

文章编号:1673-2049(2007)04-0029-05

# 钢-混凝土组合框架梁的稳定设计方法

蒋丽忠<sup>1</sup>, 汤裕坤<sup>1,2</sup>

(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:**在已有的钢-混凝土组合梁和钢框架理论研究基础上,分析了影响组合梁负弯矩区转动能力的主要因素,建立了组合梁连续和钢柱连续两种组合框架结构体系的节点塑性极限转角的求解方法,提出了相应的计算公式及一种简化的组合框架梁稳定设计方法,并得出了组合梁负弯矩极限调幅系数的计算方法。结果表明,该设计方法可以使组合框架塑性较处的内力充分重分布,使梁柱连接的转动刚度合理,也能使组合梁的设计达到充分利用组合效应及节点延性的目的。

**关键词:**钢-混凝土组合框架梁;塑性角;半刚性连接;调幅系数

**中图分类号:**TU398.2 **文献标志码:**A

## Approach for Design of Stability of Steel-concrete Composite Frame Beam

JIANG Li-zhong<sup>1</sup>, TANG Yu-kun<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** Based on the theoretical basis of steel-concrete composite beam and composite frame and the analysis of main influencing factors of negative bending moment rotation capacity, authors established an approach for design of stability of composite beams in composite frames and deduced the bending moment amplitude modulation parameter for both beam-continue and column-continue composite frames. The corresponding computation formulae were proposed and a simplified stability design method for composite frame beams was introduced. The results show that rotational stiffness is designed reasonably by redistributing internal force in plastic hinge of composite frames, and composite action and joint ductility can be used sufficiently.

**Key words:** steel-concrete composite frame beam; plastic angle; semi-rigid connection; amplitude modulation parameter

## 0 引言

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。其中在

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,对于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)中的框架设计仍然采用纯钢框架的设计理论,并没有考虑到

收稿日期:2007-09-28

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,博士生导师,工学博士,E-mail:lzhjiang@mail.csu.edu.cn。

混凝土和钢板梁的组合效应,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,且节点是介于铰接与刚接之间的半刚性连接,仍采用传统的钢框架简支梁设计方法或连续梁设计方法,都是偏于保守的。对于半刚性连接框架的优点,早已得到工程界的认同,再加上钢-混凝土组合结构效应带来的巨大经济效益,可以预计,组合结构体系将得到更广泛的应用。

从设计的角度出发,为了充分利用梁柱材料,节点必须有足够的强度和延性。肖勇<sup>[1]</sup>指出,组合节点连接的极限转角将成为组合框架应用中一个潜在的限制条件;聂建国<sup>[2]</sup>在研究连续组合梁承载力计算时指出,连续组合梁除了取决于各个控制截面的强度之外,还要求塑性铰处具有足够的转动能力,即塑性铰所能够产生的转角必须大于内力重分布后由协调关系确定的所需转角。王静峰等<sup>[3]</sup>对竖向荷载下半刚性连接组合框架的设计进行了探讨,但其结论仅适用于柱连续的情况,且没有提出如何通过调整节点构造以达到设计最优化的建议。笔者将结合组合框架实际特点,在总结钢框架、组合框架及组合梁已取得的理论基础上,提出了一种简化组合框架梁的稳定设计方法。

## 1 设计步骤

结合钢框架的稳定设计理论及组合框架的自身结构特点,提出了较为实用的组合框架中组合梁的简化塑性稳定设计方法,其具体步骤如下。

步骤 1:根据建筑设计要求,初步选择组合梁、钢柱截面尺寸和组合节点连接形式。

步骤 2:设计荷载组合计算。

步骤 3:计算节点的塑性极限弯矩  $M_u$ 、初始转动刚度  $R_{ki}$  和塑性极限转角  $[\theta_u]$ 。

步骤 4:计算组合梁正、负弯矩区的抗弯截面惯性矩  $I_{pos}$ 、 $I_{neg}$ ,组合梁跨中极限弯矩  $M_p$ ,负弯矩区塑性极限弯矩  $M_n$ 。

步骤 5:假定梁端塑性转角  $\theta = [\theta_u]$ ,推导连续组合梁的弯矩调幅系数  $\xi_n$ 。

步骤 6:假定梁柱刚接,计算框架内力,再根据  $\xi_n$  进行弯矩重分布,从而重新获得组合梁和钢柱的内力。

步骤 7:组合梁的设计。检验梁是否满足:①梁端负弯矩  $M' \leq M_u$ 、 $M' \leq M_n$ ;②跨中弯矩  $M_i \leq M_p$ 。如果满足以上条件且富余量较少,则不需修改梁截

面尺寸;如果不满足以上条件,则应重新修改梁截面尺寸或节点连接形式,直到满足为止。

## 2 节点塑性极限转角

组合梁与纯钢梁有所不同,其影响负弯矩区转动能力的因素更多。文献[2]中根据对两跨连续组合梁的计算,指出影响负弯矩区转动能力的主要影响因素有:

(1)支座负弯矩区塑性极限弯矩与跨中正弯矩的极限弯矩之比为  $\tau = M_n/M_p$ 。负弯矩区转动能力随  $\tau$  的减小而增大。

(2)考虑组合效应以后,组合梁截面弹性特征对转动能力的影响。

(3)纵向受力钢筋的影响。当纵向钢筋参与受力时,增加了钢梁受压区高度,从而降低了组合梁截面的转动能力。

(4)负弯矩区混凝土开裂的影响。混凝土开裂会产生附加转动能力。

(5)混凝土翼板的侧向约束。

### 2.1 梁连续时节点塑性极限转角

聂建国提出了关于组合节点塑性极限转角的简化计算方法,认为在承载力极限状态下组合梁截面的塑性极限转角可用曲率差  $\phi_u - \phi_y$  来表示,其中  $\phi_u$  为组合梁丧失承载能力时的极限曲率; $\phi_y$  为组合梁截面屈服时的曲率。组合梁支座处的极限塑性转角理论上可用积分法计算,即

$$[\theta_u] = \int_0^L \frac{M dx}{EI} \quad (1)$$

式中: $M$  为梁端弯矩; $E$  为弹性模量; $I$  为截面转动惯量。

但根据试验结果发现,在承载力极限状态时组合梁截面曲率集中于形成塑性铰的一段区域,因此式(1)可简化为

$$[\theta_u] = (\phi_u - \phi_y) l_p = \left( \frac{\epsilon_{su}}{y_{s2}} - \frac{f_y}{E y_{s1}} \right) l_p \quad (2)$$

式中: $y_{s1}$  为钢梁底部至组合梁截面弹性中和轴的距离; $y_{s2}$  为钢梁底部至组合梁截面塑性中和轴的距离; $l_p$  为塑性铰区长度,根据试验结果取  $1.75h$ ,  $h$  为梁高; $f_y$  为钢材的屈服应力; $\epsilon_{su}$  为组合梁在负弯矩作用下丧失承载力时钢梁下翼缘的极限应变。朱聘儒等<sup>[4]</sup>根据对试验数据的回归分析,认为  $\epsilon_{su}$  与组合梁混凝土板的配筋力比  $R$  存在如式(3)、(4)的函数关系

$$\epsilon_{su} = \frac{3\ 600}{R + 0.15} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$R = \frac{A_r f_{ry}}{A_s f_{sy}} \quad (4)$$

式中:  $A_r$  为组合梁混凝土板有效宽度范围内负弯矩钢筋截面面积;  $f_{ry}$  为钢筋屈服强度;  $A_s$  为组合梁中钢梁截面面积;  $f_{sy}$  为钢梁屈服强度。

## 2.2 柱连续时节点塑性极限转角

以端板型连接为例, Ahmed 等<sup>[5]</sup>考虑主要组件的塑性变形, 提出了计算柱连续时节点塑性极限转角的模型, 见图 1。

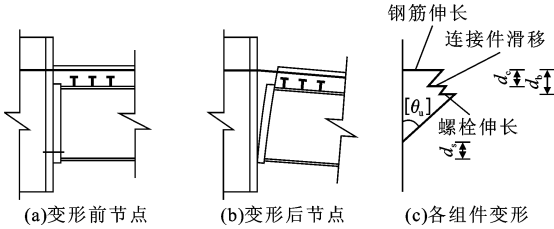


图1 组合节点塑性极限转角计算模型

Fig. 1 Calculation Model for Plastic Critical Rotation Angle of Composite Joints

考虑钢筋的塑性应变, 钢筋伸长  $\Delta_r$  为

$$\Delta_r = 0.01 \times \left| l_1 + l_2 + \frac{h_c}{2} \right| \quad (5)$$

式中:  $l_1$  为柱翼缘到第 1 个抗剪连接件的距离;  $l_2$  为抗剪连接件的间距;  $h_c$  为柱截面的高度。

连接件滑移  $\Delta_s$  为

$$\Delta_s = \frac{F_r}{K_r} \quad (6)$$

式中:  $F_r$  为一个连接件的极限承载力设计值;  $K_r$  为连接件的滑移刚度。

螺栓伸长  $\Delta_b$  为

$$\Delta_b = \frac{F_b}{K_b} \quad (7)$$

式中:  $F_b$  为螺栓的拉力,  $F_b = nF_t^b$ ,  $n$  为受拉螺栓的个数,  $F_t^b$  为单个螺栓的拉力;  $K_b$  为螺栓刚度。

节点塑性极限转角可表示为

$$[\theta_u] = \frac{\Delta_r}{L_r - d_s} + \frac{\Delta_s}{L_r - d_s - d_c} + \frac{\Delta_b}{L_r - d_s - d_b} \quad (8)$$

式中:  $d_s$  为梁腹板的受压高度;  $d_c$ 、 $d_b$  分别为节点转动前后钢梁上表面到受拉钢筋的距离之和;  $L_r$  为组合梁下翼缘中心线到钢筋的距离。

## 3 框架连续组合梁的弯矩调幅系数

通常框架设计时都是要求在梁端, 首先产生塑性铰, 此时框架连续组合梁正弯矩区承载力还没有完全发挥作用, 因此可以假定梁端出现塑性铰时截面曲率集中发生在节点附近, 即不考虑塑性铰的发

展, 梁其余部分仍处于弹性阶段, 截面曲率相对较小, 且负弯矩区混凝土开裂后, 刚度变小, 按照变截面杆件进行计算是比较精确的<sup>[6-10]</sup>。图 2 为组合梁一端调幅和两端调幅的情况。

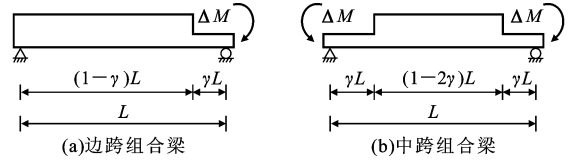


图2 变截面组合梁模型

Fig. 2 Model of Variable Section Composite Beam

容易推导上述 2 种情况下梁端负弯矩调幅为  $\Delta M$  时所需的塑性转角为

$$\theta = \begin{cases} \frac{\Delta M L}{3EI_{pos}} \vartheta \\ \frac{\Delta M L}{2EI_{pos}} \bar{\omega} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\vartheta = (1-\gamma)^3 + \alpha\gamma(1-\gamma)(2-\gamma) + \alpha\gamma$ ,  $\alpha$  为组合梁正弯矩区折减刚度与负弯矩区折减刚度之比,  $\alpha = I_{pos}/I_{neg}$ , 均按第 2 节计算;  $\gamma$  为组合梁负弯矩区长度与梁跨  $L$  之比, 对于单点加载,  $\gamma = 0.25$ ;  $\bar{\omega} = 2\alpha\gamma - 2\gamma + 1$ ;  $EI_{pos}$  为考虑滑移效应后组合梁的折减刚度。

当连续梁达到极限承载力时, 负弯矩区必须具有足够的转动能力以满足弯矩重分布的需要, 并使正弯矩区的抗弯承载力得到充分发挥, 所以节点处的转角都要满足

$$\theta \leq [\theta_u] \quad (10)$$

令  $\theta = [\theta_u]$ , 可得到组合梁负弯矩极限调幅的表达式:

柱连续

$$\Delta M = \begin{cases} \frac{3EI_{pos}[\theta_u]}{L\vartheta} & \text{变形前节点} \\ \frac{2EI_{pos}[\theta_u]}{L\bar{\omega}} & \text{变形后节点} \end{cases} \quad (11)$$

组合梁连续

$$\Delta M = \begin{cases} \frac{3EI_{pos}[\theta_u]}{2L\vartheta} & \text{变形前两跨框架中节点} \\ \frac{6EI_{pos}[\theta_u]}{2L\vartheta + 3L\bar{\omega}} & \text{变形前多跨框架边跨中节点} \\ \frac{EI_{pos}[\theta_u]}{L\bar{\omega}} & \text{变形后节点} \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)、(12)可得组合梁相应的弯矩调幅系数  $\xi_a$  为

$$\xi_a = \frac{\Delta M}{\Delta M + M_n} \quad (13)$$

其中计算  $M_n$  时不计混凝土的作用, 按简化塑性方法求解。

## 4 算例分析

以单跨无侧移半刚性组合框架设计为例,如图3所示,框架的跨度为8 m,层数为4 m。组合梁的极限荷载集度 $q=40 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,柱下端与基础固结,柱顶端均设置有侧向支撑,以保证柱不发生弯矩平面外的失稳。钢材屈服应力 $f_y=235 \text{ MPa}$ ,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 $f_{st}=210 \text{ MPa}$ 。按照第1节中的设计步骤,其设计过程如下:

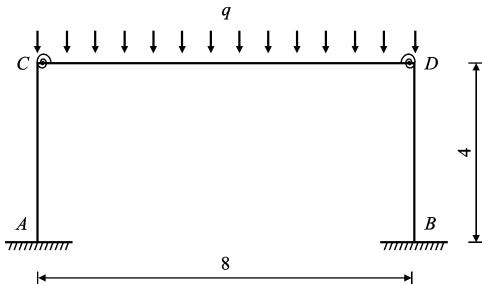


图3 单跨半刚性组合框架(单位:m)

Fig. 3 Semi-rigid Single Span Composite Frame(Unit:m)

(1)初步选择梁柱的截面尺寸如图4所示,组合梁采用完全抗剪连接设计,钢梁尺寸为 $250 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,钢柱尺寸为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,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。节点塑性极限弯矩 $M_u=131.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,初始转动刚度 $R_{ki}=49.6 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ ,连接塑性极限转角 $[\theta_u]=0.0348 \text{ rad}$ 。

(2)组合梁正、负弯矩区的惯性矩分别为 $I_{pos}=2.02 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ 、 $I_{neg}=0.87 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ ,组合梁等效抗弯刚度 $EI_{eq}=3.21 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ,组合梁跨中极限弯矩 $M_p=210.43 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,负弯矩区塑性极限弯矩 $M_n=150.51 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

(3)解式(9)得: $\gamma=0.2131$ , $\alpha=6.867$ , $\omega=$

3.479。令 $\theta=[\theta_u]$ ,由式(11)中 $\Delta M=\frac{2EI_{pos}[\theta_u]}{L\omega}$ 可得组合梁负弯矩调幅 $\Delta M=104.11 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,将其代入式(13)中可得单跨半刚性组合框架梁的弯矩调幅系数 $\xi_n=0.4089$ 。

(4)进行弯矩重分配后,组合梁端部负弯矩 $M'=126.07 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,跨中弯矩 $M=193.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。满足 $M' \leq M_u$ 、 $M' \leq M_n$ 、 $M_i \leq M_p$ ,且富余量较少,故梁的设计满足要求。

## 5 结语

笔者在已有的组合梁、组合框架和钢框架理论研究基础上,结合现行的钢结构设计规范,提出了一种简化的组合框架稳定设计方法,推导出梁连续与柱连续两种框架结构体系的弯矩调幅系数,通过框架塑性铰处的内力重分布,使设计达到充分利用楼盖组合效应及半刚性节点延性的目的。算例分析表明,该方法简单、适用,比传统的钢框架设计理论更加经济合理。

## 参考文献:

## References:

- [1] 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): 13-17.  
XIAO Yong. Analysis and Design of Composite Connections and Frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2002, 4(3): 13-17.
- [2] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构——试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
NIE Jian-guo. Test, Theory and Applications of Composite Steel Concrete Beam [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [3] 王静峰, 李国强, 刘清平. 竖向荷载下半刚性连接组合框架的实用设计方法(II)——梁与柱设计及算例[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(6): 38-44.  
WANG Jing-feng, LI Guo-qiang, LIU Qing-ping. A Practical Approach for the Design of Semi-rigid Composite Frames Under Vertical Loads (II)—Design of Beams and Columns and an Example[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(6): 38-44.
- [4] 朱聘儒, 高向东, 吴振声. 钢-砼组合梁塑性铰特性及内力重分布研究[J]. 建筑结构学报, 1990, 11(6): 22-36.  
ZHU Pin-ru, GAO Xiang-dong, WU Zhen-sheng. Research on Plastic Hinge Behaviour and Internal Moment Redistribution in Steel Concrete Continuous Composite Beam[J]. Journal of Building Structures,

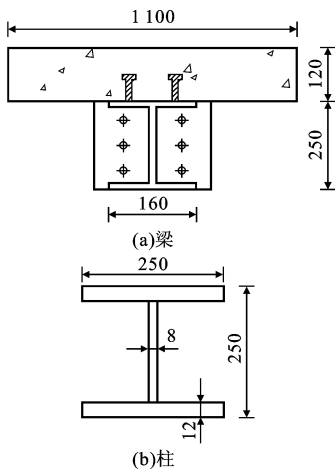


图4 梁、柱截面尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Section Size of Beam and Column(Unit:mm)

- 1990,11(6):22-36.
- [5] AHMED B, NETHERCOT D A. Prediction of Initial Stiffness and Available Rotation Capacity of Major-axis Flushend-plate Connections[J]. Construct Steel Res, 1997, 41(1): 31-60.
- [6] 曹国辉, 方志. 钢筋混凝土连续宽箱梁受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 46-52.  
CAO Guo-hui, FANG Zhi. Mechanical Behaviors Test of RC Continuous Box Girder with Wide Flange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 46-52.
- [7] 徐爱敏, 陈衡治, 谢旭. 结构极限承载力计算方法及其收敛性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 65-70.  
XU Ai-min, CHEN Heng-zhi, XIE Xu. Calculation Method for Ultimate Bearing Capacity of Structure and Its Convergence[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 65-70.
- [8] 陈宝春, 肖泽荣, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注混凝土时的截面应力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 73-76.
- CHEN Bao-chun, XIAO Ze-rong, WEI Jian-gang. Analysis on Stresses of Dumbbell-shaped Cross-section of CFST Arch Rib During Concrete Pouring Construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 73-76.
- [9] 郭健. 混凝土斜拉桥主梁的非稳态温度场与应力场分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 65-68.  
GUO Jian. Analysis of Unsteady Temperature Gradient and Thermal Stress Field for Concrete Girder of Cable-stayed Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 65-68.
- [10] 裴万吉, 赵均海, 魏雪英. 钢管混凝土的截面形式及其承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 49-53.  
PEI Wan-ji, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying. Analysis of Section Types of Concrete-filled Steel Tube and Its Load Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 49-53.

## 《施工技术》2008 年征订通知

《施工技术》系中华人民共和国建设部主管,由亚太建设科技信息研究院(原建设部科技信息研究所)、中国建筑设计研究院、中国建筑工程总公司、中国土木工程学会主办,创刊于1971年。2008年本刊将扩大杂志的信息量,除了在正刊增加页码外,还将继续出版《施工技术·资讯》。

《施工技术》特色栏目有:方针政策,综合述评,地基基础,地下工程,混凝土工程,工程检测、鉴定与加固,高效钢筋与预应力技术,新型模板与脚手架工程,钢结构工程,安装技术,建筑智能化,建筑节能和环保,建筑防水,施工过程检测和控制,建筑企业信息化技术,工程质量与建筑安全,国家标准与规范,工法交流,建筑结构与计算,市政工程,机械化施工,新型建筑材料,道路工程,桥梁工程,铁路工程,爆破工程,国外新技术等。

《施工技术·资讯》随《施工技术》杂志赠送给全年订户,为双月刊,全年6期,立足于扩大《施工技术》杂志的信息量,为读者、理事单位、广告客户提供更多更好的增值服务。《施工技术·资讯》设:特别策划、人物专访、信息大观园、技术园地、企业视窗、科研动态、科技地产、学会协会动态、读者园地、网刊互动、企业名录等栏目。

《施工技术》为大16开本,每月18日出版,国内外公开发行。全国各地邮局均可订阅,也可直接汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,是展示企业形象的理想舞台。

地址:北京西城区车公庄大街19号

邮编:100044

传真:(010)68300061

E-mail:sgjs@cadg.cn

电话:(010)68302888(主编) 68302889(编辑) 68300059(广告) 68341147(发行)