

腹杆节间间距对平行弦木桁架承载性能的影响

赵子宇¹,任海青²,强明礼^{1*},徐俊华¹,陈顺超¹,韩善宇¹

(1. 西南林业大学 材料科学与工程学院,云南 昆明 650224;2. 中国林业科学研究院 木材工业研究所,北京 100091)

摘 要:研究腹杆节间间距对平行弦木桁架承载性能的影响,控制融余强度,形成平行弦木桁架强度及质量控制的理论支撑。采用 Smsolve 结构力学求解器对桁架进行内力分析,并对构件进行承载能力与稳定性验算,得到桁架腹杆节间间距临界值。采用静力加载方式,对平行弦木桁架挠度、轴向应变以及破坏形式进行测试,对 2 种工况模拟变形趋势与试验结果进行对比分析。结果表明,腹杆节间间距 0 mm 与 65 mm 的桁架,极限荷载平均值分别是设计荷载的 5.26 倍和 3.49 倍,均满足设计要求,且节间间距 0 mm 桁架的承载力高于节间间距 65 mm 桁架,2 种桁架变异系数均较小,表现出较小的离散性。当达到极限荷载时,2 种工况的跨中挠度值相差不大;节间间距 0 mm 桁架,跨中与两加载点处挠度值相差不大,变形较小;节间间距 65 mm 桁架,跨中与两加载点处挠度值相差 1.5 倍,此工况试件极限荷载均超过 3 倍设计荷载,满足规范设计要求。比较 2 种工况下桁架变形形式,可以看出节间间距 0 mm 桁架整体变形较小,有较高的承载能力。试验证明桁架破坏形式主要为节点齿板拔出,而导致桁架失效,破坏位置主要出现在两侧端部、跨中、加载点下端节点位置,与模型分析相一致。分析认为平行弦木桁架有较好的强度储备,在满足构件承载能力、稳定性的情况下,腹杆节间间距可在 65 mm 范围内进行调节,桁架失效主要发生在齿板连接节点处。

关键词:平行弦木桁架;节间间距;承载性能;齿板;极限荷载

中图分类号:TS664.03 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)02-0235-09

Influence of the Spacing between Webs on the Bearing Capacity of Parallel String Truss

ZHAO Zi-yu¹, REN Hai-qing², QIANG Ming-li^{1*}, XU Jun-hua¹, CHEN Shun-chao¹, HAN Shan-yu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The influence of web spacing on the bearing capacity of parallel chord wood truss was studied to find out the theoretical support for the strength and quality control of parallel chord wood truss by controlling the residual strength. Smsolve structural mechanics solver was used to analyze the internal force of the truss, and the bearing capacity and stability of the members were checked to get the critical value of the spacing between the webs of the truss. The deflection, axial strain and failure modes of parallel chord wood truss were tested by static loading method. The deformation trends of the two conditions were compared with the test results. The results demonstrated that the average ultimate loads of the truss with 0 mm and 65 mm web spacing were 5.26 times and 3.49 times of the design load, respectively. The bearing capacity of the truss with 0 mm web spacing was higher than that of the truss with 65 mm web spacing. The variation coefficients of the two trusses were small and showed small dispersion. When the ultimate load was reached, the mid-span deflection values of the two working conditions were not very different; the mid-span deflection values of the truss with 0 mm inter-node spacing were not very different from those of the two

收稿日期:2019-07-29 修回日期:2019-08-29

基金项目:国家自然科学基金(51868070);西南林业大学博士启动基金(111915)。

作者简介:赵子宇,男,硕士,研究方向:木结构建筑。E-mail:970616322@qq.com

* 通信作者:强明礼,男,博士,副教授,研究方向:木材力学与木结构工程、家具设计与制造理论。E-mail:30431702@qq.com

loading points, and the deformation was small; the mid-span deflection values of the truss with 65 mm inter-node spacing were 1.5 times different from those of the mid-span and the two loading points, and the ultimate load of the specimens under this working condition was more than 3 times of the design load, which met the design requirements. Comparing the deformation forms of the truss under the two working conditions, it could be seen that the overall deformation of the truss with 0 mm inter-node spacing was smaller and had higher bearing capacity. The test proved that the main failure mode of truss was pulling out the tooth plate of the joint, leading to the failure of the truss. The failure location mainly occurred at the end of both sides, the middle span and the lower end of the loading point, which was consistent with the model analysis. The analysis showed that parallel chord wood truss had better strength reserve. Under the condition of satisfying the load-bearing capacity and stability of components, the spacing between web members could be adjusted in the range of 65 mm. The failure of the truss mainly occurred at the joints of the teeth plate.

Key words: parallel string truss; inter-segment spacing; bearing capacity; tooth plate; limit load

现代轻型平行弦木桁架以规格材为基材,多采用齿板连接件装配而成,是具有轻质高强、经济、环保的结构体系^[1-5],主要组成部分包括上下弦杆、腹杆和连接件等^[6]。目前国内外专家对平行弦木桁架的节点承载力^[7]、构件承载性能等研究较为充分^[8-10],如国内学者对 4 榀豪式木桁架进行静力承载试验,结果表明极限荷载平均值为设计荷载的 2.375 倍^[11];对速生杉木平行弦木桁架进行静力加载试验,试验结果表明导致平行弦木桁架结构过早破坏的原因是节点处齿板从木材中拔出^[12]。规范和相关研究很少涉及腹杆问题,如腹杆的摆放形式与角度、杆件的含水率等对承载力的影响。若淡化腹杆的相关问题,忽视腹杆位置及角度的承载力临界值,会影响桁架承载能力极限状态,使其无法达到极限状态标准^[13-14]。

鉴于此,采用 2 种工况共 6 榀平行弦木桁架为试验对象,通过 Smsolve 结构力学求解器对桁架进行内力分析,验算构件承载性能与稳定性,得到桁架

腹杆节间间距临界值,采用静力加载试验,通过对 2 种节间间距的平行弦木桁架进行对比,研究木桁架的节点挠度、极限荷载、轴向应变和破坏形式,为轻型木桁架质量控制及强度控制提供理论依据。

1 试验材料与制备

1.1 试验材料

以 SPF(云杉-松-冷杉)(spruce-pine-fir)为基材,截面尺寸为 38 mm×89 mm,依据《木结构设计标准》(GB 50005-2017)、《木结构工程施工质量验收规范》(GB 50206-2012)要求,选用Ⅲc 等级。每组工况试件数为 15 个,经测试,主要物理力学性能见表 1。

齿板采用国产齿板,由 Q235 碳素结构钢制成,齿板厚度约为 1 mm,齿长约 10 mm,齿宽约 3 mm,屈服强度 277 MPa,抗拉强度 363 MPa,伸长率 34%,镀锌量 275 g/m³。两端支座处齿板规格为 57 mm×75 mm,节点处齿板规格为 75 mm×133 mm。

表 1 SPF 规格材主要物理力学性能

Table 1 Main physical and mechanical properties of spruce-pine-fir (SPF) specifications

性能参数	均值						
	含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	顺纹抗弯 /(N·mm ⁻²)	弹性模量 /GPa	顺纹抗压 /(N·mm ⁻²)	顺纹抗拉 /(N·mm ⁻²)	顺纹抗剪 /(N·mm ⁻²)
SPF	13.2	0.43	69.74	10.06	31.37	48.81	14.56
TC11-A	15	0.4~0.6	11	9	10	7.5	1.49

1.2 试件制备

试验设计了 2 种平行弦木桁架试件,节间间距分别为 0 mm 和 65 mm,其中平行弦木桁架规格材平置,桁架高度为 200 mm、跨度为 2 000 mm。按桁架构造确定杆件尺寸与节点形式,如表 2 所示,并将规格材锯解成对应尺寸。按照《木结构设计标准》(GB 50005-2017)要求,通过平压法将齿板分步压入

桁架各节点中,在温度 20℃、相对湿度 60%的环境下养护 1 周,以平衡试件的应力分布。

1.3 测试方法

1.3.1 试验设备 试验设备包括:DH5908 无线动态应变采集仪系统 1 套、加载系统 1 套、DY2200-K1T2 力传感器 1 个,试验加载设备如图 1 所示。

1.3.2 测点布置 位移百分表设置于两端支座处

垂直方向各 1 个(①~②)、跨中与加载点对应的下弦节点位置处各放置 1 个(③~⑤);因木材的拉伸压缩和弯曲弹性模量大致相等,在小变形的情况下规格材截面变形符合平截面假定,所以可取截面对称轴上下或左右纤维的应变均值作为轴向应变值,

为使数据具有对比性,采用 20 mm 应变片放置于上弦杆跨中位置与加载点左右两侧位置各 2 片(E-J)、放置于下弦杆跨中位置两侧各 2 片(K-M)、放置于两端支座处斜腹杆各 2 片,测点分布见图 2。

表 2 主要杆件尺寸与节点形式

Table 2 Dimensions and nodal forms of main members

构型	节间间距/mm	斜腹杆尺寸	节点形式
标准间距	0		
临界间距	65		

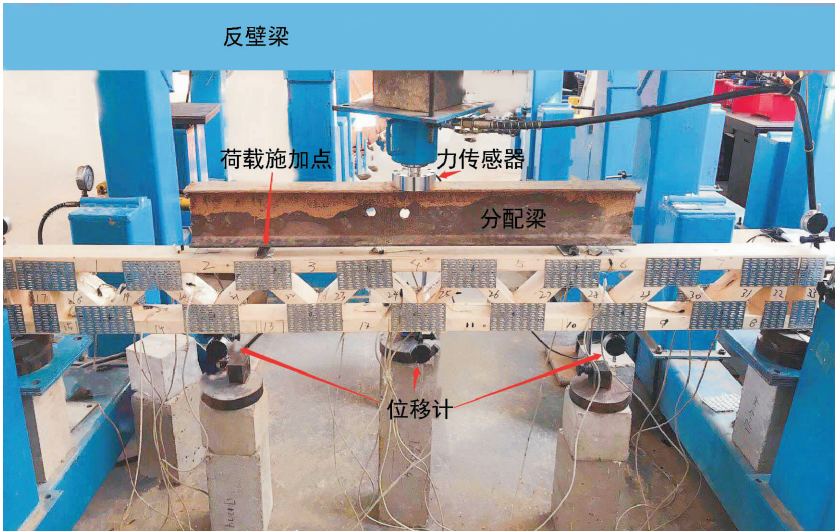


图 1 加载装置

Fig. 1 Loading device diagram

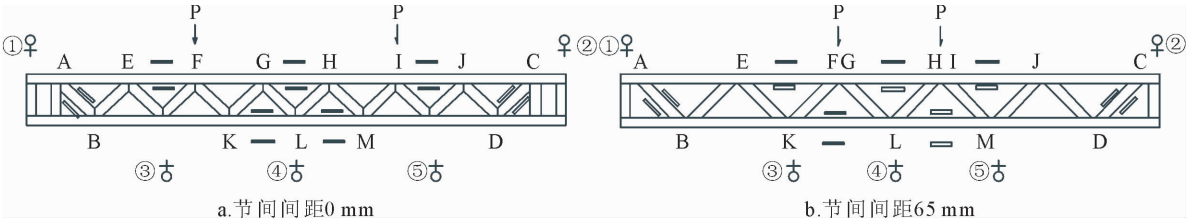


图 2 挠度与应变测点布置

Fig. 2 Schematic diagram of distribution of deformation and strain measuring points

1.3.3 加载制度 参考《轻型木桁架技术规范》(JGJ/T 265-2012)与《木结构试验方法标准》(GB/T 50329-2012)规定,试验采用液压分级加载制度,在指定位置处同步加载,并在正式加载前进行预加载。桁架加载前已装好防护措施,防止试件破坏时危及试验仪器和试验人员安全。

1.3.3.1 预加载 保证力传感器、百分表、应变片、数据采集系统、平行弦木桁架等试验工况是否正常。预加载以 0.694 kN 为 1 级,每隔 5 min 加载 1 级,加载至第 5 级后,按照 2 级卸载方式,每隔 5 min 卸载 1 级,卸载至空载后空载 30 min。

1.3.3.2 正式加载 正式加载以 0.694 kN 为一

级,每级加载的时间间隔为 5 min,分 7 级加载至设计荷载,观察其破坏情况与采集系统数值的变化,之后继续加载至桁架破坏。当木桁架出现以下情况时即认定为破坏:桁架任意杆件或连接节点失去承载能力;木桁架的挠度急剧增加;任意节点处木材发生劈裂;荷载降到峰值荷载的 80%时。

2 工程依据与桁架结构理论计算分析

桁架目标应用于室内卫生间楼面梁的承重结构,桁架间距为 405 mm,依据《建筑结构荷载规范》(GB5009-2012)确定构件设计荷载,其中包括恒载与活载,恒载包括顶棚吊顶(木龙骨+1 层 9 mm 厚纸面石膏板)荷载标准值为 0.12 kN/m²、桁架自重标准值为 0.084 kN/m²、18 mm 厚结构 OSB(定向刨花板)荷载标准值为 0.09 kN/m²、5 cm 厚混凝土垫层荷载标准值为 1.25 kN/m²、10 mm 厚地砖荷载标准值为 0.25 kN/m²;活载包括:浴室、卫生间的

均布活荷载标准值为 2.5 kN/m²;标准组合下的荷载设计值 $P=4.578$ kN。

2.1 选取工况依据

试验用桁架上、下弦杆为连续的杆件,腹杆之间及腹杆与弦杆之间为铰接的连接方式,两端支座采用一端铰接一端固定铰支座(图 3)。采用 Smsolver 结构力学求解器对 2 种工况桁架进行模型分析,得出了各杆件的内力。

通过对构件进行拉弯承载力计算和压弯承载力计算,由于建模分析出各杆内力单元较多,故仅列举重要杆件与处于临界值的杆件进行分析,此处用图 3b 中的单元代码表示各杆件,各试件的计算结果如表 3 所示,临界值均出现在节点处,此时确定节间间距为 65 mm,若再次扩大节间间距会造成单元杆件 5、11 出现不满足拉弯、压弯承载力现象,反之临界值会减小,达不到确定节间间距临界值的目的,观察图 3 与表 3 可知,达到临界值的杆件均为位移突变处。

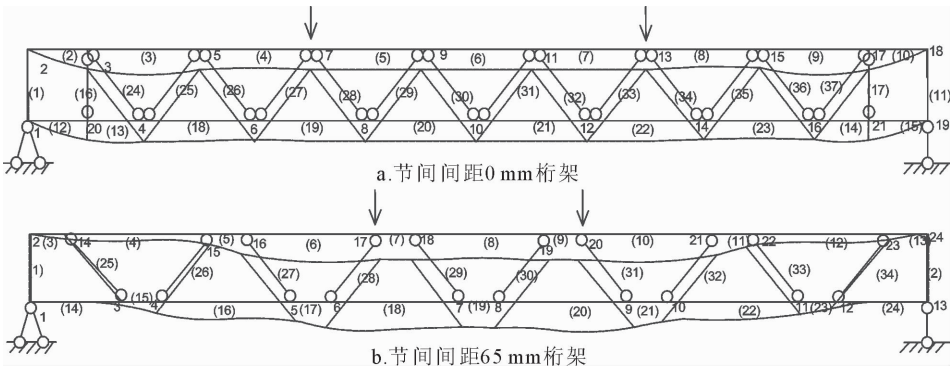


图 3 桁架变形趋势
Fig. 3 Trend diagram of truss deformation

表 3 腹杆节间间距 65 mm 的重要杆件内力

Table 3 Internal forces of important members with 65 mm web spacing

单元码	轴力/N	剪力/N	杆端 1 弯矩 /(N·mm)	杆端 2 弯矩 /(N·mm)	杆端 1 (拉弯/压弯)	杆端 2 (拉弯/压弯)	整体 稳定性验算
5	-16 058.91	5 791.74	-205 766.60	170 696.46	0.99	0.89	9.82
11	-16 047.91	-5 831.74	169 157.88	-209 905.35	0.88	0.99	
15	9 164.36	5 680.82	-170 799.03	198 454.04	0.81	0.97	
17	22 535.78	5 263.13	-181 446.39	160 656.84	0.98	0.91	
21	22 559.39	-5 257.74	158 248.66	-183 504.15	0.90	0.98	
23	9 022.04	-5 772.13	208 917.11	-166 271.62	0.98	0.71	

2.2 结构验算

由图 3 可知,通过对 2 种工况的平行弦木桁架在设计荷载下的工作状态进行模型分析,得出 2 种工况的运动趋势:节间间距 0 mm 桁架的运动趋势从两端竖杆至跨中挠度变化趋势相对缓慢,距跨中两侧各处挠度较均一,桁架变形较均匀,挠度最大值出现在跨中位置。节间间距 65 mm 桁架的运动趋势从两端竖杆至跨中挠度变化趋势较剧烈,距跨中两侧各处挠度也较均一,但桁架变形不均匀,挠度最

大值也出现于跨中位置。
根据《木结构设计标准》(GB50005-2017),验算桁架构件的各项承载力。拉弯、压弯构件承载力当节间间距为 65 mm 时最接近于 1,即达到承载能力范围内。通过稳定性验算,节间间距 65 mm 的桁架也在标准范围之内,满足稳定性的要求。
通过对 2 种工况的桁架进行验算分析后,得到腹杆节间间距临界值为 65 mm,理论上可通过调节腹杆节间间距来控制承载力和材料需求。

3 结果与分析

3.1 试验现象

平行弦木桁架预加载过程中,构件整体没有出现明显弯曲及变形,齿板也没有明显的变化,当预加载卸载后出现微小的残余变形,桁架变形不超过 1 mm。在正式加载过程中,当荷载加载至 1 倍设计荷载时,桁架节点齿板无明显变化,齿板变形量最大处仅 1.5 mm,2 种工况的桁架跨中挠度值在 1.95~3.06 mm,节间间距为 65 mm 的桁架挠度变化值略大,但变化不明显。

节间间距 65 mm 桁架从 1 倍设计荷载加载至 3 倍设计荷载过程中,桁架跨中变形趋势不断加大,挠度值同 1 倍设计荷载相比增加了 9 mm 左右,加载过程中桁架整体出现微小变形,加载点处齿板出现错动并伴随着齿拔出现象,但并不明显。在两端支座节点连接处齿板有 2~3 mm 拔出现象,并逐渐延展。从 3 倍设计荷载加载至极限荷载过程中,桁架出现明显弯曲,跨中挠度值已达 15 mm 左右,两端支座节点连接处齿板明显拔出,并逐渐延伸,出现 6~8 mm 的齿板拔出现象。荷载增加至约 17 kN,支座处齿板与腹杆脱离,桁架挠度急剧增大,试件失效破坏。桁架失效时支座节点处齿板有 5 处达到 8 mm 以上拔出现象(图 4a),加载点位置出现 3 处齿板拔出现象(图 4b)。

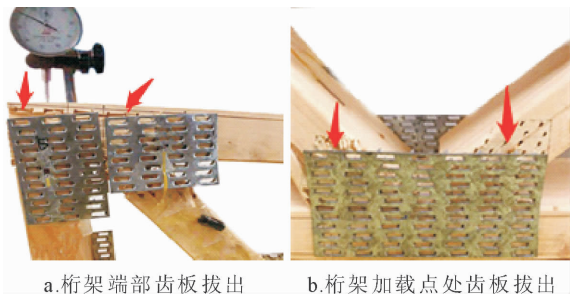


图 4 节间间距 65 mm 桁架主要破坏现象

Fig. 4 Main failure patterns of 65 mm panel spacing truss

节间间距 0 mm 的桁架从 1 倍设计荷载加载至 3 倍设计荷载过程中,桁架跨中位置处变形趋势为线性增加,但不明显,跨中挠度值增加到 6 mm 左右,加载过程中桁架整体未出现明显变形与齿板拔出、错动现象,此时加载点处也未出现明显齿板拔出情况。从 3 倍设计荷载加载至 5 倍设计荷载过程中,桁架跨中位置处与加载前相比出现 13 mm 的变形量,桁架变形增大,逐渐出现弯曲现象,但未像节间间距 65 mm 桁架那样明显,两端支座节点连接处齿板表面开始出现细小裂纹并逐渐延伸,并出现 3~4 mm 的齿板拔出现象。荷载增加至极限荷载过程中,桁架整体明显弯曲,跨中挠度已达 14 mm 左右,

端部节点连接处不断出现齿板起齿现象,齿板拔出量为 6~7 mm。随着荷载增加至最大荷载,桁架端部齿板突然拔出,试件失效破坏。桁架失效时支座节点处齿板有 6 处达到 8 mm 以上的拔出现象(图 5a),加载点位置出现 1 处齿板明显变形现象,齿板拔出量为 8.45 mm(图 5b)。

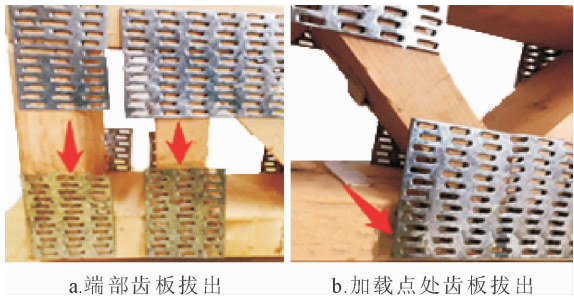


图 5 节间间距 0 mm 桁架主要破坏形态

Fig. 5 Main failure modes of trusses with 0 mm inter-node spacing

在进行静力加载试验过程中,2 种工况的平行弦木桁架虽然腹杆节间间距不同,但在破坏方式、分级加载过程中的试验现象等均类似。2 种工况的桁架在持续加载过程中破坏形式呈现脆性破坏。齿板起齿现象分别出现在两端支座节点、跨中节点、加载点对应上下弦节点,两端支座节点与加载点对应下弦节点处齿板起齿较为严重。加载至接近极限荷载时,腹杆与弦杆之间缝隙增大,节点齿板明显拔出,破坏形式为节点失效破坏。

3.2 极限荷载与最大挠度

桁架采用分级加载方式,试件达到失效破坏时加载等级为最大加载等级,最大加载等级所对应的荷载为极限荷载。由表 4 可知,2 种工况的平行弦木桁架极限荷载大小相差 8~10 kN,极限承载力超过设计荷载数倍,有较大的强度储备,体现出平行弦木桁架有着良好的承载性能^[12,15-16]。节间间距 0 mm 桁架极限荷载平均值为 25.38 kN,变异系数为 5.79%,节间间距 65 mm 桁架极限荷载平均值为 16.70 kN,变异系数为 5.88%,节间间距 0 mm 桁架极限荷载高于节间间距 65 mm 桁架 1.5 倍,2 种工况破坏形式均为齿板拔出而破坏,没有木材劈裂现象。

极限荷载时桁架跨中、两加载点处的挠度值,节间间距 0 mm 桁架各数值相差不大,变形较小;2 种工况跨中挠度值相差不大,节间间距 65 mm 桁架跨中变形与两加载点处挠度值相差 1.5 倍,这也与加载点位置距离大小有一定关系,节间间距 65 mm 桁架两加载点位置较近,使得跨中变形更大,相比较 2 种工况下桁架变形形式可以看出,0 mm 桁架整体变形较小,有更高的承载能力^[17]。

表 4 桁架的极限荷载和主要节点挠度

Table 4 Ultimate load and deflection of main joints of truss

分类	加载等级	极限荷载 /kN	挠度/mm				
			左支座(垂直) 测点①	右支座(垂直) 测点②	左加载点 测点③	跨中 测点④	右加载点 测点⑤
0 mm-1	38	26.42	1.86	2.23	13.42	18.25	15.68
0 mm-2	35	24.34	1.96	2.05	14.36	16.37	12.68
0 mm-3	31	21.55	1.41	1.71	10.25	16.72	11.87
65 mm-1	23	16.00	1.51	1.67	6.86	17.15	7.21
65 mm-2	25	17.39	1.52	1.81	9.85	16.98	9.02
65 mm-3	21	14.60	1.34	1.28	10.97	18.44	11.18

3.3 节点挠度

结合理论分析,对变形较大的节点进行挠度测定,由图 6a 可知,当荷载加至 17 kN 时,因 0 mm-1 试件的左支座处齿板变形量已达 3.7 mm,并不断延伸,节点承载力下降,导致挠度明显增大;由图 6c、图 6d 可知,当荷载加至 19 kN 时,0 mm-3 试件的挠度迅速增加,由于此试件下弦杆取材时由左至右有一定翘曲现象,跨中位置处较严重,导致跨中挠度值出现挠度剧增。与同工况两组试验数据对比,0 mm-3 试件的承载力较低,木材自然缺陷的不均匀分布,致使轻型木桁架受力状态不均匀,使得左端与跨中位置产生挠度突增现象。

由图 6d 可知,65 mm-1、65 mm-3 试件的挠度在 13 kN 和 8 kN 时出现挠度值迅速增加趋势,因在跨中位置处 65 mm-3 试件左侧腹杆有少量褐腐,导致齿板出现轻微起齿现象,稳定性降低,桁架没有发生基材破坏,构件仍具有较好的承载能力。2 种工况下,两加载点处挠度差异较小;达到极限荷载时,两加载点处挠度值节间间距 0 mm 桁架大于节间间距 65 mm 桁架,但其剪剪性强,在跨中位置处没有过早出现起齿现象。

由图 6 可知,曲线基本呈线性增加,但两端支座处、两加载点处的挠度变化明显不同,因桁架荷载为对称加载,理论上两侧变形应为对称形式,而在左、右两支座节点处挠度有所差异,这与材料本身材性有关,加之木材缺陷,导致桁架支座两端出现受力状态不均匀现象。综上分析,在 3 倍设计荷载范围内,荷载与挠度之间的关系为线性增加。与平行弦木桁架在设计荷载下的模型进行对比,节间间距 0 mm 桁架的两加载点处挠度值与跨中挠度值相差较小,节间间距 65 mm 桁架相比较,通过上述对挠度的分析也可看出理论分析与实际加载结果基本相符。

3.4 轴向应变

由图 7a、图 7c、图 7d 可知,当荷载加至 14 kN 左右时,65 mm-1 与 65 mm-2 因弦杆的木节处开始产生微小裂纹,导致杆件内力重分布,出现明显拐

点。由图 7d 可知,当荷载加至 19 kN 时,0 mm-3 试件的应变曲线出现拐点,主要与木材轻微翘曲有关,此现象与挠度曲线变化相一致。由图 7f、图 7g 可知,当荷载加至 22 kN 时,0 mm-1 试件出现明显应变迅速增加趋势,此时因桁架的左右两端支座处节点齿板已有明显起齿现象,形变量已达 7 mm 左右,并逐渐增加,导致杆件的应变值增加;65 mm-3 试件的两端腹杆应变变化速率较快,主要由于此榫桁架的木节较多,使得承载能力减弱。

相同工况下的试件表现出比较稳定的线性增加趋势,2 种工况在达到极限荷载时各杆件应变值差距不大,但 2 种工况的极限荷载差距较大,比较极限荷载会表现出不同的变化趋势。当荷载达到 3 倍设计荷载时,曲线呈线性增加,无拐点出现,明显看出节间间距 0 mm 桁架有较高的承载能力,继续加载 2 种工况各杆件应变均出现不同程度的突变,65 mm-1 试件与 65 mm-3 试件两加载点位置处杆件应变值剧增(图 7a、图 7c),0 mm-2 试件比 0 mm-1 试件应变增加速率快(图 7a、图 7c)。两侧腹杆除 0 mm-1 试件曲线出现明显突增,其余各榫都基本呈线性增加,反映出平行弦木桁架在 3 倍设计荷载下属弹性变形,具有较高的承载力。

4 结论与讨论

通过理论与验算,测试了 2 种工况下,平行弦木桁架静力加载作用下的承载力性能。结果表明:

1)通过静力加载试验得到 2 种工况平行弦木桁架极限荷载平均值分别为 24.10 kN 和 15.99 kN,是设计荷载的 5.26 倍和 3.49 倍,证明平行弦木桁架有良好的强度储备。腹杆节间间距增大所得到的破坏形式与试验数值均体现出平行弦木桁架在设计荷载下承载性能较好的特点。

2)对 2 种工况的木桁架进行理论分析与计算,得到在设计荷载下的结构内力及变形趋势。研究表明平行弦木桁架的破坏位置在端部节点、跨中、加载点下端位置处。

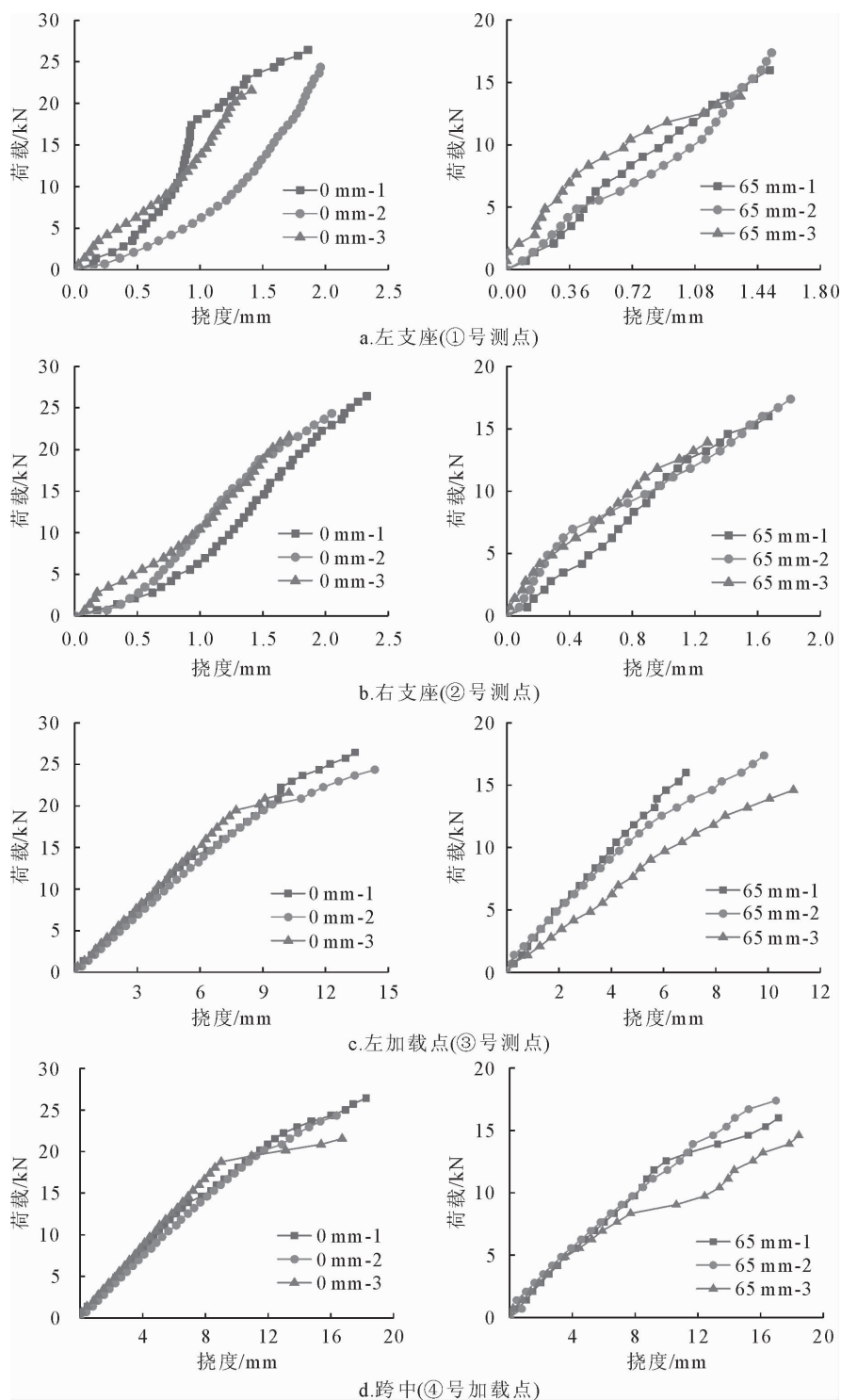
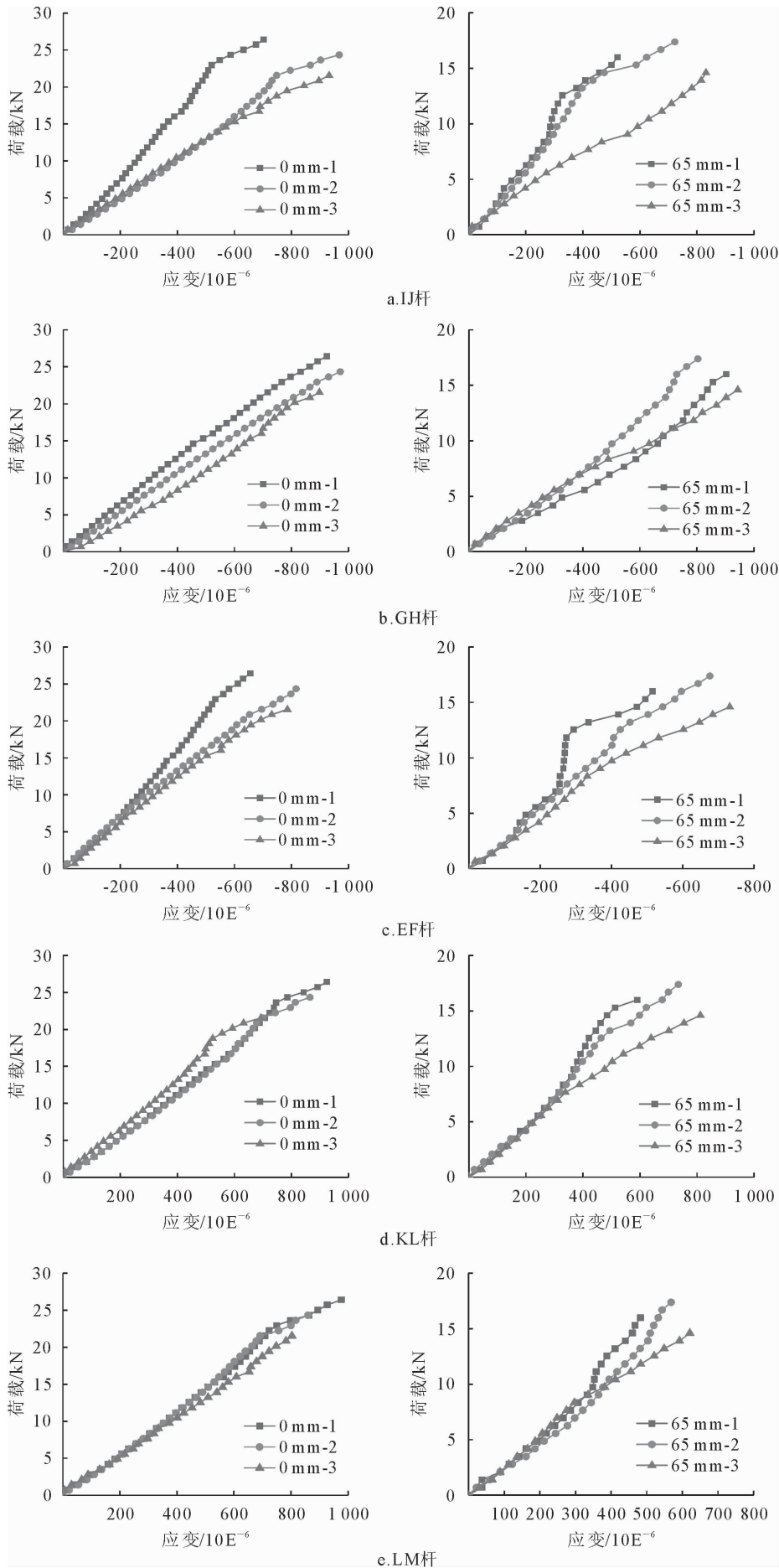


图 6 平行弦木桁架主要节点荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curve of main joints of parallel chord wood truss

3) 节间间距 0 mm 桁架加载前期总体呈现线性变形, 达到极限荷载时变形剧增, 挠度值出现明显突变, 左右两端支座处节点齿板已有明显起齿现象, 形变量已达 7 mm 左右, 并逐渐增加, 导致承载力减弱。节间间距 65 mm 桁架整体刚度较小, 荷载达到 15 kN 左右时出现明显变形, 跨中挠度值已达 15 mm 左右, 两端支座节点连接处齿板明显拔出, 并逐渐延伸, 出现 6~8 mm 的齿板拔出现象。

4) 因 2 种工况的桁架均未设置竖向腹杆, 加载过程中会出现微小的侧向变形与失稳现象, 在实际应用中, 扩大腹杆节间间距的桁架应设立垂直方向的支撑结构, 在桁架端部尽量增加节点加固装置, 使端部节点的齿板在出现起齿现象时可以缓解拔出的时间。通过提出平行弦木桁架腹杆节间间距临界值研究, 可以有效解决施工现场遇到的跨度控制导致无法排布腹杆的问题。



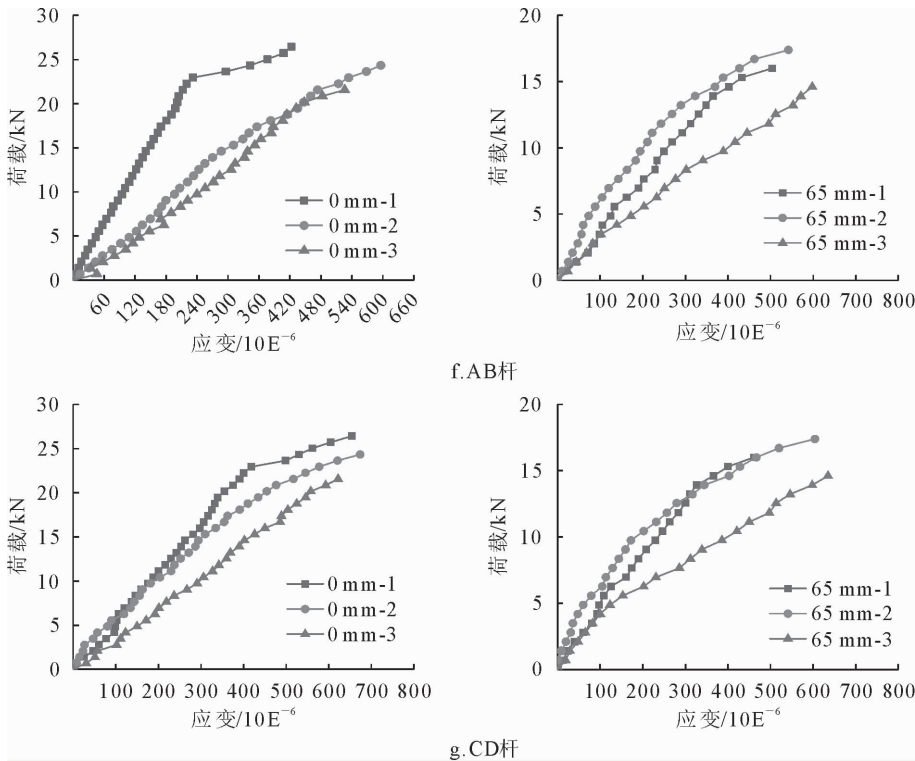


图 7 平行弦木桁架主要节点荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curve of main joints of parallel chord wood truss

参考文献:

[1] 王亚典,蔡荣芳,高颖,等. 木结构建材流通链和生态链的共生关系[J]. 西北林学院学报,2017,32(3):238-244.
WANG Y D,CAI R F,GAO Y,*et al.* Symbiosis system of circulation chain and ecology chain of wooden building materials [J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(3): 238-244. (in Chinese)

[2] RAINER. Performance of wood-frame building construction in earthquakes[J]. Australasian Journal of Construction Economics & Building,2010,10(3):80-81.

[3] 王滋,王丽,武国芳,等. 国产落叶松规格材齿板拉伸承载性能研究[J]. 木材工业,2017,31(3):10-13.

[4] 武国芳,任海青,周海宾,等. 轻型木结构用材料和构件制造技术研究进展[J]. 木材工业,2017,31(1):6-9.

[5] 杨静,饶鑫,卫佩行,等. 轻型木结构墙体结构的传热特性测试与分析[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):248-253.

[6] WANG W Q,EAMON C D. Load path uncertainty in a wood structure and the effect on structural reliability[J]. Engineering Structures,2013,56:889-896.

[7] SARAH A,STEVENSON,AYMAN,*et al.* A practical modelling technique to assess the performance of wood-frame roofs under extreme wind loads[J]. Engineering Structures,2019,191(15):640-648.

[8] MUNAFÒ P,STAZI F,TASSI C,*et al.* Experimentation on historic timber trusses to identify repair techniques compliant with the original structural-constructive conception[J]. Construction and Building Materials,2015,87(3):54-66.

[9] GRZEGORZ P, ANDRZEJ N, ANNA L,*et al.* Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings[J]. Construction and Building Materials,2014,52(3):428-436.

[10] 李素瑕,刘文金. 几种连接方式对脱脂马尾松家具结构强度的影响[J]. 西北林学院学报,2014,29(1):169-173.
LI S X,LIU W J. Effects of joint methods on the structural strength of *Pinus massoniana* furniture[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(1):169-173. (in Chinese)

[11] 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.

[12] 王志强,王转转,崔凡承,等. 速生杉木平行弦木桁架承载能力分析[J]. 建筑技术,2017,48(4):424-426.

[13] 陈秋韵,滕启城,高一帆,等. 杆件摆放方式对平行弦木桁架承载力的影响[J]. 木材工业,2017,31(6):20-25.

[14] 张树君. 发展现代木结构建筑[J]. 建设科技,2017,4(5):10-13.

[15] 朱道洪. 交错桁架体系主要连接方式对结构性能的影响研究[D]. 苏州:苏州科技学院,2009.

[16] 李楠楠,常春明. 钢筋混凝土桁架在建筑结构加固中的应用[J]. 建筑工程技术与设计,2014(30):761.

[17] 王滋,周贤武,武国芳,等. 国产落叶松平行弦轻型木桁架静力承载性能[J]. 林业科学,2018,54(2):137-144.
WANG Z,ZHOU X W,WU G F,*et al.* Load-carrying capacity of *Larix kaempferi* light wood truss[J]. Scientia Silvae Sinicae,2018,54 (2):137-144. (in Chinese)