第44卷 第11期 湖南大学学报(自然科学版) Vol.44,No.11
2017年11月 Journal of Hunan University(Natural Sciences) Nov. 2017

文章编号:1674-2974(2017)11-0099-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.11.012

轻木钉节点恢复力模型研究及参数识别*

熊海贝,曹纪兴,张凤亮†,陈佳炜
(同济大学 结构工程与防灾研究所,上海 200092)

摘 要:以低周反复作用下轻型木结构钉连接节点的试验为依据,提出了一种7个参数的钉节点恢复力模型,考虑正负方向不同的捏缩点和滑移效应,采用贝叶斯方法识别模型参数.结果表明,贝叶斯参数识别的精度依赖于所采用的数据,识别得到的恢复力模型最有可能值和协方差矩阵可用于相同条件下钉节点的计算.利用识别的结果对其反应进行模拟,所得计算结果与试验值符合良好.文中提出的恢复力模型为钉节点分析提供了可参考的力学模型,将贝叶斯理论扩展应用到恢复力模型参数识别中,为轻型木结构非线性滞回分析的研究提供了一种新的方法.

关键词:轻型木结构钉节点;恢复力模型;贝叶斯方法;参数识别
中图分类号:TU366.2 **文献标志码**:A

Parameter Identification and Research on Restoring Force Model of Nail Joints in Light Wood Structure

XIONG Haibei,CAO Jixing,ZHANG Fengliang†,CHEN Jiawei
(Research Institute of Structural Engineering & Disaster Reduction,Tongji University,Shanghai 200092,China)

Abstract: This paper proposed a novel mechanical model of nail joint restoring force with seven model parameters were based on low-cycle and repeated tests of light wood structure nail joints. This model considers different pinch points and slip effect in both positive and negative directions. Model parameters were identified by using the Bayesian method. The results show that the accuracy of Bayesian identification method relies on the quality of raw data. The result of the most probable value and the associated covariance matrix can be determined and used to the calculation of nail joint with the same conditions. The model response obtained from the result of parameters identification is in good agreement with the experimental results. The restoring force model proposed in this paper provides a reference for future nail joints analysis. Furthermore, Bayesian method is extended to parameter identification of nail joints restoring force, providing a novel way to investigate nonlinear hysteretic analysis of light wood structures.

Key words: nail joints of light wood structure; restoring force model; Bayesian method; parameter identification

---

* **收稿日期**:2016-08-19
基金项目:地震工程国际合作联合实验室合作研究项目(TMGFXK-2015-002-2), Application for the Collaborative Research Project under International Joint Research Laboratory of Earthquake Engineering (TMGFXK-2015-002-2);国家自然科学基金资助项目(51508407, 51508413),National Natural Science Foundation of China(51508407, 51508413);上海市浦江人才计划(15PJ1408600), Shanghai Pujiang Program (15PJ1408600);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20161143), Fundamental Research Funds for the Central Universities (20161143)
作者简介:熊海贝(1963—),女,上海人,同济大学教授,博士生导师
†通讯联系人,E-mail: fengliangzhang@tongji.edu.cn

轻型木结构钉连接节点对轻木剪力墙的结构性能具有重要影响[1-3].Anderson 等[2]通过 4 组钉连接试验得到屈服应力和单侧连接的滞回性能,在剪力墙数值模型中使用钉的试验参数,分析剪力墙的受力性能.熊海贝等[4-5]通过单调以及反复荷载下的钉连接节点性能试验研究,分析了钉节点承载力、延性和耗能等力学性能的影响因素;康加华[6]将该试验得到的钉连接节点参数,利用 ANSYS 建立轻型木结构房屋精细化有限元模型,与振动台试验结果吻合良好.因此,建立合理的钉连接节点恢复力模型对于准确预测木框架剪力墙或轻型木结构房屋的受力性能非常重要.Xu 等[3]采用一个连续的微分函数建立钉连接节点的恢复力模型,通过 ABQUS 建立精细剪力墙模型进行分析和验证,结果与试验数据较吻合.Dolan 等[7]提出四段指数型的滞回曲线模型,用于模拟木剪力墙在地震作用下的动力响应.Folz 等[8]基于 Dolan 的指数型骨架曲线,考虑了刚度退化和捏缩效应,并根据数值模型分析了木剪力墙的荷载-位移响应.Judd[9]提出 Q-Pinch 模型,考虑不同滑移水平下强度及刚度退化和捏缩效应等非线性性质.上述研究在恢复力模型的参数识别中均利用确定性识别方法,确定性识别方法只能得到模型参数的最优值,并不能得到模型参数的不确定性,无法考虑模型误差的影响[10].Beck 等[11]首次将贝叶斯理论应用于结构动力特性的模型参数识别中.Liu 等[12]利用贝叶斯方法识别了复合密肋楼板的恢复力模型参数,并对各参数的相关性进行讨论.基于低周反复作用下轻型木结构钉连接节点的试验结果,本文提出了一种钉节点的恢复力模型,利用贝叶斯方法进行模型参数的识别,并讨论了模型参数的不确定性及鲁棒性,利用试验数据验证了模型参数的合理性和准确性.

1 钉节点恢复力模型

钉节点的恢复力模型包括骨架曲线和滞回规律两部分.骨架曲线是研究构件或结构非弹性地震反应的重要依据,能够反应出构件的延性、强度、刚度和耗能等力学特性[13].常用的骨架曲线模型有能量曲线[14],对数曲线[15],指数曲线[16]和渐近曲线[17]等.指数型骨架曲线参数物理意义明确,表达式简单.本文采用指数型骨架曲线模型,如图 1 所示,考虑骨架曲线正负向的不对称性,图中 F_{max+},F_{max-} 分别为正向和负向荷载的最大值,其表达式分别如式(1)和式(2)所示.

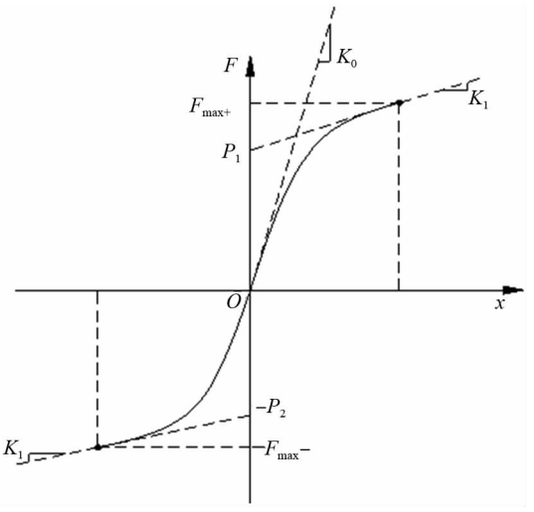


图 1 钉节点骨架曲线

Fig.1 Skeleton curve of nail joints

骨架曲线正向表达式:

$$F(x)=(P_1+K_1x)\left[1-\exp(-\frac{K_0x}{P_1})\right] \quad (1)$$

式中:K_0 为初始刚度;K_1 为等效塑性刚度;P_1 为正向最大荷载的切线与荷载轴正向的交点.

骨架曲线负向表达式:

$$F(x)=-(P_2+K_1|x|)\left[1-\exp(-\frac{K_0|x|}{P_2})\right] \quad (2)$$

式中:P_2 为负向最大荷载的切线与荷载轴负向的交点.

滞回规律是反复荷载作用时的荷载-位移(F-x)曲线规律,它定义了反复荷载作用时加载、卸载、反向加载和反向卸载的路径和规律.根据该试验滞回曲线的特点,本文提出了一种滞回模型:当位移小于屈服荷载对应的位移 x_{yield} 时,按小位移的滞回规律计算;当位移大于 x_{yield} 时,按大位移的滞回规律计算.

小位移时,试件处于弹性阶段,滞回曲线基本呈直线变化,捏缩效应不明显,故仅考虑刚度的退化,滞回模型如图 2 所示.初始加载时,沿骨架曲线路径加载,达到该级加载的最大正向位移 x_A 时开始卸载,按 K_3 卸载到 0 后反向加载,反向加载时指向该级加载的最大负向位移 x_B 时按 K_3 卸载.其对应的表达式如式(3)~式(7)所示.

图 2 中直线 L12 的方程为:

$$F_{L12}(x)=K_3(x-x_A)+F_A \quad (3)$$

式中:F_A 为该圈正向加载的最大荷载,由骨架曲线

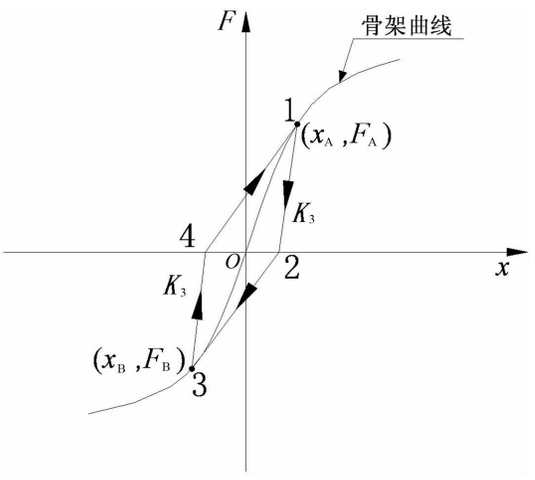


图 2　小位移时钉节点滞回模型

Fig.2　Hysteresis model of nail joints at small displacement

确定;K_3为卸载刚度,按式(4)计算.

$$K_3 = K_0 \left(\frac{x}{x_{\text{yield}}}\right)^{\gamma} \tag{4}$$

式中:γ 为刚度退化系数;x_{yield} 为屈服点对应的位移.

图 2 中直线 L23 的方程为:

$$F_{\text{L23}}(x) = \frac{F_B K_3}{K_3 x_B - K_3 x_A + F_A}(x - x_B) + F_B \tag{5}$$

式中:F_B为该圈负向加载的最大荷载,由骨架曲线确定.

图 2 中直线 L34 的方程为:

$$F_{\text{L34}}(x) = K_3(x - x_B) + F_B \tag{6}$$

图 2 中直线 L41 的方程为:

$$F_{\text{L41}}(x) = \frac{F_A K_3}{K_3 x_A - K_3 x_B + F_B}(x - x_A) + F_A \tag{7}$$

大位移时,试件进入屈服阶段,滞回曲线呈梭形,所包围的面积逐渐增大;继续加载,滞回曲线向弓形发展,单个滞回环中间存在较狭长的条形段,荷载零点附近出现捏拢效应.滞回曲线可以全面描述试件的弹性和非弹性及恢复力特性,是各种抗震性能指标的计算依据[18].常用的滞回模型有 Dolan 模型[7]、Stewart 模型[19].Dolan 模型采用四段指数型曲线,能更加真实地反应钉连接节点在不同滑移水平下强度及刚度退化的非线性性质,且数学表达式简单,但没有考虑滞回曲线正负方向的不对称性.本文改进 Dolan 四段指数型模型,考虑正负方向不同的捏缩点和滑移效应,如图 3 所示,滞回路径①→②→③→④,对应的表达式按式(8)～式(17)计算.

曲线①的方程为:

$$F_{\text{C1}}(x) = P_3 + K_5 x + [\exp(a_1 x) - 1] \tag{8}$$

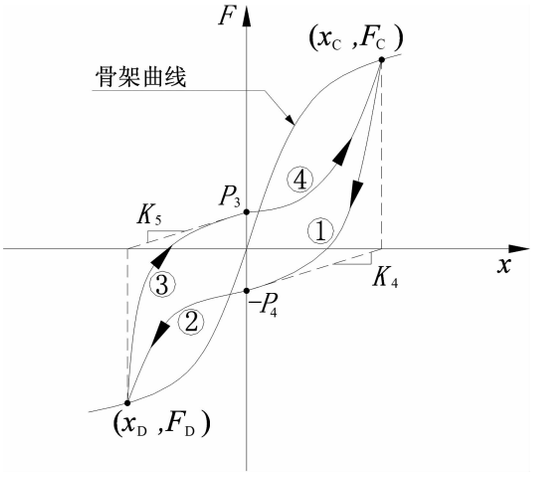


图 3　大位移时钉节点滞回模型

Fig.3　Hysteresis model of nail joints at large displacement

式中:P_3为正向捏缩点,即位移 0 时对应的正向荷载值;a_1按式(9)计算.

$$a_1 = \frac{\ln(F_C - P_3 - K_5 x_C + 1)}{x_C} \tag{9}$$

式中:F_C为该圈正向加载的最大荷载,由骨架曲线确定;K_5为正向等效滑移刚度,按式(10)计算.

$$K_5 = P_3 / x_D \tag{10}$$

式中:x_D为 F_d对应的位移.

曲线②的方程为:

$$F_{\text{C2}}(x) = -P_4 + K_4 x + [\exp(a_2 x) - 1] \tag{11}$$

式中:P_4为负向捏缩点,即位移 0 时对应的负向荷载值;a_2按式(12)计算.

$$a_2 = \frac{\ln(F_C + P_4 - K_4 x_C + 1)}{x_C} \tag{12}$$

式中:K_4为负向等效滑移刚度,按式(13)计算.

$$K_4 = P_4 / x_C \tag{13}$$

式中:x_C为 F_C对应的位移.

曲线③的方程为:

$$F_{\text{C3}}(x) = -P_4 + K_4 x - [\exp(a_3 x) - 1] \tag{14}$$

式中:a_3按式(15)计算.

$$a_3 = \frac{\ln(-F_D - P_4 + K_4 x_D + 1)}{x_D} \tag{15}$$

式中:F_D为该圈负向加载的最大荷载,由骨架曲线确定.

曲线④的方程为:

$$F_{C4}(x)=P_3+K_5x-[\exp(a_4x)-1] \tag{16}$$

式中:a_4按式(17)计算.

$$a_4=\frac{\ln(-F_D+P_3+K_5x_D+1)}{x_D} \tag{17}$$

本文确定屈服点的方法[20],如图 4 所示,在骨架曲线上取 40%最大荷载和 90%最大荷载对应的割线,在曲线上作平行于该割线的切线,切线与 10%最大荷载和 40%最大荷载对应割线的连线的交点即为名义屈服点.

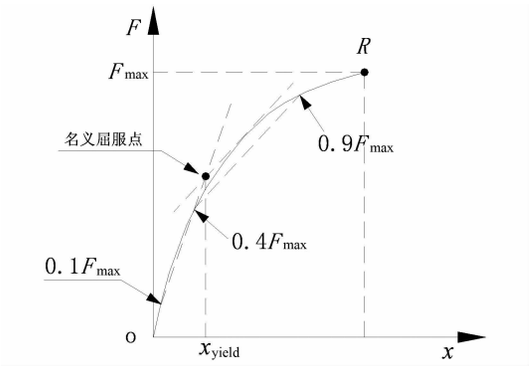


图 4 屈服点示意图

Fig.4 Sketch of yield point

2 贝叶斯参数识别框架

2.1 贝叶斯参数识别理论

传统的恢复力模型参数识别均利用确定性识别方法得到模型参数的最优值.本文采用贝叶斯参数识别方法,它从试验数据信息熵的角度认识了系统反分析的过程,比仅从数据和算法本身去研究反分析问题多了一个参照系.

根据贝叶斯理论,对于给定测试数据 $\hat{D}$,假定先验分布为均匀分布,因此可看作常数 k.模型参数 α 的后验分布可通过式(18)得到:

$$p(\alpha|D)=k\ p(D|\alpha)\cdot p(\alpha) \tag{18}$$

式中:k 为正则化常数;$p(D|\alpha)$ 为似然函数,反映了参数 α 对实测数据的合理性;$p(\alpha)$ 为先验分布.

在实际应用中,若实测数据足够多,似然函数对 α 通常比先验分布更敏感,则后验分布正比于似然函数:

$$p(\alpha|D)\propto p(D|\alpha) \tag{19}$$

设模型的计算值与实测值的误差向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$,满足均值为 0,方差 σ^2的正态分布,则

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\hat{D}-D(\alpha) \tag{20}$$

故似然函数 $L(\alpha)$为:

$$p(D|\alpha)=$$

$$\prod_{i=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}[\hat{D}_i-D_i(\alpha)]\right\}=$$

$$(2\pi\sigma^2)^{-\frac{n}{2}}\exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^{n}[\hat{D}_i-D_i(\alpha)]^2}{2\sigma^2}\right) \tag{21}$$

将式(21)取对数,得

$$L(\alpha)=-\frac{n}{2}\ln(2\pi\sigma^2)-\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}[\hat{D}_i-D_i(\alpha)]^2 \tag{22}$$

对式(22)求(σ^2)的偏导,得

$$\frac{\partial L(\alpha)}{\partial\sigma^2}=-\frac{n}{2\sigma^2}+\frac{1}{2\sigma^4}\sum_{i=1}^{n}[\hat{D}_i-D_i(\alpha)]^2=0 \tag{23}$$

则模型误差方差的最有可能值为:

$$\widetilde{\sigma^2}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[\hat{D}_i-D_i(\alpha)]^2 \tag{24}$$

模型参数 α 的最有可能值通过变异系数描述其与真实值的定量不确定性.参数的变异系数越大,则说明该参数最有可能值的不确定性越大.α 的后验协方差矩阵 $\hat{\boldsymbol{C}}$ 按式(25)计算[21]:

$$\hat{\boldsymbol{C}}=\hat{\boldsymbol{H}}^{-1} \tag{25}$$

式中:$\hat{\boldsymbol{H}}$ 为 $L(\hat{\alpha})$ 在 $\hat{\alpha}$ 的 Hessian 矩阵.Hessian 矩阵的元素可按式(26)计算.

$$H_L(i,j)=\frac{\partial^2 L}{\partial L(\alpha(i))\partial L(\alpha(j))} \tag{26}$$

贝叶斯参数识别方法是基于试验数据和计算模型、定量分析模型和参数的不确定性,识别结果可用于后续模型选择及考虑模型误差的可靠度分析.

2.2 待识别参数的选取

基于贝叶斯理论的参数识别方法实际上是使得系统识别问题转化为最优化问题.对于优化问题,待识别参数的选取对结果影响很大,若选取的模型参数过多,则很难得到全局的最优化问题;若选取的模型参数过少,则模型过于简单,无法准确地描述试件的特性.本文选取的待识别参数向量 $\boldsymbol{\alpha}=[K_0,K_1,P_1,P_2,P_3,P_4,\gamma]^T$,各参数的物理意义:$K_0$为初始刚度;$K_1$为等效塑性刚度;$P_1$为正向最大荷载的切线与荷载轴的交点;$P_2$为负向最大荷载的切线与荷载轴的交点;$P_3$为正向捏缩点;$P_4$为负向捏缩点;$\gamma$ 为刚度退化系数.

基于贝叶斯理论的参数识别框架如图 5 所示.

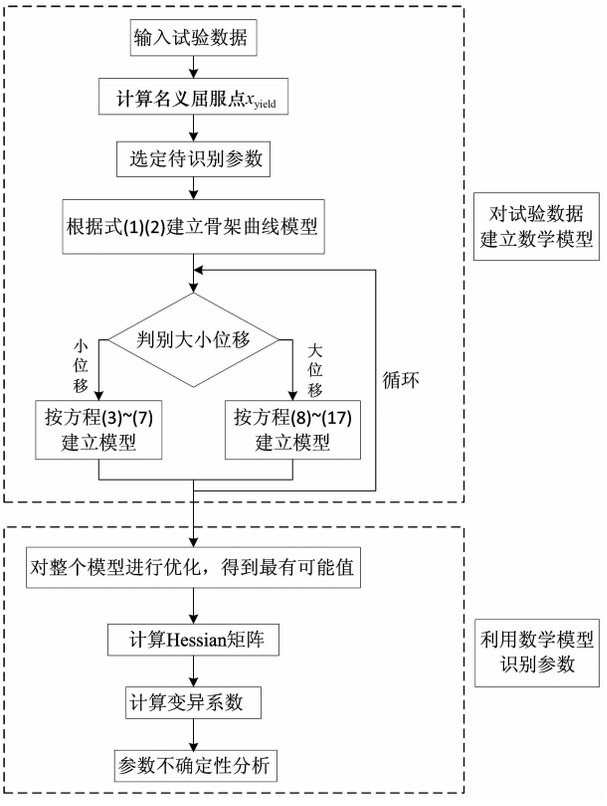


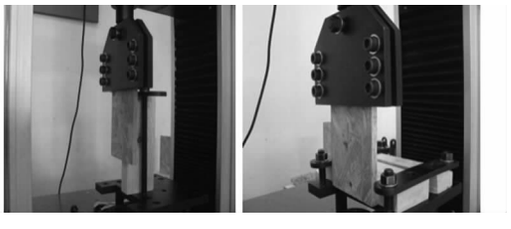
图 5　贝叶斯参数识别框架图

Fig.5　Processing of Bayesian parameter identification

3　钉节点恢复力模型参数识别

3.1　钉节点低周反复试验

轻型木结构钉节点低周反复试验的加载装置和加载制度分别见图 6 和图 7.图 7 中 L 为试验的加载圈数,ϕ 为加载位移与参考位移的比值,采用 ISO 加载制度[22],采用位移控制加载.有关该试验的具体描述见文献[23].



(a)顺纹试件　　(b)横纹试件

图 6　试件与加载装置的连接

Fig.6　Connection between specimen and loading device

根据 GB 50005－2003《木结构设计规范》中轻型木结构构造要求,且工程上常用的 4 组工况试件进行参数识别,基本信息如表 1 所示.每组工况的试件数量共 10 个,随机选取了其中的 8 组进行参数识别,利用剩余 2 组验证识别结果的合理性.

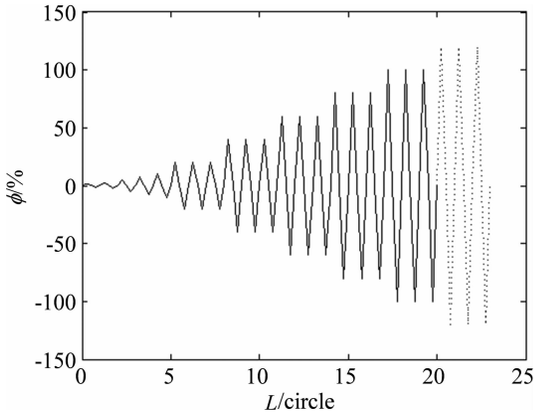


图 7　加载制度

Fig.7　Loading system

表 1　钉节点反复加载试件信息

Tab.1　Information of nail joints under low cycle and repeated test

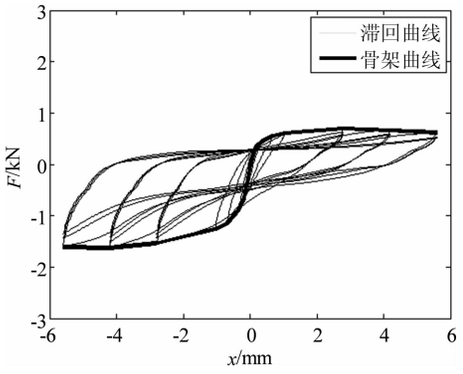
试件编号	墙骨柱材料尺寸/(mm×mm×mm)	受力方向	OSB 板厚度/mm	钉边距/mm	试件个数
HA2	40×90×230	横纹	9.5	20	10
HB2	40×90×230	横纹	12.5	20	10
HB5	40×90×230	横纹	12.5	50	10
SS2	40×90×230	顺纹	12.5	40	10

该试验结果表明,当钉边距分别为 20,40 和 50 mm 时,钉连接试件破坏时钉帽都没有穿透面板,同时由于面板对其的反复弯曲作用,大部分钉子被剪断,在规格材上沿受力方向出现长约 10～20 mm 左右的被压碎区域.试验得到的骨架曲线和滞回曲线如图 8 所示,图中 x 为加载位移,F 为钉受到的荷载,可以发现:钉节点在低周反复荷载作用下的滞回曲线呈倒 S 形,存在明显的捏缩点和滑移效应.各试件的骨架曲线和滞回曲线在第一和第三象限明显不对称,这可能是由于钉边距的影响,正向(或反向)加载时没有足够的面板承担相应的剪力.

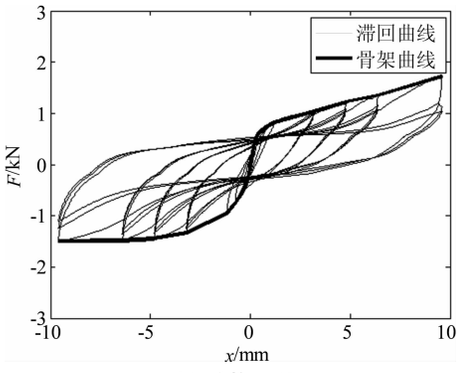
3.2　识别结果

根据贝叶斯参数识别框架,识别得到骨架曲线和滞回曲线与试验结果对比如图 9～图 12 所示,限于篇幅,本文仅列出了 4 组试件的每 2 个对比结果,可以发现:识别得到的滞回曲线与试验吻合较好,说明了识别结果的合理性,验证了利用贝叶斯理论的参数识别结果依赖于所采用的数据.

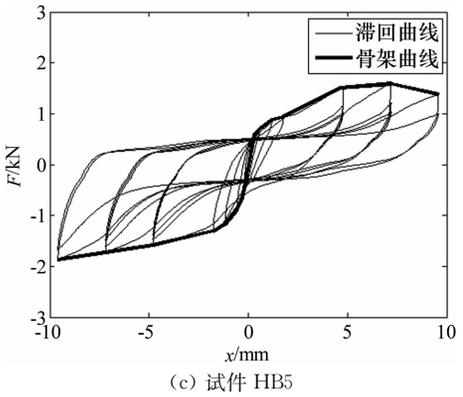
模型参数识别得到的最有可能值和变异系数如表 2 所示.以试件 HB2 的结果为例,可以发现:试件 HB2 参数 K_0 变异系数较大,这主要是因为试验加载初期,钉子与轻木之间由于间隙而存在不同程



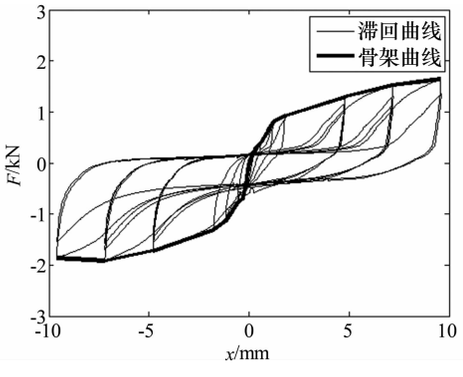
(a) 试件 HA2



(b) 试件 HB2



(c) 试件 HB5

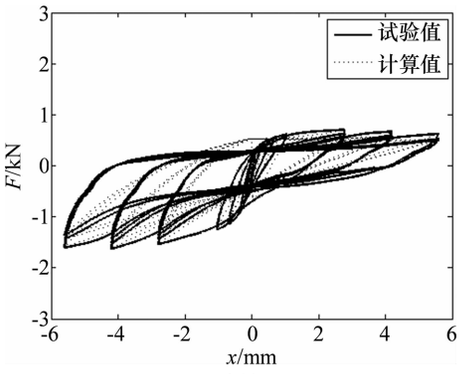


(d) 试件 SS2

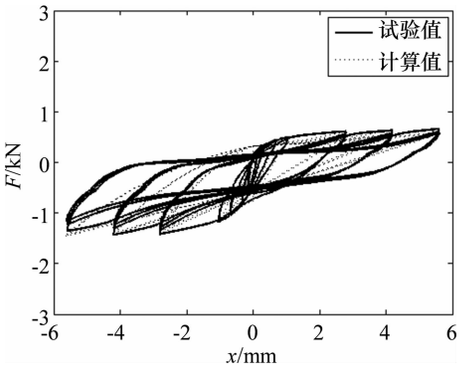
图 8 4 组试件的滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of four sets specimens

度的滑移,导致初始刚度偏小.根据参数识别的结果,计算 4 组试件的模型参数值,得到的结果如表 3



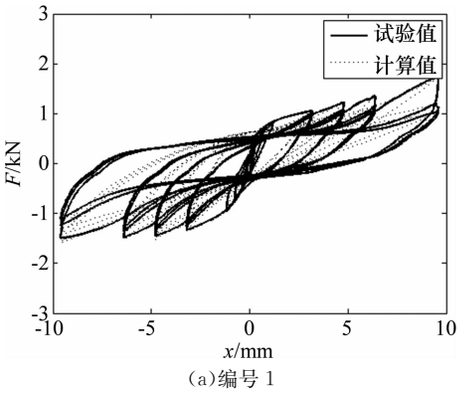
(a)编号 1



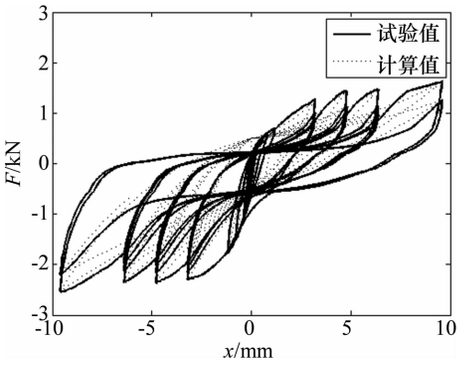
(b)编号 2

图 9 试件 HA2 识别结果与试验对比

Fig.9 Comparison between identification results of specimen HA2 and experimental results



(a)编号 1

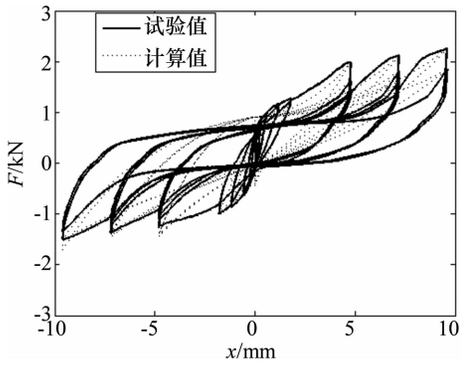


(b)编号 2

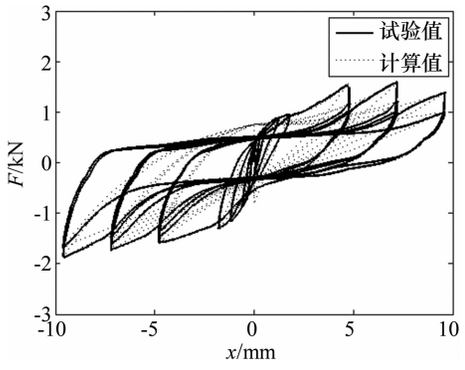
图 10 试件 HB2 识别结果与试验对比

Fig.10 Comparison between identification results of specimen HB2 and experimental results

所示.利用表 3 的结果,做出骨架曲线的误差棒(2 倍标准差),如图 13 所示,可以发现:4 组试件的骨架曲线模型误差棒几乎都能包含 8 个试验得到的骨架曲线,说明识别的模型参数具有良好的鲁棒性.



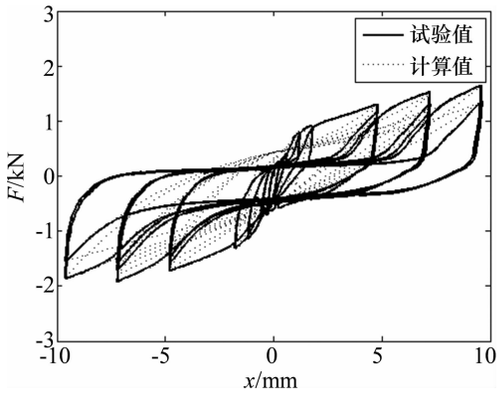
(a)编号 1



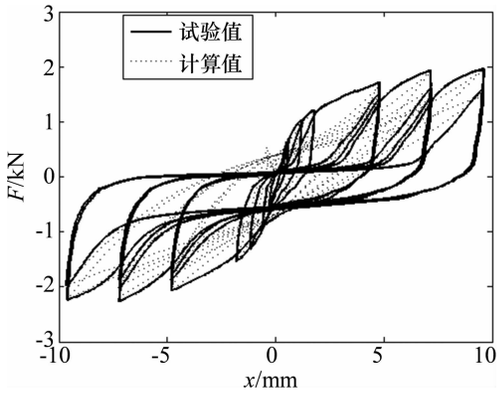
(b)编号 2

图 11　试件 HB5 识别结果与试验对比

Fig.11　Comparison between identification results of specimen HB5 and experimental results



(a)编号 1



(b)编号 2

图 12　试件 SS2 识别结果与试验对比

Fig.12　Comparison between identification results of specimen SS2 and experimental results

表 2　试件 HB2 的模型参数最有可能值和变异系数

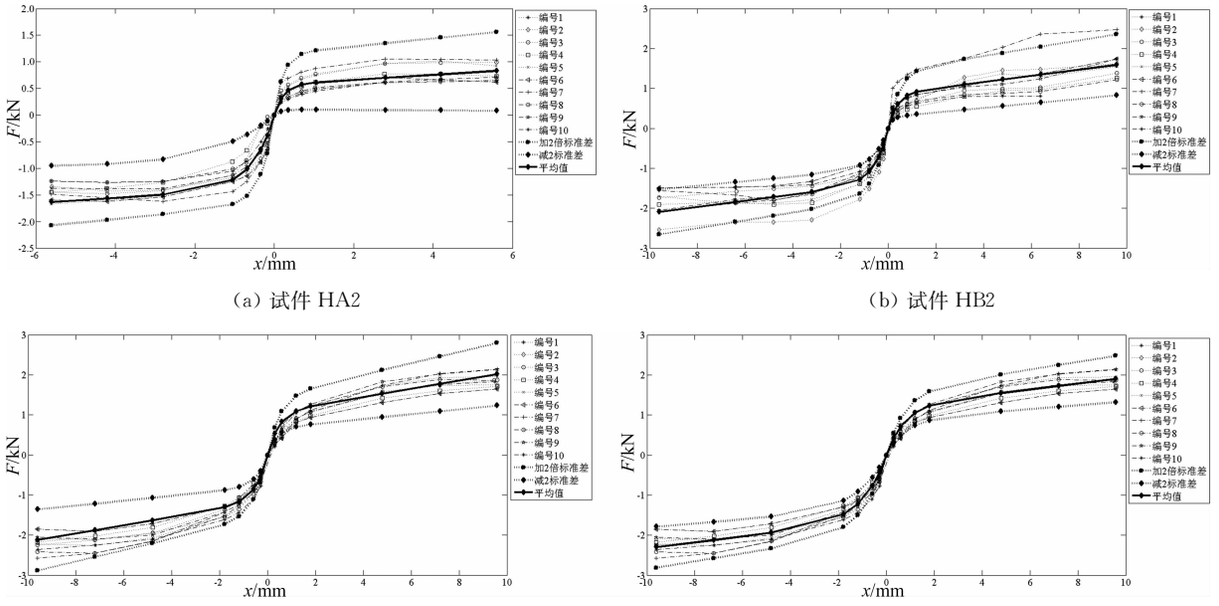
Tab.2　The most probable value of model parameter and variation coefficient of specimen HB2

编号	最优值 K_0 /(kN·mm^{-1})	K_0变异系数/%	最优值 K_1/(kN·mm^{-1})	K_1变异系数/%	最优值 P_1/kN	P_1变异系数/%	最优值 P_2/kN	P_2变异系数/%	最优值 P_3/kN	P_3变异系数/%	最优值 P_4/kN	P_4变异系数/%	最优值 γ	γ 变异系数/%
1	2.03	9.09	0.07	7.10	0.89	5.22	0.97	5.14	0.63	3.16	0.30	6.77	0.97	8.57
2	3.93	17.59	0.10	3.55	0.73	3.37	1.78	2.01	0.50	4.00	0.57	3.51	1.20	7.76
3	3.37	18.53	0.08	3.85	0.56	3.86	1.10	2.51	0.34	5.80	0.43	4.66	1.42	5.09
4	3.18	9.99	0.07	4.69	0.50	4.38	1.45	2.46	0.33	6.02	0.57	3.53	1.37	10.07
5	2.96	9.90	0.06	8.60	0.88	4.94	1.46	3.33	0.50	4.02	0.54	3.68	1.14	12.76
6	1.94	3.14	0.03	21.74	1.54	6.49	1.63	5.51	0.62	3.24	0.42	4.79	0.84	11.44
7	3.99	16.15	0.09	6.09	1.59	3.21	1.06	4.19	1.13	1.77	0.15	13.00	1.09	8.71
8	2.42	6.30	0.07	5.55	0.58	3.98	1.44	2.92	0.57	3.53	0.34	5.88	0.93	5.70

表 3　4 组试件识别的模型参数平均值及标准差

Tab.3　Average and standard deviation offour sets specimens model parameters

试件	K_0/(kN·mm^{-1})		K_1/(kN·mm^{-1})		P_1/kN		P_2/kN		P_3/kN		P_4/kN		γ	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
HA2	3.02	1.18	0.03	0.02	0.63	0.26	1.32	0.16	0.47	0.14	0.40	0.08	1.24	0.15
HB2	2.98	0.74	0.07	0.02	0.91	0.40	1.36	0.27	0.58	0.23	0.41	0.14	1.12	0.19
HB5	2.24	0.48	0.09	0.03	1.04	0.31	1.04	0.31	0.71	0.15	0.29	0.15	1.19	0.09
SS2	1.64	0.28	0.07	0.01	1.19	0.19	1.59	0.20	0.47	0.05	0.55	0.07	1.24	0.14



(a) 试件 HA2

(b) 试件 HB2

(c) 试件 HB5

(d) 试件 SS2

图 13 4 组试件的骨架曲线误差棒

Fig.13 Skeleton curves error bars of four sets specimens

3.3 验证识别的模型参数

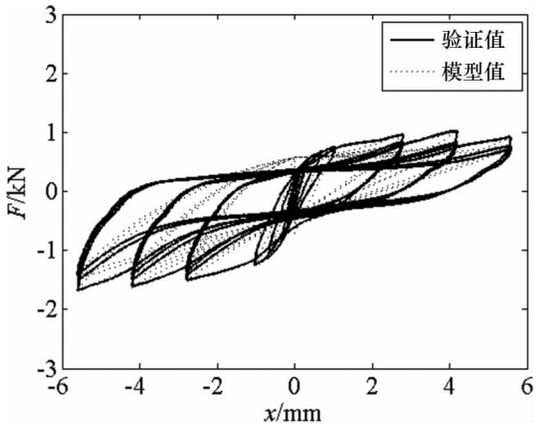
将表 3 识别的模型参数值代入公式(3),(5),(6),(7),(8),(11),(14)和(16),可以得到适合于 HA2,HB2,HB5,SS2 4 个系列的滞回曲线模型.为了验证模型的正确性和适用性,利用剩余两组试件编号 9 和 10 作为验证对象,将模型值和试验验证值进行对比,结果如图 14～图 17 所示.由图 14～图 17 可知,在弹性阶段模型的计算值与试验吻合良好.进入弹塑性阶段,滞回环的峰值和同级位移下的第 2 和第 3 圈峰值点吻合较好.最后一级的滞回曲线饱满程度有一定差异,主要原因是反复加载后期覆面板受挤压大,钉孔处变形较大,且钉子出现屈服.

根据贝叶斯概率方法识别得到的恢复力模型参数,应用本文提出的钉节点恢复力模型,可以计算相同条件下试件的恢复力曲线.识别的结果依赖于所采用的数据,识别得到的模型参数最有可能值及协方差矩阵可用于相同条件下钉连接节点的计算,为轻木结构整体非线性分析提供依据.

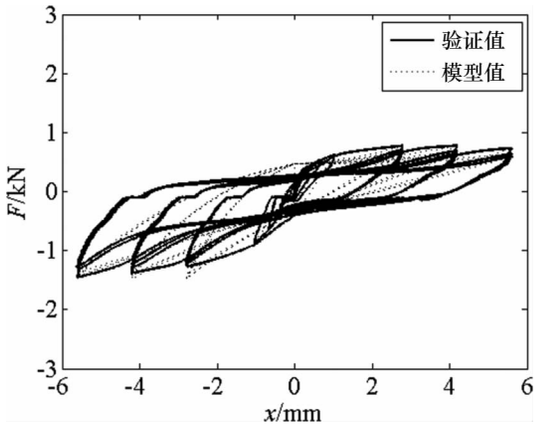
4 结 论

基于低周反复作用下轻型木结构钉连接节点的试验结果,采用贝叶斯方法研究该类型结构恢复力模型参数的识别问题,主要结论如下:

1)本文改进 Dolan 四段指数型模型,考虑正负方向不同的捏缩点和滑移效应,采用 7 个参数描述钉



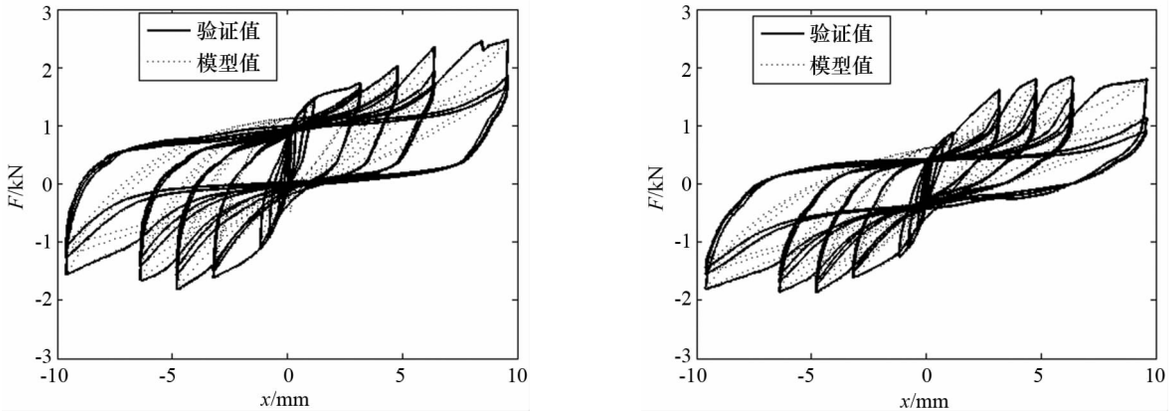
(a)编号 9



(b)编号 10

图 14 试件 HA2 模型参数的验证

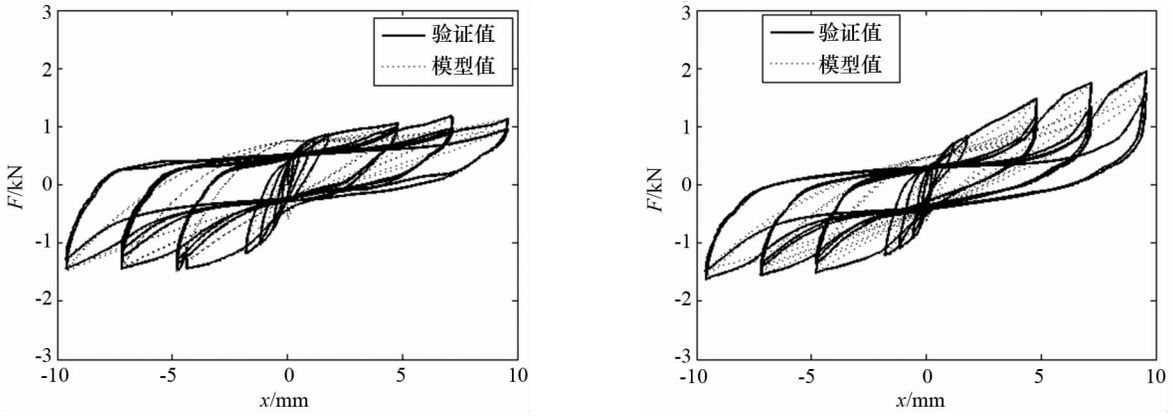
Fig.14 Validation model parameters of specimen HA2



(a)编号 9　　(b)编号 10

图 15　试件 HB2 模型参数的验证

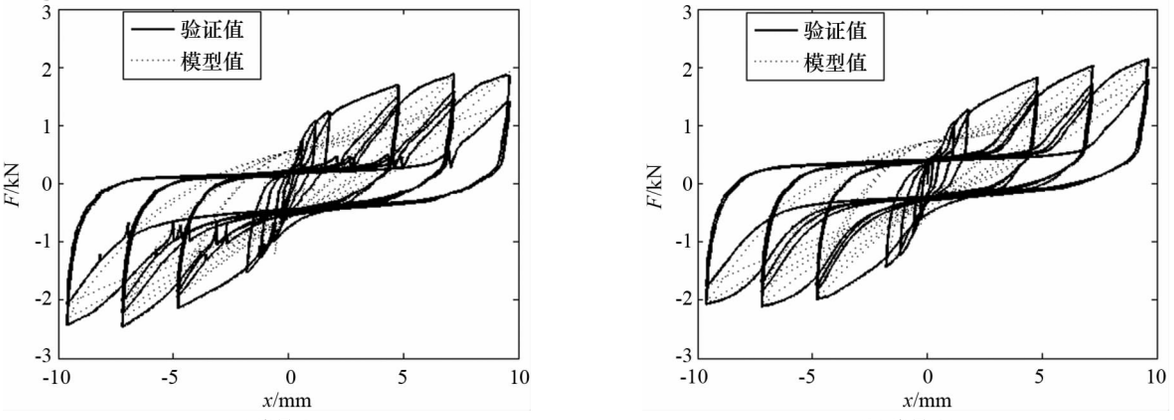
Fig.15　Validation model parameters of specimen HB2



(a)编号 9　　(b)编号 10

图 16　试件 HB5 模型参数的验证

Fig.16　Validation model parameters of specimen HB5



(a)编号 9　　(b)编号 10

图 17　试件 SS2 模型参数的验证

Fig.17　Validation model parameters of specimen SS2

节点的恢复力模型,计算得到的骨架曲线和滞回曲线与试验结果吻合良好.

2)基于贝叶斯理论构建了恢复力模型的参数识别框架,识别结果表明贝叶斯参数识别的精度依赖于所采用的数据的质量,识别得到的恢复力模型最有可能值和协方差矩阵可用于相同条件下钉节点的计算.

3)利用识别得到的恢复力模型参数,应用本文

提出的钉节点恢复力模型对其反应进行模拟,所得的计算结果与试验值符合较好,说明识别的结果具有良好的鲁棒性.

4)将贝叶斯理论扩展应用到恢复力模型的参数识别中,得到的参数可作为轻木结构整体非线性分析的依据,同时也为轻木结构的研究提供了一种新的方法.

参考文献

[1] LI M,FOSCHI R O,LAM F. Modeling hysteretic behavior of wood shear walls with a protocol-independent nail connection algorithm[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 138(1):99-108.

[2] ANDERSON E N,LEICHTI R J,SUTT JR E G,*et al*. Sheathing nail bending-yield stress: effect on cyclic performance of wood shear walls[J].Wood and Fiber Science,2007,39(4):536-547.

[3] XU J,DOLAN J D. Development of nailed wood joint element in ABAQUS [J]. Journal of Structural Engineering,2009,135(8): 968-976.

[4] 熊海贝,潘志付,康加华,等.轻型木结构面板钉节点单调加载试验研究[J]. 结构工程师,2011,27(6):106-112.
XIONG Haibei,PAN Zhifu,KANG Jiahua,*et al*. Test study on behavior of stud-to-sheathing nail joints under monotonic load in light wood frame constructions [J]. Structural Engineers,2011,27(6):106-112. (In Chinese)

[5] 熊海贝,化明星,康加华,等.轻型木结构钉节点低周反复试验研究[J]. 结构工程师,2011,27(S1):195-200.
XIONG Haibei,HUA Mingxing,KANG Jiahua,*et al*. Cyclic test research on nail joints of light wood frame structure[J]. Structural Engineers,2011,27(S1):195-200.(In Chinese)

[6] 康加华.轻型木结构房屋力学性能与设计理论研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2012:87-94.
KANG Jiahua.Performance and design methodology study on the wood framed construction[D]. Shanghai: College of Civil Engineering,Tongji University,2012:87-94.(In Chinese)

[7] DOLAN,DANIEL J. The dynamic response of timber shear walls [J]. Dissertation Abstracts International,1989,50(12): 302-318.

[8] FOLZ B,FILIATRAULT A. Cyclic analysis of wood shear walls [J]. Journal of Structural Engineering,2001,127(4):433-441.

[9] JUDD J P. Analytical modeling of wood-frame shear walls and diaphragms[D].Provo: School of Civil and Environmental Engineering,Brigham Young University,2005:100-120.

[10] 刘佩,袁泉,魏庆朝.钢筋混凝土柱恢复力模型参数识别的贝叶斯法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2013,41(9):72-75.
LIU Pei,YUAN Quan,WEI Qingzhao.Bayesian approach for restoring force model parameter identification of reinforced concrete column[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition,2013,41(9):72-75. (In Chinese)

[11] BECK J L,KATAFYGIOTIS L S. Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework[J].Journal of Engineering Mechanics,1998,124(4):455-461.

[12] LIU P,AU S K. Bayesian parameter identification of hysteretic behavior of composite walls[J].Probabilistic Engineering Mechanics,2013,34:101-109.

[13] 于建兵,郭正兴,管东芝,等. 新型预制装配框架混凝土梁柱节点抗震性能研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(7):42-47.
YU Jianbing, GUO Zhengxing, GUAN Dongzhi, *et al*. Research on seismic behavior of a new style precast concrete beam-to-column connection[J].Journal of Hunan University: Natural Sciences,2015,42(7):42-47. (In Chinese)

[14] MACK J J. The load-displacement curve for nailed joints[J]. Journal of the Institute of Wood Science,1977,7(6): 34-36.

[15] PELLICANE P J. Mechanical behavior of nailed joints with various side member materials[J].Journal of Testing and Evaluation,1991,19(2): 97-106.

[16] FOSCHI R O. Analysis of wood diaphragms and trusses,part I: diaphragms [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1977,4(3): 345-352.

[17] FONSECA F S. Cyclic loading response of reinforced concrete tilt-up structures with plywood diaphragms[D].Illinois:School of Civil and Environmental Engineering,University of Illinois at Urbana-Champaign,1997:55-63.

[18] 卢亚琴,胡岚,马克俭,等.新型 RC 网格式框架结构墙体试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(4):8-14.
LU Yaqin,HU Lan,MA Kejian,*et al*. Test research on the wall of new type RC grid frame structures[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2013,40(4):8-14. (In Chinese)

[19] STEWART W G,DEAN J A,CARR A J. The earthquake behavior of plywood sheathed shearwalls[C]//Proceedings of the International Conference on Timber Engineering. Bautechnik, German: WCTE,1998,2: 248-261.

[20] DUJIC B,KOCETOV-MISULIC T,GRAMATIKOV K,*et al*. Hysteretic responses of different sheathing to framing joints [C]//Proceeding of World Conference on Timber Engineering. Espoo Finland,Lahti: WCTE 2004 VTT,II: 407-412.

[21] AU S K,ZHANG F L. On assessing the posterior mode shape uncertainty in ambient modal identification[J]. Probabilistic Engineering Mechanics,2011,26(3):427-434.

[22] 熊海贝,吴玲,康加华. 加载制度对具有 Bouc-Wen 模型特征的结构反应的影响[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(1):143-151.
XIONG Haibei,WU Ling,KANG Jiahua. Effects of loading protocol on structural response with the Bouc-Wen model characteristics[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,2016,43(1):143-151. (In Chinese)

[23] 化明星.轻型木结构面板钉节点试验研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2012:22-30.
HUA Mingxing. Test research on nail joints of light wood frame structures[D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University,2012: 22-30.(In Chinese)