

中美欧设计标准对钢结构节点刚性分类要求及判断比较

陈 迪

(北京石油化工工程有限公司, 北京 100107)

摘 要: 在钢结构设计中, 需要对计算模型的连接节点刚性进行分类, 之后才能进行钢结构的整体分析和构件设计。因此对节点的刚性类别判断是钢结构设计中最基本也是十分重要的工作。通过对中国、美国和欧盟钢结构相关的弹性设计的钢结构节点刚性分类定义、分类要求和类别判断方法等进行比较分析, 发现中美欧设计标准都是根据节点连接的力学特征对节点刚性进行分类, 分为刚接、半刚接和铰接三类节点。中美欧标准对节点转动刚度的要求都是采用节点的弯矩-转角($M-\varphi$)曲线描述进行定义。中国标准是通过 $M-\varphi$ 曲线进行了概念性的描述, 对节点的转动刚度和节点刚性分类的转动刚度界限都没有量化定义; 美国标准虽然对梁柱节点刚性分类的转动刚度界限做了量化界定, 但是节点的切线刚度却没有相应计算方法; 欧盟标准给出了常用梁柱和柱脚标准节点的转动刚度计算公式和节点刚性分类转动刚度界限要求。在节点刚性分类构造要求方面, 美国标准和欧盟标准都要求铰接节点有一定的转动能力, 因此对端板连接的螺栓和节点板在构造上有柔性要求和延性要求, 对单板连接构造上要确保其转动能力。由于刚接连接节点承担较大的弯矩, H型钢柱的翼缘和腹板往往需要加强, 中美欧标准均给出了相应的补强措施。因此中国标准和美国标准只能通过节点构造条件对节点进行“定性”刚性类别判断, 欧盟标准却可以根据常用标准节点的转动刚度计算公式和节点刚性分类的转动刚度界限要求“定量”判断出节点是否为刚接。对于复杂节点, 仍需要通过试验或节点有限元分析绘出 $M-\varphi$ 曲线加以确定。钢结构节点设计应注意构造要求以及影响节点刚性类别判断的因素, 在结构分析时要考虑简化计算模型应用的节点刚性类别对计算结果的影响。

关键词: 钢结构节点; 刚性分类要求; 刚性类别判断方法; 标准比较

1 概 述

在钢结构设计中, 需要根据节点处荷载情况、所采用的连接方法及其细部构造, 并按节点的力学特性对计算模型的连接节点刚性进行分类, 之后才能进行钢结构的整体分析和构件设计。因此对节点的刚性类别判断是钢结构设计中最基本也是十分重要的工作。本文基于中国、美国和欧盟设计标准, 对钢结构弹性设计中有关节点刚性分类定义、分类要求及类别判断方法等方面进行比较分析。

2 节点刚性分类定义

对于钢结构的弹性设计, 中国的《钢结构连接节点手册》^[1] (简称中国设计手册)、美国标准 AISC 360-22^[2] (简称美标) 和欧盟标准 Eurocode 3: EN 1993-1-8^[3] (简称欧标) 均是根据连接节点的力学特征对节点刚性进行分类, 具体定义如表 1 所示。

表 1 中国、美国、欧洲标准中节点刚性类别

Table 1 Joint rigid classification in Chinese, US and EN standards

国家或地区	铰接类型	半刚接类型	刚接类型
中国	铰接节点	半刚性连接节点	刚性连接节点
美国	简支节点	部分约束弯矩连接节点 (PR)	完全约束弯矩连接节点 (FR)
欧洲	简支节点	半连续节点	连续节点

刚性连接节点与连接的其他构件一样承担弯矩、剪力和轴力的作用, 保证构件原有的完整连续性, 因此构件的拼接连接通常使用刚性连接节点。

作者: 陈迪, 高级工程师, 国家一级注册结构工程师, 主要从事石油化工项目的结构设计与研究。

Email: chendi@bpdi.com.cn

收稿日期: 2024-04-17

铰接节点理论上不能承受弯矩,连接应具有充分的转动能力。

3 节点刚性分类要求

3.1 转动刚度要求

文献[1-3]对节点转动刚度的要求都是采用节点的弯矩-转角($M-\varphi$)曲线来描述的。

3.1.1 中国设计手册规定

中国设计手册^[1]对节点转动刚度的要求为概念性描述,如图1所示。

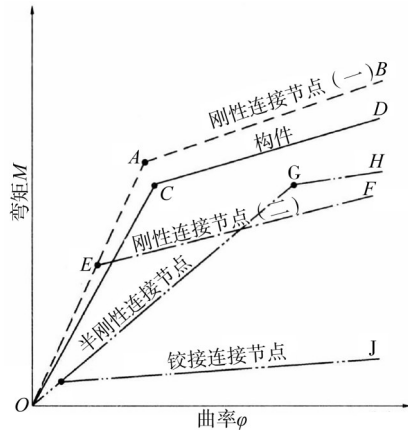


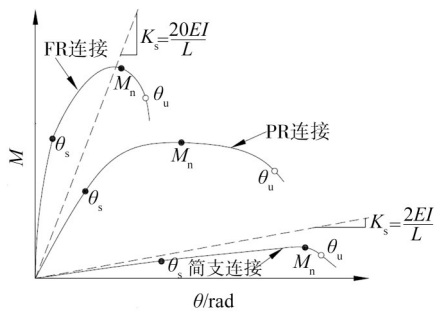
图1 连接节点的特性曲线^[1]

Fig. 1 Characteristic curves of joints

可见:刚性连接节点OAB或OEF所承受的弯矩和相应的曲率特性能确保构件的连续性并具有与构件OCD相同的 $M-\varphi$ 关系;半刚性连接节点OGH的弹性刚度比构件OCD的刚度要低;铰接连接节点OIJ几乎不能承担弯矩。

3.1.2 美标规定

美标^[2]的条文说明对梁柱节点转动刚度提出了要求,如图2所示。



注: M_n 为节点最大弯矩承载力; θ_u 为节点最大转角。

图2 FR、PR和简支连接的 $M-\theta$ 特征的分类

Fig. 2 Classification of $M-\theta$ characteristics for FR, PR and simple connections

当节点满足 $K_s L/(EI) \geq 20$ 时,节点为完全约束弯

矩连接节点(FR);当节点满足 $K_s L/(EI) \leq 2$ 时,节点则为简支连接节点,转动刚度在两界限之间的节点为部分约束弯矩连接节点(PR)。 K_s 的计算式为:

$$K_s = M_s / \theta_s \quad (1)$$

式中: K_s 为节点的切线刚度; M_s 为使用荷载下的弯矩; θ_s 为使用荷载下的转角; L 为梁的长度; EI 为梁的弯曲刚度。

3.1.3 欧标规定

欧标^[3]对梁柱节点转动刚度的要求如图3所示。

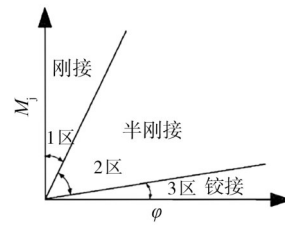


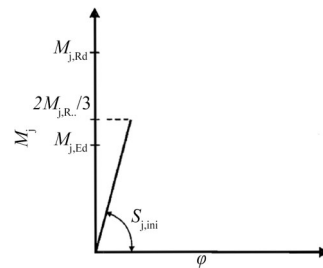
图3 梁柱节点刚性分类

Fig. 3 Rigidity classification of beam-column joints

1) 1区:刚接。

$$S_{j,ini} \geq K_{br} EI_b / L_b \quad (2)$$

式中: K_{br} 的取值要求为若支撑对减小框架结构位移的作用不小于80%时, $K_{br}=8$,若 $K_b/K_c \geq 0.1$ 时, $K_{br}=25$; K_b 为楼层所有梁 I_b/L_b 的平均值; K_c 为楼层所有柱 I_c/L_c 的平均值; I_b 为梁的截面惯性矩; L_b 为梁的跨度; I_c 为柱的截面惯性矩; L_c 为柱高; $S_{j,ini}$ 为节点的初始转动刚度(取值见图4)。



注: $M_{j,Ed}$ 为节点弯矩设计值; $M_{j,Rd}$ 为节点抗弯承载力设计值。

图4 初始刚度取值曲线

Fig. 4 Initial stiffness characteristic curve

2) 3区:铰接需要满足标准^[3]附录C.2(3)和C.2(5),几乎不能承担弯矩,但具有延性和转动能力。

3) 2区:除上述情况外均为半刚性。

欧盟标准^[3]还列出了对柱脚节点刚接的转动刚度要求:

1) 支撑至少减少80%水平位移并且变形影响

可被忽略的框架,即:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.5 \quad (3a)$$

$$0.5 < \bar{\lambda}_0 < 3.93 \text{ 且 } S_{j,ini} \geq 7(2\bar{\lambda}_0 - 1)EI_c/L_c \quad (3b)$$

$$\bar{\lambda}_0 \geq 3.93 \text{ 且 } S_{j,ini} \geq 48EI_c/L_c \quad (3c)$$

式中: $\bar{\lambda}_0$ 为两端假定为铰接的柱的正则化长细比。

2)其他情况:

$$S_{j,ini} \geq 30EI_c/L_c \quad (4)$$

3.2 构造要求

3.2.1 铰接节点

美标^[2]和欧标^[3]均要求铰接节点有一定的转动能力,因此对连接端板的螺栓和节点板在构造上有柔性性和延性要求,对单板连接构造上确保其具备转动能力。

1)美国设计手册^[4]对单板铰接连接的构造要求:连接螺栓竖向单排布置,数量为2~12个;连接板或梁腹板最大厚度为 $d/2+1/16$ in (螺栓个数为2~5个, 1 in=2.54 cm)、 $d/2-1/16$ in (螺栓个数为6~12个), d 为螺栓直径。

2)美国设计手册^[4]对端板铰接连接的构造要求:端板最大厚度为 $5/8$ in。

3)欧盟设计手册^[5]对单板铰接连接的构造要求:连接板或梁腹板最大厚度不大于 $0.42d$ (采用 S355 钢材), 不大于 $0.5d$ (采用 S275 钢材);螺栓采用 8.8 级, 不加预紧力;连接板和梁腹板上螺栓边距至少 $2d$;要提供足够强度的角焊缝。

4)欧盟设计手册^[5]对端板铰接连接的构造要求:端板最大厚度为 10 或 12 mm;螺栓列间距为 90 或 140 mm。

3.2.2 刚接节点构造要求

由于刚接节点承担较大的弯矩, H 型钢柱翼缘和腹板往往需要加强。

中国标准 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[6] (简称“中标准”) 对梁柱 (H 型钢) 刚接节点的构造要求如下:

H 型钢柱腹板对应于梁翼缘部位宜设置横向加劲肋; 横向加劲肋厚度不宜小于梁翼缘厚度, 宽度应符合传力、构造和板件宽厚比限值; 横向加劲肋的上表面宜与梁翼缘上表面对齐, 并以焊透的 T 形对接焊缝与柱翼缘连接; 对于节点域柱腹板补强可采用焊贴补强板或设置斜向加劲肋加强。

美标^[2]在 J10 节对 H 型钢柱横向及斜向加劲肋

的构造做了要求。欧盟设计手册^[7]根据 H 型钢柱刚接节点处受力状态给出了相应的补强措施 (表 2)。

表 2 柱加强方法

Table 2 Column strengthening methods

柱加劲肋形式	补强			
	腹板受拉	翼缘受弯	腹板受压	腹板受剪
水平加劲肋				
全贯通	●	●		
部分贯通	●			
腹板贴板	●		●	●
斜加劲肋 (N、K 型)	●	●		●
镜像加劲肋	●	●		●
翼缘贴板		●		

注: 表中斜向加劲肋及镜像加劲肋形式见图 5; ● 表示可采用。

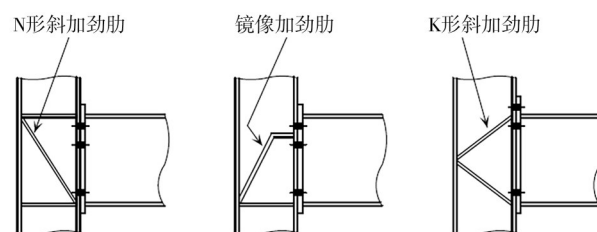


图 5 柱加劲肋形式^[7]

Fig. 5 Stiffener types for steel columns

3.3 强度要求

与弹塑性和刚塑性分析不同, 在钢结构弹性设计中, 只要节点强度满足承载力极限状态下荷载设计值, 刚接或半刚接梁柱节点强度可大于梁的强度, 也可以小于梁的强度。只有在高延性抗震设计中, 节点连接强度需要大于梁的完全塑性抗弯强度时, 连接可认为是弹性的。

4 节点刚性类别判断方法

4.1 中国与美国对节点刚性类别的定性判断

中国设计手册^[1]对节点的刚性分类判断只是对 $M-\varphi$ 曲线概念性的描述, 节点的转动刚度和节点刚性分类的转动刚度界限都不能做到量化定义。

美标^[2]虽然对梁柱节点刚性分类的转动刚度界限做了量化界定, 但是节点的切线刚度 K_t 却没有相应计算方法。

因此只能通过节点构造条件对节点刚性类别进行定性判断。这种判断方法对于一些构造特点不太明显的节点是很难界定其为刚接还是半刚接的, 只能通过试验或节点有限元分析绘出 $M-\varphi$ 曲线才能加以确定。

4.2 欧标对节点刚性类别的定量判断

欧标^[3]给出的梁柱节点初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 和转动刚度 S_j 的计算公式为:

$$S_{j,ini} = \frac{Ez^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (5a)$$

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\mu} \quad (5b)$$

式中: k_i 为对于节点基本组件 i 的刚度系数; z 为力臂,见欧标^[3]表 B. 1; μ 为转动刚度比,若 $M_{j,Ed} \leq 2M_{j,Rd}/3$ 时, $\mu = 1$,若 $2M_{j,Rd}/3 < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$ 时, $\mu = (1.5M_{j,Ed}/M_{j,Rd})^\psi$; $M_{j,Rd}$ 为节点抗弯承载力设计值; $M_{j,Ed}$ 为节点承受的弯矩设计值; ψ 取值见标准^[3]中表 7.5。

梁柱节点转动刚度的求解步骤主要分为两步:

第一步,根据设计标准^[3]中的附录 A 计算节点基本组件刚度系数。

第二步,根据设计标准^[3]中的表 B. 2 和 B. 3 组装组件的刚度系数。

欧盟标准^[3]还在表 D. 2 中给出柱脚节点初始转动刚度的计算公式。

这样有了梁柱和柱脚节点的初始转动刚度数值,就可以根据式(2)~(4)对梁柱和柱脚节点分别进行刚性类别的定量判断。

4.3 欧标的节点刚性类别判断算例

以 HW200 钢柱脚为例,进一步说明欧标^[3]的节点转动刚度计算和刚性类别判断方法。

1) 计算参数。柱脚细节如图 6 所示。

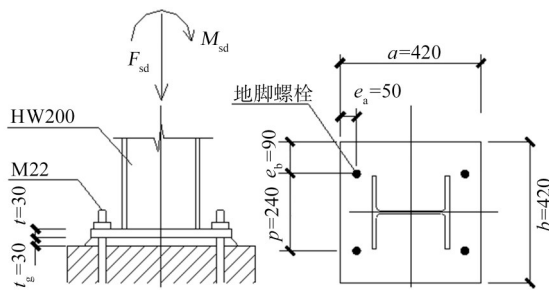


图 6 柱脚细节 mm

Fig. 6 Details of column bases

弯矩设计值 $M_{sd} = 66 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$,轴力设计值 $F_{sd} = 300 \times 10^3 \text{ N}$,钢柱 HW200 采用 Q235 钢材,屈服强度设计值 $f_y = 235 \text{ MPa}$,钢柱截面高度 $h_c = 200 \text{ mm}$,钢柱截面宽度 $b_c = 200 \text{ mm}$,钢柱翼缘厚度 $t_f = 12 \text{ mm}$,钢柱长度(层高) $L_c = 4500 \text{ mm}$,钢柱强轴惯性半径 $i = 86.1 \text{ mm}$,钢柱强轴惯性矩 $I_c =$

$4720 \times 10^4 \text{ mm}^4$,地脚螺栓直径 $d = 22 \text{ mm}$,面积 $A_s = 380 \text{ mm}^2$,螺母+垫片厚度 $t_n = 22 \text{ mm}$,柱脚底板厚度 $t = 30 \text{ mm}$,柱脚底板宽度 $b = 420 \text{ mm}$,柱脚焊缝高度 $a_{wf} = 6 \text{ mm}$,钢材弹性模量 $E_s = 206000 \text{ MPa}$,混凝土基础的强度等级为 C30,混凝土弹性模量 $E_c = 30000 \text{ MPa}$,二次灌浆层厚度 $t_g = 30 \text{ mm}$ 。

2) 钢柱脚节点初始转动刚度计算。

焊缝力臂长度 $Z_m = 60 - 0.8a_{wf}\sqrt{2} = 53.2 \text{ mm}$, T 型件翼缘的最小有效长度 $l_{eff} = \min[4Z_m + 1.25e_a, 2\pi Z_m, 0.5b, 2Z_m + 0.625e_a + 0.5p, 2Z_m + 0.625e_a + e_b, 2\pi Z_m + 4e_b, 2\pi Z_m + 2p] = 210 \text{ mm}$,地脚螺栓延伸长度 $L_b = 8d + t_g + t + t_n/2 = 247 \text{ mm}$,受拉螺栓组件的刚度系数 $k_{tb} = 2A_s/L_b = 3.1 \text{ mm}$,受弯底板组件的刚度系数 $k_{t,bp} = 0.425l_{eff}t^3/Z_m^3 = 16 \text{ mm}$,受拉组件力臂 $z_T = h_c/2 + e_c = 160 \text{ mm}$,受压组件力臂 $z_C = h_c/2 - t_f/2 = 94 \text{ mm}$,受拉部分刚度系数 $k_T = \frac{1}{1/k_{tb} + 1/k_{t,bp}} = 2.6 \text{ mm}$,T 型件翼缘有效宽度 $b_{eff} = t_f + 2.5t = 87 \text{ mm}$,T 型件翼缘有效长度 $l_{eff} = b_c + 2.5t = 275 \text{ mm}$,受压部分刚度系数 $k_C = \frac{E_c}{1.275E_s} \sqrt{b_{eff}l_{eff}} = 17.7 \text{ mm}$,力臂 $z = z_T + z_C = 254 \text{ mm}$,组件刚度偏心距 $e_k = \frac{z_C k_C - z_T k_T}{k_T + k_C} = 61.5 \text{ mm}$,偏心距 $e = \frac{M_{Rd}}{F_{sd}} = 220 \text{ mm}$,柱脚节点初始转动刚度 $S_{j,ini} = \frac{E_s z^2}{1/k_T + 1/k_C} \cdot \frac{e}{e + e_k} = 2.3553 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm/rad}$ 。

3) 柱脚节点刚性类别判断。

若采用框架-支撑结构体系,钢柱的正则化长细比 $\bar{\lambda}_0 = \frac{L_c}{i} \frac{1}{\lambda_1} = 0.56$, $\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} = 93$,则柱脚节点的初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 满足式(3b),柱脚节点为刚接。

若采用框架结构体系,则柱脚节点的初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 不满足式(4),柱脚节点为半刚接。

5 节点刚性分类要求判断方法比较及节点设计应用探讨

5.1 节点刚性分类要求及刚性类别判断方法比较

中美欧设计标准中关于钢结构节点刚性分类要求及刚性类别判断方法,可通过表 3 给出并得到

比较结果:

以前面算例所示的 HW200 柱脚节点为例,螺栓放在翼缘外,节点能抵抗弯矩,具有刚接构造特点;但是柱脚没有加劲肋,节点转动刚度不大,节点也有可能是半刚接。中美标准只能根据节点这些构造上的特点来定性判断,会带来一些不确定性结果。欧标^[3]却能根据具体情况定量判断出柱脚节点是否为刚接。当然,欧盟标准^[3]只给出了常用标准节点的组件刚度系数,对于复杂节点,还是需要通过试验或节点有限元分析绘出 $M-\varphi$ 曲线加以确定。

表3 节点刚性分类要求及刚性类别判断方法比较

Table 3 Comparisons of joint rigidity classification requirements and rigidity categorization criteria

标准 类型	节点转动刚度要求		节点构造要求		判断方法
	刚度取值	分类刚度界限	铰接构造	刚接构造	
中标				●	定性
美标		●	●	●	定性
欧标	●	●	●	●	定量

5.2 节点设计应用探讨

从表3可以看到,中标^[6]和手册^[1]对铰接节点没有提出明确的构造要求。美国和欧盟设计手册^[4-5]都规定了连接板和被连接梁腹板的最大厚度,欧盟设计手册^[5]还要求连接螺栓不加预紧力。因此在铰接节点设计中,可参考欧美设计手册,考虑保证铰接节点转动能力的构造作法。

由欧标^[3]梁柱节点和柱脚节点的刚性类别判断方法可以看到,节点刚性类别的判断不只是衡量节点的转动刚度数值大小,还与节点连接的杆件线刚度,结构体系类型等因素有关,不同的条件会得出不同的判断结果。

中标^[6]和手册^[1]都提及设计中尽量不要采用半刚接节点。在实际工程中如无法避免,又不能精细化设计时,应考虑节点转动刚度对结构分析的影响。

比如半刚接的柱脚节点,若计算模型输入铰接,柱脚转动刚度会被低估,结果产生过大的首层柱截面;若计算模型输入刚接,柱脚转动刚度会被高估,结果使结构产生过小的水平位移和二阶效应。

6 结 论

中美欧设计标准都是根据节点连接的力学特征对节点刚性进行分类的。中国对钢结构节点刚性分类的要求为概念性描述,美国只对梁柱节点刚性分类的转动刚度界限做了量化规定,因此中美标准只能由构造要求定性判断节点刚性类别。欧标给出了常用标准节点的转动刚度计算公式和节点刚性分类的转动刚度界限要求,可以根据具体情况定量判断节点刚性类别。钢结构节点设计应注意构造要求以及影响节点刚性类别判断的因素,在结构分析时要考虑简化计算模型应用的节点刚性类别对计算结果的影响。

参考文献

- [1] 秦斌. 钢结构连接节点手册[M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [2] American Institute of Steel Construction (AISC). Specification for structural steel buildings: AISC 360-22 [S]. Chicago: AISC, 2022.
- [3] European Committee for Standardization (ECS). Eurocode 3: design of steel structures: part 1-8: design of joints: EN 1993-1-8[S]. Brussels: ECS, 2024.
- [4] American Institute of Steel Construction (AISC). Steel construction manual[M]. 15th ed. Chicago: AISC, 2017.
- [5] Steel Construction Institute. Joints in steel construction: simple joints to Eurocode 3 [M]. Ascot: Steel Construction Institute, 2014.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [7] Steel Construction Institute. Joints in steel construction: moment-resisting joints to Eurocode 3 [M]. Ascot: Steel Construction Institute, 2013.

Comparisons of Steel Joint Rigidity Classification Criteria and Assessment Methods Under Chinese, American, and European Design Standards

Di Chen

(Beijing Petrochemical Engineering Co., Ltd., Beijing 100107, China)

Abstract:

In the design of steel structures, the rigidity classification of joints in the calculation model is necessary before conducting global analysis and member design. Therefore, determining the rigidity classification of joints is a fundamental and critical task in steel struc-

ture design. Through a comparative analysis of the definitions, classification requirements, and judgment methods for the rigidity classification of steel joints under elastic design in China, the United States, and the European Union, it was found that the design standards of all three regions classify joint rigidity according to the mechanical characteristics of the connections, categorizing them into three types: rigid, semi-rigid, and pinned joints. The requirements of joint rotational stiffness in Chinese, American and European standards are defined by the moment-angle ($M-\varphi$) curve of the joint. The joint rigidity classification in Chinese standards is based only on the conceptual description of the $M-\varphi$ curve, and neither the rotational stiffness of joints nor the rotational stiffness limit of joint rigidity classification can be defined quantitatively. Although the limit of rotational stiffness for the rigidity classification of beam-column joints is defined in American standards, there is no calculation method for the tangential stiffness of the joints. The calculation formula of rotational stiffness of common beam-column and column-base joints, as well as the requirements for the rotational stiffness limit in joint rigidity classification are given in EN standards. In terms of the detail requirements for joint rigidity classification, both American and European standards require that pinned joints must possess a certain rotational capacity, so the bolts and plates connected by end plates must meet flexibility and ductility requirements in detail, and ensure rotation capacity in the structure of the single-plate connection. Since rigid joint bear large bending moments, the flanges and webs of H-shaped steel columns often need to be strengthened, and the corresponding strengthening methods are provided in Chinese, American, and European standards. Therefore, both Chinese and American standards can only "qualitatively" determine joint rigidity classification through details. The European standards can "quantitatively" determine whether a joint is rigid, based on the calculation formula for the rotational stiffness of common joints and the rotational stiffness limit requirements for joint rigidity classification. Of course, for complex joins, it is still necessary to determine the $M-\varphi$ curve of through tests or finite element analysis. In the design of steel joints, attention should be paid to the detailing requirements and factors influencing the determination of joint rigidity classification. In structural analysis, the influence of joint rigidity classification which simplifies the application of the calculation model must be considered.

Keywords: steel joint; rigidity classification requirements; rigidity classification criteria; standard comparison