工程科学学报，第 38 卷，第 1 期：149－157，2016 年 1 月
Chinese Journal of Engineering，Vol. 38，No. 1：149－157，January 2016
DOI：10.13374/j.issn2095－9389.2016.01.020；http：//journals.ustb.edu.cn

交叉层积木数值模拟研究以及连接损伤分析

沈银澜[1,2)]，牟在根[1)✉]，Johannes Schneider[3)]，Siegfried F. Stiemer[3)]

1）北京科技大学土木与环境工程学院，北京 100083　2）中国电子工程设计院，北京 100142
3）英属哥伦比亚大学应用学院土木工程系，温哥华 V6T 1Z4，加拿大
✉ 通信作者，E-mail：zgmu@ces.ustb.edu.cn

摘　要　木建筑由于结构冗余性以及钉接节点超强的吸能耗能能力在抗震中表现良好．交叉层积木是一种新型的建筑材料．本文以交叉层积木 3 种柔性连接试验为基础，采用 OpenSees 中 Pinching4 自定义模型模拟连接滞回曲线的高度非线性、强度退化、刚度退化和捏拢现象．基于主次半循环累积能量的损伤模型，对交叉层积木连接进行损伤分析，并提出该连接的 5 种性能水平的损伤指数．Pinching4 模型与连接试验结果吻合较好，进一步证明该模型模拟木节点连接性能的可行性和有效性．损伤因子对应的损伤程度基本符合试验规律，其平均值在合理范围内，计算结果离散性较低．

关键词　交叉层积木结构；连接；数值研究；损伤分析；损伤累积模型
分类号　TU398⁺.6

Numerical simulation study and damage analysis of cross laminated timber connections

SHEN Yin-lan[1,2)]，*MU Zai-gen*[1)✉]，*Johannes Schneider*[3)]，*Siegfried F. Stiemer*[3)]

1）Schoolof Civil and Environmental Engineering，University of Science and Technology Beijing，Beijing 100083，China
2）China Electronics Engineering Design Institute，Beijing 100142，China
3）Department of Civil Engineering，Faculty of Applied Science，University of British Columbia，Vancouver V6T 1Z4，Canada
✉ Corresponding author，E-mail：zgmu@ces.ustb.edu.cn

ABSTRACT　Due to structural redundancy，strong energy absorption and energy dissipation capacity of nail joints，wood buildings behave good seismic performance in earthquakes．Cross laminated timber is a new generation of engineered wood-based product．Based on tests of three kinds of cross laminated timber connections，Pinching4 model in OpenSees as a user-defined element is applied to simulate the hysteresis response of the connections，which is highly nonlinear，strength degradation，stiffness degradation，and pinching．The primary and follower half-cycle energy damage model is used for damage quantitative analysis of the connections，and the damage factor ranges corresponding to five damage levels of cross laminated timber connections are given in this article．The study shows that good simulation results are obtained and it is also illustrated that Pinching4 model is valid and feasible to predict the hysteretic response of wood connections．Different damage factors responding to varied damage degrees are consistent with the experimental rules．The dispersion degrees of the damage factors are relatively low with the mean values in the reasonable ranges．

KEY WORDS　cross laminated timber structures；connections；numerical studies；damage analysis；damage accumulation models

木材是人类较早应用的一种建筑材料．结构的冗余性、较高的强重比以及钉接节点超强的吸能和耗能能力使得木结构有较好的抗震能力．现代技术加工制作的复合木材－交叉层积木（cross laminated timber，简称 CLT）是一种新型的木建筑材料．它除具有传统的木建筑材料的抗震、环保和对气候适应能力强的优点

收稿日期：2014－11－11
基金项目：教育部联合培养研究生基金资助项目（20110901）；国家自然科学基金资助项目（51578064）

外，还有极高的强度和耐火性，稳定的形状和尺寸，精确的数控切割和快速的装配式安装，可以代替混凝土作为建筑的外墙和楼板[1-3]. 北美地区为引进该材料开始对其力学性能、防火性能等进行研究[4-8]，而在我国尚没有开始系统的研究工作.

在地震作用下，木节点为耗散地震能量会产生相应的响应，如紧固件的滑移和变形、木材的开裂和破坏，往往还伴随着强度和刚度的退化. 根据抗震和加固维护的要求，需要对这些构件进行地震作用的数值分析和损伤情况的评价. 伪静力试验是模拟地震作用下结构往复振动中的受力和变形响应，因此基于数值模拟方法预测连接的滞回反应和通过损伤因子对伪静力试验中构件的损伤情况进行定量评估具有重要意义.

目前关于钢筋混凝土构件、钢结构构件和砖墙构件的损伤研究已相对成熟，大部分是基于 Park—Ang[9] 的变形和能量综合损伤模型的改进和衍生. 然而对于木结构来说，由于结构构造的特殊性以及抗震性能的复杂性[10]，损伤问题还处在探索阶段. 2005 年 van de Lindt 基于 Park—Ang 的双参数累积损伤模型[9]，提出特定结构以保护层的钉间距为函数的轻型木剪力墙的力学损伤模型[11]，这也是到目前为止，唯一用于木结构的损伤模型[12]. 低周反复加载的模式对损伤模型的选择有很大影响，本文的连接试验采用了专用于木结构的 CUREE 加载模式[13]，该模式涉及到不同加载水平下的主循环和附属循环对构件的作用，相关文献[13-15]已经表明该种加载模式下木结构破坏形式更能代表常遇地震下的破坏形式. Park—Ang 损伤模型[9]虽然考虑了首次超越破坏和累积损伤破坏两方面影响，反映最大变形和累积损伤两种不同的破坏模式，但是没有考虑加载次序影响以及损伤不对称问题. 因此寻求一种能够考虑加载次序影响的损伤模型是非常必要的.

宏观模拟模型是木结构工程界较为通用的模型[16-18]，它是通过相应的滞回曲线量化出滞回试验中力与位移之间的关系[19]. 由于木节点连接在地震作用中表现的高度非线性、强度退化、刚度退化和捏拢现象增添了模拟的复杂性，如何准确地模拟该类连接的受力性能是本文的研究重点，同时该连接模拟的准确性也关系到该类连接构成的剪力墙（未来工作）模拟的准确性.

鉴于此，本文根据交叉层积木柔性连接的伪静力试验，采用 OpenSees 中自定义 Pinching4 模型较好地模拟了 3 种连接的滞回特征，确定了模型参数，为该类节点连接的模拟提供了方法和依据；基于主次半循环累积能量损伤模型对连接试验的损伤情况进行了研究.

1　交叉层积木连接试验

交叉层积木连接由三部分构件组成：金属连接件（如图 1）、紧固件和交叉层积木试块. 紧固件的选择基于延性考虑，分别采用 3 种紧固件（图 2）. 螺旋钉型号为 16d × 3 ½″，其钉身直径为 3.8 mm，钉身长 89 mm；（2）螺丝钉型号为 5 × 90 mm，“5”为其型号，其钉身直径为 3.5 mm，钉身长 90 mm；（3）螺丝钉型号为 4 × 70 mm，其钉身直径为 2.8 mm，钉身长 70 mm. 交叉层积木试块采用 KLH 公司生产的 94 mm 三层厚的交叉层积木板，各层厚度为 30 mm—34 mm—30 mm. 其 3 种交叉层积木连接组合如表 1 所示.

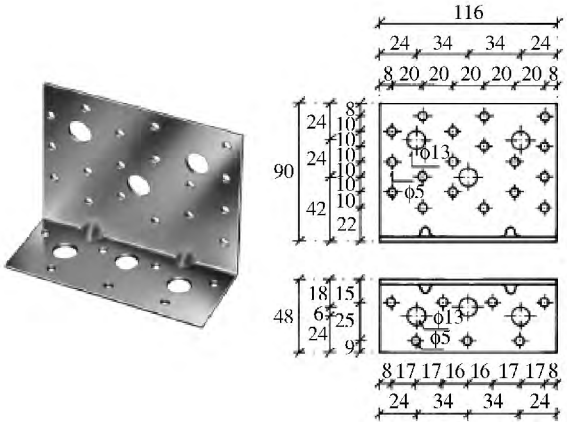

图 1　金属连接件（90 mm × 48 mm × 3.0 mm × 116 mm）

Fig. 1　SIMPSON strong tie bracket（90 mm × 48 mm × 3.0 mm × 116 mm）

图 2　3 种紧固件.（a）螺旋钉 16 d × 3½″；（b）螺丝钉 5 × 90 mm；（c）螺丝钉 4 × 70 mm

Fig. 2　Three types of fasteners:（a）spiral nails 16d × 3½″；（b）screws 5 × 90 mm；（c）screws 4 × 70 mm

表 1　CLT 连接组合

Table 1　CLT connection combinations

连接类型	金属连接件种类	紧固件类型
连接 1	金属连接件 A	18 个螺旋钉 16 d × 3½″
连接 2	金属连接件 A	9 个螺丝钉 5 × 90 mm
连接 3	金属连接件 A	18 个螺丝钉 4 × 70 mm

交叉层积木是各向异性的材料，要分别进行顺纹方向（受力方向平行于外层纹理方向）和横纹方向（受

力方向垂直于外层文理方向）的连接试验．顺纹方向的交叉层积木试块尺寸是 180 mm × 380 mm × 94 mm，如图 3 所示，横纹方向的交叉层积木试块尺寸是 250 mm × 380 mm × 94 mm．为提高其可靠性和准确性，每个连接每个方向分别进行 3 组试件试验，获得其骨架曲线和滞回包络线的平均值，其滞回加载模式和试验装置如图 4 所示．

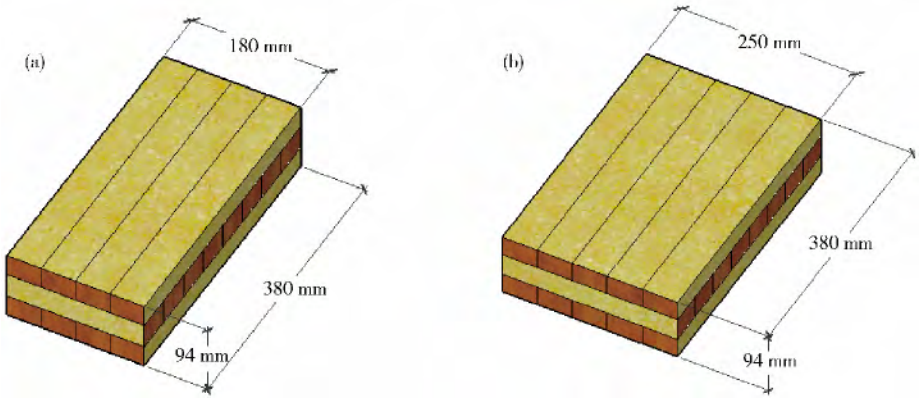

图 3　交叉层积木试块．（a）顺纹方向；（b）横纹方向

Fig. 3　CLT block：（a）longitudinal to the outer layer grain；（b）perpendicular to the outer layer grain

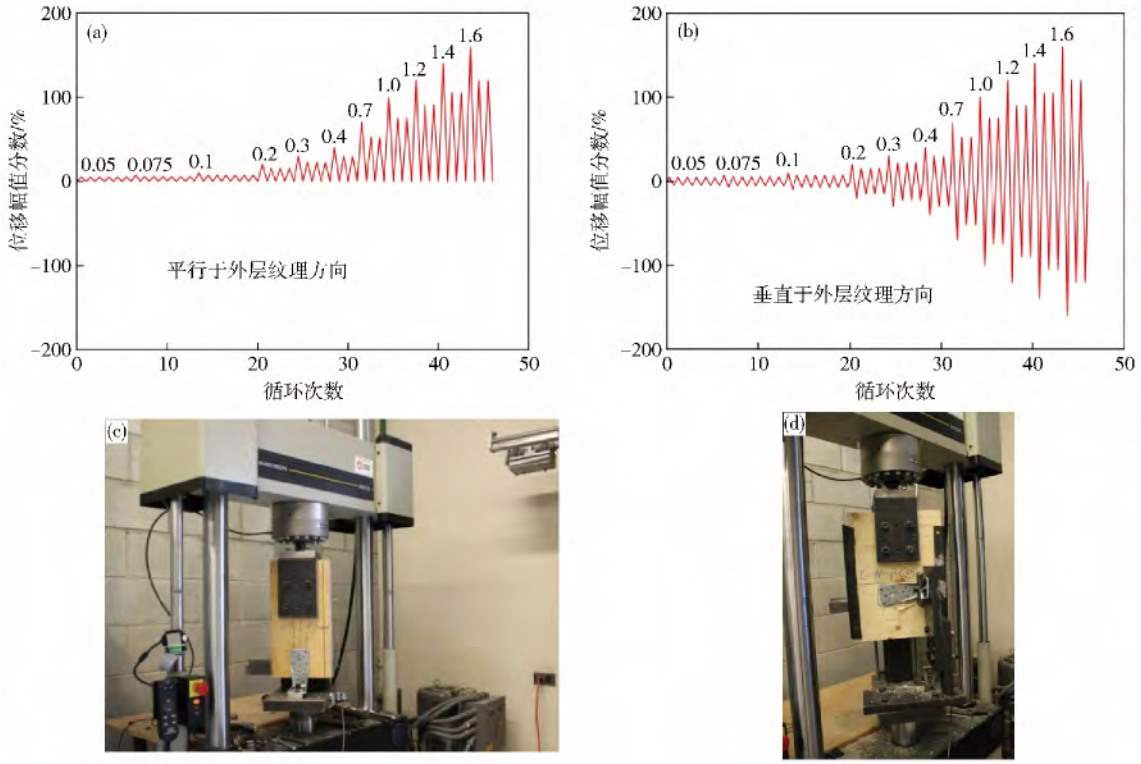

图 4　连接试验加载模式及试验装置．（a，c）顺纹方向；（b，d）横纹方向

Fig. 4　Loading protocol and test device for connection test：（a，c）longitudinal to the outer grain；（b，d）perpendicular to the outer grain

2　交叉层积木连接的数值模拟

2.1　Pinching4 模型介绍

OpenSees 中 Pinching4 模型是 Mitra [20] 开发的自定义模型代码，由多段线定义的力位移曲线，能够考虑滞回加载中的逐渐加剧的刚度和强度退化以及捏拢效应，如图 5 所示．其骨架曲线或滞回包络线由 16 个参数（ePd_1，ePf_1，ePd_2，ePf_2，ePd_3，ePf_3，ePd_4，ePf_4，eNd_1，eNf_1，eNd_2，eNf_2，eNd_3，eNf_3，eNd_4，eNf_4）组成，加卸载路径以及捏拢部分通过 6 个参数来定义（rDispP，rFoceP，rDispN，rFoceN，uForceP，uForceN）．此外 16 个参数来控制滞回反应中逐渐增加的卸载刚度退化、再加载刚度退化以及强度退化．该模型的详细使用说明可参见 Opensees 用户指南 [20]．

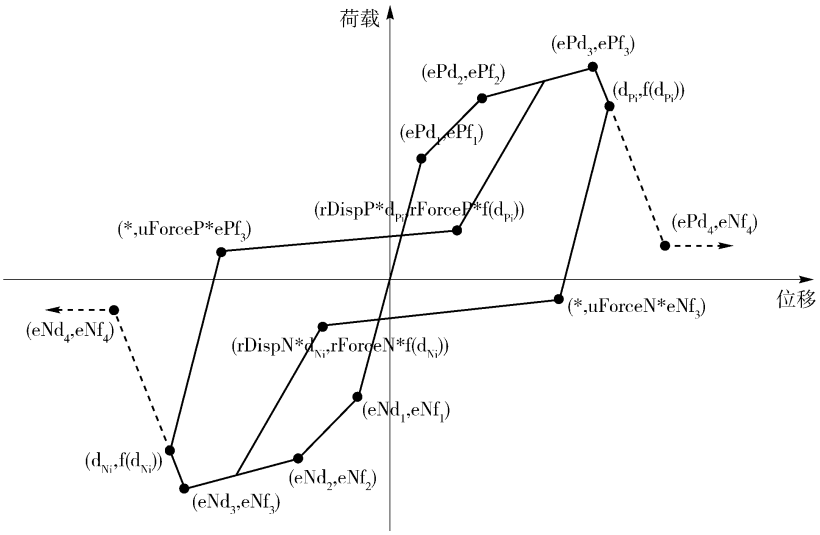

图 5　Pinching4 模型[17]

Fig. 5　Pinching4 model[17]

2.2　连接的数值分析

基于最小二乘法确定了模型中的各参数值，将试验与模拟结果进行对比，如图 6 ~ 图 8 所示，其参数评估见表 2. 连接件带动紧固件群做整体运动，对紧固件产生拉剪作用. 初始阶段，连接件带动紧固件在交叉层积木媒介中做可恢复的弹性运动；随着加载位移变大，紧固件和木材相互作用，彼此都产生塑性变形，进而产生间隙，导致图 6 ~ 图 8 中的捏拢现象；加载位移继续增加，其空隙逐渐增大，产生逐渐加剧的刚度退化；当两者之间的握裹力和摩擦力不足以固定紧固件于交叉层积木试块中，紧固件发生滑移，最终以紧固件从节点端被拉出作为破坏. 图 6 ~ 图 8 均展现了这一破坏特征.

针对滞回加载中试验平均值与模拟结果，通过等效能量法（EEEP）确定重要力学参数（初始刚度 K_e，屈服荷载 F_{yield}，屈服位移 D_{yield}，峰值荷载 F_{peak}，峰值荷载对应位移 D_{peak}，失效荷载 F_u，失效位移 D_u，延性系数 δ，累积滞回耗能 E_a）进行了对比，见表 3.

从表 3 可见，大部分数值分析与试验结果有较高的吻合程度，其偏差小于 20%. 3 种连接在顺纹和横纹方向的峰值荷载都达到 45 kN 以上，峰值荷载对应的位移达到 35 mm 以上. 其中连接 3 是 3 种连接中强度最高的连接：在顺纹方向极限承载能力达到 49.2 kN（试验和模拟）；在横纹方向，试验达到 50.4 kN，数值模拟计算值为 52 kN. 连接 1 的强度仅次于连接 3，在顺纹方向达到 48.9 kN（试验）和 49.3 kN（模拟），横纹方向达到 46.7 kN（试验和模拟）. 强度最低的是连接 2. 通过比较延性系数发现，连接 1 的延性能力最佳，在顺纹方向试验计算的延性系数是 6.1，数值模拟计算的延性系数是 5；在横纹方向计算的延性系数是 4.84（试验）和 4.8（模拟）. 连接 2 和链接 3 在顺纹和横纹方向的延性系数均在 3.0 ~ 4.2. 3 种连接的累积滞回耗能并不具有可比性，因为每种连接加载环的大小和数量基于各自的幅值水平和其失效荷载. 综上所

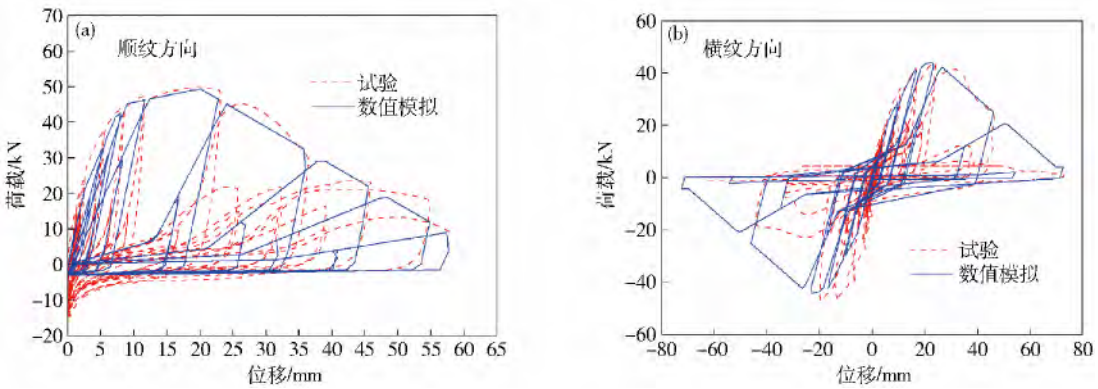

图 6　连接 1 滞回试验曲线和数值模拟.（a）顺纹方向；（b）横纹方向

Fig. 6　Hysteretic response of connection test and modeling for Connection 1:（a）longitudinal to the outer grain;（b）perpendicular to the outer grain

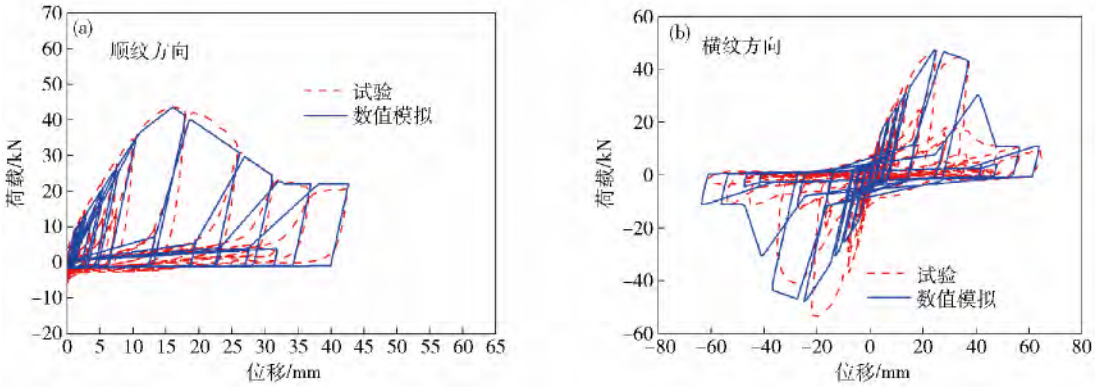

图 7　连接 2 滞回试验曲线与数值模拟.（a）顺纹方向;（b）横纹方向

Fig. 7　Hysteretic response of connection test and modeling for Connection 2:（a）longitudinal to the outer grain;（b）perpendicular to the outer grain

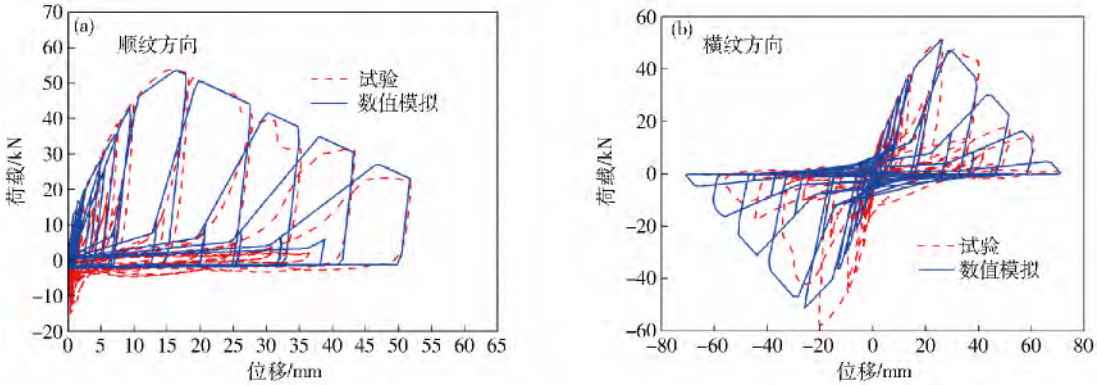

图 8　连接 3 滞回试验曲线与数值模拟.（a）顺纹方向;（b）横纹方向

Fig. 8　Hysteretic response of connection test and modeling for Connection 3:（a）longitudinal to the outer grain;（b）perpendicular to the outer grain

述，连接 1 是在强度和延性方面抗震性能最优的连接.

3　交叉层积木连接的损伤分析

3.1　主次半循环损伤模型

1989 年 Krätzig 等[21]提出一个复杂的基于能量累积的损伤模型，模型考虑了加载模式和不对称损伤的影响. 每个加载位移水平下第一个半圈加载称为主半环（简称 PHC），在峰值力之后后续的半环加载称为副半环（简称 FHC），对于滞回曲线的正向和负向的累积公式如下:

$$D^{+}=\frac{\sum E_{p,i}^{+}+\sum E_{i}^{+}}{E_{f}^{+}+\sum E_{i}^{+}},\tag{1}$$

$$D^{-}=\frac{\sum E_{p,i}^{-}+\sum E_{i}^{-}}{E_{f}^{-}+\sum E_{i}^{-}}.\tag{2}$$

式中，D^{+}为正向损伤指标，D^{-}为负向损伤指标，$E_{p,i}$为主半环吸收的能量，E_{i}为副半环吸收的能量，E_{f}为单调加载至失效时吸收的能量.

考虑不对称损伤的影响，整个的损伤系数定义为

$$D=D^{+}+D^{-}-D^{+}\cdot D^{-}.\tag{3}$$

式中，$D^{+}\cdot D^{-}$为共同损伤系数.

3.2　交叉层积木连接的地震损伤分析

图 9 ~ 图 11 以双 Y 轴形式绘出 3 种连接两种方向在低周反复往返加载情况下的损伤曲线. X 轴表示加载时间长短; 左侧 Y 轴表示加载幅值水平，以百分数形式在图中标出 10%、20%、30%、40%、70%、100%、120%、140% 和 160%; 右边 Y 轴表示损伤指数. 对于每种连接每个方向上的 3 个试验样本绘出随着时间和加载幅值水平的损伤曲线.

从图 9 ~ 图 11 损伤图可以看出在横纹和顺纹方向的损伤因子的变化规律是在 0 ~ 1 之间. 0 代表无损坏，1 代表完全损坏，在未达到 1 之前损伤曲线基本成线性函数递增. 其加载幅值取值来源于各自连接对应方向上的单调加载下的极限位移. 图 9（a）、图 10（a）和图 11（a）表示横纹方向构件失效（损伤因子为 1）发生在加载水平 70% 附近; 图 9（b）、图 10（b）和图 11（b）表示在顺纹方向构件失效（损伤因子为 1）发生在加载水平 100% 附近. 这主要是因为顺纹方向上进行正向往返循环加载，而横纹方向上进行正负双向的滞回加载，加速了构件的损伤速度. 此外，根据 ASTM-CUREE 规范[10]中规定采取相同的低周循环加载速度 2.54 mm·s^{-1}，我们定义损伤速率为损伤因子与加载时

表 2　连接试验基于 Pinching4 模型的滞回参数评估

Table 2　Hysteretic parameter estimation of Pinching4 model for connection test

试验现象	参数	连接 1		连接 2		连接 3	
		顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹
正向骨架曲线	ePf1 / kN	19. 5	18. 68	18. 28	12. 7	19. 67	28. 2
	ePf2 / kN	44. 89	41. 5	36. 53	46. 4	40. 4	51
	ePf3 / kN	49. 45	46. 7	45. 77	40. 3	49. 17	45. 28
	ePf4 / kN	6. 38	18. 6	20. 44	12. 7	19. 34	8. 55
	ePd1 / mm	2. 15	3. 7	3. 58	2	3. 17	8
	ePd2 / mm	8	10	10	24	10	26
	ePd3 / mm	20	24	18	35	16	37
	ePd4 / mm	60	70	33	46	52	52
负向骨架曲线	eNf1 / kN	– 19. 5	– 18. 68	– 18. 28	– 12. 7	– 19. 67	– 28. 2
	eNf2 / kN	– 44. 89	– 41. 5	– 36. 53	– 46. 4	– 40. 4	– 51
	eNf3 / kN	– 49. 45	– 46. 7	– 45. 77	– 40. 3	– 49. 17	– 45. 28
	eNf4 / kN	– 6. 38	– 18. 6	– 20. 44	– 12. 7	– 19. 34	– 8. 55
	eNd1 / mm	– 2. 15	– 3. 7	– 3. 58	– 2	– 3. 17	– 8
	eNd2 / mm	– 8	– 10	– 10	– 24	– 10	– 26
	eNd3 / mm	– 20	– 24	– 18	– 35	– 16	– 37
	eNd4 / mm	– 60	– 70	– 33	– 46	– 52	– 51
捏拢	rDispP	0. 55	0. 5	0. 72	0. 6	0. 65	0. 5
	fForceP	0. 15	0. 3	0. 18	0. 25	0. 15	0. 25
	uForceP	0. 03	0. 05	0. 02	0. 05	0. 02	0. 05
	rDispN	0. 55	0. 5	0. 72	0. 6	0. 65	0. 5
	fForceN	0. 15	0. 3	0. 18	0. 25	0. 15	0. 25
	uForceN	0. 03	0. 05	0. 02	0. 05	0. 02	0. 05
卸载刚度退化	gK1	0	0	0	0	0	0
	gK2	0	0	0	0	0	0
	gK3	0	0	0	0	0	0
	gK4	0	0	0	0	0	0
	gKLim	0	0	0	0	0	0
再加载刚度退化	gD1	0. 97	0. 95	0. 97	0. 95	0. 97	0. 97
	gD2	0	0	0	0	0	0
	gD3	0	0	0	0	0	0
	gD4	0	0	0	0	0	0
	gDLim	0. 05	0. 1	0. 03	0. 1	0. 08	0. 1
强度退化	gF1	0	0	0	0	0	0
	gF2	0	0	0	0	0	0
	gF3	0	0	0	0	0	0
	gF4	0	0	0	0	0	0
	gFLim	0	0	0	0	0	0
能量退化	gE	1	1	1	1	1	1
损伤类型	energy	energy	energy	energy	energy	energy	energy

表 3　滞回试验与模拟重要力学参数对比

Table 3　Comparison of the key hysteresis parameters between connection tests and modeling

类型	方向	比较	K_e /(kN·mm^{-1})	F_{yield} /kN	F_{peak} /kN	F_u /kN	D_{yield} /mm	D_{peak} /mm	D_u /mm	δ	E_a /J
连接 1	顺纹	模拟	8.4	45.8	49.3	39.4	5.87	20.2	29.3	5	4556
		试验	9.1	44.6	48.9	39.1	4.9	20	30	6.1	5530
		偏差	7.7%	2.7%	0.8%	0.8%	19.8%	1.0%	2.3%	18.3%	17.6%
	横纹	模拟	4.9	37.6	46.7	37.4	7.67	24	36.8	4.8	8742
		试验	5.1	41.5	46.7	37.4	8.1	24	39.2	4.84	7498
		偏差	3.9%	9.4%	0.0%	0.0%	5.3%	0.0%	6.1%	0.8%	16.6%
连接 2	顺纹	模拟	5.1	39.0	45.8	36.6	7.6	18	24	3.16	3104
		试验	5.1	40.2	45.8	36.6	7.9	18	29	3.67	2986
		偏差	0.0%	3.0%	0.0%	0.0%	3.8%	0.0%	17.2%	13.9%	4.0%
	横纹	模拟	4.65	39.3	48	38.4	8.46	23	36	4.25	8843
		试验	4.4	40.2	46.4	37.1	9.6	24	36.7	3.82	9174
		偏差	5.7%	2.2%	3.4%	3.5%	11.9%	4.2%	1.9%	11.3%	3.6%
连接 3	顺纹	模拟	6.2	42	49.2	39.3	6.78	16	28	4.13	4536
		试验	6.2	43.6	49.2	39.3	7.0	16	27	3.86	4032
		偏差	0.0%	3.7%	0.0%	0.0%	3.1%	0.0%	3.7%	7.0%	12.5%
	横纹	模拟	3.5	44.5	52	41.6	12.7	26	38.8	3.06	10312
		试验	4.1	44.5	50.4	40.3	10.8	26	39.7	3.68	9407
		偏差	14.6%	0.0%	3.2%	3.2%	17.6%	0.0%	2.3%	16.8%	9.6%

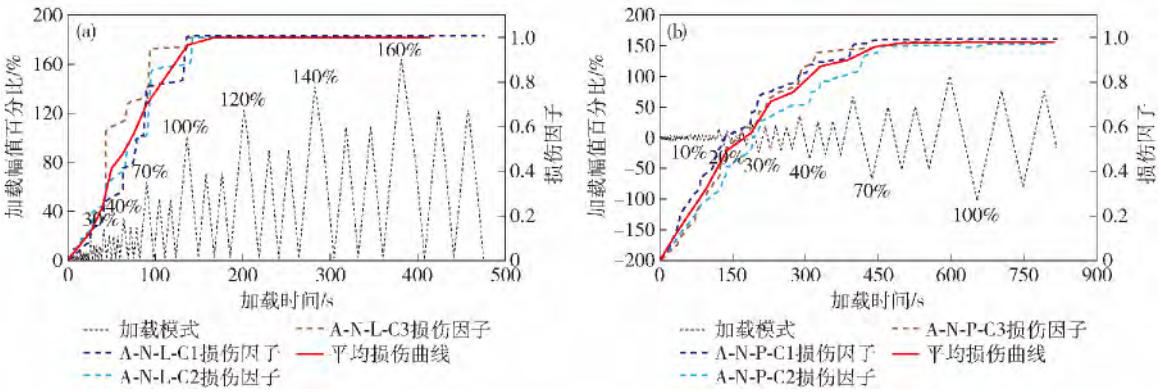

图 9　连接 1 损伤曲线.（a）顺纹方向;（b）横纹方向

Fig. 9　Damage curves of Connection 1:（a）longitudinal to the outer grain;（b）perpendicular to the outer grain

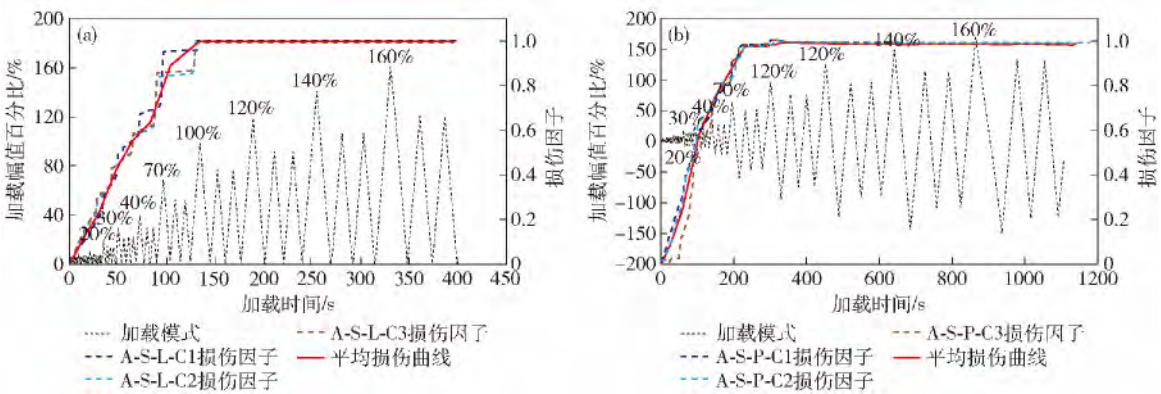

图 10　连接 2 损伤曲线.（a）顺纹方向;（b）横纹方向

Fig.　Damage curves of Connection 2:（a）longitudinal to the outer grain;（b）perpendicular to the outer grain

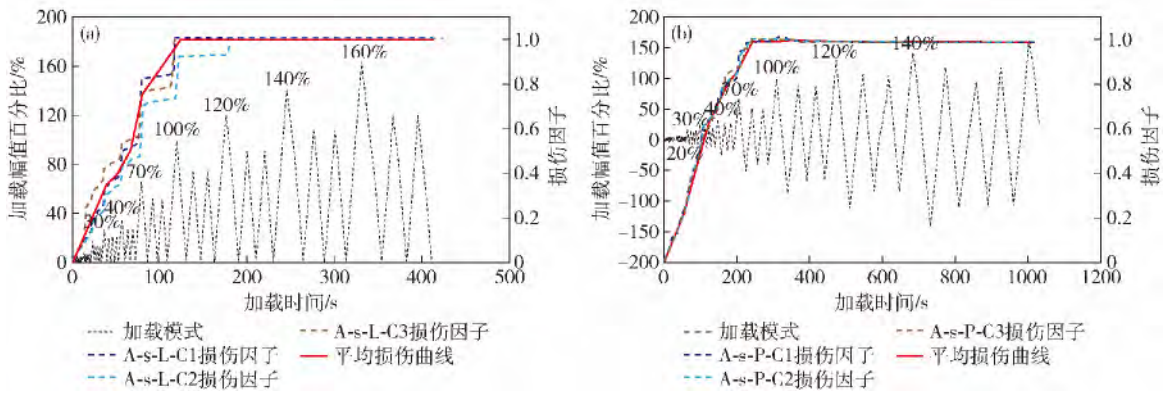

图 11　连接 3 损伤曲线.（a）顺纹方向；（b）横纹方向

Fig. 11　Damage curves of Connection 3: (a) longitudinal to the outer grain; (b) perpendicular to the outer grain

间的比值，比较在相同量程下的斜率，斜率越小其延性越好，进一步证实了连接 1 是延性最佳的连接.

3.3　损伤模型的验证

通过分析交叉层积木连接在循环往返加载作用下的损伤过程及观察的试验现象，建立损伤指数与损伤现象之间的关系，对其损伤程度进行量化分析，提出 5 水平损伤程度建议，具体划分如表 4 所示.

为了验证以上所给出的损伤模型的有效性，用试验得到的滞回曲线计算交叉层积木连接在屈服、最大承载力及极限位移（当承载力下降到 0.8 倍的峰值承载力时对应的位移）3 种状态下的损伤指标，如表 5 所示. 由表5可见，该损伤模型计算得到的连接屈服时

表 4　CLT 连接损伤量化评判准则

Table 4　Damage assessment criteria for CLT connections

损伤程度	损伤状况	损伤值	试验现象
基本完好	未损坏	$D<0.2$	视觉上看不到破坏
轻度破坏	基本完好	$0.2<D<0.35$	紧固件有轻微的拉出趋势，金属连接件有轻微的弹性变形
中度破坏	可修复	$0.35<D<0.7$	紧固件有较小的拉出变形，在紧固件与交叉层积木接触界面上形成孔隙，滞回曲线捏拢现象开始出现，可能伴随少量的紧固件受剪破坏，金属连接件也产生塑性变形
严重破坏	不可修复	$0.7<D<0.85$	紧固件与 CLT 接触截面上的孔隙变大，捏拢现象明显，大部分紧固件产生很大的拉出变形，金属连接件与 CLT 试件开始分离
倒塌	完全失效	$0.85<D<1$	大部分紧固件从 CLT 试件中拉出，金属连接件与 CLT 试件完全分离，完全丧失承载能力

表 5　交叉层积木连接不同损伤状态时对应的损伤指标

Table 5　Damage indexes corresponding to different damage states for CLT connection

连接	加载方向	试验标号	连接屈服时损伤指标，D_1	最大承载力时损伤指标，D_2	极限位移时损伤指标，D_3
连接 1	垂直纹理方向	A-N-P-C1	0.538	0.753	0.931
		A-N-P-C2	0.496	0.879	0.951
		A-N-P-C3	0.507	0.728	0.957
	平行纹理方向	A-N-L-C1	0.415	0.775	0.970
		A-N-L-C2	0.474	0.776	1.010
		A-N-L-C3	0.470	0.850	1.000
连接 2	垂直纹理方向	A-S-P-C1	0.710	0.915	1.005
		A-S-P-C2	0.620	0.926	0.999
		A-S-P-C3	0.730	0.915	0.997
	平行纹理方向	A-S-L-C1	0.645	0.930	1.010
		A-S-L-C2	0.545	0.834	1.000
		A-S-L-C3	0.673	0.795	0.999
连接 3	垂直纹理方向	A-s-P-C1	0.700	0.945	1.011
		A-s-P-C2	0.720	0.949	0.993
		A-s-P-C3	0.690	0.954	0.989
	平行纹理方向	A-s-L-C1	0.438	0.736	1.010
		A-s-L-C2	0.525	0.645	0.999
		A-s-L-C3	0.696	0.885	0.998
	平均值		0.588	0.844	0.991
	标准差		0.106	0.089	0.022

平均损伤值为 0.588，最大承载力时的平均损伤值为 0.844，极限位移时的平均损伤值为 0.999，其平均值在合理范围内，标准差较小. 计算出的损伤因子 D 对应的损伤程度基本符合试验规律，计算结果离散程度较低.

4 结论

(1) 通过连接试验以及数值模拟发现：交叉层积木连接滞回曲线中的捏拢以及强度和刚度退化至失效是由于金属连接件带动紧固件群做整体运动产生塑性变形，使得紧固件与交叉层积木接触介质之间形成逐渐增大的孔隙，导致紧固件发生滑移拔出.

(2) Pinching4 模型可以模拟复杂木节点连接的捏拢现象以及刚度和强度退化，与连接试验结果吻合较好，证明该模型模拟木节点连接性能的可行性和有效性，同时也证明连接 1 是 3 种连接中延性最佳的连接.

(3) 根据对 3 种连接试验破坏全过程损伤程度的分析，将交叉层积木连接性能划分为 5 个水平（基本完好、轻度破坏、中度破坏、严重破坏和倒塌），并给出了 5 个性能水平损伤指数的建议.

(4) 计算了交叉层积木连接 3 种不同状态（连接屈服、最大承载力和极限位移）的损伤指数，基本符合试验规律，计算结果离散程度较低，证明了该损伤模型的有效性.

参 考 文 献

[1] Wells M. Stadthaus, London: raising the bar for timber buildings. *Proceedings of the ICE-Civil Engineering*, 2011, 164(3): 122

[2] Yates M, Linegar M, Dujič B. Design of an 8 storey residential tower from KLH cross laminated solid timber panels //10*th World Conference for Timber Engineering*, Miyazaki, 2008

[3] Waugh A, Wells M, Lindegar M. Tall timber buildings: application of solid timber constructions in multi-storey buildings // *International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe*. Geneva, 2010

[4] Institute A N S. ANSI/APA PRG 320 *Standard for Performance-rated Cross-laminated Timber*. APA—The Engineered Wood Association Press, 2012

[5] Crespell P, Gagnon S. *Cross Laminated Timber: a Primer*. Pointe-Claire, Quebec: FPInnovations, 2010

[6] Gagnon S, Pirvu C. *CLT Handbook: Cross Laminated Timber*. FPInnovations, 2011

[7] Ceccotti A, Follesa M, Kawai N, et al. Which seismic behaviour factor for multi-storey buildings made of cross-laminated wooden panels // *Proceedings of* 39*th CIB W*18 *Meeting*. Florence, 2006

[8] Ceccotti A, Sandhaas C, Yasumura M. Seismic behaviour of multistory cross-laminated timber buildings // *Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology*. Geneva, 2010

[9] Park Y J, Ang A H S, Wen Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *J Struct Eng*, 1985, 111(4): 740

[10] Xue J Y, Zhang F L, Zhao H T, et al. Potential and energy dissipation-based seismic damage evaluation of ancient timber structure. *J Build Struct*, 2012, 33(8): 127
（薛建阳，张风亮，赵鸿铁，等. 古建筑木结构基于结构潜能和能量耗散准则的地震破坏评估. 建筑结构学报，2012，33(8): 127）

[11] van de Lindt J W. Damage-based seismic reliability concept for woodframe structures. *J Struct Eng*, 2005, 131(4): 668

[12] van de Lindt J W, Gupta R. Damage and damage prediction for wood shearwalls subjected to simulated earthquake loads. *J Perform Constr Facil*, 2006, 20(2): 176

[13] E2126-11 *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. Washington, D C: ASTM International, 2011

[14] Gatto K, Uang C M. Effects of loading protocol on the cyclic response of woodframe shearwalls. *J Struct Eng*, 2003, 129(10): 1384

[15] Krawinkler H, Parisi F, Ibarra L, et al. *Development of a Testing Protocol for Woodframe Structures*. Richmond: CUREE Publication, 2001

[16] Pang W, Rosowsky D, Pei S, et al. Evolutionary parameter hysteretic model for wood shear walls. *J Struct Eng*, 2007, 133(8): 1118

[17] Folz B, Filiatrault A. Cyclic analysis of wood shear walls. *J Struct Eng*, 2001, 127(4): 433

[18] Ceccotti A, Follesa M, Karacabeyli E. 3D seismic analysis of multi-storey wood frame construction // *World Conference on Timber Engineering*. Whistler Resort, BC, Canada, 2000

[19] Xu J, Dolan J D. Development of nailed wood joint element in ABAQUS. *J Struct Eng*, 2009, 135(8): 968

[20] Mitra N. *Pinching*4 *Model (OpenSees User Documetation)* [EB/OL]. University of California (2012-05-10) [2013-09-10]. http://opensees.berkeley.edu/wiki/indexphp/Pinching4_Material

[21] Krätzig W, Meyer I, Meskouris K. Damage evolution in reinforced concrete members under cyclic loading // *Structural Safety and Reliability*, *ASCE*, 1989: 795