

框筒结构裙梁最大跨高比研究*

孟焕陵¹, 沈蒲生¹

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:当框筒结构裙梁跨高比增大到一定程度以后,剪力滞效应就可以忽略,结构的受力性能与框架相近。通过令框筒和框架两种结构体系的水平侧移曲线相等的方法来寻求框筒结构裙梁的最大跨高比,当跨高比超过该值时,按框架结构计算较为合理;否则,可认为结构属于框筒结构。通过对各参数的分析,得出影响临界跨高比的各种影响因素,并给出了两种结构体系判别的步骤。该方法简单、实用,可供初步设计使用。

关键词:框筒结构;剪力滞;框架结构;裙梁跨高比

中图分类号:TU973⁺.16;TU318⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)02-0062-04

Research on the Maximum Ratio of Beam's Span to Height in Frame - Tube Structures

MENG Huan - ling , SHEN Pu - sheng

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: The shear lag effect in frame - tube structures can be neglected when the ratio of beam's span to height increases to some degree, and its behaviors comes close to the behaviors of frame structures. The maximum ratio of beam's span to height is obtained by the equal side - sway of two structures. The structure should belong to frame structures when its ratio of beam's span to height exceeds the critical value. Otherwise, it should belong to frame - tube structures. According to the analysis of the various parameters, some influence factors can be obtained, and the process to distinguish the two structural systems is given. It is shown that this method is accurate and convenient enough for use during the preliminary stage of design.

Keywords: frame - tube structures; shear lag; frame structures; ratio of beam's span to height

高层建筑中常用的框筒与框架结构体系,在许多方面存在着明显的差异。(1)受力性能:在水平荷载作用下,前者存在剪力滞后效应^[1],表现出弯剪综合变形特征;后者无需考虑剪力滞后的影响,表现出典型的剪切变形特征。(2)角柱处理:前者为减少剪力滞后效应,往往将角柱面积减少或去掉角柱,以能较好地发挥其空间受力性能^[2];后者为增大结构侧移刚度,减少侧移,往往将角柱面积加大乃至形成巨型框架角柱。(3)简化分析:前者可采用等效角柱法转化为普通框架进行计算,且需考虑梁柱刚域的影响;后者可直接采用D值法进行计算。

实际工程中一般认为“密柱深梁”的结构体系为框筒结构,“稀柱浅梁”的结构体系为框架结构。然而,框筒结构可随着跨高比(裙梁跨度与层高之比)的

增大而逐渐转变成框架结构。在水平荷载作用下,由于空间作用使得密柱深梁框筒的翼缘框架柱承受较大轴力,当柱距在一定范围内增大,使得跨高比也增大时,剪力滞后加剧,柱轴力将随框架柱距的加大而减少。但是,当柱距继续增大到“稀柱筒体”乃至成为普通框架结构时,除角柱外,其它柱子的轴力将很小,由量变到质变,通常可忽略沿翼缘框架传递轴力的作用。因此,如何确定梁柱最大跨高比成为框架结构设计的关键问题。

文中基于等效连续化法和D值法推导出的框筒与框架结构的水平侧移曲线,通过令两种结构体系的水平侧移曲线相等的方法来寻求框筒结构最大跨高比,当跨高比超过该值时,若仍旧按框筒结构计算,侧移较小、结构不安全,此时按框架结构计算较为合理;

* 收稿日期:2005-12-18

基金项目:高等学校博士点基金资助项目(20020532010)

作者简介:孟焕陵(1978-),男,湖南新邵人,博士生,主要从事高层结构分析与设计方法研究。

当跨高比小于该值时,可认为结构属于框筒结构。通过对各参数的分析,得出了影响临界跨高比的各种因素,并给出了两种结构体系判别的步骤。该方法简单、实用,可供初步设计使用。

1 框筒结构的水平侧移

等效连续化方法,就是将每一面梁柱体系的框架用一个等效均匀正交各向异性平板来代替。

假定腹板上的轴向位移为3次抛物线分布;翼缘板的轴向位移为2次抛物线分布。下标 w 代表属于腹板,下标 f 代表翼缘板。

$$\text{腹板: } w_w = \varphi a \left[(1 - \alpha) \frac{x}{a} + \alpha \left(\frac{x}{a} \right)^3 \right] \quad (1)$$

$$\text{翼缘板: } w_f = \varphi a \left[(1 - \beta) + \beta \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: φ 为4根角柱所在的平截面的转角,是 z 的函数; a 为腹板框架 x 向长度的一半; b 为翼缘框架 y 向长度的一半; α 为腹板剪力滞后系数; β 为翼缘板剪力滞后系数。

整个结构的总势能为^[3]:

$$\Pi = \Pi_e + \Pi_p = f(u, \varphi, \varphi', \alpha, \beta) \quad (3)$$

Π_e 为整个结构所储存的应变能,表达式为:

$$\begin{aligned} \Pi_e = & \int_0^H \int_{-a}^a t_w (E \varepsilon_w^2 + G_w \gamma_{xz}^2) dx dz + \\ & \int_0^H \int_{-b}^b t_f (E_f \varepsilon_f^2 + G_f \gamma_{yz}^2) dy dz + \int_0^H 2EA_k \varepsilon_k^2 dz \end{aligned} \quad (4)$$

其中, u 为结构水平方向位移,是 z 的函数; A_k 为角柱扣除中柱面积后剩余面积; ε_w 、 ε_f 分别为腹板和翼缘板的正应变; γ_{xz} 、 γ_{yz} 分别为腹板和翼缘板的剪应变; t_w 、 t_f 分别为腹板和翼缘板厚度。

Π_p 为外力势能,表达式为:

$$\Pi_p = -Pu(z) \quad (\text{顶点 } P \text{ 集中}) \quad (5)$$

$$\Pi_p = -\int_0^H Uu(z) dz \quad (\text{集度 } U \text{ 水平均布}) \quad (6)$$

$$\Pi_p = -\int_0^H T \frac{z}{H} u(z) dz \quad (\text{顶部集度 } T \text{ 倒三角形}) \quad (7)$$

由最小势能原理可知,结构的总势能对每个未知量的变分为0。结构的总势能对 φ 变分,可得:

$$G_w = \frac{h/s}{\frac{(h-d_b)^3}{Ed_c^3} + \left(\frac{h}{s}\right)^2 \frac{(s-d_c)^3}{Ed_b^3} + \frac{h-d_b}{G_c d_c} + \left(\frac{h}{s}\right)^2 \frac{s-d_c}{G_c d_b}} = \frac{Eh/s}{8\lambda_c^3 + 8\lambda_b^3 (h/s)^2 + 5\lambda_c + 5\lambda_b (h/s)^2} \quad (15)$$

式中: d_b 、 d_c 分别为梁和柱的截面高度; λ_c 、 λ_b 为分别柱和梁剪跨比(1/2净跨与截面高度之比); G_c 为混凝土的剪切模量, $G_c = 0.4E$ 。

$$EI \frac{\partial \varphi}{\partial z} = M \quad (8)$$

式中: M 为水平荷载产生的倾覆力矩; EI 为有效的筒体截面抗弯刚度。

EI 随着高度而变化,并且依赖于其它未知量。如果假定 EI 沿着高度的变化对转角 φ 的一阶导数的影响可以忽略不计,那么 φ 就可以由式(8)直接积分得到:

$$\varphi = \frac{1}{EI} \int_0^z M dz \quad (9)$$

结构总势能对 u 变分,可得控制微分方程:

$$4G_w t_w a \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \varphi \right) = V \quad (10)$$

式中: V 为结构的水平剪力。

由式(10)积分,可得:

$$u = \int_0^z \left(\frac{V}{4G_w t_w a} - \varphi \right) dz \quad (11)$$

在结构的水平侧移的计算过程中,首先把的值代入式(9)计算 φ ,然后把 φ 的值代入式(11)求出 u 的值。由于 EI 随着结构高度而变化, φ 和 u 的计算式非常复杂。然而,大部分弯曲变形发生在结构基底附近,靠近结构顶部时 EI 的确切值对于 φ 和 u 的计算结果并没有很大的影响。因此, EI 在结构高度范围内取其在基底的值进行侧移计算,忽略 EI 沿着高度的变化。经过这些简化,得到水平侧移计算公式如下:

顶点集中荷载:

$$u = \frac{P}{EI} \left(\frac{1}{2} H z^2 - \frac{1}{6} z^3 \right) + \frac{P}{4G_w t_w a} z \quad (12)$$

均布荷载:

$$\begin{aligned} u = & \frac{U}{EI} \left(\frac{1}{4} H^2 z^2 - \frac{1}{6} H z^3 + \frac{1}{24} z^4 \right) + \\ & \frac{U}{4G_w t_w a} \left(H z - \frac{1}{2} z^2 \right) \end{aligned} \quad (13)$$

倒三角形荷载:

$$\begin{aligned} u = & \frac{T}{EI} \left(\frac{1}{6} H^2 z^2 - \frac{1}{12} H z^3 + \frac{1}{120} \frac{z^3}{H} \right) + \\ & \frac{T}{4G_w t_w a} \left(\frac{1}{2} H z - \frac{1}{6} \frac{z^3}{H} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

由文献[4]可知, G_w 得表达式为:

2 框架结构的水平侧移

在水平荷载作用下图1所示框架的变形 u ,系由

梁柱的剪切变形所产生的整体剪切侧移 u_v 和由柱轴向变形产生的整体弯曲侧移 u_m 迭加而得^[5], 即 $u = u_v + u_m$ 。

$$u_v = \frac{V}{\sum D} \quad (16)$$

$$u'_v = \frac{u_v}{h} = \frac{V}{h \sum D} = \frac{V}{C_f} \quad (17)$$

$$u''_v = -\frac{q(z)}{C_f} \quad (18)$$

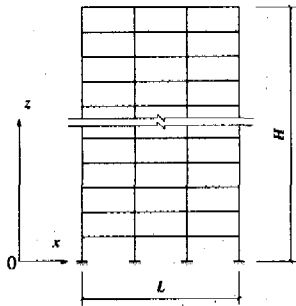


图1 平面框架

由基于平截面假定、忽略剪切变形与转动惯性影响的 Euler-Bemoulli 初等梁弯矩理论可知:

$$u''_m = -\frac{M}{EI} \quad (19)$$

$$u'' = u''_v + u''_m = -\frac{q(z)}{C_f} - \frac{M}{EI} \quad (20)$$

式中: $q(z)$ 为框架承受的水平荷载; M 为水平荷载产生的弯矩; C_f 为框架的抗推刚度, 其中 D 为柱的抗侧移刚度, 框筒结构须考虑刚域的影响, 文献[6]给出了 T 型节点的刚域长度的修正公式; EI 为框架的抗弯刚度; I 为两边柱的整体惯性矩, 其值为:

$$I = \frac{L^2}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}} \quad (21)$$

式中: A_1 、 A_2 及 L 是左右边柱的截面积及其形心间的距离。

边界条件: $z=0$ 时, $u=0$ 及 $u' = \frac{V_0}{C_f}$

顶点集中荷载作用下

$$u = \frac{P}{EI} \left(\frac{1}{2} H z^2 - \frac{1}{6} z^3 \right) + \frac{P}{C_f} z \quad (22)$$

均布荷载作用下:

$$q(z) = U \quad (23)$$

$$M = -\frac{1}{2} U (H - z)^2 \quad (24)$$

$$u'' = -\frac{U}{C_f} + \frac{U(H-z)^2}{2EI_f} \quad (25)$$

$$u' = -\frac{Uz}{C_f} + \frac{U}{2EI_f} \left(H^2 z - H z^2 + \frac{1}{3} z^3 \right) + C_1 \quad (26)$$

$$u = -\frac{Uz}{C_f} + \frac{U}{2EI_f} \left(\frac{H^2 z^2}{2} - \frac{H z^3}{3} + \frac{z^4}{12} \right) + C_1 z + C_2 \quad (27)$$

由边界条件求出 $C_2=0$ 及 $C_1 = \frac{UH}{C_f}$, 故

$$u = \frac{U}{EI} \left(\frac{1}{4} H^2 z^2 - \frac{1}{6} H z^3 + \frac{1}{24} z^4 \right) + \frac{U}{C_f} \left(H z - \frac{1}{2} z^2 \right) \quad (28)$$

倒三角形荷载作用下:

$$q(z) = T \left(\frac{z}{H} \right) \quad (29)$$

$$u = \frac{T}{EI} \left(\frac{H^2 z^2}{6} - \frac{H z^3}{12} + \frac{z^3}{120H} \right) + \frac{T}{C_f} \left(\frac{H z}{2} - \frac{z^3}{6H} \right) \quad (30)$$

3 框筒结构裙梁的最大跨高比

对比框筒与框架结构的水平侧移曲线, 即从式(12)与式(22)、(13)与式(28)、(14)与式(30)的对比中, 可知两种结构体系都包含相同的变形部分, 令两种结构体系的水平侧移曲线相等, 即只要下式相等即可。

$$4G_w t_w a = 2G_w t_w L = C_f \quad (31)$$

将(15)代入式(31), 可得

$$\frac{8\lambda_c^3 + 8\lambda_b^3 (h/s)^2 + 5\lambda_c + 5\lambda_b (h/s)^2}{h/s} = \gamma \quad (32)$$

式中: $\gamma = \frac{2Et_w L}{C_f}$, 得裙梁的临界跨高比为:

$$[s/h] = \frac{2\lambda_b (8\lambda_b^2 + 5)}{\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 4\lambda_b \lambda_c (8\lambda_b^2 + 5) (8\lambda_c^2 + 5)}} \quad (33)$$

当裙梁的跨高比超过该值时, 若仍旧按框筒结构计算, 侧移较小、结构不安全, 此时按框架结构计算较为合理; 当裙梁的跨高比小于该临界值时, 可认为结构属于框筒结构。

值得注意的是, 要使式(19)有解, 必须有

$$\gamma \geq 2 \sqrt{\lambda_b \lambda_c (8\lambda_b \lambda_c (8\lambda_b^2 + 5) (8\lambda_c^2 + 5))} \quad (34)$$

否则, 结构为框筒结构。

4 参数分析及判别步骤

4.1 参数分析

估算 γ 的取值范围, 一般情况下, $E = 3.25 \times 10^4$ N/mm², $t_w = 200$ mm, $L = 18$ m, $C_f = 2.5 \times 10^8$ N, 则 $\gamma = 9.36 \times 10^2$ 。取 $\gamma = 300, 900, 1500$ 三种情况下, $\lambda_b = 1.5 \sim 6$, $\lambda_c = 1.5 \sim 3.5$ 时, 临界跨高比 $[s/h]$ 的变化趋势 (见图2~图4)。

从图中可以看出, 随着梁、柱剪跨比的增大, 结构临界跨高比亦增大; 系数 γ 愈大, 即结构宽度愈宽、抗

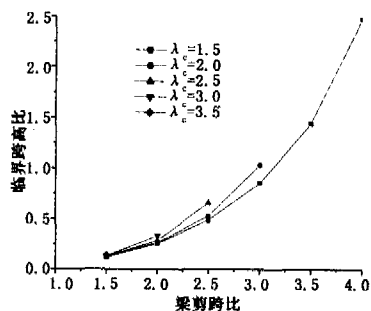


图2 临界跨高比($\gamma = 300$)

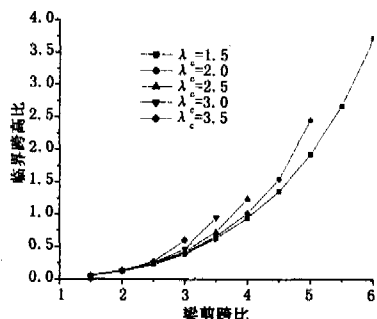


图3 临界跨高比($\gamma = 900$)

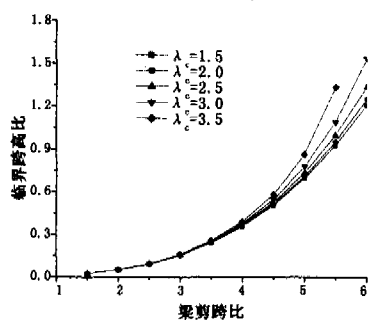


图4 临界跨高比($\gamma = 1500$)

推刚度愈小,结构临界跨高比愈小。

4.2 结构体系的判别步骤

1) 计算结构的抗推刚度 G 及系数 γ 。

2) 验算 γ 是否满足式(34), 不满足则为框筒结构, 满足则进行下一步。

3) 代入式(33)计算裙梁的临界跨高比 $[s/h]$ 。若裙梁的跨高比 $s/h \geq [s/h]$, 则可认为结构属于框架结构, 否则为框筒结构。

5 结论

1) 分别基于等效连续化法和 D 值法推导了框筒与框架结构的水平侧移曲线。

2) 通过令两种结构体系的水平侧移曲线相等的方法来寻求区分框筒与框架结构裙梁的临界跨高比, 当裙梁的跨高比超过该值时, 按框架结构计算较为合理; 当跨高比小于该值时, 可认为结构属于框筒结构。

3) 框筒中裙梁的最大跨高比是多变量的函数, 通过对各参数的分析, 得出了影响裙梁临界跨高比的各种因素。

参考文献:

- [1] Foutch D A, Chang P C. A Shear Lag Anomaly[J]. J. Struct. Div., ASCE, 1982, 108(7): 1 653 - 1 658.
- [2] 陈岳辉, 刘斌. 框筒结构中角柱刚度对结构内力分布影响的研究[J]. 结构工程师, 1998, 14(2): 14 - 18.
- [3] 沈蒲生. 高层建筑结构疑难释疑[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4] Kinh H Ha, Paul Fazio, Osama Moselhi. Orthotropic Membrane for Tall Building Analysis[J]. Journal of Structural Division, 1978, 104(9): 1 495 - 1 505.
- [5] 方鄂华. 多层及高层建筑结构设计[J]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [6] 曹希尧, 李家宝, 李存权. 框筒 T 型节点刚域长度的修正[J]. 建筑结构, 1998, 19(7): 14 - 16.

(上接第 58 页)

- [10] 中国土木工程学会高强混凝土委员会. 高强混凝土结构设计及施工指南(第二版)[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2001.
- [11] GB50010 - 2002, 混凝土结构设计规范 GB50010 - 2002[S].
- [12] 吕德生, 汤骅. 高强混凝土弹性模量与抗压强度的相关性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2001, (6): 20 - 21.
- [13] 严少华, 钱七虎, 孙伟, 等. 碳纤维高强混凝土单轴压缩下应力 - 应变关系[J]. 东南大学学报, 2001, 31(2): 77

- 80.

- [14] 王志军, 蒲心诚. 超高强混凝土单轴受压性能及应力应变曲线的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, (80): 27 - 33.
- [15] Hudson J. A. Grouch S. L., Fairhurst C. Soft, stiff and Servo-controlled testing machine; a review with reference to rock failure[J]. Engineering Geology, 1972, 6(2): 155 - 189.