

文章编号:1673-2049(2006)01-0039-06

组合梁刚度对组合框架的抗震性能影响分析

王锁军^{1,2}, 王元清¹, 吴 杰², 聂建国¹

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 北京蓝图工程设计有限公司, 北京 100051)

摘要:为研究钢-混凝土组合框架梁的刚度对组合框架抗震性能的影响,通过某多层钢结构工程实例,采用有限元软件 ANSYS 分别建立了纯钢框架、组合梁框架及其不同阻尼比下的框架计算模型,进行了纯钢框架与组合框架在不同阻尼比下的多遇地震反应谱分析及弹性时程分析。实例分析结果表明:考虑钢框架的组合作用后,结构整体自振周期变短,说明结构整体刚度变大,地震层间位移变小。虽然组合框架整体刚度的增大使地震力有所加大,但由于组合结构阻尼比接近混凝土结构阻尼比,组合框架无论是结构侧向位移还是地震力均小于纯钢框架,因此组合框架是一种良好的结构形式。

关键词:组合框架; 阻尼比; 自振周期; 层位移

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A

Analysis of Composite Beam Rigidity Influencing Seismic Properties of Composite Frame

WANG Suo-jun^{1,2}, WANG Yuan-qing¹, WU Jie², NIE Jian-guo¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Landmark Engineering Design Ltd, Beijing 100051, China)

Abstract: To study the steel-concrete composite frame rigidity, which influences the seismic performance of composite frame, authors analyzed a multi-storied steel project by two different ways, one treated the project as steel frame and the other treated it as composite frame which took the composite effect based on finite element analysis software ANSYS, to proceed the normal earthquake response spectrum analysis and elastic time-history analysis under different damping ratios of these two ways. The results which take the composite effect into account show that the natural vibration period is shorter, the rigidity of the structure is larger and the inter-story drift is smaller than the result of the other way. Although the rigidity of the structure is larger, the force of seismic is little larger. Because its damping ratios is similar with concrete structure, its drift of story and force of seismic are smaller than steel structure, and it is a good form structure.

Key words: composite frame; damping ratio; natural vibration period; drift of story

收稿日期:2005-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50578083)

作者简介:王锁军(1968-),男,河北藁城人,北京蓝图工程设计有限公司工程师,清华大学工学硕士研究生,

E-mail:wsj6811@163.com.

0 引言

欧洲规范 4(EN1994-1-1)中将钢-混凝土组合框架定义为: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。笔者所指的钢-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。组合框架中的框架梁与组合连续梁受力上有很多相同之处,在垂直荷载作用下除边跨外,其受力基本和连续梁相同,但组合框架除承受垂直荷载外还承受水平风荷载和地震力作用,因此组合框架的受力性能除对垂直荷载的影响外,更重要的是对抗震性能和抵抗水平风荷载有着非常大的影响。

相对于纯钢结构框架来说,影响组合框架结构抗震和抗风性能的因素主要是组合楼盖的整体刚度、组合框架梁刚度、柱的刚度和组合节点的转动刚度;同时,由于组合框架结构抗震性能接近于混凝土结构,因此组合框架的阻尼比大于纯钢框架的阻尼比,其阻尼比的大小对组合框架的抗震性能也是一个不可忽略的因素。对组合框架结构来说,如果在框架柱不变和梁柱节点考虑为刚接、组合楼盖平面内假定无限刚的情况下,决定框架抗震性能的因素就是组合框架梁平面内的刚度和阻尼比。笔者通过对某工程实例的对比计算,研究分析了组合框架梁刚度和不同阻尼比对组合框架在地震力作用下的抗震性能的影响。

1 组合框架梁的刚度评价

同钢-混凝土组合连续梁刚度计算方法相同,在内力和变形计算过程中,组合框架梁正弯矩区的弯曲刚度可以采用换算界面法和折减刚度法计算。组合截面的刚度换算法见文献[1]。在中国《钢结构设计规范》(GB 5007-2003)中,折减刚度按式(1)确定

$$B = \frac{EI_{eq}}{1 + \xi} \quad (1)$$

式中: E 为钢梁的弹性模量; I_{eq} 为组合梁的换算截面惯性矩; ξ 为刚度折减系数。

对于负弯矩区,不考虑混凝土的作用,仅按照钢梁和负弯矩区的混凝土翼缘板有效宽度内与钢梁平行的钢筋所形成的组合截面来计算弯曲刚度。计算方法见图 1。

组合截面的弹性中和轴与钢梁弹性中和轴之间的距离 x_e 由式(2)确定

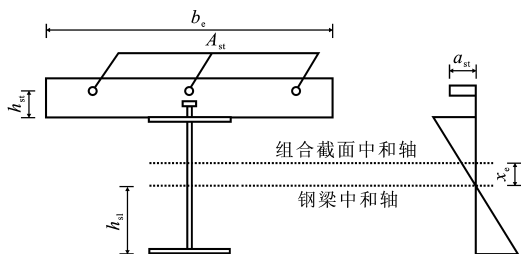


图 1 组合梁截面和负弯矩作用下的弹性应力分布

Fig. 1 Composite Beam Section and Elastic Stress Distributing Under Negative Moment

$$x_e = A_{st}(h_s - h_{sl} + h_{st}) / (A_s + A_{st}) \quad (2)$$

式中: A_{st} 为有效宽度楼板内的钢筋面积; h_{sl} 为钢梁形心至钢梁底部的距离; h_{st} 为钢梁形心至钢梁顶部的距离。这样,钢梁底部距组合截面弹性中和轴的距离 $y_s = h_{sl} + x_e$,钢筋距组合截面弹性中和轴的距离 $y_{st} = h_s - h_{sl} - x_e + h_{st}$,负弯矩区组合截面的惯性矩为

$$I = I_s + A_s x_e^2 + A_{st} y_{st}^2 \quad (3)$$

计算组合框架梁的弯曲刚度首先要确定组合梁混凝土翼缘板的有效宽度(对于负弯矩区要考虑混凝土翼缘板内钢筋对刚度的贡献)。有效宽度可按照中国《钢结构设计规范》(GB 5007-2003)确定。

对于整个组合框架梁的刚度评价,清华大学在对组合框架梁受力性能进行广泛分析的基础上提出了一种新的刚度评价方法,即将组合框架中梁视为变截面梁-柱构件,以最简单的阶梯形变截面杆件来考虑组合梁的刚度变化;然后,利用等效原理,在竖向荷载作用下根据挠度曲线相等的原则,在水平荷载作用下根据侧移相等的原则,得出了实用性比较强的刚度计算经验式。

水平荷载作用下

$$EI_{eq} = E_s(0.6I_1 + 0.4I_2) \quad (4)$$

竖向荷载作用下

$$EI_{eq} = E_s(0.7I_1 + 0.3I_2) \quad (5)$$

式中: EI_{eq} 为框架中组合梁的等效刚度; E_s 为钢材的弹性模量; I_1 、 I_2 分别为正、负弯矩区组合框架梁的截面惯性矩。

式(4)、(5)可用于组合框架在水平地震力作用下的抗震性能分析和垂直荷载作用下的受力分析。

2 工程实例分析

2.1 工程概况及结构布置

某小区一办公楼为 4 层建筑,1~3 层为小开间办公室,顶层为会议室和大开间活动室。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 3.2 m,总高 13.8 m,纵向柱距 6.0 m。采用普通钢框架结构体系,主梁采用焊接工字型截面,柱采用焊接箱型截面。楼板采用钢-混凝土预制小薄板上浇注混凝土的叠合板组合楼盖,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^[2]。框架的横向和纵向梁柱节点采用栓焊连接,按刚性连接设计,并采用组合节点的构造做法以满足组合节点的刚性连接。结构平面、框架立面和组合节点构造见图 2。该工程位于北京市,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。构件断面尺寸见表 1。

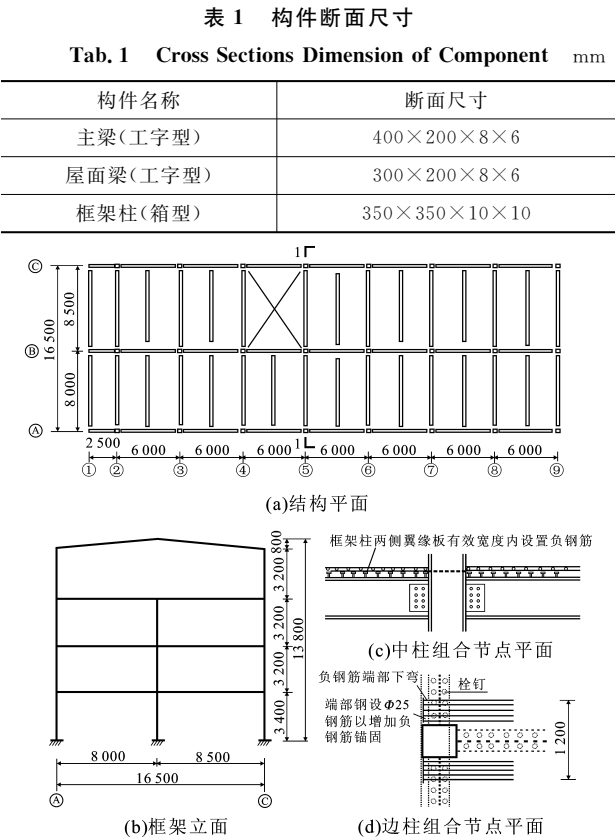


图 2 结构平面、框架立面和组合节点构造(单位:mm)

Fig. 2 Structure Plane, Elevation and Constitution of Composite Panel Point (Unit:mm)

2.2 ANSYS 建模和模态分析

ANSYS 软件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、曲屈分析、显式动力分析^[3-8]。其中的瞬态动力分析可以运用到结构的弹性和弹塑性时程分析。

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计算符合结构横向受地震力的情况。框架尺寸如图 2 所示,为对比分析,对纯钢框架和组合框架分别进行建模计算。纯钢框架阻尼比取 0.020,组合框架阻尼比分别取 0.020、0.035、0.050 共 4 种模型进行计算。纯钢框架节点与组合框架节点均假定为刚接,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。组合框架梁采用式(5)计算其等效刚度,并采用式(1)考虑滑移效应引起的刚度折减。框架各纯钢构件惯性矩及标准层组合框架梁的等效惯性矩见表 2^[9-11]。

表 2 框架构件惯性矩

Tab. 2 Inertia Moment of Frame Component m⁴

8 m 跨组合梁	0.000 245 0
8.5 m 跨组合梁	0.000 247 4
纯钢框架梁	0.000 151 2
顶层框架梁	0.000 079 7
箱型框架柱	0.000 262 3

从表 2 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框架梁惯性矩比值为 1.62~1.64。

2.2.2 模态分析

模型为单榀 4 层框架,结构的低阶振型起到控制作用,对位移和内力贡献较大,该模型仅仅对低阶振型(4 阶)分析,忽略高阶振型的影响。经计算纯钢框架与组合框架的周期对比如表 3 所示。

从表 3 可以看出:由于组合框架梁刚度增大,组合框架各振型自振周期有所减小,其一阶振型周期由 1.006 2 s 降低为 0.087 3 s。组合框架的振型与纯钢框架的相似,仅自振周期不同,组合框架的前 4 阶振型见图 3。

表 3 纯钢框架与组合框架自振周期对比

Tab. 3 Natural Vibration Period Comparison of Steel Frame and Frame Composite Frame s

纯钢框架		组合框架	
振型	自振周期	振型	自振周期
一阶	1.006 2	一阶	0.087 3
二阶	0.341 9	二阶	0.339 7
三阶	0.294 0	三阶	0.269 4
四阶	0.165 4	四阶	0.161 4

2.3 反应谱分析

抗震设防烈度为 8 度的地区多遇地震,按照中国《建筑抗震设计规范》中的规定,地震影响系数取 0.16,并分别取结构的阻尼比 ζ 为 0.020、0.035、

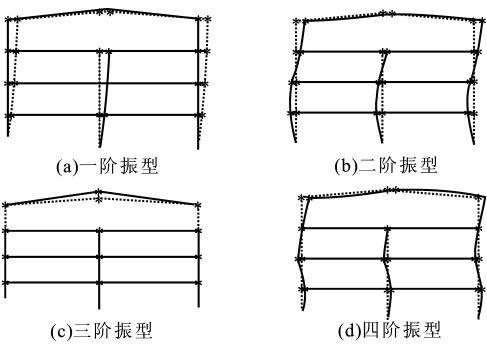


图 3 组合框架的前 4 阶振型

Fig. 3 Frontal Four Vibration Shapes of Composite Frame
0.050 时, 计算 S_a-T 曲线, 得到的最大绝对加速度反应谱曲线如图 4 所示, 其中, S_a 为结构最大加速度反应, T 为周期。从图 4 中可以看出: 随阻尼比 ζ 的增大, 绝对加速度反应减小。

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, 求出水平地震力作用效应为

$$S_{EK} = \sqrt{\sum S_j^2} \tag{6}$$

纯钢框架(阻尼比 ζ 为 0.020)与组合框架(阻尼比 ζ 分别为 0.020、0.035、0.050)地震力反应如图 5 所示。

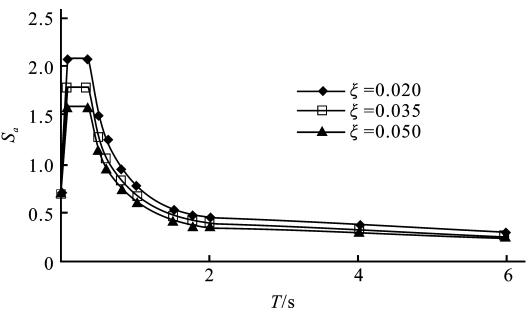


图 4 S_a-T 关系

Fig. 4 Relation of S_a and T

从图 5 中可知: 当考虑组合作用后, 在阻尼比仍为 $\zeta=0.020$ 的情况下, 地震力作用下的柱轴力和层剪力虽有所增加, 但随着阻尼比的增大, 当 $\zeta=0.035、0.050$ 时柱轴力及层剪力均有较大幅度的降低。 $\zeta=0.050$ 时的组合框架比纯钢框架在地震力作用下的柱轴力、层剪力均降低了约 16%。不同阻尼比的组合框架与纯钢框架层间位移角均呈不同幅度的降低, 其最高楼层位移见表 4。

从表 4 可以看出: ζ 分别为 0.020、0.035、0.050 时的组合框架顶层位移分别比纯钢框架降低了 11%、21%、27%。

可见, 组合框架除梁刚度提高对抗震性能产生

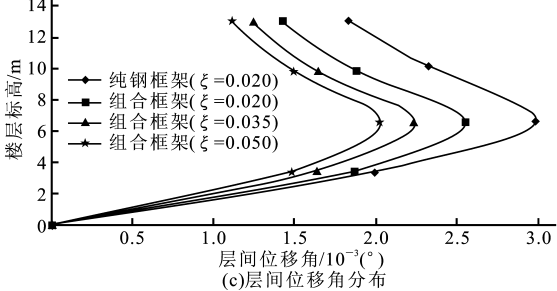
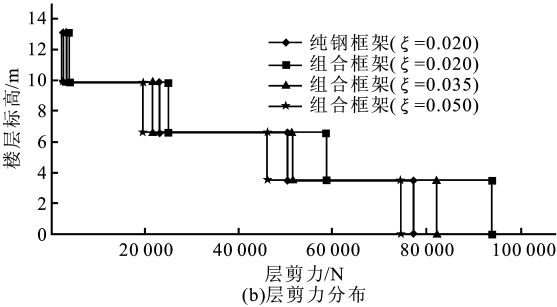
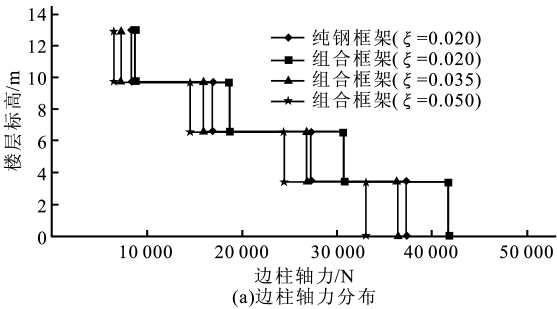


图 5 边柱轴力、层剪力和层间位移角分布

Fig. 5 Axial Force of Side Column and Shearing Force and Inner Drift Angle Distribution

有利影响外, 同时由于其工作性能相对于纯钢框架更接近于钢筋混凝土结构, 其阻尼比比纯钢结构也有较大的提高, 因此, 地震力及地震位移由于受阻尼比的影响也有较大幅度的降低。

表 4 组合框架与纯钢框架顶层位移对比

Tab. 4 Top Drifts Comparison of Composite Frame and Steel Frame

框架类型	顶层位移
纯钢框架($\zeta=0.020$)	0.050 8
组合框架($\zeta=0.020$)	0.045 1
组合框架($\zeta=0.035$)	0.040 2
组合框架($\zeta=0.050$)	0.036 9

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, 不适用于塑性阶段的地震反应分析, 因此笔者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,即 $70\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 。结构阻尼取 Rayleigh 阻尼,阻尼矩阵取为质量矩阵和刚度矩阵的线性组合

$$\boldsymbol{C}=\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K}$$

(7)

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}=\frac{2\zeta}{\omega_1+\omega_2}\begin{bmatrix} \omega_1\omega_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(8)

式中: ω_1 、 ω_2 分别为第一、二阶振型自振圆频率。 α 、 β 计算结果见表 5。

表 5 不同框架和阻尼比下的 α 、 β 值

Tab. 5 α 、 β of Different Frames and Damping Ratios

框架类型	α	β
纯钢框架($\zeta=0.020$)	0.186 33	0.001 625
组合框架($\zeta=0.020$)	0.207 20	0.001 557
组合框架($\zeta=0.035$)	0.362 61	0.002 725
组合框架($\zeta=0.050$)	0.518 01	0.003 893

时程计算结果和应用振型分解反应谱方法得到的结果相吻合,多遇地震时程分析得到的最大位移略大于反应谱分析得到的,不同框架顶层弹性时程最大位移曲线见图 6。

各种类型框架弹性时程最高楼层位移和底层层剪力分别见图 7 和表 6。

表 6 不同框架弹性时程底层层剪力

Tab. 6 Base Elastic Time-History Shearing Force of Different Frames

N

纯钢框架 ($\zeta=0.020$)	组合框架 ($\zeta=0.020$)	组合框架 ($\zeta=0.035$)	组合框架 ($\zeta=0.050$)
200 745	235 037	189 600	110 057

3 结 语

(1)模态分析表明:考虑钢框架梁的组合作用后,框架结构自振周期变短,其一阶振型周期由 1.006 2 s 降低为 0.087 3 s,说明结构刚度变大,相应的结构地震侧向位移将变小。

(2)反应谱和弹性时程分析均表明:考虑钢框架与混凝土楼板的组合作用后,由于结构整体抗侧移刚度增大,地震位移因而有较大幅度的降低。阻尼比 ζ 分别为 0.020、0.035、0.050 时,反应谱分析下的组合框架顶层位移分别比纯钢框架降低了 11%、21%、27%;弹性时程分析时,组合框架顶层最大位移分别比纯钢框架降低了 10%、26%、40%。

(3)虽然考虑组合作用的钢框架刚度增大,使地震力有所加大,但由于组合框架的阻尼比显然大于纯钢框架结构的,且反应谱分析及时程分析均表明,考虑阻尼比增大后的组合框架地震力均有一定程度

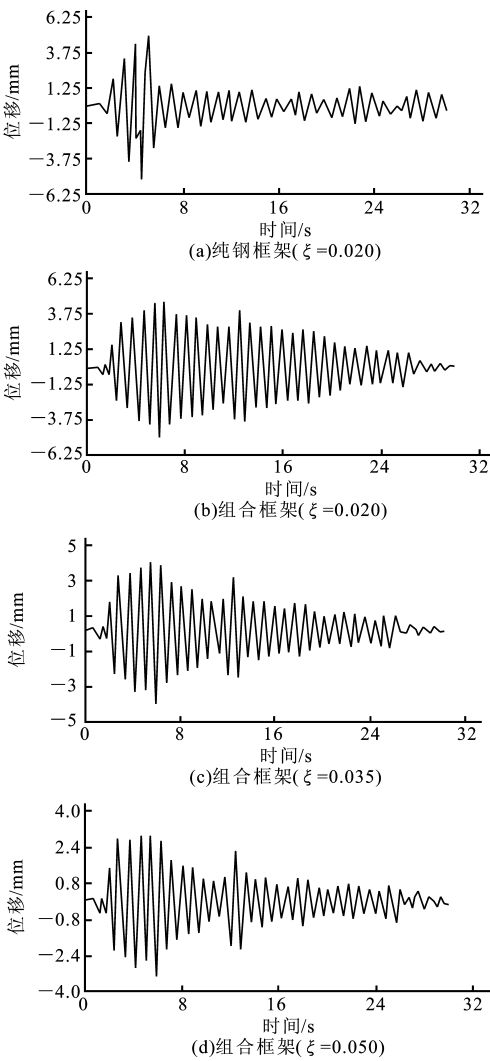


图 6 顶层最大位移时程曲线

Fig. 6 Time-History Curves of Top Max Drifts

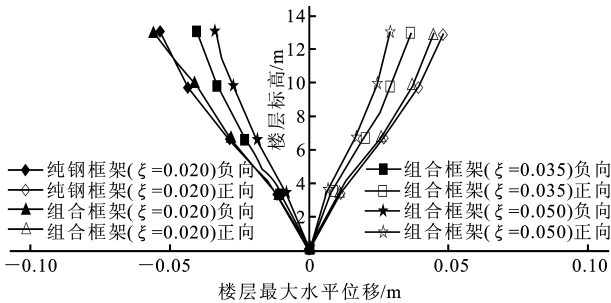


图 7 弹性时程分析的各楼层位移

Fig. 7 Every Floor Drift in Elastic Time-History Analysis

的降低,因此组合框架结构抗震性能优于纯钢框架结构,是一种良好的结构形式。

参考文献:

References:

[1] 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. Steel-Concrete Composite Structure-Test; Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 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.
- CHEN Quan, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing, et al. Application of Steel-Concrete Superposition Plate Composite Floor Slab in Multiple Story Light Steel Structure[J]. Industrial Architecture, 2004, 33(4): 20-24.
- [3] 沈蒲生, 刘杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.
- SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
- [4] 刘伯权, 潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.
- LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.
- [5] 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.
- SU Di. Study of Anti-seismic Performance About Considering Composite Steel Structure Beam Column Joint[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [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.
- CHEN Ge. Test and Theory Analysis of Steel-Concrete Composite Frame[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [7] 史庆轩, 杨文星, 门进杰. 单自由度体系非线性地震能量反应的计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 25-29.
- SHI Qing-xuan, YANG Wen-xing, MEN Jin-jie. Calculation of Seismic Energy Response for Nonlinear Single Degree of Freedom System[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 25-29.
- [8] 沈蒲生, 孟焕俊. 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.
- [9] 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. Discount Rigidity Method of Distortion Calculate About Composite Beam in Considering Glide Effect[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 11-17.
- [10] 聂建国, 樊建生. 组合梁在负弯矩下的刚度分析[J]. 工程力学, 2002, 19(4): 33-36.
- NIE Jian-guo, FAN Jian-sheng. Rigidity Analysis of Composite Beam in Negative Bending Moment[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(4): 33-36.
- [11] 樊建生, 聂建国. 钢-压型钢板混凝土连续组合梁调幅系数的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 57-60.
- FAN Jian-sheng, NIE Jian-guo. Test Study of Adjustment Range Coefficient of Steel-Press Steel Plate Concrete Continual Composite Beam[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 57-60.

“2007 年太平洋钢结构会议”会讯

“2007 年太平洋钢结构会议”将于 2007 年 3 月 13 日至 3 月 16 日在新西兰 Wairakei 召开。本次会议的主题为“自然灾害中的钢结构”, 内容涉及: 制作与安装进展、桥梁与船舶结构、工程应用研究、房屋建筑、组合结构、规范与标准、节点、耐久性与经济性、疲劳与断裂、大跨结构、螺栓与焊接等。

本次会议的主办单位: 美国钢结构研究院、澳大利亚钢结构研究院、加拿大钢结构研究院、智利钢结构研究院、中国钢结构协会、日本钢结构协会、韩国钢结构协会、墨西哥钢结构研究院和新加坡钢结构协会。会议期间将出版论文集, 有意投稿者请将论文摘要发送到本次会议信箱, 论题应适合会议研讨主题, 摘要应包括研究背景、主要观点及结论, 且不少于 400 字, 摘要收取截止日期为 2006 年 4 月 28 日。

网址: www.pssc2007.com

E-mail: admin@pssc2007.com

传真: +64 9 262 2856