

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.259



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



安装偏差对胶合木梁柱植筋节点受弯承载力的影响

唐秋霞¹, 李军¹, 郭峰旭², 解选本³, 王燕¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 重庆长厦安基建筑设计有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266061; 3. 青岛市即墨区古城发展服务中心, 山东 青岛 266200)

摘要: 胶合木植筋节点在加工和安装时通常会存在些许缺陷和误差, 且植筋节点的设计和施工目前尚无标准可循。为了研究含加工缺陷在内的安装偏差对该类节点受弯承载力的影响, 明确安装偏差的允许范围, 基于理论计算方法初步校核所设计节点的梁端抗弯承载力, 然后进行有、无安装偏差节点的有限元分析, 并与有安装偏差的试验结果进行对比, 运用考虑胶层开裂的有限元分析方法确定安装偏差限值。结果表明: 有安装偏差节点的梁端抗弯承载力有所下降; 试验中试件的破坏形态主要为植入钢筋屈服、植筋孔洞周围木材破坏及木柱顺纹方向开裂; 有限元分析时考虑安装偏差和胶层开裂, 则分析结果与试验吻合度较高; 相对于通常预留间隙 10 mm 的节点模型, 安装偏差控制在 10~25 mm 以内时, 受弯承载力的降低幅度低于 5%。

关键词: 胶合木结构; 植筋节点; 梁柱节点; 循环反复荷载; 安装偏差

中图分类号: TU366.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)02-0138-08

The influence of installation deviation on the mechanical performance of glulam beam-column glued-in rods joints

TANG Qiuxia¹, LI Jun¹, GUO Fengxu², XIE Xuanben³, WANG Yan¹

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China; 2. ARCH-AGE DESIGN, Qingdao 266061, Shandong, P. R. China; 3. Jimo District Ancient City Development Service Center, Qingdao 266200, Shandong, P. R. China)

Abstract: There are usually some defects and deviations in the manufacturing and installation of glulam glued-in rods joints, and there is currently no standard to follow for the design and construction of joints. Therefore, this paper focuses on the influence of installation deviation including manufacturing defects on the flexural capacity of such joints, aiming to clarify the allowable range of installation deviation. Based on the theoretical calculation method to check the beam end flexural bearing capacity of the designed joints, firstly, the finite element analysis of the joints with and without installation deviation was carried out, then the finite element analysis of the joints with installation deviation was compared with the experimental results, and the limit value of installation deviation was determined by using the finite element analysis method considering the cracking of rubber layer.

收稿日期: 2021-09-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703506)

作者简介: 唐秋霞(1996-), 女, 主要从事现代木结构节点性能研究, E-mail: 944397162@qq.com。

李军(通信作者), 女, 副教授, E-mail: kitjun76@qut.edu.cn。

Received: 2021-09-16

Foundation item: National Key R & D Program of China (No. 2017YFC0703506)

Author brief: TANG Qiuxia (1996-), main research interest: joint performance of modern timber structure, E-mail: 944397162@qq.com.

LI Jun (corresponding author), associate professor, E-mail: kitjun76@qut.edu.cn.

The results show that: the beam end flexural bearing capacity of joints with installation deviations has decreased; the failure modes of the specimens in the test are mainly the yield of the implanted steel bars, the damage of the wood around the reinforcement holes and the cracking of the wood columns along the grain direction. If the installation deviation and adhesive cracking can be reflected in the finite element analysis, the analysis results are in good agreement with the test results. When the installation deviation is controlled within 10~25 mm, the flexural bearing capacity of the joint model is reduced by less than 5% compared to the joint model with the usual reserved gap of 10 mm.

Keywords: glued timber structure; glued-in rods joint; beam-column joint; cyclic load; installation deviation

现代木结构具有天然环保、节能低碳的特点,且在抗震性能和装配化方面具有优势。与传统木结构相比,现代木结构材料的加工方式和连接方式不同。现代木结构通常采用工程木材,包括胶合木(集成材)、结构复合木材、木基结构板材和组合木构件。按照材料和建造形式的不同,现代木结构可分成原木结构、梁柱结构、轻型木结构、混合结构^[1]。其中,梁柱结构可用于单层工业厂房和大中型公共建筑等,其承重构件主要采用胶合木制作。胶合木可以有效避免原木疤结、裂痕等缺陷,实木锯材借助加工工艺形成材质均匀、强度高、变异性小的集成材;应用时根据建筑用途和用材状况任意调整成品规格尺寸,变短为长,合窄成宽,形状灵活且保留原木的天然特色,同时兼具良好的耐腐蚀性能及耐火性能,因此,建造多高层木框架结构已经成为可能^[2]。梁柱结构的构件之间主要采用榫卯连接、螺栓连接、钉连接和齿连接等方式,受混凝土植筋技术启发,近年胶合木植筋连接也受到关注,其将钢筋等连接件通过环保型胶黏剂植入构件中,从而传递内力^[3-4]。研究表明,通过植筋连接方式形成的节点具有承载力高、刚度大、外形优美、防火性能好等优点^[5-7]。

受力性能是胶合木植筋连接节点研究的重要内容,近年,除了节点抗拉拔性能外^[8],学者们围绕植筋节点的承载力、刚度以及断裂模式等开展了各种因素的影响研究。罗立权等^[9]研究了胶黏剂品种和温度对承载力的影响。Bouchard等^[10]分析了杆件强度变异性、螺母紧固性以及传递载荷装置刚度对多杆植筋节点受力性能的影响。Azinović等^[11]将植入深度、杆件直径等作为影响因素分析了CLT胶合木植筋连接的承载力和刚度。Ratsch等^[12]除考虑了胶黏剂品种影响外,还研究了试样缺陷和木材种类(GLT、LVL)对植筋连接的刚度、承载能力、断裂模式等力学行为的影响。研究表明,植筋节点多以梁端部区域植筋被拔出或受拉植筋屈服模式而破坏,节点的承载力受弯矩影响较大。

木结构中连接节点的设计关乎整个建筑结构

的安全性、可靠性和稳定性。近年,国家相继出台《装配式木结构建筑技术标准》(GB/T 51233—2016)、《多高层木结构建筑技术标准》(GB/T 51226—2017)、《木结构设计标准》(GB 50005—2017)等一系列设计规范与质量验收标准^[13-15],但关于木结构植筋,上述规范中尚未明确规定。植筋连接通常存在加工和安装方面的缺陷和误差,包括植筋孔位偏差、植筋未触达注胶孔底部、植筋插入倾斜等^[16],缺陷的存在会造成后期节点拼装时出现梁柱间隙过大等质量问题,控制植筋连接节点质量的允许偏差范围有待进一步研究。笔者以无钢材外露的胶合木梁柱植筋节点为研究对象,通过试验和有限元分析方法研究包含加工缺陷在内的安装偏差对节点梁端抗弯承载力的影响。

1 试件设计

1.1 几何参数

选取木框架结构中的T形节点进行研究,参照既有研究^[17]及工程实例,设计柱长1.7 m、梁长1.3 m,木柱与木梁的横截面尺寸同为150 mm×320 mm。

参考《木结构设计标准》(GB 50005—2017)、《胶合木结构技术规范》(GB/T 50708—2012)以及相关标准对节点进行参数设计^[18-19],具体参数详见表1。胶合木梁柱植筋节点尺寸如图1所示。

表1 节点几何参数

Table 1 Geometry parameter of joint

胶层厚度/mm	植筋直径/mm	注胶孔直径/mm	锚固长度/mm	最小边距/mm	最小间距/mm
2	12	16	250	50	50

1.2 材料性能参数

胶合木梁柱植筋节点由胶合木构件、环保型胶黏剂(环氧树脂胶)、植筋杆组装而成。梁、柱构件均采用花旗松胶合木,其力学性能指标通过材性试验确定,具体参数如表2所示。采用环氧树脂胶进行胶合植筋连接,胶黏剂的各项性能参数由厂家提供的质检报告获取,详见表3。植筋杆采用标准规格的8.8级螺纹杆,屈服强度取640 MPa,弹性模量

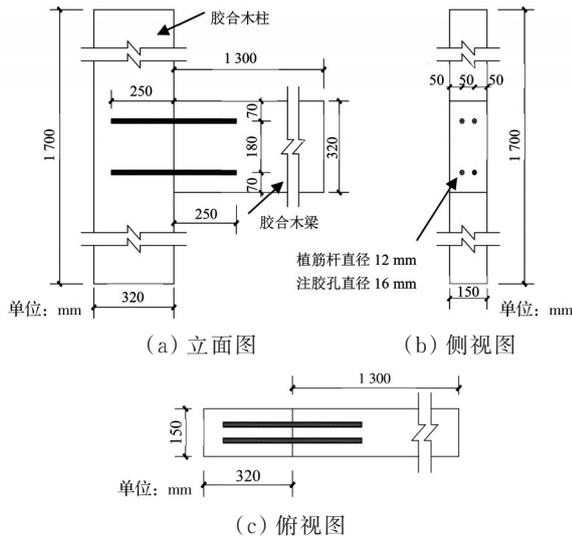


图 1 梁柱植筋节点尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam-column glued-in rods joint

为 2.1×10^5 MPa。

1.3 基于理论计算的梁端抗弯承载力校核

考虑往复荷载作用条件,以梁端受拉植筋屈服作为极限状态进行理论分析,利用以下 3 个假定^[20]: 1)胶合木与植筋满足理想弹塑性;2)受弯时应变分布均满足平截面假定;3)植筋节点屈服破坏源自受拉植筋屈服,胶合木中不存在拉力作用,植筋接头梁端受弯承载力计算模型如图 2 所示。

植筋合力 T 、 T' 计算式为

$$T = f_y A_s \tag{1}$$

$$T' = \sigma'_y A'_s \tag{2}$$

考虑每排植筋数量相同,故 $A_s = A'_s$,由力的平衡条件得

$$T + \frac{1}{2} \sigma_{w,t} (h - a - x) b = T' + \frac{1}{2} \sigma_{w,c} x b \tag{3}$$

对受压区钢筋取矩得

$$M = T(h - 2a) - \frac{1}{2} \sigma_{w,c} x b \left(\frac{x}{3} - a \right) + \frac{1}{2} \sigma_{w,t} (h - x - a) b \left[x - a + \frac{2(h - x - a)}{3} \right] \tag{4}$$

通过应力-应变关系可得方程组(5)。

$$\begin{cases} \sigma'_y = \frac{x - a}{h - a - x} E_s \epsilon_{s,y} \\ \sigma_{w,c} = \frac{x}{h - a - x} E_w \epsilon_{s,y} \\ \sigma_{w,t} = E_w \epsilon_{s,y} \end{cases} \tag{5}$$

式中: h 、 b 分别为木梁横截面高度和宽度,mm; x 为木梁受压区高度,mm; a 、 t 分别为植筋端距、间距,mm; $\epsilon_{s,y}$ 为植筋受拉屈服应变; σ'_y 为受压钢筋应力; E_s 为植筋弹性模量,MPa; E_w 为胶合木弹性模量,MPa。

将式(5)代入式(3)可得受压区高度 $x = 125.53$ mm,把受压区高度值代入式(4)可得出弯矩 M_f 为 22.94 kN·m。

1.4 有、无安装偏差节点的有限元分析

对有、无安装偏差的两种模型进行有限元分析,参考美国抗震规范 AISC 进行加载,前 3 级控制位移分别为 4.5、6、9 mm,每级循环 6 次;下一级强制位移为 12 mm,循环 4 次;当强制位移达 18、24、36 mm 时,每级循环 2 次;往后加载位移每增加 12 mm 循环次数均为 2 次。

1.4.1 有、无安装偏差节点的植筋黏结界面

胶合木梁柱植筋节点由木柱、木梁、植筋杆以及胶黏剂组成,无安装偏差时,植筋杆借助胶黏剂与木梁、木柱连接良好,节点拼装完成后梁与柱紧密贴合。在梁端施加竖向循环往复荷载时,胶合木梁近柱端的角部与柱面交互挤压,植筋杆受到反复的拉压力,植筋与木材界面产生沿植筋纵向分布的黏结应力,使木材、植筋结构胶和植筋得以有效传力。

在制作植筋节点过程中,植筋孔位若存在加工偏差,试件组装过程中就会引起梁柱接触面的安装偏差。加载初期由于初始间隙即安装偏差的存在,胶合木梁角部与柱面未产生有效接触,导致传力路径阻隔。实际施工过程中可以采取在梁柱之间添加木片的方式修补试件,用胶黏剂使木片与梁端接合,如图 3 所示,此时梁端外围与柱面产生接触。这样梁、柱、植筋可以协同工作,但间隙中的植筋无胶黏剂包裹,如图 3 中红色框线部分所示,局部植筋与木材之间无黏结力存在。

1.4.2 有限元模型的建立

基于 ABAQUS 建立胶合木梁柱植筋节点三维实体模型,根据 Patton-Mallory 等^[21]提出的木材本构关系,对顺纹方向的应力-应变关系进行简化,使顺纹受压为理想弹塑性,受拉时为线弹性;并假定木材的应力-应变关系在弹性阶段为正交各向异性,塑性阶段则假定为各向同性。植筋杆和胶黏剂均作

表 2 胶合木材性参数

Table 2 Properties of glued timber

顺纹抗压 强度/MPa	抗弯 强度/MPa	顺纹抗拉 强度/MPa	顺纹径向抗剪 强度/MPa	顺纹弦向抗剪 强度/MPa	横纹径向抗压 强度/MPa	横纹弦向抗压 强度/MPa
50.0	63.52	24.8	6.58	5.09	10.2	4.43

2 有安装偏差的节点试验

2.1 加载装置

按设计的节点尺寸进行试件制作及拼装,其中安装偏差与有限元模拟节点一致,均为 70 mm。图 6 为试验加载装置,试验之前将梁柱节点竖直放置于试验平台上,采用梁端加载模式进行加载。T 形节点柱上下端均设置为不动铰,采用液压千斤顶在柱顶端施加恒定的轴向荷载,通过 MTS 电液伺服作动器在梁端施加水平低周反复荷载。试验加载制度同有限元分析部分的描述。试验开始前调试仪器设备,记录初始读数;正式加载:先在柱端施加轴向压力并保持恒定,再在梁端逐级施加水平反复荷载。加载速度为 0.2 mm/s,加载至试件的极限承载力的 80% 或试件出现严重破坏时停止试验。



图 6 试验加载装置

Fig. 6 Test loading device

2.2 量测方案及测点布置

试验中垂直荷载由伺服作动器内置传感器测量,位移根据在测点布置位移计获取,测点布置如图 7 所示。

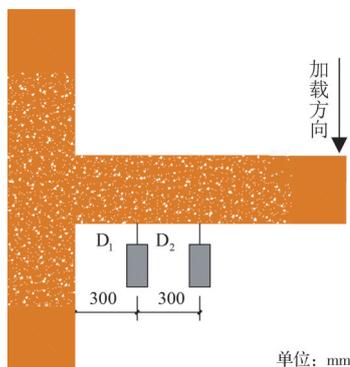


图 7 位移计测点布置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of displacement meter measuring point arrangement

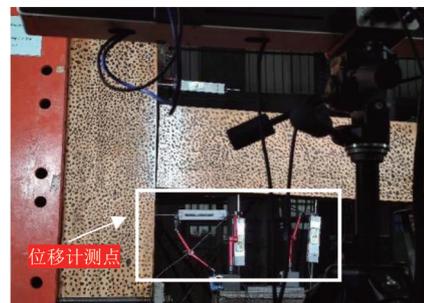
位移计布置于梁柱节点的核心区,用以推算节点的相对转角。位移、荷载数据通过 DH3816 N 静态应变测试系统获取,采用 XTDIC 三维全场应变测量分析系统测量胶合木梁、柱表面的位移与应

变,如图 6 所示。

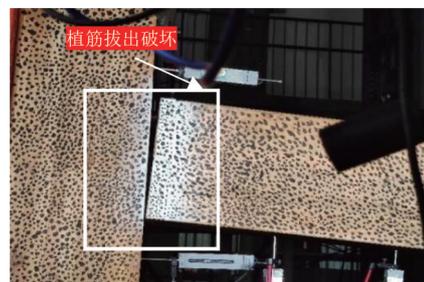
2.3 试验结果分析

2.3.1 试验现象

试件在加载初期(循环为 ± 4.5 mm、 ± 6 mm、 ± 9 mm),伴有轻微响声,判断主要为胶黏剂与木材摩擦产生;当位移循环至 ± 12 mm 时,胶合木梁内部出现劈裂声;继续加载至 ± 18 mm 时,试件产生明显劈裂声,加载期间伴有连续清脆的胶层开裂响声;当位移循环至 ± 24 mm,位移接近循环峰值时木材突然出现“砰”的一声巨响,梁柱接触面发生轻微横向错动,上部两根植筋已拔出并伴有一定木屑,当前试件已破坏,承载力明显下降,试验结束,试件破坏现象如图 8 所示。



(a) 试验时



(b) 植筋拔出破坏

图 8 试件破坏现象

Fig. 8 Specimen failure phenomenon

2.3.2 位移与应变测试结果

对比梁上相同位置的位移数据可知:XTDIC 测得的位移数据与位移计测得的数据吻合,如图 9 所示。

图 10 为位移加至 +9 mm 时的应变色谱图。除梁柱接触面因局部被拉开存在无效数据外,木梁表面应变值较小,大多为 0.022% 左右;图 11 为对应相同加载时刻的有安装偏差有限元分析中的顺纹方向应力云图,应力值大多为 2.64 MPa 左右,依据顺纹弹性模量可得对应表面应变为 0.020%。这说明有限元分析结果与试验测得的应变结果相差不大。

2.3.3 滞回曲线

图 12 为试验实测的滞回曲线,可以看出:胶合

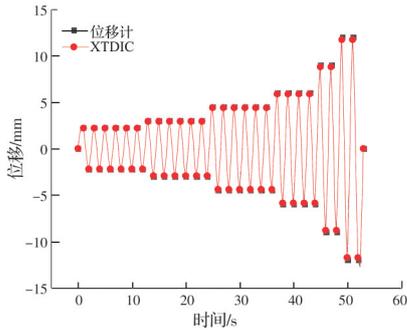


图 9 位移测试过程值

Fig. 9 Test process value of displacement

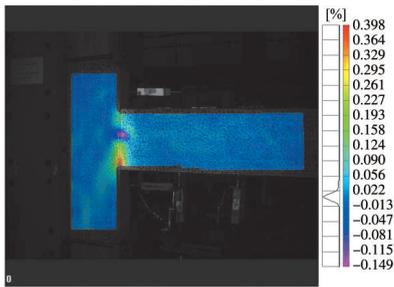


图 10 试件应变色谱图

Fig. 10 Strain chromatogram of specimen

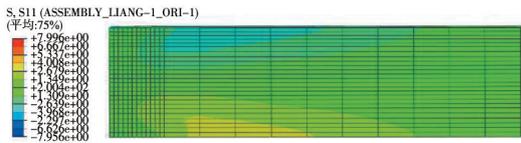


图 11 木梁顺纹方向应力云图

Fig. 11 Stress cloud of timber beam along grain direction

木梁柱植筋节点的滞回曲线基本呈现“反 S 形”，有一定的捏缩现象；比较各级循环往复加载曲线发现节点承载力的增加幅度有所减小；观察同一级加载曲线发现，每一次循环峰值荷载较上一次循环峰值荷载有轻微下降趋势，且曲线斜率相对降低，判断构件在反复荷载作用下刚度逐渐退化。

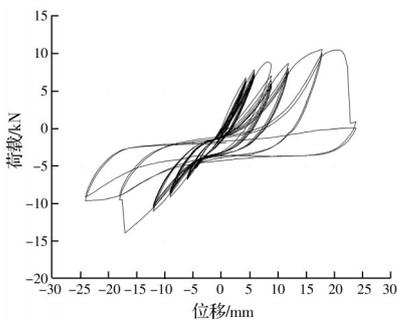


图 12 试件滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curve of specimen

2.3.4 骨架曲线

试验所得植筋节点的骨架曲线如图 13 所示。由图可见，胶合木植筋节点正向最大承载力为 10 kN 左右，负向为 14 kN 左右，并且负向荷载在达到最大

值后急剧下降，分析为上排植筋被拔出节点破坏所致，继续进行一次循环加载后负向荷载值降低。

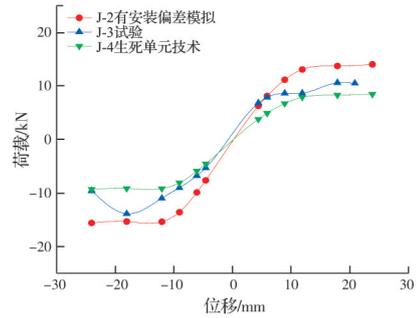


图 13 节点荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of joints

为了模拟胶体在加载过程中存在的开裂情况，针对上述考虑安装偏差的植筋节点进行有限元分析，引入生死单元技术(model change)模拟胶层失效。通过不断运行模型筛选发现，随着荷载逐级增大，失效单元增多直至大部分胶体单元因应力值达到黏结强度使节点失效。对比考虑胶层开裂的模型节点(以 J-4 表示)与试验节点(以 J-3 表示)，可知二者的骨架曲线吻合度较高，如图 13 所示。

值得注意的是，采用生死单元技术的 J-4 节点承载力略低于试验值，考虑是单元过度删除所致。因为实际开裂是某处开始出现裂纹后，逐渐形成一定长度的裂缝，而每次把开裂单元删除势必放大大开裂程度，以至于模拟所得节点承载力低于试验值。

3 安装偏差容许范围的确定

由于目前尚无统一施工验收标准，装配过程中安装偏差可能会导致胶合木植筋节点受力性能受到不利影响，需要确定合理的允许偏差范围。

为研究胶合木梁柱植筋节点的允许安装偏差，采用考虑胶层开裂的生死单元技术。为避免空气湿度变化引起的木材次应力，胶合木梁柱接触界面可预留 5~10 mm 间隙^[22]，故除对应试验中存在较大安装偏差的 J-4 节点模型外，另设置 6 组安装偏差为 10、15、20、25、30、35 mm 的节点模型，与不存在安装偏差的原始试件模型进行对比，其中偏差 10 mm 作为通常预留值考虑。

通过对比 8 组模型的骨架曲线(图 14)可知，考虑安装偏差的试件组与原始试件的骨架曲线形状基本相似，但偏差值在 10、15、20、25、30、35 mm 对应的曲线集中在一个分布带内。从各试件荷载特征值(表 4)看，以 10 mm 预留值为基准，偏差在 15~25 mm 时节点承载力的降低幅度在 5% 以内，该偏差限值可作为工程质量控制参考值。

表 4 各试件荷载特征值

Table 4 Load characteristic value of each specimen

试件节点安装偏差/mm	失效荷载/kN	极限荷载/kN	失效荷载降低值	失效荷载降低幅度/%	极限荷载降低值	极限荷载降低幅度/%
10	13.98	14.36	0.00	0.00	0.00	0.00
15	13.84	14.30	0.14	1.00	0.06	0.42
20	13.63	14.04	0.35	2.50	0.32	2.23
25	13.48	13.71	0.50	3.58	0.65	4.53
30	13.14	13.36	0.84	6.01	1.00	6.96
35	12.20	12.54	1.78	12.73	1.82	12.67

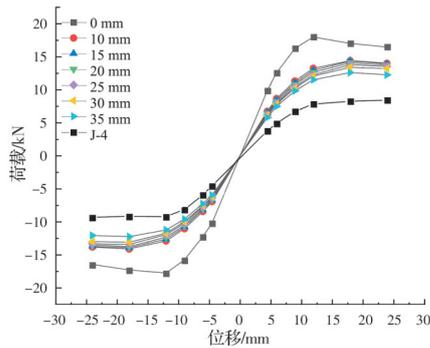


图 14 试件骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves of specimens

4 结论

考虑安装偏差影响,对胶合木结构梁柱植筋节点抗弯承载力进行了研究,设计并验证了植筋节点参数的合理性,通过数值模拟和试验方法进行了系统分析,主要结论如下:

1)为了初步校核节点梁端抗弯承载力,首先采用不考虑胶层开裂的有限元模拟进行了分析,有限元模拟方法结果与理论计算结果基本相符。

2)为了提高数值模拟的精度,引入生死单元技术模拟胶层开裂,相较于未考虑胶层开裂影响的模拟结果,基于生死单元技术的分析结果与试验吻合度较高。

3)有安装偏差节点的抗弯承载力的确会下降,安装偏差控制在 25 mm 范围以内时,相对于预留值为 10 mm 的基准,节点抗弯承载力的降低幅度在 5% 以内,建议把 25 mm 作为容许偏差限值。

4)胶合木结构植筋节点具有较大的初始刚度,低周反复荷载作用下,节点刚度退化明显,建议采用节点加强措施延缓刚度退化。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 何敏娟, 何桂荣, 梁峰, 等. 中国木结构近 20 年发展历

程[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 83-90.

HE M J, HE G R, LIANG F, et al. Development of timber structures in China during recent twenty years [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 83-90. (in Chinese)

- [3] 韩俊良, 郁有升, 王燕, 等. 木结构装配式节点研究现状[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(1): 28-33, 82.

HAN J L, YU Y S, WANG Y, et al. Research status in fabricated joint of timber structure [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(1): 28-33, 82. (in Chinese)

- [4] 房梦, 李军, 王燕. 侧面注胶式胶合木植筋抗拉拔性能试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(2): 20-25, 41.

FANG M, LI J, WANG Y. Experimental study on pull-out resistance of glued-in rod with side-injection glulam [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(2): 20-25, 41. (in Chinese)

- [5] WNN M, NH S, MK K, et al. Pull-out strength of steel rods bonded into mengkulang (*tarrietia javanica*) glulam at five different angles to the grain [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2018, 30(1): 67-74.

- [6] LING Z B, XIANG Z, LIU W Q, et al. Load-slip behaviour of glue laminated timber connections with glued-in steel rod parallel to grain [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 117028.

- [7] LING Z B, YANG H F, LIU W Q, et al. Pull-out strength and bond behaviour of axially loaded rebar glued-in glulam [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 440-449.

- [8] 凌志彬, 陆帆, 杨会峰. 胶合木植筋节点抗拔性能理论预测[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 654-662.

LING Z B, LU F, YANG H F. Theoretical prediction of withdrawal behaviour of glue laminated timber joints with glued-in rod [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2021, 43(5): 654-662. (in Chinese)

- [9] 罗立权, 杨会峰, 刘伟庆, 等. 火灾高温下木结构植筋连接的拉拔性能试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 115-123.

LUO L Q, YANG H F, LIU W Q, et al. Pull-out experiments of glued-in rod joints in timber structures

- under high temperatures in fire [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2020, 42(1): 115-123. (in Chinese)
- [10] BOUCHARD R, SALENIKOVICH A, FRENETTE C, et al. Experimental investigation of joints with multiple glued-in rods in glued-laminated timber under axial tensile loading [J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 122614.
- [11] AZINOVIĆ B, DANIELSSON H, SERRANO E, et al. Glued-in rods in cross laminated timber - Numerical simulations and parametric studies [J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 431-441.
- [12] RATSCH N, BÖHM S, VOB M, et al. Influence of imperfections on the load capacity and stiffness of glued-in rod connections [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 200-211.
- [13] 装配式木结构建筑技术标准: GB/T 51233—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Technical standard for prefabricated timber buildings: GB/T 51233—2016 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese)
- [14] 多高层木结构建筑技术标准: GB/T 51226—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Technical standard for multi-story and high rise timber buildings: GB/T 51226—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese)
- [15] 木结构设计标准: GB 50005—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of timber structures: GB 50005—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese)
- [16] TLUSTOCHOWICZ G, SERRANO E, STEIGER R. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods [J]. Materials and Structures, 2011, 44(5): 997-1020.
- [17] 何敏娟, Frank LAM, 杨军, 等. 木结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
HE M J, LAM F, YANG J, et al. Timber engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [18] Design of timber structures: EN 1995-1-1: 2004 [S]. Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, (CEN)2004.
- [19] 樊承谋, 张盛东, 陈松来. 木结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
FAN C M, ZHANG S D, CHEN S L. Basic principles of timber structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [20] 时境晶, 杨会峰. 重型木结构梁柱植筋节点的抗弯承载力研究[J]. 结构工程师, 2011, 27(4): 67-72.
SHI J J, YANG H F. Ultimate flexural capacity of beam-column glued-in rods connections of heavy timber structures [J]. Structural Engineers, 2011, 27(4): 67-72. (in Chinese)
- [21] PATTON-MALLORY M, CRAMER S M, SMITH F W, et al. Nonlinear material models for analysis of bolted wood connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(8): 1063-1070.
- [22] 王明谦, 顾祥林, 宋晓滨, 等. 胶合木梁柱嵌入钢板-螺栓拼接节点纯弯与弯剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 64-72.
WANG M Q, GU X L, SONG X B, et al. Experimental study on bolted glued laminated timber connections with slotted-in steel plates under pure bending and combined shear and bending [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 64-72. (in Chinese)

(编辑 胡玲)