

高层建筑悬挑式钢管脚手架 设计计算示例

一、引言

当建筑物高度超过 50m 时，落地搭设的扣件式钢管脚手架就不能满足要求了。此时，可以用悬挑架分段搭设的办法来解决。悬挑架的种类一般有：三角形钢架、斜撑钢管加吊杆、下撑式挑梁钢架、挑梁加吊杆、挑梁等。各类悬挑架的设计计算分两部分，一部分为架体的设计，第二部分为悬挑架部分的设计。本文介绍第二部分的设计。

悬挑架的主要构件为钢梁，应按《钢结构设计规范》(GB50017-2003) 进行设计，包括抗弯强度、抗剪强度、局部承压强度、整体稳定性、挠度和端部锚固连接强度等验算。钢梁的设计计算步骤和公式如下：

1、抗弯强度

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f$$

式中 M_x, M_y ----绕 x 轴和 y 轴的弯矩（对于工字形截面，x 轴为强轴，y 轴为弱轴，单位为 $N \cdot mm^4$ ）；

W_{nx}, W_{ny} ----对 x 轴和 y 轴的截面抵抗矩（ mm^3 ）；

γ_x, γ_y ----截面塑性发展系数：对于工字形截面， $\gamma_x=1.05, \gamma_y=1.20$ ；对于箱形截面， $\gamma_x=1.05, \gamma_y=1.05$ ；对其他截面可按《钢结构设计规范》GB50017-2003 表 5.2.1 采用；

f----钢材的抗弯强度设计值（ N/mm^2 ）

2、抗剪强度

$$\tau = \frac{VS}{It_w} \leq f_v$$

式中 V----计算截面沿腹板平面作用的剪力（N）；

S----计算剪应力处以上毛截面对中和轴的面积矩（ mm^3 ）；

I----毛截面积惯性矩；

t_w ----腹板厚度；

f_v ----钢材抗剪强度设计值（ N/mm^2 ）。

3、腹板边缘局部强度验算

1) 局部承压强度

$$\sigma_c = \frac{\psi F}{t_w l_z} \leq f$$

式中 F----集中荷载（N）；

ψ ----集中荷载增大系数，此处 $\psi=1.0$ ；

l_z ----集中荷载在腹板计算高度上边缘的假定分布长度（mm），按下式计算：

$l_z=a+5h_y$ （a----集中荷载沿梁跨度方向的支承长度， h_y ----梁顶面至腹板计算高度上边缘的距离，单位均为 mm）。

f----钢材的抗压强度设计值（ N/mm^2 ）。

2) 折算应力

在某些情况下，比如在梁的同一部位有较大的弯曲应力 σ 、剪应力 τ 和局部压应力 σ_c 时，应按最大形状改变能量强度理论计算折算应力 σ_{eq} 满足要求。规范计算公式为：

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_c^2 - \sigma\sigma_c + 3\tau^2} \quad \beta_1 f$$

式中

σ 、 τ 、 σ_c ——为腹板计算高度边缘同一点上同时产生的弯曲正应力、剪应力和局部压应力，按材料力学公式计算。

β_1 ----- $\beta_1=1.1$ (σ 、 σ_c 同号或有一为零时)

$\beta_1=1.2$ (σ 、 σ_c 异号时)

4、整体稳定

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f$$

式中 M_x -----绕强轴作用的最大弯矩 (N.mm)；

W_x -----按受压纤维确定的梁毛截面抵抗矩 (mm^3)；

φ_b -----梁的整体稳定性系数。按《钢结构设计规范》GB50017-2003 附录 B 确定。

5、挠度

$$v \leq [v]$$

式中 v -----挠度

$[v]$ -----容许挠度，悬挑受弯杆件， $[v]=l/400$ （按《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规程》JGJ130-2001 规定选用）。

二、计算示例

1、脚手架搭设参数

某高层建筑总高 $H=88\text{m}$ ，标准层高 3.0m ，在离地面高度为 19.6m 处开始，分段搭设悬挑脚手架，分段高度为 18m ，立杆横距 $l_b=1.05\text{m}$ ，内立杆离墙距离 0.25m ，立杆纵距 $l_a=1.5\text{m}$ ，步距 $h=1.8\text{m}$ ，每段脚手架 10 步，连墙件按二步三跨设置，同时作业层数为 1 层，活荷载 $Q_k=3.0\text{KN/m}^2$ ，竹笆脚手片，每段满铺 4 步。

脚手架钢管采用 $\Phi 48 \times 3.5\text{mm}$ ，悬挑梁采用 16 号工字钢，悬挑长度为 $l=1.40\text{m}$ 。

(1) $\Phi 48 \times 3.5$ 钢管，截面性质如下：

截面面积 $A=489\text{mm}^2$

截面惯性距 $I=1.219 \times 10^5\text{mm}^4$

截面模量 $W=5.08 \times 10^3\text{mm}^3$

弹性模量 $E=2.06 \times 10^5\text{N/mm}^2$

回转半径 $i=15.8\text{mm}$

抗压、抗弯强度设计值 $f=205\text{N/mm}^2$

(2) 16 号工字钢，截面性质如下：

截面面积 $A=2611\text{mm}^2$

腹板厚度 $t_w=6\text{mm}$

截面惯性距 $I_x=1.127 \times 10^7\text{mm}^4$

截面模量 $W_x=1.409 \times 10^5 \text{ mm}^3$
 弹性模量 $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
 回转半径 $i_x=65.7 \text{ mm}$ $i_y=18.9 \text{ mm}$
 半截面面积矩 $S_x=8.08 \times 10^4 \text{ mm}^3$
 梁自重 $q=0.205 \text{ kN/m}$
 抗压、抗弯强度设计值 $f=215 \text{ N/mm}^2$
 抗剪强度设计值 $f_v=125 \text{ N/mm}^2$

(3) 其他设计参数

基本风压值 $\omega_0=0.45 \text{ kN/m}^2$ 。

采用密目式安全立网，全封闭。

2、荷载标准值计算

(1) 结构自重标准值

$g_{1k}=0.1248 \text{ kN/m}$ (按双排脚手架查 JGJ130-2001)

(2) 竹脚手片自重标准值:

$g_{2k}=0.35 \text{ kN/m}^2$ (查 JGJ130-2001 得到)

(3) 施工均布活荷载:

$q_k=3 \text{ kN/m}^2$ (查 JGJ130-2001 得到)

(4) 风荷载标准值 (架体设计中用到, 鉴于许多人不熟悉风荷载的计算, 因此介绍于此):

$$\omega_k=0.7 \mu_z \cdot \mu_s \cdot \omega_0$$

式中 μ_z ——风压高度变化系数, 查《建筑结构荷载规范》, 地面粗糙度类别 C 类, 并用插入法得 37.6 米为 1.10

μ_s ——脚手架风荷载体型系数, 密目式立网的挡风系数计算, 目前规范提供的计算依据不足。哈尔滨建筑工程学院研究结果表明: 对于网目密度不低于 800 目/100cm² 的密目网, 挡风面积与迎风面积比值为 $A_n/A_w=0.54$ (含脚手架钢管挡风面积), 挡风系数 $\phi=1.2A_n/A_w=1.2 \times 0.54=0.648$ 。式中: A_n 为挡风面积; A_w 为迎风面积。

因此

$$\mu_s=1.0\phi=0.648 \quad (\text{JGJ130-2001 规范公式})$$

则

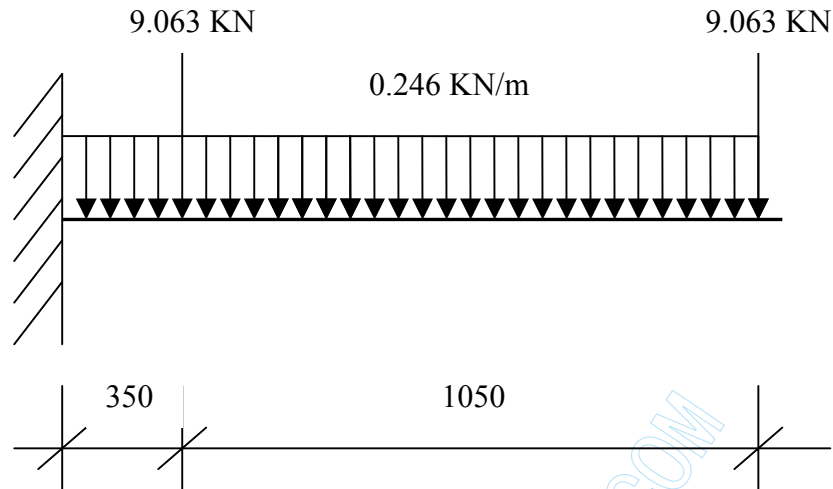
$$\omega_k=0.7 \times 1.10 \times 0.648 \times 0.45=0.225 \text{ kN/m}^2$$

3、内力计算

纵向水平杆、横向水平杆、立杆、连墙杆的强度、变形、稳定性验算另见《落地式扣件钢管脚手架计算示例》。现就悬挑梁的验算过程详述如下:

(1) 计算简图

简化为悬臂梁结构，如图所示。



(2) 内力计算

1) 每根立杆轴向力设计值 N

按规范公式计算：

$$N = 1.2(N_{G1k} + N_{G2k}) + 1.4 \sum N_{Qk}$$

式中：

N_{G1k} ——为脚手架结构自重标准值产生的轴向力

$$N_{G1k} = H \cdot g_{k1} = 18 \times 0.1248 = 2.246 \text{ kN}$$

N_{G2k} ——为构配件自重标准值产生的轴向力(包括竹脚手片、栏杆与挡脚板、安全网)，分别计算如下：

竹脚手片自重标准值：

$$0.35 \times 1.5 \times 1.3 \times 4/2 = 1.365 \text{ kN} \quad (\text{全高满铺 4 层})$$

栏杆与木挡脚板自重标准值：

$$0.14 \times 1.5 \times 10/2 = 1.05 \text{ kN} \quad (\text{共 10 层})$$

安全网自重标准值：

$$0.01 \times 1.5 \times 18/2 = 0.135 \text{ kN} \quad (\text{取立网自重 } 0.01 \text{ kN/m}^2)$$

所以

$$N_{G2k} = 1.365 + 1.05 + 0.135 = 2.550 \text{ kN}$$

$\sum N_{Qk}$ ——为施工荷载标准值产生的轴向力总和，作业层数 $n_1=1$

$$\sum N_{Qk} = n_1 \cdot q_k \cdot l_a \cdot l_b / 2 = 1 \times 3.0 \times 1.05 \times 1.5 / 2 = 2.363 \text{ kN}$$

从而可得每根立杆轴向力设计值 N:

$$N = 1.2(N_{G1k} + N_{G2k}) + 1.4 \sum N_{Qk} = 1.2(2.246 + 2.55) + 1.4 \times 2.363 = 9.063 \text{ KN}$$

2) 钢梁自重

$$q = 1.2 \times 0.205 = 0.246 \text{ KN/m}$$

3) 内力计算

$$Q_{\max} = 9.063 \times 2 + 0.246 \times 1.4 = 18.47 \text{ KN}$$

$$M_{\max} = 9.063 \times 1.4 + 9.063 \times 0.35 + 0.246 \times 1.4^2 / 2 = 16.101 \text{ KN.m}$$

4、钢梁截面验算

1) 抗弯强度

$$\sigma = \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} = \frac{16.101 \times 10^6}{1.05 \times 1.409 \times 10^5} = 108.8 \text{ f} = 215 \text{ N/mm}^2$$

满足要求。

2) 抗剪强度

$$\tau = \frac{VS}{I_t w} = \frac{18.47 \times 10^3 \times 8.08 \times 10^4}{1.127 \times 10^7 \times 6} = 19.58 \text{ f}_v = 125 \text{ N/mm}^2$$

3) 腹板边缘强度验算

● 局部承压强度

在集中荷载或支座处，腹板边缘的局部压应力可能会超过钢材抗压强度，因此应进行验算。对悬臂梁验算支座处局部承压强度。

设支座长度 $a = 30 \text{ mm}$ (有算例取 30 mm)， $h_y = 9.9 + 8.0 = 17.9 \text{ mm}$ (查工字钢截面特性表可得)，则 $l_z = a + 5 h_y = 30 + 5 \times 17.9 = 119.5 \text{ mm}$ ，查规范得 $\psi = 1$ ，则：

$$\sigma_c = \frac{\psi F}{t_w l_z} = \frac{1 \times 18470}{6 \times 119.5} = 25.76 \text{ f} = 215 \text{ N/mm}^2$$

● 折算应力

$$\sigma = \frac{M}{I_x} y_1 = \frac{16.101 \times 10^6}{1.127 \times 10^7} (80 - 17.9) = 88.7 \text{ N/mm}^2 \text{ (压应力)}$$

$$\tau = \frac{VS^*}{I_t w} = \frac{18.47 \times 10^3 \times 6.63 \times 10^4}{1.127 \times 10^7 \times 6} = 18.11 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{\psi F}{t_w l_z} = \frac{1 \times 18470}{6 \times 119.5} = 25.76 \text{ N/mm}^2 \text{ (压应力)}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_c^2 - \sigma \sigma_c + 3\tau^2} = 85.03 \text{ N/mm}^2 \quad \beta_1 f = 1.1 \times 215 = 236.5 \text{ N/mm}^2$$

满足要求。

注意：从上面的计算结果来看，对悬臂梁情况，折算应力比局部压应力要大得多。因此，腹板边缘局部强度验算，应验算折算应力满足要求，而不是局部承压强度的验算。本人参考了许多资料，在脚手架设计计算的资料中都未曾看到有折算应力的验算，应该是有问题的。

4) 整体稳定性

●先计算整体稳定系数 φ_b

按《钢结构设计规范》(GB50017-2003)附录 B.4 进行计算。梁的自重荷载很小，跨内有两个集中荷载作用，但自由端的集中荷载对量的整体稳定性起主要作用。由于

$$\xi = \frac{l_1 t_1}{b_1 h}$$

式中 ξ ——为两整体稳定计算参数
 l_1 ——为梁的受压翼缘自有长度
 b_1 ——为梁的受压翼缘宽度
 t_1 ——为梁的受压翼缘厚度
 h ——梁高

代入数据，得

$$\xi = \frac{1.40 \cdot 0.0099}{0.088 \cdot 0.160} = 0.984$$

因此，查《钢结构设计规范》(GB50017-2003)附录 B.4，得

$$\beta_b = 0.21 + 0.67\xi = 0.21 + 0.67 \times 0.984 = 0.870$$

$$\varphi_b = \beta_b \frac{4320}{\lambda_y^2} \cdot \frac{A h}{W_x} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_y t_1}{4.4 h} \right)^2} + \eta_b \right] \frac{235}{f_y}$$

式中的各个符号的含义见规范，其数值计算如下：

$$\lambda_y = l_1 / i_y = 1400 / 18.9 = 74.074$$

$$A = 2611 \text{ mm}^2$$

$$h = 160 \text{ mm}$$

$$t_1 = 9.9 \text{ mm}$$

$$\eta_b = 0$$

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

代入上式，得

$$\varphi_b = 2.93$$

则

$$\phi'_b = 1.07 - \frac{0.282}{\phi_b} = 0.974$$

●整体稳定验算

$$\frac{M_x}{\phi_b W_x} = \frac{16.101 \cdot 10^6}{0.974 \cdot 140.9 \cdot 10^3} = 117.3 \quad f = 215 \text{ N/mm}^2$$

5) 挠度

悬臂梁的挠度可以从有关静力计算手册中查到。

集中力作用下挠度：

$$v = \frac{Fb^2}{EI} (3l - b)$$

均布荷载作用下挠度：

$$v = \frac{ql^4}{8EI}$$

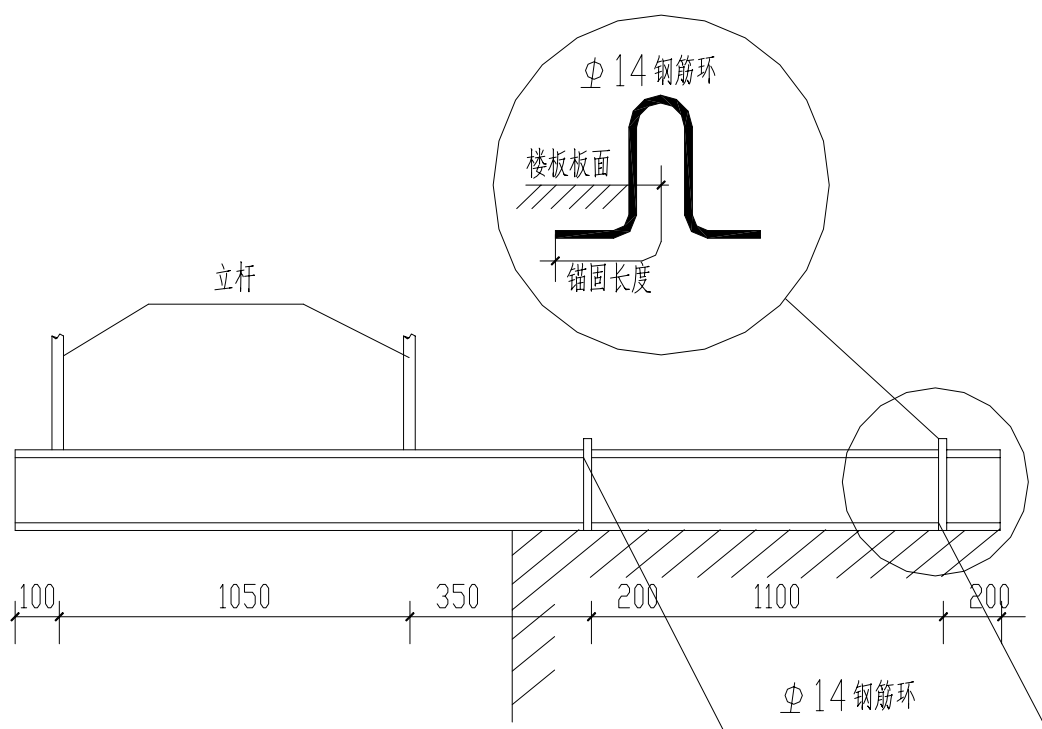
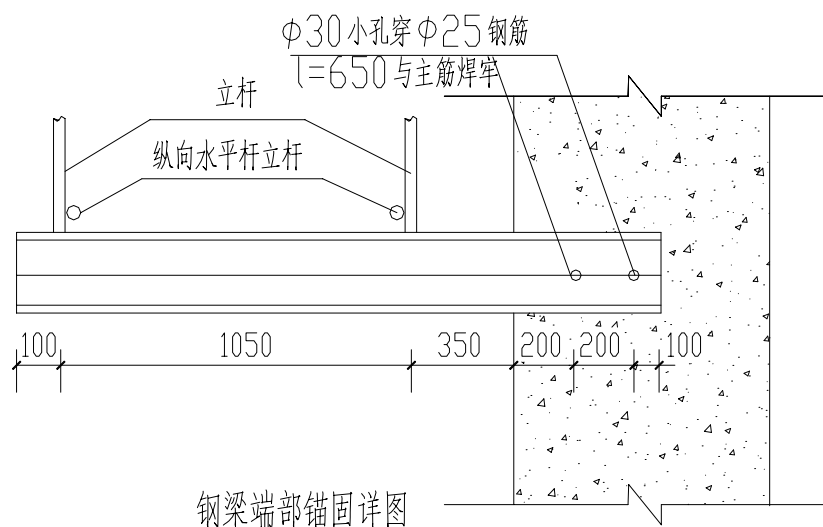
所以

$$\begin{aligned} v &= \frac{9063 \cdot 350^2}{2.06 \cdot 10^5 \cdot 1.127 \cdot 10^7} (3 \cdot 1400 - 350) \\ &+ \frac{9063 \cdot 350^2}{2.06 \cdot 10^5 \cdot 1.127 \cdot 10^7} (3 \cdot 1400 - 1400) \\ &+ \frac{0.246 \cdot 1400^4}{8 \cdot 2.06 \cdot 10^5 \cdot 1.127 \cdot 10^7} \\ &= 3.231 \text{ mm} \leq [v] = 1400/400 = 3.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

满足要求。

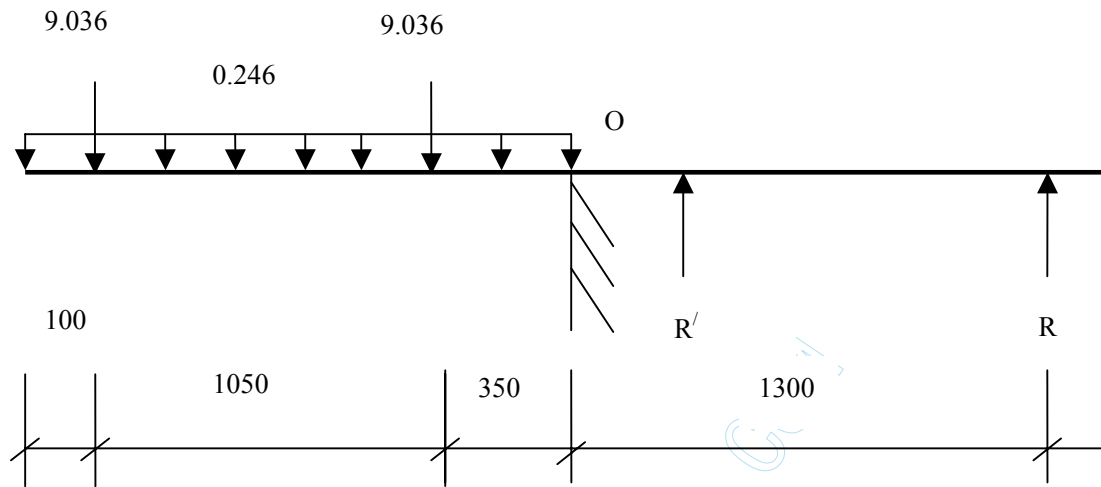
5、钢梁埋入设计

钢梁一端悬挑，另一端为了取得梁的平衡，要进行平衡措施设计。一般实用上采用两种方法解决，一是埋入钢筋混凝土墙或柱（如图所示），二是采用悬挑梁后端部分穿入预埋楼板的钢筋环内（如图所示）。



采用埋入法，一般埋入长度为 500mm，沿挑梁垂直方向穿 2 根 25 圆钢作锚筋，锚筋的作用是承担水平方向的作用力（如风荷载）。在杭州，许多悬挑外架的作法是：型钢用 16 号槽钢，每 4 层一挑，挑梁头部用钢丝绳向上斜拉，这时钢丝绳的拉力在水平方向的分力，就需要圆钢锚筋来承担，锚筋抗剪，根数要计算确定。抗剪能力的计算只能是近似的，实践和计算表明，2 根 25 圆钢锚筋在钢丝绳斜拉情况下安全度也是足够的。采用悬挑梁后端穿入预埋楼板的钢筋环内的作法，要验算钢筋环的强度。计算简图如下图

所示，根据梁的平衡可以求出梁传给钢筋环垂直作用力 R 。



为简便起见，忽略 R' ，对 O 取矩，则

$$R = [9.036 \times (1.05 + 0.35) + 0.246 \times 1.5 \times 1.5/2] / 1.3 = 9.944 \text{ kN}$$

钢筋环的水平锚固段埋于楼板的下皮钢筋之下，以便可靠锚固。假定锚固不会失效，钢筋环的破坏形式要么被拉断要么被剪断，钢筋的抗强度大于抗剪强度，因此，只要验算抗剪强度。

剪切面的剪应力为

$$\tau = 9944 / (3.14 \times 7 \times 7) = 64.6 \text{ N/mm}^2 < f = 125 \text{ N/mm}^2$$

抗剪强度满足要求。实际施工时，每根钢梁预埋 3 个钢筋环，末端 2 个，间距一般为 250mm 左右，以能够在钢梁与钢筋环之间楔入木楔子为准。