

杆件摆放方式对平行弦木桁架承载力的影响

陈秋韵, 滕启城, 高一帆, 阙泽利

(南京林业大学木结构建筑系, 江苏南京 210037)

摘要: 通过对两种摆放方式(规格材立置和平置)的平行弦木桁架进行静载试验, 测试其上下弦各节点挠度, 分析杆件摆放方式对木桁架刚度、承载能力和破坏模式等力学性能的影响。结果表明, 规格材杆件立置的平行弦木桁架具有较高的刚度和极限承载力, 破坏以杆件劈裂为主; 而杆件平置的木桁架破坏主要发生在齿板连接的节点处。木桁架弦杆接长对其承载力影响显著, 此处安全性能要求更高, 必要时应对对接节点处进行加强处理。

关键词: 规格材; 平行弦木桁架; 杆件布置; 静载试验

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2017) 06-0020-06

Mechanical Properties of Parallel-chord Wood Truss Components with Different Chord Arrangements

CHEN Qiu-yun, TENG Qi-cheng, GAO Yi-fan, QUE Ze-li

(Department of Wooden Structure Construction Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: Parallel-chord wood trusses are widely used in floor plane systems of light timber frame structures. In practice, components of parallel-chord wood trusses could be arranged in two ways. One is lumber-on-edge truss and another is lumber-on-flat truss. In this study, deflection of top and bottom nodes of these two kinds of parallel-chord wood trusses were measured through static load tests, bearing capacity, rigidity and failure modes of the nodes were analyzed. The results showed that lumber-on-edge trusses provided a better ultimate bearing capacity and higher rigidity with components' failure as the main failure mode. When it turned to lumber-on-flat trusses, nodes failure was the main failure mode. Chord extension in wood trusses has significant influence on its bearing capacity. Therefore, butt joints shall be strengthened since the safety performance requirement is normally high.

Key words: dimension lumber; parallel-chord wood truss; components arrangement; static loading test

轻型木桁架(light wood truss)是指采用齿板连接规格材形成的一种工程木产品, 具有轻质高强、预制化程度高、安装简易等特点, 被广泛应用于木结构建筑楼、屋盖体系和城市“平改坡”工程中^[1-2]。

轻型木桁架有三角形桁架和平行弦桁架两种主要的结构形式。三角形桁架一般用于屋盖系统, 跨度在12 m以内; 平行弦桁架一般用于楼盖系统, 多用于大跨结构中, 跨度可达30~40 m。

木桁架的承载性能是木桁架评价与设计的重要指标之一。国内外学者对木桁架齿板节点连接性能、材料强度、不同结构和加载制度等影响因素, 进行了深入研究^[3-7]。在木结构实际工程中, 构成平行弦木桁架杆件的规格材有立置(图1a)和平置(图1b)

收稿日期: 2017-07-17; 修改日期: 2017-09-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“多榀木桁架设计研究”(2015BAD14B0503); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介: 陈秋韵(1992—), 女, 南京林业大学硕士研究生。

责任作者: 阙泽利, 男, 南京林业大学教授, 博士。



a. 规格材杆件立置



b. 规格材杆件平置

图 1 平行弦桁架杆件的摆放方式

Fig.1 Different chord arrangements of parallel-chord truss components

两种摆放方式,对平行弦木桁架的力学性能也有较大影响^[8-9],但目前相关研究比较有限。

我国木结构相关标准中,仅 JGJ/T 265-2012《轻型木桁架技术规程》对规格材不同摆放方式下的规格、支座反力和间隙进行了规定,尚缺少对木桁架规格材杆件不同摆放方式下承载力的验算等要求。鉴于此,笔者通过对两种杆件摆放方式的平行弦木桁架进行静载试验,探讨杆件摆放方式对平行弦木桁架承载力的影响,为实际工程应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

国产兴安落叶松 (*Larix gemlimii*) II_c 级材,有少量节子,规格为 38 mm×89 mm×4 200 mm,密度 0.657 g/cm³,含水率 17.4%,弹性模量 12.22 GPa。

国产镀锌齿板,齿板厚度 0.9 mm,板齿密度 1.2 个/cm²,板齿长 8.6 mm。齿板所用钢材弹性模量为 203 GPa,拉伸屈服强度 248 MPa。

1.2 桁架形式

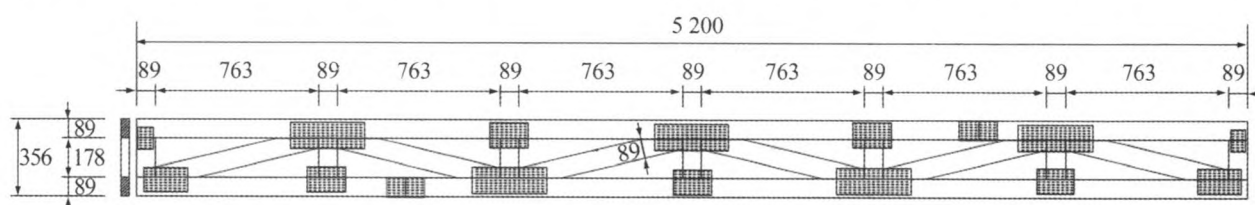
根据试验要求,设计规格材杆件立置的单槓平行弦木桁架 (PT-S1) 和杆件平置的单槓平行弦木桁架 (PT-S2),平面结构和尺寸如图 2 所示。受规格材长度限制,在桁架上下弦杆中使用齿板进行接长,在长度方向上位置错开布置。每种木桁架制备 3 个试件,在某工厂流水线上完成。

1.3 试验加载方式和装置

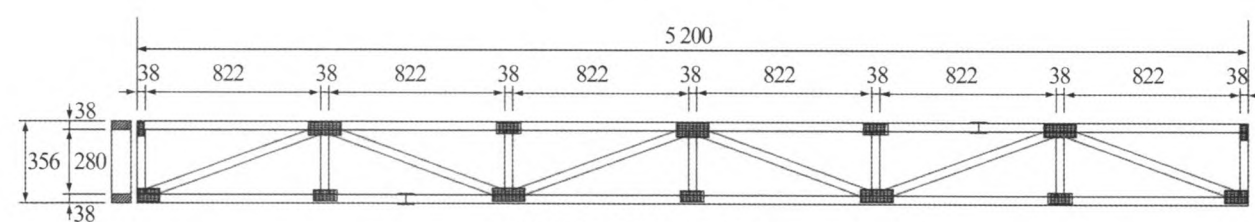
按照 GB/T 50329-2012《木结构试验方法标准》中木桁架分级加载试验方法,进行静力加载试验。加载制度包括 3 个阶段,如图 3 所示。根据 GB 50009-2012《建筑荷载规范》,计算得到木桁架的上弦节点设计承载力为 1.98 kN。

1) 预加载阶段 (T_1)。三级加载和两级卸载,均保载 30 min; T_1 结束后记录各节点残余变形。

2) 标准荷载加载阶段 (T_2)。五级加载和两级卸载, P_k 前的四级加载和卸载均保载 30 min,第 1 次 P_k 保载 1 h,第 2 次 P_k 保载 24 h,观察蠕变情况。



a. PT-S1 规格材杆件立置式



b. PT-S2 规格材杆件平置式

图 2 单槓木桁架的结构与尺寸 (单位: mm)

Fig.2 Structure and size of parallel-chord truss components

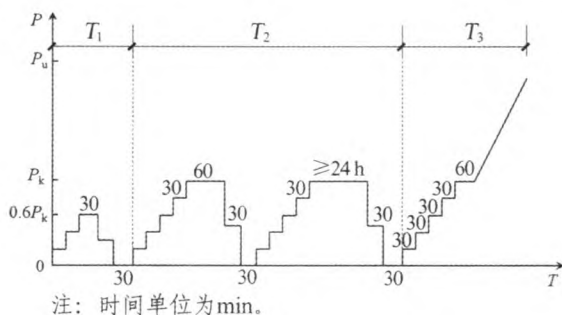


图3 木桁架分级加载制度

Fig.3 Grading loading procedure

3) 破坏性加载阶段 (T_3)。按 T_2 阶段方式加载至 P_k 后，保载 60 min，破坏加载间隔 10 min，每级 $0.2P_k$ ；当木桁架规格材杆件或节点齿板失去承载能力，或木桁架挠度急剧增大，则视为木桁架破坏，终止试验。

根据 GB/T 50329-2012 中木桁架分级加载和保载的要求，参考美国标准 ASTM E 73-2013 “Standard Practice for Static Load Testing of Truss Assemblies”，设计了如图 4 所示的木桁架节点重力加载的装置。

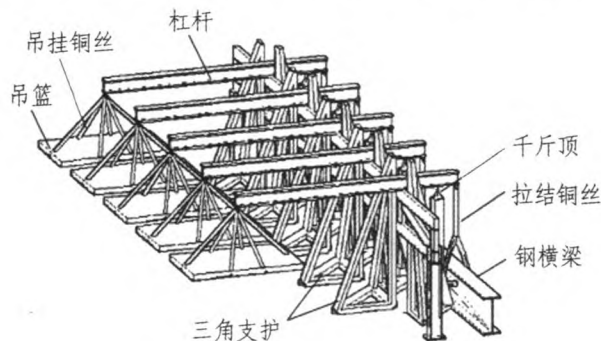


图4 木桁架静力加载装置

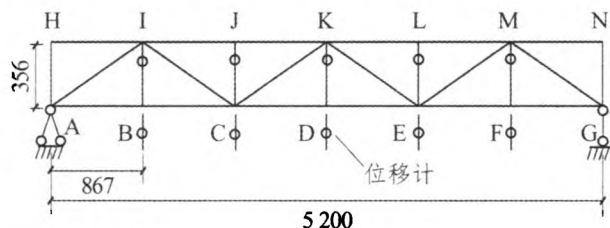
Fig.4 Device for static loading test for wood trusses

该装置采用杠杆原理（1：3 的杠杆力臂关系），对挂重进行放大，实现上弦节点处的等效集中荷载。施加重物荷载前放置工字钢杠杆和吊篮，考虑其自身重力影响，将杠杆（0.88 kN）作为前两级荷载，吊篮（0.62 kN）作为第三级荷载，因此，试验中的前几级加载为非等荷载加载。继续施加荷载，采用在吊篮中放置沙袋（质量 10 kg）的方式，吊篮中每添加一沙袋，等效于上弦节点处 0.4 kN 的作用力。卸载则采用取下沙袋、吊篮和用千斤顶顶起杠杆的方式。如此加卸载，实现图 3 所示的分级加载制度。

为避免木桁架在加载过程中出现侧倾失稳现象，在其两侧加载点附近放置三角支护（图 4）。

1.4 测试指标

试验主要测试木桁架非支座节点的挠度变化，采用量程为 50 和 100 mm 的 YWC 型位移传感器，位移计布置如图 5 所示，每 10 s 采集一次数据。



注：单位为 mm。

图5 位移计布置

Fig.5 Deflection gauges allocations

2 结果与分析

2.1 抗弯刚度

平行弦木桁架下弦的跨中节点 D 为木桁架最大变形处，可以表征两种木桁架在相同荷载作用下的不同变形情况。两种木桁架 D 节点分级加载全过程的挠度-时间曲线如图 6 所示，两者在 T_1 阶段的变形值较为接近，而进入 T_2 阶段保持荷载为 P_k 时，PT-S2 的挠度大于 PT-S1，其长期刚度低于 PT-S1；破坏阶段中，PT-S1 在 P_k 时的挠度与 PT-S2 趋于一致，表明 PT-S1 在反复荷载和长期荷载作用下，刚度发生减小。

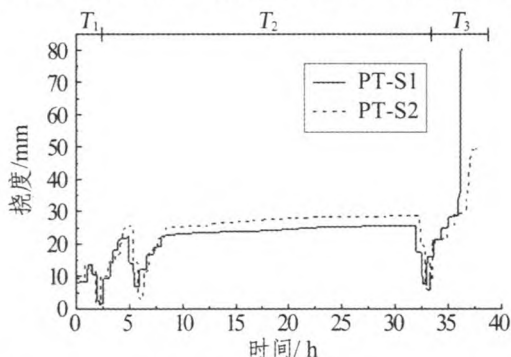


图6 两种类型桁架加载全过程 D 节点挠度变化

Fig.6 Deflection changes of node D in two types of trusses

在 T_2 阶段，分级加载 31 h。木桁架 PT-S1 各节点加载前初始挠度与卸载后挠度差值，最小 3.27 mm，最大 6.17 mm，分别占 24 h 保载结束卸载后挠度值的 0.45% 和 1.28%；PT-S2 各节点加载前初始挠度与卸载后挠度差值，最小 2.63 mm，最大 6.41 mm，分别占 0.33% 和 2.61%。表明保载 24 h 之后，两种桁架都出现了变形收敛，在 24 h P_k 保载期间变形充分。

图 7 显示 PT-S1 与 PT-S2 的下弦跨中 D 节点, 在标准荷载 P_k 作用下, 后者挠度值较前者高 20.4%; 而在长期荷载作用下, PT-S1 蠕变量相对较小。

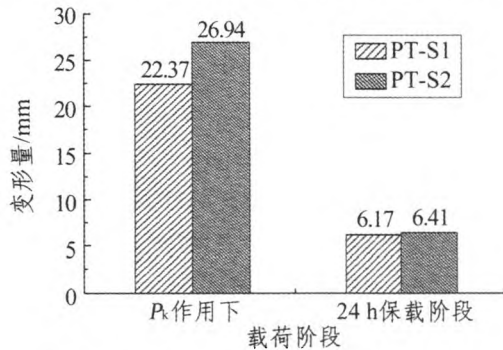


图 7 T_2 阶段不同荷载作用 D 节点变形量
Fig.7 Deformation of trusses during T_2 under different load effects

表 1 列出两种木桁架在 T_1 阶段与 T_2 阶段下弦各节点的残余变形值。

表 1 试件在 T_1 与 T_2 阶段后下弦节点的残余变形
Tab.1 Residual deflection of specimens after T_1 and T_2

加载阶段	试件编号	节点变形/mm				
		B	C	D	E	F
T_1	PT-S1	0.99	0.78	1.19	1.11	0.98
	PT-S2	0.62	1.23	1.51	1.61	1.03
T_2	PT-S1	4.31	5.8	8.04	8.6	7.69
	PT-S2	4.14	6.34	7.44	7.76	5.45

表 1 数据表明, 在 T_1 阶段, 除 B 节点外, PT-S2 下弦各节点残余变形均大于 PT-S1 的残余变形值; 在 T_2 阶段, 除 C 节点外, PT-S2 型下弦各节点残余变形均小于 PT-S1 的残余变形值。表明在受到反复荷载作用后, PT-S2 型表现出了更好的变形恢复能力。

木桁架上弦节点中 K 节点为跨中节点, J 与 L 为跨中两侧相邻节点, PT-S1 初期刚度为 9.71 N/m, PT-S2 初期刚度为 7.61 N/m。如图 8 所示, PT-S1 加载至 1.5 kN 后进入塑性阶段, 刚度减小; 而 PT-S2 的刚度减小则在荷载达到 1.9 kN 后。表明 PT-S1 木桁架的弹性阶段稍短一些, 但是刚度大于 PT-S2。

JGJ/T 265-2012 规定: 木桁架在标准荷载作用下, 上弦节间变形不应超 $s/180$, 其中 s 为桁架节间长度。本试验条件下, PT-S1、PT-S2 的 s 值分别为 763、822 mm, 由此可知, 两者的变形限值分别为 4.24、4.57 mm。实测结果为, PT-S1 的 IJ 节间挠度为 6 mm, LM 节间

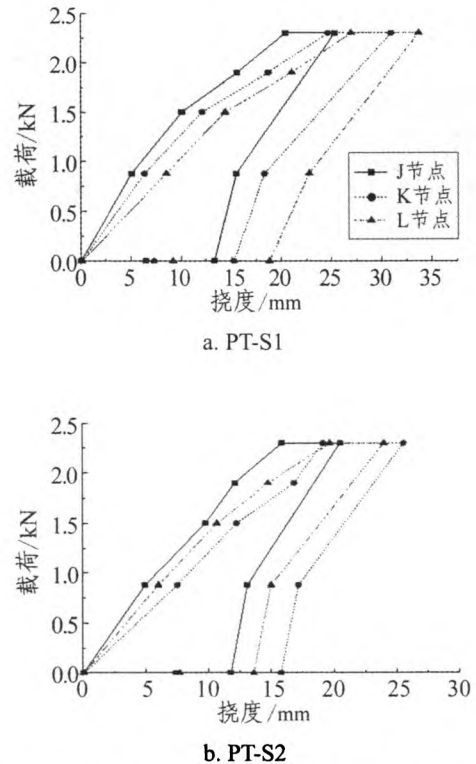
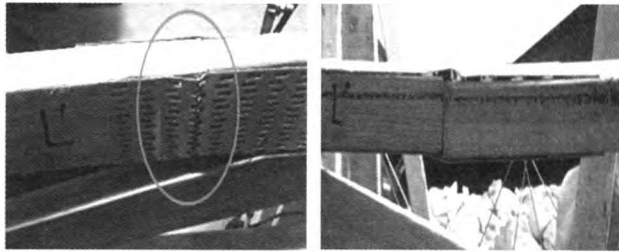


图 8 24 h 保压阶段木桁架上弦节点 J、K、L 的荷载-挠度图
Fig.8 Deflection of top chord node J, K, L during 24 h loading period

挠度为 6.67 mm; PT-S2 的 IJ 节间挠度为 6.97 mm, LM 节间挠度为 5.1 mm, 均超出规范限值, 其余节点满足规范要求。表明平行弦轻型木桁架弦杆的接长节点, 对木桁架上弦节点的变形有较大影响。

从图 8 可见, 当达到标准荷载 P_k 时, L 节点挠度值大于另一侧对称节点 J 的挠度值, 其中 PT-S1 在 P_k 保载 24 h 后, 上弦跨中 K 节点最大挠度 30.93 mm; 而 L 节点的最大挠度值为 33.71 mm, 超过了 K 节点, 及与其对称的 J 节点(最大挠度为 25.33 mm)。PT-S2 中 L 节点在标准荷载 P_k 时的最大挠度值为 23.99 mm, 亦高出 J 节点(最大挠度值为 20.51 mm)。这主要是受到 L 节点附近上弦杆接长处节点 L' 的影响。表明采用齿板接长的对接节点受力方向不同, 影响亦存在差异。

木桁架 PT-S1 上弦对接节点 L' 在反复荷载作用后, 两侧齿板均受到挤压, 在杆件接缝处鼓起, 使该节点承载能力降低, 进而对其附近节点的挠度产生影响(图 9a)。而 PT-S2 对接节点连接处的下表面齿板受拉, 上表面齿板受压, 拼缝也表现出受剪现象, 但受力特征较好, 齿板产生的变形较小(图 9b)。



a. PT-S1 上弦接长节点
两侧齿板受压鼓起
b. PT-S2 上弦接长节点
两侧齿板鼓起

图 9 T_2 阶段木桁架上弦接长处齿板的变形

Fig.9 Deflection of truss plates in lengthwise direction during T_2 period

2.2 承载能力

2.2.1 极限承载力

由于木桁架静载试验采用分级加载制度，以木桁架最终破坏的前一级总荷载作为其极限承载力。

由图 10 可知，在 3 组试验中，PT-S1 的加载级数达到 10 级，对应荷载 4.7 kN；PT-S2 加载级数为 8 级，对应荷载 3.9 kN。PT-S1 木桁架较 PT-S2 的极限承载能力平均高出 21.62%。PT-S1 破坏荷载与标准荷载的比值 k 为 2.37，PT-S2 为 1.95，表明 PT-S1 有较大的强度储备。

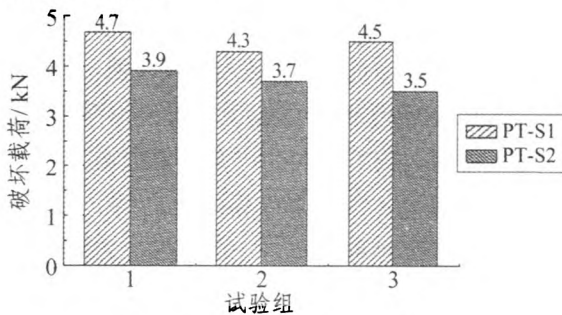


图 10 两种木桁架的破坏荷载

Fig.10 Failure load of two types of trusses

如图 11 所示，在 T_3 阶段，PT-S1 在荷载达到 3.5 kN 前，呈线性增长，随着荷载继续增加，挠度增长速率加快；PT-S2 则在荷载达到 1.9 kN 时开始屈服。PT-S1 屈服挠度 w_{y1} 与极限挠度 w_{u1} 的比值为 0.416，PT-S2 为 0.519，表明 PT-S1 强度更高，延性也更好。

2.2.2 破坏特征

PT-S1 桁架整体上以木材杆件劈裂破坏为主。荷载增加至 3.9 kN 时，在节子附近原有裂缝扩张和新裂缝产生（图 12a），导致杆件内力重分布，规格材杆件的承载能力降低^[10]。而上弦对接节点连接的齿板弯折，导致桁架上弦杆整体弯折，与腹杆和下弦

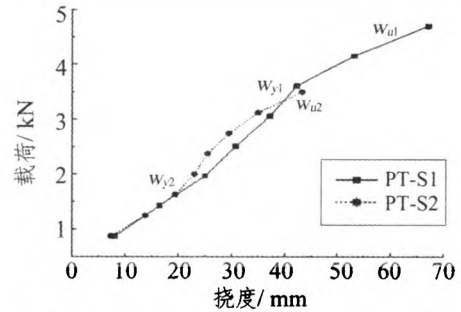
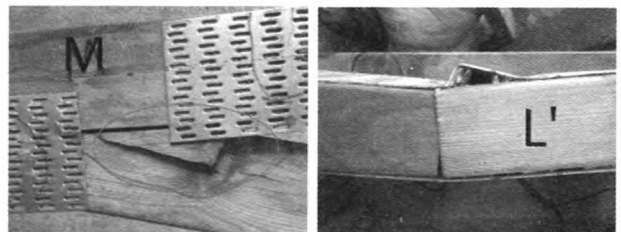


图 11 T_3 阶段木桁架下弦跨中节点的荷载-挠度曲线

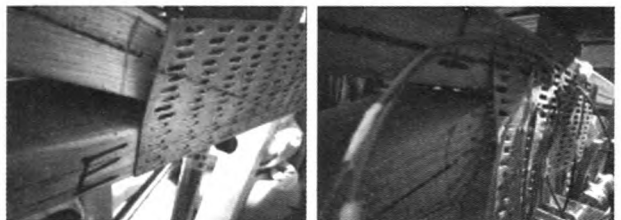
Fig.11 Load-deflection curve of center nodes in trusses during T_3 period



a. 节子附近裂纹扩大或破坏 b. 上弦对接节点齿板弯折



c. 下弦杆断裂



d. 节点齿板鼓起

图 12 PT-S1 与 PT-S2 破坏模式

Fig.12 Failure mode of PT-S1 and PT-S2

杆的错位，加速了木桁架的破坏（图 12b）。其他节点处齿板有轻微起齿和滑移。当达到极限荷载时，木桁架下弦杆规格材出现断裂（图 12c）。

PT-S2 木桁架杆件在加载过程中，并未在节子附近出现明显的木材破坏。经反复加载后，上下弦杆多个节点齿板发生鼓起，如图 12d。PT-S2 极限承载力较低，破坏阶段中荷载达到第 6 级（3.1 kN）时，部分节点齿板起齿翘起，木桁架连续发出声响。齿板起齿通常先出现在下弦节点，以上弦和下弦跨中节点最为严重，在接近极限荷载时，斜腹杆与上弦

之间的缝隙增大,多数节点齿板明显拔出,破坏形式表现为连接节点失效。

对比两种桁架每个节点钉入的齿数可以发现,PT-S1 两斜腹杆交汇的节点处齿板钉入的齿数,较 PT-S2 平均多 47 个,只连接 1 根斜腹杆的节点(A、G)处齿数,较 PT-S2 平均多 32 个。对接节点都是在规格材宽面钉入齿板,钉入齿数相当。总体而言,PT-S1 木桁架平均每个节点齿数较 PT-S2 多 36 个。

而从板齿钉入规格材相对深度而言,PT-S1 两侧齿板钉入齿深占木材截面宽度的 45.3%,而 PT-S2 仅占 19.3%,PT-S1 上齿板对规格材的拉结能力明显高于 PT-S2,这也解释了 PT-S1 可以达到较高承载力,破坏以木材劈裂为主。而 PT-S2 以连接节点处齿板起齿破坏为主,表现为多个连接节点齿板同时起齿,失去承载能力导致,其承载能力和延性不如 PT-S1。

3 结论

1) 规格材杆件立置的平行弦轻型木桁架,承载时的刚度和极限承载能力较高,但在反复荷载作用后刚度降低;规格材平置时的木桁架,整体刚度较低,但有较好的变形恢复能力。

2) 规格材杆件立置的木桁架,各节点强度较高,破坏主要为杆件破坏,多从木材缺陷处开始。规格材杆件平置的木桁架,节点强度较低,承载能力较弱,易出现多个节点同时出现起齿现象,继续加载

导致木桁架瞬间破坏。从“强节点,弱构件”的角度考虑,木桁架规格材杆件立置更为合理。

3) 木桁架弦杆接长对其承载能力以及刚度影响较大,且接长处齿板面内受力时安全性能更高。在实际工程中,平行弦木桁架跨度较大需要弦杆接长时,有必要对接节点处进行加强,如增加竖向腹杆等。

参考文献:

- [1] Ailih S, Premrov M, Kravanja S. Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility [J]. Engineering Structures, 2005, 27(1): 145-154.
- [2] 徐硕. 轻型木桁架体系在平改坡工程中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [3] 许晓梁, 马人乐, 何敏娟. 轻型木桁架静力试验及承载能力分析[J]. 特种结构, 2006, 23(1): 1-4.
- [4] 梁乾乾. 齿板滑移对轻型木桁架力学性能影响的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [5] 杨阳, 谢宝元, 费本华, 等. 三种木材齿板连接力学性能对比实验研究[J]. 木材加工机械, 2013, 24(3): 17-21.
- [6] 郭伟. 木材水分循环变化对木桁架齿板连接节点性能影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [7] 范佳南, 吕品田, 龚洪. 加载制度对轻型木桁架性能影响的试验研究[J]. 建筑施工, 2012, 34(11): 1098-1100.
- [8] Test results from an investigation of parallel-chord, top-chord-bearing wood trusses, research report 85-1 [R]. Champaign-Urbana, Small Homes Council-Building Research Council, 1985.
- [9] Bender D A, Woeste F E. Creep deflection in design of metal plate: Connected wood trusses [J]. Practice Periodical on Structural Design & Construction, 2011, 16(1):10-14.
- [10] 阙泽利, 李哲瑞, 冒海燕, 等. SPF规格材密度与节子变异特性对抗弯性能的影响[J]. 林产工业, 2016,43(3): 16-18

(责任编辑 向琴)

2018 年《中国人造板》杂志征订启事

《中国人造板》(月刊)由中国林科院木材工业研究所主办,中国林科院木材工业研究所信息中心承办,是我国专题报道人造板全方位信息的杂志。

主要面向人造板、人造板原辅材料、人造板深加工、地板、木材加工设备及配件、室内装饰、木制家具、建材等领域的广大企事业单位、营销单位、行政管理部门,报道专业性强,发行量较大,是行业的质量、技术、市场信息专家。

每月 5 日出版,大 16 开彩色印刷,国内外公开发行。全国各地邮电局(所)均可办理订阅,也可直接与本刊发行部联系订阅(汇款请注明邮编、地址、单位、收刊人、电话、订阅起止时间)。

公众微信号: zhgrzb

国际标准刊号:

ISSN 1673-5064

国内统一刊号:

CN 11-5459/S

邮发代号: 2-995

国内定价: 15 元/期 全年定价: 180 元

地址: 北京颐和园后中国林科院 70 信箱

《中国人造板》编辑部

邮编: 100091

订阅热线: 010-62888476/13488829812 (张玉萍)

广告热线: 010-62889493/15010565183 (陈怡)

