

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026010

考虑滚动剪切的杉木正交胶合木 抗弯性能数值模拟

杨世玉^{1,2}, 钟永¹, 任海青¹, 张双保²

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)



摘要: 滚动剪切是正交胶合木 (cross-laminated timber, CLT) 受弯承载能力的关键影响因素之一, 但现有数值模型常因忽略其与横纹拉伸及顺纹剪切损伤的内在耦合而难以实现精准预测。研究基于连续介质损伤力学 (continuum damage mechanics, CDM) 与弹塑性理论, 构建考虑滚动剪切与横纹拉伸、顺纹剪切损伤耦合效应的木材三维正交各向异性本构模型 (简称木材本构模型), 并基于有限元 ABAQUS/VUMAT 平台开发的子程序实现模拟。将模拟数值与木材力学性能、3 组不同结构杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) CLT 足尺抗弯试验数据进行对比验证, 结果表明: 该模型能准确模拟木材受压时的弹塑性屈服行为及受拉、受剪时的线性软化特征, 对于跨厚比为 15 和 20 的 3 层和 5 层杉木 CLT, 抗弯强度的模拟值与试验值的相对误差均在 10% 以内, 且预测的宏观破坏模式与试验吻合。以跨厚比为 15 的 3 层杉木 CLT 为例进行损伤演化分析, 发现 CLT 最终弯曲失效是由中间横纹层的滚动剪切先达到损伤阈值导致的, 且滚动剪切损伤区域也存在横纹拉伸、顺纹剪切的损伤耦合作用, 验证多损伤模式间的协同演化特征。研究建立的耦合损伤模型克服传统独立失效准则的局限, 可为 CLT 结构精细化数值分析与安全评估提供支撑。

关键词: 杉木; 正交胶合木; 滚动剪切; 连续介质损伤力学; 本构模型; 数值模拟

中图分类号: TU366.2; S791.27 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 03-0065-11

Numerical Simulation of Bending Performance of Cross-Laminated Timber Made of Chinese Fir by Considering Rolling Shear Component

YANG Shiyu^{1,2}, ZHONG Yong¹, REN Haiqing¹, ZHANG Shuangbao²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Rolling shear failure is one of the critical factors limiting the bending capacity of cross-laminated timber (CLT), however existing numerical models often fail to achieve accurate predictions due to neglecting the intrinsic coupling among rolling shear, transverse tensile, and longitudinal shear damage. A three-dimensional orthotropic constitutive model for wood was developed based on continuum damage mechanics (CDM) and elastoplastic theory, which explicitly incorporates such coupling effects among rolling shear, transverse tensile, and longitudinal shear damage modes. The model was implemented numerically via a user-defined material subroutine (VUMAT) in the ABAQUS/

收稿日期: 2026-01-20; 修改日期: 2026-02-05

基金项目: “十四五”重点研发计划课题“结构用大规格集成材的制造与评价关键技术”(2021YFD2200605)。

作者简介: 杨世玉 (1996—), 男, 博士研究生。Email: yangshiyucaif@163.com

通讯作者: 钟永, 男, 研究员。Email: zhongyong108@163.com

Explicit platform. Validation through wood mechanical property tests and full-scale bending tests of three-configuration CLT panels made of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) demonstrated that the model developed could accurately capture the elastic plastic yield behavior of wood under compression and the linear elastic brittle fracture behavior under tension and shear. For both three-layer and five-layer CLT specimens with span-to-thickness ratios of 15 and 20, the predicted bending strengths showed relative errors within 10% compared to experimental results, and the predicted macroscopic failure modes exhibited excellent agreement with experimental observations. Furthermore, damage evolution analysis of a three-layer CLT with a span-to-thickness ratio of 15 revealed that the ultimate bending failure was governed by rolling shear damage in the central transverse layer, which first reached the critical damage threshold. The rolling shear damage zone also coincided with regions of transverse tensile and longitudinal shear damage, verifying the synergistic evolution among multiple damage modes. The proposed coupled damage model could overcome the limitations of traditional independent failure criteria and provide a reliable tool for refined numerical analysis and safety assessment of CLT structures.

Key words: Chinese fir; cross-laminated timber (CLT); rolling shear; continuum damage mechanics; constitutive model; numerical simulation

正交胶合木 (cross-laminated timber, CLT) 作为现代工程木产品的代表, 正推动木结构向高层与大跨方向发展^[1-3]。CLT 由正交铺装层板构成, 兼具高刚度、高强度、优良的尺寸稳定性和双向力学性能, 同时具备预制化程度高、施工便捷与抗震性能好等优势, 已成为墙体、楼盖和屋盖等承重构件的理想选择, 在高层建筑及混合结构中的应用日益广泛^[4-5]。因此, 在复杂应力状态下, 精确模拟 CLT 构件的力学行为, 是其结构安全评估的关键^[2]。

CLT 在实际应用中表现出多种破坏模式, 其中滚动剪切破坏是主要的破坏模式之一^[6]。该破坏发生在木材横截面内, 主要由垂直于纹理方向的剪力引起。由于滚动剪切的强度与模量显著低于顺纹剪切, 常成为 CLT 楼板、墙板等构件在受弯状态下承载能力的主要控制因素^[7-9]。因此, 建立能够准确反映滚动剪切行为的木材本构模型, 对预测 CLT 抗弯性能具有重要意义。目前, 关于木材本构模型研究已形成多种理论框架, 包括弹塑性模型、损伤模型及其耦合形式, 多基于 Hoffman 或 Tsai-Wu、Hill 等各向异性准则^[10-12]。SANDHAAS 等^[13]基于连续介质损伤力学建立木材三维正交各向异性本构模型, 采用多失效准则识别不同损伤模式。针对 CLT 的数值模拟, 现有研究多将滚动剪切简化为横向剪切破坏或予以忽略^[14-15], 尚未建立

其与横纹拉伸及顺纹剪切损伤之间的耦合作用。这种解耦处理难以反映木材复杂的应力重分布路径, 导致模型难以准确捕捉 CLT 在临界状态下的渐进破坏特征, 从而可能产生预测偏差。

鉴于此, 本研究基于连续介质损伤力学 (continuum damage mechanics, CDM) 与弹塑性理论, 建立木材三维正交各向异性本构模型。该模型通过引入多模式强度准则与损伤演化律, 建立木材滚动剪切破坏的阈值条件及其与横纹拉伸、顺纹剪切损伤间的相互耦合关系。在此基础上, 对有限元 ABAQUS 平台的 VUMAT 接口进行二次开发, 通过与木材力学性能试验和 CLT 足尺抗弯试验结果对比, 验证模型的准确性与适用性。研究为 CLT 的安全设计与性能评估提供理论支撑。

1 木材三维正交各向异性本构关系模型构建方法

基于 CDM 与弹塑性理论, 构建考虑滚动剪切损伤及其与横纹拉伸、顺纹剪切损伤间相互耦合效应的木材三维正交各向异性本构模型 (简称木材本构模型)。该模型由正交各向异性弹性本构、多模式强度准则与损伤演化律三部分构成。

1.1 正交各向异性弹性定义

木材在弹性阶段可视为正交各向异性材料, 其应力-应变关系由广义胡克定律描述^[12]。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

式中: $\{\sigma\} = \{\sigma_{LL}, \sigma_{RR}, \sigma_{TT}, \sigma_{LR}, \sigma_{RT}\}^T$ 为柯西应力张量; $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{LL}, \varepsilon_{RR}, \varepsilon_{TT}, 2\varepsilon_{LR}, 2\varepsilon_{LT}, 2\varepsilon_{RT}\}^T$ 为工程应变张量; L、R 和 T 分别为木材的纵向、径向和弦向; σ_{LL} 、 σ_{RR} 、 σ_{TT} 分别为 L、R 和 T 三个主方向的正应力, MPa; σ_{LR} 、 σ_{RT} 、 σ_{LT} 分别为 L-R、R-T 和 L-T 三个主平面内的剪切应力, MPa; ε_{LL} 、 ε_{RR} 、 ε_{TT} 分别为 L、R 和 T 三个主方向的正应变; ε_{LR} 、 ε_{RT} 、 ε_{LT} 分别为 L-R、R-T 和 L-T 三个主平面内的剪切应变; $[D]$ 为刚度矩阵。

$[D]$ 为 6×6 对称矩阵, 由以下 9 个独立弹性常数确定。1) 3 个主方向的弹性模量: E_L 、 E_R 和 E_T , MPa; 2) 3 个主平面内的剪切模量: G_{LR} 、 G_{RT} 和 G_{LT} , MPa; 3) 3 个主平面内的泊松比: ν_{LR} 、 ν_{RT} 和 ν_{LT} 。

弹性常数满足对称性条件: $\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}$ 。

1.2 连续损伤力学理论

为表征木材的非线性力学行为, 引入连续损伤力学理论。采用一组损伤变量 d_k 来描述材料的损伤状态, 其取值范围为 $0 \leq d_k < 1$, 其中 $d_k = 0$ 表示初始无损伤, $d_k = 1$ 表示完全失效。

通过损伤效应张量 $[M]$ 建立名义应力 σ 与有效应力 $\bar{\sigma}$ 之间的关联。

$$\bar{\sigma} = [M]\sigma \quad (2)$$

式中: $[M]$ 的数学形式为对角矩阵, 元素 $M_{ij} = 1/(1 - d_k)$, 非对角元素为零。

采用柔度退化形式构造损伤柔度矩阵, 并通过求逆得到损伤刚度矩阵:

$$[D^{dam}] = ([S^{dam}])^{-1} \quad (3)$$

具体形式为:

$$[S^{dam}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_0)E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{(1-d_{90R})E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{(1-d_{90T})E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{vR})G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{vT})G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{roll})G_{RT}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: d_0 为顺纹损伤变量; d_{90R} 为径向损伤变量; d_{90T} 为弦向损伤变量; d_{vR} 、 d_{vT} 为顺纹剪切损伤变量; d_{roll} 为滚动剪切损伤变量。

1.3 多屈服面强度准则

为准确识别木材在不同应力状态下的损伤萌生, 引入 8 个独立的应力型强度准则^[13], 用于判断木材在不同应力状态下的损伤萌生时刻。

1) 顺纹拉伸 ($\sigma_{LL} \geq 0$):

$$F_{t0} = \frac{\sigma_{LL}}{f_{t0}} - 1 \geq 0 \quad (5)$$

式中: F_{t0} 为顺纹拉伸损伤萌生准则函数; f_{t0} 为 L 主方向的拉伸强度, MPa。

2) 顺纹压缩 ($\sigma_{LL} < 0$):

$$F_{c0} = \frac{-\sigma_{LL}}{f_{c0}} - 1 \geq 0 \quad (6)$$

式中: F_{c0} 为顺纹压缩损伤萌生准则函数; f_{c0} 为 L 主方向的压缩强度, MPa。

3) 径向拉伸-剪切复合 ($\sigma_{RR} \geq 0$):

$$F_{i90R} = \left(\frac{\sigma_{RR}}{f_{i90R}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{LR}}{f_v}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{RT}}{f_{roll}}\right)^2 - 1 \geq 0 \quad (7)$$

式中: F_{i90R} 为径向拉伸-剪切复合损伤萌生准则函数; τ_{LR} 、 τ_{RT} 为 L-R 和 R-T 两个主平面内的剪切应力, MPa; f_{i90R} 为 R 主方向的拉伸强度, MPa; f_v 为顺纹剪切强度, MPa; f_{roll} 为滚动剪切强度, MPa。

4) 径向压缩 ($\sigma_{RR} < 0$):

$$F_{c90R} = \frac{-\sigma_{RR}}{f_{c90R}} - 1 \geq 0 \quad (8)$$

式中: F_{c90R} 为径向压缩损伤萌生准则函数; f_{c90R} 为 R 主方向的压缩强度, MPa。

5) 弦向拉伸-剪切复合 ($\sigma_{TT} \geq 0$):

$$F_{i90T} = \left(\frac{\sigma_{TT}}{f_{i90T}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{LT}}{f_v}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{RT}}{f_{roll}}\right)^2 - 1 \geq 0 \quad (9)$$

式中: F_{i90T} 为弦向拉伸-剪切复合损伤萌生准则函数; τ_{LT} 为 L-T 主平面内的剪切应力, MPa; f_{i90T} 为 T 主方向的拉伸强度, MPa。

6) 弦向压缩 ($\sigma_{TT} < 0$):

$$F_{c90T} = \frac{-\sigma_{TT}}{f_{c90T}} - 1 \geq 0 \quad (10)$$

式中: F_{c90T} 为弦向压缩损伤萌生准则函数; f_{c90T} 为 T 主方向的压缩强度, MPa。

7) 径向平面剪切 (含滚动剪切):

$$F_{vR} = \left(\frac{\tau_{LR}}{f_v}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{RT}}{f_{roll}}\right)^2 - 1 \geq 0 \quad (11)$$

式中: F_{vR} 为径向平面剪切损伤萌生准则函数。

8) 弦向平面剪切 (含滚动剪切):

$$F_{\text{vT}} = \left(\frac{\tau_{\text{LT}}}{f_{\text{v}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\text{RT}}}{f_{\text{roll}}} \right)^2 - 1 \geq 0 \quad (12)$$

式中: F_{vT} 为弦向平面剪切损伤萌生准则函数。

1.4 损伤演化模型

当应力达到任一强度准则条件时, 对应损伤变量开始演化 (图1)。针对不同类型的损伤, 模型采用具有针对性的差异化演化规律^[13]。

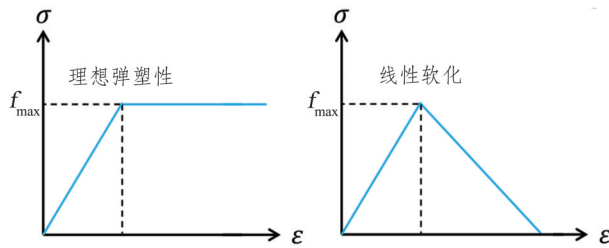


图1 两种损伤演化方式

Fig.1 Two ways of damage evolution

1) 压缩损伤 (理想弹性):

$$d_c = 1 - \frac{1}{k_c} \quad (13)$$

式中: d_c 为压缩损伤变量; k_c 为压缩损伤阈值变量。

2) 拉伸与剪切损伤 (基于断裂能 G_f 的线性软化): 为减小材料软化模型中的网格敏感性, 引入特征断裂能 $g_f = G_f/L_{\text{char}}$ 进行正则化处理^[16]。基于此, 拉伸与剪切损伤的演化法则表示为:

$$d_k = 1 - \frac{1}{f^2 - 2g_f E} \left(f^2 - \frac{2g_f E}{k} \right) \quad (14)$$

式中: f 为对应损伤模式的强度值, MPa; g_f 为特征断裂能, N/mm; k 为损伤阈值变量; E 为对应方向的弹性模量或剪切模量, MPa; L_{char} 为单元特征长度, mm。

3) 滚动剪切损伤: 滚动剪切破坏发生在木材横截面内, 其损伤演化与横纹拉伸及顺纹剪切密切相关。借鉴 CDM 中有效承载面积退化的乘积形式^[17], 将滚动剪切损伤定义为相关损伤模式的耦合结果:

$$d_{\text{roll}} = 1 - (1 - d_{\text{t90R}})(1 - d_{\text{vR}})(1 - d_{\text{t90T}})(1 - d_{\text{vT}}) \quad (15)$$

式中: 分量 d_{t90R} 、 d_{vR} 、 d_{t90T} 、 d_{vT} 均为拉伸或剪切损伤, 对应图1中线性软化模型。

1.5 数值仿真与损伤刚度迭代

本构模型通过 ABAQUS/Explicit 的 VUMAT 子程序实现模拟, 并采用基于柔度矩阵退化的应力更新算法 (图2)。算法流程如下:

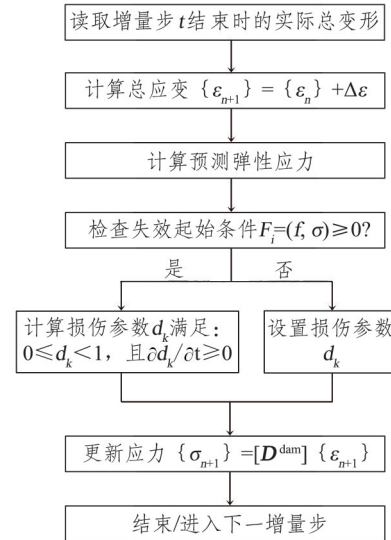


图2 应力更新算法流程

Fig.2 Flowchart of stress update algorithm

1) 应变更新: 读取应变增量 $\Delta\epsilon$ 和单元特征长度 L_{char} , 更新总应变 $\{\epsilon_{n+1}\} = \{\epsilon_n\} + \Delta\epsilon$ 。

2) 损伤判定: 基于无损刚度矩阵 $[D_0]$ 计算弹性应力预测值 $\{\sigma^{\text{elastic}}\} = [D_0]\{\epsilon_{n+1}\}$, 并评估 8 个强度准则函数 F_i 。若 $F_i > 0$, 则激活对应损伤模式并更新历史变量。

$$k_{i,n+1} = \max(1, k_{i,n}, F_i) \quad (16)$$

3) 刚度退化: 根据当前损伤状态构建损伤柔度矩阵 $[S^{\text{dam}}]_{ij} = [S_0]_{ij}/(1 - d_k)$, 通过求逆得到损伤刚度矩阵 $[D^{\text{dam}}] = ([S^{\text{dam}}])^{-1}$ 。

4) 应力更新: 计算当前应力 $\{\sigma_{n+1}\} = [D^{\text{dam}}]\{\epsilon_{n+1}\}$ 。

5) 黏性正则化: 为改善因材料软化引起的收敛性问题, 采用黏性正则化技术^[18]以平滑刚度突变。

$$d_{n+1}^v = \frac{\eta}{\eta + \Delta t} d_n^v + \frac{\Delta t}{\eta + \Delta t} d_{n+1} \quad (17)$$

式中: d_{n+1}^v 、 d_n^v 分别为第 $n+1$ 和第 n 增量步的黏性正则化损伤变量; d_{n+1} 由公式 (13) 或 (14) 计算所得的局部损伤变量; Δt 为时间步长, s; η 为黏性参数, 取 $\eta = 0.0001$ ^[13]。

2 模型验证与分析

为验证上述本构模型的准确性及其VUMAT子程序的可操作性，采用杉木木材力学性能和CLT足尺抗弯性能两部分数值模拟验证。

2.1 木材力学性能数值模拟

参考相关标准^[19-23]及ZHANG等^[24]报道的杉木

规格材力学性能（表1），建立杉木顺纹拉伸、顺纹压缩、径向拉伸、径向压缩以及顺纹剪切的有限元模型。参考文献^[25-26]建议的双切口哑铃型试件，针对试件面内剪切行为全面验证模型屈服准则的有效性。

表1 杉木力学性能试验值与模拟值

Tab.1 Experimental and simulated values of mechanical properties of Chinese fir

模型构建参数						模拟验证			
模量	数值 ^a /MPa	泊松比	数值 ^a	断裂能	数值 ^a /(N·mm ⁻¹)	指标	试验值 ^a /MPa	模拟值/MPa	相对误差
E_L	9 990	ν_{LR}	0.32	G_{f0}	60	f_{t0}	46.2	46.3	0.2%
E_R	1 040	ν_{LT}	0.35	G_{f90}	0.5	f_{c0}	32.7	33.6	2.8%
E_T	820	ν_{RT}	0.46	G_{fv}	1.2	f_{t90}	2.5	2.3	-8.0%
G_{LR}	550			G_{froll}	0.6	f_{c90}	3.6	3.8	5.6%
G_{LT}	300					f_v	5.2	5.1	-1.9%
G_{RT}	190					f_{roll}	1.3	1.2	-7.7%

注1: G_{f0} 、 G_{f90} 、 G_{fv} 、 G_{froll} 分别为顺纹、横纹、顺纹剪切及滚动剪切断裂能；其余符号含义见正文。a 数据来源于文献[24]。

为验证表1力学参数的合理性，将所列数据与无疵小试样统计数据及结构用规格材足尺测试数据对比。杉木顺纹弹性模量 E_L =9 990 MPa，在《中国主要树种木材物理力学性质》^[27]统计区间（9 000~12 000 MPa）内；弹性模量比 E_R/E_L =0.104、 E_T/E_L =0.082，符合针叶树材正交各向异性的典型规律^[28]；顺纹抗压强度 f_{c0} =32.7 MPa，处于《中国木材志》^[29]与《中国主要人工林树种木材性质》^[30]的统计区间（分别为29~37 MPa、31.8~35.4 MPa）内；顺纹抗剪强度 f_v =5.2 MPa，在《中国主要树种的木材物理力学性质》^[27]统计区间（3.4~9.7 MPa）内；滚动剪切强度 f_{roll} =1.3 MPa，约为顺纹抗剪强度的1/4，处于针叶树材典型比值范围（1/6~1/4^[31]）内。顺纹抗拉强度 f_{t0} =46.2 MPa，接近无疵小试样统计下限（48~78 MPa^[27]、73~77 MPa^[30]），高于足尺规格材均值（SS级31.3 MPa^[32]）。CLT层板为含有节子的结构用规格材，其抗拉强度介于无疵小试样与足尺规格材之间，故 f_{t0} 取值合理，且相对无疵小试样偏于保守。综上，表1所列力学参数可作为后续数值模拟的材料参数输入。

杉木在不同纹理方向拉、压、剪等荷载工况下的模拟应力云图及应力-位移曲线，如图3所示。模拟值与试验值的对比结果，列于表1。各工况的相对误差在±8%以内，验证模型的预测精度。在

响应特征方面，模型精准捕捉顺纹拉伸与剪切工况下的线弹性-脆性断裂行为，以及受压工况下屈服后的塑性硬化与延性发展特征。

2.2 足尺CLT抗弯性能数值模拟

为验证模型在复杂应力状态下的适用性及对不同结构CLT的预测能力，选取两例杉木CLT进行数值模拟验证：一是ZHANG等^[24]报道的3层短跨距杉木CLT抗弯试验；二是王菲彬等^[33]开展的3层及5层长跨距杉木CLT抗弯试验。两类试件的几何参数及试验结果见表2。

表2 杉木足尺CLT抗弯性能的试验值与模拟值

Tab.2 Experimental and simulated values of bending performance of full-scale CLT for Chinese fir

试样来源	层数	试件尺寸/mm			跨厚比	抗弯强度/MPa		相对误差/%
		长	宽	厚		试验值	模拟值	
短跨距杉木CLT ^[24]	3	900	90	54	15	25.1	24.5	-2.6
长跨距杉木CLT ^[33]	3	2 200	300	95.1	20	28.4	26.0	-8.4
	5	2 200	300	95	20	21.0	20.9	-0.6

短跨距杉木CLT由3层等厚（18 mm）杉木层板正交组坯而成，试验按照相关标准^[34]执行，跨距为810 mm，加载点间距取1/3跨距（270 mm）。长跨距试件中，3层及5层CLT分别采用31.7 mm和19 mm厚杉木层板正交铺设，跨距均为2 000 mm，加载点间距为666.6 mm（1/3跨距）。

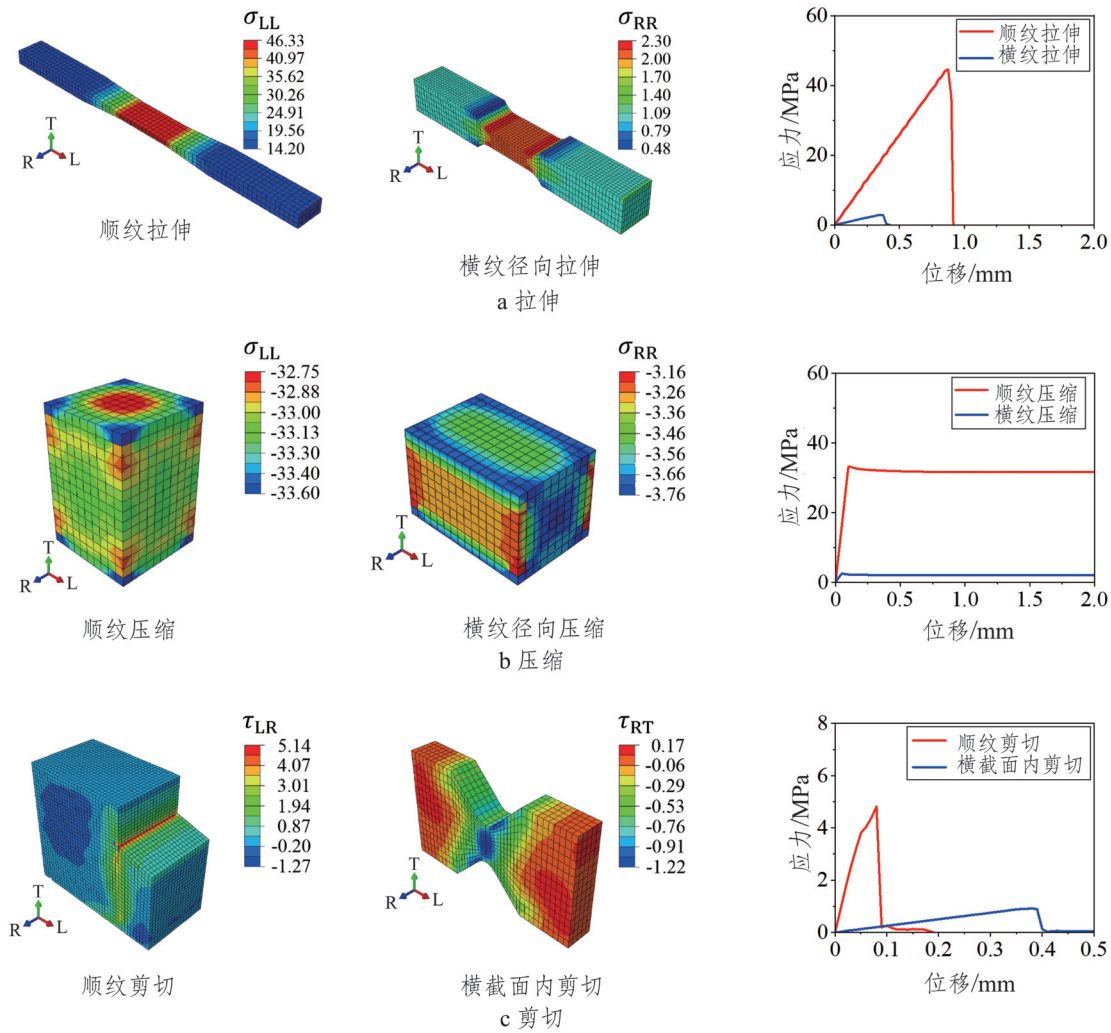


图3 杉木力学性能的有限元验证

Fig.3 Finite element validation of mechanical properties of Chinese fir

有限元模型基于 ABAQUS/Explicit 平台建立 (图4), 层板采用八节点线性六面体减缩积分单元 (C3D8R) 进行网格离散, 该单元计算效率高且适用于大变形问题。网格尺寸参考 SANDHAAS 等^[13] 构件级数值模拟经验确定: 短跨距 CLT 厚度方向取 6 mm, 其余方向取 5 mm; 长跨距 CLT 根据构件尺寸适当调整网格密度, 以兼顾计算精度与效率。本构关系通过编译的 VUMAT 子程序调用, 材料参数见表 1。层板间的胶合界面采用内聚力模型模拟, 依据文献^[24, 35-36] 设定界面参数: 法向刚度 $K_n = 4.5 \text{ N/mm}^3$, 切向刚度 $K_{t1} = K_{t2} = 30 \text{ N/mm}^3$, 临界法向及切向强度分别为 $t_n^0 = 2 \text{ MPa}$ 、 $t_{t1}^0 = t_{t2}^0 = 5 \text{ MPa}$ 。通过加载夹具施加竖向位移以模拟准静态的加载过程, 支撑支座设定为固定边界。

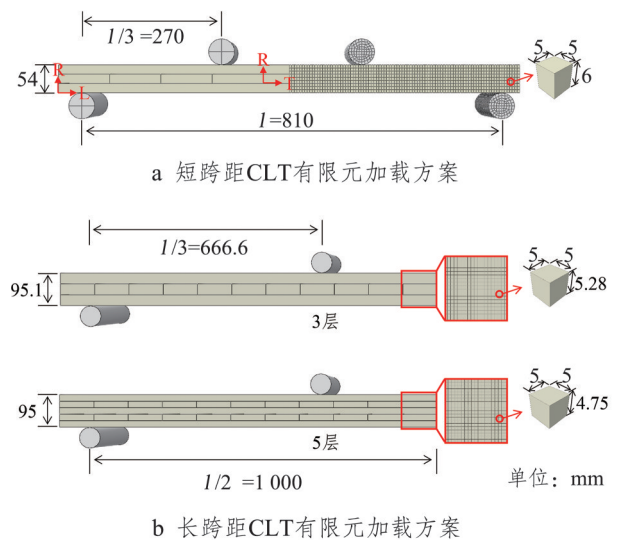


图4 CLT抗弯试验有限元模型

Fig.4 Finite element model of CLT bending test

图5展示3组CLT试件在峰值荷载时的应力场。对于顺纹方向应力 (σ_{LL}), 3组试件均呈现典型的层合梁弯曲分布特征, 如图中箭头所示, 最大拉应力集中在跨中区域的最底层纵向层, 最大压应力出现在跨中顶层纵向层。短跨距试件的 σ_{LL} 拉应力峰值为 28.03 MPa, 3层长跨距试件的 σ_{LL} 为

36.19 MPa, 5层长跨距试件的 σ_{LL} 为 29.68 MPa, 均未达到木材的顺纹拉伸强度 (46.2 MPa), 表明顺纹方向并非控制破坏的主导因素。横纹径向应力 (σ_{RR}) 分布表明, 加载头正下方及支座正上方区域存在显著的横纹压应力集中, 该承压效应在短跨距试件中尤为突出。

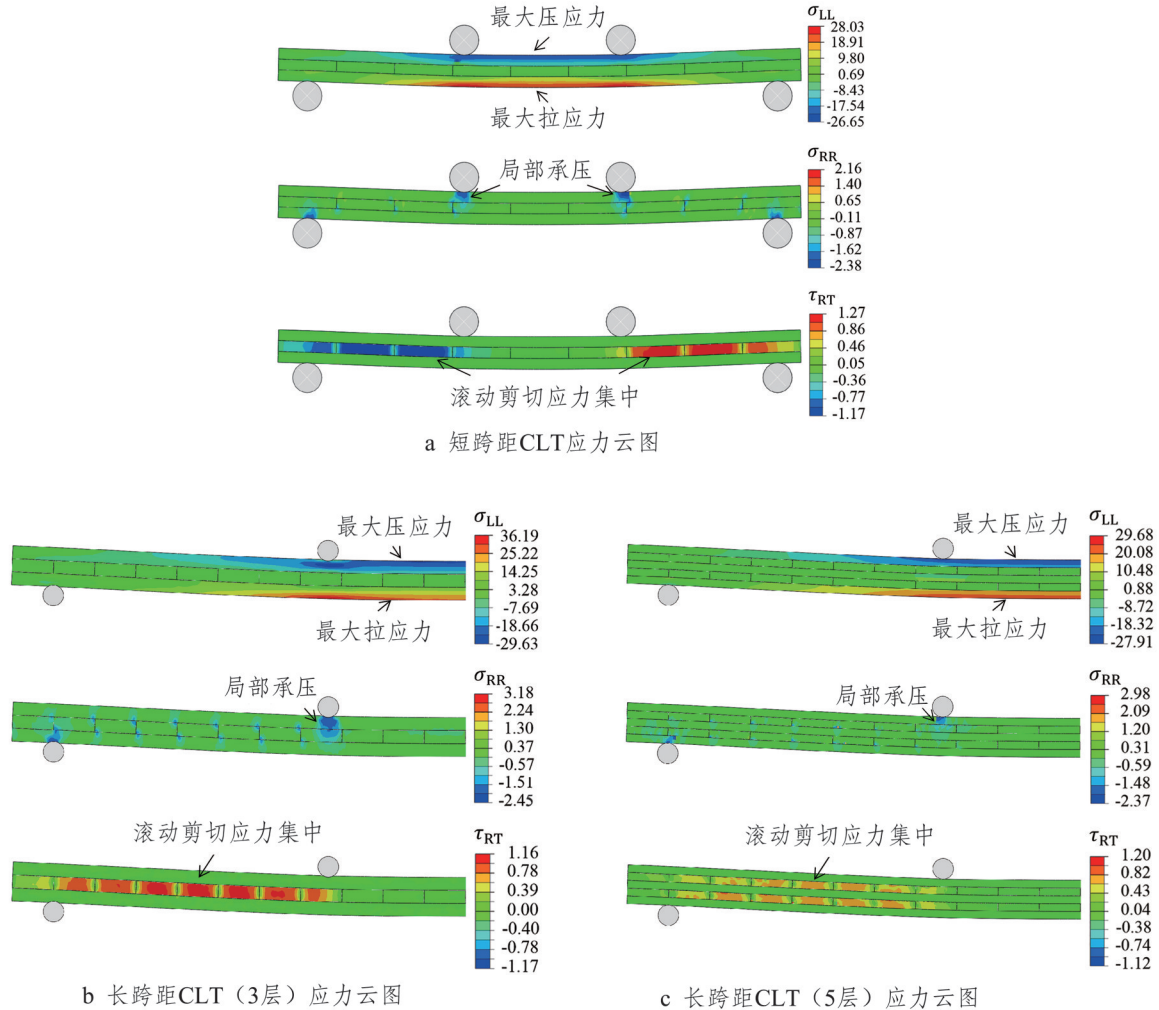


图5 CLT抗弯性能数值模拟应力云图

Fig.5 Numerical simulation stress contour plots of bending performance of CLT

值得注意, 滚动剪切应力 (τ_{RT}) 主要分布于弯剪段的横纹层。短跨距、3层长跨距和5层长跨距试件的 τ_{RT} 峰值分别为 1.27、1.16 和 1.20 MPa, 均接近木材的滚动剪切强度 f_{roll} (1.3 MPa)。与3层长跨距试件仅在一个中间横纹层形成高应力区不同, 5层长跨距试件的高滚动剪切应力区分布于上下两个横纹层, 表明该应力在厚度方向由两个横纹层共同承担。

CLT足尺抗弯试验与数值模拟的荷载-位移曲线, 如图6所示。对于短跨距试件, 弹性阶段模拟曲线与试验曲线斜率高度重合, 表明模型能精确预测CLT的抗弯刚度, 其模拟值 (24.5 MPa) 与试验值的相对误差为-2.6%。对于长跨距试件, 3层CLT抗弯强度的模拟值为 26.0 MPa, 与试验值 (28.4 MPa) 的相对误差为-8.4%; 5层CLT抗弯强度的模拟值为 20.9 MPa, 与试验值 (21.0 MPa)

的相对误差为 -0.6% 。3组试件的模拟误差均在 10% 以内,验证本构模型对不同层数及跨厚比CLT结构的适用性。在破坏阶段,所有模拟曲线与试验曲线均快速下降,表明模型能够准确捕捉CLT的失效行为。

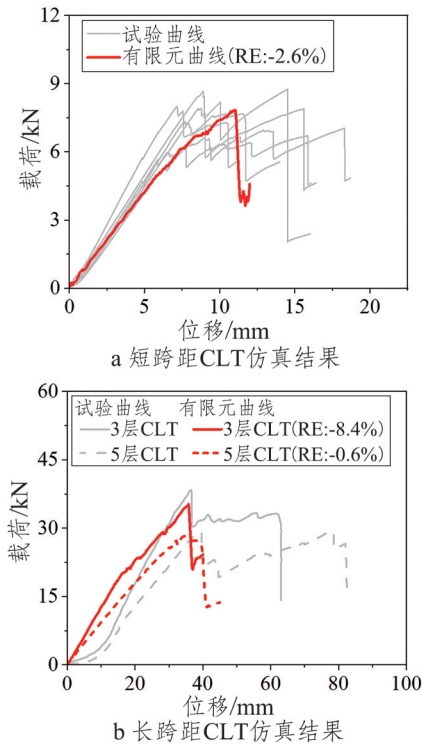


图6 CLT抗弯性能测试荷载-位移曲线与有限元模拟曲线
Fig.6 Load-displacement and finite element simulation curves of bending performance of CLT

图7对比了3组CLT试件抗弯模拟预测与试验的损伤形态,图中标注了关键损伤特征。

图7a显示,短跨距CLT试验中间横纹层出现沿年轮方向扩展的典型滚动剪切裂纹;有限元模拟结果中, d_{roll} 高损伤区(红色区域)集中于弯剪段的中间横纹层,损伤最严重区域的单元因完全失效而被删除,其空间位置与试验裂纹扩展路径高度吻合。图7b中,3层长跨距CLT的滚动剪切损伤同样集中于弯剪段横纹层,且损伤沿纵向的延伸范围较短跨距试件更广,部分严重损伤单元亦被删除;5层长跨距CLT由于存在两个横纹层,滚动剪切损伤及单元删除区域在上下两个横纹层中均有分布,损伤在双横纹层之间有所分担,单层损伤集中程度较3层结构有所缓解,但横纹层总损伤范围更为广泛。

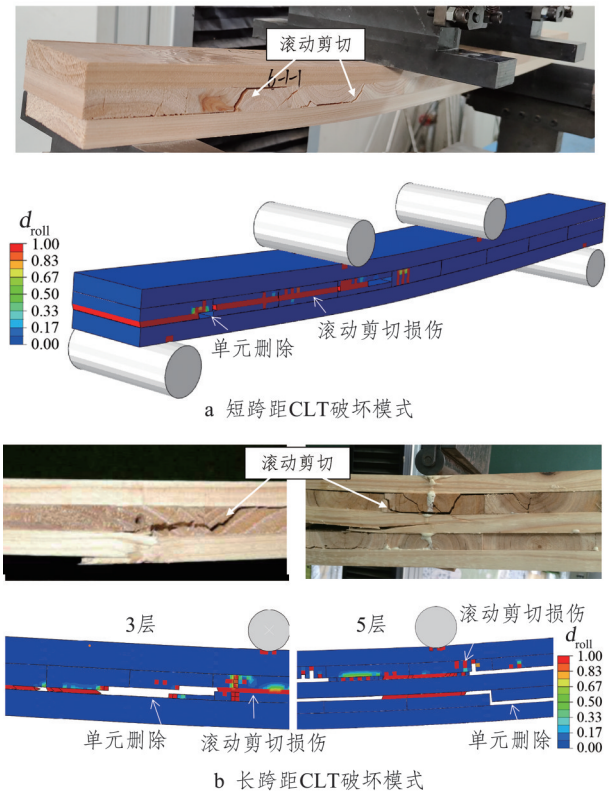


图7 抗弯性能测试试件的破坏模式与有限元模拟结果
Fig.7 Failure modes and finite element simulation results of bending performance of CLT specimens

基于3组杉木CLT的模拟结果,可量化分析跨厚比与层数对抗弯性能的影响。3层结构跨厚比由15增至20时,抗弯强度从 24.5 MPa 升至 26.0 MPa (增幅 6.1%)。低跨厚比下剪切效应显著,横纹层剪应力水平较高($1.27\text{ MPa} > 1.16\text{ MPa}$),更易触发式(7)与式(11)的复合强度准则,经式(15)耦合作用加速滚动剪切损伤累积,导致构件提前失效;跨厚比增大后弯曲正应力主导作用增强,剪切效应减弱,损伤触发推迟,承载力随之提升。相同跨厚比(20)下,5层CLT抗弯强度(20.9 MPa)较3层(26.0 MPa)降低 19.6% ,主要原因是顺纹层占比由 66.7% 降至 60% ,有效抗弯截面减小。上述结果表明,以滚动剪切为主导的CLT构件,设计时应适当增大跨厚比并优化顺/横纹层厚度配比。

2.3 损伤演化分析

为进一步揭示杉木CLT弯曲破坏机理,以ZHANG等^[24]的3层短跨距试件为例进行损伤演化分析。图8展示滚动剪切损伤首次出现完全失效

($d_{\text{roll}}=1.0$) 后承载力下降阶段各损伤变量的空间分布。从分布范围来看, 滚动剪切损伤 (d_{roll}) 在右侧弯剪段的中间横纹层呈大面积完全失效 ($d_{\text{roll}}=1.0$); 而横纹拉伸损伤 (d_{t90R} 、 d_{t90T}) 与顺纹剪切损伤 (d_{vR} 、 d_{vT}) 与滚动剪切损伤区高度重叠, 这与式 (15) 定义的耦合作用相吻合。此外, 在加载头与 CLT 接触的局部区域存在横纹径向压缩损伤 ($d_{c90R}=0.98$) 及伴随的顺纹压缩损伤 ($d_{c0}\approx 0.84$),

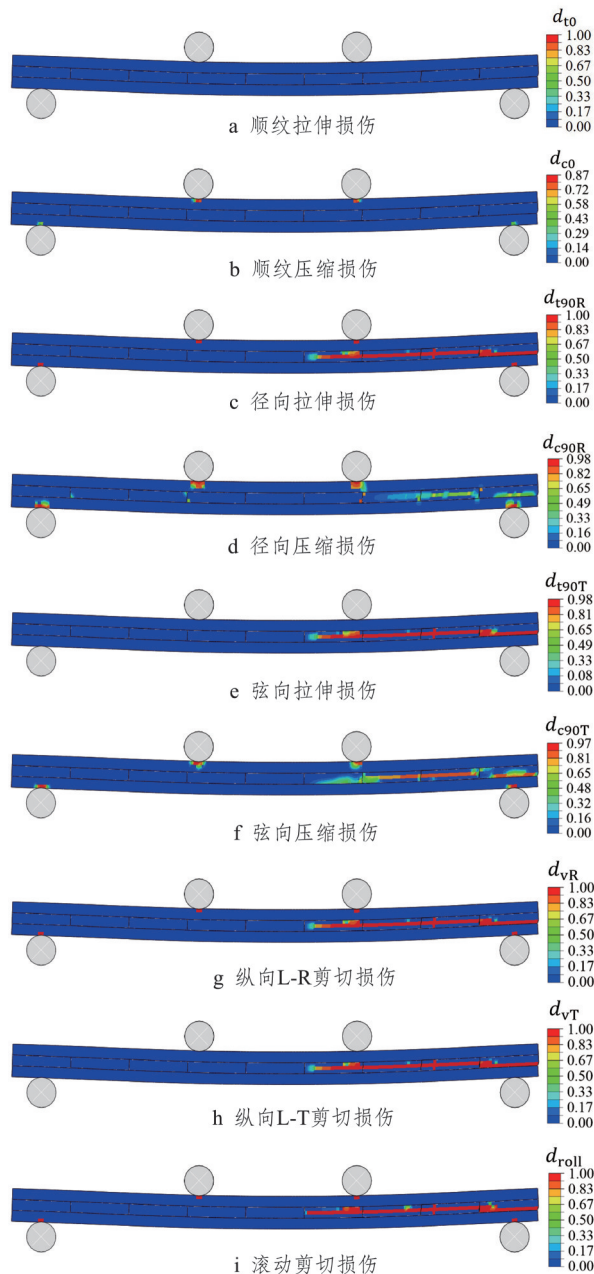


图8 峰值荷载后抗弯性能试件的损伤变量

Fig.8 Damage variables of the bending performance of CLT specimens after peak load

属于局部承压效应, 未引发整体结构失效。横向层损伤演化分析 (图9) 进一步揭示多损伤模式之间的耦合特征。图9b显示, 当弯曲荷载超过峰值后, 横纹拉伸损伤、顺纹剪切损伤与滚动剪切损伤几乎同步突增, 其激活时序与空间分布高度一致, 验证本构模型中滚动剪切作为横纹拉伸与顺纹剪切耦合效应的理论假设。

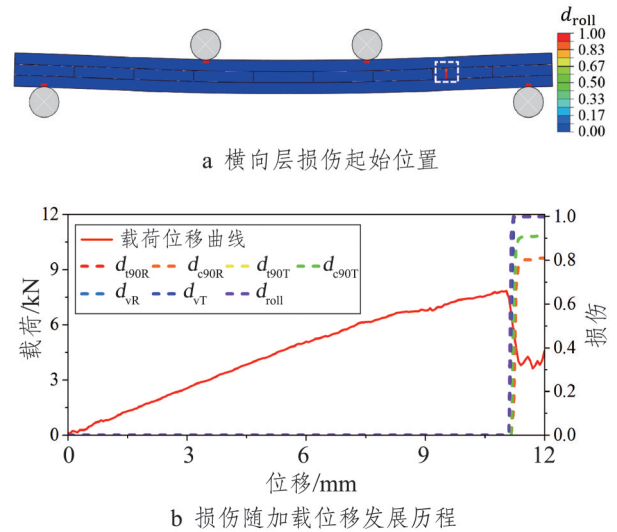


图9 CLT结构横向层初始损伤模拟分析

Fig.9 Initial damage simulation analysis of the transverse layer of CLT

2.4 数值模拟研究对比

表3从本构模型、滚动剪切处理方式及破坏预测能力等方面, 系统对比近年来CLT抗弯性能数值模拟研究。主要存在以下不足: 1) 滚动剪切处理方式粗放。文献[37]和文献[6]将滚动剪切简化为横向剪切; 文献[15]因采用线弹性本构模型而无法表征损伤机制; 文献[38]虽引入独立失效准则但未建立多模式间的耦合关系, 难以真实反映横纹层内的应力重分布路径。2) 损伤演化表征不完整。除文献[37]通过损伤变量展示部分演化特征外, 其余研究均局限于单一加载时刻的应力或应变云图, 无法追踪破坏从萌生到扩展的全过程。3) 单元失效处理缺失。现有研究虽部分通过 cohesive 单元模拟层间脱胶, 但对木材本体的滚动剪切破坏均未删除单元。相比之下, 研究模型兼具应力集中预测、破坏模式识别、损伤演化追踪及单元失效删除能力, 3组CLT结构的抗弯强度预测误差均在10%以内, 整体精度与适用性较优。

表3 CLT抗弯性能的数值模拟结果比较

Tab.3 Comparison of numerical simulation results on bending performance of CLT

参考来源	本构类型	滚剪处理方式	损伤耦合	应力集中预测	破坏模式识别	损伤演化	单元失效	抗弯强度模拟误差
文献[37]	CDM+弹塑性	横向剪切	部分	√	√	√	×	<15%
文献[6]	CDM+弹塑性	横向剪切	否	√	√	×	×	<20%
文献[15]	线弹性	忽略	否	√	×	×	×	<30%
文献[38]	CDM+线弹性	独立失效	否	√	√	×	×	<10%
本研究	CDM+弹塑性	显式耦合	是	√	√	√	√	<10%

3 结论

1) 基于连续介质损伤力学与弹塑性理论，构建能够准确表征杉木木材三维正交各向异性行为的本构模型，模型重点分析滚动剪切破坏及其与横纹拉伸、顺纹剪切损伤的耦合作用。通过开发ABAQUS/Explicit用户材料子程序（VUMAT）实现模型求解，为杉木CLT结构的非线性力学响应分析提供数值工具。

2) 研究验证模型对不同结构杉木CLT的预测能力。单元尺度模拟精准复现在不同应力路径下的典型响应，包括受压时的延性屈服及受拉、受剪时的线性软化特征。在3组不同层数和跨厚比的杉木CLT梁抗弯模拟中，抗弯强度模拟误差均控制在10%以内，且宏观破坏模式与试验结果高度吻合，验证模型对不同结构杉木CLT的适用性。

3) 研究构建的木材三维正交各向异性本构模型，揭示滚动剪切主导的失效机理。损伤演化分析表明，在跨厚比为15的3层杉木CLT梁中，中间横纹层的滚动剪切损伤率先达到临界值，是导致弯曲失效的控制性因素。滚动剪切损伤区域与横纹拉伸、顺纹剪切损伤高度重叠，验证多损伤模式间的协同演化特征。

本研究模型在杉木CLT受弯性能模拟中精度较高，但仍存在一些局限：①基于均质化假设，未考虑木节等缺陷对损伤萌生的影响；②材料参数采用确定性均值，忽略木材性能的变异性与空间随机性；③仅针对短期单调加载，尚未探究其他复杂受力条件。未来可引入随机场理论建立概率损伤预测框架，并应用于墙体、节点等复杂构件以检验其适用性。同时，该模型具备发展为参数化数字设计工具的潜力，通过与仿真平台集成实现铺层结构快速优选与承载力预评估，为杉木CLT结构数字化设计与安全评估提供支撑。

参考文献：

[1] 孙晓峰, 李双轮, 何敏娟, 等. 预应力正交胶合木剪力墙长期性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(10): 250-258.
SUN X F, LI S L, HE M J, et al. Experimental study on long-term performance of pre-stressed cross-laminated timber shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(10): 250-258.

[2] 李征, 王子为, 何敏娟, 等. 木框架-正交胶合木剪力墙多层结构体系关键节点力学性能试验与数值模拟[J]. 土木工程学报, 2024, 57(11): 1-13.
LI Z, WANG Z W, HE M J, et al. Experimental and numerical investigations into mechanical performance of key connections in multi-story timber frame structures with cross laminated timber(CLT) shear walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(11): 1-13.

[3] 罗烈, 张景翔, 宋晓滨, 等. 带屈曲约束支撑的胶合木框架-正交胶合木核心筒结构抗震性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(9): 1328-1342, 1414.
LUO L, ZHANG J X, SONG X B, et al. Seismic performance of glulam frame-CLT core tube structure with buckling-restrained braces [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(9): 1328-1342, 1414.

[4] 李荣帆, 凌志彬, 穆泉蒙, 等. 浆锚栓钉连接钢-正交胶合木组合梁抗弯性能有限元分析[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(3): 80-89.
LI R F, LING Z B, MU Q M, et al. Finite element analysis on flexural behavior of steel-cross laminated timber composite beams connected with studs embedded in grout pockets[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(3): 80-89.

[5] 王新雨, 张秀标, 孙玮弟, 等. 有限元分析在正交胶合木性能研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2025, 38(2): 62-68.
WANG X Y, ZHANG X B, SUN W D, et al. Application of finite element analysis in cross-laminated timber performance research[J]. World Forestry Research, 2025, 38(2): 62-68.

[6] LI X, ASHRAF M, SUBHANI M, et al. Experimental and numerical study on bending properties of heterogeneous Lamella layouts in cross laminated timber using Australian Radiata Pine[J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 247, 118525. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118525>.

[7] 王新雨, 张秀标, 严彦, 等. 正交胶合木滚动剪切性能研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(6): 58-63.
WANG X Y, ZHANG X B, YAN Y, et al. Research progress in rolling shear properties of cross-laminated timber[J]. World Forestry Research, 2023, 36(6): 58-63.

[8] 王正, 卢尧, 谢文博, 等. 正交胶合木(CLT)梁剪应力分析及其层间剪切强度测试[J]. 林业科学, 2019, 55(2): 152-158.
WANG Z, LU Y, XIE W B, et al. Shear stress analysis and interlayer shear strength test of cross laminated timber(CLT) beam[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(2): 152-158.

[9] WANG T, HUANG Q Z, WANG Z Q, et al. Rolling shear failure of CLT transverse layer: AE characterization of damage mechanisms under different test methods[J/OL]. Construction and Building

- Materials, 2024, 440, 137479. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137479.
- [10] DÁNIEL H, HABASHNEH M, RAD M M. Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by CFRP plate[J/OL]. Scientific Reports, 2022, 12, 13587. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17751-6>.
- [11] AKTER S T, SERRANO E, BADER T K. Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear[J/OL]. Engineering Structures, 2021, 244, 112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800.
- [12] GHARIB M, HASSANIEH A, VALIPOUR H, et al. Three-dimensional constitutive modelling of arbitrarily orientated timber based on continuum damage mechanics[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2017, 135: 79-90.
- [13] SANDHAAS C, SARNAGHI A K, VAN DE KUILEN J W. Numerical modelling of timber and timber joints: computational aspects[J]. Wood Science and Technology, 2020, 54(1): 31-61.
- [14] 李运雨. 正交胶合木板有限元模拟与理论计算[D]. 南京: 南京林业大学, 2025.
- [15] 李桥, 王志强, 梁芝君, 等. 结构用定向刨花板与云杉-松-冷杉规格材混合组坯正交胶合木的抗弯性能[J]. 林业科学, 2021, 57(11): 158-168.
- LI Q, WANG Z Q, LIANG Z J, et al. Flexural behavior of hybrid cross-laminated timber fabricated from construction oriented strand board and spruce-pine-fir[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(11): 158-168.
- [16] LOPES B, ARRUDA M R T, ALMEIDA-FERNANDES L, et al. Assessment of mesh dependency in the numerical simulation of compact tension tests for orthotropic materials[J/OL]. Composites Part C: Open Access, 2020, 1, 100006. DOI: 10.1016/j.jcocom.2020.100006.
- [17] MATZENMILLER A, LUBLINER J, TAYLOR R L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites[J]. Mechanics of Materials, 1995, 20(2): 125-152.
- [18] LANGENFELD K, JUNKER P, MOSLER J. Quasi-brittle damage modeling based on incremental energy relaxation combined with a viscous-type regularization[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2018, 30(5): 1125-1144.
- [19] GB/T 1927.14—2022 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第14部分: 顺纹抗拉强度测定[S].
- [20] GB/T 1927.11—2022 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第11部分: 顺纹抗压强度测定[S].
- [21] GB/T 1927.15—2022 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第15部分: 横纹抗拉强度测定[S].
- [22] GB/T 1927.12—2021 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第12部分: 横纹抗压强度测定[S].
- [23] GB/T 1927.16—2022 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第16部分: 顺纹抗剪强度测定[S].
- [24] ZHANG X B, YANG S Y, FEI B H, et al. Bending and shear performance of a cross-laminated composite consisting of flattened bamboo board and Chinese fir lumber[J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 392, 131913. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131913>.
- [25] 王军锋, 张利朋, RezaKazerooni, 等. 杉木高度各向异性力学性能与非线性本构行为研究[J/OL]. 复合材料学报, 1-13[2026-07-14]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250904.001>.
- WANG J F, ZHANG L P, KAZEROONI REZA, et al. Study on the high anisotropic mechanical properties and nonlinear constitutive behavior of Chinese fir wood[J/OL]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 1-13[2026-07-14]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250904.001>.
- [26] 张利朋, 谢启芳, 韩永刚, 等. 压-剪复合应力下木材力学性能与强度准则研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(4): 165-176.
- ZHANG L P, XIE Q F, HAN Y G, et al. Research on mechanical properties and failure criterion of wood under combined compression and shear stresses[J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(4): 165-176.
- [27] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [28] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [29] 成俊卿. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [30] 鲍甫成. 中国主要人工林树种木材性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [31] ROSS R J. Wood handbook: wood as an engineering material [M]. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.
- [32] 郭伟, 任海青, 费本华, 等. 杉木人工林3个目测等级规格材的力学性质[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 139-143.
- GUO W, REN H Q, FEI B H, et al. Mechanical properties of three grades of Chinese fir dimension lumber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 139-143.
- [33] 王菲彬, 王昕萌, 杨树明, 等. 国产杉木不同层板厚度对正交胶合木力学性能的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(11): 168-175.
- WANG F B, WANG X M, YANG S M, et al. Effect of different laminate thickness on mechanical properties of cross-laminated timber made from Chinese fir[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(11): 168-175.
- [34] ASTM D198-15, Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes[S].
- [35] TRAN V D, OUDJENE M, MÉAUSOONE P J. FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 52: 40-47.
- [36] YANG S Y, LI H P, FEI B H, et al. Bond quality and durability of cross-laminated flattened bamboo and timber (CLBT)[J/OL]. Forests, 2022, 13(8): 1271. DOI:10.3390/f13081271.
- [37] BOŠANSKÝ M, TRCALA M. Numerical analysis of cross-laminated timber panels under three-point bending using laminate theory[J]. Materials, 2025, 18(22): 5232.
- [38] 王泽. SPF正交胶合木板弯剪性能试验研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.

(本文编校 向琴)



(上接第64页)

- [11] 杨春梅, 刘清伟, 李响, 等. 激光切割单板的理论工艺参数求解与试验验证[J]. 林业科学, 2019, 55(12): 173-180.
- YANG C M, LIU Q W, LI X, et al. Theoretical process parameter calculation and test verification of laser cutting veneer[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(12): 173-180.
- [12] 陈芬, 崔碧峰, 冯靖宇, 等. 大功率半导体激光器光束质量的研究与

进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 26-35.

CHEN F, CUI B F, FENG J Y, et al. Research and progress of high-power semiconductor lasers with high beam quality[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 26-35.

(责任编辑 方长华 / 编校 向琴)