

文章编号:1673-2049(2008)03-0012-05

钢-混凝土组合框架柱的稳定设计方法

蒋丽忠¹, 汤裕坤^{1,2}

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 安徽省港航勘测设计院, 安徽 合肥 230011)

摘要:针对钢-混凝土组合框架的特点,利用考虑滑移影响的组合梁等效刚度计算方法,考虑组合楼盖的组合效应、组合梁与柱的实际约束程度以及节点的半刚性连接特征等因素,推导出有侧移和无侧移半刚性组合框架柱组合梁的刚度修正系数,提出了有侧移及无侧移组合框架柱的稳定设计方法。算例分析结果表明,该设计方法有效地利用了组合效应和节点的延性,具有较好的经济效益。

关键词:组合框架;半刚性连接;转动刚度;计算长度;稳定设计方法

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

Stability Design Method of Steel-concrete Composite Frame Columns

JIANG Li-zhong¹, TANG Yu-kun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;

2. Survey Design Institute of Harbor Channel of Anhui Province, Hefei 230011, Anhui, China)

Abstract: According to the characteristics of steel-concrete composite frames, the composite effect of floor slab, real constraint degree between composite beams and columns as well as features of semi-rigid connection of joints were considered by using the calculation methods for equivalent stiffness of composite beams under the slip effect. The stiffness modified coefficients of composite beams of sway and non-sway semi-rigid composite frame columns were established and the stability design methods of sway and non-sway composite frame columns were put forward. Example analytical results show that the design method effectively makes use of composite effect and ductility of nodes, and has rather good economic benefits.

Key words: composite frame; semi-rigid connection; rotational stiffness; computation length; stability design method

0 引言

近几十年来,组合构件以其截面高度小、自重轻、刚度大、承载能力高、延性好等优点,被广泛应用于各国工程中,特别是在桥梁结构、高层建筑及大跨度结构等领域,已取得了良好的经济效益和社会效益。在高层框架结构体系中,由组合构件组成的框架称为组合框架,它包括组合梁与组合柱、组合梁与钢柱、钢梁与组合柱等类型。但到目前为止,考虑楼

板组合效应的框架分析及设计方法还处于起步阶段,《钢结构设计规范》(GB 50017—2003,以下简称规范)中的框架设计仍然采用纯钢框架的设计理论,并没有考虑混凝土和钢梁的组合效应,更没有考虑节点半刚性的影响。但实际工程中框架的构造都是通过一定数量的剪力连接件将混凝土与钢梁连接从而形成整体,且节点是介于铰接和刚接之间的半刚性连接,如仍采用传统的钢框架简支设计方法或连续设计方法,则是偏于保守的。计算长度法在目前

收稿日期:2008-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50438020);国家自然科学基金项目(50778177)

作者简介:蒋丽忠(1971-),男,湖南衡山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lzhjiang@mail.csu.edu.cn。

的框架稳定设计中仍被广泛应用,童根树等^[1]指出,尽管采用理想化的假定,但通过柱子计算长度系数可以较精确地确定整个楼层的抗侧刚度,并且目前计算长度法对于稳定设计仍具有极高的应用价值。关于组合构件(组合梁、组合柱)的研究,从试验到理论研究都有了许多成果^[2-9],但进行组合框架稳定分析时,由于框架节点连接性能的复杂性,以及荷载作用下框架内力分布的多样性,把这些理论直接用于稳定设计时,还存在许多问题。

本文中笔者将考虑楼盖的组合效应、组合梁与柱的实际约束程度以及节点的半刚性连接特征等因素,提出了有侧移和无侧移组合框架柱中钢柱的稳定设计方法。

1 框架整体稳定设计时的组合梁刚度

对于组合框架整体稳定设计时组合梁刚度的评价,李秋喆等^[10]在对组合框架受力性能进行全面分析的基础上,提出了一种新的框架组合梁刚度评价方法,即首先将组合梁视为变截面梁-柱构件,以最简单的阶梯形变截面杆件来分析组合梁的刚度变化,然后,在竖向荷载、水平荷载作用下根据挠度曲线相等的原则及侧移相等的原则,求出实用性比较强的刚度计算经验公式。这种等效原则对于组合框架的稳定性分析也是适用的。等效刚度计算公式为

$$EI_{eq} = E_s(0.61I_{pos} + 0.4I_{neg}) \quad (1)$$

式中: I_{eq} 为组合梁的换算截面惯性矩; E 为组合梁的弹性模量; EI_{eq} 为组合框架梁的等效截面刚度; E_s 为钢材的弹性模量; I_{pos} 、 I_{neg} 分别为组合梁正、负弯矩区的截面惯性矩。

组合梁正弯矩区截面惯性矩 I_{pos} 按规范中的规定,采用组合梁的折减刚度进行计算,即

$$I_{pos} = \frac{I_{eq}}{1 + \zeta} \quad (2)$$

式中: ζ 为刚度折减系数,按规范第11.4.3条计算。

在组合梁的负弯矩区,混凝土板退出工作,计算组合梁截面特征时,只需考虑钢梁与混凝土板有效宽度内钢筋两部分的组合,当钢筋与钢梁的材料屈服强度不相同,将钢筋等效换算,使其与钢梁材料屈服强度一致,组合梁负弯矩区惯性矩计算模型如图1所示。

组合截面的中和轴到梁底的距离 x 为

$$x = (A_{st}H + A_sH_1) / (A_{st} + A_s) \quad (3)$$

负弯矩区组合梁截面惯性矩 I_{neg} 为

$$I_{neg} = I_s + A_{st}(H - x)^2 + A_s(x - H_1)^2 \quad (4)$$

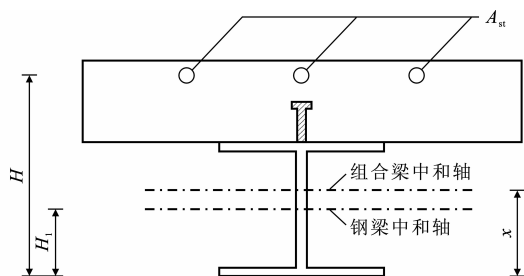


图1 组合梁负弯矩区惯性矩计算模型

Fig.1 Calculation Model for Inertial Moment of Composite Beam Under Negative Moment

式中: A_{st} 为混凝土板有效宽度内的钢筋面积; A_s 为钢梁的截面面积; I_s 为钢梁的截面惯性矩。

2 无侧移半刚性组合框架柱的设计

根据半刚性钢框架的设计理论^[11],无侧移半刚性组合框架柱的设计计算模型见图2。

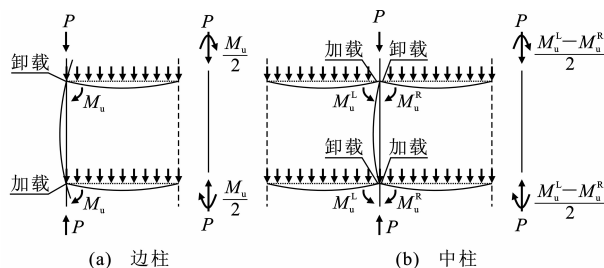


图2 无侧移组合框架柱的设计计算模型

Fig.2 Design and Calculation Model for Non-sway Composite Frame Columns

2.1 无侧移框架边柱

无侧移框架的边柱如图2(a)所示,根据柱端的转动方向,梁对柱可能提供约束也可能不提供约束。如果柱端转动方向与节点极限塑性弯矩 M_u 的方向一致,连接对柱端来说将会卸载,此时梁对柱有约束作用;如果柱端转动方向与节点极限塑性弯矩 M_u 的方向相反,连接对柱端来说将会加载,此时梁对柱不起约束作用。

一般情况下,边柱的柱端转动是在柱的一端梁提供约束,在另一端梁就没有约束作用,所以在求解柱的计算长度系数 μ 时,柱的计算模型应是柱顶受约束,柱底为铰接,但对于框架底层的边柱,地基的约束作用需要考虑。

图2(a)中假设节点极限塑性弯矩 M_u 平均分配到上下柱,如果上下柱有明显不同的刚度,可以按相对刚度分配到各柱端。

2.2 无侧移框架中柱

无侧移组合框架的中柱如图2(b)所示,柱端与

左右梁的 2 个连接之中,总有 1 个将会卸载,因此柱的两端都要受 1 个梁的约束。在求解柱的计算长度系数 μ 时,两端都有约束作用。

3 有侧移半刚性组合框架柱的设计

有侧移半刚性组合框架柱的设计计算模型如图 3 所示。对于迎风边柱,上下 2 个连接都要卸载,所以柱的上下端都受到梁的约束作用[图 3(a)];对于背风面边柱,框架侧移时都是加载,因此背风面边柱对于结构的稳定承载力是没有贡献的。迎风边柱和所有中柱将承受全部框架的竖向荷载,以保证框架的稳定。

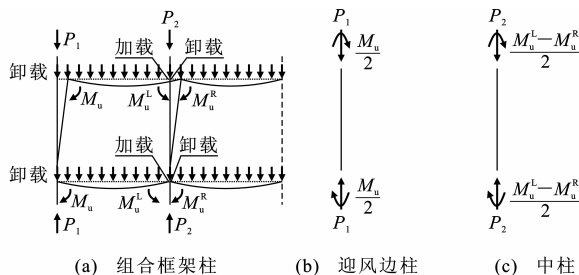


图 3 有侧移组合框架柱的设计计算模型

Fig. 3 Design and Calculation Model for Sway Composite Frame Columns

有侧移框架中柱的设计模型与侧移框架的相同,只在求解计算长度系数时有区别,设计受力模型如图 3(c) 所示。

4 钢柱计算长度系数的确定

由上述分析可知,在求解组合框架柱计算长度系数时,要注意在柱端节点处梁是否起到约束的作用,另外还要考虑连接半刚性对 μ 的影响。从图 2、3 可以看出,基本上所有的约束梁都是一端连接卸载,另一端连接加载。当连接卸载时,瞬时转动刚度可以取初始转动刚度 $R_{ki}^{[12]}$;当连接加载时,瞬时刚度等于节点弯矩-转角曲线的切线刚度,由于到达或接近节点极限弯矩承载力时,弯矩-转角曲线趋向平缓,假定此时的切线刚度为 0 是合理且偏保守的。为求得柱的有效长度系数,只需要找出对柱端有约束作用的梁,根据约束的性质对梁的刚度进行修正,一般起约束作用的组合梁都是近端半刚性连接(卸载),远端铰接(加载)。

以设计有侧移半刚性组合框架柱为例,梁的计算模型如图 4 所示, R_{kA} 为组合梁约束 A 端的初始转动刚度。由经典的转角位移方程^[13]可得:梁 A 端的弯矩 M_A 可根据式(5)进行计算

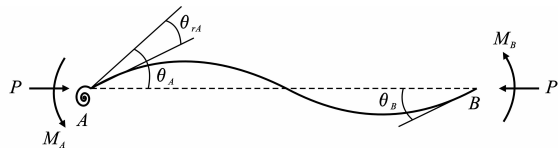


图 4 有侧移组合梁计算模型

Fig. 4 Calculation Model for Sway Composite Beams

$$M_A = \frac{3EI_{eq}}{L} (\theta_A - \frac{M_A}{R_{kA}}) \quad (5)$$

式中: L 为梁的计算长度。

由式(5)可得

$$M_A = \frac{6EI_{eq}\theta_A}{L} [2 \times (1 + \frac{3EI_{eq}}{R_{kA}})]^{-1} \quad (6)$$

由此求解有侧移半刚性组合框架柱的计算长度系数时,组合梁的刚度修正系数 β 为

$$\beta = 1/[2 \times (1 + \frac{3EI_{eq}}{R_{ki}L})] \quad (7)$$

同理可推导出无侧移半刚性组合框架柱的组合梁的刚度修正系数为

$$\beta = 3/[2 \times (1 + \frac{3EI_{eq}}{R_{ki}L})] \quad (8)$$

5 算例分析

以单跨无侧移半刚性组合框架的设计为例,其结构如图 5 所示,框架的跨度为 8 m,层高为 4 m。组合梁的极限荷载集度 $q = 40 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,柱的下端与基础固结,柱顶端均设置有侧向支撑,能保证柱不发生弯矩平面外的失稳。钢材的屈服强度 $f_y = 235 \text{ MPa}$,设计强度 $f = 215 \text{ MPa}$;混凝土采用 C30,混凝土板中的纵向钢筋采用 HPB235,设计强度 $f_{st} = 210 \text{ MPa}$ 。其设计步骤如下:

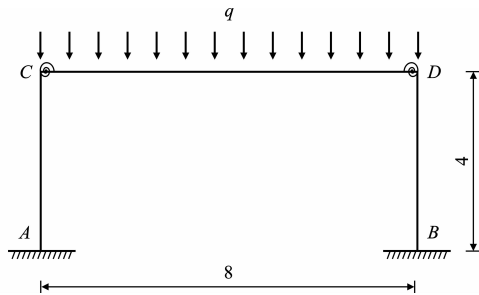


图 5 单跨半刚性组合框架(单位:m)

Fig. 5 Semi-rigid Single Span Composite Frame (Unit: m)

(1)首先设计梁的尺寸,如图 6 所示,组合梁采用完全抗剪连接设计,钢梁的尺寸为 $250 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,混凝土板内的纵向钢筋配置为 $8\Phi 12$,节点采用平端板连接。节点极限塑性弯矩 $M_u = 131.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$,初始转动刚度 $R_{ki} = 49.6 \times$

$10^3 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 。

(2) 由传统的计算长度法以及式(8)的无侧移半刚性组合梁刚度修正系数,可以得到钢柱的计算长度系数 $\mu = 0.646$ 。

(3) 钢柱的截面尺寸初步拟定为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 见图6(b), 柱顶的内力设计值为 $M'_x = 131.21 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 轴力 $N = 320 \text{ kN}$ 。

截面绕强轴和弱轴的转动惯量(下标 x 表示强轴, 下标 y 表示弱轴, 下文同)为

$$I_x = 0.927 \times 10^8 \text{ mm}^4, I_y = 0.313 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

柱的回转半径为

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 108.9 \text{ mm}, i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 63.31 \text{ mm}$$

柱的长细比为

$$\lambda_x = \frac{l_{ox}}{i_x} = 23.72, \lambda_y = \frac{l_{oy}}{i_y} = 40.81$$

式中: l_{ox} 、 l_{oy} 分别为计算构件对主轴 x 、 y 的计算半径。

根据规范查表得稳定系数为

$$\varphi_x = 0.958, \varphi_y = 0.896, N'_{Ex} = \frac{\pi^2 EA}{1.1\lambda_x^2} =$$

$$23\,623 \text{ kN}, \beta_{mx} = 1, \varphi_b = 1.07 -$$

$$\frac{\lambda_y^2}{44\,000} \frac{f_y}{235} = 1.032$$

式中: N'_{Ex} 为参数; β_{mx} 为等效弯矩系数; φ_b 为均匀弯曲的受弯构件整体稳定系数。

弯矩作用平面内的整体稳定验算

$$\frac{N}{\varphi_x A f} + \beta_{mx} M_x [W_{px} f (1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}})]^{-1} =$$

$$0.997 < 1 \text{ (符合要求)}$$

式中: A 为计算构件的毛截面面积; M_x 为所计算构件段范围内对强轴的最大弯矩; W_{px} 为对 x 轴的塑性毛截面模量。

弯矩作用平面外的整体稳定验算

$$\frac{N}{\varphi_x A f} + \eta \frac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_b W_{px} f} = 0.979 < 1 \text{ (符合要求)}$$

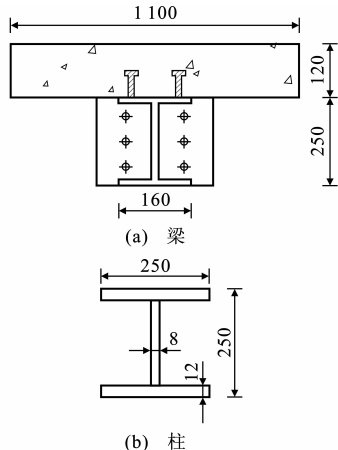


图6 梁、柱截面尺寸(单位:mm)

Fig. 6 Section Size of Beam and Column (Unit:mm)

式中: β_{tx} 为弯矩作用平面外的等效弯矩系数。

强度验算

$$\frac{N}{A_n f} = 0.19 > 0.13$$

$$1.15(1 - \frac{N}{A_n f}) W_{px} f = 129.15 > M_x \text{ (符合要求)}$$

式中: A_n 为计算构件的净截面面积; W_{px} 为对 x 轴的塑性净截面模量。

局部稳定验算:

钢梁翼缘板

$$\frac{b}{t} = 10.08 > 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9 \text{ (不符合要求)}$$

式中: b 为计算构件受压翼缘自由外伸宽度; t 为计算构件受压翼缘厚度。

钢梁腹板

$$\frac{h_0}{t_w} = 28.25 < (72 - 100 \frac{N}{A f}) \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 53 \text{ (符合要求)}$$

式中: h_0 为计算构件腹板的计算高度; t_w 为计算构件腹板的厚度。

由上述验算结果可以看出,初步选定的梁、柱截面尺寸、强度和整体稳定性都能满足要求且富余较少,只有钢梁翼缘板的宽厚比不满足局部稳定性的要求,因此只要略微加大翼缘板的厚度,便可满足稳定性要求。

6 结 语

在半刚性钢框架的设计理论的基础上,结合现行的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003),提出了有侧移及无侧移组合框架柱的稳定设计方法,考虑了钢-混凝土楼盖的组合效应,以及求解钢柱计算长度系数时的修正方法。算例分析结果表明:该方法简单适用,有效地利用了组合效应及节点的延性,提高了结构的经济性,降低了成本。

参考文献:

References:

- [1] 童根树,施祖元,李志彪. 计算长度系数的物理意义及对各种钢框架稳定设计方法的评论[J]. 建筑钢结构进展, 2004, 6(4): 1-8.
TONG Gen-shu, SHI Zu-yuan, LI Zhi-biao. Physical Meaning of Column Effective Length and an Evaluation of Stability Design Methods of Frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2004, 6(4): 1-8.
- [2] 聂建国,沈聚敏,余志武. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法[J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 11-17.

- NIE Jian-guo, SHEN Ju-min, YU Zhi-wu. A Reduced Rigidity Method for Calculating Deformation of Composite Steel Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 11-17.
- [3] 聂建国, 李勇, 余志武, 等. 钢-混凝土组合梁刚度的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(10): 38-41.
- NIE Jian-guo, LI Yong, YU Zhi-wu, et al. Study on Short and Long-term Rigidity of Composite Steel-concrete Beams[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(10): 38-41.
- [4] 肖勇. 组合节点和框架的分析与设计[J]. 建筑钢结构进展, 2002, 4(3): 13-19.
- XIAO Yong. Analysis and Design of Composite Connections and Frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2002, 4(3): 13-19.
- [5] 蒋丽忠, 汤裕坤. 钢-混凝土组合框架梁的稳定设计方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 29-33.
- JIANG Li-zhong, TANG Yu-kun. Approach for Design of Stability of Steel-concrete Composite Frame Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 29-33.
- [6] 林宏伟, 石志飞. 钢筋混凝土框架梁-剪力墙平面外连接节点的力学分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 56-60.
- LIN Hong-wei, SHI Zhi-fei. Mechanical Analysis for Non-planar Reinforced Concrete Frame Beam and Shear-wall Joint[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 56-60.
- [7] 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.
- SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling. Reasonable Section Height of Beam and Column Based on the Minimum Shear Lag in Framed Tube Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 16-19.
- [8] 易伟建, 张颖. 混凝土框架结构抗震设计的弯矩增大系数[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 46-51.
- YI Wei-jian, ZHANG Ying. Moment Magnification Factor in Anti-seismic Design of Concrete Frame Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 46-51.
- [9] 王锁军, 王元清, 吴杰, 等. 组合梁刚度对组合框架的抗震性能影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 39-44.
- WANG Suo-jun, WANG Yuan-qing, WU Jie, et al. Analysis of Composite Beam Rigidity Influencing Seismic Properties of Composite Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 39-44.
- [10] 李秋喆, 石永久, 王元清, 等. 组合扁梁楼盖受力性能分析[J]. 钢结构, 2004, 19(2): 27-30.
- LI Qiu-zhe, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing, et al. Analysis of Structural Behavior of Composite Floor with Slim Beam[J]. Steel Construction, 2004, 19(2): 27-30.
- [11] 陈惠发. 钢框架稳定设计[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1999.
- CHEN Hui-fa. Stability Design of Steel Frames[M]. Shanghai: World Publishing Corporation, 1999.
- [12] Eurocode 3, Design of Steel Structures: Part 1—General Rules and Rules for Building[S].
- [13] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- CHEN Ji. Stability Theory and Design of Steel Structures[M]. Beijing: Science Press, 2001.

《空间结构》2009 年征订通知

《空间结构》是由国家教育部主管、浙江大学主办的全国性专业科技期刊, 1994 年创刊, 面向国内外公开发行, 国内统一连续出版物号为 CN 33-1205/TU, 国际标准连续出版物号为 ISSN 1006-6578。

《空间结构》主要刊载空间结构的理论研究、分析设计、试验与实测、建筑造型、施工工艺、管理经验、工程实例、信息报导及有特色的空间结构工程照片等方面的内容; 读者对象为科研单位、设计院、生产施工单位、质检管理部门的科技人员及大专院校师生。

《空间结构》为大 16 开本, 64 页, 每期定价 10 元(含邮费 1 元), 全年定价 40 元。本刊自办发行, 需要征订的单位或个人请直接汇款至本刊编辑部订阅, 尚有少量历年合订本供补订。本刊兼营广告, 10 月起征订下一年度广告。

地址: 浙江大学空间结构研究中心《空间结构》杂志编辑部

邮编: 310027

电话: (0571) 87952414

E-mail: kjjgzz@163.com