

钢结构梁柱栓焊连接节点设计要点

黄 贤

中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京 210000

[摘要]随着钢结构的不断推广应用, 钢结构节点连接计算方法也已成熟, 本篇文章针对梁柱连接节点中的栓焊连接的计算要点, 根据多本现行规范, 逐一分析, 归纳总结, 供设计人员参考。其中包括弹性验算阶段, 翼缘和腹板的弯矩分配问题, 等强设计是如何进行等强计算的, 如何计算受弯极限承载力, 如何实现强连接弱构件, 有关节点域抗剪承载力的验算, 《建筑抗震设计规范》和《高层民用建筑钢结构设计规程》规定有何区别。

[关键词]梁柱连接; 等强设计; 受弯极限承载力

DOI: 10.33142/sca.v5i5.7371

中图分类号: TU973.13

文献标识码: A

Key Points in Design of Steel Structure Beam Column Bolted and Welded Joints

HUANG Xian

MCC Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: With the continuous promotion and application of steel structure, the calculation method of steel structure node connection has become mature. This article analyzes and summarizes the calculation points of bolt welded connection in beam column connection node one by one according to several current specifications for designers' reference. It includes the elastic checking calculation stage, the bending moment distribution of flange and web, how to calculate the equal strength design, how to calculate the bending ultimate bearing capacity, how to realize the strong connection of weak members, the checking calculation of the shear bearing capacity of the node area, and what are the differences between the provisions of the "Code for Seismic Design of Buildings" and the "Code for Design of Steel Structures of High Rise Civil Buildings".

Keywords: beam column connection; constant strength design; ultimate flexural capacity

引言

梁与柱刚性连接时, 可采用全焊接连接节点、栓焊混合连接节点、全栓接连接节点。其中, (1) 全焊接连接的传力最充分, 不会滑移, 良好的焊接构造和焊接质址可提供足够的延性, 但要求对焊缝的焊接质量进行探伤检查, 此外、采用全焊接连接节点不可避免地会出现焊接应力及焊接残余变形。(2) 全栓接连接施工较方便, 但连接或拼接全部采用高强度螺栓, 会使接头尺寸过大, 板材消耗较多, 且高强螺栓价格也较贵, 此外, 螺栓连接不能避免在大震时滑移。在高层钢结构的工程实践中, 柱的拼接多采用全焊接, 而抗震支撑的连接或拼接, 为方便, 大多用高强度螺栓连接。(3) 栓焊混合连接应用比较普遍, 即翼缘用焊接, 腹板用螺栓连接。先用螺栓安装定位然后对翼缘施焊, 具有施工上的优点。(4) 抗震节点, 此类新型节点通过在梁上、下翼缘局部范围焊接钢板或加大梁截面, 也可对梁翼缘进行局部削弱, 达到提高节点延性, 在强震作用下获得在远离梁柱节点处梁截面塑性发展的设计目标, 塑性较外移, 梁端强连接弱构件的节点设计原理, 梁柱栓焊连接刚性节点是目前钢结构框架中应用最普遍的一类节点。主要有五大验算要点: a. 梁端部验算和螺栓承载力; b. 连接板承载力; c. 受弯极限承载力; d. 受剪极限承载力;

e 节点域抗剪承载力。

1 梁端部验算和螺栓承载力 (弹性)

主流设计方法分为两种, 第一种是假设梁翼缘承担全部梁端弯矩, 梁腹板承担全部梁端剪力。当主梁翼缘翼缘提供的塑性截面模量大于梁全截面塑性模量的 70%, 可采用第一种方法。第二种是不满足上述 70% 的要求情况下, 假设梁腹板除承担全部剪力外, 还与梁翼缘一起承担弯矩。梁翼缘和腹板分担弯矩的大小根据其刚度比确定。

$$M_f = M * \frac{I_f}{I}, M_w = M * \frac{I_w}{I} \quad (1)$$

在日常设计工作中, 大部分钢梁截面均能满足上述 70% 的要求, 但应注意此处取用的塑性截面模量, 而非《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[1] (简称《新钢标》) 6.1.1 条中的弯矩强度验算中的弹性截面模量。第二种方法腹板既受剪又受弯, 螺栓和连接焊缝都出在双向应力状态, 此处应注意和简化设计方法区分对比。

弯矩等强设计方法在梁端验算中广泛应用, 有利于钢结构加工的便利性, 其本质是端部弯矩设计值和剪力设计值均与构件截面大小有关, 跟结构内力计算结果不关联。这样大大简化了钢梁加工和螺栓布置的种类, 但设计人员应注意, 此处均为弹性设计, 取值均为弹性截面模量, 且

由于是强度计算，为扣除开洞的净截面模量。

螺栓计算剪力为端部设计剪力，梁腹板净截面抗剪承载力的一半，端部弯矩/净跨计算的剪力三者取大，一般民用建筑普通荷载作用下，腹板净截面抗剪承载力一半为控制值。假设忽略梁轴力的情况下，螺栓仅承受竖直方向剪力。由于栓焊混合连接一般采用先栓后焊的方法，考虑翼缘焊接热影响引起的高强螺栓预应力损失，计入 0.9 的热损失系数，引自《钢结构设计手册》第四版^[2]，此处 0.9 系数为规范螺栓承载力设计值公式外的附加折减系数，同该公式中的 0.9 不冲突，为实际应力留有余度。

$$N_V^b = 0.9k_n\mu P \quad (2)$$

钢结构规范中 11.4.2 条文说明中，0.9=1/1.11，为抗力分项系数。栓焊连接计算时，螺栓承载力考虑焊接影响，应取 0.9N_V^b。

2 连接板的承载力（弹性）

连接板和柱翼缘之间一般采用双面角焊缝，焊缝验算应满足要求。此处因注意单板连接和双板连接，双连接板实际只存在两条角焊缝，另外一块节点板多采用单边坡口焊接，若设计四条角焊缝，不免增加安装上的难度。在实际设计案例中，角焊缝应力计算较容易满足，这是因为无论是按实际内力连接设计，还是等强连接设计，腹板的抗剪强度均没有完全发挥，从《钢结构连接节点设计手册》（第四版）^[3]中看出在等强设计时，剪力取值为实际端部剪力、腹板抗剪承载力的 1/2、梁两端弯矩代数和除以梁净长三种情况取大值，也就是说常规意义的等强设计只是受弯等强，并不是同时考虑受剪等强，这是长久以来经过经验总结得出的习惯算法，也可以理解为对螺栓设计经济性的考虑。在实际节点内力计算中，这种腹板抗剪承载力一半的等强设计也满足大部分工程结构的需要。

连接板自身的净截面强度验算中只需将连接板的螺栓孔位扣除即可，在等强设计中，一般连接板净截面强度验算不起控制作用，因为大部分连接板实际尺寸均达到腹板高度的一半以上，甚至更多。

3 受弯极限承载力（塑性）

《新钢标》17.2.9 条和《高层民用建筑钢结构设计规程》（JGJ 99-2015）（简称《高钢规》）^[4] 8.2.4 条都对梁柱连接的极限受弯承载力做出了规定。二者总体思路都是与塑性耗能区（梁柱节点）连接的极限承载力应大于其连接构件的屈服承载力乘以连接系数。

$$M_{u2} \geq \eta_j^f \times M_{pf} + \eta_j^w \times M_{pw} \quad (3)$$

以 Q345 钢为例，不采用改进型过焊孔的情况下，《新钢标》17.2.9 条对连接系数规定如下，翼缘连接系数： $\eta_j^f=1.30$ ，腹板连接系数： $\eta_j^w=1.35$ 。《高钢规》8.1.3 条对连接系数规定如下，翼缘连接系数：1.35，腹板连接

系数：1.40。《高钢规》由于应用于高层建筑，可看出明显比《新钢标》的规定要严格。《新钢标》从性能化角度对构件的屈服承载力如何计算给出了规定，根据表 17.2.2-2，构件截面模量根据宽厚比的分级，分别取值，从中可看出 S1S2 级截面由于考虑塑性转动能力，相对 S3S4 级截面对梁柱连接的要求提出了更高的要求，《高钢规》也是同样的要求，统一采用塑性截面模量，且《高钢规》8.2.4 条对连接区的极限受弯承载力给出了明确计算方法。

以柱截面尺寸：箱 500X500x18x18；材料：Q345；梁截面尺寸：WH500X200X8X12；材料：Q345；连接设计方法：等强连接设计；设计不考虑梁轴力；梁翼缘塑性截面模量/全截面塑性截面模量：0.72 > 0.7，采用常用设计法；连接系数取值采用《新钢标》规定。

梁翼缘的塑性受弯承载力：

$$M_{pf} = W_{pf} \times f_y = 200 \times 12.00 \times (500 - 12.00) \times 345.00 = 404.06 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

梁腹板的塑性受弯承载力：

$$M_{pw} = W_{pw} \times f_y = (500 - 2 \times 12.00)^2 \times 8.00 / 4 \times 345.00 = 156.34 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5)$$

梁翼缘的极限受弯承载力：

$$M_{uf} = A_f \times (H - T_f) \times f_u = 200 \times 12.00 \times (500 - 12.00) \times 470.00 = 550.46 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (6)$$

梁腹板的极限受弯承载力：

$$W_{pe} = T_w \times (H - 2 \times (T_f + r))^2 / 4 = 8.00 \times (500 - 2 \times (12.00 + 35))^2 / 4 = 329672.00 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

$$m = \min\left\{1.4 \frac{t_{fc}}{d_j} \sqrt{\frac{b_j \times f_{yc}}{T_w \times f_{yw}}}, \min\left\{1.4 \times \frac{18}{476.00} \sqrt{\frac{464 \times 335.00}{8.00 \times 345.00}}\right\}\right\} = 1.00 \quad (8)$$

$$M_{uw} = m \times W_{pe} \times f_y = 1.00 \times 329672.00 \times 345.00 = 113.74 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (9)$$

梁极限受弯承载力为：

$$M_u = M_{uf} + M_{uw} = 550.46 + 113.74 = 664.20 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (10)$$

$$M_u < \eta_j^f \times M_{pf} + \eta_j^w \times M_{pw} = 736.34 \text{ kN} \cdot \text{m}, \text{ 不满足}$$

要求需要重新设计加强。后续设计通过加宽翼缘或者翼缘贴板，来增加翼缘的极限受弯承载力达到规范要求。

在极限受弯承载力计算中，梁翼缘的极限受弯承载力采用的钢材抗拉强度的最小值 f_u ，梁腹板的极限受弯承载力采用的是钢材的屈服强度 f_y ， $f_u/f_y=1.36$ ，从规范此处的规定也可推断，腹板在承载力极限状态下，都基本

保证强度在屈服强度范围, 以免进入硬化阶段, 出现不可控的较大变形, 导致截面形式发生较大改变, 使得力学模型发生变化。下图为增强型连接的几种形式。



图1 加楔形盖板 图2 直接加宽梁翼缘 图3 加矩形盖板

以上三种加强型连接形式原理均为加大梁翼缘在连接处的截面面积, 人为使得塑性较外移, 保护梁柱连接节点端部不出现塑性破坏。节点1应用较为广泛, 方便钢结构加工, 要求柱对应的横向加劲肋顶端应和盖板顶端标高齐平, 横向加劲肋厚度不应小于梁翼缘厚度+2。图2异形板加工比较麻烦, 应用收到限制。图3属于翼缘过渡板加强型节点, 梁翼缘厚度取值过大时, 节点焊缝处的焊缝质量难以保证, 应采取其他节点形式。

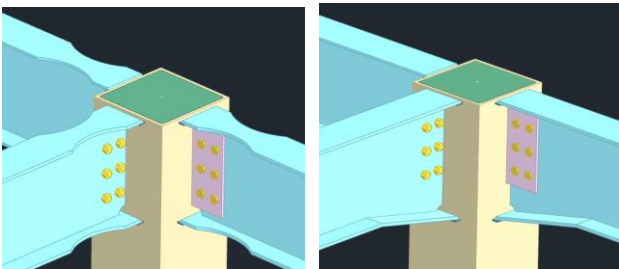


图4 鱼骨式

图5 加腋方式

图4骨形削弱型连接在距梁端一定距离处, 将梁翼缘两侧做成圆弧形切削, 但该节点对梁承载力及稳定性有一定影响, 工程应用是应给与考虑。图5属于加强腹板极限承载力, 从而达到满足极限承载力的要求, 同样是加工上比较复杂, 且若腹板增强后极限受弯承载力仍不能满足要求, 则只能采用其他节点形式。从实际算例中也可以看出, 加高腹板, 对梁极限受弯承载力的贡献有限, 增大效果不明显, 故此节点应用也较为局限。

4 受剪极限承载力 (塑性)

受剪极限承载力受5个值控制, 实际工程中连接板厚度一般大于腹板厚度, 故腹板净截面和连接板净截面抗剪承载力均不起控制作用。

a. 高强度螺栓极限受剪承载力

$$N_{vu}^b = 0.5n_f A_e^b f_u^b \quad (11)$$

注意 A_e^b 取值为螺纹处的有效截面面积, 高强螺栓的有效直径, 均小于螺栓的公称直径。

b. 高强度螺栓对应的板件极限承载力

$$N_{cu}^b = n_f d \sum t f_{cu}^b \quad (12)$$

f_{cu}^b 为钢材的极限抗压强度, 取抗拉强度最小值的1.5倍, 上式直径采用螺栓的公称直径。

c. 腹板净截面极限抗剪承载力

$$V_{u1} = 0.58A_{nw} f_u \quad (13)$$

d. 腹板连接板净截面极限抗剪承载力

$$V_{u2} = 0.58A_{nw}^{PL} f_u \quad (14)$$

《建筑抗震设计规范》^[5] 8.3.4条腹板连接板和柱的连接, 当采用双面角焊缝时, 应满足等强要求。

e. 连接板和柱翼缘间的角焊缝界限抗剪承载力

$$V_{u3} = 0.58A_f^w f_u \quad (15)$$

$$\text{实际 } V_u^j = \min\{N_{vu}^b, N_{cu}^b, V_{u1}, V_{u2}, V_{u3}\}$$

$$V_u^j \geq 1.2[2(W_E f_y)/l_n] + V_{Gb} \quad (16)$$

《高钢规》附录F给出了高强度螺栓连接计算全部内容, 主要围绕三个方面进行验算, 螺栓受剪, 板件承压和连接板以不同形式的撕裂和挤穿。其中连接板以不同形式的撕裂和挤穿计算较为复杂。在考虑梁轴力的情况下, 高强度螺栓在两个不同方向受力, 极限承载力验算时, 考虑罕遇地震作用下摩擦面已滑移, 摩擦型连接成为承压型连接, 只能考虑一个方向受力, 在梁腹板的连接和拼接中, 当工形梁与H形柱(绕强轴)连接时, 梁腹板全高可同时受弯和受剪, 应验算螺栓由弯矩和剪力引起的螺栓连接极限承载力的合力。螺栓群角部的螺栓受力最大, 可以根据弯矩和剪力分别计算两个方向的剪力, 然后求出合力。

5 节点域抗剪承载力

《建筑抗震设计规范》8.2.5条给出了节点域屈服承载力的规定, 此处规定类似于混凝土规范中混凝土受剪时的截面限制条件。节点域的截面参数在分母中体现, 在连接梁截面参数不变的条件下, 节点域腹板厚度越大, 越容易满足该限制条件。

$$\phi(M_{pb1} + M_{pb2})/V_p \leq (4/3)f_{yv} \quad (17)$$

其中 ϕ 根据《建筑抗震设计规范》二三级取0.7, 三四级取0.6, 根据《高钢规》二三级取0.85, 三四级取0.75, 显然《高钢规》对节点域的要求更高。

从节点域的体积 V_p 的表达式可以看出, 工字型柱为 $V_p = h_b h_c t_w$, 箱型柱为 $V_p = 1.8 h_b h_c t_w$, 在 $h_b h_c$ 相同的情况下, 箱型柱的节点域要强于工字型柱, 且设计人员应注意, 此时箱型柱 t_w 为单块壁板厚度, 非两块壁板厚度总和。 t_w 还应满足下式要求:

$$t_w \geq (h_{b1} + h_{c1})/90 \quad (18)$$

可以看出规范对节点域体积规定中, 腹板所占比例是有限制规定的, 因为在实际节点破坏试验中, 腹板不能发生过大的转动变形, 是节点具备承载能力的前提条件。若节点域腹板厚度不满足要求, 应采取加厚补强措施。

同时抗震规范也给出了节点域抗剪承载力的验算公式:

$$(M_{b1} + M_{b2})/V_p \leq (4/3)f_{yv}/\gamma_{RE} \quad (19)$$

在一般节点等强设计中, 弯矩是按照塑性承载力极限状态设计的, 该式较容易满足。

6 结语

弹性状态下梁端弯矩如何分配是根据翼缘塑性截面模量占截面塑性截面模量的比值确定的, 比值大于 0.7 时, 忽略腹板对弯矩的承担作用, 弯矩由翼缘全部承担, 从工程实践应用上看, 此方法计算简便, 原理清晰, 满足工程精度要求。

受弯极限承载力是由翼缘和腹板分别组成的, 腹板在塑性状态下, 受弯极限承载力的取值并不是取钢材抗拉强度最小值, 而是取屈服强度, 翼缘的受弯极限承载力则是去塑性截面模量和抗拉强度最小值。这反应了在塑性设计时, 规范对构件截面完整性的保证, 防止腹部进入应变硬化阶段, 导致不可估量的变形。受剪极限承载力的验算是多种极限承载力取最小值, 在设计中, 应注意 5 种构件抗剪承载力的取值和计算, 不得遗漏。

《高钢规》对节点域抗剪承载力的规定要明显严于《建筑抗震设计规范》, 因为高层钢结构建筑对节点域的要求更高。

[参考文献]

- [1] 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: 37-38.
 - [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计手册(第四版). [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
 - [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构连接节点设计手册(第四版). [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
 - [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构设计规程:JGJ99-2015. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 73-75.
 - [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(2016版):GB 50011—2010. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 101-102.
- 作者简介: 黄贤(1990-), 男, 安徽桐城人, 工程师, 一级注册结构工程师。