文章编号：1674-2974（2026）03-0026-09 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026021

大跨度屋面结构中叠合木梁拼接节点抗剪性能研究

周金将，何敏娟，王希珺†
（同济大学 土木工程学院，上海，200092）

摘 要：上下交错叠合木梁体系是大跨度胶合木结构中深受建筑师青睐的屋面结构形式，然而其拼接节点的力学特点尚未明确．以宜兴美术馆的大跨度屋面结构为工程背景，提出采用十字钢板与自攻螺钉组合节点连接上下交错叠合木梁，并对该组合节点开展了抗剪性能试验．试验结果表明，叠合梁节点界面采用十字钢板和自攻螺钉连接能显著增强界面间的抗剪能力，节点的荷载-位移行为特征呈现弹性段、非线性段和屈服阶段3个特征阶段，其平均极限抗剪承载力为218.5 kN，初始刚度为35.4 kN/mm；节点破坏模式主要为螺钉屈服及螺钉周围木纤维局部压溃，属延性破坏；Foschi模型可有效预测该叠合梁节点的力学行为．

关键词：大跨度屋面结构；叠合梁；拼接节点；抗剪性能；Foschi模型
中图分类号：TU366.2 **文献标志码**：A

Research on shear performance of spliced joints for composite wood beams in large-span roof structures

ZHOU Jinjiang，HE Minjuan，WANG Xijun†
（College of Civil Engineering，Tongji University，Shanghai 200092，China）

Abstract：Upper-lower staggered composite wood beam systems are widely preferred by architects for long-span glulam roof structures. However，the mechanical characteristics of its connections remain unclear. Using the large-span roof structure of the Yixing Art Museum as the engineering background，an innovative joint configuration is proposed，in which a cross-shaped steel plate in conjunction with self-tapping screws connects the upper and lower staggered composite timber beams. Shear performance tests were conducted on composite beam joints. The test results show that using cross-shaped steel plates and self-tapping screws at the composite beam，joint interfaces can effectively enhance the shear capacity between interfaces. The load-displacement behavior of the test joints presents three distinct stages：elastic stage，nonlinear stage，and yield stage. The average ultimate shear capacity and initial stiffness of the specimens were 218.5 kN and 35.4 kN/mm，respectively. The typical failure modes included screw yielding and local crushing of wood fibers around the screws，indicating a ductile failure mode. Furthermore，the Foschi model effectively predicts the mechanical behavior of the proposed composite beam joints.

Key words：large-span roof structure；composite beam；spliced joint；shear performance；Foschi model

* **收稿日期**：2025-03-09
基金项目：中国博士后科学基金资助项目（2023M742665），China Postdoctoral Science Foundation（2023M742665）
作者简介：周金将（1983—），男，浙江台州人，同济大学博士研究生
† 通信联系人，E-mail：xijunwang@tongji.edu.cn

随着建筑业的持续发展,绿色建筑材料的研究和应用愈发受到重视[1-2].胶合木作为一种低碳、环保、可预制、高强重比的工程木产品,近年来已被大量运用于各类公共建筑与住宅建筑[3-5].

大跨度结构是现代木结构发展的重要方向之一,近十年来,国内一些学者对大跨度胶合木结构进行了探索与研究.冯远等[6]对常见的大跨胶合木结构进行了系统的力学性能分析,并提出了相关设计建议.何敏娟等[7]综述了现有空间木结构的研究现状,包括长期荷载作用下结构性能、节点研究、可靠性研究等,并提出了空间木结构研究亟需解决的关键问题.贾水钟等[8]以3个大跨胶合木空间结构为对象,阐明了大跨胶合木空间结构设计过程中存在的关键问题.欧加加等[9]基于欧洲规范的建议公式确定了胶合木网壳结构分析中采用的弯矩-转角模型,并基于Ansys对单层球面胶合木网壳结构进行分析,统计了不同高跨比和节点刚度折减系数下的塑性折减系数,为后续研究提供了借鉴.

节点和构件对大跨胶合木空间结构整体力学性能有重要影响.张晓萌等[10]对大跨度钢-胶合木组合屋盖进行了结构分析,并对缩尺张弦胶合木曲梁进行了静载试验研究,验证了该组合形式在实际工程应用中的可能.He等[11]研究了一种半搭接节点对大跨度胶合木网壳结构构件力学性能的影响,为大跨度胶合木网壳结构半搭接节点的力学分析和设计提供了理论依据.Li等[12]进一步研究了采用不同连接方式的大跨拼接胶合木梁的力学性能,根据试验结果对拼接木梁提出了设计建议.Wang等[13]对自攻螺钉连接的框架梁柱节点进行了试验研究,通过比较不同胶合板厚度对框架整体性能和节点转动刚度的影响,建立了采用基础区域建模方法的有限元数值模型,为后续的工程应用提供了建议.曹正罡等[14]对采用内嵌双钢板销式连接的大断面拼接胶合木梁进行了静载试验,证明了此类拼接节点的可靠性.Girhammar等[15]提出了一种应用于纯木节点和木-组合结构抗剪连接件的刚度模型,并通过试验对其进行了验证,证明了该模型预测的准确性.

综上,目前国内外对大跨度网壳结构的结构体系、基本构件及关键节点性能进行了系列研究,但对近年深受青睐的大跨度上下交错叠合木梁体系研究较少,屋面结构中叠合梁拼接节点(简称节点)的研究更是少见.本文以宜兴美术馆的大跨度屋面结构为工程背景,提出了采用十字钢板与自攻螺钉组合节点连接上下交错叠合木梁的节点形式,对十字钢板-自攻螺钉组合节点进行了试验研究,评估了其基本力学性能,并基于试验结果对有限元方法进行了验证,为整体结构的设计和分析提供了理论支撑.

1　工程概况

1.1　结构体系

宜兴美术馆位于江苏省宜兴市,单体建筑面积为3 322.8 m^2,南北跨度为78 m,东西跨度为46.3 m,最大高度为18 m.建筑整体为单层,局部为两层,结构体系为钢-木组合结构.宜兴美术馆外部效果详见图1,内部效果见图2.

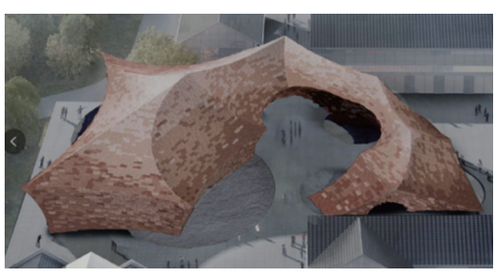


图1　宜兴美术馆外部效果图

Fig.1　External rendering of Yixing Art Museum

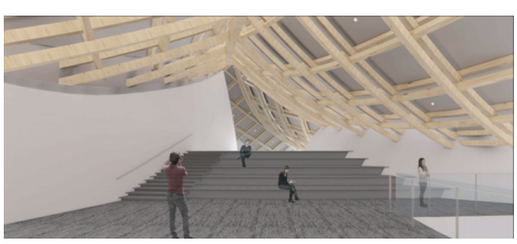


图2　宜兴美术馆内部3D效果图

Fig.2　3D rendering from interior view of Yixing Art Museum

该钢-木组合屋面采用反凹矢高为1 000 mm的4层叠合梁结构体系,由13个球面相切而成,相切屋脊线呈双曲形态,屋脊线上16根钢梁将胶合木屋盖分为13个单元,如图3所示.

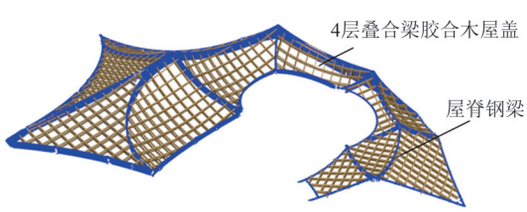
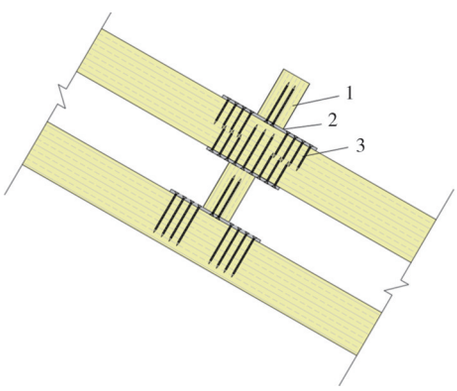


图3　钢-木组合屋面

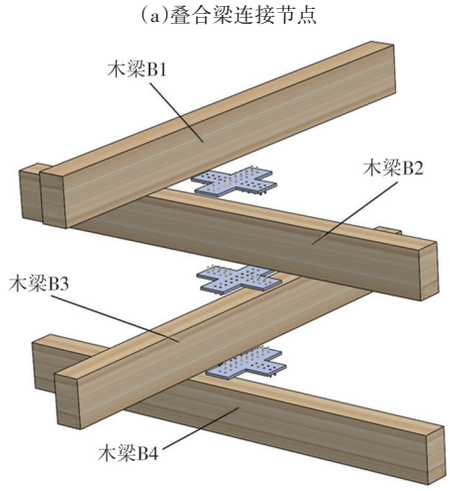
Fig.3　Steel-timber composite roof

1.2 节点设计

自攻螺钉是胶合木结构中一种施工便利的连接形式,应用十分普遍.本项目屋面胶合木构件截面宽度仅为170 mm,为了增大接触面积以布置更多自攻螺钉来传递剪力,上下木梁间交错布置了十字钢板.十字钢板与叠合木梁通过自攻螺钉连接,具体细部构造见图4.该连接方式避免了双向木梁共面时节点断开造成的构件刚度、强度削弱,在实际施工时也可以节省时间,提高施工效率.图4(a)中数字1、2、3分别代表胶合木梁、十字钢板和自攻螺钉;图4(b)中B1~B4为自上而下的4层叠合梁构件.



(a)叠合梁连接节点



(b)叠合梁节点爆炸图

图4 叠合梁节点示意图

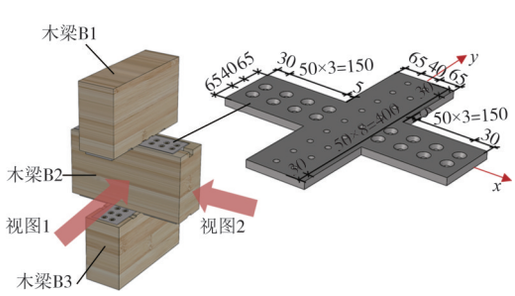
Fig.4 Schematic diagram of composite beam joints

我国《木结构设计标准》(GB 50005—2017)[16]及《木结构设计手册》[17]中缺少自攻螺钉抗剪性能的验算依据.《胶合木结构技术规范》(GB/T 50708—2012)[18]中仅有对自攻螺钉间距和边距的要求.针对自攻螺钉在木节点中的已有研究,多集中于自攻螺钉对木构件的增强作用[19-22].因此,有必要对本文节点开展试验研究,以明确节点的承载能力并验证节点的可靠性.

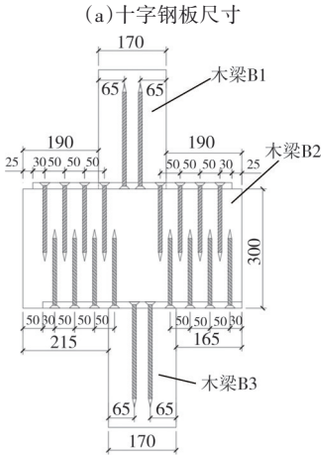
2 节点试验

2.1 试件设计及测点布置

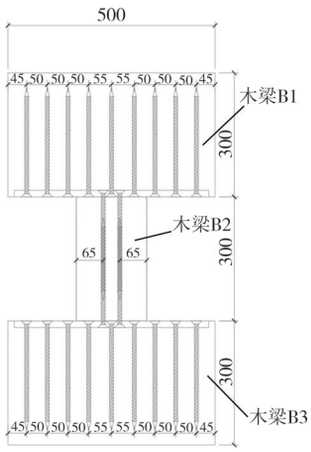
为了解该十字钢板与自攻螺钉组合节点的受力特点,对节点进行双剪推出试验.为便于试验,取3层叠合梁及相应连接十字钢板.试件所选用木材为欧洲进口云杉胶合木,强度等级对应我国《木结构设计标准》(GB 50005—2017)[16]中的TC_T32,即弹性模量标准值为7 900 MPa,抗弯强度标准值为32 MPa,顺纹抗压强度标准值为27 MPa,顺纹抗拉强度标准值为23 MPa.自攻螺钉型号为VGS9×260,即直径为9 mm、长度为260 mm的全螺纹自攻螺钉,螺钉屈服强度标准值为1 000 MPa,屈服弯矩标准值为27.2 N·m.试件形式见图5.其中,图5(a)标出了节点中木梁B1和B2连接的十字钢板的具体尺寸,钢板上自攻螺钉孔在螺钉钉入的外侧大、与木材贴合的内侧小,便于沉头;因此,钢板y轴方向为自攻螺钉从下往上钉入木梁B1的钉孔(共18个),钢板x轴方向为自攻螺钉自上而下钉入木梁B2的钉孔(共16个).木梁B2和B3间连接的钢板和自攻螺钉相同,布置基本对称,为避免双侧螺栓产生钉杆干涉,沿螺钉布置方向错开25 mm.图5(b)和(c)分别为试件在视图1和视图2方向的投影及尺寸.共制作6件相同试件,记为KJ-A、KJ-B、KJ-C、KJ-D、KJ-E、KJ-F.



(a)十字钢板尺寸



(b)试件侧视图1



(c)试件侧视图2

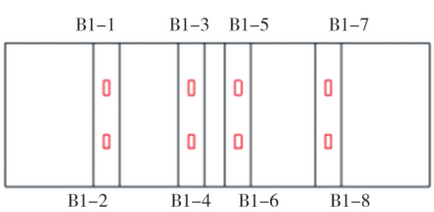
图5　试件尺寸图(单位:mm)

Fig.5　Dimension drawing of specimens(unit:mm)

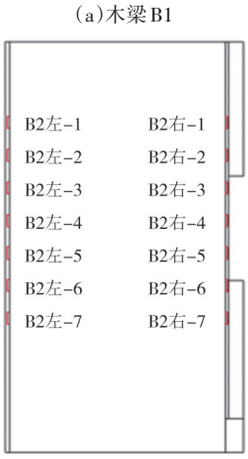
为研究节点在加载过程中木材应变的变化规律,在木材相关位置布置应变片,如图6所示.

2.2　试验装置及加载方案

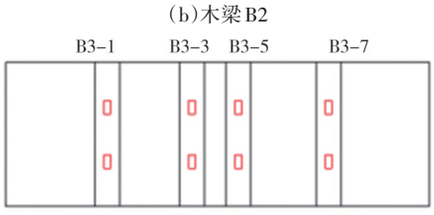
采用量程为300 kN的万能试验机进行加载.为方便加载,试件绕图5(a)所示的y轴旋转90°,加载布置如图7所示.为避免加载过程中试件发生侧向位移,在试件木梁B1和B3外侧设置侧向支撑,并利用对拉螺杆固定.



(a)木梁B1



(b)木梁B2



(c)木梁B3

图6　应变测点布置图

Fig.6　Layout of strain gauges

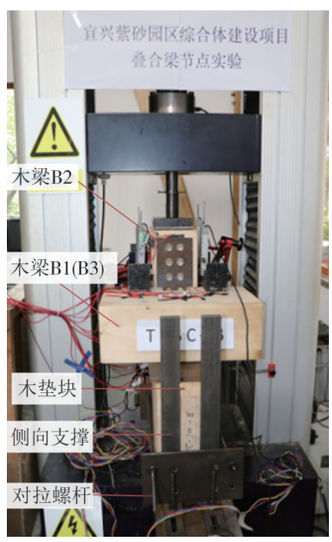


图7　试件加载布置图

Fig.7　Loading arrangement of specimens

试验按欧洲规范BS EN 26891:1991[23]加载制度进行加载,包括荷载控制加载和位移控制加载两部分.荷载控制可分为3个阶段:第1阶段,以0.2F_{est}/min的加载速率加载至0.4F_{est},并持续30 s;第2阶段,以相同的速率加载至0.5F_{est},持续30 s;而后在第3阶段以0.2F_{est}/min的速率加载至0.7F_{est}.随后,由荷载控制转变为位移控制加载,以0.5 mm/min加载速率加载至出现以下情况之一即可停止试验及数据采集:1)当荷载下降至峰值荷载的80%;2)相对滑移达到20 mm;3)试件出现严重破坏.F_{est}为试件极限承载力,第一个试件的极限承载力根据螺钉承载力预估,后续试验将第一个试件的极限承载力作为F_{est}.

2.3　试验结果分析

图8为叠合梁节点试件典型破坏形态.随着荷载逐渐增加,梁B2底部出现纵向裂缝并逐渐向上扩展,如图8(a)所示.当达到试件极限承载力时,两侧部分自攻螺钉出现屈服[图8(c)],带动两侧木梁逐渐发生转动[图8(b)],木材相互挤压,螺钉与木材之间出现较为明显的滑移,最终试件偏转而导致承载力下降.总体上,当试件失效时,自攻螺钉未发生剪切断裂破坏,而是以螺钉挤压木材纤维的延性破坏为主.

所有试件的荷载-位移曲线见图9,图中荷载为双剪切面承受的总荷载,位移为两侧位移的均值.由图9可知,6个试件的荷载-位移曲线总体上较接近,



(a) 木材顺纹开裂

(b) 试件偏转 (c) 螺钉屈服(单位：mm)

图 8 试件典型破坏形态

Fig.8 Typical failure modes of specimens

说明此次试验结果离散性不大,数据可靠. 试件的荷载-位移曲线呈现木材挤压滑移阶段、弹性和非线性上升阶段、屈服阶段. 加载初期,木材与底部垫块之间存在间隙,曲线滑移现象较为明显;随着荷载持续增加,间隙逐渐减小,螺钉逐渐受力,中部木梁 B2 与两侧木梁 B1、B3 挤压,荷载-位移关系依次呈现弹性和非线性特征直至达到峰值荷载;随着荷载持续增加,两侧木梁出现偏转,荷载出现下降,试验结束. 节点的平均极限抗剪承载力为 218.5 kN,初始刚度为 35.4 kN/mm.

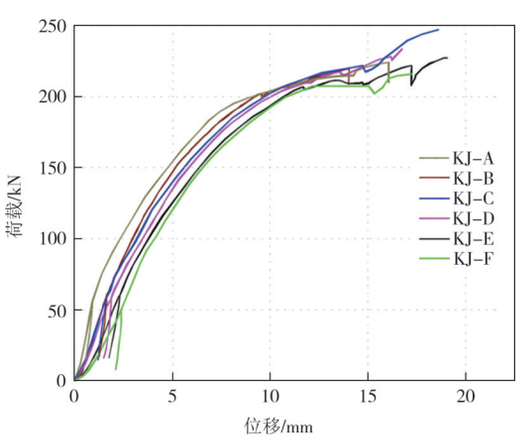
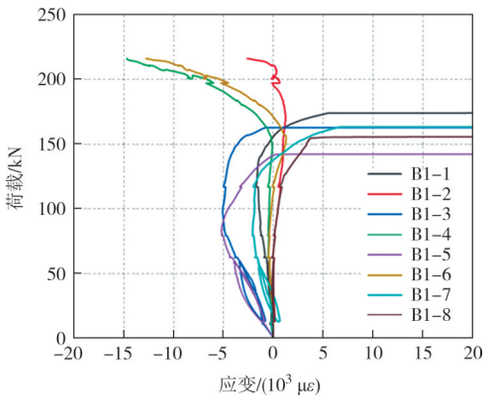


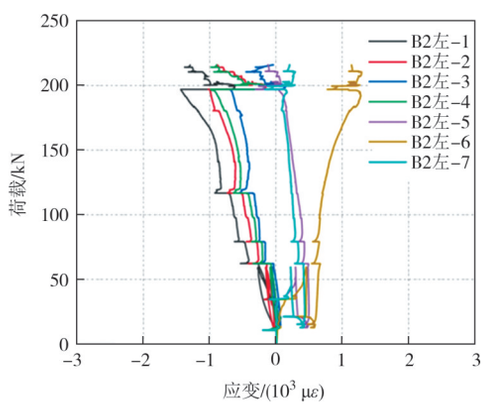
图 9 荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves

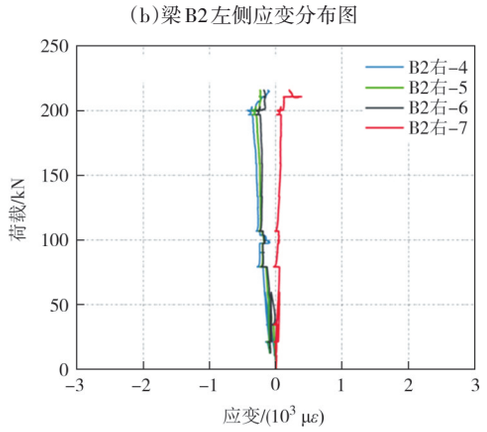
为全面分析节点的受力状态,提取胶合木梁的应变进行分析. 以 KJ-B 试件为例(应变片 B2 右-1、B2 右-2、B2 右-3 及 B3-4 损坏),图 10 为该试件各胶合木梁的应变分布图. 由图 10 可知,梁 B1、B3 处的胶合木均已出现局部屈服至破坏;十字钢板交错布置导致梁 B2 左侧变形明显,而梁右侧几乎无变形. 节点在加载过程中横梁上表面受拉、下表面受压规律较为明显.



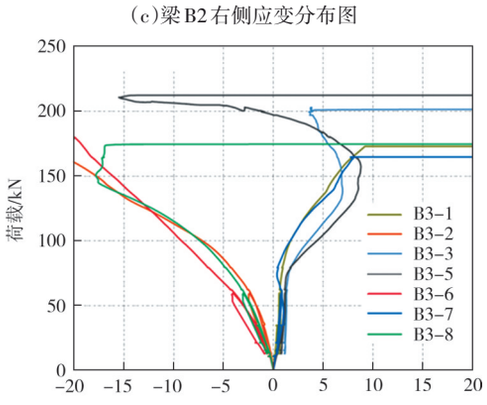
(a)梁 B1 应变分布图



(b)梁 B2 左侧应变分布图



(c)梁 B2 右侧应变分布图



(d)梁 B3 应变分布图

图 10 各胶合木梁应变分布图

Fig.10 Strain distribution diagrams of each glued wood beam

3　节点有限元模拟

为进一步探索该节点的力学性能,对可能发生的破坏及各部件的受力作系统性分析,采用 Abaqus 有限元软件对节点进行受力性能分析,并与试验结果对比.

3.1　有限元模型建立

考虑到计算效率和试件的对称性,采用 1/2 模型建模. 不考虑自攻螺钉的螺纹,采用有效直径[24]建模,并将自攻螺钉钉帽底部的锥形面等效为平面作简化处理. 其余参数均参考实际选取的参数.

有限元模拟中,假设木材为正交各向异性材料,通过对 9 个独立弹性参数的输入控制其弹性阶段的力学行为,而“potential”函数则用于对其塑性行为的描述[25-26],各个方向的初始屈服应力比 R11、R22、R33、R12、R13、R23 分别为 1、0.34、0.3、0.2、0.2、0.2. 具体输入参数如表 1. 十字搭接钢板采用 Q355 钢材,弹性模量为 206 000 MPa,屈服强度为 355 MPa. 自攻螺钉采用等效光柄直径进行建模[24],长度为 260 mm,抗拉屈服强度为 1 000 MPa.

表 1　云杉胶合木力学性能参数

Tab.1　Mechanical properties of spruce

类别	弹性模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比
顺纹	9 560	557	0.372
横纹径向	320	557	0.467
横纹切向	320	55.7	0.435

模型部件均采用 C3D8R 单元进行网格划分,考虑到局部接触部位受力复杂及模型计算的收敛性,对模型网格进行局部加密,网格划分如图 11 所示.

3.2　接触属性及边界条件

各部件之间接触方式均采用面-面接触,法向行为设置为硬接触,切向设置为“罚”函数,摩擦系数为 0.2,自攻螺钉与木材之间摩擦系数为 0.3,螺钉端头与钢板接触部位摩擦系数为 0.1,对称面设置对称约束. 忽略顶部加载钢垫板,将加载点进行耦合处理并进行位移加载,边界条件设置如图 12 所示(U2、U3 分别为 y 轴和 z 轴方向位移,UR1、UR3 分别为绕 x 轴和 z 轴位移).

3.3　有限元结果分析

通过对比拼接节点的试验与有限元结果发现,两者在主要破坏模式上具有较高一致性(图 13). 试

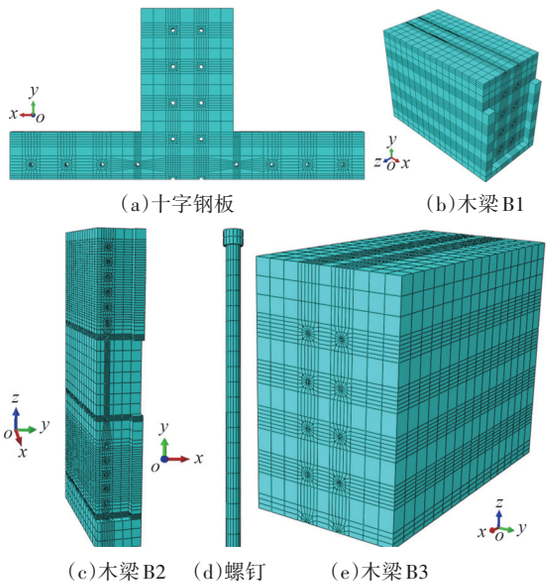


图 11　部件网格划分

Fig.11　Mesh of components

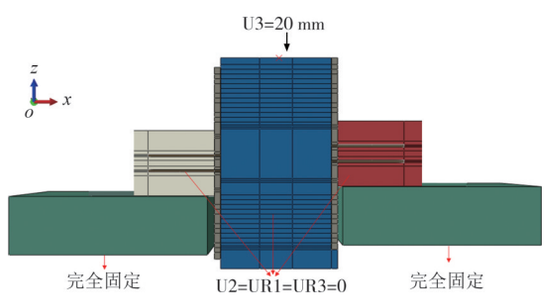
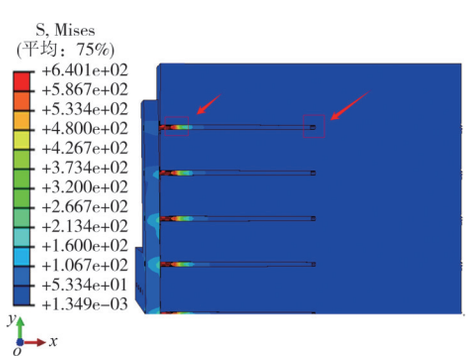


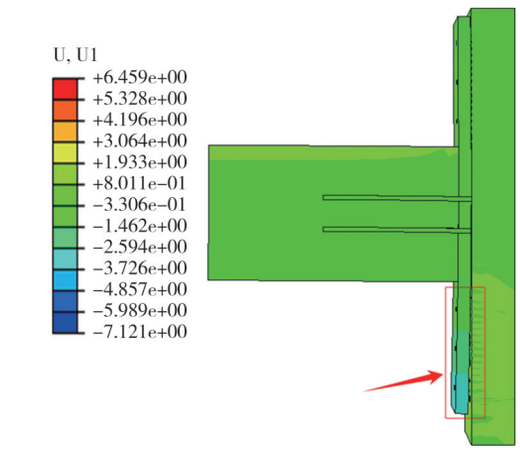
图 12　有限元模型加载边界条件

Fig.12　Boundary conditions for finite element model

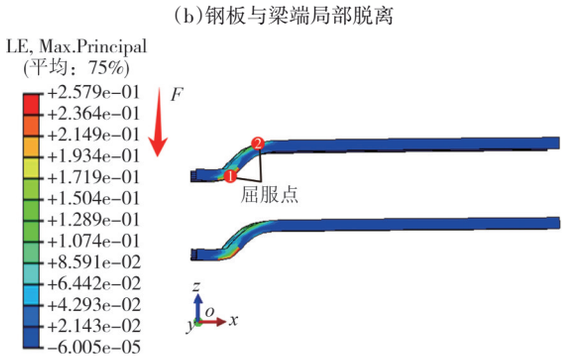
验中出现的木材顺纹开裂、试件偏转及螺钉屈服等现象,在有限元模拟中均有体现,如螺钉根部应力集中与屈服、钢板与梁端局部脱离等,表明有限元模型能够较好地捕捉拼接节点的关键力学行为. 有限元模拟中木材开裂程度相对较轻,这可能是由于模型简化了木材的天然缺陷,未充分考虑节疤、微裂纹的影响. 图 14 为试验荷载-位移曲线与有限元模拟曲线对比. 模拟初始刚度高于试验值,这是由于有限元模型忽略了木梁应变片开槽以及螺钉简化等因素.



(a)螺钉应力集中显著且伴随滑移



(b)钢板与梁端局部脱离



(c)螺钉屈服

图 13 有限元模拟结果

Fig.13 Finite element modeling results

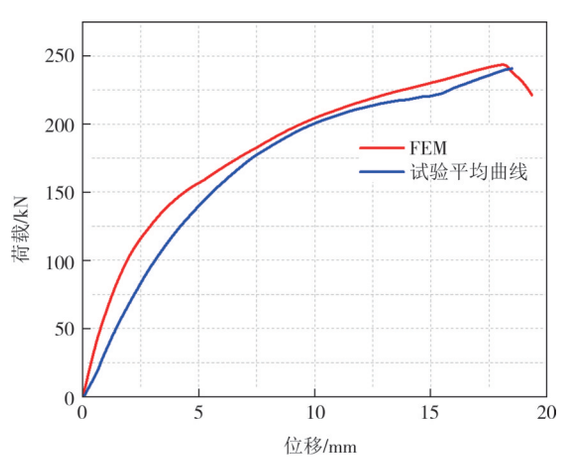


图 14 模拟与试验荷载-位移曲线对比

Fig.14 Comparison between simulated and tested load-displacement curves

总的来说,模拟所得的破坏形态与试验吻合良好,两者均为螺钉屈服,且构件偏转行为在模拟中也得到了验证.螺钉作为主要传力构件,受拉、压及剪切共同作用,其根部应力集中并率先屈服,但屈服后仍可通过残余截面承担部分荷载,并协调木材与钢板间的位移差异.钢板与梁端相互挤压产生接触应力,局部脱离后周边区域通过摩擦力和残余应力传递荷载.木材与钢板接触面的挤压效应导致局部塑性变形,会改变接触刚度和应力传递效率,进而影响节点整体刚度和承载力.

4 理论模型分析

Foschi[27]提出了如图 15 所示的木结构节点弹塑性行为计算公式(Foschi 模型),该模型的荷载-位移关系式如式(1)和式(2)所示.该模型被广泛用于各类木结构节点的力-位移关系行为预测.

$$P = (P_0 + K_1 u)(1 - e^{-K_0 u/P_0}) \tag{1}$$

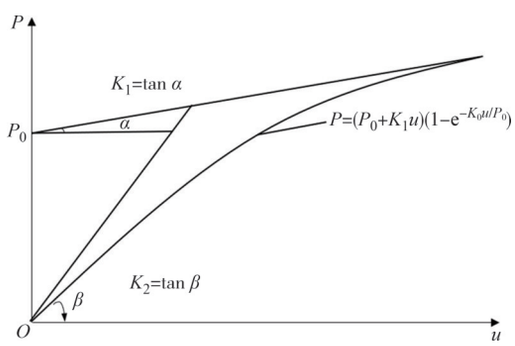


图 15 Foschi 模型的荷载-位移关系曲线

Fig.15 Load-displacement relationship curve of Foschi model

$$\lim_{\Delta \to 0} P'(u) = K_0 \tag{2}$$

式中:P为对节点施加的荷载,kN;u为相对位移,mm;P_0为屈服后渐进线在y轴上的截距,kN;K_1为屈服后的刚度,kN/mm;K_2为退化刚度,kN/mm;K_0为线弹性刚度,kN/mm.图 16 为 Foschi 模型拟合曲线与试验平均曲线对比.由图可知,Foschi 模型预测曲线与试验曲线高度吻合,表明该模型能够有效预测本文节点全过程力学行为特征.

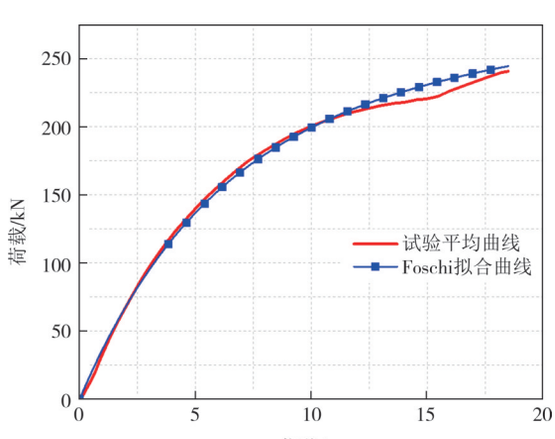


图 16 试验荷载-位移曲线和 Foschi 模型对比

Fig.16 Comparison of experimental load-displacement curves and Foschi model

5 结 论

本文通过试验、有限元模拟及理论分析对大跨度屋面结构中叠合梁拼接节点性能进行了研究,主要结论如下:

1)自攻螺钉和十字钢板的组合连接方式能将屋面上下层叠合梁可靠地连接成整体.试验与有限元结果表明,该组合连接方式可以有效提高材料利用率,提升整体结构性能.

2)十字钢板搭配自攻螺钉连接试件的破坏模式以螺钉屈服、螺钉嵌入胶合木挤压木材纤维为主,属于延性破坏.荷载-位移曲线无明显下降,存在明显屈服平台.节点的平均极限抗剪承载力为218.5 kN,初始刚度为35.4 kN/mm.

3)Foschi模型能够有效预测该十字节点的全过程受力特征,能为该拼接节点的设计及数值模拟提供理论指导.

4)在实际工程中,屋面节点同时承受剪力和轴向压力.十字钢板通过螺钉群传递剪力,叠合梁接触面的法向压力则由木材横纹承压与钢板接触摩擦共同承担.在设计中,建议优先采用对称布置的十字钢板以均衡剪压传力路径,并适当增加钢板接触面积以降低木梁横纹压应力,同时控制螺钉间距不小于5倍螺钉直径,以避免木材纤维挤压破坏的叠加效应.

5)本文聚焦该大跨度屋面结构中叠合梁拼接节点的提出和试验研究,并利用试验结果验证数值模型和Foschi模型的有效性,为该节点力学性能的预测提供有效工具,未来可进一步开展参数分析,并提出节点设计方法.

参考文献

[1] 王娟,曹晓庆,杨庆山,等.落叶松胶合木干湿交替加速老化试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(5):156-164.
WANG J,CAO X Q,YANG Q S,et al. Experimental study on accelerating aging of larch glued with dry-wet cycling[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2023,50(5):156-164.(in Chinese)

[2] 张晋,沈浩,高森,等. 体内预应力胶合木梁抗弯承载能力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(5):134-142.
ZHANG J,SHEN H,GAO S,et al. Study on flexural capacity of internal prestressed glulam beams [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(5):134-142.(in Chinese)

[3] 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):16-43.
LIU W Q,YANG H F. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures,2019,40(2):16-43.(in Chinese)

[4] 何承洋,何敏娟,王希珺,等.胶合木结构大直径钢管销式节点受力性能分析[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(2):387-394.
HE C Y,HE M J,WANG X J,et al. Mechanical performance analysis of large-diameter steel-tube dowel-type glulam joints [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2025,55(2):387-394.(in Chinese)

[5] 熊海贝,武喆,欧阳禄,等. 木-混凝土螺栓连接力学性能试验及承载力计算模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2025,52(1):34-48.
XIONG H B,WU Z,OUYANG L,et al. Experimental study on mechanical performance of timber-concrete bolted connections and bearing capacity calculation model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2025,52(1):34-48.(in Chinese)

[6] 冯远,龙卫国,欧加加,等. 大跨度胶合木结构设计探索[J].建筑结构,2021,51(17):43-49.
FENG Y,LONG W G,OU J J,et al. Exploration on design of large-span glulam structures [J]. Building Structure,2021,51(17):43-49.(in Chinese)

[7] 何敏娟,董翰林,李征. 木空间结构研究现状及关键问题[J].建筑结构,2016,46(12):103-109.
HE M J,DONG H L,LI Z. State-of-the-art and key research topics of timber spatial structures[J]. Building Structure,2016,46(12):103-109.(in Chinese)

[8] 贾水钟,李瑞雄,石硕. 胶合木大跨空间结构设计实践[J]. 建筑结构,2023,53(1):9-15.
JIA S Z,LI R X,SHI S. Design practice of glulam large-span space structure[J]. Building Structure,2023,53(1):9-15.(in Chinese)

[9] 欧加加,陈迪,龙卫国,等. K6型单层球面木网壳整体稳定性能研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(12):72-81.
OU J J,CHEN D,LONG W G,et al. Research on global stability of K6-type single-layer spherical timber reticulated shells [J]. Journal of Building Structures,2023,44(12):72-81.(in Chinese)

[10] 张晓萌,刘文珽,任庆英,等.大跨度钢-胶合木组合屋盖结构设计及静载受弯试验研究[J].建筑结构学报,2023,44(增刊1):157-164.
ZHANG X M,LIU W T,REN Q Y,et al. Structural design of long-span steel-glulam composite roof and experimental study on flexural properties[J]. 2023,44(Sup.1):157-164.(in Chinese)

[11] HE M J,HE C Y,WANG X J,et al. Mechanical properties of glulam components with half-lap joints for large-span gridshell structures[J]. Construction and Building Materials,2023,408:133627.

[12] LI Z,WANG Y J,HE C Y,et al. Experimental testing of spliced glulam joints for large-span timber structures[J]. Construction

and Building Materials,2024,415:135094.

[13] WANG Y, WANG T X, DEBERTOLIS M, et al. Glulam frame corner joints built of birch plywood and mechanical fasteners: an experimental, analytical, and numerical study[J]. Engineering Structures,2024,310:118112.

[14] 曹正罡,万宗帅,杨寒,等. 大断面胶合木张弦曲梁及拼接节点静载受弯试验研究[J]. 土木工程学报,2020,53(7):43-51.
CAO Z G, WAN Z S, YANG H, et al. Experimental study on bending behavior of large-section glulam string curved beam and splicing joint[J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(7):43-51.(in Chinese)

[15] GIRHAMMAR U A, JACQUIER N, KÄLLSNER B. Stiffness model for inclined screws in shear-tension mode in timber-to-timber joints[J]. Engineering Structures, 2017, 136: 580-595.

[16] 木结构设计标准: GB 50005—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2018.
Standard for design of timber structures: GB 50005—2017[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2018.(in Chinese)

[17] 《木结构设计手册》编写委员会. 木结构设计手册[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
The Editorial Committee of "Handbook of wood structure construction". Handbook of wood structure construction[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.(in Chinese)

[18] 胶合木结构技术规范:GB/T 50708—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Technical code of glued laminated timber structures: GB/T 50708—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.(in Chinese)

[19] 唐立秋, 徐伟, 杨会峰, 等. 自攻螺钉增强胶合木横纹承压性能试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(1):94-100.
TANG L Q,XU W,YANG H F,et al. Compressive strength tests perpendicular to the grain of glulam reinforced with self-tapping screws[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition),2021,43(1):94-100.(in Chinese)

[20] 倪鸣, 陆伟东, 路奎, 等. 胶合木自攻螺钉拉拔锚固性能试验研究[J]. 结构工程师,2015,31(2):175-179.
NI M, LU W D, LU K, et al. Experimental study on anchorage capacity of the self-tapping screws in glulam[J]. Structural Engineers, 2015, 31(2): 175-179.(in Chinese)

[21] 刘佳迪, 张安玲, 陈志华, 等. 钢木组合构件自攻螺钉连接抗剪性能试验及理论模型研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(7): 680-689.
LIU J D, ZHANG A L, CHEN Z H, et al. Experimental and theoretical model study on the shear behavior of the self-tapping screw connections of steel-timber composite members[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(7): 680-689.(in Chinese)

[22] CHEN Z H, LI W J, LIU H B, et al. Research on flexural performance of glulam spliced joints connected by self-tapping screws in different arrangements[J]. Engineering Structures, 2023,288:116146.

[23] Timber structures-Joints made with mechanical fasteners-General principles for the determination of strength and deformation characteristics (ISO 6891: 1983) (Austrian Standard): EN 26891: 1991[S]. Vienna, Austria: Austrian Standards Institute, 1991.

[24] 赵千一. 自攻螺钉-连接板组合连接受力性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
ZHAO Q Y. Study on mechanical properties of combined connection with self-tapping screw and connecting plate[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.(in Chinese)

[25] 潘毅, 袁双, 王慧琴,等. 古建筑木结构偷心造和计心造斗栱力学性能数值分析[J]. 土木建筑与环境工程,2017(5):9-15.
PAN Y, YUAN S, WANG H Q, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of Tou-Xin-Zao and Ji-Xin-Zao Tou-Kung in Chinese ancient timber structures[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2017(5): 9-15.(in Chinese)

[26] 韩松. 胶合木钢填板销钉连接节点受力性能分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.
HAN S. Study on mechanical properties of dowel connection in timber structures with slotted-in steel plate[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.(in Chinese)

[27] FOSCHI R O. Load-slip characteristics of nails[J]. Wood Science, 1974, 7(1): 69-76.