

[文章编号] 1002-8412(2013)06-0047-05

DOI: 10. 3969/j. issn. 1002 - 8412. 2013. 06. 009

# 顶底角钢加强型节点 在某加层钢框架中的抗震性能研究

褚云朋<sup>1,2</sup>,姚 勇<sup>1</sup>,杨亚龙<sup>1</sup>,王秀丽<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010; 2. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

[提 要] 基于 ANSYS 分析平台,建立了顶底角钢加强型加层钢框架梁柱节点及常规梁柱连接节点共 6 个有限元模型,对其进行恢复力特性分析,并讨论角钢肢长、厚度等对节点抗震性能的影响。结果表明:(1) 顶底角钢加强能有效地减小上下柱对接焊缝处的应力,极限状态时,梁上塑性铰外移,柱未出现塑性铰,符合强柱弱梁、强节点弱杆件的抗震设计原则。(2) 角钢肢长和厚度增加能提高节点承载力,但增加到一定长度后节点的滞回性能和耗能能力均有所降低。建议角钢参数取值范围为:肢长取梁高的 0.6~0.8 倍,厚度取梁翼缘厚度的 1.2~1.5 倍。(3) 经加强后节点初始刚度、耗能能力和承载力均好于常规梁柱焊接节点,此类节点可用于地震区钢框架加层连接。

[关键词] 钢框架加层节点;抗震性能;有限元分析;角钢几何参数

[中图分类号] TU352 [文献标识码] A

## Seismic Behavior Research on the Application of the Top and Seat Angles Strengthened Joints in A Added-storey Steel Frame

Chu Yun-peng<sup>1,2</sup>, Yao Yong<sup>1</sup>, Yang Ya-long<sup>1</sup>, Wang Xiu-li<sup>2</sup> (1. College of Civil Engineering, Southwest University of Technology, Mianyang 621010, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the ANSYS analysis platform, 5 finite element models of joints in the added-storey steel frame strengthened by top and seat angles and a finite element model of conventional beam-column joint are established, the comparative analyses of its seismic performance are carried out, and the effect of side length and thickness of the angle on its seismic performance is discussed. The results show that: (1) Strengthened by top and seat angles can effectively reduce the stress of the joint weld in the column, make the relocation of plastic hinge, avoid the joint brittle fracture. (2) As the width and thickness of the angle increase, the bearing capacity of the joint improves, but hysteretic behavior and energy dissipation are decreased. The recommended scopes of the parameters are: 0.6~0.8 times beam depth for length of angle side; 1.2~1.5 times thickness of flange for angle connections. (3) The initial stiffness, energy dissipation capacity and strength of the top and seat angles strengthened joints are better than those of conventional beam-column joints, it can be used as the joints in the added-storey steel frame in the earthquake areas.

**Keywords:** joints in the added-storey steel frame; seismic performance; finite element analysis; geometry parameters of angle

E-mail: 377309083@qq.com

轻钢结构具有良好的抗震性能,施工方便,近年来广泛应用于工业厂房及多层框架结构中。随生产扩大、需求的增加,加上当前普遍存在用地紧张问题,对原有结构加层的想法应运而生。原钢结构加

层后,节点位置特别是柱加层的拼接处受力更为复杂,如何保证节点的抗震性能,目前规范<sup>[1~2]</sup>没有明确给出指导意见,国内外的研究也主要集中于整根柱与梁连接的节点,加层钢节点性能的研究还比较缺乏。

地震中许多钢框架中刚性连接的梁柱节点发生了不同程度的脆性破坏<sup>[3~5]</sup>,国内外学者针对刚性

[收稿日期] 2013-01-17

[基金项目] 四川省科技支撑计划(2011GZ0043)  
四川省教育厅应用基础项目(12ZB157)

连接的梁柱节点的加强进行了大量研究,但应用到  
 高层钢框架节点却较少。

### 1 工程概况

某正在施工的 2 层钢框架办公楼(图 1)位于四川  
 省江油市内,抗震设防烈度 7 度(基本加速度  
 0.15g),基本风压 0.3kN/m<sup>2</sup>;底层层高 3.3m,2 层  
 层高 3m,加层层高 3.3m,跨度 5.1m + 1.8m +  
 5.1m。施工几近结束的情况下,因功能需要在顶层  
 需增加会议室,采用在顶层增加门式刚架结构以满  
 足功能需求,用 PKPM 软件对整体结构进行建模分  
 析,分析中加层处柱处理成连续的,结构计算及地基  
 承载力均可通过。此问题的核心环节变为加层节  
 点的连接处理问题,如何加固使之与计算简图相符成  
 为关键。因上下层柱在节点连接部位是断开的,所  
 以该类节点区域受力更为复杂,焊缝较多,节点区  
 域力学性能受焊接影响较大。



图 1 某钢框架房屋

Fig.1 The steel frame house

考虑加层施工难易程度及楼板、围护结构等与  
 主体结构连接情况,并结合“强节点弱杆件、强柱弱  
 梁的抗震设计原则”,选择顶底角钢方式对节点进  
 行加强,采用柱外贴补强板方式将焊接区域转移到  
 远离节点区域,避免节点的脆性断裂,但对柱进行加  
 强,加固细部构造见图 2。对节点施加低周往复荷  
 载作用下的性能进行数值分析,探讨加层节点与常  
 规梁柱节点的抗震性能差异,并对角钢肢长、厚度  
 的变化等参数对节点性能的影响进行分析,为工程应  
 用提供参考。

### 2 节点连接构造及有限元模型

#### 2.1 节点构造

节点各个板件的尺寸如图 2 所示。依据 PKPM  
 对整体结构的相关计算结果,取上柱长 750mm,下  
 柱长 950mm,梁长 1200mm。上下柱的连接和梁翼

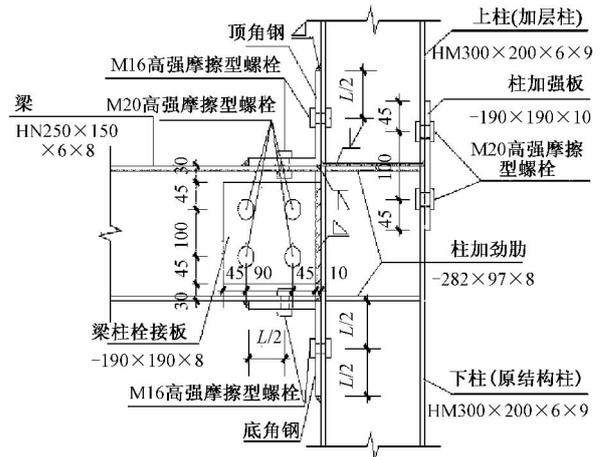


图 2 节点细部构造

Fig.2 Detail joint diagram

缘与柱的连接均采用单边 V 形缝对焊,其余焊缝采  
 用角焊缝,梁腹板与柱连接板、上下柱的连接部位所  
 采用加强板与柱翼缘均采用摩擦性高强螺栓连接,  
 顶底角钢采用中部栓接、端部焊接的方式与梁柱相  
 连。所有焊缝均符合规范<sup>[1]</sup>要求,栓接顶底角钢螺  
 栓采用 10.9 级 M16 摩擦型高强螺栓,其余采用  
 10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓。

#### 2.2 有限元模型

为讨论等边角钢肢长及厚度对加层节点抗震性  
 能的影响,利用有限元分析软件 ANSYS 建立 6 个不  
 同的模型,进行非线性有限元分析,各模型角钢参数  
 详见表 1,节点 BZ 为栓焊连接的普通梁柱节点。

表 1 各模型角钢参数

Table 1 Angle parameters of models

模型	角钢肢长( mm)	角钢厚度( mm)
节点 BZ	-	-
节点 1	140	10
节点 2	140	12
节点 3	140	14
节点 4	100	12
节点 5	180	12

模型采用 SOLID92 单元,分析中采用 Von Mises  
 屈服准则及随动强化准则,考虑螺栓预应力及螺栓  
 连接处的接触和滑移。材料参数按表 2 选取,钢材  
 视为理想弹塑性材料。钢材采用 Q345B 结构钢,依  
 据规范<sup>[1]</sup>,M16 高强摩擦型螺栓预紧力 100kN,M20

高强摩擦型螺栓预紧力 155kN,摩擦面抗滑移系数取 0.35。节点附近网格采用自由网格划分方式且细化(见图 3) 柱下端面施加固定约束,上端施加轴压比  $n=0.2$  的轴压力,在梁悬臂端施加力及位移的混合荷载。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

名称	弹性模量 ( $\times 10^5 \text{ N/mm}^2$ )	泊松比	屈服强度 ( $\text{N/mm}^2$ )
Q345B 梁、柱主材	2.06	0.3	345
E50 焊条	2.06	0.3	410
10.9 级摩擦型高强螺栓	2.06	0.3	940

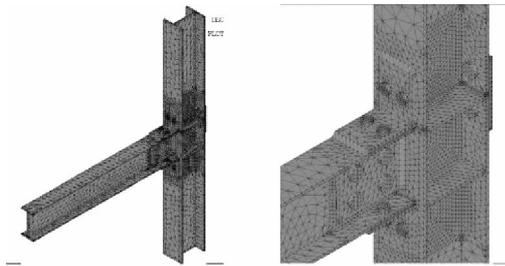


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

### 3 主要结果分析

#### 3.1 滞回曲线

由图 4 可知,6 个节点的滞回曲线形状均呈饱满的纺锤形,加强后整个节点的极限承载能力均有所提高,耗能能力有所增强,节点的屈服平台更长,破坏时所经过循环次数比节点 BZ 多。

计算各个滞回环的面积如表 3 所示,比较各节点在极限状态时的滞回环面积可知,加强的节点抗

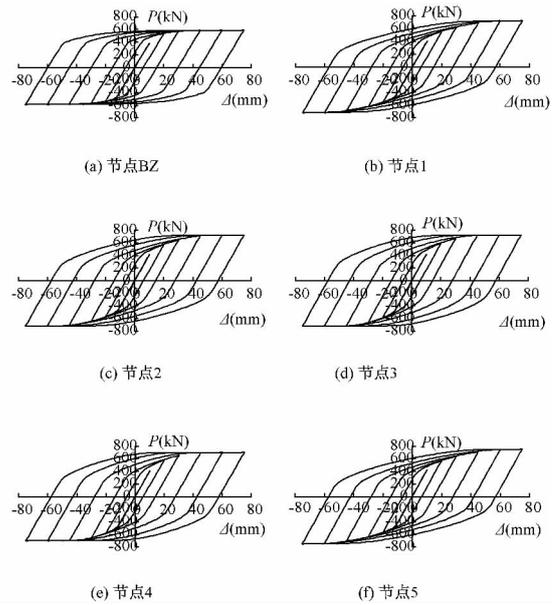


图 4 P-Δ 滞回曲线

Fig. 4 P-Δ hysteresis curves

震性能相对于未加强的普通梁柱栓焊连接节点有较大提高,进入塑性状态后的总面积也比常规节点大,累计耗能能力强。比较节点 1~3 可知,在角钢肢长一定时,随着角钢厚度增加,滞回环所围面积增大。比较节点 2、4、5 滞回曲线可知,在角钢厚度一定时,随角钢肢长的增加,节点滞回曲线“捏缩”现象愈加明显,滞回环所围面积变小,能量耗散能力降低;加强后节点累计耗能能力高于未加强节点。施工中,角钢较厚时,角钢端部与梁柱翼缘连接的焊缝附近会存在较大的焊接残余应力。当角钢肢长过短时,节点刚度提高较少,达不到塑性铰外移的目的。根据文献[5]并结合数值计算结果,角钢肢长取梁高的 0.6~0.8 倍,厚度取梁翼缘厚度 1.2~1.5 倍较为合适。

表 3 各模型滞回环面积

Table 3 Hysteresis loop area of models

$\Delta$ (mm)	节点 BZ	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
20	11714	11758	11787	11769	11118	12392
30	30784	28796	29181	29727	28710	29705
45	63103	59175	60397	64093	63442	59784
60	97673	99884	101244	106737	104901	96168
75	132686	140596	144255	149876	146581	140224
累计面积	335989	340235	346894	362244	354771	338315

### 3.2 节点刚度

图 5 给出了根据滞回曲线作出的节点割线刚度曲线。可以看出 6 个模型虽然初始刚度不一样,加载后刚度都迅速退化。当梁端位移荷载  $\Delta \geq 30\text{mm}$  时,结构刚度退化速度减缓。说明在节点变形小时,节点的受力主要依靠梁柱的连接传力,角钢对节点刚度的贡献不大。随角钢厚度增加,节点屈服后破坏前的刚度有所降低;角钢肢长增加,节点屈服后破坏前的刚度有一定的提高。

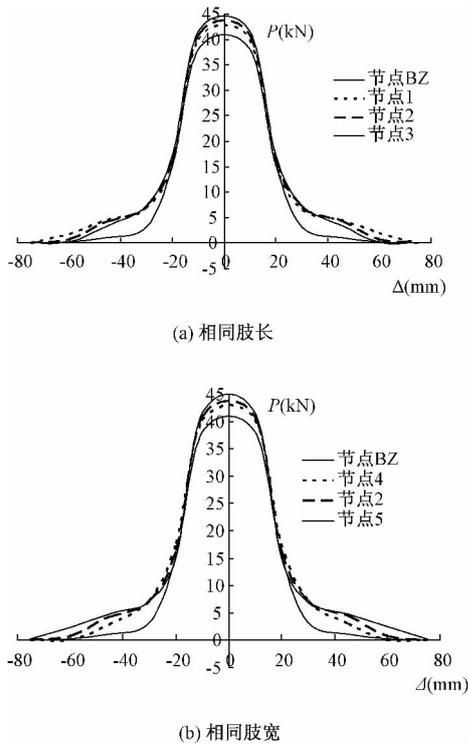


图 5 节点刚度曲线

Fig. 5 Joint stiffness curve

欧洲规范 EC3 规定:当节点转动刚度小于梁线刚度( $i_b = EI_b/l$ )的 0.5 倍时,可视为铰接;当节点转动刚度大于梁线刚度的 25 倍时,可视为刚接;两者之间为半刚接。由图 5 可知,节点初始刚度大于施加荷载过程中各点刚度,初始刚度按  $K_1 = M_0/\theta_0$  计算,式中  $K_1$  为节点初始刚度; $M_0$  为加载第一步时节点弯矩; $\theta_0$  为加载第一步时节点转角。计算结果见表 4 所示,可知所有节点均属半刚性连接节点,经加强后顶底角钢加强型节点刚度大于未加固节点。

### 3.3 骨架曲线

从图 6 可以看出,增加角钢厚度虽然能显著提高节点的屈服荷载,但极限承载力没有显著提高;增

加角钢的肢长虽不能显著提高节点的屈服荷载,但对于极限承载力来说,有明显的提高。随角钢肢长增加,塑性铰距柱边缘的距离增加,距加载点的距离减小,符合“强节点弱杆件”的抗震设计原则,而角钢厚度增加对塑性铰外移贡献不大,加强后节点达到塑性后刚度退化,但数值比常规焊接节点刚度剩余的大。

表 4 转动刚度与梁线刚度

Table 4 Rotational stiffness and the line-stiffness of beam

模型	$K_1$ ( $\times 10^9 \text{ N/mm}^2$ )	$0.5i_b$ ( $\times 10^9 \text{ N/mm}^2$ )	$25i_b$ ( $\times 10^9 \text{ N/mm}^2$ )
节点 1	67.601	1.615	80.750
节点 2	69.088	1.615	80.750
节点 3	70.552	1.615	80.750
节点 4	67.922	1.615	80.750
节点 5	70.509	1.615	80.750

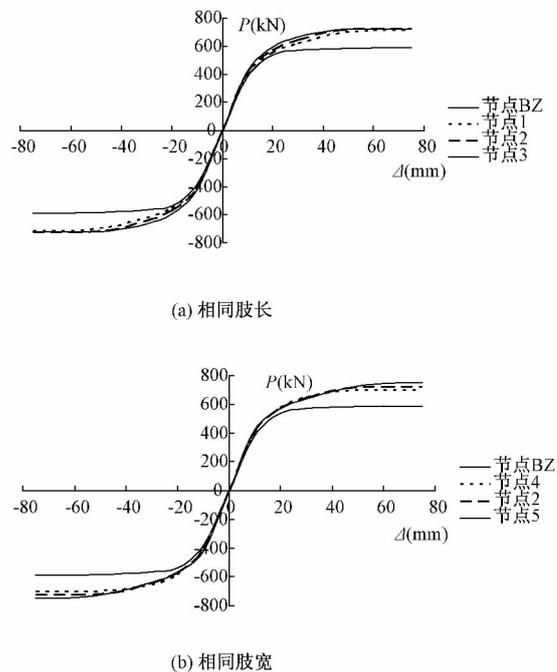


图 6 P-Δ 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves

### 3.4 延性分析

在抗震设计中,通常用延性系数  $\mu$  来表示延性大小,用等效粘滞阻尼系数  $h_e$  衡量结构构件的耗能能力,评定结构抗震性能。延性系数按公式:  $\mu = \delta_u / \delta_y$  计算,式中  $\delta_u$  为试件骨架曲线中极限承载力对应

的位移;  $\delta_y$  为试件屈服荷载对应的位移。从表 5 可以看出, 顶底角钢加强节点的延性较未加强的普通梁柱栓焊连接节点有较大幅度提高, 且随角钢厚度的增加  $\mu$  增大, 节点的延性增加, 耗能能力提高, 随角钢肢长的增加  $\mu$  增大, 节点的延性增加。但肢长增加到一定长度后,  $\mu$  反而减小, 节点的延性降低。同时也可以看出, 当角钢厚度一定时, 角钢肢长增加, 粘滞阻尼系数减小, 耗能能力减弱。这是因为当角钢肢长大于一定限度时, 节点域所受的剪力较大, 在剪力作用下发生的脆性破坏将导致连接节点的等效粘滞阻尼系数降低, 在设计中应予以特别注意; 角钢厚度增加, 等效粘滞阻尼系数增加, 耗能能力增加。根据文献 [5] 并结合数值分析的数据, 角钢肢长取梁高的 0.6 ~ 0.8 倍, 厚度取梁翼缘厚度的 1.2 ~ 1.5 倍较为合适。

表 5 延性系数和等效粘滞阻尼系数

Table 5 Ductility factor and equivalent viscous damping coefficient of specimens

模型	$\delta_u$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\mu$	$h_e$
节点 BZ	46.89	15.36	3.05	0.369
节点 1	62.35	17.95	3.47	0.407
节点 2	61.81	17.62	3.51	0.425
节点 3	60.98	17.28	3.53	0.441
节点 4	54.55	17.36	3.14	0.446
节点 5	62.42	17.97	3.47	0.397

### 3.5 破坏模式

从图 7 的 Mises 应力分布可以看到, 节点加强后塑性铰都不同程度地向梁悬臂端移动, 缓和了节点焊缝连接处的应力集中程度, 降低了节点焊缝发生脆性破坏的可能性, 常规连接节点塑性铰离节点核心区域较近, 同直接焊接节点相比, 加强后节点产生延性破坏。

比较模型节点 1~3 的破坏模式可知, 角钢肢长一定, 厚度越大时, 虽然塑性铰离柱位置没有明显改变, 但角钢分担的内力增大, 靠近柱面的梁翼缘应力也显著减小; 对比节点 2、4、5 破坏模式可得, 角钢厚度一定, 肢长越长时塑性铰越远离节点, 梁柱连接处的翼缘和焊缝处的应力也越小。当角钢参数在建议取值范围内时, 梁上都能形成明显的塑性铰, 满足“强节点弱杆件”的抗震设计要求, 达到加强目的。

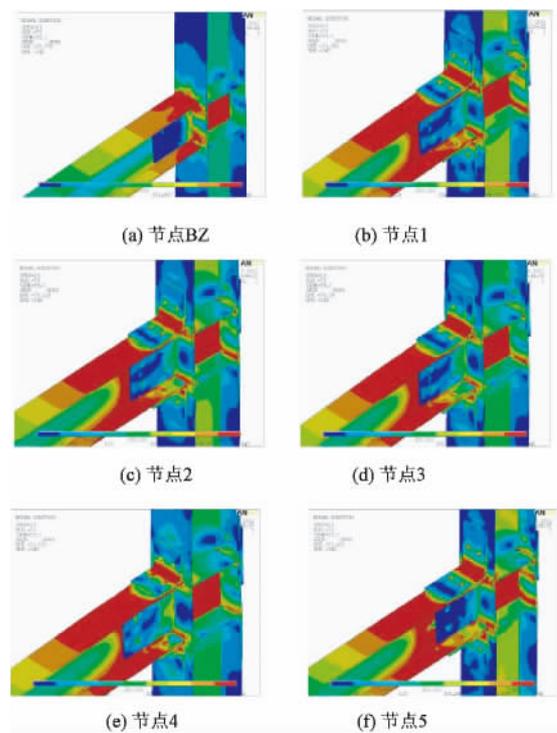


图 7 Mises 应力分布

Fig. 7 Von Mises stress distribution diagrams

## 4 结论

经过加强后的节点承载力、刚度、抗震性能均好于常规梁柱连接节点, 可以用于地震区的钢框架加层使用, 且施工简单, 只要拆除原钢柱顶盖板即可进行加层施工, 施工简单可行。

(1) 顶底角钢加强节点比常规焊接节点的初始刚度、延性、极限承载力及耗能能力强, 可用于地震区梁柱加层节点。低周往复荷载作用下, 结构达到极限状态时, 柱上未出现塑性铰, 符合强柱弱梁抗震设计原则。在距离角钢端部  $1/3 \sim 1/4$  梁高位置处形成塑性铰, 符合强节点弱杆件的抗震设计原则。

(2) 角钢厚度和肢长对节点的承载力和延性有一定的影响。角钢肢长增加, 提高了节点的极限承载力, 但肢长增加后节点的滞回性能、延性和耗能能力均有所降低。

(3) 根据数值分析结果, 建议角钢参数取值范围为: 肢长取梁高的 0.6 ~ 0.8 倍, 厚度取梁翼缘厚度的 1.2 ~ 1.5 倍。

参考文献 (References):

[1] GB50017-2003, 钢结构设计规范 [S]

(下转第 29 页)

- Press, 1961
- [4] Thompson J M T, Stewart H B. Nonlinear Dynamics and Chaos [M]. John Wiley and Sons Ltd, 1986
- [5] Zhang Q L, Peil U. A Modified Nonlinear Member Element Allowing Large Loading and Displacement Increments [J]. International Journal of Communication on Numerical Methods in Engineering, 1996, 12: 235 ~ 242
- [6] 巴斯 K J. 工程分析中的有限元法 [M]. 傅子智译. 北京: 机械工业出版社, 1991  
Barth K J (Translated by Fu Zi-zhi). The finite element method for engineering analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 1991 (in Chinese)
- [7] 张其林, Udo Peil. 任意激励下弹性结构的稳定分析 [J]. 土木工程学报, 1998, 31(1): 27 ~ 28  
Zhang Qi-lin, Udo Peil. Stability Analysis of Elastic Structures Under Arbitrary Excitation [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(1): 27 ~ 28 (in Chinese)
- [8] 何艳丽. 桅杆结构的动力稳定性分析 [D]. 上海: 同济大学, 1999  
He Yan-li. Dynamic Stability Analysis of the Guyed Masts [D]. Shanghai: Tongji University, 1999 (in Chinese)
- [9] 欧进萍, 杨杨. 压电 T 型变摩擦阻尼器的性能试验与分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4)  
Ou Jin-ping, Yang Yang. Piezoelectric-T Shape Variable Friction Damper and Its Performance Tests and Analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4) (in Chinese)
- [10] 马乾英. 空间网壳结构动力稳定主动控制理论及实验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010  
Ma Qian-ying, A Theoretical and Experimental Study of Active Control on the Dynamic Stability of Space Latticed Shell Structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2010 (in Chinese)

[作者简介] 朱军强(1976 ~) 男, 副教授, 主要从事工程结构智能减震与控制、结构健康监测及结构加固技术研究

(上接第 11 页)

- [8] 刘书奎, 吴子燕, 张玉兵. 基于 Gibbs 抽样的马尔科夫蒙特卡罗方法在结构物理参数识别及损伤定位中的研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 203 ~ 207  
Liu Shu-kui, Wu Zhi-yan, Zhang Yu-bing. Identification of Physical Parameters and Damage Locating with Markov Chain Monte Carlo Method Based on Gibbs Sampling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 203 ~ 207 (in Chinese)
- [9] 张永利. HHT 结合 NExT 法识别结构参数 [J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(5): 8 ~ 13  
Zhang Yong-li. Identification of Structural Parameters Based on HHT and NExT [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(5): 8 ~ 13 (in Chinese)

[作者简介] 李慧(1954 ~) 女, 教授, 博士生导师

(上接第 51 页)

- GB50017-2003, Code for Steel Structure [S] (in Chinese)
- [2] JGJ116-2009, 建筑抗震加固技术规程 [S]  
JGJ116-2009, Technical Specification for Seismic Strengthening for Buildings [S] (in Chinese)
- [3] Miller D K. Lessons Learned from the Northridge Earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 249 ~ 260
- [4] 黄柄生. 日本神户地震中建筑钢结构的震害及启示 [J]. 建筑结构, 2000, 30(9): 24 ~ 25  
Huang Bing-sheng. The Building Disaster and Revelation in Earthquake of the Steel Structure for Kobe in Japan [J]. Building Structures, 2000, 30(9): 24 ~ 25 (in Chinese)
- [5] 王燕, 冯双, 王玉田. 钢框架刚性连接加强型节点滞回性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 57 ~ 68  
Wang Yan, Feng Shuang, Wang Yu-tian. Experimental Study on Hysteretic Behavior for Rigid-reinforced Connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 57 ~ 68 (in Chinese)

[作者简介] 褚云朋(1979 ~) 博士研究生, 讲师