

# 基于美标的锚栓承载力计算

筑信达 张志国

目前, IDEA 支持基于欧标 EN、美标 AISC、加拿大规范 CISC、澳大利亚规范 AS、俄罗斯规范 SP、印度规范 IS、香港规范 HKG 以及中国规范 GB 的钢结构连接和节点的校核, 如: 板件校核、焊缝校核、螺栓校核以及锚栓和混凝土校核。

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 ACI 318-14 的锚栓承载力计算。关于其它组件(螺栓、焊缝)或规范(EN、CISC、AS 等)的承载力计算, 请参阅《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。

IDEA 基于美标 ACI 318-14 的锚栓承载力计算可考虑七种破坏形式, 即: 拉力作用下的锚栓拉断破坏、混凝土锥体破坏、锚栓拔出破坏以及混凝土锥体侧鼓破坏; 剪力作用下的锚栓剪断破坏、混凝土边缘破坏以及混凝土剪撬破坏。

## 1 抗拉承载力

### 1.1 锚栓拉断破坏

如右图所示, 锚栓拉断破坏是指锚栓在拉力作用下螺杆被拉断的破坏形式。该抗拉承载力主要与锚栓的抗拉强度和螺杆的有效截面面积有关, 具体如下:

$$\phi N_{sa} = \phi A_{se,N} f_{uta} \quad (\text{ACI 318-14 式 17.4.1.2})$$

式中:  $N_{sa}$  ----- 锚栓拉断破坏的抗拉承载力标准值

$A_{se,N}$  ----- 螺杆在螺纹处的有效截面面积

$f_{uta}$  ----- 锚栓的抗拉强度标准值,  $f_{uta} = \min(f_{ub}, 1.9f_{yb}, 860\text{MPa})$ 。

$\phi$  ----- 锚栓抗拉承载力分项系数, 默认值为 0.7。



### 1.2 混凝土锥体破坏

如右图所示, 混凝土锥体破坏是指混凝土在拉力作用下形成以锚栓为中心的倒锥体的破坏形式。混凝土锥体破坏不同于锚栓拉断破坏, 单锚、群锚或群锚中的部分受拉锚栓均可出现此类破坏。

IDEA 可自动识别混凝土锥体破坏包含的锚栓数量和锚栓位置, 以此校核群锚受拉区的总拉力设计值。该抗拉承载力主要与混凝土的强度等级、锚栓的有效锚固深度以及锚栓的间距、边距等有关, 具体如下:

$$\phi N_{cbg} = \phi \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \psi_{ec,N} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b \quad (\text{ACI 318-14 式 17.4.2.1b})$$

式中:  $N_{cbg}$  ----- 混凝土锥体破坏的群锚抗拉承载力标准值

$A_{Nc}$  ----- 群锚抗拉时混凝土锥体破坏的实际投影面面积

$A_{Nco}$  ----- 单锚抗拉时混凝土理想锥体破坏的投影面面积,  $A_{Nco} = 9h_{ef}^2$ 。

$N_b$  ----- 混凝土理想锥体破坏的单锚抗拉承载力标准值

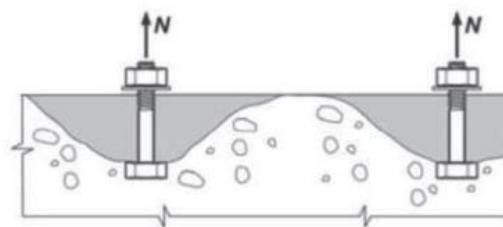
$\phi$  ----- 锚栓抗拉承载力分项系数, 默认值为 0.7。

$\psi_{ec,N}$  ----- 荷载偏心对抗拉承载力的影响系数, 详见后文。

$\psi_{ed,N}$  ----- 锚栓边距对抗拉承载力的影响系数, 详见后文。

$\psi_{c,N}$  ----- 混凝土条件对抗拉承载力的影响系数, 详见后文。

$\psi_{cp,N}$  ----- 混凝土劈裂对抗拉承载力的影响系数, 详见后文。



$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5}$$

(ACI 318-14 式 17.4.2.2a)

式中:  $k_c$  ---- 预埋锚栓取 24, 后锚固锚栓取 17。

$\lambda_a$  ---- 轻质混凝土修正系数, 取 1.0。

$f'_c$  ---- 混凝土抗压强度标准值

$h_{ef}$  ---- 锚栓的有效锚固深度

注意, 当狭长分布的群锚中存在三个或三个以上小于  $1.5 h_{ef}$  的边距时, 锚栓的有效锚固深度  $h_{ef} = \max\left(\frac{c_{a,max}}{1.5}, \frac{s}{3}\right)$ 。如果

$280\text{mm} \leq h_{ef} \leq 635\text{mm}$ , 混凝土理想锥体破坏的单锚抗拉承载力标准值应采用以下公式计算。

$$N_b = 16\lambda_a \sqrt{f'_c} h_{ef}^{5/3} \quad (\text{ACI 318-14 式 17.4.2.2b})$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + 2e'_N / 3h_{ef}} \leq 1 \quad (\text{ACI 318-14 式 17.4.2.4})$$

式中:  $e'_N$  ---- 群锚受拉区总拉力的合力作用点相对于群锚几何中心的偏心距, 如图 1 所示。

上述公式用于考虑偏心拉力作用下群锚受拉区总拉力的偏心对抗拉承载力的不利影响。对于双向偏心拉力, 应分别计算两个方向的偏心距及其影响系数并以二者乘积作为  $\psi_{ec,N}$ 。

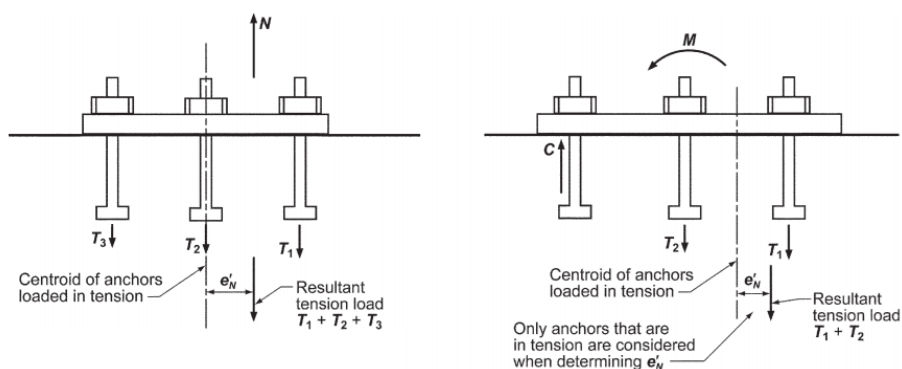


图 1 偏心拉力或弯矩的偏心距计算示意图

$$\psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a,min}}{1.5h_{ef}} \leq 1 \quad (\text{ACI 318-14 式 17.4.2.5})$$

式中:  $c_{a,min}$  ---- 锚栓最小边距

上述公式用于考虑邻近混凝土边缘的锚栓对抗拉承载力的不利影响。

对于开裂混凝土,  $\psi_{c,N}$  取 1.0; 对于不开裂混凝土,  $\psi_{c,N}$  取 1.25。开裂混凝土指在正常使用极限状态下, 考虑混凝土收缩、温度变化及支座位移的影响后, 锚固区存在拉应力的混凝土。不开裂混凝土指在上述条件下锚固区不存在拉应力的混凝土。

对于不开裂混凝土, 如果未采用补筋控制混凝土劈裂, 后锚固锚栓对抗拉承载力的影响系数  $\psi_{cp,N} = \min(1, c_{a,min} / c_{ac})$ ; 其余情况取 1.0。 $c_{ac}$  为锚栓临界边距, 关于常见锚栓类型的临界边距取值, 详见 ACI 318-14 第 17.7.6 条, 此处不再赘述。

### 1.3 锚栓拔出破坏

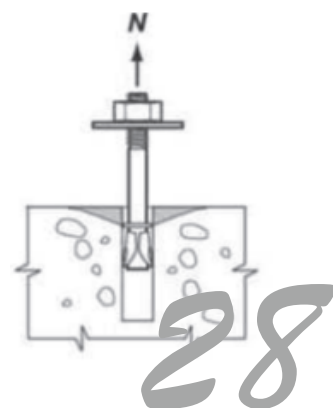
如右图所示, 锚栓拔出破坏是指锚栓在拉力作用下从锚孔中被拉出的破坏形式。该抗拉承载力主要与混凝土的强度等级和锚板的承载面积有关, 具体如下:

$$\phi N_{pm} = \phi \psi_{c,p} N_p \quad (\text{ACI 318-14 式 17.4.3.1})$$

式中:  $N_{pm}$  ---- 锚栓拔出破坏的抗拉承载力标准值

$\psi_{c,p}$  ---- 开裂混凝土取 1.0, 不开裂混凝土取 1.4。

$\phi$  ---- 锚栓抗拉承载力分项系数, 默认值为 0.7。





$$N_p = 8A_{brg}f'_c$$

(ACI 318-14 式 17.4.3.4)

式中:  $A_{brg}$  ----- 锚板承载面积

### 1.4 混凝土锥体侧鼓破坏

如右图所示, 混凝土锥体侧鼓破坏是指混凝土侧面在拉力作用下形成水平锥体的破坏形式。该抗拉承载力主要与混凝土的强度等级、锚板的承载面积以及锚栓的间距和边距等有关, 具体如下:

$$\phi N_{sb} = \phi 160 c_{a1} \lambda_a \sqrt{A_{brg}} \sqrt{f'_c}$$

(ACI 318-14 式 17.4.4.1)

式中:  $N_{sb}$  ----- 混凝土锥体侧鼓破坏的抗拉承载力标准值

$c_{a1}$  ----- 锚栓的近端边距

$\phi$  ----- 锚栓抗拉承载力分项系数, 默认值为 0.7。

当远端边距小于 3 倍近端边距或锚栓间距小于 6 倍近端边距时, 上述承载力应考虑以下折减系数:

$$r_c = \min\left(\frac{1 + c_{a2} / c_{a1}}{4}, \frac{1 + s / 6c_{a1}}{2}\right) \leq 1$$

式中:  $c_{a2}$  ----- 锚栓的远端边距

$s$  ----- 锚栓间距



## 2 抗剪承载力

### 2.1 锚栓剪断破坏

如右图所示, 锚栓剪断破坏是指锚栓在剪力作用下螺杆被剪断的破坏形式。该抗剪承载力主要与锚栓的抗拉强度和螺杆的有效截面面积有关, 具体如下:

$$\phi V_{sa} = \phi 0.6 A_{se,V} f_{uta}$$

(ACI 318-14 式 17.5.1.2b)

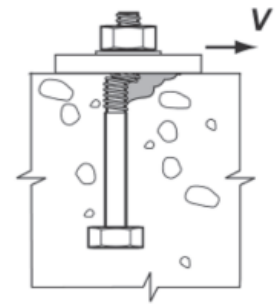
式中:  $V_{sa}$  ----- 锚栓剪断破坏的抗剪承载力标准值

$A_{se,V}$  ----- 螺杆在螺纹处的有效截面面积

$f_{uta}$  ----- 锚栓的抗拉强度标准值,  $f_{uta} = \min(f_{ub}, 1.9f_{yb}, 860\text{MPa})$ 。

$\phi$  ----- 锚栓抗剪承载力分项系数, 默认值为 0.65。

注意, 以上公式适用于无杠杆臂的纯剪破坏 (即: 底板与混凝土表面直接接触)。对于有杠杆臂的弯剪破坏 (即: 底板与混凝土表面之间灌注砂浆), 以上公式应乘以折减系数 0.8。



### 2.2 混凝土边缘破坏

如右图所示, 混凝土边缘破坏是指混凝土边缘在剪力作用下形成以锚栓轴为顶点的混凝土楔形体的破坏形式。混凝土边缘破坏类似于锥体破坏, 单锚、群锚或群锚中的部分受剪锚栓均可出现此类破坏。

IDEA 可自动识别混凝土边缘破坏包含的锚栓数量和锚栓位置, 以此校核群锚受剪区的总剪力设计值。该抗剪承载力主要与锚栓的边距和有效长度以及混凝土的强度等级有关, 具体如下:

$$\phi V_{cbg} = \phi \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \psi_{ec,V} \psi_{ed,V} \psi_{c,V} \psi_{h,V} V_b$$

(ACI 318-14 式 17.5.2.1b)

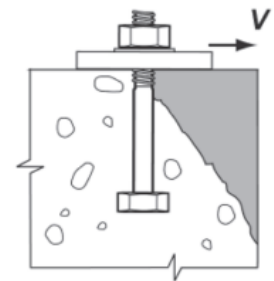
式中:  $V_{cbg}$  ----- 混凝土边缘破坏的抗剪承载力标准值

$A_{Vc}$  ----- 群锚抗剪时混凝土边缘破坏的实际投影面面积

$A_{Vco}$  ----- 单锚抗剪时混凝土理想边缘破坏的投影面面积,  $A_{Vco} = 4.5(c_{a1})^2$

$V_b$  ----- 混凝土理想边缘破坏的单锚抗剪承载力标准值

$\phi$  ----- 锚栓抗剪承载力分项系数, 默认值为 0.65。





$\psi_{ec,V}$  ----- 荷载偏心对抗剪承载力的影响系数，详见后文。

$\psi_{ed,V}$  ----- 锚栓边距对抗剪承载力的影响系数，详见后文。

$\psi_{c,V}$  ----- 混凝土条件对抗剪承载力的影响系数。开裂混凝土取 1.0；不开裂混凝土取 1.4。

$\psi_{h,V}$  ----- 混凝土厚度对抗剪承载力的影响系数

$\psi_{\alpha,V}$  ----- 剪力作用方向对抗剪承载力的影响系数

$$V_b = \min \left( 9, 7 \left( \frac{l_e}{d_a} \right)^2 \sqrt{d_a} \right) \times \lambda_a \sqrt{f'_c} (c_{a1})^{1.5} \quad (\text{ACI 318-14 式 17.5.2.2})$$

式中：  $l_e$  ----- 锚栓抗剪承载长度，  $l_e = h_{ef} \leq 8d_a$ 。

$d_a$  ----- 锚栓螺杆的公称直径

$c_{a1}$  ----- 沿剪力方向的锚栓边距。对于狭长分布的群锚，  $c_{a1} = \max(c_{a2}/1.5, h_a/1.5, s/3)$ 。

$h_a$  ----- 混凝土厚度

$$\psi_{ec,V} = \frac{1}{1 + 2e'_v / 3c_{a1}} \leq 1 \quad (\text{ACI 318-14 式 17.5.2.5})$$

式中：  $e'_v$  ----- 群锚受剪区总剪力的合力作用点相对于群锚几何中心的偏心距，如图 2 所示。

上述公式用于考虑偏心剪力作用下群锚受剪区总剪力的偏心对抗剪承载力的不利影响。

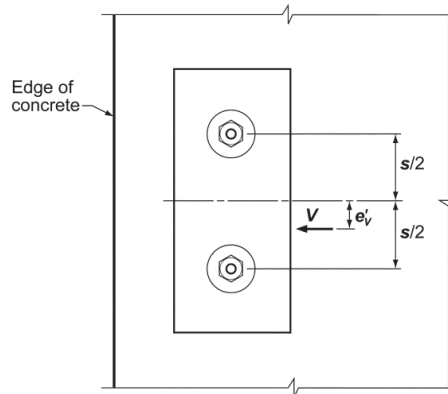


图 2 偏心剪力的偏心距示意图

$$\psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a2}}{1.5c_{a1}} \leq 1 \quad (\text{ACI 318-14 式 17.5.2.6})$$

式中：  $c_{a2}$  ----- 垂直于剪力方向的锚栓边距

上述公式用于考虑邻近混凝土边缘的锚栓对抗剪承载力的不利影响。

$$\psi_{h,V} = \sqrt{\frac{1.5c_{a1}}{h_a}} \geq 1 \quad (\text{ACI 318-14 式 17.5.2.8})$$

式中：  $h_a$  ----- 混凝土厚度

混凝土厚度  $h_a$  与边缘破坏的实际投影面面积  $A_{Vc}$  密切相关，上述公式用于修正混凝土厚度对锚栓抗剪承载力的影响。

$$\psi_{\alpha,V} = \sqrt{\frac{1}{(\cos \alpha_v)^2 + (0.5 \sin \alpha_v)^2}} \geq 1$$

式中：  $\alpha_v$  ----- 群锚受剪区总剪力与破坏边缘的法线之间的夹角 ( $0^\circ \leq \alpha_v \leq 90^\circ$ )，如下图所示。

上述公式用于考虑群锚受剪区总剪力与破坏边缘法线之间的夹角对抗剪承载力的影响。如图 3 所示，由于有效剪力小于总剪力，锚栓的抗剪承载力可适当提高。

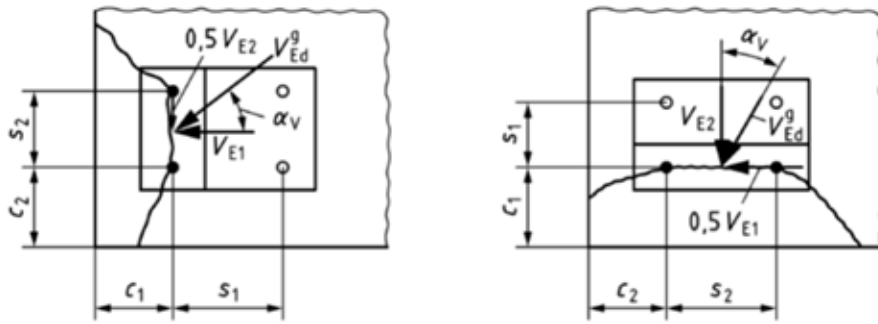


图3 剪力作用与边缘法线的夹角示意图

### 2.3 混凝土剪撬破坏

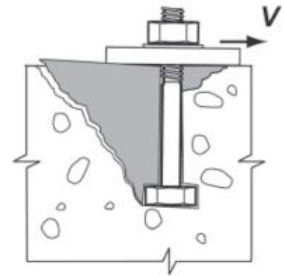
如右图所示，混凝土剪撬破坏是指混凝土在剪力作用下沿反方向被锚栓撬起的破坏形式。该抗剪承载力主要与锚栓的有效锚固深度和混凝土锥体破坏的抗拉承载力有关，具体如下：

$$\phi V_{cpg} = \phi k_{cp} N_{cpg} = \phi k_{cp} N_{cbg} \quad (\text{ACI 318-14 式 17.5.3.1a})$$

式中：  $k_{cp}$  ----- 当  $h_{ef} < 63.5\text{mm}$  时，取 1.0；当  $h_{ef} \geq 63.5\text{mm}$  时，取 2.0。

$N_{cbg}$  ----- 混凝土锥体破坏的抗拉承载力标准值

$\phi$  ----- 锚栓抗剪承载力分项系数，默认值为 0.65。



### 3 拉剪联合作用

$$\left( \frac{N_{ua}}{N_n} \right)^\zeta + \left( \frac{V_{ua}}{V_n} \right)^\zeta \leq 1.0 \quad (\text{ACI 318-14 式 17.6.3})$$

式中：  $N_{ua}$  ----- 锚栓的拉力设计值

$V_{ua}$  ----- 锚栓的剪力设计值

$N_n$  ----- 锚栓抗拉承载力设计值的最小值

$V_n$  ----- 锚栓抗剪承载力设计值的最小值

$\zeta$  ----- 取 5/3

### 4 算例演示

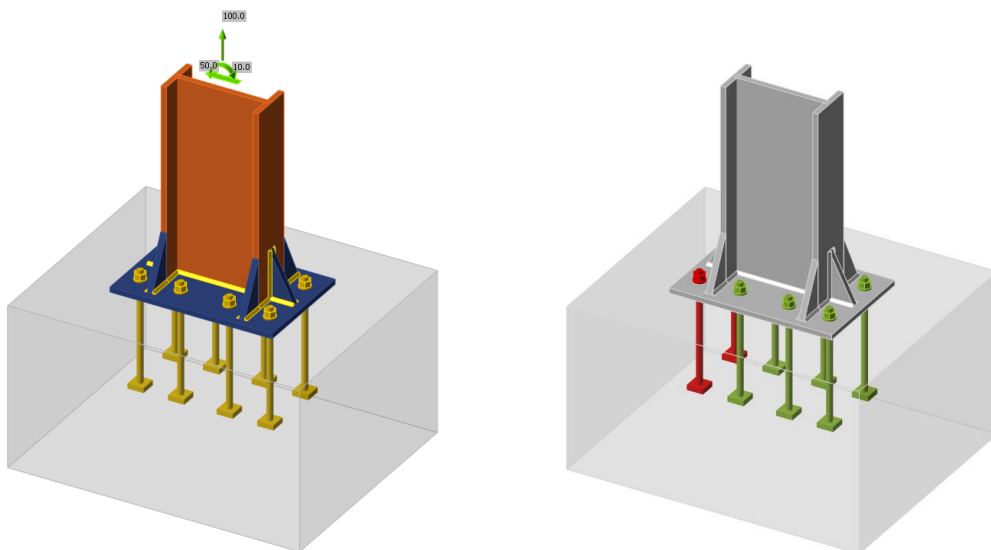


图4 基于美标的柱脚节点承载力校核



如图 4（左）所示的外露式刚接柱脚采用扩宽板形式的加劲板加强柱脚刚度，底板与混凝土基础直接接触并布置两排四列共八个锚栓，柱底内力包括弯矩、轴压力和剪力。该柱脚节点基于美标的整体校核结果如图 4（右）所示，以红色标识的锚栓表明未通过校核。以下通过 IDEA 的计算报告说明其设计过程。

对于锚栓拉断破坏的抗拉承载力，由于锚栓的抗拉强度小于 1.9 倍的屈服强度和 860MPa，故实际锚栓的抗拉强度标准值取偏于保守的较小值（825MPa）。同时，参与承载力计算的有效截面面积（215mm<sup>2</sup>）小于毛截面面积 285mm<sup>2</sup>。

$$\phi N_{sa} = \phi \cdot A_{se,N} \cdot f_{uta} = 124.4 \text{ kN} \geq N_f = 22.2 \text{ kN}$$

Where:

- $\phi = 0.70$  – resistance factor
- $A_{se,N} = 215 \text{ mm}^2$  – tensile stress area
- $f_{uta} = 825.0 \text{ MPa}$  – specified tensile strength of anchor steel:
  - $f_{uta} = \min(860 \text{ MPa}, 1.9 \cdot f_{ya}, f_u)$ , where:
    - $f_{ya} = 634.3 \text{ MPa}$  – specified yield strength of anchor steel
    - $f_u = 825.0 \text{ MPa}$  – specified ultimate strength of anchor steel

对于锚栓拔出破坏的抗拉承载力，混凝土强度等级 4000psi 即抗压强度标准值为 27.6MPa，方形锚板的承载面积应扣除螺栓的毛截面面积。具体计算过程如下所示：

**Concrete pullout resistance (ACI 318-14 – 17.4.3)**

$$\phi N_{pm} = \phi \cdot \Psi_{c,P} \cdot N_p = 354.5 \text{ kN} \geq N_f = 22.2 \text{ kN}$$

Where:

- $\phi = 0.70$  – resistance factor
- $\Psi_{c,P} = 1.00$  – modification factor for concrete condition
- $N_p = 506.5 \text{ kN}$  – basic concrete pullout strength for headed anchor:
  - $N_{pr} = 8 \cdot A_{brg} \cdot f'_c$ , where:
    - $A_{brg} = 2296 \text{ mm}^2$  – bearing area of the head of stud or anchor bolt
    - $f'_c = 27.6 \text{ MPa}$  – concrete compressive strength

对于混凝土锥体破坏的抗拉承载力，由于当前锚栓布置的四个边距均小于 1.5 倍的锚固深度（305mm），故实际的有效锚固深度（186mm）由螺栓边距和间距控制，如下所示。IDEA 基于全部锚栓（A1~A8）计算群栓抗拉承载力，注意，偏心拉力的沿 Y 方向的偏心距 98mm，即：弯矩与轴向拉力的比值 10kNm/100kN=100mm。

$$h_{ef} = \min(h_{emb}, \max(\frac{c_{a,max}}{1.5}, \frac{s}{3})) = 186 \text{ mm} - \text{depth of embedment, where:}$$

- $h_{emb} = 305 \text{ mm}$  – anchor length
- $c_{a,max} = 279 \text{ mm}$  – maximum distance from the anchor to one of the three closest edges
- $s = 190 \text{ mm}$  – maximum spacing between anchors

本算例中控制承载比来自于剪力作用下的混凝土边缘破坏。锚栓 A1 和 A2 位于沿剪力方向的混凝土边缘，抗剪承载力 46.2kN 小于总剪力 50kN，如下所示。为了提高柱脚节点的抗剪承载力，可以增大混凝土基础的平面尺寸或混凝土深度，也可以调整锚栓位置或增加锚栓数量。

**Concrete shear breakout check (ACI 318-14 – 17.5.2)**

The check is performed for group of anchors that form common shear breakout cone: A1, A2

$$\phi V_{cbg} = \phi \cdot \frac{A_{Vc}}{A_{Vc0}} \cdot \Psi_{ec,V} \cdot \Psi_{ed,V} \cdot \Psi_{c,V} \cdot \Psi_{h,V} \cdot \Psi_{\alpha,V} \cdot V_{br} = 46.2 \text{ kN} < V_g = 50.0 \text{ kN}$$

如下所示，锚栓边距对抗剪承载力的影响系数为 0.92。如果该系数等于 1，抗剪承载力等于 46.2/0.92=50.2kN > 50kN，即可通过校核。因此，可以尝试增大垂直于剪力方向的锚栓边距直至大于 254x1.5=381mm，也就混凝土基础沿垂直剪力方向增加约 100mm 即可。限于篇幅，关于本算例的更多内容本文不一一阐述。



$\Psi_{ed,V} = 0.92$  – modification factor for edge effect:

- $\Psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c_{a2}}{1.5 \cdot c_{a1}} \leq 1$ , where:
  - $c_{a1} = 254$  mm – edge distance in direction of the load
    - $c_{a1} = 254$  mm – edge distance in direction of the load
  - $c_{a2} = 279$  mm – edge distance in direction perpendicular to the load

## 5 小结

本文详细介绍了 IDEA 基于美标 ACI 318-14 的锚栓承载力计算原理和注意事项，具体包括：拉力作用下的锚栓拉断破坏、混凝土锥体破坏、锚栓拔出破坏、混凝土锥体侧鼓破坏以及剪力作用下的锚栓剪断破坏、混凝土边缘破坏、混凝土剪撬破坏。希望以上内容可以帮助众多 IDEA 用户及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的钢结构柱脚节点的设计与校核问题。

## 参考资料

- [1] ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete
- [2] AISC 360-10: Specification for Structural Steel Buildings
- [3] <https://www.ideastatica.com/support-center/design-check-of-anchors-according-to-aisc>

