

文章编号:1673-2049(2016)06-0024-06

剪切型转动粘弹性阻尼器在村镇木结构 抗风中的应用

李宏男^{1,2},倪培华¹,付 兴¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:针对强台风下村镇低矮房屋的大量倒塌,将阻尼器引入村镇木结构的抗风控制中;同时针对现有木结构模拟中榫卯节点的恢复力模型多采用线弹性,没有考虑节点塑性变形而导致与实际情况存在很大差别的问题,在木结构分析时考虑节点的塑性特征。分析了该结构在强风作用下的动力反应,通过数值模拟验证了粘弹性阻尼器在木结构抗风减振方面的良好效果。结果表明:考虑节点非线性时木结构的层间位移明显减小,阻尼器的耗能也有所减小,但对减振率影响不大。

关键词:抗风设计;粘弹性阻尼器;振动控制;村镇木结构

中图分类号:TU352.2 **文献标志码:**A

Application of Shear-rotation Viscoelastic Damper in Wind Resistance of Rural Wood Structure

LI Hong-nan^{1,2}, NI Pei-hua¹, FU Xing¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: A damper was applied in low-rise wood structure to resist wind load as many low-rise structure collapsed under the strong wind load. Aimed at the problem that mortise and tenon joint rotation model was different from actual situation because of linear elasticity in the existing simulation of wood structures and without considering plasticity deformation, the plasticity of mortise and tenon joint was considered in the structure analysis. The dynamic response and control effect of the structure under strong wind were analyzed, and viscoelastic damper was verified to have great effect on the vibration control of the wood structure under wind load by numerical simulation. The results show that considering nonlinear joint, the story drift of wood structure decreases greatly and the energy dissipation of the damper also decreases, but the nonlinear joint does not affect the reduction ratios.

Key words: wind-resistance design; viscoelastic damper; vibration control; rural wood structure

0 引言

中国的风灾调查数据表明^[1]:风灾造成的巨大损失主要是由于村镇房屋的破坏,强台风会造成大

量房屋倒塌,带来巨大生命财产损失。现有低矮房屋的抗风设计主要是通过借助全尺寸现场实测、风洞试验、计算机数值模拟等方法得到结构表面风压分布情况,进而对墙体开洞、屋面形式及女儿墙等结

收稿日期:2016-06-22

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAL05B03);国家自然科学基金创新研究群体基金项目(51421064)

作者简介:李宏男(1957-),男,辽宁沈阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:hnli@dlut.edu.cn.

构造提出改进措施^[2]。这些方法主要针对风灾中围护结构的损坏进行研究,对主体结构的倒塌破坏研究较少。

粘弹性阻尼器最早于 1969 年应用于纽约世贸中心的风振控制中^[3],通过安装该类型阻尼器,结构的阻尼比从原来不到 1% 增加到 2.5% 以上,使结构满足舒适度的抗风要求。苏毅等^[4]进行了筒式粘弹性阻尼器的老化性能试验和疲劳性能试验,并分析了筒式粘弹性阻尼器风振控制的工程应用实例,得出设置粘弹性阻尼器时,结构悬挑端竖向位移和加速度明显减小。瞿伟廉等^[5]将粘弹性阻尼器支撑应用于中国首都规划大厦中,使风振加速度平均减小 54%,并针对高层钢结构建筑提出了粘弹性阻尼器应用于抗震抗风的实用设计方法。周云^[6]对装有粘弹性阻尼器结构的性能、分析方法及工程应用作了总结。粘弹性阻尼器在风振控制中的应用主要集中在高层建筑、高耸结构和大跨空间结构上,对低矮房屋尤其是村镇木结构的风振控制研究很少。

本文根据粘弹性阻尼器已有的成果,对强台风作用下沿海地区大片房屋倒塌开展风振控制研究。由于木结构的破坏一般是节点破坏,因此,本文使用文献[7]中提出的新型剪切型转动阻尼器来提高结构的抗风性能,使用相似准则处理已有的粘弹性阻尼器数据,得到不同尺寸的剪切型转动粘弹性阻尼器的本构模型,进而应用于木结构的风振控制中,验证粘弹性阻尼器对村镇木结构风致振动的影响。以往建立木结构的模型时,假设榫卯节点的弯矩-转角之间的关系是线弹性的,没有考虑榫卯节点的塑性变形,与实际情况不符。试验获得的榫卯节点的恢复力模型曲线是针对具体尺寸的榫卯节点的模型。本文通过相似准则处理已有榫卯节点的试验数据得到算例中榫卯节点的恢复力曲线,从而考虑榫卯节点非线性对木结构层间位移的影响,并对比分析了考虑榫卯节点非线性时,剪切型转动粘弹性阻尼器的耗能及减振率。最后提出一些对村镇木结构房屋抗风减振方法的建议。

1 粘弹性阻尼器

本文选用的阻尼器是笔者提出的一种新型转动粘弹性阻尼器,其形式如图 1 所示。它主要由连接钢板和起耗能作用的粘弹性材料组成,耗能机理是当柱与地面产生角位移时,分别与柱和地面连接的钢板会发生相对错动,使它们之间的粘弹性材料产生剪切变形,达到耗能目的。

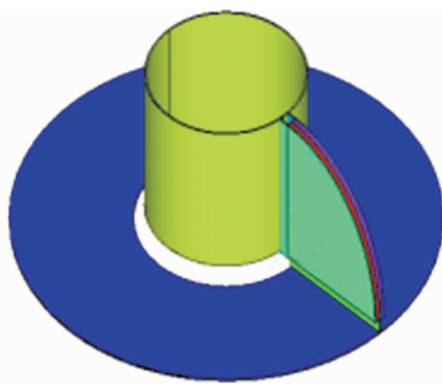


图 1 新型角位移阻尼器

Fig. 1 New Angle-displacement Damper

该阻尼器使用 Bouc-Wen 模型进行本构模拟^[8-9]。文献[7]给出了粘弹性材料厚度为 8×10^{-3} m,半径为 0.15 m 时阻尼器的试验数据。为了便于结构的减振设计,不同尺寸、相同材料阻尼器的力学特性可通过相似准则得到^[10]。图 2 为粘弹性材料厚度为 1.2×10^{-3} m,半径为 0.2 m 时阻尼器的试验曲线与滞回曲线的对比,从图 2 可以看出,采用 Bouc-Wen 模型模拟的效果非常好。

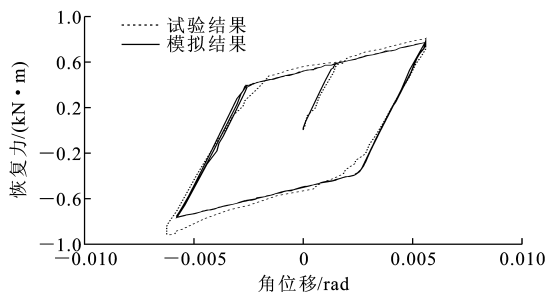


图 2 阻尼器的滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic Curves of Damper

2 木结构榫卯节点模拟

榫卯节点是木结构的特有节点形式,它是介于刚接和铰接之间的半刚性连接。通常利用现场实测和模型试验获得结构自振频率的结果,然后使用 Simplex 方法反演推出半刚性节点的刚度^[11],但这样得到的节点刚度是线性的。实际上,榫卯节点在抵抗外部荷载时能起到耗能作用。因此,在分析阻尼器在木结构上的抗风效果时最好考虑榫卯节点刚度非线性的影响。目前,学者们已经做了大量榫卯节点模型试验的研究,并得到榫卯节点的力学模型。本文采用赵鸿铁等^[12]提出的榫卯节点力学模型,即

$$M = \begin{cases} K_1 \theta & 0 \leq \theta \leq \theta_y \\ K_1 \theta_y + K_2 (\theta - \theta_y) & \theta_y < \theta \leq \theta_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_1, K_2 分别为弹性刚度和塑性刚度; M 为榫

卯节点的弯矩; θ 为榫卯节点角位移; θ_y 为屈服角位移; θ_u 为极限角位移。

由于本文采用的木结构榫卯节点的模型与试验模型有区别,可利用相似准则处理试验数据得到本文榫卯节点的模拟数据。榫卯节点的破坏原理通常是顺纹受压屈服导致横纹劈裂,从而失去承载能力,而榫卯节点的转动变形主要由柱的横纹承压引起^[13]。因此榫卯节点承载力和刚度的相似准数 π_F 、 π_K 分别为

$$\left. \begin{aligned} \pi_F &= \frac{M}{\sigma_{\perp} AL} \\ \pi_K &= K / \left(\frac{E_{\perp} A}{h} L^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_{\perp} 为横纹抗拉强度; E_{\perp} 为横纹抗拉弹性模量; A 为构件截面面积; L 为构件长度; K 为横纹抗压刚度; h 为构件截面高度。

榫卯节点承载力相似常数 C_F 与刚度相似常数 C_K 分别为

$$\left. \begin{aligned} C_F &= C_{\perp} C_1^2 C_L \\ C_K &= C_{E\perp} C_1 C_L^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: C_{\perp} 为横纹抗拉强度相似常数; $C_{E\perp}$ 为顺纹弹

性模量相似常数; C_1 为横截面尺寸相似系数; C_L 为构件长度相似常数。

3 数值算例分析

3.1 算例概况

算例是依据《营造法式》^[14]及《木结构设计规范》^[15]的相关规定,参考实际村镇建筑设计。采用3×3榀框架,单榀框架跨度为3.8 m,进深为3 m。模型为2层,首层层高3 m,二层层高2.5 m。柱截面直径为0.29 m,梁截面高0.25 m,宽0.17 m,樨头尺寸宽0.09 m,高0.25 m。

木材是各向异性材料,由于木结构材料的径向、弦向取向随机,可把它看作是横截面各向同性材料。文献^[12]试验中采用的木材是俄罗斯红松,本文选用与其产地相近的东北红松,其材料的力学性能见表1。根据材料的性能和本算例模型的尺寸,本文 C_{\perp} 和 $C_{E\perp}$ 取1,则 $C_1=0.25/0.18=1/1.39$, $C_L=1.5/3=1/2$ 。根据公式(3)得: $C_F=0.26$, $C_K=0.18$ 。根据得到的相似系数,处理榫卯节点的试验数据^[12],得到本算例榫卯节点的力学性能,如表2所示。

使用SAP2000建立木结构有限元模型,梁柱使

表 1 材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Material

材料	E_1/Pa	E_2/Pa	E_3/Pa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}/Pa	G_{13}/Pa	G_{23}/Pa
东北红松	1.434×10^{10}	5.37×10^8	537×10^8	0.427	0.427	0.643	9.76×10^8	9.76×10^8	8.9×10^7

注: E_1,E_2,E_3 分别为木材顺纹弹性模量、横纹径向弹性模量、横纹切向弹性模量; $\nu_{12},\nu_{13},\nu_{23}$ 分别为纵向和径向所在平面的泊松比、纵向与切向所在平面的泊松比、径向与切向所在平面的泊松比; G_{12},G_{13},G_{23} 分别为 $\nu_{12},\nu_{13},\nu_{23}$ 对应的剪切模量。

表 2 榫卯节点的力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of Mortise and Tenon Joint

数据来源	$M_y/(\text{N}\cdot\text{m})$	U_y/rad	$M_u/(\text{N}\cdot\text{m})$	U_u/rad	$K_1/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	$K_2/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
试验	2.77×10^3	0.060	3.31×10^3	0.100	4.46×10^4	1.92×10^3
模拟	1.08×10^4	0.043	1.29×10^4	0.063	2.48×10^5	1.06×10^5

注: M_y,M_u 分别为屈服弯矩和极限弯矩; U_y,U_u 分别为屈服位移和极限位移。

用梁单元,楼板使用壳单元。由于木结构柱与基础的特殊连接方式只约束柱的平动,不能约束转动,因此柱脚与基础的连接方式简化为固定铰支座^[16]。当只考虑弹性刚度时榫卯节点采用弹簧单元模拟^[16],考虑弹塑性刚度时,使用Multilinear Plastic连接单元模拟。粘弹性阻尼器采用Plastic(Wen)单元模拟,阻尼器施加在柱脚,完成后的木框架有限元模型如图3所示。结构的前3阶周期分别为3.62,2.87,1.68 s。前3阶振型分别为 x 向平动、 y 向平动、绕 z 轴转动。

3.2 风荷载模拟方法

风包括平均风和脉动风2种成分。平均风的模

拟使用指数风剖面,脉动风一般看作一种各态历经的平稳随机过程,用随机振动理论来模拟。目前,随机过程的模拟方法有很多,如谐波叠加法、线性滤波器法、小波变换法等。由于谐波叠加法的计算精度较高,所以本文选用谐波叠加法^[17]。由于本文研究对象是沿海台风作用下村镇木结构的抗风方法,根据中国台风等级及风速划分标准,基本风速取 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以上。风速谱使用Davenport谱^[18]。风速时程模拟参数如表3所示。使用MATLAB编制脉动风模拟程序,图4为模型中坐标(3.8 m,0 m,5.5 m)节点的脉动风风速时程曲线,图5为节点自功率谱与Davenport谱的对比。根据《建筑结构荷

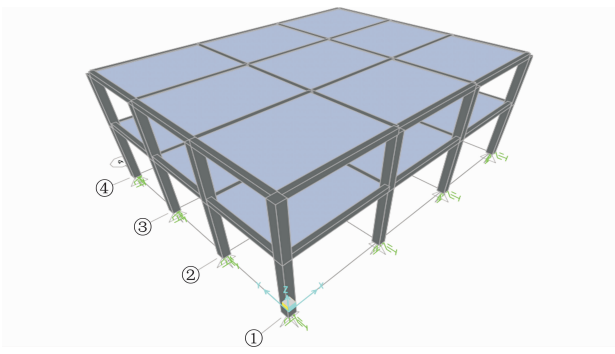


图 3 木框架有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Wood Frame

表 3 风速时程模拟参数

Tab. 3 Modeling Parameters of Time History of Wind Speed

参数	地貌类别	地面阻力系数	地面粗糙度指数
参数值	B 类	0.002 15	0.15

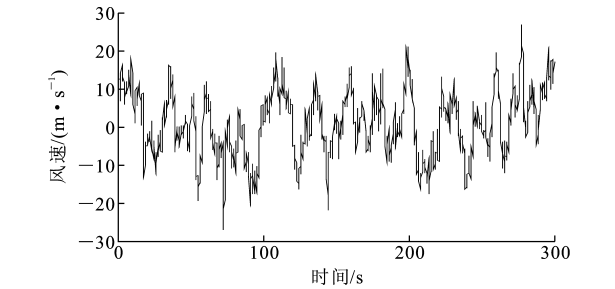


图 4 节点脉动风风速时程曲线

Fig. 4 Time History Curve of Pulse Wind Speed of Joint

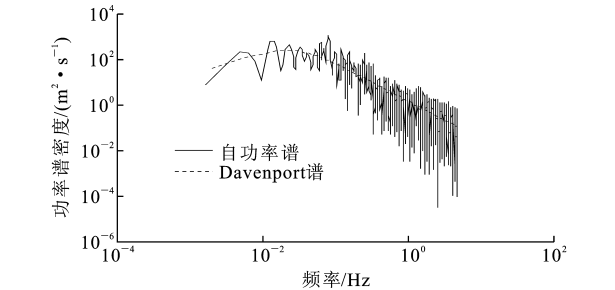


图 5 节点自功率谱与 Davenport 谱的对比

Fig. 5 Comparison Between Auto-power Spectrum of Joint and Davenport Spectrum

载规范》的规定,迎风面体型系数取 0.8,背风面取-0.5。先模拟出各梁柱节点的脉动风速及总的风荷载,然后将风荷载直接施加在有限元模型梁柱节点上,进行风振反应分析。

3.3 木结构减振分析

为了更好地研究木结构节点对有控结构及无控结构动力反应的影响,分别研究弹性节点及非线性节点下结构的减振效果。

首先将节点设为弹性。基本风速分别取 30,

35,40,45,50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,生成结构的风荷载施加到结构上,进行时程分析。对比分析采用粘弹性阻尼器的木结构和无控结构在风荷载作用下的反应。图 6 和图 7 分别为风速 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时结构的首层、二层层间位移时程曲线,从图 6,7 可以看出,安装阻尼器后对结构位移有明显的控制作用。由于脉动风模拟的随机性,采用标准差对木结构的层间位移时程数据进行处理,得到各风速下结构的层间位移标准差及减振率,如表 4 所示。从表 4 可以看出,粘弹性阻尼器对结构各层位移有良好的控制效果。当基本风速取 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,首层层间位移标准差由原来的 14.12 mm 减少到 11.97 mm,二层层间位移标准差由原来的 11.75 mm 减少到 9.97 mm,减振率都在 15% 以上。

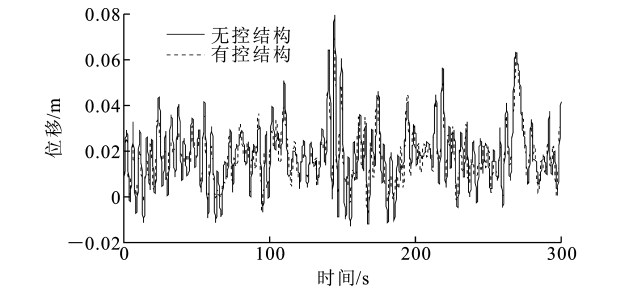


图 6 结构首层层间位移时程曲线

Fig. 6 Time History Curves of Story Drift for the First Floor

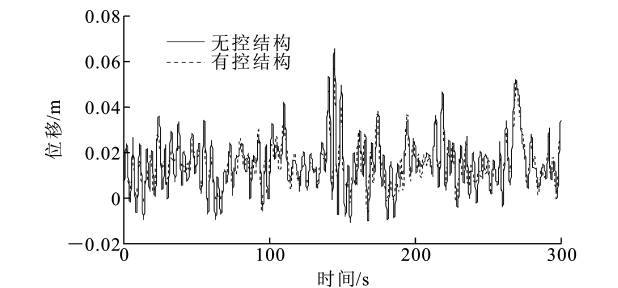


图 7 结构二层层间位移时程曲线

Fig. 7 Time History Curves of Story Drift for the Second Floor

以上是根据弹性节点得到的结果,下面将榫卯节点设为非线性,研究木结构的动力响应,并与弹性节点结果对比。表 5 列出了考虑榫卯节点非线性的层间位移标准差及减振率。从表 5 可以看出,以风速 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为例,考虑榫卯节点非线性时,无控结构的首层位移由原来的 14.12 mm 减少到 10.91 mm,二层的层间位移由原来的 11.75 mm 减少到 9.08 mm,结果相差 22.7%。通过对比表 4 和表 5 可以看出,考虑节点非线性后位移标准差明显减小,

表 4 各风速下结构层间位移标准差及减振率

Tab. 4 Standard Deviations of Story Drift and Reduction Ratios with Different Wind Speeds

基本风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		30		35		40		45		50	
位置		首层	二层	首层	二层	首层	二层	首层	二层	首层	二层
层间位移	无控结构	7.75	6.45	11.40	9.49	14.12	11.75	18.40	15.30	25.93	21.59
标准差/mm	有控结构	6.48	5.42	10.18	8.48	11.97	9.97	16.40	13.60	21.83	18.20
减振率/%		16.39	15.97	10.69	10.67	15.19	15.16	11.17	11.15	15.82	15.67

表 5 考虑榫卯节点非线性时各风速下结构层间位移标准差及减振率

Tab. 5 Standard Deviations of Story Drift and Reduction Ratios with Considering Nonlinear of Mortise and Tenon Joint Under Different Wind Speeds

基本风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		30		35		40		45		50	
位置		首层	二层	首层	二层	首层	二层	首层	二层	首层	二层
层间位移	无控结构	6.07	5.03	9.96	8.28	10.91	9.08	15.10	12.50	20.38	16.96
标准差/mm	有控结构	5.48	4.51	8.49	7.07	9.22	7.67	12.90	10.70	17.41	14.49
减振率/%		9.71	8.40	14.67	12.17	15.48	15.53	14.31	11.89	14.59	12.12

并且风速较大时减振率有小幅提升。从表 5 还可以看出,阻尼器能很好地发挥减振作用。以风速为 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为例,结构的首层位移由原来的 10.91 mm 减少到 9.22 mm ,结构的减振率在 15% 以上;二层的层间位移由原来的 9.08 mm 减少到 7.67 mm ,阻尼器对结构的减振率在 15% 以上。

图 8 给出了有无阻尼器的结构顶层位移功率谱对比,从图 8 可以看出,安装阻尼器后结构的功率谱峰值明显减小,结构整体刚度变大。

考虑榫卯节点非线性的耗能影响。
(3)剪切型转动粘弹性阻尼器与榫卯节点共同参与耗能,当考虑节点非线性时,阻尼器的耗能有所减小,但减振率的变化不大。

参考文献:

References:

[1] 孙炳楠,傅国宏,陈 鸣,等. 94 年 17 号台风对温州民房破坏的调查[J]. 浙江建筑,1995(4):19-23.
SUN Bing-nan, FU Guo-hong, CHEN Ming, et al. Investigation of Disaster in Wenzhou Due to Typhoon 9417[J]. Zhejiang Construction, 1995(4): 19-23.

[2] GERHARDT H J, KRAMER C. Effect of Building Geometry on Roof Wind Loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43 (1):1765-1773.

[3] MAHMOODI P, ROBERTSON L E, YONTAR M, et al. Performance of Viscoelastic Dampers in World Trade Center Towers [C]//ASCE. Dynamics of Structures. Orlando: ASCE, 1987: 632-644.

[4] 苏 毅, 常业军, 程文灏. 筒式粘弹性阻尼器的试验研究及工程应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 177-182.
SU Yi, CHANG Ye-jun, CHENG Wen-rang. Experimental Study and Application of Circular Tube Viscoelastic Dampers for Mitigating Wind Vibration Response[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28 (11): 177-182.

[5] 瞿伟廉, 程煜堃, 毛增达, 等. 设置粘弹性阻尼器钢结构高层建筑抗震抗风设计的实用方法[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(3): 42-49, 57.
QU Wei-lian, CHENG Mao-kun, MAO Zeng-da,

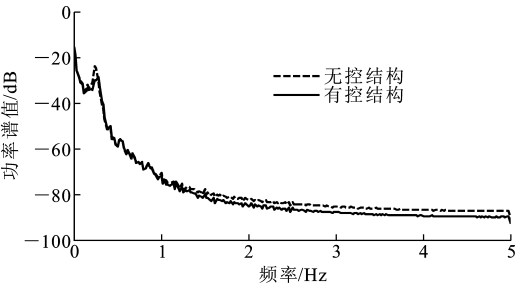


图 8 结构顶层位移功率谱对比

Fig. 8 Comparison of Displacement Power Spectrum of Structure Top

此外,是否考虑节点非线性对阻尼器的耗能也有影响,当考虑节点非线性时,阻尼器的耗能从 $3.27 \text{ N} \cdot \text{m}$ 下降到 $2.34 \text{ N} \cdot \text{m}$,这是由于榫卯节点承担了部分结构耗能。

4 结 语

(1)将剪切型转动粘弹性阻尼器应用于村镇低矮木结构的抗风减振中可以得到良好的控制效果。
(2)村镇木结构的榫卯节点具有非线性的力学特性,考虑榫卯节点塑性变形时,木结构的层间位移会大幅减小,所以在分析木结构的动力反应时需要

- et al. Practical Method for Wind and Earthquake Resistant Design of Steel Tall Building Installed with Viscoelastic Dampers[J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(3): 42-49, 57.
- [6] 周云. 结构风振控制的设计方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- ZHOU Yun. The Design Method and Application of Vibration Control of Structure Under Wind[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [7] 邹爽, 霍林生, 李宏男. 用于村镇木结构建筑的新型角位移阻尼器的性能实验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 62-68.
- ZOU Shuang, HUO Lin-sheng, LI Hong-nan. Foundation Experiments Research of New Angle-displacement Damper for Wood Frame Structures in Rural Areas[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 62-68.
- [8] BOUC R. Forced Vibration of Mechanical Systems with Hysteresis [C]//NOC. Proceedings of the Fourth Conference on Non-linear Oscillation. Prague: NOC, 1967: 1-7.
- [9] WEN Y K. Method for Random Vibration of Hysteretic Systems[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.
- [10] 周颖, 龚顺明, 吕西林. 黏弹性阻尼器滞回曲线及特征参数的相似准则[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(12): 4317-4324.
- ZHOU Ying, GONG Shun-ming, LU Xi-lin. Similarity of Hysteretic Loops and Characteristic Parameters of Viscoelastic Dampers[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(12): 4317-4324.
- [11] 方东平, 俞茂宏, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的计算研究[J]. 工程力学, 2001, 18(1): 137-144.
- FANG Dong-ping, YU Mao-hong, MIYAMOTO Y, et al. Numerical Analysis on Structural Characteristics of Ancient Timber Architecture[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(1): 137-144.
- [12] 赵鸿铁, 董春盈, 薛建阳, 等. 古建筑木结构透榫节点特性试验分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(3): 315-318.
- ZHAO Hong-tie, DONG Chun-ying, XUE Jian-yang, et al. The Experimental Study on the Characteristics of Mortise-tenon Joint Historic Timber Buildings[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(3): 315-318.
- [13] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CHEN Zhi-yong. Behavior of Typical Joints and the Structure of Yingxian Wood Pagoda[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [14] 李诚. 营造法式[M]. 上海: 商务印书馆, 1954.
- LI Jie. Architecture Rules[M]. Shanghai: The Commercial Press, 1954.
- [15] GB 50005—2003, 木结构设计规范[S].
- GB 50005—2003, Code for Design of Timber Structures[S].
- [16] 汪兴毅, 王建国. 徽州木结构古民居营造合理性的理论分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2011, 34(9): 1375-1380.
- WANG Xing-yi, WANG Jian-guo. Analysis of the Rationality of Huizhou Vernacular Dwellings Construction[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2011, 34(9): 1375-1380.
- [17] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52.
- WANG Zhi-hong. Simulation of Wind Loading[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 44-52.
- [18] DAVENPORT A G. The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372): 194-211.