

文章编号:1007-9629(2023)07-0800-09

昆明地区室内自然环境对不同类型 木质梁蠕变性能的影响

张梓健, 李统, 邓书端, 万辉, 董春雷*
(西南林业大学 云南省木材胶黏剂及胶合制品重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要:采用自研足尺寸木质梁蠕变测试系统,对昆明室内自然环境下2种实木矩形梁和3种木工字梁进行了200 d蠕变测试,并分析其含水率与相对湿度的关系。结果表明:木质梁含水率的变化明显滞后于相对湿度的变化,且其在吸湿段的滞后大于解吸段;2种实木矩形梁和3种木工字梁在低湿波动、高湿波动、湿度持续波动上升和湿度持续波动下降这4类相对湿度典型变化时段的平均蠕变速率分别为 8.839×10^{-2} 、 1.183×10^{-2} 、 -1.730×10^{-2} 、 -3.598×10^{-2} 、 7.424×10^{-2} 、 9.007×10^{-2} mm/d,机械吸附蠕变特征明显;7条木质梁的 FB_{90} (加载90 d后蠕变挠度与加载1 min后蠕变挠度的比值)小于1.60,满足承重用梁的抗蠕变要求;实木矩形梁的抗蠕变性能优于木工字梁。

关键词:蠕变;自然气候;实木矩形梁;木工字梁;定量计算

中图分类号:TU366.3;TU317.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.013

Effect of Indoor Natural Environment on Creep of Different Wood Beams in Kunming Area

ZHANG Zijian, LI Tong, DENG Shuduan, WAN Hui, DONG Chunlei*

(Yunnan Provincial Key Laboratory of Wood Adhesives and Glulam Products, Southwest Forestry University,
Kunming 650224, China)

Abstract: The creep test of two types of wood rectangular beams and three types of wood I-beams under indoor natural environment in Kunming were conducted for 200 d using a self-developed full-size wood beam creep test system. The relationship between moisture content and relative humidity was analyzed. The results show that the changes in moisture content of the wood beams significantly lag behind the changes in relative humidity and the lag in the absorption is greater than that in the desorption. The average creep rates of two types of wood rectangular beams and three types of wood I-beams in four typical relative humidity change periods of low humidity fluctuation, high humidity fluctuation, rising humidity continuous fluctuation and declining humidity continuous fluctuation are 8.839×10^{-2} , 1.183×10^{-2} , -1.730×10^{-2} , -3.598×10^{-2} and 7.424×10^{-2} , 9.007×10^{-2} mm/d respectively. The mechanical absorption creep characteristics are obvious. The FB_{90} (ratio of creep deflection at 90 d to creep deflection at 1 min) of seven beams is less than 1.60, which meets the creep resistance requirement of beams for load-bearing. The creep resistance of wood rectangular beams is better than that of wood I-beams.

Key words: creep; natural climate; wood rectangular beam; wood I-beam; quantitative calculation

实木矩形梁和木工字梁是现代轻型木结构建筑楼 面及屋面的主要承重构件,其在外荷载和环境温湿度

收稿日期:2022-08-24; 修订日期:2023-01-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31960291);高等学校学科创新引智计划(D21027)

第一作者:张梓健(1997—),男,河北石家庄人,西南林业大学硕士生. E-mail: zhangzijian1209@163.com

通讯作者:董春雷(1979—),男,河南南阳人,西南林业大学高级实验师,硕士生导师,博士. E-mail: 632474671@qq.com

的作用下会发生蠕变,进而影响建筑的正常使用,甚至会危及建筑的安全^[1]。可控环境中小尺寸木材的蠕变研究虽然可以解释木材蠕变的典型现象和规律^[2-4],却难以描述实际服役大尺寸木材的蠕变,其原因是大尺寸木材吸湿及解吸的多变性较前者复杂很多^[5-6]。在此背景下,某些学者认为采用力学性能等级更高的规格材或缺陷较少的人造板材为翼缘、抗剪性能更好的定向刨花板或胶合板为腹板的木工字梁的抗蠕变性能比实木矩形梁好^[7-9]。但另外一些学者却认为实木矩形梁的截面尺寸普遍较木工字梁大,对相对湿度的敏感性不及木工字梁,因而其抗蠕变性能更优^[10-11]。

为解决工程界存在的上述困惑并探究室内自然环境对足尺寸木质梁蠕变的实际影响,本研究同时测试了2类共5种足尺寸木质梁(2种实木矩形梁和3种木工字梁)在自然环境下的蠕变。同时以蠕变测试期内的环境温湿度为边界条件,借助木材水分扩散理论和 Matlab 自编程序定量计算了2类木质梁内

部的水分分布,在此基础上量化评价室内自然环境与2类木质梁蠕变的关系及其对不同类型木质梁蠕变的影响。

1 试验

1.1 试验材料

在前期大量制作的2种实木矩形梁和3种木工字梁中分别精心挑选纹理平直、节疤较少且静曲弹性模量(E_{MOE})接近的试件各8条、共40条木质梁用于测试。对于实木矩形梁,每种规格试件中的7条用于静曲强度(σ_{MOR})测试,1条用于静曲蠕变测试;对于木工字梁,每种规格试件中的6条用于静曲强度测试,2条用于静曲蠕变测试。实木矩形梁和木工字梁的基本参数分别如表1、2所示。图1为试件截面的示意图。将所有待测试件在同一通风良好的专用房间内水平放置60 d,达到气干平衡状态后,再用锡箔纸对试件两端进行密封处理。

表1 实木矩形梁的基本参数
Table 1 Basic parameters of wood rectangular beams

Specimen type	Raw material	Dimension/(mm×mm×mm)	Density/(kg·m ⁻³)
SPRB	Southern yellow pine, <i>pinus taeda linn</i>	4 338.0×38.5×195.5	448
GWRB	SPF glulam from Canada	4 338.0×38.5×200.5	380

Note:SPF—Combination of three species (spruce-pine-fir) with similar properties; SPRB—Abbreviation of southern pine rectangular beam; GWRB—Abbreviation of glulam rectangular beam.

表2 木工字梁的基本参数
Table 2 Basic parameters of wood I-beams

Specimen type	Flange			Web			IB dimension/(mm×mm×mm)
	Raw material	Density/(kg·m ⁻³)	Dimension/(mm×mm)	Raw material	Density/(kg·m ⁻³)	Dimension/(mm×mm)	
SOIB	SPF finger-jointed lumber	380	38.5×38.5	OSB	650	184.5×10.0	4 338.0×38.5×235.5
LOIB	Populus LVL	551	38.5×38.5	OSB	650	184.5×10.0	4 338.0×38.5×235.5
LPIB	Populus LVL	551	38.5×38.5	Structural plywood	630	184.5×10.0	4 338.0×38.5×235.5

Note:OSB—Oriented strand board; LVL—Laminated veneer lumber; SOIB—Abbreviation of I-beam with southern pin flange and OSB web; LOIB—Abbreviation of I-beam with LVL flange and OSB web; LPIB—Abbreviation of I-beam with LVL flange and plywood web.

1.2 昆明地区的气象资料

用于昆明空气温湿度波动规律研究的资料来源于国家气象科学数据中心中国地面气象站昆明站的逐小时气象观测数据库^[12],此外,还来源于本试验中温湿度记录器所记录的温湿度数据。

1.3 仪器设备

(1)足尺寸木质梁静曲蠕变测试系统1套,放置于通风良好,可提供遮阳、避尘和挡雨试验条件的专用房间,如图2所示,图中的LVDT为直线位移传感器,蠕变挠度(ϵ)测试精度为±0.01 mm。

(2)AGS-X型10 t岛津万能力学试验机,力测试

精度为±1 N,位移精度为±0.01 mm。

(3)Testo 174H型温湿度记录器,温度精度为±1℃,相对湿度(RH)精度为±3%。

(4)Sartorius天平,量程为10 kg,精度为±0.1 g。

1.4 试验方法

1.4.1 木质梁的静态力学性能测试

依据 ASTM D198—15《Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes》对各类型木质梁做非破坏性静曲弹性模量测试。首先挑选出各类型木质梁的蠕变测试试件,其余试件测试静曲强度。5种木质梁的平均静曲强度、变异系数(COV)和静曲弹性模量如表3所示。

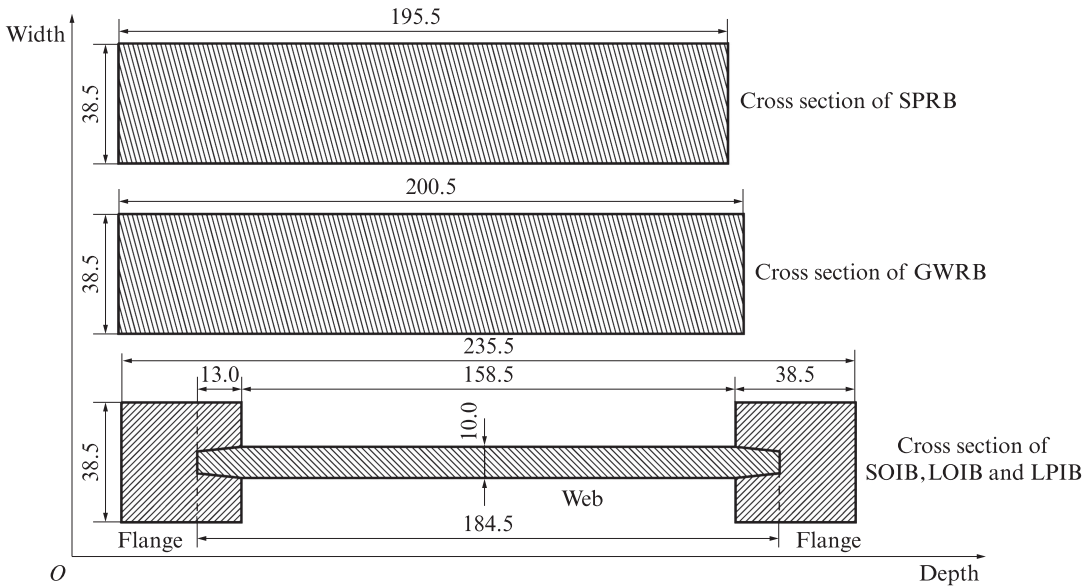
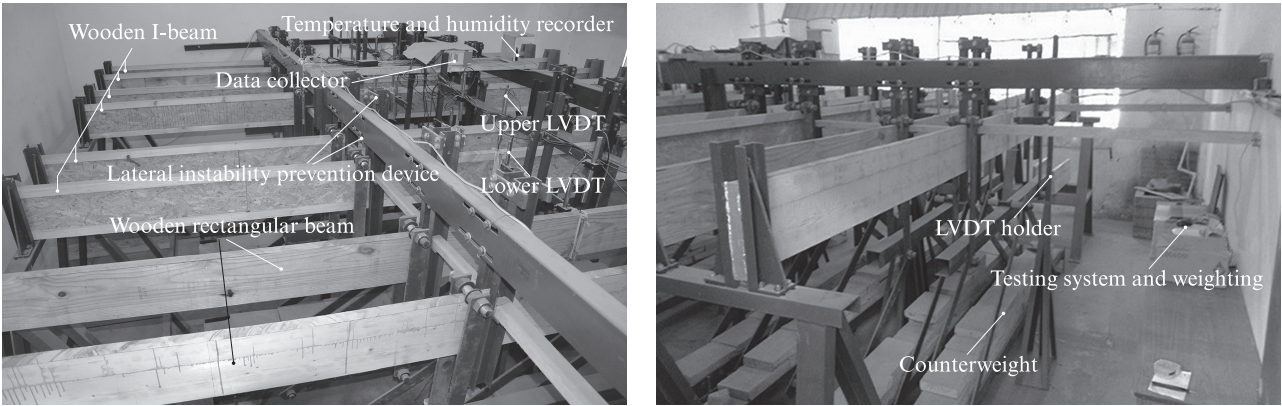


图 1 试件截面的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of cross sections of specimens(size: mm)



(a) Major equipment (b) Ancillary equipment

图 2 足尺寸木质梁静曲蠕变测试系统

Fig. 2 Static bending creep test system of large-scale wooden beams

表 3 5 种木质梁的平均静曲强度、变异系数、静曲弹性模量和蠕变试验荷载

Table 3 Average σ_{MOR} , COV, E_{MOE} and creep test load of five types of wood beams

Specimen type	Average σ_{MOR} / MPa	COV/%	E_{MOE} / MPa	Load/N
SPRB	72.54	13.48	9 180	4 498
GWRB	70.41	14.60	8 709	4 067
SOIB1	28.35	17.91	10 255	2 568
SOIB2			8 735	2 176
LOIB1	35.81	14.34	8 687	2 832
LOIB2			8 799	3 116
LPIB1	37.87	15.46	9 326	3 097
LPIB2			9 235	3 263

1.4.2 木质梁的静曲蠕变性能测试

采用四点弯静曲加载方式测试各类型木质梁的蠕变性能,如图 3 所示,图中 L 为梁的净跨距。每一

类型木质梁的加载应力水平设为其平均静曲强度值的 25%,这样既符合各类型木质梁强度性能设计值一般不超过其破坏荷载 25% 的中国木结构设计规范要求^[13],也遵循前人足尺寸木质梁加载应力水平设置的惯常经验,同时吸取了前人将加载应力水平设置高于木质梁静曲强度值 30% 之后,木质梁蠕变挠度持续上升且很快发生破坏的经验教训^[14-15]。本试验中各类型木质梁所加的荷载如表 3 所示。每条木质梁跨中的上下表面各设置 1 个 LVDT 探头以测试其变形量,木质梁的蠕变挠度取 2 个 LVDT 读数的平均值。

2 结果与分析

2.1 环境温湿度参数的定量表达

依据试验时段的气象资料,本研究提出了一个

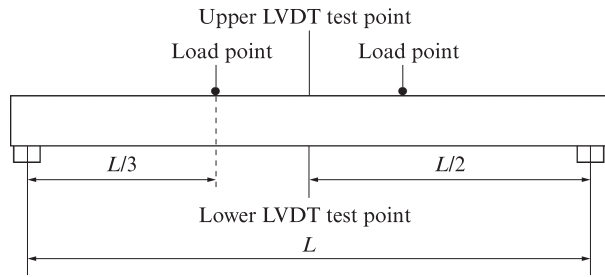


图3 四点弯静曲蠕变测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of four-point bending creep test

适用于昆明地区,以日出为起始计算时刻,并可同时定量描述气温和相对湿度的拟合方程,如式(1)所示:

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{60.5}} \quad (1)$$

式中: y 为气候参数的拟合值; y_0 为实测气候参数的标定值; A 为气候参数的极差, K/h^2 或 $1/h^2$,表示气温时 A 取正值,表示相对湿度时 A 取负值; x 为计算时刻与起始时刻的时差, h ; x_c 为当日昼长, h .

当计算气温和相对湿度时, y_0 分别由式(2)、(3)确定:

$$y_0 = T_{ave} - 0.5T_r \quad (2)$$

$$y_0 = R_{ave} + 0.5R_r \quad (3)$$

式中: T_{ave} 为日平均气温, K ; T_r 为当日气温的极差, K ; R_{ave} 为日平均相对湿度; R_r 为当日相对湿度的极差.

上述拟合方程对昆明地区温湿度的拟合效果较好,本研究以此作为边界条件,定量计算木质梁的截面水分分布.

2.2 室内自然环境下木质梁截面水分的定量表达

木材在室内自然环境下会发生吸湿或解吸,从而导致其内部水分随着环境温湿度的变化而时刻发生改变. Dong等^[16]的研究已经证实,以环境气候参数为变量的木材内部水分迁移,可以用有限元方法进行较为精确地定量计算. 本研究基于此模型,并拓展采用更符合木质梁实际服役环境的2维有限元计算方法,定量描述足尺寸木质梁截面的水分变化情况. 同时,已有研究表明酚醛树脂胶层与木材的水分扩散系数相差不大^[17-18],且存在胶层厚度极小和胶层不连续的现象. 因此,本研究忽略其对水分迁移的影响,不再探讨胶层或胶黏剂的存在对人造板材(如本研究中的LVL和OSB)水分迁移的影响.

现有研究认为翼缘对木工字梁静曲挠度的影响占绝对主导作用^[19]. 腹板采用比木材密度及剪切模量都大很多的定向刨花板(OSB)或胶合板,且其表面胶黏剂与经压缩后的木材形成致密层而不易吸湿

和解吸^[20],因此不需要考虑其对静曲挠度的影响. 彭辉等^[21]研究发现,当木材温度低于 60°C 时,温度对其蠕变的影响极小,因此本研究忽略环境温度分布对蠕变的影响,仅将环境温度作为木材内部水分迁移的必要计算参数.

本研究采用自编Matlab程序计算木工字梁翼缘(意杨)和实木矩形梁(云杉-松树-冷杉胶合木)横截面的含水率(w_w ,质量分数)分布,两者的尺寸(宽度 $\times$ 高度)分别为 $38\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ 和 $38\text{ mm} \times 200\text{ mm}$.

本研究选取低湿波动(a)、高湿波动(b)、湿度持续波动上升(c)和湿度持续波动下降(d)这4种可以囊括相对湿度基本变化规律的时段,定量考查其对足尺寸木质梁含水率的影响,具体计算时段详见表4. 同时考虑到程序总体计算量和水分原始分布对考查对象的影响,所有时段的计算起点选定在各计算时段前5 d. 以实木矩形梁为例,不同相对湿度波动时段实木矩形梁截面平均含水率和距表层1、3、5 mm深度处含水率的变化曲线如图4所示.

表4 计算时段
Table 4 Calculation periods

Period	Start to end	Brief description of RH
a	Feb. 3–Feb. 10	Around 40%
b	Nov. 3–Nov. 10	Around 65%
c	Oct. 11–Oct. 23	40%–80%
d	Feb. 21–Mar. 4	60%–30%

由图4可见:在时段a,相对湿度总体在40%附近波动,实木矩形梁截面的平均含水率在8%附近波动;在时段b,相对湿度在65%附近波动,实木矩形梁截面的平均含水率在12%~14%波动;在时段c,相对湿度从40%上升至80%,实木矩形梁截面的平均含水率从10%波动上升至约16%;在时段d,相对湿度从60%下降至30%,实木矩形梁截面的平均含水率从11%下降至7%. 需要特别注意的是:当相对湿度由下降转为上升时,实木矩形梁距表层1 mm深度处的含水率在约6 h后才开始跟随性地转为上升趋势,距表层3、5 mm深度处的含水率在约7 h后才几乎同时跟随性地转为上升趋势;当相对湿度从上升转为下降时,实木矩形梁距表层1、3、5 mm深度处的含水率只需2~3 h即几乎同时跟随性地转为下降趋势. 从图4中的波动幅度可见,表层与空气直接接触,含水率的波动幅度最大,距表层3 mm深度处和距表层5 mm深度处含水率的波动幅度逐层变小.

由此可见:木质梁的吸湿和解吸相对于相对湿

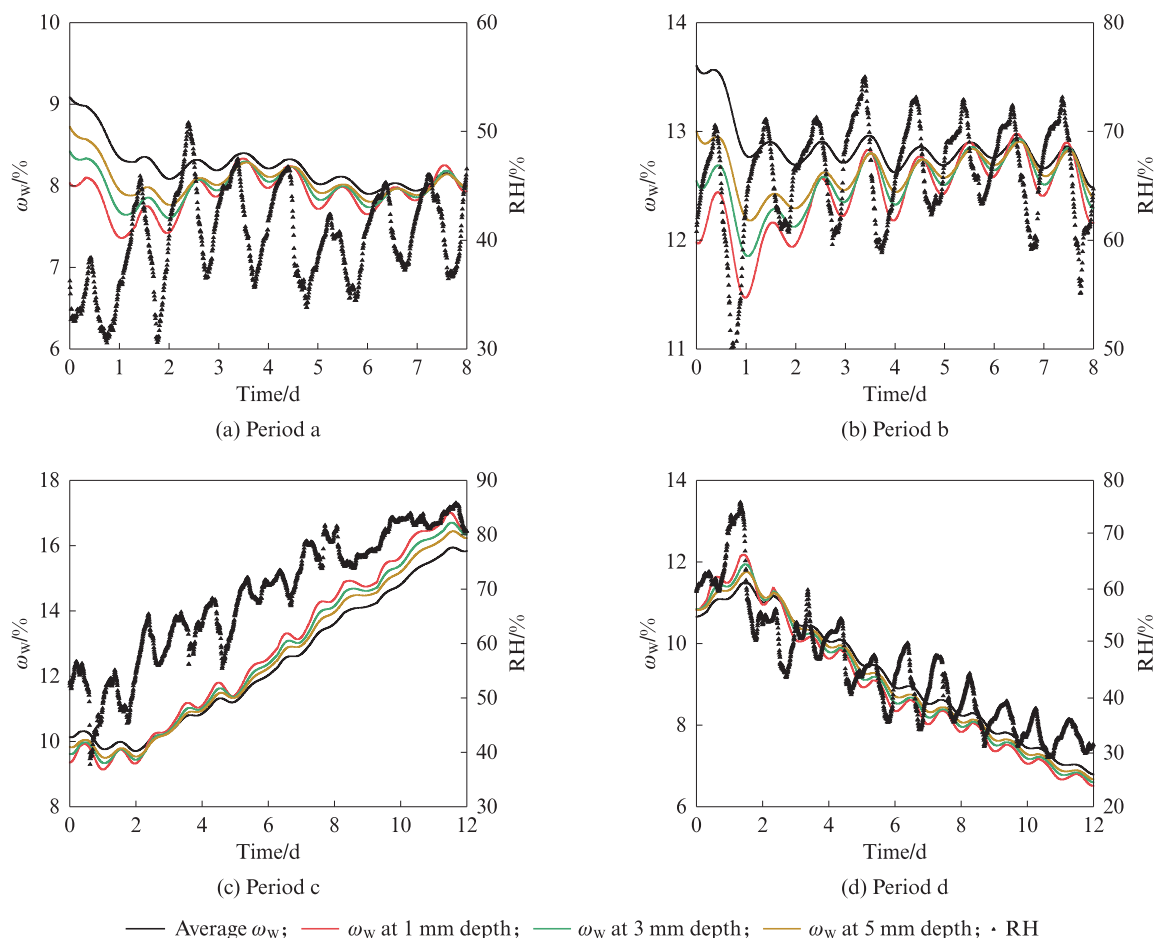


图4 不同相对湿度波动时段实木矩形梁截面平均含水率和距表层1、3、5 mm深度处含水率的变化曲线

Fig. 4 Curves of average ω_w variation of cross sections and ω_w variation of layers at the depth of 1, 3, 5 mm from the surface of wood rectangular beams during different RH fluctuation periods

度的变化有不同程度的滞后,且吸湿阶段的滞后度大于解吸阶段;木质梁表层的含水率最易受环境因素的影响。

2.3 室内自然环境下实木矩形梁与木工字梁蠕变的对比

蠕变试验从2013年8月23日开始并持续至2014年3月11日,共200 d。图5为试验周期内实木矩形梁和木工字梁的蠕变挠度曲线。图6为试验周期内相对湿度波动曲线。由图5、6可见:各试件加载初期的蠕变速率较快,后期的蠕变速率减慢,与其他建材的蠕变过程类似^[22];8条木质梁的蠕变挠度分布在4.73~8.72 mm之间,其中蠕变挠度最小的梁是LOIB2(4.73 mm),蠕变挠度最大的梁是LPIB2(8.72 mm);总体来看,SOIB1的蠕变挠度波动平缓,SOIB2的蠕变挠度波动剧烈。

由于直接暴露在室内温湿度波动较大环境中的木质梁上、下表面在分别承受最大压缩应力和最大拉伸应力的同时又经历着最剧烈的含水率波动变化,加之含水率会显著影响木材的力学性能,进而影

响其蠕变性能^[23],木质梁表层含水率的变化必然与其总蠕变挠度的变化有直接关系。

2.3.1 低湿波动时段a

图7为低湿波动时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线。由图7可见:在低湿波动时段,实木矩形梁和木工字梁的表层含水率十分接近;该时段实木矩形梁的蠕变挠度平均增加约0.8 mm,木工字梁的蠕变挠度平均增加约0.7 mm;2类木质梁在该阶段的蠕变速率相近,约为 8.839×10^{-2} mm/d。若长时间保持该蠕变速率,2类木质梁有可能在数月内发生明显的弯曲变形直至断裂破坏,严重影响其服役时长。

2.3.2 高湿波动时段b

图8为高湿波动时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线。由图8可见:与低湿波动时段a类似,在高湿波动时段b,实木矩形梁和木工字梁表层含水率的变化趋势几乎同步;该阶段2类木质梁的蠕变挠度增量均小于0.15 mm,蠕变速率相近,约为 1.183×10^{-2} mm/d。因此,即使2类木质梁

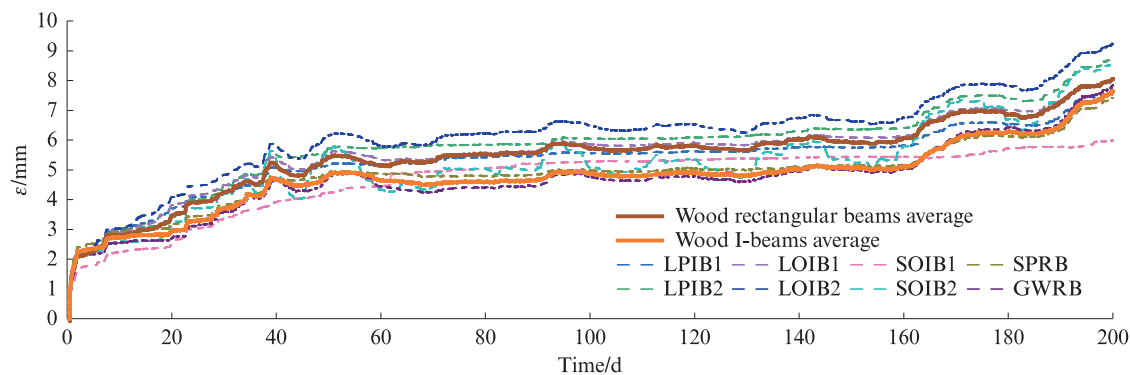


图5 试验周期内实木矩形梁和木工字梁的蠕变挠度曲线

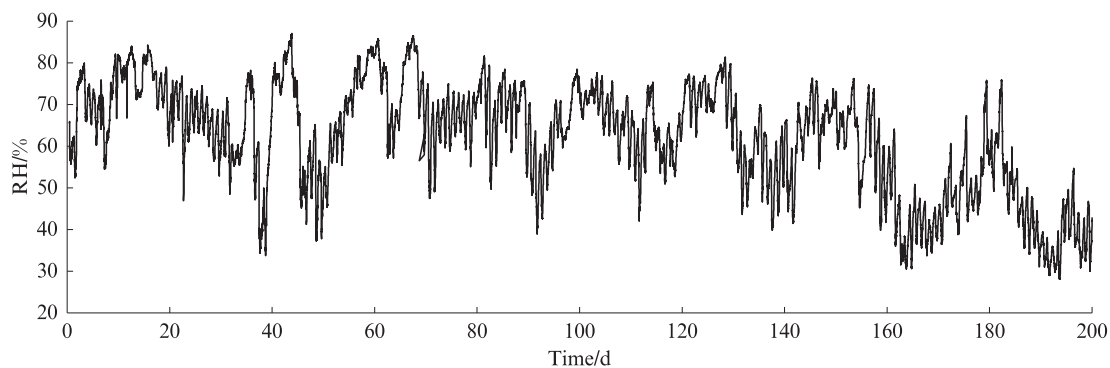
Fig. 5 ϵ curves of wood rectangular beams and wood I-beams in experimental cycle

图6 试验周期内相对湿度波动曲线

Fig. 6 Relative humidity fluctuation curves in experimental cycle

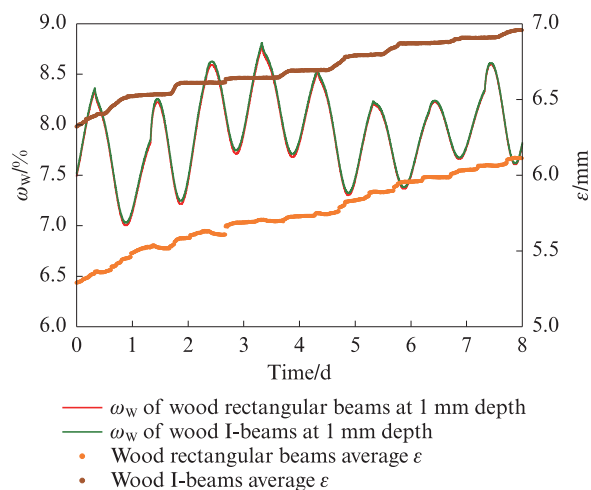


图7 低湿波动时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线

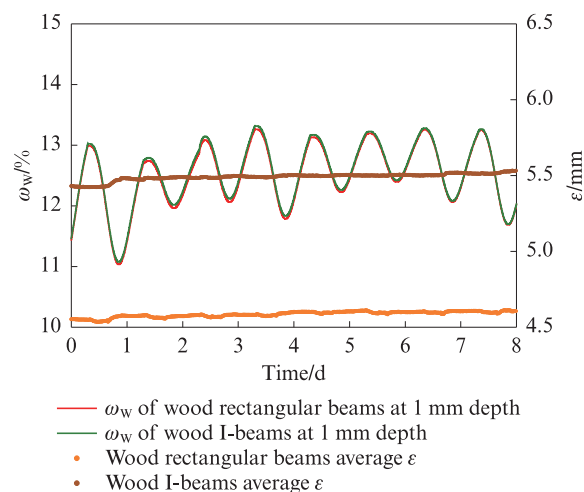
Fig. 7 Surface ω_w and ϵ curves of wood rectangular beams/wood I-beams during period a

图8 高湿波动时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线

Fig. 8 Surface ω_w and ϵ curves of wood rectangular beams/wood I-beams during period b

在这种环境中长时间服役,蠕变挠度也不会大幅增加,该时段对木质梁的正常服役影响较小。

时段a和时段b气温和相对湿度大约以24 h为周期波动。在该环境中,实木矩形梁和木工字梁表层的吸湿和解吸稳定交替进行,表层的含水率几乎完全一致。对于同一时段不同类型的梁来说,蠕变速率近乎相同;对于不同时段同一类型的梁来说,蠕

变速率存在较大差异,时段b的蠕变速率为 1.183×10^{-2} mm/d,远低于时段a的蠕变速率 8.839×10^{-2} mm/d。

2.3.3 湿度持续波动上升时段c

在湿度持续波动上升时段c,实木矩形梁和木工字梁总体处于吸湿过程,该过程中木质材料由于含水率上升所引发的静曲弹性模量下降本应导致其挠

度的大幅增加,但实际蠕变挠度却减小,这是典型的机械吸附蠕变。图9为湿度持续波动上升时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线。由图9可见:该阶段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率总体变化趋势类似,从9%左右上升至约16%,上升速度约0.58%/d;实木矩形梁平均蠕变速率为 -1.730×10^{-2} mm/d,木工字梁平均蠕变速率为 -3.598×10^{-2} mm/d,木工字梁蠕变挠度的减小速率大于实木矩形梁。

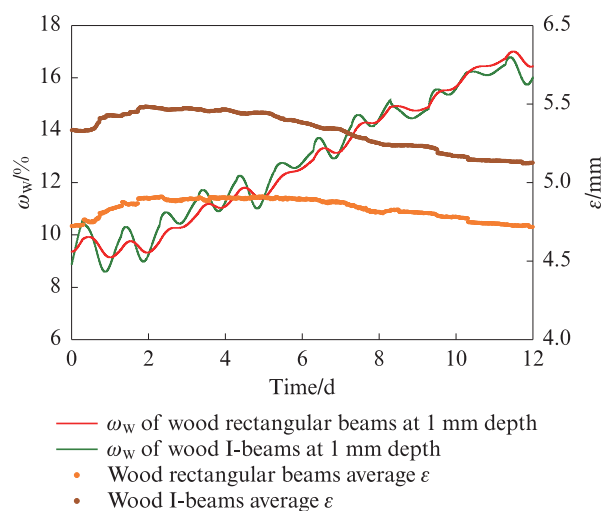


图9 湿度持续波动上升时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线

Fig. 9 Surface ω_w and ϵ curves of wood rectangular beams/wood I-beams during period c

2.3.4 湿度持续波动下降时段d

图10为湿度持续波动下降时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线。由图10可见:该时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率总体呈下降趋势,平均下降速率约为0.50%/d;实木矩形梁的平均蠕变速率为 7.424×10^{-2} mm/d,木工字梁的平均蠕变速率为 9.007×10^{-2} mm/d,木工字梁蠕变速率略大于实木矩形梁。

时段c和时段d处于昆明地区干湿两季的转变区间内,相对湿度在较长时间内变化趋势明显。在这种环境中,实木矩形梁和木工字梁表层含水率的总体变化趋势基本一致,但木工字梁表层含水率以日为周期大幅起落,相比之下实木矩形梁表层含水率的波动更为平缓。形成这种现象的原因可能是:实木矩形梁体积大,能够缓冲并储蓄相对湿度波动造成的实木矩形梁表层含水率波动;木工字梁翼缘体积较小,截面轮廓与空气的接触面积较大,且内部还插入了几乎不吸湿的腹板,其较小的体积无法缓冲并储蓄相对湿度波动造成的木工字梁表层含

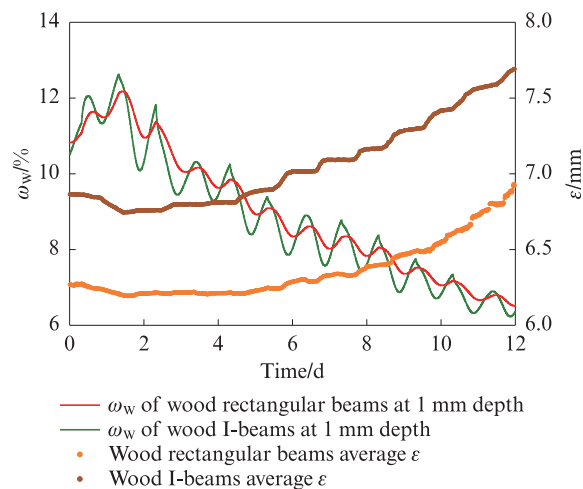


图10 湿度持续波动下降时段实木矩形梁和木工字梁的表层含水率与蠕变挠度曲线

Fig. 10 Surface ω_w and ϵ curves of wood rectangular beams/wood I-beams during period d

水率波动,因此对相对湿度的波动较为敏感。

在时段c和时段d,2类木质梁均表现出明显的机械吸附蠕变行为,但总体上实木矩形梁的蠕变趋势比木工字梁更为平缓,而木工字梁则表现出表层含水率的剧烈波动和相对较大的蠕变挠度变化,因此木工字梁的蠕变速率绝对值也更大,表明表层含水率的大幅波动更易造成木质梁蠕变挠度较大幅度的波动。其中表现最为明显的是:木工字梁在时段c的蠕变挠度平缓下降,而在时段d则表现出剧烈的、几乎以日为计时单位的阶梯式上升,表明在吸湿阶段,木工字梁本该由于其静曲弹性模量(主要是翼缘)的逐步下降而发生总体挠度的增大,但其总体挠度却呈下降趋势,这显然是由于其蠕变挠度发生了“恢复”;而在解吸阶段,本该由于其静曲弹性模量的逐步增大而发生总体挠度的减小,但其总体挠度却呈上升趋势,这显然是由于蠕变造成了“额外”的挠度^[3,11]。这一独特且与人们惯常认知相悖的现象表明木工字梁在持续变干的环境中更易发生较大的蠕变形,因而尤其需要加以关注。

产生上述现象的原因主要有2个:

(1)木质梁在静曲受力时其上表面承受最大压应力的作用,而下表面承受最大拉应力的作用。由于木材强度和弹性模量均随含水率的增大而减小,因此随着环境温湿度的变化,实木矩形梁和木工字梁从表层到芯层的含水率均发生跟随性变化而直接导致其整体挠度的跟随性变化,且木梁最外层含水率的变化对其总体挠度的影响最大。

(2)根据 Nguyen等^[24]的研究,结构用木材的蠕变规律可以用式(4)、(5)进行描述:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{K_e} + \left(\frac{\sigma}{K_k} \right) \left[1 - e^{\left(-\frac{K_k t}{\mu_k} \right)} \right] + \frac{\sigma t}{\mu_v} + \frac{\sigma}{\mu_w} \Delta w_w \quad (4)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻的蠕变挠度; σ 为恒定应力,Pa; K_e 为弹性模量,Pa; K_k 为蠕变模量,Pa; μ_k 为黏性阻尼蠕变参数,Pa·s; μ_v 为与不可恢复应变相关的牛顿黏壶黏度,Pa·s; μ_w 为机械吸附蠕变参数,Pa; Δw_w 为初始参考含水率与 t 时刻含水率之差,%。其中 σ 、 K_e 、 K_k 、 μ_w 、 μ_k 和 μ_v 均为常数。

式(4)右侧第1项为弹性变形,第2、3项分别为与时间相关的黏弹性和黏塑性变形,第4项为机械吸附蠕变变形。

$$\Delta w_w = w_{w_a} - w_{w_i} \quad (5)$$

式中: w_{w_a} 为初始参考含水率,%; w_{w_i} 为 t 时刻的含水率,%。

木工字梁表层含水率相较实木矩形梁更易波动,即木工字梁的 Δw_w 值均大于实木矩形梁的 Δw_w 值,因此在相同的试验环境和时段内,木工字梁更易受到环境湿度的波动影响而发生更为明显的蠕变挠度波动。

2.4 实木矩形梁和木工字梁蠕变性能的综合评价

依据ASTM D6815—2015《Standard specification for evaluation of duration of load and creep effects of wood and wood-based products》计算实木矩形梁和木工字梁的蠕变评价参数及指标,结果如表5所示。其中, ε_{mi} 为加载1 min后的蠕变挠度(也称弹性挠度), ε_n 为加载 n d后的蠕变挠度,FB₉₀为加载90 d后蠕变挠度与加载1 min后蠕变挠度的比值。由表5可见:除SOIB2的 $(\varepsilon_{60} - \varepsilon_{30}) < (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{60})$ 外(其蠕变速率在测试期内仍在加速),其余7根木质梁均符合 $(\varepsilon_{30} - \varepsilon_{mi}) > (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{30}) > (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{60})$ 的要求(表明蠕变速率趋于收敛)且全部试件的FB₉₀均小于1.60,满足承重用梁的服役要求;实木矩形梁的平均FB₉₀为1.28,木工字梁的平均FB₉₀为1.41,表明在昆明地区室内自然环境下实木矩形梁的抗蠕变性能优于木工字梁。

表5 实木矩形梁和木工字梁的蠕变评价参数及指标
Table5 Creep evaluation parameters and indexes of wood rectangular beams and wood I-beams

Specimen type	$\varepsilon_{30} - \varepsilon_{mi}$	$\varepsilon_{60} - \varepsilon_{30}$	$\varepsilon_{90} - \varepsilon_{60}$	FB ₉₀
SPRB	3.79	1.07	-0.04	1.26
GWRB	3.55	0.91	0	1.29
SOIB1	3.32	1.13	0.75	1.49
SOIB2	4.07	0.27	0.63	1.43
LOIB1	4.41	0.94	0.26	1.37
LOIB2	4.76	1.07	0.44	1.40
LPIB1	4.18	0.98	0.28	1.36
LPIB2	4.32	1.40	0.13	1.40

3 结论

(1)室内自然环境下木质梁含水率的变化明显滞后于相对湿度的变化,并且吸湿过程中的滞后大于解吸过程中的滞后。

(2)造成木工字梁产生更大蠕变挠度的原因是其表层含水率更易随环境温湿度的变化产生频繁且大幅度的吸湿和解吸行为。

(3)实木矩形梁和木工字梁都存在明显的机械吸附蠕变行为,在环境发生季节性干湿转变的过程中,实木矩形梁的抗蠕变性能更好,其他时段2类梁的抗蠕变性能近似,且均满足建筑用材的抗蠕变要求。

参考文献:

- [1] NAVI P, STANZL-TSCHEGG S. Micromechanics of creep and relaxation of wood. A review COST Action E35 2004-2008; Wood machining-micromechanics and fracture [J]. Wood Research and Technology, 2009, 63:186-195.
- [2] ARMSTRONG L, CHRISTENSEN G. Influence of moisture changes on deformation of wood under stress[J]. Nature, 1961, 191(4791):869-870.
- [3] HOUŠKA M, KOC P. Sorptive stress estimation: An important key to the mechano-sorptive effect in wood[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2000, 4(1):81-98.
- [4] 张尚,董春雷,窦玲,等.糠醇和玻璃纤维处理对木材弯曲蠕变的影响[J].建筑材料学报, 2020, 23(1):162-167.
ZHANG Shang, DONG Chunlei, DOU Ling, et al. Effect of furfurylation and glass fiber treatment on bending creep of wood [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):162-167. (in Chinese)
- [5] CHENG J, SCHNIEWIND A P. Creep buckling of small, slender wood columns under cyclic environment[J]. Wood and Fiber Science, 1985, 17(2):159-169
- [6] SRPČIĆ S, SRPČIĆ J, SAJE M, et al. Mechanical analysis of glulam beams exposed to changing humidity[J]. Wood Science and Technology, 2009, 43(1/2):9-22.
- [7] ROEDER R W JR, MANBECK H B, JANOWIAK J J. Creep behavior of solid-sawn and wood I-joint floors[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1):341-349.
- [8] LEICHTI R J, TANG R C. Comparative performance of long-term loaded wood composite I-beams and sawn lumber[J]. Wood and Fiber Science, 1989, 21(2):142-154.
- [9] LEICHTI R J, TANG R C. Effect of creep on the reliability of sawn lumber and wood-composite I-beams[J]. Mathematical and Computer Modelling, 1989, 12(2):153-161.
- [10] FRIDLEY K J, TANG R C. Shear effects on the creep behavior of wood composite I-beams[J]. Forest Products Journal, 1992, 42(6):17-22.
- [11] JOHNSON A P. Creep of wood I-joists exposed to abnormally

- high moisture conditions[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2003, 8(1):36-40.
- [12] 国家气象信息中心. 中国地面气象站逐小时观测资料[DB/OL]. (2022-08-10)[2022-08-10]. <https://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0012.0001.html>.
National Meteorological Information Center. Hourly observations from ground-based weather stations in China [DB/OL]. (2022-08-10)[2022-08-10]. <https://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0012.0001.html>. (in Chinese)
- [13] 龙卫国. 木结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 41-43.
LONG Weiguo. Design handbook for wood construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 41-43. (in Chinese)
- [14] HOYLE R J, ITANI R Y, ANDERSON J T. The effect of moisture cycling on creep of small glued laminated beams[J]. Wood and Fiber Science, 1994, 26(4):556-562.
- [15] HOLZER S M, LOFERSKI J R, DILLARD D A. A review of creep in wood: Concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures[J]. Wood and Fiber Science, 1989, 21(4):376-392.
- [16] DONG C L, YANG Y, ZHANG H J, et al. Modeling and experimental validation of elastic modulus of *pinus yunnanensis* exposed to high relative humidity [J]. Wood Science and Technology, 2017, 51(5):1015-1031.
- [17] BREWIS D M, COMYN J, PHANOPOULOS C. Effect of water on some wood adhesives [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987, 7(1):43-48.
- [18] 平立娟, 王喜明, 颜燕, 等. 樟子松木材高温干燥过程中水分的非稳态扩散和干燥能耗的研究[J]. 林产工业, 2018, 45(9): 28-32, 51.
PING Lijuan, WANG Ximing, YAN Yan, et al. Study on unsteady-state moisture transfer and energy consumption in high temperature drying process of *pinus sylvestris* var. *mongolica* litv. [J]. China Forest Products Industry, 2018, 45(9):28-32, 51. (in Chinese)
- [19] 张宏健, 董春雷, 袁福兴, 等. 木结构楼板托梁用木质工字梁静曲性能的设计[J]. 中国建材科技, 2009, 18(6):74-78.
ZHANG Hongjian, DONG Chunlei, YUAN Fuxing, et al. Designing basis of the static bending performance of wood I-joist for flooring of wooden houses [J]. China Building Materials Science and Technology, 2009, 18(6):74-78. (in Chinese)
- [20] 周定国. 异氰酸酯定向结构板的蠕变特性[J]. 林业科技开发, 1991(1):33-34.
ZHOU Dingguo. Creep properties of isocyanate oriented structural panels[J]. Journal of Forestry Engineering, 1991(1):33-34. (in Chinese)
- [21] 彭辉, 蒋佳荔, 詹天翼, 等. 木材普通蠕变和机械吸湿蠕变研究概述[J]. 林业科学, 2016, 52(4):116-126.
PENG Hui, JIANG Jiali, ZHAN Tianyi, et al. A review of pure viscoelastic creep and mechano-sorptive creep of wood [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(4):116-126. (in Chinese)
- [22] 张家亮, 童科挺, 陈伟, 等. 长期荷载作用下钢-竹组合柱的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):800-810.
ZHANG Jialiang, TONG Keting, CHEN Wei, et al. Mechanical properties of steel-bamboo composite columns under long-term loading[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):800-810. (in Chinese)
- [23] ISHIMARU Y, ARAI K, MIZUTANI M, et al. Physical and mechanical properties of wood after moisture conditioning[J]. Journal of Wood Science, 2001, 47(3):185-191.
- [24] NGUYEN T T, DAO T N, AALETI S, et al. Numerical model for creep behavior of axially loaded CLT panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(1):04018224.