

长螺杆加强型胶合木梁柱节点力学性能

舒展¹, 陈佳欣¹, 罗晶², 何敏娟³

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 201418; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 胶合木梁柱螺栓钢填板节点由于抗弯刚度较低, 在结构设计中通常被视为铰接。提出了一种长螺杆加强型胶合木梁柱节点, 为无支撑或剪力墙的中高层木结构体系中提供较好的刚性连接。设计并加工了 3 组不同长螺杆直径的节点试件, 通过单调加载和往复加载试验探究了节点的抗弯刚度、抗弯承载力、破坏模式及耗能性能。通过 ABAQUS 有限元软件建立了节点力学模型, 模拟结果与试验结果较为吻合, 并基于该模型开展了参数分析。结果表明: 该节点具有较高的抗弯刚度与抗弯承载力, 经过合理构造后节点损伤主要集中在长螺杆, 而长螺杆在破坏后易于更换, 可提高节点韧性与使用寿命。参数分析结果表明, 转动刚度与长螺杆直径及力臂呈正相关。基于试验与模拟的结果, 提出了该类节点抗弯刚度及抗弯承载力的计算方法, 为其在实际工程中的设计与应用提供参考。

关键词: 木结构; 梁柱螺栓钢填板节点; 长螺杆; 刚性连接; 可更换构件; 抗震韧性

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

Mechanical Properties of Glulam Reinforced Beam-to-Column Connection with Long Steel Rods

SHU Zhan¹, CHEN Jiaxin¹, LUO Jing², HE Minjuan³

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Glulam bolted beam-to-column connections with slotted-in steel plates are usually regarded as hinges in structural design due to their low moment-resisting properties. In this paper, an innovative glulam reinforced beam-to-column connection with long steel rods was proposed, aiming to provide good moment-resistant properties for mid-rise timber frames without braces or

infill shear walls. Three sets of specimens with different diameters of long steel rods were designed and manufactured. The stiffness, load-carrying capacities, failure modes, and energy-dissipating capacities of the specimens were analyzed based on the monotonic static loading tests and cyclic loading tests. Finite element models of such connections were developed using ABAQUS. The simulated results were proved to be consistent with the experimental results. Then, a parametric analysis was conducted based on the validated numerical models. The results reveal that the proposed connections have an excellent moment-resistant stiffness and a load-carrying capacity. The damage is mainly focused on the long steel rods following the concept of the connection. Besides, the damaged long steel rods can be replaced after being damaged, extending the seismic resilience and the life span of the proposed connections. The results from the parametric analysis show that the moment-resistant stiffness is positively associated with the diameter and the arm of long steel rods. Finally, based on the experimental and numerical results, a theoretical approach was proposed to estimate the moment-resistant stiffness and load-carrying capacity. The approach proposed provides important reference for the future design of such innovative connections in real projects.

Keywords: timber structure; glulam bolted beam-to-column connection with slotted-in steel plate; long steel rods; rigid connection; replaceable component; seismic resilience

现代木结构建筑是一种绿色、低碳、可持续的建筑^[1], 发展现代木竹结构建筑与国家“碳达峰”、“碳中和”目标高度契合。木框架结构是现代木结构中一个主要的结构体系。胶合木框架结构一般采用梁柱结构体系, 其胶合木梁和柱截面较大、间距也较

收稿日期: 2022-07-06

基金项目: 国家土建结构预制装配化工程技术研究中心沈祖炎专项基金(2020CPCCE-K01)

第一作者: 舒展, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为可持续、高性能建筑结构。E-mail: shuz@shu.edu.cn

通信作者: 罗晶, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为绿色低碳建筑。E-mail: luojing94@shnu.edu.cn



论文
拓展
介绍

大,可以形成大空间来满足建筑各项功能。

钢填板螺栓连接是胶合木框架结构中一种常见的节点形式^[2]。但试验研究表明^[3]该类连接存在一些问题,例如刚度小、抗弯承载力低、耗能差、捏缩效应明显等。我国现行规范^[4]将该节点视为铰接。此外,现有研究^[5]表明该类节点主要呈现出木材劈裂和紧固件产生塑性铰等破坏形式。该破坏往往难以修复,造成一定的经济损失。

为满足胶合木框架结构的抗侧力要求,工程中需采用抗侧力构件以增强结构的抗侧性能,例如木框架—剪力墙结构体系、木框架—支撑结构体系^[6]、木框架—隅撑结构体系^[7]等。此外也有针对该节点改进的措施来提高其抗弯刚度。例如在横纹方向打入自攻螺钉^[8-10]或光圆螺杆^[11]、采用预应力套管螺栓代替常规的节点螺栓^[12]、在连接区域采用纤维贴层^[13-15]、在连接区域采用正交胶合木^[16-17]等。这些方法在一定程度上改善钢填板螺栓节点刚度小、耗能差和延性差的问题,然而对提高梁柱木结构的抗侧性能效果仍然有限。

本文提出了一种长螺杆加强型胶合木梁柱节点,旨在为无支撑或剪力墙的中高层木结构体系提供较好的刚性连接。本文通过3种不同构造节点试件的单调加载和往复加载试验,分析该新型节点抗弯刚度、抗弯承载力等力学性能和耗能性能,通过ABAQUS有限元软件建立节点的三维力学模型,并与试验结果进行校对,基于有限元模型开展参数分析,并提出该类节点抗弯刚度及抗弯承载力的计算方法。

1 试验概况

1.1 节点设计概念

长螺杆加强型胶合木梁柱节点如图1所示。

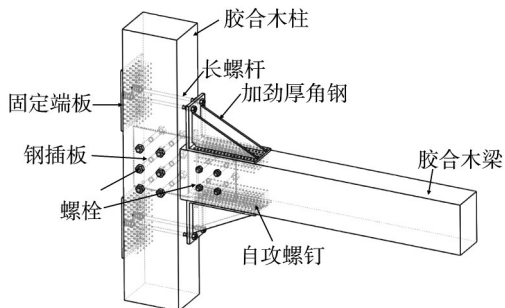


图1 长螺杆加强型胶合木梁柱节点构造

Fig. 1 Configuration of glulam reinforced beam-to-column connection with long steel rods

节点包含预开槽胶合木梁柱、钢填板、加劲角钢、自攻螺钉、长螺杆、端板等构件。该节点可以看作传统的梁柱钢填板螺栓节点添加角钢、自攻螺钉、长螺杆、端板等金属构件。在受力形式上,梁柱钢填板螺栓连接起到固定位置与传递竖向荷载的作用;而在胶合木梁上下贯穿的长螺杆则可通过拉压形变产生力偶,从而提高节点的抗弯性能。螺杆变形后易于更换,提高节点使用寿命。

1.2 试件设计

本文设计了3组不同长螺杆直径的梁柱节点,每组2个试件,分别进行单调加载试验和往复加载试验。节点构造示意如图2所示。其中节点域螺栓的边距、端距和间距均满足《胶合木结构技术规范》的要求。3组长螺杆直径分别为10.0、11.5、13.0 mm。表1为试件的参数设置。试件所选取的胶合木为TCT28云杉,材性试验得到其平均质量密度 $515 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,含水率为15%。胶合木梁和胶合木柱的尺寸分别为 $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 1\,700 \text{ mm}$ 和 $250 \text{ mm} \times 330 \text{ mm} \times 1\,620 \text{ mm}$ 。加劲角钢、钢填板和长螺杆均由Q235b钢材制成,自攻螺钉采用Eurotec的PediX-VGS $\Phi 5 \times 80 \text{ mm}$ 型号。

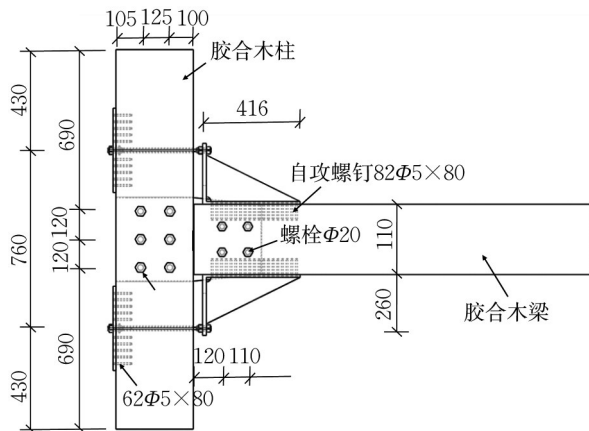


图2 节点尺寸示意(单位:mm)

Fig. 2 Configuration of the connection proposed (unit: mm)

表1 节点试件参数设置

Tab. 1 Parameters of specimens

组别	试件编号	长螺杆直径/mm	长螺杆间距/mm	加载方式
1	C1	10.0	760	单调
	W1	10.0	760	往复
2	C2	11.5	760	单调
	W2	11.5	760	往复
3	C3	13.0	760	单调
	W3	13.0	760	往复

1.3 加载装置和加载制度

试验所用加载装置如图3所示。试验在同济大学土木结构试验室进行,加载系统为邦威双通道电液伺服拟静力加载系统,加载头量程为 ± 250 mm,最大荷载为300 kN。在试验中,将胶合木柱卧放,左右用钢板顶紧防止其左右移动,上下用螺杆螺母顶紧防止其发生倾覆。这种做法为了使木柱在加载过程中保持稳定。胶合木梁末端用与水平作动器连接。位移计布置如图3所示。位移计1位于木梁作动器位置处,用于记录作动器的位移变化;位移计2和3分别位于木梁上下2排螺栓中间并呈左右对称放置;位移计4位于木柱端部;位移计5、6、7、8位于长螺杆位置处来测量长螺杆的变形。

作动器采用位移控制的单调加载制度和往复加载制度。单调加载的加载速率为 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。试件荷载下降至极限荷载的80%时停止加载。往复加载试验采用CUREE加载制度^[18],加载速率为 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。往复加载试验中的控制位移为单调试验得到的极限位移。

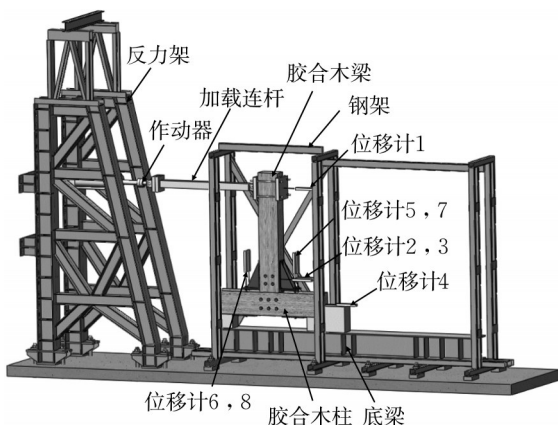


图3 加载装置

Fig. 3 Test setup

1.4 试验现象和破坏机理

1.4.1 单调加载试验

3组试件单调加载的破坏模式如图4所示。

在加载初期,C1、C2和C3试件木梁受压侧均沿螺栓列发生开裂;随着加载位移的逐渐增大,节点长螺杆变形逐渐加大而发生屈曲。由于C1、C2和C3试件长螺杆的直径各不相同,因此它们最终的破坏模式有一定差别。C1试件最终发生了长螺杆的受拉断裂,而此时木梁除了受压侧裂缝外无其他裂缝产生。C2和C3试件的长螺杆直径比C1试件更大,因此节点最终并未发生长螺杆的受拉断裂,而木梁在角钢附近发生了沿顺纹方向的劈裂裂缝,导致

节点最终失效,C3试件的长螺杆在受力过程中还发生了螺纹受剪磨平的现象。卸载试件后发现3组节点中加劲角钢、端板和螺栓基本无变形。

1.4.2 往复加载试验

3组试件在往复荷载下的破坏形态与单调加载试验类似。试件的损伤主要集中在长螺杆和木梁端部(图5)。W1试件最终发生了长螺杆的受拉断裂,W2和W3试件发生了长螺杆的受压屈曲和木梁角钢区域的严重劈裂现象。由于W2和W3试件的长螺杆直径更大,因此2组试件的木梁损伤程度较W1试件更大。将试件拆卸后,角钢、自攻螺钉、端部钢板、钢填板、螺栓均未发现明显变形。

1.5 试验结果

1.5.1 单调加载试验

图6为试验节点在单调加载过程中的弯矩转角曲线。为了对比出新型节点的增强效果,图6还展示了普通梁柱钢填板螺栓节点的弯矩转角曲线,普通梁柱钢填板螺栓节点的单调试验研究成果见文献[2],这里仅展示结果。

从图6可以看出,3组新型节点在0.003 rad之前弯矩与转角基本呈线性关系,定义该线性段刚度为3组新型节点的转动刚度。表2为节点试验结果,从表2可以看出,随着长螺杆直径的增加,节点转动刚度和抗弯承载力均有提升,但从图6看出,随着长螺杆直径的增加,节点延性下降。C1试件最终发生长螺杆断裂破坏,而C2和C3试件均为角钢侧胶合木梁劈裂破坏。C1试件的延性更好,且长螺杆破坏后易于更换,是新型节点更理想的破坏模式。与普通梁柱钢填板螺栓节点相比,新型节点的转动刚度和抗弯承载力有显著提高,对C1试件,其转动刚度提高2560%,抗弯承载力提高了590%。

判断节点是否为刚性连接除了考虑转动刚度(k)以外,还需考虑线刚度 i , $i=EI/L$,其中 E 为弹性模量, I 为惯性矩, L 为构件长度。由于梁柱胶合木节点的刚性连接难以实现,目前对其并未有明确的定义。在经典结构力学理论中,节点转动刚度超过 $4i$ 则可视作刚性连接。表2展示了各节点的 k/i 结果。考虑到单调试验中胶合木构件的转动刚度和损伤情况,对于本试验梁柱胶合木连接节点类型,建议 k/i 的值为5~7。当 $k/i > 7$ 时,胶合木梁可能先于长螺杆发生破坏,而当 $4 < k/i < 5$ 时,可能无法满足节点转动刚度要求,导致无法充分利用胶合木构件的强度。

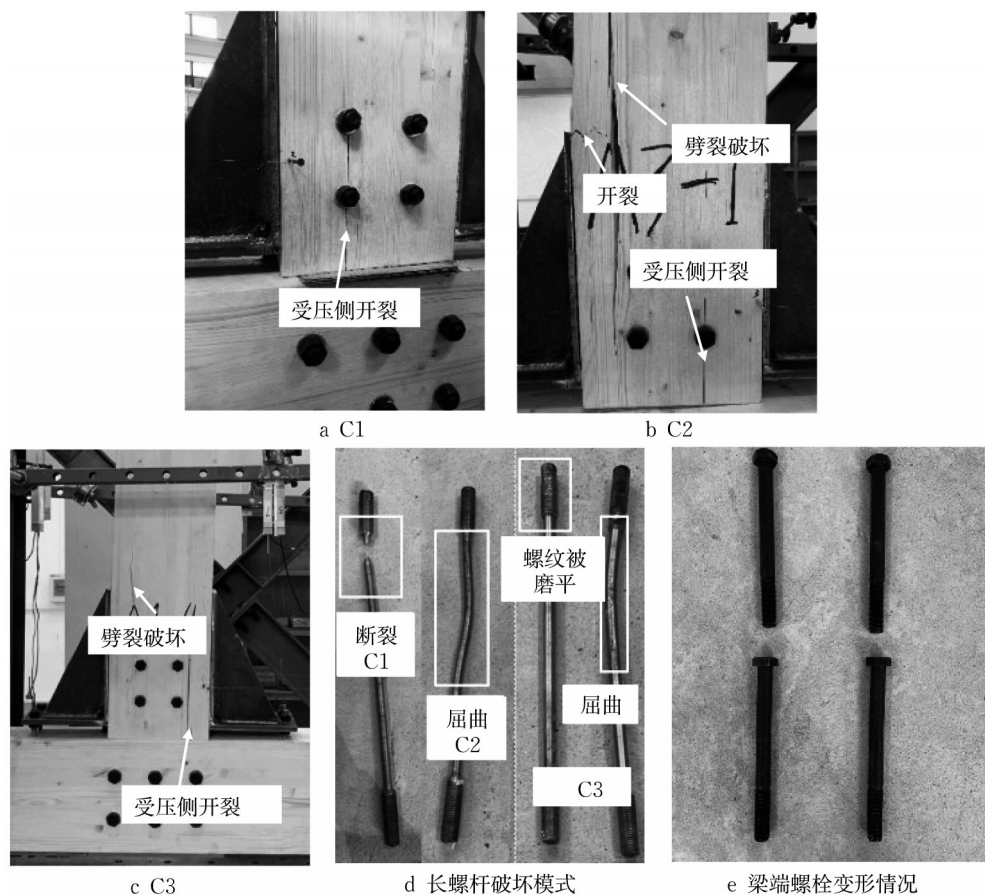


图4 单调加载下试件的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of specimens in monotonic static loading tests

1.5.2 往复加载试验

试件的弯矩-转角滞回曲线如图7所示。往复试验中节点的力学性能结果如表3所示。对于W1试件,当转角达到0.019 rad时,长螺杆发生断裂。对于W2和W3试件,其长螺杆直径较W1试件更大,但是其滞回曲线不如W1试件饱满。此外,计算表明,W1试件的等效黏滞阻尼系数随滞回圈的增加在0.08至0.22之间,而W2试件的等效黏滞阻尼系数在0.05至0.14之间,W3试件的等效黏滞阻尼系数在0.04至0.11之间。由此可见,W1试件的黏滞阻力系数为3组往复试件中最高。W1试件的变形和能量耗散集中于长螺杆上,更符合节点设计理念。因此,在节点设计时,长螺杆直径不宜过大,需考虑节点耗能影响。在设计时,节点的 k/i 值为5~7较为合理。

2 有限元参数分析

2.1 材料模型

通过ABAQUS软件建立对应的有限元模型

(FEM)。模型中涉及木材、钢材等不同材料。木材具有各项异性,顺纹及横纹的材料参数通过材性试验得到,材料模型采用Hill屈服准则,假设木材横纹各向同性。此外,销槽承压区木材的弹性模量及强度考虑到微裂缝和局部承压的影响需有一定折减,其材性参数也通过销槽承压试验得到。销槽承压区的区域为以螺栓孔中心边长为 $2.5d \times 2.5d$ 的正方形(d 为螺栓直径)。木材的弹性段力学参数见表4。此外,木材的非线性本构关系采用三折线模型,木材的三折线力学参数如表5所示。三折线参数通过荷载位移曲线计算获得,典型的试件荷载位移曲线如图8所示,屈服点通过Y&K法^[19]获得,试件的极限承载力为曲线最大值,将荷载位移曲线转化成应力应变曲线,弹性模量为曲线上10% σ_p 和40% σ_p 的直线的斜率。

钢材的本构采用双直线关系模型,其中,在弹性分析阶段,钢材和螺栓的杨氏模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比均为0.3;在塑性分析阶段,钢材的屈服应力和极限应力分别取270、550 MPa。螺栓的屈服应力和极限应力分别为640、800 MPa。

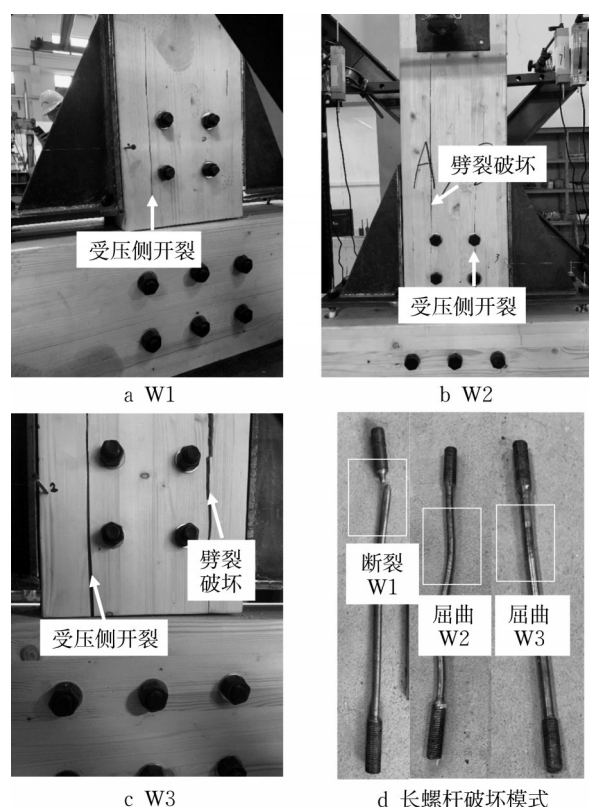


图5 往复加载下试件的破坏模式

Fig. 5 Failure modes of specimens in cyclic loading tests

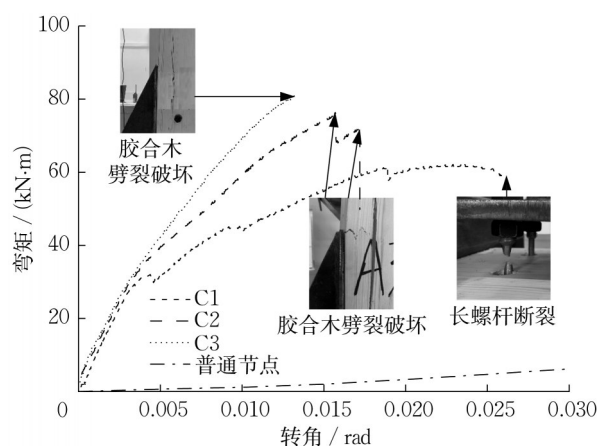


图6 单调加载下的弯矩-转角曲线

Fig. 6 Moment-rotation curves in monotonic static loading tests

表2 单调试验结果

Tab. 2 Results of monotonic static loading tests

试件编号	转动刚度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$)	抗弯承载力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	k/i
普通节点	350	10.8	0.26
C1	8 986	62.2	6.71
C2	9 664	72.0	7.21
C3	9 693	80.5	7.23

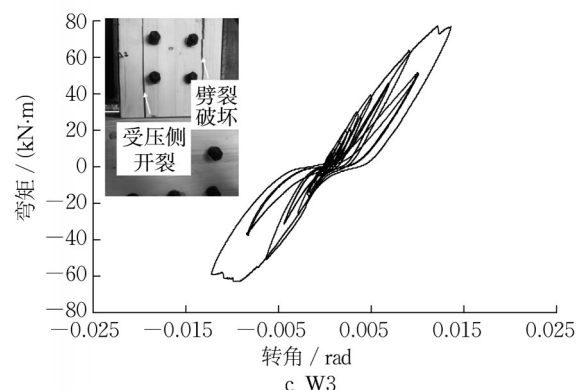
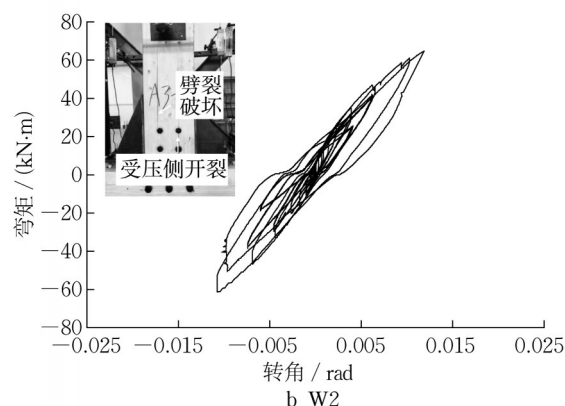
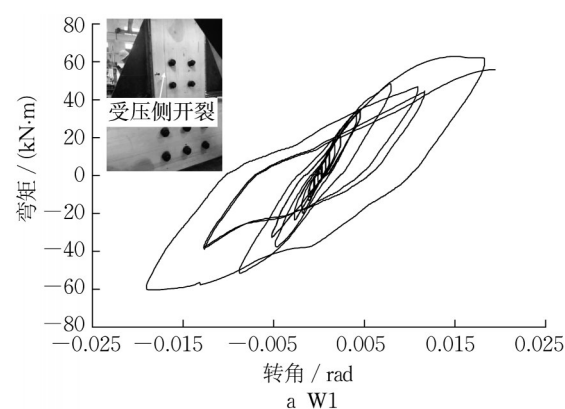


图7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves

表3 往复试验结果

Tab. 3 Results of cyclic loading tests

试件编号	转动刚度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$)	抗弯承载力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	k/i
W1	8 866	62.0	6.62
W2	10 140	64.7	7.57
W3	9 583	77.0	7.15

2.2 接触设定

在校对后的有限元模型中,螺栓与钢填板之间采用硬接触,摩擦系数为0.3;螺栓、螺帽、钢填板和木材之间的接触定义为线性,接触刚度为5,摩擦系数为0.4。角钢与木梁用自攻螺钉连接的接触面用

表 4 木材的弹性段力学参数

Tab. 4 Elastic material properties of timber

区域	弹性模量	数值/MPa	剪切模量	数值/MPa	泊松比	数值
全局	E_1	14 928	G_{12}	665	ν_{12}	0.37
	E_2	238	G_{13}	665	ν_{13}	0.37
	E_3	238	G_{23}	83	ν_{23}	0.38
销槽区	E_{1r}	850	G_{12r}	110	ν_{12r}	0.37
	E_{2r}	125	G_{13r}	110	ν_{13r}	0.37
	E_{3r}	125	G_{23r}	42	ν_{23r}	0.38

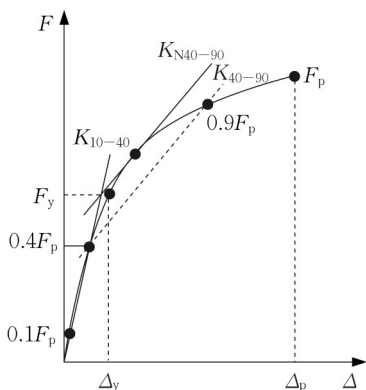
注：下标 1、2、3 分别表示木材的纵向、径向和弦向。

表 5 木材的非线性三折线力学参数

Tab. 5 Tri-linear material properties of timber

单位: MPa

参数	全局			销槽区		
	σ_e	σ_y	σ_p	σ_e	σ_y	σ_p
顺纹	31.8	38.3	33.0	28.0	37.5	28.7
横纹	3.4	4.5	6.1	8.0	13.0	16.6

图 8 Y&K 法示意^[19]Fig. 8 Y&K method^[19]

绑定约束,这是考虑到在试验中自攻螺钉未发生破坏,且角钢与木梁始终保持紧密接触。此外,加劲板与角钢、固定端板与胶合木柱均采用绑定约束。

2.3 边界及网格条件

节点模型基于 Z 平面对称,为保证模拟效率,只建立一半模型,如图 9 所示。设置参考点,并采用位移耦合的方式建立加载条件。

所有试件均采用 C3D8R 单元。对几何形状规则的实体采用规则网格,胶合木梁柱、固定端板全局种子尺寸为 20mm,长螺杆、加劲厚角钢、螺栓全局种子尺寸为 10mm,钢插板全局种子尺寸为 15mm。对螺栓、长螺杆、长螺杆孔及螺栓孔等不规则部位进行细化,在圆周上等分 8 份,以提高精确度。

2.4 数值模拟结果

C2 对应的有限元模型应力云图如图 10 所示。木材的最大应力(25 MPa 左右)发生在靠加劲厚角钢的边缘处,与试验现象吻合。此外,长螺杆与加劲

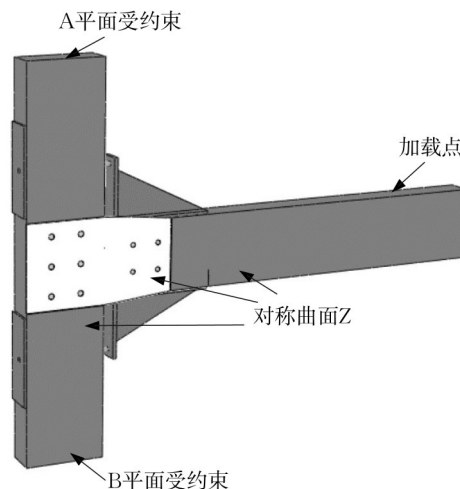


图 9 有限元模型的对称与约束

Fig. 9 Symmetry and constraints of FEMs

厚角钢的加劲板均屈服。钢填板与螺栓并未观察到明显的变形,证明其并非承担主要荷载,仅起到连接作用。

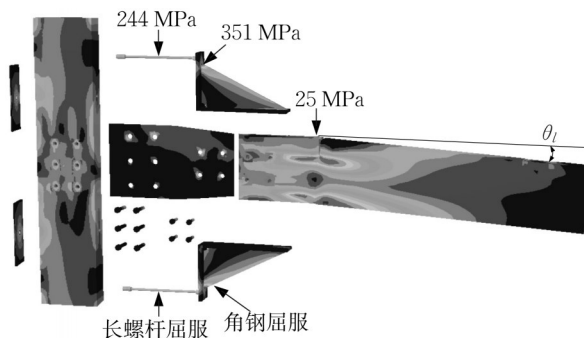


图 10 C2 节点有限元模型应力云图

Fig. 10 Mises stress of FEM for specimen C2

图 11 为 3 个模型弯矩-转角曲线有限元分析结构与试验结果的对比。从图中可见,两者前期的弯矩转角趋势总体一致,后期模型和有限元结果存在一定误差。这可能是因为长螺杆材料参数与有限元的简化材料模型存在差异。该基于 ABAQUS 有限元节点模型得到的结果可以作为节点性能数据的参考。

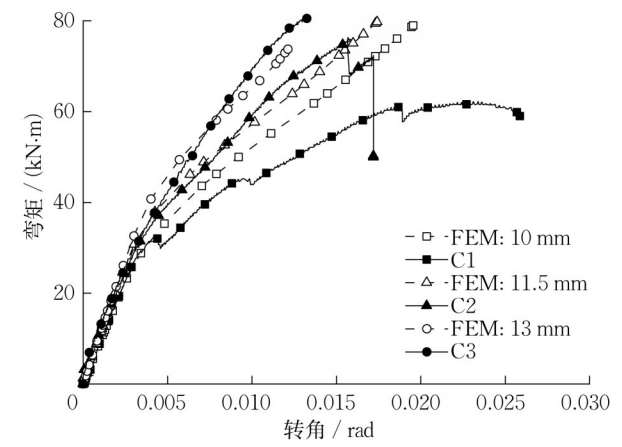


图 11 有限元与试验的弯矩-转角曲线对比

Fig. 11 Comparison of moment-rotation curves between FEMs and tests

2.5 参数分析

为研究长螺杆直径(D_s)、长螺杆力臂(L_m)参数对节点抗弯性能影响,基于有限元模型开展参数分析。表 6 展示了参数分析模型的基本参数。

图 12 为前 6 个有限元模型的弯矩转角对比图。从图中可看出,节点的转动刚度与长螺杆直径及力臂有关。当力臂一致时,与试验结果相同,抗弯刚度与长螺杆直径及力臂呈正相关。根据参数分析结果,表 7 总结了 7 个有限元模型的抗弯刚度及抗弯刚度与线刚度之比。

从表 7 可看出,节点的抗弯刚度随着长螺杆力臂的增加而增大。对于 8.5 mm 的长螺杆,当长螺杆力臂从 330 mm 增加到 380 mm 时,节点抗弯刚度增

表 6 有限元参数分析的参数设置

Tab. 6 Parameters of ABAQUS models in parameter analysis

编号	备注	长螺杆直径/mm	长螺杆力臂/mm
S1S		8.5	330
S2S		8.5	380
S3E	C1 试件拟合模型	10.0	380
S4S		10.0	330
S5E	C2 试件拟合模型	11.5	380
S6S		11.5	330
S7E	C3 试件拟合模型	13.0	380

注:长螺杆力臂为长螺杆间距的 1/2。

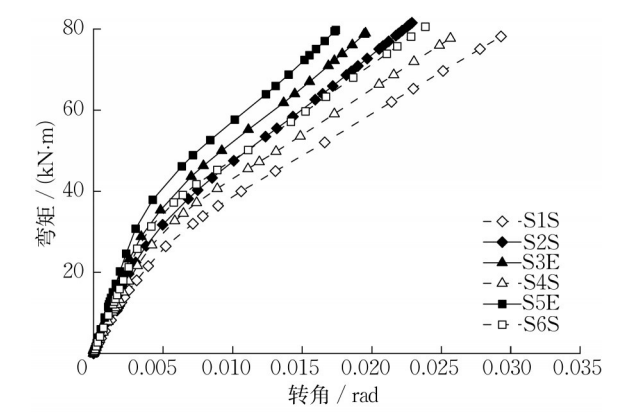


图 12 有限元模型结果对比

Fig. 12 Comparison of FEM results

加了 30%。此外,随着长螺杆直径的增加,抗弯刚度与线刚度(k/i)的比值增加,而对于模型 S1S, $4 < k/i < 5$ 时,可能无法满足节点抗弯刚度要求,导致无法充分利用胶合木构件的强度。因此,在设计节点时,长螺杆直径不宜太小,也不宜过大。

表 7 参数分析中抗弯刚度

Tab. 7 Results of rotational stiffness in parametric analysis

编号	长螺杆直径/mm	长螺杆力臂/mm	转动刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$)	转动刚度除以线刚度
S1S	8.5	330	5 717	4.3
S2S	8.5	380	7 423	5.5
S3E	10.0	380	7 838	5.8
S4S	10.0	330	6 860	5.1
S5E	11.5	380	10 175	7.6
S6S	11.5	330	8 230	6.1
S7E	13.0	380	12 093	9.0

3 节点线性抗弯刚度和抗弯承载力的计算方法

为方便工程应用,提出了一种快速预估节点线性段抗弯刚度及抗弯承载力的理论计算方法。

节点设计主要考虑以下几个目标:在长螺杆的辅助下节点具有较高的抗弯刚度和抗弯承载力;长

螺杆通过适当屈服提供耗能能力和适当的延性;长螺杆一旦破坏后,此时节点其他部分的损伤不大,可及时更换长螺杆,提高节点系统的韧性。从节点的力学试验得到,试件 C1 发生了长螺杆的屈曲和受拉断裂,C2 和 C3 发生了长螺杆的受压屈曲和木梁的劈裂裂缝。因此,可以看出长螺杆的性能对节点力学性能有关键作用。

3组节点在0.003 rad之前弯矩与转角基本呈线性关系,定义该线性段刚度为3组新型节点的转动刚度。为计算节点线性段刚度,假设长螺栓在节点转角为0.003 rad时产生的力为 F_m ,则 F_m 可由式(1)计算:

$$F_m = fA \quad (1)$$

$$A = \frac{\pi D_s^2}{4} \quad (2)$$

式中: f 为长螺杆应力; A 为长螺杆截面面积。长螺杆应力 f 可由式(2)计算:

$$f = E'\epsilon' + f_y \quad (3)$$

$$\Delta_t = \theta_c L_m \quad (4)$$

$$\epsilon' = \frac{\Delta_t}{l_0} - \frac{f_y}{E} \quad (5)$$

其中,假设长螺杆的材性本构为双折线形式; E' 和 E 分别为其塑性段和弹性段刚度; ϵ' 为塑性应变; f_y 为长螺杆屈服强度; Δ_t 为长螺杆变形; θ_c 为长螺杆转角(本文为0.003 rad); l_0 为长螺杆长度。

考虑到节点钢填板螺栓区域均未发生明显破坏,因此节点在转角为0.003 rad时,其弯矩 M_1 为长螺杆拉压力产生的弯矩。考虑到长螺杆受压时产生一定程度的高阶平面外屈曲,为了简化计算,考虑平面外屈曲的影响对承载力做适当折减。因此 M_1 由式(6)计算:

$$M_1 = 0.9 \times n \times F_m \times L_m \quad (6)$$

式中: n 为长螺杆数量。节点的弹性段刚度 k 为

$$k = \frac{M_1}{\theta_c} \quad (7)$$

值得注意的是,对式(7),当长螺杆直径较大时($k/i > 7$),受力过程中节点木梁区域将产生劈裂现象,为考虑木材劈裂对承载力的损失,结合试验结果比较,其节点弯矩建议乘以0.8的折减系数。

节点抗弯承载力可通过式(6)计算,但长螺杆应力此时取为其极限应力 f_u 。这是因为通过计算表明,取材料的极限强度所得的节点极限承载力计算结果与试验结果更吻合。但在节点设计时,建议取材料的屈服强度计算节点承载力以获得更安全的结果。

通过本节计算可以得到节点的理论抗弯承载力和线性段刚度如表8和表9所示。表中的试验值为节点单调和往复加载结果的平均值。由表可知,该方法计算的线性段抗弯刚度及抗弯承载力理论值较符合试验结果,抗弯承载力与试验结果最大误差为8.5%,抗弯刚度与试验结果最大误差为21.1%。

表8 节点的抗弯承载力理论值与试验值比较

Tab. 8 Comparison of moment-resisting capacity between experimental results and theoretical predictions

组别	理论值	试验值	误差/%
1	59.09	62.10	-4.8
2	62.52	68.35	-8.5
3	79.89	78.75	1.4

表9 节点的抗弯刚度理论值与试验值比较

Tab. 9 Comparison of rotational stiffness between experimental results and theoretical predictions

组别	理论值	试验值	误差/%
1	8 631	8 926	-3.3
2	9 132	9 902	-7.8
3	11 669	9 638	21.1

4 结论

提出了一种新型长螺杆加强型胶合木梁柱节点,基于该节点设计了3组不同长螺杆直径的节点试件,并进行了单调和往复加载试验。通过ABAQUS有限元软件建立了节点力学模型,并开展了参数分析。提出了该类节点抗弯刚度及抗弯承载力的计算方法。主要结论总结如下:

(1)试验结果表明所提出的新型节点具有较高的抗弯刚度和抗弯承载力。与普通螺栓连接相比,试验节点的转动刚度至少增加了2 560%,且抗弯承载力至少提高了590%。

(2)节点单调加载试验现象表明,节点的损伤主要集中在长螺杆上,钢填板及其螺栓无明显变形,仅起连接作用。随着长螺杆直径的不同,其最终破坏模式有一定差别。当采用合适的长螺杆直径时,节点最终呈现出长螺杆受拉破坏的形态。当长螺杆直径过大时,除长螺杆有屈曲破坏形态外,节点木梁在角钢附近发生严重的劈裂破坏。

(3)3组直径试件的往复加载试验表明,当采取合适的长螺杆直径试件时,试件滞回曲线更饱满,变形和能量耗散易集中于长螺杆上,因此,长螺杆直径不宜过大,建议转动刚度 k 与胶合木梁线刚度 i 之比的上限为7,以避免对胶合木构件造成大面积损坏。而为了满足节点的刚度要求,建议转动刚度(k)应大于胶合木梁线刚度(i)的5倍。在该节点中,长螺杆在变形后易更换,具有良好的应用前景。

(4)节点的有限元模型能较好地吻合试验结果。参数分析表明,节点的抗弯刚度随着长螺杆力臂、长

螺杆直径的增加而增大。

(5)本文提出的预估节点线性段抗弯刚度及抗弯承载力的理论计算方法与试验结果吻合较好,可为该节点的设计应用提供一定参考。

作者贡献声明:

舒展:提供研究平台,提供理论及创新思路,指导试件设计、试验研究及论文撰写。

陈佳欣:参与试验研究、建模计算及数据分析。

罗晶:参与数据分析,论文撰写及修改。

何敏娟:指导模型构建及试验研究。

参考文献:

- [1] SUN X F, HE M J, LI Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: state-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118751..
- [2] SHU Z, LI Z, YU X S, *et al.* Rotational performance of glulam bolted joints: experimental investigation and analytical approach [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 675.
- [3] 于祥圣. 胶合木标准化梁柱节点力学性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.
YU Xiangsheng. Mechanical properties on standardized beam-to-column joint of laminated timber [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构设计标准: GB 50005—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of timber structures: GB 50005—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.
- [5] 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.
WANG Mingqian, SONG Xiaobin, GU Xianglin, *et al.* Study on rotational behavior of bolted glulam beam-to-column connections with slotted-in steel plates [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(9): 141.
- [6] XIONG H B, LIU Y Y. Experimental study of the lateral resistance of bolted glulam timber post-and-beam structural systems [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014; 142(4): E4014002.
- [7] 李昌春, 刘伟庆, 欧瑾, 等. 梁柱式木结构框架抗震性能试验研究 [J]. *江苏建筑*, 2010, 3: 61.
LI Changchun, LIU Weiqing, OU Jin, *et al.* The seismic performance of the post-beam timber frame [J]. *Jiangsu Construction*, 2010, 3: 61.
- [8] BLASS H, BEJTKA I. Reinforcements perpendicular to the grain using self-tapping screws [C]//*Proceedings of the Eighth World Conference on Timber Engineering*. Helsinki: Finnish Association of Civil Engineers RI, 2004: 543-548.
- [9] LAM F, SCHULTE-WREDE M, Yao C, *et al.* Moment resistance of bolted timber connections with perpendicular to grain reinforcements [C]//*Proceedings of the Tenth World Conference on Timber Engineering*. New York: Curran Associate, 2008: 978-985.
- [10] GEHLOFF M, CLOSEN M, LAM F. Reduced edge distances in bolted timber moment connections with perpendicular to grain reinforcements [C]//*Proceedings of the Eleventh World Conference on Timber Engineering*. Washington D C: National Research Council, 2010: 970-977.
- [11] HE M J, LIU H F. Comparison of glulam post-to-beam connections reinforced by two different dowel-type fasteners [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 99: 99.
- [12] HE M J, ZHAO Y, MA R L. Experimental investigation on lateral performance of pre-stressed tube bolted connection with high initial stiffness [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(5): 762.
- [13] XIONG H B, LIU Y Y, YAO Y, *et al.* Experimental study on the lateral resistance of reinforced glued-laminated timber post and beam structures. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2017, 16(2): 379.
- [14] HALLER P, CHEN C J. Textile-reinforced joints in timber construction [J]. *Structural Engineering International*, 1999, 9(4): 259.
- [15] HALLER P, BIRK T, OFFEMANN P, *et al.* Fully fashioned biaxial weft knitted and stitch bonded textile reinforcements for wood connections [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2006, 37(4/5): 278.
- [16] BLASS H J, SCHAEDEL P. Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(11): 3018.
- [17] WANG M Q, SONG X B, GU X L, *et al.* Rotational behaviour of bolted beam-to-column connections with locally cross-laminated glulam [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(4): 04014121.
- [18] KRAWINKLER H, PARISI F, IBARRA L, *et al.* Development of a testing protocol for wood frame structures [R]. San Francisco: Stanford University, 2001.
- [19] YASUMURA M, KAWAI N. Estimating seismic performance of wood-framed structures [C]//*Proceedings of Fifth International Wood Engineering Conference*. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, 1998: 564-571.