

# 竹/木销连接组合木梁抗弯性能研究

李 桥,宋 焕,王志强\*

(南京林业大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210037)

**摘 要:**试验对竹/木销连接的双层规格材组合木梁进行四点弯曲加载试验。试验参数包括销的种类(竹销和木销),钉入角度(45°、60°、90°)和竹销直径(8、10、12 mm)。结果表明,90°和 60°角连接时,竹销连接组合木梁刚度比木销连接分别提升 11%和 18%;组合木梁随销钉入角度的增加,刚度逐渐增加,90°角连接比 60°和 45°角连接刚度分别提升 7%和 29%;增加竹销直径可以有效提升组合木梁刚度。

**关键词:**竹/木销;销连接;组合木梁;抗弯性能

**中图分类号:**TS652      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)02-0218-05

## Bending Performance of Timber Composite Beam Fastened with Bamboo/Wood Dowels

LI Qiao, SONG Huan, WANG Zhi-qiang\*

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** Four-point bending tests were carried out on double-layer timber composite beams fastened with bamboo and wood dowels. The connection parameters included the types of dowels (bamboo dowels and wood dowels), the connection angles (45, 60, and 90°) and the diameter of the dowels (8, 10, and 12 mm). The results showed that the stiffness of the composite beams using bamboo dowels increased by 11% and 18% compared with wood dowel connection when connected at 90° and 60°, respectively; the stiffness of composite beams increased gradually with the increase of dowel connection angle, and the stiffness of 90° connection increased by 7% and 29% compared with 60° and 45° connection, respectively; the increase of bamboo dowel diameter could also effectively improve the stiffness of composite beams.

**Key words:** bamboo/wood dowel; dowel connection; timber composite beam; bending performance

现代木结构建筑中的木构件,大多采用胶黏剂或金属紧固件连接,如层板胶合木、正交胶合木以及轻型木结构建筑中经常使用的组合木梁等。胶黏剂在生产和使用过程中有可能污染环境,并且不利于木构件的重复使用<sup>[1]</sup>。因此,使用木销连接层板生产木构件,受到国内外学者的关注。

目前,已有许多关于木销节点力学性能的研究。H. Hiroshi 等<sup>[2]</sup>对多种材料的木销连接件进行了剪切测试,针对销的直径、长细比、材料等因素进行研究,利用 BEF (beam on elastic foundation) 理论计算了节点的滑移模量,基于 EYM (European yield

model) 理论计算了木销的承载能力,理论计算方法能很好地预测节点的屈服过程。J. Milch 等<sup>[3]</sup>研究了栋木销节点的单剪试验,试验测试了 4 种直径的木销,利用 H. Hiroshi 等<sup>[2]</sup>提出的理论,很好地预测了节点剪切刚度和承载力。

木销连接层积材 (dowel-laminated timber, DLT) 是用阔叶材木销将层板组装到一起,通过含水率的变化将层板固定,可用作楼板、墙板等<sup>[4]</sup>。高速旋转焊接同样是一种有效的木樁节点连接方式,可以在不使用胶黏剂的情况下提供很好的节点强度。J. F. Bocquet 等<sup>[5]</sup>研究了高速旋转木销连接节

收稿日期:2019-05-04 修回日期:2019-05-27  
基金项目:国家自然科学基金项目(31570559)。  
作者简介:李 桥,男,硕士,研究方向:木结构建筑。E-mail:18362985071@163.com  
\* 通信作者:王志强,男,教授,研究方向:新型工程木产品和木结构建筑。E-mail:wangzhiqiang@njfu.edu.cn

点的剪切性能,试验测试了多种角度连接的节点,结果表明钉入角度对节点性能有显著影响。试验进一步测试了旋转焊接木销连接双层木梁的抗弯性能,其力学性能比钉连接更优异。C. Loinsigh 等<sup>[6-7]</sup>采用木销焊接技术连接组合木梁,研究了销钉数量对木梁抗弯性能的影响,并探索了在更大截面深度实现木销焊接的方法,结果表明木销数量的增加能提升木梁的复合效率和刚度。研究进一步采用 3D 有限元模型分析了可能的影响参数,包括销的力学性能、层板的厚度、木梁上下表面层板的力学性能和木销的列数等,分析其对组合木梁抗弯性能的影响。除了传统的阔叶材木销,压缩木销同样在木质节点中使用。热压后的木销密度增加,可以提供更好的力学性能。S. Adeayo 等<sup>[1]</sup>研究了压缩木销连接组合木梁的抗弯性能,将松木作为压缩木销材料,热压后的压缩木销密度为 1.2 g/cm<sup>3</sup>,测试了压缩木销连接 3 层组合木梁的抗弯性能。

中国是世界竹子分布中心产区之一,有丰富的竹材资源和广阔的分布面积<sup>[8]</sup>。竹材具有优异的力学性能,对竹制构件基础力学性能<sup>[9-11]</sup>及高温处理后力学性能的研究<sup>[12]</sup>,有利于竹材在建筑工业中的应用。压缩木销和旋转焊接技术的应用,需要复杂

的生产工艺和技术参数,而直接采用竹销连接层板形成木构件是一种更直接,且高效环保的方式。本试验用木销和竹销连接组合木梁,测试其抗弯承载力和刚度,研究不同销种类、直径和钉入角度对抗弯性能的影响,为竹质连接件在工程木构件中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

规格材:云杉-松-冷杉(Spruce-pine-fir, SPF),产地加拿大,等级 J 级,规格为 38 mm×89 mm×2 440 mm(高×宽×长,下同),平均密度为 0.46 g/cm<sup>3</sup>,平均含水率 13.8%。试验前采用自由梁横向振动法,测试了试验用 42 根规格材的顺纹弹性模量,平均值  $E=10\,774\text{ MPa}$ (变异系数为 17.4%)。木销的材料是国产木荷,直径为 10 mm,表面带有斜向纹理。竹销采用楠竹旋切竹片制成,直径有 8、10、12 mm。根据标准 ASTM F1575-03<sup>[13]</sup>,分别测试了木销和 3 种直径竹销的抗弯强度,支座间距为 11.5 倍的销直径,加载速度为 5 mm/min,每组试件测试 15 个(表 1)。

表 1 木销和竹销的基本物理力学性能

Table 1 Basic physical and mechanical properties of wood dowels and bamboo dowels

编号	销种类	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗弯强度/MPa
W10	木销	13.0(4.1)	0.57(9.8)	51.23(23.6)
B8	竹销	9.5(10.4)	0.75(5.6)	94.25(20.0)
B10	竹销	9.8(5.1)	0.68(14.0)	65.65(22.0)
B12	竹销	9.4(7.2)	0.66(5.6)	61.49(17.1)

注:表中括号内数据为变异系数(%)。

### 1.2 试件设计

组合木梁由 2 层 SPF 规格材组成,尺寸为 76 mm×89 mm×1 460 mm。在组合木梁宽度中间沿长度方向布置 1 行竹销或木销,竹销或木销间距为 40 mm,每根组合木梁使用 32 根竹销或木销连接。竹销或木销对称布置在梁长度两侧。不同角度竹/木销布置方式、边距和跨中间距,如图 1 所示。组合木梁制作时,先用夹具固定 2 层规格材,再用台钻(台式钻床 Z525)以需要的角度钻孔。在加工过程中,8 mm 竹销在钉入深度没有达到第 2 层时,竹销端部开裂,因此 8 mm 竹销的预钻孔也设置为 8 mm。其他预钻孔直径比钉入销的直径小 0.5 mm,钻孔后竹/木销通过敲击钉入。试验设置了不同销种类、直径和钉入角度(销轴线与组合木梁长度方向之间的夹角)连接的组合木梁,共 7 组,每组 3 个试件,共 21 个试件,试件安排如表 2。

表 2 组合木梁试件安排

Table 2 The configurations of timber composite beams

编号	销种类	销直径/mm	销钉入角度/(°)
W10-60°	木销	10	60
W10-90°	木销	10	90
B10-45°	竹销	10	45
B10-60°	竹销	10	60
B10-90°	竹销	10	90
B8-60°	竹销	8	60
B12-60°	竹销	12	60

### 1.3 复合效率评价

竹/木销连接的组合木梁,层板之间通过销传递剪力,属于半刚性连接,弯曲刚度介于完全复合的刚性连接和完全无复合连接之间。根据 M. Riggio 等<sup>[14]</sup>的研究,采用复合效率  $\gamma_c$  来直观表现不同组合木梁之间的不同。

$$\gamma_s = \frac{EI_{comp} - EI_{min}}{EI_{max} - EI_{min}} \quad (1)$$

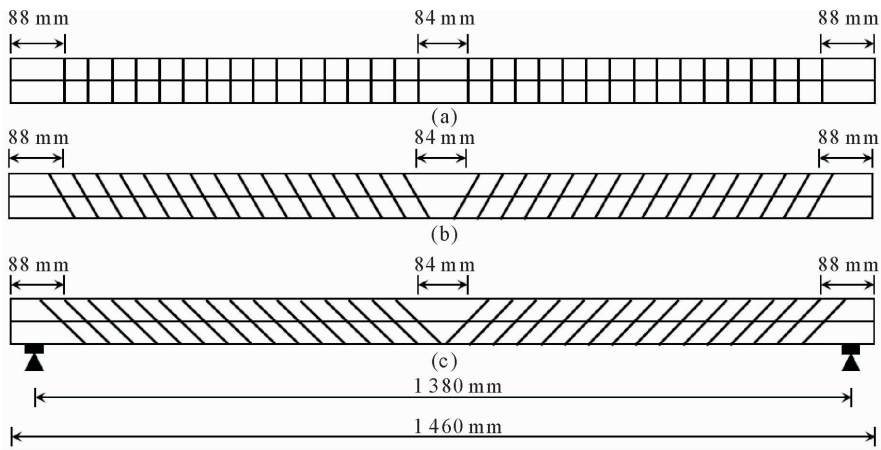
式中,  $EI_{comp}$  为半刚性连接组合木梁的刚度,  $N \cdot mm^{-2}$ ;  $EI_{max}$  为完全复合刚性连接组合木梁刚度,  $N \cdot mm^{-2}$ ;  $EI_{min}$  为无复合连接组合木梁刚度,  $N \cdot mm^{-2}$ 。

EN eurocode 5<sup>[15]</sup> 中的  $\gamma$ -法可以用来计算紧固件连接复合梁的有效弯曲刚度。对于双层组合木梁

( $i=1,2$ ), 有效刚度根据式(2)计算:

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^2 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i) \quad (2)$$

式中,  $E_i$  为层板弹性模量, MPa;  $I_i$  为截面惯性矩,  $mm^4$ ;  $A_i$  为层板横截面积,  $mm^2$ ;  $a_i$  为层板质心到胶层的距离, mm。本试验组合木梁中  $a_1 = a_2 = 38$  mm,  $\gamma_i$  是  $\gamma$ -法的系数, 当  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$  时表示层板间完全复合,  $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 1$  时表示层板间无复合作用。



注:(a)钉入角度 90°;(b)钉入角度 60°;(c)钉入角度 45°。

图 1 3 种角度连接组合木梁

Fig. 1 Three angle connected composite wood beams

1.4 抗弯性能测试

根据 ASTM D198<sup>[16]</sup> 标准, 对试件进行四点弯曲抗弯测试, 2 个支座间跨距为 1 380 mm, 两加载点间距为总跨距的 1/3, 试件跨高比为 18(图 2)。抗弯性能测试在 100 kN 的万能力学试验机上进行, 采用位移控制, 加载速度为 10 mm/min。在试件跨中位置设置位移计, 利用 TDS-530 静态数据采集仪记录试件挠度变化, 采集间隔为 1 次/s。组合木梁的初始刚度  $k$  通过荷载-位移曲线的斜率表示。组合木梁的弯曲刚度, 可由式(3)获得。



图 2 组合木梁四点弯曲加载测试

Fig. 2 Four-point loading test of timber composite beams

$$EI_{comp} = \frac{a(F_2 - F_1)(3l^2 - 4a^2)}{48(w_2 - w_1)} \quad (3)$$

式中,  $a$  为加载点到支座之间的距离, mm;  $l$  为试件的跨度, mm;  $F_1$  和  $F_2$  是 10% 和 40% 极限承载力对

应的荷载, N;  $w_1$  和  $w_2$  为荷载  $F_1$  和  $F_2$  对应的跨中挠度值, mm。

2 结果与分析

所有试件的极限承载力( $F_{max}$ )、初始刚度( $k$ )和复合效率值( $\gamma_s$ )统计数据, 如表 3。

2.1 荷载-位移曲线和破坏模式

销连接组合木梁的荷载-位移曲线如图 3 所示。曲线主要包括弹性段和非弹性段, 在弹性段, 竹/木销连接的组合木梁都有很好的线性刚度; 在非弹性段时, 由于荷载增加到一定程度, 连接组合木梁的竹/木销开始剪切断裂, 达到极限荷载时, 组合木梁弯曲破坏。

试件都是脆性弯曲破坏, 破坏主要发生在跨中位置和加载点下方有节子缺陷处, 部分试件还会在破坏处会产生轻微分层, 并向两侧延伸(图 4a)。图 4b 为 B12-60°组试件木梁底部, 沿竹销布置方向的破坏裂纹。组合木梁破坏特征主要有 2 种: 层板的弯曲破坏和销剪切断裂。在木销连接组合木梁中, 2 种角度连接的木销都出现了部分断裂, 并使组合木梁分离(图 4c)。而在竹销连接组合木梁中, 除了 8 mm 试件外, 都没有出现断裂情况(图 4d)。

2.2 销种类对组合木梁抗弯性能的影响

在 Loinsigh 等<sup>[8]</sup>用 3D 应力分析多层梁时, 认

为销的力学性能十分重要的,使用力学性能更好的销,可以有效提升组合木梁的抗弯性能。比较 W10-90°、W10-60°、B10-90°和 B10-60°组试件可以看出,钉入角度为 60°和 90°时,相同直径的竹销连接比木销连接的组合木梁初始刚度分别高出 18%和 11%,60°角连接时,组合木梁的极限承载力最大,达 12.57 kN,比木销连接的组合木梁提升约 48%。而在 90°连接时,竹销和木销连接承载力没有明显区别。

表 3 组合木梁的初始刚度和极限承载力  
Table 3 Initial stiffness and ultimate load of timber composite beams

编号	平均值	标准差	置信区间 (95%)
W10-90° $k/(N \cdot mm^{-1})$	313.29	6.05	6.83
$F_{max}/kN$	10.18	1.96	2.26
$\gamma_s$	0.20		
W10-60° $k/(N \cdot mm^{-1})$	275.42	36.93	41.34
$F_{max}/kN$	8.51	0.91	1.03
$\gamma_s$	0.13		
B8-60° $k/(N \cdot mm^{-1})$	339.46	25.90	29.31
$F_{max}/kN$	10.32	1.37	1.55
$\gamma_s$	0.25		
B10-60° $k/(N \cdot mm^{-1})$	324.31	18.26	20.66
$F_{max}/kN$	12.57	0.41	0.45
$\gamma_s$	0.22		
B12-60° $k/(N \cdot mm^{-1})$	416.65	57.19	20.66
$F_{max}/kN$	10.62	1.16	1.82
$\gamma_s$	0.39		
B10-90° $k/(N \cdot mm^{-1})$	346.24	31.09	35.18
$F_{max}/kN$	9.77	1.47	1.66
$\gamma_s$	0.26		
B10-45° $k/(N \cdot mm^{-1})$	268.78	16.05	18.15
$F_{max}/kN$	8.98	0.30	0.34
$\gamma_s$	0.12		

以看出,2 种角度连接时,竹销连接组合木梁都比木销连接有更好的复合效率。使用力学性能更好的竹材来连接组合木梁,可以显著提高组合木梁的抗弯性能。

2.3 销钉入角度不同对组合木梁抗弯性能影响

比较 W10-90°、W10-60°、B10-90°、B10-60°和 B10-45°组试件,木销垂直(90°)钉入比 60°角连接的组合木梁,极限承载力和刚度分别提升了 14%和 19%。竹销连接组合木梁中,试件极限承载力无明显趋势,60°角连钉入时,组合木梁的极限承载力最大,45°和 90°角连接时,极限承载力分别为 8.89 kN 和 9.77 kN。组合木梁刚度随钉入角度的增加而逐渐增加,B10-90°组试件初始刚度最大,达 346.24 N/mm,同 60°和 45°角连接组合木梁相比,刚度分别提升 7%和 29%。因为钉入角度的增加,会使规格材在加载过程中滑移趋势增加,试件破坏时更容易分层,这会直接导致组合木梁刚度的降低。从表 3 可看出,以刚度为评估基础的复合效率值,同样随钉入角度的增加而增加,90°角连接时,竹销连接组合木梁为 0.26。

2.4 竹销直径对组合木梁抗弯性能影响

竹销作为连接件来传递层间剪力,增大竹销的直径,同样是提升抗弯刚度的有效方法。比较 B12-60°、B10-60°和 B8-60°,当钉入角度都是 60°时,12 mm 竹销连接的刚度最大,复合效率值为 0.39,初始刚度达 416.65 N/mm,明显高于 10 mm 和 8 mm,分别高出 29%和 23%。10 mm 的竹销连接的极限荷载力最大,达 12.57 kN。而 8 mm 和 12 mm 的竹销连接的极限承载力约为 10 kN。8 mm 竹销的直径最小,但抗弯刚度较大,所以 B8-60°组试件也有较好的弯曲刚度。12 mm 竹销连接组合木梁的极限承载力降低,其原因可能是当增大销的直径,需要更大的预钻孔,导致破坏时发生图 4b 中沿竹销排列方向的裂纹,使抗弯承载力降低。

3 结论

同木销连接组合木梁相比,采用竹销连接,可以有效提升组合木梁的抗弯性能,其中刚度提升最明显,并且在加载过程中木销连接更容易发生剪切断裂。

木销垂直连接比 60°角连接,极限承载力和刚度都有所提升。竹销连接组合木梁,随钉入角度的增加,组合木梁的刚度会逐渐增加。

竹销连接组合木梁,随销直径的增加,组合木梁刚度逐渐提升,但预钻孔直径增加,可能会使承载力降低。

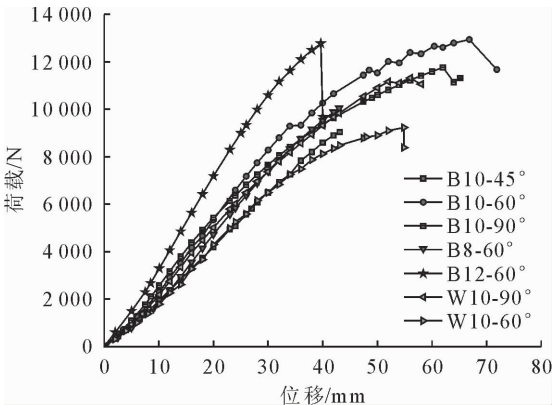


图 3 组合木梁的荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-deflection curves of timber composite beams

表 3 列出了各组试件的复合效率值,从表 3 可



注:a. 组合木梁弯曲破坏;b. 组合木梁底部裂纹;c. 木销连接截面;d. 竹销连接截面。

图 4 组合木梁破坏特征

Fig. 4 Typical failure of timber composite beams

参考文献:

[1] ADEAYO S, SIU-KUI A, GUAN Z W. Finite element modeling and testing of timber laminated beams fastened with compressed wood dowels[C]. 15th World Conference on Timber Engineering, Seoul: Korea, 2018.

[2] FUKUYAMA H, KAIRI M, HIRSI HANNU H, *et al.* Shear characteristics of wood dowel shear joint and practical application example[C]. 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki: Japan, 2008.

[3] MILCH J, TIPPNER J, BRABEC M, *et al.* Experimental testing and theoretical prediction of traditional dowel-type connections in tension parallel to grain[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 180-187.

[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): 8-11.

SONG H, LI Q, QI Y Y, *et al.* Development and research of pin connection on wood structure [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(10): 8-11. (in Chinese)

[5] BOCQUET J F, PIZZI A, DESPRES A, *et al.* Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels[J]. Journal of Adhesion Science & Technology, 2007, 21(3-4): 301-317.

[6] OLOINSIGH C, OUDJENE M, AIT-AIDER H, *et al.* Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels[J]. Construction & Building Materials, 2012, 36(6): 245-250.

[7] OLOINSIGH C, MARC O, ELISABETH S, *et al.* Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels[J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 313-321.

[8] 冷予冰, 许清风, 陈珍珠. 工程竹在建筑结构中的应用研究进展[J]. 建筑结构, 2018, 48(10): 89-97.

LENG Y B, XU Q F, CHEN L Z. Research progress of application of engineered bamboo in building structures[J]. Building Structure, 2018, 48(10): 89-97. (in Chinese)

[9] 魏洋, 纪雪微, 端茂军, 等. 重组竹轴向应力-应变关系模型[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 572-579.

WEI Y, JI X W, DUAN M J, *et al.* Model for axial stress-strain relationship of bamboo scrimber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 572-579. (in Chinese)

[10] 周佳如, 李玉顺, 王嘉琳, 等. 长期荷载作用下钢-竹组合楼板的力学性能[J]. 森林工程, 2020(1): 109-114.

[11] 肖忠平, 李晨, 苏相宇. 不同截面形式重组竹柱轴心受压试验研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 231-235.

XIAO Z P, LI C, SU X Y. Experimental study on axial compression of glued laminated bamboo columns with different cross sections[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 231-235. (in Chinese)

[12] 肖忠平, 俞君宝, 束必清, 等. 重组竹高温处理后的性能研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 240-243.

XIAO Z P, YU J B, SHU B Q, *et al.* performance of glued laminated bamboo after high temperature treatment[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 240-243. (in Chinese)

[13] ASTM F1575. Standard test method for determining bending yield moment of nails[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2003.

[14] 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): 74-93.

[15] EN eurocode 5: design of timber structures-part 1-1: common rules and rules for buildings[S]. CEN, Eur. Comm. Stand. , Brussels, 2014.

[16] ASTM D198. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.