

文章编号: 1000-4750(2011)03-0055-07

平端板连接半刚性梁柱组合节点的初始转动刚度

高 婧¹, *石文龙², 李国强³, 叶志明⁴

(1. 厦门大学土木工程系, 厦门 361005; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072;

3. 厦门市公路桥隧维护中心, 厦门 361008; 4. 宝钢股份公司工程管理部, 上海 200122)

摘 要: 在现有研究成果的基础上, 推导了柱腹板抗压、抗拉和抗剪刚度; 钢筋抗拉刚度; 柱翼缘和端板抗弯刚度; 混凝土楼板抗压刚度等。在此基础上, 利用组件法, 推导了组合节点初始转动刚度的计算方法、考虑了组合节点承受正弯矩、负弯矩作用的情况。与试验数据比较表明: 该方法具有很好的计算精度。给出的初始刚度计算公式, 既适用于按照完全抗剪连接设计的组合节点, 也适用于按照部分抗剪连接设计的组合节点。

关键词: 半刚性; 连接; 初始转动刚度; 组件法; 节点

中图分类号: TU313 **文献标识码:** A

INITIAL ROTATIONAL STIFFNESS OF SEMI-RIGID COMPOSITE BEAM-TO-COLUMN JOINTS WITH FLUSH END PLATE CONNECTIONS

GAO Jing¹, *SHI Wen-long², LI Guo-qiang³, YE Zhi-ming⁴

(1. Department of Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

3. Highway Bridge & Tunnel Maintenance Center in Xiamen, Xiamen 361008, China;

4. Department of Engineering Management, Bao Steel Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Based on the current available research, the stiffnesses are developed for the column web in compression, tension and shear, rebar in tension, column flange and end plate in bending flexure, concrete slab in compression, etc. Based on these stiffnesses, a method has been developed for predicting the initial rotational stiffness of semi-rigid composite beam-to-column joints with a flush end-plate connection by the component method. In this method, the effects of both negative moment and positive moment are taken into account. Comparisons against experimental results have demonstrated that the method is capable of predicting the initial stiffness of flush endplate connections with very good accuracy, and can be used to calculate the initial rotational stiffness of the full shear connection and the partial shear connection composite joints.

Key words: semi-rigid; connection; initial rotational stiffness; component method; joint

连接的初始转动刚度^[1]是指连接在梁端弯矩作用下的转角处于线弹性范围内时所具有的刚度。大量试验表明^[2-5], 半刚性梁柱组合节点的初始转动刚度大大高于同类型的钢节点, 主要原因在于混凝土楼板内的纵向钢筋代替了梁柱之间的螺栓或焊缝连接, 为节点负弯矩区参与抗拉的主要组件。在

弹性计算分析和结构使用阶段, 节点较高的抗弯承载力和初始转动刚度可以增大结构的跨度、降低梁高、获得更大的使用空间。但是, 在半刚性梁柱组合节点刚度提高的同时, 节点区的非线性情况变得更为复杂, 节点区初始转动刚度的计算也更加困难。目前, 国内外研究人员针对不同的连接形式,

收稿日期: 2009-08-18; 修改日期: 2009-11-17

基金项目: 上海大学创新基金项目

作者简介: 高 婧(1979—), 女, 陕西韩城人, 讲师, 博士, 从事组合结构及桥梁结构研究(E-mail: gaojing@xmu.edu.cn);

*石文龙(1975—), 男, 黑龙江泰来人, 讲师, 博士, 从事钢结构和组合结构研究(E-mail: swlsxf@163.com);

李国强(1963—), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士, 从事结构工程研究;

叶志明(1954—), 男, 上海人, 教授, 博士, 上海大学副校长, 从事计算力学和工程力学研究。

已经提出了一些组合节点初始转动刚度的简化计算模型和计算公式。EC3^[6]给出了纯钢连接转动刚度的计算方法。EC4^[7]指出, 计算组合连接的转动刚度可参照纯钢连接的方法, 只须计入钢筋的贡献, 并给出了钢筋抗拉刚度的计算方法。文献[3]认为, 计算组合节点的初始转动刚度时, 可把钢筋的抗拉刚度和纯钢节点的抗拉刚度并联在一起考虑。但是, 目前的研究工作主要集中在组合节点承受负弯矩作用的情况, 而对于正弯矩作用的情况, 研究工作很少。本文在现有研究成果基础上, 利用组件法, 推导了正弯矩、负弯矩作用下组合节点初始转动刚度的计算方法。

1 确定连接初始转动刚度的组件法

EC3^[6]提出了组件法, 用来计算纯钢节点的初始转动刚度。该方法认为, 纯钢节点可看作是由一系列的组件所构成, 这样, 纯钢节点的受力特征就可以通过这些组件的受力特性来确定。根据 EC3 附录 J^[8], 对于平端板连接梁柱纯钢节点, 影响其受力性能的主要组件包括: 柱腹板受压、受拉和受剪, 柱翼缘和端板受弯, 螺栓受拉等。对于组合节点, 可借鉴 EC3 的组件法来计算其初始转动刚度, 只须在纯钢节点原有组件的基础上, 增加考虑组合楼板的组件即可。比如, 在负弯矩作用下, 增加考虑钢筋抗拉作用的组件; 在正弯矩作用下, 增加考虑混凝土楼板受压作用的组件等。

应用组件法计算连接初始转动刚度的步骤如下: 1) 确定对连接刚度有贡献的组件; 2) 计算各组件的刚度; 3) 根据各组件的刚度和组合节点的计算模型, 确定连接的初始转动刚度。

1.1 负弯矩作用下连接的初始转动刚度

在弹性阶段, 采用小变形假定, 连接初始转动刚度可由各组件自身的刚度计算得到。对于负弯矩

作用的情况, 本文采用图 1 所示的计算模型, 并遵循以下的计算假定: 1) 钢梁和组合楼板在受弯时均符合平截面假定; 2) 不考虑混凝土楼板的抗拉作用; 3) 在负弯矩作用下, 节点的转动中心位于钢梁下翼缘的底部。

从图 1 可知, 当多个组件位于同一高度时, 可用一个等效刚度 $k_{eq,i}$ (i 表示第 i 排螺栓) 来代替这一高度处各组件的刚度; 对于受力形式相同但所处高度不同的组件, 可用一个等效力臂 z_{eq} 来代替原来的力臂 z , 从而得到不同高度位置处各组件的等效刚度 k_{eq} 。

等效刚度可以采用下式计算:

$$k_{eq,i} = \frac{1}{1/k_{cw,t,i} + 1/k_{cf,i} + 1/k_{ep,i}} \quad (1)$$

式中: $k_{cw,t}$ 为柱腹板抗拉刚度; k_{cf} 为柱翼缘抗弯刚度; k_{ep} 为端板抗弯刚度; i 表示与第 i 排螺栓相对应。

在弯矩 M 作用下, 分别根据合力等效和弯矩等效, 见图 1(c)、图 1(d), 可以建立如下方程:

$$\begin{aligned} k_{eq} z_{eq} \theta &= k_r z \theta + \sum_i k_{eq,i} z_i \theta, \\ k_{eq} z_{eq}^2 \theta &= k_r z^2 \theta + \sum_i k_{eq,i} z_i^2 \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可得:

$$\begin{aligned} k_{eq} &= \frac{k_r z \theta + \sum_i k_{eq,i} z_i \theta}{z_{eq} \theta}, \\ z_{eq} &= \frac{k_r z^2 + \sum_i k_{eq,i} z_i^2}{k_r z + \sum_i k_{eq,i} z_i}. \end{aligned} \quad (3)$$

在弯矩 M 作用下, 在 z_{eq} 处由于钢筋受拉、柱腹板受拉、端板受弯、螺栓受拉产生的总变形为:

$$\delta_T = M / (z_{eq} k_{eq}) \quad (4)$$

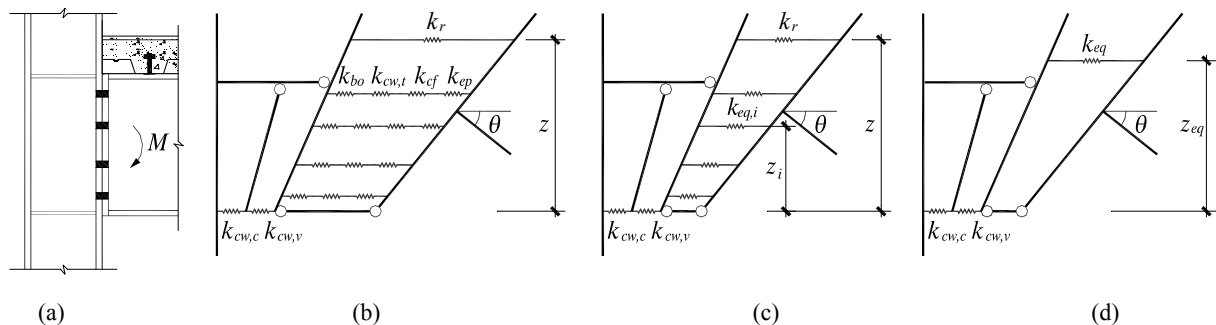


图 1 负弯矩作用下组合节点初始转动刚度计算模型

Fig.1 The theoretical model for composite connections under negative moment

柱腹板受压变形为:

$$\delta_c = M/z_{eq}k_{cw,c} \quad (5)$$

假设柱截面上的剪力全部由柱腹板承担, 则柱腹板在 z_{eq} 高度范围内产生的剪切变形量为:

$$\delta_v = M/(z_{eq}k_{cw,v}) \quad (6)$$

因此, 连接的相对转角为:

$$\theta = \frac{\delta_T + \delta_c + \delta_v}{z_{eq}} = \frac{M}{z_{eq}^2} \left(\frac{1}{k_{eq}} + \frac{1}{k_{cw,c}} + \frac{1}{k_{cw,v}} \right) \quad (7)$$

连接的初始抗弯刚度为:

$$K_i = \frac{M}{\theta} = \frac{z_{eq}^2}{1/k_{cw,c} + 1/k_{cw,v} + 1/k_{eq}} \quad (8)$$

1.2 正弯矩作用下连接的初始转动刚度

当组合节点承受正弯矩作用时, 混凝土楼板处于受压状态。计算正弯矩作用下组合节点的初始转动刚度时, 可采取与负弯矩作用下初始转动刚度类似的计算方法, 计算模型如图 2 所示, 并遵循以下的计算假定: 1) 钢梁和混凝土楼板在受弯时均符合平截面假定; 2) 不考虑钢筋的抗压作用; 3) 在正弯矩作用下, 节点的转动中心位于混凝土楼板上表面。

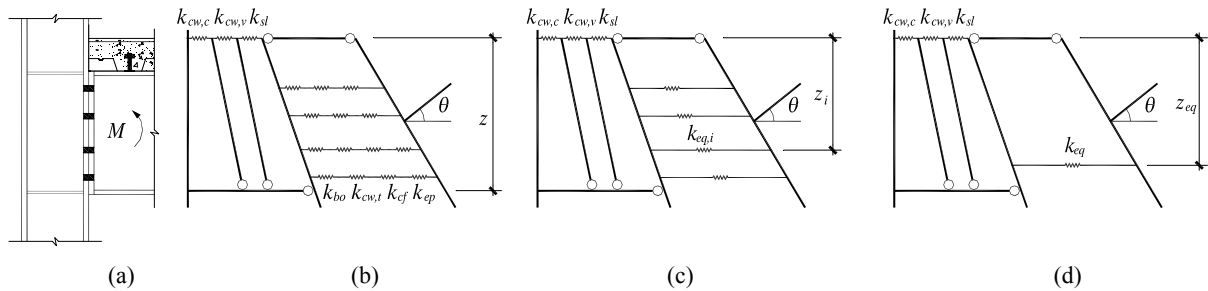


图 2 正弯矩作用下组合节点初始转动刚度计算模型

Fig.2 The theoretical model for composite connections under positive moment

2 组件刚度和连接初始转动刚度

2.1 柱腹板抗压刚度

对于柱腹板无加劲肋的连接来说, 柱腹板的受压变形不可忽略。可将柱腹板简化为两对边固支、承受均布荷载作用的矩形板(图 3), 按照弹性力学的平面应力问题^[9]来处理。柱腹板在由端板传来的压力 $F_{c,bf}$ 作用下的变形可按下列下式计算:

$$\delta_{cw,c} = [F_{c,bf}h_{cw}(1-\nu^2)]/(Et_{cw}b'_{eff,cw}) \quad (9)$$

式中: $b'_{eff,cw}$ 为柱腹板的有效受压宽度; h_{cw} 为柱腹板高度; E 为柱腹板钢材的弹性模量; t_{cw} 为柱腹板厚度; ν 为柱腹板钢材的泊松比。

据此, 可以得到柱腹板的抗压刚度:

$$k_{cw,c} = \frac{F_{c,bf}}{\delta_{cw,c}} = (Et_{cw}b'_{eff,cw})/[h_{cw}(1-\nu^2)] \quad (10)$$

考虑梁翼缘传来的压力在柱腹板内按 45° 角扩散^[10](图 3), 柱腹板有效受压宽度为: 热轧型钢截面, $b'_{eff,cw} = t_{bf} + 2h_{f,ep} + 2t_{ep} + 2(t_{cf} + r_c)$; 焊接型钢截面, $b'_{eff,cw} = t_{bf} + 2h_{f,ep} + 2t_{ep} + 2(t_{cf} + h_{f,cf})$ 。式中, t_{bf} 为梁翼缘厚度; $h_{f,ep}$ 为钢梁与端板之间连接焊缝有效高度; t_{ep} 为端板厚度; t_{cf} 为柱翼缘厚度; r_c 为柱翼缘根部半径; $h_{f,cf}$ 为柱翼缘与腹板连接焊缝

有效高度。

当柱腹板设有与梁翼缘平齐的横向加劲肋时, 梁翼缘传来的压力主要由加劲肋来承担。在此情况下, 柱腹板抗压刚度为其它细部构造均相同的无加劲肋连接的刚度加上加劲肋的刚度:

$$k_{cw,c} = [E(t_{cw}b'_{eff,cw} + t_s b_s)]/[h_{cw}(1-\nu^2)] \quad (11)$$

式中, t_s 和 b_s 分别为柱横向加劲肋的厚度和宽度。

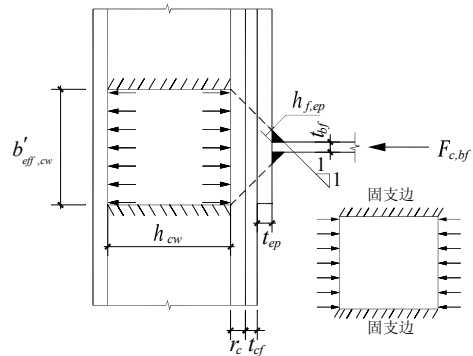


图 3 柱腹板受压模型

Fig.3 The model for column webs in compression

2.2 柱腹板抗拉刚度

柱腹板抗拉刚度的推导过程与其抗压刚度十分相似, 在梁翼缘传来的拉力 $F_{t,bf}$ 的作用下, 柱腹板拉伸变形按下式计算:

$$\delta_{cw,t} = [F_{t,bf} h_{cw} (1 - \nu^2)] / (E t_{cw} b'_{eff,cw}) \quad (12)$$

由此可得柱腹板抗拉刚度为:

$$k_{cw,t} = \frac{F_{t,bf}}{\delta_{cw,t}} = (E t_{cw} b'_{eff,cw}) / [h_{cw} (1 - \nu^2)] \quad (13)$$

当柱腹板在受拉区设有横向加劲肋时, 柱腹板抗拉刚度按照与受压时相同的方法考虑:

$$k_{cw,t} = [E(t_{cw} b'_{eff,cw} + t_s b_s)] / [h_{cw} (1 - \nu^2)] \quad (14)$$

2.3 柱腹板抗剪刚度

为计算柱腹板的剪切变形, 可将其假定为一个受剪力作用的短柱来考虑^[11](图 4)。由图 4 可知, 柱腹板在剪力作用下的剪切变形为:

$$\delta_{cw,v} = (V z_{cw,v}) / (G A_{v,cw}) \quad (15)$$

式中: G 为柱腹板钢材剪切模量; $z_{cw,v}$ 为柱腹板的受剪高度, 在负弯矩作用下, 取为钢筋中心至钢梁下翼缘中心的距离; 在正弯矩作用下, 取为最下一排螺栓至楼板上表面的距离; $A_{v,cw}$ 为柱腹板的有效抗剪面积: 对于热轧截面: $A_{v,cw} = A_c - 2b_{cf} t_{cf} + (t_{cw} + 2r_c) t_{cf}$; 对于焊接截面: $A_{v,cw} = h_{cw} t_{cw}$, A_c 为柱全截面面积。

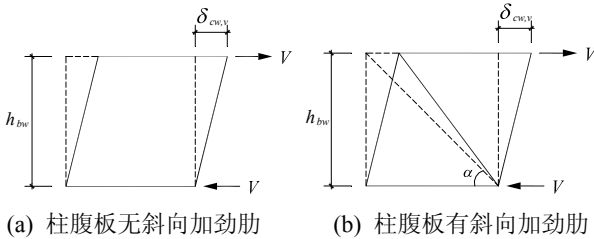


图 4 柱腹板的剪切变形

Fig.4 The shear deformation of column webs

剪切模量与弹性模量之间的关系为^[9]:

$$G = E / [2(1 + \nu)] \quad (16)$$

式中: ν 为钢材的泊松比, 可取为 0.3。将式(16)以及 $\nu = 0.3$ 代入式(15)中, 可得:

$$\delta_{cw,v} = (2.6 V z_{cw,v}) / (E A_{v,cw}) \quad (17)$$

取柱腹板的剪切区域为隔离体, 设作用在节点左、右两侧的梁端弯矩分别为 M_1 和 M_2 , 则作用在腹板上的剪力 V 可以由 M_1 和 M_2 表示为:

$$V = (M_1 + M_2) / z_{cw,v} \quad (18)$$

梁翼缘拉力与柱腹板所受剪力之间的关系为^[1]:

$$V = \beta F_{t,bf} = \beta M / z_{cw,v} \quad (19)$$

式中: M 为作用在节点两侧的梁端弯矩; β 为与连接受剪边数有关的参数, 按下式计算:

$$\beta = \begin{cases} 1 + M_2 / M_1, & M = M_1 \\ 1 + M_1 / M_2, & M = M_2 \end{cases}, \beta \leq 2 \quad (20)$$

由式(17)和式(19), 可得柱腹板的抗剪刚度为:

$$k_{cw,v} = F_{t,bf} / \delta_{cw,v} = (0.385 E A_{v,cw}) / (\beta z_{cw,v}) \quad (21)$$

对于边柱的梁柱连接, 柱腹板单边受剪, $\beta = 1$; 对于中柱的梁柱连接, β 取值如下: 1) 节点两侧所承受的弯矩大小相等、方向相反时, $\beta = 0$; 2) 节点两侧所承受的弯矩大小相等、方向相同时, $\beta = 2$; 3) 其它情况按照式(20)计算。

柱腹板有斜向加劲肋时(图 4(b)), 其剪切变形包括以下两部分: 1) 剪切变形 δ_1 ; 2) 斜向加劲肋变形 δ_2 。设对应的剪力分别为 V_1 和 V_2 , 这两个剪力以及其所引起的变形需满足以下平衡方程和变形协调方程:

$$V = V_1 + V_2 \quad (22)$$

$$\delta_{cw,v} = \delta_1 = \delta_2 \quad (23)$$

δ_1 可采用式(17)计算, 并考虑参数 β 的影响:

$$\delta_1 = (2.6 \beta V_1 z_{cw,v}) / (E A_{v,cw}) \quad (24)$$

δ_2 可以采用与计算格构柱类似的方法确定:

$$\delta_2 = (V_2 l_{st}) / (E_{st} A_{st} \cos^2 \alpha) \quad (25)$$

$$\cos \alpha = h_{cw} / l_{st}$$

式中: l_{st} 为斜加劲肋长度; E_{st} 为斜加劲肋的弹性模量; A_{st} 为斜加劲肋的横截面积, $A_{st} = b_{st} t_{st}$, 其中 b_{st} 、 t_{st} 为分别为斜加劲肋的宽度和厚度。

将式(24)、式(25)代入式(22)和式(23), 可得到柱腹板设有斜加劲肋时, 柱腹板的剪切变形:

$$\delta_{cw,v} = \frac{F}{E [A_{st} h_{cw}^2 / l_{st}^3 + A_{v,cw} / (2.6 \beta z_{cw,v})]} \quad (26)$$

柱腹板的抗剪刚度为:

$$k_{cw,v} = E [A_{st} h_{cw}^2 / l_{st}^3 + A_{v,cw} / (2.6 \beta z_{cw,v})] \quad (27)$$

2.4 钢筋抗拉刚度

纵向钢筋抗拉刚度是组合节点所特有的, 正是由于它的参与才使得组合节点的初始转动刚度较纯钢节点有了较大提高。在确定钢筋抗拉刚度时, 其计算长度的选取是一个关键问题。目前, 研究人员提出了一些计算公式^[12-13], 但差别不大。本文取钢筋的计算长度为柱截面高度的一半, 可得钢筋的抗拉刚度为:

$$k_r = 2 E_r A_r / h_c \quad (28)$$

式中: E_r 为钢筋弹性模量; A_r 为楼板有效宽度范围内纵向受力钢筋的总面积; h_c 为柱截面高度。

为考虑钢梁与混凝土楼板之间的相对滑移对组合节点初始转动刚度的影响, 引入一个折减系数 k_{stud} , 将式(28)表示的钢筋抗拉刚度乘以此折减系

数, 得到一个新的钢筋抗拉刚度:

$$k_r^T = k_{stud} \cdot k_r \quad (29)$$

折减系数 k_{stud} 按照下式计算^[14]:

$$k_{stud} = 1/(1 + k_r/K_{sc}) \quad (30)$$

其中:

$$K_{sc} = \frac{N_{sc} k_{sc}}{v - [h_s(v-1)]/[d_s(1+\xi)]} \quad (31)$$

$$v = \sqrt{[(1+\xi)N_{sc}k_{sc}l_{eff,b}d_s^2]/(E_b I_b)} \quad (32)$$

$$\xi = (E_b I_b)/(d_s^2 E_r A_r) \quad (33)$$

式中: d_s 为钢筋中心至钢梁截面高度中心的距离; N_{sc} 为梁长 $l_{eff,b}$ 范围内栓钉的数量; $l_{eff,b}$ 为梁受负弯矩作用的长度, 可近似取为梁长的 0.15 倍; h_s 为钢筋中心至转动中心的距离; E_b 为钢梁弹性模量; I_b 为钢梁转动惯量; k_{sc} 为单个栓钉的抗剪刚度, $k_{sc}=200\text{kN/mm}^{[15]}$ 。

2.5 柱翼缘和端板的抗弯刚度

将柱翼缘和加劲肋或腹板的一部分以及端板和梁翼缘看作 T 形连接件进行分析。研究表明^[16]: 螺栓预拉力对连接的转动刚度有显著的影响, 主要原因在于螺栓的预拉力改变了 T 形连接件翼缘板梁模型的计算跨度及其边界约束条件, 从而影响了整个 T 形连接件的受力性能。由于螺栓预拉力的影响, 螺栓轴线处 T 形连接件翼缘板的变形受到很大的限制。分析时可假定 T 形连接件翼缘板为跨中作用有一集中力的两端固接梁(图 5), 它的计算跨度 l_T^* 可取为 $2m$ 。忽略螺栓撬力的影响, 将螺栓的伸长量 δ_{bo} 作为支座的刚体位移来考虑, 则 T 形连接件翼缘板的变形为:

$$\delta_T = (F_T l_T^{*3})/(192E_T I_T) + \delta_{bo} \quad (34)$$

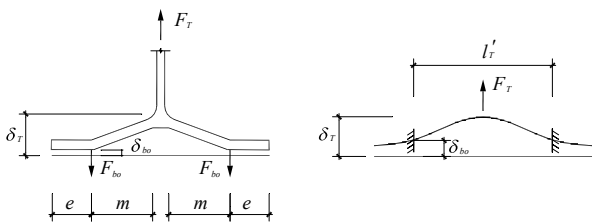


图 5 T 形连接件的等效固端梁模型

Fig.5 Fixed beam model of T-stub connections

螺栓在承受外荷载 F_T 之前已承受预拉力 P , 它和 T 形连接件翼缘接触面之间的挤压力 F_C 相平衡, 即 $P=F_C$ 。在 F_T 的作用下, 螺栓拉力由 P 增加至 P_f , 而接触面之间的挤压力减小至 $F_{c,f}$, 因此有 $P_f=F_T+F_{c,f}$ 。此时, 螺栓伸长量 δ_{bo} 和板件压缩恢

复量 δ_p 分别为:

$$\delta_{bo} = (P_f - P)/k_{bo} \quad (35)$$

$$\delta_p = (F_c - F_{c,f})/k_p \quad (36)$$

式中: k_{bo} 和 k_p 分别为螺栓和板件的线刚度, $k_{bo} = E_{bo} A_{bo}/l_{bo}$, $k_p = E_p A_p/t_p$ 。

根据变形协调条件, 螺栓伸长量应等于板件压缩恢复量, 即有:

$$(P_f - P)/k_{bo} = (F_c - F_{c,f})/k_p \quad (37)$$

将 $P = F_C$, $P_f = F_T + F_{c,f}$ 代入式(37)可得:

$$P_f = P + F_T/(1+\lambda) \quad (38)$$

式中, λ 为板件与螺栓的线刚度之比。

假设接触面承受螺栓预拉力的有效承压面积为 A_p , 压力 F_C 均匀分布于面积 A_p 上(图 6), 有:

$$A_p = \pi[2(t_p + t_{wh}) + d_n]^2 - A_0 \quad (39)$$

式中: t_p 为螺栓连接的板厚; t_{wh} 为螺栓垫圈的厚度; d_n 为螺帽直径; A_0 为螺栓孔面积。

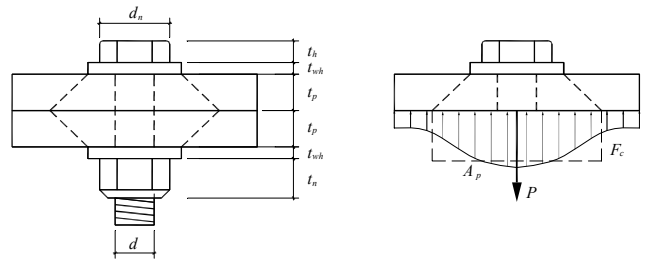


图 6 板件的有效承压面积

Fig.6 Effective compression area of bolted plate

螺栓预拉力对柱翼缘和端板抗弯刚度的影响, 就是体现在 $(1+\lambda)$ 这一项上。如果忽略螺栓垫圈的厚度, 即认为板厚与螺栓杆的有效长度 l_{bo} 相等, 同时设板件与螺栓的弹性模量相同, 可得:

$$\lambda = k_p/k_{bo} = A_p/A_{bo} \quad (40)$$

一般来说, A_p 与 A_{bo} 的比值在 3—20 之间不等^[17], 文献[18]建议取 $A_p/A_{bo}=10$, 代入式(38), 有:

$$P_f = P + F_T/11 \quad (41)$$

将式(41)代入式(35), 有:

$$\delta_{bo} = F_T/(11k_{bo}) \quad (42)$$

将式(42)代入式(34), 有:

$$\delta_T = (F_T l_T^{*3})/(192E_T I_T) + F_T/(11k_{bo}) \quad (43)$$

因此, T 形连接件的刚度为:

$$k_T = 1/[l_T^{*3}/(192E_T I_T) + t_p/(11E_{bo} A_{bo})] \quad (44)$$

在计算柱翼缘以及端板考虑螺栓预拉力影响的抗弯刚度时, 只需将式(44)中的参数取为柱翼缘和端板的相应参数即可:

$$k_{cf} = 1/[l'_{cf}{}^3/(192E_{cf}I_{cf}) + t_{cf}/(11E_{bo}A_{bo})] \quad (45)$$

$$k_{ep} = 1/[l'_{ep}{}^3/(192E_{ep}I_{ep}) + t_{ep}/(11E_{bo}A_{bo})] \quad (46)$$

式中: $l'_{cf} = 2m_c$; $l'_{ep} = 2m_e$ 。

2.6 混凝土楼板抗压刚度

当节点承受正弯矩作用时,混凝土楼板处于受压状态,其抗压刚度对节点的初始转动刚度有贡献。文献[12]采用T形连接件方法,对混凝土楼板受压的情况进行了研究,给出了混凝土楼板的抗压刚度:

$$k_{sl} = (E_c^2 \sqrt{b_{eff,sl} l_{eff,sl}}) / (1.275 E_s) \quad (47)$$

式中: E_c 、 E_s 分别为楼板混凝土材料和钢柱材料的弹性模量; $b_{eff,sl}$ 为T形连接件翼缘的宽度,可以取为混凝土楼板与柱翼缘接触处的厚度; $l_{eff,sl}$ 为T形连接件翼缘的长度,可以取为柱翼缘的宽度。

2.7 其它组件的刚度

在计算转动刚度时,还需考虑梁翼缘和梁腹板的抗压刚度、梁腹板的抗拉刚度等。根据文献[12],可认为这些组件所贡献的刚度为无穷大,即不会引起连接变形。因此,可不考虑这些组件对刚度的贡献。

3 试验验证

为验证提出的组合节点初始转动刚度的计算方法,对一些文献中的试验试件进行了计算和验证,试件的几何参数和材料参数可以参见相关文献,计算结果见表1和表2,从中可以得到以下结论:

表1 负弯矩作用下的计算结果 /($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

Table 1 The calculated results under negative moment

文献来源	构件编号	计算值 C	试验值 T	$(C-T)/T(\%)$
文[16]	CJ1	28370	28784	-1.44
	CJ2	28370	27648	2.61
	CJ3	44370	45231	-1.90
文[17]	SCCB1	35830	36265	-1.20
	SCCB2	49810	56328	-11.57
	SCCB3	56770	83125	-31.71
	SCCB4	40120	37978	5.64
文[18]	Joint-3	38300	40377	-5.14
	Joint-6	38300	39195	-2.28
文[19]	Test2	157900	142000	11.20
	Test3	157900	144000	9.65
	Test4	149100	136000	9.63
	Test5	168900	211000	-19.95
	SJ1	7340	6930	5.92
文[20]	CJ3	16320	19510	-16.35
	CJ4	15080	17715	-14.87

表2 正弯矩作用下的计算结果 /($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

Table 2 The calculated results under positive moment

文献来源	构件编号	计算值 C	试验值 T	$(C-T)/T(\%)$
文[16]	CJ1	16530	17043	-3.01
	CJ2	16530	16987	-2.69
	CJ3	23540	27757	-15.19
文[20]	SJ1	7340	6930	5.92

1) 本文给出的组合节点初始转动刚度的计算公式,其计算值与试验值吻合程度较好。

2) 对于大部分试验试件,节点初始转动刚度的计算值均小于其试验值。

3) 对于承受非对称荷载作用的试件,其计算值与试验值吻合程度很好;而承受对称荷载作用时,吻合程度稍差一些,原因在于计算柱腹板抗剪刚度时, β 的取值对于非对称荷载作用的情况,更符合其真实情况。

4) 对于正弯矩作用下组合节点的初始转动刚度,其计算值与试验值吻合程度也较好。

4 结论

考虑混凝土楼板中的纵向钢筋对负弯矩作用下半刚性组合节点初始转动刚度的贡献,既符合实际受力情况,又具有重要的经济意义。首先推导了:

1) 柱腹板抗压、抗拉和抗剪刚度; 2) 钢筋抗拉刚度; 3) 柱翼缘和端板抗弯刚度; 4) 混凝土楼板抗压刚度; 其次,在前人研究成果的基础上,考虑钢梁与混凝土楼板之间的相对滑移对节点初始转动刚度的影响,利用组件法,分别推导了组合节点在正、负弯矩作用下初始转动刚度的计算方法。与试验结果的比较表明,给出的组合节点初始转动刚度的计算公式与试验结果吻合较好,虽存在一定的误差,但总体精度可满足工程设计的要求。通过分析过程和与试验结果的对比可知,采用组件法计算连接的初始刚度是简单而有效的,文中对于连接组件的选取是合理的,给出的计算公式可以比较准确地计算连接的初始转动刚度。本文给出的理论计算公式,既适用于按照完全抗剪连接设计的组合节点,也适用于按照部分抗剪连接设计的组合节点。

参考文献:

- [1] 张建明. 钢框架梁柱节点端板螺栓连接静力工作性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
Zhang Jianming. Research on static performance of steel

- frames with bolted end plate connections [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002. (in Chinese)
- [2] Xiao Y, Choo B S, Nethercot D A. Composite connections in steel and concrete. I. Experimental behavior of composite beam-column connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1994, 31(1): 3–30.
- [3] Simões da Silva L, Simões Rui D, Cruz Paulo J S. Experimental behavior of end-plate beam-to-column composite joints under monotonical loading [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(11): 1383–1409.
- [4] Li T Q, Moore D B, Nethercot D A. The experimental behavior of a full-scale, semi-rigidly connected composite frame: overall considerations [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1996, 39(3): 167–191.
- [5] Li T Q, Nethercot D A, Choo B S. Behaviour of flush end-plate composite connections with unbalanced moment and variable shear/moment ratios-I. Experimental behavior [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1996, 38(2): 125–164.
- [6] DD ENV 1993-1-1, Eurocode No.3: Design of steel structures-part 1 [S]. London: BSI, 1992.
- [7] ENV1994-1-1, Eurocode No.4: Design of composite steel and concrete structures-part 1.1 [S]. Brussels, 1993.
- [8] DD ENV 1993-1-1, Eurocode No.3: Design of steel structures, revised annex J [S]. Brussels, 1997.
- [9] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003. Wu Jialong. *Elastic mechanics* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. (in Chinese)
- [10] Faella C, Piluso V, Rizzano G. *Structural steel semi-rigid connections* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [11] Yee K L, Melchers R E. Moment-rotation curves for bolted connections [J]. *Journal of Civil Engineering*, 1986, 11(2): 615–635.
- [12] prEN 1993-1-8, Eurocode No.3: Design of steel structures-part1.8 [S]. Brussels, 2003.
- [13] Rassati G A, Leon R T, Noe S. Component modeling of partially restrained composite joints under cyclic and dynamic loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(2): 343–351.
- [14] Aribert J M, Lachal A. Partial shear connection adjacent to a beam-to-column composite joint subject to static and cyclic loads [C]// *Proceedings of the first international conference on steel & composite structures*. Pusan, Korea, 2001: 14–16
- [15] Ahmed B, Nethercot D A. Prediction initial stiffness and available rotation capacity of major axis composite flush endplate connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1997, 42(1): 31–60.
- [16] Liew J Y Richard, Teo T H, Shanmugam N E. Composite joints subject to reversal of loading-part 1: Experimental study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(2): 221–246.
- [17] Richard Liew J Y, Teo T H, Shanmugam N E. Testing of steel-concrete composite connections and appraisal of results [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2000, 56(2): 117–150.
- [18] 王静峰. 竖向荷载作用下半刚性连接组合框架的实用设计方法[D]. 上海: 同济大学, 2005. Wang Jingfeng. *The practical design approach of semi-rigidly connected composite frames under vertical loads* [D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese)
- [19] Brown N D, Anderson D A. Structural properties of composite major axis end plate connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(3): 327–349.
- [20] 石文龙. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的试验与理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. Shi Wenlong. *Experimental and theoretical study on semi-rigid beam-to-column composite joints with flush end-plate connection* [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)