

# 大跨度门式刚架屋面梁平面外稳定的研究

朱立欢

(巴特勒(上海)有限公司 上海 200030)

**摘 要** 近年来,门式刚架在工业厂房的设计中得到广泛的应用。对于一般的轻型门式刚架,通过设置隅撑来保证屋面梁受压下翼缘的平面外稳定,经多年的工程实践已经被证明是一种行之有效的构造措施。但对于大跨度、屋面荷载比较大的建筑物,经实例分析,如果仍采用这一措施则很难达到预期的效果。为保证结构的安全性和可靠性,探讨了一种行之有效的解决方案——摇摆支撑的设置。

**关键词** 门式刚架 跨度 屋面荷载 稳定 摇摆支撑

## RESEARCH ON ROOF BEAM STABILITY OF LARGE SPAN GABLED FRAMES

Zhu Lihuan

(Batelay(Shanghai)Co.,Ltd Shanghai 200030)

**Abstract** Nowadays, gabled frames are widely applied in designs for industrial mill buildings. For normal gabled frames, construction scheme of flange bracing to ensure stability is proved to be effective. But for buildings of large span and great roof loads, anticipated effect is not be achieved by the same scheme. To ensure security and reliability of construction, sway bracing is introduced.

**Keywords** gabled frames span roof loads stability sway bracing

### 1 概 述

研究表明,门式刚架的破坏和倒塌在很多情况下是由于受压翼缘的失稳引起的。对于任何一种结构体系,都要求构件的受压翼缘有侧向支撑以保证

结构的整体有效性。一般屋面梁上翼缘由于与檩条和屋面板有可靠连接,可以保证其平面外的稳定,而屋面梁受压下翼缘的出平面稳定往往是通过设置隅撑来解决(图1)。

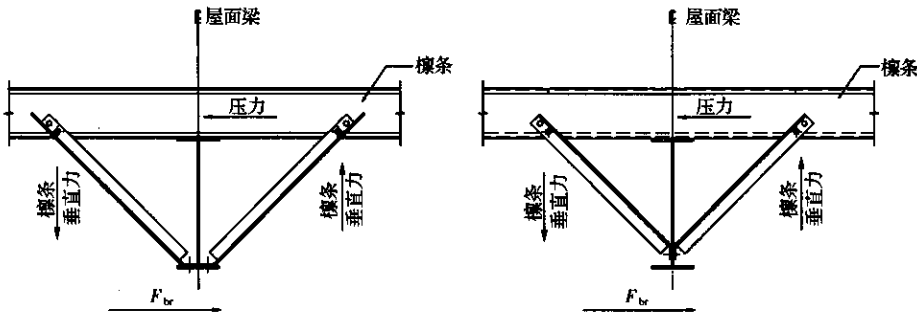


图1 隅撑

根据《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002)第6.1.6条,隅撑的设计,应符合下列规定:

1)实腹式刚架斜梁的出平面计算长度,应取侧向支承点间的距离;当斜梁两翼缘侧向支承点间的距离不等时,应取最大受压翼缘侧向支承点间的距离。

2)当实腹式刚架斜梁下翼缘受压时,必须在受压翼缘侧面布置隅撑作为斜梁的侧向支承点,隅撑的另一端连接在檩条上。

3)隅撑应按轴心受压构件设计。轴心力可按下列公式计算:

作者 朱立欢 女 1970年4月出生 一级注册结构工程师  
收稿日期 2006-12-15

$$N = \frac{Af}{60 \cos \theta} \wedge \frac{f_y}{235}$$

式中  $A$  —— 实腹斜梁被支撑翼缘的截面面积；  
 $f$  —— 实腹斜梁钢材的强度设计值；  
 $f_y$  —— 实腹斜梁钢材的屈服强度；  
 $\theta$  —— 隅撑与檩条轴线的夹角。

当隅撑成对布置时，每根隅撑的计算轴压力可取按公式计算值之半。

但是随着轻钢技术的不断发展及工程中的广泛应用，目前建筑物的跨度越做越大，如刚架横向柱距达到 40~50m，甚至更大，而且屋面的附加荷载又比较大，此时通过计算可以发现屋面梁某些截面的弯矩很大，因此所需的截面高度往往比较高，翼缘也会较宽较厚。虽然常规的隅撑（图 1）本身若不能满足强度和稳定要求时，可以加大其截面尺寸，加强节点连接。但在轻刚结构中屋面檩条一般采用的是冷弯薄壁型钢，截面高度常规采用 200、240、292mm，与屋面梁相比是比较弱的，即有可能既不能满足强度要求，也不能满足刚度要求。在这种比较特殊的情况下，再利用隅撑来作为屋面梁受压下翼缘平面外的侧向支撑点显然是不合适，也是不安全的。

因此，笔者认为“规程”（CECS 102:2002）及有关的设计手册主要针对的还是常规的门式刚架（如跨度≤30m）。而对于大跨度的门式刚架，笔者将根据美国的有关资料，将国外大跨度门式刚架屋面梁出平面的稳定计算做一介绍。

## 2 稳定计算

首先我们按下列两公式验算采用常规的隅撑布置是否能满足强度和刚度要求。

1) 刚度 (kN/m) 计算：

$$\beta_L^* = 2 \# \frac{M_f}{h} C_L C_d / L_b \quad (1)$$

式中  $\#$  —— 支撑形式系数（相关的取 1）；  
 $n$  —— 屋面横向交叉支撑的个数；  
 $M_f$  —— 刚架斜梁受压下翼缘的弯矩（验算截面处）kN·m；  
 $h$  —— 刚架斜梁的截面高度（验算截面处），m；  
 $C_L$  —— 上翼缘荷载的影响系数， $C_L = 1 + 1.2/n$ ；  
 $C_d$  —— 弯曲影响系数，1.0（单向弯曲和双向弯曲）2.0（验算截面接近于反弯点附近）；  
 $L_b$  —— 相邻支撑间的距离，m。

## 2) 强度计算：

$$F_{br}^* = 0.008 C_L C_d M_f / h \quad (2)$$

计算后接着要做以下分析：

a. 复核檩条的刚度，檩条在隅撑支撑点位置施加一单位力，计算位移  $1/\beta_{br}$  与  $1/\beta_L^*$  作比较，来判断所选的檩条刚度是否能满足要求。

b. 把  $F_{br}^*$  加至屋面梁的受压翼缘（图 1），复核檩条的强度及相关的连接节点。

若以上两点验算结果不满足，国外更多的是采用 Sway Bracing（摇摆支撑）（图 2）作为屋面梁下翼缘平面外的侧向支撑点。

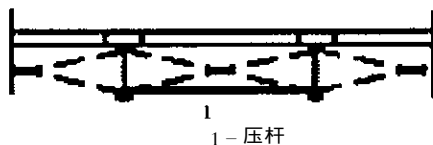


图 2 摇摆支撑

摇摆支撑的刚度计算：

$$\beta = \frac{A_{BR} E L_B^2}{(L_B^2 + L_C^2)^{3/2}} \quad (3)$$

式中  $A_{BR}$  —— 圆钢支撑的面积， $m^2$ ；  
 $L_B$  —— 相邻支撑间的距离，m；  
 $L_C$  —— 圆钢支撑上下两点间的距离，m；  
 $E$  —— 材料的弹性模量。

## 2.1 算例

建筑物的概况：60mm×108mm×6mm，单跨，屋面坡度 2%（图 3）。

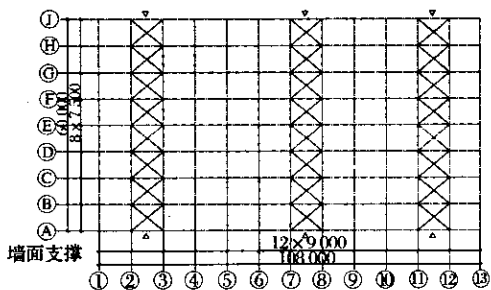


图 3 算例结构形式

荷载 (kN/m<sup>2</sup>) 情况：

恒载 = 0.38（刚架 + 屋面板 + 檩条）  
 雪载 = 1.20 地面雪载  
 风载 = 0.62（0.48 向上）  
 附加荷载 = 0.14

经过刚架的优化设计，选出稳定计算的控制组合工况，得到在每一个不利危险支撑位置截面的弯矩，见表 1。

只需验算屋面梁受压下翼缘，经判断靠近檐口处的截面，控制工况为：DL + CL + RSL；而对于

屋脊处的截面控制工况为 :DL + UPLIFT。这可以大大地减少计算量。

下面以验算距檐口处屋面梁的受压下翼缘的稳定为例(控制工况 DL + CL + RSL)进行计算。

表 1 刚架稳定计算的控制组合工况示意

梁截面高度/m	DL+RSL+CL 弯矩/(kN·m)	DL+UPLIFT 弯矩/(kN·m)
1.52	-2 428.5	245.2
1.14	-1208.9	127.9
0.91	91.6	-34.9
1.21	803.0	-83.6
1.32	1 000.0	-93.8
1.21	803.0	-83.6
0.91	91.6	-34.9
1.14	-1 208.9	127.9
1.52	-2 428.5	245.2

1)刚度计算

∵  $\beta = 1.0$  ,  $n = 7$  ,  $M_f = 1\,208.9\text{ kN}\cdot\text{m}$  ,  $h = 1.14\text{ m}$  ,  $C_L = 1 + (1.2/n) = (1 + 1.2/7) = 1.17$  ,  $C_d = 1.0$  ,  $L_b = 7.5\text{ m}$

将其代入式(1)则有:

$\beta_L^* = 661.7\text{ kN/m}$

2)强度计算

利用式(2)可得:

$F_{br} = 0.008(1.17 \times 1.00 \times 1208.9/1.14) = 9.9\text{ kN}$

有了以上的初步计算,还需作一些更为详细的计算,如檩条的强度、刚度的验算(图 1)。

由于隅撑强度和刚度及连接节点的验算不属于本文所要讨论的问题,故在文中略去详细的验算过程。

表 2 檩条计算结果

截面尺寸			按弯剪构件验算			挠度值/mm
			弯矩 M/(kN·m)	剪力 V/kN	应力比	
第一跨	图 4	Z240×3.0	15.94	0.00	0.773	52.5
	图 5		22.93	0.00	* 1.598	69.3
第二跨	图 4	Z240×2.1	-11.22	9.39	* 1.0	17.7
	图 5		-15.36	6.24	* 1.678	-8.0
第三跨	图 4	Z240×2.1	-10.99	-9.90	0.989	32.8
	图 5		13.82	0.00	* 1.305	63.2
第四跨	图 4	Z240×2.1	-11.22	-9.39	* 1.0	17.7
	图 5		-15.36	-6.24	* 1.678	-8.0
第五跨	图 4	Z240×3.0	15.94	0.00	0.773	52.5
	图 5		22.93	0.00	* 1.598	69.3

由以上分析可得:大跨度屋面梁受压翼缘平面外失稳产生的力  $F_{br}^*$  通过隅撑作用于檩条,对于檩条的计算影响很大,是不容忽视的,否则结构的安全会存在隐患。

2.3 檩条刚度(柔度)验算

2.2 檩条强度验算

1)按不考虑隅撑作用力进行檩条计算,仅考虑屋面荷载(包括恒载、雪载、风载、附加荷载),计算简图及结果(剪力、弯矩、挠度)见图 4;

2)按考虑隅撑作用力进行檩条计算,除考虑屋面荷载(包括恒载、雪载、风载、附加荷载)外,另在隅撑支点的位置加上由  $F_{br}^*$  产生的力见图 1,计算简图及结果(剪力、弯矩、挠度)见图 5。

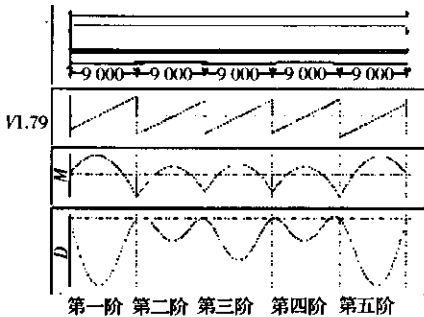


图 4 未考虑隅撑作用

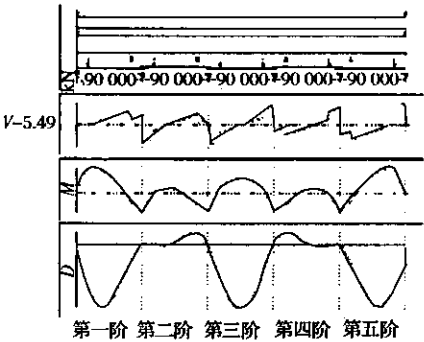


图 5 考虑隅撑作用

3)檩条计算两种结果的比较见表 2。

檩条刚度计算:在隅撑支撑点的位置加一竖向单位力,求得挠度值  $f$ ,即檩条的刚度  $1/f$  与屋面梁受压翼缘稳定所需的刚度  $[1/\beta_L^*]$  作比较(具体计算略)。

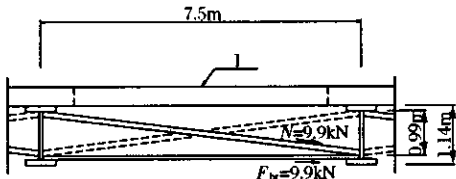
根据上述计算结果,再进行以下判断:

1 )假如隅撑本身不能满足要求 ,加大其截面尺寸即可。

2 )假如连接螺栓验算不够 ,则采用高强度螺栓 ,但一般不加大螺栓直径 ,以便安装。

3 )假如檩条既不能满足强度要求 ,也不能满足刚度要求 ,那必须加大檩条截面( 但必须在图纸上表达清楚特殊规格檩条的位置 ,或者在这些位置附加檩条 ,或者不考虑檩条承担而直接增加压杆 ,如方管或圆管 )。

4 )利用拉杆支撑系统如图 6。



1 - 屋面檩条  
图 6 拉杆支撑

对于大多数工程 ,相关的荷载比较小 ,小直径的圆钢就能满足强度要求 ,强度可进行估计。如  $\phi 12$  ( 35 号优质碳素钢 ) 的允许承载力为 20.77kN ,就能抵抗拉杆 ( 9.9kN )。

摇摆支撑的刚度计算 :

( 上接第 426 页 )

当荷载作用位置分段太多时 ,理论求解方法过于繁杂了 ,利用有限元程序来求解受弯构件的临界弯矩

$$\beta = \frac{A_{BR} E L_B^2}{(L_B^2 + L_C^2)^{3/2}} = \frac{2620 \text{ kN/m}}{[\beta_L^*]} = 649.7 \text{ kN/m}$$

这个实例也说明 ,利用标准的圆钢支撑一般很少超过  $\phi 12$ 。从经济的角度看 ,增加 X 型  $\phi 12$  的圆钢支撑与主刚架的费用相比几乎是微乎其微的。虽然只是在某些特殊的位置安装这些圆钢支撑 ,但结构的安全性却得到了大大的提升 ,而且安装简单方便。

### 3 结 论

对于一般的轻型门式刚架 ,通过设置隅撑来保证屋面梁受压下翼缘的平面外稳定 ,经多年的工程实践已经被证明是一种行之有效的构造措施 ;但对于大跨度的门式刚架 ,经过上述的阐述可知 ,如果仍采用这一措施则很难达到预期的效果 ,结构的安全性和可靠性也难以得到有效保证 ,而摇摆支撑的设置则能很好地解决这一问题。

### 参考文献

- 1 CECS 102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程
- 2 American Institute of Steel Construction ,INC. Load and Resistance Factor Design - LRFD. USA 2003
- 3 钢结构设计手册编辑委员会 , 钢结构设计手册 , 北京 : 中国建筑工业出版社 2004

中的系数是种行之有效的方法。除此之外 ,在理论方法求解多侧向支撑梁的完全支撑刚度和支撑强度陷入困难时 ,FEM 的利用也可以起到事半功倍的效果。

表 8 临界弯矩系数

荷载	弯矩图	最大弯矩	端部侧扭约束条件	系数			
				$\mu_y$	$\mu_w$	$\beta_1$	$\beta_2$
		1	简支	1.0	1.09	0.50	0.45
		6	固定	0.5	0.93	0.34	0.57
		1	简支	1.0	1.18	0.46	0.50
		6	固定	0.5	1.01	0.32	0.60
		3	简支	1.0	1.12	0.48	0.49
		20	固定	0.5	0.96	0.32	0.61
		1	简支	1.0	1.13	0.46	0.53
		8	固定	0.5	0.97	0.29	0.98

### 参考文献

- 1 Wang Y C. Ultimate Strength Analysis of Three - Dimensional Braced I - Beams. [ PhD Thesis ] Sheffield: University of Sheffield ,1988
- 2 Rajasekaran S , Murray D W. Finite Element Solution of Inelastic Beam Equations. Journal of Structural Division ,ASCE ,1973 ,99

- ( ST6 )
- 3 陈 骥. 钢结构稳定理论与设计. 北京 : 科学出版社 2001
- 4 吕烈武、沈世钊、沈祖炎 ,等 . 钢结构构件稳定理论 . 北京 : 中国建筑工业出版社 ,1983
- 5 严剑松 . 两端铰接的楔形杆的平面外稳定 [ 硕士学位论文 ]. 杭州 : 浙江大学 ,2004