

文章编号:1007-9629(2023)10-1117-12

层板销接木性能研究进展

付海燕, 何敏娟*

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:层板销接木(DLT)是仅由木销和层板组成的一种无胶无钉、近似全实木的工程木产品,可用于制作梁、墙体和楼板,具有用材经济、绿色低碳和预制化程度高等特点.从构造和分类两方面对 DLT 进行简要概述,系统梳理了近些年 DLT 在木销、木销节点及构件方面的性能研究成果,包括木销-层板销槽承压性能、木销节点抗剪性能、DLT 木梁抗弯性能及 DLT 板振动特性等.在此基础上,介绍了 DLT 在性能研究中存在的不足,并提出了 DLT 研究亟需解决的关键问题.

关键词:层板销接木;木销;构造;节点性能;构件性能

中图分类号:TU366.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.010

Performance of Dowel Laminated Timber

FU Haiyan, HE Minjuan*

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Dowel laminated timber (DLT) is only composed of wood dowel and laminated timber of a kind of non-glue and non-nail, nearly full solid wood engineering wood products. DLT can be used as beams, walls and floors. It has the characteristics of the material economy, green and low carbon, and a high degree of prefabrication. A brief overview of DLT was given from the aspects of construction and classification, and the performance research results of DLT in recent years in terms of the dowel, dowel joints, and components are systematically reviewed, including the embedment performance of dowel-laminate, shear performance of dowel joints, bending performance of DLT beams, vibration characteristics of DLT plates, et al. On this basis, the shortcomings in the performance research of DLT are summarized, and the fundamental problems to be solved in the study of DLT are put forward.

Key words: dowel laminated timber(DLT); wood dowel; structure; joint property; component property

随着全球环境资源问题的凸显,中国推出了“力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和”的“3060”战略目标,绿色低碳发展越来越成为主流.而建筑行业,尤其是建筑材料在能源消耗和废弃物排放方面对环境产生较大程度的负面影响.因此,建筑材料的低碳发展和绿色转型已经成为实现双碳目标的关键之一.

木材具有绿色节能、资源可再生等优点,是一种具有固碳能力的建材,在可持续发展的环境下具有显著优势.此外,城市人口密度持续增长推动了多高

层建筑的快速发展^[1],从而对木材的应用已不仅仅局限于非结构用材.近年来,与木材有关的工程材料技术取得较大进展,如研发了胶合木^[2-3]、层板钉接木^[4]等工程木产品,以及竹木-钢材^[5]、竹木-混凝土^[6]等混合竹木产品.

层板销接木(dowel laminated timber, DLT)是层板通过木销连接组合而成的一种结构用工程木产品.此概念最早在 20 世纪 70 年代提出,近些年由于石材、钢材等资源减少,以及当前低碳政策的推广,DLT 得到较多研究和应用.一方面,DLT 基本属于

收稿日期:2022-12-09; 修订日期:2023-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078371)

第一作者:付海燕(1994—),女,河北张家口人,同济大学博士生.E-mail:zoeifu@tongji.edu.cn

通讯作者:何敏娟(1963—),女,江苏海门人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:hemj@tongji.edu.cn

全实木产品,除了在层板接长时使用少量胶黏剂外,层板和木销均采用木材;另一方面,DLT板材可以根据使用目标进行定制,预制化程度较高。DLT具有绿色节能、可持续性等优势,其结构简单,构造灵活,加工高效,可应用范围广泛。

基于此,本文首先简要概述了DLT的基本构造和分类;然后,系统梳理了DLT在木销、木销节点及构件方面的性能研究成果,包括木销力学性能、木销-层板销槽承压性能、木销节点抗剪性能、DLT木梁抗弯性能、DLT板抗弯性能和振动特性;最后,介绍了DLT在性能研究中存在的不足,同时提出了DLT研究中亟需解决的关键问题。

1 DLT概述

1.1 DLT基本构造

DLT是一种将层板宽面通过侧面拼接、层板组合采用销连接的工程木产品,示意图见图1。目前

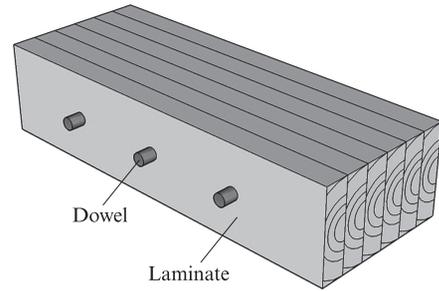


图1 层板销接木

Fig. 1 Dowel laminated timber

DLT产品中的层板通常使用厚度为20~38 mm,宽度为89~140 mm的规格材(如冷杉、云杉等),含水率(质量分数)在19%以下;销通常为高密度木材(如橡木、榉木等),直径一般为10~19 mm,含水率为6%~8%^[7-8]。近些年,由于压缩木材(表1^[9-11])和竹材在性能研究方面取得了一些进展,有部分学者采用压缩木销和竹销来连接DLT^[12-13],但研究成果尚未投入应用。

表1 部分木材压缩处理前后力学性能对比

Table 1 Comparison of mechanical properties of part wood species before and after compression treatment

Object	Method	Before modification			After modification		
		$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	σ_m/MPa	E/GPa	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	σ_m/MPa	E/GPa
<i>Populus euramericana</i> ^[9]	Hot-humidity compression ^①	0.478	57.7	5.4	0.738	126.0	10.8
<i>Cunninghamia lanceolata</i> ^[10]	Hot compression ^②	0.362	74.3	8.2	0.692	137.0	20.7
<i>Picea sitchensis car</i> ^[11]	Hot compression ^③	0.458	90.0	14.0	0.606-0.800	96.0-115.0	25.0-31.0

Note: 1: ① The compressed wood was first softened by steam at 130 °C for 40 to 80 min. Then the fixed compression molding process, control temperature of 100 °C, unit pressure 5 MPa, and compression rate of 50%; Finally, the heat treatment was carried out at 180 °C, maintained for 40 min, and then forced cooling. ② The optimal process conditions were the compression rate controlled at 50%~60%, compression time at 20~30 min, and hot pressing temperature at 180~200 °C. ③ The compression treatment was first soaked in water at 20 °C for 2 days. Then the fixed compression molding process, control temperature 180 °C, compression rate of 33%~67%. 2: ρ is the density; σ_m is the bending strength; E is the flexural elastic modulus.

DLT加工过程中,在木销插入层板之前,需要于层板相应位置预钻孔。预钻孔直径主要由销连接工作原理和加工工艺决定,通常预钻孔直径比木销直径小0~1.5 mm^[14]。图2为木销排列方式。由图2可见:木销可以一次性穿透7~10块层板;DLT中木销排数一般是1~2排,排列方式主要为并列和错列。在实际工程中,为避免木销因长期效应偏离所在轴线,通过改变木销插入角度和方式来提高板材长期性能,比如调整木销与层板之间的夹角(V-DLT)^[10]或改变相邻木销的插入方向(W-DLT)^[8]等,如图3所示。

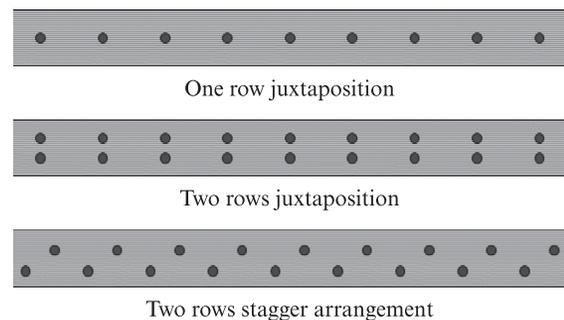


图2 木销排列方式

Fig. 2 Dowel arrangement

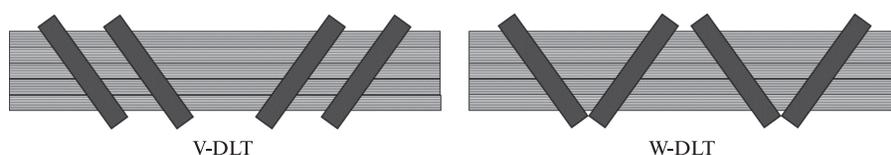


图3 V-DLT或W-DLT示意图

Fig. 3 Sketch map of V-DLT or W-DLT

根据木材的生物质性和干缩湿胀性,DLT销连接系统的工作原理主要分为2种:一种是将木销固定在钻头上,在高速旋转条件下,利用木销中的非晶体聚合物(如木质素)或者涂抹在木销外层的热熔胶受热软化,对层板和木销进行连接组合^[15-16];另一种是利用木材含水率平衡和其自身的吸湿膨胀性能^[17-18],通过使用含水率明显低于层板的高密度木销(通常干燥率为5%~8%)与层板(通常干燥率为12%~15%,不超过19%)进行组装,组装后的DLT为达到含水率平衡,木销湿胀且层板干缩,紧密结合后形成一个整体体系.然而,由于木材的各向异性,因含水率变化而发生干缩湿胀时各方向的尺寸变化并不均匀.因此,若采用第2种工作原理进行销连接,在加工上需要特别注意预钻孔与木销之间的直

径差^[19],比如为保证销连接性能,在确保可加工的情况下,层板上的预钻孔直径仍需小于干燥后的木销直径.关于直径差的具体数值,需要基于实际使用的木材种类、直径等,根据预试验或预加工进行确定.

1.2 DLT分类

在结构工程中,DLT常用做梁、墙体、楼面板和屋面板等.图4显示,DLT有2种基本形式,分别是水平DLT和垂直DLT.由图4可见:水平DLT中木销沿层板宽度方向进行连接,构件宽度由层板数量决定,多用于墙体、楼面板和屋面板^[19];垂直DLT中木销沿层板厚度方向进行连接,构件厚度尺寸较灵活,但宽度受层板截面高度限制,工程中主要用于制作梁^[15].

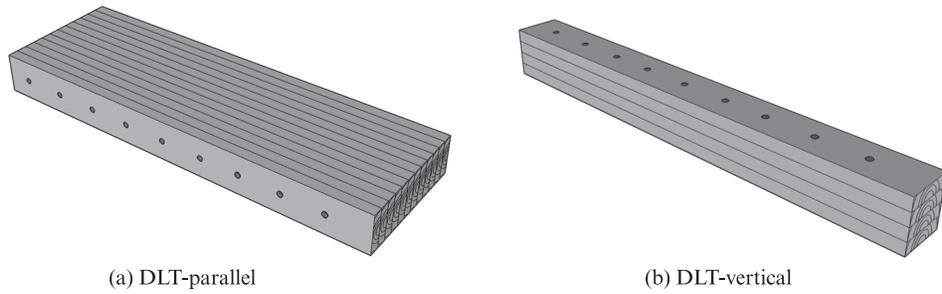


图4 DLT基本形式
Fig. 4 Basic form of DLT

DLT木销和层板的布置可根据用途和设计要求进行调整.层板正交错接木(dowel cross laminated timber,DCLT)是一种DLT木销连接与层板正交组坯(cross laminated timber,CLT)相结合的结构材,示意图见图5^[18],其通过正交组坯的方式减小因层板变形所造成的层间隙,进而增强板材变形稳定性.此外,DLT还可以与其他材料(如混凝土)叠合形成组合楼板,以增强板材结构刚度和减小板材振动,如图6所示^[8].

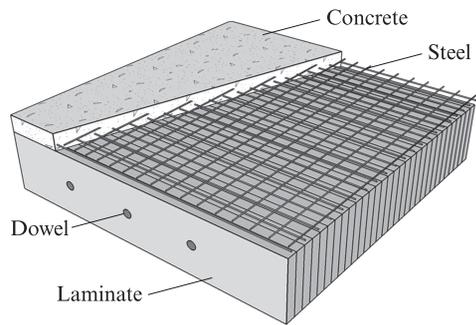


图6 DLT-混凝土结构
Fig. 6 DLT-concrete structure^[8]

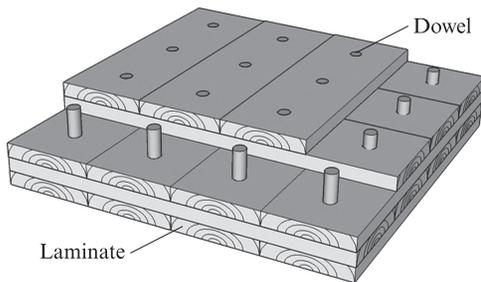


图5 层板正交错接木结构
Fig. 5 Structure of dowel cross laminated timber^[18]

图7为层板构造.DLT的形状规格灵活,可以通过改变层板表面形式来增加板材的附属功能.比如,

通过加工槽口和切口、或安装吸声材料等来提高板材的声学性能(图7(a)^[20]);或通过使用不同截面高度的层板来形成层板间的凹槽,便于安装线管等(图7(b)^[20]).

2 木销及木销节点性能研究

木销连接是DLT的连接方式,对DLT物理力学性能有重要影响.木销的抗剪强度、抗拔强度、抗弯强度,以及销槽承压强度是木销节点的重要评价指标.以下将从木销力学性能、木销-层板销槽承压性能及木销节点抗剪性能3方面进行阐述.

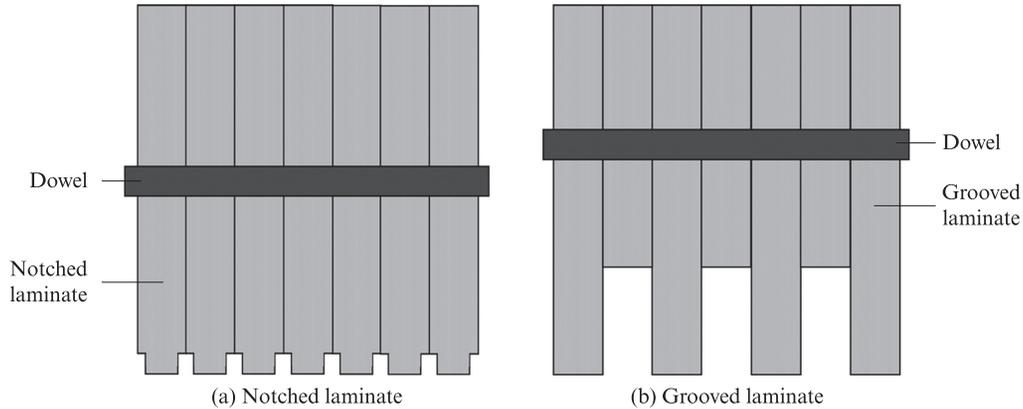


图7 层板构造

Fig.7 Detail construction of laminate

2.1 木销力学性能

木销作为层板连接的紧固件,主要承受剪力、弯矩和压力3种荷载.木销双剪节点破坏模式见图8.由图8可见:(1)欧洲木结构设计规范^[21]给出了4种销连接破坏模式(I_m/I_s/III_s/IV),其中I_m和I_s破坏模式分别是中间层板和两侧层板上的销槽应力达到销槽承压强度后发生的受压破坏,销钉无明显损伤;III_s破坏模式是销钉在中间层板中受弯,产生1个塑性铰所发生的屈服破坏;IV破坏模式是销钉在两侧和中间层板中分别受弯,共产生3个塑性铰所发生的屈服破坏.(2)Miller等^[22]对销连接破坏模式进行了补充,提出了第5种破坏模式(V),即“有效剪切”破

坏模式.研究发现,DLT中使用的高密度木销在承受剪力、弯矩和压力3种荷载的合力作用下,易发生剪切破坏模式^[23].王必林^[24]采用直径12 mm的压缩杨木销,设置0、6、12、18 mm的剪切跨度,探究了木销有效剪切强度与剪切跨距之间的关系,结果表明,随着剪切跨距的增大,木销的有效剪切强度逐渐下降.同时还提出了用于预测不同剪切跨距下压缩木销横纹抗剪强度的计算表达式^[24]:

$$f_{y,v} = 1.02E \left[0.65 \left(\frac{s}{d} \right)^2 - 2.54 \left(\frac{s}{d} \right) + 3.95 \right] \quad (1)$$

式中: $f_{y,v}$ 为木销有效剪切强度,MPa; E 为抗弯弹性模量,MPa; s 为木销剪切跨距,mm; d 为木销直径,mm.

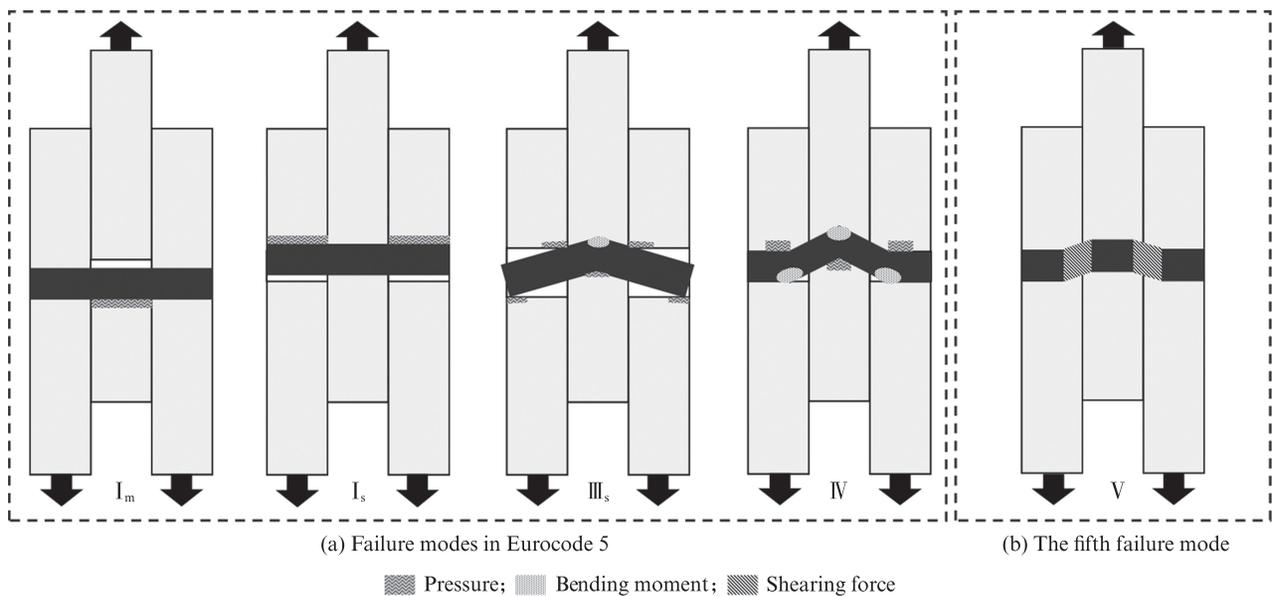


图8 木销双剪节点破坏模式

Fig.8 Failure mode of double-shear joints^[21-22]

由于节点破坏过程中木销主要有拔出和断裂2种破坏模式^[25],因此,木销抗拔性能和抗弯性能对木销节点力学性能有重要影响.研究表明:木销

的抗拔性能与其插入方向^[26]、预钻孔深度^[27]、加工工艺^[28]、木销种类^[29],以及木销直径与预钻孔直径比值^[30]等变量有关.文献中木销抗拔性能试验结

果对比见表2.选择高密度木销或通过加工处理提高木销密度、增加木销插入深度、设计木销插入层板方向为垂直于木纹等,均可以提高木销的抗拔性能.

表2 文献中木销抗拔性能试验结果对比
Table 2 Pullout resistances of dowel from the experimental results in literature

Resource	Dowel material	Laminate material	Insertion depth/mm	Dowel-hole diameter ratio	Processing method	Insertion direction	Pullout resistance/kN	Pullout strength/MPa
Ref. [26]	Beech	Beech	30	10/8	Rotary welding	⊥	1.89	
					Rotary welding	//	1.44	
Ref. [27]	Densified poplar	Pinus sylvestris glulam	36	12/9	Rotary welding	//	1.77	
			72				2.59	
Ref. [28]	Bamboo	Beech	20	10/10	Gluing	⊥		4.08
				10/9	Rotary welding	⊥		4.44
Ref. [29]	Densified poplar	Scots pine	48	12/9	Rotary welding	//	3.47	
	Natural poplar						0.39	
Ref. [30]	Bamboo	Beech	38	10/7	Rotary welding	⊥	2.97	
				10/9			3.38	

Note://—Parallel to the direction of wood grain; ⊥—Vertical to the wood grain direction.

针对木销抗弯性能的研究较少,主要作为材料参数,用于计算节点承载力. Ioana等^[31]为探究节点力学性能,对12 mm巴西红檀(*manilkara spp*)木销进行了弯曲试验,测得其抗弯屈服承载力为1.78 kN、抗弯屈服弯矩为40.05 kN·mm,其性能显著优于贾贺然等^[14]研究得到的12 mm榉木销的抗弯性能(抗弯屈服承载力0.52 kN、抗弯屈服弯矩17.84 kN·mm). 这表明,当直径相同时,木销密度越大,木销的抗弯屈服承载力和抗弯屈服弯矩也越大(巴西红檀和榉木销密度分别为1.127 g/cm³和0.711 g/cm³).

2.2 木销-层板销槽承压性能

欧洲屈服理论模式(European yield model, EYM)中有2种木销连接延性破坏模式,分别为层板销槽承压屈服(I_m和I_s)、木销和层板销槽承压同时屈服(III_s和IV). 木销连接的力学性能主要受层板销槽承压强度与销钉的抗弯承载力影响^[32]. 销槽承压强度是欧洲屈服理论模式中的重要参数之一,也是评价层板销连接承载力的技术指标之一^[33-34]. 当前销槽承压研究多为钢销-层板^[35-36],木销-层板销槽承压研究较少. 王必林^[24]采用半孔试验法对压缩杨木销-樟子松胶合木层板进行了顺纹和横纹销槽承压试验,结果表明:压缩木销-胶合木层板顺纹和横纹销槽承压强度分别为29.37~36.30 MPa和16.59~19.54 MPa,顺纹销槽承压强度明显优于横纹;欧洲木结构规范BS EN383《Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners》和美国木结构规范ASTMD 5764-97a(2013)

《Standard test method for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products》均能较为准确地预测压缩木销-胶合木层板的顺纹销槽承压强度(绝对误差积分分别5.15%和8.52%),而对于横纹销槽承压强度存在较大预测误差(绝对误差积分分别19.92%和27.25%).

研究发现,层板种类对木销-层板销槽承压性能有一定影响. Ioana等^[31]采用12 mm巴西红檀木销分别与云杉、云杉制CLT和栗木层板组合,并进行顺纹销槽承压试验,得到3种木销-层板销槽承压强度值,分别为11.3、11.9、12.7 MPa. 层板密度由大到小为栗木、云杉制CLT和云杉,表明随着层板密度的增大,木销-层板顺纹销槽承压强度有增长的趋势,但该趋势并不明显.

木销种类对木销-层板销槽承压性能的影响存在分歧. Ioana等^[31]采用全孔法进行顺纹销槽承压试验,测得巴西红檀木销-云杉层板和钢销-云杉层板顺纹承压强度值分别为11.3、31.3 MPa,钢销顺纹销槽承压强度明显优于巴西红檀木销. 贾贺然等^[14]采用半孔法进行横纹销槽承压试验,测得榉木销-云杉/松/冷杉(SPF)层板与钢销-SPF层板横纹的销槽承压强度基本相同,分别为28.20、28.36 MPa. 2个研究结果不同的原因:一方面,可能是木销种类对顺纹销槽承压性能有影响,对横纹销槽承压性能基本无影响;另一方面可能是采用了不同的试验方法和评估方式. 研究表明^[34]销槽承压强度的试验方法和评估方式对横纹销槽承压强度有重要影响,这需要在今后的研究中进一步确认.

2.3 木销节点抗剪性能

当前,主要采用双剪试验^[37]和单剪试验^[38]来探

究层板销连接节点的抗剪性能. 2种试验示意图如图9所示.

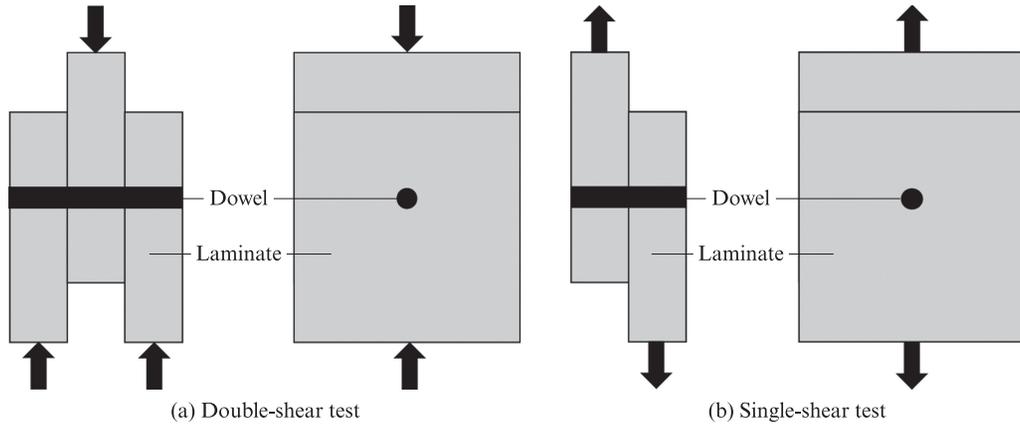


图9 木销剪切试验示意图

Fig. 9 Schematic map of wood dowel shear test

Jung等^[37]采用单销双剪试验,探讨了销的初始刚度、极限承载力、屈服强度等抗剪性能. 结果表明: 其余变量一致时,压缩木销节点的极限承载力、屈服强度和耗能明显优于未压缩木销,而初始刚度无明显不同;加载方向平行于销截面木纹时,压缩木圆销和方销的极限承载力和初始刚度分别为6.10~7.65、8.33~11.07 kN和4.09~4.43、6.73~8.49 kN/mm,其中压缩木方销承载力与钢圆销的极限承载力基本相当,均为6.97~13.87 kN.

薛莹莹等^[38]采用单剪抗拉试验,探究了水青冈木销(直径10 mm、平均密度0.703 g/cm³、含水率2%、抗弯强度93.68 MPa)和自攻螺钉(直径5.2 mm、头部直径10.3 mm、抗弯强度1 184.3 MPa)的极限荷载、初始刚度和延性系数等抗剪性能. 结果表明:水青冈木销的极限荷载低于自攻螺钉(两者分别为3.62、5.25 kN)、延性系数与自攻螺钉相似(两者分别为2.02、2.39)、初始刚度明显优于自攻螺钉(两者分别为1.11、0.38 kN/mm).

研究发现,木销种类、层板种类、厚度和加工方式等对木销节点抗剪性能有重要影响.

2.3.1 木销种类

E-Houjeyri等^[39]在单调和循环加载条件下对云杉层板-压缩云杉木销(SJ-SCWD)和云杉层板-橡木销(SJ-OWD)2种节点进行了顺纹方向的单销双剪试验. 图10为木销种类对节点抗剪性能的影响. 图10显示,压缩云杉木销节点抗剪承载力为11.0~13.0 kN,显著高于橡木销节点的抗剪承载力4.0~7.5 kN. 另外压缩云杉的弹性模量和断裂模量显著高于橡木,这也在一定程度上说明提高木销材性可以增强节点抗剪承载力.

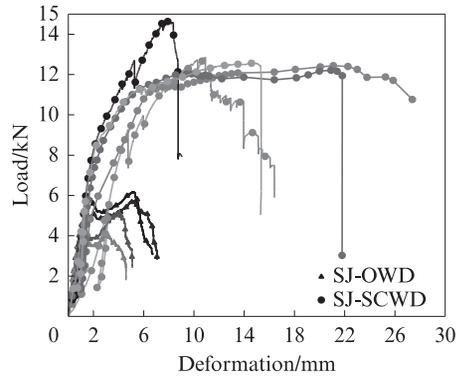


图10 木销种类对节点抗剪性能影响

Fig. 10 Effect of dowel types on shear properties of joints^[39]

2.3.2 层板种类和厚度

研究表明,层板种类对节点抗剪性能有影响^[31,39]. 图11为层板种类对节点抗剪性能影响. 由图11可见,当采用云杉层板-压缩云杉木销和橡木层板-压缩云杉木销做单销双剪试件时,橡木层板和云杉层板节点的顺纹抗剪强度和初始刚度分别为

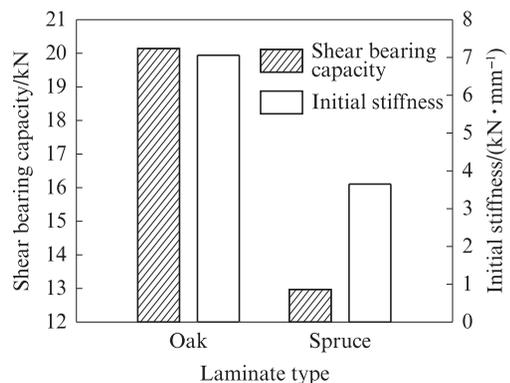


图11 层板种类对节点抗剪性能影响

Fig. 11 Effect of laminate types on shear properties of joints^[39]

20.14、12.97 kN和7.06、3.65 kN/mm,橡木层板节点的抗剪强度和刚度优于云杉^[39]。橡木层板的密度、弹性模量和断裂模量均大于云杉,表明提高层板材性可以增强节点抗剪强度和初始刚度。

表3为不同层板厚度在双剪试验中的力学性能对比。由表3可见,层板厚度的增加也可以提高销连接节点的抗剪承载力和延性,但会降低节点刚度^[40]。

表3 不同层板厚度在双剪试验中的力学性能对比
Table 3 Comparison of mechanical properties of different thickness of laminates in double-shear test^[40]

Dowel diameter/mm	Edge laminate thickness/mm	Core laminate thickness/mm	Initial stiffness/(kN·mm ⁻¹)	Shear bearing capacity/kN	Yield strength/kN
12	12	24	5.37	6.35	11.66
12	36	48	2.51	9.98	12.69

Note: The laminate of the specimen is glulam, and the dowel is densified poplar. All variables are consistent except the thickness of laminates.

2.3.3 其他因素

根据木销连接工作原理,木销与层板组合加工方式主要为木锤敲入和高速旋转钻入。研究表明^[11]:木销在高速旋转钻入时产生的损伤明显大于敲入时,敲入式的单销双剪试件的平均抗剪承载力(6.786 kN)略高于高速旋转式试件(6.127 kN)。

此外,木销节点抗剪性能也因木材的生物质性和干缩湿胀性而受环境湿度影响^[31]。

3 DLT 构件性能研究

目前针对 DLT 构件的力学性能研究主要是垂直

DLT 木梁抗弯性能、DLT 板抗弯性能和振动特性^[41]。

3.1 垂直 DLT 木梁抗弯性能

3.1.1 性能对比

表4汇总了当前主要的垂直 DLT 木梁和胶合木梁抗弯性能对比。由表4可见:垂直 DLT 木梁的抗弯强度和抗弯刚度均低于胶合木梁,分别约为胶合木梁的 1/2 和 1/4;但最大变形和延性明显优于胶合木梁,约为胶合木梁的 2 倍。这是由于胶结的完全刚性显著提高了层板的抗弯强度和抗弯刚度,而木销的半刚性连接可以通过层板间的相对滑移进行耗能,从而提高木梁整体的延性。

表4 垂直 DLT 木梁和胶合木梁力学性能对比

Table 4 Comparison of mechanical properties between DLT-vertical and glulam beams

Resource	Structural composition	Mechanical index (mean or range)			
		Flexural strength/MPa	Flexural rigidity/(kN·m ²)	Maximum deformation/mm	Ductility
Ref. [39]	DLT: Oak laminate + compressed spruce dowel	—	6.97	105.71	4.53
	Glulam: Oak laminate	—	16.11	40.30	2.05
Ref. [42]	DLT: Scots pine laminate + compressed Scots pine dowel	19.3–30.9	—	—	1.5–4.1
	Glulam: Scots pine laminate	54.0–73.2	—	—	1.2–2.0
Ref. [43]	DCLT: SPF laminate + compressed poplar dowel	23.00	3.72	85.00	—
	Glulam: SPF laminate	45.06	19.82	35.00	—

同时,研究发现^[39],胶合木梁的破坏模式为脆性破坏,而垂直 DLT 木梁的破坏模式主要是底层板的顺纹开裂和木销断裂造成的层板间错位,如图 12 所示。

3.1.2 影响因素

目前,垂直 DLT 木梁抗弯性能研究主要是以木销的相关性能为变量,探究木梁的初始刚度、抗弯模量、抗弯承载力和变形等。研究表明,木销间距(数量)、直径及种类、插入角度对垂直 DLT 木梁抗弯性能均有重要影响。

(1)木销间距(数量)

O’loinsigh 等^[15]制作了1种采用高速旋转木销进

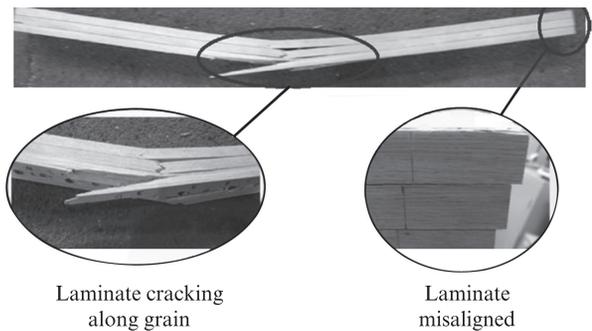


图12 垂直 DLT 木梁破坏模式
Fig. 12 Failure mode of DLT-vertical beams^[39]

行层板连接的4层垂直 DLT 木梁,研究了木销间距对垂直 DLT 木梁力学性能的影响,结果见图 13。由

图13可见:采用木销数量为44、32、20、0的垂直DLT木梁抗弯承载力和最大变形分别为24.00、22.75、22.00、21.00 kN和98.70、108.15、115.04、123.57 mm;在试验范围内,随着木销间距的减小(即木销数量的增加),垂直DLT木梁的抗弯承载力均呈现增长趋势,但最大变形逐渐减小。

Sotayo等^[12]通过ABAQUS数值模拟,探讨了3层垂直DLT木梁初始横向刚度,结果表明,在试验范围内,随着木销间距的减小(沿木梁纵向方向由100 mm减小到50 mm),垂直DLT木梁的横向刚度增大。Bouhala等^[44]通过四点弯曲试验和数值模拟,探讨了木销间距和排数对垂直DLT木梁结构性能的影响,结果表明:当木销数量不变时,随着木销排数的增加,垂直DLT木梁的抗弯承载力降低;当木销排数不变时,随着木销数量的增加,垂直DLT木梁的抗弯承载力提高。

上述研究表明,木销数量的增多使得结构整体性得到了提高。因此,减小木销间距或增加木销数

量,一定程度上可以提高垂直DLT木梁的抗弯强度和刚度。

(2)木销直径及种类

Sotayo等^[42]采用压缩木销为欧洲赤松和山毛榉,层板为欧洲赤松组合制作了7层垂直DLT木梁,并对其抗弯性能进行了研究,结果表明:当其余变量一致时,采用木销直径为10、15 mm的垂直DLT木梁平均抗弯模量和抗弯强度分别为2.6、3.7 GPa和20.2、22.0 MPa,表明适当增大木销直径可以提高木梁抗弯模量;当其余变量一致时,分别采用压缩赤松木销和压缩山毛榉木销的垂直DLT木梁平均抗弯模量和抗弯强度为2.5、2.6 GPa和34.8、20.2 MPa,一定程度上说明选择高性能木销可以增强垂直DLT木梁抗弯强度。

也有学者采用回收的工程木制作木销,来连接层板形成垂直DLT木梁,并对该木梁进行了抗弯性能研究^[45],如图14所示。研究表明:回收的工程木可以用做DLT中的木销。

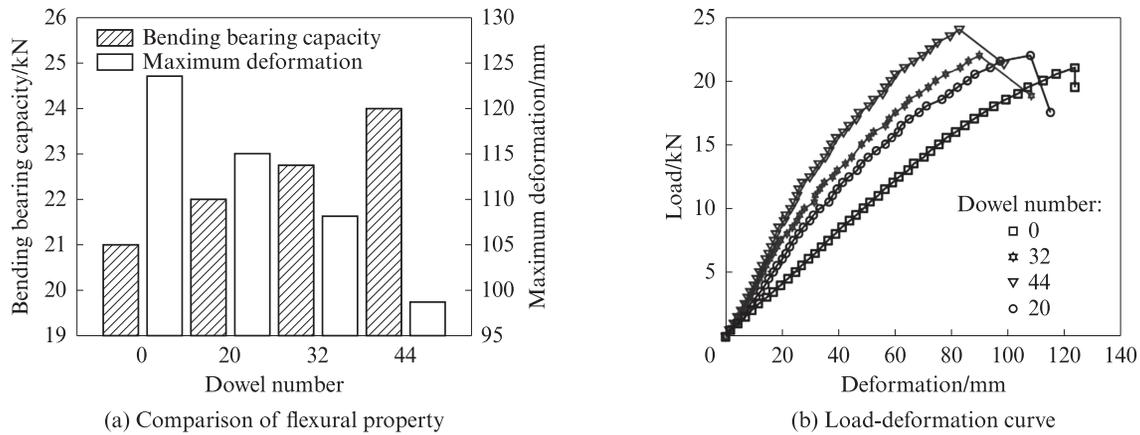
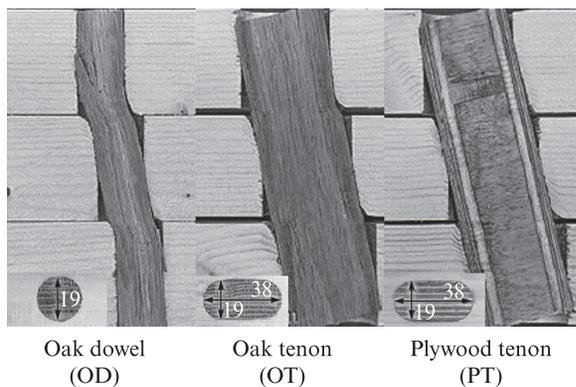
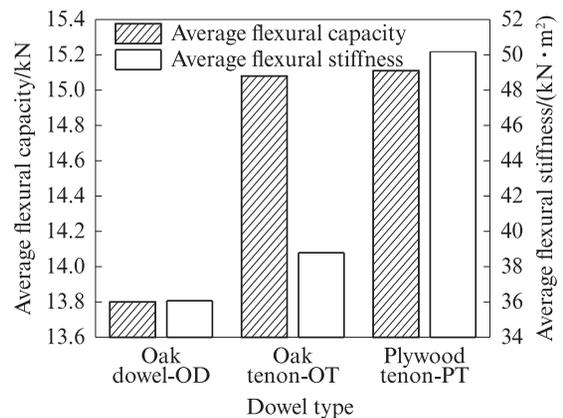


图13 木销间距(数量)对垂直DLT木梁力学性能影响
Fig. 13 Effect of dowel spacing on flexural performance of DLT-vertical beams^[15]



(a) Dowel type(size:mm)



(b) Comparison of flexural property

图14 回收工程木制木销对垂直DLT木梁力学性能影响
Fig. 14 Effect of recycled dowel on flexural performance of DLT-vertical beams^[45]

(3)木销插入角度

关于木销插入角度对垂直DLT木梁抗弯性能影响的研究结果存在一定分歧. Sotayo等^[42]采用四点弯曲试验对7层垂直DLT木梁的破坏模式、抗弯强度和抗弯模量等力学性能进行了研究,结果表明:木销间距为50 mm时,木销插入角度为55°和90°的垂直DLT木梁抗弯模量均为2.5 GPa,故木销插入角度对木梁的抗弯模量无明显影响. 而李桥等^[13]对双层垂直DLT木梁进行了四点弯曲试验,结果表明:在试验范围内,木销插入角度为60°和90°的垂直DLT木梁初始刚度和极限承载力分别为275.42、313.29 N/mm和8.51、10.18 kN,表明木销插入角度的增加会提高木梁的抗弯性能.

以上2个研究结果出现分歧的原因可能是垂直DLT木梁的其他变量数值未统一,在不同情况下,影响垂直DLT木梁力学性能的关键变量会发生变化. 因此,后续需要在保证其余变量尽可能相同的情况下,进一步确认木销插入角度及其与其他

变量之间的相互关系对垂直DLT木梁抗弯性能的影响.

3.2 DLT板性能研究

当前,针对DLT板性能研究相对较少,主要是探究DCLT板抗弯模量、抗弯刚度等抗弯性能,以及自振频率、阻尼等振动特性.

3.2.1 DCLT板抗弯性能

(1)性能对比

研究发现,DCLT板与垂直DLT木梁抗弯性能相似,均具有优良的延性特性和抗震性能. Sotayo等^[42]对DCLT板进行了弯曲试验,并与CLT进行了比较,结果见图15. 由图15可见:(1)截面尺寸相近时,DCLT的抗弯强度较低,约为CLT抗弯强度的1/2;但DCLT的延性系数显著高于CLT.(2)CLT板材为典型的脆性破坏,主要是胶层的分离和层板的滚动剪切破坏;而DCLT板材表现出不同破坏模式,包括围绕木节发生的层板拉伸破坏及靠近支撑辊轴的横向层板沿木销排列方向破坏,所有破坏中木销并无损伤.

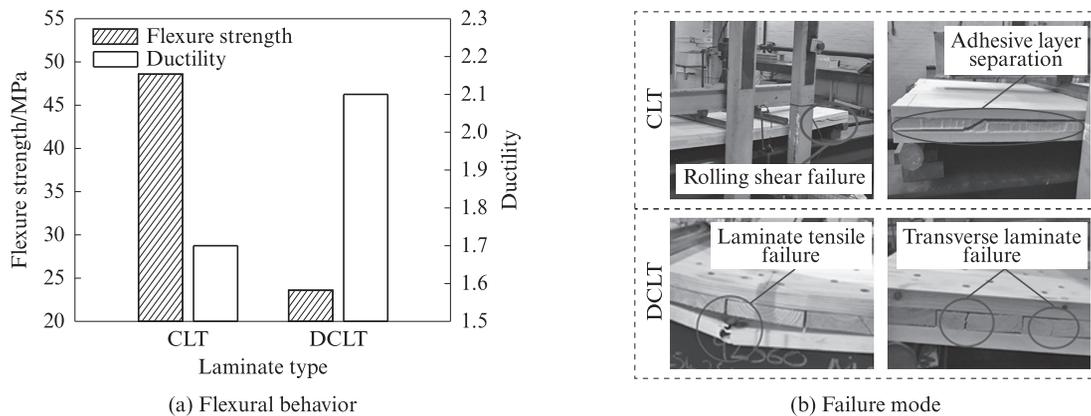


图15 DCLT与CLT板抗弯性能对比

Fig. 15 Comparison of flexural performance between DCLT and CLT plates^[42]

(2)影响因素

图16为层板数量及种类对DCLT板抗弯性能的影响. 由图16可见:(1)5层DCLT板材的纵向抗弯刚度和断裂模量约为3层DCLT板材的2倍和0.8;当均布荷载为2 940 N/m²、挠度标准为l/400时(l为跨度),3层和5层DCLT板材的最大跨度分别为3.25、4.50 m,说明层板数量的增加可以提高DCLT板材的抗弯刚度及结构设计的最大跨度^[18]. (2)橡木DCLT的抗弯模量和抗弯强度均高于欧洲赤松DCLT;对比于欧洲赤松层板,橡木层板较高的抗弯强度和刚度显著提高了DCLT的抗弯模量和抗弯强度,说明可以通过改善层板力学性能来优化DCLT板材的抗弯性能^[42].

木销直径似乎对DCLT板抗弯性能存在影响.

木销直径16 mm的DCLT抗弯模量和抗弯强度均优于木销直径10 mm的DCLT^[42],但由于该研究中存在其余变量,因此结论需要进一步确定. 图17为层板拼接方式对DCLT板抗弯性能影响. 由图17可见,相邻层板拼接处凹槽的有无对DCLT板抗弯性能无明显影响^[42],故DCLT加工可以直接采用平接方式进行拼板,以减少加工流程,便于组装.

3.2.2 DLT板构件振动特性

现有研究表明^[46-47],DCLT板振动特性满足标准要求. 通过弯曲试验和ABAQUS数值模拟,得到了足尺DCLT板的自振频率、挠度和参数b分别为11.0 Hz、0.82 mm/kN和137,均满足欧洲木结构设计规范^[21]要求(自振频率大于8 Hz、挠度0.4~4.0 mm/kN、参数b为50~150). 同时,研究发现,相

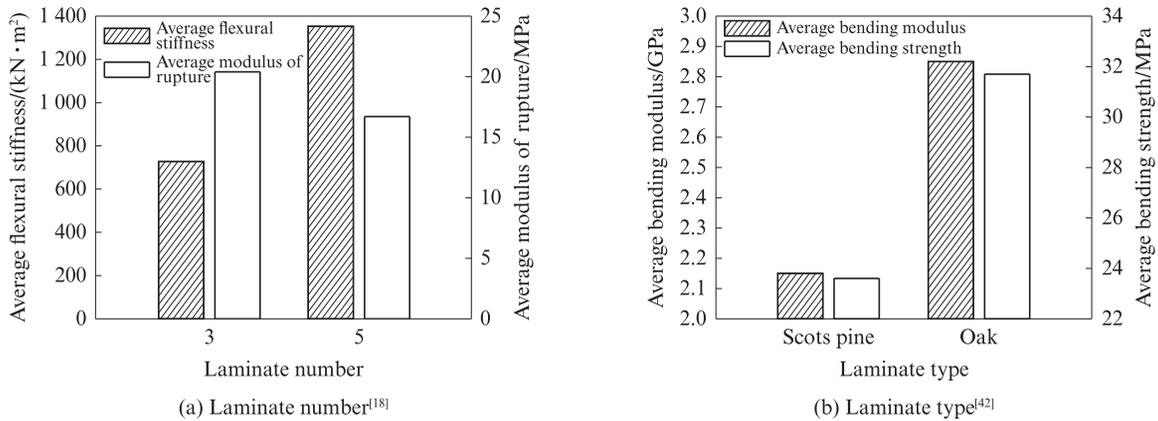


图16 层板数量及种类对DCLT板抗弯性能的影响

Fig. 16 Effect of number and type of laminates on flexural performance of DCLT plates

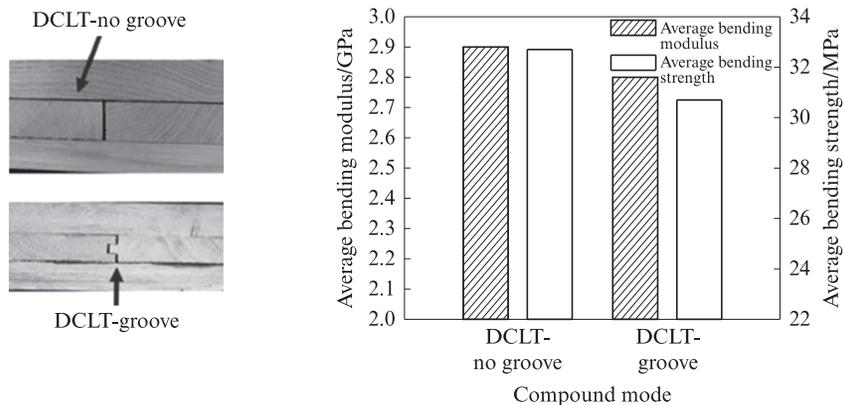


图17 层板拼接方式对DCLT板抗弯性能影响

Fig. 17 Effect of laminate splicing method on flexural performance of DCLT plate^[42]

邻层板拼接处有无凹槽对DCLT板的实测振动频率值和阻尼也基本无影响。

4 结论与展望

一系列的研究成果证明DLT作为结构用材应用于建筑中的可行性。通过对DLT构造分类的介绍及研究现状的阐述,得到相关结论:(1)构造方面,仅由木销和层板组成的DLT是一种近似全实木的工程木产品,具有绿色节能、可持续性的优势,且其结构简单,构造灵活,可应用范围广泛。(2)性能方面,木销节点、垂直DLT木梁和DCLT板均具有优良的延性特性和抗震性能;虽然其在强度、刚度性能上仍与钢销节点、胶合木梁及CLT板存在一定差距,但可以通过调整相关变量来增强节点及构件性能。

为提高DLT的力学性能,扩大其工程应用,对DLT进一步的研究内容提出以下建议:

(1)在材料方面,增加国产木材的应用,降低国内工程木产品对国外进口材的依赖。目前作为DLT的主体材料——层板,仍主要采用国外进口板材,如何有效利用国产材发展DLT等工程木产品是如今需

要深入研究的课题。为满足DLT层板力学性能的要求,需要进一步研究国产材改性处理方式,同时尽快建立国产材重要材性数据库和力学性能评估体系。

(2)在节点方面,探究关键变量,提高木销节点抗剪性能。当前木销连接机理仍不清晰,因此需要进一步探究更多变量对木销节点抗剪性能的影响,比如木销的插入角度等。此外,需要建立不同破坏模式下,适用于木销节点的抗剪承载力公式,完善木销节点计算规范。

(3)在构件方面,合理应用层板,提高DLT构件力学性能。垂直DLT木梁和DCLT板在抗弯强度和刚度上仍与胶合木梁和CLT板存在较大差距。因此,需要进一步考虑层板的选择,比如不同树种或高性能国产木基结构板材等,通过合理的组合方式来提高DLT的抗弯强度和抗弯刚度。另外,有必要对DLT进行长期性能试验,提供DLT的全生命周期评价数据。

参考文献:

- [1] 何敏娟,孙晓峰,李征.多高层木结构抗震性能研究与设计方法综述[J].建筑结构,2020,50(5):1-6.

- HE Minjuan, SUN Xiaofeng, LI Zheng. Seismic performance study and design method summary for multi-storey timber structures[J]. *Building Structure*, 2020, 50(5):1-6. (in Chinese)
- [2] 周海宾, 孙华林, 张俊珍, 等. 结构用胶合木性能若干影响因素[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(3):553-558.
ZHOU Haibin, SUN Hualin, ZHANG Junzhen, et al. Factors influencing strength properties of structural glulam[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(3):553-558. (in Chinese)
- [3] 周海宾, 刘晓娜, 韩刘杨, 等. 胶黏剂和指接接头对胶合木性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5):752-757.
ZHOU Haibin, LIU Xiaona, HAN Liuyang, et al. Influence of adhesive type and finger joint on properties of glulam[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(5):752-757. (in Chinese)
- [4] 何敏娟, 冯威. 层板钉接木(NLT)在竖向荷载作用下的承载性能研究综述[J]. *建筑技术*, 2020, 51(3):311-315.
HE Minjuan, FENG Wei. State-of-the-art of nail-laminated timber under vertical load[J]. *Architecture Technology*, 2020, 51(3):311-315. (in Chinese)
- [5] 茅鸣, 童科挺, 张家亮, 等. 长期荷载作用对钢-竹组合梁力学性能影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6):1280-1290.
MAO Ming, TONG Keting, ZHANG Jialiang, et al. Effect of long-term load on mechanical properties of steel-bamboo combination beams [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6):1280-1290. (in Chinese)
- [6] 张杰, 黄斐, 刘文地, 等. 改性竹纤维加气混凝土的制备与界面特性[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(7):686-692.
ZHANG Jie, HUANG Fei, LIU Wendi, et al. Preparation and interfacial characteristics of modified bamboo fibers reinforced autoclaved aerated concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(7):686-692. (in Chinese)
- [7] 贺勤, 龚蒙. 两种建筑用重型无胶木基工程结构材介绍[J]. *国际木业*, 2020, 50(5):15-17.
HE Qin, GONG Meng. Introduction to two gum free mass timber products for construction[J]. *International Wood Industry*, 2020, 50(5):15-17. (in Chinese)
- [8] Dowel laminated timber: Design and profile guide[Z]. Abbotsford: StructureCraft, 2021.
- [9] 魏新莉, 向仕龙, 何华. 水热预处理对杨木压缩木物理力学性能的影响[J]. *木材工业*, 2004(3):20-22.
WEI Xinli, XIANG Shilong, HE Hua. Effect of hydrothermal treatment on physical and mechanical properties of compressed poplar wood[J]. *China Wood Industry*, 2004(3):20-22. (in Chinese)
- [10] 陈瑞英, 魏萍, 刘景宏. 杉木间伐材压缩密化利用的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12):2306-2310.
CHEN Ruiying, WEI Ping, LIU Jinghong. Utilization of compressed Chinese fir thinning wood[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12):2306-2310. (in Chinese)
- [11] YOSHIHARA H, TUNEMATSU S. Bending and shear properties of compressed sitka spruce[J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41(2):117-131.
- [1 2] SOTAYO A, AU S K, GUAN Z. Finite element modelling and testing of timber laminated beams fastened with compressed wood dowels[C]//World Conference on Timber Engineering 2018. Seoul:Mondial Congress & Events, 2018.
- [13] 李桥, 宋焕, 王志强. 竹/木销连接组合木梁抗弯性能研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(2):218-222.
LI Qiao, SONG Huan, WANG Zhiqiang. Bending performance of timber composite beam fastened with bamboo/wood dowels[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2):218-222. (in Chinese)
- [14] 贾贺然, 高颖, 孟鑫森, 等. 木榫旋转焊接节点剪切试验研究与理论分析[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(1):38-44.
JIA Heran, GAO Ying, MENG Xinmiao, et al. Shear tests and theoretical analysis of wood-dowel rotation welding joints[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(1):38-44. (in Chinese)
- [15] O'LOINSIGH C, OUDJENE M, AIT A H, et al. Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36(11):245-250.
- [16] O' LOINSIGH C, OUDJENE M, SHOTTON E, et al. Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(2):313-321.
- [17] MILCH J, TIPPNER J, BRABEC M, et al. Experimental testing and theoretical prediction of traditional dowel-type connections in tension parallel to grain [J]. *Engineering Structures*, 2017, 152(12):180-187.
- [18] PEREIRA M, SOHIER L, DESCAMPS T, et al. Doweled cross laminated timber: Experimental and analytical study[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273(9):121820.
- [19] Parts catalogue system thoma Holz100[Z]. Amsterdam:Thoma, 2012.
- [20] Dowel laminated timber: Environmental product declaration[Z]. Abbotsford:StructureCraft, 2019.
- [21] European Committee for Standardization. Eurocode 5: Design of timber structures part 1-1: General and rules for buildings: EN 1995-1-1—2004 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [22] MILLER J F, SCHMIDT R J, BULLEIT W M. New yield model for wood dowel connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(10):1255-1261.
- [23] OUDJENE M, TRAN V, KHELIFA M. Cyclic and monotonic responses of double shear single dowelled timber connections made of hardwood species: Experimental investigations [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132(2):188-195.
- [24] 王必林. 压缩木销钉连接力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
WANG Bilin. Study on mechanical behaviour of timber joints with compressed wood dowel [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [25] HAO J X, XU L, WU X F, et al. Analysis and modeling of the dowel connection in wood T type joint for optimal performance [J]. *Composite Structures*, 2020, 253(12):112754.
- [26] KANAZAWA F, PIZZI A, PROPERZI M, et al. Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation [J].

- Journal of Adhesion Science and Technology, 2005, 19(12): 1025-1038.
- [27] 刘恪. 压缩木销旋转摩擦焊接抗拔性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
LIU Ke. Study on pullout resistance of compressed wooden dowel rotary friction welding [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [28] 李素瑕, 张海洋, 程良松, 等. 毛竹销(钉)的高速旋转摩擦焊接性能研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4):225-232,248.
LI Suxia, ZHANG Haiyang, CHENG Liangsong, et al. Bonding properties of bamboo dowel welded to wood with high-speed rotation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4):225-232,248. (in Chinese)
- [29] XU B H, LIU K, ZHAO Y H, et al. Pullout resistance of densified wood dowel welded by rotation friction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 38(8):04022186.
- [30] 杨鸿达, 王宁, 孟鑫森, 等. 竹榫旋转焊接工艺参数及机理探究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(2):141-150.
YANG Hongda, WANG Ning, MENG Xinmiao, et al. Study on process parameters and mechanism of bamboo dowel rotation welding[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(2): 141-150. (in Chinese)
- [31] IOANA T, BÁRBARA P, JORGE M, et al. Experimental evaluation of dowel-type timber joints with wooden dowels[J]. Structures and Buildings, 2020, 173(12):927-938.
- [32] JOHANSEN K W. Theory of timber connections[J]. Publication of International Association for Bridge and Structural Engineering, 1949, 9:249-262.
- [33] 祝恩淳, 潘景龙, 周晓强, 等. 木结构螺栓连接试验研究及承载力设计值确定[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4):54-63.
ZHU Enchun, PAN Jinglong, ZHOU Xiaoqiang, et al. Experiments of load-carrying capacity of bolted connections in timber structures and determination of design value[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4):54-63. (in Chinese)
- [34] 冯新, 肖宏彬, 陈伯望, 等. 木材横纹销槽承压强度研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):644-652.
FEN Xin, XIAO Hongbin, CHEN Bowang, et al. Research on embedment strength perpendicular to the wood grain[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):644-652. (in Chinese)
- [35] 郝丹, 王佳阳, 付帅, 等. 高湿环境下杨木单板层积材销槽的承压性能[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5):554-560.
HAO Dan, WANG Jiayang, FU Shuai, et al. Dowel-bearing capacity of poplar laminated veneer lumber in a high-humidity environment[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(5):554-560. (in Chinese)
- [36] 唐红元, 马梦淋, 杨媛, 等. 正交胶合木销槽承压强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(5):175-184.
TANG Hongyuan, MA Menglin, YANG Yuan, et al. Experimental study on dowel bearing strength of cross-laminated-timber (CLT) panels[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(5):175-184. (in Chinese)
- [37] JUNG K, KITAMORI A, KOMATSU K. Evaluation on structural performance of compressed wood as shear dowel[J]. Holzforchung, 2008, 62(4):461-467.
- [38] 薛莹莹, 朱旭东, 张雪雯, 等. 水青冈木-自攻螺钉复合榫连接节点单剪性能[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(1):68-74.
XUE Yingying, ZHU Xudong, ZHANG Xuewen, et al. Single shear performance of components connected by beech-self-tapping-screw composite dowels[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(1):68-74. (in Chinese)
- [39] E-HOUJEYRI I, THIA V D, OUDJENE M, et al. Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels [J]. Construction and Building Materials, 2019, 222(10):288-299.
- [40] XU B H, JIAO S Y, WANG B L, et al. Mechanical performance of timber-to-timber joints with densified wood dowels[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(4):04022023.
- [41] SOTAYO A, BRADLEY D, BATHER M, et al. Review of state of the art dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications[J]. Developments in the Built Environment, 2020, 1(2):100004.
- [42] SOTAYO A, DAN F B, BATHER M, et al. Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated panels[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259(3):119821.
- [43] XU B H, ZHANG S D, ZHAO Y H, et al. Mechanical properties of adhesive-free cross-laminated timber [J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(9):04022135.
- [44] BOUHALA L, FIORELLI D, MAKRADI A, et al. Advanced numerical investigation on adhesive free timber structures [J]. Composite Structures, 2020, 246:112389.
- [45] DERIKVAND M, HOSSEINZADEH S, FINK G. Mechanical properties of dowel laminated timber beams with connectors made of salvaged wooden materials [J]. Journal of Architectural Engineering, 2021, 27(4):04021035.
- [46] BUI T A, LARDEUR P, OUDJENE M, et al. Towards experimental and numerical assessment of the vibrational serviceability comfort of adhesive free laminated timber beams and CLT panels assembled using compressed wood dowels [J]. Engineering Structures, 2020, 216(8):1105836.
- [47] BUI T A, OUDJENE M, LARDEUR P, et al. Numerical modelling of the variability of the vibration frequencies of multi-layered timber structures using the modal stability procedure [J]. Composite Structures, 2022, 285:115226.