

具有多道弹性支撑杆的钢柱稳定计算

陈绍蕃

(西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用平衡法或能量法对设有二至四道弹性支撑杆的轴压钢柱的稳定性能进行分析, 得出不同屈曲波形的柱弹性临界荷载的简化计算公式, 和弹性临界荷载相对应的计算长度系数可以用于轴压和压弯钢柱的设计计算. 综合以上结果, 进一步导出有多道弹性支撑杆的柱弹性临界荷载的统一近似公式, 既可用于二至四道弹性支撑杆的工况, 也适用于道数更多的工况. 此外, 还讨论了支撑杆应满足的要求, 包括刚度、承载力 and 隔撑设置, 并强调考虑杆件几何缺陷的必要性.

关键词: 钢柱; 屈曲; 弹性支撑杆; 临界荷载; 几何缺陷

中图分类号: TU323

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0153-07

0 引言

单跨工、商业房屋之高度较大者, 框架柱通常在纵向设有一道或多道支撑杆, 以减小柱在框架平面外的计算长度. 当采用轻型墙体时, 支撑杆可以由墙梁兼任, 条件是墙梁应和柱间斜撑体系牢固连接. 框架柱虽然是压弯构件, 但计算其稳定性时用到的 φ 系数是基于轴压构件确定的. 因此本文着重分析弹性支撑杆(简称撑杆)对轴压构件稳定承载力的影响.

撑杆是否能起刚性支座的作用, 取决于它的刚度和承载力. 这个问题在文献[1-2]中有详细论述, 这里不做重复. 撑杆截面不大时, 达不到刚性支座的要求. 但作为弹性支座, 仍然对减小柱计算长度起一定作用. 设有中间弹性支座的柱稳定承载力, 文献[3, 4]都有所分析. 除稳定承载力的一般计算公式外, 文献[3]具体计算了有一个和两个中间弹性支座的工况; 文献[4]则给出有一至九个中间弹性支座连续压杆的临界压力和支座刚度的关系曲线. 但是这些结果或是计算过于复杂, 或是只有曲线而无公式, 不便直接用于设计计算. 文献[5]用能量法计算有三道弹簧支撑的钢柱临界力, 但是受到所取变形曲线的限制, 只能计算在特定的弹簧刚度下的柱计算长度系数(相当于图3b的B点).

本文在分析的基础上给出具有1~4道弹性撑杆的钢柱临界力随撑杆弹簧刚度变化的简化关系式和普遍适用于多道撑杆的近似公式, 可供设计工作采用. 还讨论了撑杆的刚度、承载力计算和构造问题.

1 设有1~4道弹性撑杆的钢柱稳定承载力

1.1 一道弹性撑杆的工况

图1a所示工况, 柱临界压力 N_{cr} 和撑杆弹簧刚度之间的关系在文献[1-3]都有解答. 当弹簧刚度 K 达到 $K \geq 2N_0/l$ 时, 撑杆起刚性支座作用, 柱临界压力为 $N = \pi^2 EI / l^2 = N_0$.

这一关系由图1(b)中水平线 BC 表示. 式中 E, I 分别为材料弹性模量和柱截面绕屈曲轴的惯性矩, l 为柱段长度.

显然, 当撑杆刚度为零时临界力等于欧拉力 N_E , 即

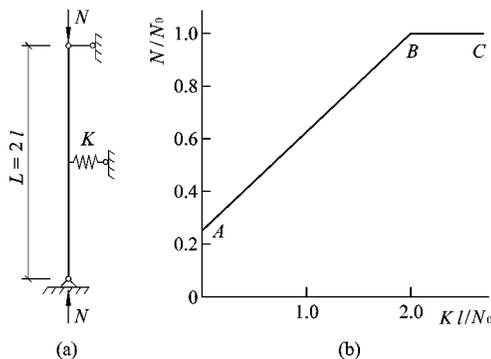


图1 有一道弹性撑杆的柱子

Fig. 1 Column with a single elastic brace

收稿日期: 2011-03-24 修改稿日期: 2011-04-12

作者简介: 陈绍蕃(1919-), 男, 浙江海盐人, 教授, 硕士, 主要从事钢结构基本性能研究.

$$N = N_E = \pi^2 EI / L^2 = 0.25 N_0$$

并由图 1(b)的 A 点表示. L 为压杆全长. 在 A, B 两点之间 N/N_0 和 Kl/N_0 的关系曲线十分接近直线^[3], 并可足够精确地用直线表示. 无量纲化的临界压力和无量纲化弹簧刚度之间的线性关系式为:

$$\text{当 } Kl/N_0 < 2.0 \text{ 时, } N/N_0 = \frac{1}{4} \left(1 + 1.5 Kl/N_0 \right) \quad (1a)$$

$$\text{当 } Kl/N_0 \geq 2.0 \text{ 时, } N/N_0 = 1.0 \quad (1b)$$

1.2 二道弹性撑杆的工况

图 2(a)所示的柱, 中间有两道等间距的弹性撑杆. 文献[3] 给出弹簧支座反力的计算公式

$$-F_1 \frac{\sin \frac{2kL}{3} \times \sin \frac{kL}{3}}{Nk \sin kL} - F_2 \frac{\sin^2 \frac{kL}{3}}{Nk \sin kL} + \frac{L}{9N} (2F_1 + F_2) = \frac{F_1}{K} \quad (2)$$

式中: $k = \sqrt{\frac{N}{EI}}$, N 为杆件轴线压力; L 为杆件全长; F_1 和 F_2 分别为两个弹性撑杆的反力.

当柱子以一个半波的模式屈曲时, 反力 $F_1 = F_2$. 此时式(2)简化为

$$\frac{KL}{N} \left[\frac{1}{3} - \frac{\sin \frac{kL}{3}}{kL \sin kL} \left(\sin \frac{2kL}{3} + \sin \frac{kL}{3} \right) \right] = 1 \quad (3)$$

当柱子以两个半波的模式屈曲时, 反力 $F_1 = -F_2$, 此时式(2)可简化为

$$\frac{KL}{N} \left[\frac{\sin \frac{kL}{3}}{kL \sin kL} \left(\sin \frac{2kL}{3} - \sin \frac{kL}{3} \right) - \frac{1}{9} \right] = 1 \quad (4)$$

把式(3)和式(4)联立求解, 即可得到两种屈曲模式转换点(即图 2(b)的 B 点)的数据. 为此, 把这两个式子相加, 得到

$$\frac{KL}{N} \left[\frac{2}{9} - \frac{2 \sin^2 \frac{kL}{3}}{kL \sin kL} \right] = 0$$

由括弧部分等于零, 经试算得到 $kL = 7.0$

将 kL 值代入式(3), 得到 $\frac{KL}{N} = 2.654$

鉴于 $kL = L \sqrt{N/EI} = \pi \sqrt{N/N_E}$ 及 $N_E = \pi^2 \frac{EI}{L^2} =$

$\pi^2 \frac{EI}{(3L)^2} = \frac{N_0}{9}$, 图 2(b)中 B 点的坐标为

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{9} \left(\frac{7}{\pi} \right)^2 = 0.552$$

和 $\frac{KL}{N_0} = \frac{0.552}{3} \times 2.654 = 0.488$

式中: N_0 为两道支撑均起刚性支座时的压杆临界力.

为了简化计算公式, 把此二值分别调整为 0.56 和 0.50. 按照文献[1] 的计算结果, C 点的坐标是 $N/N_0 = 1.0$ 和 $Kl/N_0 = 3.0$. 本工况的无量纲化的临界压力在屈曲模式转换点之间看作按直线变化, 并由下式计算

$$\text{当 } Kl/N_0 \leq 0.5 \text{ 时 } N/N_0 = 0.11 + 0.9 Kl/N_0 \quad (5a)$$

$$\text{当 } 0.5 < Kl/N_0 \leq 3.0 \text{ 时 } N/N_0 = 0.47 + 0.176 Kl/N_0 \quad (5b)$$

$$\text{当 } Kl/N_0 \geq 3.0 \text{ 时 } N/N_0 = 1.0 \quad (5c)$$

实际上图 2(b)曲线的 AB 段和 BC 段应分别由式(3)和式(4)表达. 此二式可以分别改写为

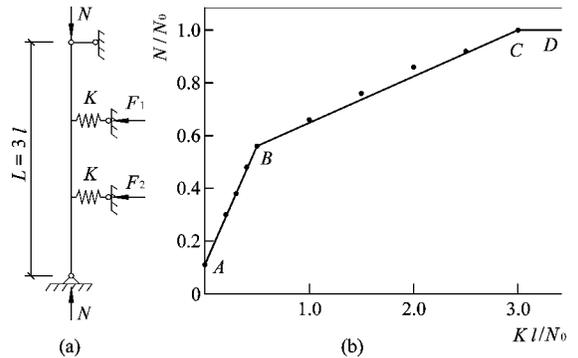


图 2 有两道弹性撑杆的柱子
Fig. 2 Column with double elastic braces

$$\left(\frac{27\pi^2}{kL}\right)^2 \left[\frac{1}{3} - \frac{\sin \frac{kL}{3}}{kL \sin kL} \left(\sin \frac{2kL}{3} + \sin \frac{kL}{3} \right) \right] = \frac{N_0}{Kl}$$

和

$$\left(\frac{27\pi^2}{kL}\right)^2 \left[\frac{\sin \frac{kL}{3}}{kL \sin kL} \left(\sin \frac{2kL}{3} - \sin \frac{kL}{3} \right) - \frac{1}{9} \right] = -\frac{N_0}{Kl}$$

给定一个 $\frac{KL}{N_0}$ 值, 即可由相应屈曲模式算出 kL . 并由此得到 $\frac{N}{N_0} = \left(\frac{kL}{3\pi} \right)^2$, 图 2b 中的圆点就是这样算得的. 这些点十分接近折线 ABC 而略高一点, 表明式 (5a) 和 (5b) 可以安全地用于设计工作, 并且具有较高的精确度.

1.3 用能量法求解

能量法本质上属于近似方法, 但如果运用得当, 可以得到足够精确的结果. 图 2 所示的柱子在线段 AB 范围内屈曲时呈一个半波. 屈曲变形曲线为

$$y = a \sin \frac{\pi x}{L} \quad (6)$$

式中: x 为沿柱纵轴方向的坐标, a 为常数, y 的一阶和二阶导数分别为

$$y' = \frac{\pi a}{L} \cos \frac{\pi x}{L} \quad \text{和} \quad y'' = -\frac{\pi^2 a}{L^2} \sin \frac{\pi x}{L}$$

柱子的弯曲应变能和弹簧支座的应变能分别为

$$U_b \approx \frac{EI}{2} \int_0^L (y'')^2 dx = \frac{\pi^4 EI}{4L^3} a^2$$

和

$$U_c = \sum \frac{1}{2} K y_i^2 = \frac{K a^2}{2} (2 \times 0.866^2) = 0.75 K a^2$$

式中: y_i 为第 i 个弹簧支座的位移.

柱子的外力功则为

$$W = \frac{1}{2} N \int_0^L (y')^2 dx = \frac{\pi^2 a^2}{4L} N$$

总势能为

$$V = U_b + U_c - W = a^2 \left[\frac{\pi^4 EI}{4L^3} + 0.75K - \frac{\pi^2 N}{4L} \right] \quad (7)$$

按势能驻值原理对 a 求导并使导数等于零得到

$$\frac{\pi^2}{4L} (N_E - N) + 0.75K = 0 \quad (8)$$

此式可以转化成

$$\frac{N}{N_0} = 0.11 + 0.91 \frac{KL}{N_0}$$

和式 (5a) 十分接近.

图 2(b) 的线段 BC 属于以二个半波屈曲的范围, 屈曲挠曲线由下式表达

$$y = b \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (9)$$

式中: b 为常数. y 的一阶和二阶导数分别为

$$y' = \frac{2\pi b}{L} \cos \frac{2\pi x}{L} \quad \text{和} \quad y'' = -\frac{4\pi^2 b}{L^2} \sin \frac{2\pi x}{L}$$

采用和上面相同的方法, 可算得

$$\frac{\pi^2}{L} (4N_E - N) + 0.75K = 0 \quad (10)$$

此式可以转化为

$$\frac{N}{N_0} = 0.444 + 0.228 \frac{Kl}{N_0}$$

它和式(5b)的差别稍大, 精度比一个半波的工况逊色.

把式(8)和式(10)联立, 求解屈曲模式转换点的数据, 得到

$$\frac{1}{4}(N_E - N) = 4N_E - N \quad \frac{N}{N_0} = 0.556$$

相应的弹簧刚度由式(8)得到, 即

$$K = \frac{\pi^2}{3 \times 3l} (0.556N_0 - \frac{N_0}{9}) = 0.488 \frac{N_0}{l}$$

转换点的坐标和解析法算得的结果相同, 表明能量法在这里精度很高. 原因是以一个半波屈曲时的挠曲线符合正弦曲线.

1.4 三道和四道弹性撑杆的工况

撑杆道数越多, 解析法的计算越复杂, 而能量法相对简单一些. 因此本节用能量法解设有三道和四道弹性撑杆的柱稳定承载力. 由于屈曲半波越多则能量法精度越差, 需要参照文献[4]的曲线对计算结果作一些调整.

对具有三道弹性撑杆的柱(图 3a), 分别分析一个半波、两个半波和三个半波屈曲三种工况. 屈曲挠曲线分别取为

$$y = a \sin \frac{\pi x}{L}, y = b \sin \frac{2\pi x}{L}, y = c \sin \frac{3\pi x}{L}$$

按照上一节的同样方式算得柱临界压力和撑杆弹簧刚度之间的关系式

$$\text{一个半波} \quad \frac{\pi^2}{4L} (N_E - N) + K = 0 \quad (11)$$

$$\text{两个半波} \quad \frac{\pi^2}{L} (4N_E - N) + K = 0 \quad (12)$$

$$\text{三个半波} \quad \frac{2.25\pi^2}{L} (9N_E - N) + K = 0 \quad (13)$$

由式(11)和式(12)联立, 得到前两种屈曲模式转换点(图 3(b)的 B 点)的数据

$$N/N_0 = 0.313 \quad \text{和} \quad Kl/N_0 = 0.154$$

并调整为

$$N/N_0 = 0.30 \quad \text{和} \quad Kl/N_0 = 0.16$$

由式(12)和式(13)联立, 得到第二、三种屈曲模式转换点(图 3(b)的 C 点)的数据

$$N/N_0 = 0.813 \quad \text{和} \quad Kl/N_0 = 1.389$$

并调整为

$$N/N_0 = 0.77 \quad \text{和} \quad Kl/N_0 = 1.40$$

这里, N/N_0 下降稍多以适应能量法对承载力估计偏高的特点.

当无量纲化的弹簧刚度达到 $Kl/N_0 = 3.41$ 时, $N = N_0^{[1]}$ (图 3b 中 D 点表示). 在这些转换点之间连以直线, 得到图 3b 的关系曲线. 曲线和文献[4]的图 62 基本相符.

无量纲化临界力的计算公式是:

$$\text{当 } Kl/N_0 \leq 0.16 \text{ 时,} \quad N/N_0 = 0.06 + 1.5Kl/N_0 \quad (14a)$$

$$\text{当 } 0.16 < Kl/N_0 \leq 1.40 \text{ 时,} \quad N/N_0 = 0.24 + 0.38Kl/N_0 \quad (14b)$$

$$\text{当 } 1.40 < Kl/N_0 \leq 3.41 \text{ 时,} \quad N/N_0 = 0.61 + 0.115Kl/N_0 \quad (14c)$$

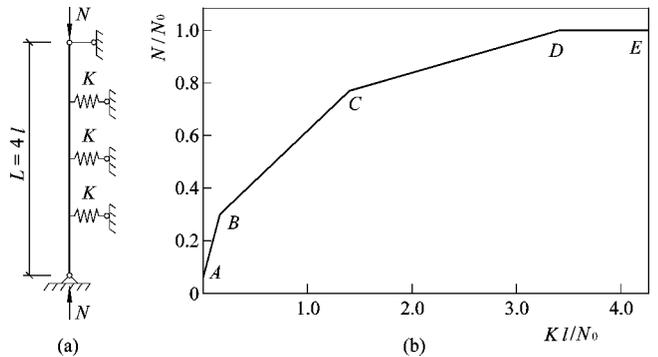


图 3 有三道弹性撑杆的柱子
Fig.3 Column with triple elastic braces

当 $Kl/N_0 \geq 3.41$ 时, $N/N_0 = 1.0$ (14d)

文献 [5] 对设有三道弹性撑杆的柱子用能量法求解, 所取变形曲线是

$$y = a_1 \sin \frac{\pi x}{L} + a_2 \sin \frac{2\pi x}{L}$$

它既不是对称曲线, 又不是反对称曲线, 不能正确反映屈曲时的变形状态, 因而得出的临界力是从一个半波屈曲向两个半波屈曲转换时的值, 即 $N/N_0 = 0.313$.

对设有四道弹性撑杆的柱子, 继续采用能量法进行计算. 计算所取挠曲线为和屈曲半波数相符合的正弦曲线, 得到不同屈曲模式转换点的坐标如下:

1—2 半波转换点 $N/N_0 = 0.19, Kl/N_0 = 0.059$

2—3 半波转换点 $N/N_0 = 0.52, Kl/N_0 = 0.57$

3—4 半波转换点 $N/N_0 = 0.99, Kl/N_0 = 2.26$

参照文献 [4] 的图 63, 并考虑计算公式的简化, 把上列数据调整为

图 4(b) 的 A 点 $N/N_0 = 0.18, Kl/N_0 = 0.07$

图 4(b) 的 B 点 $N/N_0 = 0.525, Kl/N_0 = 0.70$

图 4(b) 的 C 点 $N/N_0 = 0.90, Kl/N_0 = 2.20$

图 4(b) 的 D 点则由文献 [1] 得到 $N/N_0 = 1.00, Kl/N_0 = 3.62$

压杆无量纲化临界力的计算公式是:

当 $Kl/N_0 \leq 0.07$ 时, $N/N_0 = 0.04 + 2.0Kl/N_0$ (15a)

当 $0.07 < Kl/N_0 \leq 0.70$ 时, $N/N_0 = 0.14 + 0.55Kl/N_0$ (15b)

当 $0.70 < Kl/N_0 \leq 2.20$ 时, $N/N_0 = 0.35 + 0.25Kl/N_0$ (15c)

当 $2.20 < Kl/N_0 \leq 3.62$ 时, $N/N_0 = 0.74 + 0.072Kl/N_0$ (15d)

当 $Kl/N_0 \geq 3.62$ 时, $N/N_0 = 1.0$ (15e)

2 多道弹性撑杆柱的统一近似公式

以上得出的无量纲化临界力的计算公式虽然都是简单的线性公式, 但数目较多, 显得有些繁琐. 把式 (5a, b, c), 式 (14a—d), 式 (15a—e) 画在同一个坐标系上, 如图 5 所示, 然后画出它们的内包络线并进行拟合, 得出下列表达式

当 $Kl/N_0 \leq 3/j^4$ 时, $N = N_0/j^2$ (16a)

当 $3/j^4 < Kl/N_0 \leq 1.5$ 时, $N = N_0 \sqrt{\frac{Kl}{3N_0}}$ (16b)

当 $1.5 < Kl/N_0 \leq 3.75$ 时, $N = N_0 \left[1 - \frac{\left(3.75 - \frac{Kl}{N_0} \right)^{1.5}}{11.5} \right]$ (16c)

当 $Kl/N_0 > 3.75$ 时, $N = N_0$ (16d)

式中: j 为柱的分段数, 即弹性撑杆道数加 1, 适用范围为 $j \geq 3$.

由图 5 可见, 公式 (16) 偏于安全. 但它不仅适用 2 至 4 道弹性撑杆 ($j = 3 \sim 5$) 的工况, 也可用于 5 道和更多撑杆的工况.

在设计工作中, 算得无量纲化的临界压力 N/N_0 后, 由下式计算柱子的计算长度系数

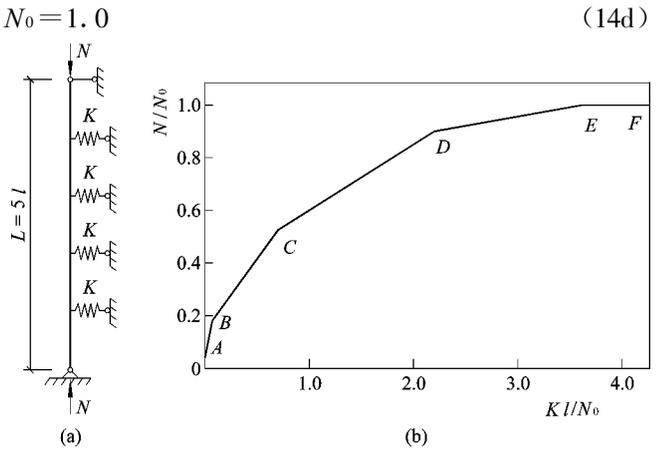


图 4 有四道弹性撑杆的柱子

Fig. 4 Column with four elastic braces

$$\mu = \sqrt{\frac{N_0}{N}} \quad (17)$$

式中: $N_0 = \pi^2 EI / l^2$, l 为柱段长度.

柱子的计算长度为

$$l_0 = \mu l \quad (18)$$

有时已知要求的承载力 N , 需要计算保证柱承载力的 $(j-1)$ 道撑杆的刚度, 则可采用式(16)转换得到下列公式

当 $N / N_0 \leq 0.71$ 时,

$$K = \frac{3N_0}{l} \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (19a)$$

当 $0.7 < N / N_0 \leq 1.0$ 时,

$$K = 3.75 \frac{N_0}{l} \left[1 - 1.36 \left(1 - \frac{N}{N_0} \right)^3 \right] \quad (19b)$$

式中: N_0 为柱段的弹性临界力, l 为柱段长度.

3 撑杆的刚度和承载力

3.1 撑杆纵轴通过柱截面剪心

当采用专设的撑杆时, 其轴线宜通过柱截面的剪心(对双轴对称的工形截面柱, 即为通过其形心), 以免因偏心而导致柱扭转.

如果柱和撑杆都是理想直杆, 支撑的轴向变形刚度为

$$K = \frac{EA_b}{b} \quad (20)$$

式中: A_b 和 b 分别为撑杆的截面积和长度. 然而现实工程中的杆件都会有几何缺陷. 当撑杆有正弦半波形的初弯曲时(图 6), 在端部单位力作用下产生弯矩

$$M = v_0 \sin \frac{\pi x}{b}$$

根据计算位移的单位荷载法, 撑杆因弯矩而两端相对位移

$$\Delta_b = \int \frac{M^2 dx}{EI_b} = \frac{v_0^2 b}{2EI_b}$$

式中: I_b 为撑杆截面惯性矩. 这样初曲杆在端部单位力作用下的总位移为

$$\frac{b}{EA_b} + \frac{v_0^2 b}{2EI_b} = \frac{b}{EA_b} \left(1 + \frac{v_0^2}{2I_b^2} \right)$$

式中: i_b 为撑杆截面的回转半径.

因此, 有初曲撑杆的刚度是

$$K = \frac{EA_b}{b} \left(1 + \frac{v_0^2}{2I_b^2} \right)^{-1} \quad (21)$$

当柱子也有初曲时, 在 N 力作用下的弯曲幅度增大而使撑杆产生轴力 F , 导致撑杆刚度进一步下降为^[6-7]

$$K = \frac{EA_b}{b} \left[1 + \frac{v_0^2}{2I_b^2 \left(1 - \frac{F}{F_E} \right)^3} \right]^{-1} \quad (22)$$

式(22)比式(21)多了一个因数 $\left(1 - \frac{F}{F_E} \right)^3$, 体现撑杆轴力 F 的不利作用, $F_E = \frac{\pi^2 EI_b}{b^2}$ 为撑杆的欧拉力.

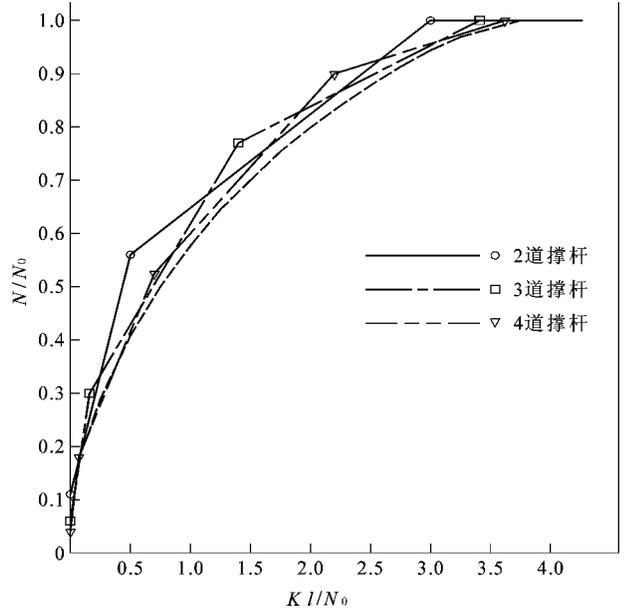


图 5 多道弹性撑杆临界压力的统一曲线
Fig. 5 Unified curve of critical compression for struts with multiple elastic braces

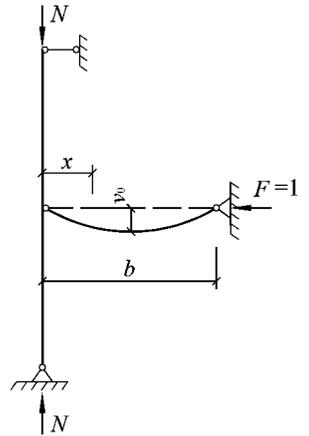


图 6 有初曲的撑杆
Fig. 6 Initially crooked brace

在设计工作中, 撑杆刚度 K 应取自式(22), 而不是式(21)或式(20). 式(22)的 F 可以按钢结构设计规范 GB50017-2003 第 5.1.7 节的规定计算. 对于单柱一道撑杆的工况, $F = N/60$. 对于多根柱组成的柱列, 当设置多道支撑时

$$F = \frac{\sum N}{30(m+1)} (0.6 + \frac{0.4}{n}) \quad (23)$$

式中: n 为被撑柱的根数; m 为撑杆道数.

除了具有必要的刚度, 撑杆还应满足承载力要求, 其截面强度和构件稳定性能应能承受式(23)给出的 F 力.

3.2 撑杆纵轴不通过柱截面剪心

在采用墙梁充当撑杆时, 通常把它连接在柱子的外侧. 此时, 墙梁的纵轴偏离柱子剪心, 设计工作需要注意两个问题, 其一是, 墙梁在连接于柱的一个翼缘的同时, 还需要通过隅撑连于柱的另一翼缘(图7), 以免造成柱的扭转; 其二是墙梁因起支撑作用而产生的 F 力对它是偏心力, 此力的效应应和风荷载的效应适当组合.

4 结 语

本文着重讨论弹性撑杆对轴压构件稳定性的影响. 由柱弹性临界压力导出的计算长度系数可以用于设计工作. 框架柱稳定性计算还涉及受弯构件的稳定系数 φ_b . 当柱的两个翼缘在被撑点同时得到弹性支承时, 受弯构件的计算长度可以取得和轴压构件相同.

构件的缺陷是钢结构设计必须考虑的问题, 因此, 撑杆的刚度应按式(22)计算. 在利用墙梁作为弹性撑杆对柱失稳的约束作用时, 必须注意兼职给它带来的负担, 它在承受风荷载的同时还要承担支撑力, 而且是偏心作用的力.

致谢: 感谢同事苏明周教授审阅文稿, 研究生张文莹、李蕾将文稿录入计算机.

参考文献 References

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2005.
CHEN Shao-fan. Principles of steel structure design[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
CHEN Shao-fan. Guide to stability design of steel structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [3] 铁摩辛柯, 盖莱. 弹性稳定理论[M]. 2版. 张福范, 译. 北京: 科学出版社, 1965.
Timoshenko SP, Gere JM. Theory of elastic stability[M]. 2nd ed. ZHANG Fu-fan, Translation. New York, McGraw-Hill, 1961.
- [4] 周承侗. 弹性稳定理论[M]. 成都: 四川人民出版社, 1981.
ZHOU Cheng-ti. Theory of elastic stability[M]. Chengdu: Sichuan People's Press, 1981.
- [5] 马晓董, 陈天虹, 虞祝帅. 轻钢蒙皮结构墙板支撑钢柱的侧向稳定分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 111-115.
MA Xiao-dong, CHEN Tian-hong, YU Zhu-shuai. Lateral stability analysis of column of light steel structure under stressed skin diaphragm[J]. J. of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 111-115.
- [6] 董根树. 钢结构的平面内稳定[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
TONG Gen-shu. In-plane stability of steel structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.
- [7] TONG Gen-shu, CHEN Shao-fan. A unified approach for multiple lateral bracing of columns[J]. J. Construct. Steel Research, 1989, 12: 141-149.

(下转第276页)

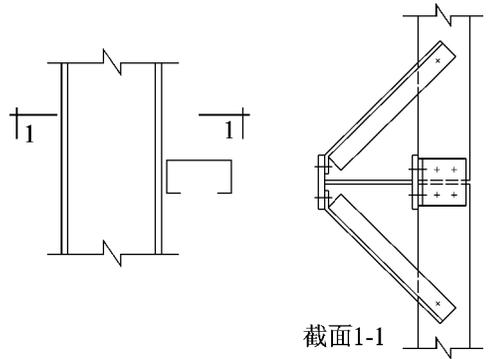


图7 连接墙梁和柱的隅撑

Fig. 7 Knee brace connecting wall beam with column

- [7] GB50364-2005, 民用建筑太阳能热水系统应用技术规范[S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
GB50364-2005, Code of solar water heating system application technology for civil building [S] . Beijing: China Architecture Industry Press, 2005.
- [8] 涂爱民, 董 华, 周恩泽. 太阳能热泵-地板辐射供热系统实验研究[J] . 暖通空调, 2007, 37(1): 106-112.
TU Ai-min, DONG Hua, ZHOU En-ze. Experimental study on combined solar-assisted heat pump and radiant floor heating systems [J] . Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007, 37(1): 106-112.
- [9] DB54/ 0016-2007, 西藏自治区居住建筑节能设计标准[S] . 拉萨: 西藏人民出版社, 2009.
DB54/ 0016-2007, Design standard for energy efficiency of residential buildings in Tibet Autonomous Region [S] . Lasa: Tibetan People's Publishing House, 2009.
- [10] JGJ26-95. 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
JGJ26-95., Design standard for energy efficiency of residential buildings (Heating residential buildings) [S] . Beijing: China Architecture Industry Press, 1995.

Solar fraction of residential building in north-west China

LIU Yan-feng, YU Ya-li, KONG Dan

(School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract Heating loads of residential buildings in Lhasa, Xi'an and Xining under combination conditions of different insulation, storey and window-wall ratio were analyzed. Single-layer traditional dwelling building in Lhasa City was also studied in different conditions. The results showed that: values of solar fraction in different cities depend on the local solar radiation, increasing with less layers and larger southern window. The collector area of active solar heating system can reduce significantly in single-layer traditional dwelling building with good insulation and sunspace in Lhasa city.

Key words: residential building; solar fraction; heating; heat load

Biography: LIU Yan-feng, Ph. D., Professor, Xi'an 710055, P. R. China. Tel: 0086-29-82201423, E-mail: liuyanfeng@xauat.edu.cn

(上接第 159 页)

Stability calculation of steel columns with multiple elastic braces

CHEN Shao-fan

(Key Laboratory of Structural and Aseismatic Engineering of Education Ministry, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract The stability of axially compressed steel columns with two to four braces are investigated using equilibrium approach or energy approach. Simplified formulas of the elastic critical load of these columns are obtained for different buckling configurations. The coefficient of effective length derived from this elastic critical load can be used in design calculation of steel columns and beam-columns. By investigating the above results, unified approximate formulas are proposed for elastic critical load of columns provided with multiple braces. These formulas not only apply to the case of two to four braces but also to that of more than four braces. Moreover, requirements to be fulfilled by braces are discussed, including stiffness, strength and installation of knee braces, emphasizing the necessity of considering the geometrical imperfection.

Key words: steel column; buckling; elastic brace; critical load; geometric imperfection

Biography: CHEN Shao-fan, Professor, Xi'an 710055, P. R. China. Tel: 0086-29-82202199, E-mail: chensf2@yahoo.com.cn