

文章编号:1674-2974(2016)01-0143-09

## 加载制度对具有 Bouc-Wen 模型特征的结构反应的影响\*

熊海贝<sup>1†</sup>, 吴玲<sup>1</sup>, 康加华<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:**根据 ISO 和 CUREE 两种低周反复加载制度并采用 Bouc-Wen 恢复力模型计算得到不同参考位移时轻型木结构的力学性能参数,通过对结构极限强度、极限位移、刚度、耗能和强度及刚度退化的分析得到如下的一些结论:1)不同加载制度下得到的轻型木结构力学性能参数是不同的,在利用试验结果对轻型木结构房屋进行性能评价时应该考虑加载制度和参考位移的影响;2)采用 ISO 加载制度,参考位移为 120 mm 时结构的极限强度和极限位移较参考位移为 60 mm 时分别增加 12%~13%和 66%~68%;采用 CUREE 加载制度,参考位移为 100 mm 时结构的极限强度和极限位移较参考位移为 50 mm 时分别增加 4%~6%和 55%~58%;3)结构的割线刚度受参考位移的影响较小;4)参考位移对 ISO 加载制度下的结构耗能、强度及刚度退化影响较大,而对 CUREE 加载制度下的影响较小。

**关键词:**反复加载制度;Bouc-Wen 恢复力模型;ISO 加载制度;CUREE 加载制度;力学性能

中图分类号:TU366.2

文献标识码:A

## Effects of Loading Protocol on Structural Response with the Bouc-Wen Model Characteristics

XIONG Hai-bei<sup>1†</sup>, WU Ling<sup>1</sup>, KANG Jia-hua<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji Univ, Shanghai 200092, China;  
2. Tongji Architectural Design (Group) Co Ltd, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** According to the ISO and CUREE cyclic test loading protocol, some mechanical performance parameters of wood framed constructions were calculated in Bouc-Wen hysteresis model. Based on analysis of the ultimate strength, ultimate displacement, stiffness, energy dissipation and strength and stiffness degradation of wood framed construction, some basic conclusions on the mechanical performance considering the influence of different loading protocols and reference displacements were obtained. The influence of the loading protocols and reference displacements should be taken into consideration in order to evaluate the mechanical performance parameter based on the test results exactly. Reference displacement equal to 120mm resulted in a 12%~13% and a 66%~68% increasing in ultimate

\* 收稿日期:2015-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5137838), National Natural Science Foundation of China(5137838);住房和城乡建设部2015年科技项目(2015-K2-030)

作者简介:熊海贝(1964-),女,上海人,同济大学教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: xionghaibei@tongji.edu.cn

strength and ultimate displacement respectively when compared with reference displacement equal to 60mm under ISO protocol. Reference displacement equal to 100mm resulted in a 4%~6% and a 55%~58% increasing in ultimate strength and ultimate displacement respectively when compared with reference displacement equal to 50mm under CUREE protocol. The loading protocol appeared to have little influence on the scant stiffness of the wood framed construction. It was shown that the ISO protocol with different reference displacements had more effect on the energy dissipation and strength and stiffness degradation when compared with the CUREE protocol.

**Key words:** cyclic test loading protocol; Bouc-Wen hysteresis model; ISO loading protocol; CUREE loading protocol; mechanical performance

北美轻型木结构房屋中,木框架剪力墙作为主要的抗侧力构件,其力学性能决定了房屋结构的整体性能.因此,许多的国外研究者对木框架剪力墙的力学性能做了大量的试验研究.轻型木结构设计规范中以表格形式给出的木框架剪力墙抗剪强度设计值是 APA(美国工程木协会)根据 ASTM E72<sup>[1]</sup>和 ASTM E564<sup>[2]</sup>对尺寸为 2.44 m×2.44 m 的墙体进行单调加载试验得到的经验值.然而,通过单调加载试验不能完全了解轻型木结构房屋在地震作用下的反应.

为此,近年来许多研究者采用低周反复加载试验方法对木框架剪力墙进行力学性能的研究. ASTM E2126-11<sup>[3]</sup>中提供了 3 种不同的针对木框架剪力墙低周反复试验的加载制度,分别是 Sequential Phased Displacement (SPD), ISO Displacement Schedule (ISO) 和 CUREE Basic Loading Protocol (CUREE). 其中,SPD 加载制度循环次数多,试验中观察的典型破坏机制与地震作用下观察到的破坏具有显著不同,因此 SPD 加载机制没有得到普遍认可,故本文不讨论 SPD 加载制度.除以上 3 个常用的低周反复加载制度外,Forintek Canada Corp<sup>[4]</sup>也开发了一种加载制度(FCC),另外欧洲の木结构试验规范<sup>[5]</sup>(CEN 2001)也提出了一种用于轻型木结构研究的低周反复加载(CEN short protocol),Ming<sup>[6]</sup>曾对采用后两种加载制度得到的试验结果进行过讨论,但是目前这两种加载制度使用不多.必须指出不同的加载制度下得到的墙体力学性能指标是不同的,各加载制度均对试验中参考位移的选取作了不同的规定,这给大量的试验结果之间的直接比较带来了困难.目前我国尚无对此展开深入研究,虽然在钢筋混凝土构件试验中有文章运用低周反复加载制度<sup>[7]</sup>,有文章提到了加载制度对结构性能的影响<sup>[8-9]</sup>,但讨论的是不同加载路径、循环次数及幅值增量的影响.范佳南、吕品田等<sup>[10]</sup>

提到了加载制度对木桁架整体性能的影响,但只研究了不同持荷时间对木材蠕变的影响.

基于此,本文对于 ISO 和 CUREE 两种低周反复加载制度,采用 Bouc-Wen 恢复力模型计算得到不同参考位移时轻型木结构的力学性能参数,研究不同加载制度下轻型木结构房屋性能,着重研究加载制度对结构极限强度、极限位移、刚度、耗能和强度及刚度退化的影响.

## 1 轻型木结构试验的低周反复加载制度

### 1.1 循环次数及位移幅值

低周反复加载制度之间的不同主要体现在参考位移、循环数量及每个荷载步控制位移的不同. ISO 加载制度起初是专门为木结构中的连接节点提出的一个加载制度,之后也被用于木结构(构件)的试验研究,该制度主要关注结构最大承载力处的性能,分为两个加载模式进行加载,第 1 个加载模式中共 5 个荷载步,每个荷载步各 1 个循环,位移幅值分别为参考位移的 1.25%, 2.5%, 5%, 7.5% 和 10%; 第 2 个加载模式中,每个加载步有 3 个循环,且每个循环的位移幅值相同,每个荷载步的位移幅值为参考位移的 20%, 40%, 60%, 80% 和 100%, 当位移幅值超过参考位移时,以 20% 参考位移的增幅继续按第 2 个模式加载后终止试验. CUREE 加载制度是专门为远场地震地面运动下木结构的滞回反应制定的,分为 3 个加载模式进行加载,第 1 个加载模式中共有 3 个荷载步,第 1 个荷载步有 6 个相同位移幅值的循环,位移幅值为参考位移的 5%, 后两个荷载步各有 7 个同位移幅值的循环,位移幅值分别为参考位移的 7.5% 和 10%; 第 2 个加载模式共有 2 个荷载步,每个荷载步有 4 个循环,每个荷载步初始循环的位移幅值分别为参考位移的 20% 和 30%, 后 3 个循环的位移幅值较初始循环削减 25%; 第 3 个加载

模式中,每个荷载步有 3 个循环,每个荷载步初始循环的位移幅值为参考位移的 40%,70%和 100%,后两个循环的位移幅值较初始循环削减 25%,当位移幅值超过参考位移后,以不大于 50%参考位移的增幅继续按第 3 个加载模式加载直至结构发生破坏.图 1 和图 2 分别是 ISO 加载制度和 CUREE 加载制度的位移加载曲线.

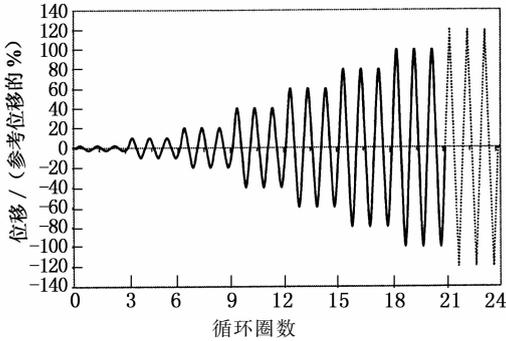


图 1 ISO 加载制度  
Fig. 1 ISO loading protocol

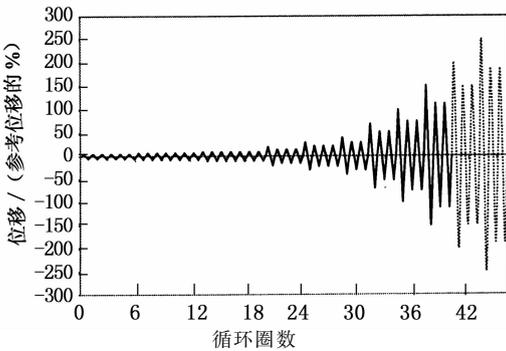


图 2 CUREE 加载制度  
Fig. 2 CUREE loading protocol

### 1.2 参数定义及参考位移的取值

图 3 中峰值荷载即为极限荷载,极限位移即为承载力下降至极限荷载的 80% ( $p_u$ ) 所对应的位移  $\Delta_u$ .

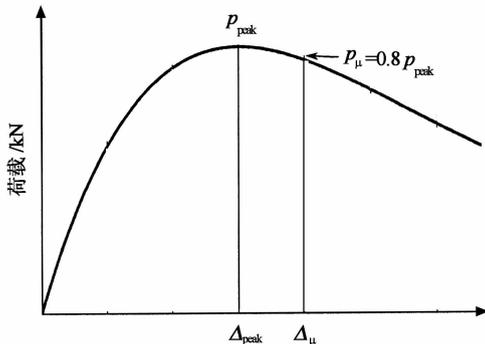


图 3 骨架曲线  
Fig. 3 Envelope curve

根据 ASTM E2126-11<sup>[3]</sup>,ISO 加载制度和 CUREE 加载制度所采用的参考位移均为单调加载下墙体承载力下降至极限荷载的 80% 所对应的位移.不同的剪力墙墙体单调加载得到的荷载位移曲线不尽相同,因此所得到的参考位移也是不同的.

## 2 Bouc-Wen 恢复力模型特征

首先介绍基于非线性微分方程的 Bouc-Wen 滞回模型,然后根据试验结果<sup>[11]</sup>通过优化方法得到 Bouc-Wen 模型的 13 个参数.

图 4 所示为一整体轻型木结构房屋的荷载位移曲线,从中可以看到在低周反复加载下木结构表现出明显的非线性性质,主要是荷载位移的非线性、强度与刚度的退化及明显的捏拢效应,整个荷载位移曲线呈反“S”形.因此用以模拟轻型木结构房屋低周反复荷载下反应的恢复力模型必须能反映木结构以上这些明显的非线性性能. Bouc-Wen 模型经过许多研究者的改进,具备了反复荷载作用下,模拟结构(构件)强度与刚度退化及捏拢等非线性效应的功能.

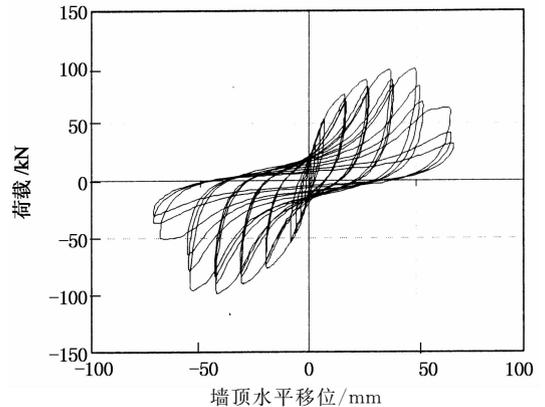


图 4 典型的轻型木结构房屋荷载位移滞回曲线<sup>[11]</sup>  
Fig. 4 Hysteresis curve of typical light wood structure buildings<sup>[11]</sup>

### 2.1 Bouc-Wen 恢复力模型简介

根据 Bouc<sup>[12]</sup>和 Wen<sup>[13]</sup>的研究,动力方程中与结构刚度相关的恢复力项可以表示为:

$$R = \alpha k u + (1 - \alpha) k z \tag{1}$$

式中  $R$ ,  $z$  及  $u$  分别表示结构恢复力、滞回位移和相对位移,可用如下非线性微分方程表示:

$$\dot{z} = A \dot{u} - \beta |\dot{u}| |z|^{n-1} z - \gamma \dot{u} |z|^n \tag{2}$$

其中,点( $\cdot$ )表示对时间的微分,式(1)和(2)合称为经典的 Bouc-Wen 恢复力模型. Baber<sup>[14-15]</sup>在经典的 Bouc-Wen 恢复力模型基础上引入了基于耗能的

强度与刚度退化系数  $\nu$  和  $\eta$  及反映捏拢效应的函数  $h(z)$  .

此时  $z$  与  $u$  的非线性微分关系式可如式(3)表示:

$$\dot{z} = h(z) \left\{ \frac{A\dot{u} - \nu(\beta|\dot{u}| |z|^{n-1}z + \gamma\ddot{u} |z|^n)}{\eta} \right\} \quad (3)$$

一般而言,结构刚度与强度的退化与结构经历的水平荷载作用持时与强度有关,因此 Baber 等<sup>[15]</sup> 用滞回环所包围的面积(耗能)来量化刚度与强度的退化:

$$E(t) = \int_0^t (1 - \alpha)kz(t)\dot{u}(t)dt \quad (4)$$

在实际应用中由于  $\epsilon(t) = \int_0^t z(t)\dot{u}(t)dt$  与上式成线性比例关系,一般用  $\epsilon(t)$  作为考量结构刚度与强度退化的参数.强度与刚度退化系数表达式如式(5):

$$\nu(\epsilon) = 1.0 + \delta_\nu \epsilon \quad (5)$$

$$\eta(\epsilon) = 1.0 + \delta_\eta \epsilon \quad (6)$$

$\delta_\nu$  和  $\delta_\eta$  是控制强度和刚度随着能耗退化程度的参数. Foliente<sup>[16]</sup> 在 Baber 等<sup>[15]</sup> 的基础上又对捏拢函数  $h(z)$  进行了研究,提出更能反映出轻型木结构在反复荷载作用下捏拢性特点的  $h(z)$ , 表达式如式(7)~式(10):

$$h(z) = 1.0 - \zeta_1 e^{[-(z \times \text{sgn}(\dot{u}) - q_\mu)^2 / \zeta_2^2]} \quad (7)$$

其中:

$$\zeta_1(\epsilon) = \zeta_s [1.0 - e^{-\beta \epsilon}] \quad (8)$$

$$\zeta_2(\epsilon) = (\psi + \delta_\psi \epsilon)(\lambda + \zeta_1(\epsilon)) \quad (9)$$

$$z_\mu = \left( \frac{A}{\nu(\beta + \gamma)} \right)^{1/n} \quad (10)$$

图 5 为经过改进且考虑强度与刚度退化和捏拢效应的  $z(t)$  与  $u(t)$  的关系曲线,可以看到其中后 3 个循环的滞回曲线与轻型木结构房屋在低周反复加载作用下的某个加载位移幅值控制下的荷载位移滞回曲线形态相似(图 6<sup>[10]</sup>).

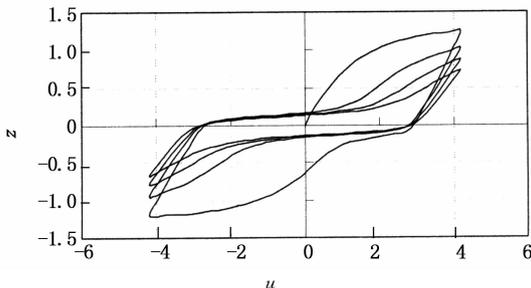


图 5 Bouc-Wen 恢复模型考虑结构非线性的滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curve of Bouc-Wen restoring force model with structural nonlinear

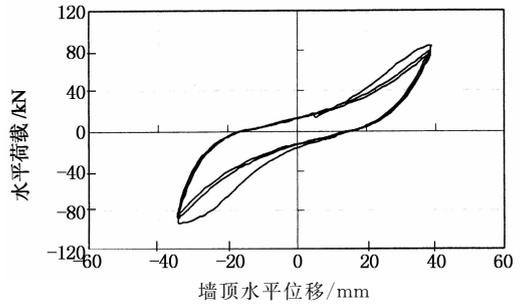


图 6 某控制位移下轻型

木结构房屋荷载位移滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curve of the light wood structure building under some control displacement

经过多位研究者不断地改进, Bouc-Wen 恢复力模型由最初的 5 参数发展到了 13 个参数, 分别是:  $A, \alpha, \beta, \gamma, n, \delta_\nu, \delta_\eta, \zeta_s, q, p, \psi, \delta_\psi, \lambda$ . 各个参数的意义见表 1, 这些参数使 Bouc-Wen 恢复力模型具有模拟结构(构件)在反复荷载作用下强度与刚度的退化、捏拢等重要特性, 并且这些特性与结构(构件)所经历的加载历史有关.

表 1 修正后的 Bouc-Wen 非线性恢复力模型参数  
Tab. 1 Modified Bouc-Wen nonlinear restoring force model parameters

参数	意义或作用
经典 Bouc-Wen 模型 <sup>[12-13]</sup>	
$A$	控制恢复力曲线初始切线刚度的参数
$\alpha$	线性恢复力、非线性恢复力占总恢复力的百分比( $0 < \alpha < 1$ )
$\beta, \gamma$	控制荷载位移滞回环的形状参数 ( $\beta > 0$ )
$n$	控制荷载位移滞回曲线在位移零点附近的平坦程度
考虑强度与刚度退化 <sup>[14-15]</sup>	
$\delta_\nu$	控制结构或构件在反复荷载作用下的强度退化
$\delta_\eta$	控制结构或构件在反复荷载作用下的刚度退化
考虑捏拢效应 <sup>[16]</sup>	
$\zeta_s$	控制荷载位移滞回曲线的捏拢程度(一般有 $\zeta_s < 0.98$ )
$q$	荷载位移曲线出现捏拢处的恢复力占总恢复力的百分比
$p$	荷载位移曲线捏拢发生时控制曲线斜率下降程度
$\psi$	荷载位移曲线总捏拢量的补充参数
$\delta_\psi$	控制基于能量的捏拢率参数的大小
$\lambda$	控制 $\zeta_1(\epsilon)$ 和 $\zeta_2(\epsilon)$ 的变化率

## 2.2 低周反复荷载下的轻型木结构房屋抗侧力性能模型

为了在不同加载制度下考察轻型木结构房屋模型的力学性能, 先根据一轻型木结构房屋低周反复荷载试验结果<sup>[10]</sup> 求解 Bouc-Wen 模型中的 13 个参数, 注意这些参数反映了轻型木结构房屋在反复荷载下的重要特点即荷载位移非线性、强度与刚度退化、捏拢等, 房屋模型试验得到的荷载位移滞回曲线如图 4 所示.

根据试验所得的数据(时间点及对应位移)并预估 13 个参数即可采用 Bouc-Wen 模型计算求得对应的力,每个时间点都有对应力的计算值  $Fm_i$ ,构造目标函数如式(11):

$$\Delta F(\alpha, \beta, \gamma, \dots) = \sum_{i=0}^m (Ft_i - Fm_i)^2 \quad (11)$$

式中  $Ft_i$  为试验得到的恢复力数据点,  $Fm_i$  为拟合得到的恢复力数据点,  $m$  为试验所采集的数据点数,  $\Delta F$  为关于 Bouc-Wen 模型 13 个参数的函数. 假设 Bouc-Wen 恢复力模型只含有一个参数,那么求解该参数实质为对一个一元非线性函数的数值求根问题,当含有 13 个参数时,求解这 13 个参数的问题实质则变为对一个多元非线性函数的数值求根问题. 利用 EXCEL 中的规划求解功能就可以实现求解 Bouc-Wen 恢复力模型中 13 个参数的问题,实质为一个不断迭代调整,直至  $\Delta F$  满足一定条件(小于某一假定数值),进而确定 13 个参数的问题. 按上述方法根据试验数据拟合得到的 Bouc-Wen 恢复力模型中的 13 个参数结果如下:  $A = 1$ ,  $\alpha = 0.01$ ,  $\beta = 0.11$ ,  $\gamma = -0.026$ ,  $n = 1$ ,  $\delta_v = 0.000\ 002\ 5$ ,  $\delta_\eta = 0.000\ 25$ ,  $\zeta_s = 0.95$ ,  $q = 0.1$ ,  $p = 0.075$ ,  $\psi = 0.73$ ,  $\delta_\psi = 0.000\ 5$ ,  $\lambda = 0.65$ . 图 7 所示为拟合的滞回曲线与试验所得到的曲线比较,图 8 是两者耗能的比较. 拟合和试验所得的结构极限荷载分别为 99.07 kN 和 97.98 kN,拟合和试验所得的结构极限位移分别为 68.28 mm 和 64.56 mm,两者吻合良好.

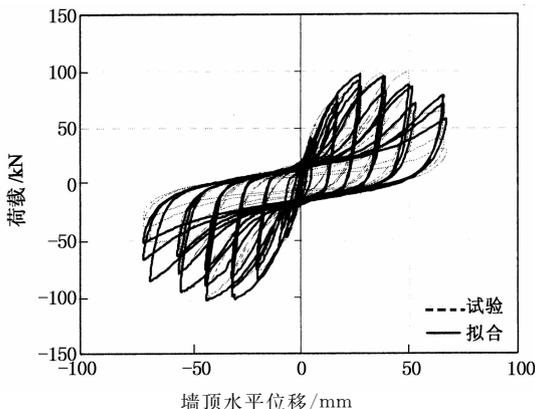


图 7 荷载位移曲线试验值与拟合值比较  
Fig. 7 Comparison about testing and fitting values of hysteresis curve

求得 Bouc-Wen 模型中的 13 个参数后,该模型实质就是一个确定性的非线性微分方程,当给定位移后,就可以求解得到相应的力值,以下部分将利用

该模型来探讨不同加载制度下轻型木结构房屋力学性能参数的变化.

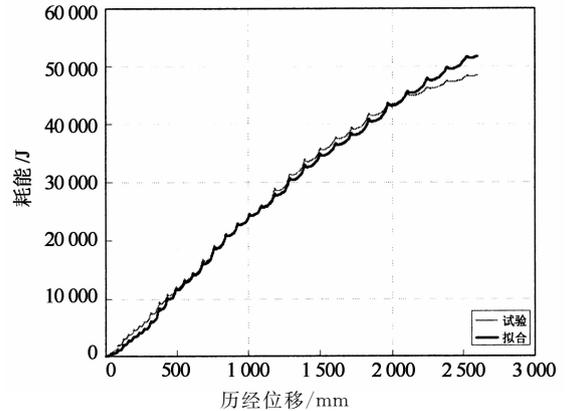


图 8 结构耗能试验值与拟合值比较  
Fig. 8 Comparison about testing and fitting values of energy dissipation

图 9,图 10 分别为 CUREE 和 ISO 加载制度下利用 Bouc-Wen 恢复力模型计算得到的轻型木结构房屋荷载位移曲线,从图中可以明显看出轻型木结构荷载位移曲线的 3 个特征即荷载位移非线性、强度与刚度退化,以及捏拢效应. ISO 和 CUREE 加载制度在各个参考位移下荷载位移滞回曲线的包络线示于图 11~图 12 中. 从包络线的形态可以看到,不同参考位移时包络线的前半部分基本上是重合的,即不同参考位移对结构的刚度影响不大;但包络线的后半部分与参考位移的选取有很大关系,参考位移越大,得到的结构极限位移也越大.

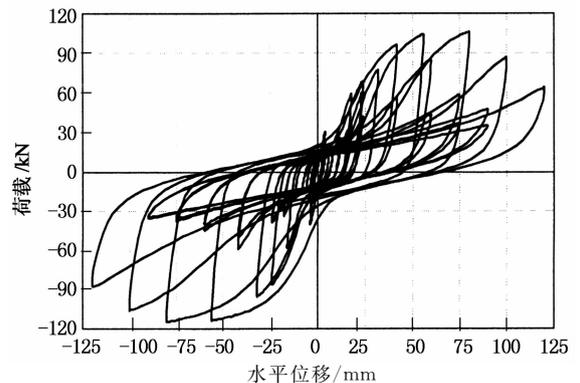


图 9 CUREE 加载制度下结构荷载位移滞回曲线  
Fig. 9 Hysteresis curve under CUREE loading protocol

### 3 不同加载制度对轻型木结构房屋抗侧性能的影响

本文选用如表 2 的参考位移,对 ISO 加载制度

和 CUREE 加载制度下得到的结构反复荷载作用下的结构性能进行研究. 加载位移波形采用正弦波, 其中 ISO 加载制度下, 参考位移为 60 mm 时最终的加载位移为 1.2 倍参考位移, 其余为 1 倍参考位移; CUREE 加载制度下, 最终的加载位移都为 1.5 倍参考位移. 通过模型分析, 从结构极限强度、极限位移、刚度、耗能和强度及刚度退化几个方面着重研究不同加载制度对轻型木结构房屋性能的影响.

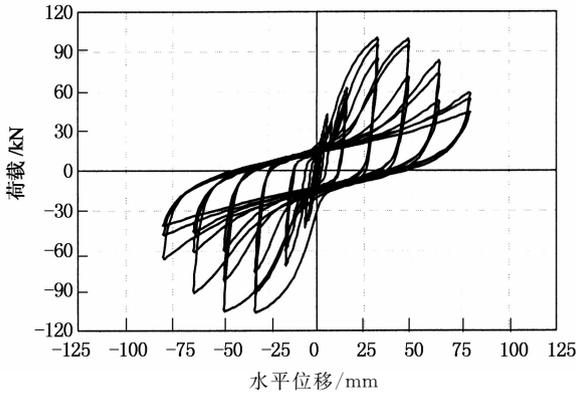


图 10 ISO 加载制度下结构荷载位移滞回曲线  
Fig. 10 Hysteresis curve under ISO loading protocol

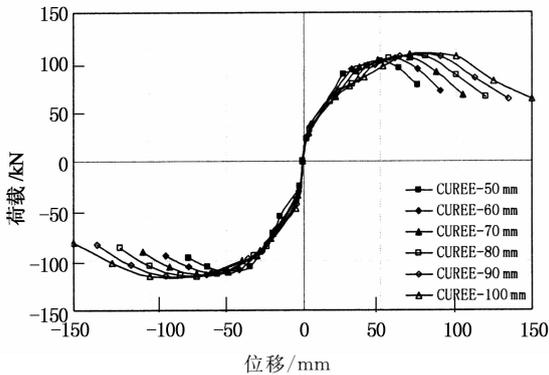


图 11 CUREE 加载制度下结构包络线  
Fig. 11 Envelope curve under CUREE loading protocol

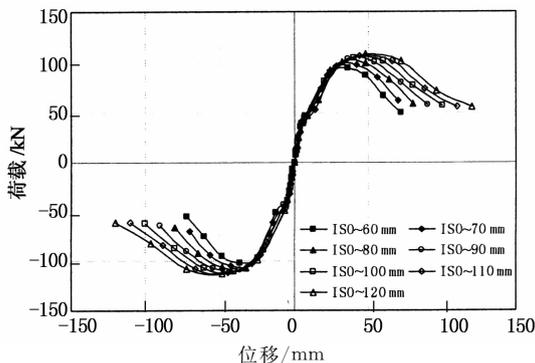


图 12 ISO 加载制度下结构包络线  
Fig. 12 Envelope curve under ISO loading protocol

表 2 Bouc-Wen 模型分析中采用的 ISO 和 CUREE 加载制度的参考位移  
Tab. 2 Reference displacements of ISO and CUREE loading protocol in the Bouc-Wen model analysis

加载制度	循环周期/s	参考位移/mm	最大加载位移
ISO	50	60	1.2 倍参考位移
	50	70	
	50	80	1 倍参考位移
	50	90	
	50	100	
	50	110	
CUREE	50	120	1.5 倍参考位移
	50	50	
	50	60	
	50	70	
	50	80	
	50	90	

### 3.1 极限强度

图 13 所示为不同控制位移下, 采用 ISO 和 CUREE 加载制度得到的结构极限荷载, 即极限强度. 从图中可以看到参考位移值取得越大, 得到的结构极限强度也越大, 在 ISO 加载制度下, 120 mm 参考位移下得到的结构极限强度较 60 mm 参考位移下得到的极限强度增加约 12.7%; 在 CUREE 加载制度下, 100 mm 参考位移下得到的结构极限强度较 50 mm 参考位移下得到的极限强度增加约 5.8%. 当加载循环的周期确定时, 参考位移越大, 则位移加载速率也越大, 因此参考位移越大, 结构的极限强度也越大. Jeffrey<sup>[17]</sup>曾采用 CUREE 加载制度对不同参考位移下结构的极限强度进行过试验研究, 研究表明, 参考位移越大, 墙体的极限强度也越大, 这个趋势性与本文采用 Bouc-Wen 恢复力模型计算得到的结构极限强度变化趋势一致. 通过分析可以知道, 结构的极限强度值与选取的加载制度及参考位移有关.

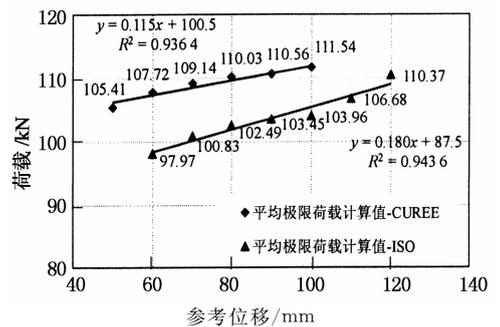


图 13 不同参考位移下结构极限强度  
Fig. 13 Ultimate strength under different reference displacements

### 3.2 结构变形能力

图 14 所示为不同参考位移下,采用 ISO 和 CUREE 加载制度得到的结构极限强度对应的峰值位移.从图中可以看到,不同加载制度得到的峰值位移是不同的. ISO 和 CUREE 加载制度下结构的峰值位移先随着参考位移增大而增大,最后,随着参考位移的增大而减小.图 15 所示为不同控制位移下,采用 ISO 和 CUREE 加载制度得到的极限位移,极限位移定义为荷载下降至 80% 极限强度对应的位移.从图中可以看到不同加载制度得到的结构极限位移是不同的,结构的极限位移随着参考位移的增大而增大.在 ISO 加载制度下,120 mm 参考位移下得到的结构极限位移较 60 mm 参考位移下得到的极限位移增加约 66.8%;在 CUREE 加载制度下,100 mm 参考位移下得到的结构极限位移较 50 mm 参考位移下得到的极限位移增加约 57.1%.

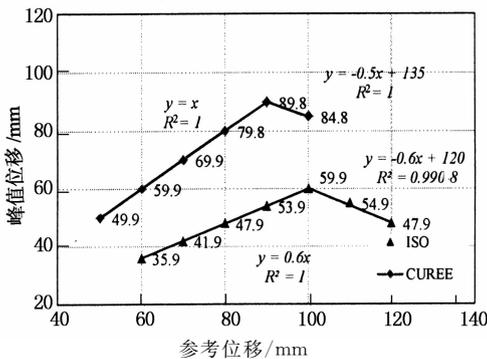


图 14 不同参考位移下极限荷载对应位移  
Fig. 14 Displacements of ultimate strength under different reference displacements

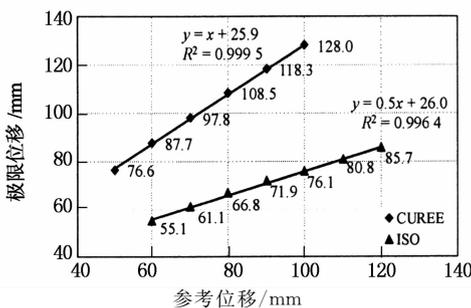


图 15 不同参考位移下的极限位移  
Fig. 15 Ultimate displacements under different reference displacements

### 3.3 刚度

轻型木结构领域的常用刚度定义方法有 4 种,分别是 80%<sup>[18]</sup>,40%<sup>[5]</sup>和 33%<sup>[4]</sup>极限强度时的割线刚度,及位移为  $H/250$  ( $H$  为墙体高度)时的割线刚度<sup>[19]</sup>,其中 40% 极限强度时的割线刚度比较常用,以下对不同加载制度时该刚度值的变换进行讨

论.图 16 所示为不同控制位移下,采用 ISO 和 CUREE 加载制度得到的结构割线刚度.从图中可以看到,相同加载制度时,不同参考位移下得到的结构割线刚度变化趋势较小,但是 ISO 加载制度下得到的割线刚度始终比 CUREE 加载制度下得到的结构刚度要大.

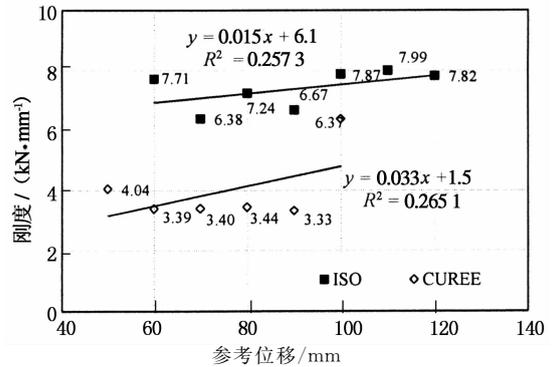


图 16 不同加载制度下结构的割线刚度比较  
Fig. 16 Comparison about secant stiffness under different loading protocols

### 3.4 耗能和刚度与强度退化

结构的耗能性能是结构抗震性能的重要指标,数值上等于滞回曲线所包围的面积.图 17 所示为 ISO 加载下结构的耗能曲线,图 18 所示为 CUREE 加载下结构的耗能曲线.从两种加载制度下得到的结构耗能曲线可以看到,CUREE 加载制度下,结构的耗能历程与所采用的参考位移大小相关性不大,与 ISO 加载制度下结构的耗能随着参考位移变化的规律截然不同.

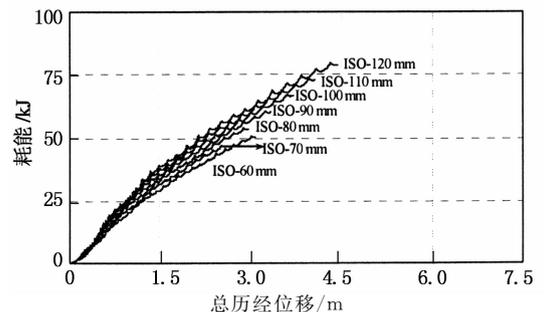


图 17 ISO 加载制度下结构的耗能  
Fig. 17 Energy dissipation under ISO loading protocol

结构的刚度退化系数  $\eta(\epsilon)$  与强度退化系数  $\nu(\epsilon)$  的定义见式(5),式(6)及表 1.图 19 和图 20 为 ISO 和 CUREE 加载制度下,结构强度和刚度退化系数的示意,从图中可以看到 ISO 加载制度得到的结构强度和刚度退化系数明显随着参考位移的增大而减小,而 CUREE 加载制度得到的结构强度和刚

度退化系数与参考位移的大小没有明显的相关性;参考位移越大,加载速率也越大,因此结构的刚度和强度退化就越小,因此按照耗能的计算方法得到的耗能值也越大。

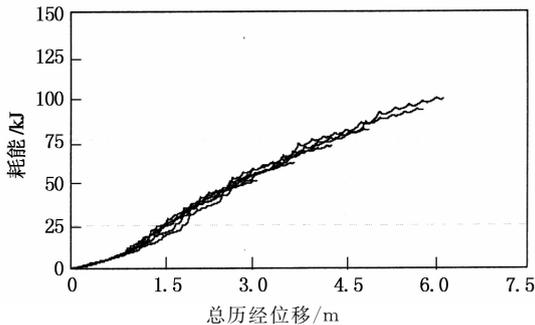


图 18 CUREE 加载制度下结构的耗能  
Fig. 18 Energy dissipation under CUREE loading protocol

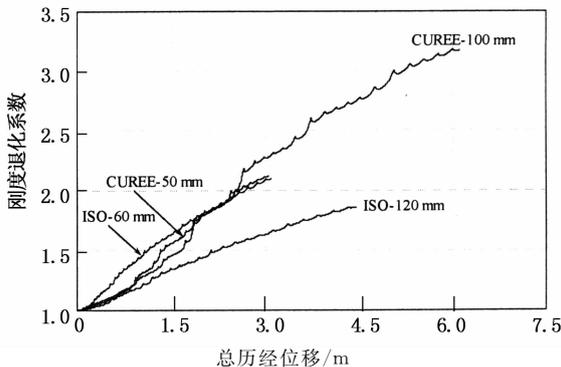


图 19 结构刚度退化系数  
Fig. 19 Structural stiffness degradation coefficients

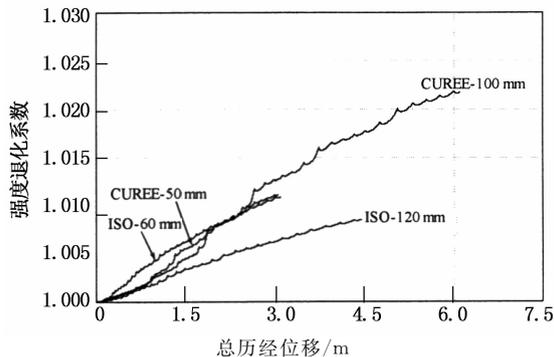


图 20 结构强度退化系数  
Fig. 20 Structural strength degradation coefficients

## 4 结论

本文通过分析 ISO 和 CUREE 两种加载制度对轻型木结构房屋性能参数的影响,可以得出不同加载制度下得到的轻型木结构力学性能参数是不同

的,所以在利用试验结果对轻型木结构房屋进行性能评价时应该考虑加载制度和参考位移的影响。具体结论如下:

1)采用同一加载制度时,不同参考位移下得到的结构极限强度是不同的,采用 ISO 加载制度,参考位移为 120 mm 时结构的极限强度较参考位移为 60 mm 时增加 12%~13%;采用 CUREE 加载制度,参考位移为 100 mm 时结构的极限强度较参考位移为 50 mm 时增加 4%~6%。参考位移越大,得到的结构极限强度也越大。

2)采用同一加载制度时,结构的极限位移随着参考位移的增大而增大,采用 ISO 加载制度,参考位移为 120 mm 时结构的极限位移较参考位移为 60 mm 时增加 66%~68%;采用 CUREE 加载制度,参考位移为 100 mm 时结构的极限位移较参考位移为 50 mm 时增加 55%~58%。

3)采用同一加载制度时,按照 40% 极限强度定义的割线刚度受参考位移的影响较小,且 ISO 加载制度下得到的割线刚度始终比 CUREE 加载制度下得到的结构刚度要大。

4)ISO 加载下得到的结构耗能值随着参考位移的增大而增大,而 CUREE 加载制度下,结构的耗能历程与所采用的参考位移大小相关性不大。

5)参考位移对 CUREE 加载制度下结构的强度和刚度退化系数影响较小,而对 ISO 加载制度下结构的强度和刚度退化系数影响较大(参考位移越大,得到的结构强度和刚度退化系数越小)。

## 参考文献

- [1] ASTM E72-15 Standard test methods of conducting strength test of panels for building construction[S]. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2014:8-11.
- [2] ASTM E564-06 Standard practice for static load test for shear resistance of framed walls for buildings[S]. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2012:3-5.
- [3] ASTM E2126-11 Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings. pennsylvania[S]. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2012:7-10.
- [4] KARACABEYLI E. Lateral resistance of nailed shear walls subjected to static and cyclic displacements [C]// Earthquake Performance and Safety of Timber Structures. Canada, Vancouver: Research Report, PS 49th Annual Meeting, 1995:2-

- 4.
- [5] CEN EN TC 124.117 Timber structures-test methods-cyclic testing of joints made with mechanical fasteners[S]. Brussels, Belgium; European Committee for Standardization, 2001;9-13.
- [6] MING H, FRANK L, HELMUT G L P. Influence of cyclic test protocols on performance of wood-based shear walls [J]. Canada Journal of Civil Engineering, 1998(25): 539-550.
- [7] 齐岳, 郑文忠. 低周反复荷载下核心高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(12):6-12.  
 QI Yue, ZHENG Wen-zhong. Experimental study of the seismic behavior of concrete columns with high strength core under low cyclic loading[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(12):6-12. (In Chinese)
- [8] 肖诗云, 曹闻博, 潘浩浩. 不同加载速率下钢筋混凝土梁力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(12):142-146.  
 XIAO Shi-yun, CAO Wen-bo, PAN Hao-hao. Experimental study on mechanical behavior of reinforced concrete beams at different loading rates [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12):142-146. (In Chinese)
- [9] 史庆轩, 王朋, 李坤, 等. 加载制度对新型型钢混凝土柱的抗震性能影响[J]. 工程力学, 2014, 31(3):152-159.  
 SHI Qing-xuan, WANG Peng, LI Kun, *et al.* Influence of loading regimes on seismic behavior of new type steel reinforced concrete columns [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3):152-159. (In Chinese)
- [10] 范佳南, 吕品田, 龚洪. 加载制度对轻型木桁架性能影响的试验研究[J]. 建筑施工, 2012(11):1098-1100.  
 FAN Jia-nan, LI Pin-tian, GONG Hong. Experimental study on impact of loading system upon lightweight wood truss performance [J]. Building Construction, 2012(11):1098-1100. (In Chinese)
- [11] 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: 48-50.  
 KANG Jia-hua. Performance and design methodology study on the wood framed construction[D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2012: 48-50. (In Chinese)
- [12] BOUC R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis[C]//Abstract Proc. Czechoslovakia; Proceedings of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillation, 1967.
- [13] WEN Y K. Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation [J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 47:150-154.
- [14] BABER T T, WEN Y K. Random vibration of hysteretic degrading systems [J]. Journal of Applied Mechanics, 1981(107): 1069-1087.
- [15] BABER T T, NOORI M N. Modeling general hysteresis behavior and random vibration application[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 1986(108): 411-420.
- [16] FOLIENTE Greg C. Hysteretic modeling of wood joints and structural systems [J]. Journal of Structural Engineering, 1995(121):1013-1022.
- [17] JEFFREY G L, RAKESH G, THOMAS H M. Effects of reference displacement and damage accumulation in wood shear walls [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2004(130): 470-479.
- [18] FEMA-273, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings[S]. Washington D C; Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1996:213-225.
- [19] 程海江, 倪春, 吕西林. 有翼缘和竖向荷载的带洞口木框架剪力墙的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 33-47.  
 CHENG Hai-jiang, NI Chun, LV Xi-lin. Performance of perforated wood-frame shear walls with transverse walls and vertical load [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 33-47. (In Chinese)