

基于美标的螺栓承载力计算

筑信达 张志国

目前，IDEA 支持基于美标 AISC、欧标 EN、加拿大规范 CISC、澳大利亚规范 AS、俄罗斯规范 SP 以及国标 GB 的钢结构节点校核，具体包括：板件校核、焊缝校核、螺栓或锚栓校核以及柱脚节点的混凝土校核。为了让广大用户深入学习和理解关于钢结构节点校核的更多细节，本文将重点介绍基于美标 AISC 360-16 的螺栓承载力在 IDEA 中的具体计算方法。关于其它组件（锚栓、焊缝）或其它规范（欧标 EN、国标 GB）的钢结构节点校核内容，请读者参阅《筑信达技术通讯》中刊载的往期文章或关注本期刊的后续文章。

美标 AISC 360-16 支持分项系数设计法（LRFD）和允许应力设计法（ASD）两种设计方法，前者的承载力设计值 ϕR_n 中包含分项系数 ϕ ，后者的允许承载力 R_n/Ω 中包含安全系数 Ω ，用户可根据需要选择具体采用的设计方法，也可以在 IDEA 的设置选项中修改上述分项系数和安全系数的默认值。本文将在后续内容中分别介绍上述两种设计方法在基于美标的螺栓承载力计算中的具体应用。

1 普通螺栓的承载力

1.1 抗拉承载力和抗剪承载力

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$

$$R_n = F_n A_b \quad \text{(AISC 360-16 J3-1)}$$

上式中， A_b 为根据螺栓（公称）直径 d 计算的螺杆截面面积，即： $A_b = \pi d^2/4$ 。注意，美标 AISC 并未在 A_b 中考虑螺纹对螺栓抗拉或抗剪承载力的削弱作用。 F_n 为螺栓的抗拉强度 F_t 或抗剪强度 F_v ，具体取值详见 AISC 360-16 表 J3.2。从表中数据可以看出，各个材料等级的螺栓均区分是否考虑螺纹的两种强度取值。以常见的 A490 为例，考虑螺纹的抗剪强度为 469MPa，不考虑螺纹的抗剪强度为 579MPa，后者大于前者。

可以看出，美标 AISC 采用折减抗剪强度的方式考虑螺纹对螺栓抗剪承载力的削弱作用，而非直接采用螺杆的有效截面面积。同时，上述强度折减仅限于螺栓的抗剪强度而不影响抗拉强度。这一点与欧标 EN 和国标 GB 有所不同，后两者均采用螺栓在螺纹处的有效直径 d_e 计算螺栓的抗拉承载力。抗剪承载力则可采用公称直径或有效直径，国标取公称直径，欧标可根据需要二选一。

1.2 承压承载力

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$

$$\text{标准孔: } R_n = 1.2l_c t F_u \leq 2.4dt F_u \quad \text{(AISC 360-16 J3-6a, J3-6c)}$$

$$\text{槽孔: } R_n = 1.0l_c t F_u \leq 2.0dt F_u \quad \text{(AISC 360-16 J3-6e, J3-6f)}$$

上式中， F_u 为承压板件的抗拉强度，具体取值与钢材牌号有关，用户可在 IDEA 的材料列表中查看。以常见的 A36 为例，抗拉强度 $F_u=400\text{Mpa}$ 。 l_c 为沿传力方向螺孔边缘与相邻螺孔边缘或板件边缘之间的净距离， d 和 t 分别为螺栓直径和承压板件的厚度。

事实上，上述承压承载力的计算公式包括两种板件破坏方式，即：孔壁的挤压破坏和板件的剪切破坏。可以看出，当 $l_c < 2d$ 时，剪切破坏起控制作用；当 $l_c > 2d$ 时，挤压破坏起控制作用。对比国标 GB 的处理方法，孔壁的挤压破坏（即承压破坏）采用计算手段予以保证；板件的剪切破坏则利用构造措施予以保证，如：最小孔距 $3d_0$ 或最小端距/边距 $2d_0$ 。此处，如果忽略 d 和 d_0 之间的微小差异，美标中的临界净距 $l_c=2d$ 与国标中的最小孔距 $3d_0$ 完全一致。

1.3 拉剪承载力

$$\phi=0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.00 \text{ (ASD)}$$



$$R_n = F'_n A_b \quad (\text{AISC 360-16, J3-2})$$

$$F'_n = 1.3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \quad (\text{LRFD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-3a})$$

$$F'_n = 1.3F_{nt} - \frac{\Omega F_{nt}}{F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \quad (\text{ASD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-3b})$$

上式中， F'_n 为考虑剪应力折减后的螺栓抗拉强度，美标 AISC 以此计算螺栓的抗拉承载力。 F'_n 的具体取值与荷载组合中的剪应力水平 f_{rv} 有关，但不得大于折减前的螺栓抗拉强度 F_{nt} 。根据美标 AISC 的相关规定，当螺栓中的拉应力或剪应力小于等于 ϕF_n (LRFD) 或 F_n/Ω (ASD) 的 30% 时，可忽略拉剪承载力的校核。

2 高强度螺栓摩擦型连接的承载力

根据螺栓直径和材料等级，利用 AISC 360-16 表 J3.1 确定预拉力 T_b 的具体取值，如图 1 所示。注意，材料等级 A307 仅限于普通螺栓，不适用于高强度螺栓。该表格中的预拉力值等于 0.7 倍的螺栓抗拉强度与有效截面面积的乘积，即： $T_b=0.7F_u \times A_{be}$ 。以直径为 M20 的 A490 螺栓为例，预拉力 $T_b=0.7 \times 1040 \times 245/1000=178.36\text{kN} \approx 179\text{kN}$ 。

TABLE J3.1M Minimum Bolt Pretension, kN ^[a]		
Bolt Size, mm	Group A (e.g., A325M Bolts)	Group B (e.g., A490M Bolts)
M16	91	114
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334
M30	326	408
M36	475	595

图 1 高强螺栓的最小预拉力

2.1 抗剪承载力

$$\text{标准孔: } \phi=1.0 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=1.5 \text{ (ASD)}$$

$$\text{槽孔: } \phi=0.7 \text{ (LRFD)} \quad \Omega=2.14 \text{ (ASD)}$$

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (\text{AISC 360-16, J3-4})$$

其中：

μ 为抗滑移系数，具体取值与接触面类型有关，A 类取 0.3，B 类取 0.5，详见 AISC 360-16 J3.8。

D_u 为平均预拉力与最小预拉力的比值，即超张拉系数，此处取 1.13。

h_f 为考虑多层填板的系数。如图 2 所示，单层填板取 1.0，多层填板取 0.85。IDEA 只考虑单层填板，故此取 1.0。

n_s 为传力摩擦面的数量。

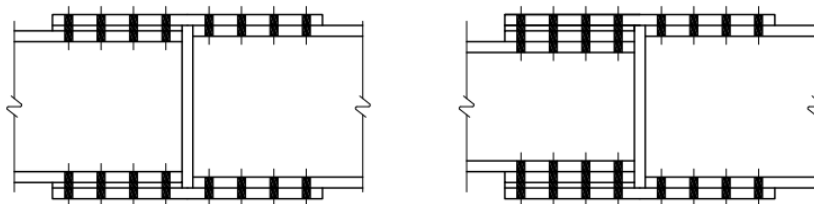


图 2 单层填板（左）与多层填板（右）



2.2 抗拉承载力和拉剪承载力

$$k_{sc} = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b n_b} \geq 0 \quad (\text{LRFD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-5a})$$

$$k_{sc} = 1 - \frac{1.5T_a}{D_u T_b n_b} \geq 0 \quad (\text{ASD}) \quad (\text{AISC 360-16, J3-5b})$$

上式中，折减系数 k_{sc} 既可作为抗拉承载力的计算公式（即： $k_{sc} \geq 0$ ），也可用于考虑螺栓拉力对抗剪承载力 R_n 的削弱作用。其中， T_u 和 T_a 为荷载组合中的螺栓拉力值，前者对应于分项系数设计法 LRFD，后者对应于允许应力设计法 ASD， n_b 为受拉螺栓的数量。此时，高强度螺栓摩擦型连接的拉剪承载力的计算表达式如下所示：

$$R_n = \mu k_{sc} D_u h_f T_b n_s$$

3 螺栓布置的构造要求

根据 AISC 360-16 J3.3 规定，螺栓中心的最小间距为 2.66（即 $2\frac{2}{3}$ ）倍螺栓直径 d ，螺孔边缘的最小净距为 d 。用户可在设置选项中修改上述最小间距的默认值。对于标准孔，螺栓中心的最小边距和最小端距应符合 AISC 360-16 表 J3.4 的要求，如图 3 所示。需要注意的是，AISC 360-16 J3.5 对螺孔间距和边距/端距的最大值也给出了具体规定，但 IDEA 并未校核该构造要求。因此，用户在采用美标 AISC 校核钢结构节点时，应自行保证有关最大间距值的构造要求。

Bolt Diameter, mm	Minimum Edge Distance
16	22
20	26
22	28
24	30
27	34
30	38
36	46
Over 36	1.25d

图 3 标准孔的最小边距和最小端距

4 算例演示

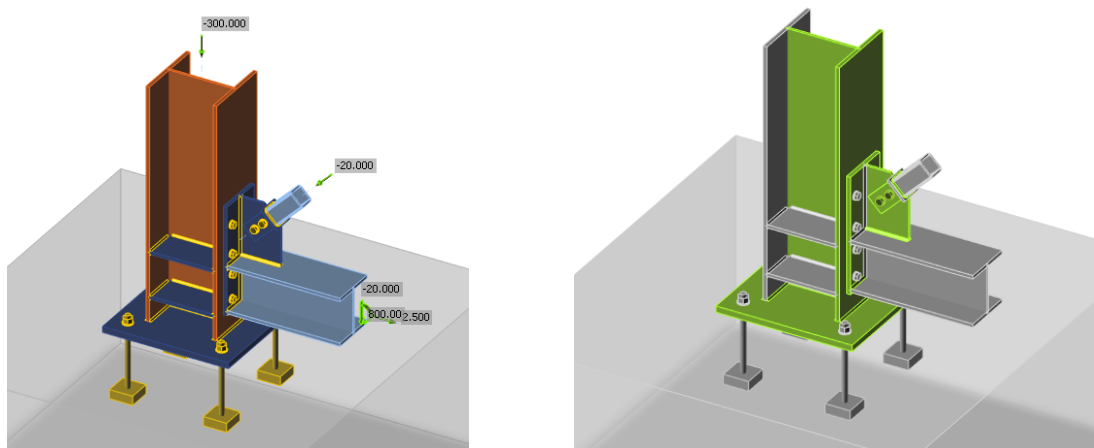


图 4 基于 AISC-LRFD 的柱脚节点承载力校核



图 4（左）所示的柱脚节点采用底板和锚栓与柱下的混凝土独立基础相连，同时以端板和螺栓与水平梁相连，斜撑则通过连接板和螺栓与端板和水平梁相连。该柱脚节点基于美标 AISC-LRFD 的整体校核结果如图 4（右）所示，无红色标识的组件表明通过校核。

以端板某处直径 16mm、材料等级 A490 的普通螺栓为例，抗拉和抗剪承载力的校核计算如下所示。可以看出，IDEA 根据螺栓（公称）直径计算抗拉或抗剪的截面面积，即： $A_b = \pi d^2 / 4 = 3.14 \cdot 16^2 / 4 = 198 \text{ mm}^2$ 。由于本算例中的普通螺栓未考虑螺纹对抗剪强度的影响，故抗剪强度取 579MPa；如考虑其影响，则取 469MPa。

Tension resistance check (AISC 360-16: J3-1)

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nt} \cdot A_b = 115.8 \text{ kN} \geq F_t = 47.3 \text{ kN}$$

Where:

- $F_{nt} = 780.0 \text{ MPa}$ – nominal tensile stress from AISC 360-16 Table J3.2
- $A_b = 198 \text{ mm}^2$ – gross bolt cross-sectional area
- $\phi = 0.75$ – capacity factor

Shear resistance check (AISC 360-16: J3-1)

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nv} \cdot A_b = 86.0 \text{ kN} \geq V = 19.4 \text{ kN}$$

Where:

- $F_{nv} = 579.0 \text{ MPa}$ – nominal shear stress from AISC 360-16 Table J3.2
- $A_b = 198 \text{ mm}^2$ – gross bolt cross-sectional area
- $\phi = 0.75$ – capacity factor

上述普通螺栓的承压承载力的校核计算如下所示，由于沿传力方向该螺孔边缘与最近的相邻螺孔边缘的净距 $l_c = 71 \text{ mm}$ ，大于两倍的螺栓直径 $2d = 32 \text{ mm}$ ，故该螺孔处不存在板件的剪切破坏，需以孔壁的挤压破坏验算其承压承载力 $R_n = 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u$ 。

Bearing resistance check (AISC 360-16: J3-6)

$$R_n = 1.20 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2.40 \cdot d \cdot t \cdot F_u$$

$$\phi R_n = 176.1 \text{ kN} \geq V = 19.4 \text{ kN}$$

Where:

- $l_c = 71 \text{ mm}$ – clear distance, in the direction of the force, between the edge of the hole and the edge of the adjacent hole or edge of the material
- $t = 15 \text{ mm}$ – thickness of the ply
- $d = 16 \text{ mm}$ – diameter of a bolt
- $F_u = 400.0 \text{ MPa}$ – tensile strength of the connected material
- $\phi = 0.75$ – resistance factor for bearing at bolt holes

上述普通螺栓中的拉应力或剪应力小于等于 ϕF_{nt} 或 ϕF_{nv} 的 30%。根据美标 AISC 的相关规定，可忽略拉剪承载力的校核，如下所示。

Interaction of tension and shear check (AISC 360-16: J3-2)

The required stress, in either shear or tension, is less than or equal to 30% of the corresponding available stress and the effects of combined stresses need not to be investigated.

5 小结

本文详细介绍了 IDEA 中基于美标 AISC 360-16 的螺栓承载力计算，包括普通螺栓的抗拉、抗剪、承压以及拉剪承载力计算以及高强度螺栓摩擦型连接的预拉力、抗剪、抗拉和拉剪承载力计算。希望以上内容可以帮助众多的 IDEA 用户或爱好者更加深入地理解和应用此软件，以期解决实际工程中遇到的有关美标钢结构节点设计的各类问题。