

轻型木结构榫卯连接试验研究及有限元分析

丁俊豪¹, 冯选辉², 周 华³

(1. 贵阳人文科技学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州电力建设监理咨询有限责任公司, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 为了研究榫卯连接在轻型木结构中应用的可行性, 设计并制作了 18 个榫卯连接试件, 对试件进行抗拉、抗剪及抗弯试验, 分析节点的破坏模式、试验曲线及受力性能评价指标。并对试件节点进行有限元建模分析, 所模拟结果与试验结果基本吻合。研究表明: 榫卯连接破坏模式主要表现为榫头和卯口的相互挤压变形以及底梁板被拔出。在榫卯节点缝隙中加入白乳胶能提高节点刚度以及增大节点的极限荷载。试验节点刚度较为稳定, 当试件的破坏迅速传开后节点的承载力明显降低。

关键词: 轻型木结构; 榫卯节点; 破坏模式; 弯矩-转角曲线; 有限元分析

中图分类号: TU366

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0137-03

引言

随着 2020 年 9 月我国提出“双碳”(2030 年碳达峰, 2060 年碳中和)目标, 进一步推动了木结构在各行各业的发展。轻型木结构是指木骨架与覆面板通过钉连接而成的整体, 在我国上海、杭州、苏州等地被广泛使用, 具有自重轻、抗震性能优良、装配式程度高等优点^[1]。榫卯节点是古建筑木结构中主要的连接方式, 通过凹(卯口)、凸(榫头)结合方式来抵抗地震荷载, 承担着木结构的主要耗能, 具有一定的拉压、弯曲、抗剪和抗扭强度和介于刚性及铰接之间的半刚性特性, 因此将榫卯连接应用于轻型木结构建筑中, 可以提高轻木结构整体稳定性和抗震性能。但目前对榫卯连接应用在轻型木结构中仍然处于探索阶段, 没有形成类似于轻型木结构钉连接的设计理论。

目前, 国内外众多学者对榫卯连接节点开展大量的受力性能研究。戴璐等^[2]探究在现代木结构中应用榫卯连接, 分析其理论依据, 表明榫卯连接在承载力方面能满足现代木结构的要求。实际工程中往往榫卯节点都是比较复杂的, 孙国军等^[3]对复合榫卯节点进行试验研究, 结果表明该节点有良好的变形能力, 验证了榫卯节点的半刚性能。姚侃等^[4]对燕尾榫和直榫进行了试验研究和力学分析, 得出了榫卯节点的半刚性能和刚度退化规律。一般而言, 榫卯节点应用于木结构的梁柱节点, 榫卯结构对施工工艺要求较高, 是木结构中受力较薄弱环节, 在木结构建筑中是重要研究对象。文中对燕尾榫连接节点进行试验研究并进行有限元分析, 以期为今后轻型木结构的应用提供一定的参考。

一、试验概况

1. 试件设计

根据《木结构设计标准》^[5]规定, 轻型木结构剪力墙骨架是由规格材相互连接而成, 规格材通常采用截面尺寸为

38mm×89mm 的 SPF (即云杉-松木-冷杉)。榫卯连接是通过材料间的相互咬合来抵抗荷载, 为半刚性节点, 介于刚性连接与铰接之间, 缝隙对节点承载力、变形及刚度有很大影响, 因此在榫卯连接中考虑加入白乳胶来填充缝隙, 试验设计为打胶与不打胶两种, 每种进行抗拉、抗剪及抗弯三组试验, 每组试验包含 3 个平行试件。

榫卯节点试件的截面尺寸如图 1 所示。其中, 梁柱截面尺寸均为 38mm×89mm×150mm (高×宽×长), 榫头高度为 20mm, 根部为 20mm, 端部为 38mm, 与卯口完全契合。

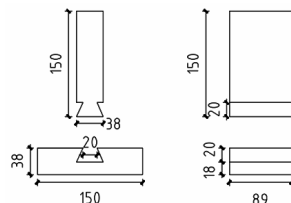


图 1 榫卯节点试件尺寸示意图 (单位: mm)

确定 SPF 的主要力学材性参数, 根据国内木材试验规范^[6]中的试件尺寸和加载方案进行测定力学性能参数, 主要包括纵向、径向及弦向抗压试验, 纵向抗拉试验及纵向抗弯试验, 如图 2 所示。试验结束后经过数据拟合处理得出如表 1 所示结果。



(a) 抗压试验

(b) 抗拉试验

(c) 抗弯试验

图 2 SPF 材性试验

收稿日期: 2022-07-29

作者简介: 丁俊豪 (1995-), 男, 硕士, 贵阳人文科技学院, 工程师, 研究方向为木结构建筑。

基金项目: 贵阳人文科技学院科研基金项目“轻型木结构榫卯连接方式研究+2021rwjs014”。

表 1 SPF 材性试验主要结果

	纵向抗压	径向抗压	弦向抗压	纵向抗拉	抗弯
屈服荷载/kN	9.35	2.35	3.45	3.28	9.3
屈服位移/mm	1.5	1.3	1.8	3.5	7.6
屈服强度/MPa	23	3.9	5.8	8.2	2.3

参考 Wood Handbook^[7]的研究成果, SPF 材料力学性能参数见表 2。

表 2 SPF 力学性能参数

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
11,000	500	500	0.35	0.05	0.40	650	650	60

注: E 表示弹性模量; μ 表示泊松比; G 表示剪切模量; 下标 1 为纵向, 2 为径向, 3 为弦向; 下标 12 为径切面, 13 为弦切面, 23 横切面。

2. 试验加载方案

榫卯连接试验采用多功能材料力学试验机进行加载, 夹具通过加工厂加工而得。参考已有榫卯节点试验加载方案^[8], 抗剪、抗弯试验前, 将梁柱节点旋转 90° , 将梁固定在试验机上, 以便施加荷载。节点试验采用位移控制单调加载模式, 加载速率为 $2.5\text{mm}/\text{min}$, 试件加载到有明显破坏或荷载下降至极限荷载的 80% 时停止加载, 并做好相关记录, 试验结束。

二、试验结果分析

1. 试验现象

在单向荷载作用下, 各构件的破坏模式基本相同, 主要表现为榫头和卯口的相互挤压变形、底梁板被拔出以及位移增大而伴随着“吱吱”声。抗拉试验中, 随着荷载的不断加大, 底板中间位置出现平齐裂缝, 被榫头拉断为两层, 榫头也在拔出过程中断裂。另一组试验在榫卯节点处加入白乳胶, 底板出现不平齐裂缝, 燕尾榫榫头凸出部分被剪断, 如图 3 所示。



(a) 未打胶抗拉试验破坏 (b) 打胶抗拉试验破坏

图 3 抗拉试验破坏模式

抗剪与抗弯试验现象基本相同, 故以未打胶抗弯试验简述破坏现象。初始加载时, 榫卯节点处有不明显的弯曲和变形, 榫卯节点相互挤压, “吱吱”声并不明显; 随着位移的不断增大, 榫卯连接刚度不断增加, 机械咬合力及侧移也逐渐增大, 但保持着良好的线性关系, 榫卯节点出现明显的挤压变形; 在加载的最后阶段, 底梁板出现明显裂缝, 挤压变形越来越大, 节点处发出明显的“吱吱”声, 构件出现明显松动, 承载力下降, 直至试验结束。试验后取下夹板时底梁板完全断裂脱落, 榫头并没有破坏, 如图 4 所示。

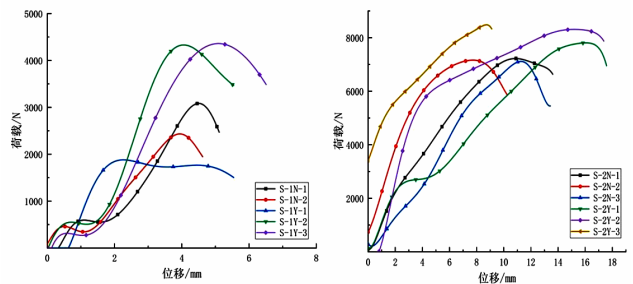


(a) 抗剪试验破坏 (b) 抗弯试验破坏

图 4 抗剪、抗弯试验破坏模式

2. 试验结果曲线

在抗拉及抗剪试验中用荷载-位移曲线表现受力性能, 如图 5 所示。由于抗拉 (未打胶) 试件制造出现误差, 在加载前就已经破坏, 因此略去一组试验数据。抗弯试验从加载至破坏过程中, 榫卯节点出现了较为明显的拔榫、转动变形, 因此采用弯矩-转角曲线来表述榫卯节点的受力性能。其中, 弯矩由竖向荷载与其至榫头端部距离 (120mm) 相乘得到, 转角由柱竖向位移与其至榫头端部距离 (120mm) 相除得到。如图 6 所示, 给出了节点 $M-\theta$ (弯矩-转角) 曲线。



(a) 抗拉节点 (b) 抗剪节点

图 5 荷载-位移曲线

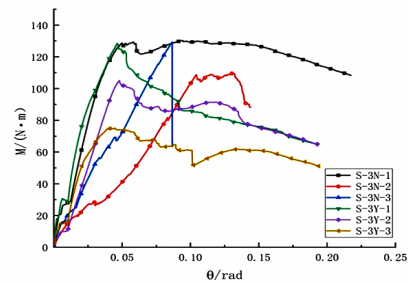


图 6 抗弯节点弯矩-转角曲线

注: S-1N 为抗拉 (未打胶)、S-1Y 为抗拉 (打胶)、S-2N 为抗剪 (未打胶)、S-2Y 为抗剪 (打胶)、S-3N 为抗弯 (未打胶)、S-3Y 为抗弯 (打胶), 后面数字为 3 个平行试件。

3. 拟合结果

从试验结果曲线可以看出, 试验结果具有一定的离散性, 这与木材自身的材料力学性能参数有关。为了更好的反应榫卯节点试验结果的代表性, 文中移除部分离散性较大的数据和坏点, 并利用 Origin 软件对试验结果进行拟合, 得到修正后的荷载-位移曲线及弯矩-转角曲线如图 7 所示。由图 7 (a) 可知, 未打胶抗拉试件极限荷载为 $2,756\text{N}$, 所对应的位移为 4.23mm 。打胶以后极限荷载为 $3,453\text{N}$, 所对应的位移为 4.57mm 。极限位移之前处于弹性阶段, 在这之后试件开

始破坏，抗拉能力下降。由图 7 (b) 可知，未打胶抗剪试件极限荷载为 7,147N，所对应的位移为 10.09mm，打胶后极限荷载增大到 8173N，位移也相应延长到 13.58mm。由图 7 (c) 可知，抗弯构件前期弹性阶段刚度较为稳定，当试件的破坏迅速传开后节点的承载力明显降低，受白乳胶影响，试件内部出现小范围拉扯破坏，曲线呈现波浪状。对比试验可以看出，榫卯节点缝隙中加入白乳胶能提高节点刚度以及增大节点的极限荷载。

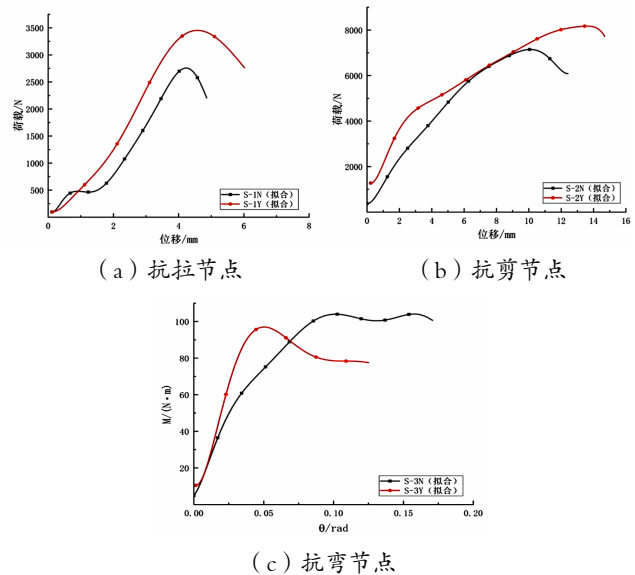


图 7 荷载-位移（弯矩-转角）拟合曲线

根据榫卯节点的弯矩-转角曲线可以进一步计算节点刚度 k 、屈服弯矩 M_y 、屈服转角 θ_y 、极限弯矩 M_{max} 、极限转角 θ_{max} 、破坏弯矩 M_f 、破坏转角 θ_f 以及转角延性系数 μ ，计算结果如表 3 所示。参考文献[8]对以上受力性能评价指标进行定义，其中弯矩-转角曲线上采用极限弯矩 40%的点和 50%的点的连线斜率作为节点刚度。屈服弯矩通常采用 1/6 初始刚度进行计算，但考虑到榫卯节点为脆性破坏，因此取极限弯矩的 50%最为屈服弯矩。破坏弯矩取下降到极限弯矩的 80%或有明显破坏时试验停止的荷载。转角延性系数取破坏转角和屈服转角对应的比值。

表 3 主要试验结果

试件编号	$k/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	$M_y/(N \cdot m)$	θ_y/rad	$M_{max}/(N \cdot m)$	θ_{max}/rad	$M_f/(N \cdot m)$	θ_f/rad	μ
S-3N	1,485.7	52	0.027	104	0.103	100.6	0.171	6.3
S-3Y	3,233.3	48.5	0.019	97	0.05	77.6	0.125	6.6

三、榫卯连接有限元分析

1. 有限元模型建立

采用 ABAQUS 软件对上述试验进行有限元分析。模型采用实体建模，模型尺寸与试验尺寸保持一致。单元类型为 C3D8（三维八节点）单元。接触方式包含两种，一种为木材间直接接触用于未打胶试件，接触类型为表面与表面接触，属性定义为罚函数和硬接触；第二种为打胶层与木材接触用于打胶试件，接触类型为点与表面接触，属性定义为二次张拉准则。木材材性为各向异性，通过上述材性试验结果与文

献[7]中的研究成果，采用表 2 中数据进行材料参数的输入。

2. 有限元计算结果

在抗拉有限元模拟中，榫头翼缘两侧均出现较大的切应力和压应力，是最容易破坏的部位。在抗剪有限元模拟中，榫头燕尾部位因挤压变形而溢出平面外，不过加入白乳胶后平面外溢有所减缓。在抗弯有限元模拟中，应力集中在受力一侧的翼缘部分和受力反方向的榫头燕尾处，而底梁板和柱的其他位置应力较小且分布较为均匀。

榫卯节点有限元计算结果和试验结果对比如表 4 所示。可以看出，试件 S-2Y 误差在 18.83%，原因可能是抗剪模型存在初始缺陷导致数据有离散性。整体来看，有限元模拟结果与试验结果基本吻合，误差范围相差在 0.18%~18.83%，误差较小。

表 4 榫卯连接试验与模拟对比

试件编号	极限荷载 (N) / 极限弯矩 (N · m/rad)			极限位移 (mm) / 极限转角 (rad)		
	试验	模拟	误差 (%)	试验	模拟	误差 (%)
S-1N	2,756	2,698	2.1	4.23	4	5.44
S-1Y	3,453	3,298	4.49	4.57	5	9.41
S-2N	7,147	7,160	0.18	10.09	10	0.89
S-2Y	8,173	6,634	18.83	13.58	14	3.09
S-3N	104	104.3	0.29	0.103	0.092	10.68
S-3Y	97	99.72	2.8	0.05	0.047	6

四、结论

文中对轻型木结构榫卯连接进行抗拉、抗剪及抗弯试验研究以及有限元分析，可以得出以下结论：

(1) 由各试件的破坏现象可知，构件的破坏模式基本相同，主要表现为榫头和卯口的相互挤压变形、底梁板被拔出以及位移增大而伴随着“吱吱”声。

(2) 拟合结果很好的反应试验受力性能，各构件弹性阶段刚度较为稳定，当试件的破坏迅速传开后节点的承载力明显降低。受白乳胶影响，荷载和位移随之增大，但试件内部会出现小范围拉扯破坏。从对比试验可以看出，在榫卯缝隙中加入白乳胶能提高节点刚度以及增大节点的极限荷载。

(3) 采用 ABAQUS 软件对试验构件建立有限元分析模型，计算得到的应力分布、节点破坏模式以及模拟数据都与试验结果基本吻合，为实际推广中将榫卯节点应用在轻型木结构中提供参考。

参考文献

- [1] 周华，柏洁，文伟等. 轻型木结构剪力墙木骨架的抗侧性能[J]. 林业工程学报, 2021, 6 (4): 72-79.
- [2] 戴璐，肖浩楠. 典型直榫梁柱节点在现代木结构中的应用研究[J]. 林产工业, 2020, 57 (1): 29-36.
- [3] 孙国军，赵益峰，薛素铎等. 复合榫卯节点连接特性拟静力试验研究[J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2018, 51 (S1): 20-26.
- [4] 姚侃，赵鸿铁，葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. 工程力学, 2006, (10): 168-173.
- [5] 木结构设计标准: GB50005-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (下转第 158 页)

风电项目位于南通市如东海域，在洋口港水域港界北侧，河豚沙西部，场区中心离岸距离 33km，海底泥面高程在 -18.6~0m（85 高程）之间，海底地形起伏明显。风电场形状呈梯形，东西方向长约为 13km，南北方向平均宽约为 5km，风电场涉海面积 64km²，规划装机容量 400MW。风机采用单桩式基础并配合集合式套笼附属构件。

集成式套笼附属构件结构单重约 50~90T，利用起重船进行安装，起重船起重负荷完全满足要求。套笼竖向放置于运输船甲板面进行绑扎固定后运输至现场。由于海上现场涌浪大，套笼高度高，套笼上平台摇晃幅度大，且套笼上平台内侧无围挡，施工人员上至套笼上平台进行挂扣操作非常危险，现配置高于套笼的钢丝绳，在后方制作现场便将套笼吊装索具挂扣完成，吊装钢丝绳一端搁置于运输船甲板，海上现场吊装施工人员直接在运输船甲板挂钩即可，安全有保障。集成式套笼吊装吊索具清单见表 1。

表 1 集成式套笼安装吊索具清单

序号	1	2
名称	双头扣钢丝绳	弓形卸扣
数量	24 根	24 个
规格	L=38m，SWL35T	SWL35T
备注	每个套笼吊装用 4 根，共配 6 套 每个套笼吊装用 4 个，共配 6 套	

集成式套笼海上现场安装具体流程如下：

（1）运输靠泊，施工人员运输船甲板挂扣，浮吊起吊集成式附属构件套笼。

（2）浮吊旋转吊臂将集成式附属构件套笼吊至桩基础顶部。缓慢放钩防止发生摩擦或磕碰等，避免造成附属构件及桩基保护层的损伤。同时通过缆风绳旋转集成式附属构件的方向，使其安装方向与桩基础方向一致。

（3）附属构件安装完成后，检查基础防腐涂层的损伤情况，若有损伤，按规定进行修补。

附属构件安装完成后，检查基础防腐涂层的损伤情况，修补方法：

①修补前先对破损位置进行表面清洁处理，除去水、油污、异物等，并用压缩空气吹干后，再喷砂处理到 Sa2.5 级或用动力工具打磨至 St3 级。除锈打磨的方法的选择，视破损面积的大小及施工条件而定，具备工厂修补条件时，优先采用喷砂方式。

②防腐涂料供应商必须为承包方制定修复规范，该修复规范及涂料性能等相关数据必须在第 1 批涂料（或第 1 个样品）交货前提供给建设单位及设计认可。

③采用由防腐涂料供应商确认并经设计认可的适合潮湿环境施工的涂料进行补涂刷。



图 2 集成式附属构件起吊

为保证集成式套笼附属构件的施工质量，还需做以下相关规定：

（1）集成式附属构件安装偏差控制在 1.5‰范围内，且总偏差不得超过 30mm；构件制作过程中应在工厂内进行预组/拼装（含外平台），组/拼装无误并经设计和监理验收后方可运至现场整体安/吊装。

（2）附属构件施工过程应采取有效措施防止起吊的摩擦或磕碰等，避免造成附属构件及桩基保护层的损伤。

（3）附属构件安装完成后，应检查基础防腐涂层的损伤情况，并按相关规定修补。

（4）底部圈梁为非承重构件，在加工、制作、运输中均应配备必要的施工机械及工装保证措施，并注意对电缆管喇叭口予以保护。

三、结论

海上风电是未来风电技术的发展方向，相关的结构设计和施工工艺研究还有很长的一段路要走。文中介绍了海上风电附属构件套笼的主要结构与各部分的主要功能，并结合工程实例从构件吊装、防腐检测以及施工质量保证措施对该附属构件的施工工艺做了研究，利用文中提到的方法进行套笼构件的安装及检测能够增强结构的稳定性，保证施工安全性，提高施工效率，并方便工作人员进行后续的调试和维护。

参考文献

- [1] 郑海,杜伟安等.国内外海上风电发展现状[J].水电与新能源, 2018, 32(6): 75-77.
- [2] 王怀明.冰区海域单桩基础附属构件结构型式[J].船舶工程, 2021, 43: 147-150.
- [3] 何小华,张力.海上风机基础阴极保护设计与应用[J].南方能源建设, 2015, 2(3): 76-79.

（上接第 139 页）

- [6] 木材物理力学试验方法总则：GB/T 1928—2009[S].北京：中国国家标准化管理委员会，2009.
- [7] Wood Handbook, wood as an engineering material, general technical report [R]. Madison, Wisconsin: Forest products

laboratory, United States Department of Agriculture, Forest Service, 2010.

- [8] 王明谦,宋晓滨,顾祥林等.胶合木梁柱螺栓-钢填板节点转动性能研究[J].建筑结构学报, 2014, 35(9): 141-150.