

文章编号:1673-2049(2008)01-0010-08

## 框架-核心筒组合结构体系在 选型中的刚度规律

聂建国<sup>1</sup>, 田淑明<sup>1</sup>, 矫金广<sup>2</sup>

(1. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 北京时空筑诚建筑设计有限公司, 北京 100840)

**摘要:**根据外围框架柱与核心筒间框架连梁的不同连接方式可划分为 4 种不同类型结构, 对这 4 种不同类型的结构抗侧刚度进行了解析和归纳, 对其基本周期、框架剪力、核心筒基底弯矩分别进行了对比, 给出了各力学特性指标的相对关系计算公式, 通过实际工程的反应谱分析进行了验证。将这 4 种结构类型与带加强层的框架-核心筒结构类型进行类比, 提出了 5 种类型的框架-核心筒组合结构体系的统一刚度特性参数, 并给出了合理的取值范围。在上述分析基础上, 通过实际工程算例重点讨论了组合楼盖的组合作用和加强方式对结构体系刚度的影响。所得的刚度规律可用于高层结构初步设计阶段的结构选型。

**关键词:**框架-核心筒结构; 结构选型; 刚度规律; 统一刚度特征参数

**中图分类号:** TU398.2 **文献标志码:** A

## Stiffness Regularity in Option of Frame-corewall Composite Structure Systems

NIE Jian-guo<sup>1</sup>, TIAN Shu-ming<sup>1</sup>, JIAO Jin-guang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Space-time Creator Architecture Design Ltd, Beijing 100840, China)

**Abstract:** Frame-corewall structure system is categorized into four structural types according to different connections of outrigger frame beams between perimeter frame column and corewall. Lateral stiffnesses of four structural types were analyzed and concluded; fundamental period, shear force of frame and base moment of corewalls were compared respectively; calculation formulae on relative relationship among mechanical property of four types were proposed, which was verified by response spectrum analysis of calculation case. Furthermore, the four structural types were compared with frame-corewall structure with strengthened-story. Stiffness characteristic parameters in five types of frame-corewall composite structural systems were unified and reasonable range was suggested. Based on above analysis, two kinds of strengthening methods including distributed method and concentrated method were contrasted by actual engineering case, as well as composite effect of composite beam under different earthquake intensities. Stiffness regularity proposed above can be applied to option of structural scheme in preliminary design stage of high-rise structure for reference.

收稿日期: 2008-01-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50438020)

作者简介: 聂建国(1958-), 男, 湖南衡阳人, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 工学博士, E-mail: niejg@mail. tsinghua. edu. cn。

**Key words:** frame-corewall structure; structural option; stiffness regularity; unified stiffness characteristic parameter

## 0 引言

框架-核心筒结构在高层建筑中被广泛采用<sup>[1-2]</sup>,目前这种结构大都是以组合结构的形式出现,不再局限于以前的钢筋混凝土结构,核心筒体和外围框架柱间的框架梁由此派生出了不同的连接方式,包括两端刚接(体系1)、两端铰接(体系2)、一端刚接(体系3)、一端铰接(体系4)、带加强层(体系5)5种类型。选择不同的结构类型对后期构件设计乃至施工都会有较大影响,因此存在结构选型的问题,这使不同类型间的对比和选择成为必要,但是目前这方面的工作基本在概念层次上,对工程师而言,尚缺乏实际可操作的定量方法和指标。

鉴于此,本文中笔者从对高层结构设计有显著影响的刚度分析入手,探讨了高层结构体系中典型的框架-核心筒结构体系在选型中的刚度规律,以寻求简洁合理的初步设计方法及其指标。

对这5种体系而言,体系1和体系2的刚度分析已经比较成熟<sup>[3]</sup>,体系5也有详尽的论述<sup>[4]</sup>,而体系3和体系4大都近似采用体系2的计算方法,虽可粗略估计,但是对整个结构的力学性能反映不够准确,本文中对这2类体系进行了刚度解析,得到了其力学特性规律。

在此基础上,笔者将体系1~4四种类型结构的抗侧刚度、基本周期、框架剪力及核心筒基底弯矩进行对比,得到了这4种类型结构力学性能指标的相对关系,并通过反应谱分析算例验证了上述规律;进而将其与带有加强层的框架-核心筒结构(体系5)进行类比,统一了这5种类型结构的刚度特征参数,利用在文献[5]中得到的体系5的合理刚度特征参数取值范围,确定出前4种结构体系刚度特征参数的合理取值。最后通过算例重点讨论了组合作用对结构抗侧刚度的贡献、集中加强和连续加强2种加强方式的选择问题。

## 1 抗侧刚度解析

在体系1和体系2的基础上,推导了体系3和体系4的抗侧刚度,并对这4种类型的结构力学特性进行了对比。本文的解析方法均建立在弹性理论和方法基础上,所采用的结构材料都处于弹性工作状态,其他的基本假设以及各参数的意义可以参见文献[3]。

### 1.1 体系3、4的力学特性

对于体系3和体系4,不能简单地套用体系1和体系2的结果,本文中按照文献[3]取连梁铰接点处变形协调条件来推导这2种结构类型的抗侧刚度,将体系1和体系3、4的基本微分方程及特征刚度参数做如下类比

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{hL^3}{12EJ_L} \right] \tau''(x) - \frac{1}{EA_z} \tau(x) - \frac{B}{2EI} m(x) + \\ \quad \frac{B}{2EI} V_0(1-\xi^2) + \frac{2\mu L}{GA_c H^2} V_0 = 0 \quad \text{体系1} \\ \left[ \frac{hL^3}{3EJ_L} \right] \tau''(x) - \frac{1}{EA_z} \tau(x) - \frac{B}{2EI} m(x) + \\ \quad \frac{B}{2EI} V_0(1-\xi^2) + \frac{2\mu L}{GA_c H^2} V_0 = 0 \quad \text{体系3、4} \\ D = \frac{6EJ_L B^2}{L^3}, EI_0 = \frac{EA_z B^2}{2}, \alpha_1^2 = \frac{DH^2}{EI_0 h}, \alpha_2^2 = \frac{DH^2}{EIh}, \\ \quad \underline{\alpha'^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2}, \gamma^2 = \frac{2\mu EIL}{GA_c BH^2}, \\ \quad m(x) = B\tau(x) = \frac{\alpha_2^2}{\alpha'} V_0 \psi(\xi) \quad \text{体系1} \\ D = \frac{6EJ_L B^2}{L^3}, EI_0 = \frac{EA_z B^2}{2}, \alpha_1^2 = \frac{DH^2}{EI_0 h}, \alpha_2^2 = \frac{DH^2}{EIh}, \\ \quad \underline{\alpha'^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2}, \gamma^2 = \frac{2\mu EIL}{GA_c BH^2}, \\ \quad m(x) = B\tau(x) = \frac{\alpha_2^2}{\alpha'} V_0 \psi(\xi) \quad \text{体系3、4} \end{array} \right.$$

通过体系3、4与体系1的类比(基本微分方程中标有方框项以及刚度特征参数中标有双下划线项),存在如下关系 $\alpha' = \alpha/2$ ,这样就可以在形式上直接应用体系1的结论,只需用 $\alpha'$ 替代 $\alpha$ 即可。

由此得到如下3个重要的力学特性指标:

(1) 筒框结构抗侧刚度的提高系数 $\beta_c$

$$\beta_{c,i} = 1/[1 - (\frac{10}{11} - \phi_a') T'] \quad i=3,4$$

$$T' = \frac{\alpha_2'^2}{a'^2} \cdot \phi_a' = \frac{60}{11} \frac{1}{\alpha'^2} \left( \frac{2}{3} + \frac{2\text{th } \alpha'}{\alpha'^3} - \frac{\text{th } \alpha'}{\alpha'} - \frac{2}{\alpha'^2 \text{ch } \alpha'} \right)$$

(2) 外围框架的剪力及分担率 $\beta_v$

$$\beta_{v,i} = V_{\text{frame},i}/V_0 = 1 - \xi^2 - [1 - T' \psi'(\xi)] f_v(\lambda', \xi) \quad i=3,4$$

$$V_{\text{frame},i} = V_p(\xi) - [1 - T' \psi'(\xi)] f_v(\lambda', \xi) V_0 = \{(1 - \xi^2) - [1 - T' \psi'(\xi)] f_v(\lambda', \xi)\} V_0$$

$$f_v(\lambda', \xi) V_0 = \frac{2}{\lambda'^2} [1 + (\frac{\lambda'^2}{2} - 1) \operatorname{ch} \lambda' \xi - (\frac{\lambda'^2}{2} \operatorname{sh} \lambda' - \operatorname{sh} \lambda' + \lambda') \frac{\operatorname{sh} \lambda' \xi}{\operatorname{ch} \lambda'}]$$

$$\phi'(\xi) = (1 - \alpha'^2 \gamma^2) \{ \frac{1}{\operatorname{ch} \alpha} [\frac{2}{\alpha} + (1 - \frac{2}{\alpha^2}) \cdot \operatorname{sh} \alpha'] \operatorname{sh} \alpha' \xi - (1 - \frac{2}{\alpha^2}) \operatorname{ch} \alpha' \xi - \frac{2}{\alpha^2} \} + 1 - \xi^2$$

(3) 核心筒基底弯矩及弯矩系数  $\beta_M$

$$\beta_{M,i} = M_{C0,i} / M_0 \quad i = 3, 4$$

$$M_{C0,i} = M_{CF0,i} - T'(1 - \varphi_a') M_{CF0,i} = [1 - T'(1 - \varphi_a')] M_{CF0,i} = [1 - T'(1 - \varphi_a')] f_M(\lambda') M_0$$

$$f_M(\lambda') = \frac{3}{\lambda'^3 \operatorname{ch} \lambda'} (\frac{\lambda'^2 \operatorname{sh} \lambda'}{2} - \operatorname{sh} \lambda' + \lambda')$$

$$\varphi_a' = \frac{3}{\alpha'^2 \operatorname{ch} \alpha'} [1 + (\frac{1}{2} - \frac{1}{\alpha'^2}) \alpha' \operatorname{sh} \alpha']$$

## 1.2 各体系力学特性比较

### 1.2.1 抗侧刚度

由第 1.1 节得到各类型结构的抗侧刚度, 对相同构件不同连接结构的整体抗侧刚度进行对比发现, 各类型结构的主要区别是外围框架对核心筒抗侧刚度的提高程度不同。假定体系 2 中外围框架对核心筒抗侧刚度的提高系数为 1.0, 则体系 1 和体系 3、4 的提高系数分别为  $\beta_{C,1} = 1/[1 - (10/11 - \varphi_a) T]$  和  $\beta_{C,i} = 1/[1 - (10/11 - \varphi_a') T']$ ,  $i = 3, 4$ 。

体系 1 和体系 3、4 的提高系数曲线见图 1。由图 1 可知, 在外围框架柱和核心筒刚度不变的情况下, 若使体系 3、4 达到体系 1 的整体刚度, 需要将外伸框架梁的刚度提高 3 倍。

各体系之间的刚度特征值及整体抗侧刚度的相对关系为

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_2} = \frac{1.91 \sqrt{EJ_{dKi}/(EJ_{dC})}}{1.91 \sqrt{EJ_{dK2}/(EJ_C)}} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{C,i}}} \sqrt{\frac{EJ_{dKi}}{EJ_{dK2}}} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{C,i}}} \sqrt{\frac{1 + \gamma_M^2}{1 + \gamma_{Ki}^2}}$$

$$\frac{EJ_{di}}{EJ_{d2}} \approx \frac{f(\lambda_i) EJ_{dC}}{f(\lambda_2) EJ_C} \approx \sqrt{\beta_{C,i}} \quad i = 1, 3, 4$$

### 1.2.2 基本周期

根据高层建筑结构基本周期的计算公式

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{3.555 \sqrt{\frac{mH^4}{EI_{eq}}}} = \frac{2\pi}{3.555 \sqrt{\frac{8}{9.8} \sqrt{\frac{mgH^4}{8EI_{eq}}}}} = 1.6 \sqrt{\Delta_g}$$

其中,  $EI_{eq}$  可用  $EJ_{di}$  来代替, 由此可得到各体系间周期的相对关系

$$T_i/T_2 = 1/\sqrt[4]{\beta_{C,i}} \quad i = 1, 3, 4$$

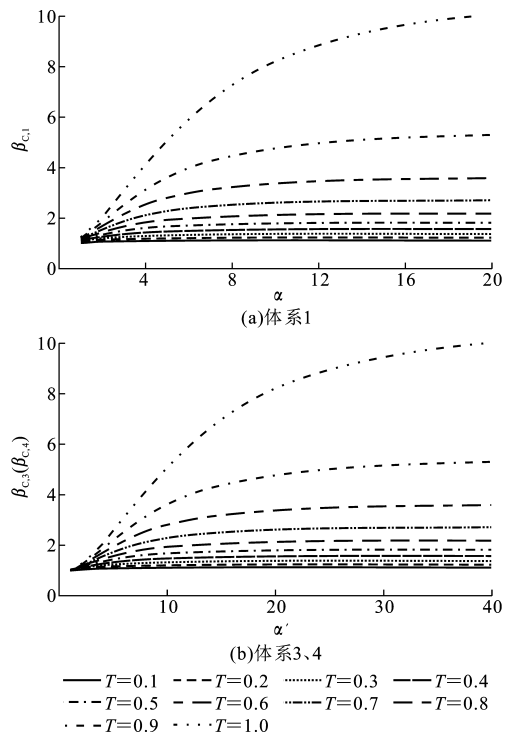


图 1 体系 1 和体系 3、4 的筒体刚度放大系数与刚度特征参数关系

Fig. 1 Relationships Between Stiffness Amplification Factors of Corewall and Stiffness Characteristic Parameters for System 1 and Systems 3, 4

### 1.2.3 框架剪力分担率

边框架柱剪力从小到大依次为: 体系 1、体系 3、4 和体系 2, 翼缘框架柱剪力从大到小依次为: 体系 1、体系 3、4 和体系 2。将这 4 种体系的框架剪力分担率进行对比, 得到体系间的总框架剪力分担率的相对关系为:  $\beta_{V,1} : \beta_{V,2} : \beta_{V,3} (\beta_{V,4}) = \{1 - \xi^2 - [1 - T\psi(\xi)] f_v(\lambda, \xi)\} : [1 - \xi^2 - f_v(\lambda, \xi)] : \{1 - \xi^2 - [1 - T'\psi'(\xi)] f_v(\lambda', \xi)\}$ 。

### 1.2.4 核心筒基底弯矩

将核心筒基底弯矩进行对比, 得到各个体系的相对关系, 其由小到大的次序为: 体系 1、体系 3、4 和体系 2。

$$\eta_{M,i} = [1 - T'(1 - \varphi_a')] f_M(\lambda') \quad i = 3, 4$$

以体系 2 为基准, 图 2 中给出了体系 1 和体系 3、4 的筒体基底弯矩系数随刚度特征参数的变化曲线。取相同的刚度特征值  $\lambda$  和  $\alpha$ , 则这 3 种结构核心筒基底弯矩系数比为  $[1 - T(1 - \varphi_a)] : 1 : [1 - T'(1 - \varphi_a')]$ 。

## 2 反应谱分析验证

第 1 节中提出的刚度解析方法, 基本延续了钢筋

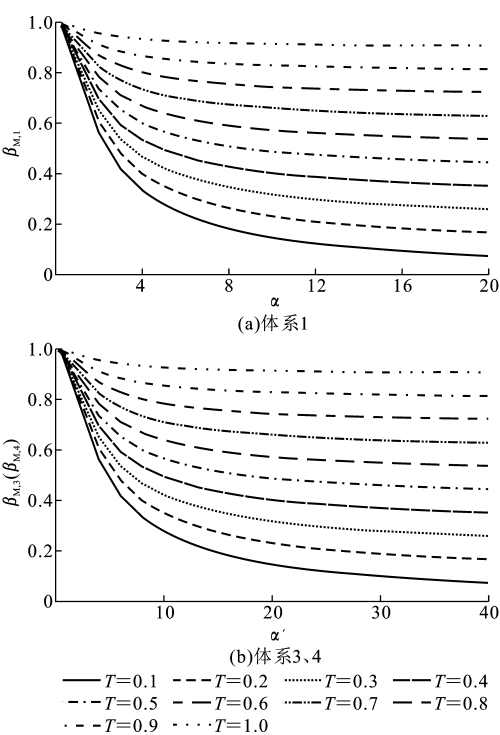


图 2 体系 1 和体系 3、4 的简体基底弯矩系数与刚度特征参数关系

Fig. 2 Relationships Between Base-moment Factors of Corewalls and Stiffness Characteristic Parameters for System 1 and Systems 3, 4

混凝土框架-核心筒结构的分析方法,具有一般意义上的通用性,所以在组合结构体系中也是适用的。现以第 1 节平均状态下设计的钢框架-混凝土核心筒结构为例,通过反应谱分析验证了该解析结论,算例以文献[3]中的钢筋混凝土框架-核心筒结构为蓝本,将外围钢筋混凝土柱替换为方钢管柱,钢筋混凝土梁替换为钢-混凝土组合梁,方钢管柱与组合梁的刚度特征值按体系 1、2 刚度特征值分别取为1.821、1.868。

表 1 首先给出各体系前 5 阶周期的准确计算结果,根据第 1 节基本周期相对关系式可得: $T_1/T_2=0.88$ , $T_3/T_2=T_4/T_2=0.958$ ,这与表 1 第 2 行括弧内的基本周期比基本一致。表 1 也给出了各体系在地震作用和风荷载下的层间位移角,各体系均满足规范要求。以体系 2 为基准,体系 1、3、4 在地震作用和风荷载作用下的最大层间位移角和整体刚度的相对关系如表 1 中括弧内的百分数所示,负号表示最大层间位移角的减小程度,正号表示等效抗侧刚度的提高程度。相对体系 2 而言,体系 1 整体刚度最大可分别提高28.1%和31.5%(刚度理论计算为29%),最大层间位移角可分别减小24.1%和26.4%;体系 3 整体刚度最大可分别提高9.3%和10.4%(刚度理论计算为9%),最大层间位移角可分

表 1 结构反应谱分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Structural Response Spectrum

比较项目		体系 1	体系 2	体系 3	体系 4
结构前 5 阶周期/s	1 阶	2.759 4(0.878 3)	3.141 9	2.997 5(0.954 0)	2.989 0(0.952 0)
	2 阶	2.740 5	3.082 2	2.953 1	2.948 7
	3 阶	1.362 6	1.364 9	1.363 8	1.364 3
	4 阶	0.599 5	0.620 7	0.613 7	0.613 6
	5 阶	0.570 7	0.592 6	0.585 6	0.584 9
地震下最大层间位移角	x 向	1/147 9(−21.9%)	1/1 155	1/126 5(−8.7%)	1/1 269(−9.0%)
	y 向	1/142 1(−24.1%)	1/1 079	1/119 2(−9.5%)	1/1 199(−10.0%)
风荷载下最大层间位移角	x 向	1/164 9(−23.9%)	1/1 255	1/138 7(−9.5%)	1/1 392(−9.8%)
	y 向	1/159 2(−26.4%)	1/1 171	1/131 1(−10.7%)	1/1 320(−11.3%)
地震下基底剪力/kN	x 向	3 150.7(25.4%)	3 108.7	3 122.9(8.6%)	3 122.8(8.9%)
	y 向	53.0(25.4%)	65.6	60.7(8.6%)	60.5(8.9%)
地震下最大顶点位移/mm	x 向	3 218.3(28.1%)	3 173.8	3 188.2(9.3%)	3 189.7(9.8%)
	y 向	54.0(28.1%)	68.2	62.7(9.3%)	62.4(9.8%)
风荷载下基底剪力/kN	x 向	2 512.8(28.3%)	2 512.8	2 512.8(9.6%)	2 512.8(10.0%)
	y 向	48.1(28.3%)	61.7	56.3(9.6%)	56.1(10.0%)
风荷载下最大顶点位移/mm	x 向	2 512.8(31.5%)	2 512.8	2 512.8(10.4%)	2 512.8(11.2%)
	y 向	49.2(31.5%)	64.7	58.6(10.4%)	58.2(11.2%)
最大框架剪力分担率/%	x 向	9.16	7.70	14.33	10.95
	y 向	9.34	7.97	14.63	11.11
最大核心筒基底弯矩系数	x 向	0.090 51	0.091 92	0.085 48	0.088 71
	y 向	0.090 47	0.091 77	0.085 40	0.088 73

别减小9.5%和10.7%;体系4整体刚度最大可分别提高9.8%和11.2%(刚度理论计算为9%),最大层间位移角可分别减小10.0%和11.3%。由此可知,体系1和体系3的平均整体刚度分别为体系2的1.29倍和1.09倍,体系1的平均整体刚度为体系3、4的1.188倍。4种体系的框架剪力分担率及基底弯矩系数由小到大依次为:体系3、体系4、体系1和体系2,这与刚度理论的对比关系是一致的。

由以上对比分析可以发现,刚度理论分析与反应谱分析基本一致,说明第1节提出的几种类型的抗侧刚度相对关系是合理可用的。综合刚度和受力情况可知,对高层结构来讲,条件允许时尽量采用体系1,否则再采用体系3或体系4。

3 统一刚度特征参数及其最佳范围

在框架-核心筒结构体系中,就其抗侧刚度贡献而言,可将其分为2种组件,一种为类筒体部分,另一种为类框架部分,具体到5种体系中,2种组件有着不同的表现形式,见表2。将框架-核心筒体系做此划分后,与框架-剪力墙结构相似,可以得到2类刚度特征参数及其合理的取值范围,现分述如下。

表2 类筒体和类框架在各个体系中的表现类型

Tab. 2 Expression Types of Analogous Corewalls and Analogous Frames in Different Structural Systems					
结构组件	刚度特征参数	体系1	体系2	体系3、4	体系5
类筒体	$T[1/(EIS)]$	连续加强	无加强	连续加强	集中加强
	$\alpha(\omega)$	筒框结构	核心筒	筒框结构	筒框结构
类框架	$\lambda$	平面边 框架	周边空间 框架	平面边 框架	平面边 框架

3.1 类筒体刚度参数

文献[6]中证明了体系4和体系5都可以采用框架伸臂梁连续化假设来进行结构刚度分析,此假设带来的误差很小,足以满足工程精度要求。由此可将第2节体系1、体系3、体系4中的刚度特征参数和体系5的刚度特征参数进行统一化处理,得到它们之间的对应关系,并利用文献[5]中体系5已经确定的刚度特征参数的合理范围,确定出体系1、体系3、4刚度参数的合理取值范围。

由第1.1节分析可知,体系1的 $\alpha$ 和体系3、4的 $\alpha'$ 之间关系为 $\alpha'=\alpha/2$ ,体系1的 $T$ 和体系3、4的 $T'$ 之间的关系为 $T=T'$ 。将 $T$ 或 $T'$ 与体系5的 $1/(EIS)$ 对比发现,虽然采用的分析方法不同,但是两者是完全相同的。将体系1的 $\alpha$ 和体系5的 $\omega$ 对比,得到两者之间的关系为 $\alpha=1.837/\sqrt{\omega}$ 。各类型

间的对应关系结果如表3所示,由此可将各种类型结构用统一的刚度特征参数来表示。

表3 各种类型结构刚度特征参数对应关系

Tab. 3 Corresponding Relationships Among Stiffness Characteristic Parameters in Different Structural Types				
刚度特征参数	体系1	体系3、4	体系5	对应关系
$T[1/(EIS)]$	$T$	$T'$	$1/(EIS)$	$T=T'=1/(EIS)$
$\alpha(\omega)$	$\alpha$	$\alpha'$	$\omega$	$\alpha=2\alpha'=1.837/\sqrt{\omega}$

由文献[5]中 $\omega$ 的合理取值范围为0.3~0.9,可得 $\alpha'$ 的取值范围为0.970~1.675, $\alpha$ 的取值范围为1.94~3.35。 $T=T'=1/(EIS)$ 的合理取值范围为0.60~0.85。

3.2 类框架刚度参数

类框架刚度参数选取类似于框架-剪力墙(筒体)结构的刚度特征值 $\lambda$ ,以此来确定类筒体和类框架间的刚度匹配关系。 $\lambda$ 的合理取值范围可根据文献[3]确定:体系1取为1.0~2.5,体系2取为1.2~3.0,同时根据各体系间的类比关系,体系3、4可取为1.1~2.7。

4 组合楼盖对刚度的贡献

框架-核心筒结构体系中大都采用组合楼盖,由文献[7]可知,在高层建筑结构中,当高宽比大于3时,能满足刚性楼盖假定,所以楼盖的组合作用对结构抗侧刚度的贡献是不能忽略的,故将第2节反应谱分析算例中的体系1和体系2再进行弹塑性分析,以探讨组合楼盖在高层结构体系中的刚度贡献。

4.1 反应谱分析

按照第1.2节力学特性的对比关系可知,组合作用主要体现在框架梁的刚度特征参数 $D$ 上,而且与其两端的连接方式有关。第2节的反应谱分析中考虑了翼缘对梁抗弯刚度的提高作用,刚度放大系数采用2.0。为阐述组合作用,考虑体系1和体系2这2种体系,并补充计算框架梁刚度不放大情况,表4为计算结果。由表4可知,组合作用对结构抗侧刚度有提高作用,体系1中组合作用更为明显,整体抗侧刚度可提高15%左右,约为体系2的1.7倍,这与刚度解析结果一致。

4.2 弹塑性分析

利用CANNY<sup>[8]</sup>程序对El Centro波双向输入进行计算,得到体系1和体系2在不同地震水平下的地震反应,其弹塑性分析结果见表5。由表5可知:考虑组合作用后,结构抗侧刚度提高,结构周期减小;体系1在 $x$ 方向和 $y$ 方向的最大层间位移角

表 4 结构反应谱分析结果

Tab. 4 Analysis Results of Response Spectrum for Structures

参 数		体系 1		体系 2	
		x 向	y 向	x 向	y 向
位移角	不考虑组合	1/1 251	1/1 183	1/1 051	1/974
	考虑组合	1/1 479	1/1 421	1/1 155	1/1 079
相对体系 2 的提高程度/%		15.416	16.749	9.004	9.731

表 5 结构弹塑性计算结果

Tab. 5 Calculation Results of Structure Elastoplastics

参 数		考虑组合	不考虑组合	相对体系 2 的 提高程度/%	
前 5 阶周期/s	1 阶	2.889 5	3.208 1		
	2 阶	2.711 0	2.958 3		
	3 阶	1.450 6	1.476 8		
	4 阶	0.630 9	0.650 6		
	5 阶	0.604 4	0.620 0		
体系 1 最大 层间位移角	小震	x 向	0.000 79	0.000 75	5.123
		y 向	0.000 93	0.001 03	−9.720
	中震	x 向	0.001 99	0.001 93	3.090
		y 向	0.001 93	0.002 32	−16.706
	大震	x 向	0.003 84	0.004 49	−14.342
		y 向	0.003 38	0.003 69	−8.525
体系 2 最大 层间位移角	小震	x 向	0.000 74	0.000 73	1.260
		y 向	0.001 08	0.001 09	−1.200
	中震	x 向	0.001 96	0.002 12	−7.632
		y 向	0.002 12	0.002 22	−4.691
	大震	x 向	0.004 62	0.004 95	−6.628
		y 向	0.004 06	0.004 40	−7.614

最大可分别减小14.342%和16.706%，体系 2 在 x 方向和 y 方向的最大层间位移角最大可分别减小 7.632%和7.614%，体系 1 的减小程度约为体系 2 的 2 倍，与第 2 节的反应谱分析中得出的结论一致。图 3、4 为结构在不同地震水平下的层间位移角包络图，由图 3、4 可知，随着地震强度的增大，组合作用有增加的趋势，在使最大层间位移角减小的同时，更重要的是使结构层间位移角的分布沿结构高度更为均匀，突变减小。将这 2 种结构类型进行对比发现，组合作用的发挥在体系 1 中表现更为明显一些，这说明组合空间作用的发挥与前期结构选型有较大关系。

5 加强方式对刚度的影响

解决结构抗侧刚度不足的问题时，可在某些楼层进行集中加强（体系 5），也可以层层加强（体系 4），就等效抗侧刚度而言，2 种加强方式是等效的，所不同的是：集中加强时，会在加强层及上下 2 层的

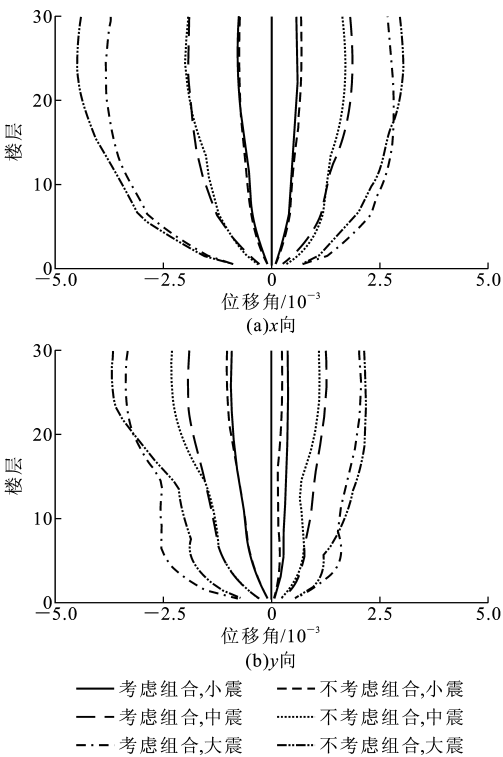


图 3 体系 1 的 x 向和 y 向层间位移角包络曲线  
Fig. 3 Interlaminar Drift Angle Envelope Curves for x-direction and y-direction of System 1

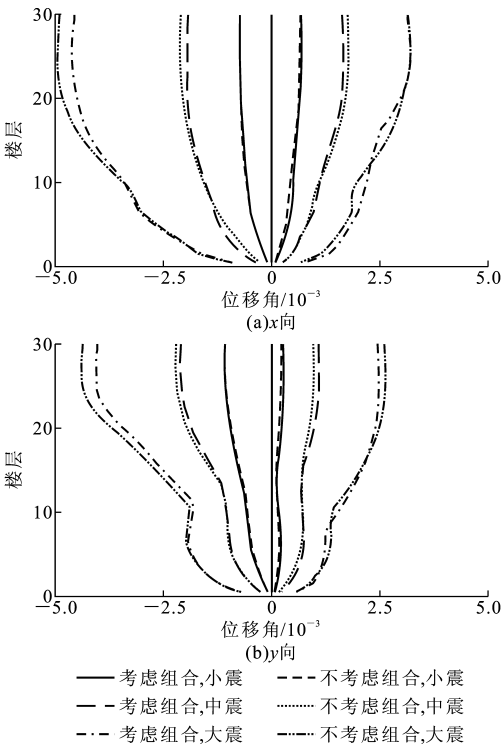


图 4 体系 2 的 x 向和 y 向层间位移角包络曲线  
Fig. 4 Interlaminar Drift Angle Envelope Curves for x-direction and y-direction of System 2

部位产生刚度突变，这种突变如果较大，会导致筒体

和外围框架柱的设计困难;而层层加强相当于均匀连续加强,在受力上更为合理,但是可能会受到建筑、设备等其他因素的影响。孰优孰劣,尚没有严格的标准,目前两者都有应用<sup>[9-11]</sup>。本文中以某一实际高层结构为例,旨在阐述 2 种结构体系的应用方法和适用范围。

某实际高层建筑为双钢筋混凝土核心筒-外型钢混凝土框架结构,地下 7 层,局部有 2 层错层结构,地上 37 层,结构总高 150 m,标准层高 4.2 m,总建筑面积 150 000 m<sup>2</sup>,平面结构布置如图 5 所示,在结构 26 层设置加强层,在框架伸臂梁和筒体间连体梁位置设置加强桁架,在 26 层以上的 2 个核心筒呈小塔状伸出。

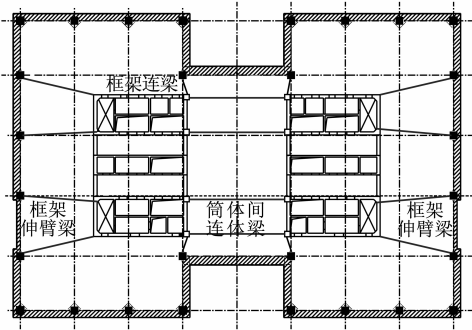


图 5 某实际工程平面结构

Fig. 5 An Actual Engineering Plane Structure

5.1 加强方式的对比

原结构设计方案为地上各层的框架梁与外围框架柱刚接,与内核心筒铰接,即第 3 节中所指的体系 3 类型,将此方案称为原方案。利用文献[5]中提出的体系 5 的设计方法,对原设计方案 p<sub>1</sub> 进行了改进(称为改进方案 p<sub>2</sub>),改进如下:①将框架梁的连接方式改为两端刚接,将 y 方向短跨框架梁做连梁处理,并通过计算比较将连梁两端刚接,即采用了第 3 节中所述的体系 1 方案;②取消加强层外围共 8 片加强桁架,保留其上下弦杆,两端做刚性连接,保留 2 个核心筒体之间的加强桁架,桁架上下弦采用铰接;③加强楼层外围框架梁适当加强以形成环梁,可以防止楼盖发生翘曲和减小加强桁架的受力,同时可以保证视为上面塔楼“基底”的加强层的整体性。

原方案与改进方案的内力和刚度对比如图 6 和表 6 所示。由图 6 可知,改进方案的倾覆弯矩和楼层剪力在 x 方向有明显的减小,尤其是加强层剪力减小近 50%,为设计带来了方便。在 y 方向对原方案也有相应的改善,最终楼层侧移均满足规范要求。

值得注意的是,改进方案是在原方案基础上进

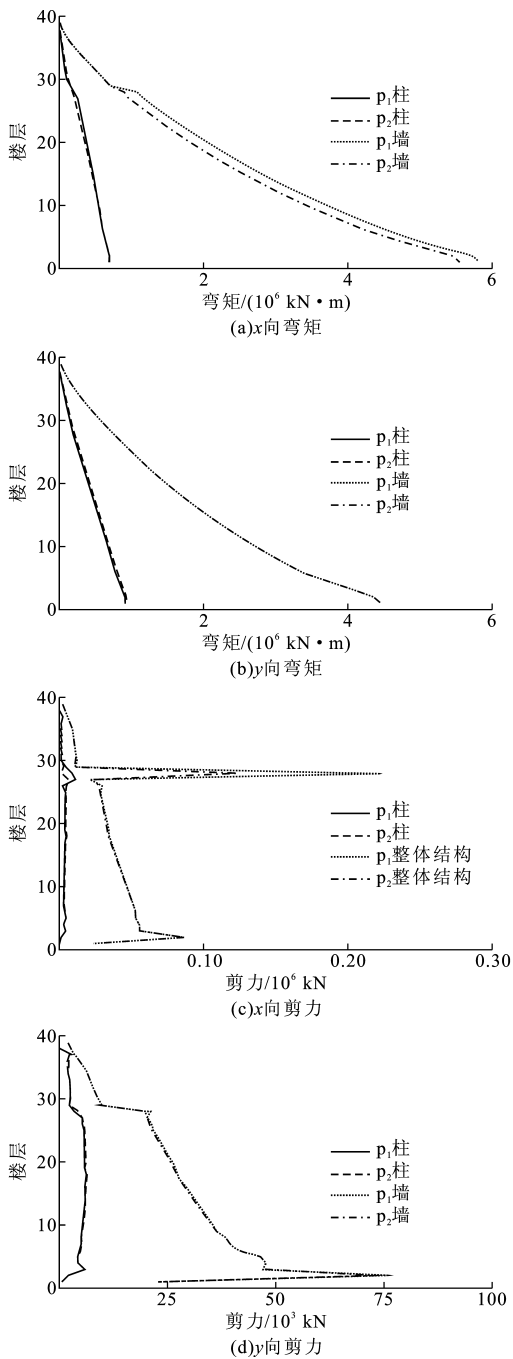


图 6 原方案与改进方案内力比较

Fig. 6 Comparisons of Internal Forces Between Original Scheme and Modified Scheme

行的,并未对构件截面做任何调整,只是调整了构件的连接方式,由此可见,加强方式的选择可有效地改善结构的刚度匹配关系。如果认为富余程度不够,还可以将 4 个角部的楼面梁倾斜放置,两端连接框架柱和核心筒体,这将使结构具有更大的安全储备。

5.2 加强方式的选择

(1) 2 种加强方式都可以弥补结构抗侧刚度的不足,在整体抗侧刚度上是相同的。

表 6 原方案与改进方案刚度比较

Tab. 6 Comparisons of Stiffnesses Between Original Scheme and Modified Scheme

设计方案		原方案	改进方案
前 5 阶周期/s	1 阶	3. 221	3. 147
	2 阶	2. 945	3. 029
	3 阶	2. 572	2. 551
	4 阶	0. 884	0. 875
	5 阶	0. 837	0. 830
地震下最大层间位移角	x 向	1/890	1/822
	x-5%向	1/875	1/815
	x+5%向	1/885	1/820
	y 向	1/854	1/889
	y-5%向	1/849	1/888
	y+5%向	1/794	1/824

(2)集中加强和层层加强之间选择的优先顺序为:首选层层加强均匀化的方案,其次为集中加强的方案。

(3)带加强层结构容易出现刚度突变,而且设计中要保证其中震不屈服或者中震弹性,结果导致设计困难,形成结构薄弱层,通常在连续加强不能实现时才采用,如必须采用,应尽量做到楼层刚度沿竖向均匀,可按方法(1)、(2)来进行各组件刚度的选择。

(4)考虑建筑要求以及施工等因素,如楼层净高、压型钢板跨度、节点连接和管线布置等。

6 结 语

(1)不同体系的抗侧刚度、基本周期、框架分担剪力以及核心筒基底剪力间存在对应关系,利用此关系可以方便初步设计阶段的结构选型。

(2)5 种类型结构体系的刚度特征参数可以进行统一化处理,并能得到其最佳取值范围。

(3)组合楼盖的组合作用主要体现在框架连梁的特征刚度上,与两端的连接类型有密切的关系。

(4)当结构刚度需加强时,应尽量采用连续加强的方式,其次考虑有限刚度的集中加强,尽量避免刚度突变。

参考文献:

References:

[ 1 ] JGJ 3—2002,高层建筑混凝土结构技术规程[S].  
JGJ 3—2002, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S].  
[ 2 ] 徐培福,薛彦涛,肖从真,等. 高层型钢混凝土框筒混合结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2005, 35 (5):3-8.

XU Pei-fu,XUE Yan-tao,XIAO Cong-zhen,et al. Experimental Study on Seismic Performance of High-rise SRC Hybrid Structures[J]. Building Structure,2005, 35(5):3-8.  
[ 3 ] 傅学怡.实用高层建筑设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.  
FU Xue-yi. Practical Design of Tall Building Structure [M]. Beijing:China Architecture &. Building Press, 1999.  
[ 4 ] SMITH B S,SALIM I. Parameter Study of Outrigger-braced Tall Building Structures[J]. Journal of Structure Engineering,1981,107(10):2 001-2 014.  
[ 5 ] 聂建国. 国家自然科学基金重点项目(50438020)中期报告[R]. 北京:清华大学,2006.  
NIE Jian-guo. Metaphase Report of Key Project of National Natural Science Foundation of China (50438020)[R]. Beijing:Tsinghua University,2006.  
[ 6 ] COULL A,LAU W H O. Analysis of Multioutrigger-braced Structures[J]. Journal of Structure Engineering,1989,115(7):1 811-1 815.  
[ 7 ] 聂建国,田淑明. 大震下高层型钢混凝土结构弹塑性分析[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(6): 772-775.  
NIE Jian-guo,TIAN Shu-ming. Elastoplastic Analysis of a Tall SRC Structure Under Major Earthquakes [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2007,47(6):772-775.  
[ 8 ] LI Kang-ning. Canny for 3D Nonlinear Static and Dynamic Structural Analysis [M]. Singapore: National University of Singapore Press,2006.  
[ 9 ] GB 50011—2001,建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2001, Building Anti-seismic Design Code [S].  
[10] 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.  
[11] 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. A-nalysis of Composite Beam Rigidity Influencing Seismic Properties of Composite Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):39-44.