

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.033



# 多榫木桁架的静载试验及其承载能力

王菲彬<sup>a</sup>, 滕启城<sup>b</sup>, 高一帆<sup>b</sup>, 陈秋韵<sup>b</sup>, 王长菊<sup>b</sup>, 阙泽利<sup>b</sup>

(南京林业大学 a. 风景园林学院; b. 材料科学与工程学院, 南京 210037)

**摘要:**以现代木结构中的齿板连接木桁架为基础, 开发一种多榫木桁架, 研究其承载能力和抗变形能力。依据《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2012)中规定的木桁架分级加载试验方法, 对比 3 种木桁架在设计标准荷载下的变形情况和破坏加载阶段的极限承载力。结果表明, 多榫木桁架的极限承载力能达到其设计标准荷载的 2 倍以上, 具有良好的安全储备性能; 设计时需严格验算木桁架的节点齿板承载力, 以满足相应木桁架承载力水平的要求; 组成多榫木桁架的单榫之间通过木销连接, 具有较好的协同效应, 能有效解决单榫的失稳问题; 木销连接是一种有效的多榫连接方式, 能达到多榫木桁架极限承载力高于单榫之和的目的, 使其抗变形能力更优。

**关键词:**木桁架; 静载试验; 承载能力; 抗变形

**中图分类号:** TU366.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2019)02-0086-07

## Static load test and bearing capacity of timber girder truss

Wang Feibin<sup>a</sup>, Teng Qicheng<sup>b</sup>, Gao Yifan<sup>b</sup>, Chen Qiuyun<sup>b</sup>, Wang Changju<sup>b</sup>, Que Zeli<sup>b</sup>

(a. College of Landscape Architecture; b. College of Materials Science and Engineering,

Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China)

**Abstract:** Wood truss connected with metal plate is an important structural component widely used in modern timber structures. A new type of girder truss was developed and its bearing capacity and anti-deformation ability of light wood truss were studied. According to multi-stage loading test method specified in *Standard for test methods of timber structures* (GB/T 50329-2012), the deformation of 3 kinds of wooden trusses under standard design load and the ultimate bearing capacity during the destructive loading stage were compared. The test results showed that ultimate bearing capacity of wood truss is more than twice the standard design load which means the truss has great safety margin. During the course of design, the bearing capacity of the metal plate joints of the timber truss must be strictly checked to meet the basic requirements of corresponding bearing capacity of the truss. Several single trusses combined into girder truss by wooden dowel which have great synergistic effect can effectively solve the instability of the single truss. Wooden dowel joint is an effective connection for girder truss, which makes the bearing capacity of

**收稿日期:** 2018-01-31

**基金项目:** "十二五"国家科技支撑计划(2015BAD14B05); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

**作者简介:** 王菲彬(1973-), 女, 主要从事园林景观与木结构研究, E-mail: 156096113@qq.com。

阙泽利(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: zeliq@njfu.edu.cn。

**Received:** 2018-01-31

**Foundation item:** National Science & Technology Pillar Program During the Twelfth Five-year Plan Period (No. 2015BAD14B05); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (No. PAPD)

**Author brief:** Wang Feibin (1973-), main research interest: landscape and wood structure, E-mail: 156096113@qq.com.

Que Zeli (corresponding author), PhD, professor, E-mail: zeliq@njfu.edu.cn.

girder truss exceeds the sum of several single trusses and anti-deformation ability much better than single ones.

**Keywords:** timber girder truss; static load test; bearing capacity; anti-deformation

轻型木桁架(light wood truss)作为一种重要的工程木产品在欧美等国家的木结构建筑中得到了广泛应用。轻型木桁架以其轻质高强、预制化程度高以及施工灵活等优势,不仅用于多种结构形式的现代木结构屋盖、楼盖体系,在城市老旧房屋“平改坡”工程中也得到了大力推广和应用<sup>[1-2]</sup>。在轻型木桁架屋盖和楼盖体系中,存在一些特殊位置的木桁架,该类桁架除受到上部均布荷载外,还同时承担与其搭接的木桁架传递的集中荷载,其受力较为复杂,普通单榀木桁架难以满足实际要求<sup>[3]</sup>。此外,随着大型公共木结构和大跨度结构的发展,一些大跨、悬挑结构中也更需要具有更大承载能力的木桁架<sup>[4]</sup>。实际工程中,提高木桁架承载能力的方案有:采用大截面规格材加工木桁架;将多个相同结构的单榀木桁架通过连接件组合形成多榀木桁架(girder truss)。《轻型木桁架技术规范》(JGJ/T 265—2012)<sup>[5]</sup>中仅对采用钉连接的多榀木桁架作了钉行数和间距的要求,且钉连接具有易锈蚀,不美观等缺点,而木质连接件在这方面有较大的优势<sup>[6-7]</sup>。

木桁架是建筑中重要的结构构件,其承载能力关乎整体结构的安全性能。许晓梁等<sup>[8]</sup>通过多组试验研究了轻型三角形木桁架的荷载-变形关系及可能的破坏形式。况宜<sup>[9]</sup>采用应变花观测轻型三角形木桁架齿板的应力变化,分析了齿板连接节点的受力性能。阙泽利等<sup>[10]</sup>结合多榀木桁架的连接节点性能、承载性能与破坏机理等系统地分析了多榀木桁架的研究现状和发展趋势。目前,对组合型轻型平行弦木桁架的试验研究鲜有报道,笔者采用木销连接制备一种多榀木桁架,并与构成多榀中的单榀木桁架、与多榀等厚的单榀木桁架形成对照,深入研究该多榀木桁架的承载能力、抗变形能力以及破坏机理,探究木桁架承载能力的主要影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验所用的单榀轻型木桁架由齿板连接规格材滚压而成。规格材为俄罗斯进口落叶松(*Larix gemlinii Rupl.*),材质等级为 II c 级,密度为 0.657 g/cm<sup>3</sup>,平均含水率为 17.4%,规格材基础材料性能如表 1。齿板采用中国产镀锌齿板,齿板厚 0.9

mm,板齿面密度为 1.2 个/cm<sup>2</sup>,齿长 8.6 mm,齿板所用钢材弹性模量为 203 GPa,屈服强度为 248 MPa。连接多榀木桁架的木销为榉木(*Schneider Zelkova*)光面销,直径 16 mm,长 12 cm。

表 1 规格材基础材料性能

Table 1 Properties of dimension lumber MPa

抗弯弹性模量	抗弯强度	顺纹抗压强度	顺纹抗拉强度	横纹抗压强度
12 220.9±3.21*	85.32±1.18*	45.15±2.30*	10.21±1.25*	7.60±1.80*

注:标\*值为标准差。

### 1.2 桁架形式

试验设计了普通单榀平行弦木桁架(PT-S)、大截面单榀平行弦木桁架(PT-D)和新型多榀木桁架(PT-G),除截面不同(如图 1),3 种木桁架具有如图 2 所示的相同结构形式和平面尺寸。PT-S 是由 MiTek 公司的木桁架结构设计和滚压式轻型木桁架流水线完成的结构拆分和构件制备。PT-G 由 2 个相同结构的 PT-S 采用木销连接而成,如图 3。多榀木桁架木销连接的位置依据平行弦桁架的受力特点,设定在多榀木桁架上、下弦每节间的中部<sup>[11]</sup>,销孔直径为 15.5 mm,木销旋入后形成过盈配合。平行弦桁架受上部均布荷载作用时,若将上下弦每个节间视为一根简支梁,其中部弯矩最大,剪力最小。弦杆的销孔会降低其抗剪性能,所以,将木销连接的位置设定在木桁架受到上部均布荷载时剪力最小处,即每节间的中部,最大程度减小弦杆开孔所产生的不利影响。

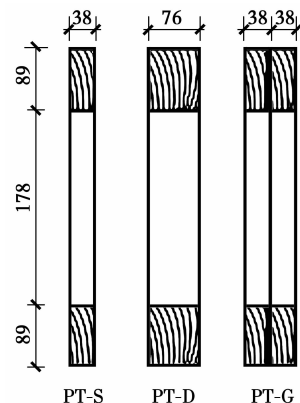


图 1 3 种木桁架侧面结构示意图

Fig. 1 Side schematic diagram of three kinds of truss

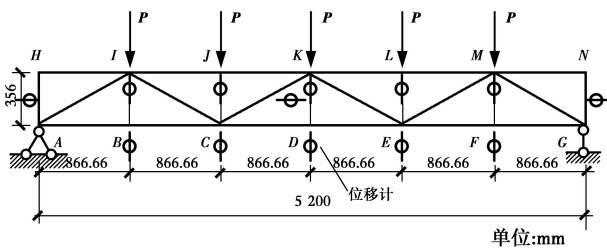


图 2 桁架平面图、位移传感器布置及加载示意

Fig. 2 The plan of floor truss, arrangement of displacement sensors and loading diagram

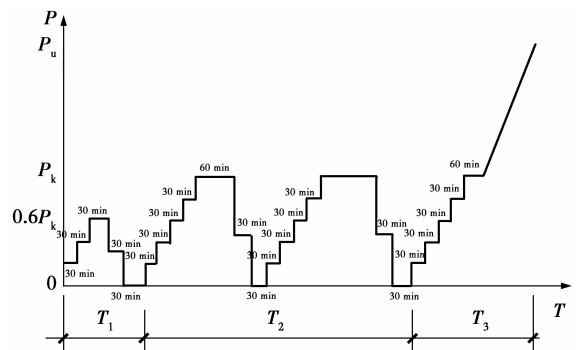


图 4 木桁架试验分级加载制度

Fig. 4 Multi-stage loading system for truss test

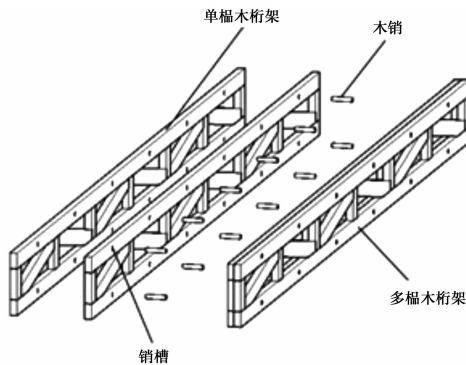
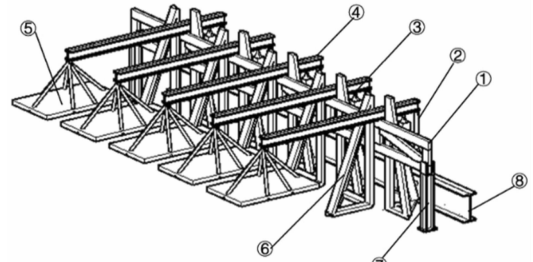


图 3 多榀木桁架构成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of girder truss

#### 1.4 加载方式

为实现木桁架逐级加载和满足对木桁架保载的要求,参考美国标准 ASTM E73-13<sup>[13]</sup>中推荐的桁架节点重物加载的方式,自主设计一套如图 5 所示的木桁架静载试验加载装置。



注: ①木桁架;②拉结钢索;③千斤顶;④工字钢杠杆;⑤吊篮;⑥支护;⑦支座;⑧锚固工字钢地梁

图 5 木桁架静载试验加载装置

Fig. 5 Truss assemblies with point loading

采用杠杆原理对配重进行放大,工字钢杠杆长 2 m,采用 1:4 的力臂关系,实现等效集中荷载作用于木桁架上弦各节点。加载时在吊篮上放置精确称量的沙袋,质量为 10 kg,每加一个沙袋,等于在木桁架上弦杆节点施加 0.4 kN 的作用力。

#### 1.5 测试项目

测试项目为木桁架在分级加载过程中桁架上下弦节点的挠度。通过接入 TDS-530 型数据采集仪的 10 个 YWC 型位移传感器,对桁架各节点各阶段下的变形情况进行持续、原位自动采集,采集频率为 0.1。位移传感器布置位置如图 2 所示。

## 2 结果及分析

### 2.1 试验结果

木桁架静力加载试验采用分级施加的方式,以桁架最终破坏时加载的级数作为最终加载级数,破坏前的一级为木桁架的极限荷载。3 种桁架的极限荷载和各阶段下弦跨中最大挠度如表 2 所示。

### 1.3 确定标准荷载

《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2012)<sup>[12]</sup>中的木桁架分级加载试验方法将加载程序分为 3 个阶段:预加载阶段  $T_1$ 、标准荷载加载阶段  $T_2$  和破坏性加载阶段  $T_3$ ,如图 4。单榀木桁架(PT-S)的上弦节点设计承载力计算时选取《木结构建筑》(14J924)中楼盖平行弦桁架和楼盖木桁架的常见安装间距 406 mm,应用《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)恒载和活载分项系数计算。

恒荷载标准值: $0.885 \times 0.406 = 0.359$  kN/m

桁架自重: $0.106 \times 0.406 = 0.043$  kN/m

雪荷载标准值: $0.5 \times 0.406 = 0.203$  kN/m

活荷载标准值: $2.0 \times 0.406 = 0.812$  kN/m

荷载设计值: $(0.359 + 0.043) \times 1.2 + (0.203 + 0.812) \times 1.4 \approx 1.9$  kN/m

节点所受荷载: $1.9 \times 5.2 \div 5 \approx 1.98$  kN

得到木桁架上弦节点设计承载力为 1.98 kN。两对照组单榀木桁架 PT-S、PT-D 以 1.98 kN 标准荷载进行 3 阶段分级加载;多榀木桁架 PT-G 以 1.98 kN 标准荷载进行  $T_1$ 、 $T_2$  两个阶段试验(PT-G1)后,再以 2 个单榀木桁架的标准荷载,即 3.96 kN,作为  $T_2$  阶段的新标准荷载进行 3 阶段加载试验(PT-G2)。

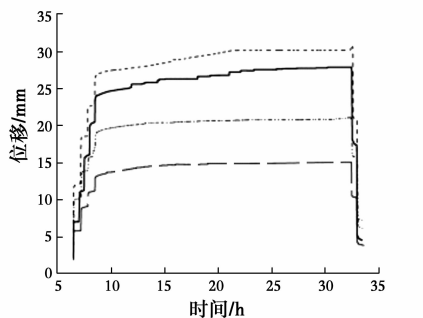
表 2 3 种木桁架分级加载试验结果  
Table 2 Results of three kinds of truss test

试件	最终加载等级	极限荷载 $P/kN$	下弦跨中 $D$ 最大挠度/mm							
			预加载时	预加载后空载	标准荷载下	24 h 保压开始时	24 h 保压结束后	24 h 保压后空载	极限荷载下	最大位移
PT-S	10	3.9	14.8	1.08	27.08	27.31	30.92	7.33	54.05	63.64
PT-D	11	4.3	11.22	1.79	18.97	19.39	21.23	6.18	59.52	88.05
PT-G1			8.19	1.04	13.12	13.51	15.16	3.91		
PT-G2	18	8.7	14.75	0.59	24.41	24.43	28.01	4.58	94.61	100.23

注:PT-G1 以  $P_k$  为标准荷载,PT-G2 以  $2P_k$  为标准荷载。

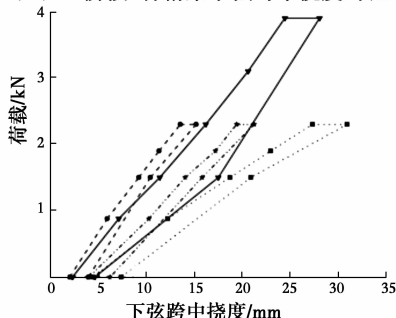
2.2 标准荷载阶段下弦跨中挠度对比

图 6(a)为标准荷载阶段  $T_2$  下 3 种木桁架的下弦跨中挠度的对比,可以看出,在 1.98 kN 标准荷载下,PT-G1 的下弦跨中挠度  $<$  PT-D  $<$  PT-S,且 PT-G2 在 3.96 kN 标准荷载时的下弦跨中挠度仍比 PT-S 在  $P_k$  时小约 2.5 mm。结合表 2 和图 6(b),24 h 持续保载 1.98 kN 标准荷载阶段中,3 种桁架 PT-S、PT-D、PT-G1 的蠕变量分别为 3.61、1.84、1.65 mm,24 h 保压后荷载卸载为零时 3 种木桁架的残余变形为 2.9、2.23、1.95 mm。PT-G2 在 3.96 kN 标准荷载时 24 h 的蠕变量为 3.59 mm,接近 PT-S 在  $P_k$  时的 24 h 蠕变量,卸载后的残余变形为 2.32 mm,远小于 PT-S。



注: --- PT-S - · - PT-D - - - PT-G1 — PT-G2

(a)  $T_2$  阶段 3 种桁架下弦跨中挠度对比



注: ··· PT-S - · - PT-D - - - PT-G1 — PT-G2

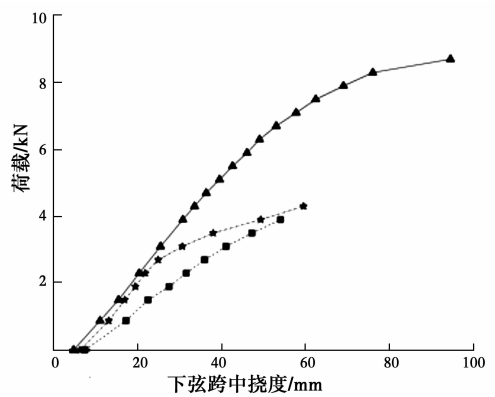
(b) 24 h 保压阶段 3 种木桁架荷载-挠度关系

图 6 标准荷载阶段木桁架的挠度特征

Fig. 6 The deflection of truss in  $P_k$

2.3  $T_3$  阶段荷载与下弦跨中挠度的关系

图 7 为破坏阶段每级荷载与挠度关系曲线。PT-D 在加载到 2.7 kN (第 6 级荷载) 前与 PT-G2 的挠度曲线较为接近。PT-S 在整个破坏阶段的挠度曲线呈现较好的线性,PT-D 在荷载达到 2.7 kN 前,荷载-挠度曲线保持线性,继续加载后变为明显的非线性,木桁架 PT-D 的下弦跨中挠度逐渐增大,直至破坏。PT-G2 在加载到标准荷载及后续分级加载到第 12 级 (6.7 kN) 时,荷载-挠度曲线均保持线性,随后木桁架的挠度增大逐渐加快,且在第 17 级荷载时急剧增大,木桁架最终在第 18 级荷载时破坏。线性阶段的刚度为 PT-G 与 PT-D 较为接近,但明显大于 PT-S。



注: ··· PT-S - · - PT-D — PT-G2

图 7  $T_2$  阶段标准荷载-挠度图

Fig. 7 Load-deflection curve in  $T_2$

2.4 破坏现象与分析

木桁架在预加载  $T_1$  阶段分级加载中没有出现明显破坏现象,卸载至零后,位移计仍显示的即为木桁架的残余变形,木桁架的残余变形均较小,在 1 mm 左右,只有 PT-G 的残余变形较大,为 1.79 mm。SPT-G2 的预加载后残余变形为 0.59 mm,远小于 SPT-G1 的残余变形,即经过一次 1.79 kN 标准荷载加载后,木桁架 SPT-G 的预加载后残余变形

明显减小,证明了残余变形主要由木桁架杆件之间的加工间隙经过预加载后变为紧密而形成。

单榀木桁架(PT-S)分级加载至标准荷载时,未出现明显的现象,木桁架工作良好。在  $T_3$  阶段破坏性加载至 2 倍标准荷载后,木桁架的下弦跨中挠度没有出现急剧增大,但上弦逐渐出现明显的侧倾现象,最终因为木桁架(PT-S)的上弦杆扭转屈曲破坏(如图 8),导致结构完全失去承载能力,属于平面外失稳。单榀木桁架(PT-S)支座支承面和节点承载面的截面宽度仅为 38 mm,在木桁架跨高比较大时极易出现失稳现象。



图 8 PT-S 失稳破坏现象

Fig. 8 Instability and the failure of PT-S

相比之下,单榀木桁架(PT-D)试件的厚度为 76 mm,在分级加载过程中没有发生失稳。PT-D 在  $T_3$  阶段加载至标准荷载过程中未出现明显现象,继续加载,下弦挠度逐渐加速增大,在 4.3 kN(第 10 级)后一级加载后立即出现 K 节点处齿板拔出,斜腹杆脱落(如图 9),木桁架整体结构失效。破坏过程中未产生木材断裂的声音,脱落的斜腹杆没有明显破坏特征。木桁架(PT-D)的整体失效呈现脆性破坏特征。



图 9 木桁架 PT-D 破坏现象

Fig. 9 Destructive phenomenon of PT-D

在  $T_3$  阶段,多榀木桁架(PT-G)分级加载前期,木桁架没有出现明显现象,直至荷载达到 6.7 kN(第 12 级)时,可以观察到木桁架整体发生了明显弯曲变形,继续施加荷载,中部多个节点处齿板发生变形、轻微起齿和板齿错位。PT-G 中一单榀桁架的

下弦 AB 节间上存在一较大活节,而节子产生的应力集中容易最先导致破坏<sup>[14]</sup>。在施加 18 级荷载后多榀木桁架(PT-G)下弦杆在 AB 节间发生断裂(如图 10),但在另一单榀的承载下,多榀木桁架(PT-G)仍保持着木桁架的有效结构,直至 10 多分钟后由于下弦接长处齿板被剪断,桁架最终破坏。



图 10 PT-G 破坏现象

Fig. 10 Destructive phenomenon of PT-G

## 2.5 木桁架承载能力分析

2.5.1 极限承载力 由表 2 知,木桁架 PT-S、PT-D 和 PT-G 的极限承载力分别为 3.9、4.3 和 8.7 kN。不同截面尺寸规格材制备的轻型木桁架在极限承载能力上存在较大的差异。单榀木桁架(PT-D)的试件厚度为 PT-S 的 2 倍,极限承载能力仅比 PT-S 高 1 级(0.4 kN)。PT-D 试件的规格材使用量较 PT-S 增加一倍,但因为轻型木桁架的特殊节点构造特点,极限承载能力并没有明显提升。轻型木桁架是由规格材通过齿板连接而成,齿板连接木桁架对板齿嵌入深度要求不小于板齿承载力验算时的嵌入深度<sup>[15]</sup>,极限承载力也与齿板节点的极限承载力密切相关。木桁架 PT-D 虽然增加了试件厚度及规格材厚度,但节点齿板的面积没有增大,板齿嵌入的相对深度反而减小,有限的齿板极限承载力不能满足承载更高荷载时的木桁架对节点的要求,使齿板连接的节点成为整个木桁架接近破坏时最薄弱的部位,试验中,PT-D 的 K 节点处齿板脱齿后,腹杆脱落导致桁架的突然破坏而杆件完好,也表明相对于杆件的极限承载性能,PT-D 节点较薄弱,所以,木桁架 PT-D 的极限承载能力并未明显高于 PT-S。通过仅增大杆件截面尺寸,对提高桁架的极限承载力效果有限,也不符合“强节点弱构件”的设计理念<sup>[16]</sup>。

多榀木桁架(PT-G)通过木销将两个单榀木桁架(PT-S)组合起来,较与之等厚的 PT-D,节点处多一倍齿板,能满足更高荷载时节点对齿板连接的要求,在分级加载试验中,17 级(8.7 kN)后发生破坏,可见其极限承载能力较 PT-S、PT-D 有明显优势。PT-G 破坏加载时没有出现平面内失稳和齿板拔出现象,其破坏出现在规格材杆件上,表明在一定的节点承载性能条件下,充分利用小径级规格材的结构

性能,增加了桁架的结构稳定性和极限承载性能,具有更高的安全性。

2.5.2 抗变形能力 在3阶段的分级加载木桁架试验中,木桁架的抗变形能力可以根据  $T_2$  标准荷载阶段下标准荷载时木桁架下弦跨中挠度、24 h 持荷木桁架的蠕变量、持荷结束卸载后木桁架的弹性恢复能力来行评价。由表2知,标准荷载作用下木桁架下弦跨中挠度为  $PT-G < PT-D < PT-S$ ,  $PT-D$ 、 $PT-G1$  较  $PT-S$  的下弦跨中最大挠度分别小 29.9% 和 51.6%,而  $PT-G2$  在 3.96 kN 标准荷载下比  $PT-S$  小 9.9%。结果表明,在相同使用环境下,厚度较大的单榫木桁架的变形能力比正常规格材厚度的木桁架有优势,而多榫组合的多榫木桁架即使在与榫数等倍数标准荷载的条件下,变形仍较小,因此,多榫木桁架更能适应复杂应力条件下的实际工况。

从图6(a)  $T_2$  阶段3种木桁架下弦跨中挠度对比中明显发现,24 h 持续荷载作用下木桁架的蠕变情况也存在较大差别。标准荷载下木桁架  $PT-D$ 、 $PT-G1$  的蠕变量比  $PT-S$  分别小 49% 和 54.3%,  $PT-G2$  在  $2P_k$  时与  $PT-S$  蠕变量相近。与木桁架下弦跨中挠度相同,多榫木桁架  $PT-G$  的蠕变量最小。 $T_2$  阶段残余变形是经 24 h 保压后卸载,在空载阶段木桁架无法恢复的部分变形,是表征木桁架弹性恢复能力的一个重要指标。3次试验中木桁架  $PT-D$ 、 $PT-G1$  的残余变形比  $PT-S$  分别小 23.1% 和 32.8%,  $PT-G2$  在 3.96 kN 标准荷载时仅为  $PT-S$  的 4/5。3种桁架的残余变形与前两种指标相同,多榫木桁架都具有较大的优势,体现出良好的抗变形能力。

### 3 结论

1)3种木桁架在标准荷载作用下均工作良好。多榫木桁架的极限承载力达到2倍标准荷载以上,且破坏阶段在1.6倍标准荷载前荷载-挠度曲线呈现线性,相比两种单榫木桁架,多榫木桁架作为结构构件具有很好的安全性能。

2)单榫木桁架  $PT-S$  在破坏阶段容易出现平面外失稳。通过木销连接的多榫木桁架增加了承载面宽度,实现单榫间较好的协同效应,有效解决了失稳隐患。

3)节点齿板易成为较高承载性能要求桁架的薄弱部位,设计时必须验算齿板承载力,通过增大齿板面积或板齿长度以满足较大承载能力木桁架对节点的要求,且与规格材承载性能平衡,实现材料性能的充分利用。

4)木销连接是一种可靠的多榫连接方式。通过木销连接多个单榫桁架,不仅实现多榫极限承载力大于多个单榫之和,且抗变形能力、弹性恢复能力等均更优。

### 参考文献:

- [1] 王滋,王丽,张赛男,等. 轻型木桁架的研究现状与发展趋势[J]. 林产工业, 2016, 43(2): 3-7.  
WANG Z, WANG L, ZHANG S N, et al. The research status and the development trend for light-frame wood truss [J]. China Forest Products Industry, 2016, 43(2): 3-7. (in Chinese)
- [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.  
XU S. Study on the application of wood truss in re-roofing project [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [3] BURDZIK W M G. Analysis of timber girder trusses for eccentric loading: technical paper [J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2004, 46(2): 15-22.
- [4] 赵建敏, 张建平, 吴昭华. 大跨转换桁架结构分析与设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(11): 21-26.  
ZHAO J M, ZHANG J P, WU Z H. Analysis and design of large-span transfer truss structure [J]. Building Structure, 2016, 46(11): 21-26. (in Chinese)
- [5] 轻型木桁架技术规范: JGJ/T 265—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Technical code for light wood trusses; JGJ/T 265-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [6] 贺绍均, 尚澎, 杨保铨, 等. 锈蚀诱导处理下竹钉和钢钉的抗剪性能[J]. 林业科技开发, 2015, 29(2): 90-94.  
HE S J, SHANG P, YANG B S, et al. Influence of corrosion inducing treatment on shear behavior of bamboo nail and steel nail [J]. China Forestry Science and Technology, 2015, 29(2): 90-94. (in Chinese)
- [7] 阙泽利, 李哲瑞, 王菲彬, 等. 高盐环境对钉连接木结构抗剪性能的影响[J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 81-85.  
QUE Z L, LI Z R, WANG F B, et al. Influence of high salinity environment on shear strength of wood frame structures [J]. Industrial Construction, 2015, 45(9): 81-85. (in Chinese)
- [8] 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.  
XU X L, MA R L, HE M J. Analysis of light wood truss test and bearing capacity [J]. Special Structures, 2006, 23(1): 1-4. (in Chinese)
- [9] 况宜. 轻型木桁架齿板连接节点受力性能的试验研究

- [D]. 重庆:重庆大学,2011.
- KUANG Y. Experimental investigation on wood joint connected by truss plate of light truss [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [10] 阙泽利,高一帆,戈禧芸. 多榀木桁架的研究现状与发展趋势[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 138-144.
- QUE Z L, GAO Y F, GE X Y. A review of the research of wood girder truss [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(2): 138-144. (in Chinese)
- [11] 刘永健,傅梅珍,刘士林,等. 现代木结构桥梁及其结构形式[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 83-91.
- LIU Y J, FU M Z, LIU S L, et al. Modern timber bridges and their structure types [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 83-91. (in Chinese)
- [12] 木结构试验方法标准: GB/T 50329—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012.
- Standard for test methods of timber structures: GB/T 50329-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [13] Standard practice for static load testing of truss assemblies: ASTM E73-13 [S]. West Conshohocken, American Society of Testing Materials International, 2013.
- [14] 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): 16-18,23.
- QUE Z L, LI Z R, MAO H Y, et al. The influence of bending performance by the variations in wood density and knot of SPF dimension lumber [J]. China Forest Products Industry, 2016, 43 (3): 16-18, 23. (in Chinese)
- [15] 木结构设计规范: GB 50005—2003[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- Code for design of timber structures: GB 50005-2003 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 阙泽利,杨玲,付勍,等. 木结构建筑失效的原因和形式分析[J]. 中国人造板, 2012, 19(11):15-18.
- QUE Z L, YANG L, FU Q, et al. Modes and causes of structural failure of timber structures [J]. China Wood-Based Panels, 2012, 19(11):15-18. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)