

第1道塔机附着验算计算书

计算依据:

- 1、《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》JGJ/T187-2019
- 2、《钢结构设计标准》GB50017-2017

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT360-20S1	塔身桁架结构类型	角钢
塔机计算高度H(m)	84.9	塔身宽度B(m)	2
起重臂长度 l_1 (m)	50	平衡臂长度 l_2 (m)	17
起重臂与平衡臂截面计算高度h(m)	1.06	工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	837
工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	4362.5	非工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k' (kN·m)	999.5(反向)

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	格构柱	塔身锚固环边长C(m)	2.6

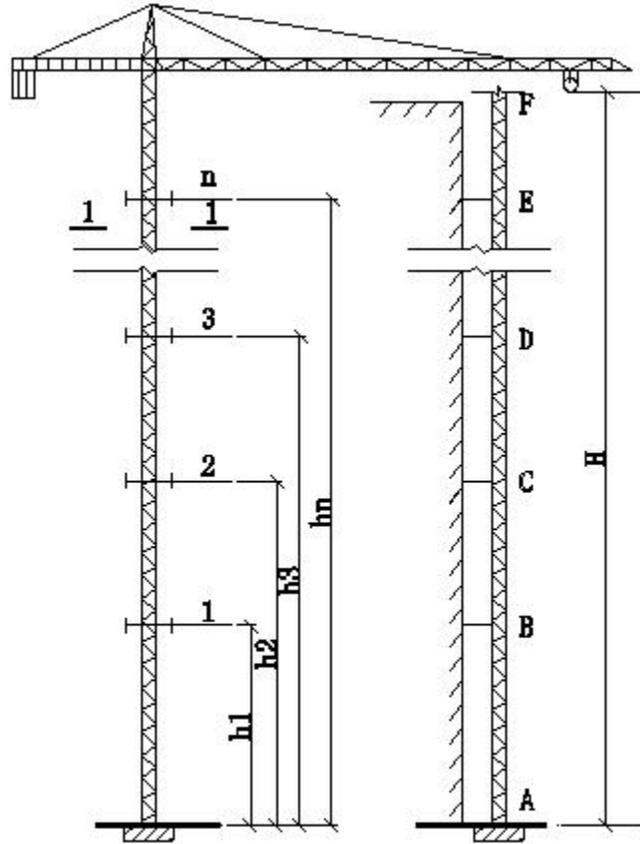
二、风荷载及附着参数

该风荷载取值依据JGJ/T187-2019《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》附录A相关内容进行取值。

附着次数N	1		
附着点1到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.15	点1到塔机的竖向距离 b_1 (m)	14.38
附着点2到塔机的横向距离 a_2 (m)	1.59	点2到塔机的竖向距离 b_2 (m)	12.13
附着点3到塔机的横向距离 a_3 (m)	6.58	点3到塔机的竖向距离 b_3 (m)	6.73
附着点4到塔机的横向距离 a_4 (m)	5.28	点4到塔机的竖向距离 b_4 (m)	8.72
工作状态基本风压 ω_0 (kN/m ²)	0.2	非工作状态基本风压 ω_0' (kN/m ²)	0.35
塔身前后片桁架的平均充实率 α_0	0.35		

第N次附着	附着点高度 h_1 (m)	附着点净高 h_{01} (m)	风压等效高度变化系数 μ_z	工作状态风荷载体型系数 μ_s	非工作状态风荷载体型系数 μ_s'	工作状态风振系数 β_z	非工作状态风振系数 β_z'	工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}'
第1次附着	44.4	44.4	0.845	1.95	1.95	1.763	1.815	0.39	0.703
悬臂端	84.9	40.5	1.089	1.95	1.95	1.708	1.759	0.487	0.879

附图如下:



(a) 附墙正立面

(b) 附墙侧立面

塔机附着立面图

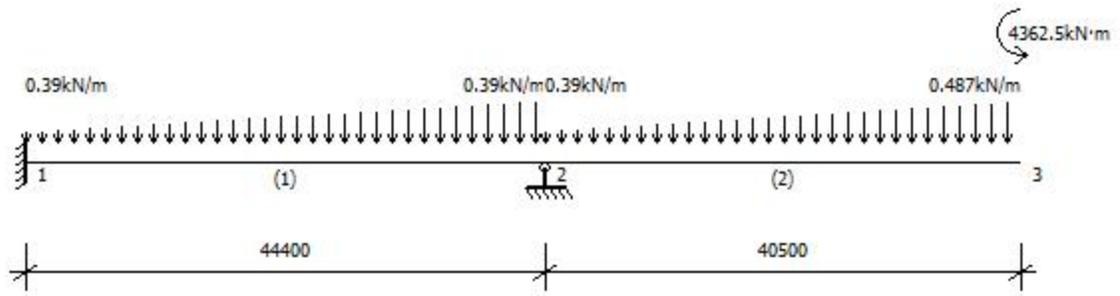
三、工作状态下附墙杆内力计算

1、扭矩组合标准值 T_k

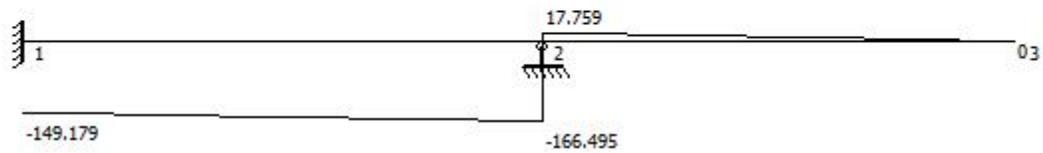
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值：

$$T_k = T_{k1} = 837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

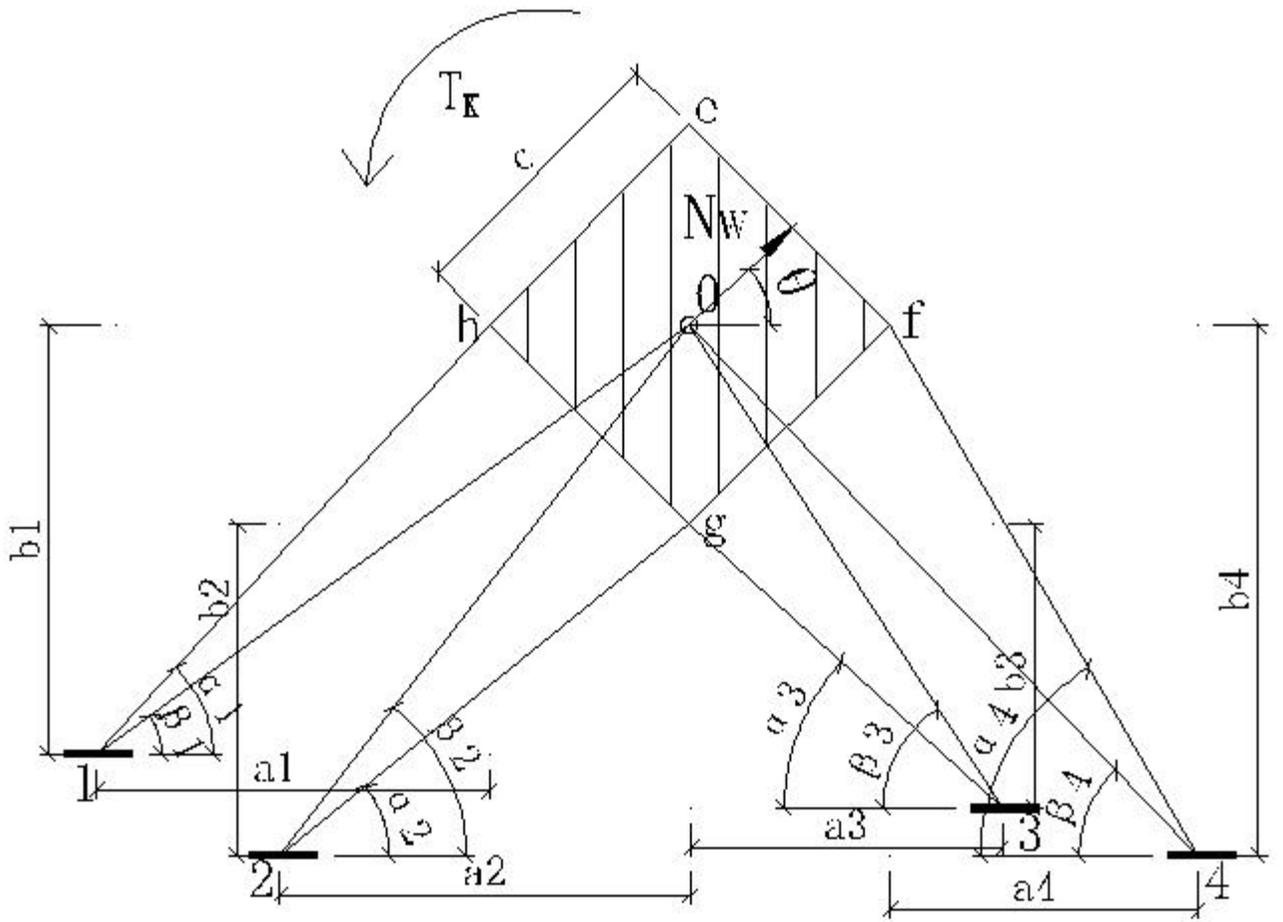
得: $R_E=184.254\text{kN}$

在工作状态下,塔机起重臂位置的不确定性以及风向的随机性,在计算支座2处锚固环截面内力时需考虑塔身承受双向的风荷载和倾覆力矩及扭矩。

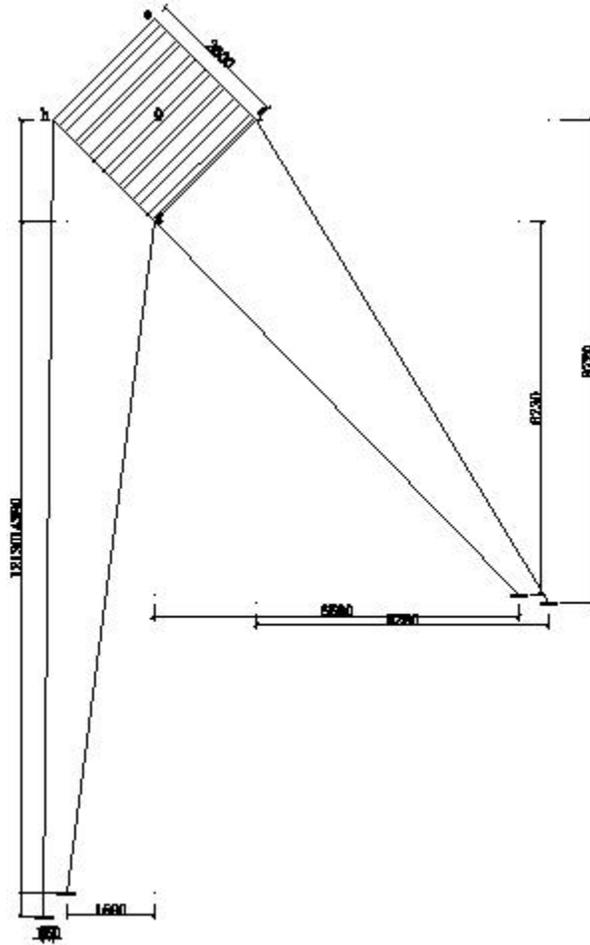
3、附墙杆内力计算

支座2处锚固环的截面扭矩 T_k (考虑塔机产生的扭矩由支座2处的附墙杆承担),水平内力 $N_w=2^{0.5}R_E=260.575\text{kN}$ 。

计算简图:



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 89.402^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 82.532^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 45.646^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 58.805^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 82.127^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 83.506^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 52.478^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 50.774^\circ$$

四杆附着属于一次超静定结构，用力法计算，切断T₄杆并代以相应多余未知力

X₁=1。

$$\delta_{11} \times X_1 + \Delta_{1p} = 0$$

X₁=1时，各杆件轴力计算：

$$T_{11} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{21} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{31} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - 1 \times \sin(\alpha_4 - \beta_4) \times b_4 / \sin \beta_4 = 0$$

$$T_{21} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{21} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{31} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{31} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

$$T_{11} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{11} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \cos \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

当 N_w 、 T_k 同时存在时， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，各杆件轴力计算：

$$T_{1p} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{2p} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{3p} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - T_k = 0$$

$$T_{2p} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{2p} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{3p} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{3p} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \sin \theta \times (2^{0.5} \times c/2) + T_k = 0$$

$$T_{1p} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{1p} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \cos \theta \times (2^{0.5} \times c/2) - T_k = 0$$

$$\delta_{11} = \Sigma(T_1^2 L / (EA)) = T_{11}^2 (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21}^2 (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31}^2 (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA) + 1^2 (a_4 / \cos \alpha_4) / (EA)$$

$$\Delta_{1p} = \Sigma(T_1 \times T_p L / (EA)) = T_{11} \times T_{1p} (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21} \times T_{2p} (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31} \times T_{3p} (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA)$$

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11}$$

各杆轴力计算公式如下：

$$T_1 = T_{11} \times X_1 + T_{1p}, \quad T_2 = T_{21} \times X_1 + T_{2p}, \quad T_3 = T_{31} \times X_1 + T_{3p}, \quad T_4 = X_1$$

(1) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

$$\text{最大轴压力 } T_1 = 178.705 \text{ kN}, \quad T_2 = 20.025 \text{ kN}, \quad T_3 = 387.001 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 441.82 \text{ kN}, \quad T_3 = 79.491 \text{ kN}, \quad T_4 = 423.363 \text{ kN}$$

(2) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上反方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

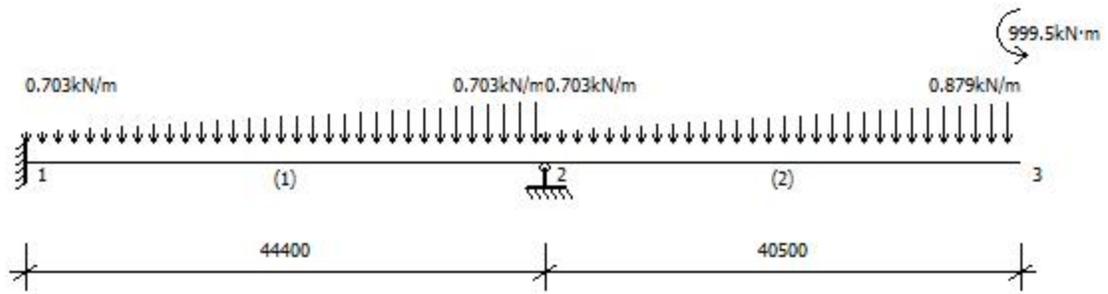
$$\text{最大轴压力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 441.82 \text{ kN}, \quad T_3 = 79.491 \text{ kN}, \quad T_4 = 423.363 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 178.705 \text{ kN}, \quad T_2 = 20.025 \text{ kN}, \quad T_3 = 387.001 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

四、非工作状态下附墙杆内力计算

此工况下塔机回转机构的制动器完全松开，起重臂能随风转动，故不计风荷载产生的扭转力矩。

1、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

得: $R_E=32.743\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座2处锚固环的水平内力 $N_w=R_E=32.743\text{kN}$ 。

根据工作状态方程组 $T_k=0$, θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环, 求解各杆最大轴拉力和轴压力:

最大轴压力 $T_1=9.976\text{kN}$, $T_2=29.017\text{kN}$, $T_3=29.309\text{kN}$, $T_4=20.729\text{kN}$

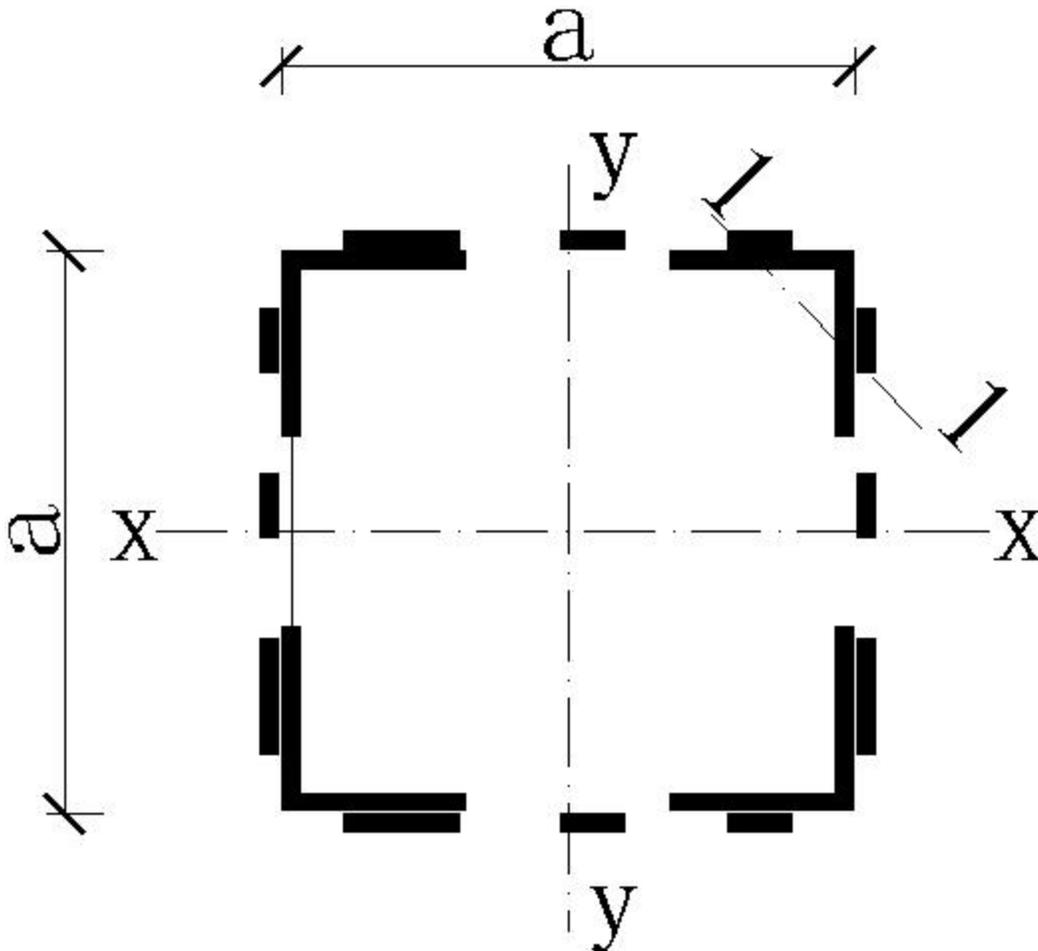
最大轴拉力 $T_1=9.975\text{kN}$, $T_2=29.017\text{kN}$, $T_3=29.309\text{kN}$, $T_4=20.729\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

格构柱参数			
格构柱截面类型	四肢	格构柱缀件形式	缀条
缀件间净距 $l_{01}(\text{mm})$	200	格构柱截面边长 $a(\text{mm})$	400
格构柱分肢参数			
格构柱分肢材料	L100X10	分肢材料截面积 $A_0(\text{cm}^2)$	19.26
分肢对最小刚度轴的回转半径 $i_{y0}(\text{cm})$	1.96	分肢平行于对称轴惯性矩 $I_0(\text{cm}^4)$	179.51

分肢形心轴距分肢外边缘距离 $Z_0(\text{cm})$	2.84	分肢材料强度设计值 $f_y(\text{N}/\text{mm}^2)$	235
分肢材料抗拉、压强度设计值 $f(\text{N}/\text{mm}^2)$	210		
格构柱缀件参数			
缀条材料	L50X5	缀条最小回转半径 $i_{\text{min}}(\text{cm})$	0.98
缀条截面积 $A_z(\text{cm}^2)$	4.8		
角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	10	焊缝计算长度 $l_f(\text{mm})$	250
焊缝强度设计值 $f_{\text{fw}}(\text{N}/\text{mm}^2)$	160		

附图如下:



塔机附着格构柱截面

1、杆件轴心受拉强度验算

$$A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

$$\sigma=N/A=441820/7704=57.349\text{N}/\text{mm}^2\leq [f]=210\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、格构式钢柱换算长细比验算

杆件1的计算长度： $L_0=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}=14380.782\text{mm}$

整个格构柱截面对X、Y轴惯性矩：

$$I_x=4[I_0+A_0(a/2-Z_0)^2]=4\times[179.51+19.26\times(40/2-2.84)^2]=23403.67\text{cm}^4$$

整个构件长细比： $\lambda_x=\lambda_y=L_0/(I_x/(4A_0))^{0.5}=1438.078/(23403.67/(4\times 19.26))^{0.5}=82.508$

分肢长细比： $\lambda_1=l_{01}/i_{y0}=20/1.96=10.204$

分肢毛截面积之和： $A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$

构件截面中垂直于X轴的各斜缀条的毛截面积之和：

$$A_{1x}=2A_z=2\times 480=960\text{mm}^2$$

格构式钢柱绕两主轴的换算长细比：

$$\lambda_{0\max}=(\lambda_x^2+40A/A_{1x})^{0.5}=(82.508^2+40\times 7704/960)^{0.5}=84.431$$

附墙杆1长细比：

$$\lambda_{01\max}=84.431\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.658$$

满足要求！

附墙杆2长细比：

$$\lambda_{02\max}=72.441\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.736$$

满足要求！

附墙杆3长细比：

$$\lambda_{03\max}=56.897\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.823$$

满足要求！

附墙杆4长细比：

$$\lambda_{04\max}=61.17\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.801$$

满足要求！

附墙杆1轴心受压稳定验算：

$$N_1/(\varphi_1Af)=178705/(0.658\times 7704\times 210)=0.168\leq 1$$

满足要求！

附墙杆2轴心受压稳定验算：

$$N_2/(\varphi_2Af)=441820/(0.736\times 7704\times 210)=0.371\leq 1$$

满足要求!

附墙杆3轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3 Af)=387001/(0.823 \times 7704 \times 210)=0.291 \leq 1$$

满足要求!

附墙杆4轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 Af)=423363/(0.801 \times 7704 \times 210)=0.327 \leq 1$$

满足要求!

3、格构式钢柱分肢的长细比验算

附墙杆1钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_1=10.204 \leq 0.7\lambda_{01\max}=0.7 \times 84.431=59.102$$

满足要求!

附墙杆2钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_2=10.204 \leq 0.7\lambda_{02\max}=0.7 \times 72.441=50.709$$

满足要求!

附墙杆3钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_3=10.204 \leq 0.7\lambda_{03\max}=0.7 \times 56.897=39.828$$

满足要求!

附墙杆4钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_4=10.204 \leq 0.7\lambda_{04\max}=0.7 \times 61.17=42.819$$

满足要求!

4、缀件验算

$$\begin{aligned} \text{缀件所受剪力: } V &= Af(f_y/235)^{0.5}/85 = 7704 \times 210.00 \times 10^{-3} \times \\ & (235.00/235)^{0.5}/85 = 19.033 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{格构柱相邻缀板轴线距离: } l_1 = l_{01} + 5 = 20.00 + 5 = 25 \text{ cm}$$

$$\text{作用在一侧缀板上的弯矩: } M_0 = V l_1 / 4 = 19.033 \times 0.25 / 4 = 1.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{分肢型钢形心轴之间距离: } b_1 = a - 2Z_0 = 0.4 - 2 \times 0.0284 = 0.343 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{斜缀条轴向压力值: } N_0 &= V / (2 \cos \alpha) = V / (2a / (a^2 + l_1^2)^{0.5}) = 19.033 / (2 \times \\ & 0.4 / (0.4^2 + 0.25^2)^{0.5}) = 11.223 \text{ kN} \end{aligned}$$

缀条计算长度： $l_1=(a^2+l_1^2)^{0.5}=(400.00^2+250^2)^{0.5}=471.699\text{mm}$

缀条长细比： $\lambda=l_1/i_{\min}=47.17/0.98=48.133\leq 80$

查表《钢结构设计标准》GB50017-2017附录D：b类截面轴心受压构件的稳定系数： $\varphi=0.865$

等边角钢计算稳定性系数：

$\eta=\min(0.6+0.0015\lambda, 1.0)=\min(0.6+0.0015\times 48.133, 1.0)=0.672$

缀条稳定验算：

$N_0/(\varphi\eta A_z f)=11.223\times 10^3/(0.865\times 0.672\times 4.80\times 10^2\times 215)=0.187\leq 1$

满足要求！

需要焊缝长度：

$\Sigma l_w=N_0/(0.7h_f\times 0.85f_f^w)=11.223\times 10^3/(0.7\times 10\times 0.85\times 160)=12\text{mm}\leq l_f=250\text{mm}$

满足要求！

六、附着杆与结构连接节点验算

附着杆与建筑物连接方式	铰接	连接钢板厚度dt(mm)	20
连接钢板强度等级	Q235	建筑物混凝土强度等级	C35
连接板固定方式	锚固螺栓	连接板耳板排数	2
锚固螺栓类型	摩擦型高强螺栓	高强螺栓的性能等级	8.8级
摩擦面抗滑移系数u	0.45	高强螺栓公称直径	M30
一个高强螺栓的预拉力P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目nr	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度L1(mm):	150	右侧吊耳孔中心至连接板高度L2(mm):	300
双吊耳板连接钢板垂直方向螺栓排数 m1	2	双吊耳板连接钢板水平方向螺栓排数 n1	5
双吊耳板连接钢板水平方向最外侧螺栓两端中心线距离S1(mm)	600		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下：

$F_1=N_1\sin\alpha_1=178.705\times\sin 89.402^\circ=178.695\text{kN}$, $V_1=N_1\cos\alpha_1=178.705\times\cos 89.402^\circ$

=1.864kN;

$F_2=N_2\sin\alpha_2=441.82\times\sin 82.532^\circ=438.073\text{kN}$, $V_2=N_2\cos\alpha_2=441.82\times\cos 82.532^\circ$
=57.423kN;

$F_3=N_3\sin\alpha_3=387.001\times\sin 45.646^\circ=276.717\text{kN}$, $V_3=N_3\cos\alpha_3=387.001\times\cos 45.646^\circ$
=270.55kN;

$F_4=N_4\sin\alpha_4=423.363\times\sin 58.805^\circ=362.148\text{kN}$, $V_4=N_4\cos\alpha_4=423.363\times\cos 58.805^\circ$
=219.282kN;

2、螺栓承载力计算

单个高强螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b=0.9k_n\mu P=0.9\times 1\times 1\times 0.45\times 355=143.775\text{kN}$

单个高强螺栓受拉承载力设计值 $N_t^b=0.8P=0.8\times 355=284\text{kN}$

(1) 双吊耳板位置螺栓承载力计算:

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向 ($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向 ($T_k=-T_k$)、非工作状态 ($T_k=0$) 三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}$, $\theta=53^\circ$, $N_1=-20.098\text{kN}$, $N_2=441.061\text{kN}$

轴向拉力合力为:

$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=-20.098\times\sin 89.402^\circ+441.061\times\sin 82.532^\circ=417.223\text{kN}$

水平向剪力合力为:

$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=-20.098\times\cos 89.402^\circ+441.061\times\cos 82.532^\circ=57.114\text{kN}$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=-20.098\times\sin 89.402^\circ\times$
 $0.5/2+(-20.098)\times\cos 89.402^\circ\times 0.15-441.061\times\sin 82.532^\circ\times 0.5/2+441.061\times\cos 82.532^\circ\times$
 $0.3|=97.189\text{kN}\cdot\text{m}$

经分析判断, 按照小偏心进行计算

$$\sum x_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_i [S_1 / 2 - (i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$\sum x_1^2 = 2\times[300^2+(300-1\times 600/4)^2+(300-2\times 600/4)^2+(300-3\times 600/4)^2+(300-4\times$

$$600/4)^2]=900000\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}}=(MS_1/2)/\Sigma x_1^2=(97.189\times 600/2)/(900000/1000)=32.396\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t=F/m_1n_1+N_{\text{附加}}=417.223/(2\times 5)+32.396=74.118\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

$$N_v=|V|/m_1n_1=57.114/(2\times 5)=5.711\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b+N_t/N_t^b=5.711/143.775+74.118/284=0.301\leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=168^\circ, N_3=74.394\text{kN}, N_4=422.687\text{kN}$$

轴向拉力合力为:

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=74.394\times\sin 45.646^\circ+422.687\times\sin 58.805^\circ=414.764\text{kN}$$

水平向剪力合力为:

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=74.394\times\cos 45.646^\circ+422.687\times\cos 58.805^\circ=270.941\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-74.394\times\sin 45.646^\circ\times 0.5/2+74.394\times\cos 45.646^\circ\times 0.15+422.687\times\sin 58.805^\circ\times 0.5/2+422.687\times\cos 58.805^\circ\times 0.3|=150.575\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断, 应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩:

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|74.394\times\sin 45.646^\circ\times(0.6-0.5)/2+74.394\times\cos 45.646^\circ\times 0.15+422.687\times\sin 58.805^\circ\times(0.6+0.5)/2+422.687\times\cos 58.805^\circ\times 0.3|=275.004\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 275.004 \times 600 / 1350 = 122.224 \text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 414.764 / (2 \times 5) + 122.224 = 163.7 \text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

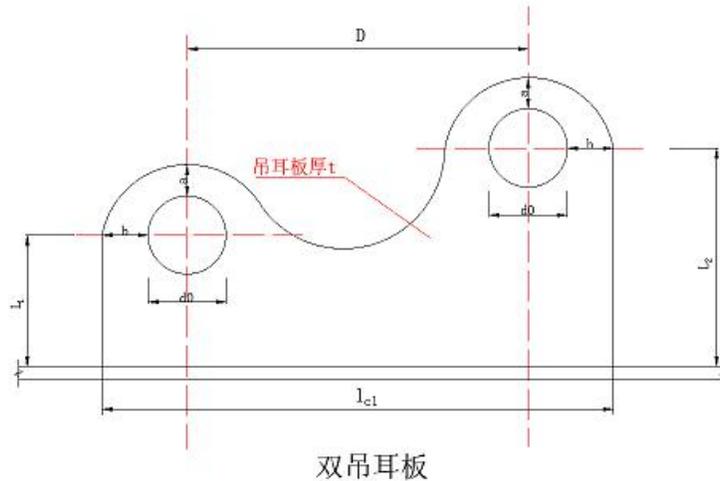
$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 270.941 / (2 \times 5) = 27.094 \text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 27.094 / 143.775 + 163.7 / 284 = 0.765 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚t(mm)	20	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	100
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	80	吊孔直径d ₀ (mm)	60
吊耳板抗拉强度设计值f(N/mm ²)	205	吊耳板抗剪强度设计值f _v (N/mm ²)	120
连接板耳板排数	2		



双吊耳板

参考GB50017-2017，对连接耳板进行如下验算：

吊耳板验算与吊孔中心至连接钢板高度无关，单双吊耳板的a、b、d₀参数均相同，因此单吊耳板与双吊耳板的验算方法相同，取拉力最大值进行计算即可。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 220.91 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 20 + 16 = 56 \text{ mm} \leq b = 100 \text{ mm}$$

满足要求！

$$4B_e / 3 = 4 \times 56 / 3 = 74.667 \text{ mm} \leq a = 80 \text{ mm}$$

满足要求！

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0 / 3) = \min(2 \times 20 + 16, 100 - 60 / 3) = 56 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 220.91 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 56) = 98.621 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求！

(3) 耳板端部截面抗拉（劈开）强度验算

$$\sigma = N_s / [2t(a - 2d_0 / 3)] = 220.91 \times 10^3 / [2 \times 20 \times (80 - 2 \times 60 / 3)] = 138.069 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板端部截面抗拉强度满足要求！

(4) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(80+60/2)^2 - (60/2)^2]^{0.5} = 105.83\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 220.91 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 105.83) = 52.185\text{N/mm}^2 \leq f_v = 120\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 d_1 (mm)	60
销轴材料抗剪强度 f_{v1}^b (N/mm ²)	346

参考GB50017-2017，对销轴进行如下验算：

由附墙杆内力计算章节可知，作用于销轴截面的最大剪力

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 441.82\text{kN}$$

(2) 销轴抗剪强度

$$\tau_b = F / (n \cdot \pi d_1^2 / 4) = 441.82 \times 10^3 / (2 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 78.131\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 346\text{N/mm}^2$$

销轴抗剪强度满足要求!

5、连接钢板焊缝计算

连接钢板角焊缝焊脚尺寸 h_f (mm)	16
连接钢板角焊缝强度设计值 f_f^w (N/mm ²)	160
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 l_{c1} (mm)	680

(1) 双吊耳板位置焊缝验算：

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|417.223| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 14.372\text{N/mm}^2$$

$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|57.114| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 1.967\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (97.189 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 30.998\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{14.372 + 30.998}{1.22})^2 + 1.967^2]^{0.5} = 37.241\text{N/mm}^2 \leq$$

$$f_r^w=160\text{N/mm}^2$$

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|414.764|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 16\times (680-2\times 16)]=14.287\text{N/mm}^2$$

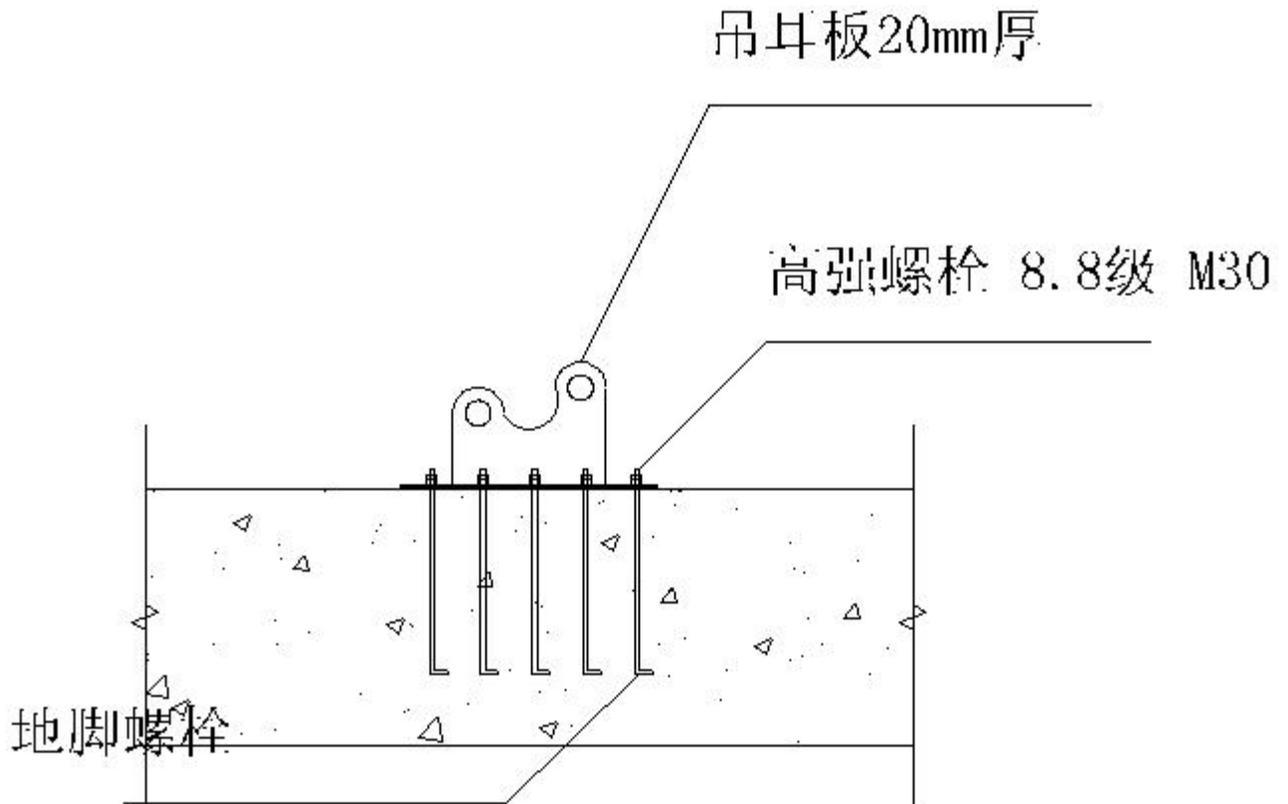
$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|270.941|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 16\times (680-2\times 16)]=9.333\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)^2/6]=(150.575\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 16\times (680-2\times 16)^2/6]=48.026\text{N/mm}^2$$

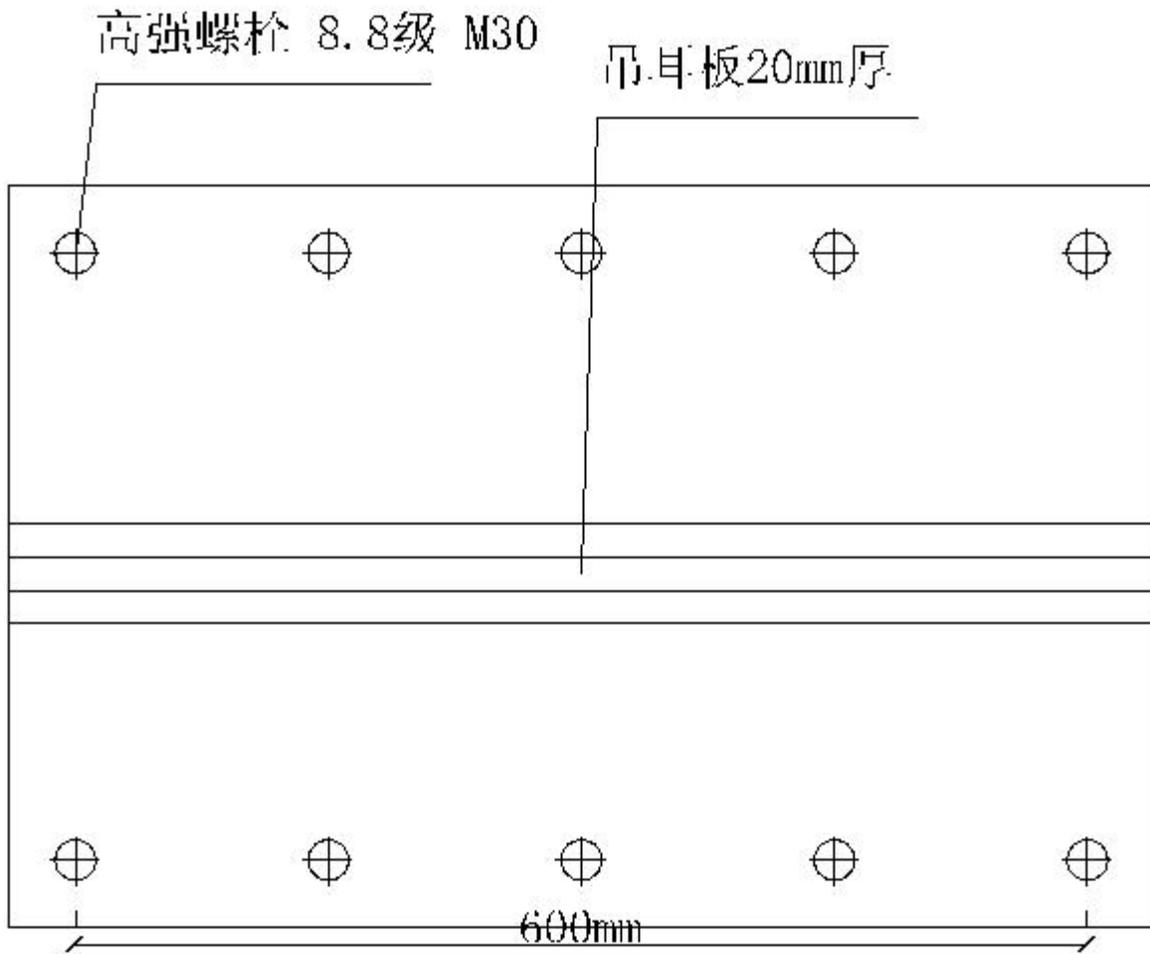
$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}]^2+\tau_V^2)^{0.5}=[\frac{(14.287+48.026)}{1.22}]^2+9.333^2)^{0.5}=51.922\text{N/mm}^2\leq f_r^w=160\text{N/mm}^2$$

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附图如下：



塔机附着节点详图-双吊耳板



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

第2道塔机附着验算计算书

计算依据:

- 1、《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》JGJ/T187-2019
- 2、《钢结构设计标准》GB50017-2017

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT360-20S1	塔身桁架结构类型	角钢
塔机计算高度H(m)	114.9	塔身宽度B(m)	2
起重臂长度 l_1 (m)	50	平衡臂长度 l_2 (m)	17
起重臂与平衡臂截面计算高度h(m)	1.06	工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	837
工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	4362.5	非工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k' (kN·m)	999.5(反向)

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	格构柱	塔身锚固环边长C(m)	2.6

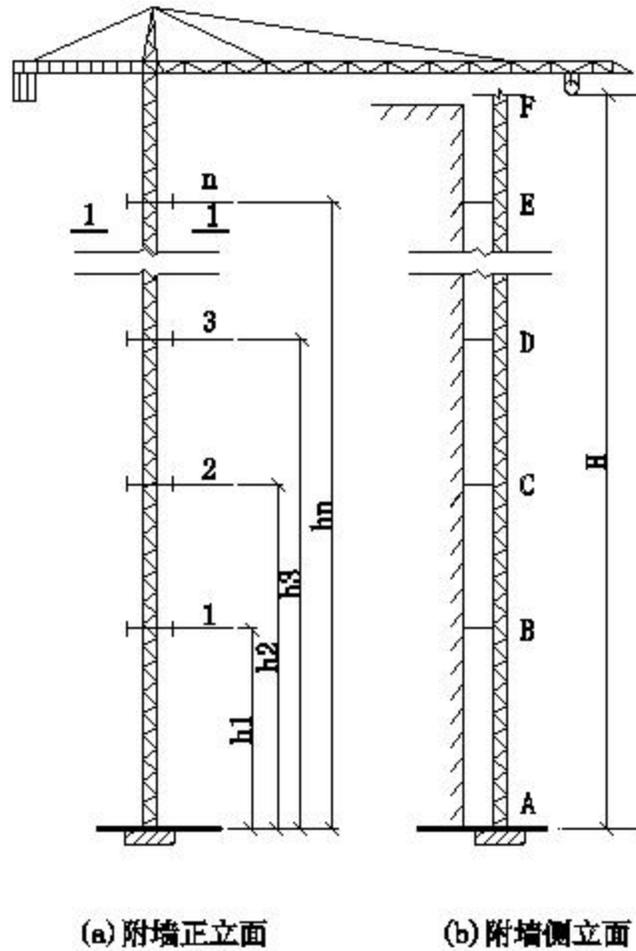
二、风荷载及附着参数

该风荷载取值依据JGJ/T187-2019《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》附录A相关内容进行取值。

附着次数N	2		
附着点1到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.2	点1到塔机的竖向距离 b_1 (m)	15
附着点2到塔机的横向距离 a_2 (m)	1.45	点2到塔机的竖向距离 b_2 (m)	12.7
附着点3到塔机的横向距离 a_3 (m)	8	点3到塔机的竖向距离 b_3 (m)	8.85
附着点4到塔机的横向距离 a_4 (m)	6.95	点4到塔机的竖向距离 b_4 (m)	11.1
工作状态基本风压 ω_0 (kN/m ²)	0.2	非工作状态基本风压 ω_0' (kN/m ²)	0.35
塔身前后片桁架的平均充实率 α_0	0.35		

第N次附着	附着点高度 h_1 (m)	附着点净高 h_{01} (m)	风压等效高度变化系数 μ_z	工作状态风荷载体型系数 μ_s	非工作状态风荷载体型系数 μ_s'	工作状态风振系数 β_z	非工作状态风振系数 β_z'	工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}'
第1次附着	44.4	44.4	0.845	1.95	1.95	1.763	1.815	0.39	0.703
第2次附着	74.4	30	1.021	1.95	1.95	1.726	1.773	0.462	0.83
悬臂端	114.9	40.5	1.23	1.95	1.95	1.691	1.748	0.545	0.986

附图如下:



塔机附着立面图

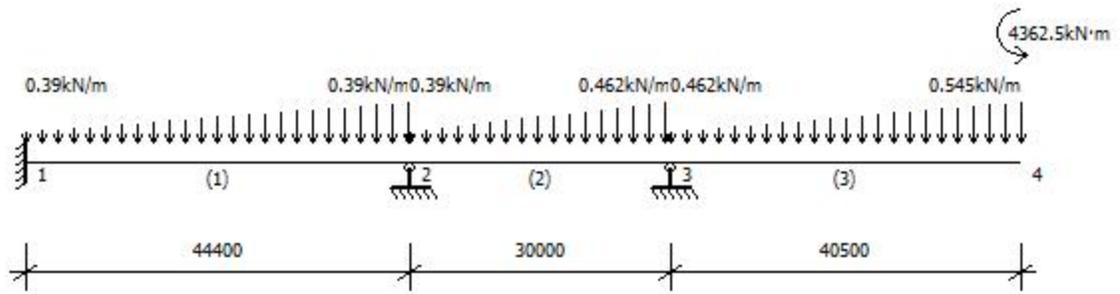
三、工作状态下附墙杆内力计算

1、扭矩组合标准值 T_k

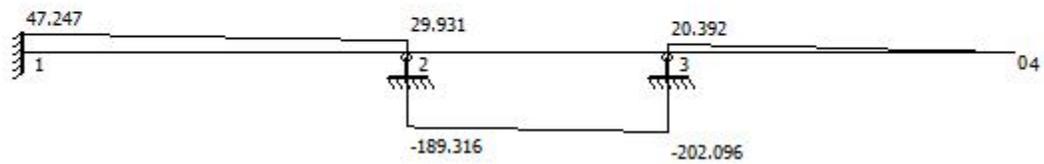
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{k1} = 837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

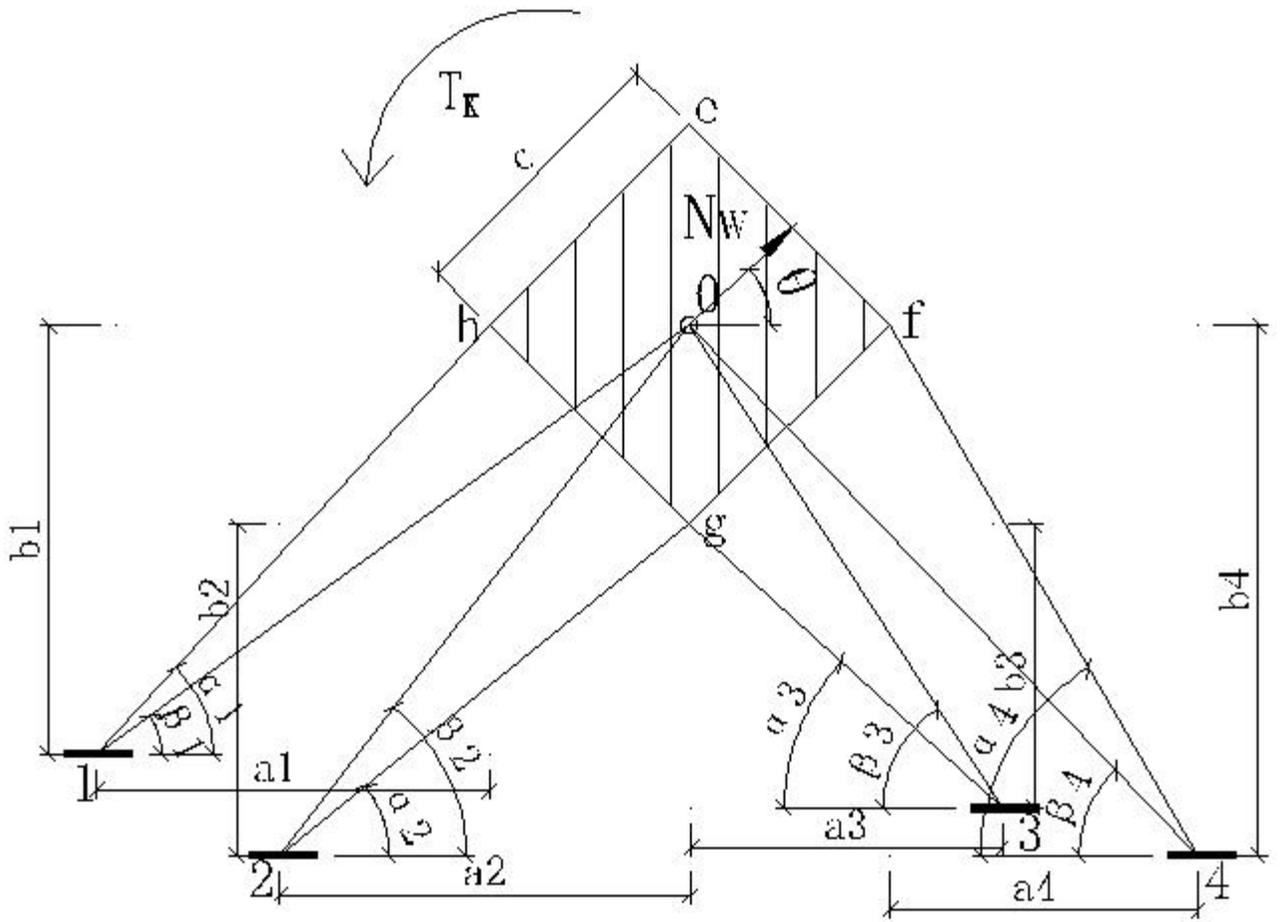
得： $R_E=222.488\text{kN}$

在工作状态下，塔机起重臂位置的不确定性以及风向的随机性，在计算支座3处锚固环截面内力时需考虑塔身承受双向的风荷载和倾覆力矩及扭矩。

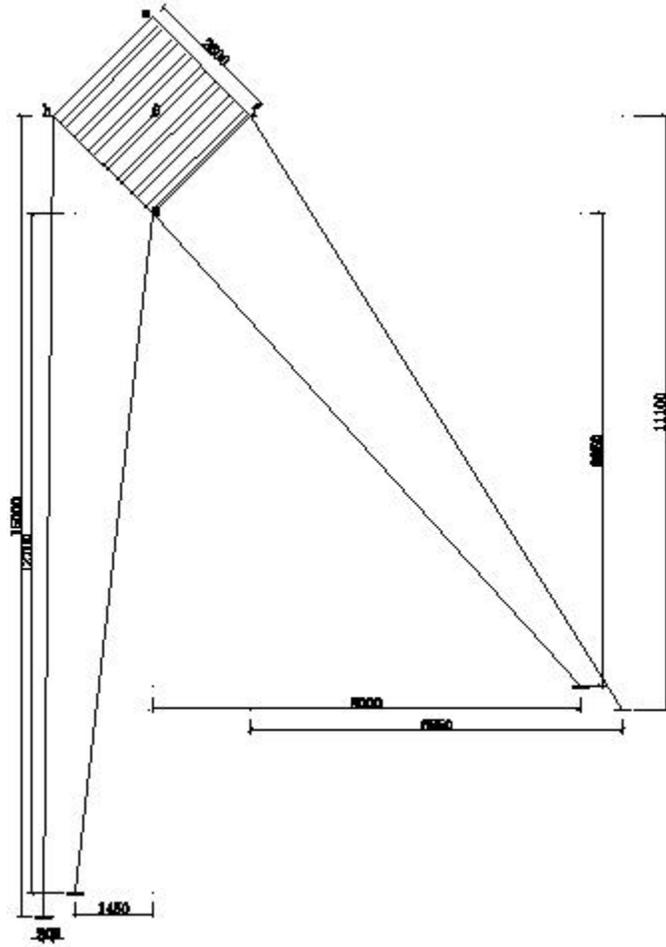
3、附墙杆内力计算

支座3处锚固环的截面扭矩 T_k （考虑塔机产生的扭矩由支座3处的附墙杆承担），水平内力 $N_w=2^{0.5}R_E=314.646\text{kN}$ 。

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 89.236^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 83.487^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 47.888^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 57.948^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 82.261^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 84.304^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 53.186^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 51.629^\circ$$

四杆附着属于一次超静定结构，用力法计算，切断 T_4 杆并代以相应多余未知力

$X_1=1$ 。

$$\delta_{11} \times X_1 + \Delta_{1p} = 0$$

$X_1=1$ 时，各杆件轴力计算：

$$T_{11} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{21} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{31} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - 1 \times \sin(\alpha_4 - \beta_4) \times b_4 / \sin \beta_4 = 0$$

$$T_{21} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{21} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{31} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{31} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

$$T_{11} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{11} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \cos \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

当 N_w 、 T_k 同时存在时， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，各杆件轴力计算：

$$T_{1p} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{2p} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{3p} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - T_k = 0$$

$$T_{2p} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{2p} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{3p} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{3p} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \sin \theta \times (2^{0.5} \times c/2) + T_k = 0$$

$$T_{1p} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{1p} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \cos \theta \times (2^{0.5} \times c/2) - T_k = 0$$

$$\delta_{11} = \Sigma(T_1^2 L / (EA)) = T_{11}^2 (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21}^2 (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31}^2 (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA) + 1^2 (a_4 / \cos \alpha_4) / (EA)$$

$$\Delta_{1p} = \Sigma(T_1 \times T_p L / (EA)) = T_{11} \times T_{1p} (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21} \times T_{2p} (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31} \times T_{3p} (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA)$$

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11}$$

各杆轴力计算公式如下：

$$T_1 = T_{11} \times X_1 + T_{1p}, \quad T_2 = T_{21} \times X_1 + T_{2p}, \quad T_3 = T_{31} \times X_1 + T_{3p}, \quad T_4 = X_1$$

(1) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

$$\text{最大轴压力 } T_1 = 213.058 \text{ kN}, \quad T_2 = 55.701 \text{ kN}, \quad T_3 = 441.945 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 533.115 \text{ kN}, \quad T_3 = 136.982 \text{ kN}, \quad T_4 = 438.149 \text{ kN}$$

(2) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上反方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

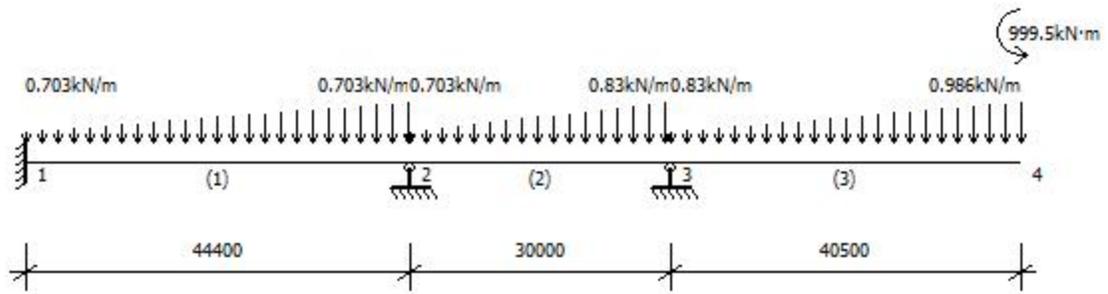
$$\text{最大轴压力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 533.114 \text{ kN}, \quad T_3 = 136.982 \text{ kN}, \quad T_4 = 438.15 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 213.058 \text{ kN}, \quad T_2 = 55.701 \text{ kN}, \quad T_3 = 441.945 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

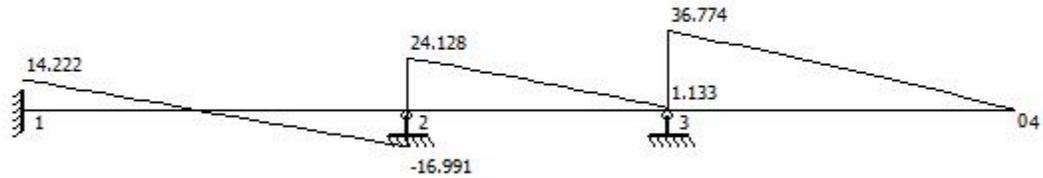
四、非工作状态下附墙杆内力计算

此工况下塔机回转机构的制动器完全松开，起重臂能随风转动，故不计风荷载产生的扭转力矩。

1、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

得: $R_E=41.118\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座3处锚固环的水平内力 $N_w=R_E=41.118\text{kN}$ 。

根据工作状态方程组 $T_k=0$, θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环, 求解各杆最大轴拉力和轴压力:

最大轴压力 $T_1=11.48\text{kN}$, $T_2=38.474\text{kN}$, $T_3=37.827\text{kN}$, $T_4=26.119\text{kN}$

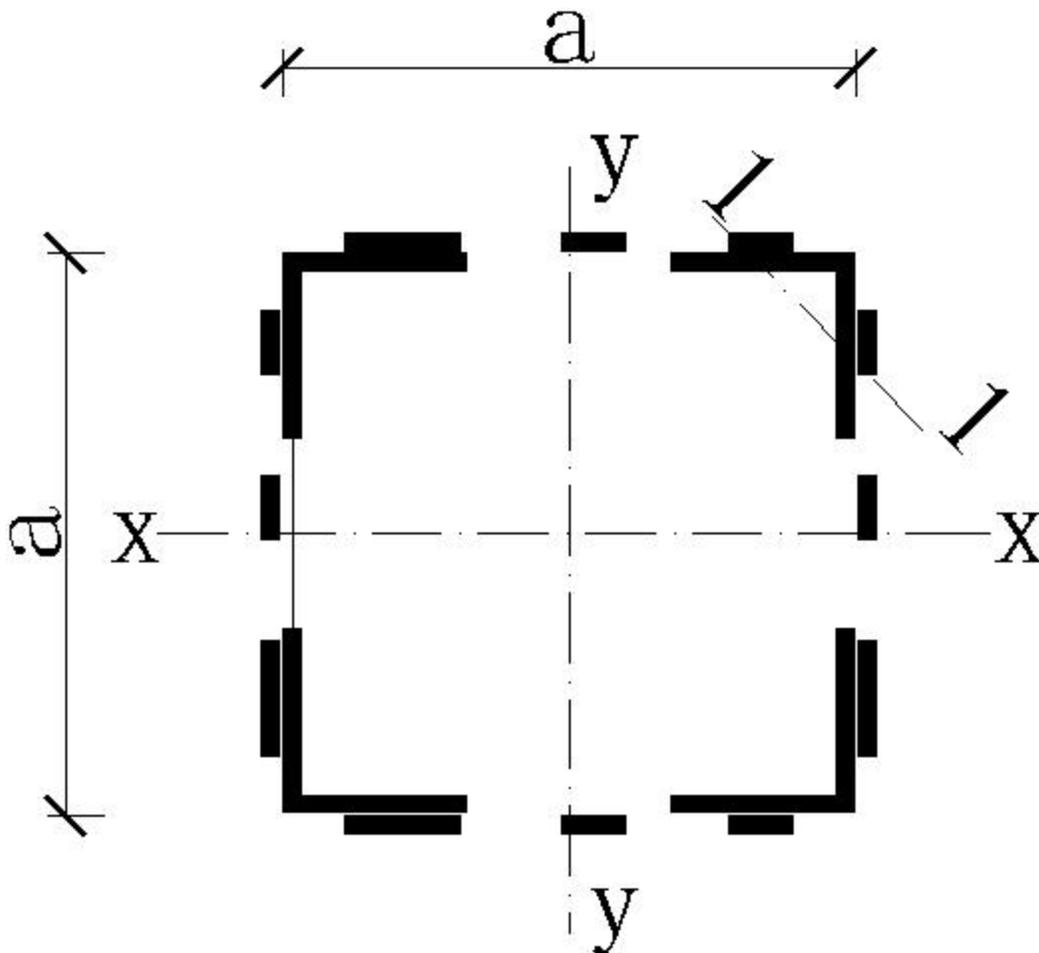
最大轴拉力 $T_1=11.48\text{kN}$, $T_2=38.473\text{kN}$, $T_3=37.827\text{kN}$, $T_4=26.118\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

格构柱参数			
格构柱截面类型	四肢	格构柱缀件形式	缀条
缀件间净距 $l_{01}(\text{mm})$	200	格构柱截面边长 $a(\text{mm})$	400
格构柱分肢参数			
格构柱分肢材料	L100X10	分肢材料截面面积 $A_0(\text{cm}^2)$	19.26
分肢对最小刚度轴的回转半径 $i_{y0}(\text{cm})$	1.96	分肢平行于对称轴惯性矩 $I_0(\text{cm}^4)$	179.51

分肢形心轴距分肢外边缘距离 $Z_0(\text{cm})$	2.84	分肢材料强度设计值 $f_y(\text{N}/\text{mm}^2)$	235
分肢材料抗拉、压强度设计值 $f(\text{N}/\text{mm}^2)$	210		
格构柱缀件参数			
缀条材料	L50X5	缀条最小回转半径 $i_{\text{min}}(\text{cm})$	0.98
缀条截面面积 $A_z(\text{cm}^2)$	4.8		
角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	10	焊缝计算长度 $l_f(\text{mm})$	250
焊缝强度设计值 $f_{\text{fw}}(\text{N}/\text{mm}^2)$	160		

附图如下:



塔机附着格构柱截面

1、杆件轴心受拉强度验算

$$A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

$$\sigma=N/A=533114/7704=69.2\text{N}/\text{mm}^2\leq [f]=210\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、格构式钢柱换算长细比验算

杆件1的计算长度： $L_0=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}=15001.333\text{mm}$

整个格构柱截面对X、Y轴惯性矩：

$$I_x=4[I_0+A_0(a/2-Z_0)^2]=4\times[179.51+19.26\times(40/2-2.84)^2]=23403.67\text{cm}^4$$

整个构件长细比： $\lambda_x=\lambda_y=L_0/(I_x/(4A_0))^{0.5}=1500.133/(23403.67/(4\times 19.26))^{0.5}=86.069$

分肢长细比： $\lambda_1=l_{01}/i_{y0}=20/1.96=10.204$

分肢毛截面积之和： $A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$

构件截面中垂直于X轴的各斜缀条的毛截面积之和：

$$A_{1x}=2A_z=2\times 480=960\text{mm}^2$$

格构式钢柱绕两主轴的换算长细比：

$$\lambda_{0\max}=(\lambda_x^2+40A/A_{1x})^{0.5}=(86.069^2+40\times 7704/960)^{0.5}=87.914$$

附墙杆1长细比：

$$\lambda_{01\max}=87.914\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.635$$

满足要求！

附墙杆2长细比：

$$\lambda_{02\max}=75.496\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.717$$

满足要求！

附墙杆3长细比：

$$\lambda_{03\max}=70.753\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.746$$

满足要求！

附墙杆4长细比：

$$\lambda_{04\max}=77.246\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.706$$

满足要求！

附墙杆1轴心受压稳定验算：

$$N_1/(\varphi_1Af)=213058/(0.635\times 7704\times 210)=0.207\leq 1$$

满足要求！

附墙杆2轴心受压稳定验算：

$$N_2/(\varphi_2Af)=533115/(0.717\times 7704\times 210)=0.46\leq 1$$

满足要求!

附墙杆3轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3 Af)=441945/(0.746 \times 7704 \times 210)=0.366 \leq 1$$

满足要求!

附墙杆4轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 Af)=438149/(0.706 \times 7704 \times 210)=0.384 \leq 1$$

满足要求!

3、格构式钢柱分肢的长细比验算

附墙杆1钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_1=10.204 \leq 0.7\lambda_{01\max}=0.7 \times 87.914=61.54$$

满足要求!

附墙杆2钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_2=10.204 \leq 0.7\lambda_{02\max}=0.7 \times 75.496=52.847$$

满足要求!

附墙杆3钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_3=10.204 \leq 0.7\lambda_{03\max}=0.7 \times 70.753=49.527$$

满足要求!

附墙杆4钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_4=10.204 \leq 0.7\lambda_{04\max}=0.7 \times 77.246=54.072$$

满足要求!

4、缀件验算

$$\begin{aligned} \text{缀件所受剪力: } V &= Af(f_y/235)^{0.5}/85 = 7704 \times 210.00 \times 10^{-3} \times \\ & (235.00/235)^{0.5}/85 = 19.033 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{格构柱相邻缀板轴线距离: } l_1 = l_{01} + 5 = 20.00 + 5 = 25 \text{ cm}$$

$$\text{作用在一侧缀板上的弯矩: } M_0 = V l_1 / 4 = 19.033 \times 0.25 / 4 = 1.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{分肢型钢形心轴之间距离: } b_1 = a - 2Z_0 = 0.4 - 2 \times 0.0284 = 0.343 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{斜缀条轴向压力值: } N_0 &= V / (2 \cos \alpha) = V / (2a / (a^2 + l_1^2)^{0.5}) = 19.033 / (2 \times \\ & 0.4 / (0.4^2 + 0.25^2)^{0.5}) = 11.223 \text{ kN} \end{aligned}$$

缀条计算长度： $l_1=(a^2+l_1^2)^{0.5}=(400.00^2+250^2)^{0.5}=471.699\text{mm}$

缀条长细比： $\lambda=l_1/i_{\min}=47.17/0.98=48.133\leq 80$

查表《钢结构设计标准》GB50017-2017附录D：b类截面轴心受压构件的稳定系数： $\varphi=0.865$

等边角钢计算稳定性系数：

$\eta=\min(0.6+0.0015\lambda, 1.0)=\min(0.6+0.0015\times 48.133, 1.0)=0.672$

缀条稳定验算：

$N_0/(\varphi\eta A_z f)=11.223\times 10^3/(0.865\times 0.672\times 4.80\times 10^2\times 215)=0.187\leq 1$

满足要求！

需要焊缝长度：

$\Sigma l_w=N_0/(0.7h_f\times 0.85f_f^w)=11.223\times 10^3/(0.7\times 10\times 0.85\times 160)=12\text{mm}\leq l_f=250\text{mm}$

满足要求！

六、附着杆与结构连接节点验算

附着杆与建筑物连接方式	铰接	连接钢板厚度dt(mm)	20
连接钢板强度等级	Q235	建筑物混凝土强度等级	C35
连接板固定方式	锚固螺栓	连接板耳板排数	2
锚固螺栓类型	摩擦型高强螺栓	高强螺栓的性能等级	8.8级
摩擦面抗滑移系数u	0.45	高强螺栓公称直径	M30
一个高强螺栓的预拉力P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目nr	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度L1(mm):	150	右侧吊耳孔中心至连接板高度L2(mm):	300
双吊耳板连接钢板垂直方向螺栓排数 m1	2	双吊耳板连接钢板水平方向螺栓排数 n1	5
双吊耳板连接钢板水平方向最外侧螺栓两端中心线距离S1(mm)	600		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下：

$F_1=N_1\sin\alpha_1=213.058\times\sin 89.236^\circ=213.039\text{kN}$, $V_1=N_1\cos\alpha_1=213.058\times\cos 89.236^\circ$

=2.841kN;

$F_2=N_2\sin\alpha_2=533.115\times\sin83.487^\circ=529.674\text{kN}$, $V_2=N_2\cos\alpha_2=533.115\times\cos83.487^\circ=60.475\text{kN}$;

$F_3=N_3\sin\alpha_3=441.945\times\sin47.888^\circ=327.85\text{kN}$, $V_3=N_3\cos\alpha_3=441.945\times\cos47.888^\circ=296.361\text{kN}$;

$F_4=N_4\sin\alpha_4=438.149\times\sin57.948^\circ=371.362\text{kN}$, $V_4=N_4\cos\alpha_4=438.149\times\cos57.948^\circ=232.519\text{kN}$;

2、螺栓承载力计算

单个高强螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b=0.9k_n\mu P=0.9\times1\times1\times0.45\times355=143.775\text{kN}$

单个高强螺栓受拉承载力设计值 $N_t^b=0.8P=0.8\times355=284\text{kN}$

(1) 双吊耳板位置螺栓承载力计算:

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向 ($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向 ($T_k=-T_k$)、非工作状态 ($T_k=0$) 三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}$, $\theta=51^\circ$, $N_1=-37.739\text{kN}$, $N_2=532.134\text{kN}$

轴向拉力合力为:

$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=-37.739\times\sin89.236^\circ+532.134\times\sin83.487^\circ=490.964\text{kN}$

水平向剪力合力为:

$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=-37.739\times\cos89.236^\circ+532.134\times\cos83.487^\circ=59.86\text{kN}$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=-37.739\times\sin89.236^\circ\times0.5/2+(-37.739)\times\cos89.236^\circ\times0.15-532.134\times\sin83.487^\circ\times0.5/2+532.134\times\cos83.487^\circ\times0.3|=123.575\text{kN}\cdot\text{m}$

经分析判断, 按照小偏心进行计算

$$\sum x_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_i [S_1 / 2 - (i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$\sum x_1^2 = 2\times[300^2+(300-1\times600/4)^2+(300-2\times600/4)^2+(300-3\times600/4)^2+(300-4\times$

$$600/4)^2]=900000\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}}=(MS_1/2)/\Sigma x_1^2=(123.575\times 600/2)/(900000/1000)=41.192\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t=F/m_1n_1+N_{\text{附加}}=490.964/(2\times 5)+41.192=90.288\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

$$N_v=|V|/m_1n_1=59.86/(2\times 5)=5.986\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b+N_t/N_t^b=5.986/143.775+90.288/284=0.36\leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=170^\circ, N_3=132.451\text{kN}, N_4=437.2\text{kN}$$

轴向拉力合力为:

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=132.451\times\sin 47.888^\circ+437.2\times\sin 57.948^\circ=468.814\text{kN}$$

水平向剪力合力为:

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=132.451\times\cos 47.888^\circ+437.2\times\cos 57.948^\circ=320.835\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-132.451\times\sin 47.888^\circ\times 0.5/2+132.451\times\cos 47.888^\circ\times 0.15+437.2\times\sin 57.948^\circ\times 0.5/2+437.2\times\cos 57.948^\circ\times 0.3|=151.003\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断, 应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩:

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|132.451\times\sin 47.888^\circ\times(0.6-0.5)/2+132.451\times\cos 47.888^\circ\times 0.15+437.2\times\sin 57.948^\circ\times(0.6+0.5)/2+437.2\times\cos 57.948^\circ\times 0.3|=291.647\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 291.647 \times 600 / 1350 = 129.621 \text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 468.814 / (2 \times 5) + 129.621 = 176.502 \text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

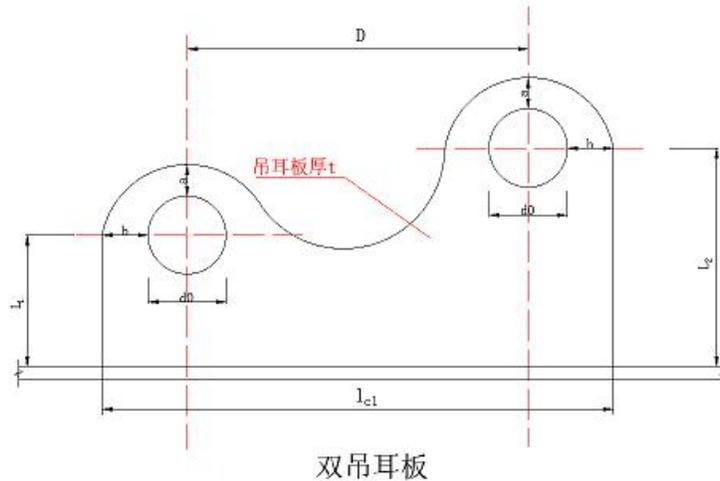
$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 320.835 / (2 \times 5) = 32.084 \text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 32.084 / 143.775 + 176.502 / 284 = 0.845 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚t(mm)	20	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	100
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	80	吊孔直径d ₀ (mm)	60
吊耳板抗拉强度设计值f(N/mm ²)	205	吊耳板抗剪强度设计值f _v (N/mm ²)	120
连接板耳板排数	2		



双吊耳板

参考GB50017-2017，对连接耳板进行如下验算：

吊耳板验算与吊孔中心至连接钢板高度无关，单双吊耳板的 a 、 b 、 d_0 参数均相同，因此单吊耳板与双吊耳板的验算方法相同，取拉力最大值进行计算即可。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 266.558 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 20 + 16 = 56 \text{ mm} \leq b = 100 \text{ mm}$$

满足要求！

$$4B_e / 3 = 4 \times 56 / 3 = 74.667 \text{ mm} \leq a = 80 \text{ mm}$$

满足要求！

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0 / 3) = \min(2 \times 20 + 16, 100 - 60 / 3) = 56 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 266.558 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 56) = 118.999 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求！

(3) 耳板端部截面抗拉（劈开）强度验算

$$\sigma = N_s / [2t(a - 2d_0 / 3)] = 266.558 \times 10^3 / [2 \times 20 \times (80 - 2 \times 60 / 3)] = 166.598 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板端部截面抗拉强度满足要求！

(4) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(80+60/2)^2 - (60/2)^2]^{0.5} = 105.83\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 266.558 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 105.83) = 62.968\text{N/mm}^2 \leq f_v = 120\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60
销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	346

参考GB50017-2017，对销轴进行如下验算：

由附墙杆内力计算章节可知，作用于销轴截面的最大剪力

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 533.115\text{kN}$$

(2) 销轴抗剪强度

$$\tau_b = F / (n \cdot \pi d_1^2 / 4) = 533.115 \times 10^3 / (2 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 94.275\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 346\text{N/mm}^2$$

销轴抗剪强度满足要求!

5、连接钢板焊缝计算

连接钢板角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	16
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	160
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	680

(1) 双吊耳板位置焊缝验算：

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|490.964| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 16.912\text{N/mm}^2$$

$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|59.86| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 2.062\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)^2 / 6] = (123.575 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 39.414\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{16.912 + 39.414}{1.22})^2 + 2.062^2]^{0.5} = 46.215 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|468.814| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 16.149 \text{ N/mm}^2$$

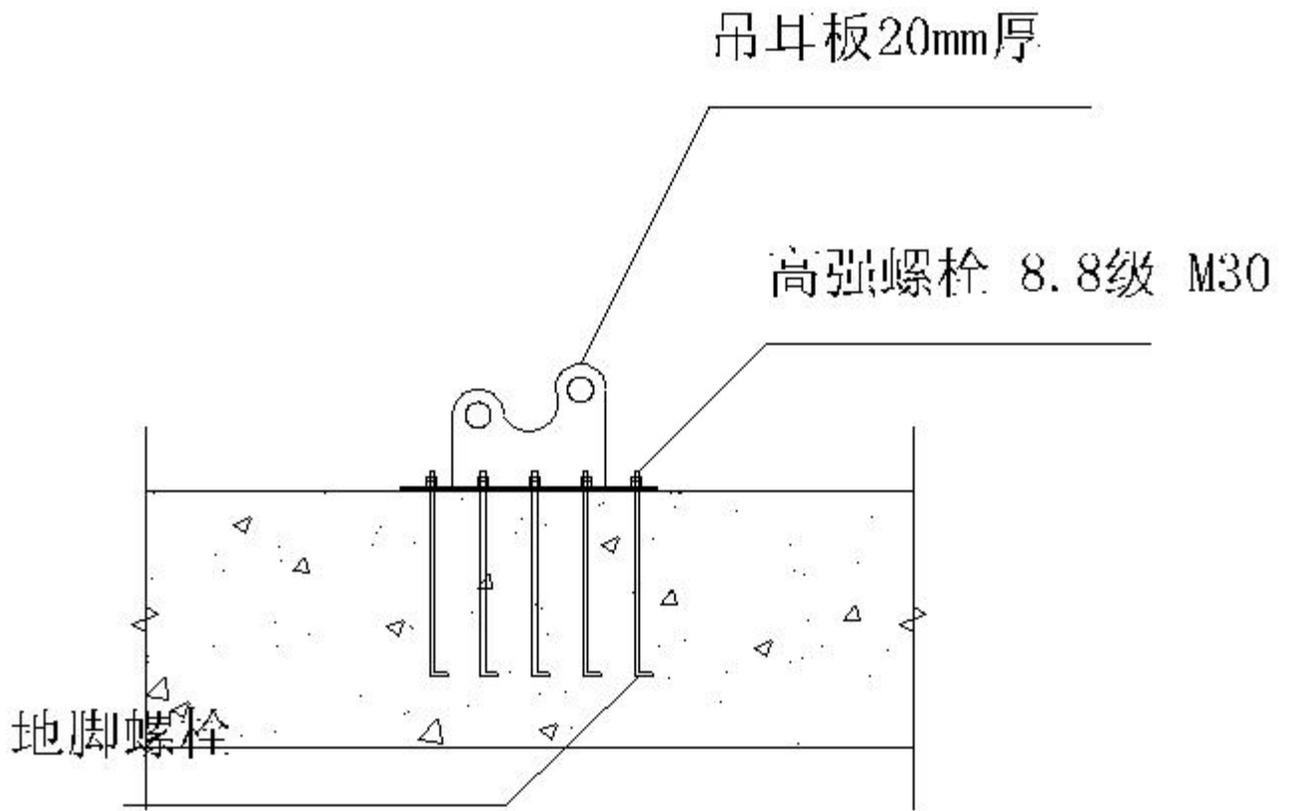
$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|320.835| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 11.052 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)^2 / 6] = (151.003 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 48.162 \text{ N/mm}^2$$

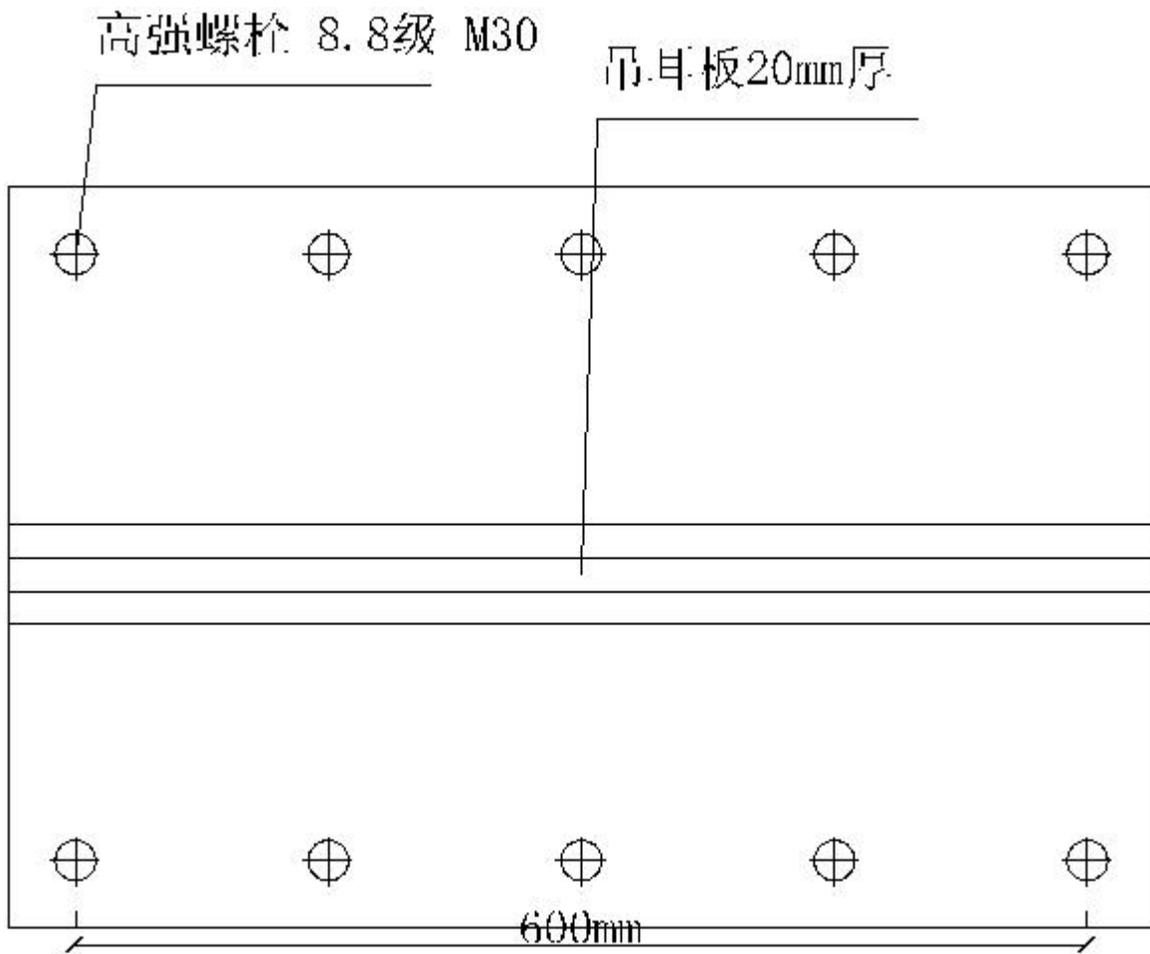
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{16.149 + 48.162}{1.22})^2 + 11.052^2]^{0.5} = 53.86 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附图如下：



塔机附着节点详图-双吊耳板



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

第3道塔机附着验算计算书

计算依据:

- 1、《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》JGJ/T187-2019
- 2、《钢结构设计标准》GB50017-2017

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT360-20S1	塔身桁架结构类型	角钢
塔机计算高度H(m)	144.9	塔身宽度B(m)	2
起重臂长度 l_1 (m)	50	平衡臂长度 l_2 (m)	17
起重臂与平衡臂截面计算高度h(m)	1.06	工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	837
工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	4362.5	非工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k' (kN·m)	999.5(反向)

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	格构柱	塔身锚固环边长C(m)	2.6

二、风荷载及附着参数

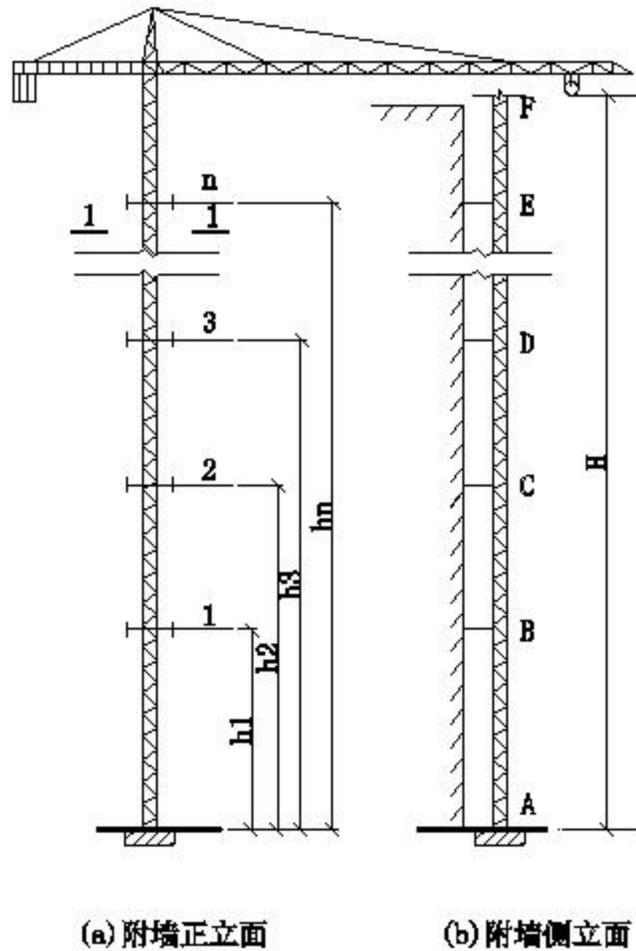
该风荷载取值依据JGJ/T187-2019《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》附录A相关内容进行取值。

附着次数N	3		
附着点1到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.15	点1到塔机的竖向距离 b_1 (m)	15.8
附着点2到塔机的横向距离 a_2 (m)	1.25	点2到塔机的竖向距离 b_2 (m)	13.38
附着点3到塔机的横向距离 a_3 (m)	7.76	点3到塔机的竖向距离 b_3 (m)	9.83
附着点4到塔机的横向距离 a_4 (m)	6.63	点4到塔机的竖向距离 b_4 (m)	12.13
工作状态基本风压 ω_0 (kN/m ²)	0.2	非工作状态基本风压 ω_0' (kN/m ²)	0.35
塔身前后片桁架的平均充实率 α_0	0.35		

第N次附着	附着点高度 h_1 (m)	附着点净高 h_{01} (m)	风压等效高度变化系数 μ_z	工作状态风荷载体型系数 μ_s	非工作状态风荷载体型系数 μ_s'	工作状态风振系数 β_z	非工作状态风振系数 β_z'	工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}'
第1次附着	44.4	44.4	0.845	1.95	1.95	1.763	1.815	0.39	0.703
第2次附着	74.4	30	1.021	1.95	1.95	1.726	1.773	0.462	0.83
第3次附着	104.4	30	1.172	1.95	1.95	1.698	1.75	0.522	0.941

悬臂端	144.9	40.5	1.352	1.95	1.95	1.669	1.721	0.591	1.067
-----	-------	------	-------	------	------	-------	-------	-------	-------

附图如下:



塔机附着立面图

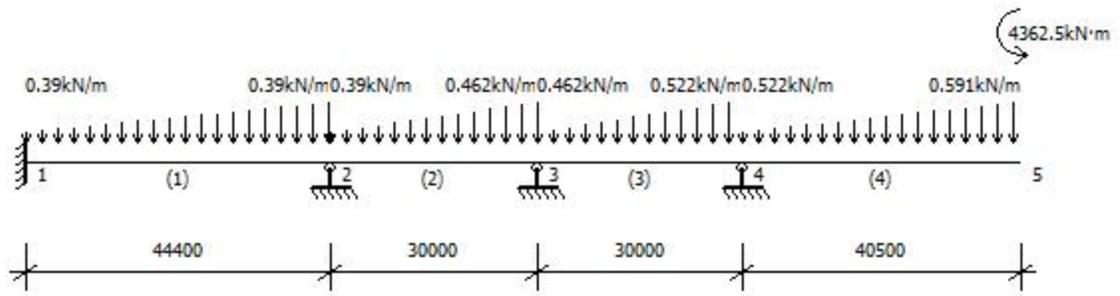
三、工作状态下附墙杆内力计算

1、扭矩组合标准值 T_k

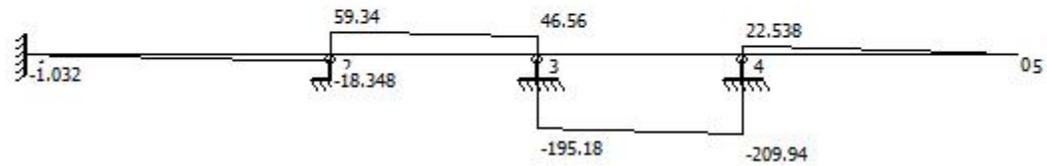
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{k1} = 837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

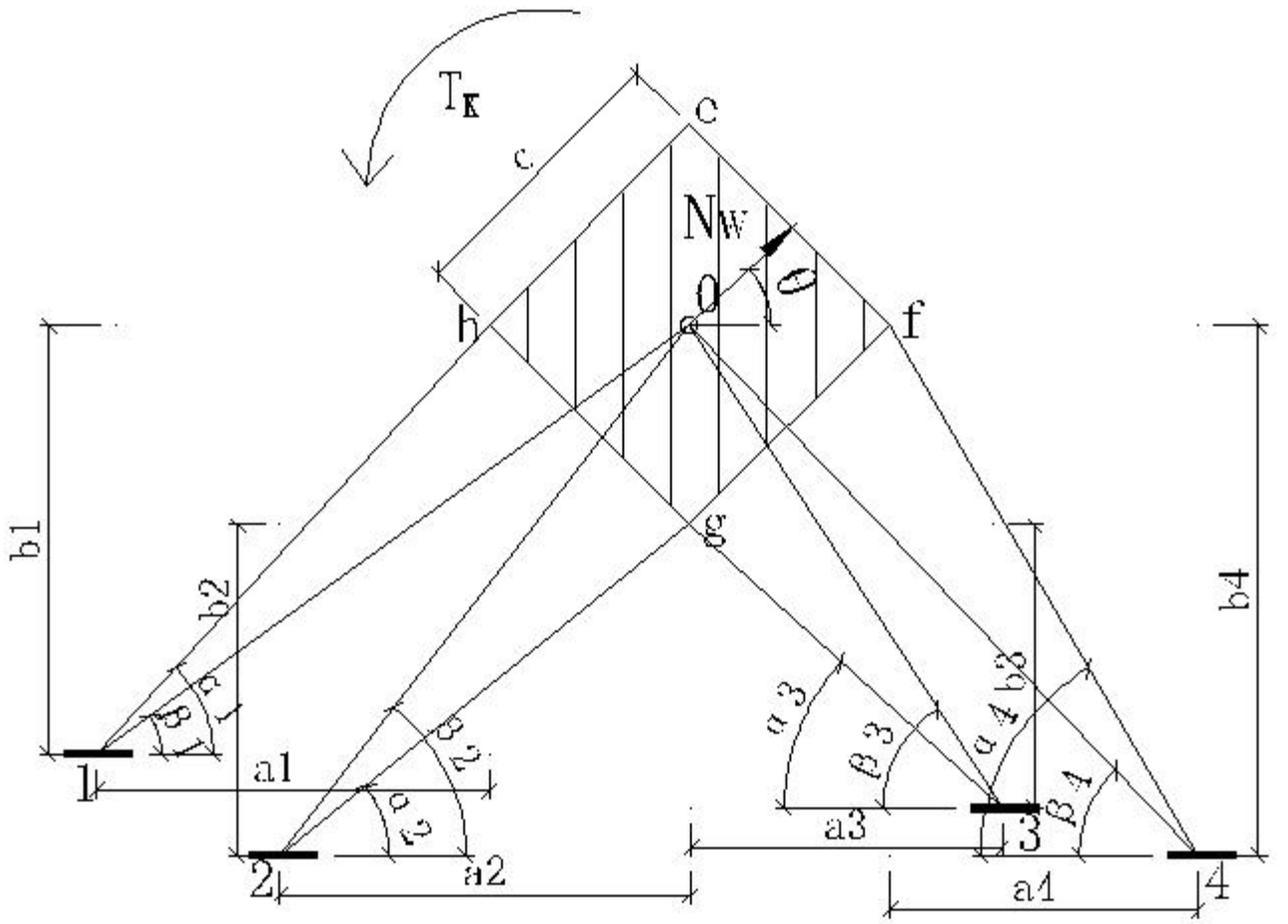
得: $R_E=241.739\text{kN}$

在工作状态下,塔机起重臂位置的不确定性以及风向的随机性,在计算支座4处锚固环截面内力时需考虑塔身承受双向的风荷载和倾覆力矩及扭矩。

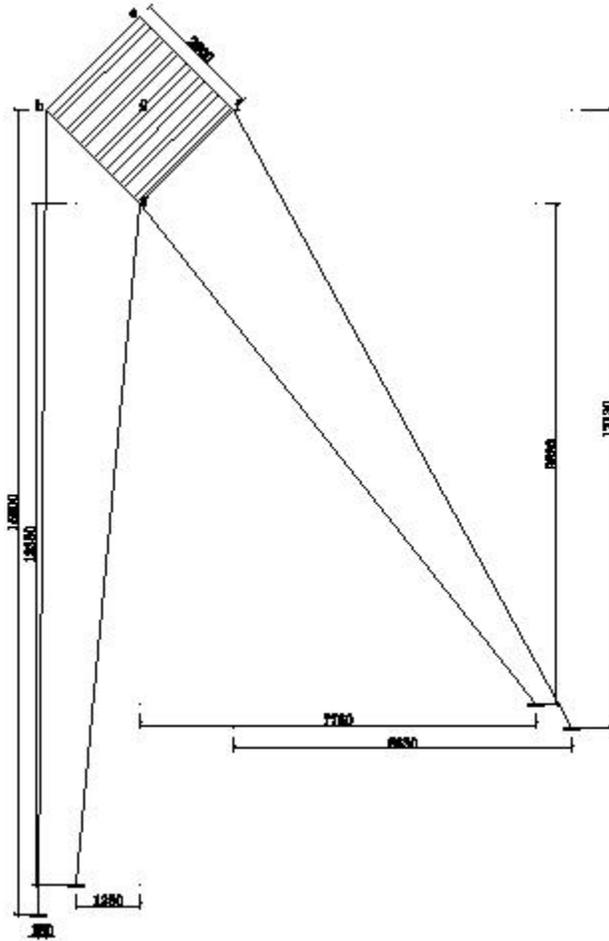
3、附墙杆内力计算

支座4处锚固环的截面扭矩 T_k (考虑塔机产生的扭矩由支座4处的附墙杆承担),水平内力 $N_w=2^{0.5}R_E=341.871\text{kN}$ 。

计算简图:



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 89.456^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 84.663^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 51.712^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 61.34^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 82.827^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 85.304^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 56.375^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 55.079^\circ$$

四杆附着属于一次超静定结构，用力法计算，切断T₄杆并代以相应多余未知力

X₁=1。

$$\delta_{11} \times X_1 + \Delta_{1p} = 0$$

X₁=1时，各杆件轴力计算：

$$T_{11} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{21} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{31} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - 1 \times \sin(\alpha_4 - \beta_4) \times b_4 / \sin \beta_4 = 0$$

$$T_{21} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{21} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{31} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{31} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

$$T_{11} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{11} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \cos \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

当 N_w 、 T_k 同时存在时， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，各杆件轴力计算：

$$T_{1p} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{2p} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{3p} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - T_k = 0$$

$$T_{2p} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{2p} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{3p} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{3p} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \sin \theta \times (2^{0.5} \times c/2) + T_k = 0$$

$$T_{1p} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{1p} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \cos \theta \times (2^{0.5} \times c/2) - T_k = 0$$

$$\delta_{11} = \Sigma(T_1^2 L / (EA)) = T_{11}^2 (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21}^2 (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31}^2 (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA) + 1^2 (a_4 / \cos \alpha_4) / (EA)$$

$$\Delta_{1p} = \Sigma(T_1 \times T_p L / (EA)) = T_{11} \times T_{1p} (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21} \times T_{2p} (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31} \times T_{3p} (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA)$$

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11}$$

各杆轴力计算公式如下：

$$T_1 = T_{11} \times X_1 + T_{1p}, \quad T_2 = T_{21} \times X_1 + T_{2p}, \quad T_3 = T_{31} \times X_1 + T_{3p}, \quad T_4 = X_1$$

(1) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

$$\text{最大轴压力 } T_1 = 221.781 \text{ kN}, \quad T_2 = 102.464 \text{ kN}, \quad T_3 = 505.535 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 595.304 \text{ kN}, \quad T_3 = 203.563 \text{ kN}, \quad T_4 = 459.215 \text{ kN}$$

(2) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上反方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

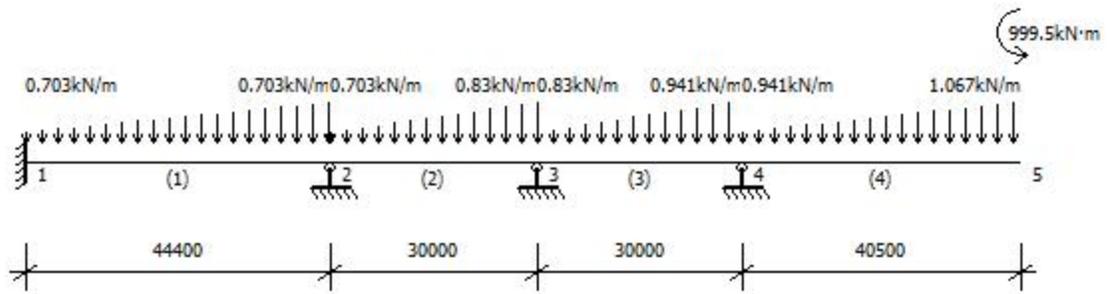
$$\text{最大轴压力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 595.304 \text{ kN}, \quad T_3 = 203.562 \text{ kN}, \quad T_4 = 459.215 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 221.781 \text{ kN}, \quad T_2 = 102.464 \text{ kN}, \quad T_3 = 505.536 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

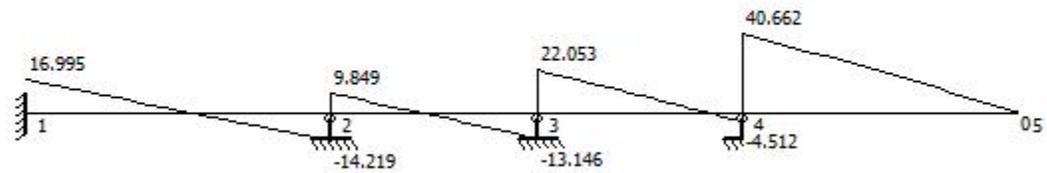
四、非工作状态下附墙杆内力计算

此工况下塔机回转机构的制动器完全松开，起重臂能随风转动，故不计风荷载产生的扭转力矩。

1、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

得: $R_E=45.174\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座4处锚固环的水平内力 $N_w=R_E=45.174\text{kN}$ 。

根据工作状态方程组 $T_k=0$, θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环, 求解各杆最大轴拉力和轴压力:

最大轴压力 $T_1=12.582\text{kN}$, $T_2=46.1\text{kN}$, $T_3=46.849\text{kN}$, $T_4=28.784\text{kN}$

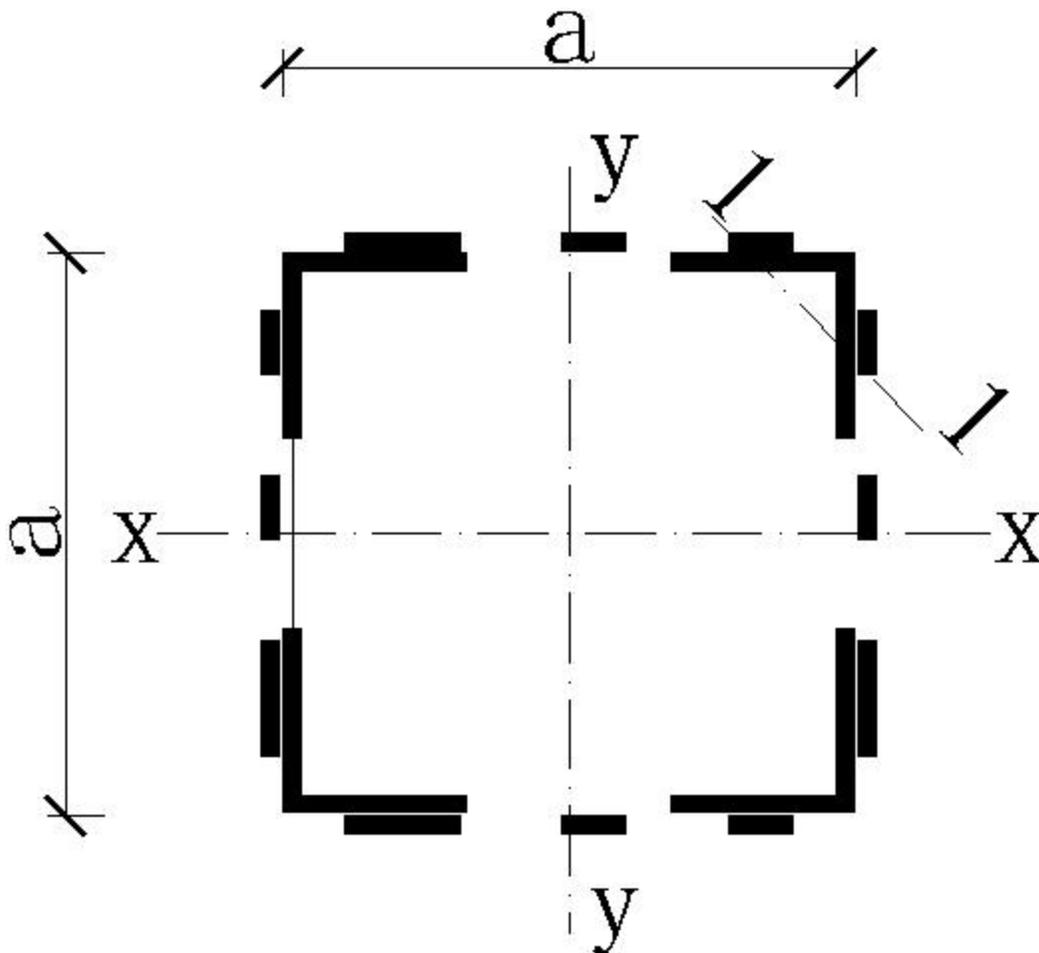
最大轴拉力 $T_1=12.582\text{kN}$, $T_2=46.101\text{kN}$, $T_3=46.849\text{kN}$, $T_4=28.785\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

格构柱参数			
格构柱截面类型	四肢	格构柱缀件形式	缀条
缀件间净距 $l_{01}(\text{mm})$	200	格构柱截面边长 $a(\text{mm})$	400
格构柱分肢参数			
格构柱分肢材料	L100X10	分肢材料截面积 $A_0(\text{cm}^2)$	19.26
分肢对最小刚度轴的回转半径 $i_{y0}(\text{cm})$	1.96	分肢平行于对称轴惯性矩 $I_0(\text{cm}^4)$	179.51

分肢形心轴距分肢外边缘距离 $Z_0(\text{cm})$	2.84	分肢材料强度设计值 $f_y(\text{N}/\text{mm}^2)$	235
分肢材料抗拉、压强度设计值 $f(\text{N}/\text{mm}^2)$	210		
格构柱缀件参数			
缀条材料	L50X5	缀条最小回转半径 $i_{\text{min}}(\text{cm})$	0.98
缀条截面积 $A_z(\text{cm}^2)$	4.8		
角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	10	焊缝计算长度 $l_f(\text{mm})$	250
焊缝强度设计值 $f_{\text{fw}}(\text{N}/\text{mm}^2)$	160		

附图如下:



塔机附着格构柱截面

1、杆件轴心受拉强度验算

$$A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

$$\sigma=N/A=595304/7704=77.272\text{N}/\text{mm}^2\leq [f]=210\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、格构式钢柱换算长细比验算

杆件1的计算长度： $L_0=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}=15800.712\text{mm}$

整个格构柱截面对X、Y轴惯性矩：

$$I_x=4[I_0+A_0(a/2-Z_0)^2]=4\times[179.51+19.26\times(40/2-2.84)^2]=23403.67\text{cm}^4$$

整个构件长细比： $\lambda_x=\lambda_y=L_0/(I_x/(4A_0))^{0.5}=1580.071/(23403.67/(4\times 19.26))^{0.5}=90.655$

分肢长细比： $\lambda_1=l_{01}/i_{y0}=20/1.96=10.204$

分肢毛截面积之和： $A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$

构件截面中垂直于X轴的各斜缀条的毛截面积之和：

$$A_{1x}=2A_z=2\times 480=960\text{mm}^2$$

格构式钢柱绕两主轴的换算长细比：

$$\lambda_{0\max}=(\lambda_x^2+40A/A_{1x})^{0.5}=(90.655^2+40\times 7704/960)^{0.5}=92.408$$

附墙杆1长细比：

$$\lambda_{01\max}=92.408\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.605$$

满足要求！

附墙杆2长细比：

$$\lambda_{02\max}=79.155\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.693$$

满足要求！

附墙杆3长细比：

$$\lambda_{03\max}=74.054\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.726$$

满足要求！

附墙杆4长细比：

$$\lambda_{04\max}=81.31\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.679$$

满足要求！

附墙杆1轴心受压稳定验算：

$$N_1/(\varphi_1Af)=221781/(0.605\times 7704\times 210)=0.227\leq 1$$

满足要求！

附墙杆2轴心受压稳定验算：

$$N_2/(\varphi_2Af)=595304/(0.693\times 7704\times 210)=0.531\leq 1$$

满足要求!

附墙杆3轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3 Af)=505536/(0.726 \times 7704 \times 210)=0.43 \leq 1$$

满足要求!

附墙杆4轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 Af)=459215/(0.679 \times 7704 \times 210)=0.418 \leq 1$$

满足要求!

3、格构式钢柱分肢的长细比验算

附墙杆1钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_1=10.204 \leq 0.7\lambda_{01\max}=0.7 \times 92.408=64.686$$

满足要求!

附墙杆2钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_2=10.204 \leq 0.7\lambda_{02\max}=0.7 \times 79.155=55.409$$

满足要求!

附墙杆3钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_3=10.204 \leq 0.7\lambda_{03\max}=0.7 \times 74.054=51.838$$

满足要求!

附墙杆4钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_4=10.204 \leq 0.7\lambda_{04\max}=0.7 \times 81.31=56.917$$

满足要求!

4、缀件验算

$$\begin{aligned} \text{缀件所受剪力: } V &= Af(f_y/235)^{0.5}/85 = 7704 \times 210.00 \times 10^{-3} \times \\ & (235.00/235)^{0.5}/85 = 19.033 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{格构柱相邻缀板轴线距离: } l_1 = l_{01} + 5 = 20.00 + 5 = 25 \text{ cm}$$

$$\text{作用在一侧缀板上的弯矩: } M_0 = V l_1 / 4 = 19.033 \times 0.25 / 4 = 1.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{分肢型钢形心轴之间距离: } b_1 = a - 2Z_0 = 0.4 - 2 \times 0.0284 = 0.343 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{斜缀条轴向压力值: } N_0 &= V / (2 \cos \alpha) = V / (2a / (a^2 + l_1^2)^{0.5}) = 19.033 / (2 \times \\ & 0.4 / (0.4^2 + 0.25^2)^{0.5}) = 11.223 \text{ kN} \end{aligned}$$

缀条计算长度： $l_1=(a^2+l_1^2)^{0.5}=(400.00^2+250^2)^{0.5}=471.699\text{mm}$

缀条长细比： $\lambda=l_1/i_{\min}=47.17/0.98=48.133\leq 80$

查表《钢结构设计标准》GB50017-2017附录D：b类截面轴心受压构件的稳定系数： $\varphi=0.865$

等边角钢计算稳定性系数：

$\eta=\min(0.6+0.0015\lambda, 1.0)=\min(0.6+0.0015\times 48.133, 1.0)=0.672$

缀条稳定验算：

$N_0/(\varphi\eta A_z f)=11.223\times 10^3/(0.865\times 0.672\times 4.80\times 10^2\times 215)=0.187\leq 1$

满足要求！

需要焊缝长度：

$\Sigma l_w=N_0/(0.7h_f\times 0.85f_f^w)=11.223\times 10^3/(0.7\times 10\times 0.85\times 160)=12\text{mm}\leq l_f=250\text{mm}$

满足要求！

六、附着杆与结构连接节点验算

附着杆与建筑物连接方式	铰接	连接钢板厚度dt(mm)	20
连接钢板强度等级	Q235	建筑物混凝土强度等级	C35
连接板固定方式	锚固螺栓	连接板耳板排数	2
锚固螺栓类型	摩擦型高强螺栓	高强螺栓的性能等级	8.8级
摩擦面抗滑移系数u	0.45	高强螺栓公称直径	M30
一个高强螺栓的预拉力P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目nr	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度L1(mm):	150	右侧吊耳孔中心至连接板高度L2(mm):	300
双吊耳板连接钢板垂直方向螺栓排数 m1	2	双吊耳板连接钢板水平方向螺栓排数 n1	5
双吊耳板连接钢板水平方向最外侧螺栓两端中心线距离S1(mm)	600		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下：

$F_1=N_1\sin\alpha_1=221.781\times\sin 89.456^\circ=221.771\text{kN}$, $V_1=N_1\cos\alpha_1=221.781\times\cos 89.456^\circ$

=2.105kN;

$F_2=N_2\sin\alpha_2=595.304\times\sin84.663^\circ=592.723\text{kN}, V_2=N_2\cos\alpha_2=595.304\times\cos84.663^\circ=55.374\text{kN};$

$F_3=N_3\sin\alpha_3=505.536\times\sin51.712^\circ=396.797\text{kN}, V_3=N_3\cos\alpha_3=505.536\times\cos51.712^\circ=313.239\text{kN};$

$F_4=N_4\sin\alpha_4=459.215\times\sin61.34^\circ=402.952\text{kN}, V_4=N_4\cos\alpha_4=459.215\times\cos61.34^\circ=220.245\text{kN};$

2、螺栓承载力计算

单个高强螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b=0.9k_n\mu P=0.9\times1\times1\times0.45\times355=143.775\text{kN}$

单个高强螺栓受拉承载力设计值 $N_t^b=0.8P=0.8\times355=284\text{kN}$

(1) 双吊耳板位置螺栓承载力计算:

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=49^\circ, N_1=-31.679\text{kN}, N_2=595.227\text{kN}$

轴向拉力合力为:

$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=-31.679\times\sin89.456^\circ+595.227\times\sin84.663^\circ=560.969\text{kN}$

水平向剪力合力为:

$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=-31.679\times\cos89.456^\circ+595.227\times\cos84.663^\circ=55.066\text{kN}$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=-31.679\times\sin89.456^\circ\times0.5/2+(-31.679)\times\cos89.456^\circ\times0.15-595.227\times\sin84.663^\circ\times0.5/2+595.227\times\cos84.663^\circ\times0.3|=139.516\text{kN}\cdot\text{m}$

经分析判断, 按照小偏心进行计算

$$\sum x_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_i [S_1 / 2 - (i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$\sum x_1^2 = 2 \times [300^2 + (300-1 \times 600/4)^2 + (300-2 \times 600/4)^2 + (300-3 \times 600/4)^2 + (300-4 \times$

$$600/4)^2]=900000\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}}=(MS_1/2)/\Sigma x_1^2=(139.516\times 600/2)/(900000/1000)=46.505\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t=F/m_1n_1+N_{\text{附加}}=560.969/(2\times 5)+46.505=102.602\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

$$N_v=|V|/m_1n_1=55.066/(2\times 5)=5.507\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b+N_t/N_t^b=5.507/143.775+102.602/284=0.4\leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=142^\circ, N_3=127.257\text{kN}, N_4=442.208\text{kN}$$

轴向拉力合力为:

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=127.257\times\sin 51.712^\circ+442.208\times\sin 61.34^\circ=487.913\text{kN}$$

水平向剪力合力为:

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=127.257\times\cos 51.712^\circ+442.208\times\cos 61.34^\circ=290.939\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-127.257\times\sin 51.712^\circ\times 0.5/2+127.257\times\cos 51.712^\circ\times 0.15+442.208\times\sin 61.34^\circ\times 0.5/2+442.208\times\cos 61.34^\circ\times 0.3|=147.49\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断, 应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩:

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|127.257\times\sin 51.712^\circ\times(0.6-0.5)/2+127.257\times\cos 51.712^\circ\times 0.15+442.208\times\sin 61.34^\circ\times(0.6+0.5)/2+442.208\times\cos 61.34^\circ\times 0.3|=293.864\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 293.864 \times 600 / 1350 = 130.606 \text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 487.913 / (2 \times 5) + 130.606 = 179.397 \text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

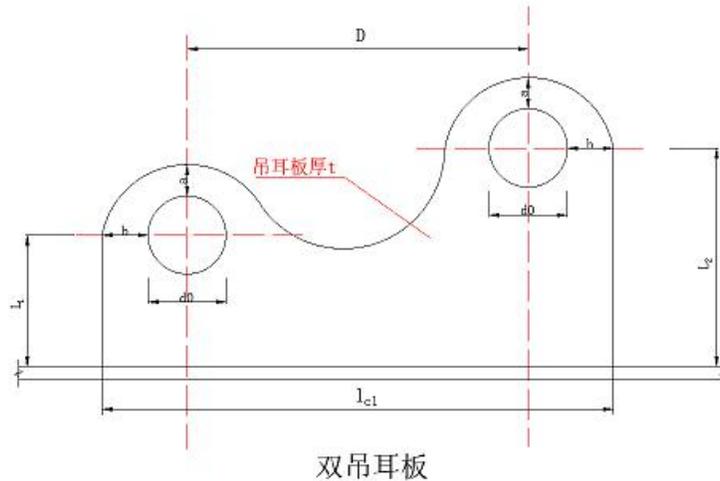
$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 290.939 / (2 \times 5) = 29.094 \text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 29.094 / 143.775 + 179.397 / 284 = 0.834 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚t(mm)	20	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	100
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	80	吊孔直径d ₀ (mm)	60
吊耳板抗拉强度设计值f(N/mm ²)	205	吊耳板抗剪强度设计值f _v (N/mm ²)	120
连接板耳板排数	2		



双吊耳板

参考GB50017-2017，对连接耳板进行如下验算：

吊耳板验算与吊孔中心至连接钢板高度无关，单双吊耳板的a、b、d₀参数均相同，因此单吊耳板与双吊耳板的验算方法相同，取拉力最大值进行计算即可。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 297.652 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 20 + 16 = 56 \text{ mm} \leq b = 100 \text{ mm}$$

满足要求！

$$4B_e / 3 = 4 \times 56 / 3 = 74.667 \text{ mm} \leq a = 80 \text{ mm}$$

满足要求！

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0 / 3) = \min(2 \times 20 + 16, 100 - 60 / 3) = 56 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 297.652 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 56) = 132.88 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求！

(3) 耳板端部截面抗拉（劈开）强度验算

$$\sigma = N_s / [2t(a - 2d_0 / 3)] = 297.652 \times 10^3 / [2 \times 20 \times (80 - 2 \times 60 / 3)] = 186.032 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板端部截面抗拉强度满足要求！

(4) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(80+60/2)^2 - (60/2)^2]^{0.5} = 105.83\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 297.652 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 105.83) = 70.314 \text{N/mm}^2 \leq f_v = 120 \text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 d_1 (mm)	60
销轴材料抗剪强度 f_{v1}^b (N/mm ²)	346

参考GB50017-2017，对销轴进行如下验算：

由附墙杆内力计算章节可知，作用于销轴截面的最大剪力

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 595.304 \text{kN}$$

(2) 销轴抗剪强度

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 595.304 \times 10^3 / (2 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 105.273 \text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 346 \text{N/mm}^2$$

销轴抗剪强度满足要求!

5、连接钢板焊缝计算

连接钢板角焊缝焊脚尺寸 h_f (mm)	16
连接钢板角焊缝强度设计值 f_t^w (N/mm ²)	160
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 l_{c1} (mm)	680

(1) 双吊耳板位置焊缝验算：

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|560.969| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 19.323 \text{N/mm}^2$$

$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|55.066| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 1.897 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (139.516 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 44.499 \text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{19.323 + 44.499}{1.22})^2 + 1.897^2]^{0.5} = 52.347 \text{ N/mm}^2 \leq f_t^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|487.913| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 16.807 \text{ N/mm}^2$$

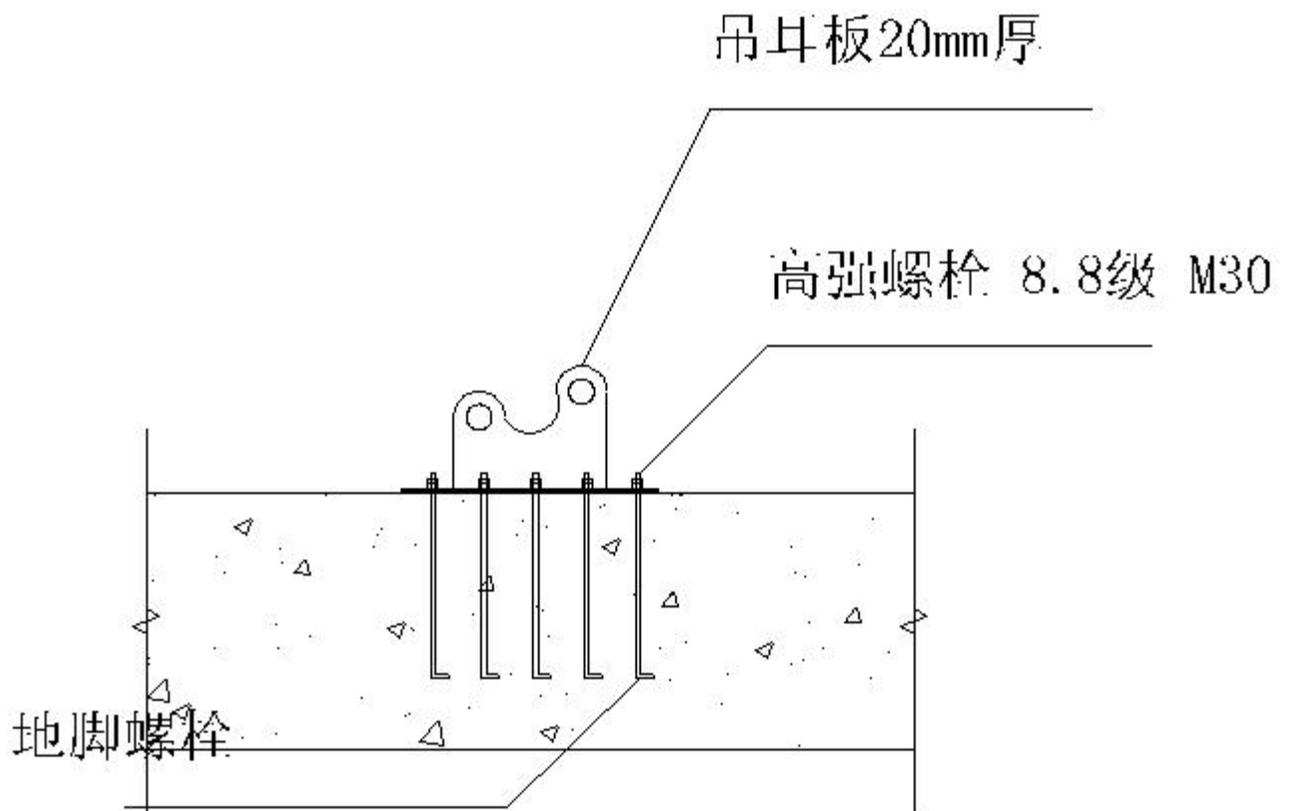
$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|290.939| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 10.022 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)^2 / 6] = (147.49 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 47.042 \text{ N/mm}^2$$

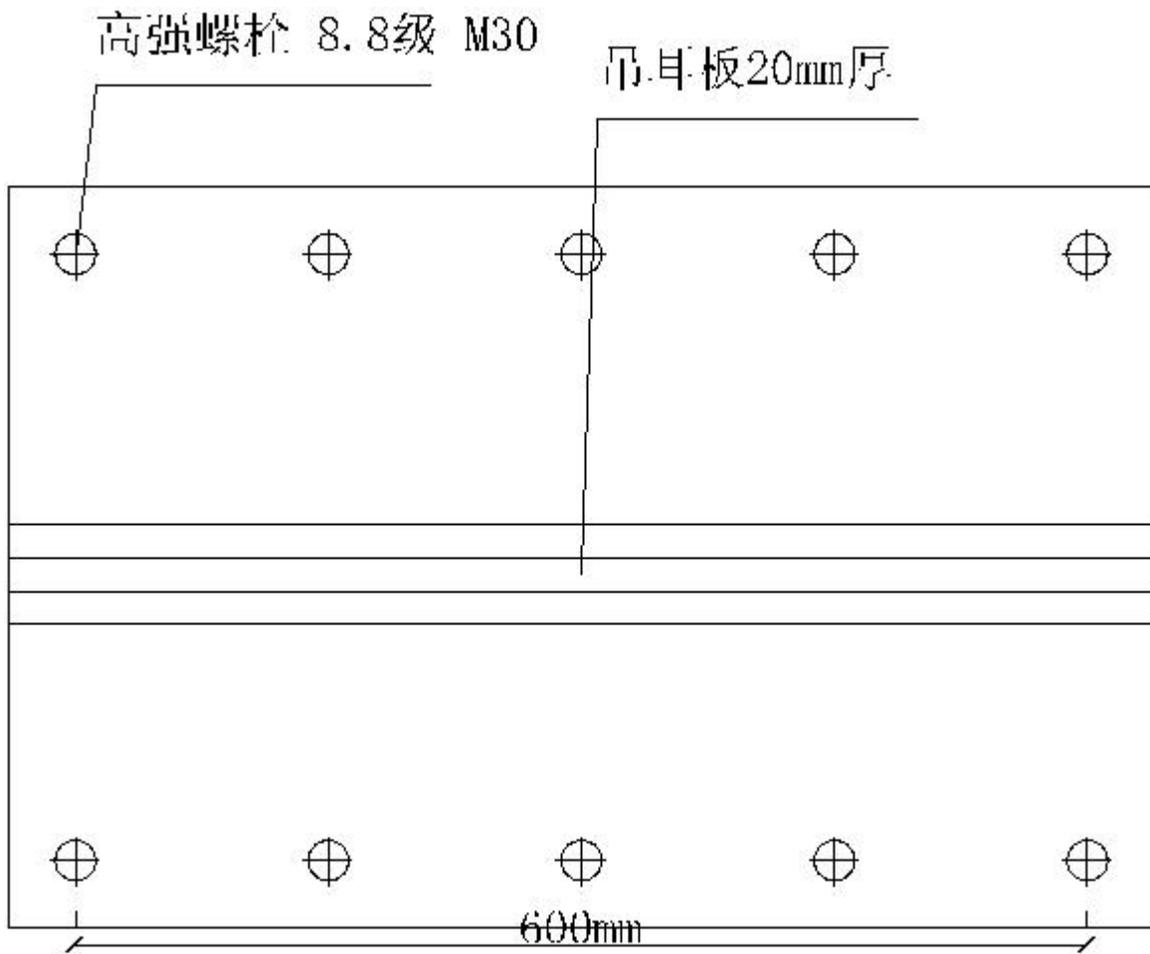
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{16.807 + 47.042}{1.22})^2 + 10.022^2]^{0.5} = 53.286 \text{ N/mm}^2 \leq f_t^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附图如下：



塔机附着节点详图-双吊耳板



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

第4道塔机附着验算计算书

计算依据:

- 1、《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》JGJ/T187-2019
- 2、《钢结构设计标准》GB50017-2017

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT360-20S1	塔身桁架结构类型	角钢
塔机计算高度H(m)	174.9	塔身宽度B(m)	2
起重臂长度 l_1 (m)	50	平衡臂长度 l_2 (m)	17
起重臂与平衡臂截面计算高度h(m)	1.06	工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	837
工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	4362.5	非工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k' (kN·m)	999.5(反向)

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	格构柱	塔身锚固环边长C(m)	2.6

二、风荷载及附着参数

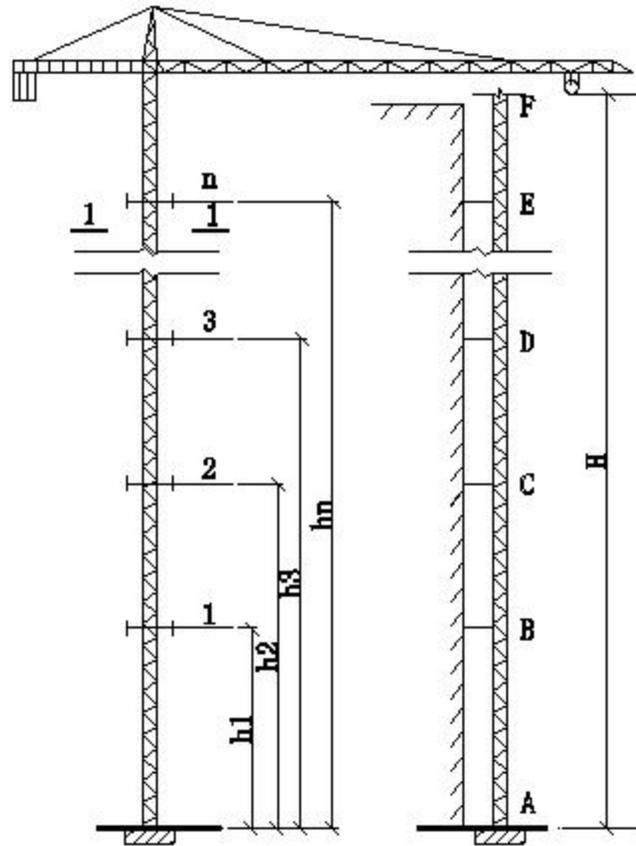
该风荷载取值依据JGJ/T187-2019《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》附录A相关内容进行取值。

附着次数N	4		
附着点1到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.1	点1到塔机的竖向距离 b_1 (m)	16.03
附着点2到塔机的横向距离 a_2 (m)	1.25	点2到塔机的竖向距离 b_2 (m)	13.72
附着点3到塔机的横向距离 a_3 (m)	8.48	点3到塔机的竖向距离 b_3 (m)	10.93
附着点4到塔机的横向距离 a_4 (m)	7.37	点4到塔机的竖向距离 b_4 (m)	12.96
工作状态基本风压 ω_0 (kN/m ²)	0.2	非工作状态基本风压 ω_0' (kN/m ²)	0.35
塔身前后片桁架的平均充实率 α_0	0.35		

第N次附着	附着点高度 h_1 (m)	附着点净高 h_{01} (m)	风压等效高度变化系数 μ_z	工作状态风荷载体型系数 μ_s	非工作状态风荷载体型系数 μ_s'	工作状态风振系数 β_z	非工作状态风振系数 β_z'	工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}'
第1次附着	44.4	44.4	0.845	1.95	1.95	1.763	1.815	0.39	0.703
第2次附着	74.4	30	1.021	1.95	1.95	1.726	1.773	0.462	0.83
第3次附着	104.4	30	1.172	1.95	1.95	1.698	1.75	0.522	0.941

第4次附着	134.4	30	1.302	1.95	1.95	1.677	1.732	0.572	1.034
悬臂端	174.9	40.5	1.464	1.95	1.95	1.646	1.698	0.632	1.14

附图如下:



(a) 附墙正立面

(b) 附墙侧立面

塔机附着立面图

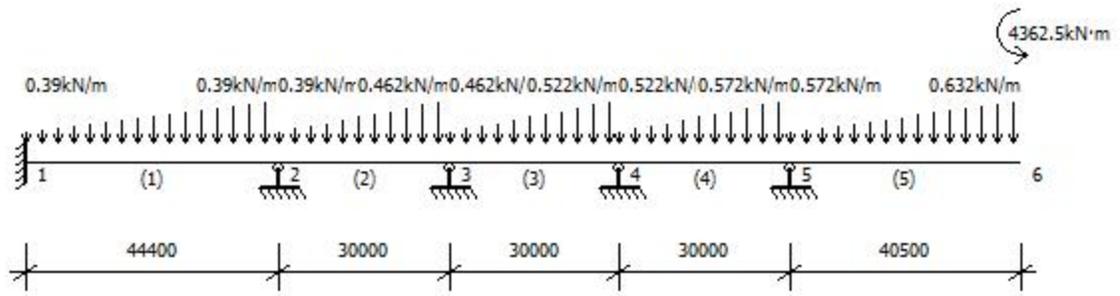
三、工作状态下附墙杆内力计算

1、扭矩组合标准值 T_k

回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{ki} = 837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

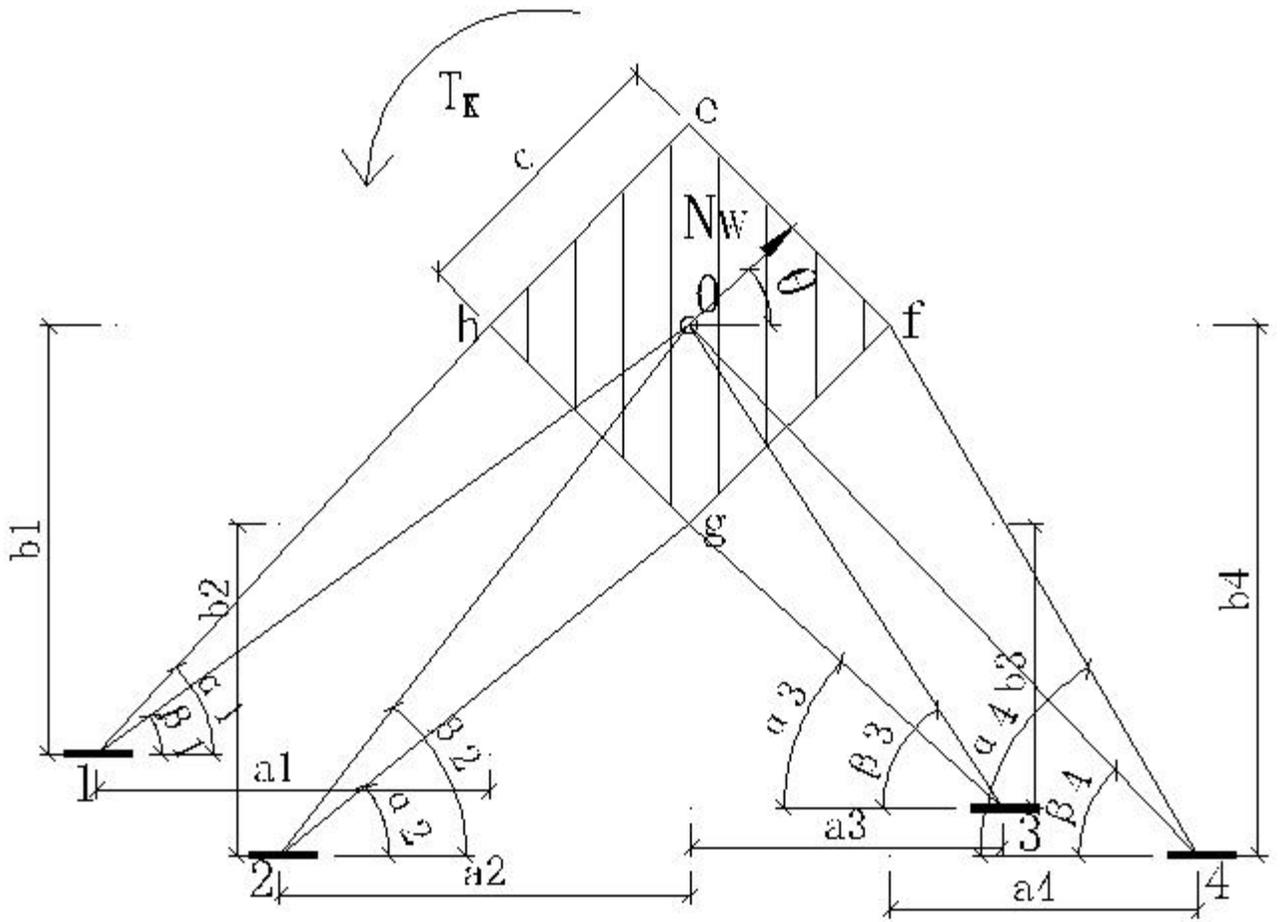
得: $R_E=242.35\text{kN}$

在工作状态下,塔机起重臂位置的不确定性以及风向的随机性,在计算支座5处锚固环截面内力时需考虑塔身承受双向的风荷载和倾覆力矩及扭矩。

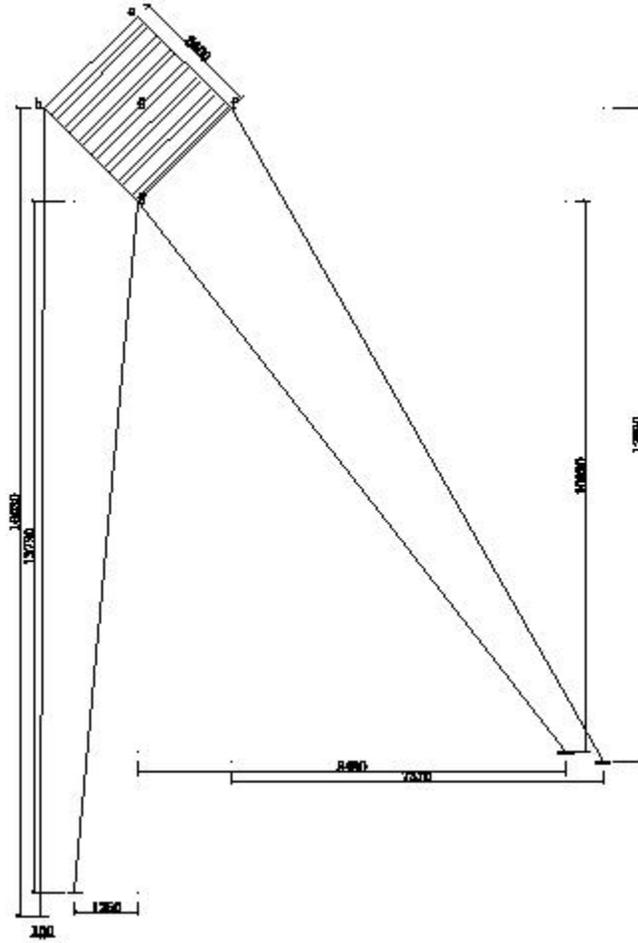
3、附墙杆内力计算

支座5处锚固环的截面扭矩 T_k (考虑塔机产生的扭矩由支座5处的附墙杆承担),水平内力 $N_w=2^{0.5}R_E=342.735\text{kN}$ 。

计算简图:



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 89.643^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 84.794^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 52.194^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 60.374^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 83.105^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 85.407^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 56.41^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 54.605^\circ$$

四杆附着属于一次超静定结构，用力法计算，切断 T_4 杆并代以相应多余未知力

$X_1=1$ 。

$$\delta_{11} \times X_1 + \Delta_{1p} = 0$$

$X_1=1$ 时，各杆件轴力计算：

$$T_{11} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{21} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{31} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - 1 \times \sin(\alpha_4 - \beta_4) \times b_4 / \sin \beta_4 = 0$$

$$T_{21} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{21} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{31} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{31} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

$$T_{11} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{11} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \sin \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) - 1 \times \cos \alpha_4 \times (2^{0.5} \times c/2) = 0$$

当 N_w 、 T_k 同时存在时， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，各杆件轴力计算：

$$T_{1p} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times b_1 / \sin \beta_1 + T_{2p} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_2 - T_{3p} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + 2^{0.5}c/2) / \sin \beta_3 - T_k = 0$$

$$T_{2p} \times \sin \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{2p} \times \cos \alpha_2 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{3p} \times \sin \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) - T_{3p} \times \cos \alpha_3 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \sin \theta \times (2^{0.5} \times c/2) + T_k = 0$$

$$T_{1p} \times \sin \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + T_{1p} \times \cos \alpha_1 \times (2^{0.5} \times c/2) + N_w \times \cos \theta \times (2^{0.5} \times c/2) - T_k = 0$$

$$\delta_{11} = \Sigma(T_1^2 L / (EA)) = T_{11}^2 (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21}^2 (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31}^2 (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA) + 1^2 (a_4 / \cos \alpha_4) / (EA)$$

$$\Delta_{1p} = \Sigma(T_1 \times T_p L / (EA)) = T_{11} \times T_{1p} (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21} \times T_{2p} (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31} \times T_{3p} (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA)$$

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11}$$

各杆轴力计算公式如下：

$$T_1 = T_{11} \times X_1 + T_{1p}, \quad T_2 = T_{21} \times X_1 + T_{2p}, \quad T_3 = T_{31} \times X_1 + T_{3p}, \quad T_4 = X_1$$

(1) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

$$\text{最大轴压力 } T_1 = 224.837 \text{ kN}, \quad T_2 = 99.375 \text{ kN}, \quad T_3 = 494.173 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 613.165 \text{ kN}, \quad T_3 = 199.002 \text{ kN}, \quad T_4 = 456.32 \text{ kN}$$

(2) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上反方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

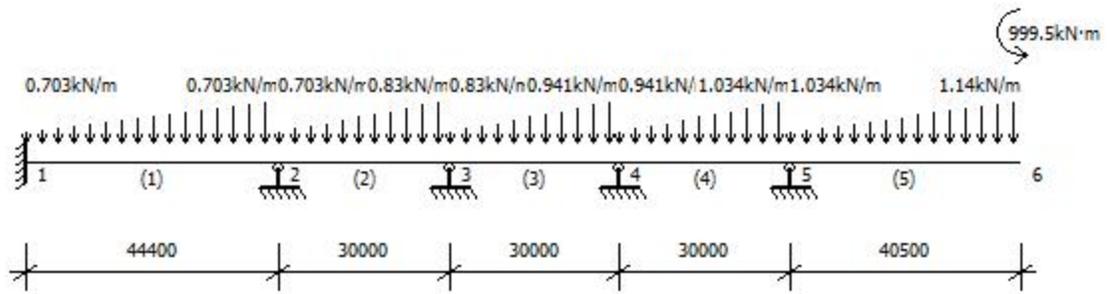
$$\text{最大轴压力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 613.165 \text{ kN}, \quad T_3 = 199.002 \text{ kN}, \quad T_4 = 456.32 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 224.838 \text{ kN}, \quad T_2 = 99.373 \text{ kN}, \quad T_3 = 494.174 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

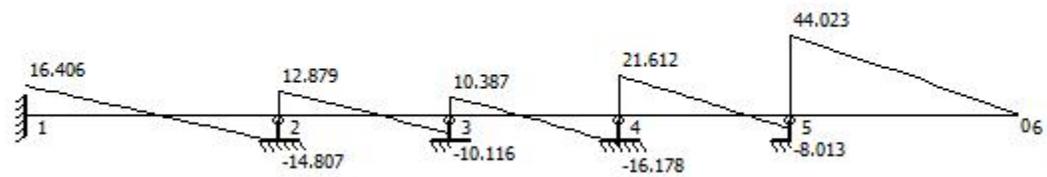
四、非工作状态下附墙杆内力计算

此工况下塔机回转机构的制动器完全松开，起重臂能随风转动，故不计风荷载产生的扭转力矩。

1、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

得: $R_E=52.036\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座5处锚固环的水平内力 $N_w=R_E=52.036\text{kN}$ 。

根据工作状态方程组 $T_k=0$, θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环, 求解各杆最大轴拉力和轴压力:

最大轴压力 $T_1=13.291\text{kN}$, $T_2=54.091\text{kN}$, $T_3=52.621\text{kN}$, $T_4=33.971\text{kN}$

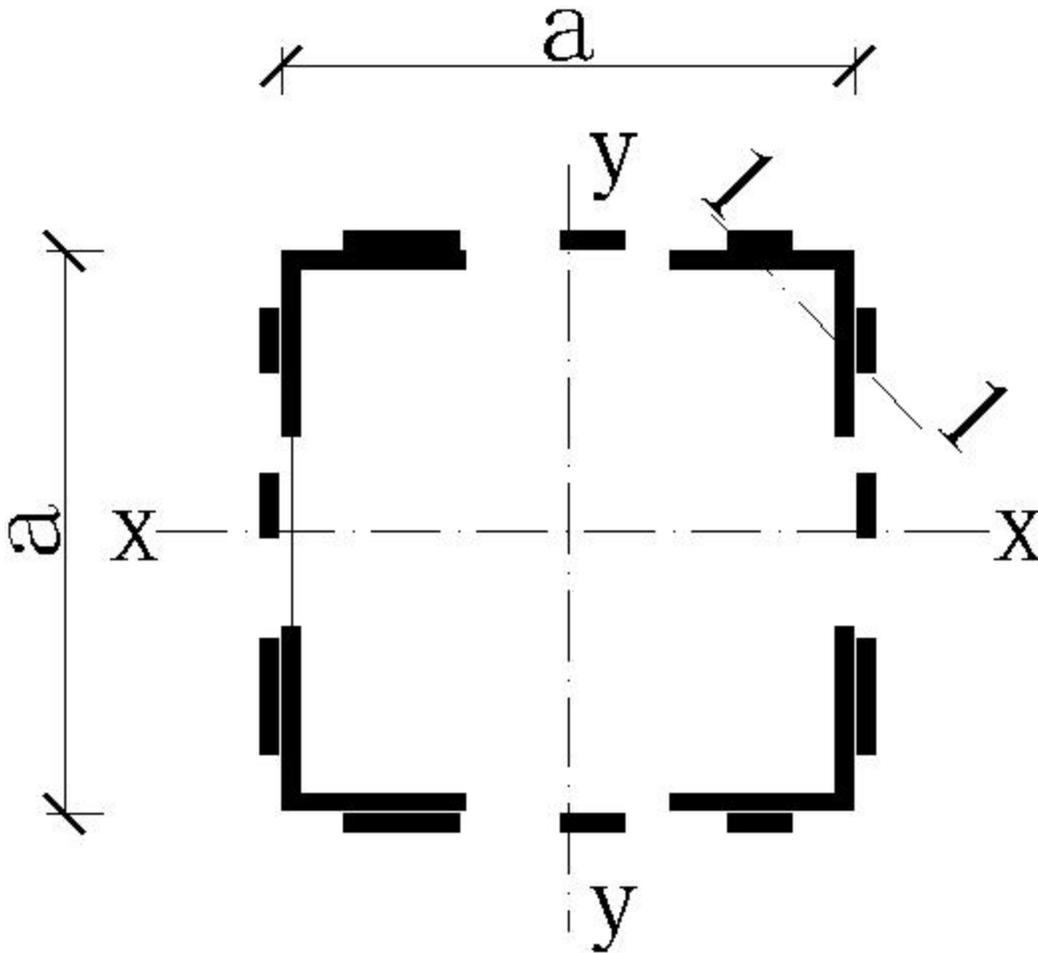
最大轴拉力 $T_1=13.291\text{kN}$, $T_2=54.09\text{kN}$, $T_3=52.621\text{kN}$, $T_4=33.971\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

格构柱参数			
格构柱截面类型	四肢	格构柱缀件形式	缀条
缀件间净距 $l_{01}(\text{mm})$	200	格构柱截面边长 $a(\text{mm})$	400
格构柱分肢参数			
格构柱分肢材料	L100X10	分肢材料截面面积 $A_0(\text{cm}^2)$	19.26
分肢对最小刚度轴的回转半径 $i_{y0}(\text{cm})$	1.96	分肢平行于对称轴惯性矩 $I_0(\text{cm}^4)$	179.51

分肢形心轴距分肢外边缘距离 $Z_0(\text{cm})$	2.84	分肢材料强度设计值 $f_y(\text{N}/\text{mm}^2)$	235
分肢材料抗拉、压强度设计值 $f(\text{N}/\text{mm}^2)$	210		
格构柱缀件参数			
缀条材料	L50X5	缀条最小回转半径 $i_{\text{min}}(\text{cm})$	0.98
缀条截面积 $A_z(\text{cm}^2)$	4.8		
角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	10	焊缝计算长度 $l_f(\text{mm})$	250
焊缝强度设计值 $f_{\text{fw}}(\text{N}/\text{mm}^2)$	160		

附图如下:



塔机附着格构柱截面

1、杆件轴心受拉强度验算

$$A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

$$\sigma=N/A=613165/7704=79.59\text{N}/\text{mm}^2\leq[f]=210\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、格构式钢柱换算长细比验算

杆件1的计算长度： $L_0=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}=16030.312\text{mm}$

整个格构柱截面对X、Y轴惯性矩：

$$I_x=4[I_0+A_0(a/2-Z_0)^2]=4\times[179.51+19.26\times(40/2-2.84)^2]=23403.67\text{cm}^4$$

整个构件长细比： $\lambda_x=\lambda_y=L_0/(I_x/(4A_0))^{0.5}=1603.031/(23403.67/(4\times 19.26))^{0.5}=91.973$

分肢长细比： $\lambda_1=l_{01}/i_{y0}=20/1.96=10.204$

分肢毛截面积之和： $A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$

构件截面中垂直于X轴的各斜缀条的毛截面积之和：

$$A_{1x}=2A_z=2\times 480=960\text{mm}^2$$

格构式钢柱绕两主轴的换算长细比：

$$\lambda_{0\max}=(\lambda_x^2+40A/A_{1x})^{0.5}=(91.973^2+40\times 7704/960)^{0.5}=93.702$$

附墙杆1长细比：

$$\lambda_{01\max}=93.702\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.596$$

满足要求！

附墙杆2长细比：

$$\lambda_{02\max}=81.048\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.681$$

满足要求！

附墙杆3长细比：

$$\lambda_{03\max}=81.367\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.679$$

满足要求！

附墙杆4长细比：

$$\lambda_{04\max}=87.395\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.639$$

满足要求！

附墙杆1轴心受压稳定验算：

$$N_1/(\varphi_1Af)=224838/(0.596\times 7704\times 210)=0.233\leq 1$$

满足要求！

附墙杆2轴心受压稳定验算：

$$N_2/(\varphi_2Af)=613165/(0.681\times 7704\times 210)=0.557\leq 1$$

满足要求!

附墙杆3轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3 Af)=494174/(0.679 \times 7704 \times 210)=0.45 \leq 1$$

满足要求!

附墙杆4轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 Af)=456320/(0.639 \times 7704 \times 210)=0.441 \leq 1$$

满足要求!

3、格构式钢柱分肢的长细比验算

附墙杆1钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_1=10.204 \leq 0.7\lambda_{01\max}=0.7 \times 93.702=65.591$$

满足要求!

附墙杆2钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_2=10.204 \leq 0.7\lambda_{02\max}=0.7 \times 81.048=56.734$$

满足要求!

附墙杆3钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_3=10.204 \leq 0.7\lambda_{03\max}=0.7 \times 81.367=56.957$$

满足要求!

附墙杆4钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_4=10.204 \leq 0.7\lambda_{04\max}=0.7 \times 87.395=61.176$$

满足要求!

4、缀件验算

$$\begin{aligned} \text{缀件所受剪力: } V &= Af(f_y/235)^{0.5}/85 = 7704 \times 210.00 \times 10^{-3} \times \\ & (235.00/235)^{0.5}/85 = 19.033 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{格构柱相邻缀板轴线距离: } l_1 = l_{01} + 5 = 20.00 + 5 = 25 \text{ cm}$$

$$\text{作用在一侧缀板上的弯矩: } M_0 = V l_1 / 4 = 19.033 \times 0.25 / 4 = 1.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{分肢型钢形心轴之间距离: } b_1 = a - 2Z_0 = 0.4 - 2 \times 0.0284 = 0.343 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{斜缀条轴向压力值: } N_0 &= V / (2 \cos \alpha) = V / (2a / (a^2 + l_1^2)^{0.5}) = 19.033 / (2 \times \\ & 0.4 / (0.4^2 + 0.25^2)^{0.5}) = 11.223 \text{ kN} \end{aligned}$$

缀条计算长度： $l_1=(a^2+l_1^2)^{0.5}=(400.00^2+250^2)^{0.5}=471.699\text{mm}$

缀条长细比： $\lambda=l_1/i_{\min}=47.17/0.98=48.133\leq 80$

查表《钢结构设计标准》GB50017-2017附录D：b类截面轴心受压构件的稳定系数： $\varphi=0.865$

等边角钢计算稳定性系数：

$\eta=\min(0.6+0.0015\lambda, 1.0)=\min(0.6+0.0015\times 48.133, 1.0)=0.672$

缀条稳定验算：

$N_0/(\varphi\eta A_z f)=11.223\times 10^3/(0.865\times 0.672\times 4.80\times 10^2\times 215)=0.187\leq 1$

满足要求！

需要焊缝长度：

$\Sigma l_w=N_0/(0.7h_f\times 0.85f_f^w)=11.223\times 10^3/(0.7\times 10\times 0.85\times 160)=12\text{mm}\leq l_f=250\text{mm}$

满足要求！

六、附着杆与结构连接节点验算

附着杆与建筑物连接方式	铰接	连接钢板厚度dt(mm)	20
连接钢板强度等级	Q235	建筑物混凝土强度等级	C35
连接板固定方式	锚固螺栓	连接板耳板排数	2
锚固螺栓类型	摩擦型高强螺栓	高强螺栓的性能等级	8.8级
摩擦面抗滑移系数u	0.45	高强螺栓公称直径	M30
一个高强螺栓的预拉力P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目nr	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度L1(mm):	150	右侧吊耳孔中心至连接板高度L2(mm):	300
双吊耳板连接钢板垂直方向螺栓排数 m1	2	双吊耳板连接钢板水平方向螺栓排数 n1	5
双吊耳板连接钢板水平方向最外侧螺栓两端中心线距离S1(mm)	600		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下：

$F_1=N_1\sin\alpha_1=224.838\times \sin 89.643^\circ=224.834\text{kN}$, $V_1=N_1\cos\alpha_1=224.838\times \cos 89.643^\circ$

=1.403kN;

$F_2=N_2\sin\alpha_2=613.165\times\sin84.794^\circ=610.636\text{kN}, V_2=N_2\cos\alpha_2=613.165\times\cos84.794^\circ=55.634\text{kN};$

$F_3=N_3\sin\alpha_3=494.174\times\sin52.194^\circ=390.443\text{kN}, V_3=N_3\cos\alpha_3=494.174\times\cos52.194^\circ=302.923\text{kN};$

$F_4=N_4\sin\alpha_4=456.32\times\sin60.374^\circ=396.667\text{kN}, V_4=N_4\cos\alpha_4=456.32\times\cos60.374^\circ=225.574\text{kN};$

2、螺栓承载力计算

单个高强螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b=0.9k_n\mu P=0.9\times1\times1\times0.45\times355=143.775\text{kN}$

单个高强螺栓受拉承载力设计值 $N_t^b=0.8P=0.8\times355=284\text{kN}$

(1) 双吊耳板位置螺栓承载力计算:

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=46^\circ, N_1=-51.609\text{kN}, N_2=612.407\text{kN}$

轴向拉力合力为:

$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=-51.609\times\sin89.643^\circ+612.407\times\sin84.794^\circ=558.273\text{kN}$

水平向剪力合力为:

$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=-51.609\times\cos89.643^\circ+612.407\times\cos84.794^\circ=55.243\text{kN}$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=-51.609\times\sin89.643^\circ\times0.5/2+(-51.609)\times\cos89.643^\circ\times0.15-612.407\times\sin84.794^\circ\times0.5/2+612.407\times\cos84.794^\circ\times0.3|=148.751\text{kN}\cdot\text{m}$

经分析判断, 按照小偏心进行计算

$$\sum x_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_i [S_1 / 2 - (i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$\sum x_1^2 = 2 \times [300^2 + (300-1 \times 600/4)^2 + (300-2 \times 600/4)^2 + (300-3 \times 600/4)^2 + (300-4 \times$

$$600/4)^2]=900000\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}}=(MS_1/2)/\Sigma x_1^2=(148.751 \times 600/2)/(900000/1000)=49.584\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t=F/m_1n_1+N_{\text{附加}}=558.273/(2 \times 5)+49.584=105.411\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

$$N_v=|V|/m_1n_1=55.243/(2 \times 5)=5.524\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b+N_t/N_t^b=5.524/143.775+105.411/284=0.41 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$$T_k=837\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=144^\circ, N_3=131.546\text{kN}, N_4=440.22\text{kN}$$

轴向拉力合力为:

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=131.546 \times \sin 52.194^\circ+440.22 \times \sin 60.374^\circ=486.605\text{kN}$$

水平向剪力合力为:

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=131.546 \times \cos 52.194^\circ+440.22 \times \cos 60.374^\circ=298.251\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-131.546 \times \sin 52.194^\circ \times 0.5/2+131.546 \times \cos 52.194^\circ \times 0.15+440.22 \times \sin 60.374^\circ \times 0.5/2+440.22 \times \cos 60.374^\circ \times 0.3|=147.064\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断, 应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩:

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|131.546 \times \sin 52.194^\circ \times (0.6-0.5)/2+131.546 \times \cos 52.194^\circ \times 0.15+440.22 \times \sin 60.374^\circ \times (0.6+0.5)/2+440.22 \times \cos 60.374^\circ \times 0.3|=293.046\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 293.046 \times 600 / 1350 = 130.243 \text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 486.605 / (2 \times 5) + 130.243 = 178.903 \text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

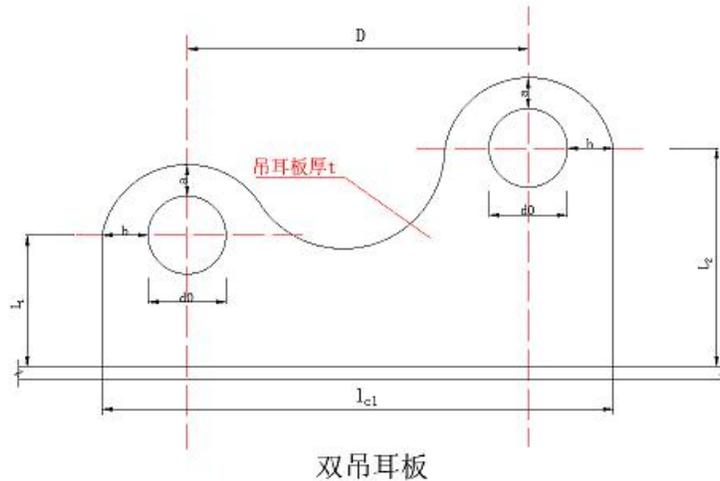
$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 298.251 / (2 \times 5) = 29.825 \text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 29.825 / 143.775 + 178.903 / 284 = 0.837 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚t(mm)	20	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	100
顺受力方向，吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	80	吊孔直径d ₀ (mm)	60
吊耳板抗拉强度设计值f(N/mm ²)	205	吊耳板抗剪强度设计值f _v (N/mm ²)	120
连接板耳板排数	2		



双吊耳板

参考GB50017-2017，对连接耳板进行如下验算：

吊耳板验算与吊孔中心至连接钢板高度无关，单双吊耳板的a、b、d₀参数均相同，因此单吊耳板与双吊耳板的验算方法相同，取拉力最大值进行计算即可。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 306.582 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 20 + 16 = 56 \text{ mm} \leq b = 100 \text{ mm}$$

满足要求！

$$4B_e / 3 = 4 \times 56 / 3 = 74.667 \text{ mm} \leq a = 80 \text{ mm}$$

满足要求！

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0 / 3) = \min(2 \times 20 + 16, 100 - 60 / 3) = 56 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 306.582 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 56) = 136.867 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求！

(3) 耳板端部截面抗拉（劈开）强度验算

$$\sigma = N_s / [2t(a - 2d_0 / 3)] = 306.582 \times 10^3 / [2 \times 20 \times (80 - 2 \times 60 / 3)] = 191.614 \text{ N/mm}^2 \leq$$

$$f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板端部截面抗拉强度满足要求！

(4) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(80+60/2)^2 - (60/2)^2]^{0.5} = 105.83\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 306.582 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 105.83) = 72.423\text{N/mm}^2 \leq f_v = 120\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60
销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	346

参考GB50017-2017，对销轴进行如下验算：

由附墙杆内力计算章节可知，作用于销轴截面的最大剪力

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 613.165\text{kN}$$

(2) 销轴抗剪强度

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 613.165 \times 10^3 / (2 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 108.431\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 346\text{N/mm}^2$$

销轴抗剪强度满足要求!

5、连接钢板焊缝计算

连接钢板角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	16
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	160
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	680

(1) 双吊耳板位置焊缝验算：

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|558.273| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 19.231\text{N/mm}^2$$

$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|55.243| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 1.903\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (148.751 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 47.444\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{19.231 + 47.444}{1.22})^2 + 1.903^2]^{0.5} = 54.685 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|486.605| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 16.762 \text{ N/mm}^2$$

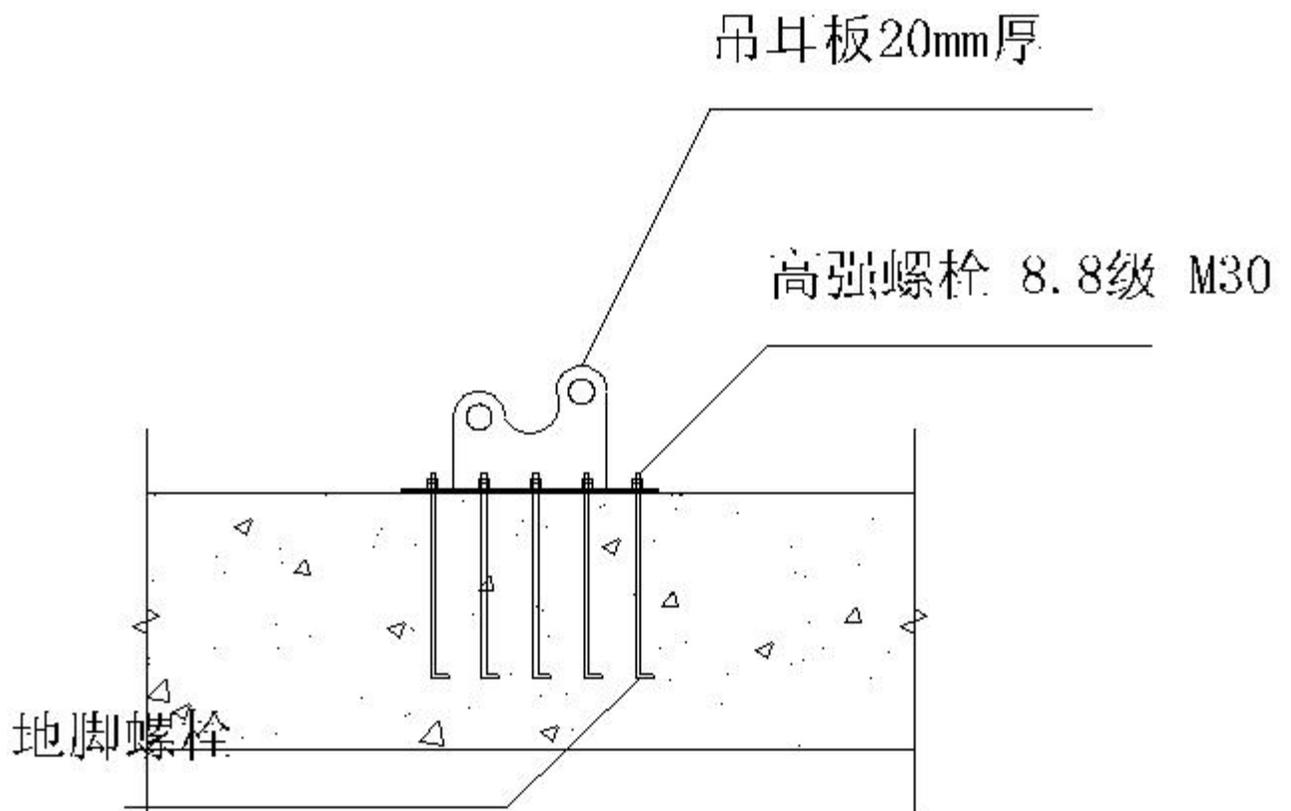
$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|298.251| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 10.274 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)^2 / 6] = (147.064 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 46.906 \text{ N/mm}^2$$

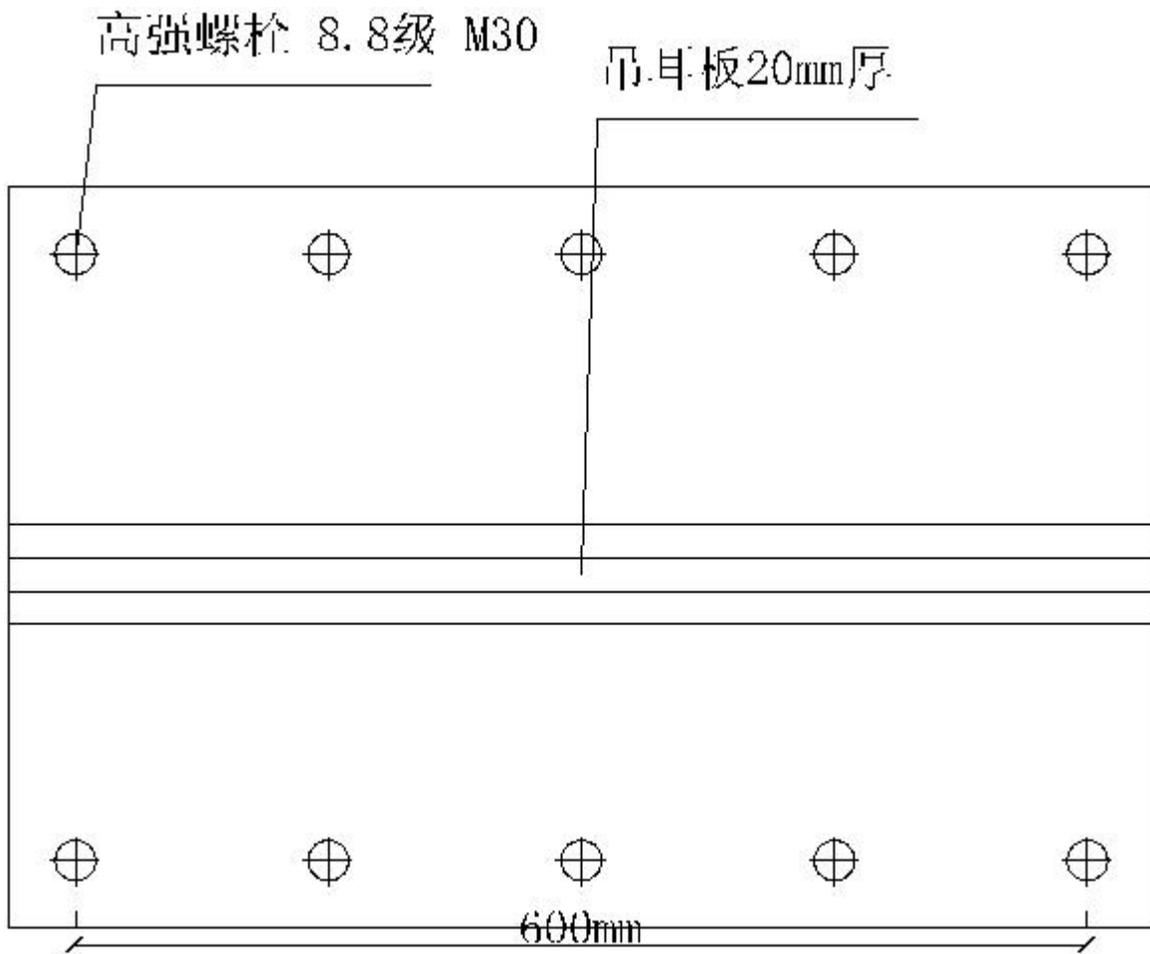
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{16.762 + 46.906}{1.22})^2 + 10.274^2]^{0.5} = 53.189 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附图如下：



塔机附着节点详图-双吊耳板



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

第 5 道塔机附着验算计算书

计算依据:

- 1、《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》JGJ/T187-2019
- 2、《钢结构设计标准》GB50017-2017

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT360-20S1	塔身桁架结构类型	角钢
塔机计算高度 H(m)	204.9	塔身宽度 B(m)	2
起重臂长度 l ₁ (m)	50	平衡臂长度 l ₂ (m)	17
起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	1.06	工作状态时扭矩标准值 T _{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	837
工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M _k (kN·m)	4362.5	非工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M _{k'} (kN·m)	999.5(反向)

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	VII类
附墙杆截面类型	格构柱	塔身锚固环边长 C(m)	2.6

二、风荷载及附着参数

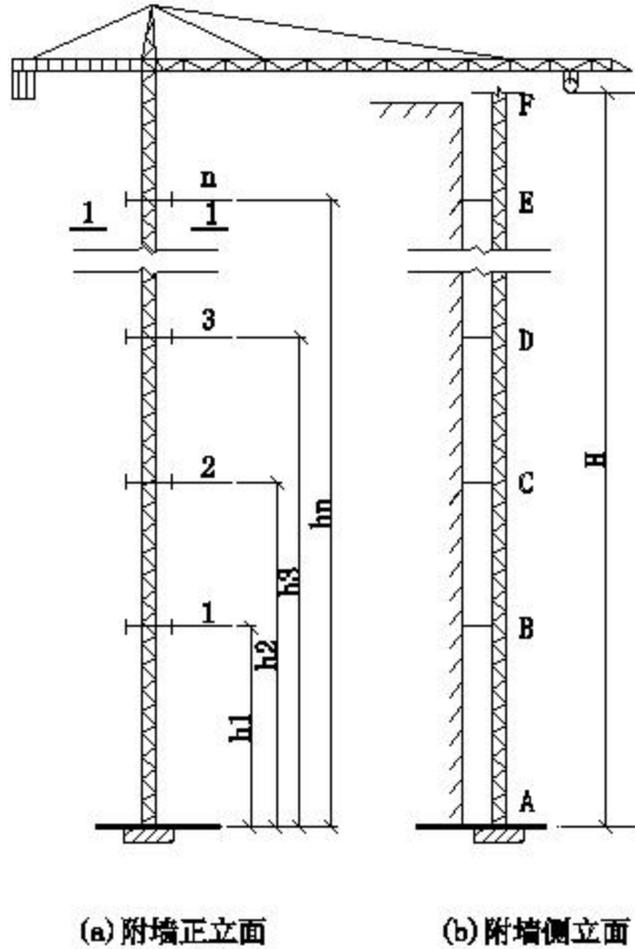
该风荷载取值依据JGJ/T187-2019《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》附录A相关内容进行取值。

附着次数 N	5		
附着点 1 到塔机的横向距离 a ₁ (m)	3	点 1 到塔机的竖向距离 b ₁ (m)	4
附着点 2 到塔机的横向距离 a ₂ (m)	4.8	点 2 到塔机的竖向距离 b ₂ (m)	4
附着点 3 到塔机的横向距离 a ₃ (m)	3	点 3 到塔机的竖向距离 b ₃ (m)	4
附着点 4 到塔机的横向距离 a ₄ (m)	3	点 4 到塔机的竖向距离 b ₄ (m)	5.8
工作状态基本风压 ω ₀ (kN/m ²)	0.2	非工作状态基本风压 ω _{0'} (kN/m ²)	0.35
塔身前后片桁架的平均充实率 α ₀	0.35		

第 N 次附着	附着点高度 h ₁ (m)	附着点净高 h ₀₁ (m)	风压等效高度变化系数 μ _z	工作状态风荷载体型系数 μ _s	非工作状态风荷载体型系数 μ _{s'}	工作状态风振系数 β _z	非工作状态风振系数 β _{z'}	工作状态风压等效均布线荷载标准值 q _{sk}	非工作状态风压等效均布线荷载标准值 q _{sk'}
第 1 次附着	44.4	44.4	0.845	1.95	1.95	1.763	1.815	0.39	0.703
第 2 次附着	74.4	30	1.021	1.95	1.95	1.726	1.773	0.462	0.83

第3次附着	104.4	30	1.172	1.95	1.95	1.698	1.75	0.522	0.941
第4次附着	134.4	30	1.302	1.95	1.95	1.677	1.732	0.572	1.034
第5次附着	164.4	30	1.418	1.95	1.95	1.654	1.707	0.615	1.11
悬臂端	204.9	40.5	1.566	1.95	1.95	1.622	1.668	0.666	1.198

附图如下:



塔机附着立面图

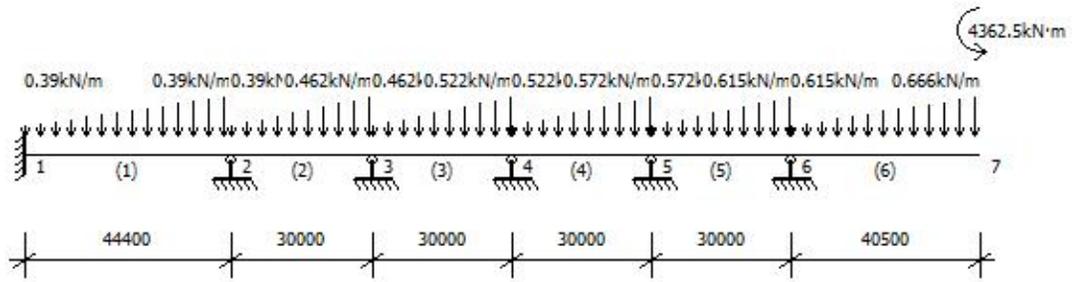
三、工作状态下附墙杆内力计算

1、扭矩组合标准值 T_k

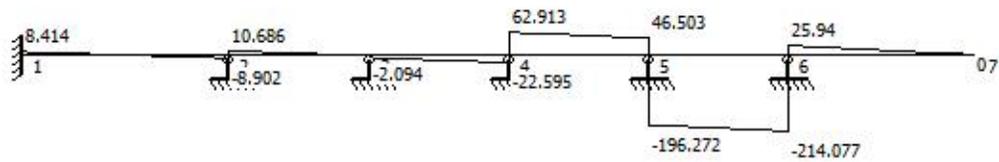
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{ki} = 837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

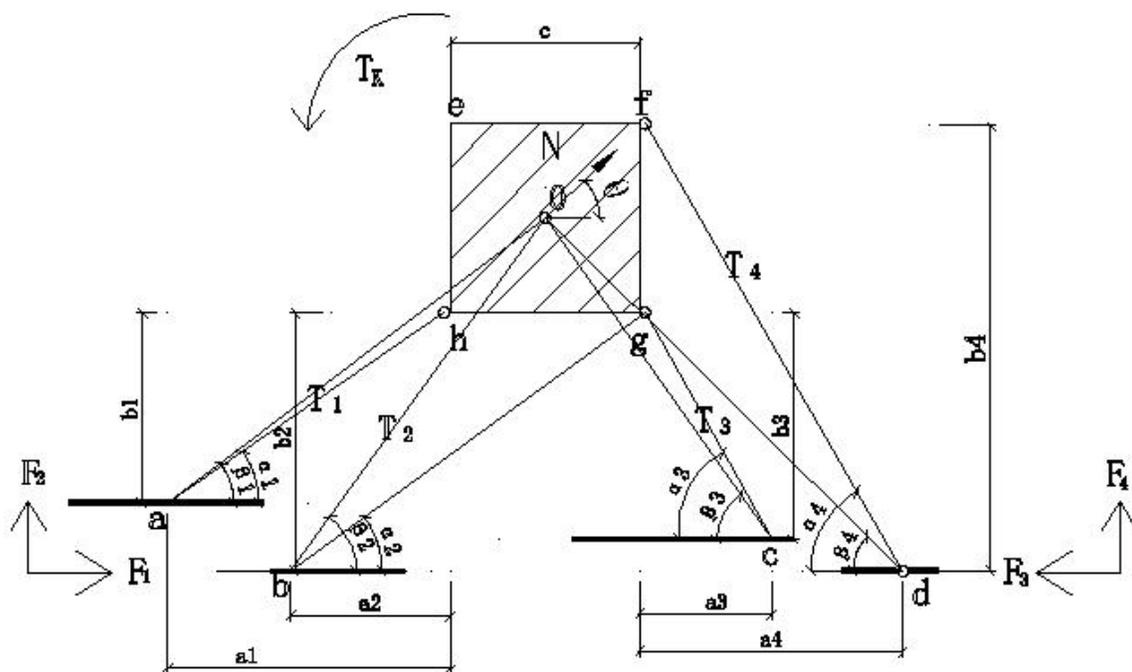
得: $R_E=242.775\text{kN}$

在工作状态下,塔机起重臂位置的不确定性以及风向的随机性,在计算支座 6 处锚固环截面内力时需考虑塔身承受双向的风荷载和倾覆力矩及扭矩。

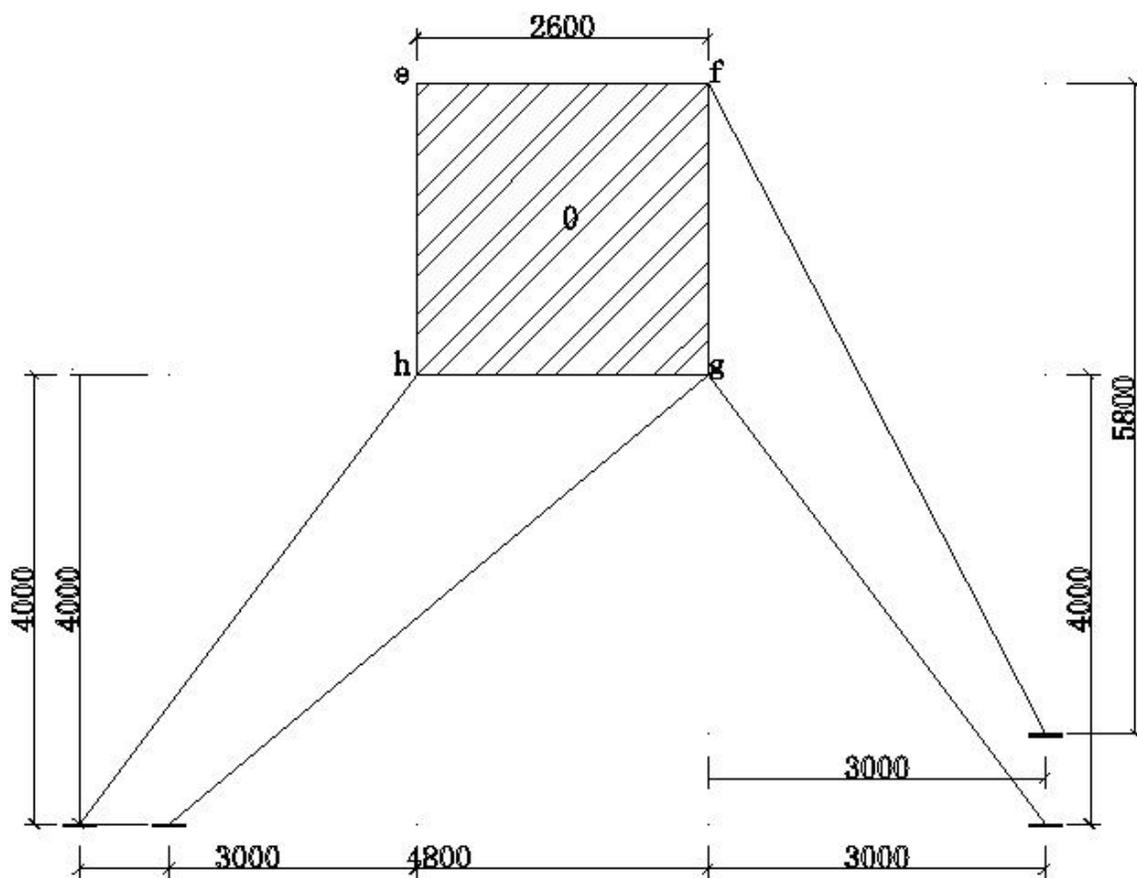
3、附墙杆内力计算

支座 6 处锚固环的截面扭矩 T_k (考虑塔机产生的扭矩由支座 6 处的附墙杆承担), 水平内力 $N_w=2^{0.5}R_E=343.336\text{kN}$ 。

计算简图:



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 53.13^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 39.806^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 53.13^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 62.65^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan((b_1+c/2)/(a_1+c/2)) = 50.947^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2+c/2)/(a_2-c/2)) = 56.56^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3+c/2)/(a_3+c/2)) = 50.947^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan((b_4-c/2)/(a_4+c/2)) = 46.302^\circ$$

四杆附着属于一次超静定结构，用力法计算，切断 T_4 杆并代以相应多余未知力 $X_1=1$ 。

$$\delta_{11} \times X_1 + \Delta_{1p} = 0$$

$X_1=1$ 时，各杆件轴力计算：

$$T_{11} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times (b_1 + c/2) / \sin\beta_1 + T_{21} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + c/2) / \sin\beta_2 - T_{31} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + c/2) / \sin\beta_3 - 1 \times \sin(\alpha_4 - \beta_4) \times (a_4 + c/2) / \cos\beta_4 = 0$$

$$T_{21} \times \sin\alpha_2 \times c + T_{31} \times \sin\alpha_3 \times c + 1 \times \cos\alpha_4 \times c + 1 \times \sin\alpha_4 \times c = 0$$

$$T_{11} \times \sin\alpha_1 \times c - 1 \times \cos\alpha_4 \times c = 0$$

当 N_w 、 T_k 同时存在时， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，各杆件轴力计算：

$$T_{1p} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times (b_1 + c/2) / \sin\beta_1 + T_{2p} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + c/2) / \sin\beta_2 - T_{3p} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + c/2) / \sin\beta_3 - T_k = 0$$

$$T_{2p} \times \sin\alpha_2 \times c + T_{3p} \times \sin\alpha_3 \times c + N_w \times \sin\theta \times c/2 - N_w \times \cos\theta \times c/2 + T_k = 0$$

$$T_{1p} \times \sin\alpha_1 \times c + N_w \times \sin\theta \times c/2 + N_w \times \cos\theta \times c/2 - T_k = 0$$

$$\delta_{11} = \Sigma(T_i^2 L / (EA)) = T_{11}^2 (a_1 / \cos\alpha_1) / (EA) + T_{21}^2 (a_2 / \cos\alpha_2) / (EA) + T_{31}^2 (a_3 / \cos\alpha_3) / (EA) + 1^2 (a_4 / \cos\alpha_4) / (EA)$$

$$\Delta_{1p} = \Sigma(T_i \times T_{ip} L / (EA)) = T_{11} \times T_{1p} (a_1 / \cos\alpha_1) / (EA) + T_{21} \times T_{2p} (a_2 / \cos\alpha_2) / (EA) + T_{31} \times T_{3p} (a_3 / \cos\alpha_3) / (EA)$$

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11}$$

各杆轴力计算公式如下：

$$T_1 = T_{11} \times X_1 + T_{1p}, \quad T_2 = T_{21} \times X_1 + T_{2p}, \quad T_3 = T_{31} \times X_1 + T_{3p}, \quad T_4 = X_1$$

(1) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

最大轴压力 $T_1=567.433\text{kN}$, $T_2=38.332\text{kN}$, $T_3=357.013\text{kN}$, $T_4=0\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=12.046\text{kN}$, $T_2=194.293\text{kN}$, $T_3=305.384\text{kN}$, $T_4=250.512\text{kN}$

(2) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环, 当 T_k 按图上反方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力:

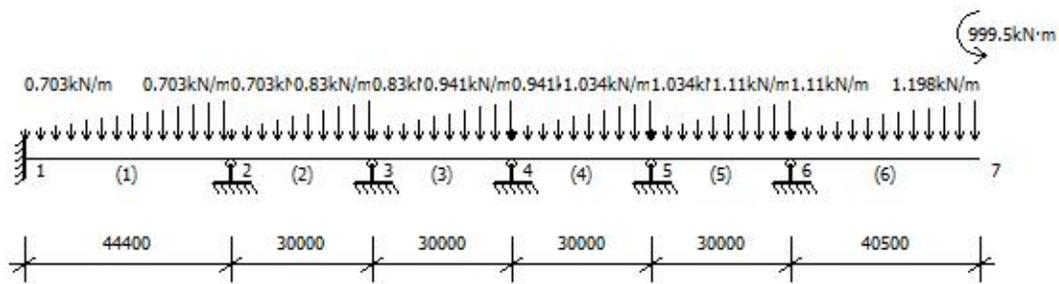
最大轴压力 $T_1=12.048\text{kN}$, $T_2=194.294\text{kN}$, $T_3=305.384\text{kN}$, $T_4=250.512\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=567.432\text{kN}$, $T_2=38.332\text{kN}$, $T_3=357.012\text{kN}$, $T_4=0\text{kN}$

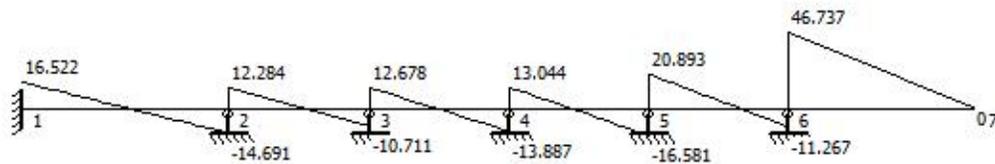
四、非工作状态下附墙杆内力计算

此工况下塔机回转机构的制动器完全松开, 起重臂能随风转动, 故不计风荷载产生的扭转力矩。

1、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

得: $R_E=58.004\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 6 处锚固环的水平内力 $N_w=R_E=58.004\text{kN}$ 。

根据工作状态方程组 $T_k=0$ ， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，求解各杆最大轴拉力和轴压力：

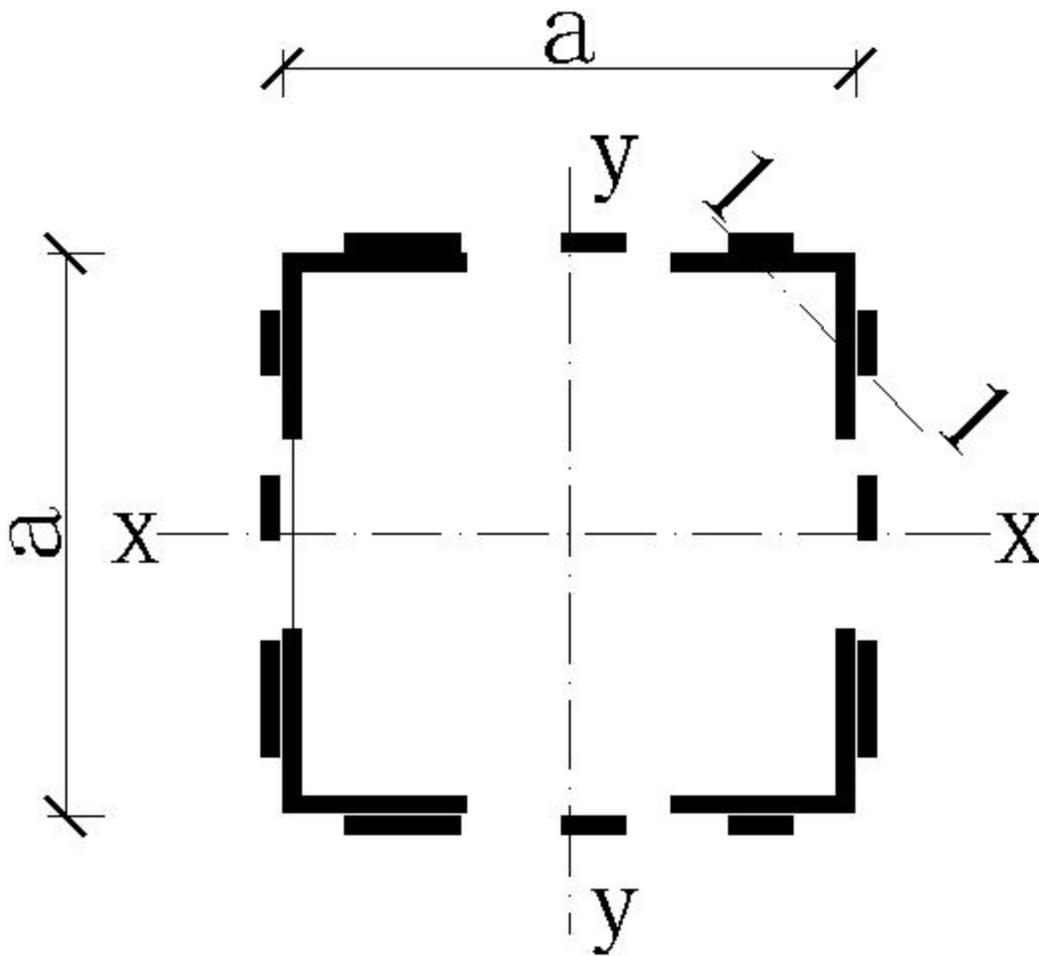
最大轴压力 $T_1=48.95\text{kN}$ ， $T_2=19.65\text{kN}$ ， $T_3=55.953\text{kN}$ ， $T_4=5.616\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=48.949\text{kN}$ ， $T_2=19.65\text{kN}$ ， $T_3=55.953\text{kN}$ ， $T_4=5.616\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

格构柱参数			
格构柱截面类型	四肢	格构柱缀件形式	缀条
缀件间净距 $l_{01}(\text{mm})$	200	格构柱截面边长 $a(\text{mm})$	400
格构柱分肢参数			
格构柱分肢材料	L100X10	分肢材料截面积 $A_0(\text{cm}^2)$	19.26
分肢对最小刚度轴的回转半径 $i_{y0}(\text{cm})$	1.96	分肢平行于对称轴惯性矩 $I_0(\text{cm}^4)$	179.51
分肢形心轴距分肢外边缘距离 $Z_0(\text{cm})$	2.84	分肢材料强度设计值 $f_y(\text{N}/\text{mm}^2)$	235
分肢材料抗拉、压强度设计值 $f(\text{N}/\text{mm}^2)$	210		
格构柱缀件参数			
缀条材料	L50X5	缀条最小回转半径 $i_{\text{nim}}(\text{cm})$	0.98
缀条截面积 $A_z(\text{cm}^2)$	4.8		
角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	10	焊缝计算长度 $l_f(\text{mm})$	250
焊缝强度设计值 $f_{f_w}(\text{N}/\text{mm}^2)$	160		

附图如下：



塔机附着格构柱截面

1、杆件轴心受拉强度验算

$$A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

$$\sigma=N/A=567433/7704=73.654\text{N/mm}^2\leq [f]=210\text{N/mm}^2$$

满足要求!

2、格构式钢柱换算长细比验算

$$\text{杆件 1 的计算长度: } L_0=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}=5000\text{mm}$$

整个格构柱截面对 X、Y 轴惯性矩:

$$I_x=4[I_0+A_0(a/2-Z_0)^2]=4\times [179.51+19.26\times (40/2-2.84)^2]=23403.67\text{cm}^4$$

$$\text{整个构件长细比: } \lambda_x=\lambda_y=L_0/(I_x/(4A_0))^{0.5}=500/(23403.67/(4\times 19.26))^{0.5}=28.687$$

$$\text{分肢长细比: } \lambda_1=l_{01}/i_{y0}=20/1.96=10.204$$

$$\text{分肢毛截面积之和: } A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

构件截面中垂直于 X 轴的各斜缀条的毛截面积之和:

$$A_{1x}=2A_z=2\times 480=960\text{mm}^2$$

格构式钢柱绕两主轴的换算长细比:

$$\lambda_{0\max}=(\lambda_x^2+40A/A_{1x})^{0.5}=(28.687^2+40\times 7704/960)^{0.5}=33.822$$

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_{01\max}=33.822\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.922$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_{02\max}=40.077\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.898$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_{03\max}=33.822\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.922$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_{04\max}=41.529\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.893$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=567432/(0.922\times 7704\times 210)=0.38\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=194293/(0.898\times 7704\times 210)=0.134\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=357012/(0.922\times 7704\times 210)=0.239\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4Af)=250512/(0.893\times 7704\times 210)=0.173\leq 1$$

满足要求!

3、格构式钢柱分肢的长细比验算

附墙杆 1 钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_1=10.204 \leq 0.7\lambda_{01\max}=0.7 \times 50=35$$

当 $\lambda_{01\max}$ 小于 50 时取 50

满足要求!

附墙杆 2 钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_2=10.204 \leq 0.7\lambda_{02\max}=0.7 \times 50=35$$

当 $\lambda_{02\max}$ 小于 50 时取 50

满足要求!

附墙杆 3 钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_3=10.204 \leq 0.7\lambda_{03\max}=0.7 \times 50=35$$

当 $\lambda_{03\max}$ 小于 50 时取 50

满足要求!

附墙杆 4 钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_4=10.204 \leq 0.7\lambda_{04\max}=0.7 \times 50=35$$

当 $\lambda_{04\max}$ 小于 50 时取 50

满足要求!

4、缀件验算

缀件所受剪力： $V=Af(f_y/235)^{0.5}/85=7704 \times 210.00 \times 10^{-3} \times (235.00/235)^{0.5}/85=19.033\text{kN}$

格构柱相邻缀板轴线距离： $l_1=l_{01}+5=20.00+5=25\text{cm}$

作用在一侧缀板上的弯矩： $M_0=Vl_1/4=19.033 \times 0.25/4=1.19\text{kN}\cdot\text{m}$

分肢型钢形心轴之间距离： $b_1=a-2Z_0=0.4-2 \times 0.0284=0.343\text{m}$

斜缀条轴向压力值： $N_0=V/(2\cos\alpha)=V/(2a/(a^2+l_1^2)^{0.5})=19.033/(2 \times 0.4/(0.4^2+0.25^2)^{0.5})=11.223\text{kN}$

缀条计算长度： $l_t=(a^2+l_1^2)^{0.5}=(400.00^2+250^2)^{0.5}=471.699\text{mm}$

缀条长细比: $\lambda=l/i_{\min}=47.17/0.98=48.133\leq 80$

查表《钢结构设计标准》GB50017-2017 附录 D: b 类截面轴心受压构件的稳定系数: $\varphi=0.865$

等边角钢计算稳定性系数:

$\eta=\min(0.6+0.0015\lambda, 1.0)=\min(0.6+0.0015\times 48.133, 1.0)=0.672$

缀条稳定验算:

$N_0/(\varphi\eta A_z f)=11.223\times 10^3/(0.865\times 0.672\times 4.80\times 10^2\times 215)=0.187\leq 1$

满足要求!

需要焊缝长度:

$\Sigma l_w=N_0/(0.7h_f\times 0.85f_f^w)=11.223\times 10^3/(0.7\times 10\times 0.85\times 160)=12\text{mm}\leq l_f=250\text{mm}$

满足要求!

六、附着杆与结构连接节点验算

附着杆与建筑物连接方式	铰接	连接钢板厚度 dt(mm)	20
连接钢板强度等级	Q235	建筑物混凝土强度等级	C35
连接板固定方式	锚固螺栓	连接板耳板排数	2
锚固螺栓类型	摩擦型高强螺栓	高强螺栓的性能等级	8.8 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M30
一个高强螺栓的预拉力 P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目 nf	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₁ (mm):	150	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	300
双吊耳板连接钢板垂直方向螺栓排数 m ₁	2	双吊耳板连接钢板水平方向螺栓排数 n ₁	5
双吊耳板连接钢板水平方向最外侧螺栓两端中心线距离 S ₁ (mm)	600		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下:

$F_1=N_1\sin\alpha_1=567.432\times \sin 53.13^\circ=453.946\text{kN}, V_1=N_1\cos\alpha_1=567.432\times \cos 53.13^\circ$

=340.459kN;

$F_2=N_2\sin\alpha_2=194.293 \times \sin 39.806^\circ=124.383\text{kN}$, $V_2=N_2\cos\alpha_2=194.293 \times \cos 39.806^\circ=149.26\text{kN}$;

$F_3=N_3\sin\alpha_3=357.012 \times \sin 53.13^\circ=285.61\text{kN}$, $V_3=N_3\cos\alpha_3=357.012 \times \cos 53.13^\circ=214.207\text{kN}$;

$F_4=N_4\sin\alpha_4=250.512 \times \sin 62.65^\circ=222.509\text{kN}$, $V_4=N_4\cos\alpha_4=250.512 \times \cos 62.65^\circ=115.091\text{kN}$;

2、螺栓承载力计算

单个高强螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b=0.9k_n\mu P=0.9 \times 1 \times 1 \times 0.45 \times 355=143.775\text{kN}$

单个高强螺栓受拉承载力设计值 $N_t^b=0.8P=0.8 \times 355=284\text{kN}$

(1) 双吊耳板位置螺栓承载力计算：

附着杆 1、附着杆 2 连接的双吊耳板：

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下，每种情况中 θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环计算，经过分析判断最不利情况如下：

$T_k=-837\text{kN}\cdot\text{m}$, $\theta=37^\circ$, $N_1=562.543\text{kN}$, $N_2=15.995\text{kN}$

轴向拉力合力为：

$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=562.543 \times \sin 53.13^\circ+15.995 \times \sin 39.806^\circ=460.274\text{kN}$

水平向剪力合力为：

$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=562.543 \times \cos 53.13^\circ+15.995 \times \cos 39.806^\circ=349.813\text{kN}$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|562.543 \times \sin 53.13^\circ \times 0.5/2+562.543 \times \cos 53.13^\circ \times 0.15-15.995 \times \sin 39.806^\circ \times 0.5/2+15.995 \times \cos 39.806^\circ \times 0.3|=164.264\text{kN}\cdot\text{m}$

经分析判断，应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩：

$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|562.543 \times \sin 53.13^\circ \times (0.6+0.5)/2+562.543 \times \cos 53.13^\circ \times 0.15+15.995 \times \sin 39.806^\circ \times (0.6-0.5)/2+15.995 \times \cos 39.806^\circ \times 0.3|=302.346\text{kN}\cdot\text{m}$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 302.346 \times 600 / 1350 = 134.376 \text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 460.274 / (2 \times 5) + 134.376 = 180.403 \text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 349.813 / (2 \times 5) = 34.981 \text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 34.981 / 143.775 + 180.403 / 284 = 0.879 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

附着杆 3、附着杆 4 连接的双吊耳板：

分别在工作状态下 T_k 为图中方向 ($T_k = T_k$)、 T_k 为图中相反方向 ($T_k = -T_k$)、非工作状态 ($T_k = 0$) 三种情况下，每种情况中 θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环计算，经过分析判断最不利情况如下：

$$T_k = 837 \text{kN} \cdot \text{m}, \theta = 214^\circ, N_3 = 62.454 \text{kN}, N_4 = 245.534 \text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F = N_3 \sin \alpha_3 + N_4 \sin \alpha_4 = 62.454 \times \sin 53.13^\circ + 245.534 \times \sin 62.65^\circ = 268.051 \text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V = N_3 \cos \alpha_3 + N_4 \cos \alpha_4 = 62.454 \times \cos 53.13^\circ + 245.534 \times \cos 62.65^\circ = 150.276 \text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M = |-N_3 \sin \alpha_3 D / 2 + N_3 \cos \alpha_3 L_1 + N_4 \sin \alpha_4 D / 2 + N_4 \cos \alpha_4 L_2| = |-62.454 \times \sin 53.13^\circ \times 0.5 / 2 + 62.454 \times \cos 53.13^\circ \times 0.15 + 245.534 \times \sin 62.65^\circ \times 0.5 / 2 + 245.534 \times \cos 62.65^\circ \times 0.3| = 81.493 \text{kN} \cdot \text{m}$$

经分析判断，应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩：

$$M_1 = |N_3 \sin \alpha_3 (S_1 - D) / 2 + N_3 \cos \alpha_3 L_1 + N_4 \sin \alpha_4 (S_1 + D) / 2 + N_4 \cos \alpha_4 L_2| = |62.454 \times \sin 53.13^\circ \times$$

$$(0.6-0.5)/2+62.454 \times \cos 53.13^\circ \times 0.15+245.534 \times \sin 62.65^\circ \times (0.6+0.5)/2+245.534 \times \cos 62.65^\circ \times 0.3=161.908 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{ mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 161.908 \times 600 / 1350 = 71.959 \text{ kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 268.051 / (2 \times 5) + 71.959 = 98.764 \text{ kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

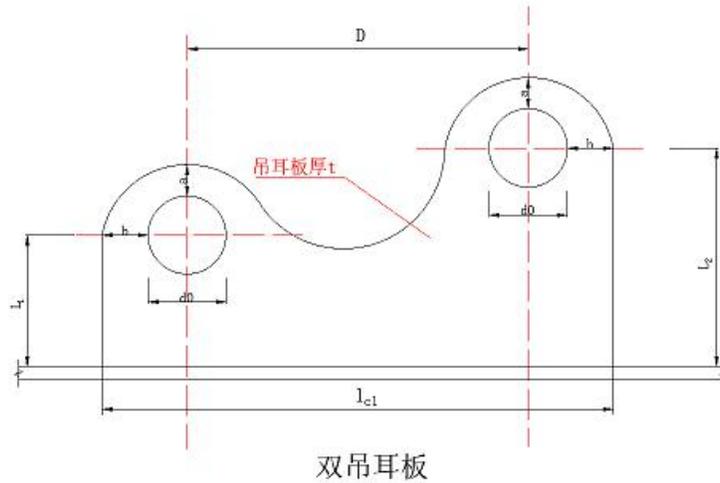
$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 150.276 / (2 \times 5) = 15.028 \text{ kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 15.028 / 143.775 + 98.764 / 284 = 0.452 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	20	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	100
顺受力方向，吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	80	吊孔直径 d ₀ (mm)	60
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	205	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	120
连接板耳板排数	2		



双吊耳板

参考 GB50017-2017，对连接耳板进行如下验算：

吊耳板验算与吊孔中心至连接钢板高度无关，单双吊耳板的 a 、 b 、 d_0 参数均相同，因此单吊耳板与双吊耳板的验算方法相同，取拉力最大值进行计算即可。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 283.716 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 20 + 16 = 56 \text{ mm} \leq b = 100 \text{ mm}$$

满足要求!

$$4B_e / 3 = 4 \times 56 / 3 = 74.667 \text{ mm} \leq a = 80 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0 / 3) = \min(2 \times 20 + 16, 100 - 60 / 3) = 56 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 283.716 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 56) = 126.659 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板端部截面抗拉（劈开）强度验算

$$\sigma = N_s / [2t(a - 2d_0 / 3)] = 283.716 \times 10^3 / [2 \times 20 \times (80 - 2 \times 60 / 3)] = 177.322 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板端部截面抗拉强度满足要求!

(4) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(80+60/2)^2 - (60/2)^2]^{0.5} = 105.83\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 283.716 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 105.83) = 67.022\text{N/mm}^2 \leq f_v = 120\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60
销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	346

参考 GB50017-2017, 对销轴进行如下验算:

由附墙杆内力计算章节可知, 作用于销轴截面的最大剪力

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 567.432\text{kN}$$

(2) 销轴抗剪强度

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 567.432 \times 10^3 / (2 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 100.344\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 346\text{N/mm}^2$$

销轴抗剪强度满足要求!

5、连接钢板焊缝计算

连接钢板角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	16
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	160
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	680

(1) 双吊耳板位置焊缝验算:

附着杆 1、附着杆 2 连接的双吊耳板:

连接钢板吊耳板排数为 2, 则:

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为:

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7h_f(l_{c1} - 2h_f)] = (|460.274| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 15.855\text{N/mm}^2$$

$$\tau_v = (|V|/2) / [2 \times 0.7h_f(l_{c1} - 2h_f)] = (|349.813| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)]$$

$$16)] = 12.05 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7h_f(l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (164.264 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 52.392 \text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^2 + \tau_V^2]^{0.5} = [(\frac{15.855 + 52.392}{1.22})^2 + 12.05^2]^{0.5} = 57.223 \text{N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{N/mm}^2$$

附着杆 1、附着杆 2 连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附着杆 3、附着杆 4 连接的双吊耳板：

连接钢板吊耳板排数为 2，则：

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为：

$$\sigma_N = (F/2) / [2 \times 0.7h_f(l_{c1} - 2h_f)] = (268.051 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 9.233 \text{N/mm}^2$$

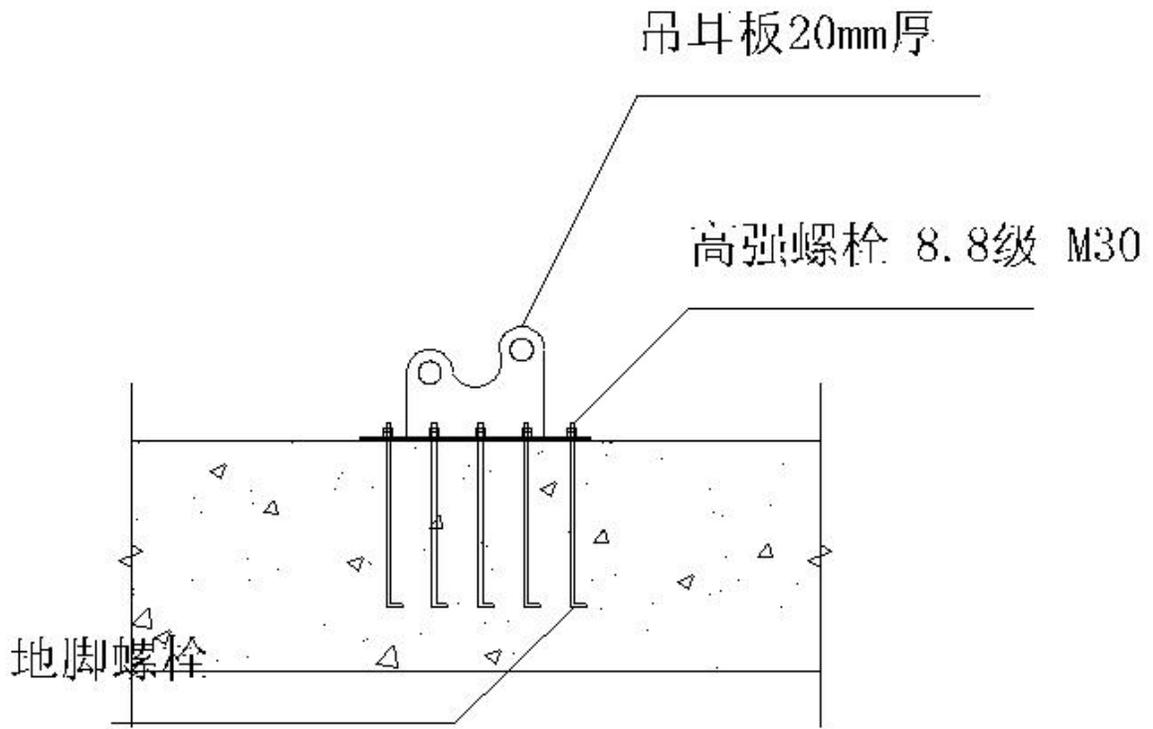
$$\tau_V = (V/2) / [2 \times 0.7h_f(l_{c1} - 2h_f)] = (150.276 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 5.177 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7h_f(l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (81.493 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 25.992 \text{N/mm}^2$$

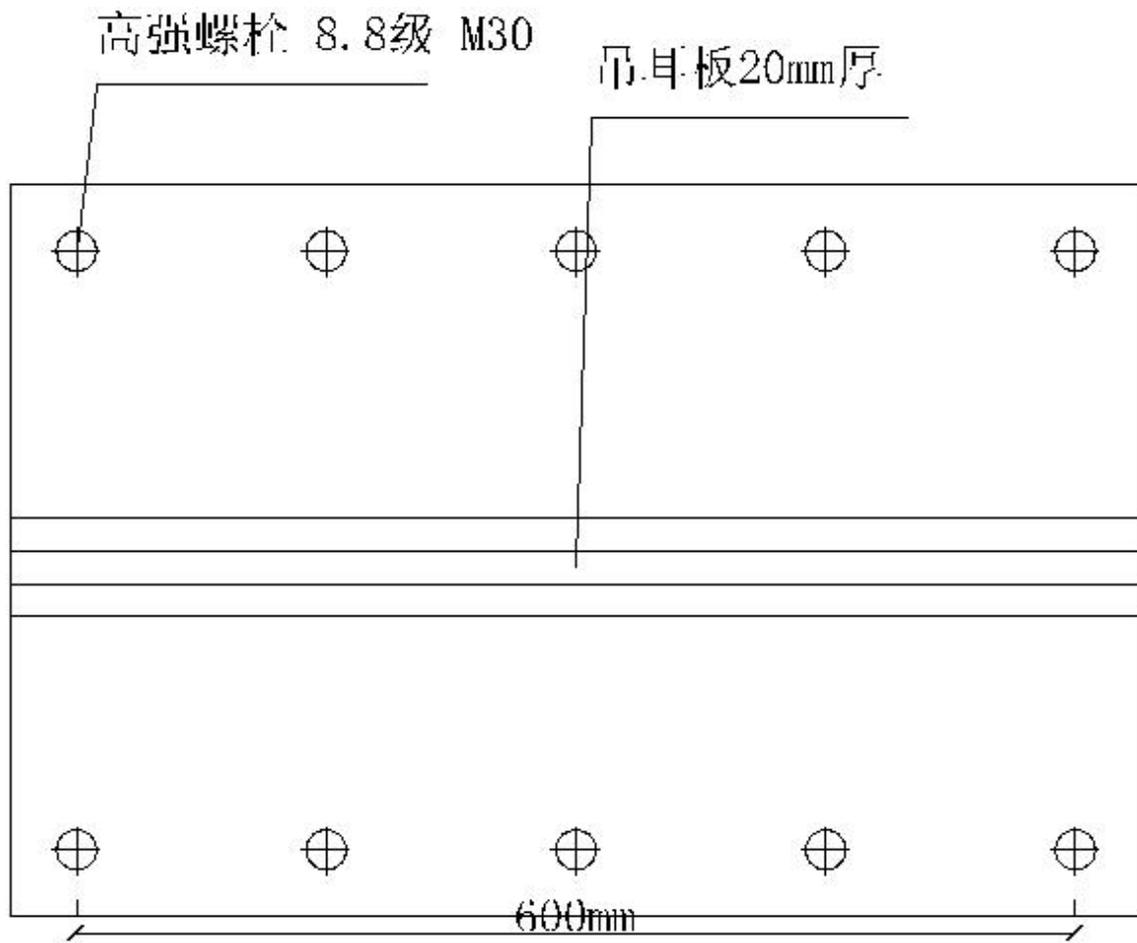
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^2 + \tau_V^2]^{0.5} = [(\frac{9.233 + 25.992}{1.22})^2 + 5.177^2]^{0.5} = 29.334 \text{N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{N/mm}^2$$

附着杆 3、附着杆 4 连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附图如下：



塔机附着节点详图-双吊耳板



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

第6道塔机附着验算计算书

计算依据:

- 1、《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》JGJ/T187-2019
- 2、《钢结构设计标准》GB50017-2017

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT360-20S1	塔身桁架结构类型	角钢
塔机计算高度H(m)	231.9	塔身宽度B(m)	2
起重臂长度 l_1 (m)	50	平衡臂长度 l_2 (m)	17
起重臂与平衡臂截面计算高度h(m)	1.06	工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	837
工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	4362.5	非工作状态下不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k' (kN·m)	999.5(反向)

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	VII类
附墙杆截面类型	格构柱	塔身锚固环边长C(m)	2.6

二、风荷载及附着参数

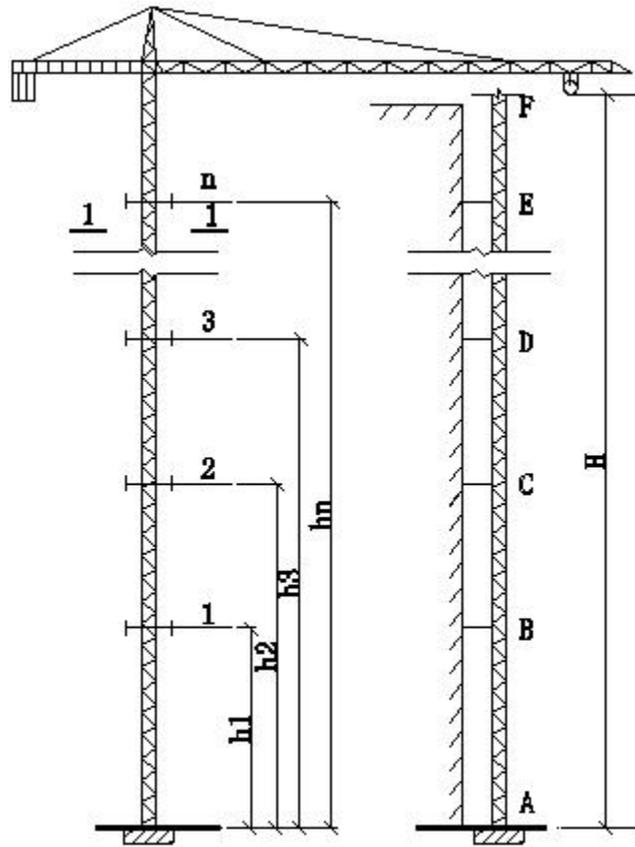
该风荷载取值依据JGJ/T187-2019《塔式起重机混凝土基础工程技术标准》附录A相关内容进行取值。

附着次数N	6		
附着点1到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.07	点1到塔机的竖向距离 b_1 (m)	13.09
附着点2到塔机的横向距离 a_2 (m)	2.16	点2到塔机的竖向距离 b_2 (m)	13.16
附着点3到塔机的横向距离 a_3 (m)	7.23	点3到塔机的竖向距离 b_3 (m)	13.36
附着点4到塔机的横向距离 a_4 (m)	7.79	点4到塔机的竖向距离 b_4 (m)	15.87
工作状态基本风压 ω_0 (kN/m ²)	0.2	非工作状态基本风压 ω_0' (kN/m ²)	0.35
塔身前后片桁架的平均充实率 α_0	0.35		

第N次附着	附着点高度 h_1 (m)	附着点净高 h_{01} (m)	风压等效高度变化系数 μ_z	工作状态风荷载体型系数 μ_s	非工作状态风荷载体型系数 μ_s'	工作状态风振系数 β_z	非工作状态风振系数 β_z'	工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压等效均布线荷载标准值 q_{sk}'
第1次附着	44.4	44.4	0.845	1.95	1.95	1.763	1.815	0.39	0.703
第2次附着	74.4	30	1.021	1.95	1.95	1.726	1.773	0.462	0.83
第3次附着	104.4	30	1.172	1.95	1.95	1.698	1.75	0.522	0.941

第4次附着	134.4	30	1.302	1.95	1.95	1.677	1.732	0.572	1.034
第5次附着	164.4	30	1.418	1.95	1.95	1.654	1.707	0.615	1.11
第6次附着	191.4	27	1.513	1.95	1.95	1.631	1.679	0.647	1.165
悬臂端	231.9	40.5	1.651	1.95	1.95	1.607	1.655	0.695	1.253

附图如下:



(a) 附墙正立面

(b) 附墙侧立面

塔机附着立面图

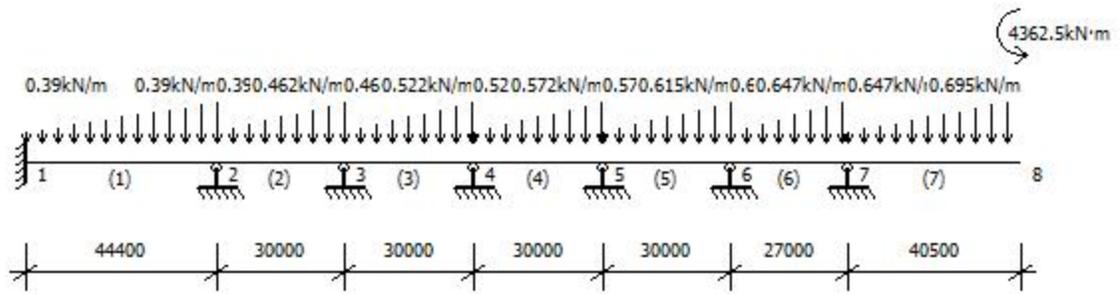
三、工作状态下附墙杆内力计算

1、扭矩组合标准值 T_k

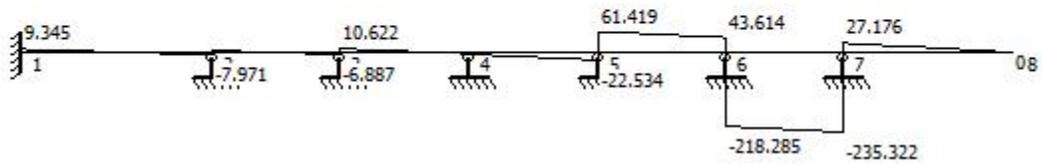
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{ki} = 837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

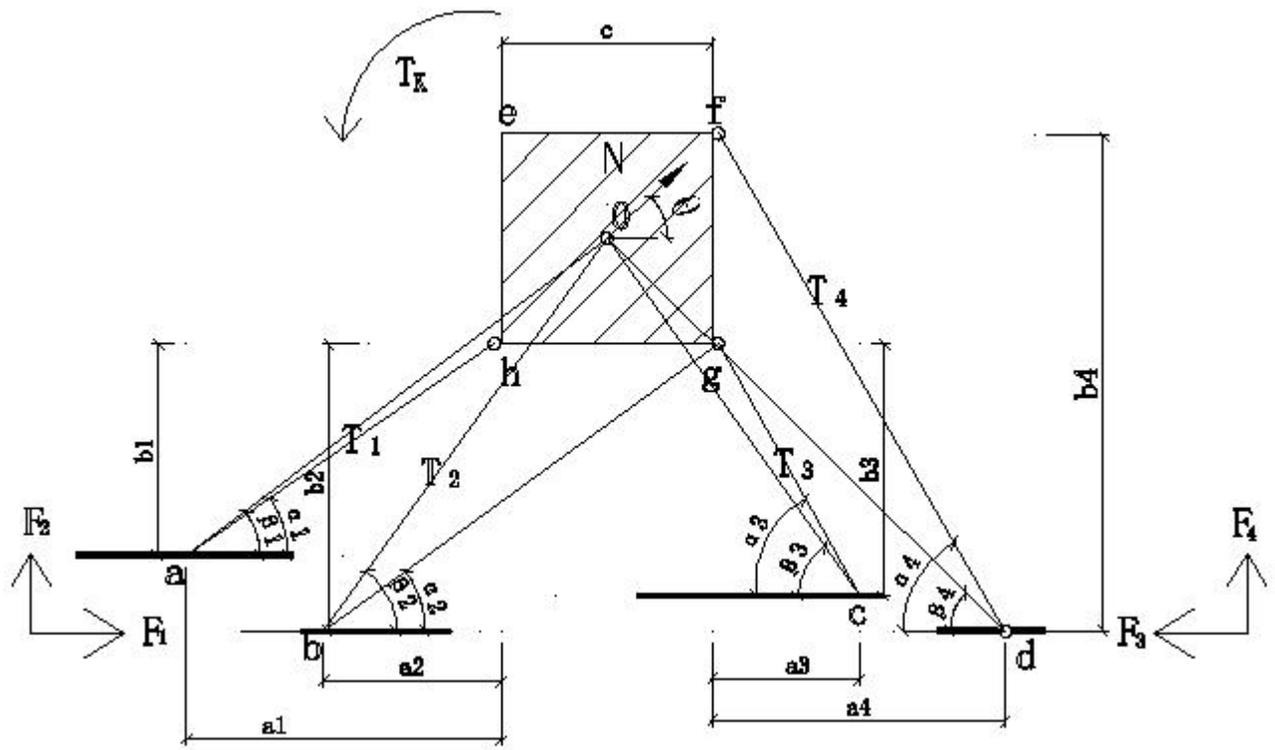
得: $R_E=262.497\text{kN}$

在工作状态下, 塔机起重臂位置的不确定性以及风向的随机性, 在计算支座7处锚固环截面内力时需考虑塔身承受双向的风荷载和倾覆力矩及扭矩。

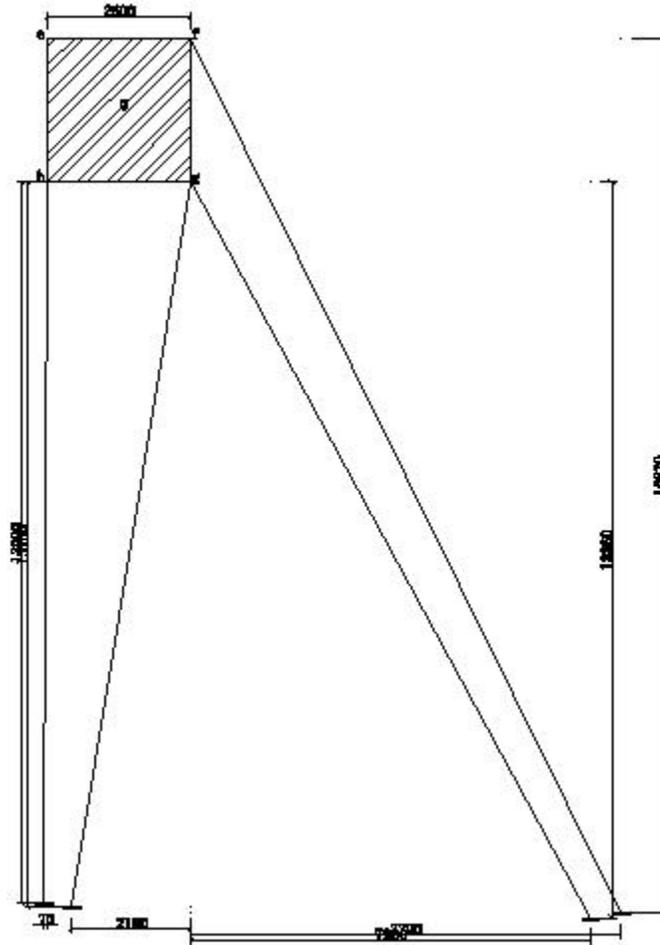
3、附墙杆内力计算

支座7处锚固环的截面扭矩 T_k (考虑塔机产生的扭矩由支座7处的附墙杆承担), 水平内力 $N_w=2^{0.5}R_E=371.227\text{kN}$ 。

计算简图:



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 89.694^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 80.679^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 61.579^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 63.855^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan((b_1+c/2)/(a_1+c/2)) = 84.562^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2+c/2)/(a_2-c/2)) = 86.596^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3+c/2)/(a_3+c/2)) = 59.807^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan((b_4-c/2)/(a_4+c/2)) = 58.041^\circ$$

四杆附着属于一次超静定结构，用力法计算，切断T₄杆并代以相应多余未知力

X₁=1。

$$\delta_{11} \times X_1 + \Delta_{1p} = 0$$

X₁=1时，各杆件轴力计算：

$$T_{11} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times (b_1 + c/2) / \sin \beta_1 + T_{21} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + c/2) / \sin \beta_2 - T_{31} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + c/2) / \sin \beta_3 - 1 \times \sin(\alpha_4 - \beta_4) \times (a_4 + c/2) / \cos \beta_4 = 0$$

$$T_{21} \times \sin \alpha_2 \times c + T_{31} \times \sin \alpha_3 \times c + 1 \times \cos \alpha_4 \times c + 1 \times \sin \alpha_4 \times c = 0$$

$$T_{11} \times \sin \alpha_1 \times c - 1 \times \cos \alpha_4 \times c = 0$$

当 N_w 、 T_k 同时存在时， θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，各杆件轴力计算：

$$T_{1p} \times \sin(\alpha_1 - \beta_1) \times (b_1 + c/2) / \sin \beta_1 + T_{2p} \times \sin(\alpha_2 - \beta_2) \times (b_2 + c/2) / \sin \beta_2 - T_{3p} \times \sin(\alpha_3 - \beta_3) \times (b_3 + c/2) / \sin \beta_3 - T_k = 0$$

$$T_{2p} \times \sin \alpha_2 \times c + T_{3p} \times \sin \alpha_3 \times c + N_w \times \sin \theta \times c/2 - N_w \times \cos \theta \times c/2 + T_k = 0$$

$$T_{1p} \times \sin \alpha_1 \times c + N_w \times \sin \theta \times c/2 + N_w \times \cos \theta \times c/2 - T_k = 0$$

$$\delta_{11} = \Sigma(T_i^2 L / (EA)) = T_{11}^2 (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21}^2 (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31}^2 (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA) + 1^2 (a_4 / \cos \alpha_4) / (EA)$$

$$\Delta_{1p} = \Sigma(T_i \times T_p L / (EA)) = T_{11} \times T_{1p} (a_1 / \cos \alpha_1) / (EA) + T_{21} \times T_{2p} (a_2 / \cos \alpha_2) / (EA) + T_{31} \times T_{3p} (a_3 / \cos \alpha_3) / (EA)$$

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11}$$

各杆轴力计算公式如下：

$$T_1 = T_{11} \times X_1 + T_{1p}, \quad T_2 = T_{21} \times X_1 + T_{2p}, \quad T_3 = T_{31} \times X_1 + T_{3p}, \quad T_4 = X_1$$

(1) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

$$\text{最大轴压力 } T_1 = 620.671 \text{ kN}, \quad T_2 = 28.419 \text{ kN}, \quad T_3 = 321.927 \text{ kN}, \quad T_4 = 114.428 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 53.914 \text{ kN}, \quad T_2 = 166.492 \text{ kN}, \quad T_3 = 632.926 \text{ kN}, \quad T_4 = 289.234 \text{ kN}$$

(2) θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环，当 T_k 按图上反方向设置时求解各杆最大轴拉力和轴压力：

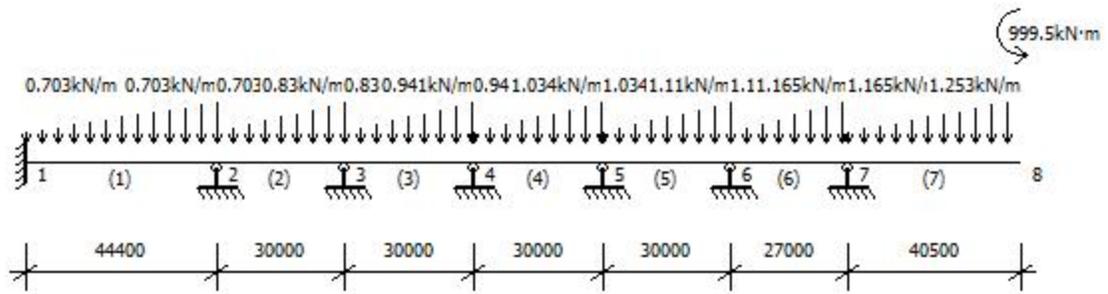
$$\text{最大轴压力 } T_1 = 53.914 \text{ kN}, \quad T_2 = 166.494 \text{ kN}, \quad T_3 = 632.925 \text{ kN}, \quad T_4 = 289.234 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 620.671 \text{ kN}, \quad T_2 = 28.42 \text{ kN}, \quad T_3 = 321.93 \text{ kN}, \quad T_4 = 114.428 \text{ kN}$$

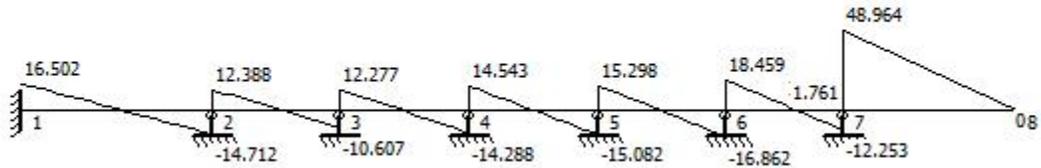
四、非工作状态下附墙杆内力计算

此工况下塔机回转机构的制动器完全松开，起重臂能随风转动，故不计风荷载产生的扭转力矩。

1、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

得: $R_E=61.218\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座7处锚固环的水平内力 $N_w=R_E=61.218\text{kN}$ 。

根据工作状态方程组 $T_k=0$, θ 由 $0\sim 360^\circ$ 循环, 求解各杆最大轴拉力和轴压力:

最大轴压力 $T_1=55.622\text{kN}$, $T_2=16.071\text{kN}$, $T_3=78.73\text{kN}$, $T_4=33.283\text{kN}$

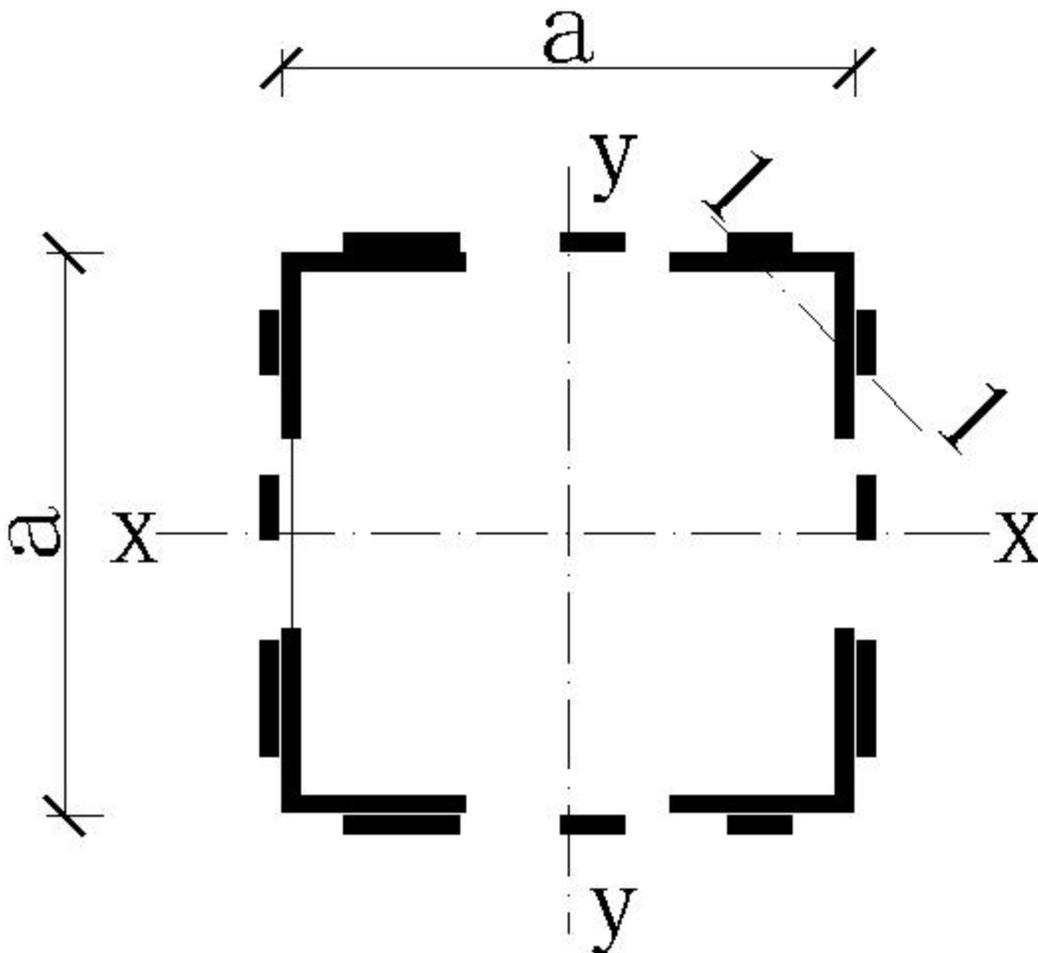
最大轴拉力 $T_1=55.623\text{kN}$, $T_2=16.071\text{kN}$, $T_3=78.732\text{kN}$, $T_4=33.283\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

格构柱参数			
格构柱截面类型	四肢	格构柱缀件形式	缀条
缀件间净距 $l_{01}(\text{mm})$	200	格构柱截面边长 $a(\text{mm})$	400
格构柱分肢参数			
格构柱分肢材料	L100X10	分肢材料截面积 $A_0(\text{cm}^2)$	19.26
分肢对最小刚度轴的回转半径 $i_{y0}(\text{cm})$	1.96	分肢平行于对称轴惯性矩 $I_0(\text{cm}^4)$	179.51

分肢形心轴距分肢外边缘距离 $Z_0(\text{cm})$	2.84	分肢材料强度设计值 $f_y(\text{N}/\text{mm}^2)$	235
分肢材料抗拉、压强度设计值 $f(\text{N}/\text{mm}^2)$	210		
格构柱缀件参数			
缀条材料	L50X5	缀条最小回转半径 $i_{\text{min}}(\text{cm})$	0.98
缀条截面积 $A_z(\text{cm}^2)$	4.8		
角焊缝焊脚尺寸 $h_f(\text{mm})$	10	焊缝计算长度 $l_f(\text{mm})$	250
焊缝强度设计值 $f_{\text{fw}}(\text{N}/\text{mm}^2)$	160		

附图如下:



塔机附着格构柱截面

1、杆件轴心受拉强度验算

$$A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$$

$$\sigma=N/A=632925/7704=82.155\text{N}/\text{mm}^2\leq [f]=210\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、格构式钢柱换算长细比验算

杆件1的计算长度： $L_0=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}=13090.187\text{mm}$

整个格构柱截面对X、Y轴惯性矩：

$$I_x=4[I_0+A_0(a/2-Z_0)^2]=4\times[179.51+19.26\times(40/2-2.84)^2]=23403.67\text{cm}^4$$

整个构件长细比： $\lambda_x=\lambda_y=L_0/(I_x/(4A_0))^{0.5}=1309.019/(23403.67/(4\times 19.26))^{0.5}=75.104$

分肢长细比： $\lambda_1=l_{01}/i_{y0}=20/1.96=10.204$

分肢毛截面积之和： $A=4A_0=4\times 19.26\times 100=7704\text{mm}^2$

构件截面中垂直于X轴的各斜缀条的毛截面积之和：

$$A_{1x}=2A_z=2\times 480=960\text{mm}^2$$

格构式钢柱绕两主轴的换算长细比：

$$\lambda_{0\max}=(\lambda_x^2+40A/A_{1x})^{0.5}=(75.104^2+40\times 7704/960)^{0.5}=77.211$$

附墙杆1长细比：

$$\lambda_{01\max}=77.211\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.706$$

满足要求！

附墙杆2长细比：

$$\lambda_{02\max}=78.585\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.697$$

满足要求！

附墙杆3长细比：

$$\lambda_{03\max}=88.978\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.628$$

满足要求！

附墙杆4长细比：

$$\lambda_{04\max}=103.001\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.536$$

满足要求！

附墙杆1轴心受压稳定验算：

$$N_1/(\varphi_1Af)=620671/(0.706\times 7704\times 210)=0.543\leq 1$$

满足要求！

附墙杆2轴心受压稳定验算：

$$N_2/(\varphi_2Af)=166492/(0.697\times 7704\times 210)=0.148\leq 1$$

满足要求!

附墙杆3轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3 A f) = 632926 / (0.628 \times 7704 \times 210) = 0.623 \leq 1$$

满足要求!

附墙杆4轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 A f) = 289234 / (0.536 \times 7704 \times 210) = 0.334 \leq 1$$

满足要求!

3、格构式钢柱分肢的长细比验算

附墙杆1钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_1 = 10.204 \leq 0.7 \lambda_{01\max} = 0.7 \times 77.211 = 54.048$$

满足要求!

附墙杆2钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_2 = 10.204 \leq 0.7 \lambda_{02\max} = 0.7 \times 78.585 = 55.009$$

满足要求!

附墙杆3钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_3 = 10.204 \leq 0.7 \lambda_{03\max} = 0.7 \times 88.978 = 62.285$$

满足要求!

附墙杆4钢柱分肢的长细比:

$$\lambda_4 = 10.204 \leq 0.7 \lambda_{04\max} = 0.7 \times 103.001 = 72.101$$

满足要求!

4、缀件验算

$$\begin{aligned} \text{缀件所受剪力: } V &= A f (f_y / 235)^{0.5} / 85 = 7704 \times 210.00 \times 10^{-3} \times \\ & (235.00 / 235)^{0.5} / 85 = 19.033 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{格构柱相邻缀板轴线距离: } l_1 = l_{01} + 5 = 20.00 + 5 = 25 \text{ cm}$$

$$\text{作用在一侧缀板上的弯矩: } M_0 = V l_1 / 4 = 19.033 \times 0.25 / 4 = 1.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{分肢型钢形心轴之间距离: } b_1 = a - 2Z_0 = 0.4 - 2 \times 0.0284 = 0.343 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{斜缀条轴向压力值: } N_0 &= V / (2 \cos \alpha) = V / (2a / (a^2 + l_1^2)^{0.5}) = 19.033 / (2 \times \\ & 0.4 / (0.4^2 + 0.25^2)^{0.5}) = 11.223 \text{ kN} \end{aligned}$$

缀条计算长度： $l_1=(a^2+l_1^2)^{0.5}=(400.00^2+250^2)^{0.5}=471.699\text{mm}$

缀条长细比： $\lambda=l_1/i_{\min}=47.17/0.98=48.133\leq 80$

查表《钢结构设计标准》GB50017-2017附录D：b类截面轴心受压构件的稳定系数： $\varphi=0.865$

等边角钢计算稳定性系数：

$\eta=\min(0.6+0.0015\lambda, 1.0)=\min(0.6+0.0015\times 48.133, 1.0)=0.672$

缀条稳定验算：

$N_0/(\varphi\eta A_z f)=11.223\times 10^3/(0.865\times 0.672\times 4.80\times 10^2\times 215)=0.187\leq 1$

满足要求！

需要焊缝长度：

$\Sigma l_w=N_0/(0.7h_f\times 0.85f_f^w)=11.223\times 10^3/(0.7\times 10\times 0.85\times 160)=12\text{mm}\leq l_f=250\text{mm}$

满足要求！

六、附着杆与结构连接节点验算

附着杆与建筑物连接方式	铰接	连接钢板厚度dt(mm)	20
连接钢板强度等级	Q235	建筑物混凝土强度等级	C35
连接板固定方式	锚固螺栓	连接板耳板排数	2
锚固螺栓类型	摩擦型高强螺栓	高强螺栓的性能等级	8.8级
摩擦面抗滑移系数u	0.45	高强螺栓公称直径	M30
一个高强螺栓的预拉力P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目nr	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度L1(mm):	150	右侧吊耳孔中心至连接板高度L2(mm):	300
双吊耳板连接钢板垂直方向螺栓排数 m1	2	双吊耳板连接钢板水平方向螺栓排数 n1	5
双吊耳板连接钢板水平方向最外侧螺栓两端中心线距离S1(mm)	600		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下：

$F_1=N_1\sin\alpha_1=620.671\times \sin 89.694^\circ=620.662\text{kN}$, $V_1=N_1\cos\alpha_1=620.671\times \cos 89.694^\circ$

=3.319kN;

$F_2=N_2\sin\alpha_2=166.492\times\sin80.679^\circ=164.294\text{kN}$, $V_2=N_2\cos\alpha_2=166.492\times\cos80.679^\circ=26.966\text{kN}$;

$F_3=N_3\sin\alpha_3=632.926\times\sin61.579^\circ=556.643\text{kN}$, $V_3=N_3\cos\alpha_3=632.926\times\cos61.579^\circ=301.237\text{kN}$;

$F_4=N_4\sin\alpha_4=289.234\times\sin63.855^\circ=259.641\text{kN}$, $V_4=N_4\cos\alpha_4=289.234\times\cos63.855^\circ=127.448\text{kN}$;

2、螺栓承载力计算

单个高强螺栓抗剪承载力设计值 $N_v^b=0.9k_n\mu P=0.9\times1\times1\times0.45\times355=143.775\text{kN}$

单个高强螺栓受拉承载力设计值 $N_t^b=0.8P=0.8\times355=284\text{kN}$

(1) 双吊耳板位置螺栓承载力计算:

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板:

分别在工作状态下 T_k 为图中方向 ($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向 ($T_k=-T_k$)、非工作状态 ($T_k=0$) 三种情况下, 每种情况中 θ 由 $0\sim360^\circ$ 循环计算, 经过分析判断最不利情况如下:

$T_k=-837\text{kN}\cdot\text{m}$, $\theta=28^\circ$, $N_1=617.648\text{kN}$, $N_2=-61.55\text{kN}$

轴向拉力合力为:

$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=617.648\times\sin89.694^\circ+(-61.55)\times\sin80.679^\circ=556.902\text{kN}$

水平向剪力合力为:

$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=617.648\times\cos89.694^\circ+(-61.55)\times\cos80.679^\circ=-6.666\text{kN}$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|617.648\times\sin89.694^\circ\times0.5/2+617.648\times\cos89.694^\circ\times0.15-(-61.55)\times\sin80.679^\circ\times0.5/2+(-61.55)\times\cos80.679^\circ\times0.3|=167.099\text{kN}\cdot\text{m}$

经分析判断, 应按照大偏心进行计算

计算对弯矩指向最外侧螺栓中心的弯矩:

$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|617.648\times\sin89.694^\circ\times(0.6+0.5)/2+617.648\times\cos89.694^\circ\times0.15+(-61.55)\times\sin80.679^\circ\times(0.6-0.5)/2+(-61.55)\times\cos80.679^\circ\times0.3|=334.169\text{kN}\cdot\text{m}$

$$\Sigma y_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [(i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 600/4)^2 + (2 \times 600/4)^2 + (3 \times 600/4)^2 + (4 \times 600/4)^2] = 1350000 \text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 334.169 \times 600 / 1350 = 148.52 \text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 556.902 / (2 \times 5) + 148.52 = 204.21 \text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 6.666 / (2 \times 5) = 0.667 \text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 0.667 / 143.775 + 204.21 / 284 = 0.724 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：

分别在工作状态下 T_k 为图中方向($T_k=T_k$)、 T_k 为图中相反方向($T_k=-T_k$)、非工作状态($T_k=0$)三种情况下，每种情况中 θ 由 $0 \sim 360^\circ$ 循环计算，经过分析判断最不利情况如下：

$$T_k = 837 \text{kN} \cdot \text{m}, \theta = 166^\circ, N_3 = 630.87 \text{kN}, N_4 = -100.704 \text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F = N_3 \sin \alpha_3 + N_4 \sin \alpha_4 = 630.87 \times \sin 61.579^\circ + (-100.704) \times \sin 63.855^\circ = 464.434 \text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V = N_3 \cos \alpha_3 + N_4 \cos \alpha_4 = 630.87 \times \cos 61.579^\circ + (-100.704) \times \cos 63.855^\circ = 255.884 \text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M = |-N_3 \sin \alpha_3 D / 2 + N_3 \cos \alpha_3 L_1 + N_4 \sin \alpha_4 D / 2 + N_4 \cos \alpha_4 L_2| = |-630.87 \times \sin 61.579^\circ \times 0.5 / 2 + 630.87 \times \cos 61.579^\circ \times 0.15 + (-100.704) \times \sin 63.855^\circ \times 0.5 / 2 + (-100.704) \times \cos 63.855^\circ \times 0.3| = 129.582 \text{kN} \cdot \text{m}$$

经分析判断，按照小偏心进行计算

$$\Sigma x_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [S_1 / 2 - (i-1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\Sigma x_1^2 = 2 \times [300^2 + (300 - 1 \times 600/4)^2 + (300 - 2 \times 600/4)^2 + (300 - 3 \times 600/4)^2 + (300 - 4 \times 600/4)^2] = 9000000 \text{ mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}} = (MS_1/2) / \Sigma x_1^2 = (129.582 \times 600/2) / (9000000/1000) = 43.194 \text{ kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t = F/m_1 n_1 + N_{\text{附加}} = 464.434 / (2 \times 5) + 43.194 = 89.637 \text{ kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

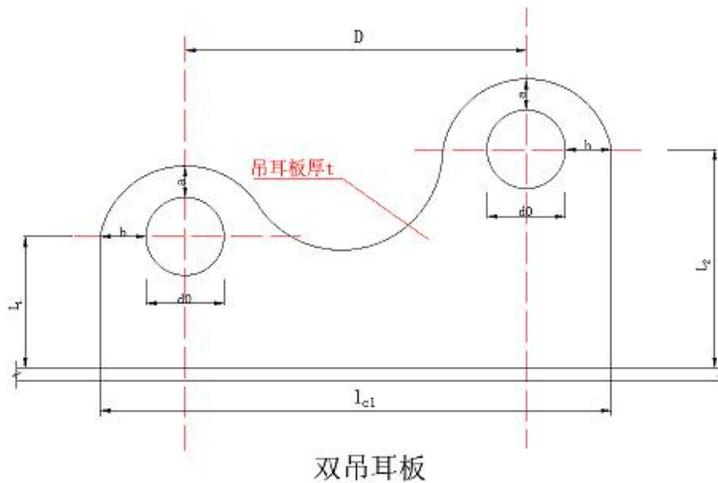
$$N_v = |V| / m_1 n_1 = 255.884 / (2 \times 5) = 25.588 \text{ kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 25.588 / 143.775 + 89.637 / 284 = 0.494 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚t(mm)	20	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	100
顺受力方向,吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	80	吊孔直径d ₀ (mm)	60
吊耳板抗拉强度设计值f(N/mm ²)	205	吊耳板抗剪强度设计值f _v (N/mm ²)	120
连接板耳板排数	2		



双吊耳板

参考GB50017-2017，对连接耳板进行如下验算：

吊耳板验算与吊孔中心至连接钢板高度无关，单双吊耳板的a、b、d₀参数均相同，因此单吊耳板与双吊耳板的验算方法相同，取拉力最大值进行计算即可。

$$N_s = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 316.463 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 20 + 16 = 56 \text{ mm} \leq b = 100 \text{ mm}$$

满足要求！

$$4B_e / 3 = 4 \times 56 / 3 = 74.667 \text{ mm} \leq a = 80 \text{ mm}$$

满足要求！

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0 / 3) = \min(2 \times 20 + 16, 100 - 60 / 3) = 56 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 316.463 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 56) = 141.278 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求！

(3) 耳板端部截面抗拉（劈开）强度验算

$$\sigma = N_s / [2t(a - 2d_0 / 3)] = 316.463 \times 10^3 / [2 \times 20 \times (80 - 2 \times 60 / 3)] = 197.789 \text{ N/mm}^2 \leq f = 205 \text{ N/mm}^2$$

耳板端部截面抗拉强度满足要求！

(4) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度：

$$Z = [(a + d_0 / 2)^2 - (d_0 / 2)^2]^{0.5} = [(80 + 60 / 2)^2 - (60 / 2)^2]^{0.5} = 105.83 \text{ mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 316.463 \times 10^3 / (2 \times 20 \times 105.83) = 74.757 \text{ N/mm}^2 \leq f_v = 120 \text{ N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求！

4、销轴计算

销轴直径d ₁ (mm)	60
销轴材料抗剪强度f _{v1} ^b (N/mm ²)	346

参考GB50017-2017，对销轴进行如下验算：

由附墙杆内力计算章节可知，作用于销轴截面的最大剪力

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 632.926 \text{ kN}$$

(2) 销轴抗剪强度

$$\tau_b = F / (n \sqrt{\pi} d_1^2 / 4) = 632.926 \times 10^3 / (2 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 111.926 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 346 \text{ N/mm}^2$$

销轴抗剪强度满足要求!

5、连接钢板焊缝计算

连接钢板角焊缝焊脚尺寸 h_f (mm)	16
连接钢板角焊缝强度设计值 f_f^w (N/mm ²)	160
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 l_{c1} (mm)	680

(1) 双吊耳板位置焊缝验算:

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板:

连接钢板吊耳板排数为2, 则:

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为:

$$\sigma_N = (F/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (556.902 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 19.183 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_V = (V/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (-6.666 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 0.23 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)^2 / 6] = (167.099 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 53.296 \text{ N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^2 + \tau_V^2)^{0.5} = [(\frac{19.183 + 53.296}{1.22})^2 + 0.23^2]^{0.5} = 59.41 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆1、附着杆2连接的双吊耳板: 连接钢板焊缝强度满足要求!

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板:

连接钢板吊耳板排数为2, 则:

计算连接钢板与吊耳板连接位置焊缝应力为:

$$\sigma_N = (F/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (464.434 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 15.998 \text{ N/mm}^2$$

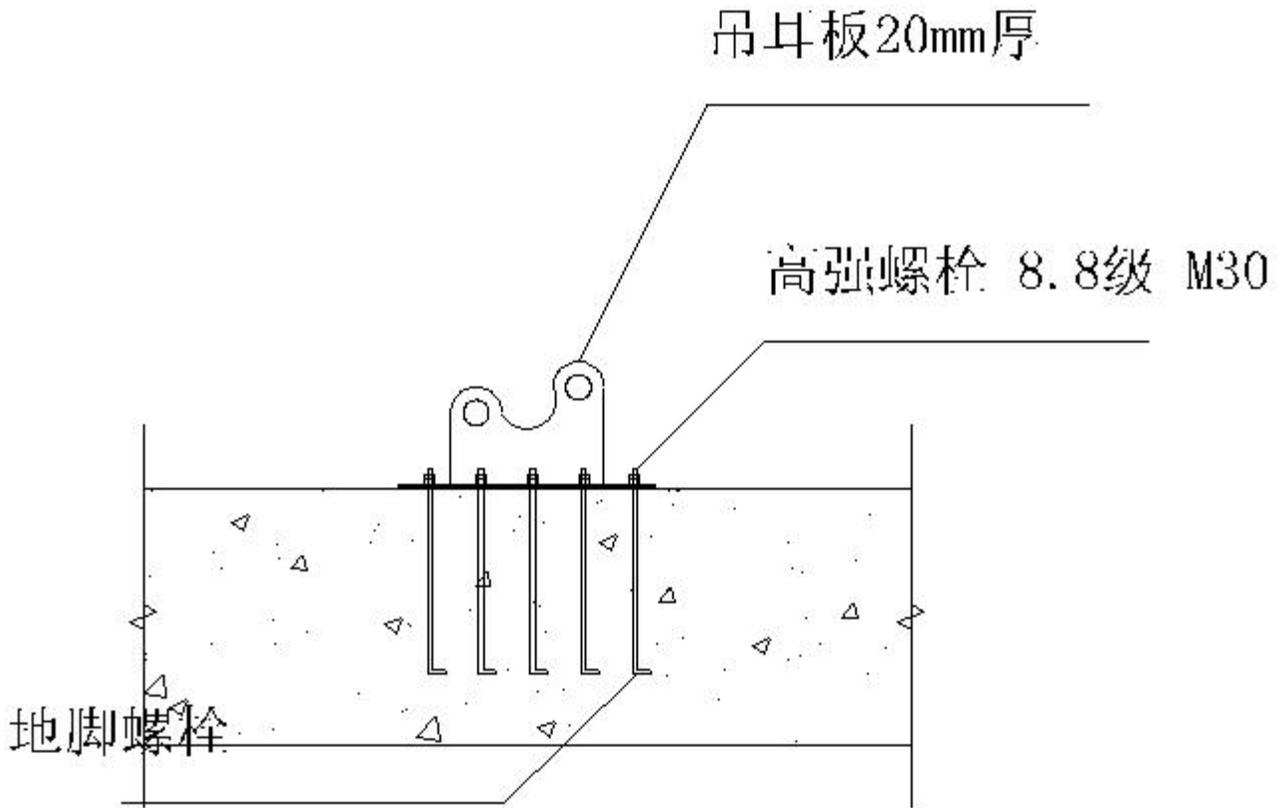
$$\tau_V = (V/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (255.884 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)] = 8.814 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)^2 / 6] = (129.582 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 16 \times (680 - 2 \times 16)^2 / 6] = 41.33 \text{ N/mm}^2$$

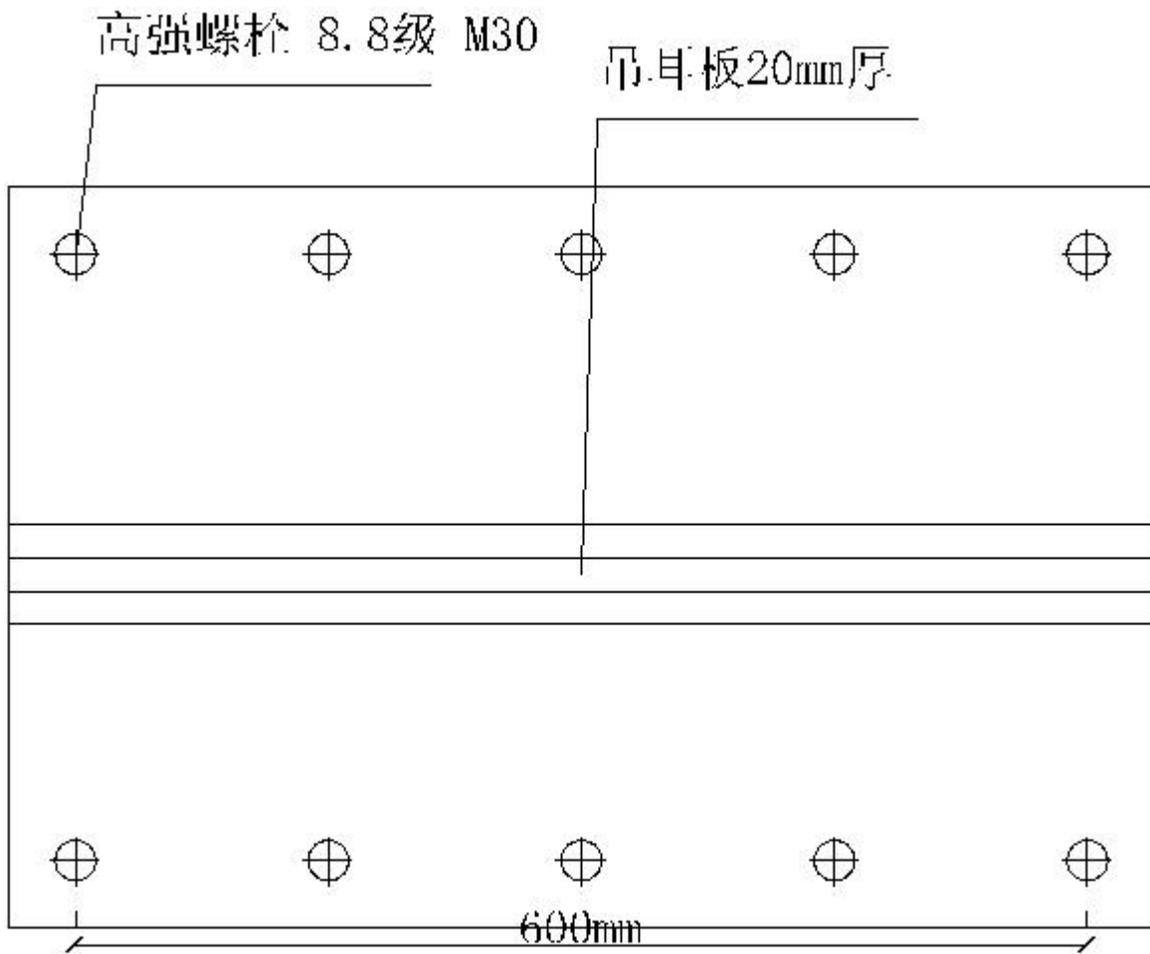
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_v]^2 + \tau_v^2]^{0.5} = [(\frac{15.998 + 41.33}{1.22})^2 + 8.814^2]^{0.5} = 47.81 \text{ N/mm}^2 \leq f_t^w = 160 \text{ N/mm}^2$$

附着杆3、附着杆4连接的双吊耳板：连接钢板焊缝强度满足要求！

附图如下：



塔机附着节点详图-双吊耳板



塔机附着节点剖面图-双吊耳板