

编者按:中国林科院木材工业研究所承担的“十二五”国家科技支撑计划“木质复合材料制造关键技术研究”课题“结构用木质复合材料构件制造技术研究”任务,开展了轻型木结构木质复合材料制造技术、性能评价技术及安全设计技术等研究,目前已获得国产规格材的强度设计指标、国产木桁架和结构用木质保温板的优化工艺等多项成果。

本刊自2017年第1期起,系列报道此项研究的成果,为我国木质复合材料的应用研究提供参考,为木质复合材料构件在轻型木结构建筑中的应用提供技术支撑。

兴安落叶松规格材抗弯强度设计值的研究

钟永,任海青,武国芳,周海宾,赵荣军,邢新婷

(中国林科院木材工业研究所;中国林科院林业新技术研究所,北京 100091)

摘要:以不同等级(Ic、IIc、IIIc、IVc)的国产兴安落叶松规格材(40 mm×90 mm×4 000 mm)为试验对象,进行足尺抗弯强度测试,采用最小二乘法确定其抗弯强度的最优概率分布模型,再运用可靠度理论分析方法,确定抗弯强度设计值,为改进我国规格材强度设计值的确定方法,促进规格材在建筑结构中的安全设计和合理应用提供依据。

关键词:兴安落叶松;规格材;足尺;抗弯强度;设计值;可靠度理论

中图分类号:TS6;TU366.2 文献标识码:A 文章编号:1001-8654(2017)04-0005-05

Design Value for Bending Strength of Chinese Larch Dimension Lumber

ZHONG Yong, REN Hai-qing, WU Guo-fang, ZHOU Hai-bin, ZHAO Rong-jun, XING Xin-ting

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry (CAF);

Research Institute of Forestry New Technology, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: Bending strength (MOR) of Chinese larch (*Larix gmelinii*) dimension lumber (grades Ic, IIc, IIIc and IVc for 40 mm×90 mm×4 000 mm) was obtained by full-size bending tests. Optimal probability distribution model for the MOR was investigated by the least square method. According to reliability theory, design values for MOR of dimension lumber with different grades were then determined. The goals of this study were to improve determination method for design values of dimension lumber strength and to provide scientific basis for safety design and reasonable application in wood building structures.

Key words: Chinese larch; dimension lumber; full-size; bending strength; design value; reliability theory

规格材作为最常用的结构用木质产品之一,可直接用于木结构建筑中,或作为基材用于制作胶合

木(Glulam)、交错层积木(CLT)等,在木结构建筑中的应用范围非常广泛^[1]。据城乡建设部预计,至2020年,我国每年用于木结构建筑的规格材数量约50万m³^[2]。

与钢材、混凝土和砌体等建材相同,规格材在建筑结构中用作结构构件时,其在规定设计基准周期内的安全性,需要依靠合理的设计来保证,其中

收稿日期:2017-03-20;修改日期:2017-06-01

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划“结构用木质复合材料构件制造技术研究”(2015BAD14B0502)。

作者简介:钟永(1985—),男,中国林科院木材工业研究所/林业新技术所助理研究员。

强度设计值的取值最为关键。如果强度设计值过大,设计尺寸截面过小,构件的设计安全系数低,会导致在规定设计基准周期内发生破坏的可能性增加;反之,构件的设计安全系数高,则设计过于保守,材料未得到充分利用,缺乏经济合理性^[3]。

由于缺乏足尺测试的基础数据,我国现有标准 GB 50005-2003《木结构设计规范》中,仍按照传统普通木结构的设计方法来确定国产规格材的强度设计值指标,即:先目测外观,将规格材分为 Ic、IIc、IIIc、IVc、Vc、VIc、VIIc 等 7 个等级,与北美规格材目测分级的 SS、No.1、No.2...对应;再根据规格材的不同等级,确定其主要适用范围(受压、受弯或受拉等),但不同等级规格材的强度设计值是根据其树种定为同一值。

以兴安落叶松规格材为例,根据树种直接判别,其强度等级为 TC17-B,即不同目测等级规格材的抗弯强度(MOR)设计值均统一取为 17 MPa。然而,加拿大、美国等木结构先进发达国家已进行大量足尺试验,发现不同目测等级规格材的实际抗弯强度存在显著差异,因此,对规格材的抗弯强度设计值视木材等级而异。

鉴于此,笔者以中国林科院木材工业研究所前期所积累的国产兴安落叶松规格材足尺试件的 MOR 测试数据为基础,对其 MOR 概率分布进行分析,并通过可靠度理论分析法,确定不同等级规格材的 MOR 设计值,旨在《木结构设计规范》的修订提供参考,以进一步完善我国结构用规格材强度设计值的确定方法,促进国产规格材的科学合理应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

兴安落叶松(*Larix gmelinii*)采自黑龙江省,原木径级 18~30 cm,经过锯截、干燥、刨光等流程,加工成 40 mm × 90 mm × 4 000 mm 尺寸的规格材,含水率为 10%~20%。

根据 GB 50005-2003《木结构设计规范》对规格材进行目测分级,获得 Ic、IIc、IIIc、IVc 共 4 个等级的规格材,数量分别为 429、201、285 和 165 根。

1.2 试验方法

参照 GB/T 28993-2012《结构用锯材力学性能测

试方法》,测试规格材的 MOR。测试跨高比设置为 18:1,破坏时间控制在 3 min 内,且随机选择试件的测试跨区以及试件拉伸侧。待试件破坏后,立即从破坏部位附近处截取含水率试件,测试含水率。

鉴于 GB 50005-2003 规定,所有木质材料的强度设计值采用的含水率基准点均为 12%。因此,参照 ASTM D 1990-16^[4],将规格材的抗弯强度原始数据调整至 12%含水率所对应的强度值后,再确定其抗弯强度的设计值。

2 结果与分析

2.1 MOR 的试验数据统计

经含水率调整后,不同等级规格材的 MOR 统计描述见表 1。

表 1 12%含水率对应规格材 MOR 的统计描述
Tab.1 Statistics of MOR for different lumber grades

等级	样本数	平均值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%
Ic	429	70.932	22.780	32.115
IIc	201	50.297	18.643	37.065
IIIc	285	56.164	21.147	37.652
IVc	165	53.614	23.410	43.664
IIc 和 IIIc	486	53.738	20.336	37.842

由表 1 中数据可知,随着规格材等级的降低,其 MOR 的变异系数呈现递增趋势(Ic < IIc < IIIc < IVc);除 IIc 等材外,MOR 平均值呈现递减趋势(Ic > IIIc > IVc)。

通过方差较分析(显著性水平设置为 0.05)发现,IIc 等材的 MOR 明显低于 IIIc 等材,主要是由于 IIc 等材的主要降等缺陷为木节(约占 90%),而 IIIc 等材的主要降等缺陷包括木节、裂纹、钝棱(占到 20%~30%)。由于裂纹和钝棱对木材 MOR 的影响小,因此,IIIc 等材的 MOR 反而高于 IIc 等材。该情况也存在于北美铁杉(*Tsuga canadensis*)规格材中^[5]。

在实际工程规格材的设计时,应遵循高等级规格材的强度设计值不低于低等级规格材的原则,因此,需要对不同等级规格材的 MOR 数据进行调整。在基于可靠度理论设计方法确定规格材的 MOR 设计值时,不仅取决于强度平均值,还受强度变异系数、强度尾部概率分布等因素的影响。

表 1 数据显示, IVc 等材的 MOR 变异系数远大于 IIc、IIIc 等材, 而 IIc、IIIc 等材的 MOR 变异系数较为接近, 因此, 只需对 IIc、IIIc 等材的 MOR 数据进行调整。将 IIc、IIIc 等材的 MOR 归为同一组, 其平均值和标准差分别为 53.738、20.336 MPa, 用于后续规格材 MOR 设计值的确定。

2.2 MOR 的概率分布和特征值

概率分布类型选择常用的正态分布 (Normal, 简写 Nor)、对数正态分布 (Lognormal, 简写 Log)

和两参数韦布尔分布 (2-P-Weibull, 简写 2-P-W), 拟合数据点选用全部 100%样本和尾部 25%样本, 对规格材 MOR 实测值的概率分布进行拟合, 并结合最小二乘法^[6], 来确定不同概率分布中的待定参数。

通过 MATLAB 编程计算, 不同等级规格材的拟合结果见表 2 和图 1a、1b。

从表 2 可知, 当基于全部 100%样本进行拟合时, Ic 等材采用 2-P-W 分布的整体拟合效果最佳; 而 IIc 和 IIIc、IVc 等材, 则采用 Log 分布的整体拟合效果

表 2 不同概率分布模型的拟合结果和 MOR 特征值
Tab.2 Fitting results for different probability distribution model and characteristic values of MOR

等级	特征值/ MPa	概率 分布	基于全部 100%试样样本拟合				基于尾部 25%试样样本拟合			
			样本数/个	均值/MPa	标准差/MPa	误差	样本数/个	均值/MPa	标准差/MPa	误差
Ic	36.862	Nor		69.819	23.715	0.078		64.608	17.227	0.003
		Log	429	72.605	26.048	0.114	107	74.119	29.243	0.001
		2-P-W		69.962	23.236	0.018		63.703	15.949	0.003
IIc 和 IIIc	24.535	Nor		52.005	20.699	0.325		47.840	14.004	0.005
		Log	486	54.887	23.489	0.090	122	57.624	26.773	0.003
		2-P-W		52.568	20.367	0.223		47.738	12.888	0.004
IVc	16.906	Nor		51.344	23.634	0.116		44.050	14.040	0.003
		Log	165	55.395	28.067	0.046	41	56.356	30.621	0.005
		2-P-W		52.536	23.442	0.054		44.607	14.179	0.003

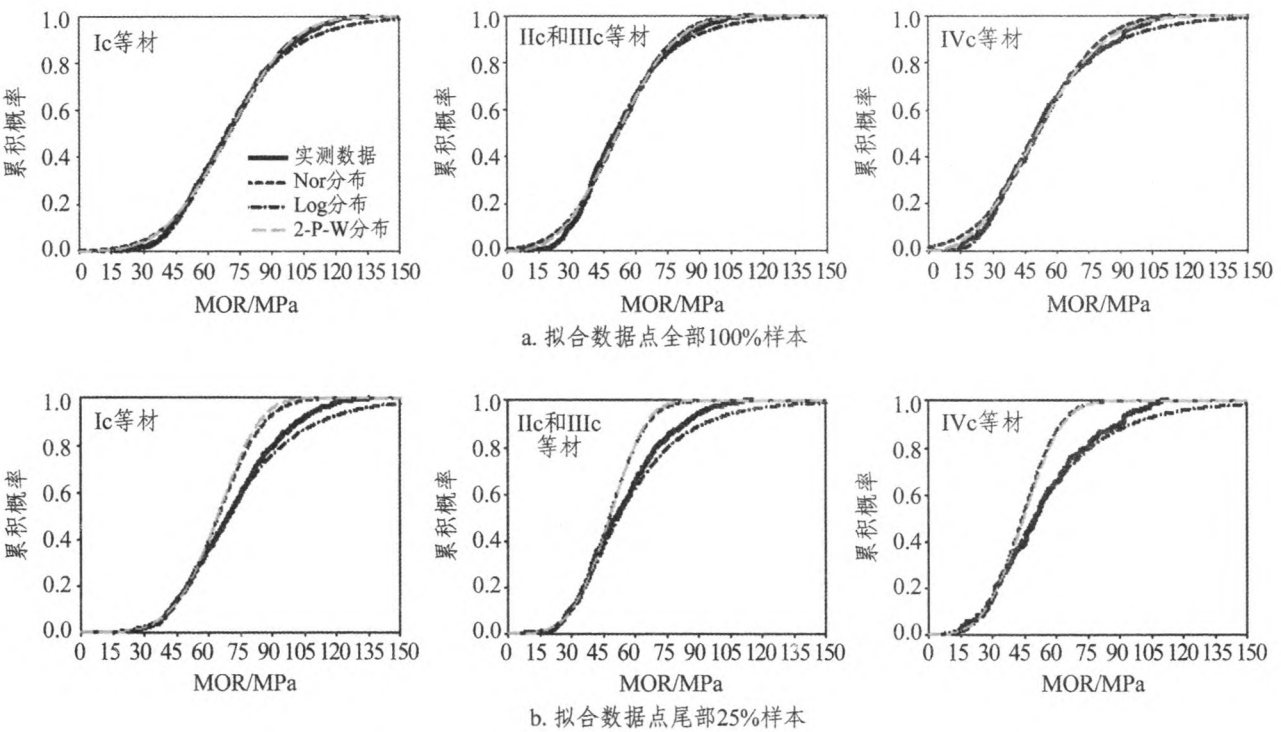


图 1 基于不同样本、不同概率分布模型对规格材 MOR 累计概率的拟合结果
Fig.1 Tested cumulative probability of MOR fitted by different probability distribution models

最佳。当基于尾部 25%样本进行拟合时, Ic、IIc 和 IIIc 等材采用 Log 分布的整体拟合效果最佳; IVc 等材则采用 Nor 分布的整体拟合效果最佳。

在基于可靠度理论设计方法确定规格材 MOR 的设计值时, 选用的概率分布类型和拟合数据点, 能否准确拟合实测规格材 MOR 的尾部概率分布, 对其设计值的确定最为重要^[7]。

当基于全部 100%样本进行拟合时(图 1), 所有等级规格材均是采用 Log 分布时, 能够更好地拟合其尾部概率分布(累计概率 $P < 0.2$); 而采用 Nor 和 2-P-W 分布拟合的尾部概率值, 明显大于实测值, 将会导致计算得到的抗力分项系数偏大, 即强度设计值偏小。当基于尾部 25%样本进行拟合时(图 2), 3 种分布均能较好地拟合规格材 MOR 的尾部概率。

以 75%置信度下的 5%分位值作为规格材 MOR 的特征值, 并采用非参数法, 计算得到 Ic、IIc 和 IIIc、IVc 等级规格材的特征值分别为 36.862、24.535 和 16.906 MPa。

2.3 MOR 的设计值

根据 GB 50068-2001《建筑结构设计可靠度统一标准》规定, 应采用可靠度理论分析方法, 来确定规格材 MOR 的设计值。

木结构可靠度理论分析的功能函数(G)及规格材 MOR 设计值(f_d)的计算公式为^[8]:

$$G = \frac{f_s K_Q K_A K_P}{f_k K_D} - \frac{(d + \rho q) K_B}{\gamma_R (\gamma_G + \rho \gamma_Q)} \quad (1)$$

$$f_d = \frac{f_k K_D}{\gamma_R} \quad (2)$$

根据 GB 50005-2003、GB 50068-2001 规定, 各参数的统计值和分布类型见表 3。活荷载标准值与恒荷载标准值的比值(ρ)取为 1.0。

表 3 可靠度分析中各参数的统计值
Tab.3 Statistic parameters for reliability analysis

参数	平均值	变异系数/%	分布类型
K_Q	0.72	12	正态分布
K_A	1.02	2.2	正态分布
K_P	1.00	5	正态分布
d	1.06	7	正态分布
q	0.644	23.3	极值 I 型分布
K_B	1.00	5	正态分布

根据式(2), 采用一次二阶矩法(JC 法)进行可靠度理论分析, 并通过 MATLAB 编程进行运算, 结果见图 2a、2b。

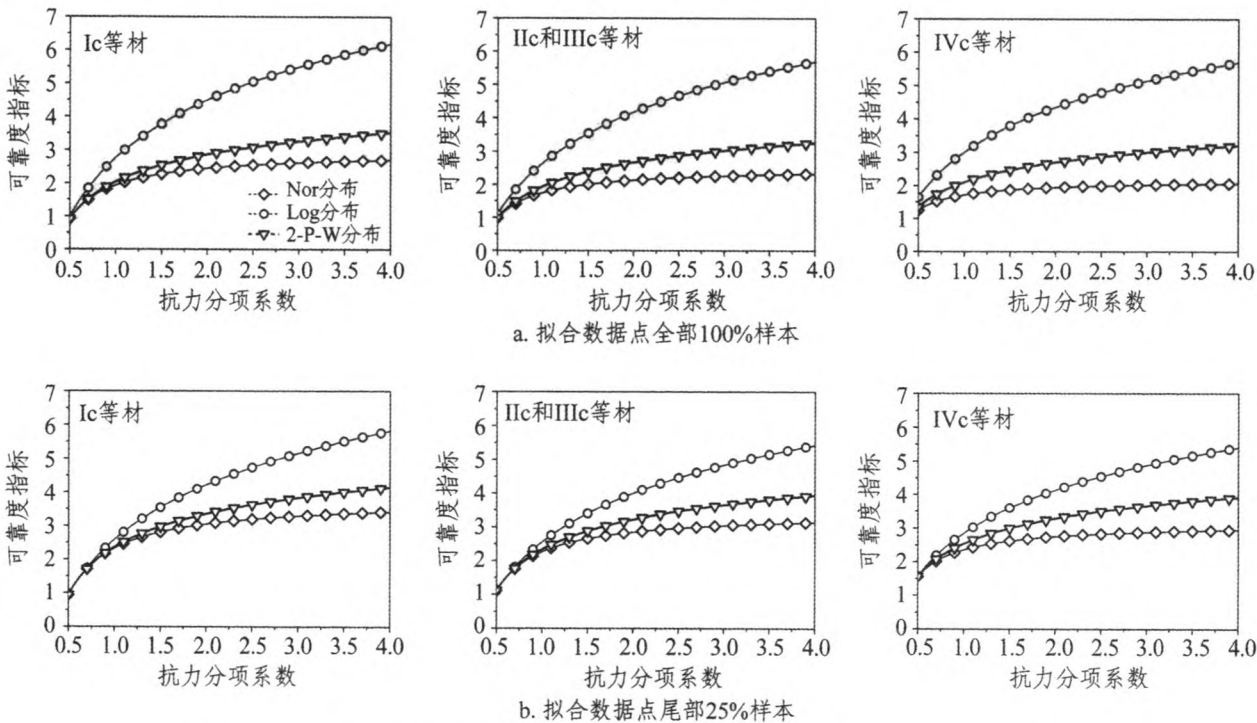


图 2 基于不同样本可靠度指标与抗力分项系数间的关系

Fig.2 Relationship between reliability index and resisting partial coefficient

由图 2 结果可知,对于不同等级规格材的 MOR,在采用 3 种分布时,其可靠度指标均随抗力分项系数的增大呈非线性递增。

Log 分布得到的可靠度指标,明显高于其他两种分布类型。基于全部 100%样本的拟合,由于在同一累积概率值时,Nor 和 2-P-W 分布拟合得到的 MOR 值明显低于实测值,而 Log 分布拟合的 MOR 值则与实测值接近(图 1)。而 MOR 的尾部累积概率值对可靠度指标具有显著影响,尾部累积概率值高,可靠度指标值小;反之,则可靠度指标值高^[6]。基于尾部 25%样本的拟合,则主要由于在中端部累积概率段,Nor 和 2-P-W 分布拟合得到的 MOR 值明显低于实测值,而 Log 分布拟合的 MOR 值则与实测值接近(图 2)。这些导致了基于 Log 分布获得的 MOR 设计值,高于其他两种分布获得的设计值。

基于结构安全等级和设计基准周期分别按 II 级、50 年的考虑,由于规格材抗弯属于延性破坏,根据 GB 50068-2001《建筑结构设计可靠度统一标准》规定,其目标可靠度 β_0 取为 3.2。根据图 2 得到目标可靠度对应的抗力分项系数,应用式(2),获得不同等级规格材 MOR 的设计值,计算结果见表 4。

表 4 规格材 MOR 的设计值和抗力分项系数

Tab.4 Design value and resisting partial coefficient of MOR

拟合数据点	等级	强度设计值 f_d /MPa			抗力分项系数 r_k		
		Nor	Log	2-P-W	Nor	Log	2-P-W
100% 样本	Ic	-	22.221	9.445	-	1.20	2.81
	IIc 和 IIIc	-	13.694	4.774	-	1.29	3.70
	IVc	-	10.966	3.082	-	1.11	3.95
尾部 25% 样本	Ic	10.490	20.416	14.995	2.53	1.30	1.77
	IIc 和 IIIc	-	12.989	9.013	-	1.36	1.96
	IVc	-	10.060	6.652	-	1.21	1.83

由图 2 和表 4 可发现:

1) 对于所有等级规格材,当采用 Nor、2-P-W 分布计算时,可靠度指标达到目标可靠度时的抗力分项系数均大于 1.7,而根据以往的经验,抗力分项系数取值往往远小于该值。

2) 尾部概率分布是对可靠度指标影响最为关键的因素之一。相对于采用全部 100%样本进行拟合(图 2a),尾部 25%样本能够更好地预测规格材 MOR 的尾部概率(图 2b),且 3 种不同概率分布得到的结果

开始趋于一致。因此,建议选用 Log 分布、尾部 25%试样样本,来推算规格材的 MOR 设计值。

采用上述可靠度理论设计法,不同等级规格材的 MOR 设计值分别确定为:

Ic 等材, 20.416 MPa (>17 MPa);

IIc 和 IIIc 等材, 12.989 MPa (<17 MPa);

IVc 等材料, 10.060 MPa (<17 MPa)。

将此设计结果与传统设计方法中^[4]规定的统一参考设计指标(17 MPa)相比可知:传统的统一定值,对于 Ic 等材的要求偏低,而对 IIc 和 IIIc、IVc 等材的要求则偏高。表明如果参照传统方法进行规格材的设计,可能会导致规格材在建筑结构中使用时安全隐患或浪费问题。

3 结论

1) 采用 Log 分布、尾部 25%试样样本,能够较好地拟合不同等级规格材的尾部概率分布,适用于确定规格材 MOR 的强度设计值。

2) 采用可靠度理论设计法,Ic、IIc 和 IIIc、IVc 等级规格材的 MOR 设计值分别为 20.416、12.989、10.060,抗力系数分别为 1.30、1.36 和 1.21。

3) 与本研究确定的 MOR 设计值比较,传统的统一设计定值对 Ic 等级规格材的要求偏低,而对 IIc 和 IIIc、IVc 等级规格材则偏高。在实际工程设计时,需考虑不同等级规格材强度值的差异,因材施教。

参考文献:

- [1] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京:中国建筑业出版社, 2009: 31-40.
- [2] 叶克林,吕建雄. 落叶松规格材加工利用技术研究[J]. 木材工业, 2010, 24 (6): 1-3, 11.
- [3] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 北京:大连理工大学出版社, 1996: 18-30.
- [4] Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens: ASTM D 1990-16 [S]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2016.
- [5] 赵秀,吕建雄,江京辉. 落叶松规格材抗弯性能特征值研究[J]. 木材工业, 2009, 23 (6): 1-4.
- [6] 黄仿伦. 数值分析[M]. 北京:电子工业出版社, 2002: 252-297.
- [7] Foschi R O, Folz B R, Yao F Z. Reliability-based design of wood structures [M]. First Folio Printing Corp. Ltd, 1989.
- [8] 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.

(责任编辑 向琴)