

光圆螺杆加强胶合木梁柱螺栓节点抗侧性能

何敏娟¹, 刘慧芬¹, 高承勇², 张家华²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海现代建筑设计(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 采用光圆螺杆对节点进行横纹加强, 并通过进行胶合木螺栓连接梁柱节点在有、无光圆螺杆加强时的单调和低周往复加载试验, 研究了节点的刚度、延性、承载力、破坏模式和抗震性能。结果表明: 普通节点裂缝出现较早且发展迅速, 主要破坏模式为劈裂破坏; 采用光圆螺杆加强后, 节点的主要破坏模式为销槽承压破坏和螺栓弯曲破坏, 并且节点的承载力、延性和抗震性能得到了明显提高。

关键词: 螺栓节点; 光圆螺杆; 抗侧性能

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

Lateral Resistance Capacity of Glulam Beam-to-column Bolted Connections Reinforced by Plain Round Rod

HE Minjuan¹, LIU Huifen¹, GAO Chengyong², ZHANG Jiahua²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Xiandai Architectural Design Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to avoid the brittle failure of glulam bolted connections, a reinforcing method, which used plain round rod as reinforcement perpendicular to grain, was proposed. Through monotonic and low frequency cyclic loading tests of reinforced and non-reinforced glulam beam-to-column bolted connections, the stiffness, ductility, moment resistance capacity, failure modes and seismic behaviors of the connections were studied. The results show that the cracks of non-reinforced bolted connections appear early with rapid development and the main failure mode of non-reinforced connections is splitting, while the main failure modes of reinforced connections are wood crushing and bolts bending. Besides, the moment resistance capacity, ductility and seismic performance of the connections reinforced with plain round rod are enhanced significantly.

Key words: bolted connections; plain round rod; lateral

resistance capacity

胶合木结构节点连接是结构设计的重要内容之一, 节点连接的可靠性和有效性对木结构整体性能有着非常重要的影响^[1]。其中, 螺栓节点以制作简单、使用安全等优点^[2-3]被广泛应用于胶合木梁柱连接。

目前国内外规范中关于木结构螺栓连接的设计多是基于 Trayer^[4]和 Johansen^[5]等学者的理论, 认为在满足一定构造的要求下, 节点只发生塑性破坏, 其承载力由螺栓抗弯强度和木材的销槽承压强度决定。然而, 文献[6-7]的研究发现, 由于木材本身横纹抗拉强度和顺纹抗剪强度较低, 在满足规范规定的构造要求下, 螺栓节点仍有可能发生木材劈裂等脆性破坏, 导致节点提前失效。此外, 在梁上竖向荷载或风荷载、地震等侧向荷载作用下, 梁柱节点处产生弯矩, 节点处于弯剪复杂受力状态, 螺栓孔周横纹拉应力和顺纹剪应力较大, 节点易在孔周发生开裂^[8-9], 从而影响整体结构的延性和耗能能力。当螺栓个数较多、直径较大时这种现象尤其明显。因此, 有效地限制节点开裂对于提高节点甚至整体结构安全性有着重要意义。本文采用光圆螺杆对节点进行横纹加强, 并通过进行胶合木螺栓连接梁柱节点在有、无光圆螺杆加强时的单调和低周往复加载试验, 研究了光圆螺杆加强对节点刚度、延性、承载力、破坏模式和抗震性能的影响。

1 光圆螺杆加强节点

光圆螺杆加强节点是在普通节点的基础上, 采用光圆螺杆对木构件进行横纹加强。光圆螺杆仅在螺杆两端部分有螺纹, 用于旋紧螺母, 穿过木构件的

杆身部分光圆,如图 1 所示.光圆螺杆加强节点的构造如图 2 所示.安装时螺杆穿过木构件中的预钻孔,两端通过垫片和螺母锚固在木构件两侧,螺杆轴线与木纹方向和螺栓轴线均为正交.当对外观有要求时,可在木梁上设沉头孔,将垫片和螺母埋入孔中,以减小对构件外观的影响.当木材开裂时,光圆螺杆可承担开裂缝上的剪力,同时由于螺母和垫片的锚固作用,还能夹紧木材以限制裂缝的扩展.

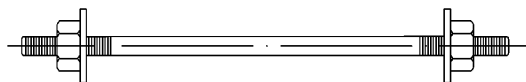
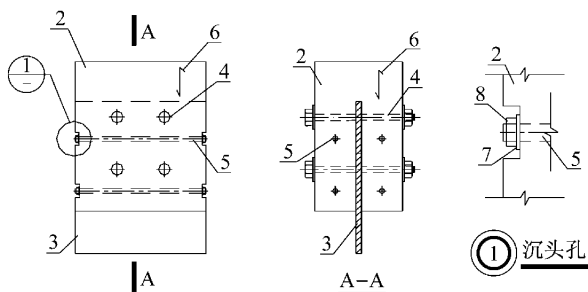


图 1 光圆螺杆示意图

Fig.1 Plain round rod



1—沉头孔;2—木构件;3—钢填板;4—螺栓;5—光圆螺杆;
6—木纹方向;7—垫片;8—螺母

图 2 光圆螺杆加强节点构造

Fig.2 Configuration of connections reinforced by plain round rod

2 试验概况

2.1 试件设计

试件共两组,编号分别为 N 和 S,其中节点 N 为普通钢填板螺栓连接梁柱节点,节点 S 在节点 N 的基础上采用光圆螺杆对节点进行横纹加强,设计简图如图 3 所示.其中木构件采用胶合木,由 SPF 2# 规格材胶合而成.根据美国规范 ASTM D143-09^[10]测得木材平均含水率为 14.58%,平均气干密度为 $408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.木构件上螺栓开孔直径为 26 mm,光圆螺杆预钻孔直径为 12 mm,插板处开槽宽度为 12 mm.螺栓采用 8.8 级 M24 普通螺栓,钢填板采用厚 10 mm 的 Q235B 钢板.光圆螺杆采用直径为 10 mm 的 4.8 级普通螺杆,垫片采用标准 M10 平垫片,其规格尺寸为内径 11 mm,外径 20 mm,厚度 2 mm.为了简化加工,试验中的木梁未设沉头孔,螺母垫片外露.每组节点各有五个试件,三个用于单调加载、两个用于低周往复加载.

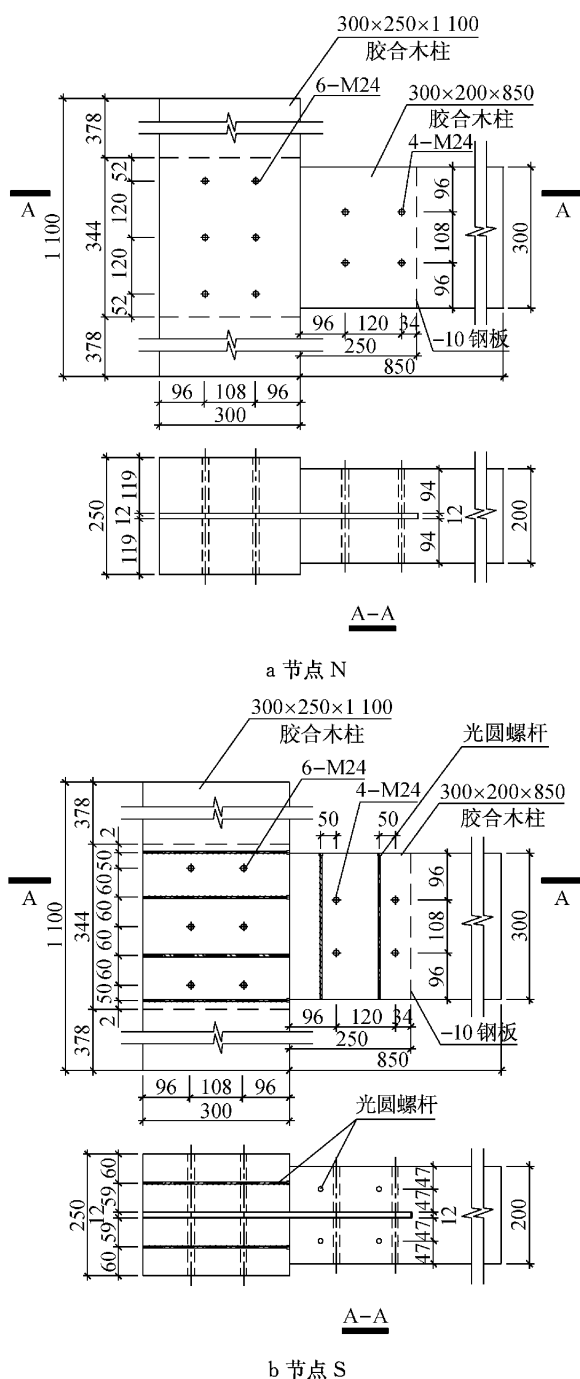


图 3 试件设计简图 (单位:mm)

Fig.3 Design of specimens (unit:mm)

2.2 加载制度及测量内容

单调加载试验参考美国试验标准 ASTM D1761-88^[11]采用单向匀速位移控制加载方式,加载速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,当试验荷载下降至极限荷载的 80% 或者试件出现严重破坏时停止试验.

低周往复加载试验参考美国试验标准 ASTM E2126-11^[12]采用 CUREE 加载制度,如图 4 所示.其中,控制位移 Δ 为单调加载中极限位移 Δ_m 的 60%. CUREE 加载中首先是六个位移幅值为

0.050 Δ 的初始循环,然后是第一个主循环,其位移幅值为0.075 Δ ,接下来主循环位移幅值依次为0.100 Δ ,0.200 Δ ,0.300 Δ ,0.400 Δ ,0.700 Δ ,1.000 Δ ,1.500 Δ 和2.000 Δ ,每个主循环后紧跟若干个次循环,其中0.075 Δ 和0.100 Δ 后所跟次循环数为六个,0.200 Δ 和0.300 Δ 后所跟次循环数为三个,0.400 Δ ~2.000 Δ 后所跟次循环数为两个.各次循环位移幅值为相应主循环的75%.

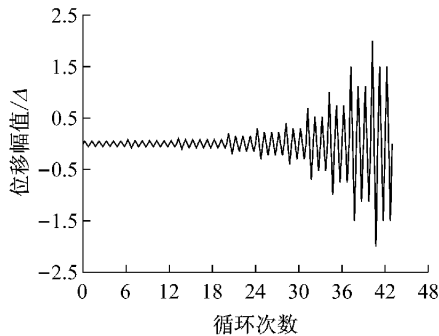


图4 CUREE 加载制度

Fig.4 CUREE protocol for cyclic loading test

为了便于加载,将胶合木柱水平固定于加载梁上,通过作动器在梁端施加水平位移使节点产生转动变形,并沿节点高度方向布置七个 YHD 型位移计测量节点的侧向位移,如图 5 所示.其中,位移计 D1 用于测量梁顶水平位移,位移计 D6 用于测量节点整体水平位移,位移计 D7、D2 和 D3 用于测量木梁的转角,位移计 D4 和 D5 用于测量钢填板的转角.通过测量加载过程中梁端所受水平荷载以及节点不同高度处的侧向位移,可得到节点的弯矩-转角曲线,以此评价节点的抗侧性能.

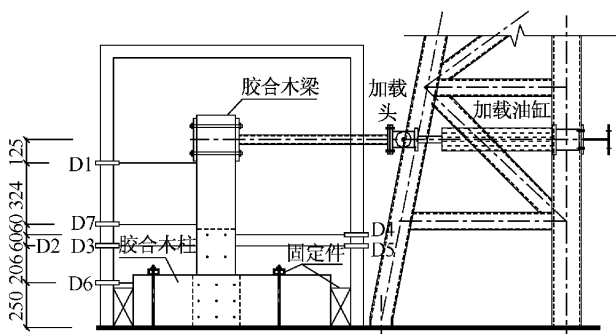


图5 试验布置图

Fig.5 Test setup

3 试验结果与分析

3.1 单调加载试验

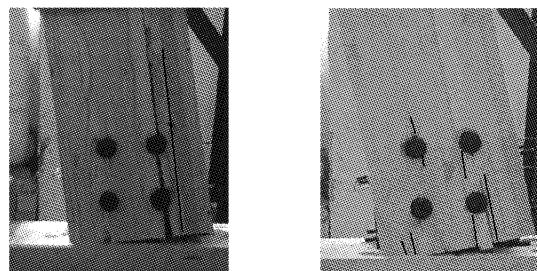
3.1.1 试验现象及破坏模式

在加载初期,所有节点均处于弹性阶段,除初始

滑移外无明显变形;随着变形的增大,节点出现初始微裂缝,但由于光圆螺杆的加强作用,两组节点的开裂顺序不同,开裂后的行为及破坏模式也不同.

对于普通节点 N,当木梁节点区转角达到 4.4° 左右时,三个试件先后于受拉侧底排螺栓下方发生开裂,裂缝从梁与柱的接触端启裂并迅速扩展至底排螺栓孔处,裂缝出现突然且伴随较大声响;随着变形的进一步增大,裂缝逐渐变宽并沿受拉侧螺栓列轴线向上发展,直至贯穿全梁.在整个加载过程中,节点 N 的三个试件仅在受拉侧螺栓列处形成一条主贯通裂缝,其他部位无明显破坏,如图 6a 所示.

对于加强节点 S,当木梁节点区转角达到 5.2° 左右时,三个试件先后在受拉侧螺栓列处出现第 1 条裂缝,由于光圆螺杆的加强作用,裂缝未向上发展;随着变形的增大,受压侧出现劈裂裂缝和梁的顺纹剪切裂缝,同时受拉侧出现列剪破坏,如图 6b 所示.从图 6 可以看出,不同于节点 N 破坏时的一条主贯通裂缝,节点 S 破坏时裂缝多且细小.



a 节点 N

b 节点 S

图6 劈裂和列剪破坏

Fig.6 Splitting and row shear

两组节点的螺栓和木孔的变形如图 7 所示.从图 7 可以看出,普通节点 N 中螺栓基本刚直,孔周木材变形不明显,可见导致其丧失承载能力的原因是主贯通裂缝的出现而非节点的塑性变形.对于加强节点 S,受拉侧顶排螺栓出现轻微弯曲变形,孔周木材销槽承压变形明显.可见采用光圆螺杆对节点进行加强后,节点的破坏模式由脆性破坏转变为螺栓弯曲破坏和木材销槽承压破坏.

节点 S 中光圆螺杆连接的破坏模式如图 8 所示.从图 8 可以看出,节点破坏时光圆螺杆未发生明显变形,但是由于螺杆垫片下方木材出现了明显的局部承压破坏(局部横纹承压变形约为 9~11 mm),导致光圆螺杆的拉结作用失效.

3.1.2 承载性能分析

本文试验中的试件,皆是梁上节点域弱于柱上节点域,节点承载性能由梁上节点域控制.因此,分析时选取梁上节点域为研究对象,假定梁上螺栓群

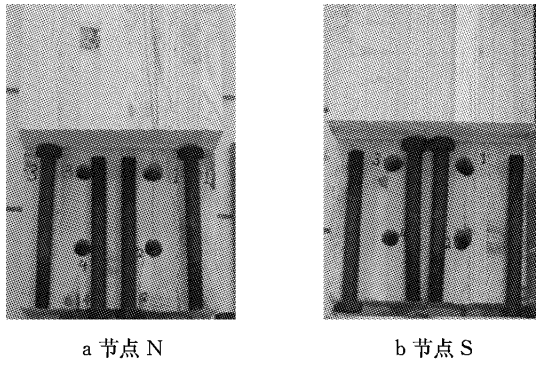


图 7 螺栓和木孔变形
Fig. 7 Deformation of bolts and timber

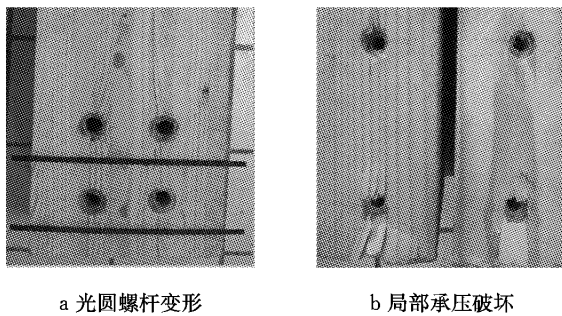


图 8 光圆螺杆连接的破坏模式
Fig. 8 Failure modes of plain round rod connection

形心处为转动中心,因试验过程中钢板无明显变形,可认为梁上螺栓群形心即为钢板上螺栓孔群形心,则梁上节点区转角即为木梁相对于钢板的转角,因此节点所承受的弯矩和转角可按式(1)~(4)进行计算,最终得到节点的弯矩-转角曲线.节点所承受的弯矩和转角表达式如下所示:

$$M = FH \quad (1)$$

$$\theta = \theta_{BS} = \theta_{BC} - \theta_{SC} \quad (2)$$

$$\theta_{BC} = \left[\arctan \frac{s_7 - (s_2 + s_3)/2}{0.12} \right] \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

$$\theta_{SC} = \left(\arctan \frac{s_4 - s_5}{0.06} \right) \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

式中: F 为加载头施加的水平力; H 为加载点至木梁螺栓群形心的高度; θ 为木梁相对于梁上螺栓群形心的转角, θ_{BS} 为木梁相对于钢填板的转角, θ_{BC} 为木梁相对于木柱的转角, θ_{SC} 为钢填板相对于木柱的转角,各转角如图 9 所示; s_7, s_2, s_3, s_4 和 s_5 分别为位移计 D7, D2, D3, D4 和 D5 测得的水平位移。

根据式(1)~(4)可得两组节点单调加载的弯矩-转角曲线,如图 10 所示.从图 10 可以看出,每组节点三个试件的弯矩-转角曲线在开裂之前相差不大,初始刚度和极限承载力的差别在 10% 以内,因此每组节点的力-变形曲线用三个试件的平均弯矩-转角曲线表示,如图 11 所示.从图 11 可以看出,在加

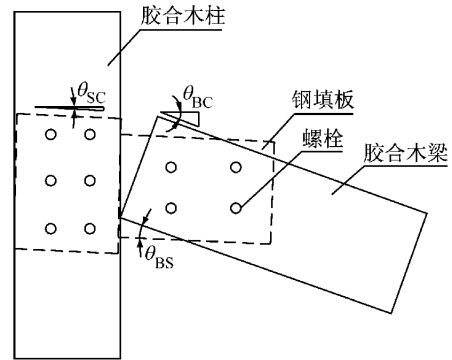
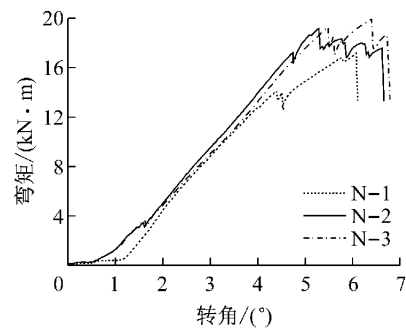
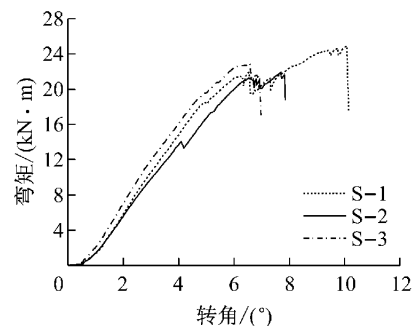


图 9 梁柱节点转角示意图
Fig. 9 Rotation of beam-to-column connection



a 节点 N



b 节点 S

图 10 单调加载弯矩-转角曲线
Fig. 10 Moment-rotation curves under monotonic loading

载初期,两组节点的弯矩-转角曲线基本呈线性关系,试件处于弹性变形阶段.当转角大约为 4.4° 时,普通节点 N 的三个试件先后出现劈裂裂缝,荷载在各螺栓之间进行重新分配,弯矩-转角曲线出现锯齿状波动,节点无法稳定承载;随着裂缝的发展,节点承载力迅速下降至极限承载力的 80% 以下,节点破坏.加强节点 S 由于光圆螺杆的拉结作用,开裂迟于节点 N,且开裂(转角约为 5.2°)后节点承载力未出现明显波动,仍可稳定承载,直到螺杆垫片下方的木材出现局部承压破坏,光圆螺杆拉结作用失效,无法限制裂缝的发展,节点逐渐破坏.

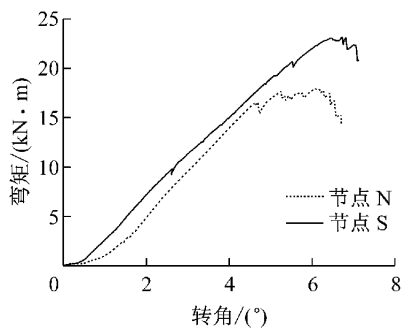


图 11 平均弯矩-转角曲线

Fig. 11 Average moment-rotation curve

两组节点的初始刚度和极限承载力如表 1 所示.从表 1 可以看出,采用光圆螺杆加强后节点的极限承载提高了 29%,初始刚度无明显变化.

表 1 初始刚度和极限承载力

Tab. 1 Initial stiffness and ultimate bearing capacity				
节点	初始刚度平均值/ (kN·m·(°) ⁻¹)	差别/ %	极限承载力平均值/ (kN·m)	差别/ %
N	4.49	3.8	17.94	6.5
S	4.47	9.6	23.18	8.4

注:初始刚度为弯矩-转角曲线中经过 10%最大弯矩点和 40%最大弯矩点的直线斜率^[13];差别=(标准差/平均值)×100%.

3.2 低周往复加载试验

3.2.1 试验现象及破坏模式

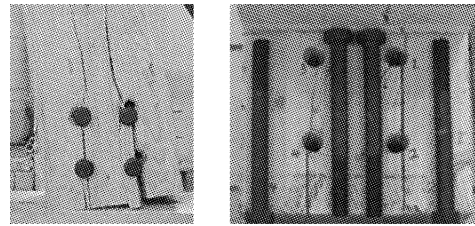
在低周往复加载试验中,节点 N 和 S 的水平控制位移 Δ 根据单调加载极限水平位移的 60%确定,分别取为 60 mm 和 100 mm.其中节点 N 的两个试件在 1.500 Δ 主循环时即发生明显破坏,故未进行主循环幅值为 2.000 Δ 的循环加载.

在低周往复荷载作用下,普通节点 N 裂缝发展较单调加载试验更充分,两列螺栓处均出现了贯通主裂缝和列剪破坏;螺栓和木孔变形不明显,节点破坏模式为脆性破坏,如图 12a 所示.加强节点 S 除了发生劈裂和列剪破坏外,上排螺栓处的木材还出现了梁的弯曲断裂破坏;上排螺栓弯曲变形和孔周木材销槽承压变形明显,节点破坏模式为塑性破坏,如图 12b 所示.

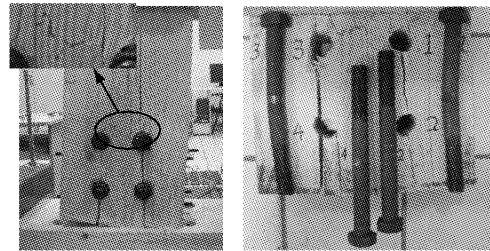
3.2.2 弯矩-转角关系

根据式(1)~(4)可得到节点在低周往复荷载作用下的弯矩-转角滞回曲线和骨架曲线,分别如图 13 和 14 所示,其中骨架曲线为滞回曲线中各级主循环峰值点的连线.

从图 13 可以看出,两组节点的滞回曲线均有明显的捏缩现象,表现为反 S 形.其中,节点 N 在最后一个主循环中承载力突然下降至极限承载力的 80%以下,节点破坏突然;节点 S 的最后一主循环峰值



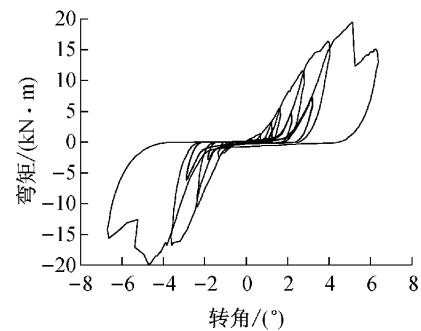
a 节点 N



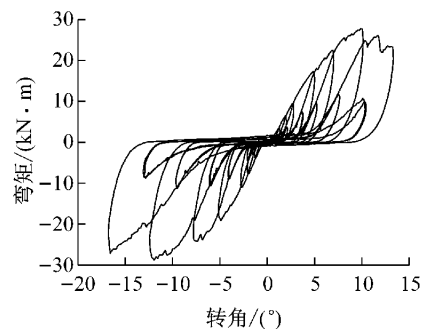
b 节点 S

图 12 往复加载破坏模式

Fig. 12 Failure modes under cyclic loading



a 节点 N



b 节点 S

图 13 弯矩-转角滞回曲线

Fig. 13 Moment-rotation hysteresis loops

和前一主循环峰值相比下降较轻微,表现出了良好的延性和抗震性能.从图 14 可以看出,节点 N 的骨架曲线只有弹性阶段,这与节点破坏为脆性破坏相吻合;节点 S 的骨架曲线表现出明显的三折线特征,即经历了弹性、屈服、极限破坏三个阶段.此外,加强节点骨架曲线的峰值点约为普通节点的 1.44 倍,可见采用光圆螺杆加强后,节点极限承载力得到了明显提高.

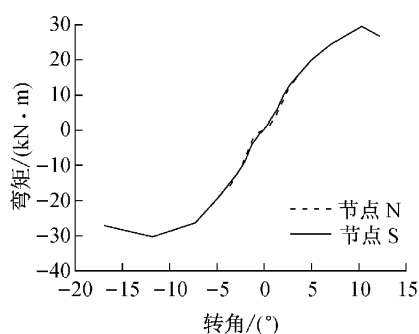


图 14 弯矩-转角骨架曲线

Fig.14 Moment-rotation skeleton curves

3.2.3 耗能能力

节点的耗能能力一般用荷载-位移滞回曲线所包围的图形面积来衡量,滞回曲线越饱满,则节点的耗能能力越强,其抗震性能也越好。此外,等效黏滞阻尼系数 h_e 也是判别节点耗能能力的重要指标之一。两组节点各级主循环的等效黏滞阻尼系数和累计耗能如表 2 所示。从表 2 可以看出,在加载初期,两组节点均处于弹性阶段,等效黏滞阻尼系数和累计耗能较小;随着变形的增大,等效黏滞阻尼系数和累计耗能呈非线性增长。通过两组节点对比可以发现,在整个加载过程中,加强节点 S 的等效黏滞阻尼系数高于普通节点 N,且其总耗能为普通节点 N 总耗能的 4.36 倍,可见采用光圆螺杆对节点进行加强可显著提高节点的耗能能力。

表 2 等效黏滞阻尼系数和累计耗能

Tab.2 h_e and energy dissipation

主循环幅值	h_e		累计耗能/kJ	
	节点 N	节点 S	节点 N	节点 S
0.200Δ	0.056	0.065	0.006	0.067
0.300Δ	0.051	0.064	0.008	0.137
0.400Δ	0.060	0.060	0.015	0.283
0.700Δ	0.072	0.092	0.744	1.665
1.000Δ	0.076	0.093	1.814	4.341
1.500Δ	0.126	0.114	4.373	10.528
2.000Δ	—	0.131	—	19.053

4 结论

(1) 普通节点破坏时,只有一条主贯通裂缝,破坏较突然,破坏模式为劈裂破坏;采用光圆螺杆对节点进行横纹加强后,有效地延缓、限制了木材的开裂,节点破坏模式由脆性破坏转变为螺栓弯曲破坏和木孔销槽承压破坏。

(2) 采用光圆螺杆加强后,节点的初始刚度无明显变化,而承载力、延性和耗能能力得到了明显提高,抗震性能得到了明显改善。

(3) 光圆螺杆加强作用失效是由垫片下方木材局部承压变形引起的,螺杆本身无明显变形。

参考文献:

- [1] 何敏娟, Lam F, 杨军, 等. 木结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
HE Minjuan, Lam F, YANG Jun, *et al.* Timber engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [2] Dorn M, De Borst K, Eberhardsteiner J. Experiments on dowel-type timber connections [J]. Engineering Structures, 2013, 47: 67.
- [3] Xu B H, Bouchair A, Taazount M, *et al.* Numerical and experimental analyses of multiple-dowel steel-to-timber joints in tension perpendicular to grain [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 2357.
- [4] Trayer G W. The bearing strength of wood under bolts[R]. Washington D C: USDA, 1932.
- [5] Johansen K W. Theory of timber connections [J]. International Association of Bridge and Structural Engineering, 1949, 9: 249.
- [6] Franke B, Quenneville P. Numerical modeling of the failure behavior of dowel connections in wood [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(3): 186.
- [7] Snow M A. Fracture Development in engineered wood product bolted connections [D]. New Brunswick: The University of New Brunswick, 2006.
- [8] Bouchair A, Racher P, Bocquet J F. Analysis of dowelled timber to timber moment-resisting joints [J]. Materials and Structures, 2007, 40(10): 1127.
- [9] Lam F, Gehloff M, Closen M. Moment-resisting bolted timber connections [J]. Structures and Buildings, 2010, 163: 167.
- [10] American Society of Mechanical Engineers. ASTM D143-09 Standard test methods for small clear specimens of timber [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [11] American Society of Mechanical Engineers. ASTM D1761-88 Standard test methods for mechanical fasteners in wood [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [12] American Society of Mechanical Engineers. ASTM E2126-11 Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
- [13] European Committee for Standardization (CEN). Design of timber structures, Part 1-1: general common rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2004.