

# 框架梁刚度放大系数对结构的影响及合理取值

刘 源<sup>1,2</sup>, 辛 力<sup>2</sup>, 王 敏<sup>2</sup>, 郑 宏<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

**摘 要:** 为了降低框架结构的梁配筋, 间接考虑楼板对梁的承载力贡献, 以实现“强柱弱梁”的设计理念。通过对一组 4 层 3 跨的钢筋混凝土框架结构进行 Etabs 建模有限元分析, 考虑不同形式梁对楼板刚度贡献, 分析了中梁刚度放大系数取值对框架结构分析结果的影响, 以考虑楼板平面外刚度与放大梁刚度 2 种情况的框架结构弹性基本自振周期相等原则, 近似确定楼板对框架梁弹性刚度的影响范围, 求出理论计算值。分析结果表明: 在现有条件下, 框架梁刚度放大系数取值对梁配筋的敏感性要高于柱; 可以对不同设防烈度框架结构采用不同的梁刚度放大系数, 以提高经济性; 给出梁刚度放大系数的建议值, 提出了框架柱塑性铰区梁、板之间分缝的设计建议。

**关键词:** 结构工程; 框架结构; 梁刚度放大系数; 强柱弱梁

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A

## Reasonable value of rigidity amplification factor of frame beams

LIU Yuan<sup>1,2</sup>, XIN Li<sup>2</sup>, WANG Min<sup>2</sup>, ZHENG Hong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. China Northwest Building Design Research Institute Co Ltd, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to reduce the beam reinforcement of the frame structure with the consideration of the contribution of floor to the bearing capacity of beams and achieve “strong-column and weak-beam” design, a four-story three-span reinforced concrete frame was used for the simulation by Etabs for finite element analysis, with the consideration of the contribution of different kinds of beams to the floor rigidity, to analyze the influence of amplification factor of frame beams on the frame structure. The equivalence of basic natural period of vibration theory involving out-of-plane rigidity and amplification of beam rigidity was adopted for approximate determination of the influence range of floor on the frame elastic rigidity, and the theoretical value was deduced. The results show that the rigidity amplification factor of beams is more sensitive to the beam reinforcement than the column under current conditons; different rigidity amplification factors of beams should be applied to different seismic fortification intensities to improve the economy; the proposed value of rigidity amplification factor of beam is presented; and horizontal joints should be set in the beam's plastic hinge zone between the beam and slab. 1 tab, 4 figs, 9 refs.

**Key words:** structure engineering; frame; rigidity amplification factor of beam; strong column and weak beam

## 0 引言

汶川地震震害表明,框架结构的破坏形态中,柱底或柱顶破坏严重,而梁端较为完好,未能体现“强柱弱梁”的设计概念。文献[1-2]总结了实际工程设计中导致出现“强梁弱柱”的几种原因,认为现浇楼板对框架梁的刚度和承载力贡献是主要因素。

《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)第 5.2.2 条规定:在结构内力与位移计算中,现浇楼盖和装配整体式楼盖中,梁的刚度可考虑翼缘的作用予以增大,楼面梁刚度增大系数可根据翼缘情况取 1.3~2.0<sup>[3]</sup>。由于文献[3]没有给出梁刚度放大系数的计算方法,故目前工程设计人员对这一系数的取值大多由经验确定,取值范围为 1.5~2.0,导致同一结构的柱、梁设计内力分析结果存在差异。另外,Satwe 2010 版等软件虽然考虑梁两边一定范围的板刚度自动计算值,但梁截面设计时仍按矩形截面考虑,仅考虑现浇板的刚度贡献而没有考虑其承载力贡献,存在刚度分析与截面设计不一致的问题,不利于“强柱弱梁”设计理念的实现。

本文首先分析了梁刚度放大系数不同取值对框架结构整体分析结果的影响,然后对这一系数的合理取值进行了探讨,给出了其建议取值,提出了框架梁塑性铰区与板脱开的设计思路,为建筑工程设计人员提供参考。

## 1 框架刚度放大系数取值对框架结构分析结果的影响

### 1.1 水平荷载

对于多层多跨框架结构,水平荷载作用下假定各层梁柱结点转角相等( $D$  值法),则标准层框架柱的侧移刚度  $D$  可表示为

$$D = \alpha \frac{12i_c}{h^2} \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为柱侧移刚度修正系数; $i_c$  为柱的线刚度; $h$  为柱高。

根据  $D$  值法计算原理, $\alpha$  随着梁、柱线刚度比的增大而增大,即当梁的线刚度增大(梁刚度放大系数  $\lambda$  增大), $D$  会相应增大,继而增大楼层刚度和结构整体刚度,增大结构地震作用。

当柱的水平剪力(水平地震作用效应)确定后,其上、下端的弯矩值与其反弯点高度有关。柱的反弯点高度比由标准反弯点高度比  $y_0$ 、上下梁相对刚

度变化修正值  $y_1$  以及上下层高度变化时修正值  $y_2$  和  $y_3$  相加得到。由此可见,整体调整框架梁的刚度不会影响到反弯点高度变化。因此,由于梁刚度的增大,柱两端弯矩及其剪力会随地震作用的增大而增大。同样,为保证节点区弯矩平衡( $\sum M_b = \sum M_c$ ),框架梁的弯矩也会增大。其中, $M_b$  为梁端弯矩; $M_c$  为柱端弯矩。

以上分析说明,增大  $\lambda$  取值可增大结构刚度,进而增大结构的地震作用,梁柱弯矩、剪力设计值也会增大。

### 1.2 竖向荷载

在竖向荷载作用下,按照分层法计算原理,以多层多跨框架中节点为例(图 1),其中,假定节点嵌固时  $M_{b2} > M_{b1}$ ,梁刚度增大,会增加其对节点区的不平衡力矩( $M_{b2} - M_{b1}$ )分配量,即增大了较大弯矩一端梁的弯矩释放  $M'_{b2}$ ,减小了其弯矩设计值( $M_{b2} - M'_{b2}$ ),而其跨中弯矩设计值  $M_{b2z}$  会相应增大。同时较小弯矩一端梁的弯矩释放  $M'_{b1}$  也会增大,则弯矩较小一端梁端弯矩设计值( $M_{b1} + M'_{b1}$ )会增大,而其跨中弯矩设计值  $M_{b1z}$  会减。对于框架柱,由于柱刚度的相对减小,柱端对节点不平衡弯矩的分配值会减小,进而其弯矩设计值  $M_{c1}$  或  $M_{c2}$  也会减小。以上描述均以绝对值为指标。其中, $M_{b1}$ 、 $M_{b2}$ 、 $M_{b1z}$ 、 $M_{b2z}$ 、 $M_{c1}$ 、 $M_{c2}$  如图 1 所示。

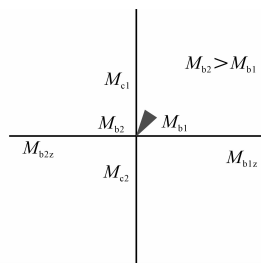


图 1 框架中节点弯矩分配关系

Fig.1 Moment distribution of frame joints

以上分析说明, $\lambda$  取值增大,竖向荷载作用下柱端弯矩设计值会减小,梁两端及跨中弯矩设计值则根据实际情况(线刚度、跨度、荷载等)的不同出现或增或减的情况。本文对几个框架结构的试算表明,梁刚度放大系数对竖向荷载作用下梁的弯矩设计值影响不明显。

## 2 中梁刚度放大系数的合理取值

### 2.1 中梁刚度放大系数值计算

考虑到质量一定时,结构周期与刚度的平方根

反相关,现以结构基本自振周期为指标,分析结构刚度计算时以下几种梁翼缘宽度取值的合理性。以 1 个混凝土强度等级为 C30,两方向均为 3 跨,跨度均 6 m,层高均为 3 m,柱截面尺寸均为 500 mm×500 mm 的 4 层框架结构为例,梁分别以矩形梁、考虑梁两侧

6 倍板厚范围板作为翼缘的 T 型梁 I (Satwe 软件)、考虑梁两侧 1 倍梁宽范围板作为翼缘的 T 型梁 II、矩形梁但考虑板的平面外刚度(以此作为准确值)4 种模型在 Etabs 中建模计算,得到结构的基本自振周期值比较,见表 1<sup>[4-6]</sup>。

表 1 结构弹性基本自振周期比较  
Tab. 1 Comparison of structural basic period of free vibration

| 梁截面/mm  | 板厚/mm | 第一振型自振周期/s |         |         |             |
|---------|-------|------------|---------|---------|-------------|
|         |       | 矩形梁        | T 型梁 I  | T 型梁 II | 矩形梁但考虑板面外刚度 |
| 250×500 | 100   | 0.743 2    | 0.659 5 | 0.692 1 | 0.709 9     |
|         | 120   | 0.743 9    | 0.643 2 | 0.675 8 | 0.698 2     |
| 250×600 | 100   | 0.639 5    | 0.585 7 | 0.594 9 | 0.618 8     |
|         | 120   | 0.641 2    | 0.568 0 | 0.583 1 | 0.612 6     |
| 250×700 | 100   | 0.595 8    | 0.554 1 | 0.565 7 | 0.578 1     |
|         | 120   | 0.600 4    | 0.542 9 | 0.549 6 | 0.571 3     |
| 350×500 | 100   | 0.699 7    | 0.599 7 | 0.629 5 | 0.653 7     |
|         | 120   | 0.700 1    | 0.581 9 | 0.600 7 | 0.644 2     |
| 350×600 | 100   | 0.605 0    | 0.549 1 | 0.561 5 | 0.591 3     |
|         | 120   | 0.616 2    | 0.534 4 | 0.552 9 | 0.580 7     |
| 350×700 | 100   | 0.543 3    | 0.485 6 | 0.503 2 | 0.510 9     |
|         | 120   | 0.550 1    | 0.462 5 | 0.486 2 | 0.490 3     |

注:周期折减系数取 1,边跨按 Γ 型梁输入

考虑楼板面外刚度时结构弹性基本自振周期与表 1 中 T 型梁 II 计算结果比较接近,方便起见,将考虑梁两侧各 1 倍梁宽范围的板作为有效翼缘的 T 型梁与相应矩形梁的惯性矩  $I_x$  进行比较,梁刚度放大系数  $\lambda$  与梁截面高度  $h_b$  及板厚的关系如图 2 所示。

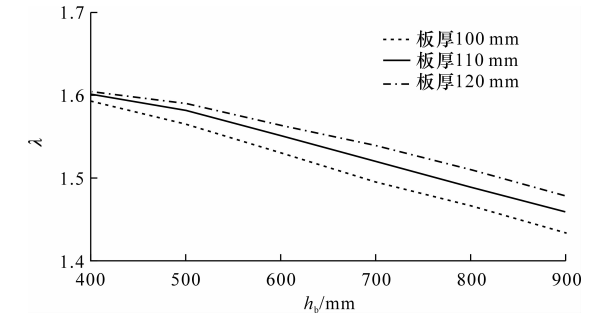


图 2  $\lambda$  理论计算参考值  
Fig. 2 Theoretical value of  $\lambda$

2.2 λ 取值设计建议

目前考虑楼板影响时的“强柱弱梁”设计主要有 2 种思路:一种是计算梁截面抗弯承载力时不考虑楼板翼缘,但对柱端的弯矩、剪力按规范要求乘以增大系数,通过增加柱的承载力实现“强柱弱梁”<sup>[3,7]</sup>;另一种是在计算梁截面抗弯承载力时,将框架梁等效为 T 型或者 Γ 型梁进行设计计算。后一种方法

精度可靠,但由于其可操作性不强,故目前尚难以在实际工程中应用。

2.2.1 柱端弯矩、剪力放大法算例分析

对 8 度区 1 个 5 层框架在 Etabs 中进行建模分析(下页图 3(a)),其中柱截面尺寸为 600 mm×600 mm,框架梁截面尺寸为 250 mm×600 mm,板厚 110 mm,混凝土强度等级均为 C30。 $\lambda$  按图 2 取值,柱端弯矩增大系数  $\eta_c$  分别取 1.2、1.3、1.5 和 1.7,底层柱下端弯矩增大系数均取 2.0,梁、柱按计算结果实值配筋(误差率不超过±2%),取出结构中间一榀框架进行 Pushover 分析(考虑梁两侧各 1 倍梁宽范围板作为有效翼缘,板顶部、底部在平行于主梁方向均按 Φ10@200 配筋),其中框架梁两端设弯曲性塑性铰,框架柱两端设压-弯塑性铰。结构整体屈服时梁、柱的塑性铰分布如下页图 3(b)~(e)所示。

由图 3 可知,按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)规定的柱端弯矩增大系数  $\eta_c$ ,除抗震等级为一级( $\eta_c=1.7$ )外,底层柱在结构屈服时仍产生塑性铰<sup>[7]</sup>。

另外,文献[8]统一采用偏心距增大系数法在压弯构件设计中近似考虑重力二阶效应;文献[9]把结

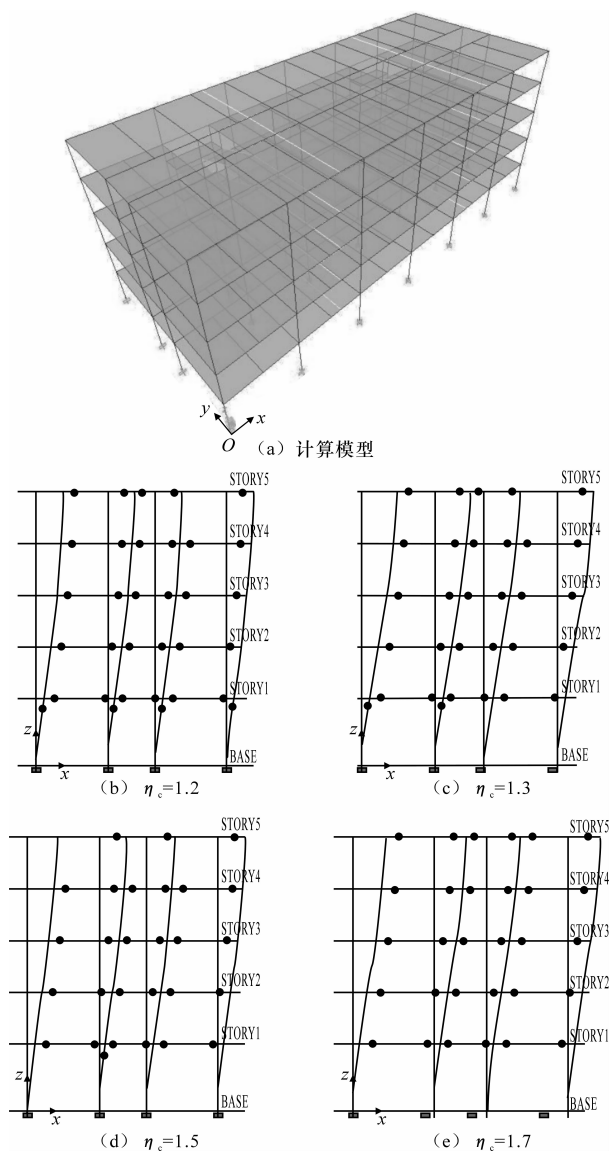


图 3 结构模型及屈服时塑性铰分布

Fig. 3 Plastic hinge distribution when structure yield

构及构件的二阶效应分开考虑,即结构的二阶效应在结构分析里面考虑(第 5.3.4 条),构件的二阶效应在构件设计中考虑(第 6.2.3 条给出了考虑条件)。一方面,考虑二阶效应的框架柱范围有所减少;另一方面,构件的挠曲二阶效应  $M$  为

$$M = C_m \eta_{ns} M_2 \quad (2)$$

式中:  $\eta_{ns}$  为弯矩增大系数;  $C_m$  为构件端截面偏心距调节系数;  $M_2$  为构件端部弯矩设计值。

计算发现,  $C_m - \eta_{ns}$  法中,  $\eta_{ns}$  的计算结果与文献[8]中的  $\eta$  (偏心距增大系数) 计算结果相近,但  $C_m$  的计算结果在 0.7~1.0 之间,即式(2)所得的  $M$  值相比文献[8]的偏心距增大系数法有所降低<sup>[7-8]</sup>。考虑到混凝土结构多数情况是可以不用考虑结构

$p-\Delta$  效应的,所以,文献[9]中计算所得柱配筋会有所减小,这可能会对柱端弯矩、剪力增大系数的放大效果有所抵消,对“强柱弱梁”产生不利影响。

### 2.2.2 建议

在目前尚不能有效考虑楼板对框架梁的承载力贡献,大多框架梁仍按矩形截面计算其抗弯承载力的前提下,本文对取值给出以下 2 条建议。

(1) 设防烈度小于等于 7 度时(不包含 0.15  $g$  地区),但此时  $\lambda$  对框架梁、柱的配筋影响有限,建议此时  $\lambda$  取值以图 2 的计算结果为参考。

(2) 设防烈度大于等于 8 度时(包含 7 度 0.15  $g$  地区),  $\lambda$  取值对梁、柱配筋均会产生影响,而梁的配筋结果对其更敏感(因柱受轴压比控制,截面尺寸较大,且其属于压弯构件,弯矩增大对其配筋影响敏感性低于框架梁),较大的  $\lambda$  值会导致梁的弯矩、剪力设计值明显增大。 $\lambda$  取值减小会降低梁配筋,利于“强柱弱梁”的实现;另一方面,  $\lambda$  取值减小会导致结构整体刚度降低,进而影响位移验算结果。考虑实际情况,建议  $\lambda$  值在梁受弯承载力设计时取 1,以减少梁的纵筋配筋量;而在柱承载力设计、梁的抗剪、扭承载力设计以及结构总体位移验算时  $\lambda$  可参考图 2 取值。

## 3 设计建议

楼板对框架梁的刚度、承载力均有贡献,即框架梁应按 T 型截面进行分析和设计。但在目前设计情况下,常用的工程设计软件如 Satwe 等均按框架梁为矩形截面考虑,而板内钢筋对框架梁承载力的贡献在设计时也难以实现,而仅通过调整取值来实现“强柱弱梁”则过于勉强。

为此,本文建议在梁两端的塑性铰范围内,施工时将梁、板脱开一个缝隙,再用柔性材料填充,具体设计如下页图 4 所示。此时框架梁刚度放大系数  $\lambda'$  与梁板全部整浇时  $\lambda$  的关系为

$$\lambda' / \lambda = S' / S \quad (3)$$

式中:  $S'$ 、 $S$  分别为端部设缝梁和整浇梁的刚度比。

以梁两端各 1/8 净跨范围的板与梁脱开为例,虑梁两侧各 1 倍梁宽范围的板作为有效翼缘,由结构力学理论可推导出

$$S' / S = \frac{4}{3 + \lambda} \quad (4)$$

根据图 2 计算结果,取  $\lambda$  为较大的 1.6,则式(4)计算结果的最小值为 0.87。即采用图 4 做法

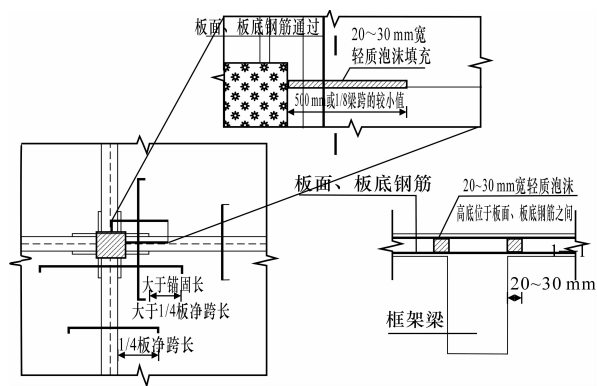


图4 框架梁端部塑性铰区与板分缝做法

Fig. 4 Separation of beam and slab detail draw

后,框架梁刚度放大系数 $\lambda'$ 最小值约为 $0.87\lambda$ ,变化幅度不大,另外,较大的 $\lambda$ 取值会增大梁、柱配筋,对结构设计而言是偏于保守的。因此,采用图4做法后, $\lambda$ 仍可按梁板全部整浇选取。

采用图4做法后,承载力设计时可省去板内钢筋的贡献,按矩形截面考虑,简化了设计步骤,有利于“强柱弱梁”的实现,同时与现行的设计软件(如Satwe、Etabs、Midas等)计算模型相一致。

另外,采用图4做法后,楼板支座配筋在开缝框架梁处应适当放大,根据双向板塑性铰线理论,板支座钢筋放大系数 $\beta$ 可近似表示为

$$\beta = l / (l - l') \quad (5)$$

式中: $l$ 为框架梁计算跨度; $l'$ 为框架梁两端开缝长度之和。

## 4 结 语

(1)框架梁刚度放大系数取值对梁配筋的敏感性要高于柱,较小的取值更有利于减小梁配筋,利于“强柱弱梁”的实现。

(2)在现行设计软件尚不能有效地综合考虑现浇板对框架梁的刚度、承载力贡献的前提下,实现“强柱弱梁”可采用:人为降低框架梁刚度放大系数取值,减小梁配筋,同时通过放大柱端弯矩、剪力设计值来实现“强柱弱梁”;将框架梁端部塑性铰区与板分缝脱开,不考虑现浇板对框架梁的承载力贡献(考虑实际情况,框架结构可仅在底部层间位移较大的几层设置),此法与程序计算模型统一,便于工程师操作,为本文建议方法。

(3)楼板与框架梁局部设缝后,造成现浇板的边界条件发生改变,可能改变设缝长度与梁跨度相比较大的楼板的破坏方式,有关这方面的问题,有待进

一步研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 叶列平,曲哲,马千里,等.从汶川地震中框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J].建筑结构,2008,38(11):52-59.  
YE Lie-ping, QU Zhe, MA Qian-li, et al. Study on ensuring the strong column-weak beam mechanism for RC frames based on the damage analysis in the Wenchuan earthquake [J]. Building Structure, 2008, 38 (11): 52-59. (in Chinese)
- [2] 蒋永生,陈忠范,周绪平,等.整浇梁板的框架节点抗震研究[J].建筑结构学报,1994,12(3):11-15.  
JIANG Yong-sheng, CHEN Zhong-fan, ZHOU Xuping, et al. Aseismic research on RC frame joint of monolithically casted slab [J]. Journal of Building Structures, 1994, 12(3), 11-15. (in Chinese)
- [3] JGJ3—2010,高层建筑混凝土结构技术规程[S].  
JGJ3—2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. (in Chinese)
- [4] ACI committee 318, 2002, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02) [S].
- [5] 王素裹,韩小雷,季静.现浇楼板对RC框架结构破坏形式的影响分析[J].土木建筑与环境工程,2009,31(1):66-71.  
WANG Su-guo, HAN Xiao-lei, JI Jing. The effect of slabs on the failure mode of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(1): 66-71. (in Chinese)
- [6] 唐九如.钢筋混凝土框架节点抗震[M].南京:东南大学出版社,1989.  
TANG Jiu-ru. Reinforced concrete frame joints aseismic [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989. (in Chinese)
- [7] GB 50011—2001,建筑抗震设计规范(2010年版)[S].  
GB 50011—2001, Code for seismic design of buildings (2010 Edition) [S]. (in Chinese)
- [8] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2002, Code for design of concrete structures [S]. (in Chinese)
- [9] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures [S]. (in Chinese)