

层板销合木的界面滑移与木梁受弯性能

杨会峰¹, 张聪聪¹, 顾日鑫², 陶昊天³, 史本凯¹

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 江苏省泰州市海陵区住房与城乡建设局, 江苏 泰州 225300;

3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 层板销合木(简称销合木)是一种由规格材通过销组合而成的新型结构用木材,与胶合木相比具有加工快捷、成本低且更加绿色环保等优点。为研究销合木梁的弯曲性能,设计了8组木梁的四点弯试验,试验参数包括销的种类(木销和竹销)、销间距(70、100和140 mm)和层板的数量(3、4和6层)。此外,为揭示层积材界面销连接抗剪性能对销合木梁受弯性能的贡献,开展了木销和竹销连接销合木推出试验研究。研究结果表明:与木销连接相比,竹销连接的抗滑移刚度更高且延性更好;销合木梁的受弯性能介于无销接叠合木梁和胶合木梁之间,其组合效率为0.11~0.15;随层板数量的增加,梁截面的增高使销合木梁的抗弯性能显著上升;减小销间距对销合木梁的抗弯承载力与刚度均有一定的提升作用。采用欧洲规范5中的 γ 法预测销合木梁的抗弯刚度时结果偏大,因此认为对销合木梁的抗弯刚度进行计算时须对销连接的滑移刚度进行折减。

关键词: 销合木;界面滑移;弯曲性能;销连接; γ 系数法

中图分类号: TU366.3

文献标志码: A

Evaluation of Interfacial Slip and Flexural Behavior of Dowel Laminated Timber Beams

YANG Hui Feng¹, ZHANG Cong Cong¹, GU Ri Xin², TAO Hao Tian³, SHI Ben Kai¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Bureau of Housing and Urban-Rural Development of Hailing District, Taizhou 225300, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Dowel laminated timber (DLT) is a kind of novelty structural timber made of lumber connected by dowels. Compared with glulam, it has the advantages of fast processing, low cost, and more green environmental protection. To evaluate the bending performance of DLT beams, eight groups of DLT beams were tested under

four-point loads. The testing parameters include the types of dowels (wood and bamboo dowels), dowel spacing (70, 100 and 140 mm), and the number of laminates (3, 4, and 6 layers). In addition, to reveal the contribution of the interfacial dowelled connection among lumbers to the bending performance of DLT beams, push-out tests were also conducted on the wood or bamboo dowelled connection of DLT. The test results indicate that the bamboo dowel connection show a higher slip stiffness and a better ductility compared with wood dowel connections, and the bending performance of DLT beams with a composite action range from 0.11 to 0.15 which is lower than that of glulam beams but higher than that of unconnected timber beams. The bending performance of DLT beams increases significantly when adding the number of the laminates, while reducing the dowel spacing could improve the bending capacity and stiffness of DLT beams. Due to the fact that the bending stiffness of the DLT beam would be overestimated by the γ method provided in Eurocode 5, a recommended reduction factor was proposed for the connection stiffness when it was used to calculate the bending stiffness of the DLT beam, to facilitate engineering design.

Keywords: dowel laminated timber(DLT); interfacial slip; flexural behavior; dowel-type joints; γ method

在工程建设领域,推动木结构建筑的应用是实现碳达峰、碳中和目标的有效途径^[1-3]。近些年来,采用螺钉、木钉和木销连接的层积材以其绿色环保、成本低且回收利用率高等优势获得了国内外研究者的广泛关注^[4-6],并得到了较好的工程应用。

层板间采用销进行连接的叠合木一般被称为层板销合木(dowel laminated timber, DLT),简称销合木。销合木是完全由生物质材料组成的工程木产

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51878344, 52208253)

第一作者: 杨会峰,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为现代木结构。E-mail: hfyang@njtech.edu.cn



论文
拓展
介绍

品,采用木销等将规格材连接成结构用工程木材,可用作楼盖、墙体和梁柱等结构构件^[7-9]。此外,木销还可以用作不同构件之间的连接,如梁柱节点和木梁拼接等^[10-11]。现有研究主要以木销连接的木—木节点抗剪性能^[12-13]、销合木梁和木楼板的受弯性能^[6-9]等为主,研究结果表明木销连接的木—木节点主要以销的剪切破坏为主,而销合木梁的受弯破坏则常伴随着层板分离以及层板之间较大的相对滑移。因此,木销作为约束层板相对滑移的剪力件,其界面连接的抗剪性能对DLT的结构性能影响至关重要。目前,木销剪力件常采用压密木销^[14]或硬木销^[15]。然而,当前我国压密木销或硬木销的生产还未实现规范化和市场化,压密木销或硬木销均依赖进口,成本较高也较难获取,一定程度上限制了DLT在国内的应用与发展。

考虑到我国拥有丰富的竹材资源,且竹销在材料强度方面与硬木或压缩木较为接近,采用竹销代替木销形成竹销连接的DLT构件在工程运用领域具有广阔前景。基于此,对具有不同销种类(木销和竹销)、销间距以及层板数量的销合木梁开展了受弯试验研究,以期对销合木梁的设计与工程应用提供参考。

1 销合木推出试验

1.1 试件设计及材料性能

图1为销合木构造示意图。为研究销合木的界面抗滑移性能,共设计了4组推出试验。试验设计参数包括销的材质(木销和竹销)与销间距(70、100和140 mm),每组5个试件,推出试验参数见表1。

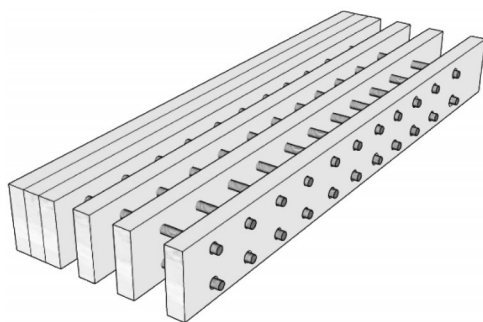


图1 销合木示意

Fig. 1 Schematic diagram of DLT

试验采用的规格材为云杉,根据规范^[16-18]的方法,测得其密度为 $438 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均含水率为9.36%,顺纹方向的弹性模量为 $8\,887 \text{ MPa}$,抗压强度为 32.16 MPa 。此外,参考美国规范ASTM D5764-97a^[19]的方法,测得云杉胶合木顺纹方向

表1 推出试件设计参数

Tab. 1 Details of push-out test specimens

序号	试件名称	销种类	销直径/mm	销间距/mm	数量
1	WDS70	木销	10	70	5
2	BDS70	竹销	10	70	5
3	BDS100	竹销	10	100	5
4	BDS140	竹销	10	140	5

注:W代表木材;B代表竹材;D代表销;S70、S100和S140分别表示销间距为70 mm、100 mm和140 mm。

的销槽承压强度为 22.38 MPa 。

木销和竹销作为层板间的剪力件,直径均为10 mm。木销的材质为榉木,平均密度为 $656 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;竹销的材质为楠竹,平均密度为 $665 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。参考《木结构 销类紧固件屈服弯矩试验方法》(LY/T 3140—2019)^[20],测得榉木销的平均屈服强度为 71.93 MPa 、抗弯弹模为 $9\,080 \text{ MPa}$;楠竹销的平均屈服强度为 56.67 MPa 、抗弯弹模为 $10\,909 \text{ MPa}$ 。

图2给出销间距为70、100和140 mm的试件构造示意图。试件采用对称式设计(双剪),3种间距下主材和侧材的长度分别为360、420和500 mm;不同间距下边销端距不变,均为90 mm。试件的主材和侧材横截面尺寸一致,均为 $32 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。所有木销、竹销均垂直于板面嵌入,长度为96 mm。

1.2 加载装置与加载制度

推出试件试验方法参考欧洲规范EN 26891^[21],量测内容包括施加荷载与界面间的相对滑移,加载与量测布置如图3所示,加载制度如图4所示。试验开始前,对推出试件的承载力进行估算,根据前期初步试验结果,试件的预估承载力 F_{est} 为20 kN。试验加载程序如下:①采用荷载控制模式,以每分钟 $0.2F_{\text{est}}$ 加载至 $0.4F_{\text{est}}$,并维持该荷载水平30s;②以每分钟 $0.2F_{\text{est}}$ 降荷至 $0.1F_{\text{est}}$,并维持该荷载水平30s;③以每分钟 $0.2F_{\text{est}}$ 增加荷载至 $0.7F_{\text{est}}$;④转换为位移控制模式,以 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度加载至推出试件破坏。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 试验现象及破坏模式

木销和竹销连接的试验现象相似,如图5所示。在加载初期,试件基本处于弹性状态,无明显试验现象。继续加载,试件界面的相对滑移开始缓慢发展。随着试验荷载增加至峰值荷载的80%左右时,试件内部发出轻微声响,此时界面滑移发展迅速,销出现明显变形。继续增加荷载,试件内部发生较大声响,随着销发生断裂,试验荷载大幅下降。

试件破坏后,木销与竹销连接的主、侧材之间出

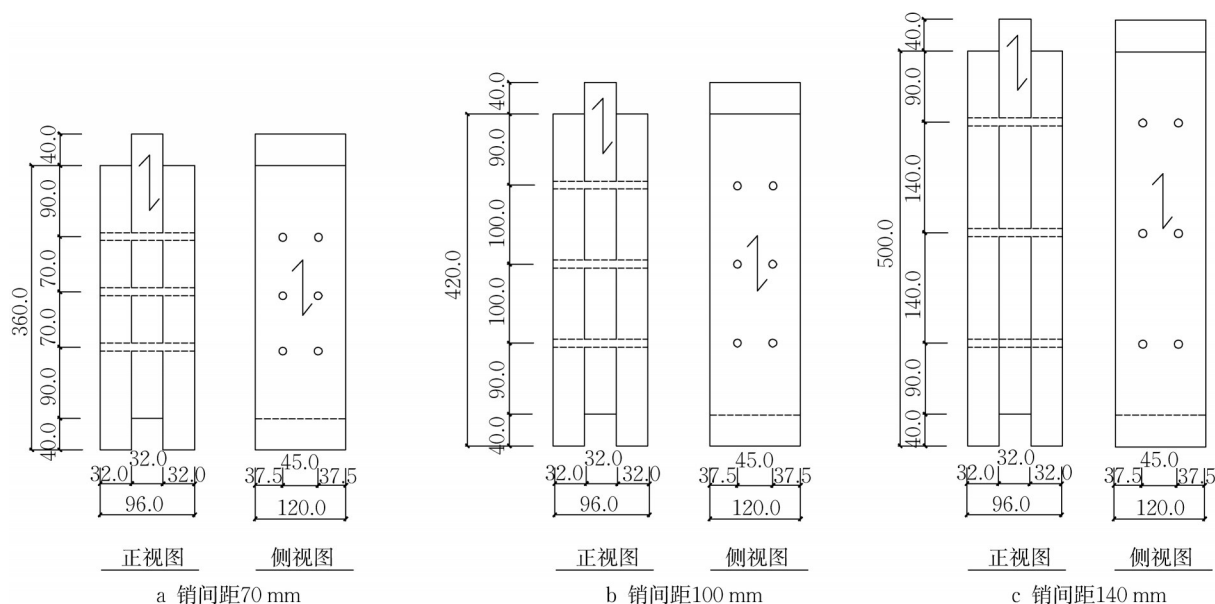


图2 推出试件示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of push-out specimens (unit: mm)

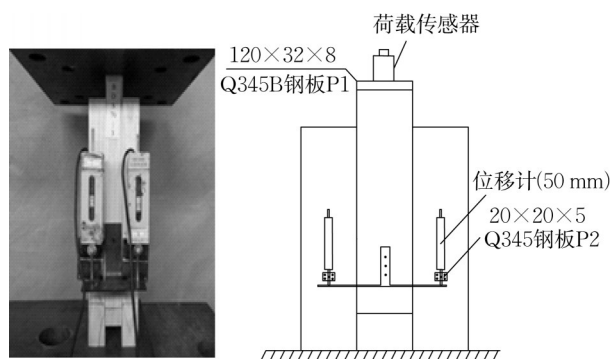
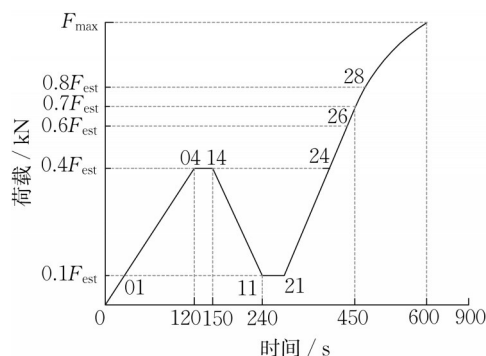


图3 加载装置

Fig. 3 Loading device

图4 加载制度^[21]Fig. 4 Loading procedure^[21]

现了较明显的界面分离,如图5a和图5b所示。在所有试件中,销均发生了双塑性铰破坏,如图5c与5d

所示。此外,观察到试件上部的销断裂失效最为严重,这说明靠近加载端的销承担的荷载更大。

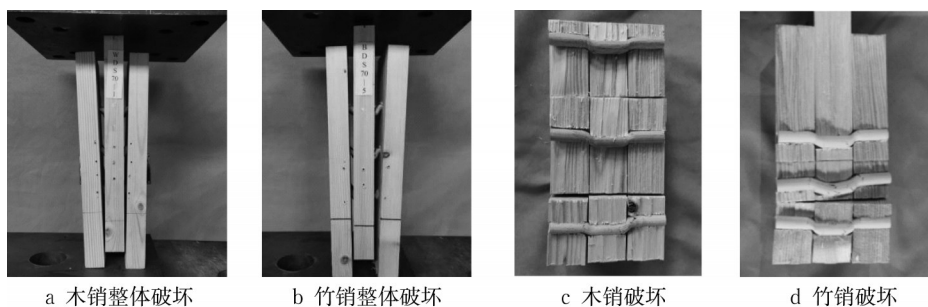


图5 销合木推出试件的破坏模式

Fig. 5 Failure modes of push-out specimens

1.3.2 承载力

各组试件的荷载-滑移曲线如图6所示,各组试件的承载力和滑移刚度汇总于表2。从表2中可以看出,竹销的间距对界面连接的屈服承载力影响不

大,这是因为3种间距下所有销均发生了屈服。但随着销间距的增加,界面连接的极限抗剪承载力有所下降。根据试验破坏模式可知,间距较大时各销不再均匀承担界面剪力,靠近加载端的销塑性发展

更加充分,而远离加载端的销塑性发展更少,因而降低了试件的极限承载力。此外,在相同销间距下,竹销连接试件的极限承载力比木销的更高。原因可能

有两点:一是试件数量有限,试验结果离散性较大而导致^[22-23],二是竹销在云杉中的抗拔承载力大于木销的抗拔承载力。

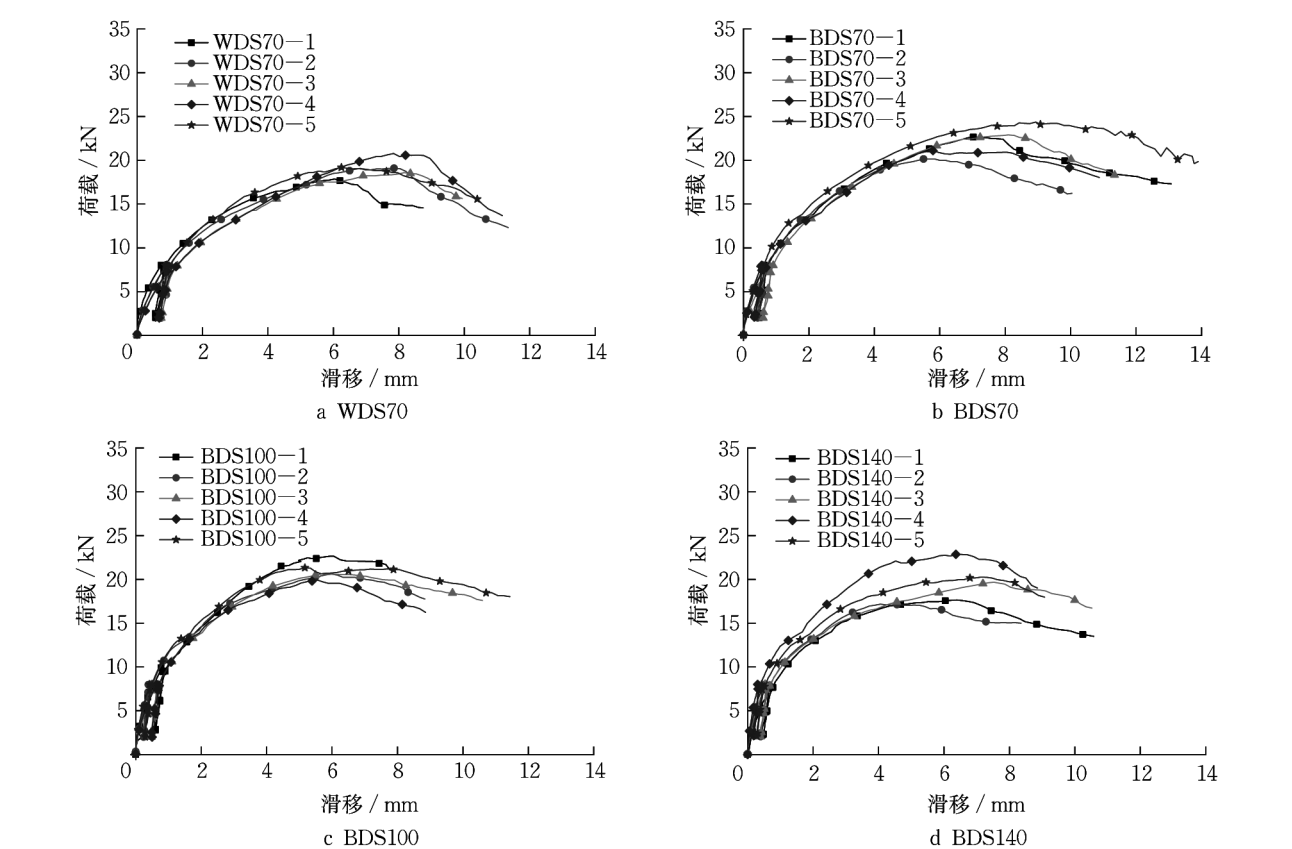


图6 推出试件的荷载-滑移曲线

Fig. 6 Load-slip curves of push-out specimens

表2 推出试件试验结果

Tab. 2 Test results of push-out specimens

组别	屈服承载力			极限承载力			滑移刚度			延性系数		
	范围/kN	平均值/kN	变异系数/%	范围/kN	平均值/kN	变异系数/%	范围/(kN·mm ⁻¹)	平均值/(kN·mm ⁻¹)	变异系数/%	范围	平均值	变异系数/%
WDS70	10.92~13.54	12.23	8.40	17.86~20.77	19.10	5.02	7.43~8.56	7.81	5.49	2.99~3.91	3.26	16.76
BDS70	10.83~13.49	12.12	7.89	20.15~24.27	22.20	6.53	8.68~12.97	11.27	14.09	3.73~5.11	4.59	11.42
BDS100	11.09~13.55	12.08	7.68	19.82~22.58	20.99	4.42	10.19~15.84	11.93	16.81	3.38~6.51	4.52	26.15
BDS140	10.76~12.00	11.50	4.14	17.18~22.91	19.53	11.74	8.77~15.79	12.19	20.94	2.83~4.87	4.67	29.70

1.3.3 滑移刚度

参考欧洲规范 EN 26891^[21]计算销合木推出试件的界面连接滑移刚度 K_s ,计算式如式(1)所示:

$$K_s = \frac{0.4F_{est}}{\frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})}$$

(1)

式中: F_{est} 为预估承载力,kN; v_{04} 和 v_{01} 分别为图3中第1个加载循环中 $0.4F_{est}$ 和 $0.1F_{est}$ 对应的滑移值,mm。

滑移刚度 K_s 的计算结果如表2所示,表中屈服

承载力参考欧规 EN 12512^[24]计算。由表2中可知:竹销连接试件在3种不同间距下的滑移刚度接近,均为 $12\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 左右;在相同间距下,竹销连接试件的滑移刚度是木销连接1.44倍,这与竹销的密度与弹性模量更有关。

1.3.4 延性系数

欧洲规范 EN 12512^[24]中建议木结构销类连接的延性系数 D 可由屈服承载力和极限承载力对应的滑移比值确定,如式(2)所示:

$$D = \frac{S_u}{S_y} \quad (2)$$

式中: S_u 和 S_y 分别为推出试件在极限承载力 F_u 和屈服承载力 F_y 时对应的滑移值, mm。

根据式(2)计算的试件延性系数如表2所示。从表2中可知, 楠竹销系列试件的平均延性系数为4.52~4.67, 而榉木销组试件的平均延性系数为3.26。根据Eurocode 8^[25]提出的延性分类标准, 认为当木结构节点的延性系数超过4.0时为中高延性。由此可见, 本文采用的竹销相较传统木销在延性方面具有明显优势。

2 销合木梁受弯试验

2.1 试件设计与制作

在开展销合木界面抗剪性能研究的基础上, 对木销和竹销连接的销合木梁进行四点弯曲试验研究。共设计8组试件, 每组3个, 试验参数见表3。以无销接叠合木梁和胶合木梁为对照组, 对销间距分别为70 mm、100 mm和140 mm以及层板数量分别

为3层、4层和6层的销合木梁进行弯曲性能测试。

表3 销合木梁的试件设计

Tab. 3 Specimen design of DLT beams

序号	试件名称	梁尺寸			界面类型	销间距/mm	层板数量	试件数量
		L/mm	W/mm	H/mm				
1	LTBL4	2 500	120	128	无销接		4	3
2	GLTBL4	2 500	120	128	胶合连接		4	3
3	WDBL4-S70	2 500	120	128	木销连接	70	4	3
4	BDBL4-S70	2 500	120	128	竹销连接	70	4	3
5	BDBL4-S100	2 500	120	128	竹销连接	100	4	3
6	BDBL4-S140	2 500	120	128	竹销连接	140	4	3
7	BDBL3-S70	1 900	120	96	竹销连接	70	3	3
8	BDBL6-S70	3 750	120	192	竹销连接	70	6	3

图7以销间距100 mm的销合木梁构造为例, 单块层板的截面尺寸均为120 mm×32 mm。根据《木结构试验方法标准》^[26]中第5.2.2条规定: 梁试件的跨度与截面高度的比值宜取18, 两端支点处试件的外伸长度不应少于截面高度的1/2。因此, 3、4和6层板对应的销合木梁长度分别为1 900、2 500和3 750 mm。为便于对照, 无销接叠合木梁和胶合木梁的尺寸均为2 500 mm×120 mm×128 mm。

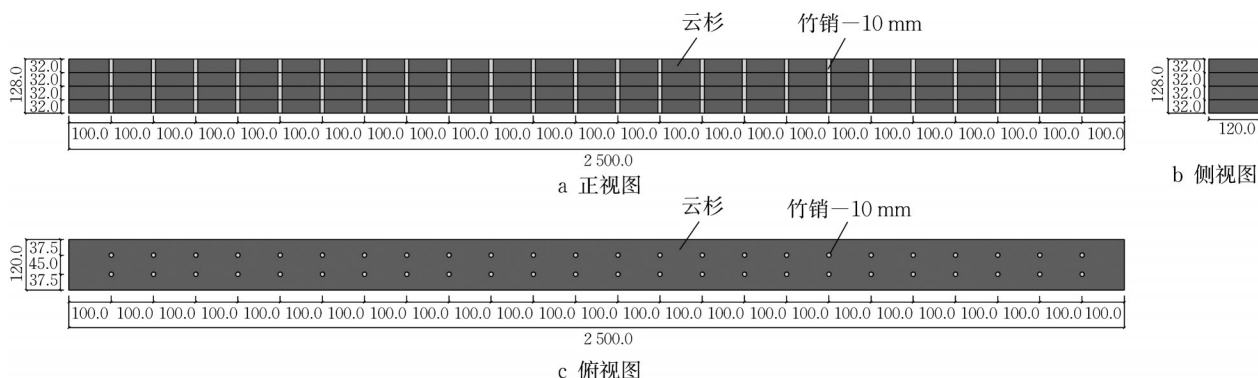


图7 销合木梁的构造细节(单位:mm)

Fig. 7 Structural detail of DLT beams (unit: mm)

2.2 试验加载与量测

试验采用四点弯加载方式, 加载与量测装置如图8所示。加载速率为12 mm·min⁻¹, 直到试件出现完全破坏或者荷载下降到极限荷载的80%时停止试验。梁端分别设置铰支座和滑动铰支座, 梁端到支座的距离为80 mm。试件的净跨为2 340 mm, 加载点之间的距离为780 mm。在梁跨中布置2个位移计来记录跨中挠度, 在梁端部层板界面处布置位移计来记录层板间界面相对滑移。在跨中位置的梁侧面沿高度均匀布置应变片, 每层层板上设置2个应变片。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 破坏模式

各组试件的典型破坏模式如图9所示。图9a和9b表明, 胶合木梁主要发生底层层板受拉断裂破坏, 而无销接叠合木梁层板均发生了破坏。木销或竹销连接的销合木梁也发生了底部木纤维受拉破坏, 且最底层层板出现了明显的分离现象(图9c), 这主要是因为木销和竹销抗拔性能较弱, 未能提供较强的竖向抗分离力。

此外, 试验发现销合木梁端部界面滑移明显(图9d), 梁端竹销和木销发生了明显的剪切变形(图10e), 而加载点间梁界面滑移不明显, 竹销和木销也

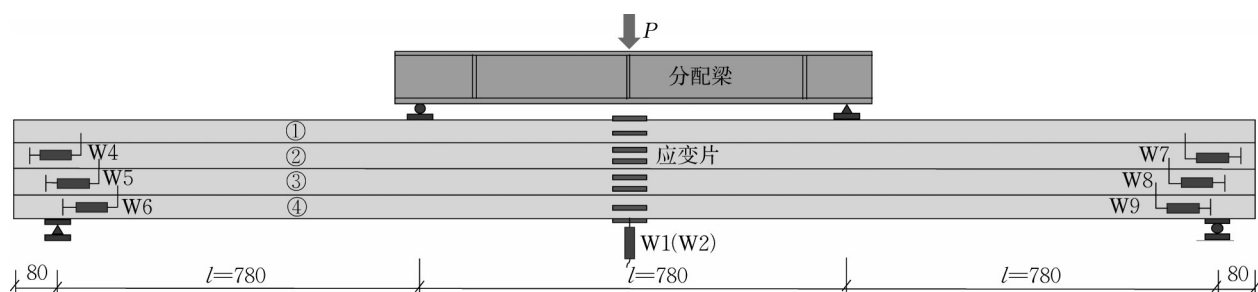


图8 加载与量测(单位:mm)

Fig. 8 Loading and measurement (unit: mm)



图9 试件主要破坏模式

Fig. 9 Failure modes of test specimens

观察不到明显的变形(图9f)。

2.3.2 荷载—挠度曲线

各组试件木梁的荷载-挠度曲线如图10所示。图10a表明无销接叠合木梁与胶合木梁试件的荷载-挠度曲线几乎为线性,而销合木梁的荷载-挠度曲线在荷载较小时呈线性特征,荷载较大后呈现出明显的非线性增长,这主要是竹销和木销剪力件刚度退化所致。

表4为各试件受弯试验结果,表5为各组别受弯试验结果平均值。其中, M_{\max} 为跨中最大弯矩,抗弯强度 f_m 和抗弯刚度试验值 B_{\exp} (其中 $B=EI$, E 为弹性模量, I 为截面惯性矩)参考《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2012)^[26]计算得到,计算式分别见式(3)和式(4):

$$f_m = \frac{M_{\max}}{W} \quad (3)$$

$$B_{\exp} = \frac{a\Delta P}{48\Delta w} (3l_0^2 - 4a^2) \quad (4)$$

式中: M_{\max} 为跨中最大弯矩; W 为试件截面抵抗矩; a 为加载点至支座的距离; l_0 为木梁的净跨; Δw 为在荷载增量 ΔP 作用下试件跨中挠度的增量。

为定量评价竹销和木销连接销合木梁的组合作用,引用Riggio等^[27]提出的组合系数计算方法,为

$$\varphi = \frac{B_{\exp} - B_0}{B_{\infty} - B_0} \quad (5)$$

式中: B_{∞} 为完全组合作用下销合木梁的抗弯刚度理论值, $N \cdot mm^2$; B_0 为无组合作用时销合木梁的抗弯刚度理论值, $N \cdot mm^2$ 。

表4和表5中的试验数据表明,胶合木梁界面抗滑移性能最强,因此组合作用最强、抗弯性能最佳。

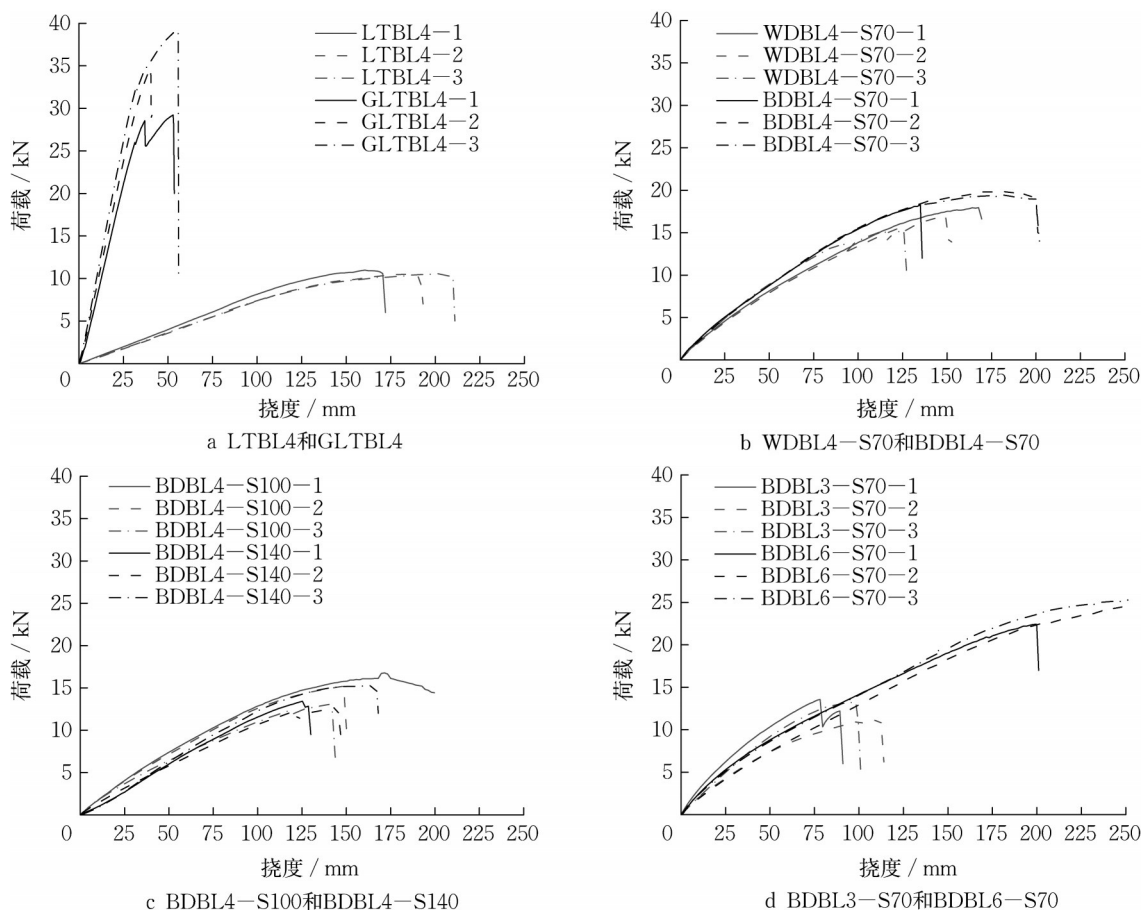


图10 荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves

销合木梁的组合系数为0.11~0.15,承载力与刚度均低于胶合木梁,但仍远高于无连接的叠合木梁。当降低界面竹销的间距时,销合木梁的整体组合系数上升,抗弯承载力与刚度也随之提高;当增加层板的数量时,3层、4层和6层的销合木梁的组合系数分别为0.14、0.15和0.14,这表明增加层板的数量对组合系数几乎无影响。此外,竹销连接销合木梁的抗弯性能略高于木销连接销合木梁。

2.3.3 荷载-滑移曲线

选取木销、竹销以及不同层数销合木梁的典型试件来绘制其层板间的荷载-滑移曲线(图11)。由图11可知:各试件端部滑移均随荷载增加而上升,且呈现出一定的非线性增长趋势。4层销合木梁端部的最大滑移出现在②号与③号层板之间,而非最底部③号与④号层板间。这主要因为底部层板受支座的摩擦作用,相对滑移被约束。此外,在相同荷载作用下,随着层板数量增加,端部滑移减小。这主要是因为销合木梁截面高度增加,抗弯刚度变大。

2.3.4 跨中截面应变分布

各组试件中典型试件的跨中应变分布如图12所示。表明:无销接叠合木梁(LTBL4-1)各层层板横截面上的正应变沿高度线性分布,每层层板均上部受压、下部受拉。胶合木梁(GLTBL4-2)的截面应变则呈现明显的平截面变形条件,梁顶与梁底应变基本呈对称性分布,中性轴大致出现在梁截面中间部位。在相同荷载水平下,无销接叠合木梁LTBL4-1的梁底拉应变最大;随竹销间距减小的销合木梁梁底拉应变降低;胶合木梁梁底拉应变最小。这是因为界面抗剪性能越强时,层板间组合程度越高,抗弯刚度越大,相同荷载时的挠度与变形越小。此外,销合木梁每层层板截面上的应变分布虽满足平截面假定,但随着荷载的增加,层板中性轴的位置发生变化,这主要是销受力变形界面滑移刚度退化所致。

3 木梁抗弯刚度计算

计算假定如下:① 每层层板弹性模量相同;

表 4 各试件受弯试验结果

Tab. 4 Bending test results of each specimen

组别	试件编号	$M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$f_m/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$B_{\text{exp}}/(10^{10}\text{N}\cdot\text{mm}^2)$	端部最大滑移/mm	φ
LTBL4	LTBL4-1	4.29	13.09	1.81	10.85	0
	LTBL4-2	4.10	12.51	1.73	12.47	0
	LTBL4-3	4.12	12.57	1.71	8.75	0
GLTBL4	GLTBL4-1	11.40	34.79	20.33	0	1.00
	GLTBL4-2	13.51	41.23	21.81	0	1.00
	GLTBL4-3	15.25	46.54	24.79	0	1.00
WDBL4-S70	WDBL4-S70-1	7.00	21.36	3.56	7.01	0.14
	WDBL4-S70-2	6.63	20.23	3.49	5.11	0.13
	WDBL4-S70-3	5.98	18.25	4.18	4.38	0.17
BDBL4-S70	BDBL4-S70-1	7.13	21.76	3.85	6.70	0.15
	BDBL4-S70-2	7.76	23.68	3.86	7.17	0.15
	BDBL4-S70-3	7.57	23.10	3.79	7.96	0.15
BDBL4-S100	BDBL4-S100-1	6.54	19.96	3.32	8.44	0.12
	BDBL4-S100-2	5.93	18.10	3.19	6.77	0.12
	BDBL4-S100-3	5.09	15.53	2.81	6.50	0.09
BDBL4-S140	BDBL4-S140-1	5.19	15.84	3.34	5.04	0.12
	BDBL4-S140-2	4.95	15.11	3.24	6.71	0.12
	BDBL4-S140-3	5.88	17.94	2.72	6.50	0.09
BDBL3-S70	BDBL3-S70-1	3.93	21.32	2.22	3.68	0.19
	BDBL3-S70-2	3.24	17.58	1.50	4.46	0.09
	BDBL3-S70-3	3.85	20.89	1.81	5.39	0.13
BDBL6-S70	BDBL6-S70-1	12.87	17.46	11.77	3.72	0.16
	BDBL6-S70-2	14.06	19.07	9.52	4.91	0.13
	BDBL6-S70-3	14.65	19.87	10.57	6.69	0.14

表 5 各组别受弯试验结果平均值

Tab. 5 Average value of bending test results of each group

组别	最大弯矩		抗弯强度		抗弯刚度		端部最大滑移		组合系数	
	平均值/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	变异系数/ %	平均值/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	变异系 数/%	平均值/ ($10^{10}\text{N}\cdot\text{mm}^2$)	变异系 数/%	平均值/ mm	变异系 数/%	平均值	变异系 数/%
LTBL4	4.17	2.50	12.72	2.51	1.75	2.47	10.69	17.45	0	0
GLTBL4	13.39	14.40	40.85	14.40	22.31	10.18	0	0	1.00	0
WDBL4-S70	6.54	7.90	19.95	7.89	3.74	10.58	5.50	24.69	0.15	14.19
BDBL4-S70	7.49	4.32	22.85	4.31	3.83	0.81	7.28	8.75	0.15	0
BDBL4-S100	5.85	12.44	17.86	12.44	3.11	6.96	7.24	14.52	0.11	15.75
BDBL4-S140	5.34	9.04	16.29	9.01	3.10	8.77	6.08	14.95	0.11	15.75
BDBL3-S70	3.67	10.27	19.93	10.27	1.84	16.03	4.51	18.98	0.14	36.83
BDBL6-S70	13.86	6.54	18.80	6.54	10.49	6.54	5.11	29.27	0.14	10.67

② 弹性阶段内,每层层板具有相同的曲率,层板变形符合平截面假定;③ 销合木梁中销连接抗剪作用沿梁长均匀分布。

目前,木组合梁的抗弯刚度计算多采用欧洲规范 Eurocode 5^[28]中的 γ 法。 γ 法主要用于2层或者3层机械连接组合梁的抗弯刚度计算,对于3层以上的组合结构无法直接使用。因此,本文采用有效截

面惯性矩的简化计算方法,将4层和6层的木组合梁分别进行2次计算。根据基本假定,2层和3层木组合梁的计算模型如图13所示。其中, σ_t 和 σ_c 分别为木层板的抗拉强度和抗压强度。

部分组合的木组合梁的有效抗弯刚度理论计算公式如式(6)所示,其中连接系数 γ 计算如式(9)、(13)和(14)所示。当 $\gamma=0$ 时,表明木梁层板间无组

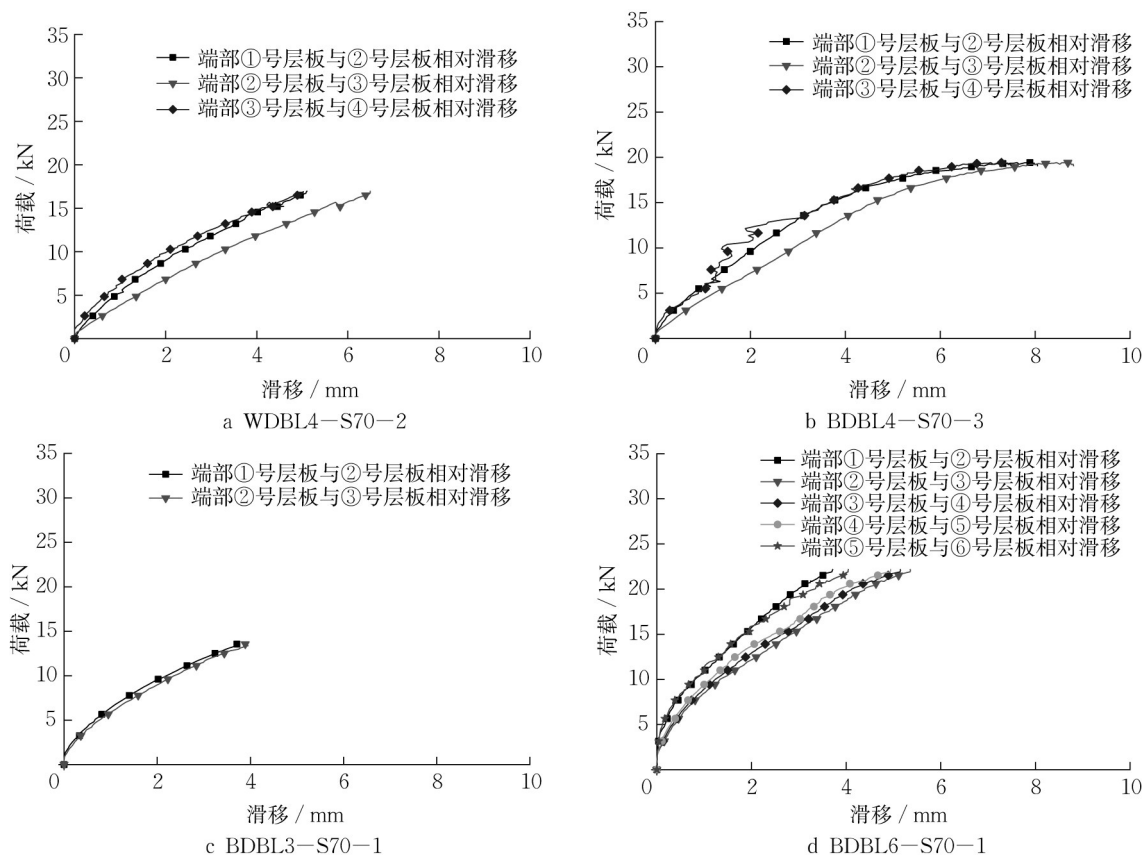


图11 荷载-滑移曲线

Fig. 11 Load-slip curves

合作用;当 $\gamma=1$ 时,表明木梁层板间完全组合。

$$B_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma E_i A_i a_i^2) \quad (6)$$

$$h_{\text{ef}} = \sqrt[3]{\frac{12I_{\text{ef}}}{b}} \quad (7)$$

当层板数量为2时,有

$$\gamma_2 = 1 \quad (8)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 S}{K_s l^2}} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2(\gamma_1 E_1 A_1 + E_2 A_2)} \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (11)$$

当层板数量为3时,有

$$\gamma_2 = 1 \quad (12)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 S}{K_s l^2}} \quad (13)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_3 A_3 S}{K_s l^2}} \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2[\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2 + \gamma_3 E_3 A_3]} \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (16)$$

$$a_3 = \frac{h_2 + h_3}{2} + a_2 \quad (17)$$

式中: B_{eff} 为木组合梁的有效抗弯刚度, $\text{N}\cdot\text{mm}^2$; h_{ef} 为截面有效高度,mm; I_{ef} 为截面有效惯性矩, mm^4 ; A_i 为第*i*层层板截面面积, mm^2 ,其中*i*为1、2或3; b 、 h_i 分别为第*i*层层板截面宽度、高度,mm; E_i 为第*i*层层板的弹性模量,MPa; I_i 为第*i*层层板的截面惯性矩, mm^4 ; a_i 为第*i*层层板的形心轴到组合截面中性轴的距离,mm; γ_i 为第*i*层层板连接系数; S 为剪力连接件的间距,mm; l 为销合木梁的跨度,mm; K_s 为单排剪力连接件的滑移刚度, $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

各组试件理论计算结果见表6。从表6中可见:直接采用滑移刚度试验值计算出的销合木梁抗弯刚度明显高于试验结果,误差为30%~50%。原因主要是推出试验中采用对称试件,木销和竹销在对称剪切力作用下发挥出较好的绳索效应,导致通过推出试验得到的界面抗剪刚度较大,而在

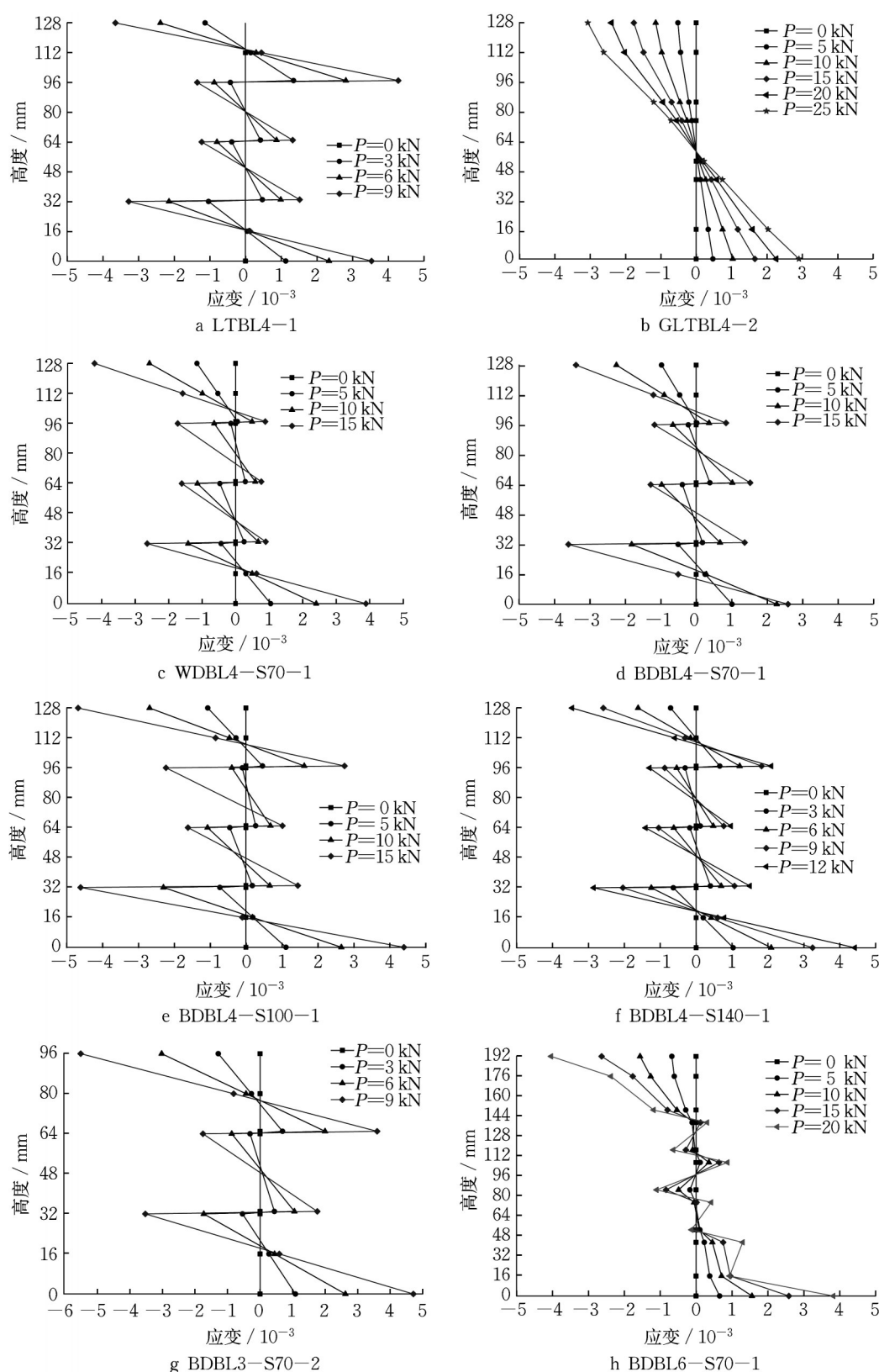


图 12 跨中截面应变分布

Fig. 12 Strain distribution of cross-section at mid-span

销合木梁的弯曲过程中木销和竹销受到非对称剪切,其绳索效应较弱。因而,通过推出试验得到的滑移刚度计算销合木梁抗弯刚度时较大。为此,

建议取滑移刚度试验值的1/2进行计算(表中 $B_{\text{eff}, 0.5K_s}$),表6结果表明理论与试验误差基本控制在15%以内。

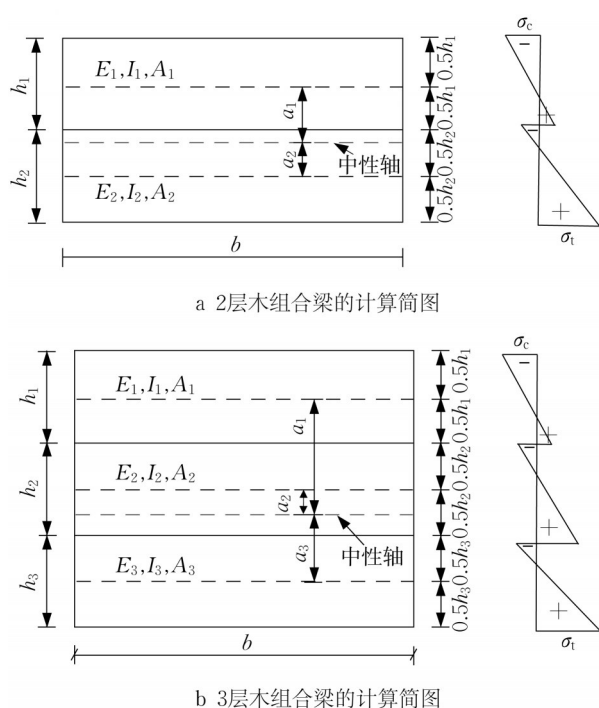


图13 部分组合作用下木组合梁的计算模型

Fig. 13 Calculation model of timber composite beams with partially composite action

表6 计算结果对比

Tab. 6 Comparison of calculation results

试件名称	试验值	理论值			
	B_{exp}	B_{eff, K_s}	B_{eff, K_s} 误差/%	$B_{eff, 0.5K_s}$	$B_{eff, 0.5K_s}$ 误差/%
WDBL4-S70	3.74	5.72	34.4	3.20	-14.4
BDBL4-S70	3.83	7.03	45.5	4.12	7.0
BDBL4-S100	3.11	5.95	47.4	3.33	6.6
BDBL4-S140	3.10	4.95	37.4	2.79	10.0
BDBL3-S70	1.84	2.99	38.5	2.19	16.0
BDBL6-S70	10.49	16.62	36.9	10.32	-1.6

4 结论

(1)推出试验中的主要破坏模式为销的双塑性铰破坏。在抗剪性能方面,竹销连接的滑移刚度比同直径木销连接高30.7%,延性也更优,二者的极限承载力接近。因此,采用竹销来代替木销进行连接具有良好的替代性。

(2)销合木梁主要破坏模式为梁底木材受拉破坏。在承载力极限状态下,梁端层板间也出现明显界面相对滑移,且梁端部木销和竹销剪切变形严重。此外,层板之间界面分离比较明显,在实际应用中可考虑在竹销表面涂抹胶黏剂以提高其抗剪性能。

(3)当销间距在70 mm至140 mm范围时,销合木梁的组合作用系数为0.11~0.15。随销间距增

大,销合木梁的抗弯强度和刚度均有所降低。增加层板数量后,销合木梁的抗弯性能显著提升。

(4)通过推出试验得出的木销和竹销连接滑移刚度用于计算销合木梁的抗弯刚度时,计算结果高于销合木梁的抗弯刚度试验值,采用1/2滑移刚度值计算销合木梁的抗弯刚度与试验结果更为吻合。

作者贡献声明:

杨会峰:提供研究思路和项目资助,指导试验开展,撰写并修改论文。

张聪聪:设计论文框架,数据处理及试验结果分析,论文撰写。

顾日鑫:制作试验构件,开展具体试验工作,协助完成论文撰写。

陶昊天:学术指导,论文修改。

史本凯:学术指导,论文修改。

参考文献:

- [1] 刘伟庆,杨会峰.现代木结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(2):16. DOI:10.14006/Jjzjgxb.2019.02.002.
LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (2): 16. DOI:10.14006/Jjzjgxb.2019.02.002.
- [2] 何敏娟,何桂荣,梁峰,等.中国木结构近20年发展历程[J].建筑结构,2019,49(19):83.
HE Minjuan, HE Guirong, LIANG Feng, et al. Development of timber structures in China during recent twenty years[J]. Building Structure, 2019, 49(19):83.
- [3] 熊海贝,欧阳禄,吴颖.国外高层木结构研究综述[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(9):1297.
XIONG Haibei, OUYANG Lu, WU Yin. State-of-the-art research of tall wood buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9):1297.
- [4] 宋焕,李桥,祁云扬,等.国内外钉/木销连接层积材研究进展[J].林业机械与木工设备,2018,46(10):8.
SONG Huan, LI Qiao, OI Yunyang, et al. Development and research of pin connection on wood structure [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(10):8.
- [5] 武国芳, GONG Meng, 任海青.层板钉合木(NLT)研究与应用现状[J].木材科学与技术,2021,35(1):9.
WU Guofang, GONG Meng, REN Haiqing. Review of research status and application of nail-laminated timber [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35 (1): 9.
- [6] EL-HOUJEYRI I, THI V D, OUDJENE M, et al. Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels [J]. Construction and Building Materials, 2019, 222: 288.
- [7] O' LOINSIGH C, OUDJENE M, AIT-AIDER H, et al. Experimental study of timber-to-timber composite beam using

- welded-through wood dowels [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 245.
- [8] SOTAYO A, BRADLEY D F, BATHER M, *et al.* Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated panels [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119821.
- [9] 李桥,宋焕,王志强. 竹/木销连接组合木梁抗弯性能研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(2): 218.
LI Qiao, SONG Huan, WANG Zhiqiang. Bending performance of timber composite beam fastened with bamboo/wood dowels[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 218.
- [10] 王明谦,宋晓滨,罗烈. 木销半榫节点转动性能试验研究与有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(3): 193.
WANG Mingqian, SONG Xiaobin, LUO Lie. Experimental study and finite element analysis of rotational behavior of wood pegged semi mortise and tenon connections [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(3): 193.
- [11] MEHRA S, O'CEALLAIGH C, SOTAYO A, *et al.* Experimental characterisation of the moment-rotation behaviour of beam-beam connections using compressed wood connectors [J]. *Engineering Structures*, 2021, 247: 113132.
- [12] MILLER J F, SCHMIDT R J, BULLEIT W M. New yield model for wood dowel connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(10): 1255.
- [13] TEODORESCU I, PEREIRA B, AQUINO C D, *et al.* Experimental evaluation of dowel-type timber joints with wooden dowels [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 2020, 173(12): 927.
- [14] XU B H, JIAO S Y, WANG B L, *et al.* Mechanical performance of timber-to-timber joints with densified wood dowels[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148(4): 04022023.
- [15] PODLENA M, BÖHM M, HYSEK S, *et al.* Evaluation of parameters influencing the withdrawal strength of oak and beech dowels[J]. *BioResources*, 2020, 15(1): 1665.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材密度测定方法: GB/T 1933—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for determination of the density of wood: GB/T 1933—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材含水率测定方法: GB/T 1931—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for determination of the moisture content of wood: GB/T 1931—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材顺纹抗压弹性模量测定方法: GB/T 15777—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for determination of the modulus of elasticity in compression parallel to grain of wood: GB/T 15777—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] American Society for Testing and Materials. Standard test method for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products: ASTM D5764-97a [S]. West Conshohocken: ASTM, 2013.
- [20] 国家林业和草原局. 木结构 销类紧固件屈服弯矩试验方法: LY/T 3140—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Forestry and Grassland Administration. Timber structures—determination bending yield moment of dowel-type fasteners: LY/T 3140—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [21] European Committee for Standardization. Timber structures-joints made with mechanical fasteners-general principles for the determination of strength and deformation characteristics: EN 26891 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1991.
- [22] 陶昊天,杨会峰,刘伟庆,等. 预制装配式木-混凝土斜交螺钉剪力件的受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(5): 164.
TAO Haotian, YANG Huifeng, LIU Weiqing, *et al.* Mechanical behavior of crossed inclined coach screw shear connections for prefabricated timber-concrete composite structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(5): 164.
- [23] 陆言, 杨会峰, 史本凯, 等. 胶合木-CLT组合梁斜螺钉连接的界面受剪性能[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(3): 243.
LU Yan, YANG Huifeng, SHI Benkai, *et al.* Interfacial shear behavior of glulam-CLT composite systems with inclined self-tapping screw connectors [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(3): 243.
- [24] European Committee for Standardization. Timber structures-test methods-cyclic testing of joints made with mechanical fasteners: EN 12512 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2001.
- [25] European Committee for Standardization. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings: EN 1998-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构试验方法标准: GB/T 50329—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of timber structures: GB/T 50329—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [27] RIGGIO M, TOMASI R, PIAZZA M. Refurbishment of a traditional timber floor with a reversible technique: importance of the investigation campaign for design and control of the intervention [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2014, 8(1): 74.
- [28] European Committee for Standardization. Eurocode 5: Design of timber structures - part 1-1: general - common rules and rules for buildings: EN 1995-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.