

考虑桁架刚度的温室结构风载效应分析方法

蒋秀根 剧锦三 张丽莉

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要 基于位移法,在考虑桁架下弦实际刚度的基础上,提出温室结构排架柱折算刚度的概念及计算公式,给出了风荷载作用下温室结构内力和变形计算的精确方法和公式。通过近似方法、本文方法和有限元方法的对比分析,对影响温室风荷载效应的主要因素:温室桁架下弦杆截面刚度、温室的跨数进行了讨论,结果表明:提出的计算公式与有限元计算结果符合较好;拱架变形对排架内力有明显影响,工程中不能完全将拱架简化为无限刚度横梁;当连栋温室横梁轴向刚度与中间柱的抗侧刚度之比小于 $1\ 500\ \text{mm}^{-2}$ 或跨数大于 8 时应考虑横梁变形的影响。

关键词 温室; 结构分析; 刚度

中图分类号 TU 311.1

文章编号 1007-4333(2005)06-0070-05

文献标识码 A

Analytical method for wind load effect on greenhouse structure considering of truss deformations

Jiang Xiugen, Ju Jinsa, Zhang Lili

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract With the consideration of the actual stiffness of bottom chords of a truss and based on the displacement method, an accurate method as well as its corresponding formulations for a greenhouse structure analysis under wind load were presented and a concept of the equivalent stiffness of greenhouse structure was brought forward. By comparing the presented method with the approximate method and the finite element method, the main influencing factors of wind load, section stiffness of bottom chords of greenhouse trusses and the span number of a greenhouse was investigated. We concluded that the calculated results from the method presented in this paper and the FEM coincided well; the deformation of truss had a great influence to the inner force of the frame; the truss could not be considered an infinite stiffness transverse beam; the influence of the deformation of a truss should be considered in engineering design when the number of span was more than eight or the stiffness ratio of the beam and column was less than $1\ 500\ \text{mm}^{-2}$.

Key words greenhouse; structural analysis; stiffness

工业与民用建筑结构中排架的桁架或横梁刚度较大,计算时通常将屋面桁架(拱架)简化为刚度无限大的横梁^[1-2],采用柱顶位移相等假设,用位移法或剪力分配法计算排架的内力和变形。农业建筑中的温室结构一般由柱、桁架或拱架以及支承结构组成,在结构分析中一般也是将其简化为由柱和“横梁”组成的平面排架结构^[3],计算其在永久荷载、风荷载及雪荷载作用下的内力及位移。

温室结构自重较轻,某些地区雪荷载亦较小,风

荷载就成为主要荷载。由于桁架的刚度较小,在风荷载作用下,桁架下弦杆承受轴压力传递的荷载,其轴向压缩变形较大,随着排架跨数的增加,排架柱的剪力明显递减。

对于温室结构,如果计算时仍参照工业与民用建筑结构的计算方法,将产生很大误差,其中结构整体的抗侧刚度偏大,中柱计算内力偏大,边柱计算内力偏小,给结构安全带来隐患。针对连栋温室的特点,笔者提出了基于位移法的考虑横梁有限刚度的

收稿日期: 2005-04-09

基金项目: 国家重大科技项目(2002BA906A17-3)

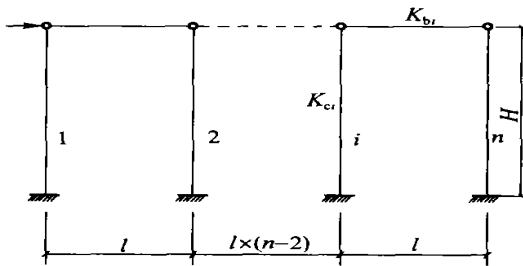
作者简介: 蒋秀根,副教授,主要从事结构工程方向的研究;剧锦三,副教授,通讯作者,主要从事结构稳定和断裂研究, E-mail: jujinsan@tsinghua.org.cn

内力和位移分析精确计算方法。

1 柱顶集中力下弹性横梁连接排架内力及位移

1.1 结构简化与计算简图

n 跨连栋温室由 $n+1$ 根柱和 n 个连接柱的桁架(或拱架)组成,在风荷载作用下,桁架下弦承受全部轴压力,风荷载作用下的温室可简化成由 $n+1$ 根柱和 n 个横梁组成的排架,其计算简图见图 1。

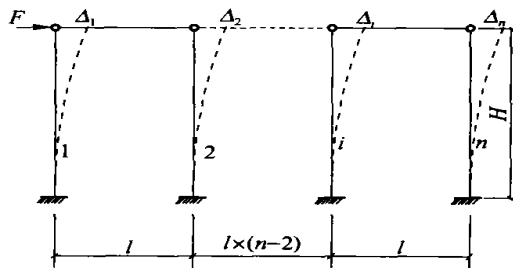


F 为作用于温室结构上的风荷载(下图同); K_{ci} 为 i 柱的抗侧刚度; K_{bi} 为第 i 跨排架横梁的轴向刚度; l 为温室结构跨度; H 为温室结构柱高度

图 1 风荷载作用下温室结构计算简图

Fig. 1 Simplified model of greenhouse structures

风荷载作用下,连栋温室发生侧向位移,当横梁刚度有限时,各柱柱顶位移不等,结构的位移形式见图 2。



Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_i 、 Δ_n 分别为 1 柱、2 柱、 i 柱、 n 柱的柱顶位移

图 2 温室结构风荷载作用下的柱顶位移

Fig. 2 Displacement at top-column of greenhouse under wind load

1.2 基本方程

1.2.1 几何方程

1) 柱位移关系。假定柱顶在集中力作用下,各柱柱顶位移依次为 Δ_1 、 Δ_i 、 Δ_{n+1} , 柱顶位移衰减系数 λ_i 可定义为

$$\lambda_i = \frac{\Delta_i}{\Delta_{i-1}} \quad (1)$$

2) 排架横梁变形计算。集中力作用下排架 i 横

梁的压缩变形 l_i 可定义为

$$l_i = \Delta_i - \Delta_{i+1} \quad (2)$$

1.2.2 刚度方程^[4]

i 柱抗侧刚度 K_{ci} 可定义为

$$K_{ci} = V_{ci} / \Delta_i \quad (3)$$

式中: V_{ci} 和 Δ_i 分别为 i 柱柱顶剪力和柱顶位移。根据柱刚度定义(3)可得绞结排架柱的实际刚度

$$K_{ci} = 3 EI_{ci} / H^3$$

式中: EI_{ci} 为柱抗弯刚度, H 为排架柱高度。由式(3),对 i 柱有

$$V_{ci} = K_{ci} \cdot \Delta_i \quad (4)$$

排架横梁的轴向刚度 K_{bi} 可定义为

$$K_{bi} = N_{bi} / l_i \quad (5)$$

根据横梁刚度定义(5)可得 i 横梁的轴向刚度

$$K_{bi} = EA_{bi} / l$$

由式(2)和(5),对 i 横梁有

$$N_{bi} = K_{bi} (\Delta_{i-1} - \Delta_{i+1}) \quad (6)$$

式中: N_{bi} 为 i 跨横梁轴力; l_i 为 i 横梁压缩变形值; EA_{bi} 为 i 横梁轴向刚度; l 为排架跨度。

1.2.3 平衡方程

对 i 柱,根据柱顶平衡条件,有

$$V_{ci} = N_{bi-1} - N_{bi} =$$

$$K_{bi-1} (\Delta_{i-1} - \Delta_i) - (1 - \lambda_{i+1}) K_{bi} \Delta_i \quad (7)$$

由整体平衡条件,有

$$F = V_{ci} \quad (8)$$

1.2.4 柱顶位移及柱顶位移衰减系数

由式(2),对 $n+1$ 柱,有

$$\Delta_{n+1} = \Delta_n - l_n = \Delta_n - \frac{N_{bn}}{K_{bn}} =$$

$$\Delta_n - \frac{V_{cn+1}}{K_{bn}} = \Delta_n - \frac{K_{cn+1} \cdot \Delta_{n+1}}{K_{bn}}$$

可得

$$\Delta_{n+1} = \frac{K_{bn}}{K_{cn+1} + K_{bn}} \Delta_n \quad (9)$$

同时有

$$\Delta_{n+1} = \frac{K_{bn}}{K_{cn+1} + K_{bn}} \Delta_n \quad (10)$$

同理可以推导柱的柱顶位移 Δ_i 和衰减系数 λ_i 。联合求解式(4)和(7),可得 i 柱的柱顶剪力

$$K_{ci} \Delta_i = K_{bi-1} (\Delta_{i-1} - \Delta_i) - (1 - \lambda_{i+1}) K_{bi} \Delta_i \quad (11)$$

由式(11),可得 λ_i 及 Δ_i ,

$$\lambda_i = \frac{K_{bi-1}}{K_{ci} + K_{bi-1} + (1 - \lambda_{i+1}) K_{bi}} \Delta_{i-1} = \lambda_{i-1}$$

$$(i=2,3,\dots,n) \quad (12)$$

其中

$$i = \frac{K_{bi-1}}{K_{ci} + K_{bi-1} + (1 - i_{i+1}) K_{bi}} \quad (i=2,3,\dots,n) \quad (13)$$

各柱柱顶位移: 1柱为 v_1 ; 2柱为 v_2 , $v_2 = v_1$;

$$i = i_{i-1} = \prod_{j=2}^i j_{j-1} = \prod_{j=2}^i K_{ci-1} \quad (i=2,3,\dots,n+1) \quad (14)$$

式中: $i_1 = 1$; K_{ci} 可定义为 i 柱的等效刚度系数,

$$K_{ci} = \prod_{j=2}^i j_{j-1} \quad (i=2,3,\dots,n+1)。根据柱刚度定义$$

将其代入式(4),有

$$V_{ci} = K_{ci} K_{ci-1} \quad (i=2,3,\dots,n+1) \quad (15)$$

将式(15)代入式(8),可以得到 1柱的位移

$$v_1 = \frac{F}{K_{c1} + v_2 K_{c2} + \dots + K_{ci} K_{ci} + \dots + K_{cn+1} K_{cn+1}} \quad (16)$$

1.3 柱顶剪力及柱底弯矩

根据柱的刚度定义可得 i 柱的柱顶剪力

$$V_{ci} = \frac{K_{ci} K_{ci}}{K_{c1} + v_2 K_{c2} + \dots + K_{ci} K_{ci} + \dots + K_{cn+1} K_{cn+1}} \cdot F \quad (17)$$

柱底弯矩

$$M_{ci} = V_{ci} \cdot H$$

2 排架刚度

2.1 横梁刚度

纵向集中荷载作用下温室排架结构横梁通常为:1)绞结桁架,桁架上弦杆及腹杆不承受力的作用,此时桁架的纵向刚度即为桁架下弦杆的轴向刚度;2)有部分刚结效应的拱架结构,拱架上弦拱的抗弯刚度远小于下弦杆的轴向刚度,因而几乎不参与受力,腹杆为二力杆不受力,计算时拱架的横向刚度可近似取为拱架下弦杆的纵向刚度。

2.2 排架等效抗侧刚度

i 柱的等效刚度 K_{cei} 可定义为

$$K_{cei} = K_{ci} K_{ci}$$

由式(16)和(17)可得

$$v_1 = \frac{F}{\prod_{i=1}^{n+1} K_{cei}} \quad (18)$$

$$V_{ci} = \left[\frac{K_{cei}}{\prod_{i=1}^{n+1} K_{cei}} \right] F = (K_{cei} / K_F) F$$

其中 $K_F = \prod_{i=1}^{n+1} K_{cei}$ 为排架总刚度。

3 风荷载作用下温室结构内力与变形计算方法

风荷载作用下温室结构内力和变形的计算步骤为:

- 1) 计算各柱及各跨横梁刚度;
- 2) 计算右边柱位移衰减系数;
- 3) 逆向依次计算中柱位移衰减系数;
- 4) 计算各柱等效刚度及排架等效刚度;
- 5) 将各柱柱顶加水水平约束支承,计算无侧移排架各柱内力及柱顶支承反力;
- 6) 将柱顶支承反力的合力反向加于柱顶,按照等效刚度进行剪力分配,计算柱顶位移、柱顶剪力及柱底弯矩;
- 7) 叠加内力得到结构在风荷载下的内力。

4 本文计算方法的讨论

以华北型连栋温室为例,分析本文中提出的计算方法的精度与必要性,温室结构计算简图见图3。

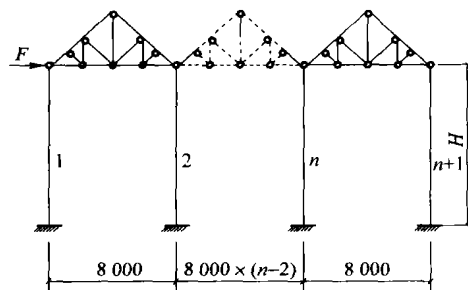


图3 连栋温室结构计算简图

Fig. 3 Simplified model of a Huaber-type greenhouse structure

4.1 本文计算方法的精度分析

为验算本文中提出的分析方法的计算精度,分别采用 Ansys 计算软件和本文方法对华北型连栋温室结构^[5]进行计算,重点分析比较边柱位移与刚度,计算结果见表1。温室参数:跨度 8 m,柱高 3 m,边柱截面为方空矩形 50 × 100 × 2.5,中柱截面为 $\phi 60 \times 3.5$,横梁截面分别为 $\phi 40 \times 1.5$,柱顶集中力 $F = 1$ kN,跨数 3 ~ 15(工程当中 10 跨以下者居多)。从表 1 可以看出,本文方法与 FEM 分析结果符合较好,说明本文中建立的公式合理、可行。

4.2 横梁变形对内力影响的分析

某连栋温室跨数 10,跨度 8 m,柱高 4 m,柱截

表 1 本文方法与 FEM 分析结果

Table 1 Calculated results from the method in this paper and the FEM

跨数	FEM 分析			本文方法
	1 柱顶 位移/mm	n+1 柱顶 位移/mm	n+1 柱等效 刚度系数 k_i	n+1 柱等效 刚度系数 k_i
3	18.36	18.13	0.987	0.987
4	16.71	16.36	0.979	0.979
5	15.35	14.90	0.971	0.971
6	14.22	13.65	0.960	0.960
7	13.26	12.59	0.949	0.949
8	12.45	11.66	0.937	0.937
9	11.74	10.85	0.924	0.924
10	11.13	10.14	0.911	0.911
11	10.59	9.50	0.897	0.897
12	10.12	8.93	0.882	0.882
13	9.70	8.41	0.867	0.867
14	9.33	7.94	0.851	0.851
15	9.00	7.51	0.834	0.835

面 $\phi 60 \times 3.5$, 桁架下弦截面 $\phi 40 \times 1.5$ 。采用本文方法计算得到的柱顶集中力 $F = 1 \text{ kN}$ 时各柱的变形与剪力见表 2。可以看出, 实际工程中柱剪力、柱顶位移随离荷载距离的增大而减小, 在风荷载作用下对于离边柱较近的柱子, 按横梁刚度无穷大处理将会偏于不安全, 所以在柱子设计时应该按横梁实际刚度计算。

表 2 本文方法与近似方法计算结果

Table 2 Calculated results from the method in this paper and the approximate method

柱编号	柱剪力/N		柱顶位移/mm		k_i
	横梁刚度无穷大	考虑拱架变形	横梁刚度无穷大	考虑拱架变形	
1	91.1	92.5	37.86	38.51	1.000
2	91.1	92.1	37.86	38.32	0.995
3	91.1	91.7	37.86	38.14	0.990
4	91.1	91.3	37.86	37.99	0.986
5	91.1	91.0	37.86	37.85	0.983
6	91.1	90.7	37.86	37.74	0.980
7	91.1	90.4	37.86	37.64	0.977
8	91.1	90.3	37.86	37.56	0.975
9	91.1	90.1	37.86	37.50	0.974
10	91.1	90.0	37.86	37.47	0.973
11	91.1	89.9	37.86	37.45	0.972

5 工程应用与分析

5.1 温室跨数的影响

某连栋温室跨度 8 m, 柱高 3 m, 边柱截面为方空矩形 $50 \times 100 \times 2.5$, 中柱截面为 $\phi 60 \times 3.5$, 横梁截面分别为 $\phi 40 \times 1.5$ 。计算得到的各柱等效刚度系数见图 4。

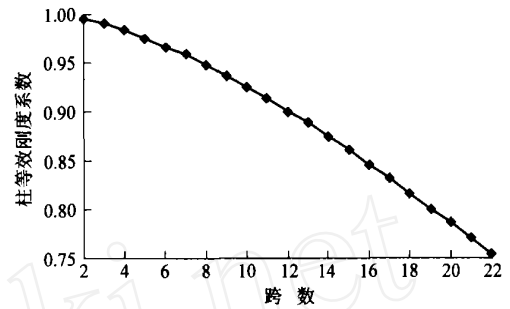


图 4 温室跨数对柱等效刚度系数的影响

Fig. 4 Influence of span number to equivalent stiffness coefficient (ESC) of a column

考虑到工程中计算方法的便易性要求及不超过 5% 的允许误差, 由图 4 可以看出: 当跨数 $n < 8$ 时, 排架的位移和内力计算可不考虑拱架变形的影响; 当跨数 $n \geq 8$ 时, 排架的位移和内力计算必须考虑拱架变形的影响。

5.2 横梁截面的影响

1) 截面管壁厚度的影响。某连栋温室, 跨度 8 m, 柱高 3 m, 边柱截面为方空矩形 $50 \times 100 \times 2.5$, 中柱截面为 $\phi 60 \times 3.5$, 横梁截面分别为 $\phi 40 \times 1.5$ 、 $\phi 40 \times 2.0$ 、 $\phi 40 \times 2.5$, 计算横梁截面不同时柱等效刚度系数, 结果见图 5。可以看出, 管壁厚度对等效刚度系数有很大影响, 管壁越厚, 等效刚度系数越大, 跨数越多厚度的影响越明显。

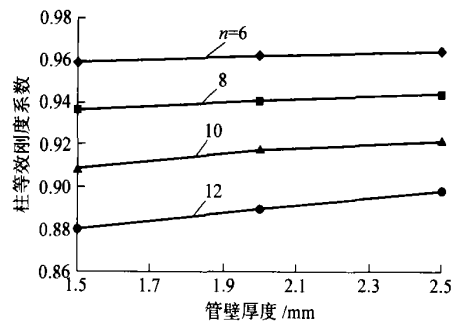


图 5 横梁管壁厚度对柱等效刚度系数的影响

Fig. 5 Influence of thickness of transverse beam section to ESC of a column

2) 截面钢管直径的影响。一连栋温室, 跨度 8

m,柱高3 m,边柱截面为方空矩形 $50 \times 100 \times 2.5$,中柱截面为 $\phi 60 \times 3.5$,横梁截面分别为 $\phi 30 \times 2.0$ 、 $\phi 35 \times 2.0$ 、 $\phi 40 \times 2.0$ 、 $\phi 45 \times 2.0$ 、 $\phi 50 \times 2.0$,柱等效刚度系数变化情况见图6。可以看出,管径对等效刚度系数影响明显,管径越大,等效刚度系数越大;跨数越多,管径的影响越明显。

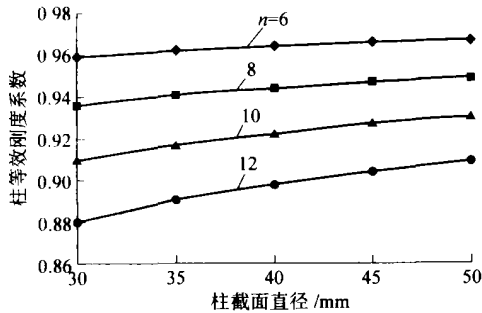


图6 横梁截面直径对柱等效刚度系数的影响
Fig. 6 Influence of diameter of transverse beam section to ESC of a column

3) 梁柱相对刚度比的影响。一连栋温室,跨度8 m,柱高3 m,边柱截面方空矩形为 $50 \times 100 \times 2.5$,中柱截面为 $\phi 60 \times 3.5$,柱顶集中力 $F = 1 \text{ kN}$ 。改变横梁截面,将横梁轴向刚度 K_b 与中间柱抗侧刚度 K_c 的比值 K_b/K_c 作为变量参数研究横梁截面变化对柱等效刚度系数的影响,结果见图7。可以看出,横梁和柱的刚度比对柱等效刚度系数起决定作用:梁柱刚度比越小,横梁变形对排架内力的影响越明显;梁柱刚度比越大,横梁变形效应越小;当梁柱刚度比 $< 1500 \text{ mm}^{-2}$ 时,横梁变形对排架内力的影响不能忽略。

6 结论

1) 本文中提出的温室结构内力与位移计算的简

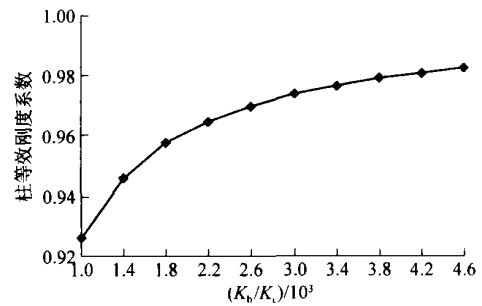


图7 柱等效刚度系数随 K_b/K_c 的变化规律
Fig. 7 Influence of stiffness ratio of a beam and a column

化方法考虑了拱架及排架的实际刚度,与有限元分析方法的计算结果符合较好。

2) 拱架变形对结构计算精度有明显影响,工程中不能完全将拱架简化为无限刚度横梁;

3) 当连栋温室横梁轴向刚度与中间柱抗侧刚度之比小于 1500 mm^{-2} 或跨数大于8时,应考虑横梁变形的影响。

参考文献

- [1] 罗福午主编. 单层工业厂房结构设计(第2版) [M]. 北京:清华大学出版社,1990. 53-70
- [2] 施楚贤主编. 砌体结构理论与设计(第2版) [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003. 231-232
- [3] 宋占军. 三连拱温室受风雪荷载时的结构计算[J]. 中国农业大学学报,1997,2(6):101-106
- [4] 龙驭球,包世华,支秉琛. 结构力学上册(第2版) [M]. 北京:高等教育出版社,1994. 360-363
- [5] 梁宗敏. 连栋温室结构抗风可靠度设计理论研究[D]. 北京:中国农业大学,2004. 36-45