

温室边柱侧向偏心支撑下的平面外稳定

齐 飞¹, 童根树^{2※}

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 生产性温室通常采用矩形钢管作为立柱, 在受力最不利的边柱外侧连接规格更小的钢管作为墙檩。实践中, 该墙檩对提高边柱的侧向稳定起到了一定作用, 但却缺乏必要的设计理论支持。该文分析了这种小钢管对矩形钢管立柱的侧向支撑作用, 分析表明, 虽然这种小钢管相对立柱的形心有偏心, 但是仍然能够对立柱提供有效的侧向支撑, 可以减小立柱的平面外计算长度。按照这个结论, 立柱在进行稳定性验算时, 平面外的计算长度可以取侧向支撑点之间的距离, 从而在保证边柱强度和稳定性、减少边柱用材的基础上, 提高边柱计算的科学性。

关键词: 温室, 稳定性, 钢管, 支撑, 边柱

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.043

中图分类号: S625

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0245-05

齐 飞, 童根树. 温室边柱侧向偏心支撑下的平面外稳定[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 245—249.

Qi Fei, Tong Genshu. Out of plane stability of greenhouse side columns with eccentrically lateral braces[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 245—249. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

生产性温室由于受高采光和低成本要求的影响, 往往采用较工业与民用建筑更加细小的截面, 因此这些细小截面的钢结构也更容易发生屈曲, 特别是温室柱作为温室的基本结构支撑, 其稳定性设计就显得尤为重要, 对生产性温室技术的可靠性和经济的合理性至关重要。

温室的立柱通常采用矩形钢管, 在受力最不利的边柱^[1]外侧, 为配合侧墙铝合金型材的安装, 需要连接规格更小的钢管作为水平墙檩。在工程实践中发现, 这些墙檩对提高边柱的平面外稳定性起到了一定作用, 但其能否作为边柱的平面外支撑点、减小立柱的平面外计算长度系数, 却一直缺乏必要的理论支持。侧向支撑对诸如温室边柱等偏心受压构件弯矩作用平面外的整体稳定计算影响很大^[2], 但目前的理论认为, 这种偏心放置在立柱外侧的横向墙檩是不能减小压杆的平面外计算长度的, 在历史上, 也发生过因为支撑杆偏心而导致的大型体育场屋盖钢结构倒塌、造成巨大损失的事故^[3-7]。而对于相对细小的温室矩形边柱, 其作为温室结构设计中的最关键部件之一, 在满荷载作用下也往往首先破坏从而造成温室的变形过大或坍塌^[8], 因此研究墙檩对边柱稳定性的影响、填补此项研究在理论分析和应用方法上的空白, 不仅可以更科学地分析其实际受力特性、减少用钢量,

对提高整个温室结构的安全性也具有很大意义。

1 偏心支撑压杆的屈曲

如图 1 所示, 两端铰支压杆的长度为 L , 承受轴力 P , 中间有一支撑杆, 截面尺寸如图 1 示, 图中及后文公式中符号的涵义及单位见表 1 (余同)。

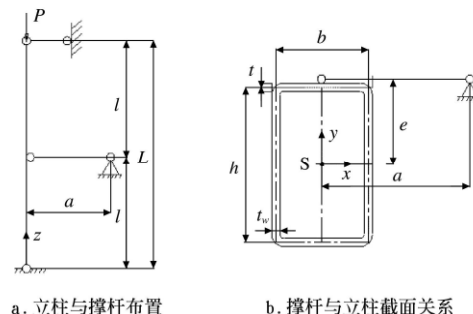


图 1 计算参数图

Fig.1 Graph of calculation parameters

表 1 常用符号表

Table 1 Legend of symbols

符号	涵义	单位
u	位移	mm
θ	扭转角	(°)
z	沿杆件高度方向 (z 轴) 上的坐标	mm
E	弹性模量	N/mm ²
I_x, I_y	截面绕 x 轴和 y 轴的惯性矩	mm ⁴
I_ω	截面翘曲惯性矩	mm ⁶
J	自由扭转常数	mm ⁴
L	压杆长度	mm
G	剪切弹性模量	mm ⁴
P	压杆轴力	N

收稿日期: 2008-11-03 修订日期: 2009-09-25

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目 (2006BAD28B07): “现代高效设施农业工程技术与示范”

作者简介: 齐 飞 (1967—), 男, 研究员, 主要从事温室结构、设备、材料和产业发展方面的研究。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院设施农业研究所, 100125. Email: qf2008@188.com

※通信作者: 童根树 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钢结构稳定理论与设计方法等的研究与应用。浙江省杭州市浙大路 38 号 浙江大学建筑工程学院, 310027. Email: tonggs@ccea.zju.edu.cn

转下页

接上页

符号	涵义	单位
a	支撑杆长度	mm
A_b	支撑杆面积	mm ²
F	支撑内力	N
e	支撑杆形心线对压杆截面形心的偏心	mm
b	截面宽度	mm
h	截面高度	mm
l	等于 $0.5L$	mm
t	截面翼缘厚度	mm
t_w	截面腹板厚度	mm
i_0	绕形心的极回转半径	mm
K	支撑杆的轴压刚度	N/mm
n	支撑的跨数	/
P_{y1}	压杆弯曲屈曲荷载, 计算长度系数 1.0	N
P_{y2}	压杆弯曲屈曲荷载, 计算长度系数 0.5	N
$P_{\omega 1}$	压杆扭转屈曲荷载, 计算长度系数 1.0	N
$P_{\omega 2}$	压杆扭转屈曲荷载, 计算长度系数 0.5	N
α_2	刚度参数	/
β_1	扭转刚度参数	/
k_y	柱弯曲刚度参数	/
k_θ	柱扭转刚度参数	/
χ	偏心影响系数, 即在因水平支撑杆的形心线不通过柱子截面的形心而使支撑效率降低的情况下, 为使支撑能够达到与中心支撑相同的效果, 支撑杆刚度必须放大的倍数	/

当轴力达到临界值时, 压杆发生弯扭屈曲而产生侧向位移 u 和绕截面剪切中心 S 的扭转角 θ , u 是压杆截面剪切中心的侧向位移, 压杆屈曲时支撑杆内产生内力 F , 在压杆截面是双轴对称的情况下, 由参考文献[9]可以得到压杆屈曲的平衡微分方程为^[9-11]

$$0 \leq z \leq l: \quad EI_y u'' + Pu = \frac{1}{2} Fz \quad (1a)$$

$$EI_\omega \theta''' + (Pi_0^2 - GJ)\theta' = \frac{1}{2} Fe \quad (1b)$$

$$l \leq z \leq L = 2l: \quad EI_y u'' + Pu = \frac{1}{2} F(2l - z) \quad (1c)$$

$$EI_\omega \theta''' + (Pi_0^2 - GJ)\theta' = -\frac{1}{2} Fe \quad (1d)$$

由式 (1a)、(1b)、(1c)、(1d) 可知, u 和 θ 可以独立求解。记 $0 \leq z \leq l$ 时的解为 u_1 和 θ_1 , $l \leq z \leq 2l$ 时的解为 u_2 和 θ_2 。利用如下条件

$$z = 0 \text{ 时 } u_1 = 0, u_1' = 0; \quad \theta_1 = 0, \theta_1' = 0;$$

$$z = l \text{ 时 } u_1 = u_2, u_1' = u_2'; \quad \theta_1 = \theta_2, \theta_1' = \theta_2';$$

$$z = 2l \text{ 时 } u_2 = 0, u_2' = 0; \quad \theta_2 = 0, \theta_2' = 0;$$

可以得到

$$u_1 = \frac{Fl}{4P} \left(\frac{z}{l} - \frac{\sin(k_y z)}{k_y l \cos(k_y l)} \right) \quad (2a)$$

$$Pi_0^2 - GJ < 0 \text{ 时 } \quad \theta_1 = \frac{Fel}{2(Pi_0^2 - GJ)} \left(\frac{z}{l} - \frac{\text{sh}(k_\theta z)}{k_\theta l \text{ch}(k_\theta l)} \right) \quad (2b)$$

$$Pi_0^2 - GJ = 0 \text{ 时 } \quad \theta_1 = \frac{Fel^3}{12EI_\omega} \left(\frac{z^3}{l^3} - 3\frac{z}{l} \right) \quad (2c)$$

$$Pi_0^2 - GJ > 0 \text{ 时 } \quad \theta_1 = \frac{Fel}{2(Pi_0^2 - GJ)} \left(\frac{z}{l} - \frac{\sin(k_\theta z)}{k_\theta l \cos(k_\theta l)} \right) \quad (2d)$$

式中 $k_y = \sqrt{P/EI_y}$, $k_\theta = \sqrt{Pi_0^2 - GJ/EI_\omega}$ 。 u_2 和 θ_2 可以在式 (2a) ~ (2d) 中将 z 替换成 $2l - z$ 得到。

记压杆跨中截面的屈曲位移为 u_2 和 θ_2 , 侧向支撑的刚度为 $K = EA_b/a$, 则有

$$F = K(u_2 + e\theta_2) \quad (3)$$

由式 (2a) ~ (2d) 求得 u_2 和 θ_2 , 代入式 (3), 约去等式两边的 F 可以得到压杆的临界方程为

$$Pi_0^2 - GJ \neq 0 \text{ 时 } \quad \frac{KL}{4P} \left(a_y - \frac{Pe^2}{Pi_0^2 - GJ} a_\theta \right) = 1 \quad (4a)$$

$$Pi_0^2 - GJ = 0 \text{ 时 } \quad \frac{KL}{4P} \left(a_y - \frac{Pe^2 L^2}{12EI_\omega} \right) = 1 \quad (4b)$$

式中

$$a_y = 1 - \frac{\tan(k_y l)}{k_y l} \quad (5a)$$

$$Pi_0^2 - GJ < 0 \text{ 时 } \quad a_\theta = 1 - \frac{\text{th}(k_\theta l)}{k_\theta l} \quad (5b)$$

$$Pi_0^2 - GJ > 0 \text{ 时 } \quad a_\theta = 1 - \frac{\tan(k_\theta l)}{k_\theta l} \quad (5c)$$

式 (4a)、(4b) 可用于详细分析偏心侧向支撑压杆的屈曲性能, 从而了解偏心情况下, 支撑杆能否有效地减小压杆的计算长度、提高压杆的临界荷载。

2 计算结果与分析

首先引入下列记号

$$\beta_1^2 = \frac{\pi^2 EI_\omega}{GJL^2} \quad (6a)$$

$$\alpha_2^2 = \frac{4I_\omega}{I_y h^2} \quad (6b)$$

$$P_{y1} = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \quad (6c)$$

$$P_{y2} = \frac{4\pi^2 EI_y}{L^2} \quad (6d)$$

$$P_{\omega 1} = \frac{1}{i_0^2} \left(GJ + \frac{\pi^2 EI_\omega}{L^2} \right) = \frac{1}{i_0^2} \frac{\pi^2 EI_\omega}{L^2} \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} \right) \\ = \frac{1}{i_0^2} \frac{\pi^2 EI_y}{4L^2} h^2 \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} \right) \alpha_2^2 = \frac{P_{y1}}{4} \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} \right) \alpha_2^2 \frac{h^2}{i_0^2} \quad (6e)$$

$$P_{\omega 2} = \frac{1}{i_0^2} \left(GJ + \frac{4\pi^2 EI_\omega}{L^2} \right) = \frac{1}{16} \left(4 + \frac{1}{\beta_1^2} \right) \alpha_2^2 \frac{h^2}{i_0^2} P_{y2} \quad (6f)$$

对等厚的冷弯方钢管, 其截面性质是

$$J = \frac{2b^2 h^2 t}{b + h} \quad (6g)$$

$$I_{\omega} = \frac{b^2 h^2 t}{24} \cdot \frac{(b-h)^2}{(h+b)} = \frac{(b-h)^2}{48} J \quad (6h)$$

$$\beta_1^2 = \frac{\pi^2 EI_{\omega}}{GJL^2} = \frac{2.6\pi^2}{48} \cdot \frac{(b-h)^2}{L^2} \quad (6i)$$

$$I_x = \frac{1}{6} th^3 + \frac{1}{2} bth^2 \quad (6j)$$

$$I_y = \frac{1}{6} tb^3 + \frac{1}{2} htb^2 \quad (6k)$$

$$i_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A} = \frac{h^3 + 3bh^2 + 3hb^2 + b^3}{12(b+h)} = \frac{(h+b)^2}{12} \quad (6l)$$

$$\alpha_2^2 = \frac{4I_{\omega}}{I_y h^2} = \frac{(b-h)^2}{(3h+b)(h+b)} \quad (6m)$$

$$\frac{\alpha_2^2}{\beta_1^2} = 0.6235 \frac{L^2}{(h+b/3)(h+b)} \quad (6n)$$

我们可根据 P_{y1} 、 P_{y2} 、 $P_{\omega1}$ 和 $P_{\omega2}$ 的相对大小, 讨论压杆的屈曲性能。

表 2 是部分温室柱的截面参数及计算出的 4 个临界荷载 (其中, $L=4\ 000$, $t_w=t$ 比较 4 个临界荷载的大小可以发现, 对常用的温室柱来说, 通常 $P_{y1} < P_{y2} < P_{\omega1} < P_{\omega2}$ 。在这种参数范围内, 如果柱子截面是工字形截面, 设置柱的侧向支撑时, 支撑相对于截面形心有偏心对提高临界荷载有显著的不利影响^[10-11]。但是对于矩形钢管截面, 不利作用是否显著, 则需要进行分析。

表 2 典型截面及其截面性质

Table 2 Sectional characteristic of typical sections

截面	h	b	t	I_x	I_y	J	I_{ω}	i_0^2	P_{y1}	P_{y2}	$P_{\omega1}$	$P_{\omega2}$
1	150	75	3	3 922 034	1 329 696	3 069 070	359 656 644	3 997	168 966	675 864	60 852 063	60 886 367
2	100	50	2	774 723	262 656	606 236	31 574 795	1 776	33 376	133 504	27 042 538	27 049 314
3	150	75	2	2 679 589	918 364	2 112 695	247 581 482	4 070	116 698	466 790	41 134 768	41 157 957
4	100	50	3	1 119 671	373 321	866 020	45 105 211	1 728	47 438	189 753	39 711 323	39 721 273
5	150	100	2	3 227 189	1 735 123	3 420 586	178 155 501	5 043	220 484	881 936	53 745 443	53 758 910
6	150	100	3	4 732 371	2 531 021	4 999 650	260 398 413	4 961	321 620	1 286 479	79 849 335	79 869 343
7	150	150	3	6 352 884	6 352 560	9 529 083	0	7 203	807 227	3 228 908	104 820 525	104 820 525

截面	α_2	β_1	$k_{\theta l}$	χ			$(e/h)_{cr}$
				$e/h=0.5$	$e/h=1$	$e/h=2$	
1	0.223759	0.01828	113.94	1.01542	1.0647	1.3209	4.0577
2	0.223759	0.01219	171.44	1.00675	1.0276	1.1202	6.1055
3	0.221881	0.01828	113.93	1.01569	1.0659	1.3283	4.0231
4	0.226637	0.01219	171.46	1.00658	1.0268	1.1168	6.1845
5	0.136931	0.01219	170.45	1.01845	1.0781	1.4082	3.7147
6	0.138002	0.01219	170.48	1.01816	1.0768	1.3992	3.7443
7	0		∞	1.02442	1.1054	1.6166	3.2384

一般情况下, $P_{Ey2} < P_{\omega1}$, 此时参数 β_1 、 α_2 和 i_0/h 之间满足如下的关系

$$\frac{i_0^2}{h^2} < \frac{1}{16} \left(1 + \frac{1}{\beta_1^2} \right) \alpha_2^2 = \frac{1}{16} \left(\alpha_2^2 + \frac{\alpha_2^2}{\beta_1^2} \right) \quad (7)$$

因 P_{y2} 是压杆屈曲荷载的上限 (4 个临界荷载中第 2 大的临界荷载), $P_{y2} < P_{\omega1}$ 表明侧向支撑杆件无需为防止扭转屈曲起任何作用。将 P 用 P_{y2} 无量纲化, 式 (4a) 成为

$$\begin{aligned} \frac{KL}{4P} \left(a_y - \frac{Pe^2}{Pi_0^2 - GJ} a_{\theta} \right) &= 1 \\ \bar{K} \left[a_y \frac{i_0^2}{h^2} + a_{\theta} \frac{e^2}{h^2} / (1 - \beta^2 \frac{P_{y2}}{P}) \right] &= 16\pi^2 \frac{P}{P_{y2}} \frac{i_0^2}{h^2} \end{aligned} \quad (8a)$$

式中 $\bar{K} = \frac{KL^3}{EI_y}$, $\beta = \frac{\alpha_2 h}{4i_0 \beta_1}$, a_y 由式 (5a) 给出, 此时

$k_y l = \pi \sqrt{P/P_{y2}}$ 。 a_{θ} 为

$P/P_{y2} < \beta^2$ 时, a_{θ} 由 (5b) 式计算,

$$k_{\theta} l = \frac{2\pi i_0}{\alpha_2 h} \sqrt{\beta^2 - P/P_{y2}}$$

$P/P_{y2} > \beta^2$ 时, a_{θ} 由 (5c) 式计算,

$$k_{\theta} l = \frac{2\pi i_0}{\alpha_2 h} \sqrt{P/P_{y2} - \beta^2}$$

$P/P_{y2} = \beta^2$, 这一特定的临界荷载对应的支撑刚度由下式求得

$$\bar{K} = \left(\frac{\pi \alpha_2}{\beta_1} \right)^2 / \left(a_y \cdot \frac{i_0^2}{h^2} - \frac{\pi^2}{12\beta_1^2} \cdot \frac{e^2}{h^2} \right) \quad (8b)$$

式中 a_y 仍然由式 (5a) 计算, 但是 $k_y l = \pi \beta$ 。

下面确定完全支撑的门槛刚度 K_{th} , 它是指当压杆发生半波长 $l=L/2$ 的弯曲屈曲时, 对应的支撑刚度。此时 $k_y l = \pi$, $a_y=1$ 。由式 (8a) 得到

$$\bar{K}_{th} = \bar{K}_{th0} / \left(1 + \frac{e^2}{h^2} \cdot \frac{a_{\theta}}{i_0^2/h^2 - (\frac{\alpha_2}{4\beta_1})^2} \right) \quad (9)$$

式中 K_{th0} ——支撑的偏心等于 0 时（中心支撑时），为使压杆的计算长度系数减少一半所需要的支撑刚度。在式（8a）中令 $P=P_{y2}$ 得到

$$K_{th0} = \frac{4P_{y2}}{L}, \bar{K}_{th0} = 16\pi^2 \quad (10)$$

下面对式（9）分母的几何参数进行推演

$$\begin{aligned} \frac{i_0^2}{h^2} &= \frac{1}{12} \left(1 + \frac{b}{h} \right)^2, \quad \frac{\alpha_2^2}{4\beta_1^2} = \frac{12L^2}{2.6\pi^2(3h+b)(h+b)} \\ k_\theta l &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{GJ - P i_0^2}{EI_\omega}} = \sqrt{\frac{\pi GJ L^2}{4\pi EI_\omega} - \frac{\pi EI_y i_0^2}{EI_\omega}} \\ &= \sqrt{\frac{\pi^2}{4\beta_1^2} - \frac{4\pi^2}{\alpha_2^2} \frac{i_0^2}{h^2}} = \frac{2\pi}{\alpha_2} \sqrt{\frac{\alpha_2^2}{16\beta_1^2} - \frac{i_0^2}{h^2}} \\ k_\theta l &= \frac{2\pi}{\alpha_2} \frac{i_0}{h} \sqrt{\frac{\alpha_2^2}{16\beta_1^2} \frac{h^2}{i_0^2} - 1} = \frac{2\pi}{\alpha_2} \frac{i_0}{h} \sqrt{\beta^2 - 1} \\ k_\theta l &= \frac{\pi}{\sqrt{3}\alpha_2} \sqrt{\frac{6(L/h)^2}{1.3\pi^4(1+b/3h)(1+b/h)} - \left(1 + \frac{b}{h}\right)^2} \end{aligned}$$

由于 α_2 是一个小量，所以 $k_\theta l$ 是一个较大数值，因此

$$a_\theta = 1 - \frac{\text{th}(k_\theta l)}{k_\theta l} = 1 - \frac{1}{k_\theta l} \approx 1$$

$$\frac{\alpha_2^2}{16\beta_1^2} = \frac{L^2/h^2}{2.6\pi^2(1+0.3333b/h)(1+b/h)}$$

$$\bar{K}_{th} = \chi \bar{K}_{th0} = 16\pi^2 \chi \quad (11)$$

$$\chi = \left(1 - \frac{e^2}{h^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\alpha_2}{4\beta_1}\right)^2 - i_0^2/h^2} \right)^{-1}$$

$$= \left(1 - \frac{e^2}{h^2} \cdot \frac{12}{\frac{6L^2/h^2}{1.3\pi^2(1+b/3h)(1+b/h)} - \left(1 + \frac{b}{h}\right)^2} \right)^{-1}$$

χ 值如果达到无穷大，则表示不再能使柱子的计算长度减小一半，此时

$$\left(\frac{e}{h}\right)_{cr} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[\frac{6L^2/h^2}{1.3\pi^2(1+0.3333b/h)(1+b/h)} - \left(1 + \frac{b}{h}\right)^2 \right]^{0.5} \quad (12)$$

表 2 给出了几种截面设置偏心侧向水平支撑时，在支撑偏置 $e/h=0.5$ 、 1.0 、 2.0 时，使压杆计算长度系数减小一半所需的支撑刚度放大系数。从表 2 的结果看，偏心为 $e/h=0.5$ 、 1.0 时，需要的支撑刚度比中心支撑增大不多，特别是 $e/h=0.5$ 时，增大的比例几乎可以忽略。因为实际温室柱的侧向偏心支撑 $e/h=0.6$ 左右，因此这种侧向偏心水平支撑基本上可以起到中心支撑的作用。

上述结论与工字形截面压杆偏心水平支撑的作用有很大的不同。在工字形截面的情况下，如果 $e/h=0.5$ ，则无论支撑刚度多大，都很难使得计算长度系数减小一半。

式（12）中支撑偏心的门槛值，按照表 2 的算例计

算，其比值是 3~6，这种情况在生产性温室中不会出现。

在实际工程中应用式（11）时，支撑刚度 \bar{K}_{th} 必须放大 2~3 倍，以考虑缺陷的影响^[12-14]。

下面，我们验算一下温室常用规格的墙檩能否满足刚度要求。

假设温室边柱的规格为 $\square 150 \times 75 \times 3 \times 3$ ，高度 4 000 mm，则

$$3 \times 16\pi^2 \frac{EI_y}{L^3} = 48\pi^2 \frac{206000 \times 1329696}{4000^3} = 2\,027.6 \text{ N/mm}$$

取墙檩截面 $\square 50 \times 50 \times 2$ ，长度 4 000（常见开间），则

$$\frac{EA_b}{a} = \frac{206000 \times 384}{4000} = 19\,776 \text{ N/mm} > 2\,027.6 \text{ N/mm}$$

满足要求。

但实际上墙檩要支撑的是柱列，因此水平支撑杆实际上是对多个压杆提供支撑，此时需要的支撑刚度必须乘以增大系数，这个增大系数公式为^[15-16]

$$\alpha_m = 0.4n^2 + 0.6n \quad (13)$$

式中 n ——被支撑的立柱数量。1 个纵向柱列，如果有 20 根立柱，但是设置了 4 道交叉支撑，交叉支撑跨可以近似为支撑的最终支撑点^[17]，则每道交叉支撑分摊到的立柱数量是 5 根， n 就取 5，此时 $\alpha_m=13$ 。

从该算例看，用 $\square 50 \times 50 \times 2 \times 2$ 支撑 6 根 $\square 150 \times 75 \times 3 \times 3$ 是不够的，如将规格增大到 $\square 70 \times 70 \times 2 \times 2$ ，此时

$$\frac{EA_b}{a} = \frac{206000 \times 544}{4000} = 28\,016 \text{ N/mm} > 13 \times 2027.6 = 26\,359 \text{ N/mm}$$

则证明后者的支撑是有效的。

在工程应用中，水平支撑钢管的刚度须满足一定的要求，这个要求由（11）式与（13）式相乘，并乘以缺陷影响系数 3.0 得到。

为使这些水平小钢管有效地起到压杆平面外支点的作用，在设有交叉支撑的跨，交叉支撑应以某种简单的方式与水平钢管连接。如果支撑承受水平力，则承受水平力所需要的支撑杆面积应与上面得到的面积相加^[18]。

3 结 论

生产性温室的边柱外侧有作为墙檩的水平小钢管连接。本文从理论上分析了这种偏心支撑的小钢管对边柱平面外稳定性的影响，并。结果表明，在满足文中所述的刚度要求下，生产性温室紧贴矩形钢管柱外皮的水平钢管可以作为压杆的有效侧向支撑。边柱平面外计算长度可以取水平钢管之间的距离，从而减小边柱的平面外计算长度，在保证边柱强度和稳定性安全的基础上降低用钢量。

[参 考 文 献]

- [1] 齐飞, 周新群. Venlo 温室的荷载效应特征及其在工程中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 163—167.
Qi Fei, Zhou Xinqun. Features of load effects and application in designing Venlo greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 163—168. (in Chinese with English abstract)

- [2] 吴勇军. 支撑位置对钢构件稳定承载力的影响[D]. 南京: 河海大学土木工程学院, 2005.
Wu Yongjun. Effect of brace position on the capacity of steel members[D]. Nanjing: Civil Engineering Institute, Hehai University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [3] Ross S S. Construction Disasters, Design Failures, Causes & Prevention[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [4] Smith E A, Epstein H I. Hartford coliseum roof collapse: structural collapse sequence and lessons learned[J]. Civil Engineering, 1980, 50(4): 59-62.
- [5] Loomis R S, Loomis R H, Loomis R W, et al. Torsional buckling study of Hartford Coliseum[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(1): 211-231.
- [6] Epstein H I. Discussion of "Torsional buckling study of Hartford Coliseum"[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(10): 2134-2135.
- [7] Pretzer C A. Discussion of "Torsional buckling study of Hartford Coliseum"[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(1): 248-249.
- [8] 方瑞纲, 陆桦. 台风“麦莎”对薄膜温室结构影响的分析[J]. 农业工程技术: 温室园艺, 2006, (1): 19.
- [9] 童根树. 钢结构的平面外稳定[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [10] 郭立湘, 童根树. 偏心支撑压弯构件稳定性分析[J]. 建筑结构, 2003, 33(7): 3-8.
Guo Lixiang, Tong Genshu. Stability analysis of beam/column with lateral and torsional brace at mid-span[J]. Building Structure, 2003, 33(7): 3-8. (in Chinese with English abstract)
- [11] Tong G S, Chen S F. On the efficiency of eccentric brace on column and the collapse of Hartford Coliseum[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1990, 16(4): 281-305.
- [12] Trahair N S, Nethercot D A. Bracing requirements in thin-walled structures[M]. New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1984: 93-130.
- [13] Tong G S, Chen S F. Design forces of horizontal inter-column braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1987, 7(5): 371-383.
- [14] Chen S F, Tong G S. Design for stability: correct use of braces[J]. Steel Structures, 1994, 5(1): 1-11.
- [15] 童根树. 柱间水平撑杆设计的统一方法[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1988, 20(1): 87-93.
Tong Genshu. A unified approach for the design of horizontal braces between columns[J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgy & Construction Engineering, 1988, 20(1): 87-93. (in Chinese with English abstract)
- [16] 童根树. 平行压杆体系的侧向稳定性支撑[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1991, 23(4): 425-431.
Tong Genshu. Stability bracing in the parallel compression member systems[J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgy & Construction Engineering, 1991, 23(4): 425-431. (in Chinese with English abstract)
- [17] 童根树, 陈海啸. 厂房纵向抽撑时柱子的平面外计算长度, 工业建筑, 2004, 34(5): 59-61.
Tong Genshu, Chen Haixiao. Out-of-plan effective length of columns without longitudinal braces for mill buildings[J]. Industrial Construction, 2004, 34(5): 59-61. (in Chinese with English abstract)
- [18] 童根树, 李东. 水平和竖向力作用下厂房纵向支撑的设计要求, 科技通报, 2006, 22(2): 241-246.
Tong Genshu, Li Dong. Requirements for longitudinal bracings of industrial buildings under horizontal and vertical loads[J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(2): 241-246. (in Chinese with English abstract)

Out of plane stability of greenhouse side columns with eccentrically lateral braces

Qi Fei¹, Tong Genshu^{2*}

(1. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Rectangular box section is widely used as columns in agricultural Greenhouse. Smaller tubes are attached on the outside of the most dangerous side columns to serve as wall purlin. These horizontal smaller tubes provide lateral braces to side columns in practice, but this effect is lacking of theoretical supporting. The paper carried out an analysis of the efficiency of the tube in providing the lateral support. Analysis revealed that, though the smaller tubes are eccentric to the centroid of the column, the lateral braces to the column could still be effective. The out of plane effective length could be decreased accordingly. According to this conclusion, the out of plane effective length could take the distance between the lateral braces when checking the stability of the column. In this way, the checking calculation of the side column could be more scientific and reasonable on the bases of less material application and proper strength and stability of the side column.

Key words: greenhouses, stability, steel pipe, braces, side column