

文章编号:1671-6833(2003)01-0016-04

门式刚架轻钢结构平面内整体稳定分析中的几个问题

李 天, 张 哲, 刘朝宏

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对现行规程对于轻型门式刚架钢结构稳定设计中存在的不足, 用有限元法进行了平面内整体稳定研究. 提出了无侧移刚架的整体稳定的计算长度系数, 讨论了在非对称作用下轻型门式刚架结构平面内整体稳定性, 研究了主弯矩对于轻型门式刚架的影响, 给出了轻型门式刚架平面内整体稳定的计算公式. 研究结果可作为轻型门式刚架钢结构稳定设计的参考.

关键词: 轻钢结构; 门式刚架; 稳定性; 计算长度

中图分类号: TU 311.2 **文献标识码:** A

0 引言

轻型门式刚架钢结构是我国近年来才引进的一种结构形式, 在这种结构体系中, 杆件一般均采用变截面实腹 I 字形截面, 如图 1 所示, 有单跨、双跨、多跨刚架等形式. 轻型门式刚架结构, 由于构件一般较细长、组成构件的板件又比较纤薄, 故保证其稳定性显得尤为重要. 一般在设置合理的

系杆或支撑后, 刚架的平面外稳定性较容易得到满足, 而平面内的稳定性则更加重要. 1999 年, 我国颁布了轻型门式刚架结构的设计规程^[1], 但关于这种结构的一些分析方法并不是很完整. 如缺少无侧移刚架的整体稳定性, 以及主弯矩对刚架平面内整体稳定的影响等. 本文将针对上述这些问题进行研究.

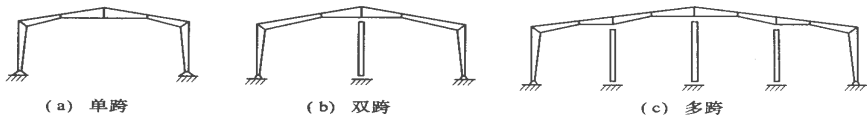


图 1 轻型门式刚架结构

Fig. 1 Light weight buildings with gabled frames

对于门式刚架结构来说, 它是由各个杆件组成的一个整体. 当一个杆件发生失稳变形后, 它必然牵动和它连接的其它杆件. 据此, 杆件的稳定性不能就某一根杆件去孤立地分析, 而应当考虑其它杆件对它的约束作用, 这种约束作用在结构的稳定分析中体现为整体性问题. 然而, 目前在设计各种钢框架结构时是通过计算柱子的稳定性来代替框架的稳定性. 这样将结构的整体稳定割裂为单个构件的稳定, 就不能全面反映结构构件间的相互作用. 目前的计算方法只是一种简化的设计方法, 这种简化只是在符合一定条件下才是准确的, 仅研究柱子的稳定性并不能确切反映刚架的

整体稳定状况. 通过有限元法对刚架进行整体稳定分析, 来确定刚架平面内整体稳定具有现实意义^[2,3].

1 分析方法简述

本文采用矩阵位移法作为轻型门式刚架平面内整体稳定的分析方法. 在分析中, 采用基本假定:

- (1) 材料为理想线弹性体;
- (2) 轴向力由弹性分析确定, 构件或结构在由直变弯的屈曲过程中, 轴向力保持不变;
- (3) 结构上的各荷载成比例增加;

收稿日期:2002-10-31; 修订日期:2002-12-05

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金资助项目

作者简介: 李 天 (1960-), 男, 浙江省宁波市人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事钢结构等方面的研究.

(4) 构件或结构的变形是微小的.

基于上述假定,考虑结构处在微弯的临界状态,运用能量原理可以建立单元的弯曲刚度矩阵 $[K_E]^e$,选取侧向位移函数可以建立单元的几何刚度矩阵 $[K_G]^e$.由平衡条件,可以建立起结构系统结点力 $\{F\}$ 与结点位移 $\{\Delta\}$ 之间的关系:

$$\{F\} = ([K_E] + [K_G]) \{\Delta\} \tag{1}$$

式中 $[K_E]$ 和 $[K_G]$ 分别为结构的整体弯曲刚度矩阵和几何刚度矩阵.

由于方程 (1) 为齐次方程,要使方程有解,则应满足

$$[K_E] + [K_G] = 0 \tag{2}$$

可见对于式 (1) 齐次方程,需要求解方程的特征值.在假定一组外荷载 $\{F^*\}$ 条件下,可以得到相应的几何刚度矩阵 $[K_G^*]$,从而可以得到结构屈曲的特征方程:

$$[K_E] - \lambda [K_G^*] \{\Phi^*\} = 0 \tag{3}$$

式中: λ 是特征值; $\{\Phi^*\}$ 是特征向量.

记最小特征值为 λ_1 , 相应的特征向量为 $\{\Phi_1\}$. $\{\Phi_1\}$ 将给出屈曲模态, λ_1 用来确定临界荷载 $\{F_{cr}\}$, 则临界荷载为

$$\{F_{cr}\} = \lambda_1 \{F^*\} \tag{4}$$

应用一般求特征值的方法,即可求出结构的临界荷载^[3].对变截面梁元,单元弯曲刚度矩阵与等截面不同.注意到在线弹性稳定问题中,对刚度矩阵的影响来自杆长,而与材料的特性无关.因此,变截面梁元的几何刚度矩阵不随截面的变化而变化,仅取决于单元的长度.

2 无侧移刚架柱的计算长度系数

对于门式刚架,在计算刚架平面内的整体稳定时,变截面柱的计算长度系数无法用具有显式的解析解表达,常用计算长度系数表来反应.但在当前的设计规程中没有给出无侧移刚架的计算长度系数^[1].这样在实际工程中遇到无侧移刚架时,就无法设计.本文对图 1(a) 所示柱顶无侧移楔形柱的单跨门式刚架,根据实际工程中常见的契率和变截面两端的刚度比值范围(取 $\gamma=0\sim4, n=2.1\sim2.4, I_{c1}/I_{c0}=1\sim50$.),应用有限元程序计算,给出类似规范^{1,4]} 的无侧移变截面刚架柱的计算长度系数如表 1 所示.

表 1 柱脚铰接无侧移刚架楔形柱平面内稳定计算长度系数 μ_y

Tab. 1 Calculating length factors of tapered column with pinned end (horizontal displacement)

I_{c1}/I_{c0}	K						
	0.1	0.2	0.3	0.75	1.0	2.0	10.0
50.0	0.318	0.308	0.300	0.278	0.272	0.257	0.240
33.3	0.361	0.349	0.341	0.316	0.308	0.291	0.272
20.0	0.420	0.408	0.399	0.370	0.361	0.340	0.315
14.3	0.465	0.453	0.442	0.411	0.401	0.377	0.348
10.0	0.519	0.505	0.494	0.460	0.448	0.422	0.387
6.67	0.583	0.569	0.557	0.519	0.506	0.475	0.435
5.00	0.633	0.618	0.606	0.566	0.552	0.518	0.472
1.50	0.883	0.867	0.852	0.803	0.782	0.734	0.658
1.00	0.981	0.964	0.949	0.896	0.875	0.820	0.732

3 非对称荷载下变截面门式刚架的临界荷载

在实际工程中,刚架所作用的各种荷载往往并不是对称荷载,但在进行刚架的整体稳定计算中,一般均考虑为所有柱同时失稳,这样实际将刚架所作用的荷载当作对称荷载来处理,这与实际刚架的受力是不相同的.作为分析实例,实际刚架下数,长度系数,本文利用变截面门式刚架平面内稳定有限元程序^[3],对图 2 所示刚架在非对称荷载下的平面内整体稳定进行分析.计算中取: $H=6\text{ m}, L=18\text{ m}$; 屋面坡度 $i=1/9$, 斜梁分段参数 α

$=1/3$; 梁、柱采用焊接工字截面,翼缘板均为 $250\text{ mm}\times10\text{ mm}$,腹板 6 mm ; 楔形柱截面高 $300\sim600\text{ mm}$,梁高在截面变化处分别为 $600, 300, 600\text{ mm}$. β_1, β_2 分别是竖向和水平荷载比例系数.取初始荷载 $P=100\text{ kN}$,并设荷载参数 $\lambda=P_{cr}/P$,为刚架整体失稳临界荷载与初始荷载的比值.不同 β_1, β_2 组合下的刚架平面内稳定有限元计算结果如表 2 所示.

表 2 的计算结果表明,柱的实际计算长度不仅与结构的约束条件有关,还与荷载条件有关.荷载作用方式不同,刚架的稳定状况也就不同.计算结果表明,柱间支援的存在对刚架的稳定起有利

表 2 非对称荷载作用下变截面门式刚架的稳定参数 λ

Tab .2 Stability parameters λ of portal frame under unsymmetrical loading

β_1	β_2						
	0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.1	39.181	37.789	37.511	36.958	36.395	35.820	35.235
0.2	36.056	34.693	34.452	33.977	33.493	33.002	32.503
0.3	33.372	32.033	31.824	31.411	30.993	30.569	30.138
0.4	31.046	29.727	29.544	29.183	28.818	28.449	28.075
0.5	29.014	27.711	27.549	27.232	26.911	26.587	26.259
0.6	27.224	25.935	25.792	25.511	25.227	24.940	24.651
0.7	25.636	24.360	24.233	23.982	23.729	23.475	23.218
0.8	24.220	22.953	22.840	22.616	22.390	22.162	21.932
0.9	22.949	21.691	21.589	21.388	21.184	20.979	20.773
1.0	21.803	20.551	20.461	20.279	20.095	19.910	19.723

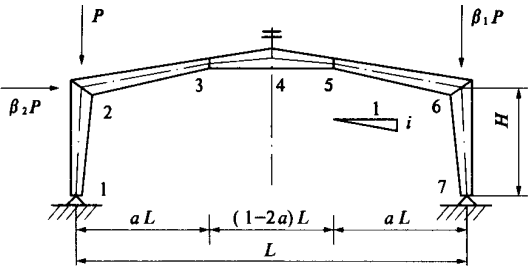


图 2 非对称荷载下门式刚架

Fig .2 Portal frame under unsymmetrical loading

的作用:不计水平荷载影响时, $\beta_1=1.0$ (两柱之间不存在支援作用) 和 $\beta_1=0.5$ (柱间支援作用较大) 时刚架整体失稳临界荷载最大相差可达 35%。另外,水平荷载对单层门式刚架失稳的不利影响并不十分强烈,这是因为 $P-\Delta$ 效应主要对层数多而侧向刚度小的刚框架作用较为显著。

4 主弯矩对门式刚架稳定的影响

实际工程中的刚架的受力形式是很复杂的,既有集中荷载,也有作用在横梁上的分布荷载,还有作用在刚架侧向的风荷载等.在这些荷载的共同作用下,将导致刚架在屈曲前已经产生弯曲变形,刚架梁、柱已存在弯矩,即刚架的平面内整体稳定是具有主弯矩作用的稳定问题.在一般刚架稳定分析中,认为主弯矩的影响可以忽略.而对于门式刚架,屋面横梁往往具有一定坡度,这使得横梁内轴力效应比一般刚架要大.这里采用有限元法对门式刚架进行稳定分析,研究主弯矩的影响.

以图 2 所示典型单跨对称刚架为例,刚架跨度及高度分别为 $L=18\text{ m}$, $H=6\text{ m}$, $\alpha=1/3$, Q235 钢.梁、柱均采用工字截面,翼缘板 $200\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,腹板 5 mm ,柱截面高 $h=300\sim 600\text{ mm}$ (楔率 $\gamma=1.0$).屋面坡度 i 分别取 $0, 1/24, 1/12, 1/6, 1/3$;斜梁在 2,3,4 节点处的截面高度分别取表 3

中五种值.

表 3 梁截面高计算值

Tab .3 Calculating height of beams mm

截面位置	截面高工况				
	A	B	C	D	E
2	600	600	450	450	250
3	600	450	450	300	250
4	600	600	450	450	250

荷载工况为两种:承受屋面均布荷载 q ;承受柱顶等效集中荷载 $qL/2$.两种荷载工况下刚架柱以小头截面(截面惯性矩为 I_{c0}) 为准的计算长度系数为 μ_1, μ_2 ,根据等效屈曲原则,刚架平面内失稳荷载临界荷载分别为

$$P_{cr1}=\frac{\pi^2EI_{c0}}{(\mu_1H)^2},P_{cr2}=\frac{\pi^2EI_{c0}}{(\mu_2H)^2}\tag{6}$$

本文在计算 P_{cr1} 时假定随着均布荷载 q 的增加,变截面柱和斜梁的轴向力是成比例增加的.实际上斜梁轴力要比柱中轴力增加得快,它们之间表现为非线性关系,但因刚架有侧移屈曲失稳时临界荷载不是很大,所以这种非线性关系并不十分明显.

不同坡度(i 表示) 与梁柱线刚度比(以变截面梁高 h_b 表示) 的有限元计算结果如表 4 所示.

图 3 为两种荷载工况下刚架失稳临界荷载的比较.由图可以很直观地看到,随着屋面坡度 i 的增加以及梁柱线刚度比值的减小, P_{cr1}/P_{cr2} 将变小.也就是说,屋面均布荷载作用下的主弯矩对刚架稳定的不利影响增大.图 3 还表明,主弯矩使刚架失稳的作用对梁柱线刚度比大小的反应要比对屋面坡度的反应强烈: K 值相同时,由屋面坡度不同引起的临界荷载比值的变化一般在 5% 以内;而对同一屋面坡度,由 K 改变引起的临界荷载比值变化可达 12%,而主弯矩引起刚架失稳荷载的

表 4 考虑主弯矩影响的稳定计算长度系数
Tab .4 Calculating length factors under the impact of principal moment

i	A		B		C		D		E	
	μ_1	μ_2	μ_1	μ_2	μ_1	μ_2	μ_1	μ_2	μ_1	μ_2
0	1.518	1.499	1.619	1.583	1.824	1.775	2.077	1.974	3.062	2.897
1/24	1.520	1.500	1.623	1.584	1.828	1.776	2.084	1.975	3.072	2.898
1/12	1.522	1.501	1.626	1.584	1.832	1.777	2.091	1.976	3.083	2.900
1/6	1.527	1.502	1.634	1.587	1.842	1.780	2.108	1.980	3.109	2.908
1/3	1.541	1.511	1.651	1.597	1.869	1.794	2.152	1.999	3.176	2.940

降低可以达到近 15%，从计算结果也可以看出，当屋面坡度较大时，如 1/10000，主弯矩的影响较大，而坡度较小时，这种影响相对较小。同时这种影响也与梁柱本身的长细有关，当长细比较小时，影响较大，反之影响较小。

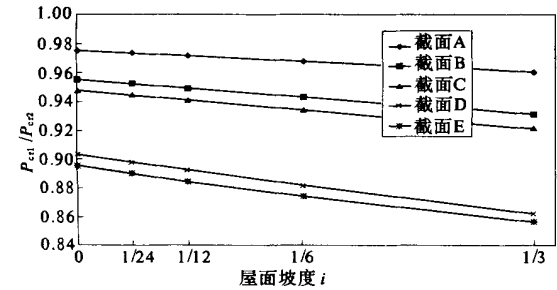


图 3 横向荷载与柱顶荷载下刚架失稳荷载比较
Tab .3 Comparison of portal frame instability under column top loading and transverse load

5 结论

本文在对于现行门式刚架轻型钢房屋结构技术规程分析的基础上，应用有限元方法，进行了刚架平面内整体稳定研究。通过大量分析计算表明：

(1) 实际刚架在非对称荷载作用下，对于刚

架的整体稳定具有较大的影响。将实际刚架处理为对称荷载，将低估了刚架的整体稳定性。

(2) 轻型门式刚架在主弯矩的作用下使得刚架的平面内整体稳定性降低，屋面坡度的大小对于刚架的整体稳定有较大的影响。当屋面的坡度以及梁柱的长细比较大时，主弯矩的影响不能忽略。

(3) 本文给出的无侧移刚架平面内整体稳定的计算长度系数和有侧移刚架柱平面内整体稳定的计算公式可供设计人员参考。

参考文献：

[1] CECS 102:98, 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程 [S] .
[2] 轻型钢结构设计手册编委会. 轻型钢结构设计手册 [M] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
[3] 李 峰, 顾 强. 楔形变截面单跨门式刚架柱计算长度分析[J] . 西安建筑科技大学学报, 2000, 32(3) : 256~259.
[4] GBJ 18—87, 冷弯薄壁型钢结构技术规程 [S] .
[5] 刘朝宏, 李 天. 轻型门式刚架结构平面内稳定系数计算[J] , 郑州工业大学学报, 2001, 22(2) : 73~76.

Discussion on the Calculation of in-plane Stability of Light-weight Portal Frame

LI Tian , ZHANG Zhe , LIU Chao -hong

(College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Some problems are discussed about the in-plane stability designing of light-weight portal frame in current code of China . By means of the finite element method , the calculating formula of in-plane elastic stability of portal frame is suggested . The global stability under asymmetrical loads is discussed . The stability performance of the portal frame under the impact of principal moment is studied in this paper .

Key words : light-weight steel structure ; portal frame ; stability ; calculating length