

盘龙河 3 号桥 14 墩 XGT6015A-8S 第 1 道附着计 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
- 3、《钢结构通用规范》GB 55006-2021

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT6015A-8S	塔身桁架结构类型	方钢管
塔机计算高度 H(m)	60	塔身宽度 B(m)	1.6
起重臂长度 l_1 (m)	50.9	荷载确定方式	按构件不平衡自重计算
平衡臂长度 l_2 (m)	13.06	起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	2.2
工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	375	工作状态不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	1584
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)	1075		

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	钢管	附墙杆钢管规格(mm)	Φ160×8
塔身锚固环边长 C(m)	2.02		

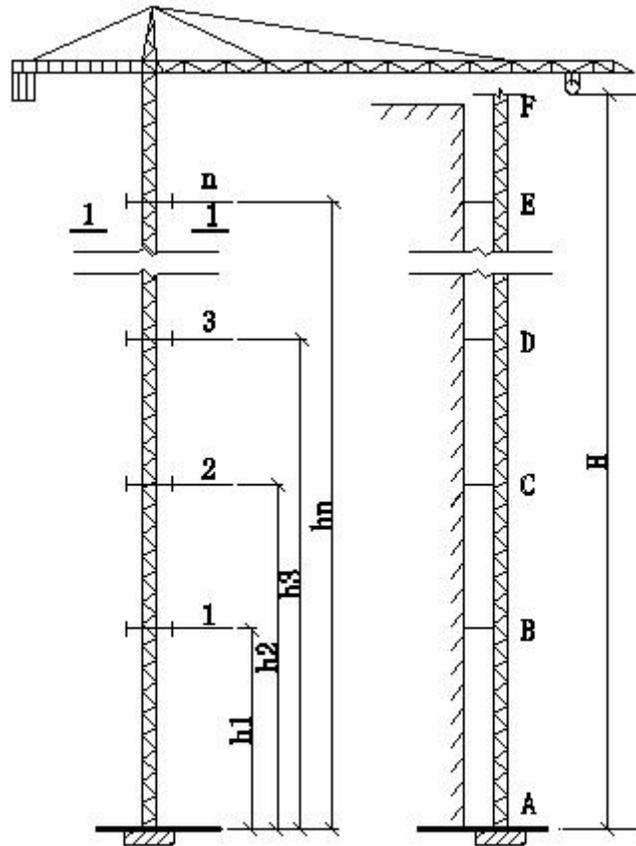
二、风荷载及附着参数

附着次数 N	1		
附着点 1 到塔机的横向距离 a_1 (m)	1.431	点 1 到塔机的竖向距离 b_1 (m)	4.718
附着点 2 到塔机的横向距离 a_2 (m)	2.591	点 2 到塔机的竖向距离 b_2 (m)	3.157
附着点 3 到塔机的横向距离 a_3 (m)	1.743	点 3 到塔机的竖向距离 b_3 (m)	3.763
附着点 4 到塔机的横向距离 a_4 (m)	0.538	点 4 到塔机的竖向距离 b_4 (m)	5.392
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)	0.5
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'	工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}'
---------	-----------------	--------------------	------------------	---------------------	-----------------------	--------------------	----------------------	-----------------------	-------------------------

第1次附着	24.5	24.5	1.302	1.95	1.95	1.585	1.646	0.433	1.123
悬臂端	60	35.5	1.71	1.95	1.95	1.585	1.651	0.568	1.48

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、扭矩组合值 T_k

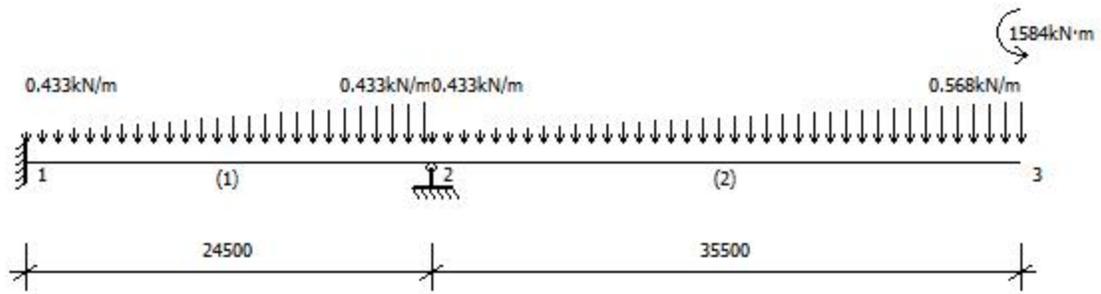
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{k1} = 375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

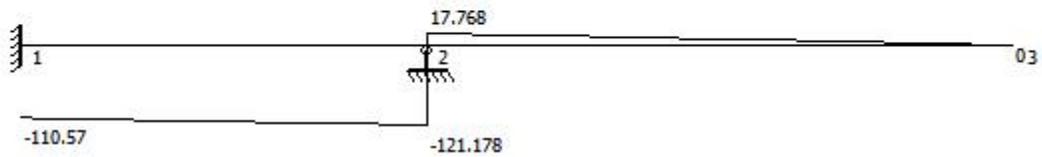
回转惯性力及风荷载产生的扭矩设计值:

$$T_k = 1.5 \times T_{k1} = 562.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

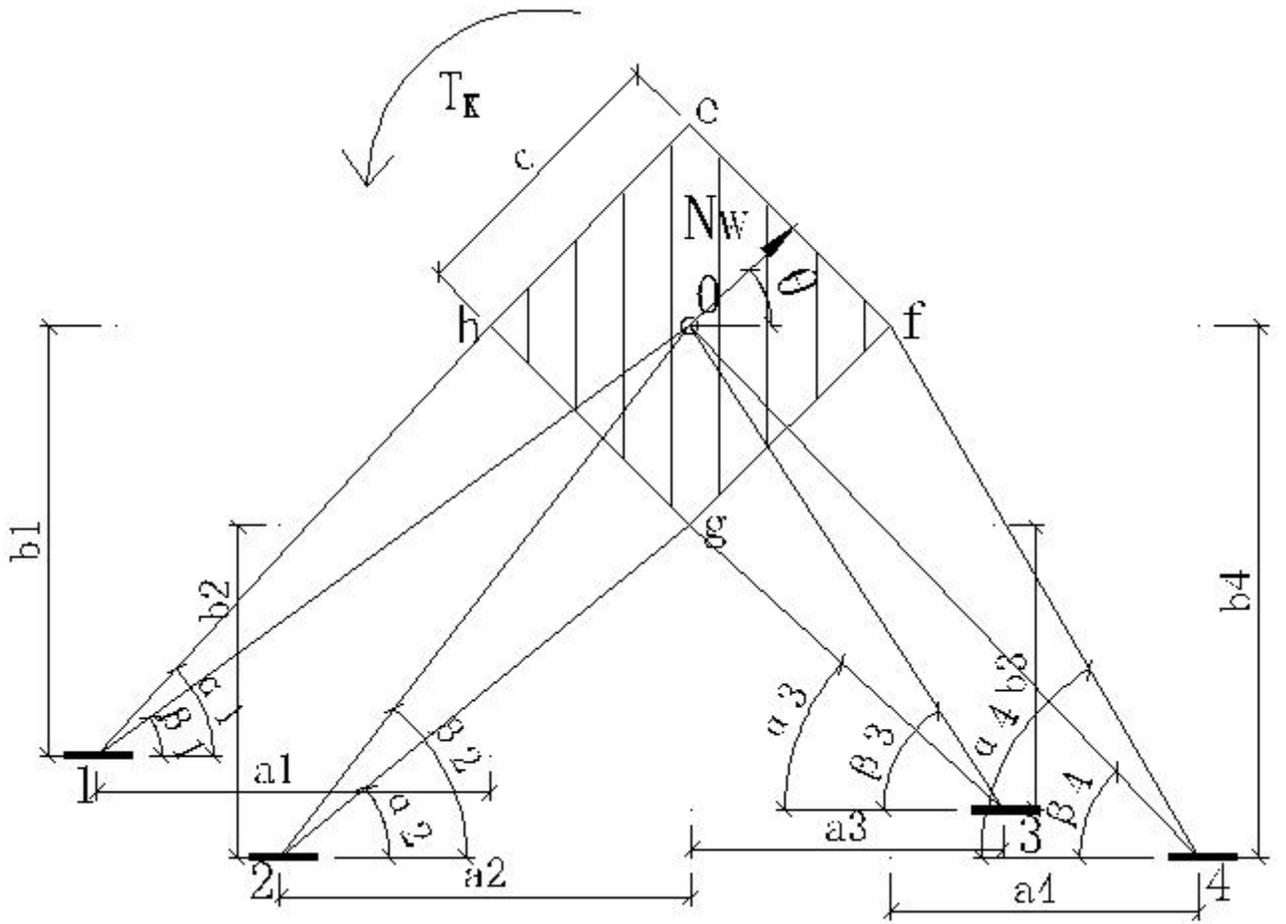
支座反力标准值得： $R_E=138.946\text{kN}$

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。

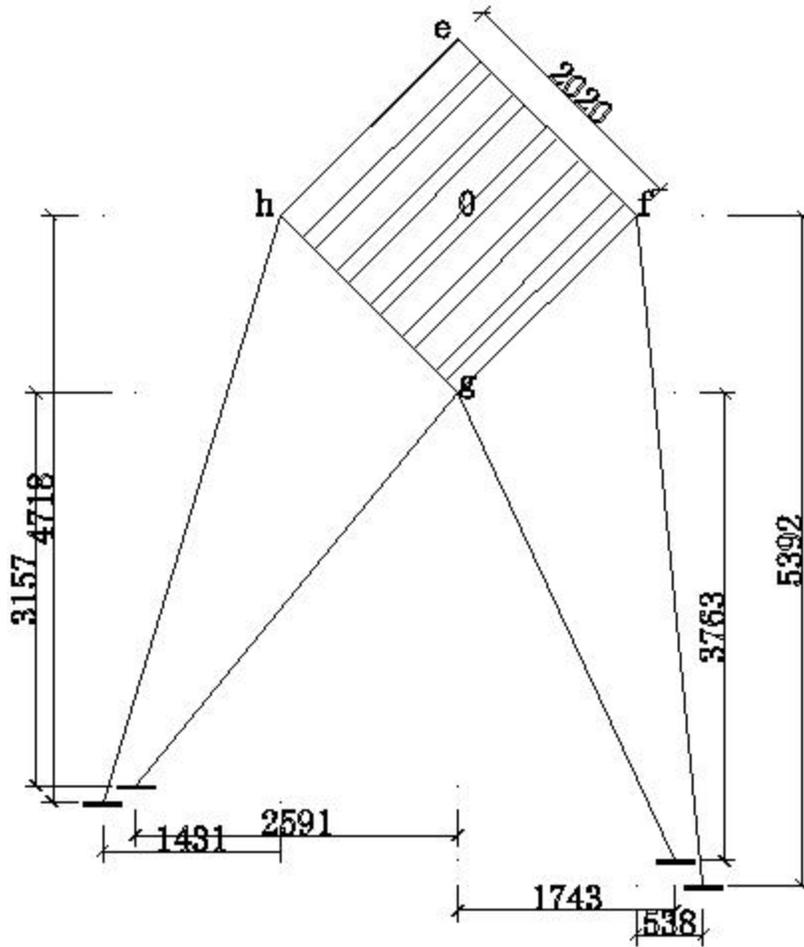
3、附墙杆内力计算

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 $N_w=1.5 \times R_E=208.419\text{kN}$

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 73.127^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 50.624^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 65.147^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 84.302^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 58.782^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 60.531^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 71.441^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 69.964^\circ$$

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：

最大轴压力 $T_1 = 246.812\text{kN}$, $T_2 = 24.079\text{kN}$, $T_3 = 197.626\text{kN}$, $T_4 = 0\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 0\text{kN}$, $T_2 = 283.367\text{kN}$, $T_3 = 291.967\text{kN}$, $T_4 = 288.206\text{kN}$

(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：

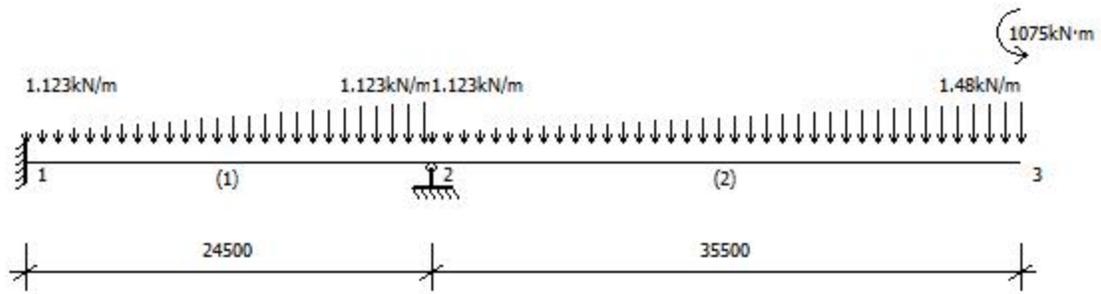
最大轴压力 $T_1 = 0\text{kN}$, $T_2 = 283.367\text{kN}$, $T_3 = 291.967\text{kN}$, $T_4 = 288.206\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 246.812\text{kN}$, $T_2 = 24.08\text{kN}$, $T_3 = 197.626\text{kN}$, $T_4 = 0\text{kN}$

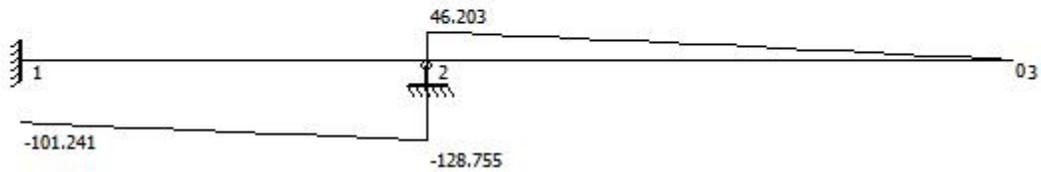
四、非工作状态下附墙杆内力计算

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

支座反力标准值得： $R_E=174.958\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 2 处锚固环的水平内力 $N_w=1.5\times R_E=262.437\text{kN}$ 。

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 $T_1=122.565\text{kN}$ ， $T_2=193.565\text{kN}$ ， $T_3=308.243\text{kN}$ ， $T_4=124.321\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=122.565\text{kN}$ ， $T_2=193.566\text{kN}$ ， $T_3=308.243\text{kN}$ ， $T_4=124.32\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160\times 8$	附墙杆截面面积 $A(\text{mm}^2)$	3820.177
附墙杆截面回转半径 $i(\text{mm})$	53.814	附墙杆强度设计值 $[f](\text{N}/\text{mm}^2)$	205
附墙杆允许长细比 $[\lambda]$	120		

1、杆件轴心受拉强度验算

$$\sigma=N/A=308243/3820.177=80.688\text{N}/\text{mm}^2\leq [f]=205\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、杆件轴心受压强度验算

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_1=L_0/i=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}/i=(1431^2+4718^2)^{0.5}/53.814=91.616\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.61$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_2=L_0/i=(a_2^2+b_2^2)^{0.5}/i=(2591^2+3157^2)^{0.5}/53.814=75.893\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.714$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_3=L_0/i=(a_3^2+b_3^2)^{0.5}/i=(1743^2+3763^2)^{0.5}/53.814=77.063\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.707$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_4=L_0/i=(a_4^2+b_4^2)^{0.5}/i=(538^2+5392^2)^{0.5}/53.814=100.694\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.55$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=246812/(0.61\times3820.177\times205)=0.517\leq1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=283367/(0.714\times3820.177\times205)=0.507\leq1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=308243/(0.707\times3820.177\times205)=0.557\leq1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 A_f)=288206/(0.55 \times 3820.177 \times 205)=0.669 \leq 1$$

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)	10
连接钢板强度等级	Q355	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	10.9 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M20
一个高强螺栓的预拉力 P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目 n _f	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₁ (mm):	115	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	115
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	3
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)	350		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下:

$$F_1=N_1 \sin \alpha_1=246.812 \times \sin 73.127^\circ=236.187 \text{ kN}, V_1=N_1 \cos \alpha_1=246.812 \times \cos 73.127^\circ=71.637 \text{ kN};$$

$$F_2=N_2 \sin \alpha_2=283.367 \times \sin 50.624^\circ=219.042 \text{ kN}, V_2=N_2 \cos \alpha_2=283.367 \times \cos 50.624^\circ=179.771 \text{ kN};$$

$$F_3=N_3 \sin \alpha_3=308.243 \times \sin 65.147^\circ=279.696 \text{ kN}, V_3=N_3 \cos \alpha_3=308.243 \times \cos 65.147^\circ=129.553 \text{ kN};$$

$$F_4=N_4 \sin \alpha_4=288.206 \times \sin 84.302^\circ=286.782 \text{ kN}, V_4=N_4 \cos \alpha_4=288.206 \times \cos 84.302^\circ=28.614 \text{ kN};$$

2、螺栓承载力计算

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

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

(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：

$$T_k=-562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=24^\circ, N_1=246.805\text{kN}, N_2=23.612\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=246.805\times\sin 73.127^\circ+23.612\times\sin 50.624^\circ=254.432\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=246.805\times\cos 73.127^\circ+23.612\times\cos 50.624^\circ=86.615\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|246.805\times\sin 73.127^\circ\times 0.3/2+246.805\times\cos 73.127^\circ\times 0.115-23.612\times\sin 50.624^\circ\times 0.3/2+23.612\times\cos 50.624^\circ\times 0.115|=42.65\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|246.805\times\sin 73.127^\circ\times(0.35+0.3)/2+246.805\times\cos 73.127^\circ\times 0.115+23.612\times\sin 50.624^\circ\times(0.35-0.3)/2+23.612\times\cos 50.624^\circ\times 0.115|=87.176\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 87.176 \times 350 / 306.25 = 99.629\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 254.432 / (2 \times 3) + 99.629 = 142.034\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 86.615 / (2 \times 3) = 14.436\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 14.436 / 143.775 + 142.034 / 284 = 0.601 \leq 1$$

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：

$$T_k=562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=149^\circ, N_3=291.967\text{kN}, N_4=287.879\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=291.967\times\sin 65.147^\circ+287.879\times\sin 84.302^\circ=551.384\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=291.967\times\cos 65.147^\circ+287.879\times\cos 84.302^\circ=151.295\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-291.967\times\sin 65.147^\circ\times 0.3/2+291.967\times\cos 65.147^\circ\times 0.115+287.879\times\sin 84.302^\circ\times 0.3/2+287.879\times\cos 84.302^\circ\times 0.115|=20.628\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断，按照小偏心进行计算

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

$$\sum x_1^2 = 2 \times [175^2 + (175-1 \times 350/2)^2 + (175-2 \times 350/2)^2] = 74861.111\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = (MS_1/2) / \sum x_1^2 = (20.628 \times 350/2) / (74861.111/1000) = 48.222\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 551.384 / (2 \times 3) + 48.222 = 140.119\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

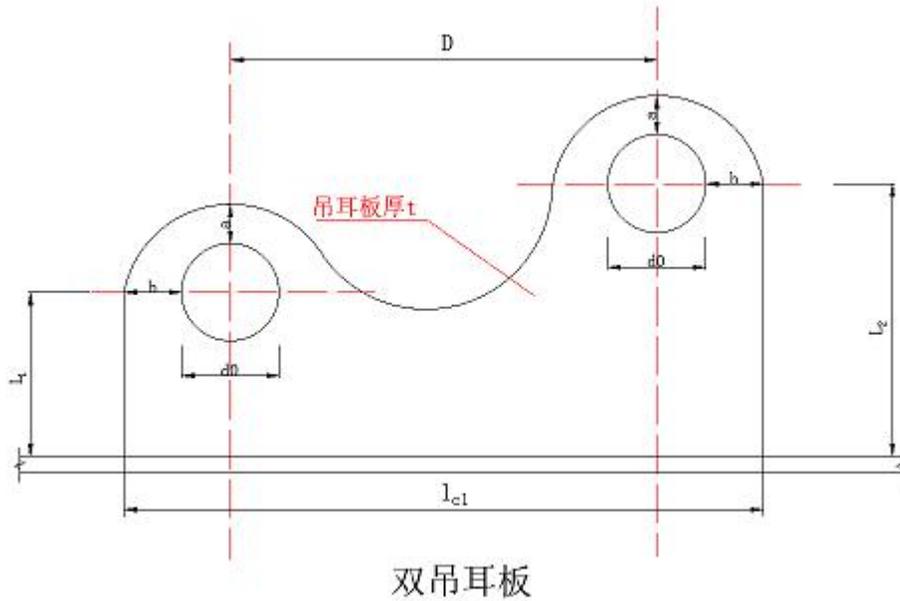
$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 151.295 / (2 \times 3) = 25.216\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 25.216 / 143.775 + 140.119 / 284 = 0.669 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	16	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	55
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	55	吊孔直径 d ₀ (mm)	50
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	295	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	170
连接板耳板排数	2	附墙杆端部耳板排数	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。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 154.121 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 16 + 16 = 48 \text{ mm} \leq b = 55 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0/3) = \min(2 \times 16 + 16, 55 - 50/3) = 38.333 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 154.121 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 38.333) = 125.644 \text{ N/mm}^2 \leq f = 295 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(55+50/2)^2 - (50/2)^2]^{0.5} = 75.993\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 154.121 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 75.993) = 63.378\text{N/mm}^2 \leq f_v = 170\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

(4) 与轴销连接的耳板承压强度验算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	吊耳板承压强度设计值 (N/mm^2)	400
-----------------------	----	------------------------------	-----

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 154.121\text{kN}$$

$$\sigma_c = F / (d_1 t) = 154.121 \times 10^3 / (60 \times 16) = 160.543\text{N/mm}^2 \leq 400\text{N/mm}^2$$

与轴销连接的耳板承压强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	566
-----------------------	----	------------------------------------	-----

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

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 308.243\text{kN}$$

(1) 销轴抗剪强度

根据吊耳板排数可得, 销轴抗剪面数 $n_v = 3$

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 308.243 \times 10^3 / (3 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 36.34\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 566\text{N/mm}^2$$

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 $h_f(\text{mm})$	10
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	200
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	460

(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:

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|254.432|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=20.652\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|86.615|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=7.03\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2\times h_f)^2/6]=(42.65\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=47.207\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V^2]^{0.5}=[\frac{(20.652+47.207)}{1.22}+7.03^2]^{0.5}=56.065\text{N/mm}^2\leq f_f^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|551.384|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=44.755\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|151.295|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=12.28\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2\times h_f)^2/6]=(20.628\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=22.832\text{N/mm}^2$$

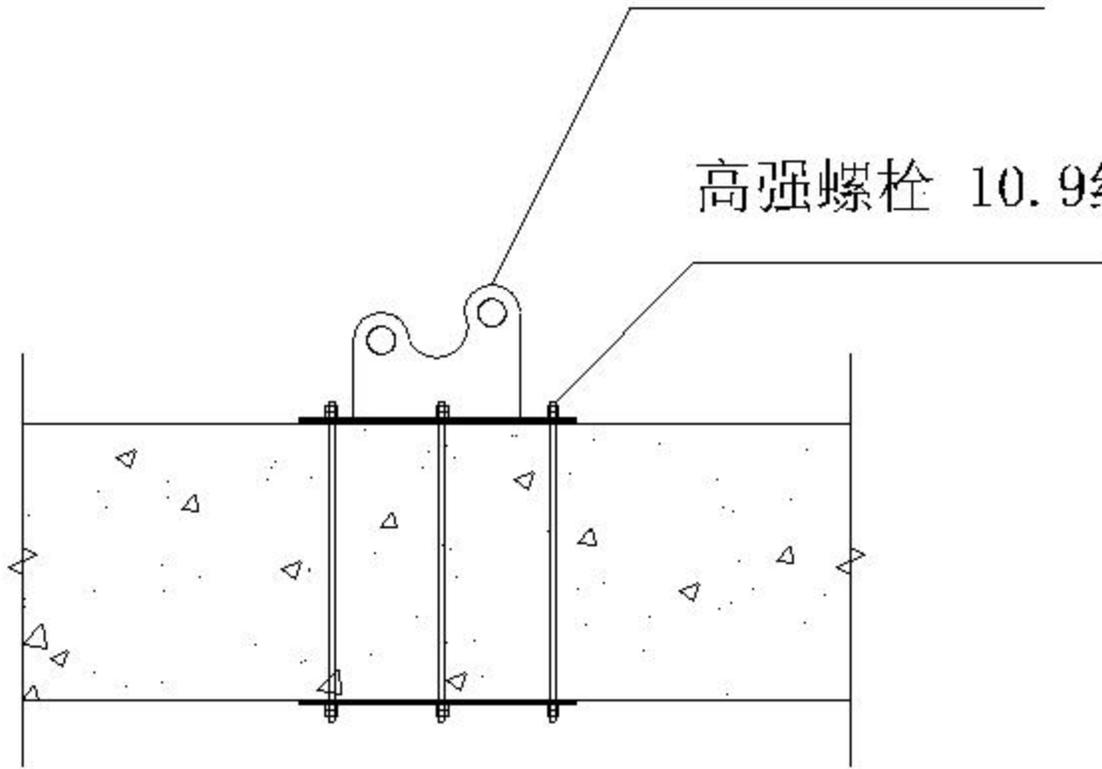
$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V^2]^{0.5}=[\frac{(44.755+22.832)}{1.22}+12.28^2]^{0.5}=56.744\text{N/mm}^2\leq f_f^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

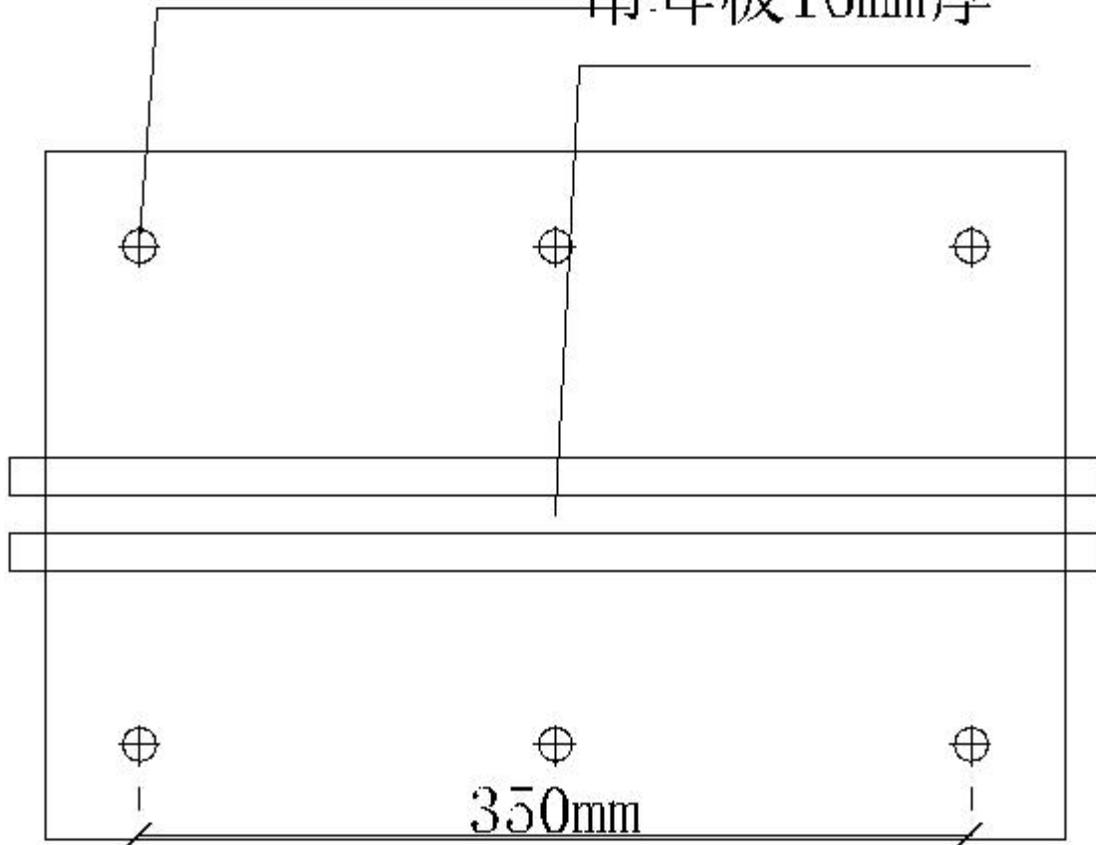
吊耳板16mm厚

高强螺栓 10.9级 M20



塔机附着节点详图-双吊耳板

高强螺栓 10.9级 M20
吊耳板 16mm厚



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

盘龙河 3 号桥 14 墩 XGT6015A-8S 第 2 道附着计 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
- 3、《钢结构通用规范》GB 55006-2021

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT6015A-8S	塔身桁架结构类型	方钢管
塔机计算高度 H(m)	77	塔身宽度 B(m)	1.6
起重臂长度 l ₁ (m)	50.9	荷载确定方式	按构件不平衡自重计算
平衡臂长度 l ₂ (m)	13.06	起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	2.2
工作状态时扭矩标准值 T _{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	375	工作状态不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M _k (kN·m)	1584
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)	1075		

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	钢管	附墙杆钢管规格(mm)	Φ160×8
塔身锚固环边长 C(m)	2.02		

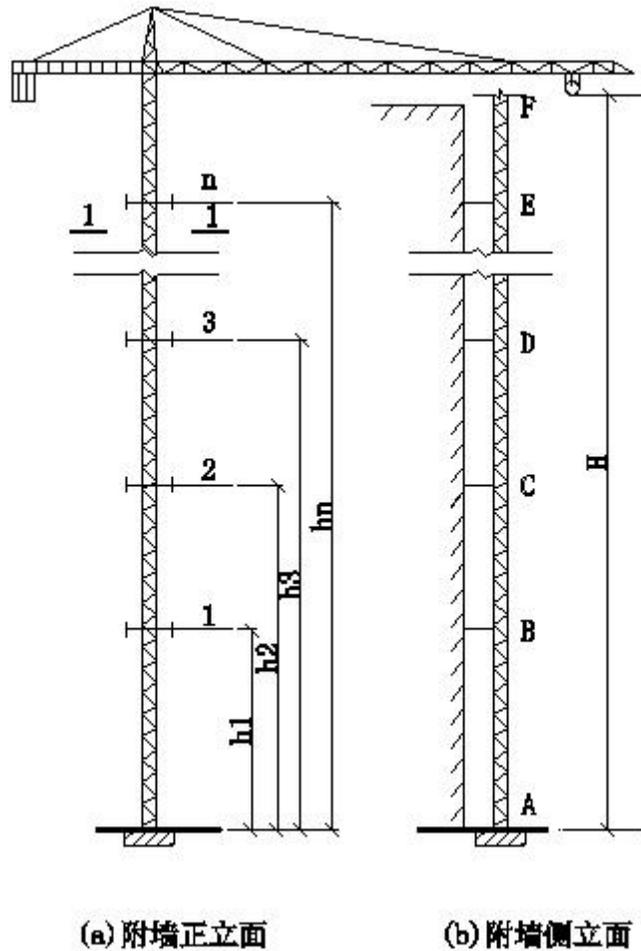
二、风荷载及附着参数

附着次数 N	2		
附着点 1 到塔机的横向距离 a ₁ (m)	1.095	点 1 到塔机的竖向距离 b ₁ (m)	5.044
附着点 2 到塔机的横向距离 a ₂ (m)	2.249	点 2 到塔机的竖向距离 b ₂ (m)	3.495
附着点 3 到塔机的横向距离 a ₃ (m)	1.584	点 3 到塔机的竖向距离 b ₃ (m)	4.342
附着点 4 到塔机的横向距离 a ₄ (m)	0.369	点 4 到塔机的竖向距离 b ₄ (m)	5.855
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)	0.5
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'}	工作状态风压线荷载标准值 q _{sk}	非工作状态风压线荷载标准值 q _{sk'}

第1次附着	24.5	24.5	1.302	1.95	1.95	1.585	1.646	0.433	1.123
第2次附着	42.3	17.8	1.543	1.95	1.95	1.586	1.65	0.513	1.334
悬臂端	77	34.7	1.846	1.95	1.95	1.576	1.652	0.61	1.598

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、扭矩组合值 T_k

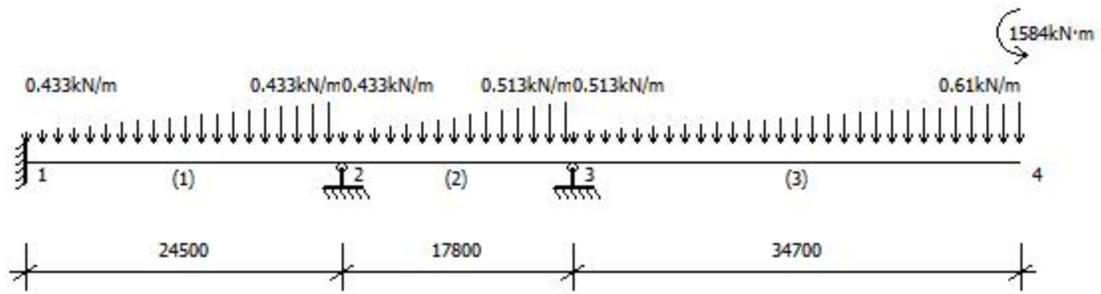
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{ki} = 375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

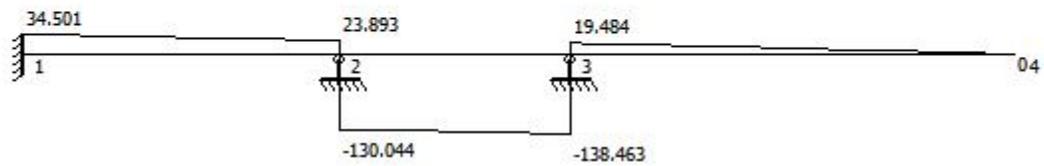
回转惯性力及风荷载产生的扭矩设计值:

$$T_k = 1.5 \times T_{ki} = 562.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

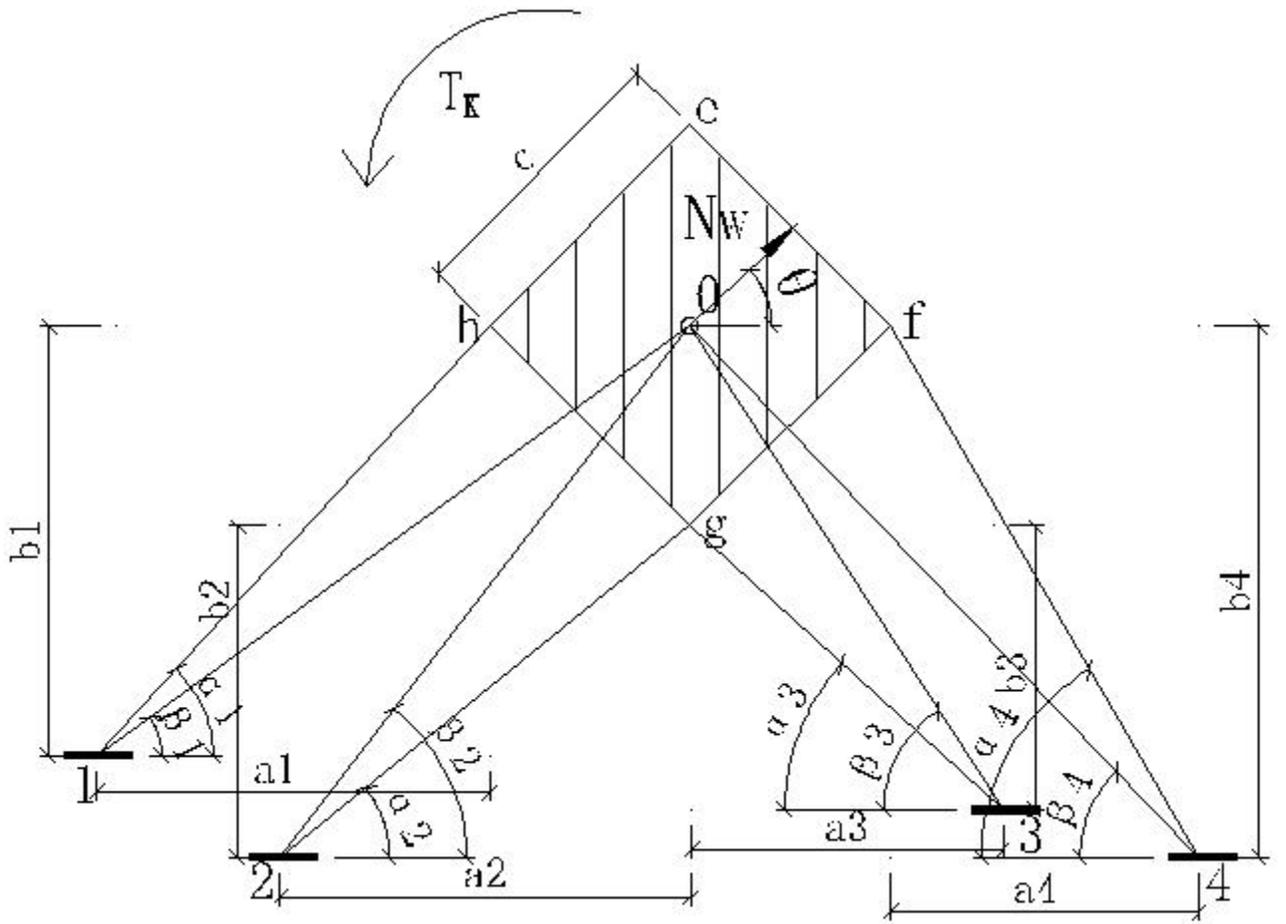
支座反力标准值得： $R_E=157.947\text{kN}$

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。

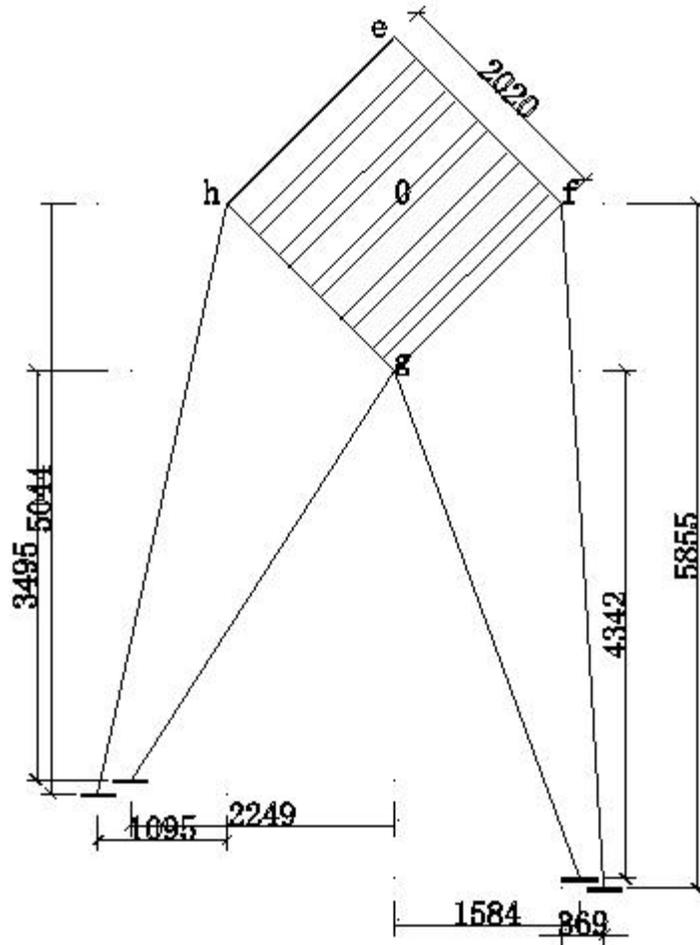
3、附墙杆内力计算

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 $N_w=1.5 \times R_E=236.921\text{kN}$

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 77.752^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 57.239^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 69.958^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 86.394^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 63.423^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 65.449^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 74.65^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 72.935^\circ$$

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：

最大轴压力 $T_1 = 270.565 \text{ kN}$, $T_2 = 95.234 \text{ kN}$, $T_3 = 262.894 \text{ kN}$, $T_4 = 0 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 0 \text{ kN}$, $T_2 = 339.047 \text{ kN}$, $T_3 = 377.158 \text{ kN}$, $T_4 = 309.75 \text{ kN}$

(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：

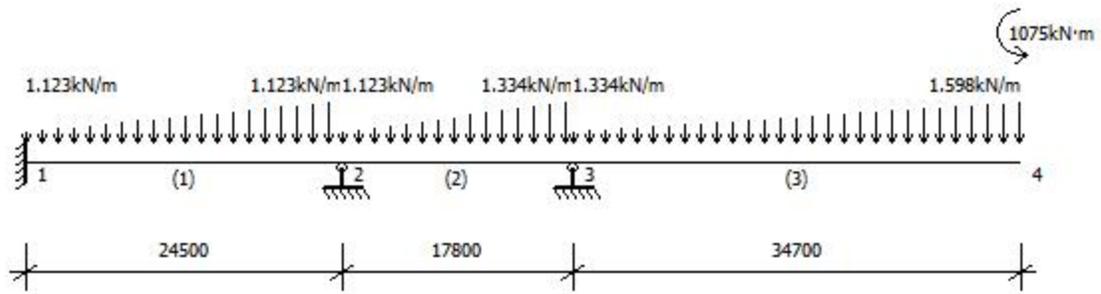
最大轴压力 $T_1 = 0 \text{ kN}$, $T_2 = 339.048 \text{ kN}$, $T_3 = 377.157 \text{ kN}$, $T_4 = 309.75 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 270.564 \text{ kN}$, $T_2 = 95.235 \text{ kN}$, $T_3 = 262.896 \text{ kN}$, $T_4 = 0 \text{ kN}$

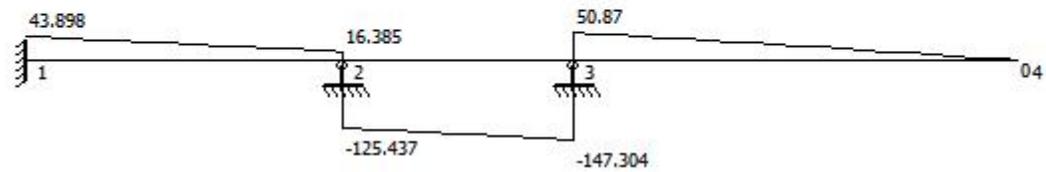
四、非工作状态下附墙杆内力计算

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

支座反力标准值得： $R_E=198.174\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 3 处锚固环的水平内力 $N_w=1.5 \times R_E=297.261\text{kN}$ 。

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 $T_1=138.521\text{kN}$ ， $T_2=272.444\text{kN}$ ， $T_3=401.532\text{kN}$ ， $T_4=148.229\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=138.522\text{kN}$ ， $T_2=272.444\text{kN}$ ， $T_3=401.533\text{kN}$ ， $T_4=148.23\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160 \times 8$	附墙杆截面面积 $A(\text{mm}^2)$	3820.177
附墙杆截面回转半径 $i(\text{mm})$	53.814	附墙杆强度设计值 $[f](\text{N}/\text{mm}^2)$	205
附墙杆允许长细比 $[\lambda]$	120		

1、杆件轴心受拉强度验算

$$\sigma = N/A = 401532/3820.177 = 105.108 \text{N}/\text{mm}^2 \leq [f] = 205 \text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、杆件轴心受压强度验算

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_1=L_0/i=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}/i=(1095^2+5044^2)^{0.5}/53.814=95.913\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.582$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_2=L_0/i=(a_2^2+b_2^2)^{0.5}/i=(2249^2+3495^2)^{0.5}/53.814=77.231\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.706$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_3=L_0/i=(a_3^2+b_3^2)^{0.5}/i=(1584^2+4342^2)^{0.5}/53.814=85.887\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.649$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_4=L_0/i=(a_4^2+b_4^2)^{0.5}/i=(369^2+5855^2)^{0.5}/53.814=109.017\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.499$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=270564/(0.582\times3820.177\times205)=0.594\leq1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=339047/(0.706\times3820.177\times205)=0.613\leq1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=401533/(0.649\times3820.177\times205)=0.79\leq1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 A_f)=309750/(0.499 \times 3820.177 \times 205)=0.793 \leq 1$$

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)	10
连接钢板强度等级	Q355	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	10.9 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M20
一个高强螺栓的预拉力 P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目 n _f	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₁ (mm):	115	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	115
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	3
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)	350		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下:

$$F_1=N_1 \sin \alpha_1=270.564 \times \sin 77.752^\circ=264.405 \text{ kN}, V_1=N_1 \cos \alpha_1=270.564 \times \cos 77.752^\circ=57.4 \text{ kN};$$

$$F_2=N_2 \sin \alpha_2=339.047 \times \sin 57.239^\circ=285.117 \text{ kN}, V_2=N_2 \cos \alpha_2=339.047 \times \cos 57.239^\circ=183.47 \text{ kN};$$

$$F_3=N_3 \sin \alpha_3=401.533 \times \sin 69.958^\circ=377.216 \text{ kN}, V_3=N_3 \cos \alpha_3=401.533 \times \cos 69.958^\circ=137.612 \text{ kN};$$

$$F_4=N_4 \sin \alpha_4=309.75 \times \sin 86.394^\circ=309.137 \text{ kN}, V_4=N_4 \cos \alpha_4=309.75 \times \cos 86.394^\circ=19.483 \text{ kN};$$

2、螺栓承载力计算

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

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

(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：

$$T_k=-562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=20^\circ, N_1=270.492\text{kN}, N_2=95.204\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=270.492\times\sin 77.752^\circ+95.204\times\sin 57.239^\circ=344.395\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=270.492\times\cos 77.752^\circ+95.204\times\cos 57.239^\circ=108.903\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|270.492\times\sin 77.752^\circ\times 0.3/2+270.492\times\cos 77.752^\circ\times 0.115-95.204\times\sin 57.239^\circ\times 0.3/2+95.204\times\cos 57.239^\circ\times 0.115|=40.165\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|270.492\times\sin 77.752^\circ\times(0.35+0.3)/2+270.492\times\cos 77.752^\circ\times 0.115+95.204\times\sin 57.239^\circ\times(0.35-0.3)/2+95.204\times\cos 57.239^\circ\times 0.115|=100.434\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 100.434 \times 350 / 306.25 = 114.782\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 344.395 / (2 \times 3) + 114.782 = 172.181\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 108.903 / (2 \times 3) = 18.15\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 18.15 / 143.775 + 172.181 / 284 = 0.733 \leq 1$$

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：

$$T_k=562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=154^\circ, N_3=377.158\text{kN}, N_4=309.609\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=377.158\times\sin 69.958^\circ+309.609\times\sin 86.394^\circ=663.313\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=377.158\times\cos 69.958^\circ+309.609\times\cos 86.394^\circ=148.732\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-377.158\times\sin 69.958^\circ\times 0.3/2+377.158\times\cos 69.958^\circ\times 0.115+309.609\times\sin 86.394^\circ\times 0.3/2+309.609\times\cos 86.394^\circ\times 0.115|=10.306\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断，按照小偏心进行计算

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

$$\sum x_1^2 = 2 \times [175^2 + (175-1 \times 350/2)^2 + (175-2 \times 350/2)^2] = 74861.111\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = (MS_1/2) / \sum x_1^2 = (10.306 \times 350/2) / (74861.111/1000) = 24.092\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 663.313 / (2 \times 3) + 24.092 = 134.644\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

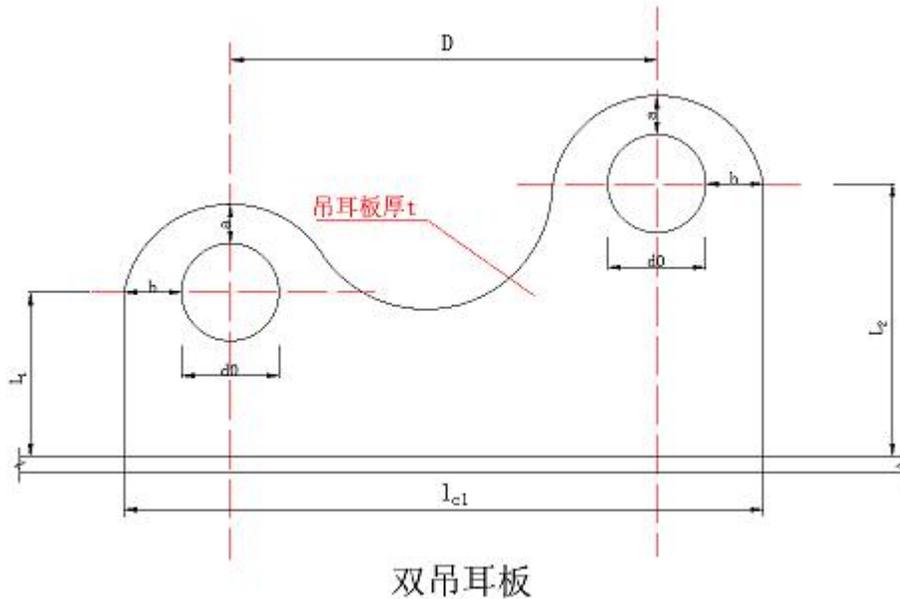
$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 148.732 / (2 \times 3) = 24.789\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 24.789 / 143.775 + 134.644 / 284 = 0.647 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	16	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	55
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	55	吊孔直径 d ₀ (mm)	50
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	295	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	170
连接板耳板排数	2	附墙杆端部耳板排数	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。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 200.767 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 16 + 16 = 48 \text{ mm} \leq b = 55 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0/3) = \min(2 \times 16 + 16, 55 - 50/3) = 38.333 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 200.767 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 38.333) = 163.67 \text{ N/mm}^2 \leq f = 295 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(55+50/2)^2 - (50/2)^2]^{0.5} = 75.993\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 200.767 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 75.993) = 82.56\text{N/mm}^2 \leq f_v = 170\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

(4) 与轴销连接的耳板承压强度验算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	吊耳板承压强度设计值 (N/mm^2)	400
-----------------------	----	------------------------------	-----

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 200.767\text{kN}$$

$$\sigma_c = F / (d_1 t) = 200.767 \times 10^3 / (60 \times 16) = 209.132\text{N/mm}^2 \leq 400\text{N/mm}^2$$

与轴销连接的耳板承压强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	566
-----------------------	----	------------------------------------	-----

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

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 401.533\text{kN}$$

(1) 销轴抗剪强度

根据吊耳板排数可得, 销轴抗剪面数 $n_v = 3$

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 401.533 \times 10^3 / (3 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 47.338\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 566\text{N/mm}^2$$

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 $h_f(\text{mm})$	10
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	200
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	460

(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:

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|344.395|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=27.954\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|108.903|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=8.839\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)^2/6]=(40.165\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=44.456\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V]^2+\tau_V^2)^{0.5}=[\frac{(27.954+44.456)}{1.22}+8.839]^2+8.839^2)^{0.5}=60.007\text{N/mm}^2\leq f_t^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|663.313|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=53.84\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|148.732|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=12.072\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)^2/6]=(10.306\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=11.407\text{N/mm}^2$$

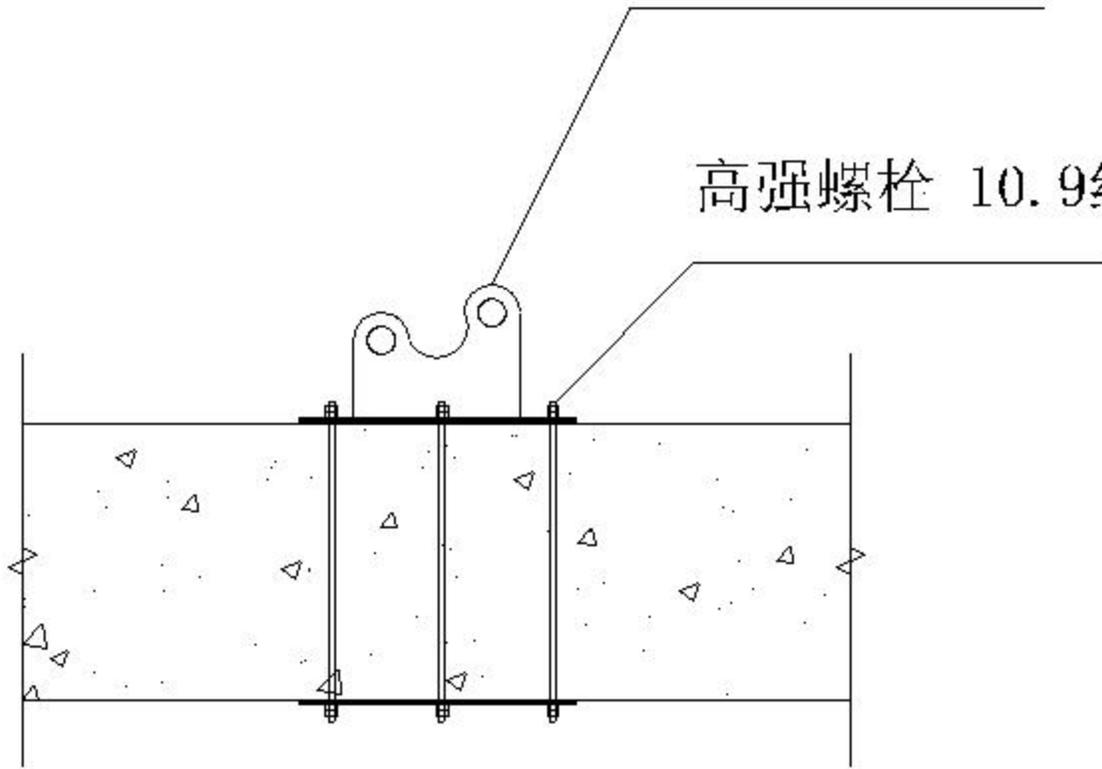
$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V]^2+\tau_V^2)^{0.5}=[\frac{(53.84+11.407)}{1.22}+12.072]^2+12.072^2)^{0.5}=54.827\text{N/mm}^2\leq f_t^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

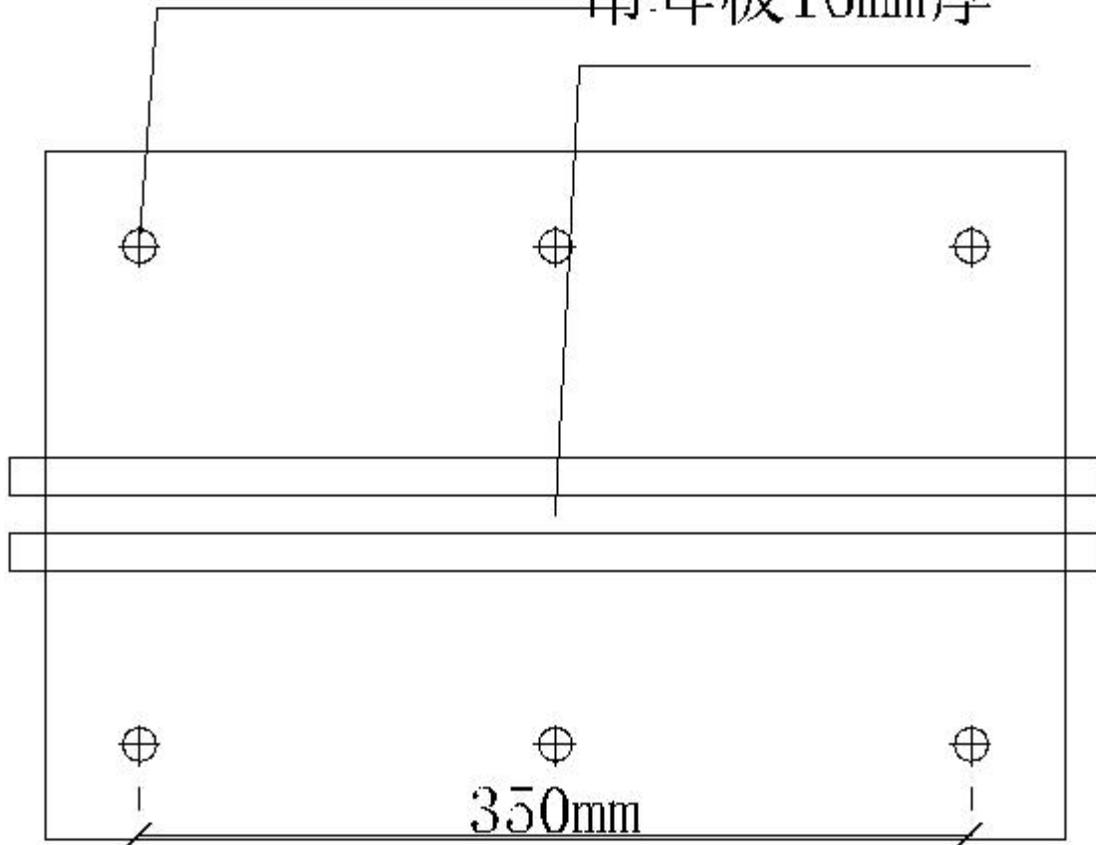
吊耳板16mm厚

高强螺栓 10.9级 M20



塔机附着节点详图-双吊耳板

高强螺栓 10.9级 M20
吊耳板 16mm厚



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

盘龙河 3 号桥 14 墩 XGT6015A-8S 第 3 道附着计 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
- 3、《钢结构通用规范》GB 55006-2021

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT6015A-8S	塔身桁架结构类型	方钢管
塔机计算高度 H(m)	88	塔身宽度 B(m)	1.6
起重臂长度 l_1 (m)	50.9	荷载确定方式	按构件不平衡自重计算
平衡臂长度 l_2 (m)	13.06	起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	2.2
工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	375	工作状态不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	1584
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)	1075		

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	钢管	附墙杆钢管规格(mm)	Φ160×8
塔身锚固环边长 C(m)	2.02		

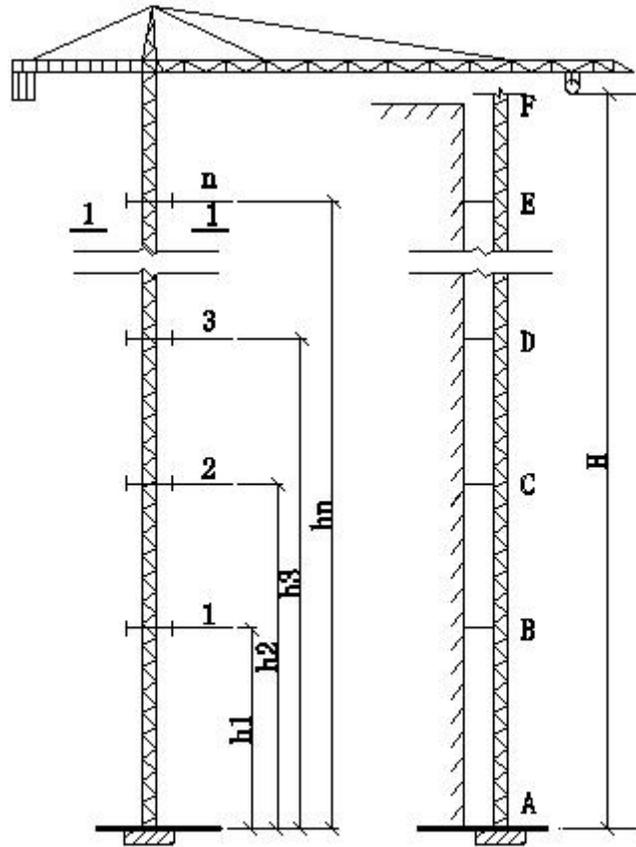
二、风荷载及附着参数

附着次数 N	3		
附着点 1 到塔机的横向距离 a_1 (m)	1.07	点 1 到塔机的竖向距离 b_1 (m)	5.351
附着点 2 到塔机的横向距离 a_2 (m)	2.224	点 2 到塔机的竖向距离 b_2 (m)	3.802
附着点 3 到塔机的横向距离 a_3 (m)	1.363	点 3 到塔机的竖向距离 b_3 (m)	4.435
附着点 4 到塔机的横向距离 a_4 (m)	0.147	点 4 到塔机的竖向距离 b_4 (m)	6.076
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)	0.5
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'	工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}'
---------	-----------------	--------------------	------------------	---------------------	-----------------------	--------------------	----------------------	-----------------------	-------------------------

第1次附着	24.5	24.5	1.302	1.95	1.95	1.585	1.646	0.433	1.123
第2次附着	42.3	17.8	1.543	1.95	1.95	1.586	1.65	0.513	1.334
第3次附着	54.8	12.5	1.663	1.95	1.95	1.587	1.654	0.553	1.442
悬臂端	88	33.2	1.918	1.95	1.95	1.573	1.649	0.633	1.658

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、扭矩组合值 T_k

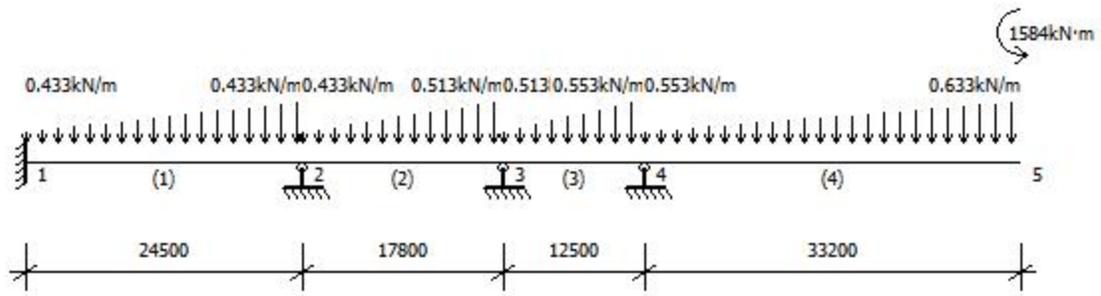
回转惯性力及风荷载产出的扭矩标准值:

$$T_k = T_{k1} = 375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

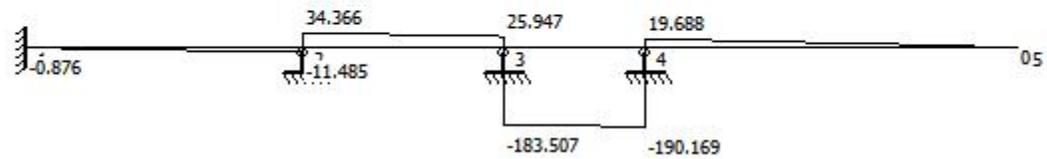
回转惯性力及风荷载产出的扭矩设计值:

$$T_k = 1.5 \times T_{k1} = 562.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

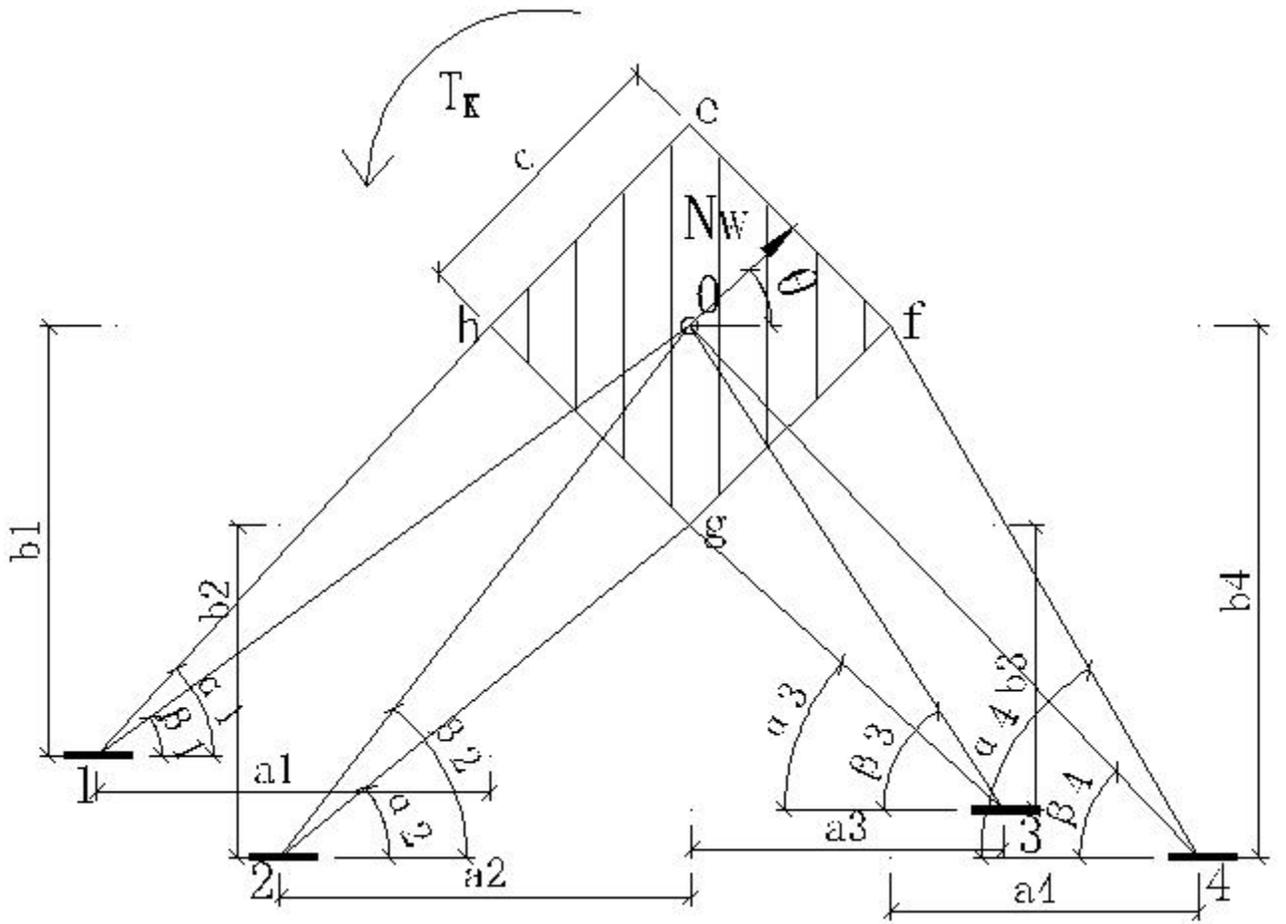
支座反力标准值得： $R_E=209.857\text{kN}$

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。

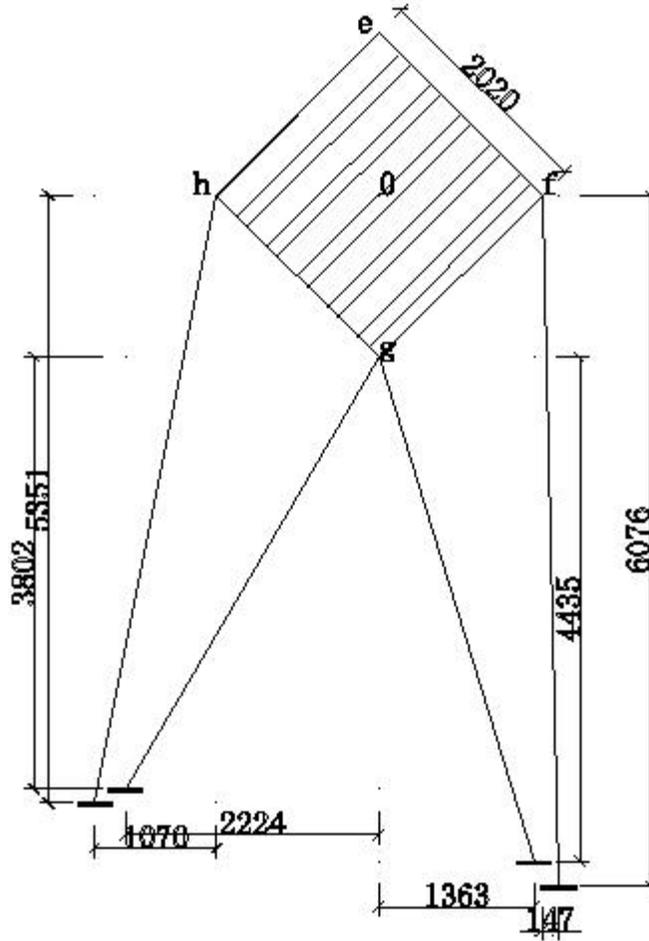
3、附墙杆内力计算

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 $N_w=1.5 \times R_E=314.786\text{kN}$

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 78.692^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 59.674^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 72.916^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 88.614^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 64.972^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 66.964^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 76.913^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 75.465^\circ$$

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：

最大轴压力 $T_1 = 323.577 \text{ kN}$ ， $T_2 = 209.711 \text{ kN}$ ， $T_3 = 404.868 \text{ kN}$ ， $T_4 = 0 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 0 \text{ kN}$ ， $T_2 = 435.018 \text{ kN}$ ， $T_3 = 442.364 \text{ kN}$ ， $T_4 = 341.473 \text{ kN}$

(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：

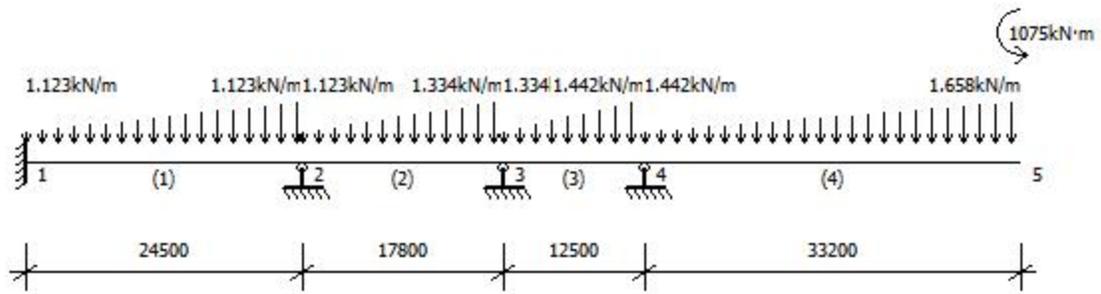
最大轴压力 $T_1 = 0 \text{ kN}$ ， $T_2 = 435.019 \text{ kN}$ ， $T_3 = 442.363 \text{ kN}$ ， $T_4 = 341.474 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 323.576 \text{ kN}$ ， $T_2 = 209.711 \text{ kN}$ ， $T_3 = 404.868 \text{ kN}$ ， $T_4 = 0 \text{ kN}$

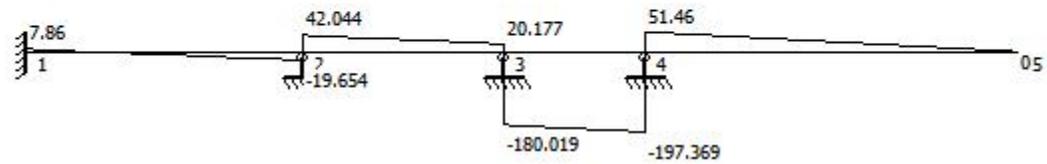
四、非工作状态下附墙杆内力计算

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

支座反力标准值得： $R_E=248.829\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 4 处锚固环的水平内力 $N_w=1.5 \times R_E=373.244\text{kN}$ 。

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 $T_1=187.353\text{kN}$ ， $T_2=382.231\text{kN}$ ， $T_3=461.57\text{kN}$ ， $T_4=174.485\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=187.352\text{kN}$ ， $T_2=382.231\text{kN}$ ， $T_3=461.57\text{kN}$ ， $T_4=174.486\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160 \times 8$	附墙杆截面面积 $A(\text{mm}^2)$	3820.177
附墙杆截面回转半径 $i(\text{mm})$	53.814	附墙杆强度设计值 $[f](\text{N}/\text{mm}^2)$	205
附墙杆允许长细比 $[\lambda]$	120		

1、杆件轴心受拉强度验算

$$\sigma = N/A = 461570/3820.177 = 120.821 \text{N}/\text{mm}^2 \leq [f] = 205 \text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、杆件轴心受压强度验算

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_1=L_0/i=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}/i=(1070^2+5351^2)^{0.5}/53.814=101.404\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.546$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_2=L_0/i=(a_2^2+b_2^2)^{0.5}/i=(2224^2+3802^2)^{0.5}/53.814=81.85\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.676$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_3=L_0/i=(a_3^2+b_3^2)^{0.5}/i=(1363^2+4435^2)^{0.5}/53.814=86.218\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.646$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_4=L_0/i=(a_4^2+b_4^2)^{0.5}/i=(147^2+6076^2)^{0.5}/53.814=112.94\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.476$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=323576/(0.546\times 3820.177\times 205)=0.757\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=435018/(0.676\times 3820.177\times 205)=0.822\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=461570/(0.646\times 3820.177\times 205)=0.912\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算：

$$N_4/(\varphi_4 A_f)=341473/(0.476 \times 3820.177 \times 205)=0.916 \leq 1$$

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)	10
连接钢板强度等级	Q355	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	10.9 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M20
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):	115	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	115
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	3
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)	350		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下：

$$F_1=N_1 \sin \alpha_1=323.576 \times \sin 78.692^\circ=317.295 \text{ kN}, V_1=N_1 \cos \alpha_1=323.576 \times \cos 78.692^\circ=63.447 \text{ kN};$$

$$F_2=N_2 \sin \alpha_2=435.018 \times \sin 59.674^\circ=375.494 \text{ kN}, V_2=N_2 \cos \alpha_2=435.018 \times \cos 59.674^\circ=219.647 \text{ kN};$$

$$F_3=N_3 \sin \alpha_3=561.57 \times \sin 72.916^\circ=536.792 \text{ kN}, V_3=N_3 \cos \alpha_3=561.57 \times \cos 72.916^\circ=164.971 \text{ kN};$$

$$F_4=N_4 \sin \alpha_4=341.473 \times \sin 88.614^\circ=341.373 \text{ kN}, V_4=N_4 \cos \alpha_4=341.473 \times \cos 88.614^\circ=8.259 \text{ kN};$$

2、螺栓承载力计算

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

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

(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:

$$T_k=-562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=16^\circ, N_1=323.417\text{kN}, N_2=209.658\text{kN}$$

轴向拉力合力为:

$$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=323.417\times\sin 78.692^\circ+209.658\times\sin 59.674^\circ=498.109\text{kN}$$

水平向剪力合力为:

$$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=323.417\times\cos 78.692^\circ+209.658\times\cos 59.674^\circ=169.275\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩:

$$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|323.417\times\sin 78.692^\circ\times 0.3/2+323.417\times\cos 78.692^\circ\times 0.115-209.658\times\sin 59.674^\circ\times 0.3/2+209.658\times\cos 59.674^\circ\times 0.115|=39.892\text{kN}\cdot\text{m}$$

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:

$$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|323.417\times\sin 78.692^\circ\times(0.35+0.3)/2+323.417\times\cos 78.692^\circ\times 0.115+209.658\times\sin 59.674^\circ\times(0.35-0.3)/2+209.658\times\cos 59.674^\circ\times 0.115|=127.061\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力:

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 127.061 \times 350 / 306.25 = 145.213\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力:

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 498.109 / (2 \times 3) + 145.213 = 228.231\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力:

$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 169.275 / (2 \times 3) = 28.213\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b+N_t/N_t^b=28.213/143.775+228.231/284=1\leq 1$$

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：

$$T_k=0\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=155^\circ, N_3=561.488\text{kN}, N_4=174.396\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=561.488\times\sin 72.916^\circ+174.396\times\sin 88.614^\circ=711.058\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=561.488\times\cos 72.916^\circ+174.396\times\cos 88.614^\circ=169.165\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-561.488\times\sin 72.916^\circ\times 0.3/2+561.488\times\cos 72.916^\circ\times 0.115+174.396\times\sin 88.614^\circ\times 0.3/2+174.396\times\cos 88.614^\circ\times 0.115|=34.901\text{kN}\cdot\text{m}$$

经分析判断，按照小偏心进行计算

$$\sum X_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} m_1 [S_1 / 2 - (i - 1)S_1 / (n_1 - 1)]^2$$

$$\sum X_1^2 = 2 \times [175^2 + (175 - 1 \times 350/2)^2 + (175 - 2 \times 350/2)^2] = 74861.111\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = (MS_1/2)/\sum X_1^2 = (34.901 \times 350/2)/(74861.111/1000) = 81.587\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F/(m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 711.058/(2 \times 3) + 81.587 = 200.097\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

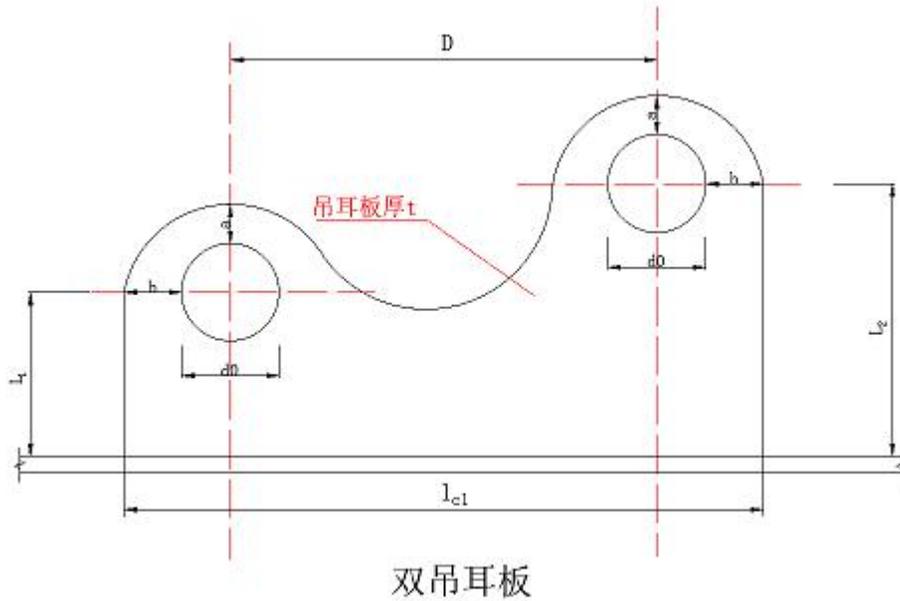
$$N_v = |V|/(m_1 n_1) = 169.165/(2 \times 3) = 28.194\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b + N_t/N_t^b = 28.194/143.775 + 200.097/284 = 0.901 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	16	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	55
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	55	吊孔直径 d ₀ (mm)	50
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	295	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	170
连接板耳板排数	2	附墙杆端部耳板排数	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。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 280.785 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 16 + 16 = 48 \text{ mm} \leq b = 55 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t + 16, b - d_0/3) = \min(2 \times 16 + 16, 55 - 50/3) = 38.333 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 280.785 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 38.333) = 228.903 \text{ N/mm}^2 \leq f = 295 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(55+50/2)^2 - (50/2)^2]^{0.5} = 75.993\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 280.785 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 75.993) = 115.465\text{N/mm}^2 \leq f_v = 170\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

(4) 与轴销连接的耳板承压强度验算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	吊耳板承压强度设计值 (N/mm^2)	400
-----------------------	----	------------------------------	-----

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 280.785\text{kN}$$

$$\sigma_c = F / (d_1 t) = 280.785 \times 10^3 / (60 \times 16) = 292.484\text{N/mm}^2 \leq 400\text{N/mm}^2$$

与轴销连接的耳板承压强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	566
-----------------------	----	------------------------------------	-----

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

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 561.57\text{kN}$$

(1) 销轴抗剪强度

根据吊耳板排数可得, 销轴抗剪面数 $n_v = 3$

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 561.57 \times 10^3 / (3 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 66.205\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 566\text{N/mm}^2$$

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 $h_f(\text{mm})$	10
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_f^w(\text{N/mm}^2)$	200
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	460

(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:

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|498.109|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=40.431\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|169.275|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=13.74\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)^2/6]=(39.892\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=44.154\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V]^2]^0.5=[\frac{(40.431+44.154)}{1.22}+13.74]^2]^0.5=70.681\text{N/mm}^2\leq f_t^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|711.058|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=57.716\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|169.165|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=13.731\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)^2/6]=(34.901\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=38.63\text{N/mm}^2$$

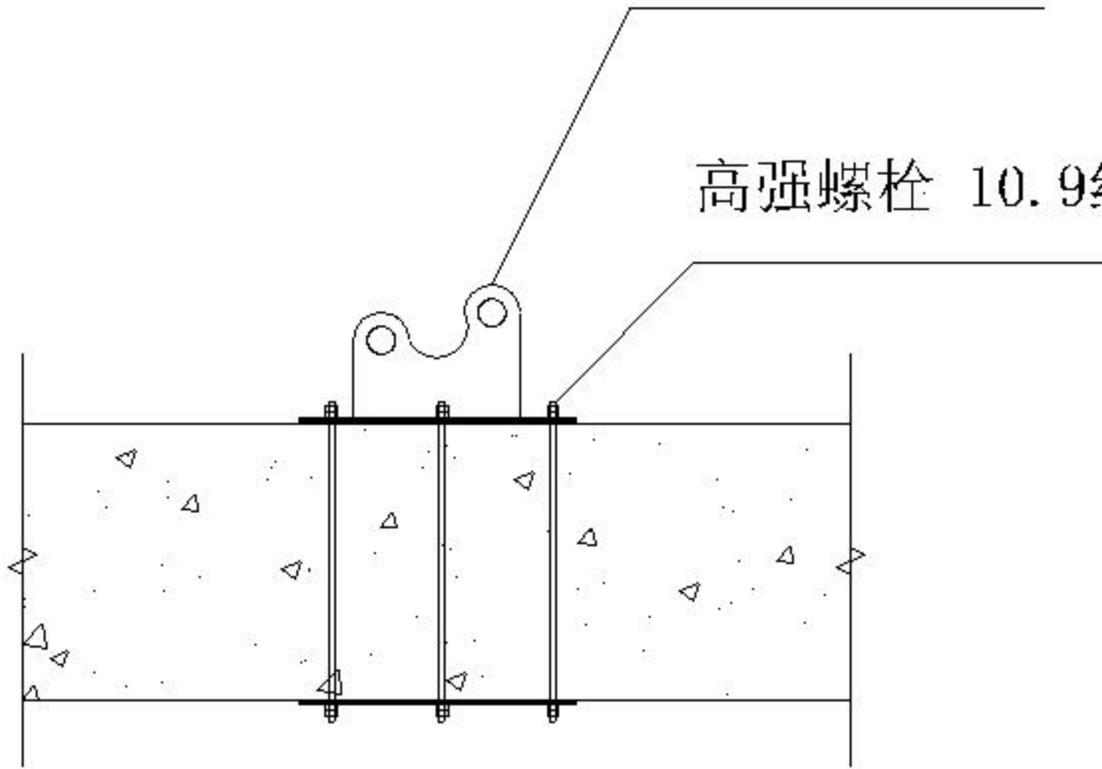
$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V]^2]^0.5=[\frac{(57.716+38.63)}{1.22}+13.731]^2]^0.5=80.157\text{N/mm}^2\leq f_t^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

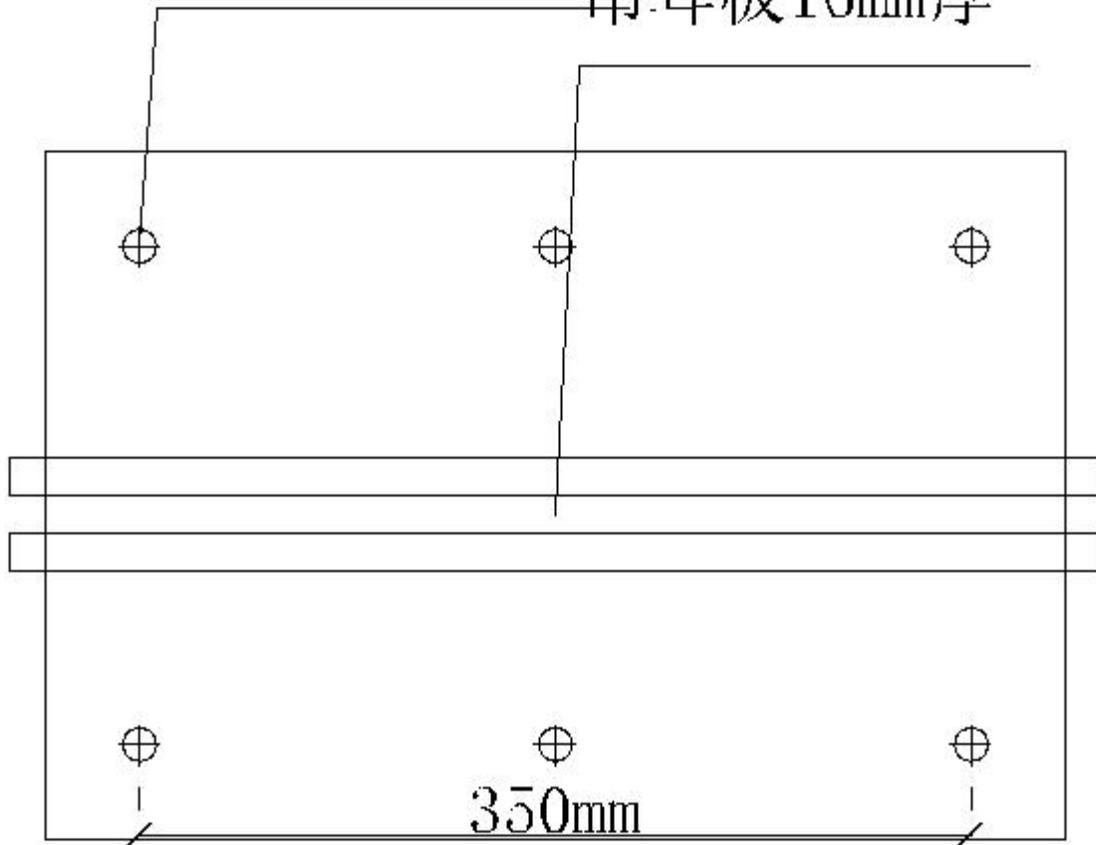
吊耳板16mm厚

高强螺栓 10.9级 M20



塔机附着节点详图-双吊耳板

高强螺栓 10.9级 M20
吊耳板 16mm厚



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

盘龙河 3 号桥 15 墩 XGT6015A-8S 第 1 道附着计 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
- 3、《钢结构通用规范》GB 55006-2021

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT6015A-8S	塔身桁架结构类型	方钢管
塔机计算高度 H(m)	54	塔身宽度 B(m)	1.6
起重臂长度 l_1 (m)	50.9	荷载确定方式	按构件不平衡自重计算
平衡臂长度 l_2 (m)	13.06	起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	2.2
工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	375	工作状态不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	1584
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)	1075		

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	钢管	附墙杆钢管规格(mm)	Φ160×8
塔身锚固环边长 C(m)	2.02		

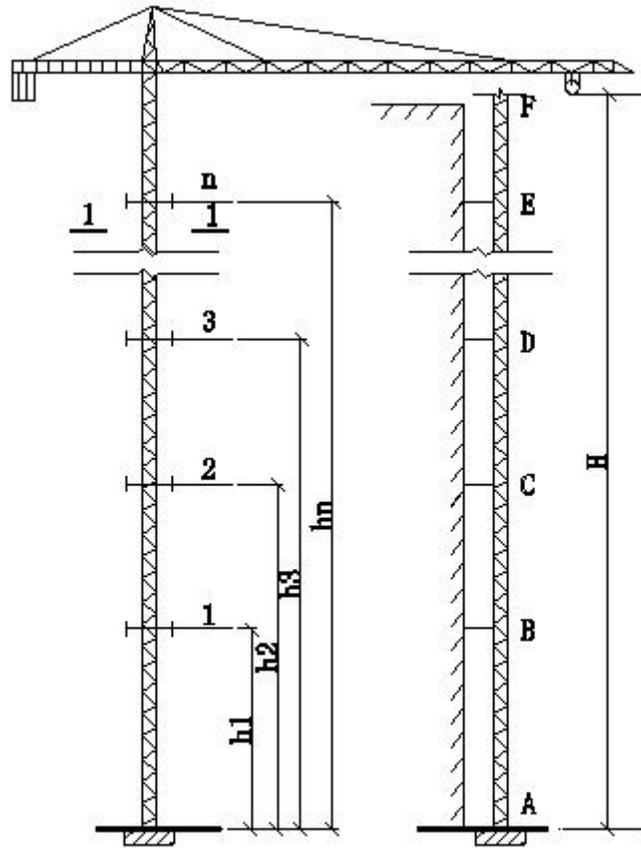
二、风荷载及附着参数

附着次数 N	1		
附着点 1 到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.415	点 1 到塔机的竖向距离 b_1 (m)	5.076
附着点 2 到塔机的横向距离 a_2 (m)	1.607	点 2 到塔机的竖向距离 b_2 (m)	3.463
附着点 3 到塔机的横向距离 a_3 (m)	2.403	点 3 到塔机的竖向距离 b_3 (m)	2.914
附着点 4 到塔机的横向距离 a_4 (m)	1.252	点 4 到塔机的竖向距离 b_4 (m)	4.457
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)	0.5
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'	工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}'

第1次附着	18.4	18.4	1.198	1.95	1.95	1.587	1.637	0.399	1.028
悬臂端	54	35.6	1.656	1.95	1.95	1.588	1.655	0.551	1.437

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、扭矩组合值 T_k

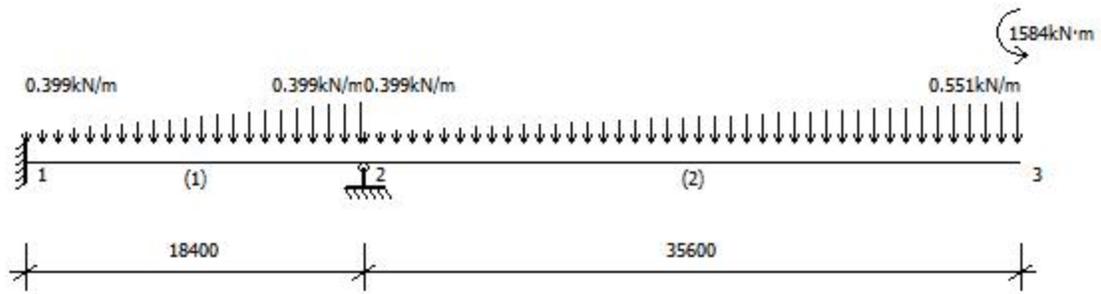
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{k1} = 375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

回转惯性力及风荷载产生的扭矩设计值:

$$T_k = 1.5 \times T_{k1} = 562.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

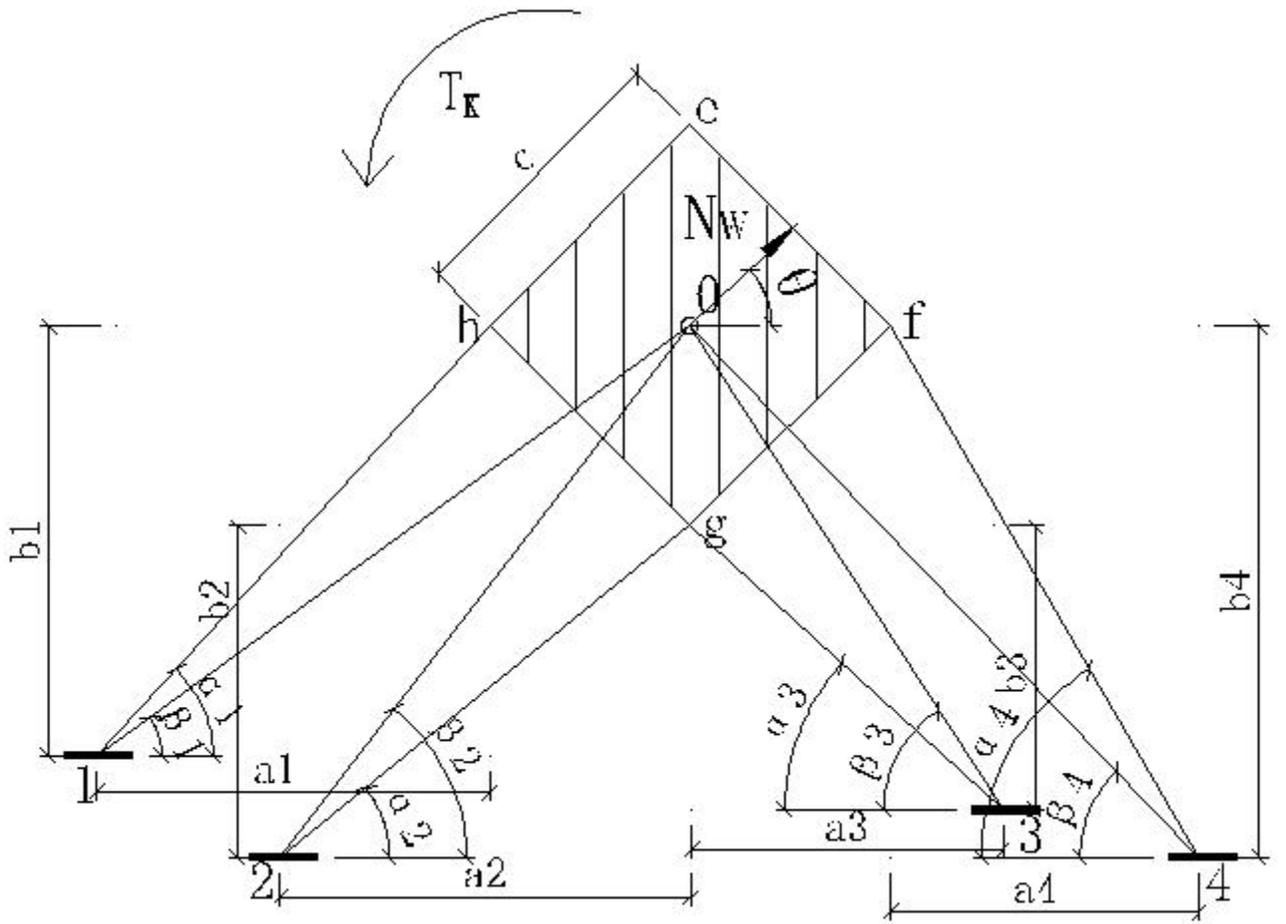
支座反力标准值得： $R_E=174.706\text{kN}$

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。

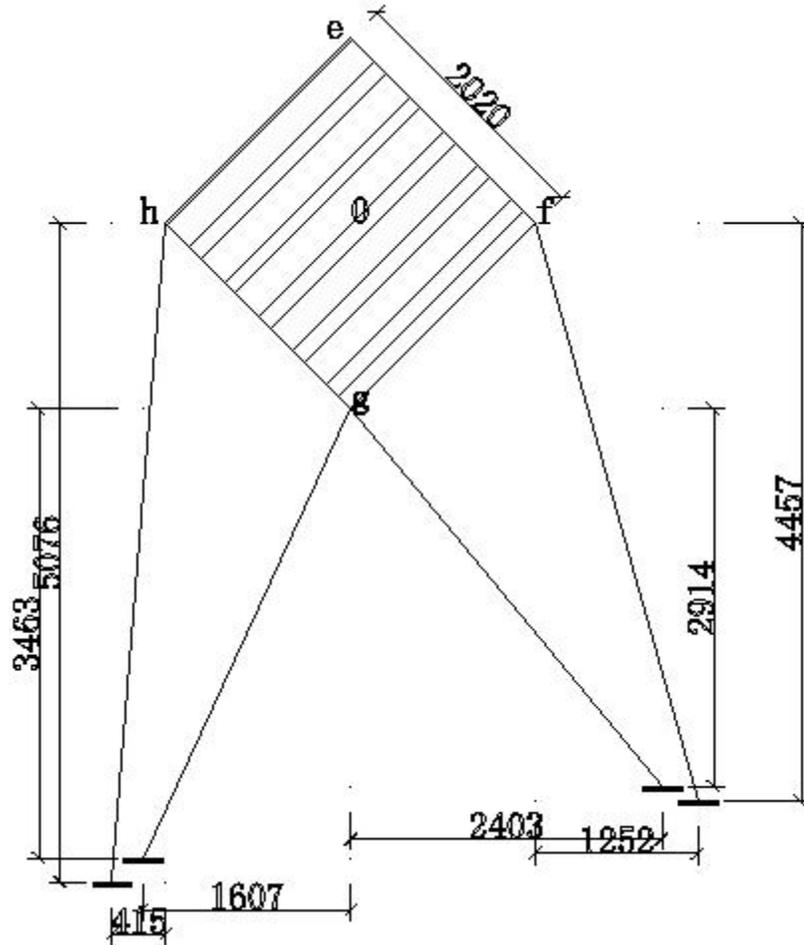
3、附墙杆内力计算

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 $N_w=1.5 \times R_E=262.059\text{kN}$

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 85.326^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 65.106^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 50.49^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 74.31^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 70.041^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 71.813^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 61.04^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 58.978^\circ$$

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：

$$\text{最大轴压力 } T_1 = 208.008 \text{ kN}, \quad T_2 = 62.395 \text{ kN}, \quad T_3 = 275.71 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 344.292 \text{ kN}, \quad T_3 = 249.015 \text{ kN}, \quad T_4 = 379.459 \text{ kN}$$

(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：

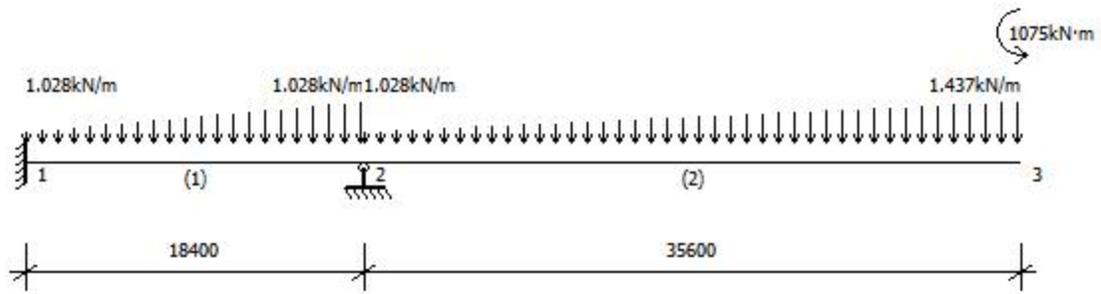
$$\text{最大轴压力 } T_1 = 0 \text{ kN}, \quad T_2 = 344.294 \text{ kN}, \quad T_3 = 249.015 \text{ kN}, \quad T_4 = 379.459 \text{ kN}$$

$$\text{最大轴拉力 } T_1 = 208.008 \text{ kN}, \quad T_2 = 62.393 \text{ kN}, \quad T_3 = 275.71 \text{ kN}, \quad T_4 = 0 \text{ kN}$$

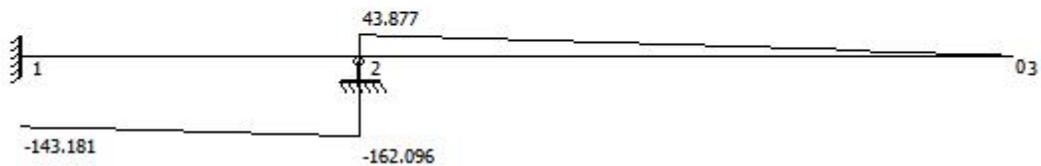
四、非工作状态下附墙杆内力计算

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

支座反力标准值得： $R_E=205.973\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 2 处锚固环的水平内力 $N_w=1.5 \times R_E=308.96\text{kN}$ 。

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 $T_1=106.41\text{kN}$ ， $T_2=239.736\text{kN}$ ， $T_3=309.318\text{kN}$ ， $T_4=192.296\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=106.41\text{kN}$ ， $T_2=239.736\text{kN}$ ， $T_3=309.317\text{kN}$ ， $T_4=192.296\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160 \times 8$	附墙杆截面面积 $A(\text{mm}^2)$	3820.177
附墙杆截面回转半径 $i(\text{mm})$	53.814	附墙杆强度设计值 $[f](\text{N}/\text{mm}^2)$	205
附墙杆允许长细比 $[\lambda]$	120		

1、杆件轴心受拉强度验算

$$\sigma = N/A = 379459/3820.177 = 99.33 \text{ N}/\text{mm}^2 \leq [f] = 205 \text{ N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、杆件轴心受压强度验算

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_1=L_0/i=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}/i=(415^2+5076^2)^{0.5}/53.814=94.64\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.59$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_2=L_0/i=(a_2^2+b_2^2)^{0.5}/i=(1607^2+3463^2)^{0.5}/53.814=70.942\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.745$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_3=L_0/i=(a_3^2+b_3^2)^{0.5}/i=(2403^2+2914^2)^{0.5}/53.814=70.186\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.75$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_4=L_0/i=(a_4^2+b_4^2)^{0.5}/i=(1252^2+4457^2)^{0.5}/53.814=86.028\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.648$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=208008/(0.59\times 3820.177\times 205)=0.45\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=344292/(0.745\times 3820.177\times 205)=0.59\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=309317/(0.75\times 3820.177\times 205)=0.527\leq 1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4Af)=379459/(0.648\times 3820.177\times 205)=0.748\leq 1$$

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)	10
连接钢板强度等级	Q355	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	10.9 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M20
一个高强螺栓的预拉力 P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目 n _f	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₁ (mm):	115	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	115
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	3
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)	350		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下:

$$F_1 = N_1 \sin \alpha_1 = 208.008 \times \sin 85.326^\circ = 207.316 \text{ kN}, V_1 = N_1 \cos \alpha_1 = 208.008 \times \cos 85.326^\circ = 16.95 \text{ kN};$$

$$F_2 = N_2 \sin \alpha_2 = 344.292 \times \sin 65.106^\circ = 312.304 \text{ kN}, V_2 = N_2 \cos \alpha_2 = 344.292 \times \cos 65.106^\circ = 144.924 \text{ kN};$$

$$F_3 = N_3 \sin \alpha_3 = 309.317 \times \sin 50.49^\circ = 238.641 \text{ kN}, V_3 = N_3 \cos \alpha_3 = 309.317 \times \cos 50.49^\circ = 196.793 \text{ kN};$$

$$F_4 = N_4 \sin \alpha_4 = 379.459 \times \sin 74.31^\circ = 365.319 \text{ kN}, V_4 = N_4 \cos \alpha_4 = 379.459 \times \cos 74.31^\circ = 102.621 \text{ kN};$$

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：

$$T_k=-562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=42^\circ, N_1=208.008\text{kN}, N_2=61.427\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=208.008\times\sin 85.326^\circ+61.427\times\sin 65.106^\circ=263.036\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=208.008\times\cos 85.326^\circ+61.427\times\cos 65.106^\circ=42.806\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|208.008\times\sin 85.326^\circ\times 0.3/2+208.008\times\cos 85.326^\circ\times 0.115-61.427\times\sin 65.106^\circ\times 0.3/2+61.427\times\cos 65.106^\circ\times 0.115|=27.662\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|208.008\times\sin 85.326^\circ\times(0.35+0.3)/2+208.008\times\cos 85.326^\circ\times 0.115+61.427\times\sin 65.106^\circ\times(0.35-0.3)/2+61.427\times\cos 65.106^\circ\times 0.115|=73.694\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 73.694 \times 350 / 306.25 = 84.221\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 263.036 / (2 \times 3) + 84.221 = 128.06\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = V / (m_1 n_1) = 42.806 / (2 \times 3) = 7.134\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 7.134 / 143.775 + 128.06 / 284 = 0.501 \leq 1$$

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：

$$T_k=562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=160^\circ, N_3=248.957\text{kN}, N_4=379.436\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=248.957\times\sin 50.49^\circ+379.436\times\sin 74.31^\circ=557.37\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=248.957\times\cos 50.49^\circ+379.436\times\cos 74.31^\circ=261.005\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-248.957\times\sin 50.49^\circ\times 0.3/2+248.957\times\cos 50.49^\circ\times 0.115+379.436\times\sin 74.31^\circ\times 0.3/2+379.436\times\cos 74.31^\circ\times 0.115|=55.999\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|248.957\times\sin 50.49^\circ\times(0.35-0.3)/2+248.957\times\cos 50.49^\circ\times 0.115+379.436\times\sin 74.31^\circ\times(0.35+0.3)/2+379.436\times\cos 74.31^\circ\times 0.115|=153.539\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\Sigma y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \Sigma y_1^2 = 153.539 \times 350 / 306.25 = 75.473\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 557.37 / (2 \times 3) + 75.473 = 168.368\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

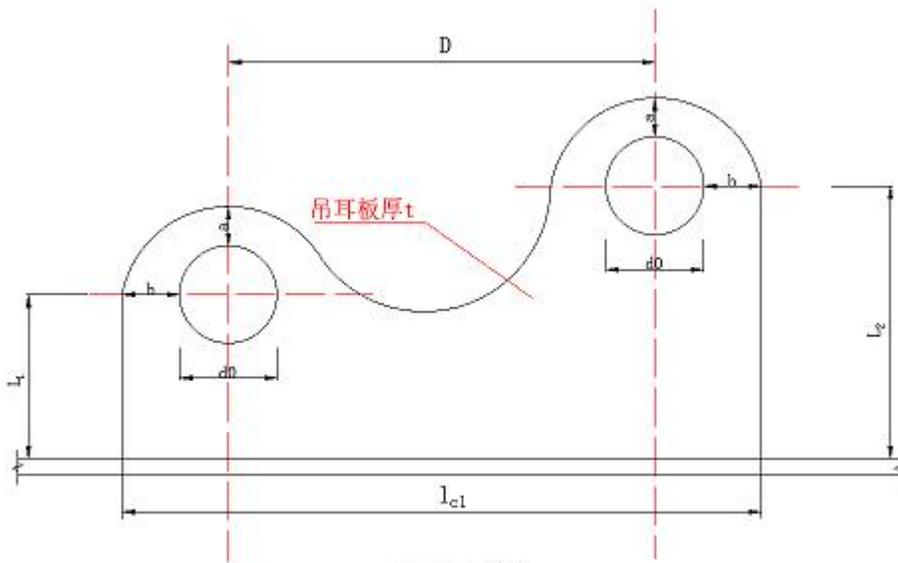
$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 261.005 / (2 \times 3) = 43.501\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 43.501 / 143.775 + 168.368 / 284 = 0.895 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	16	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	55
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	55	吊孔直径 d ₀ (mm)	50
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	295	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	170
连接板耳板排数	2	附墙杆端部耳板排数	2



双吊耳板

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。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 189.73 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 16 + 16 = 48 \text{ mm} \leq b = 55 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

计算宽度: $b_1 = \min(2t+16, b-d_0/3) = \min(2 \times 16 + 16, 55 - 50/3) = 38.333\text{mm}$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 189.73 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 38.333) = 154.672\text{N/mm}^2 \leq f = 295\text{N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(55+50/2)^2 - (50/2)^2]^{0.5} = 75.993\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 189.73 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 75.993) = 78.021\text{N/mm}^2 \leq f_v = 170\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

(4) 与轴销连接的耳板承压强度验算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	吊耳板承压强度设计值 (N/mm^2)	400
-----------------------	----	------------------------------	-----

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 189.73\text{kN}$$

$$\sigma_c = F / (d_1 t) = 189.73 \times 10^3 / (60 \times 16) = 197.635\text{N/mm}^2 \leq 400\text{N/mm}^2$$

与轴销连接的耳板承压强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	566
-----------------------	----	------------------------------------	-----

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

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 379.459\text{kN}$$

(1) 销轴抗剪强度

根据吊耳板排数可得, 销轴抗剪面数 $n_v = 3$

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 379.459 \times 10^3 / (3 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 44.735\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 566\text{N/mm}^2$$

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 $h_f(\text{mm})$	10
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	200
连接板耳板排数	2
双吊耳板底部宽度 $l_{c1}(\text{mm})$	460

(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：

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|263.036|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=21.35\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|42.806|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=3.475\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2\times h_f)^2/6]=(27.662\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=30.618\text{N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V]^{0.5}=[\frac{(21.35+30.618)}{1.22}+3.475^2]^{0.5}=42.738\text{N/mm}^2\leq f_t^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

$$\sigma_N=(|F|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|557.37|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=45.241\text{N/mm}^2$$

$$\tau_V=(|V|/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2h_f)]=(|261.005|\times 10^3/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)]=21.185\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_M=M/W=(M/2)/[2\times 0.7h_f(l_{c1}-2\times h_f)^2/6]=(55.999\times 10^6/2)/[2\times 0.7\times 10\times (460-2\times 10)^2/6]=61.983\text{N/mm}^2$$

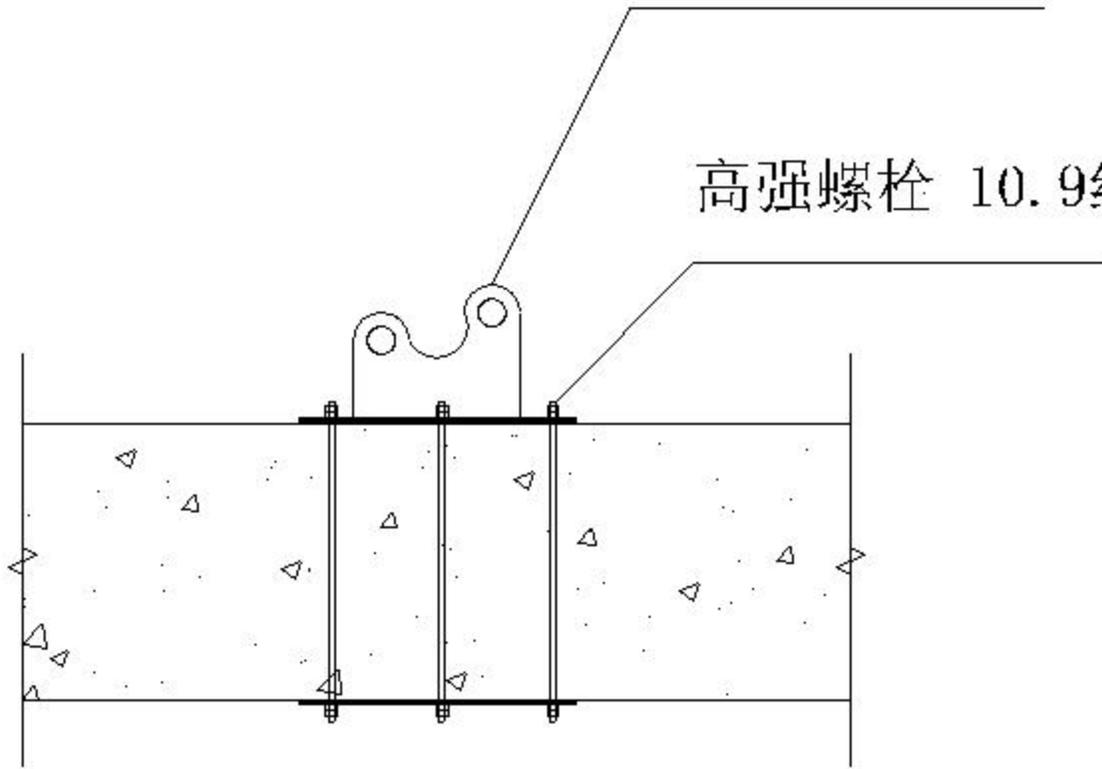
$$[\frac{(\sigma_N+\sigma_M)}{\beta_f}+\tau_V]^{0.5}=[\frac{(45.241+61.983)}{1.22}+21.185^2]^{0.5}=90.405\text{N/mm}^2\leq f_t^w=200\text{N/mm}^2$$

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：

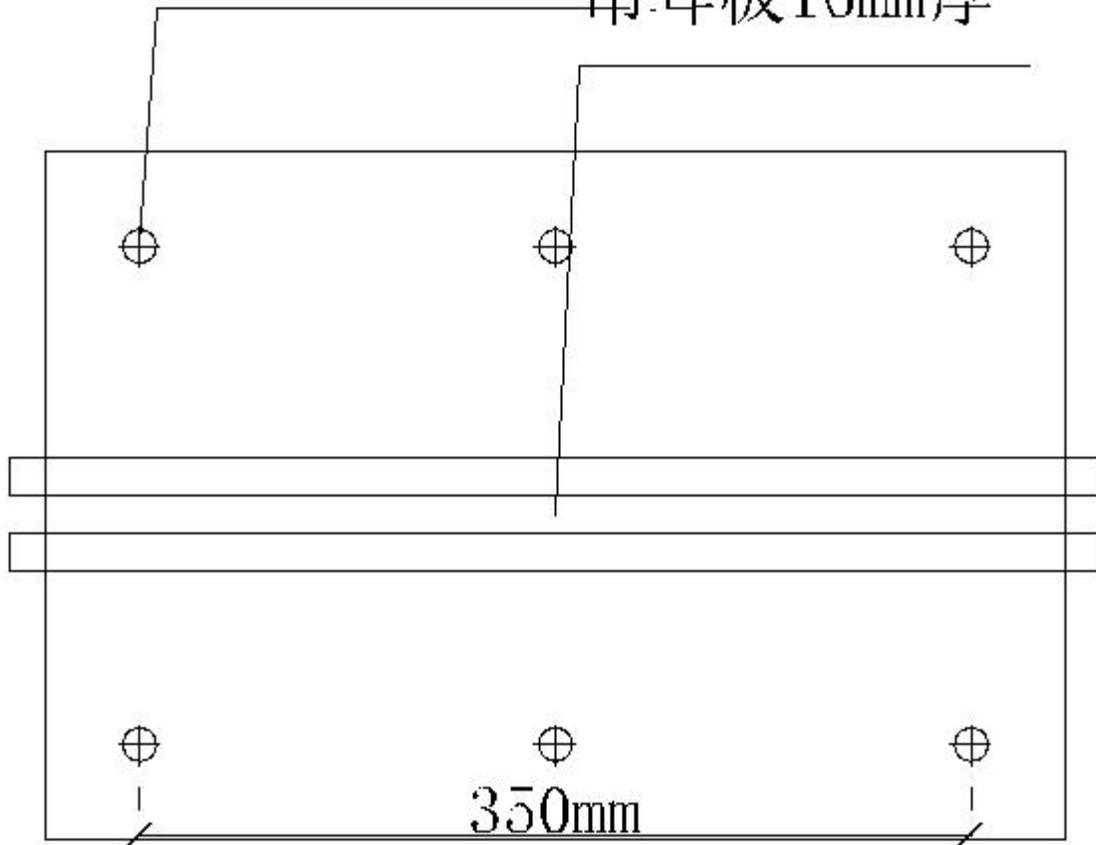
吊耳板16mm厚

高强螺栓 10.9级 M20



塔机附着节点详图-双吊耳板

高强螺栓 10.9级 M20
吊耳板 16mm厚



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

盘龙河 3 号桥 15 墩 XGT6015A-8S 第 2 道附着计 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
- 3、《钢结构通用规范》GB 55006-2021

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT6015A-8S	塔身桁架结构类型	方钢管
塔机计算高度 H(m)	72	塔身宽度 B(m)	1.6
起重臂长度 l ₁ (m)	50.9	荷载确定方式	按构件不平衡自重计算
平衡臂长度 l ₂ (m)	13.06	起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	2.2
工作状态时扭矩标准值 T _{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	375	工作状态不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M _k (kN·m)	1584
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)	1075		

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	钢管	附墙杆钢管规格(mm)	Φ160×8
塔身锚固环边长 C(m)	2.02		

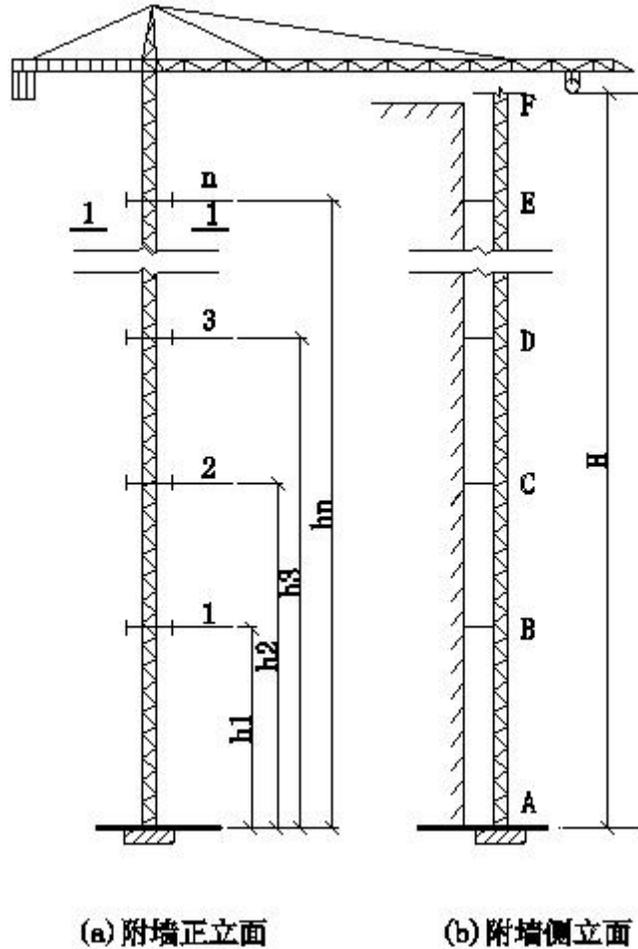
二、风荷载及附着参数

附着次数 N	2		
附着点 1 到塔机的横向距离 a ₁ (m)	0.094	点 1 到塔机的竖向距离 b ₁ (m)	5.394
附着点 2 到塔机的横向距离 a ₂ (m)	1.283	点 2 到塔机的竖向距离 b ₂ (m)	3.784
附着点 3 到塔机的横向距离 a ₃ (m)	2.567	点 3 到塔机的竖向距离 b ₃ (m)	3.467
附着点 4 到塔机的横向距离 a ₄ (m)	1.404	点 4 到塔机的竖向距离 b ₄ (m)	5.035
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)	0.5
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'}	工作状态风压线荷载标准值 q _{sk}	非工作状态风压线荷载标准值 q _{sk'}

第1次附着	18.4	18.4	1.198	1.95	1.95	1.587	1.637	0.399	1.028
第2次附着	36.4	18	1.473	1.95	1.95	1.587	1.653	0.49	1.276
悬臂端	72	35.6	1.806	1.95	1.95	1.578	1.653	0.598	1.565

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、扭矩组合值 T_k

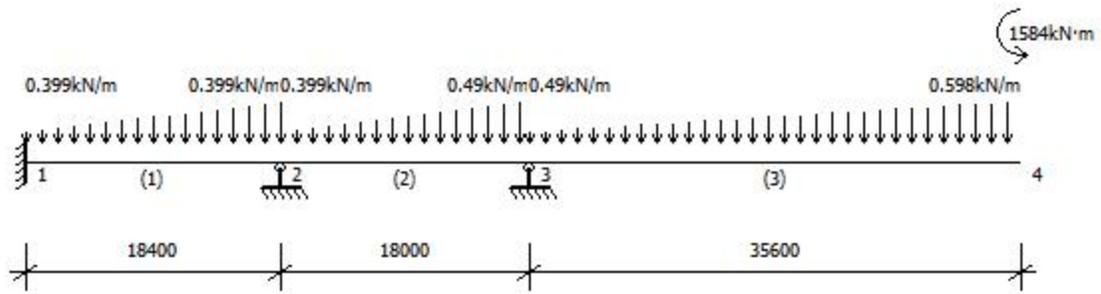
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{ki} = 375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

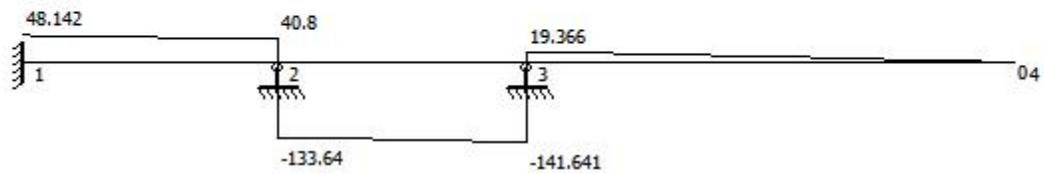
回转惯性力及风荷载产生的扭矩设计值:

$$T_k = 1.5 \times T_{ki} = 562.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

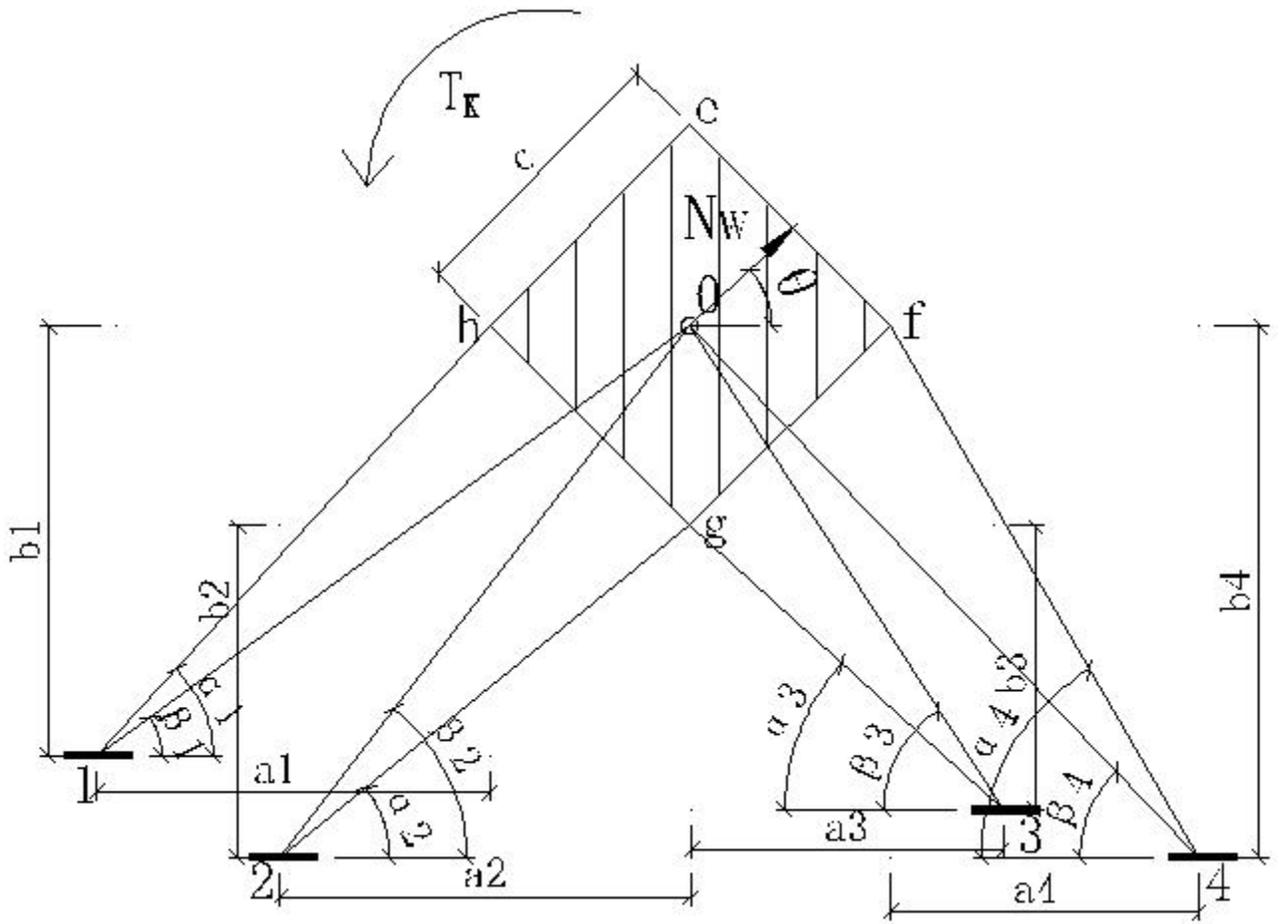
支座反力标准值得： $R_E=174.44\text{kN}$

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。

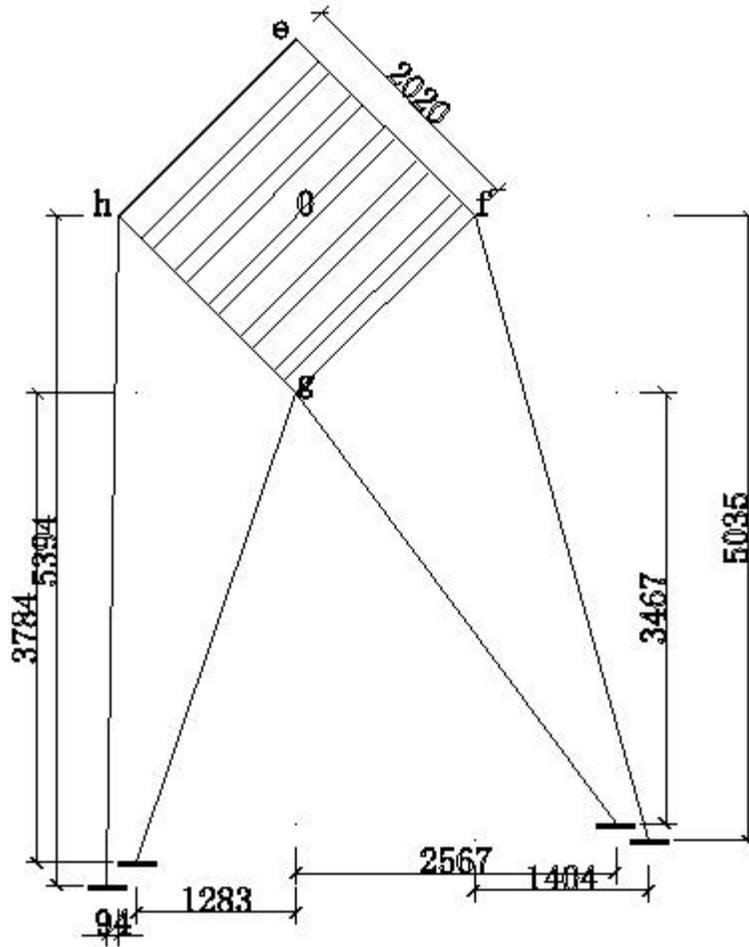
3、附墙杆内力计算

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 $N_w=1.5 \times R_E=261.66\text{kN}$

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 89.002^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 71.27^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 53.483^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 74.419^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 74.239^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 76.172^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 62.329^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 60.641^\circ$$

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：

最大轴压力 $T_1 = 208.017 \text{ kN}$, $T_2 = 82.687 \text{ kN}$, $T_3 = 302.351 \text{ kN}$, $T_4 = 0 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 0 \text{ kN}$, $T_2 = 381.999 \text{ kN}$, $T_3 = 260.758 \text{ kN}$, $T_4 = 385.916 \text{ kN}$

(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：

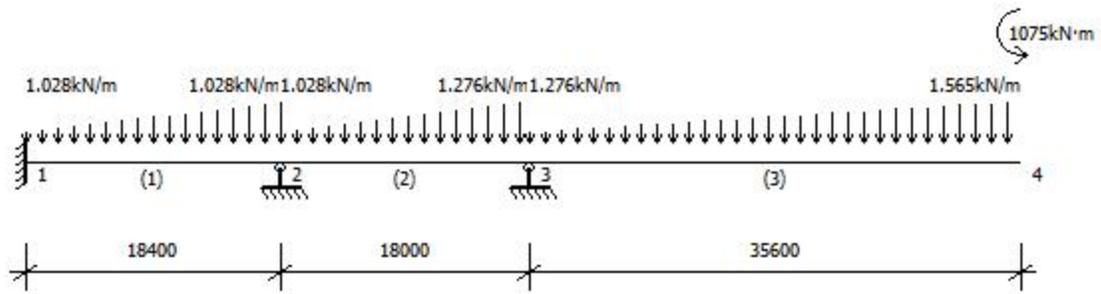
最大轴压力 $T_1 = 0 \text{ kN}$, $T_2 = 382 \text{ kN}$, $T_3 = 260.759 \text{ kN}$, $T_4 = 385.915 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 208.017 \text{ kN}$, $T_2 = 82.687 \text{ kN}$, $T_3 = 302.35 \text{ kN}$, $T_4 = 0 \text{ kN}$

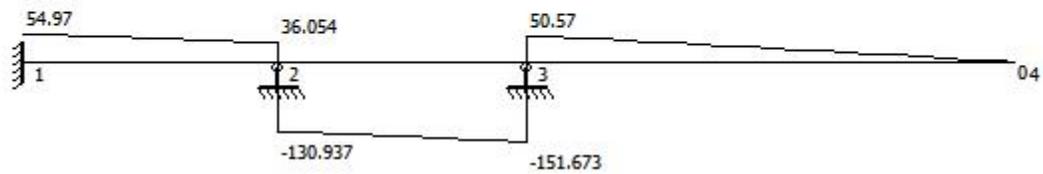
四、非工作状态下附墙杆内力计算

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

支座反力标准值得： $R_E=202.243\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 3 处锚固环的水平内力 $N_w=1.5 \times R_E=303.365\text{kN}$ 。

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 $T_1=96.028\text{kN}$ ， $T_2=269.377\text{kN}$ ， $T_3=326.431\text{kN}$ ， $T_4=196.649\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=96.027\text{kN}$ ， $T_2=269.375\text{kN}$ ， $T_3=326.428\text{kN}$ ， $T_4=196.65\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160 \times 8$	附墙杆截面面积 $A(\text{mm}^2)$	3820.177
附墙杆截面回转半径 $i(\text{mm})$	53.814	附墙杆强度设计值 $[f](\text{N}/\text{mm}^2)$	205
附墙杆允许长细比 $[\lambda]$	120		

1、杆件轴心受拉强度验算

$$\sigma = N/A = 385915/3820.177 = 101.02\text{N}/\text{mm}^2 \leq [f] = 205\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、杆件轴心受压强度验算

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_1=L_0/i=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}/i=(94^2+5394^2)^{0.5}/53.814=100.249\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.553$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_2=L_0/i=(a_2^2+b_2^2)^{0.5}/i=(1283^2+3784^2)^{0.5}/53.814=74.248\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.725$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_3=L_0/i=(a_3^2+b_3^2)^{0.5}/i=(2567^2+3467^2)^{0.5}/53.814=80.163\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.687$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_4=L_0/i=(a_4^2+b_4^2)^{0.5}/i=(1404^2+5035^2)^{0.5}/53.814=97.132\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.574$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=208017/(0.553\times3820.177\times205)=0.48\leq1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=381999/(0.725\times3820.177\times205)=0.673\leq1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=326428/(0.687\times3820.177\times205)=0.607\leq1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4Af)=385916/(0.574\times3820.177\times205)=0.859\leq 1$$

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)	10
连接钢板强度等级	Q355	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	10.9 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M20
一个高强螺栓的预拉力 P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目 n _f	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₁ (mm):	115	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	115
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	3
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)	350		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下:

$$F_1=N_1\sin\alpha_1=208.017\times\sin 89.002^\circ=207.985\text{kN}, V_1=N_1\cos\alpha_1=208.017\times\cos 89.002^\circ=3.625\text{kN};$$

$$F_2=N_2\sin\alpha_2=381.999\times\sin 71.27^\circ=361.77\text{kN}, V_2=N_2\cos\alpha_2=381.999\times\cos 71.27^\circ=122.661\text{kN};$$

$$F_3=N_3\sin\alpha_3=326.428\times\sin 53.483^\circ=262.345\text{kN}, V_3=N_3\cos\alpha_3=326.428\times\cos 53.483^\circ=194.243\text{kN};$$

$$F_4=N_4\sin\alpha_4=385.916\times\sin 74.419^\circ=371.734\text{kN}, V_4=N_4\cos\alpha_4=385.916\times\cos 74.419^\circ=103.657\text{kN};$$

2、螺栓承载力计算

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

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

(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：

$$T_k=-562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=42^\circ, N_1=207.984\text{kN}, N_2=82.625\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=207.984\times\sin 89.002^\circ+82.625\times\sin 71.27^\circ=286.202\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=207.984\times\cos 89.002^\circ+82.625\times\cos 71.27^\circ=30.155\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|207.984\times\sin 89.002^\circ\times 0.3/2+207.984\times\cos 89.002^\circ\times 0.115-82.625\times\sin 71.27^\circ\times 0.3/2+82.625\times\cos 71.27^\circ\times 0.115|=22.923\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|207.984\times\sin 89.002^\circ\times(0.35+0.3)/2+207.984\times\cos 89.002^\circ\times 0.115+82.625\times\sin 71.27^\circ\times(0.35-0.3)/2+82.625\times\cos 71.27^\circ\times 0.115|=73.009\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 73.009 \times 350 / 306.25 = 83.438\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 286.202 / (2 \times 3) + 83.438 = 131.138\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 30.155 / (2 \times 3) = 5.026\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 5.026 / 143.775 + 131.138 / 284 = 0.497 \leq 1$$

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：

$$T_k=562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=164^\circ, N_3=260.509\text{kN}, N_4=385.916\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=260.509\times\sin 53.483^\circ+385.916\times\sin 74.419^\circ=581.101\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=260.509\times\cos 53.483^\circ+385.916\times\cos 74.419^\circ=258.675\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-260.509\times\sin 53.483^\circ\times 0.3/2+260.509\times\cos 53.483^\circ\times 0.115+385.916\times\sin 74.419^\circ\times 0.3/2+385.916\times\cos 74.419^\circ\times 0.115|=54.103\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|260.509\times\sin 53.483^\circ\times(0.35-0.3)/2+260.509\times\cos 53.483^\circ\times 0.115+385.916\times\sin 74.419^\circ\times(0.35+0.3)/2+385.916\times\cos 74.419^\circ\times 0.115|=55.795\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 55.795 \times 350 / 306.25 = 63.766\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 581.101 / (2 \times 3) + 63.766 = 160.616\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

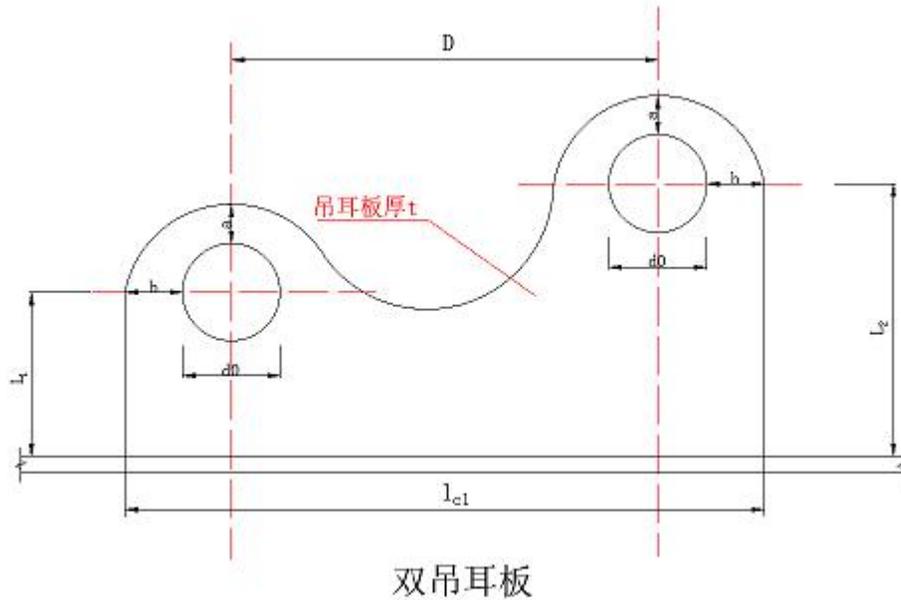
$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 258.675 / (2 \times 3) = 43.112\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b + N_t/N_t^b = 43.112/143.775 + 160.616/284 = 0.865 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	16	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	55
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	55	吊孔直径 d ₀ (mm)	50
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	295	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	170
连接板耳板排数	2	附墙杆端部耳板排数	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。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 192.958 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 16 + 16 = 48 \text{ mm} \leq b = 55 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

计算宽度: $b_1 = \min(2t+16, b-d_0/3) = \min(2 \times 16 + 16, 55 - 50/3) = 38.333\text{mm}$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 192.958 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 38.333) = 157.304\text{N/mm}^2 \leq f = 295\text{N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(55+50/2)^2 - (50/2)^2]^{0.5} = 75.993\text{mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 192.958 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 75.993) = 79.349\text{N/mm}^2 \leq f_v = 170\text{N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

(4) 与轴销连接的耳板承压强度验算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	吊耳板承压强度设计值(N/mm^2)	400
-----------------------	----	-------------------------------	-----

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 192.958\text{kN}$$

$$\sigma_c = F / (d_1 t) = 192.958 \times 10^3 / (60 \times 16) = 200.998\text{N/mm}^2 \leq 400\text{N/mm}^2$$

与轴销连接的耳板承压强度满足要求!

4、销轴计算

销轴直径 $d_1(\text{mm})$	60	销轴材料抗剪强度 $f_{v1}^b(\text{N/mm}^2)$	566
-----------------------	----	------------------------------------	-----

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

$$F = \max\{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 385.916\text{kN}$$

(1) 销轴抗剪强度

根据吊耳板排数可得, 销轴抗剪面数 $n_v = 3$

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 385.916 \times 10^3 / (3 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 45.497\text{N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 566\text{N/mm}^2$$

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 $h_f(\text{mm})$	10
连接钢板角焊缝强度设计值 $f_t^w(\text{N/mm}^2)$	200
连接板耳板排数	2

双吊耳板底部宽度 l_{c1} (mm)	460
------------------------	-----

(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:

$$\sigma_N = (F/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (286.202 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 23.231 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_V = (V/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (30.155 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 2.448 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (22.923 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)^2 / 6] = 25.373 \text{ N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^{0.5} = [\frac{(23.231 + 25.373)}{1.22} + 2.448^2]^{0.5} = 39.914 \text{ N/mm}^2 \leq f_t^w = 200 \text{ N/mm}^2$$

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:

$$\sigma_N = (F/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (581.101 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 47.167 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_V = (V/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (258.675 \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 20.996 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (54.103 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)^2 / 6] = 59.883 \text{ N/mm}^2$$

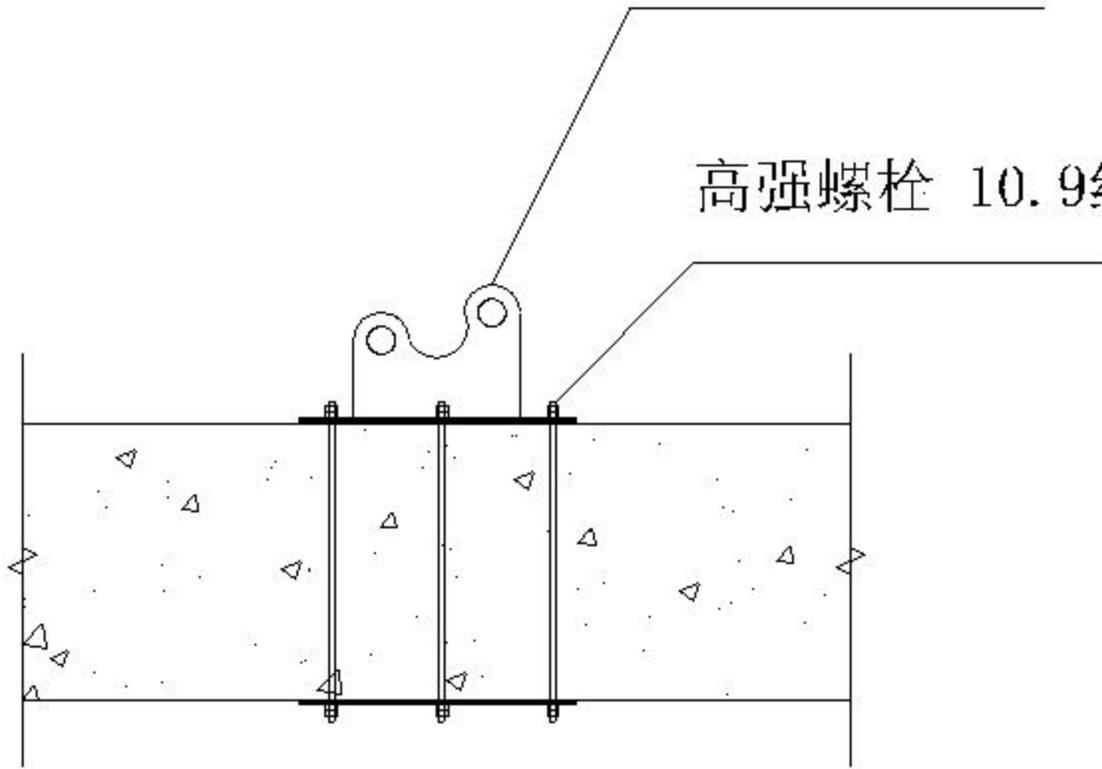
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^{0.5} = [\frac{(47.167 + 59.883)}{1.22} + 20.996^2]^{0.5} = 90.223 \text{ N/mm}^2 \leq f_t^w = 200 \text{ N/mm}^2$$

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:

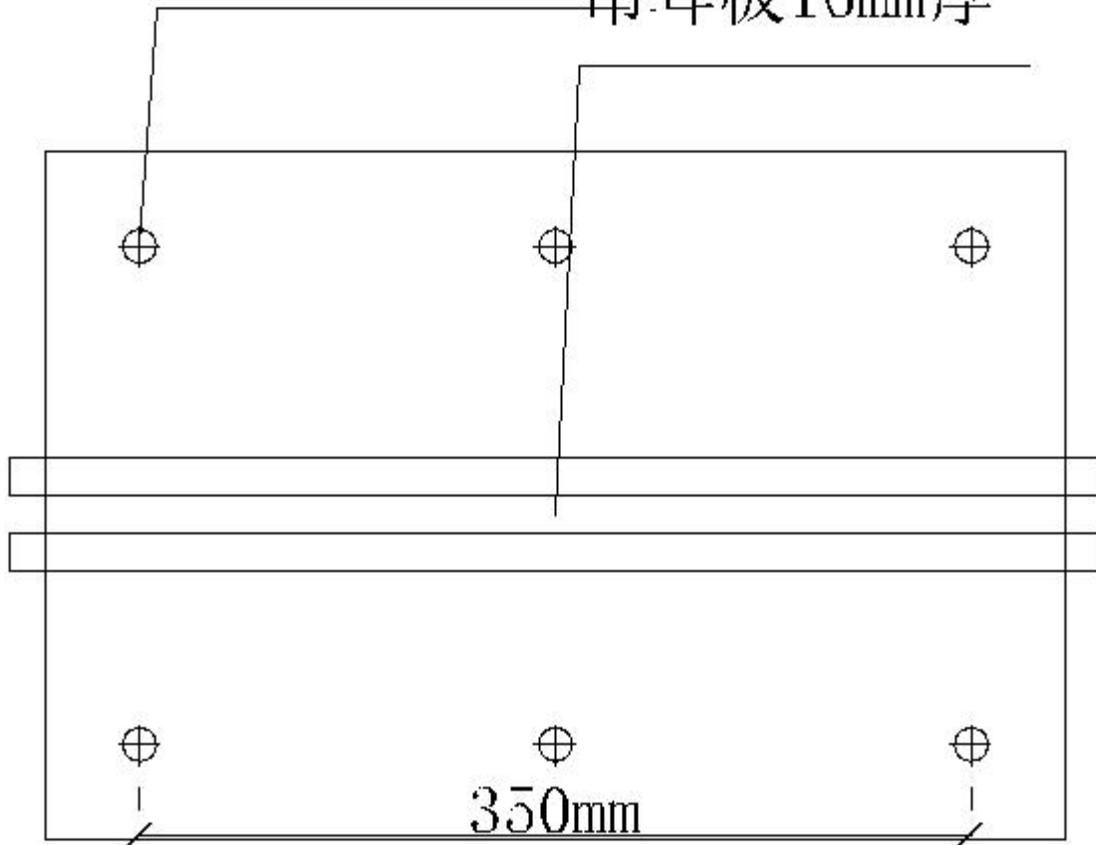
吊耳板16mm厚

高强螺栓 10.9级 M20



塔机附着节点详图-双吊耳板

高强螺栓 10.9级 M20
吊耳板 16mm厚



塔机附着节点剖面图-双吊耳板

盘龙河 3 号桥 15 墩 XGT6015A-8S 第 3 道附着计 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
- 3、《钢结构通用规范》GB 55006-2021

一、塔机附着杆参数

塔机型号	XGT6015A-8S	塔身桁架结构类型	方钢管
塔机计算高度 H(m)	83	塔身宽度 B(m)	1.6
起重臂长度 l_1 (m)	50.9	荷载确定方式	按构件不平衡自重计算
平衡臂长度 l_2 (m)	13.06	起重臂与平衡臂截面计算高度 h(m)	2.2
工作状态时扭矩标准值 T_{k1} (包含风荷载扭矩)(kN·m)	375	工作状态不平衡自重引起的倾覆力矩标准值 M_k (kN·m)	1584
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)	1075		

附着杆数	四杆附着	附墙杆类型	V类
附墙杆截面类型	钢管	附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160 \times 8$
塔身锚固环边长 C(m)	2.02		

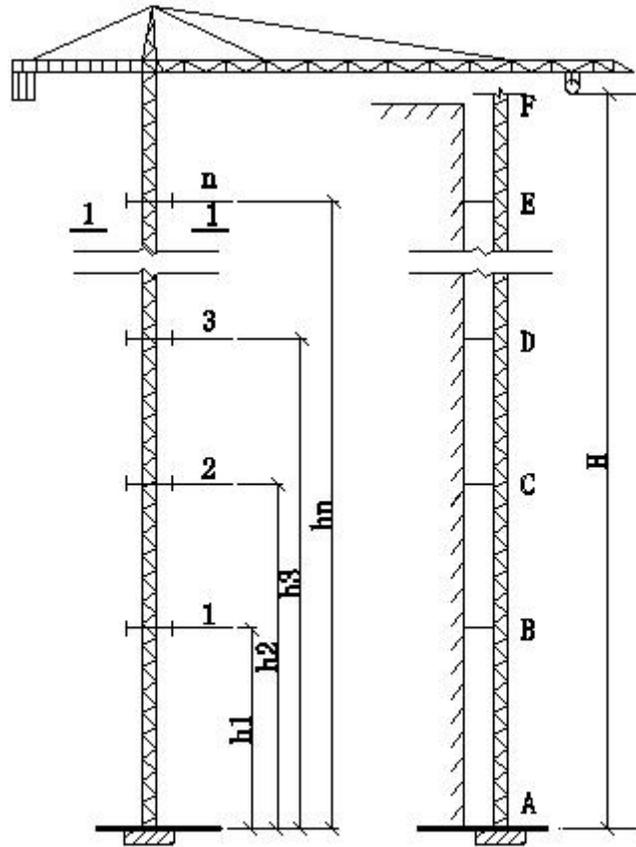
二、风荷载及附着参数

附着次数 N	3		
附着点 1 到塔机的横向距离 a_1 (m)	0.225	点 1 到塔机的竖向距离 b_1 (m)	5.998
附着点 2 到塔机的横向距离 a_2 (m)	1.441	点 2 到塔机的竖向距离 b_2 (m)	4.358
附着点 3 到塔机的横向距离 a_3 (m)	2.5	点 3 到塔机的竖向距离 b_3 (m)	3.82
附着点 4 到塔机的横向距离 a_4 (m)	1.333	点 4 到塔机的竖向距离 b_4 (m)	5.396
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)	0.5
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'	工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}	非工作状态风压线荷载标准值 q_{sk}'
---------	-----------------	--------------------	------------------	---------------------	-----------------------	--------------------	----------------------	-----------------------	-------------------------

第1次附着	18.4	18.4	1.198	1.95	1.95	1.587	1.637	0.399	1.028
第2次附着	36.4	18	1.473	1.95	1.95	1.587	1.653	0.49	1.276
第3次附着	50.4	14	1.624	1.95	1.95	1.588	1.654	0.541	1.408
悬臂端	83	32.6	1.888	1.95	1.95	1.576	1.65	0.624	1.633

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、扭矩组合值 T_k

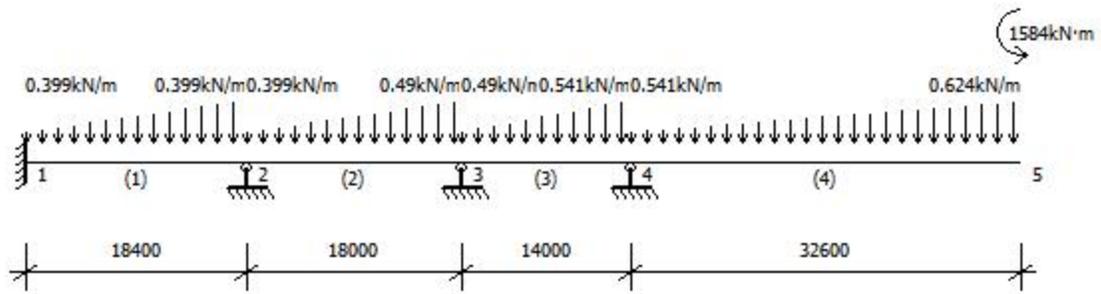
回转惯性力及风荷载产生的扭矩标准值:

$$T_k = T_{k1} = 375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

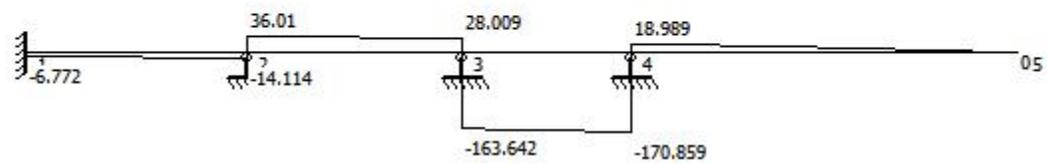
回转惯性力及风荷载产生的扭矩设计值:

$$T_k = 1.5 \times T_{k1} = 562.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2、附着支座反力计算



计算简图



剪力图

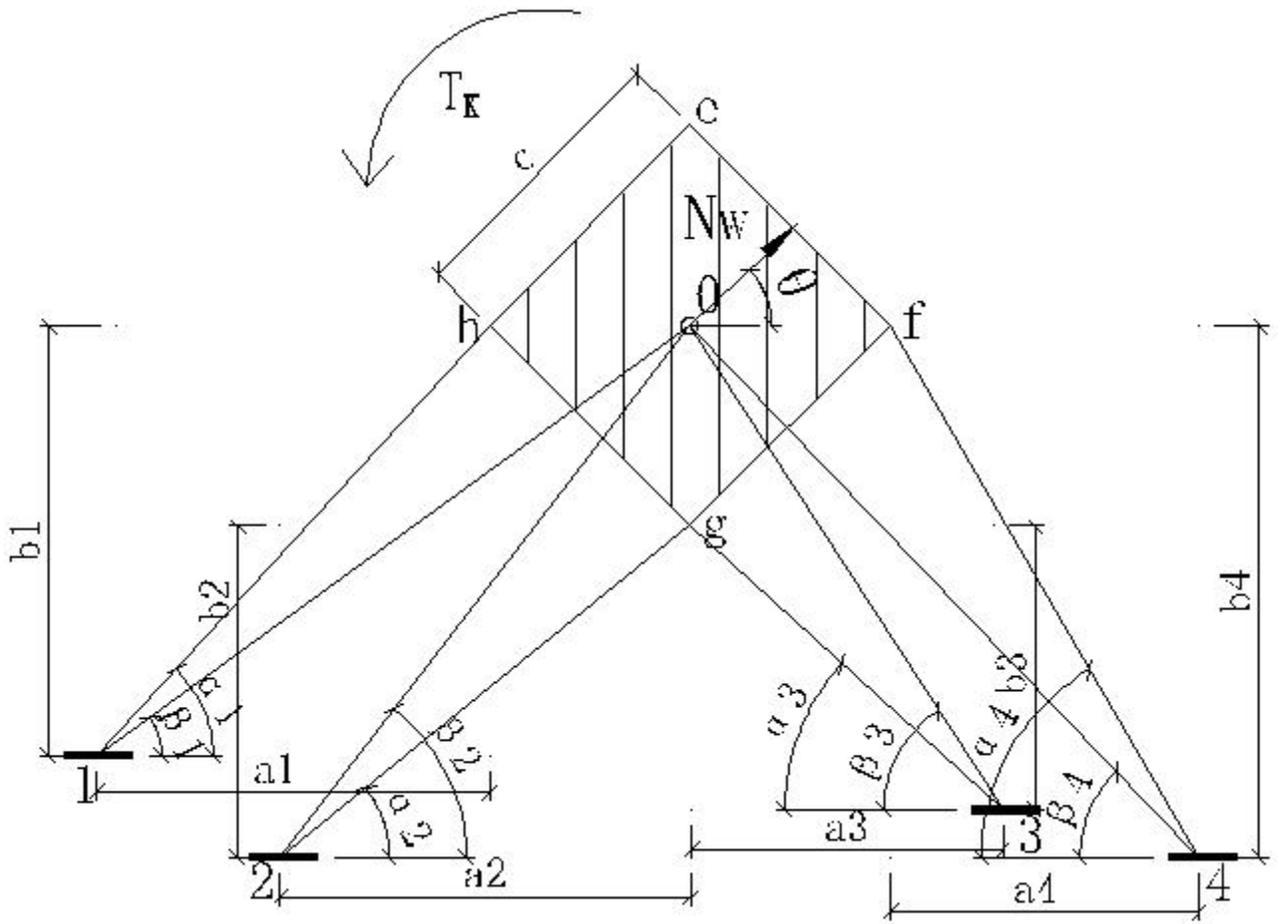
支座反力标准值得： $R_E=191.651\text{kN}$

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。

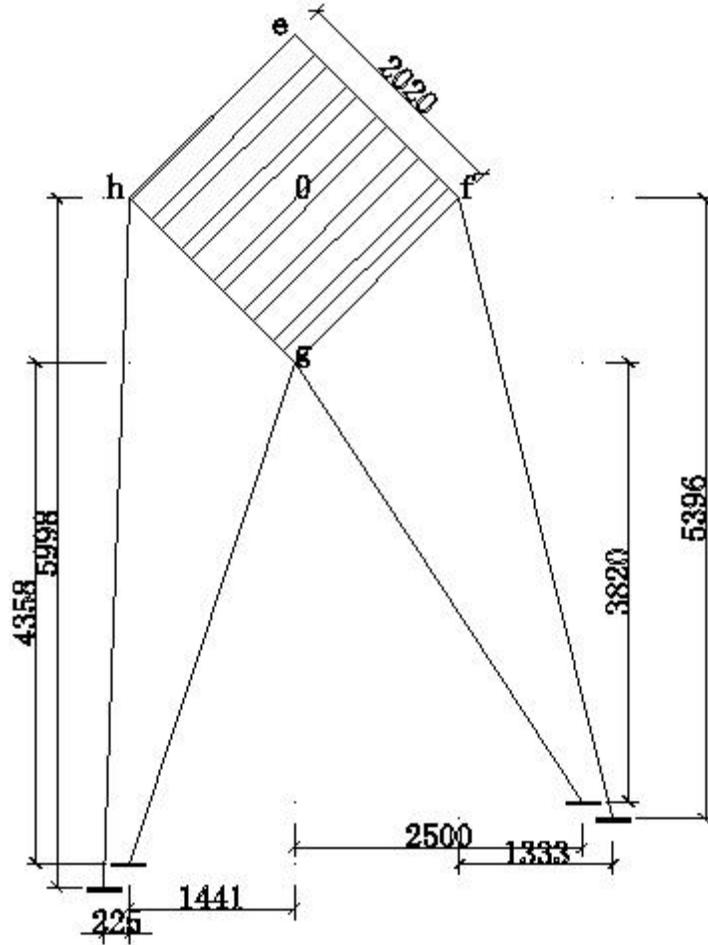
3、附墙杆内力计算

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 $N_w=1.5 \times R_E=287.476\text{kN}$

计算简图：



塔机附着示意图



塔机附着平面图

$$\alpha_1 = \arctan(b_1/a_1) = 87.852^\circ$$

$$\alpha_2 = \arctan(b_2/a_2) = 71.703^\circ$$

$$\alpha_3 = \arctan(b_3/a_3) = 56.797^\circ$$

$$\alpha_4 = \arctan(b_4/a_4) = 76.124^\circ$$

$$\beta_1 = \arctan(b_1/(a_1 + 2^{0.5}c/2)) = 74.589^\circ$$

$$\beta_2 = \arctan((b_2 + 2^{0.5}c/2)/a_2) = 76.016^\circ$$

$$\beta_3 = \arctan((b_3 + 2^{0.5}c/2)/a_3) = 64.53^\circ$$

$$\beta_4 = \arctan(b_4/(a_4 + 2^{0.5}c/2)) = 62.899^\circ$$

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：

最大轴压力 $T_1 = 219.512 \text{ kN}$ ， $T_2 = 120.418 \text{ kN}$ ， $T_3 = 352.617 \text{ kN}$ ， $T_4 = 0 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 0 \text{ kN}$ ， $T_2 = 416.482 \text{ kN}$ ， $T_3 = 312.546 \text{ kN}$ ， $T_4 = 401.996 \text{ kN}$

(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：

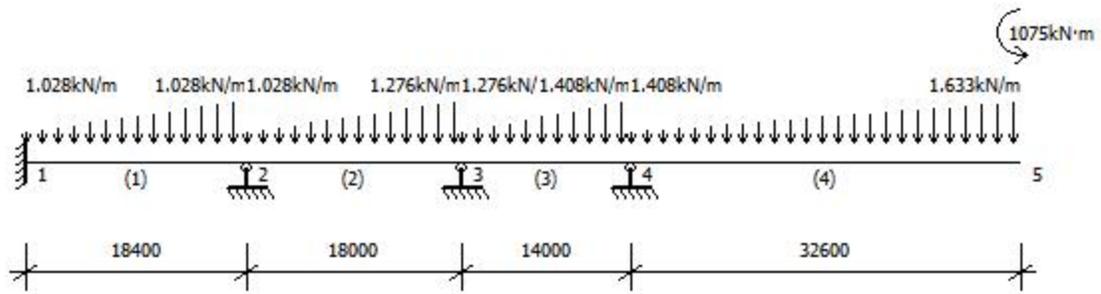
最大轴压力 $T_1 = 0 \text{ kN}$ ， $T_2 = 416.483 \text{ kN}$ ， $T_3 = 312.547 \text{ kN}$ ， $T_4 = 401.995 \text{ kN}$

最大轴拉力 $T_1 = 219.513 \text{ kN}$ ， $T_2 = 120.418 \text{ kN}$ ， $T_3 = 352.616 \text{ kN}$ ， $T_4 = 0 \text{ kN}$

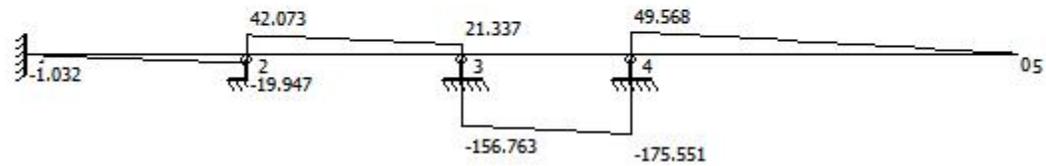
四、非工作状态下附墙杆内力计算

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

支座反力标准值得： $R_E=225.119\text{kN}$

2、附墙杆内力计算

支座 4 处锚固环的水平内力 $N_w=1.5 \times R_E=337.678\text{kN}$ 。

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 $T_1=111.904\text{kN}$ ， $T_2=315.329\text{kN}$ ， $T_3=390.66\text{kN}$ ， $T_4=214.959\text{kN}$

最大轴拉力 $T_1=111.903\text{kN}$ ， $T_2=315.329\text{kN}$ ， $T_3=390.659\text{kN}$ ， $T_4=214.96\text{kN}$

五、附墙杆强度验算

附墙杆钢管规格(mm)	$\Phi 160 \times 8$	附墙杆截面面积 $A(\text{mm}^2)$	3820.177
附墙杆截面回转半径 $i(\text{mm})$	53.814	附墙杆强度设计值 $[f](\text{N}/\text{mm}^2)$	205
附墙杆允许长细比 $[\lambda]$	120		

1、杆件轴心受拉强度验算

$$\sigma = N/A = 416483/3820.177 = 109.022\text{N}/\text{mm}^2 \leq [f] = 205\text{N}/\text{mm}^2$$

满足要求!

2、杆件轴心受压强度验算

附墙杆 1 长细比:

$$\lambda_1=L_0/i=(a_1^2+b_1^2)^{0.5}/i=(225^2+5998^2)^{0.5}/53.814=111.536\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_1=0.484$$

满足要求!

附墙杆 2 长细比:

$$\lambda_2=L_0/i=(a_2^2+b_2^2)^{0.5}/i=(1441^2+4358^2)^{0.5}/53.814=85.295\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_2=0.653$$

满足要求!

附墙杆 3 长细比:

$$\lambda_3=L_0/i=(a_3^2+b_3^2)^{0.5}/i=(2500^2+3820^2)^{0.5}/53.814=84.836\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_3=0.656$$

满足要求!

附墙杆 4 长细比:

$$\lambda_4=L_0/i=(a_4^2+b_4^2)^{0.5}/i=(1333^2+5396^2)^{0.5}/53.814=103.286\leq[\lambda]=120, \text{查规范表得: } \varphi_4=0.534$$

满足要求!

附墙杆 1 轴心受压稳定验算:

$$N_1/(\varphi_1Af)=219513/(0.484\times3820.177\times205)=0.579\leq1$$

满足要求!

附墙杆 2 轴心受压稳定验算:

$$N_2/(\varphi_2Af)=416482/(0.653\times3820.177\times205)=0.814\leq1$$

满足要求!

附墙杆 3 轴心受压稳定验算:

$$N_3/(\varphi_3Af)=390659/(0.656\times3820.177\times205)=0.76\leq1$$

满足要求!

附墙杆 4 轴心受压稳定验算:

$$N_4/(\varphi_4 A_f)=401996/(0.534 \times 3820.177 \times 205)=0.961 \leq 1$$

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)	10
连接钢板强度等级	Q355	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	10.9 级
摩擦面抗滑移系数 u	0.45	高强螺栓公称直径	M20
一个高强螺栓的预拉力 P(kN)	355	高强螺栓传力摩擦面数目 n _f	1
双吊耳板			
左侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₁ (mm):	115	右侧吊耳孔中心至连接板高度 L ₂ (mm):	115
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	3
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)	350		

1、附着点荷载计算

各附着杆传给连接节点荷载如下:

$$F_1=N_1 \sin \alpha_1=219.513 \times \sin 87.852^\circ=219.359 \text{ kN}, V_1=N_1 \cos \alpha_1=219.513 \times \cos 87.852^\circ=8.229 \text{ kN};$$

$$F_2=N_2 \sin \alpha_2=416.482 \times \sin 71.703^\circ=395.426 \text{ kN}, V_2=N_2 \cos \alpha_2=416.482 \times \cos 71.703^\circ=130.75 \text{ kN};$$

$$F_3=N_3 \sin \alpha_3=390.659 \times \sin 56.797^\circ=326.879 \text{ kN}, V_3=N_3 \cos \alpha_3=390.659 \times \cos 56.797^\circ=213.926 \text{ kN};$$

$$F_4=N_4 \sin \alpha_4=401.996 \times \sin 76.124^\circ=390.264 \text{ kN}, V_4=N_4 \cos \alpha_4=401.996 \times \cos 76.124^\circ=96.409 \text{ kN};$$

2、螺栓承载力计算

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

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

(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：

$$T_k=-562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=61^\circ, N_1=213.304\text{kN}, N_2=100.887\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_1\sin\alpha_1+N_2\sin\alpha_2=213.304\times\sin 87.852^\circ+100.887\times\sin 71.703^\circ=308.941\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_1\cos\alpha_1+N_2\cos\alpha_2=213.304\times\cos 87.852^\circ+100.887\times\cos 71.703^\circ=39.668\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|N_1\sin\alpha_1D/2+N_1\cos\alpha_1L_1-N_2\sin\alpha_2D/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|213.304\times\sin 87.852^\circ\times 0.3/2+213.304\times\cos 87.852^\circ\times 0.115-100.887\times\sin 71.703^\circ\times 0.3/2+100.887\times\cos 71.703^\circ\times 0.115|=22.167\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_1\sin\alpha_1(S_1+D)/2+N_1\cos\alpha_1L_1+N_2\sin\alpha_2(S_1-D)/2+N_2\cos\alpha_2L_2|=|213.304\times\sin 87.852^\circ\times(0.35+0.3)/2+213.304\times\cos 87.852^\circ\times 0.115+100.887\times\sin 71.703^\circ\times(0.35-0.3)/2+100.887\times\cos 71.703^\circ\times 0.115|=76.232\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 76.232 \times 350 / 306.25 = 87.122\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 308.941 / (2 \times 3) + 87.122 = 138.612\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 39.668 / (2 \times 3) = 6.611\text{kN}$$

$$N_v / N_v^b + N_t / N_t^b = 6.611 / 143.775 + 138.612 / 284 = 0.534 \leq 1$$

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：

$$T_k=562.5\text{kN}\cdot\text{m}, \theta=164^\circ, N_3=312.268\text{kN}, N_4=401.983\text{kN}$$

轴向拉力合力为：

$$F=N_3\sin\alpha_3+N_4\sin\alpha_4=312.268\times\sin 56.797^\circ+401.983\times\sin 76.124^\circ=551.538\text{kN}$$

水平向剪力合力为：

$$V=N_3\cos\alpha_3+N_4\cos\alpha_4=312.268\times\cos 56.797^\circ+401.983\times\cos 76.124^\circ=267.405\text{kN}$$

计算对螺栓群形心的弯矩：

$$M=|-N_3\sin\alpha_3D/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4D/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|-312.268\times\sin 56.797^\circ\times 0.3/2+312.268\times\cos 56.797^\circ\times 0.115+401.983\times\sin 76.124^\circ\times 0.3/2+401.983\times\cos 76.124^\circ\times 0.115|=50.096\text{kN}\cdot\text{m}$$

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：

$$M_1=|N_3\sin\alpha_3(S_1-D)/2+N_3\cos\alpha_3L_1+N_4\sin\alpha_4(S_1+D)/2+N_4\cos\alpha_4L_2|=|312.268\times\sin 56.797^\circ\times(0.35-0.3)/2+312.268\times\cos 56.797^\circ\times 0.115+401.983\times\sin 76.124^\circ\times(0.35+0.3)/2+401.983\times\cos 76.124^\circ\times 0.115|=64.115\text{kN}\cdot\text{m}$$

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

$$\sum y_1^2 = 2 \times [(1 \times 350/2)^2 + (2 \times 350/2)^2] = 306250\text{mm}^2$$

计算弯矩对单个螺栓的附加轴力：

$$N_{\text{附加}} = M_1 S_1 / \sum y_1^2 = 64.115 \times 350 / 306.25 = 73.274\text{kN}$$

计算考虑附加轴力后单个螺栓的最大拉力：

$$N_t = F / (m_1 n_1) + N_{\text{附加}} = 551.538 / (2 \times 3) + 73.274 = 165.197\text{kN}$$

计算单个螺栓的最大剪力：

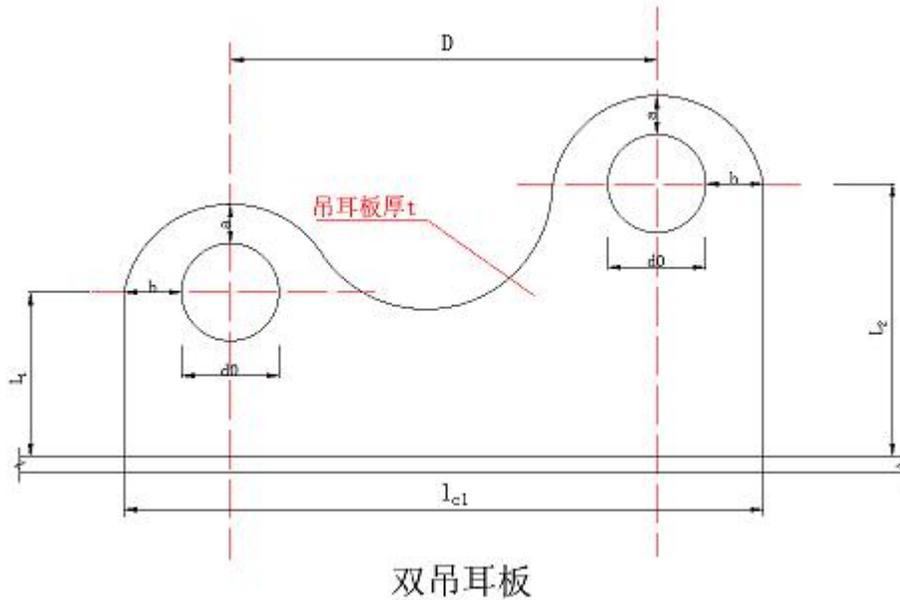
$$N_v = |V| / (m_1 n_1) = 165.197 / (2 \times 3) = 27.532\text{kN}$$

$$N_v/N_v^b + N_t/N_t^b = 27.532/143.775 + 165.197/284 = 0.773 \leq 1$$

螺栓承载力满足要求。

3、吊耳板计算

吊耳板厚 t(mm)	16	吊耳板两侧边缘与吊孔边缘净距 b(mm):	55
顺受力方向, 吊孔边距板边缘最小距离 a(mm):	55	吊孔直径 d ₀ (mm)	50
吊耳板抗拉强度设计值 f(N/mm ²)	295	吊耳板抗剪强度设计值 f _v (N/mm ²)	170
连接板耳板排数	2	附墙杆端部耳板排数	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。

$$N_s = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 208.241 \text{ kN}$$

(1) 耳板构造要求

$$B_e = 2t + 16 = 2 \times 16 + 16 = 48 \text{ mm} \leq b = 55 \text{ mm}$$

满足要求!

(2) 耳板孔净截面处的抗拉强度验算

$$\text{计算宽度: } b_1 = \min(2t+16, b-d_0/3) = \min(2 \times 16 + 16, 55 - 50/3) = 38.333 \text{ mm}$$

$$\sigma = N_s / (2tb_1) = 208.241 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 38.333) = 169.763 \text{ N/mm}^2 \leq f = 295 \text{ N/mm}^2$$

耳板孔净截面处抗拉强度满足要求!

(3) 耳板抗剪强度验算

耳板端部抗剪截面宽度:

$$Z = [(a+d_0/2)^2 - (d_0/2)^2]^{0.5} = [(55+50/2)^2 - (50/2)^2]^{0.5} = 75.993 \text{ mm}$$

$$\tau = N_s / (2tZ) = 208.241 \times 10^3 / (2 \times 16 \times 75.993) = 85.633 \text{ N/mm}^2 \leq f_v = 170 \text{ N/mm}^2$$

耳板抗剪强度满足要求!

(4) 与轴销连接的耳板承压强度验算

销轴直径 d_1 (mm)	60	吊耳板承压强度设计值(N/mm ²)	400
-----------------	----	--------------------------------	-----

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} / 2 = 208.241 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = F / (d_1 t) = 208.241 \times 10^3 / (60 \times 16) = 216.918 \text{ N/mm}^2 \leq 400 \text{ N/mm}^2$$

与轴销连接的耳板承压强度满足要求!

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)	566
-----------------	----	--	-----

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

$$F = \max \{N_1, N_2, N_3, N_4\} = 416.482 \text{ kN}$$

(1) 销轴抗剪强度

根据吊耳板排数可得, 销轴抗剪面数 $n_v = 3$

$$\tau_b = F / (n_v \pi d_1^2 / 4) = 416.482 \times 10^3 / (3 \times 3.142 \times 60^2 / 4) = 49.1 \text{ N/mm}^2 \leq f_{v1}^b = 566 \text{ N/mm}^2$$

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)	10
连接钢板角焊缝强度设计值 f_t^w (N/mm ²)	200
连接板耳板排数	2

双吊耳板底部宽度 l_{c1} (mm)	460
------------------------	-----

(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：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|308.941| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 25.076 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_V = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|39.668| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 3.22 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (22.167 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)^2 / 6] = 24.535 \text{ N/mm}^2$$

$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^2 + \tau_V^2]^{0.5} = [\frac{(25.076 + 24.535)}{1.22} + 3.22]^2 + 3.22^2]^{0.5} = 40.792 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 200 \text{ N/mm}^2$$

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：

$$\sigma_N = (|F|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|651.538| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 52.885 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_V = (|V|/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2h_f)] = (|267.405| \times 10^3 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)] = 21.705 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = M/W = (M/2) / [2 \times 0.7 h_f (l_{c1} - 2 \times h_f)^2 / 6] = (50.096 \times 10^6 / 2) / [2 \times 0.7 \times 10 \times (460 - 2 \times 10)^2 / 6] = 55.449 \text{ N/mm}^2$$

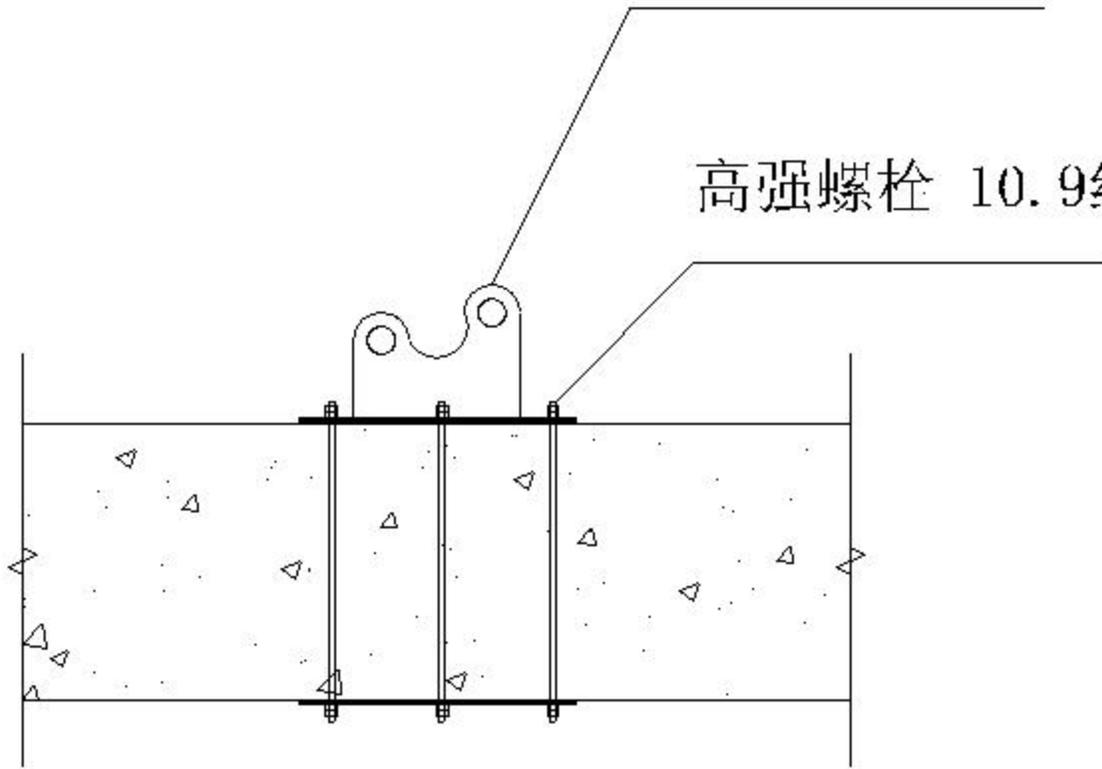
$$[\frac{(\sigma_N + \sigma_M)}{\beta_f} + \tau_V]^2 + \tau_V^2]^{0.5} = [\frac{(52.885 + 55.449)}{1.22} + 21.705]^2 + 21.705^2]^{0.5} = 91.413 \text{ N/mm}^2 \leq f_f^w = 200 \text{ N/mm}^2$$

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：

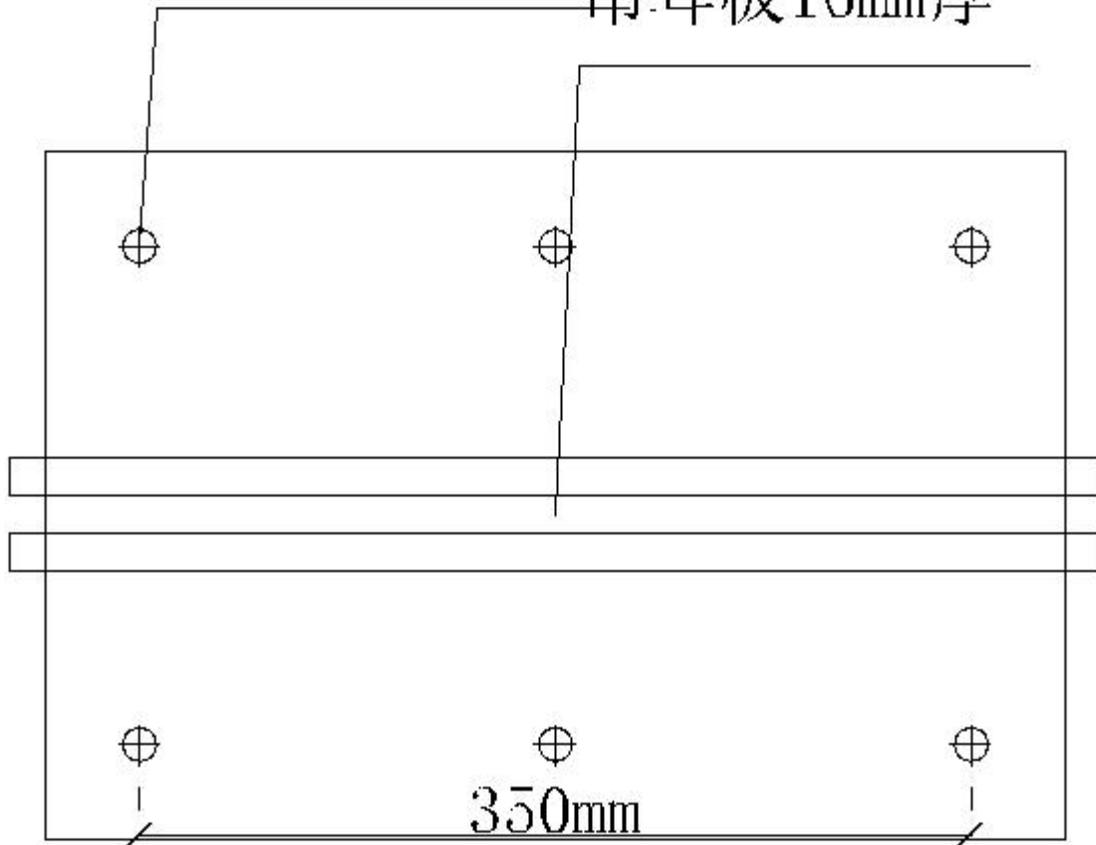
吊耳板16mm厚

高强螺栓 10.9级 M20



塔机附着节点详图-双吊耳板

高强螺栓 10.9级 M20
吊耳板 16mm厚



塔机附着节点剖面图-双吊耳板