

文章编号:1007-9629(2023)12-1286-06

国产速生杉木胶合木的抗弯性能

欧加加¹, 张 毅^{1,2}, 龙卫国^{1,*}, 陈 迪¹, 钟 永³

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610042; 2. 中国建筑绿色建造工程研究中心, 四川 成都 610041; 3. 中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:为进一步合理利用中国丰富的速生林资源,用国产速生杉木机械分级层板制备了胶合木,并研究了其抗弯性能.结果表明:基于横向振动法杉木层板强度等级中,M22和M18占比达80%以上;胶合木抗弯性能的变异系数较层板显著减小,杉木层板等级与组坯方式对胶合木抗弯性能影响显著;国产速生杉木胶合木最高强度等级可达TC_T40,大部分可达到TC_T32(TC_{YD}32),其抗弯强度设计值均大于GB 50005—2017《木结构设计标准》中规定的相同等级胶合木的设计值.

关键词:速生杉木;胶合木;机械分级;足尺试验;抗弯性能

中图分类号:TU366.2;TU531.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.007

Bending Properties of Glulam Made by Domestic Fast-Growing Chinese Fir

OU Jiajia¹, ZHANG Yi^{1,2}, LONG Weiguo^{1,*}, CHEN Di¹, ZHONG Yong³

(1. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610042, China;

2. CSCEC Green Construction Engineering Research Center, Chengdu 610041, China;

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

Abstract: To better utilize the vast fast-growing forest resources in China, the bending properties of glulam made from domestically produced machine graded laminas of fast-growing Chinese fir were studied. The results show that the production of laminas with strength grade M22 and M18 accounts for more than 80%. The bending properties of glulam are significantly influenced by the grade and lay-up methods of the laminas, and the coefficient of variation of the bending properties is significantly reduced compared to individual lamina. The highest strength grade of glulam made by domestic fast-growing Chinese fir is TC_T40, in which TC_T32 or TC_{YD}32 account for most of the production, and the design value of bending strength exceeds the value specified in GB 50005—2017 *Standard for Design of Timber Structures*.

Key words: fast-growing Chinese fir; glulam; machine graded; full-scale test; bending property

现代木结构具有绿色低碳、抗震性能好和装配化程度高等优势^[1],近年来在中国发展迅速.然而,长期以来中国加工制作胶合木的层板依赖国外进口^[2],GB 50005—2017《木结构设计标准》、GB/T 50708—2012《胶合木结构技术规范》中规定的胶合木适用树种也主要为欧美针叶材,杉木等国产速生木材尚未列入其中.因此,研究国产速生杉木胶合木及其力学

性能具有重要的意义.

由于受生长条件及各种缺陷的影响,速生林木的材质较软、尺寸稳定性差、力学性能存在较大的变异性和不确定性^[3].为保证杉木胶合木安全可靠,必须对层板进行分级^[4].现有研究表明^[5],不同分级方法对木材等级有显著影响,机械分级方法具有较目测分级更高的可靠性,且纵向应力波法和横向振动法

收稿日期:2023-04-03; 修订日期:2023-05-08

基金项目:重庆市重点项目(2022TIAD-KPX0058);中建股份科技研发课题(CSCEC-2021-Z-40)

第一作者:欧加加(1988—),男,湖南娄底人,中国建筑西南设计研究院有限公司高级工程师,博士生.E-mail:ouyangjia28@126.com

通讯作者:龙卫国(1967—),男,江西吉水人,中国建筑西南设计研究院有限公司教授级高级工程师,硕士.E-mail:xnymjg@cscec.com

效率较高^[6-7]。

近年来,学者们利用杨木^[3,8]、杉木^[9]、落叶松^[10]等国产速生木材制备了胶合木梁并研究了其抗弯性能,取得了一系列成果,然而国产速生木材胶合木大多由未分级或目测分级的层板制作,其材料利用率低、变异性大,也尚未考虑不同性能层板以及组坯方式对胶合木整体性能的影响。为此,本文开展了基于国产速生杉木机械分级层板胶合木的抗弯性能研究,以期国产杉木胶合木的工程应用提供参考。

1 试验

1.1 杉木层板机械分级

速生杉木产自贵州省从江县,树龄30 a左右,胸径不小于25 cm。杉木原木经过锯截、干燥、刨光等工序,共制作了1 937根杉木层板试件,试件平均含水率(质量分数)约为14.4%,平均密度约为390 kg/m³。

表1 机械分级结果统计
Table 1 Results of machine graded

Grade	E_t /GPa		ρ /(kg·m ⁻³)		Number	Proportion/%
	Section	Mean value	Section	Mean value		
S	≥ 11.20	12.84	≥ 480	497	11	0.6
I	[9.40, 11.20)	11.62	[430, 480)	450	193	10.0
II	[7.60, 9.40)	10.08	[380, 430)	409	772	39.8
III	[5.80, 7.60)	8.70	[330, 380)	367	842	43.5
R	< 5.80	7.37	< 330	321	119	6.1

1.2 杉木层板足尺力学试验

由于通过无疵清材小试件的力学性能确定木材强度忽略了木材自身缺陷、尺寸效应等因素对其强度的影响,将会影响到木材强度的准确性与结构的安全性。根据GB/T 28993—2012《结构用锯材力学性能测试方法》,开展国产速生杉木层板的足尺抗弯与顺纹抗拉试验(见图1)。

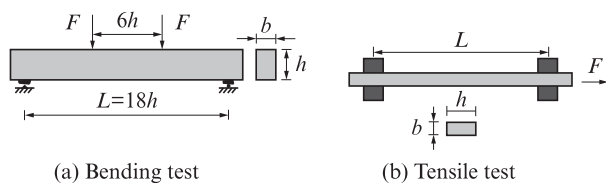


图1 力学性能试验

Fig. 1 Tests of mechanical properties

抗弯试件共121根,其中I、II、III级层板分别23、50、48根,试件尺寸为35 mm×80 mm×4 000 mm,对足尺杉木层板试件进行四点抗弯试验测试其静态抗弯弹性模量 E_s 与抗弯强度 f_m 。试验为窄面加载,跨度

将所有试件按截面宽度 b 分为2组, $b=150$ mm的层板1 305根及 $b=85$ mm的层板632根,试件的厚度 d 、长度分别为40、4 000 mm,且长度方向均为木材顺纹方向。

根据GB/T 29895—2013《横向振动法测试木质材料动态弯曲弹性模量方法》,采用横向振动法对杉木层板进行机械分级,通过Metriguard-Model 340 E-computer便携式机械分等机测试所有杉木层板的横向振动弹性模量 E_t :

$$E_t = GL^3 f_1^2 / (Kbd^3) \quad (1)$$

式中: G 为层板的质量; L 为层板跨度; f_1 为层板的第1阶固有频率; K 为常数,取 1.83×10^6 。

通过机械弹性模量分级,得到所有杉木层板试件的横向振动弹性模量与密度。本文将所有试件的横向振动弹性模量和密度分为5个等级,即S、I、II、III与R,并控制杉木层板最高等级与最低等级数量占比之和不超过10.0%,结果见表1。

L 与截面高度 h 之比为18,加载速率为20 mm/min。 E_s 和 f_m 计算式为:

$$E_s = \frac{23\Delta F \times L^3}{108\Delta e \times bh^3} \quad (2)$$

$$f_m = \frac{F_{\max} L}{bh^2} \quad (3)$$

式中: ΔF 为试件弹性范围内的荷载差,为最大荷载 $F_{\max}$ 的10%~40%; Δe 为由 ΔF 引起的试件跨中挠度。

顺纹抗拉试件共204根^[11],其中I、II、III级层板分别为55、106、43根,试件尺寸均为40 mm×150 mm×4 000 mm, L 为3 000 mm,加载速率为6 mm/min,足尺层板试件的顺纹抗拉强度 f_t 为:

$$f_t = \frac{F_{t, \max}}{bh} \quad (4)$$

式中: $F_{t, \max}$ 为足尺层板试件的最大拉力。

国产杉木层板的基本力学性能见表2(表中COV为变异系数)。通过与表1的对比可知,国产速生杉木层板的横向振动弹性模量与静态抗弯弹性模

量之间存在明显的正相关关系,且各级杉木层板的静态抗弯弹性模量、抗弯强度与顺纹抗拉强度均有明显的区分度.为满足制造胶合木的实际需要,分别依据 GB/T 36407—2018《机械应力分级锯材》与 GB/T 50708—2012 确定层板等级,结果亦列于表2.

由表2可见,基于横向振动法的层板等级与规范中规定的层板等级存在一一对应关系,且强度等级为 M22 和 M18 的层板占比达 80% 以上.这表明横向振动法可有效反映国产杉木层板的力学性能,且比规范方法更加便捷、高效.

表2 国产杉木层板的基本力学性能
Table 2 Mechanical properties of Chinese fir laminas

Grade	E_s		f_m			f_t			Grading method	
	Value/ GPa	COV/%	Value/ MPa	COV/%	5th percentile value/MPa	Value/ MPa	COV/%	5th percentile value/MPa	Stress grade	Elastic modulus grade
I	12.634	9.7	50.46	21.7	32.45	30.60	26.1	17.46	M26	M _E 12
II	11.641	10.2	47.67	21.5	30.81	24.47	26.1	13.96	M22	M _E 11
III	10.411	11.7	41.28	21.4	26.75	18.76	22.1	11.93	M18	M _E 10

1.4 杉木胶合木试件的设计

设计并制作了45根国产速生杉木胶合木试件,试件截面尺寸为140 mm×240 mm,长度为4 000 mm,均由7层机械分级非指接层板组坯.按组坯方式分为同等组合胶合木(编号 T1~T3)与对称异等组合胶合木(编号 Y1~Y3)两类,试件的参数见表3.

表3 试件的参数
Table 3 Parameters of specimens

Parameter	T1	T2	T3	Y1	Y2	Y3
Number	5	15	5	5	5	10
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	439	403	369	403	377	386
Lay-up method						

1.5 杉木胶合木抗弯试验

根据 GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》,对45根胶合木试件进行四点抗弯试验,试验装置见图2.竖向荷载通过MTS电液伺服抗弯试验机施加,将试件放在支座上,随机选择弯曲受拉面.为保证纯弯曲,试件跨度与截面高度之比 $L/h=16$.采用单调位移控制,加载速率为25 mm/min,破坏时间控制在1~3 min左右,结果取平均值.

试件静态抗弯弹性模量 E_m 与抗弯强度 f_m 的计算式为:

$$E_m = \frac{u(3L^2 - 4u^2) \times \Delta F}{48I \times \Delta e} \quad (5)$$

$$f_m = \frac{F_{\max} u}{2W} \quad (6)$$

式中: u 为单侧加载点至支座的距离; I 为试件的截面惯性矩; W 为试件的截面抵抗矩.

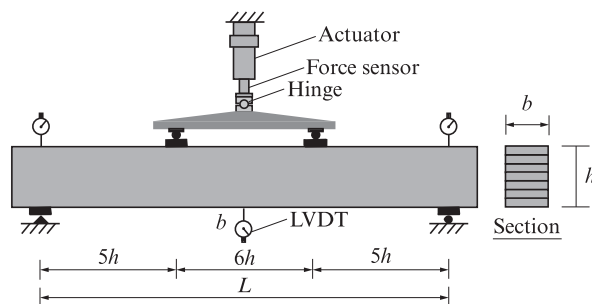


图2 试验装置
Fig. 2 Test setup

2 结果与讨论

2.1 试验现象及破坏模式

所有国产速生杉木胶合木试件在加载过程中的试验现象均大致相同,其破坏模式主要与木节等缺陷分布的位置有关.杉木胶合木的典型破坏模式见图3.在加载初始阶段,各试件跨中挠度随着荷载的增大呈线性增大;随着荷载的持续增加,试件的弯曲变形渐趋显著.当加载至接近峰值荷载附近时:若试件无明显缺陷,受拉区表面层板跨中或三分点位置纤维被拉断,且裂缝水平扩展,试件的承载力骤然下降,表现出明显的脆性破坏性质(见图3(a));若试件跨中纯弯段的受拉侧存在木节、斜纹等缺陷,缺陷附近纤维在拉应力的作用下绷断,层板产生横纹受拉发生纵向劈裂导致试件脆性破坏(见图3(b));少量胶合木试件在受弯过程中,中间层板木材在剪应力作用下发生劈裂破坏(见图3(c)).

2.3 荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度曲线见图4.结合试验现象和图4可知,除个别试件在抗弯试验中后期表现出一定的弹塑性外,大部分试件均突然发生脆性破坏,因此

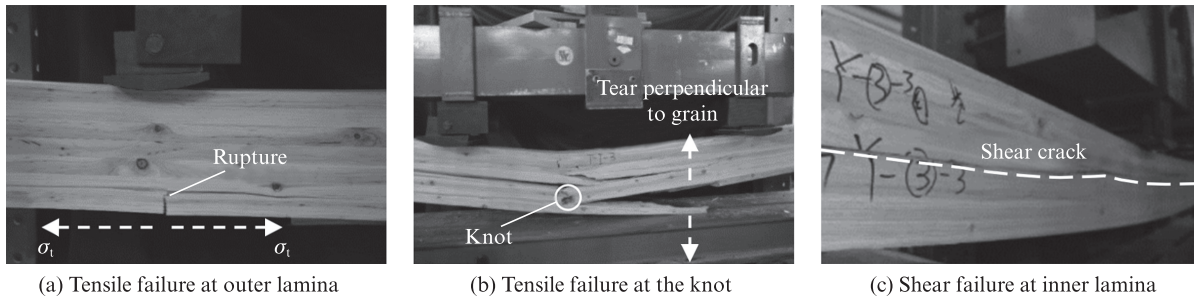


图 3 杉木胶合木的典型破坏模式
Fig. 3 Typical failure modes of Chinese fir glulams

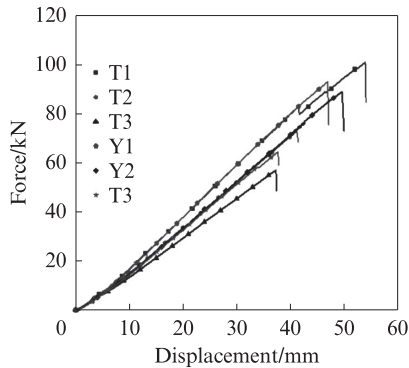


图 4 试件的荷载-挠度曲线
Fig. 4 Force-displacement curves of specimens

可将其受弯全过程划分为弹性阶段和破坏阶段. 由图 4 可见: 在弹性阶段, 试件的荷载-挠度曲线呈线性变化; 当加载至极限荷载时, 各试件的荷载骤降至其峰值荷载的 10% 左右; 在抗弯承载力方面, T2、T3 组试件的承载力较 T1 组分别下降了约 15.40% 和 43.50%, 而 Y2、Y3 组试件的承载力较 Y1 组则分别下降了约 0.08% 和 9.15%, 这表明胶合木的抗弯承载力随着组坯层板的等级降低而降低; Y2 组试件的承载力较 T1 组试件下降了 18.40%, 而较 T3 组试件提高了 44.30%, 且在 T2、T3 和 Y3 组试件中观察到

了相似的规律, 这表明胶合木的抗弯承载力主要由靠外侧层板木材控制, 靠外侧层板的等级越高, 其力学性能越优, 胶合木的抗弯承载力也越高.

2.3 抗弯弹性模量与抗弯强度

试件的抗弯弹性模量与抗弯强度见表 4. 由表 4 可见: T1、T2、T3 组试件与 Y1、Y2、Y3 组试件的抗弯弹性模量与抗弯强度均依次降低, 表明由机械分级杉木层板制成的胶合木具有明显的力学性能梯度; T3 组试件的抗弯弹性模量与抗弯强度均明显小于其他组试件, 当替换其表面或外侧层板为 I 级或 II 级杉木层板时, 其抗弯弹性模量可提高 15.4%~37.5%, 抗弯强度可提高 32.6%~45.5%. 由于杉木生长周期快、径级较小, 其高等级层板产量较少, 而中低等级层板产量占比可达 80% 以上 (见表 1), 若采用异等组合胶合木, 将更高效地利用不同机械等级的层板, 而其力学性能较中高等级同等组合胶合木并未有明显下降, 更具经济性. 此外, 相较于杉木层板, 胶合木抗弯弹性模量与抗弯强度的变异系数均更小, 这是由于胶合木在受力后会根据各层板的性能进行荷载分配与内力重分布, 从而优化了构件整体的受力情况, 力学性能更为稳定.

表 4 试件的抗弯弹性模量与抗弯强度
Table 4 Modulus of elasticity and bending strength of specimens

Group	E_m		f_m		Group	E_m		f_m	
	Value/MPa	COV/%	Value/MPa	COV/%		Value/MPa	COV/%	Value/MPa	COV/%
T1	13 211	4.40	53.23	8.51	Y1	12 760	7.04	46.50	8.94
T2	11 083	9.75	44.98	14.93	Y2	11 458	4.71	40.20	7.52
T3	9 608	3.62	29.87	14.71	Y3	11 422	5.98	39.61	18.57

2.4 抗弯性能理论预测

层板是胶合木的基本组成单元, 层板的力学性能直接影响着胶合木的力学性能. 本文采用剪力类比理论预测胶合木的抗弯性能, 其抗弯刚度 S 与抗弯强度为 f_m :

$$S = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2 \quad (7)$$

$$f_m = \frac{M_{\max} E_{\text{eff}} h}{2 E I_{\text{eff}}} \quad (8)$$

式中: E_i 、 I_i 、 b_i 、 h_i 、 A_i 、分别为第 i 层层板的弹性模量、惯性矩、截面厚度、截面高度、截面面积; z_i 为第 i 层层板中心到胶合木中心的距离; $M_{\max}$ 为胶合木试件跨中最大弯矩; E_{eff} 为表面层板的抗弯弹性模量.

胶合木抗弯性能试验值与预测值的对比见表

5. 由表 5 可见, T3 组试件的抗弯强度预测值较试验值高 20.7%, 这可能是由于未通过目测控制层板的外观质量, T3 组试件中存在相对更多的缺陷分布, 而木材的强度相对于弹性模量对缺陷分布更为敏感^[12], 因此试验所得抗弯强度偏低. 在实际

应用时, 综合机械分级与目测分级将进一步降低杉木胶合木力学性能的离散性. 其他组试件的预测值与试验值吻合度较好, 相对误差均小于 10.00%, 表明通过层板性能可预测国产速生杉木胶合木抗弯性能.

表 5 胶合木抗弯性能试验值与预测值的对比

Table 5 Comparison between test value and predictive value of bending properties of glulams

Group	E_m			f_m		
	Test value/MPa	Predictive value/MPa	Error/%	Test value/MPa	Predictive value/MPa	Error/%
T1	13 211	12 634	-4.57	53.23	52.52	-1.33
T2	11 083	11 641	5.03	44.98	48.22	7.21
T3	9 608	10 411	8.36	29.87	36.04	20.65
Y1	12 760	12 175	-4.58	46.50	47.79	2.77
Y2	11 458	11 824	3.19	40.20	43.54	8.31
Y3	11 422	11 544	1.08	39.61	42.62	7.61

2.5 抗弯强度的设计值

2.5.1 胶合木抗弯强度的标准值

通常情况下, 胶合木强度服从对数正态分布, 而其弹性模量服从正态分布^[13]. 由于本文各组试件样本均较少, 为提高预测精度, 依据欧洲规范 EN 14358 *Timber Structures—Calculation and Verification of Characteristic Values* 中规定的参数确定国产速生杉木胶合木的抗弯强度标准值 f_{mk} 与弹性模量标准值 E_k 为:

$$E_k = E_m - k_s s_E \quad (9)$$

$$f_{mk} = \exp(f_m - k_s s_f) \quad (10)$$

$$f_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln f_j \quad (11)$$

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j \quad (12)$$

$$s_f = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\ln f_j - f_m)^2}, 0.05 \right\} \quad (13)$$

$$s_E = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_j - E_m)^2}, 0.05 E_m \right\} \quad (14)$$

式中: k_s 为特征系数, 其取值与试件数量 n 有关, $n=5$ 时取 2.46, $n=10$ 时取 2.10, $n=15$ 时取 1.99; s_E 、 s_f 分别为试件抗弯强度与弹性模量的标准差; f_j 、 E_j 分别为第 j 个试件的抗弯强度和弹性模量.

胶合木的抗弯强度标准值和弹性模量计算值见表 6. 由表 6 可见: 随着层板等级的降低, 胶合木抗弯强度与弹性模量标准值均逐渐减小; 相较于 T3 组试件, T1、T2 组试件的抗弯强度标准值分别提高了

110.1%、62.1%, 弹性模量标准值分别提高了 37.5%、4.8%, 而 Y1、Y2、Y3 组试件的抗弯强度标准值分别提高了 81.8%、62.3%、27.7%, 弹性模量标准值分别提高了 25.2%、19.2%、18.5%, 表明适当提高胶合木的外侧层板等级将明显提高胶合木的整体性能.

为便于国产速生杉木胶合木的工程实际应用, 依据 GB/T 26899—2022《结构用集成材》, 对比了 6 组试件的组坯等级与实际等级, 结果也列于表 6. 由表 6 还可见, 除 T3 组试件外, 各组胶合木试件的实际等级均高于或等于其组坯等级, 且大部分胶合木的强度等级均可达到 TC_T32 (TC_{YD}32). 这表明基于横向振动法分级的杉木层板制备胶合木能够满足胶合木组坯要求的力学性能指标, 国产速生杉木可以作为制作胶合木的适用树种.

表 6 胶合木的抗弯强度标准值和弹性模量计算值

Table 6 Characteristic values of bending strength and calculated values for elastic modulus of glulams

Group	f_{mk} /MPa	E_m /MPa	E_k /MPa	Lay-up grade	Strength grade
T1	42.79	13 211	11 586	TC _T 36	TC _T 40
T2	33.01	11 083	8 932	TC _T 32	TC _T 32
T3	20.37	9 608	8 426	TC _T 28	TC _T 20
Y1	37.03	12 760	10 548	TC _{YD} 28	TC _{YD} 36
Y2	33.07	11 458	10 048	TC _{YD} 24	TC _{YD} 32
Y3	26.01	11 422	9 987	TC _{YD} 24	TC _{YD} 24

2.5.2 胶合木抗弯强度的设计值

根据木材设计指标可靠度分析方法^[14], 国产速生杉木胶合木抗弯强度的设计值 f_{md} 为:

$$f_{md} = \frac{f_{mk} K_{Q3}}{\gamma_R} \quad (15)$$

式中: K_{Q3} 为荷载持续作用效应系数,取 0.72; γ_R 为抗力分项系数。

胶合木的抗弯强度设计值见表 7。由表 7 可见:相较于 GB 50005—2017 中规定的同等级胶合木抗弯强度的设计值,本文所提出的杉木胶合木抗弯强度的设计值均偏大,计算结果偏保守,表明经合理组坯的杉木胶合木抗弯强度具有一定的冗余度,可应用于实际工程。

表 7 胶合木抗弯强度设计值 Table 7 Design values of bending strength of glulams						
Method	T1	T2	T3	Y1	Y2	Y3
Design value	29.5	23.0	14.2	25.8	22.9	17.9
GB 50005—2017	27.9	22.3		19.5	22.3	16.7

3 结论

(1)基于横向振动法的机械分级方法可高效、明显地区分国产杉木层板的力学性能,其中强度等级为 M22 和 M18 的层板占比达 80% 以上。

(2)杉木层板的组坯方式对国产速生杉木胶合木的抗弯性能影响显著,适当提高胶合木外侧层板的等级将明显提高胶合木的抗弯性能。

(3)基于弹性模量和抗弯强度标准值定级的国产速生杉木同等组合胶合木强度等级可达规范规定 TC_T20~TC_T40,异等组合胶合木强度等级可达 TC_{YD}24~TC_{YD}36,表明利用国产速生杉木制备胶合木是可行的。

(4)基于可靠度理论确定的国产速生杉木胶合木抗弯强度设计值均大于 GB 50005—2017《木结构设计标准》中规定的同等级胶合木强度,可为国产速生杉木胶合木的工程应用提供设计依据。

参考文献:

[1] CHAI H, GUO Z X, YUAN P F. Developing a mold-free approach for complex glulam production with the assist of computer vision technologies[J]. Automation in Construction, 2021, 127: 103710.

[2] 刘伟庆, 杨会峰. 现代木结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 16-43.

LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 16-43. (in Chinese)

[3] WANG Y Z, HOU Q, XU T G, et al. The bending-shear behaviors of steel reinforced fast-growing poplar glulam beams with different shear-span ratios[J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 124008.

[4] EHRHART T, STEIGER R, LEHMANN M, et al. European beech (fagus sylvatica L.) glued laminated timber: Lamination

strength grading, production and mechanical properties [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2020, 78: 971-984.

[5] 周海宾, 任海青, 吕建雄, 等. 分等方法对我国人工林杉木规格材等级的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 296-301.

ZHOU Haibin, REN Haiqing, LÜ Jianxiong, et al. Effects of grading methods on dimension lumber grades for Chinese fir plantation [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 296-301. (in Chinese)

[6] 乔鹭婷, 谢力生, 唐子桑, 等. 人工林杉木层板分级及性能研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(1): 41-45.

QIAO Luting, XIE Lisheng, TANG Zishen, et al. Study on the grading and property of plantation Chinese fir lamina[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(1): 41-45. (in Chinese)

[7] LIU Y, GONG M, LI L, et al. Width effect on the modulus of elasticity of hardwood lumber measured by non-destructive evaluation techniques[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 276-280.

[8] 刘伟庆, 杨会峰. 工程木梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 90-95.

LIU Weiqing, YANG Huifeng. Experimental study on flexural behavior of engineered wood beams [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 90-95. (in Chinese)

[9] 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, ZHAGN Junzhen, et al. Factors influencing strength properties of structural glulam[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 553-558. (in Chinese)

[10] 曹磊, 张仲凤, 曾丹, 等. 落叶松胶合木梁疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 27-35.

CAO Lei, ZHANG Zhongfeng, ZENG Dan, et al. Experimental research on fatigue behavior of larch glulam beams[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 27-35. (in Chinese)

[11] 龙卫国, 欧加加, 陈迪, 等. 机械应力分级杉木锯材的顺纹抗拉强度[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6): 653-659.

LONG Weiguo, OU Jiajia, CHEN Di, et al. Tensile strength parallel to grain of Chinese fir lumber graded by mechanical stress [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6): 653-659. (in Chinese)

[12] 钟永, 任海青, 姜万里. 木节对规格材抗弯强度影响的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 875-878.

ZHONG Yong, REN Haiqing, LOU Wanli. Experimental research on the effects of knot on the bending strength of dimension lumber[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 875-878. (in Chinese)

[13] LI H M, LAM F, QIU H X. Comparison of glulam beam-to-beam connections with round dovetail and half-lap joints reinforced with self-tapping screws[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116437.

[14] 祝恩淳, 牛爽, 乔梁, 等. 木结构可靠度分析及木材强度设计值的确定方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 28-36.

ZHU Enchun, NIU Shuang, QIAO Liang, et al. Reliability analysis of wood structures and method for determining design strength value of timber[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 28-36. (in Chinese)