

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.041



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



内嵌式钢连接系统-榫卯节点的承载性能

郭佳立¹, 熊汪¹, 杨成¹, 宋谦益², 刘宜丰², 姜雪²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610041)

摘要:针对现代钢木组合梁柱节点的钢连接件外露、木材强度利用率不高和安全冗余不足的问题,提出一种由内嵌式钢连接系统与榫卯嵌固组合的新型钢木组合梁柱节点。通过足尺节点单调试验和 Abaqus 高精度有限元模拟研究不同钢连接系统数量和钢部件强度对承载性能和变形能力的影响。研究表明,提出的新型钢木节点中的钢连接系统和榫卯均发生明显的挤压变形,具备良好的协同作用;增加钢连接系统数量可最大提升 36.2% 的节点承载力和 33.8% 的延性系数,但节点的屈服位移降低 33.8%;数值分析表明,增加钢连接系统会抑制榫头的拔出转动,导致榫内贯穿螺栓与孔壁协调变形减小和应力集中加剧,降低节点的绝对变形能力;增加螺栓和 L 形角钢的强度会加剧木材局部屈服程度,节点整体刚度和承载能力提升最大仅 15.93%。

关键词:钢木组合节点;单调试验;数值分析;承载性能;内嵌式;参数化

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Load-bearing performance of embedded steel connection system-mortise-and-tenon composite joints

GUO Jiali¹, XIONG Wang¹, YANG Cheng¹, SONG Qianyi², LIU Yifeng², JIANG Xue²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: To address the issues of exposed steel connectors, the underutilization of timber strength, and insufficient safety redundancy in modern steel-timber composite beam-column joints, this study proposes a novel steel-timber composite beam-column joint that integrates an embedded steel connection system with mortise-and-tenon embedment. Full-scale monotonic tests and high-fidelity finite element models in ABAQUS were utilized to investigate the effects of the number of steel connection systems and the strengths of steel components on the load-bearing and deformation capacities of the joints. The results indicate that both the steel connection system and the mortise-and-tenon connection in the proposed novel steel-timber joint undergo significant bearing deformation, exhibiting excellent synergistic behavior. Increasing the number of steel connection systems enhances the load-bearing capacity of the joint by a maximum of 36.2% and the ductility ratio by 33.8%, whereas the yield displacement of the joint decreases by 33.8%. Numerical analysis reveals that

收稿日期: 2026-03-15

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1101005、2019YFD1101001、2021YFB2600501)

作者简介: 郭佳立(1999-), 男, 从事钢木组合结构研究, E-mail: 2259741561@qq.com。

宋谦益(通信作者), 男, 博士, 高级工程师, E-mail: song.qianyi@cscec.com。

Received: 2026-03-15

Foundation items: National Key Research and Development Program (Nos. 2019YFD1101005, 2019YFD1101001, 2021YFB2600501)

Author brief: GUO Jiali (1999-), main research interest: steel-timber composite structure, E-mail: 2259741561@qq.com.

SONG Qianyi (corresponding author), PhD, senior engineer, E-mail: song.qianyi@cscec.com.

an increased number of steel connection systems suppresses the pull-out rotation of the tenon, resulting in reduced coordinated deformation between the through-bolts and the bolt-hole walls, alongside intensified stress concentration, thereby reducing the absolute deformation capacity of the joint. Furthermore, increasing the strength of the bolts and steel angles intensifies local yielding in the timber, offering only a limited improvement in the overall stiffness and load-bearing capacity of the joint, with a maximum increase of only 15.93%.

Keywords: steel-timber composite joint; monotonic loading test; numerical analysis; load-bearing performance; embedded connection; parametric analysis

由于在低碳减排、林木经济调节、装配式建筑等方面的优势,现代木结构正在得到积极推广^[1-3]。中国有悠久的木构建筑历史,能否将传统建造技巧与现代工业技术充分合理地结合,弥补传统木结构的不足,对木结构未来发展至关重要。传统木结构的卯榫节点形式存在局限性,一方面,受限于木材各向异性及较低的弹性模量,节点强度和刚度偏低,长期荷载下易发生蠕变和磨损,易导致拔榫或脆性劈裂等病害,进而丧失有效刚度、连接能力,成为木结构体系承载的薄弱点^[4]。

带钢连接件的钢木组合梁柱节点作为现代木结构承载体系中常采用的形式,利用钢材的各向同性特征和稳定的屈服后硬化行为,弥补了木材横纹强度和延性的显著不足^[5-6],一定程度上克服了传统木结构节点缺点,促进了两种材料的协同工作。但由于构造和应用情境的多样性,以及钢部件力学性能的高温敏感性,钢木组合节点也需不断完善。

为了同时保证节点的强度和耗能能力,需要在钢制连接件数量和节点延性上达成平衡。以螺栓为例,一方面,Quenneville等^[7]发现,当采用数量较多的螺栓组,且荷载平行于纤维时,容易诱发排剪、块剪等脆性破坏,提出了抗剪的有效厚度概念,CSA O86和Eurocode 5也对木结构螺栓间距和端距作了更严格的调整^[8-9],在其他相关研究中,这种类似的破坏机理也反推动了钢制连接件在设计中的运用^[10-12]。另一方面,采用数量偏少或长径比较大的螺栓,往往能表现出一定的能量耗散能力,但也容易诱发木材局部挤压破坏^[13-14],这种不可恢复的挤压变形是导致钢木组合节点耗能能力显著降低的重要原因,且该现象在利用木材横纹面承压的研究中更为明显^[15]。为了避免局部过度挤压带来的不利影响,Iovane等^[16]为连接钢构件设置了集中耗能段,以避免胶合木构件在局部挤压中受到显著的变形甚至破坏,填板、内嵌钢板、钢连接件等措施也逐渐被运用在钢木组合节点中^[17-19]。

从防火性能上看,虽然防火涂料可以整体提升木框架的防火能力,但相比梁柱跨中,梁柱节点仍然最为薄弱,是高温下率先失效的部分^[4]。提升钢

连接件的木材覆盖厚度,甚至将连接件预埋入木构件内,成为提升钢-木节点耐火等级的方法之一,且已被证明有效^[20-22]。具体连接部件方面,采用螺栓-内嵌钢板、螺栓-钢连接件带加劲肋、螺栓-带翼缘钢填板、T型钢连接件等作为钢连接件的木结构试验和模拟分析都表明,混合使用螺栓和连接件均比采用单一的螺栓或钢板等性能优越^[23-24]。既有研究在钢-木组合连接的延性和防火方面已经进行了探索,但兼顾二者的构造设计,以及合理的冗余度和外观仍然是未来需要解决的问题^[24]。

在与金属部件接触中尽可能利用顺纹面承压以减少局部受压破坏和不可恢复变形的累积,同时提升对钢连接件的防火和防腐保护措施以避免钢材强度在高温下的快速降低,成为整个木结构体系的发展方向。此外,提升关键部件的可更换性以增强装配式建筑的实用性,成为当下的发展趋势。笔者提出一种将榫卯嵌固与钢连接系统两种承载体系融为一体的新型内嵌式钢连接系统-榫卯节点,该节点利用贯穿螺栓建立了木材顺纹承压的抗力机制,且木材完全包覆钢连接系统的特点使节点具备良好热障保护和防腐蚀性能优势。通过多组足尺节点试验分析该节点在不同的钢连接系统下的承载性能的非线性演化规律,并建立精细化的非线性数值模型,深入探究钢连接系统影响下的节点承载机理和性能演变规律。

1 试验概况

1.1 试件制作

1.1.1 设计理念

如图1所示,新型内嵌式钢连接系统-榫卯节点主要由预制榫头、卯口和槽口的木梁木柱,以及构成钢连接系统的L形角钢、高强螺栓组成。

在构造形式上具备“隐蔽式”设计:L形角钢被置入木梁端部上下侧对称开凿的安装槽内,其水平肢与竖向肢分别通过横竖向的贯穿螺栓建立与木柱及木梁紧密连接,木柱背侧的螺栓锚固端亦设置了凹槽。结构中金属与木材接触部位均配垫片消除局部应力,以促进应力均匀分布,避免局部压溃。

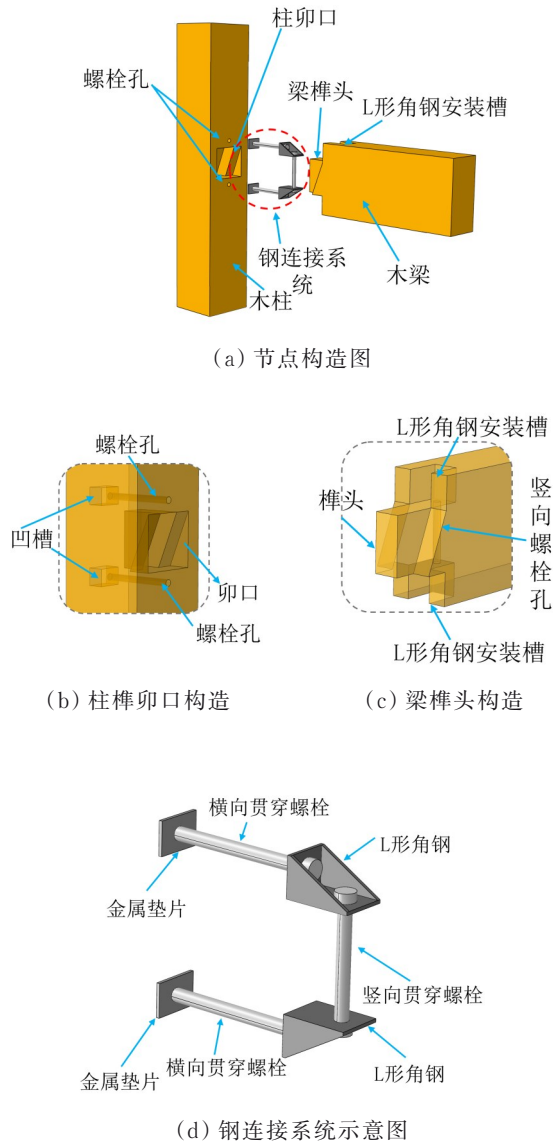


图 1 节点设计

Fig.1 Joint design

最后, L形角钢安装槽与锚固凹槽剩余的空隙可采用木块或与基材同质的防火填料进行过盈封堵与密封。这种构造既具备通过螺栓规格实现刚度可调的功能, 又通过建立以木材为介质的热障和表面覆盖建立延缓环境腐蚀和高温退化的潜在优势。同时, 隐藏钢部件有利于保持外观, 契合仿古设计需求。

在力学形式上, 该节点同时采用榫卯嵌固与钢连接系统, 共同构建了如图 2(a)所示的双重受力体系。一方面, 沿用传统构造, 将梁端榫头插入柱身卯口, 形成半刚性框架。另一方面, 贯穿榫头的竖向螺栓与 L形角钢相连, L形角钢再通过横向螺栓与柱相连, 钢部件形成一个门型受力体系, 可以强化一系列受力机制。

1) 抗弯机制: 节点所受外部弯矩由水平螺栓的拉压杆作用的力偶矩, 以及榫卯与榫口上下面挤压

形成的抵抗矩承担(图 2(b))。

2) 抗剪机制: 梁端剪力主要通过梁端榫头传递至柱卯口中, 另一部分通过 L形角钢由横向螺栓的销栓作用传递到木柱栓孔(图 2(c))。

3) 抗压机制: 梁和柱轴向力, 可以利用竖向螺栓或水平螺栓的螺杆壁对横截面施加正应力, 形成

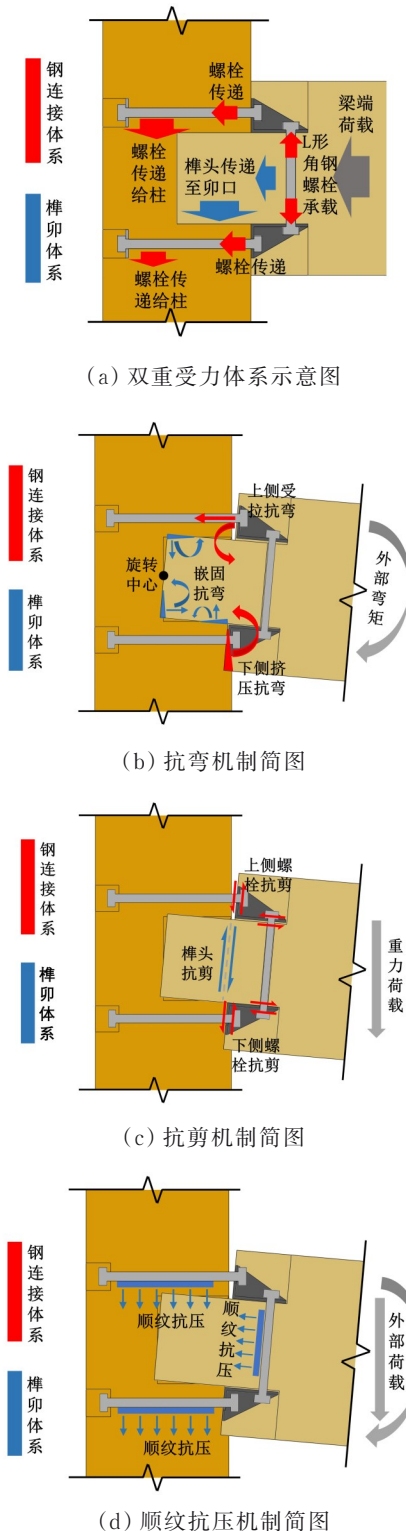


图 2 节点“双重受力体系”简图

Fig.2 Schematic diagram of the dual load-resisting mechanism of the joint

沿梁和柱轴向的顺纹受压机制。

1.1.2 节点设计

为研究钢连接件用量对节点力学性能的影响,根据钢连接系统数量差异设计A、B两种节点,具体构造区别如图3所示。其中,L形角钢均由5 mm厚的Q235钢板焊接而成;螺栓的强度等级均为4.8,公称直径均为16 mm。采用相同的梁和柱,尺寸分别为:梁170 mm×340 mm×1 500 mm,柱260 mm×260 mm×2 000 mm。

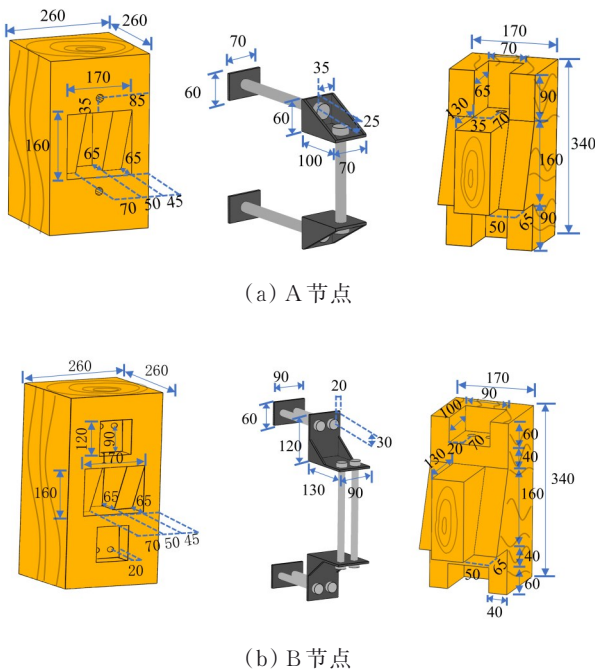


图3 A、B节点核心区的细节及尺寸

Fig.3 Details and dimensions of the core areas of joint A and B

1.2 试验材料

1.2.1 木材

木材采用欧洲云杉,力学性能满足《木结构设计标准》(GB 50005—2017)^[25]规定的强度等级TC13B。经取样测试,密度为446 kg/m³、含水率为10%,具体参数见表1^[26]。

表1 木材力学性能测试结果

Table 1 Mechanical properties of wood

树种	E_L / MPa	E_R / MPa	E_T / MPa	f_L / MPa	f_R / MPa	f_T / MPa	f_m / MPa
云杉	12 925	651	767	42.75	2.39	3.32	67.79

注: E 为抗压弹性模量; f 为抗压强度; f_m 为抗弯强度;下标L、R、T分别表示顺纹、径向、弦向;表中强度值均为强度测试结果平均值。

1.2.2 L形角钢和螺栓

L形角钢和垫片选购自攀钢集团西昌钢钒公司,材质为Q235。螺栓选购自浙江元立集团公司,等级为4.8级。取样实测力学性能见表2。

表2 L形角钢、垫片和螺栓的力学性能

Table 2 Mechanical properties of l-shaped angle steels, washers and bolts

名称	钢牌号或等 级	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	伸长 率/%
L形角钢、垫片	Q235B	309	431	36.5
螺栓	4.8级	364	480	

1.3 试验装置与加载制度

对A和B节点均采用梁端位移加载方法进行试验^[27],加载装置如图4所示。柱上下两端采用抱箍固定在反力架上,提供横向约束。依据典型工况计算,采用1#千斤顶从下端对柱施加25 kN的轴力,柱上端与反力架梁之间采用垫块抵紧,以消除柱与钢梁之间的间隙。

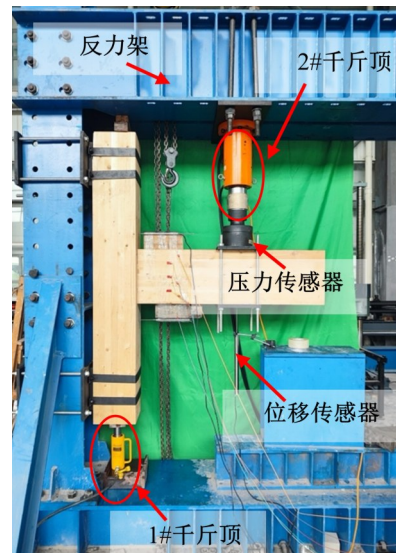


图4 节点试验装置及测点布置

Fig.4 Joint test system and measurement point arrangement

对梁顶面加载集中力的2#千斤顶带有传感器,梁底面安装位移传感器LVDT-1。参考《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[27],按照步长2 mm对节点进行分级加载,每级荷载加载完后,保持该级位移约1 min,然后继续下一级位移加载,直至试件完全破坏或承载力降低至峰值荷载的85%时。

2 试验结果

2.1 试验现象

两组节点在单调加载下的力学响应均呈现出显著的阶段性演化特征,依据荷载-位移曲线特征及损伤发展规律,其受力过程可划分为弹性变形、塑性挤压与屈服破坏3个阶段。

图5展示了节点A的典型破坏演化过程。

1)在加载初期,构件间孔隙逐渐闭合,各部件

处于弹性工作状态;随位移加载至 10 mm 左右,节点进入塑性挤压阶段,梁端上缘与柱面开始分离,梁底与柱接触区域出现局部嵌压变形(图 5(a))。

2)当位移增至 50 mm 左右时,由于连接件拉力集聚,节点上部螺栓出现螺纹滑脱现象(图 5(b)),且伴随 L 形角钢发生显著塑性变形。

3)随后节点进入屈服破坏阶段,加载至约 80 mm 时试件内部频发木材纤维断裂声,观测发现柱身受压侧木材已发生严重的溃缩变形(图 5(c)),且 L 形角钢塑性变形进一步加剧;当位移达到 92 mm 时,此时节点承载力达到峰值荷载,承载力开始下降,直至承载力降低至峰值承载力的 85% 时,认为试件达到极限破坏状态,停止试验。

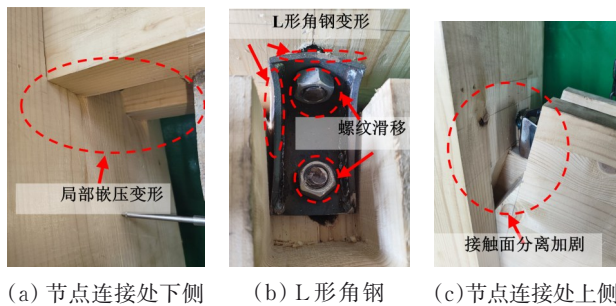


图 5 节点 A 变形情况

Fig.5 Deformation of Joint A

相比之下,节点 B 虽然经历了相似的演化逻辑,但受钢连接系统增强约束的影响,其破坏进程显著缩短,呈现出明显的脆性特征:

1)加载初期处于弹性状态,当位移加载至 8 mm,对应木梁底部的柱接触面产生塑性受压变形,随后该受压区出现局部嵌压(图 6(a)),梁端顶部与柱接触面之间出现界面分离。

2)位移增至 38 mm 左右时,钢连接系统的螺栓发生螺纹滑脱,L 形角钢屈服(图 6(b))。继续加载进入系统破坏阶段,至 66 mm 时榫头滑脱现象加剧,梁柱初始接触界面显著分离(图 6(c))。

3)当位移达 82 mm 时,荷载达到峰值,随后缓慢降低,直至荷载降低至峰值承载力的 85% 时停止

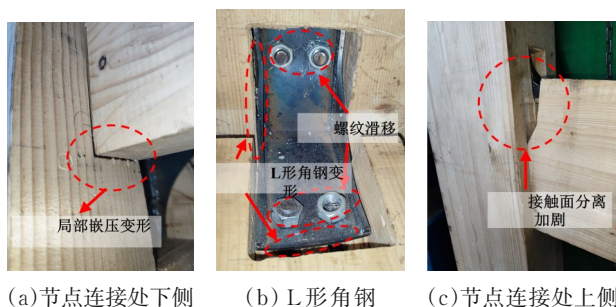


图 6 节点 B 变形情况

Fig.6 Deformation of joint B

试验。图 9 对比了两种节点的加载曲线,B 节点由于拥有更多的螺栓数量,承载力更高,但对应荷载峰值的位移比 A 节点更小。

2.2 构件变形情况

试验结束分别对 A、B 节点中的钢连接系统和榫卯情况进行观察对比。在钢连接系统方面(图 7(a)、图 8(a)),A、B 节点中的梁端螺栓、内嵌 L 形角钢及垫片均呈现出显著的塑性变形,受转动引起的应力梯度影响,位于受拉区(上部)的金属构件变形程度明显高于受压区(下部),说明钢连接系统在节点弯剪联合作用下产生塑性变形,起到了承载与耗能作用。在木材损伤方面,A 节点表现为典型的混合破坏模式:梁端榫头顶部出现轻微的横纹裂缝且榫顶前边缘侧发生挤压变形(图 7(b)),同时梁榫上的栓孔壁也发生了显著的顺纹承压破坏(图 7(d)),柱卯口上、下螺栓孔附近分别出现清晰的栓孔剪切和局部嵌压现象(图 7(c))。

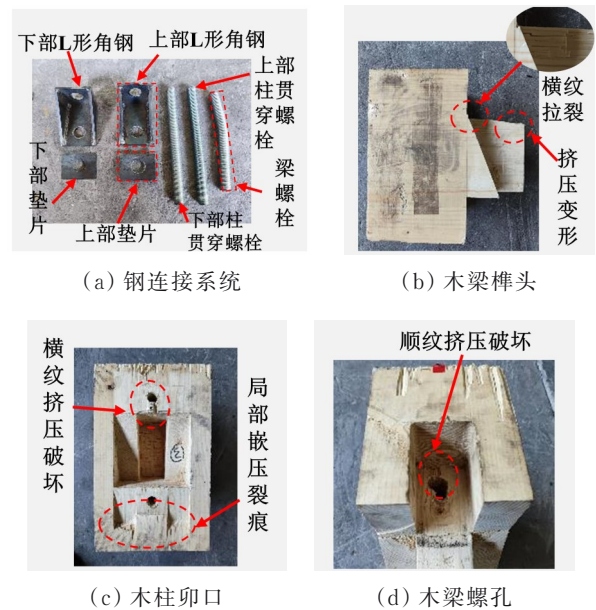


图 7 节点 A 变形

Fig.7 Deformation of joint A

破坏现象验证了对传力体系的设计,即充分利用螺栓和 L 形角钢之间的连接,实现梁柱间内力传递,弥补了纯木榫卯构造在刚度和强度上的短板。随着荷载增加,L 形角钢和与相应接触部位的木材变形都显著增加,协同承载的榫卯构造也相应产生了塑性变形。

虽然拥有更多螺栓,但 B 节点宏观破坏形态与节点 A 相似,同样发生了榫顶横纹拉裂及榫头顶部前边缘的挤压变形。尽管节点 B 榫头顶部的边缘侧挤压变形程度较 A 有所缓解,但榫顶横纹拉裂现象却比 A 更为剧烈(图 8(b)),产生的贯通裂缝导致

节点完全丧失承载能力。此外,B节点柱与梁底对应的接触面呈现显著的局部嵌压溃缩,柱卯口上部的螺孔处有显著的横纹受压破坏(图8(c)),但梁螺栓孔壁的顺纹挤压变形程度不如A节点显著(图8(d))。这些差异是因为B节点拥有更多的螺栓数量,连接系统的刚度和强度都更高,对梁的转动约束和螺栓孔壁的挤压更强。

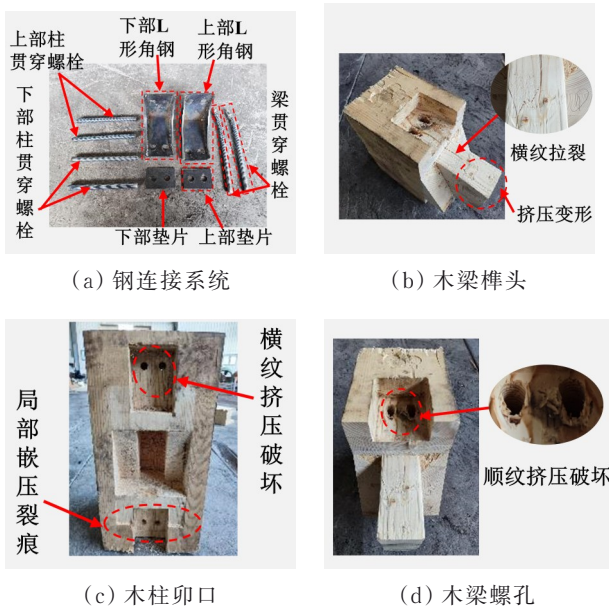


图8 节点B变形

Fig.8 Deformation of joint B

2.3 转角-弯矩曲线

基于试验数据绘制弯矩-转角曲线,如图9所示。观察可知,该曲线呈现出显著的3阶段演化特征。

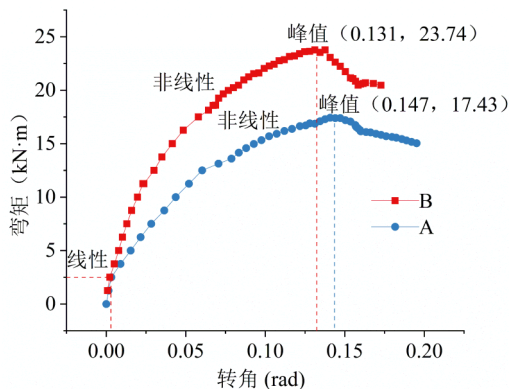


图9 A、B试件极限承载力试验弯矩-转角曲线

Fig.9 Moment-rotation curves for the ultimate load-bearing capacity tests of joint A and B

1)线弹性工作阶段。加载初期,各部件间接触间隙闭合,“木梁-钢连接系统-木柱”和“榫头-卯口”双重传力路径一起工作。荷载响应由L形角钢的弹性变形及木材顺纹抗压刚度主导,弯矩随转角线性

增长,转角在0.003 2 rad前无显著衰减。

2)弹塑性强化阶段。随荷载增加,榫卯挤压区的木材横纹局部开裂,螺栓孔壁处木材有显著的塑性变形,伴随竖向螺栓、L形角钢及垫片的变形累积,曲线切线刚度随节点转角增加而退化,呈非线性特征。当A节点转角达0.147 rad、B节点达0.131 rad时,节点荷载达到峰值。

3)软化和破坏阶段。峰值荷载后,随着转角增大,木梁上缘的螺栓孔壁、L形角钢均出现更为显著的塑性变形,木梁下缘受压区出现较大面积溃缩。曲线进入下降段,切线刚度转负,直至试件发生破坏。

2.4 承载力及延性

从试验结果的数据看(表3),节点B表现出显著的承载力优势,其极限荷载达到37.99 kN,相较于试件节点A(27.89 kN)提升了约36.2%。这是由于更多的螺栓数量,扩大了钢连接系统和木材有效接触面,从而显著提升了节点的抗弯刚度与极限承载能力。

表3 A、B节点的承载及延性

Table 3 Load-bearing and Ductility for Joint A and B

试件 编号	极限荷载/ kN	屈服荷载/ kN	极限位 移/mm	屈服位 移/mm	延性 系数
A	27.89	23.45	122	55.6	2.19
B	37.99	31.75	108	36.8	2.93

基于等能量法^[28]计算屈服位移与极限位移。结果表明:节点A的屈服位移、极限位移数分别高达55.6 mm、122 mm,延性系数为2.19;节点B的屈服位移与极限位移分别为36.8 mm与108 mm,延性系数则为2.93。虽节点B的延性系数高于节点A,但绝对变形能力却低于节点A,且节点B在达到峰值荷载前的抗弯刚度始终高于节点A。节点B展示出更好的延性系数是依靠更早出现的屈服点得到的,并非更大的极限位移。

试验结果体现了“强度-变形”竞争机制^[29-31]。双螺栓配置导致荷载高度集中于螺孔周边的木材。使得局部木材更快发生压溃失效,而榫孔中螺栓杆的塑性变形不明显。类似于钢筋混凝土梁的“超筋破坏”,一定程度抑制了节点整体耗能能力。

3 数值模拟

为弥补宏观试验难以实时观测到内部应力分布及接触状态的局限,基于Abaqus通用分析平台建立与试验条件接近的三维实体有限元模型,进行数值分析。

3.1 材料本构模型

木材具有显著顺纹、径纹及弦纹 3 个主轴方向的各向异性特征。在弹性阶段,木材的单轴应力-应变关系如图 10 所示:受拉行为定义为线弹性模型,受压行为则采用双折线弹塑性模型。其中, ϵ_{cu} 和 ϵ_{c0} 分别为木材受压的极限应变和屈服应变, ϵ_{tu} 为木材受拉极限应变, E_{cs} 、 E_{ts} 分别为木材受压、受拉弹性模量, f_c 和 f_t 分别为木材的抗压和抗拉强度。受压塑性阶段则引入 Hill 屈服准则^[17, 32-33],通过定义不同主轴方向的屈服应力比,构建满足连续性方程与封闭屈服面准则的塑性势函数,以表征木材在达到受压极限应变 ϵ_{cu} 之前的各向异性塑性演化及软化行为。具体数据与表 1 一致。

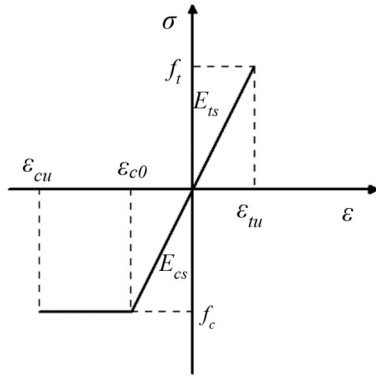


图 10 木材应力-应变关系

Fig.10 Stress-strain relationship of timber

对于螺栓、L 形角钢及垫片等钢材构件,其力学性能均采用简化的理想弹塑性模型进行描述。在该模型下,钢材在达到屈服强度之前表现为线弹性;一旦触及屈服面,材料即进入完全塑性流动阶段,不考虑材料屈服后的应变强化效应,以此偏于安全地评估钢连接系统的承载与变形能力。具体参数与表 2 一致。

3.2 实体建模

木梁、木柱及螺栓、L 形角钢、垫片等均采用三维实体单元进行建模,并选用八节点减缩积分六面体单元(C3D8R)做网格属性,避免或减少变形与接触分析中出现网格的剪切闭锁与沙漏效应^[34]。

针对螺栓-栓孔、榫卯界面及钢-木接触面模拟,采用“面-面接触(Surface-to-Surface Contact)”予以定义。其中法向设定为“硬接触(Hard Contact)”以防止网格穿透;切向通过定义“罚(Penalty)”摩擦模型表征相对滑移^[34],钢-木界面系数为 0.3,木-木界面系数为 0.4^[35-37]。

为兼顾计算精度与效率,引入辅助切割平面将榫卯及螺栓孔周边区域设定为规则的独立区域。在布种策略上,构建“核密场疏”的梯度网格体系

(图 11),参考杨成等^[35]的研究,加密核心区网格尺寸 2 mm,而在远离核心区的非关键区域则参考张悦洋^[36]、周鸿屹^[37]的研究,采用相对稀疏的 10 mm 网格。

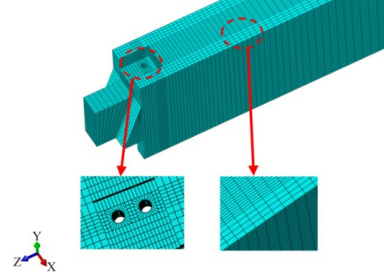


图 11 有限元网格划分

Fig.11 Finite element meshing

模型边界条件符合试验工况(图 12),为消除加载点的局部应力集中,真实模拟千斤顶加载,在梁端顶部设置刚体垫板,利用运动耦合约束功能将其约束至参考点 RP-1,通过控制 RP-1 的竖向位移实现对节点的位移加载。

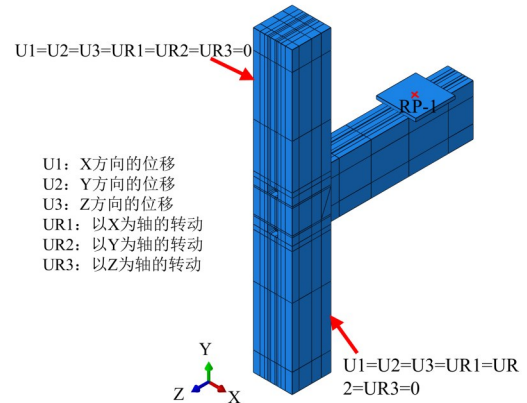


图 12 节点边界条件

Fig.12 Boundary condition

3.3 模型验证

对比有限元模型 Mises 应力与试验变形(见图 13)。两节点的木梁与木柱处应力峰值均显著集中于螺栓孔壁及榫卯接触区域,呈现出典型的局部高应力特征,且有限元模型精确复现了试验中观察到的榫卯挤压及钢连接系统屈服等宏观变形特征。对比数值模拟和试验结果(见图 14)。在曲线上升阶段,模拟和试验数据较为接近,且极限承载力相对误差控制在 10% 内,表明数值模拟能够体现节点试验的主要特征。

经分析,造成误差的主要原因是:一方面,数值模拟尚无法充分考虑木材节疤、纹理偏差等随机性非均匀的材料特征;另一方面,钢材与木材强度差距显著,且加工和装配误差等因素均会对钢木之间

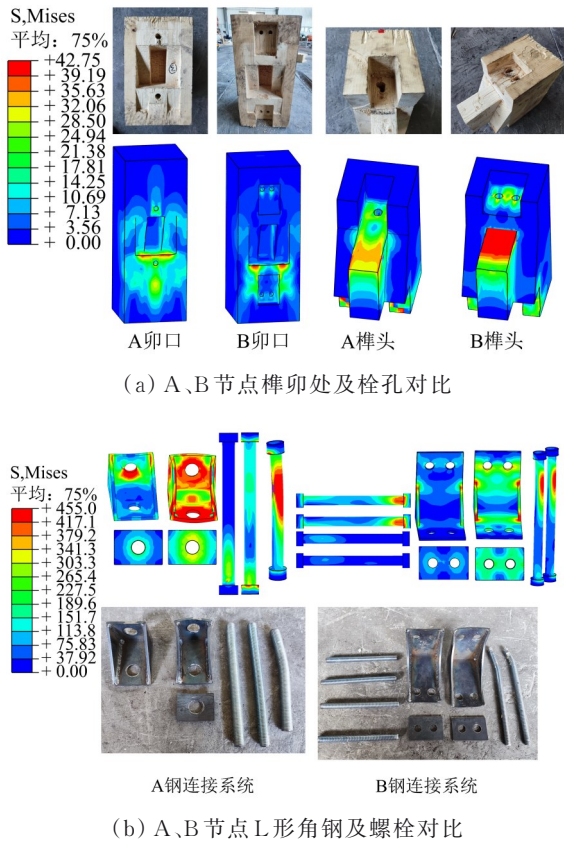


图 13 有限元与试验的变形对比

Fig.13 Comparison of deformation between simulation and experiment

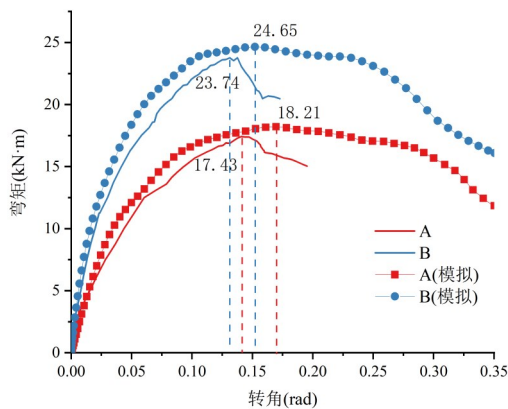


图 14 试验与模拟转角-弯矩曲线对比图

Fig.14 Comparison between experimental and simulated rotation-moment curves

相互作用的力学行为计算结果产生一定的偏差^[38-42]。

3.4 失效机理分析

节点 A 仅配置单组钢连接系统,较弱的约束允许榫头产生较大的拔出,导致竖向螺栓弯曲变形和孔壁受压侧顺纹挤压变形较为显著(见图 13(a)),进而增加了节点的极限变形能力。

相比之下,节点 B 的双重钢连接系统形成了更强的约束,抑制了榫头的拔出与转动,榫头的拔出

幅度较小,导致榫头上表面与卯口的顶紧部位更加靠卯口外侧,因此应力集中区更靠近榫根(见图 13(a)),且双螺栓提供更大的约束反力,导致榫头上压应力更大,产生了比节点 A 木材更为剧烈的横纹劈裂效应,呈现出更为显著的脆性破坏特征。

在承载能力极限到达前,由于竖向双螺栓比单螺栓能提供更大的节点变形约束力,因此 B 节点榫头处的两根竖向螺栓与榫栓孔的协调变形更小,竖向螺栓和榫孔处的应力集中比节点 A 更为明显(见图 13(b)),故节点 B 的屈服变形也更小。

3.5 参数化分析

基于数值模拟能较好地反映试验现象,故进一步对钢连接系统进行参数分析,以探究其对节点整体性能的影响规律。另外,欧洲云杉因为较好的可加工和力学性能,以及经济合理性,已经被广泛应用^[43-44],本文不讨论其他木材。

3.5.1 工况设置

钢连接件系统的不同部件对节点变形的贡献不同,故按照常见规格选取螺栓与角钢的强度作为变量组合,形成两类节点的 5 组工况、10 个模型(见表 4)进行结构数值模拟。

表 4 A、B 节点的工况表

Table 4 Design conditions of joint A and B

工况编号	螺栓强度等级	L 形角钢	工况描述
A/B-0	4.8 级	Q235	基准工况
A/B-1	5.8 级	Q235	中强螺栓
A/B-2	8.8 级	Q235	高强螺栓
A/B-3	4.8 级	Q345	高强角钢
A/B-4	8.8 级	Q345	共同增强

3.5.2 A 节点参数化分析

如图 15 所示。所有增强工况节点的曲线均明显高于基准工况,即 4.8 级螺栓/Q235 角钢。表明提升钢连接系统的材料强度等级能有效提高节点的极限承载力,且提升 L 形角钢强度对整体强度效率更显著(见表 5)。

1) L 形角钢从 Q235 提升至 Q345 有效延迟了节点塑性铰的形成,增强了节点刚度,钢连接系统对榫卯相对转动的约束性能提高,榫头压应力降低。

2) 螺栓强度从 4.8 级提升至 5.8 级,同样增强了钢连接系统的整体刚度,且螺栓仍保持一定的变形协调能力,榫头处的挤压压力较基准组工况有所降低。

3) 螺栓 8.8 级和 Q235 强度 L 形角钢的搭配不合理,螺栓将过大的内力传递给 L 形角钢,导致 L 形角钢发生较大的塑性变形,作为结构体系承载能力的“短板”率先失效,导致水平螺栓与柱之间的传力

受阻,对榫卯构造的约束不足导致变形过大,榫头表面压应力显著变大和集中。

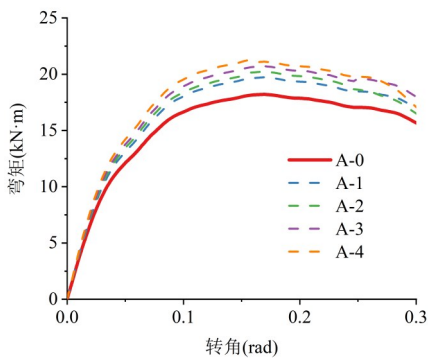


图 15 节点 A 不同工况转角-弯矩图

Fig.15 Rotation-moment curves of joint a under different working conditions

表 5 节点 A 不同工况下的极限承载力结果

Table 5 Ultimate load capacity of Joint A under various load cases

工况编号	螺栓/连接件	极限承载力/(kN·m)	提升效果/%
A-0	4. 8/Q235	18. 21	
A-1	5. 8/Q235	19. 72	8. 29
A-2	8. 8/Q235	20. 22	11. 04
A-3	4. 8/Q345	20. 70	13. 67
A-4	8. 8/Q345	21. 11	15. 93

可见,提高 L 形角钢强度虽然延缓了金属屈服,但破坏模式向“木材局部顺纹承压破坏”转移,加速了木材的非线性压溃。

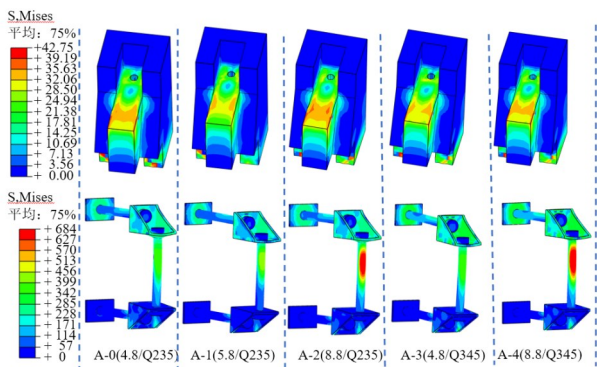


图 16 节点 A 应力关键部件应力云图

Fig.16 Stress Contour Plot of Critical Component at Joint A

3. 5. 3 B 节点参数化分析

对 B 节点的参数化分析曲线及承载力数据分别见图 17 和表 6。总体上看,B 节点强化钢连接系统产生的变化规律和 A 节点接近,增加 L 形角钢材料强度比增加螺栓强度以提升结构强度的效率更为显著。但 B 节点采取这些措施时的结构强度的增加幅度又不及 A 节点。

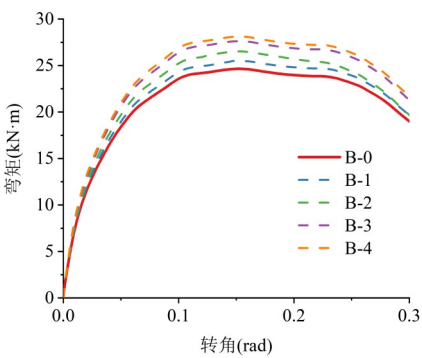


图 17 节点 B 不同工况转角-弯矩曲线图

Fig.17 Rotation-moment curves of joint B under different working conditions

表 6 节点 B 不同工况下的极限承载力结果

Table 6 Ultimate load capacity of joint B under various load cases

工况编号	螺栓/连接件	极限承载力/(kN·m)	提升效果/%
B-0	4. 8/Q235	24. 65	
B-1	5. 8/Q235	25. 51	3. 49
B-2	8. 8/Q235	26. 52	7. 59
B-3	4. 8/Q345	27. 62	12. 05
B-4	8. 8/Q345	28. 12	14. 08

另外,由于 B 节点榫头处的应力分布相较于 A 应力值更高,木材更易进入屈服(图 16、图 18)。这是因为 B 节点的刚度更高,在相同的节点转角下比 A 节点产生的内力更大,榫卯之间挤压作用更强,更易进入塑性阶段。因此相比 A 节点,B 节点木材受压破坏时,节点整体变形更小。简而言之,B 节点木材的“强度瓶颈”来得更早。

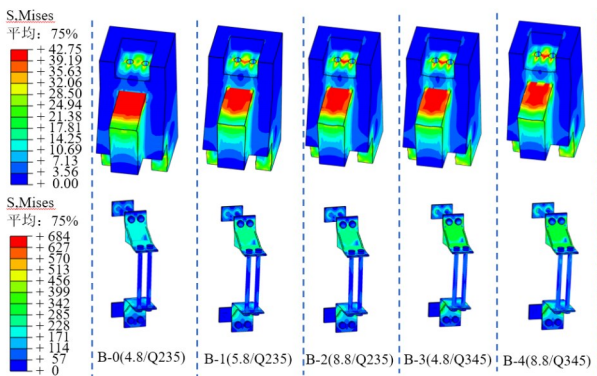


图 18 节点 B 应力关键部件应力云图

Fig.18 Stress contour plot of critical component at joint B

4 结论

1)试验表明,内嵌式钢连接系统-榫卯节点的钢连接系统部件和榫头区域发生显著的塑性变形,榫栓孔处发生明显的顺纹挤压破坏,证明钢连接系统和榫卯嵌固双重受力体系具备良好协同作用,有效

发挥了木材的顺纹承压机制。

2) 双钢连接系统节点比单钢连接系统节点的承载能力和延性系数都提高了 30% 以上,但也增加了榫头栓孔处的应力集中程度,使得榫头顶部嵌固挤压发生横纹拉裂破坏,降低了节点转动变形能力。相比单钢连接系统节点,双钢连接系统的节点屈服位移降低了 33.8%。

3) 经验证,模拟的承载性能与试验值误差小于 10%,破坏现象吻合,数值模拟能够反映节点受力变形的主要特征。有限元分析表明增加钢连接系统抑制了榫头的拔出与转动,榫内贯穿螺栓与孔壁协调变形减小,加剧了榫根和榫上栓孔处的应力集中程度,呈现局部显著的脆性破坏特征,降低了对 L 形角钢的利用效率。

4) 参数化分析表明,提升 L 形角钢和螺栓强度对 A、B 节点承载性能的增强有限,最大提升效果分别为 15.93% 和 14.08%。两者强度的提升增强了钢连接系统的刚度并延缓了节点塑性铰的形成,但降低了对榫卯之间的约束,加剧了局部木材的屈服,使得出现“强度瓶颈”。

参考文献

- [1] 宋炜德, 王朝晖, 赵弘博, 等. 国内外木结构建筑抗震研究进展[J]. 世界林业研究, 2025, 38(3): 58-67.
Song W D, Wang Z H, Zhao H B, et al. National and international research progress in seismic resistance of wooden structures[J]. World Forestry Research, 2025, 38(3): 58-67. (in Chinese)
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进建筑业持续健康发展的意见[Z]. 2017.
General Office of the State Council. Opinions of the general office of the state council on promoting the continuous and healthy development of the construction industry[Z]. 2017. (in Chinese)
- [3] Ling T T, Mohrmann S, Li H T, et al. Review on research progress of metal-plate-connected wood joints [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 59: 105056.
- [4] Li F Y, Gao Y, Song X B, et al. Experimental study of fire resistance of mortise-tenon-jointed post-beam timber frames with intumescent coatings[J]. Journal of Structural Engineering, 2026, 152(2): 04025257.
- [5] van Nimwegen S E, Latteur P. A state-of-the-art review of carpentry connections: from traditional designs to emerging trends in wood-wood structural joints[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107089.
- [6] Pastori S, Sergio Mazzucchelli E, Wallhagen M. Hybrid timber-based structures: a state of the art review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129505.
- [7] Quenneville J H P, Mohammad M. On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connections loaded parallel-to-grain[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(4): 761-773.
- [8] CSA O86-2014 Engineering design in wood - Tenth Edition; Update No. 1: May 20[S]. 2014.
- [9] DS/EN 1995-1-1/A1: 2008 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings[S].
- [10] 奚爱峰, 刘伟庆, 杨会峰, 等. 木材—钢填板螺栓连接节点结构性能试验研究[J]. 江苏建筑, 2009(5): 12-14, 96.
Xi A F, Liu W Q, Yang H F, et al. Experimental study on structural performance of wood-steel-wood bolted joints[J]. Jiangsu Construction, 2009(5): 12-14, 96. (in Chinese)
- [11] 何敏娟, 赵艺, 高承勇, 等. 螺栓排数和自攻螺钉对木梁柱节点抗侧力性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 845-852.
He M J, Zhao Y, Gao C Y, et al. Effect of bolt row and self-tapping screw reinforcement on lateral performance of bolted timber connection[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(6): 845-852. (in Chinese)
- [12] 刘慧芬, 何敏娟. 自攻螺钉参数设置对胶合木梁柱节点受力性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 148-156.
Liu H F, He M J. Effects of self-tapping screw on performance of glulam beam-to-column connections[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7): 148-156. (in Chinese)
- [13] 冯新, 杨欣欣, 聂万龙, 等. 木结构销类连接横纹劈裂承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2025, 58(12): 18-38.
Feng X, Yang X X, Nie W L, et al. Experimental study on splitting capacity for dowel-type timber connections loaded perpendicular to the grain[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(12): 18-38. (in Chinese)
- [14] Feng X, Yang X X, Nie W L, et al. Evaluating the splitting capacity of timber beams loaded perpendicular to grain by bolted connections with steel plate: experimental study and theoretical calculation[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119831.
- [15] Feng X, Xiao H B, Chen B W. Experimental study on splitting strength of sawn lumber loaded perpendicular to grain by bolted steel-wood-steel connections[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102554.
- [16] Iovane G, Faggiano B. Seismic timber frames with steel link: mechanical characterization through numerical investigation[C]//World Conference on Timber Engineering 2025. June 22-26, 2025. Brisbane, Australia. World

- Conference On Timber Engineering 2025, 2025: 1355-1360.
- [17] 王明谦. 基于有效应力正负分解的木材三维弹塑性损伤模型[J]. 土木工程学报, 2025, 58(2): 25-32.
Wang M Q. Three-dimensional combined elastic-plastic and damage model of wood based on positive/negative decomposition of effective stress tensor[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(2): 25-32. (in Chinese)
- [18] SANDHAAS C. Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates[M]. Germany: Wöhrmann Vreden, 2012.
- [19] Wang M Q, Song X B, Gu X L, et al. Rotational behavior of bolted beam-to-column connections with locally cross-laminated glulam[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(4): 04014121.
- [20] Kim C, Han S, Choi S. Proposal for column-beam joint system in Korean mid- and high-rise timber structures[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2025, 53(4): 370-388.
- [21] Maraveas C, Miamis K, Matthaiou C E. Performance of timber connections exposed to fire: a review[J]. Fire Technology, 2015, 51(6): 1401-1432.
- [22] Azanaw G M. Fire behaviour of timber-encased steel composite structures: a meta-analytic review of experimental findings and design implications[J]. International Journal of Emerging Science and Engineering, 2025, 14(1): 1-5.
- [23] 徐天琦, 马瑜蓉, 宋晓滨, 等. 带翼缘钢填板-螺栓连接胶合木梁-柱节点转动性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 131-137.
Xu T Q, Ma Y R, Song X B, et al. Experimental study on rotational behavior of bolted glulam beam-to-column connections with slotted-in flanged steel plates[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 131-137. (in Chinese)
- [24] 李照. 装配式梁柱式木结构节点开发及力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Li Z. Development and experimental study on the structural performance of beam-column connection for prefabricated post and beam timber construction[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [25] GB 50005—2017 木结构设计标准[S].
GB 50005—2017 Standard for design of timber structures[S].
- [26] 杨成, 吉鑫民, 宋谦益, 等. 木框架承重组合墙体足尺耐火试验研究[J]. 土木工程学报, 2025, 58(9): 30-43.
Yang C, Ji X M, Song Q Y, et al. Experimental study on fire resistance of full-scale load-carrying light-wood-frame wall system[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(9): 30-43. (in Chinese)
- [27] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S].
- [28] Sun C Z, Zhuang M L, Bai L T, et al. Experimental study on seismic performance of novel precast concrete beam-column joints using mechanical connections[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21(9): 4429-4448.
- [29] 陶昊天, 毛旻, 杨会峰, 等. 胶合木梁柱角钢混合连接静力与抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(10): 114-121, 129.
Tao H T, Mao M, Yang H F, et al. Experimental study on static and seismic behavior of glulam beam-to-column hybrid joints with bolted angles[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(10): 114-121, 129. (in Chinese)
- [30] 冯蜀逸. 新型连接节点梁柱式胶合木结构受力性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
Feng S Y. Study on the mechanical properties of new type joint timber post and beam systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [31] 朱海. 考虑多种因素影响的胶合木框架受力性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Zhu H. Study on the mechanical properties of glulam frame considering the multi-factor influences[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [32] 徐博瀚, 蔡竞. 木材强度准则的研究进展[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 64-73.
Xu B H, Cai J. State-of-the-art in strength criteria for wood[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 64-73. (in Chinese)
- [33] 李盼, 淳庆, 张承文, 等. 混杂纤维布加固木梁受弯性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(4): 1018-1031.
Li P, Chun Q, Zhang C W, et al. Study on flexural behavior of timber beams strengthened with hybrid fiber sheets[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(4): 1018-1031. (in Chinese)
- [34] Simulia d C S. Abaqus 6.11 analysis user's manual[M]. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2011.
- [35] 杨成, 罗浪, 宋谦益. 火灾条件下冷弯薄壁型钢楼板体系的耐火性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 81-93.
Yang C, Luo L, Song Q Y. Fire resistance of cold-formed light gauge steel frame floor systems under fire conditions[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 81-93. (in Chinese)
- [36] 张悦洋. 钢-木螺栓连接木结构框架火灾反应试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Zhang Y Y. Experimental study on the fire performance of post-and-beam timber structure with bolted steel-to-

- timber connection [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [37] 周鸿屹. 木结构钢填板螺栓连接节点力学性能试验研究与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Zhou H Y. Experiments and analysis of the mechanical behavior of bolted joints with slotted-in steel plate in timber structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [38] Hassanieh A, Valipour H R, Bradford M A. Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 122: 367-378.
- [39] Awaludin A, Hirai T, Hayashikawa T, et al. Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pretensioned bolt[J]. *Journal of Wood Science*, 2008, 54(5): 362-368.
- [40] Sandhaas C, van de Kuilen J G. Strength and stiffness of timber joints with very high strength steel dowels[J]. *Engineering Structures*, 2017, 131: 394-404.
- [41] Feio A, Machado J S. In-situ assessment of timber structural members: combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods - A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 1157-1165.
- [42] Hassanieh A, Valipour H R, Bradford M A, et al. Modelling of steel-timber composite connections: validation of finite element model and parametric study[J]. *Engineering Structures*, 2017, 138: 35-49.
- [43] 王忠铨, 李久林, 杨娜, 等. 天府农博园主展馆 GL24h 欧洲云杉胶合木力学性质试验探究[J]. *林业科学*, 2025 (9): 184-194.
- Wang Z C, Li J L, Yang N, et al. Exploration of mechanical properties of GL24h European spruce glued laminated timber in the main exhibition hall of Tianfu agricultural expo park[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025 (9): 184-194. (in Chinese)
- [44] 岳孔, 李响, 石鑫磊, 等. 高温预处理对杨木正交胶合木剪力墙抗侧力性能的影响[J]. *林业科学*, 2024, 60 (7): 117-128.
- Yue K, Li X, Shi X L, et al. Effects of thermal pretreatment on lateral performance of poplar cross-laminated timber shear walls[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(7): 117-128. (in Chinese)
- (编辑 XXX)