (3):157-159.
- [2] Baharri R, Sherburne N. Finite element prediction of end plate bolted connections behavior II: Analytic formulation[J]. Journal of structure engineering, 1997, (2):157-175.
- [3] 刘小强, 吴惠弼. 半刚性连接框架位移和内力的计算[J]. 重庆建筑工程学院学报 1993. 增刊: 64-68.

(下转第 27 页)

(上接第10页)

[4] 李国强,沈祖炎.钢结构框架体系弹性及塑性分析与计算理论[M].上海:上海科学技术出版社,1998.

[5] 龙驭球,包世华.结构力学[M].北京:高等教育出版社,1996.

## Effect of joint stiffness on steel frame design

XU Jian-xun<sup>1</sup>, ZHAO Dian-sheng<sup>1</sup>, WU Du-long<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310012, China;

2. Quzhou Building Design Institute, Quzhou 324000, China)

**Abstract:** The model of semi-rigid joint is introduced and main factors for joint deformations are analyzed with joint stiffness changing, and the effect on frame is analyzed and studied through some instances in this article.

**Key words:** steel frame; semi-rigid connections; joint stiffness; effect