

湿效应对竹木复合材料刚度性能的影响

王泉中¹, 张晓冬², 周雪华¹

(1. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 竹材工程研究中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 首先根据经典层合板理论和一阶剪切变形理论的基本假设, 建立起相关的位移模式, 进一步推导出考虑湿效应下竹木复合层合梁的势能函数表达式, 然后运用材料力学的等效梁理论推导出考虑湿效应下的竹木复合层合梁的等效弹性模量。比较了不同理论下湿效应前后的等效弹性模量与弯曲变形。研究表明, 吸湿比例达 30% 时, 竹木复合材料的等效弹性模量损失逾一半, 而同样载荷下弯曲变形则是原有的 2 倍。图 1 表 3 参 8

关键词: 林业工程; 竹木复合层合板; 湿效应; 经典理论; 一阶剪切变形理论

中图分类号: S781 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2010)04-0591-04

Hygro-effect on stiffness properties for a wood-bamboo composite laminate

WANG Quan-zhong¹, ZHANG Xiao-dong², ZHOU Xue-hua¹

(1. College of Electronic and Mechanical Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Bamboo Engineering and Research Centre, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: To determine the potential energy function derived from a wood-bamboo composite laminate employing the hygro-effect, a displacement model was established based on assumptions of the classical laminated plate theory (CLPT) and the first-order shear deformation theory (FSDT). Then, the equivalent elastic modulus of wood-bamboo composite laminate with the hygro-effect was derived according to the equal beam theory. Using several theories, a comparison of the equivalent elastic modulus and bending deformation was made before and after the hygro-effect was used. Results showed when moisture concentration increased up to 30%, the equivalent elastic modulus of bamboo and wood composite materials decreased more than half, and under the same load, bending deformation was twice that of the original. [Ch, 1 fig. 3 tab. 8 ref.]

Key words: forest engineering; wood-bamboo composite laminate; hygro-effect; classical laminated plate theory; first-order shear deformation theory

随着竹木复合结构材料的出现并在汽车、船舶、铁路车辆制造及建筑业等领域的广泛应用, 人们对竹木复合结构材料的研究也越来越重视^[1]。张晓冬等^[2]对竹木复合材料在集中载荷作用下的有效弹性模量进行了预测; 关明杰等^[3]通过实验的方法研究了湿热效应对竹木复合胶合板弯曲性能的影响; 韩健^[4]运用弹性力学的方法建立了竹木复合材料表观弹性模量的预测模型。Ram 等^[5]考虑了横向剪切变形的因素, 研究了不同温度和湿度、铰支和固支边界条件对称正交铺设和角铺设等不同参数下的挠度和应力分量。结果表明, 挠度和应力分量几乎随湿热的增加而线性增加; Upadhyay 等^[6]分析纤维增强聚合物基复合材料(PMC)在湿热条件下对其挠度性能的影响。但对竹木复合层合板考虑湿热效应下有效弹性模量的预测与变形目前尚未见报道。本研究根据经典层合板理论和一阶剪切变形理论的基本假设建立了竹木复合层合板考虑湿效应下的等效弹性模量预测模型, 计算了不同理论下竹木复合层合

收稿日期: 2009-09-04; 修回日期: 2009-10-21

基金项目: 国家高新技术发展计划(863 计划)资助项目(2002AA245171)

作者简介: 王泉中, 教授, 从事机械设计及理论研究。E-mail: wqz@njfu.com.cn

板在湿效应前后的弹性模量和弯曲变形, 讨论了湿效应对它们的影响。

1 考虑湿效应下的竹木复合梁的位移模式

竹木复合板在结构上是一种对称正交层合板。为能准确预报, 本研究应用经典层合板理论和一阶剪切变形理论分别建立了预测模型。研究时忽略其泊松效应^[2], 沿某一主向截取一层合梁来研究。其结构如图1所示。

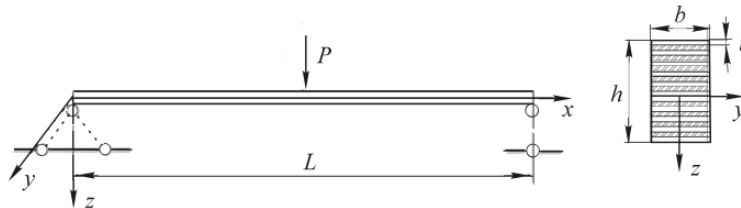


图1 层合梁结构示意图

Figure 1 Scheme of laminated beam model

1.1 经典层合板理论

根据经典层合板理论假设, 位移模式采用如下形式:

$$\begin{cases} u = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot z \\ w = w(x) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, u 为梁的纵向位移, w 为梁的挠度。则考虑湿效应下整梁的势能函数为:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k \right) \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx - \frac{1}{4} b \left(\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \beta_i^k C \right) \int_0^L \frac{d^2 w}{dx^2} dx - P \cdot w(x) \Big|_{x=L/2} \quad (2)$$

由虚功原理 $\delta \Pi = 0$, 并考虑层合梁边界条件得梁的位移函数为:

$$\begin{cases} u = \frac{\partial w}{\partial x} \cdot z = \frac{P}{8 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} (L^2 - 4x^2) \cdot z + \frac{M_{\text{wet}}(2x - L)}{4 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} z \\ w(x) = \frac{P \cdot x}{24 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} (3L^2 - 4x^2) + \frac{M_{\text{wet}} x(x - L)}{4 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 $E_i^{(k)}$, β_i^k 分别为板的第 k 层材料在 i ($i = 1, 2$) 主方向的弯曲弹性模量和湿膨胀系数; C 为吸湿比例。本研究假定所研材料具有均匀的吸湿比例; z_k, z_{k-1} 为第 k 层材料上下表面高度坐标; I, b 分别为层合梁横截面轴惯矩和宽度; M_{wet} 为由于湿效应产生的弯矩。具体的表达式如下:

$$\begin{cases} I_k = b \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \\ M_{\text{wet}} = b \left[\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \beta_i^k C \right] \end{cases} \quad (4)$$

1.2 一阶剪切变形理论

根据一阶剪切变形理论假设, 位移模式采用如下形式:

$$\begin{cases} u(x, z) = z \cdot \varphi(x) \\ w = w(x) \end{cases} \quad (5)$$

则考虑湿效应下整梁的势能函数为:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k \right) \int_0^L \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^2 dx - \frac{1}{4} b \left(\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \beta_i^k C \right) \int_0^L \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx + \frac{K}{2} \left(\sum_{k=1}^n G^k A^k \right) \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx - P \cdot w(x) \Big|_{x=\frac{L}{2}} \quad (6)$$

运用最小势能原理 $\delta \Pi = 0$ 及边界条件得位移表达式：

$$\begin{cases} u(x, z) = \left(\frac{Px^2}{2 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} - \frac{PL^2}{8 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} \right) \cdot z + \frac{M_{wet}(2x - L)}{4 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} z \\ w(x) = \frac{Px}{24 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} (3L^2 - 4x^2) + \frac{Px}{K \sum_{k=1}^n G^{(k)} A^{(k)}} + \frac{M_{wet}x}{4 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} (L - x) \end{cases} \quad (7)$$

2 竹木复合材料有效弹性模量的预测

由经典层合板理论及一阶剪切变形理论下梁的挠度表达式(3)和(7)得梁的跨中挠度分别为：

$$\begin{cases} w\left(\frac{L}{2}\right)_{CLPT} = \frac{P \cdot L^3 - \frac{3}{2} M_{wet} L^2}{24 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} \\ w\left(\frac{L}{2}\right)_{FSDT} = \frac{PL^3}{24 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} + \frac{PL}{2K \sum_{k=1}^n G^{(k)} A^{(k)}} + \frac{M_{wet} L^2}{16 \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k} \end{cases} \quad (8)$$

由材料力学可知梁在集中载荷下的跨中挠度^[7]为：

$$w = \frac{PL^3}{48EI} \quad (9)$$

根据等效梁理论可得经典层合板理论下梁的弹性模量为：

$$E_i = \frac{PL \sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k}{(2PL - 3M_{wet})I} \quad (10)$$

一阶剪切变形理论下梁的弹性模量为：

$$E_i = \frac{PKL^2 \left(\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k \right) \left(\sum_{k=1}^n G^{(k)} A^{(k)} \right)}{I \left[24P \left(\sum_{k=1}^n E_i^{(k)} I_k \right) + (2PL^2 - 3M_{wet}L)K \left(\sum_{k=1}^n G^{(k)} A^{(k)} \right) \right]} \quad (11)$$

3 结果分析

本研究的竹木复合板铺层方式为 $[0 \text{ 木}/0 \text{ 竹}/90 \text{ 木}/0 \text{ 竹}/0 \text{ 木}]_s$ ，杨木单板厚度为 1.6 mm，竹帘单板厚度为 1.4 mm，梁的宽度 b 为 50.0 mm，长度 L 为 320.0 mm，剪切变形系数 K^2 为 $5/6$ ^[8]。相关材料参数如表 1 所示。吸湿比例 C 为 30%。

对上述给定的材料参数，在载荷 P 为 500 N 情况下，运用经典理论与一阶剪切理论下的表达式(3)和(11)及式(8)分别计算了梁的等效弹性模量和跨中挠度，并和有限元计算结果^[8]进行了比较，结果如表 2 ~ 3 所示。

由表 2 和表 3 看出，在湿效应下，经典理论与一阶剪切理论预测结果基本相同，但在湿效应前

表 1 杨木/竹帘相关材料参数^[6]

Table 1 Material properties of wood and bamboo

项目	E_1/MPa	E_2/Mpa	G_{13}/MPa	μ_{13}	$\beta_z/10^{-6}$	$\beta_{th}/10^{-6}$
杨木	3 500	1 500	300	0.4	202.50	522.75
竹帘	10 000	300	350	0.3	- 29.00	- 178.50

表2 层合梁考虑湿效应前后弹性模量比较

Table 2 Results of Young's modulus with or without wet effect

因素	经典理论		一阶剪切变形理论		相对误差/%	
	E_{lx}/MPa	E_{ly}/Mpa	E_{2x}/MPa	E_{2y}/Mpa	$\frac{E_{1x} - E_{2x}}{E_{1x}}$	$\frac{E_{1y} - E_{2y}}{E_{1y}}$
湿效应	2 582.8	692.3	2 554.1	690.3	1.11	0.30
无湿效应	5 229.6	1 417.8	4 981.3	1 398.9	4.74	1.33

表3 3种理论下跨中挠度比较

Table 3 Comparison of mid-span deflection for three theories

因素	经典理论	一阶剪切变形理论	有限单元法	相对误差/%	
	$w(\frac{L}{2})_{\text{CLPT}}$	$w(\frac{L}{2})_{\text{FSPT}}$	$w(\frac{L}{2})_{\text{FEM}}$	$\frac{w_{\text{CLPT}} - w_{\text{FSPT}}}{w_{\text{CLPT}}} \Big _{\frac{L}{2}}$	$\frac{w_{\text{CLPT}} - w_{\text{FEM}}}{w_{\text{CLPT}}} \Big _{\frac{L}{2}}$
湿效应	7.559 3	7.938 1	7.787	4.77	2.90
无湿效应	3.827 0	4.016 4	3.570	4.71	6.70

后,同一种理论预测的结果相差很大,湿效应后的等效弹性模量损失一半多,而同样载荷下所产生的跨中挠度几乎是前者的2倍,有限元法的计算结果也佐证了这一点。这充分说明,湿效应对材料的刚度特性有显著影响。因此,竹木复合层合梁在大气中使用,水分的作用会使材料的刚度性能显著下降。

4 结论

湿效应对竹木复合材料的刚度性能有显著影响,材料湿度的增加极大地降低了其弹性模量,从而使得结构抗变形能力显著降低。因此,控制湿度环境,或提高竹木复合材料的抗吸湿能力,对于提高竹木复合材料使用性能具有重要意义。

参考文献:

- [1] 江泽慧,王戈,费本华,等.竹木复合材料的研究及发展[J].林业科学研究,2002,15(6):712-718.
JIANG Zehui, WANG Ge, FEI Benhua, et al. The research and development on bamboo-wood composite materials [J]. *For Res*, 2002, 15(6): 712-718.
- [2] 张晓冬,李君,王泉中,等.木竹复合层合板力学性能预测分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(6):103-105.
ZHANG Xiaodong, LI Jun, WANG Quanzhong, et al. Mechanical property prediction of laminated wood-bamboo composite and analysis [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, 29(6): 103-105.
- [3] 关明杰,朱一辛,张晓冬,等.湿热条件对竹木复合胶合板弯曲性能的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(6):106-108.
GUAN Mingjie, ZHU Yixin, ZHANG Xiaodong, et al. Bending properties of wood-bamboo composite plywood in differently hydrothermal conditions [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, 29(6): 106-108.
- [4] 韩健.定向竹木复合板表观弹性模量预测模型的构建[J].南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(1):33-36.
HAN Jian. Forecasting model of the elasticity modulus of the aligned bamboo-wood composite panel [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2009, 33(1): 33-36.
- [5] RAM K S S, SINHA P K. Hydro-thermal effects on the bending characteristics of laminated composite plates [J]. *Comput Struct*, 1991, 40(4): 1009-1015.
- [6] UPADHYAY P C, LYONS J S. Effect of hydrothermal environment on the bending of PMC laminates under large deflection [J]. *J Reinf Plast Compos*, 2000, 19(6): 465-491.
- [7] 孙训芳.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [8] 周雪华.湿条件下竹木复合材料力学性能研究与优化设计[D].南京:南京林业大学,2008.
ZHOU Xuehua. *Mechanical Properties and Optimization Design on Hydro Effect of Wood-bamboo Composite* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.