

竖向物理拼接木梁抗弯性能数值模拟

刘永军,李亚雄

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究不同螺钉直径和钉入角度下竖向拼接木梁的抗弯性能变化规律。
方法 通过有限元软件 ABAQUS 建立 8 个拼接木梁有限元模型,研究不同螺钉直径(8、10、12、16 mm)和不同螺钉钉入角度(45°、60°、90°)对拼接木梁极限线荷载及跨中挠度的影响规律。螺钉采用分段均匀分布排列,螺钉与木梁应用梁-实体耦合。
结果 90°钉入时,拼接木梁采用 16 mm 螺钉比 8 mm 螺钉极限线荷载提高了 11.38%,跨中挠度减小 17.88%;8 mm 螺钉下 45°与 90°钉入相比,拼接木梁极限线荷载提高了 11.38%,跨中挠度减小 14.60%。
结论 增加螺钉直径可提高拼接木梁的抗弯性能,但螺钉钉入角度越小,改变螺钉直径对拼接木梁抗弯性能的影响越小;减小螺钉钉入角度可提高拼接木梁的抗弯性能,但螺钉直径越大,通过减小螺钉钉入角度来提升拼接木梁抗弯性能的效果越差。

关键词 拼接木梁;抗弯性能;螺钉直径;螺钉钉入角度;梁-实体耦合

中图分类号 TU366

文献标志码 A

Numerical Simulation on Bending Behavior of Vertical Mechanically Spliced Wooden Beams

LIU Yongjun, LI Yaxiong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the variation of bending behavior of vertically spliced wooden beams under different screw diameters and screw insertion angles. The finite element software ABAQUS was used to establish eight models, studying the effects of different screw diameters (8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm) and screw insertion angles (45°, 60°, 90°) on the ultimate line loads and mid-span deflections of the spliced wooden beams. Screws were arranged in piecewise uniform distribution, the screws and wooden beams use beam-to-solid coupling. When insertion angle at 90°, compared with 8 mm screws, the ultimate line load was increased by 11.38% and the mid-span deflection was decreased by 17.88% of splicing wooden beams with 16 mm screws. When diameter is 8 mm, insertion angle at 45° compared with 90°, the ultimate line load was increased

收稿日期:2021-08-25

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100403)

作者简介:刘永军(1966—),男,教授,博士,主要从事建筑结构抗火性能等方面研究。

by 11.38% and the mid-span deflection was decreased by 14.60% of splicing wooden beams. Increasing the diameter of screws can improve the bending behavior of splicing wooden beams, but the smaller the insertion angle of screws, the smaller the influence of changing the diameter on the bending behavior of spliced wooden beams. Decreasing the insertion angle of screws can improve the bending behavior of spliced wooden beams, but the larger the diameter of screws, the worse the effect of decreasing the insertion angle to improve the bending behavior of spliced wooden beams.

Key words: spliced wooden beam; bending behavior; diameter of screw; insertion angle of screw; beam-to-solid coupling

竖向物理拼接木梁是村镇建筑中一种常用的结构构件,指通过金属连接件对上下叠放的木梁进行拼接,连接件不仅可以限制上下木梁的相对滑移和掀起分离^[1],重要的是可以显著增加截面惯性矩,从而提升木梁的抗弯性能。木材是天然生长的材料,其长度和截面尺寸都受到一定限制,有时为了满足长度和承载力等方面的要求,需要将有限尺寸的木材拼接在一起形成符合要求的构件^[2]。经防火设计和防火处理的大截面木构件可以具有可靠的耐火性,并且同等条件下,木结构建筑同钢结构和混凝土结构相比,在降低能耗和减少废物排放等方面表现更优^[3]。

近年来,国内外学者针对木梁的拼接开展了较多研究。陈爱军等^[4-5]对钢夹板-螺栓连接木梁的抗剪性能进行了相关研究,探讨了厚径比、螺栓间距、螺栓列数、并错列布置方式对拼接木梁抗剪性能的影响。袁东伟等^[6]进行了木材-钢填板销钉连接斜纹受拉试验,分析了销钉直径、销钉数量、销钉长细比、木材厚度以及荷载与木纹之间的角度等因素对连接承载力、刚度和延性的影响。熊海贝等^[7]进行了矩形截面梁、钉连接T型组合梁和钉连接工字型组合梁受弯对比试验,结果表明钉连接能有效传递腹板和翼缘的组合作用,两种组合梁较矩形梁承载力和刚度有明显提高。淳庆等^[8]对采用板销连接件的上大下小拼接木梁的抗弯性能进行了试验研究,指出了拼接木梁受弯时的破坏形式和截面应变分布,并推导了拼接木梁抗弯

承载力计算公式。周红梅等^[9]对螺钉的抗拔性能和抗剪性能进行了试验研究,指出设置预钻孔可提高钉连接抗剪力,且钻孔孔径为钉直径80%左右时抗剪性能最好,螺钉采用三角形分布抗剪性能最优。H. Fukuyama等^[10]对不同材质的木销连接件进行了剪切测试,研究了销的材质、直径和长细比对木销结点力学性能的影响。M. Oudjenea等^[11-13]提出采用梁-实体耦合的方法来实现螺钉与木梁的相互作用,该种模拟方法避免了对木梁进行预留孔洞处理以及对螺钉建立精细化的实体单元,大大简化了模型计算。

目前的研究中多采用方木和方木拼接的形式,对圆木与方木拼接或圆木与圆木拼接研究较少。螺钉多采用全长等间距分布的方式,在依据剪力流合理布置螺钉方面研究较少。因此,笔者应用有限元软件ABAQUS对螺钉连接的竖向拼接木梁抗弯性能进行分析。螺钉采用分段均匀分布的方式排列,研究在此种排布方式下螺钉直径和螺钉钉入角度对拼接木梁抗弯性能的影响。结果表明,增大螺钉直径或减小螺钉钉入角度均可提高拼接木梁的抗弯性能,且螺钉钉入角度越大,改变螺钉直径对拼接木梁抗弯性能影响越大。

1 分段均匀分布螺钉数量的计算方法

螺钉连接可促使上下木梁在荷载作用下协同受力,随着螺钉数量的增加,拼接木梁将由半刚性连接逐渐趋向刚性连接,受弯时的

破坏形式和截面应变分布将逐渐趋向大尺寸的整材木梁。

文中螺钉连接的竖向拼接木梁为承受均布荷载的简支梁。如图1所示,拼接木梁在均布荷载作用下,拼接面剪力流从支座到跨中逐渐减小,因此螺钉分布应为两端密中间疏。笔者将拼接木梁跨度等分为6段,各段采用均匀分布的方式排布螺钉,且螺钉沿跨中左右对称,假设每颗螺钉承担其左右各一半螺钉间距范围内的剪力,拼接木梁左侧螺钉排布如图2所示。

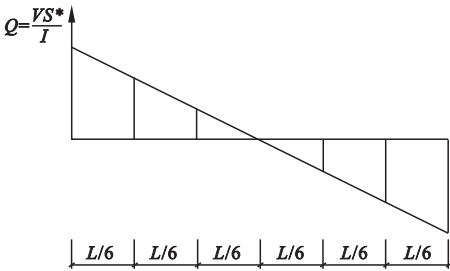


图1 均布荷载作用下拼接木梁剪力流

Fig. 1 Shear flow of spliced wooden beams under uniformly distributed loads

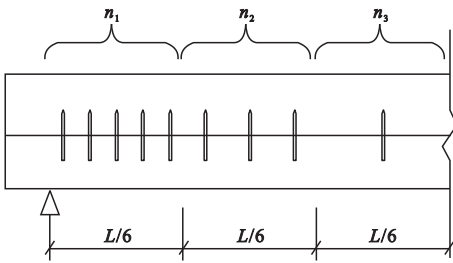


图2 螺钉排布方式

Fig. 2 Arrangement of screws

由拼接木梁在均布荷载作用下的剪力流可知,从支座到跨中的3段剪切面的剪力合力比值为5:3:1,因此3段剪切面所需螺钉数

量比 $n_1:n_2:n_3 = 5:3:1$ 。假设每段拼接面上的剪力合力由该段的螺钉承受,由螺钉抗剪强度和木材顺纹抗剪强度,可计算分段均匀分布螺钉的数量:

$$n_i A_s f_v^r = \frac{k_i b L f_v}{6} \Rightarrow n_i = \frac{k_i b L f_v}{6 A_s f_v^r} \quad (1)$$

式中: k 为折减系数($k_1 = 1, k_2 = 3/5, k_3 = 1/5$); n_i 为第*i*段的螺钉数量; A_s 为螺钉横截面面积; f_v^r 为螺钉抗剪强度; b 为拼接面宽度; L 为拼接木梁跨度; f_v 木材顺纹抗剪强度。

2 有限元模型建立

2.1 拼接木梁简介

拼接木梁是由螺钉将上下叠放的圆木和方木拼接而成的,圆木需沿长度方向削出一个与方木顶面相同的拼接面,拼接木梁为简支梁,承受竖直向下的均布荷载。上圆木直径为150 mm,长度为4 000 mm,下方木宽×高×长为60 mm×120 mm×4 000 mm,拼接木梁跨度为3 600 mm。在拼接木梁宽度中间沿长度方向布置一排螺钉,螺钉长度为120 mm,螺钉钉入上圆木和下方木中的长度相同,均为60 mm。螺钉直径选用8 mm、10 mm、12 mm和16 mm,螺钉钉入角度 ϵ (螺钉轴线与拼接面的夹角)设置为45°、60°和90°。螺钉沿跨度共分6段,采用分段均匀分布排列,且螺钉沿跨中左右对称。拼接木梁底面布置有两个钢垫块作为支座,钢垫块宽×高×长为60 mm×20 mm×200 mm,垫块中心距梁端的距离为200 mm。拼接木梁示意图如图3所示。

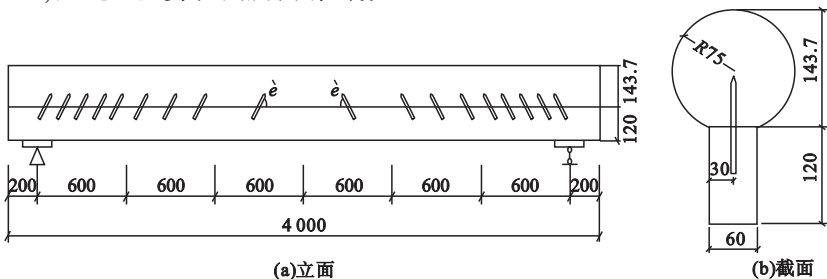


图3 拼接木梁示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spliced wooden beams

2.2 拼接木梁材料模型

木材具有各向异性的特征,尤其是纵向的力学性能与另外两个方向明显不同^[2]。笔者将木材简化成正交各向异性材料,采用胡旭^[14]在黔东南地区传统民居穿斗式木结构力学性能与评估方法研究中所用杉木的材料属性进行模拟,杉木常温下的弹性参数见表1。杉木的气干密度为 340 kg/m^3 ,含水率

表1 杉木弹性参数

Table 1 Elastic parameters of Chinese fir

弹性模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松比		
E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}
11 417.12	1 085.77	637.37	587.25	685.80	205.74	0.501	0.574	0.669

注: E_L 、 E_R 、 E_T 分别为顺纹纵向、横纹径向和横纹弦向的弹性模量; G_{LR} 、 G_{LT} 、 G_{RT} 分别为顺纹纵向、横纹径向和横纹弦向的剪切模量; μ_{LR} 、 μ_{LT} 、 μ_{RT} 分别为顺纹纵向、横纹径向和横纹弦向的泊松比。

螺钉采用4.8级普通六角头木螺钉,弹性模量为 $210\,000 \text{ MPa}$,泊松比为0.3,屈服强度为 320 MPa ,抗剪强度为 224 MPa ,密度为 $7\,850 \text{ kg/m}^3$ 。

垫块选用钢材为Q235等级,弹性模量为 $210\,000 \text{ MPa}$,泊松比为0.3,屈服强度为 235 MPa ,密度为 $7\,850 \text{ kg/m}^3$ 。

2.3 确定螺钉数量

笔者将拼接木梁跨度等分为6段,各段采用均匀分布的方式排布螺钉,且螺钉沿跨中左右对称。将木材和螺钉的材料参数带入式(1)可计算出拼接木梁模型所需螺钉个数。笔者主要研究螺钉直径和螺钉钉入角度对拼接木梁抗弯性能的影响,以直径 16 mm 螺钉为基准计算螺钉个数,结果如下:

$$n_1 = \frac{k_1 b L f_v}{6 A_s f_v^r} = \frac{1 \times 60 \times 3\,600 \times 6.23}{6 \times 201.1 \times 224} = 4.979;$$

$$n_2 = \frac{k_2 b L f_v}{6 A_s f_v^r} = \frac{3 \times 60 \times 3\,600 \times 6.23}{5 \times 6 \times 201.1 \times 224} = 2.987;$$

$$n_3 = \frac{k_3 b L f_v}{6 A_s f_v^r} = \frac{1 \times 60 \times 3\,600 \times 6.23}{5 \times 6 \times 201.1 \times 224} = 0.996。$$

为12%,顺纹抗拉强度为 74.93 MPa ,顺纹抗压强度为 30.04 MPa ,顺纹抗剪强度为 6.23 MPa ,木材屈服强度取抗拉强度的65%,即 48.7 MPa 。在有限元软件ABAQUS中,输入Engineering Constants来定义弹性属性,输入Yield stress、Plastic strain和Potential来定义塑形属性。

由计算结果可知拼接木梁从支座到跨中3段剪切面所需螺钉个数分别为5颗、3颗和1颗,因此文中拼接木梁所需螺钉总数为18颗。

2.4 拼接木梁有限元模型建立

装配拼接木梁。首先通过部件模块创建方木、圆木、螺钉和垫块4种拼接木梁组成部件,然后按照拼接木梁示意图通过装配模块对各个部件进行装配,圆木和方木上下叠放通过18颗螺钉连接,拼接木梁底面布置两个刚性垫块。

定义木材方向。建立局部坐标系定义木材方向,木材顺纹纵向为X方向,横纹弦向为Y方向,横纹径向为Z方向。木材方向如图4所示。

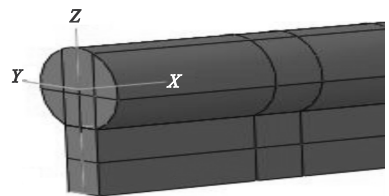


图4 木材方向

Fig. 4 The directions of wood

设置相互作用。圆木下表面和方木上表面设置为表面与表面接触,法向定义为硬接触来传递均布荷载作用下上下表面间的接触压

力,切向不考虑摩擦。钢垫块上表面与木梁底面也设置为绑定约束(Tie)。螺钉采用梁单元,木梁通过拆分在添加螺钉的地方分割出与螺钉长度相同的分割线,将螺钉与木梁分割线设置为绑定约束(Tie),如图5所示。

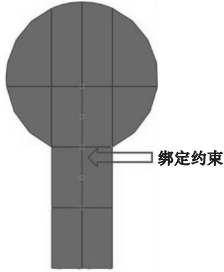


图5 螺钉与木梁绑定约束

Fig. 5 Screw and wooden beams binding constraints

荷载和边界条件。在圆木60 mm弦长宽度范围内设置竖直向下的表面载荷,荷载采用匀速加载方式。拼接木梁一端支座处约束 X 、 Y 、 Z 方向(整体坐标系)的移动来模拟固定铰支座;另一端支座处仅约束 X 、 Y 方向(整体坐标系)的移动来模拟活动铰支座^[15]。

拼接木梁网格划分。木梁和钢垫块采用八节点线性六面体单元(C3D8),单元宽 \times 高 \times 长为10 mm \times 10 mm \times 20 mm。上圆木梁单元总数为32 800,节点总数为37 587;下方木梁单元总数为14 400,节点总数为18 291;每个垫块单元总数为120,节点总数为231。螺钉采用两节点空间线性梁单元(B31),属于铁木辛柯梁,考虑剪切变形,单元长度约为5.2 mm。每颗螺钉单元总数为23,节点总数为24。螺钉与木梁分割线绑定在一起不发生滑移,相邻单元节点之间相互

作用。模型网格划分如图6所示。

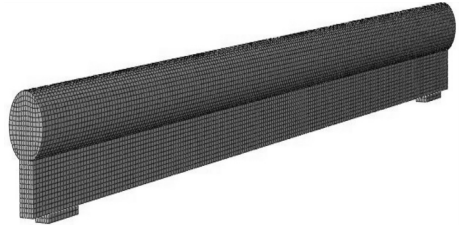


图6 拼接木梁网格划分

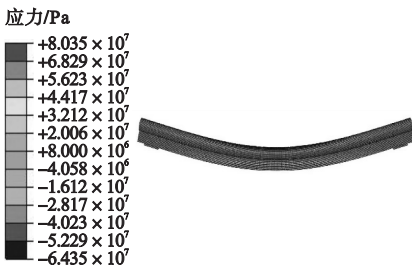
Fig. 6 Mesh dividing of spliced wooden beams

3 数值模拟结果与分析

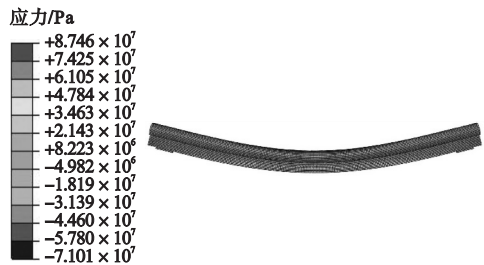
3.1 数值模拟结果

笔者应用有限元软件ABAQUS共建立8个拼接木梁有限元模型,研究螺钉直径和螺钉钉入角度对拼接木梁抗弯性能的影响。模型编号为D-L-A-,其中D为螺钉直径,L为螺钉长度,A为螺钉钉入角度,如D10L120A90表示螺钉直径为10 mm,螺钉长度为120 mm,螺钉钉入角度为90°。

拼接木梁在均布荷载作用下发生弯曲变形。模拟得到模型D16L120A90和D8L120A60在极限线荷载31.248 kN/m和30.156 kN/m作用下的纵向(拼接木梁长度方向)应力云图如图7(a)和(b)所示。为了观察在极限线荷载作用下螺钉附近木材的受力情况,将拼接木梁在长度方向沿截面中心线剖开,得到模型D16L120A90和D8L120A60在极限线荷载31.248 kN/m和30.156 kN/m作用下右侧剖面纵向应力云图如图7(c)和(d)所示。



(a)模型D16L120A90



(b)模型D8L120A60

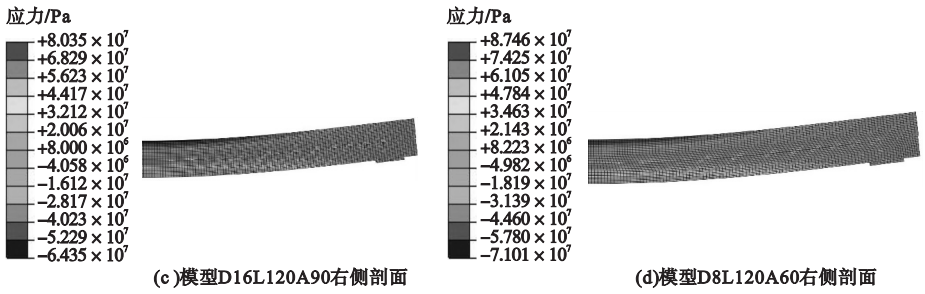


图7 拼接木梁纵向应力云图

Fig. 7 Longitudinal stress contour plots of spliced wooden beams

从图7中可以看出,在均布荷载作用下拼接木梁发生弯曲变形,梁底受拉,梁顶受压,上下木梁的拼接面会发生稍许相对滑移。螺钉与木梁被设置为绑定约束,螺钉因抑制拼接面滑移而产生弯曲变形,同时螺钉附近的木材也发生变形表现为一侧受拉而另一侧受压。

螺钉承受剪力发生剪切变形,螺钉中部位于拼接面处,剪切变形突出,螺钉在该位置剪力最大。以模型D12L120A90右半部分9颗螺钉为例,螺钉的剪力分布如图8所示。

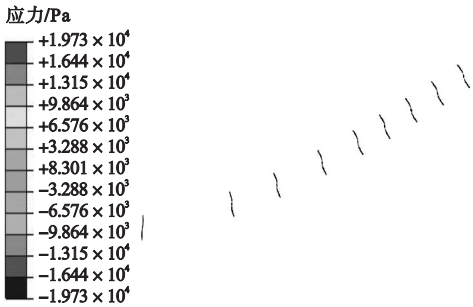


图8 模型D12L120A90螺钉剪力分布图

Fig. 8 Shear distribution diagram of screws for model D12L120A90

在极限线荷载30.912 kN/m作用下,模型D12L120A90从右到左9颗螺钉最大剪力分别为19.73 kN、19.37 kN、19.03 kN、18.62 kN、18.37kN、18.02kN、16.89 kN、15.25 kN、8.34 kN。由螺钉剪力分布可知,除了右数第9颗螺钉外其余8颗螺钉剪力相差较小,模型螺钉剪力值比较均匀。右数第8颗和第9颗螺钉剪力分别为右数第1颗螺钉剪力的77.3%和42.3%。螺钉受力总体

比较均匀,因此假设每段拼接面上的剪力合力由该段的螺钉承受,采用分段均匀分布的方式排列螺钉合理可行。

均布荷载作用下拼接木梁的荷载-跨中挠度曲线如图9所示。从图中可以看出,荷载-跨中挠度曲线主要包括弹性和弹塑性两个阶段。前期荷载较小时曲线呈线性,上下木梁变形协调,拼接木梁具有良好的线性刚度;当荷载增加到一定程度后,拼接木梁进入弹塑性阶段,曲线呈非线性增长,且斜率逐渐减小趋于平缓,达到极限荷载时拼接木梁弯曲破坏。

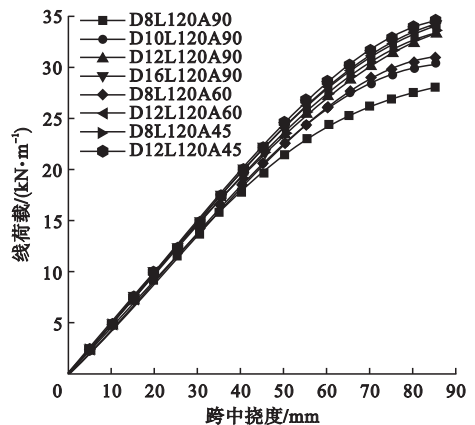


图9 拼接木梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-midspan displacement curves of spliced wooden beams

笔者采用极限应变法进行分析,以梁底跨中测点的拉应变达到杉木极限拉应变(6.58×10^{-3})作为拼接木梁的破坏准则^[16],此时所施加的荷载即为拼接木梁的极限线荷载。通过对不同螺钉直径和螺钉钉入角度的拼接木梁进行数值分析后,得出8组拼接木

梁在受弯破坏时的极限线荷载、跨中挠度和 螺钉最大剪力,数据整理结果见表2。

表2 拼接木梁模拟结果

Table 2 Simulated results of spliced wooden beams

模型编号	直径/mm	钉入角度/(°)	极限线荷载/(kN·m ⁻¹)	跨中挠度/mm	螺钉最大剪力/kN
D8L120A90	8	90	28.056	85.34	11.71
D10L120A90	10	90	29.400	76.12	17.94
D12L120A90	12	90	30.912	72.91	19.73
D16L120A90	16	90	31.248	70.08	23.93
D8L120A60	8	60	30.156	75.80	11.07
D12L120A60	12	60	31.248	70.95	15.63
D8L120A45	8	45	31.248	72.88	7.36
D12L120A45	12	45	31.416	68.94	10.15

3.2 螺钉直径对拼接木梁抗弯性能的影响

拼接木梁采用18颗螺钉进行连接,通过改变所用螺钉的直径分析其对拼接木梁抗弯性能的影响。对比模型D8L120A90、D10L120A90、D12L120A90和D16L120A90可知,当钉入角度为90°时,与8mm螺钉相比,10mm、12mm、16mm螺钉连接的拼接木梁极限线荷载分别提高了4.79%、10.18%、11.38%,跨中挠度分别减小10.80%、14.57%、17.88%,可知增大螺钉直径可提高拼接木梁的抗弯性能,但16mm螺钉连接和12mm螺钉连接的拼接木梁极限线荷载相差较小。对比模型D8L120A60和D12L120A60可知,当钉入角度为60°时,12mm螺钉较8mm螺钉连接的拼接木梁极限线荷载提高了3.62%,跨中挠度减小6.40%。对比模型D8L120A45和D12L120A45可知,当钉入角度为45°时,12mm螺钉较8mm螺钉连接的拼接木梁极限线荷载提高了0.54%,跨中挠度减小5.41%。通过分析可知,螺钉钉入角度越小,改变螺钉直径对拼接木梁抗弯性能的影响越小。

当螺钉钉入角度较大时,可通过适当增大螺钉直径的方法来提高拼接木梁的抗弯性能;当螺钉钉入角度较小时,增大螺钉直径来提高拼接木梁抗弯性能的效果较差,采用小直径螺钉作为抗剪连接件即可。

3.3 螺钉钉入角度对拼接木梁抗弯性能的影响

通过改变螺钉的钉入角度,分析拼接木梁的抗弯性能。对比模型D8L120A90、D8L120A60和D8L120A45可知,当螺钉直径为8mm时,螺钉45°和60°钉入较90°钉入拼接木梁极限线荷载分别提高了11.38%、7.49%,跨中挠度分别减小14.60%、11.18%。可知减小螺钉钉入的角度可提高拼接木梁的抗弯性能。对比模型D12L120A90、D12L120A60和D12L120A45可知,当螺钉直径为12mm时,螺钉45°和60°钉入与90°钉入相比,拼接木梁极限线荷载提高了1.63%和1.09%,跨中挠度减小5.45%和2.69%,增幅明显小于8mm螺钉。

螺钉直径越大,通过减小螺钉钉入角度来提高拼接木梁抗弯性能的效果越差。采用大直径螺钉时,考虑到施工方便,可选择垂直钉入的方式;采用小直径螺钉时,可以适当减小螺钉钉入角度来提高拼接木梁的抗弯性能。

4 结论

(1)螺钉数量不变,增大螺钉直径可以提高拼接木梁的抗弯性能,但螺钉直径较大时,增大螺钉直径后拼接木梁抗弯性能提升不显著。且螺钉钉入角度越小,改变螺钉直径对拼接木梁抗弯性能的影响越小。

(2)减小螺钉钉入角度可提高拼接木梁的抗弯性能。螺钉直径越大,通过减小螺钉钉入角度来提升拼接木梁抗弯性能的效果越差。

(3)拼接木梁在均布荷载作用下的荷载-跨中挠度曲线包括弹性和弹塑性两个阶段。拼接木梁前期拥有良好的线性刚度,后期荷载增大,曲线斜率逐渐减小趋于平缓。

参考文献

[1] 袁帅,易锦,贺国京. 加筋木-混凝土组合梁承载力计算及尺寸设计方法[J]. 材料导报, 2019,33(10):3419-3425.
(YUAN Shuai, YI Jin, HE Guojing. The calculation of ultimate flexural capacity and dimension design method of reinforced timber-concrete composite beams [J]. Materials reports, 2019,33(10):3419-3425.)

[2] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2018.
(PAN Jinglong, ZHU Enchun. Principle of timber structure design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.)

[3] 左宏亮,付丁虬,邱一桐,等. 配筋形式对配筋胶合木梁受弯性能影响试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(4):621-628.
(ZUO Hongliang, FU Dingqiu, QIU Yitong, et al. Bending performance test on the different forms of reinforced glulam beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017,33(4):621-628.)

[4] 陈爱军,彭荣新,贺国京. 装配式木结构钢夹板螺栓连接抗剪性能[J]. 中国公路学报, 2018,31(12):59-70.
(CHEN Aijun, PENG Rongxin, HE Guojing. Shear behavior of bolted connections with steel plate in assembled timber structures [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(12):59-70.)

[5] 陈爱军,牛东,占雪芳. 钢夹板-螺栓连接胶合木抗剪性能试验研究[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(9):115-119.
(CHEN Aijun, NIU Dong, ZHAN Xuefang. Experimental study on connection performance of glued wood-steel clamp bolted connection [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2018,38(9):115-119.)

[6] 袁东伟. 木材-钢填板销钉连接力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
(YUAN Dongwei. Study on mechanical behaviour of dowelled steel-to-timber joints [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.)

[7] 熊海贝,康加华,吕西林. 木质组合梁抗弯性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(4):522-528.
(XIONG Haibei, KANG Jiahua, Lü Xilin. Bending tests investigation on composite timber

beam [J]. Journal of tongji university (natural science), 2012,40(4):522-528.)

[8] 淳庆,陈春超,潘建伍. 上大下小拼合木梁抗弯性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(5):1659-1665.
(CHUN Qing, CHEN Chunchao, PAN Jianwu. Experimental study on bending behavior of Chinese traditional timber stitching beams with big top and small bottom [J]. Journal of central south university (science and technology), 2014,45(5):1659-1665.)

[9] 周红梅. 木结构钉连接力学性能试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2015.
(ZHOU Hongmei. Experimental research on mechanical behavior of nail connection [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.)

[10] FUKUYAMA H, KAIRA M, HIRSIHANNU H. Shear characteristics of wood dowel shear joint and practical application example [C]. Miyazaki: Proceedings of The Tenth World Conference on Timber Engineering, 2008.

[11] OUDJENEA M, MEGHLA E M. Non-linear finite element modelling of the structural behavior of screwed timber-to-concrete composite connections [J]. Composite structures, 2013, 102:20-28.

[12] MEGHLA E M, OUDJENEA M. A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method [J]. Construction and building materials, 2013, 41: 263-269.

[13] OUDJENEA M, MEGHLA E M. A one-dimensional 4-node shear-flexible beam element for beam-to-solid modelling in mechanically jointed connections made with screws or nails [C]. Vienna: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 2012.

[14] 胡旭. 黔东南地区传统民居穿斗式木结构力学性能与评估方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
(HU Xu. Research on mechanical behavior and appraisal method of traditional residence with through type timber structure in southeast Guizhou [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)

[15] 蔡郭圣. 内嵌BFRP筋增强胶合木梁受弯性能试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2018.
(CAI Guosheng. The experimental study on flexural behavior of the glulam timber beams reinforced with BFRP tendon [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018.)

[16] 曹磊. 落叶松胶合木梁力学性能研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
(CAO Lei. The research on mechanical properties of larch glulam beams [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.)