

新型木建筑材料——交叉层积木介绍及其连接的试验研究

沈银澜^{1 2)}, 牟在根^{1)✉}, Johannes Schneider³⁾, Siegfried F. Stiemer³⁾

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 100840

3) 英属哥伦比亚大学应用学院土木工程系, 温哥华, B. C. V6T 1Z4, 加拿大

✉ 通信作者, E-mail: zgmu@ces.ustb.edu.cn

摘要 交叉层积木作为一种新型木建筑材料已经在北美地区推广开来, 然而在我国还没有得到引进和推广. 本文介绍了这种新型材料的性能特点, 总结其生产工艺、设计方法和研究进展, 重点对交叉层积木七种半刚性连接的抗震性能进行试验研究. 研究表明: 紧固件全部被拔出的失效模式为理想的延性破坏模式, 滞回曲线表现出高度非线性、刚度退化、强度退化以及捏拢现象. 通过试验数据分析, 给出了在延性和承载能力两方面最佳的连接.

关键词 层积木结构; 生产工艺; 设计方法; 连接; 抗震性能; 破坏模式

分类号 TU398+.6

Introduction to a new engineered wood-based product — cross laminated timber and experimental study on cross laminated timber bracket connection

SHEN Yin-lan^{1 2)}, MU Zai-gen^{1)✉}, Johannes Schneider³⁾, Siegfried F. Stiemer³⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) China Electronics Engineering Design Institute, Beijing 100840, China

3) Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of British Columbia, Vancouver, B. C. V6T 1Z4, Canada

✉ Corresponding author, E-mail: zgmu@ces.ustb.edu.cn

ABSTRACT Cross laminated timber (CLT), a new generation of engineered wood-based product, is gaining attention in the North American market, but it has not been introduced and spread in China yet. In the paper, the mechanical properties of CLT are introduced in details, and the production technology, design methods and research progress are summarized as well. What's more, an experimental study on CLT flexible connection in seismic performance is done. The results show that the failure with all fasteners pulled out is disclosed as an ideal ductility failure. Highly nonlinear, stiffness degradation, strength degradation and pinching are illustrated in the hysteresis curves of connection. An excellent connector in ductility and load capacity is presented by test data analysis.

KEY WORDS laminated timber structures; production technology; design methods; connection; seismic performance; failure modes

交叉层积木(cross laminated timber, 简称 CLT 或 X-lam)是 20 世纪 90 年代初起源于瑞典的新型木建筑材料^[1] 现在已经成为欧洲和北美发展最快的人造板材之

一. 由于其较高的强度和耐火性, 稳定的形状和尺寸, 良好的保温性能, 精确的数控切割和快速的装配式安装, 故可直接代替混凝土作为重型木建筑的外墙、楼板

收稿日期: 2014-08-09

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)

和屋顶. 到目前为止, 该建筑材料的低层住宅已经在欧洲盛行. 在英国和澳大利亚分别建成了 8 层和 9 层交叉层积木写字楼^[2-5]. 研究表明: 建于伦敦的 9 层交叉层积木写字楼 Stadthaus 4 个木匠利用 22 个星期完成施工, 比相同情况的混凝土结构节省 30% 的时间^[1].

北美地区为引进这种材料开始对其力学性能、防火性能等进行研究. 2012 年, 美国国家标准学会颁布了交叉层积木额定性能标准^[6], 加拿大国家林业技术研究院与英属哥伦比亚大学合作进行了一系列交叉层积木墙板试验, 获得了第一手试验资料, 并发行了交叉层积木设计手册, 积极推广其在北美市场的发展^[7]. 2006 年 Ceccotti 等^[8-9] 基于三层交叉层积木建筑的足尺振动台试验和欧洲规范 (Eurocode 8)^[10] 研究了该结构的强度、变形和耗能能力, 并评估了地震性能系数, 不小于 1.43. 2007 年, 一座七层的交叉层积木建筑的足尺振动台试验在日本 Miki 进行, 记录了 14 次连续地震事件 (震级 7.2, 加速度值从 0.8g 到 1.2g)^[11], 该建筑并没有发生破坏, 展现出很好的延性和耗能能力. Dujic 等^[11] 采用 SAP2000 对上述试验进行了动力反应预测, 并对试验结果进行校正, 指出机械紧固件超强的耗能能力和交叉层积木的自定心能力使得结构在地震中表现良好.

木结构中连接多为半刚性连接, 在抗震中起着协调变形和耗能的重要作用. 目前, 国外对交叉层积木的研究主要是对整体结构的试验研究或宏观简化模拟预测, 对于节点连接的研究较少. 在我国, 交叉层积木还是一个陌生的领域, 目前尚未开始系统的研究工作, 也少有文献提及. 交叉层积木与基础的连接必须满足一些基本要求: 有足够强度抵抗侧向和竖向荷载; 是半刚性连接, 可以协调基础与木材之间的变形和受力, 可以在地震中耗散能量; 在木材发生脆性破坏之前连接能首先发生屈服^[12]; 必须易于组装、生产、安装以及有较好的防火性能^[13].

鉴于此, 本文基于在英属哥伦比亚大学参与的交叉层积木课题, 介绍了交叉层积木的性能和制造工艺, 为引进该材料提供参考依据; 总结了常用的三种交叉层积木楼板的设计方法, 分析了其适用性, 可供国内设计人员参考; 在本课题组完成的多种交叉层积木半刚

性连接的伪静力试验基础上, 对连接在单调加载和循环往返加载下的破坏形式、骨架曲线、位移延性等进行了较系统的研究.

1 交叉层积材在国外的研究

交叉层积木是杉木板材条正交叠放胶合挤压成的奇数层实木板材, 厚度在 50 ~ 600 mm 之间, 层数为 3 ~ 9, 可以定制, 如图 1 所示. 交叉层积木作为各向异性材料, 主要有三个受力方向, 面外垂直板平面方向, 面内主强度方向和面内次强度方向. 主强度方向是平行于外层顺纹方向, 次强度方向是垂直于外层顺纹方向, 如图 2 所示. 交叉层积木板的主要的面内承载力方向是外层纹理方向^[9].

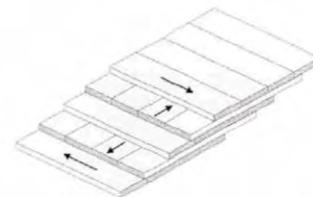


图 1 交叉层积材的构造

Fig. 1 Configuration of CLT

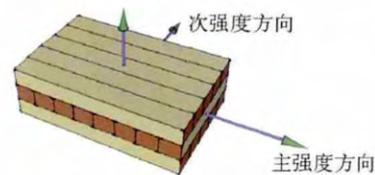


图 2 交叉层积材的各向异性

Fig. 2 Anisotropy of CLT

1.1 交叉层积木性能比较

中低层住宅中常用的填充墙材料有页岩模数多孔砖、轻型混凝土、生土填充墙等. 表 1 对比了传统填充墙材料与三层交叉层积木墙板的材料性能, 发现交叉层积木墙板密度最小, 只有 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 是传统墙体材料 $1/4 \sim 1/2$, 传统材料较大的密度也限制了其在高层中的应用. 在保温性能上, 交叉层积木墙板的热阻达到了 $8.333 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, 而页岩模数多孔砖、轻型混凝土和生土填充墙的热阻系数均小于 1. 在填充墙厚度上,

表 1 传统填充墙材料与交叉层积木墙板的性能比较

Table 1 Property comparison of conventional infill wall materials and CLT wall

材料	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热阻 / ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)	墙体厚度 / mm	抗压强度 / MPa	弹性模量 / MPa	强重比
页岩模数多孔砖 ^[14]	1200	0.800	90	6.27	13060	0.533
轻型混凝土填充墙 ^[15]	2000	0.613	90	27	32000	1.38
交叉层积木墙板	500	8.333	93	11.8	7700	2.41
生土填充墙 ^[16]	2200	0.700	150	4	55.77	0.186

前三者相同为 90 mm 左右,生土填充墙的厚度偏厚为 150 mm. 在抗压强度方面,轻型混凝土填充墙为 27 MPa;次之为交叉层积木填充墙,为 11.8 MPa;最小是生土填充墙,只有 4 MPa. 轻型混凝土填充墙具有较高的弹性模量和抗压强度,但是较强的抗压强度和弹性模量经常会导致其墙板的脆性开裂,延性减少,耗能能力劣化. 交叉层积木由于其特殊的加工工艺,有效缩小了自身的收缩和膨润变形,增强了形状和尺寸的稳定性. 此外,其强度较高,强重比大(2.41),重量轻,使其具有较好的抗震性能.

1.2 交叉层积木制造工艺以及设计方法

交叉层积木的制作安装工艺分为五个步骤:(1)



图 3 交叉层积木的加工与安装

Fig. 3 Fabrication and installation of CLT

复合理论基于每一单层交叉层积木板的强度和刚度,考虑中间层垂直方向的影响,通过计算不同加载方向的复合系数来折算出多层正交叠加后的刚度和强度^[17],该复合理论只能考虑相同厚度相同弹性模量的交叉层积木层,不能考虑受弯构件各层的受剪变形,因此只能用于大的跨高比(通常大于 30)的交叉层积木构件.

机械梁理论考虑了平行层(与加载方向平行)的刚度贡献以及垂直层(与加载方向垂直)的滚切变形影响^[18],可以计算不同层厚度和不同弹性模量的交叉层积木层,但是忽略了平行层的剪切变形,只适用于相对大的跨高比交叉层积木板.

Kreuzinger^[19]提出的剪力类比理论是目前公认的最准确的方法.该方法将多层的交叉层积木截面分成两个虚拟梁 A 和 B,用无限刚度的腹板构件连接,以协调其变形.梁 A 代表所有各层基于各自的中性轴的弯曲强度的总和,梁 B 代表了 Steiner 点的弯曲刚度和交叉层积木板的剪切刚度和所有连接的弯曲刚度.叠加

原木板被烘干至湿度为 $12\% \pm 2\%$,防止形状变化和表面裂缝.采用削剪或指接木的方法获得理想的长度和质量;(2)交错铺设交叉层积木板,用聚氨酯黏结剂粘接木条的面和边,再经液压、真空压或压缩空气压处理使其变成均匀粘接牢固的木板,采用平刨磨砂获得光滑表面;(3)采用计算机数控机床精确切割窗户、门、楼梯或其他构件;(4)包装运输至施工现场;(5)采用吊车吊装以及连接件进行现场安装.其加工工艺与安装示意图如图 3 所示.

在欧洲采用三种估算交叉层积木板或梁的面外刚度和强度的方法:复合理论(简称 k 法)^[17]、机械梁理论(简称 α 法)^[18]和剪力类比理论^[19].

两个梁的弯曲刚度和剪切刚度以获得整个截面的结果.该方法不但考虑了剪切变形,而且不受层数、厚度和弹性模量的限制.

2 交叉层积木连接试验设计

本论文的连接采用金属连接件和紧固件来协调变形和耗散能量,其刚度和承载能力很大程度上取决于连接件和紧固件的类型及数量,因此需要通过试验获得两者的最佳配比,研究不同连接组合在顺纹方向和横纹方向的力学性能.

2.1 试件设计

连接试件包括三个构件:金属连接件、紧固件和交叉层积木试块.

连接试验中三种金属连接件:连接件 A (Winkelverbinder $90 \times 48 \times 3.0 \times 116$),连接件 B (BMF-Winkelverbinder 105) 和连接件 C (AKR135LG-B-Winkelverbinder) 如图 4 所示.由 SIMPSON StrongTie 公司生产,其材料为高强镀铝锌钢的材质 S250GD +

Z275, 屈服强度为 250 MPa, 抗拉强度为 330 MPa。典型的连接件连接是一边附着在试块上, 另一边通过螺栓锚固在基础平台上。连接件 A 提供了 3 个 M12 的锚固螺栓孔, B 提供了 3 个 M10 的锚固螺栓孔, C 提供了 1 个 M12 的锚固螺栓长圆孔和 1 个 M10 的螺栓孔。

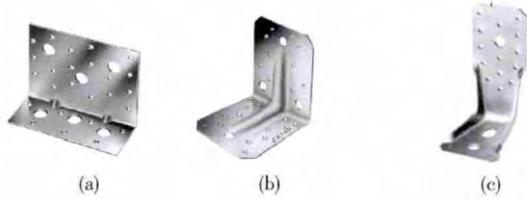


图 4 连接件. (a) A; (b) B; (c) C

Fig. 4 Bracket connectors: (a) A; (b) B; (c) C

紧固件的选择基于延性和握裹力考虑, 采用三种紧固件: (1) 螺旋钉 16d × 3 1/2", 其钉身直径为 3.8 mm, 钉身长 89 mm; (2) 螺丝钉型号为 5 × 90 mm, 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, 见图 5。



图 5 紧固件. (a) 螺旋钉 16d × 3 1/2"; (b) 螺丝钉 5 × 90 mm; (c) 螺丝钉 4 × 70 mm

Fig. 5 Fasteners: (a) spiral nails 16d × 3 1/2"; (b) screws 5 × 90 mm; (c) screws 4 × 70 mm

采用 KLH 公司生产的 94 mm 三层厚的交叉层积木板 (30 mm—34 mm—30 mm), 等级为 E3, 其参数如表 2。由于交叉层积木是各向异性的材料, 要分别进行顺纹方向和横纹方向的连接试验。顺纹试验试块尺寸为 180 mm × 380 mm × 94 mm, 横纹试验试块尺寸为 250 mm × 380 mm × 94 mm。

表 2 交叉层积木 E3 的力学性能^[6]

Table 2 Mechanical properties of CLT Grade E3

方向	顺纹弯曲应力, f_b /MPa	顺纹弹性模量, E /MPa	顺纹拉应力, f_t /MPa	顺纹压应力, f_c /MPa	顺纹剪应力, f_v /MPa	顺纹滚剪应力, f_s /MPa
主强度方向	17.4	8300	6.7	15.1	1.3	0.43
次强度方向	4.5	6500	2.0	5.2	1.3	0.43

2.2 试验装置

本试验是在英属哥伦比亚大学应用学院材料实验室完成, 所用仪器为全数字化控制电液伺服疲劳材料

试验机 INSTRON8802, 最大轴向载荷为 250 kN, 总行程为 150 mm。连接试验装置如图 6 所示。



图 6 连接试验装置. (a) 顺纹方向试验连接; (b) 横纹方向连接试验

Fig. 6 Connection devices: (a) connection device parallel to the grain direction; (b) connection device perpendicular to the grain direction

试样准备工作是事先在试块上精确定位螺栓孔位置, 进行打孔, 然后安装试样于试验机上, 4 个 1/2" 的螺栓贯穿于试块打好的螺栓孔和厚 25 mm 的钢夹板, 依靠螺栓对试件和钢夹板产生的挤压力和剪力固定试块上端于试验机上夹头, 如图 6(a) 所示。厚 40 mm 的钢板作为基础平台固定于下夹头。在顺纹试验中, 金属件和紧固件一端连接于试块下端, 另一端通过锚栓固

定在基础工作台上, 基础工作台连接试验机的加载器, 实现竖向位移控制, 见图 6(a)。由于金属件连接是单边连接, 并非轴心受力, 为避免试件弯曲, 在试块背面安置滚筒, 提供侧向抵抗力同时又不影响试块的竖向运动。通过悬钉法测量连接和钢板工作台之间的相对位移。横纹试验中, 金属连接件一端通过紧固件固定于试块上, 另一端通过锚栓固定在厚 25 mm 的竖向钢

板上,竖向钢板刚接于基础平台上,如图 6(b) 所示. 同样在试块背面设置滚筒,试件两端用 U 型钢来防止面外翘曲. 传感器通过悬钉测量法记录连接和钢板工作台之间的相对位移.

2.3 加载制度

常用于木结构加载模式有 SPD 加载模式^[20]、FCC 加载模式^[21]、ISO 加载模式^[20]、CEN 加载模式^[22]以及 ASTM-CUREE 加载方式^[20]等. 但是 SPD 和 FCC 的加载模式制造了大量的滞回环对连接产生疲劳破坏; CEN 加载模式虽有较少的滞回环但是在试验一开始非常大的幅值在节点处产生了不可恢复的损伤; ISO 加载模式代表结构大震后的破坏,而 ASTM-CUREE 的加载模式代表在常见地震下木结构的破坏模式,与现实地震行为最为一致,因此采用该种加载模式. 该种加载模式基于每一种百分比的幅值进行主循环加载,之后伴随 75% 的附属循环加载. 参考幅值定义为单调加载下结构或构件的极限位移 Δ_m , 其加载模式参见表 3.

根据 ASTM 的循环往返加载试验标准^[20],单调加

载速度采取 $6.35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,循环往返加载速度采取 $2.54 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. 单调加载通过试验机控制位移加载,循环往返加载通过电脑控制试验机进行位移加载. 在顺纹方向和横纹方向的加载模式见图 7(a) 和图 7(b) .

表 3 ASTM-CUREE 加载模式列表
Table 3 Details of ASTM-CUREE cyclic protocol

模式	加载步骤	最少加载环数量	初始环幅值/ Δ_m
1	1	6	0.05
	2	7	0.075
2	3	7	0.1
	4	4	0.2
3	5	4	0.3
	6	3	0.4
	7	3	0.7
4	8	3	1.0
	9	3	1.2
	10	3	1.4
	11	3	1.6

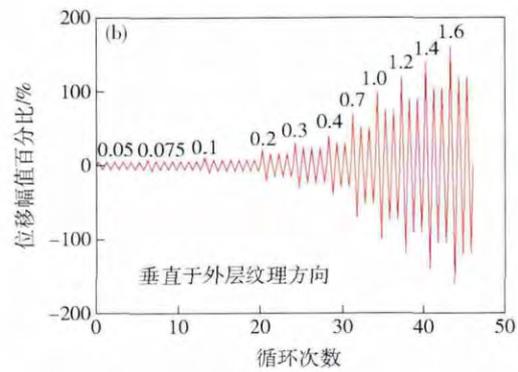
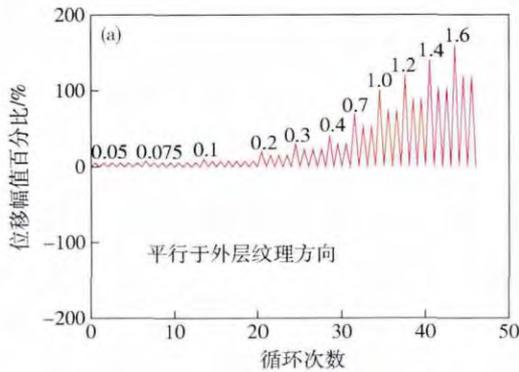


图 7 加载模式. (a) 平行于外层纹理的 CUREE 加载模式; (b) 垂直于外层纹理的 CUREE 加载模式

Fig. 7 Loading protocol: (a) CUREE loading protocol parallel to the grain direction; (b) CUREE loading protocol perpendicular to the grain direction

2.4 主要测试内容

主要测试内容: 单调加载下顺纹方向和横纹方向的位移-承载能力曲线; 循环往返加载试验顺纹方向和横纹方向的位移-承载能力曲线.

3 主要试验结果及分析

3.1 连接试验失效模式分析

通过一些初始的试验来决定紧固件数量和金属连接件之间的匹配. 试验发现, 有以下的失效模式, 如图 8 所示.

失效(a) 是紧固件嵌入试块中, 初始阶段连接件对紧固件产生拉剪作用, 带动紧固件在木材中做可恢复的弹性运动; 随着加载位移变大, 紧固件和木材产生挤压脱离的相互作用, 产生塑形变形, 其空隙逐渐增大; 继续加载至一定水平, 两者之间的握裹力和摩擦力

不足以固定紧固件于木材中, 最终导致紧固件被拉出的破坏. 这种失效是一种延性破坏. 失效(b) 是由于紧固件过多, 金属件强度不足导致连接件的受拉破坏, 这种破坏是一种脆性破坏应予以避免. 失效(c) 是由于金属件固定在试块下端的位置过低, 导致试块边部拉穿, 该种破坏也是一种脆性破坏. 失效(d) 是由于金属件横纹方向刚度不足, 不足以带动紧固件群作集体运动, 导致连接件的弯曲扭转, 其翘曲应力将导致锚固部分的螺纹破坏, 这种破坏是连接件本身的延性破坏, 紧固件并没有发生作用. 失效(e) 是由于锚固部分强度不足导致螺栓的受拉脆性破坏. 失效(b) ~ (e) 应尽量避免. 理想的延性破坏即模式(a) 是紧固件全部被拔出而不是金属连接件本身的破坏. 在测试不同金属连接件和不同数量种类的紧固件组合之后, 发现最适合的连接组合基本属于失效(a) 的组合, 如表 4 所示.

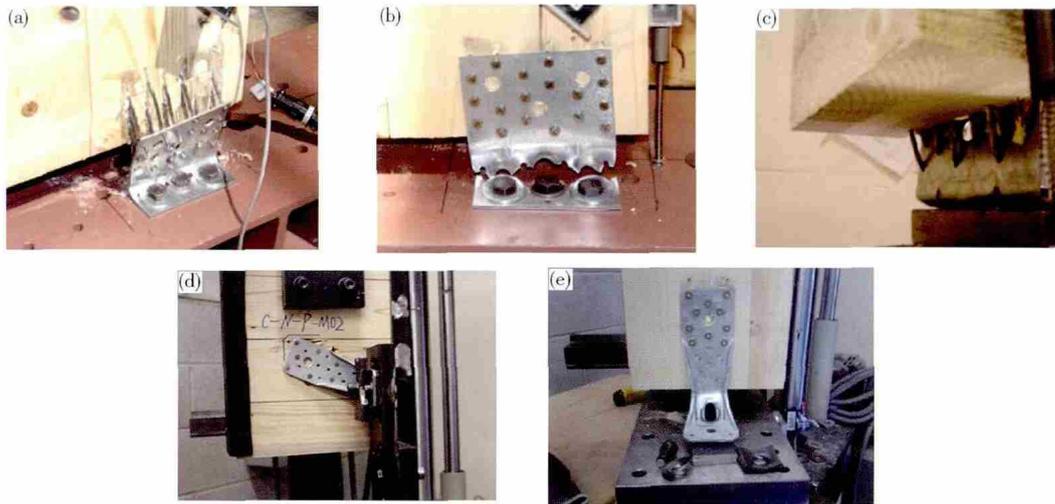


图 8 连接试验失效模式. (a) 钉子被拔出; (b) 金属件受拉破坏; (c) 边破坏; (d) 金属件严重变形; (e) 螺栓受拉破坏

Fig. 8 Failure modes of connection tests: (a) fastener pull-out; (b) bracket connection tensile failure; (c) CLT block edge failure; (d) bracket connection large deformation; (e) bolt tensile failure

表 4 金属连接件与紧固件组合

Table 4 Combination of bracket connection and fasteners

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 16d × 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
连接 4	金属连接件 B	10 个螺旋钉 16d × 3½"
连接 5	金属连接件 C	7 个螺旋钉 16d × 3½"
连接 6	金属连接件 C	7 个螺丝钉 5 × 90 mm
连接 7	金属连接件 C	9 个螺丝钉 4 × 70 mm

3.2 荷载—位移曲线

由于木材是一种天然材料,为获得稳定可靠的力学参数,每种连接每个方向至少进行三组单调加载试验获得平均骨架曲线和不少于三组循环往返加载试验获得平均滞回曲线包络线.由于篇幅限制,本文仅列出了连接 1 顺纹方向单调加载下和滞回加载的荷载—位移曲线,如图 9(a)和(b)是所示. A-N-L-M_x 表示

连接 1 顺纹方向单调加载下试验编号, A-N-L-C_x 表示连接 1 顺纹方向循环加载下试验编号. 由图 9(a)可以看出,其单调曲线经历了弹性阶段到塑性阶段,然后达到极限荷载,之后承载力下降直至破坏的全过程,并没有明显的屈服点,表现了非线性;其滞回曲线也表现出了高度的非线性,以及明显的刚度退化、强度退化和捏拢现象.这主要是因为随着位移加载,紧固件与交叉层积木接触介质之间形成孔隙,孔隙逐渐加大,紧固件在接触介质中发生了滑移,产生了逐渐加剧的刚度退化、强度退化和捏拢现象,最终导致紧固件在交叉层积木介质中滑移拔出.

为了方便比较几种连接包络曲线的特征,绘制了各种连接在单调加载下顺纹方向和横纹方向的平均骨架曲线如图 10 和图 11 所示.

由图 10 和图 11 可知,7 种连接在顺纹方向随着位移加载,连接从弹性阶段到塑性阶段,然后达到极限荷载,之后承载力下降直至破坏.在顺纹方向 7 种连接破坏属于失效(a)模式(图 8(a)).由图 11 看出,在横

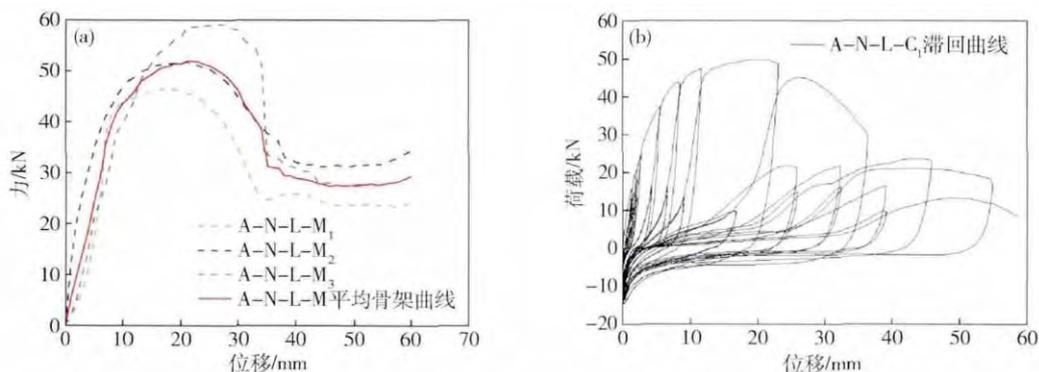


图 9 (a) 连接 1 顺纹方向单调加载包络线; (b) 连接 1 顺纹方向单调加载滞回曲线

Fig. 9 (a) Monotonic envelopes of connection 1 parallel to the grain direction; (b) hysteresis curves of connection 1 parallel to the grain direction

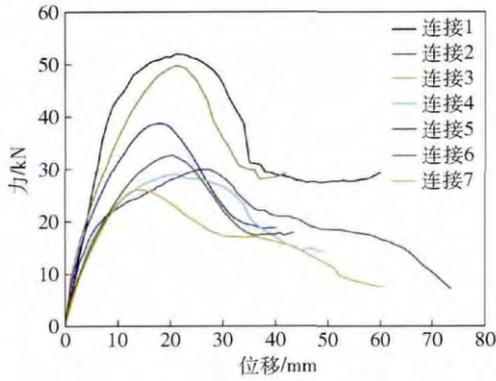


图 10 顺纹方向单调加载平均包络线

Fig. 10 Monotonic average envelopes of connections parallel to the grain direction

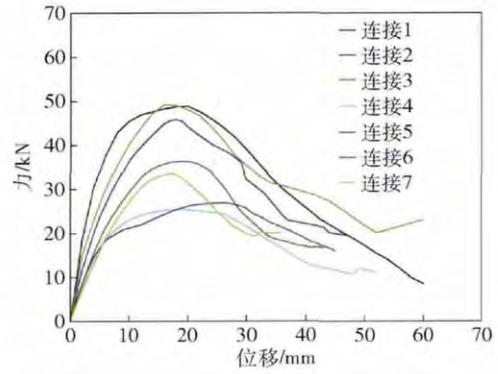


图 12 顺纹方向反复往返加载平均包络线

Fig. 12 Average hysteresis envelopes of connections parallel to the grain direction

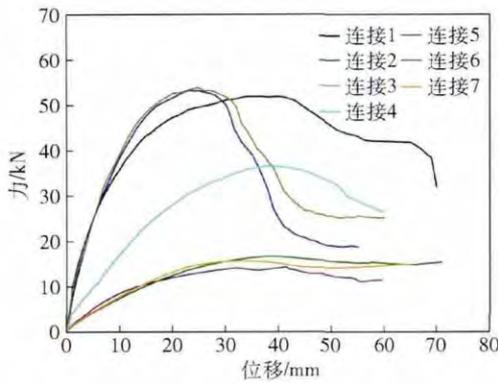


图 11 横纹方向单调加载平均包络线

Fig. 11 Monotonic average envelopes of connections perpendicular to the grain direction

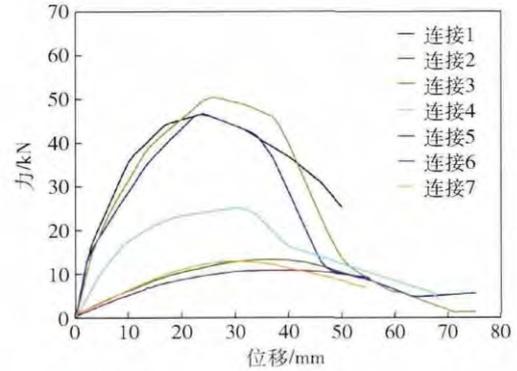


图 13 横纹方向反复往返加载平均包络线

Fig. 13 Average hysteresis envelopes of connections perpendicular to the grain direction

纹方向,连接 1、2、3 和 4 展现了失效 (a) 模式 (图 9 (a)) 的延性破坏过程;而连接 5、6 和 7 峰值承载力低至 15 kN 左右,而且在达到峰值承载力之后展现了很长一段荷载稳定阶段,产生很大的变形.这主要是由于连接件在横纹方向刚度薄弱,导致连接件自身产生很大变形(弯曲和扭转)而非带动紧固件发生变形.

在滞回试验中,各连接在顺纹方向上展现了完整的延性破坏过程见图 12,说明在顺纹方向三种金属连接件的强度足以带动紧固件的往返运动,产生模式 (a) 的失效;而连接 5、6 和 7 在横纹方向的低周往返加载试验中表现出类似于单调加载试验中的现象,峰值承载力低至 13 kN,峰值力之后产生很大的变形,主要是金属连接件自身变形而非紧固件发生变形,产生模式 (d) 的失效.如图 13 所示.

3.3 位移延性

通过获得的荷载-位移骨架曲线以及滞回包络线发现木节点没有钢构件那么明显的屈服点,屈服荷载和屈服位移不容易确定.采用等效能量法^[20]确定了

构件的失效荷载为 P_u , 相当于极限荷载 P_{peak} 的 0.8 倍,失效荷载对应的失效位移即极限位移 D_u , 极限荷载对应的位移 D_{peak} , 初始刚度 K_e , 屈服荷载 P_y , 屈服位移 D_y , 延性系数 δ (定义为失效位移与屈服位移的比值), 各个连接的重要力学参数列表 5 和表 6.

根据表 5 发现:顺纹方向无论是单调加载还是循环往返加载,所有连接的延性系数基本都达到 3 以上,从峰值荷载来看,由金属连接件 A 构成的连接 1、2 和 3 承载能力最大,在 38 ~ 52 kN 之间;其次是金属连接件 C 构成的连接 5、6 和 7,在 26.85 ~ 36.36 kN 范围之内;最小是金属连接件 B 构成的连接 4,在 25.3 ~ 29.1 kN 之间.由金属连接件 A 构成的三种连接中,在单调加载下,其承载能力从大到小依次是连接 1 (52 kN)、连接 3 (49.7 kN) 和连接 2 (38.7 kN);在低周往返加载下,其承载能力从大到小依次为连接 3 (49.2 kN)、连接 1 (48.9 kN) 和连接 2 (45.8 kN).峰值力相差不大的情况下,连接 1 在滞回加载过程中展现了突出的延性能力,延性系数达到 6.12,而其余两种连接的延性系数在 3 左右,所以顺纹方向上根据单

表 5 顺纹方向连接的包络线重要力学参数

Table 5 Key parameters of connection envelopes parallel to the grain direction

连接	加载模式	初始刚度, $K_c / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	屈服荷载, P_y / kN	峰值荷载, $P_{\text{peak}} / \text{kN}$	失效荷载, P_u / kN	屈服位移, D_y / mm	峰值位移, $D_{\text{peak}} / \text{mm}$	失效位移, D_u / mm	延性系数, δ
连接 1	单调	4.7	49.1	52	41.6	10.4	21	32.3	3.1
	滞回	9.1	44.6	48.9	39.1	4.9	20	30	6.12
连接 2	单调	4.9	34.1	38.7	31.0	6.9	18	24	3.48
	滞回	5.1	40.2	45.8	36.6	7.9	18	29	3.67
连接 3	单调	4.9	44	49.7	39.8	9.0	21.0	27.9	3.1
	滞回	6.2	43.6	49.2	39.3	7.0	16	27	3.86
连接 4	单调	3.5	26.2	29.1	23.2	7.5	21	33.9	4.52
	滞回	3.7	23.4	25.3	20.3	6.3	19	31.4	4.98
连接 5	单调	4.26	25.94	29.93	23.95	6.09	26.5	34	5.58
	滞回	3.9	23.88	26.85	21.48	6.12	25.5	35.55	5.81
连接 6	单调	3.26	28.48	32.6	26.09	8.74	20	27.2	3.11
	滞回	3.91	33.38	36.36	29.09	8.54	19	26.75	3.13
连接 7	单调	3.16	23.48	26.03	20.83	7.43	14.5	23.5	3.16
	滞回	3.16	30.57	33.63	26.90	9.67	17.5	23.5	2.4

表 6 横纹方向连接的包络线重要力学参数

Table 6 Key parameters of connection envelopes perpendicular to the grain direction

连接	加载模式	初始刚度, $K_c / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	屈服荷载, P_y / kN	峰值荷载, $P_{\text{peak}} / \text{kN}$	失效荷载, P_u / kN	屈服位移, D_y / mm	峰值位移, $D_{\text{peak}} / \text{mm}$	失效位移, D_u / mm	延性系数, δ
连接 1	单调	5.1	46.6	51.9	41.6	9.1	37	58.2	6.40
	滞回	5.1	41.5	46.7	37.4	8.1	24	39.2	4.84
连接 2	单调	4.5	41	45.6	36.5	9.1	23	32	3.51
	滞回	4.2	40.2	46.4	37.1	9.6	24	36.7	3.82
连接 3	单调	4.3	42.2	46.1	36.9	9.7	25	34.7	3.58
	滞回	4.1	44.5	50.4	40.3	10.8	40.3	39.7	3.68
连接 4	单调	1.5	28.3	31.3	25.1	18.6	38	54.1	2.91
	滞回	2.2	22.5	25.2	20.1	10.3	30	36.7	3.56
连接 5	单调	0.87	11.03	12.35	9.88	12.68	32	50.25	3.96
	滞回	0.48	11.21	12.12	9.70	23.35	30	48	2.06
连接 6	单调	1.02	14.51	16.35	13.08	14.23	33	57.5	4.04
	滞回	0.64	12.17	13.3	10.64	19	36.5	49.25	2.60
连接 7	单调	0.70	13.15	13.4	10.72	18.8	33.5	54.5	2.90
	滞回	0.67	11.8	12.9	10.32	17.6	30	43.4	2.46

调和滞回骨架曲线判断连接 1 是最优的连接。

由表 6 对比发现,横纹方向,从峰值荷载来看,综合单调加载和低周往返加载,由金属连接件 A 构成的连接 1、2 和 3 的极限承载力最大,其范围在 46.1 ~ 51.9 kN;其次是金属连接件 B 构成的连接 4,位于 25.2 ~ 31.3 kN 之间;最小是金属连接件 C 构成的连接 5、6 和 7 在 12.12 ~ 16.35 kN 之间。这主要是因为金

属连接件 C 在垂直于纹理方向相比于平行于纹理方向上刚度较弱,不能带动紧固件群的整体运动,金属连接件发生很大的塑性变形,其峰值荷载其实是金属连接件的承载力。在由金属件 B 构成的连接 4,单调加载下极限承载力达到 31.3 kN;在低周往返加载下极限承载力为 25.2 kN。在由金属连接件 A 构成的三种连接中,在单调加载下,其承载能力从大到小依次是连接 1

(51.9 kN)、连接 3 (46.1 kN) 和连接 2 (45.6 kN); 在低周循环加载下, 其承载能力从大到小依次为连接 3 (50.4 kN)、连接 1 (46.7 kN) 和连接 2 (46.4 kN)。同样连接 1 在单调加载和滞回加载过程中展现了突出的延性能力, 延性系数分别达到 6.40 和 4.84, 而连接 2 和 3 的延性系数在 3.5 左右。

综上所述, 由金属连接件 A 和 B 组成的连接在顺纹和逆方向刚度分配相对均匀, 可以作为交叉层积木剪力墙连接; 由连接件 A 构成的连接 1 在延性和承载能力上是 7 种连接中最优的连接; 而金属连接件 C 虽然在顺纹方向有较强的承载能力, 但是在横纹方向上, 从外形看腰部过窄形成薄弱面, 同时锚固螺栓孔的纵向分布并不能提供较大的锚固能力。

4 结论

(1) 在交叉层积木试块不变的情况下, 紧固件的尺寸规格、分布范围以及配比数量, 金属件对基础的锚固能力以及金属件的尺寸规格对连接的力学性能影响很大。

(2) 连接试验中紧固件全部被滑移拔出的失效模式为理想的延性破坏模式, 在荷载-位移曲线中表现为从弹性阶段、塑性阶段到极限荷载, 之后承载力下降直至破坏的完整曲线, 滞回曲线表现出逐渐加剧的刚度退化、强度退化和捏拢现象。

(3) 金属连接件 A 组成的连接 1、2 和 3 由于在顺纹方向和横纹方向上都有相对高的刚度和强度, 能够带动紧固件群做整体运动, 提供较大的极限承载力; 其中连接 1 是 7 种连接在延性和承载能力方面最佳的连接。

参 考 文 献

- [1] Crespell P, Gagnon S. *Cross Laminated Timber: a Primer*. Pointe-Claire Quebec: FP Innovations, 2010
- [2] Wells M. Stadthaus, London: raising the bar for timber buildings. *Proceedings of the ICE-Civil Engineering*, 2011, 164(3): 122
- [3] Yates M, Linegar M, Dujic B B. Design of an 8 storey Residential Tower from KLH cross laminated solid timber panels // *10th World Conference on Timber Engineering*. Miyazaki, 2008
- [4] Waugh A, Wells M, Lindegar M. Tall timber buildings: application of solid timber constructions in multi-storey buildings // *Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe - Timber Committee*. Geneva, 2010
- [5] Lehmann S. Developing a prefabricated low-carbon construction system using cross-laminated timber (CLT) panels for multi-storey inner-city infill housing in Australia. *Coll Publishing*, 2012, 7(3): 131
- [6] *Standard for Performance-rated Cross-laminated Timber*. APA-The Engineered Wood Association, 2012
- [7] Gagnon S, Ciprian P. *CLT Handbook: Cross-laminated Timber*. FPInnovations, 2011
- [8] Ceccotti A, Follesa M, Kawai N, et al. Which seismic behaviour factor for multi-storey buildings made of cross-laminated wooden panels // *Proceedings of 39th CIB W18 Meeting*. Florence, 2006: 4
- [9] Ceccotti A, Sandhaas C, Yasumura M. Seismic behaviour of multi-storey cross-laminated timber buildings // *Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe - Timber Committee*. Geneva, 2010
- [10] De Normalisation C E. *Design of Structures for Earthquake Resistance: Part 1. General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. Eurocode 8, EN 1998-1: 2004
- [11] Dujic B, Strus K, Zarnic R, et al. Prediction of dynamic response of a 7-storey massive XLam wooden building tested on a shaking table // *World Conference on Timber Engineering*, Riva del Garda, 2010: 20
- [12] Buchanan A H. Developments in design of wood structures for earthquake resistance // *4th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, 1983
- [13] Leijten A J M. *Densified Veneer Wood Reinforced Timber Joints with Expanded Tube Fasteners*. Delft: Delft University Press, 1998
- [14] Xian L. *Study on the Performance of Filler Wall Steel Frames Construction Under load* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008
(洗兰. 带填充墙的钢框架结构的受力性能分析 [学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2008)
- [15] Li G H, Yu Y Q, Gu Q. Finite element analysis for concrete infilled steel frame. *Sichuan Build Sci*, 2007, 33(5): 17
(李国华, 郁银泉, 顾强. 钢框架内填混凝土墙结构体系有限元分析. *四川建筑科学研究*, 2007, 33(5): 17)
- [16] Shen W. *Research on Stress performance of steel frame with Row-Soil Wall Infill* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012
(申薇. 生土填充墙钢框架结构受力性能研究 [学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012)
- [17] Blass H J, Fellmoser P. Design of solid wood panels with cross layers // *8th World Conference on Timber Engineering*. Lahti, 2004: 543
- [18] De Normalisation C E. *Design of Timber Structures: Part 1-4. General Rules and Rules for Buildings*. Eurocode 5, EN 1995-1: 2003
- [19] Kreuzinger H. Platten, Scheiben und Schalen: Ein Berechnungsmodell für gängige Statikprogramme. *Bauen Holz*, 1999(1): 34
- [20] 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*. Washington D C: ASTM, 2011
- [21] Lam F, Prion H G L, He M. Lateral resistance of wood shear walls with large sheathing panels. *J Struct Eng*, 1997, 123(12): 1666
- [22] DIN EN 12512 *Timber Structures - Test Methods - Cyclic Testing of Joints Made with Mechanical Fasteners*. Berlin: Beuth Verlag, 2001