

文章编号:1671-6833(2006)02-0008-06

# 组合节点刚度对组合框架的抗震性能影响分析

王元清<sup>1</sup>, 王锁军<sup>1,2</sup>, 吴杰<sup>2</sup>, 聂建国<sup>1</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. 北京蓝图工程设计公司, 北京 100051)

**摘要:** 为研究钢-混凝土组合节点刚度对组合框架抗震性能的影响, 首先讨论了组合节点的刚度及其影响因素, 然后通过某多层钢结构工程实例, 利用 Ansys 有限元软件建立了纯钢框架与组合框架, 分别假定刚接及考虑节点刚度等共 4 种框架模型, 进行了多遇地震反应谱分析及弹性时程分析, 并进行了计算对比. 计算结果表明, 考虑钢框架的组合作用后, 结构整体自振周期变短, 基本自振周期降低了 13.4%, 说明结构整体刚度变大. 但考虑节点刚度后, 地震周期又有所加大, 纯钢框架及组合框架基本自振周期均增大了 17%, 相应地震位移变大, 2 种模型的反应谱法分析顶层位移分别增大了 8%, 11%, 说明组合节点刚度对结构的抗震性能是不可忽略的因素.

**关键词:** 组合框架; 组合节点刚度; 自振周期; 层位移; 底层层剪力

**中图分类号:** TU 398 **文献标识码:** A

## 0 引言

欧洲规范(EC4)中对钢-混凝土组合框架作了如下定义: 一个组合框架是指结构中的部分或全部梁、柱为组合构件, 而其余的构件均为钢构件的框架结构. 本文所指的钢混凝土组合框架是由(混凝土楼板通过栓钉与钢梁组成的组合框架梁和纯钢框架柱(一般为工字型或箱型断面)所组成的组合框架. 影响组合框架结构抗震和抗风性能的因素主要是结构的刚度即组合框架的抗侧移刚度. 结构的抗侧移刚度由框架柱、框架梁和连接框架柱梁的节点的刚度确定. 对组合框架来说, 在框架柱一定的情况下, 决定组合框架侧移刚度的因素就是组合框架梁的刚度及组合节点的刚度( $k = M/\phi$ ). 本文将结合工程实例讨论组合节点刚度对组合框架的抗震性能的影响分析.

## 1 组合节点的刚度确定

对节点区通常是指梁端与柱轴线之间的区域, 一般来说, 节点转角  $\phi$  是指节点连接梁柱轴线夹角在某荷载作用下相对于无荷载时的改变值. 节点刚度  $k$  是指梁柱轴线夹角  $\phi$  单位变化所需的弯矩  $M$ . 对于梁柱栓焊连接而言, 在承受水

平地地震荷载作用时, 节点变形将以节点域内的柱腹板剪切变形为主<sup>[1,2]</sup>. 根据《钢结构设计规范》(GB50017-2003)第 7.4.2 条的规定, 对于纯钢结构的栓焊节点, 其刚度可按式确定.

箱型截面柱、H 型钢梁:

$$k = M/\phi = 2.4 G h_b h_c t_w \quad (1)$$

H 型钢柱、H 形钢梁:

$$k = M/\phi = \frac{4}{3} G h_b h_c t_w \quad (2)$$

而组合节点由于混凝土楼板的组合效应, 能够有效地增加节点的抗弯承载力和连接刚度<sup>[3]</sup>. 组合节点示意图见图 1.

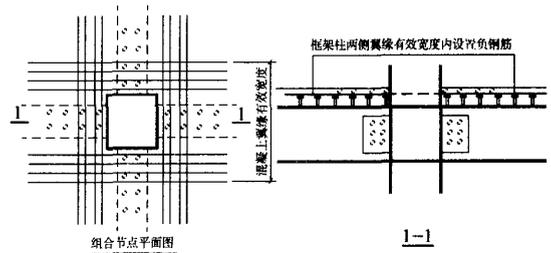


图 1 钢-混凝土组合节点示意图

Fig.1 Sketch map of composite joint

从图中可以看出, 影响组合节点刚度及承载力的因素众多, 包括混凝土板的有效宽度; 混凝土

收稿日期: 2005-01-28; 修订日期: 2006-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578083)

作者简介: 王元清(1963-), 男, 安徽霍山人, 清华大学副教授, 博士, 主要从事结构工程方面教学与研究.

万方数据

板的厚度;混凝土板的配筋率;钢梁、柱节点连接形式等.当钢框架节点形式一定的情况下,影响组合节点刚度的主要是混凝土板的厚度及配筋.文献[3]针对上述因素对组合节点进行了实验研究及数值分析.

### 1.1 混凝土板厚的影响

在混凝土板的配筋量一定的条件下,混凝土板的厚度将决定板中配置钢筋的高度,从而影响负弯矩区整个组合截面中和轴的高度.根据试验结果可以看出,无论在正弯矩区还是负弯矩区,随着板厚的增加,节点承载力有明显的提高,与此同时,节点的弹性阶段线刚度和屈服后的刚度均有一定程度的提高.文献[3]在有限元组合节点计算中,将混凝土板的配筋固定为  $\Phi 12 @ 100$  时,混凝土板厚分别取为 80 mm、100 mm、125 mm、150 mm 进行计算,得出混凝土板厚对组合节点刚度及承载力相对与纯钢节点影响见表 1.表中  $k_0$  表示混凝土板厚为 0,即纯钢节点弹性阶段的线刚度, $k$  表示不同板厚在正负弯矩作用下的组合节点弹性阶段的线刚度.

表 1 混凝土板板厚因素影响

Tab.1 Influence thickness of concrete plate

板厚/mm	正弯矩 $k/k_0$	负弯矩 $k/k_0$
0	1.00	1.00
80	1.17	1.10
100	1.26	1.15
125	1.35	1.25
150	1.46	1.32

### 1.2 混凝土板配筋率的影响

当板厚一定的条件下,混凝土板有效翼缘宽度内配筋量(有效宽度内的混凝土板面积乘以板配筋率)将决定组合节点处中和轴的位置,进而影响组合节点的刚度及承载力.文献[3]在组合节点有限元计算中,将混凝土板板宽取为 850 mm,板厚固定为 125 mm,选取截面配筋率分别为 0.5%, 1%, 1.5%, 2% 和 2.5% 5 种情况进行比较.下表 2 为混凝土板配筋率对组合节点弹性阶段线刚度的影响.表中  $k_0$  表示纯钢节点弹性阶段的线刚度, $k$  表示混凝土翼缘板内不同配筋率时在正负弯矩作用下的组合节点弹性阶段的线刚度.

从表 2 可以看出,即使在配筋率很低的情况下,组合节点在负弯矩作用下刚度也有 30% 以上的提高.值得注意的是,混凝土板对节点的影响,随着配筋率的提高而逐渐减小,过高的配筋率并不能有效提高节点刚度,并且还影响节点的延

性和转动能力.

表 2 混凝土板配筋率的影响

Tab.2 Influence of concrete plate steel bar rate

配筋率/%	正弯矩 $k/k_0$	负弯矩 $k/k_0$
纯钢节点	1.00	1.00
0.5	1.36	1.31
1.0	1.41	1.37
1.5	1.43	1.39
2.0	1.46	1.43
2.5	1.48	1.45

可见,考虑组合作用后节点的弹性阶段的线刚度在正负弯矩作用下均有较大幅度的提高.从表 1、表 2 可以看出,在混凝土板厚及配筋率正常设计的情况下,正弯矩作用时,组合节点刚度提高约 20% ~ 40%,负弯矩作用时提高约 10% ~ 30%.

下面结合北京某办公楼多层组合轻钢结构工程,分别对纯钢框架假定节点刚接、纯钢框架考虑节点刚度、组合框架假定节点刚接、组合框架考虑节点刚度共 4 种情况,采用有限元软件 ANSYS 建立模型及进行动力特性及抗震性能的分析计算,以研究节点刚度对组合结构抗震性能的影响.

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况及结构布置

北京某小区办公楼为一 4 层办公建筑,1 ~ 3 层为小开间办公室,顶层为会议室及大开间活动室.结构标准层横向为 3 排柱(8 m + 8.5 m),顶层抽去中柱,屋面梁为双坡焊接 H 型钢梁,屋面板为双面夹芯彩钢板.第一层层高 3.4 m;其他层高层高为 3.2 m,建筑物总高 13.8 m.纵向柱距 6.0 m.采用普通钢框架结构体系,主梁采用焊接工字形截面,柱采用焊接箱型截面.楼板采用混凝土预制小薄板上浇混凝土的叠合板楼盖,叠合混凝土板厚 100 mm,框架钢梁采用 2 排  $\Phi 13 \times 80 @ 125$  栓钉与混凝土楼板形成组合框架梁<sup>[4]</sup>框架的横向和纵向梁柱节点采用栓焊连接.结构平面、框架立面及组合节点构造见图 2.

本工程位于北京市,场地类别为 II 类,抗震设防烈度为 8 度,按第一组设计计算,特征周期为 0.35 s.梁柱断面如表 3 所示.

### 2.2 ANSYS 建模及模态分析

ANSYS 在建筑行业用到的功能包括:静力分析、模态分析、谐波分析、瞬态动力分析、谱分析、屈曲分析、显式动力分析.其中的瞬态分析可以运

用到结构的弹性和弹塑性时程分析.

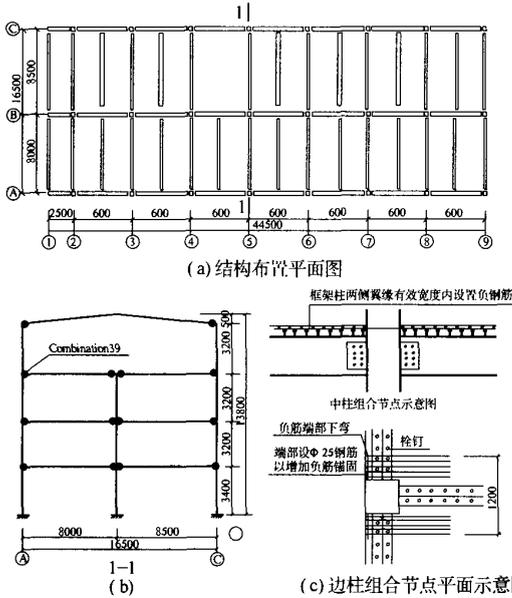


图2 结构平面、立面及组合节点构造图

Fig.2 structure plane, elevation and constitution of composite panel point

表3 构件断面尺寸

Tab.3 Cross-sections of component

构件名称	断面尺寸/mm
主梁	I 400 × 200 × 8 × 6
屋面梁	I 300 × 200 × 8 × 6
框架柱	□350 × 350 × 10 × 10

2.2.1 建模

由于该工程为多层框架结构,且结构质量分布比较均匀,取结构横向中部一榀框架进行计算符合结构横向地震受力情况.框架计算简图如图2所示.纯钢框架与组合框架的阻尼分别取为0.02,0.035.梁、柱单元采用 Beam4 单元.将恒载和活载按照荷载规范,折算成计算地震的重力荷载代表值,用 mass21 质量块加在每层的所有梁柱节点上.节点刚度采用 Combination39 模拟.组合框架梁采用文献[5,6]计算其等效刚度,并按钢结构设计规范考虑滑移效应引起的刚度折减<sup>[5,7]</sup>.框架各纯钢构件惯性矩及标准层组合框架梁的的等效惯性矩见下表4.

表4 框架构件惯性矩

Tab.4 Inertia moment of frame component

构件	惯性矩/m <sup>4</sup>
8 m 跨组合梁	2.45 × 10 <sup>-4</sup>
8.5 m 跨组合梁	2.47 × 10 <sup>-4</sup>
纯钢框架梁	1.51 × 10 <sup>-4</sup>
顶层刚架梁	7.97 × 10 <sup>-5</sup>
箱形框架柱	2.62 × 10 <sup>-4</sup>

从上表可以看出,考虑组合的框架梁等效惯性矩与不考虑组合的纯钢梁惯性矩之比约为1.62 ~ 1.64.

组合框架梁柱节点采用 Combination39 模拟. Combination39 是一个具有非线性的力 - 位移性能的单向单元,可以通过其描述梁、柱沿垂直于框架平面方向(Z 向)的相对转角与弯矩的关系(节点刚度  $k = M/\phi$ )来模拟梁柱节点的刚度.单元几何图形见图3.本实例纯钢节点刚度按公式(1)计算且正负弯矩时节点刚度相同.根据苏迪<sup>[3]</sup>的研究成果并根据本工程的纯刚节点类型、混凝土板厚、混凝土板翼缘有效宽度及配筋率等因素,通过综合分析,组合框架节点的正负弯矩的节点刚度分别取纯钢节点的1.35倍、1.25倍,见表5.

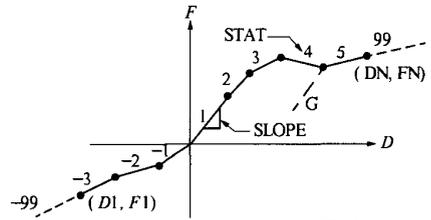


图3 Combination39 几何图形

Fig.3 Geometry figure of combination 39

表5 节点刚度

Tab.5 Table 5 joint rigidity

节点类型	节点刚度/(N·m)	
纯钢节点(标准层)	正弯矩区	2.403 × 10 <sup>8</sup>
	负弯矩区	-2.403 × 10 <sup>8</sup>
纯钢节点(顶层)	正弯矩区	1.778 × 10 <sup>8</sup>
	负弯矩区	-1.777 × 10 <sup>8</sup>
组合节点	正弯矩区	3.244 × 10 <sup>8</sup>
	负弯矩区	-3.003 × 10 <sup>8</sup>

2.2.2 模态分析

本模型为单榀四层框架,本算例仅仅对低阶振型(四阶)分析,忽略高阶振型的影响.经计算4种模型的周期对比如下表6所示.

表6 组合结构与非组合结构自振周期对比

Tab.6 Contrast of natural vibration period between composite and steel structure

模型	框架类型	振型1	振型2	振型3	振型4
模型1	纯钢框架	1.024	0.346	0.319	0.207
	假定节点刚接				
模型2	纯钢框架	1.199	0.420	0.369	0.200
	考虑节点刚度				
模型3	组合框架	0.886	0.344	0.295	0.199
	假定节点刚接				
模型4	组合框架	1.037	0.397	0.366	0.190
	考虑节点刚度				

由表 3 可看出,考虑节点刚度后,无论是纯钢框架还是组合框架,结构自振周期均有所增大,纯钢框架和组合框架自振周期均增大了 17%. 组合钢框架的振型与纯钢结构相近,仅自振周期有所不同,模型 3 和模型 4 两种模型的前四阶振型分别见图 4、图 5.

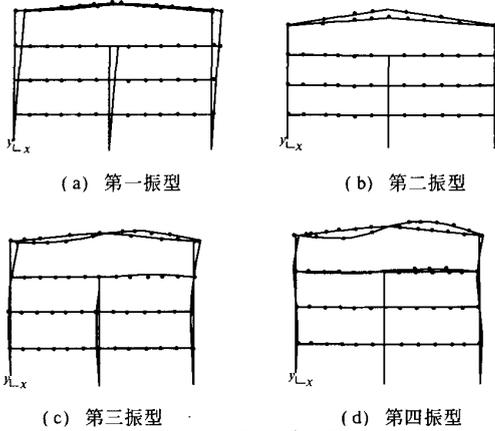


图 4 模型 3 的振型

Fig.4 The vibration shapes of model 3

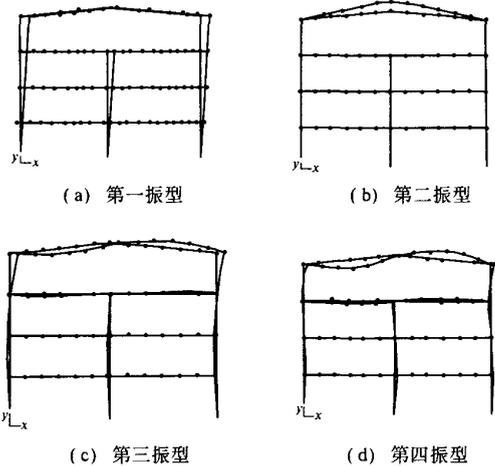


图 5 模型 4 的振型

Fig.5 The vibration shapes of model 4

### 2.2.3 反应谱分析

按照《建筑抗震设计规范》,8 度区多遇地震取地震影响系数为 0.16,并分别取结构的阻尼比  $\zeta$  为 0.02,0.035 两种情况计算  $S_a - T$  曲线,得到的最大绝对加速度反映谱曲线如图 6 所示,其中,  $S_a$  为结构最大加速度反应,  $T$  为周期.从图中可以看出,随阻尼比  $\zeta$  的加大,绝对加速度反映减小.

采用振型分解反应谱时,求出各振型的作用效应,应用平方和开平方方法进行组合,即 SRSS 方法.经反应谱分析计算,4 种模型的地震反应如图 7.其中,纯钢框架、组合框架阻尼比  $\zeta$  分别采用 0.02 和 0.035.

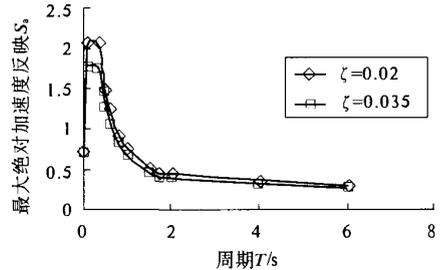
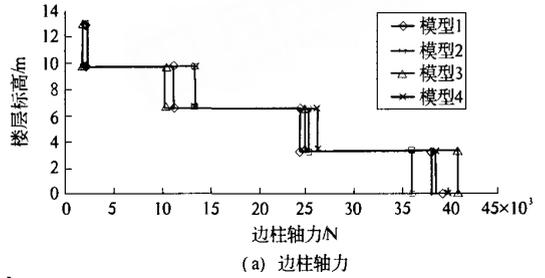
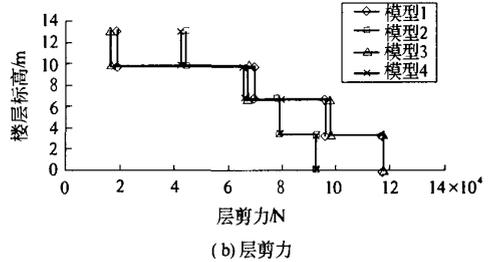


图 6  $S_a - T$  曲线

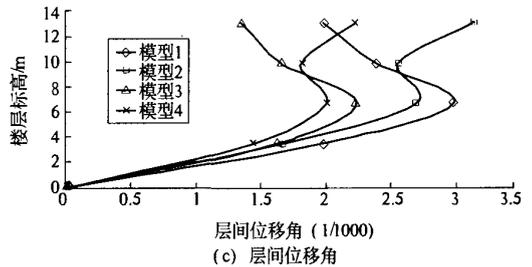
Fig.6  $S_a - T$  curve



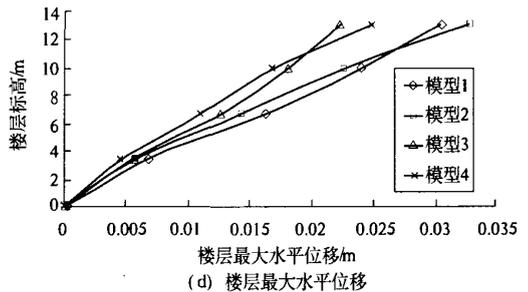
(a) 边柱轴力



(b) 层剪力



(c) 层间位移角



(d) 楼层最大水平位移

图 7 边柱轴力、层剪力、层间位移角及楼层最大水平位移

Fig.7 Axial and shearing forces of side column, and inner drift distribution

从图 7 中可得出得结论:无论纯钢框架还是组合框架,考虑节点刚度后,楼层轴力、剪力及层间位移角在底部楼层均有较大幅度的降低,但在上部楼层却有所增加,说明结构由考虑节点刚度

后,结构由位移由剪切型趋近于弯曲型。

最大楼层位移见下表7,从表中可以看出,考虑节点刚度的组合框架与纯钢框架顶层位移均比假定为刚接的顶层位移增大了8%,11%。说明考虑节点刚度后,结构整体刚度降低。

表7 组合框架与纯钢框架顶层位移对比

Tab.7 Top drifts comparison of composite structure and steel structure

框架类型	顶层位移/mm	框架类型	顶层位移/mm
模型1	0.030 41	模型3	0.022 44
模型2	0.032 74	模型4	0.024 97

4种模型底层边柱弯矩见表8。可见,组合框架和纯钢框架其节点刚度均对框架的抗震性能产生了很大的影响。因此,在实际工程实际中,将框架节点假定为刚接进行计算与结构的实际情况有一定的误差,应予以考虑。组合框架梁刚度的提高大大增加了框架结构的抗侧移刚度,而由于实际工程中节点刚度的影响,结构的实际抗侧移刚度要小于假定节点为刚接时的框架侧移刚度。

表8 组合框架与纯钢框架底层边柱弯矩

Tab.8 Side column moment comparison of composite structure and steel structure

框架类型	弯矩/(N·m)	框架类型	弯矩/(N·m)
模型1	45 284	模型3	51 118
模型2	57 718	模型4	65 972

3.2.4 弹性时程分析

在时程分析法计算中,采用比较典型的 El-Centro 加速度时程波对结构进行计算,由于组合框架梁采用的是换算截面法得到的等效截面刚度,不适用塑性阶段的地震反应分析,因此本文仅进行了多遇地震下的弹性时程分析,计算采用地震加速度时程曲线的最大值取 70 cm/s<sup>2</sup>。结构阻尼取 Rayleigh 阻尼,阻尼矩阵取质量矩阵和刚度矩阵的线性组合。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$\alpha$  和  $\beta$  计算结果见表9。

表9 不同框架模型的  $\alpha, \beta$  值

Tab.9  $\alpha, \beta$  of different frame model

框架类型	$\alpha$	$\beta$
模型1	0.183 34	0.001 650
模型2	0.155 18	0.001 981
模型3	0.357 30	0.002 764
模型4	0.306 58	0.003 199

时程计算结果和振型分解反应谱方法得到的结果相类似,多遇地震时程分析得到最大位移略大于反应谱分析,各种框架顶层弹性时程最大位移曲线见下图8。各种类型框架弹性时程最大楼层位移及底层层剪力分别见图9及表10。

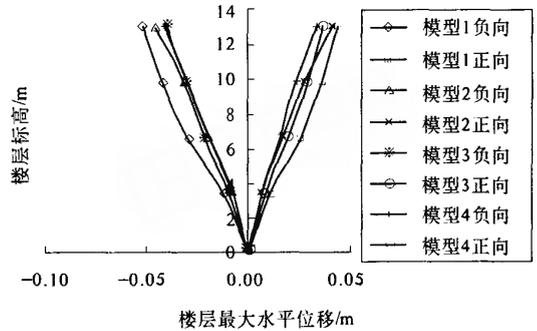


图8 框架弹性时程分析的各楼层位移

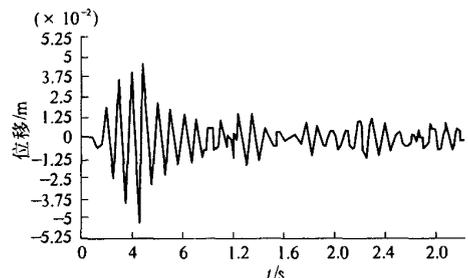
Fig.8 Every floor drift in elastic time history analysis

表10 各框架模型弹性时程底层剪力

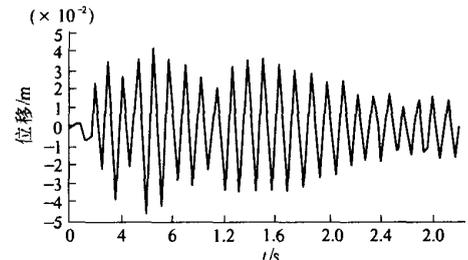
Tab.10 Ground floor shearing force in

elastic time history analysis

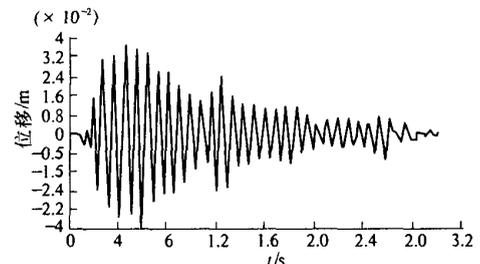
模型	层剪力	模型	层剪力
模型1	207 002	模型3	191 082
模型2	111 270	模型4	143 445



(a) 模型1



(b) 模型2



(c) 模型3

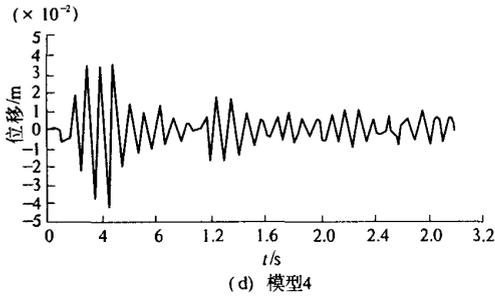


图 9 各框架模型顶层最大位移时程曲线

Fig.9 Time history curves of top max drifts

#### 4 结论

(1) 组合节点刚度对组合框架的抗震性能有着较大的影响,而当组合节点的钢节点形式一定的情况下,影响组合节点刚度的主要因素是混凝土板的厚度及配筋率。

(2) 各种模型的模态分析表明:考虑框架梁的组合作用后,结构自振周期变短,说明结构刚度加大.而当考虑节点刚度后,结构周期相对于节点刚接时又有所加大.说明节点的刚度对结构的抗震性能影响是个不可忽略的因素。

(3) 反应谱及弹性时程分析均表明:考虑框架梁的组合作用后,由于结构抗侧移刚度加大,相应地震位移有较大幅度的降低.例如,其顶层位移降低了 26%.但考虑节点的实际刚度后,组合及纯钢框架地震反应其底部两层地震力有所降低,地震位移降低幅度较大,首层位移纯钢与组合框

架分别降低了 15%, 16%. 三层楼板处,地震水平位移相当,但顶层位移分别增大了 11%, 8%, 从而,从数据上说明了结构震动特性发生了变化,由剪切型趋向于弯曲型,底层柱弯矩分别加大了 23%, 27%。

(4) 从以上分析可以看出,组合框架的抗震性能优于纯钢框架,但节点刚度的影响不可忽略.通常,在实际工程计算中假定节点为刚接的计算模型与实际情况出入较大,应充分予以考虑。

#### 参考文献:

- [1] 陈惠发. 钢框架稳定设计[M]. 周绥平, 译. 上海: 世界图书出版公司, 1999.
- [2] 施刚. 钢框架半刚性端板连接的静力和抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [3] 苏迪. 考虑组合效应的钢结构梁柱节点抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [4] 陈全, 石永久, 王元清, 等. 钢-混凝土叠合板组合楼盖在多层轻钢结构中的应用[J]. 工业建筑 2004, 33(4): 20~24.
- [5] 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.
- [6] 陈戈. 钢-混凝土组合框架的实验及理论分析[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [7] 聂建国. 钢-混凝土组合结构-试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

### Analysis of Influence of Composite Joint Rigidity on Seismic Properties of the Steel-concrete Composite Frame

WANG Yuan-qing<sup>1</sup>, WANG Suo-jun<sup>1,2</sup>, WU Jie<sup>2</sup>, NIE Jian-guo<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Landmark Engineering Design Co. Ltd., Beijing 100051, China)

**Abstract:** To study the main influence of composite joints rigidity on composite frame seismic properties, this paper at first discusses composite joint rigidity and influence factors, and then through a multi-storied steel project, creates frame composite frame and different joint style four model based with finite element software ANSYS, and contrasts the results of response spectrum analysis to elastic time-history analysis. The results which take the composite effect into account show that the natural vibration period is shorter by 13.4%, the stiffness of the structure is larger than not. But considering the rigidity of joints, the natural vibration period is larger by 17%, the drifts of earthquake are larger, and the top drifts is larger 8% and 11%. the rigidity of composite joints can not be ignored in earthquake.

**Key words:** composite frame; composite rigidity of joint; natural vibration period; drift of story; base shear force