

文章编号: 1000-5013(2009)04-0449-05

框筒结构的简化分析模型

张大勇, 施养杭

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 将楼层整体变形分为剪切变形和弯曲变形, 用壁式框架 D 值法和等效连续体法, 对在侧向荷载作用下框筒结构进行简化分析. 在考虑翼缘框架对剪切变形影响的前提下, 应用壁式框架 D 值法对整体剪切变形进行分析; 在考虑剪力滞效应的前提下, 用等效连续体法推导剪力滞系数, 分析整体弯曲变形. 算例结果表明, 简化计算与空间框架计算的结果接近, 各柱轴向应变的误差在 $2\% \sim 8\%$ 之间, 水平位移误差在 10% 之内.

关键词: 框筒结构; 简化分析; D 值法; 剪力滞; 等效连续体法

中图分类号: TU 973+ . 17

文献标识码: A

框筒结构是由建筑物外围轮廓线处布置密柱深梁所形成的框架. 在整体上, 这些框架围成一个闭合的筒体, 不设内部支撑墙体, 仅筒体作为一个竖向悬臂构件承受水平荷载, 具有很大的抗侧刚度, 所以可以建造较高的楼宇. 通常情况下, 将与水平侧力垂直的框架称为翼缘框架, 而将与水平侧力平行的框架称为腹板框架, 不同平面框架相交处的柱称为角柱, 其余的柱称作边柱. 在水平荷载作用下, 框筒结构的受力性能类似于薄壁箱形梁. 裙深梁的刚度并不是无限大, 其柔性产生了剪力滞效应, 使角柱的轴力增大, 中柱的轴力减小. 因此, 导致截面变形不再符合初等梁理论的平截面假定, 类似于薄壁箱形梁的受力性能. 剪力滞框筒结构降低了结构的抗侧刚度与抗倾覆能力, 使得空间整体性能不能完全发挥. 如何减小剪力滞影响已成为框筒结构设计的主要问题. 目前, 根据所作假设的不同及筒体结构本身的受力特性, 对框筒结构的简化计算方法大致有以下两类: (1) 等效平面框架法. 包括翼缘展开法^[1]和等效角柱法^[2]; (2) 等效连续化法^[3]. 这两种简化计算方法经典且简便, 但也存在着不足. 它们均忽略了翼缘抗剪作用, 即当楼板和框架整体浇筑时将产生较大的误差^[4]. 参照文[4]的计算理论, 本文以等效连续法为前提, 配合壁式框架 D 值法对框筒结构进行简化分析.

1 D 值法分析框架

1.1 基本假定

采用如下 3 点假定: (1) 楼板平面内刚度无限大, 而平面外的刚度可忽略不计; (2) 各楼层均存在反弯点; (3) 将框筒结构在侧向荷载作用下的楼层变形分为剪切型和弯曲线, 分别有壁式 D 值法和等效连续体法进行计算叠加.

1.2 考虑剪切变形后的刚度系数和 D 值的修正

图 1 为两端壁式框架杆件, a, b 为杆件的刚域系数. 设 η 为考虑剪切变形影响的系数 ($\eta = \frac{12EI}{GA l^2}$), 当 $G = 0.4E$ 时, $\eta = \frac{30I_0}{Al^2}$, l, I_0 分别为杆件中段长度和惯性矩. 目前, 对于刚域长度的取值普遍参照 JGJ 3-2002《高层建筑混凝土结构技术规程》(以下简称《高规》)中

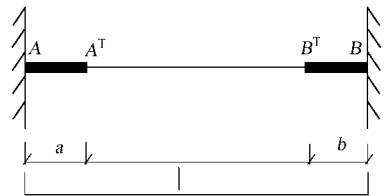


图 1 带刚域杆件
Fig. 1 The bar element
with rigid zone

收稿日期: 2008-01-08

通信作者: 施养杭(1962-), 男, 教授, 主要从事工程抗震与结构寿命的研究. E-mail: d.s666@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120); 建设部国家混凝土规范第六批科研攻关课题 (GBKY6001); 华侨大学高层次人才科研启动项目(05BS303)

的规定. 为简化计算, 用一个相同长度的等截面受弯杆件代替壁式框架杆件, 使两者具有相同的转动刚度, 所求杆件的等效刚度 $EI = EI_0 \eta (l/l')^3$. 其中, η 为考虑剪切变形的刚度折减系数 ($\eta = 1/(1 + \eta)$).

在壁式框架的框架中, 经常用杆件修正刚度 k 代替普通框架中的 i , 即梁取为 $k_i = EI/l$, 柱取为 $k_c = EI/h$, EI 为带刚域柱的等效高度. 此时, 可以按照普通框架设计中给出的方法计算柱的 $D_{m,i}$ 值, 即

$$D_{m,i} = \alpha_c 2k_c / h^2.$$

（1）

刚度系数 α_c 值的计算, 如表 1 所示. 在求梁柱刚度比 (K) 时, 考虑到与角柱相连的裙梁反弯点不在中点及整体弯曲变形的影响, 取折减系数为 $0.7^{[4]}$. 表 1 中, $k_1 \sim k_4$ 为上、下层带刚域梁按等效刚度计算的线刚度.

1.3 反弯点高度系数 Z_m 的确定

为了简化计算, 当 $m = 1$ 时, $Z_m = 0.60$; 当 $1 < m < n$ 时, $Z_m = 0.50$; 而当 $m = n$ 时, $Z_m = 0.45$.

2 翼缘框架抗剪参与系数

假设第 m 层翼缘框架柱及内柱 (有内柱时) 的抗剪参与系数为 ζ_m , 有

$$\zeta_m = D'_m / D_m.$$

（2）

式(2)中, D'_m 为第 m 层翼缘框架 (不含角柱) 及内柱的有效抗剪刚度, D_m 为第 m 层腹板框架 (含角柱) 总抗剪刚度. 当各中柱的截面尺寸相同及各角柱的截面尺寸相同时, 有

$$D_m = 2(n_x - 2)D_{m,m} + 4D_{m,c}.$$

其中, $D_{m,m}$ 为中柱的 D_m 值, $D_{m,c}$ 为角柱的 D_m 值. 为求 ζ_m , 需求出 D'_m . 当各层层高均为 h 时, 有

$$D'_1 = 2(n_y - 2) \frac{3EI_{c,y}}{h^3}, \quad D'_m = 0.1D'_1, \quad m > 1.$$

（3）

式(3)中, n_y 为翼缘方向柱数 (含角柱), $I_{c,y}$ 为翼缘中柱沿 y 向的截面惯性矩, 系数 0.1 是翼缘框架的有效抗剪系数, 而 D'_1 是按底端固支上部自由的悬臂杆考虑翼缘框架抗剪刚度.

3 整体剪切变形分析

假设框筒结构总层数为 n , 以第 m ($1 \leq m \leq n$) 层为研究对象, 外荷载作用在楼层部位, 各层反弯点的高度为 Z_m , 则第 m 层第 i 根腹板柱受到的剪力为

$$V_{m,i} = \frac{1}{1 + \zeta_m} \cdot \frac{D_{m,i}}{D_m} \cdot V_m.$$

（4）

式(4)中, $D_{m,i}$ 为第 m 层第 i 根柱的抗侧刚度, V_m 为第 m 层结构受到的总剪力, $V_m = \sum_{j=m}^n F_j$, F_j 为作用于第 j 层的外部荷载. 各柱受到的剪力后, 将剪力乘反弯点到柱顶或柱底的距离, 可得到柱顶或柱底的弯矩. 第 m 层的整体剪切水平位移为

$$u_{s,m} = \frac{1}{1 + \zeta_m} \cdot \frac{V_m}{D_m} + \sum_{i=1}^{m-1} u_{s,i}.$$

（5）

4 整体弯曲变形分析

4.1 等效连续体法模型

将框筒结构简化成正交同性板, 一般可认为由两块平行于水平力作用方向的腹板、两块垂直于水平力方向的翼缘板和 4 个角柱组成. 对于等效平面板而言, 影响分析结果精度主要有如下两方面,

(1) 等效平板的分析方法. 用等效连续体法分析框筒结构, 每一面梁柱的框架可用一个等效均匀的正交平板来代替, 形成一个闭和的实体等效筒(图 2). 假设楼板平面内刚度无限大, 能约束壁板的平面外变形, 因此, 壁板只要考虑平面内的作用. (2) 等效平板的弹性特征量. 包括等效平板的弹性模量(在这里取 $E_c = E$) 和等效平板的剪切模量.

$$G = \frac{h/st}{\Delta_b/V + \Delta/V},$$
$$\frac{\Delta_b}{V} = \frac{(h - d_b)^3}{12E_m I_c} + \left(\frac{h}{s}\right)^2 \frac{(s - d_c)^2}{12E_m I_b} \frac{\Delta}{V} = \frac{(h - d_b)}{G_m A_c} + \left(\frac{h}{s}\right)^2 \frac{(s - d_c)}{G_m A_b}. \tag{6}$$

式(6)中, s 为柱距, h 为层高, t 为等效板厚度, d_b, d_c 分部为梁和柱的截面高度, I_b, I_c 分别为梁和柱的截面惯性矩.

4.2 剪力滞影响系数

假定腹板和翼缘板的位移方程分别为

$$U_1(z, x) = \varphi \alpha [(1 - \alpha) \frac{x}{a} + \alpha (\frac{x}{a})^3], \tag{7}$$

$$U_2(z, y) = \varphi \beta [(1 - \beta) + \beta (\frac{x}{b})^2]. \tag{8}$$

式(7), (8)中, a 为腹板框架 x 方向长度的一半, b 为翼缘框架 y 方向长度的一半; φ 是 z 的函数, 为 4 根角柱所在的平截面的转角; α, β 分别为腹板和翼缘板的剪力滞系数. 考虑剪力滞效应, 假定剪力滞系数 α, β 分别为

$$\alpha = \alpha_1 (1 - \zeta)^2 + \alpha_2 (2\zeta - \zeta^2), \quad \beta = \beta_1 (1 - \zeta)^2 + \beta_2 (2\zeta - \zeta^2). \tag{9}$$

式(9)中, $\zeta = z/H$, E 为混凝土的弹性模量, G 为等效板的剪切模量, $\varphi = E/G$. 当 $z = 0$ 时, $\alpha = \alpha_1, \beta = \beta_1$; 当 $z = H$ 时, $\alpha = \alpha_2, \beta = \beta_2$. 即 α_1, β_1 是结构底部处的剪力滞系数, α_2, β_2 是结构顶部处的剪力滞系数. 将腹板和翼缘板的相对剪切刚度分别定义为

$$m_w = \frac{G_w H^2}{E_w a^2} = \frac{1}{\varphi} (H/a)^2, \quad m_f = \frac{G_f H^2}{E_f b^2} = \frac{1}{\varphi} (H/b)^2,$$

从而可得剪力滞系数表达式^[5].

(1) 当顶点集中荷载时, 剪力滞系数表达式为

$$\alpha_1 = \frac{1.17m_w + 1.00}{m_w^2 + 2.67m_w + 0.57}, \quad \alpha_2 = \frac{0.29m_w + 1.00}{m_w^2 + 2.67m_w + 0.57},$$
$$\beta_1 = \frac{3.50m_f + 12.60}{m_f^2 + 11.20m_f + 10.08}, \quad \beta_2 = \frac{0.88m_f + 12.60}{m_f^2 + 11.20m_f + 10.08}.$$

(2) 当水平均布荷载时, 剪力滞系数表达式为

$$\alpha_1 = \frac{2.57m_w + 1.12}{m_w^2 + 2.94m_w + 0.64}, \quad \alpha_2 = \frac{0.03m_w + 1.12}{m_w^2 + 2.94m_w + 0.64},$$
$$\beta_1 = \frac{7.72m_f + 14.15}{m_f^2 + 12.35m_f + 11.32}, \quad \beta_2 = \frac{0.08m_f + 14.15}{m_f^2 + 12.35m_f + 11.32}.$$

(3) 当倒三角形荷载时, 剪力滞系数表达式为

$$\alpha_1 = \frac{2.22m_w + 1.09}{m_w^2 + 2.86m_w + 0.62}, \quad \alpha_2 = \frac{0.10m_w + 1.09}{m_w^2 + 2.86m_w + 0.62},$$
$$\beta_1 = \frac{6.67m_f + 13.71}{m_f^2 + 12.01m_f + 10.97}, \quad \beta_2 = \frac{0.29m_f + 13.71}{m_f^2 + 12.01m_f + 10.97}.$$

剪力滞的影响因素有如下 5 点^[6-8]. (1) 结构高度. 剪力滞系数是高度的递减函数, 故底部剪力滞现象相对严重些. 在满足结构稳定的条件下, 高宽比愈大, 剪力滞系数愈小. (2) 开洞率. 开洞率越小, 剪力滞影响越小. (3) 平面形状. 剪力滞系数分别是 a, b 的增函数, 翼缘框架越长, 剪力滞越大, 框架中部的柱子轴力会很小. (4) 角柱面积. 角柱面积加大能增大框筒结构整体刚度, 但同时也加大了剪力滞效应, 对结构设计利弊难辨. 将角柱面积减小或去除角柱, 剪力滞效应明显减小. (5) 跨高比. 框筒结

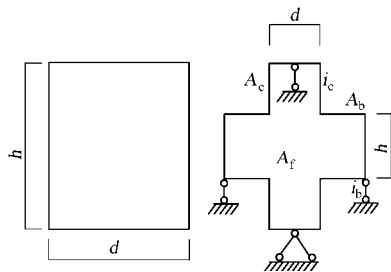


图 2 框筒结构等效单元
Fig. 2 Equivalent element of framed tube structures

构随着跨高比的增大, 剪力滞效应增大, 框筒结构会转变成普通框架结构. 此时, 再按框筒结构计算, 侧移较小, 结构偏不安全. (6) 长宽比. 在框筒结构的设计时, 应优先选择长宽比 L/B 等于 1.0

4.3 整体弯曲变形

上述的等效连续体的方法推导出剪力滞影响的效应, 如图 3 所示. 设 $2b, 2c$ 分别为框筒沿 y, x 方向的宽度, 腹板、翼缘各柱的纵向位移函数如式(7), (8), 剪力滞系数按式(9)取值. 根据框筒截面分析, 可得第 m 层结构承受的总弯矩为

$$M_m = F_m(1 - z_m)h_m + F_{m+1}[h_{m+1} + (1 - z_m)h_m] + \dots = \sum_{i=m}^n F_i[\sum_{j=m+1}^i h_j + (1 - z_m)h_m], \tag{10}$$

式(10)中, h_j 为第 j 层的层高, F_i 为作用在第 i 层的水平荷载, z_m 为第 m 层的反弯点高度系数. 如果是等高楼层, 各层均为 h 时, 式(10)可以简化为

$$M_m = \sum_{i=m}^n F_i[(i - m)h + (1 - z_m)h]. \tag{11}$$

设中柱截面积为 A_m , 角柱截面积为 A_c , 第 m 层的转角增量为 $\Delta\Phi_m$, 则框筒的抗弯刚度 $K_{\Delta\Phi_m} = M_m h_m / \Delta\Phi_m$, 从而推导得 $\Delta\Phi_m = M_m h_m / K_{\Phi_m}$. 由

$$K_{\Delta\Phi_m} = 2Eb^2A_m\left\{2\sum_{i=1}^{(n_x-1)/2}\left[(1-\alpha)\left(\frac{x_i}{b}\right)^2 + \alpha\left(\frac{x_i}{b}\right)^4\right] + 2\frac{A_c}{A_m} + \sum_{j=1}^{n_y-2}\left[(1-\beta) + \beta\left(\frac{y_j}{c}\right)^3\right]\right\} \tag{12}$$

可求得转角位移增量 $\Delta\Phi_m$, 即可求得 m 层各柱的轴力. 式(12)中, $(n_x - 1)/2$ 取整数, n_x 为单侧腹板的柱数(含角柱), n_y 为单侧翼缘板的柱数(含角柱). 继续推导第 m 层柱的轴力, 可知腹板中柱轴力、角柱轴力和翼缘中柱轴力分别为

$$P_{m,i} = EA_m b \frac{\Delta\Phi_m}{h_m} \left[(1 - \alpha) \frac{x_i}{b} + \alpha \left(\frac{x_i}{b} \right)^3 \right],$$
$$P_{m,c} = EA_c b \frac{\Delta\Phi_m}{h_m},$$
$$P_{m,j} = EA_m b \frac{\Delta\Phi_m}{h_m} \left[(1 - \beta) + \beta \left(\frac{y_j}{c} \right)^2 \right],$$

而第 m 层整体弯曲变形水平位移为 $u_{b,m} = u_{b,m-1} + \Phi_{m-1}h_m + \Delta\Phi_m h_m/2$ 由此, 可得各层总水平位移为 $u_m = u_{s,m} + u_{b,m}$.

5 算例

某 20 层框筒结构, 层高 3 m, x, y 方向柱数 $n_x = n_y = 11$, 各梁柱截面尺寸均为 800 mm \times 800 mm, 结构承受顶部集中荷载作用 $F = 2$ kN, 钢筋混凝土弹性模量 $E_m = 30$ GPa, 剪切模量 $G_m = 12$ GPa. 按《高规》中有关规定, 刚域长度取 200 mm, 等效板厚取为 0.213 m, 计算结果如图 4 所示.

由图 4 可知, 简化计算结果与空间框架计算结果较为接近, 各柱轴向应变的误差在 2% ~ 8% 之间, 水平位移误差在 10% 之内, 基本上满足初步设计的精度要求.

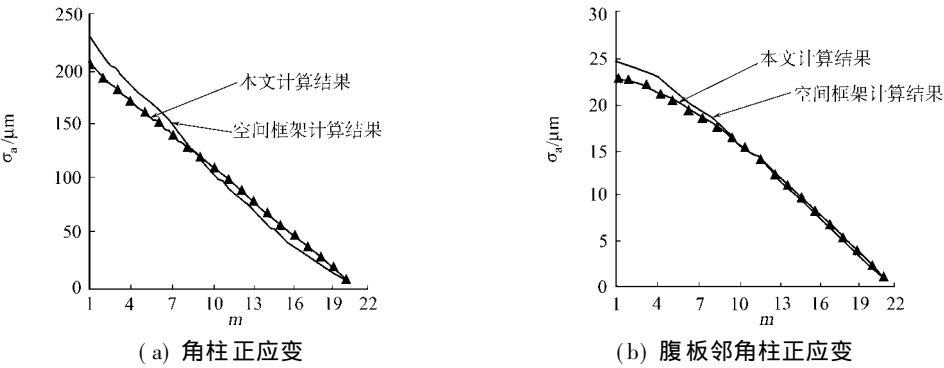
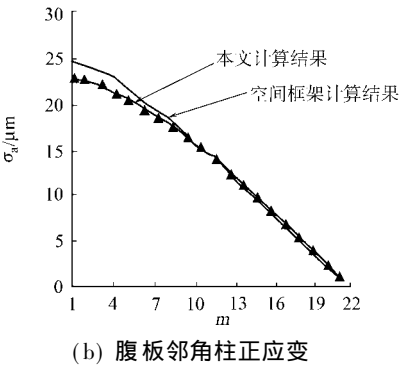
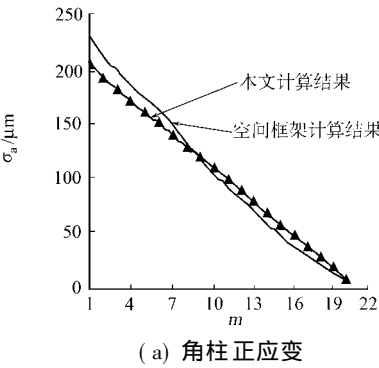


图 3 框筒结构性能的轴向应力分布
Fig.3 The distribution of axial stress of column in framed tube structures



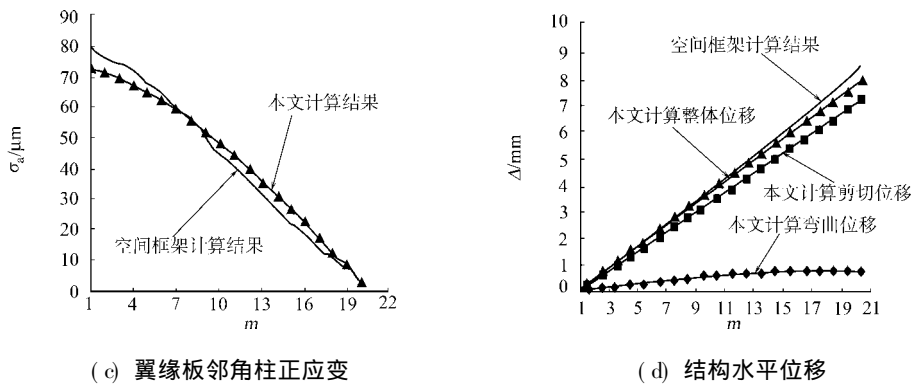


图 4 算例计算结果

Fig. 4 The calculation results

6 结束语

由于负剪力滞对结构的影响较小, 实际工程主要考虑正剪力滞的影响, 故没有考虑负剪力滞效应。实例证明, 所提出的方法简捷, 能为初步设计提供较为精确的分析。

参考文献:

[1] KHAN F R, AMIN N R. Analysis and design of framed tube structures for tall concrete buildings[J]. Struct Eng, 1973, 51(3), 85-92.

[2] 崔鸿超. 框筒(筒中筒)结构的简化计算方法[J]. 建筑结构学报, 1982(6): 38-50.

[3] COULL A, BOSE B. Simplified analysis of framed tube structures[J]. J Struct Div, ASCE, 1975, 110(11): 2223-2240.

[4] 王海波, 陈伯望, 沈蒲生, 等. 框筒结构的层模型简化分析方法[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(4): 1-6.

[5] 彭伟. 高层建筑结构设计原理[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004.

[6] 沈蒲生, 孟焕陵. 框筒结构梁柱截面基于剪力滞最小的合理高度[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 16-19.

[7] 孟焕陵, 沈蒲生. 框筒结构裙梁最小跨高比研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(2): 62-65.

[8] 刘中辉, 王全凤. 框筒结构长宽比对剪力滞后的影响及其分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2005, 26(3): 331-332.

Simplified Analysis Mode of Framed Tube Structures

ZHANG Da-yong, SHI Yang-hang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Dividing the storey deformation into shear deformation and flexural deformation, by amendatory contra flexure point method of wall frame and the equivalent continuum method, a simplified method is carried out to analyze the framed tube structure subjected to the lateral loads. Considering the effect of shear stiffness of flange frame on shear deformation, the overall shear deformation is analyzed by amendatory contra flexure point method of wall frame. Considering the shear lag, the equivalent continuum method is used to deduce the coefficient of shear lag and to analyze overall flexural deformation. The calculation results by simplified method is close to the results by spatial frame, the error of axial strains of columns is 2% ~ 8%, the error of horizontal displacements is less than 10%.

Keywords: framed tube; simplified analysis; amendatory contra flexure point method; shear lag; equivalent continuum method

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 方德平)