

研究论文

利用振动法检测胶合板的剪切弹性模量

胡英成¹, 王逢瑚¹, 刘一星¹, 中尾哲也²

(1. 东北林业大学, 哈尔滨 150040; 2. 日本岛根大学, 日本)

摘要: 首次提出用表面波传播法对胶合板的剪切弹性模量进行无损检测, 并与利用弯曲振动试验测得的动态剪切弹性模量进行比较分析。结果表明: 两种方法测得剪切弹性模量值不同, 有的甚至相差甚大。理论计算证明, 表面波传播法检测胶合板剪切弹性模量更合适, 可解决纤维倾斜角 45° 方向上胶合板动态剪切弹性模量测定的难题。

关键词: 胶合板; 无损检测; 剪切弹性模量; 表面波传播

中图分类号: S781.23 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2001)04-0012-03

Study on Shear Modulus of Elasticity of Plywood by Vibration Method

HU Ying-cheng¹, WANG Feng-hu¹, LIU Yi-xing¹, Tetsuya Nakao²

(1. Northeast Forestry University, Harbin 150040; 2. Shimane University, Japan)

Abstract: A surface wave propagation method was proposed to measure the dynamic shear moduli of plywood for the first time. The testing results of the dynamic shear moduli for plywood measured both by flexural vibration method and surface wave propagation method were different. According to the theoretic analysis, the surface wave propagation method was more suitable for nondestructive testing of dynamic shear moduli of plywood since it could solve the problem especially for measurement of dynamic shear moduli of plywood with 45° grain angle.

Key words: Plywood; Nondestructive test; Shear modulus of elasticity; Surface wave propagation

人造板的弹性模量是极其重要的力学性能指标之一, 它与静曲强度、内结合强度等力学性能均有较为密切的相关^[1]。依据这种相关性可以由弹性模量推测静曲强度等性能指标。有鉴于此, 本研究利用弯曲振动法和表面波传播法对胶合板的动态弹性模量进行无损检测, 并对两种方法测得的结果进行了比较。此外, 鉴于对纤维倾斜角 45° 方向上胶合板动态剪切弹性模量的检测, 国内外目前尚无很好的办法, 在本研究中, 尝试用一种新的检测方法—表面波传播法进行检测, 并用理论解析法对其测定结果进行了验证。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料参见前报^[2]。

1.2 振动试验

1.2.1 弯曲振动试验 弯曲振动试验参见前报^[2],

利用剪切力以及回转惯性力影响的 TGH 法 (Timoshenko-Goens-Hearmon)^[3], 求得面外剪切弹性模量 G_1/k_1 与面内剪切弹性模量 G_2/k_2 , k 为剪应力分布系数。

1.2.2 表面波传播试验 根据表面波传播理论, 设计了表面波传播试验, 如图 1 所示。传感器用木工压敏胶与试件粘在一起, 泡沫体在试件的节点 (0.224l) 处支持试件, 用木条敲击试件的一端, 试件的另一端捕捉表面波, 触发信号和接收信号经传感器、放大器传到 FFT 分析仪, 解析得时间差, 算出表面波传播速度, 利用公式 $G/k = \rho v^2$ (式中 ρ 为密度, v 为表面波传播速度。) 求得剪切弹性模量 G/k 。试验全部在日本岛根大学农学部林产加工场的 20℃, 65%RH 恒温恒湿实验室进行。

2 试验结果

2.1 利用表面波传播法和弯曲振动法测定胶合板的动态剪切弹性模量

收稿日期: 2000-10-16

第一作者: 胡英成 (1972-), 男, 东北林业大学讲师, 博士研究生。

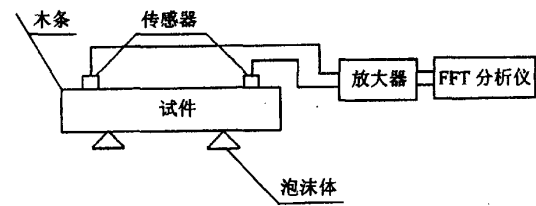


图 1 表面波传播试验示意图
Fig.1 Surface wave propagation test

对于纤维倾斜角 45°方向上胶合板的动态剪切弹性模量的无损检测,国内外目前尚无很好的办法,本研究试图用表面波传播法来解决这一难题.对厚度不同、纤维倾斜角不同的胶合板分别测量,利用公式 $G/k=\rho v^2$ 求得面内表面波传播剪切弹性模量 G_v ,平均值列入表 1;再按前述,求得胶合板的面内弯曲振动剪切弹性模量 G_f ,结果列入表 1。

表 1 胶合板的剪切弹性模量
Tab.1 Shear moduli of elasticity of plywood

编号	表面波传播 G_v			弯曲振动 G_f			试件数
	平均值 GPa	标准差 GPa	变异系数 %	平均值 GPa	标准差 GPa	变异系数 %	
1	0.503	0.027	5.4	0.437	0.019	4.3	9
2	1.117	0.106	9.5	2.989	0.327	10.9	9
3	0.533	0.018	3.4	0.431	0.014	3.2	9
4	0.619	0.021	3.4	0.499	0.024	4.8	9
5	1.244	0.025	2.0	3.181	0.426	13.4	9
6	0.605	0.024	4.0	0.497	0.037	7.4	9
7	0.589	0.015	2.5	0.468	0.029	6.2	9
8	1.091	0.089	8.2	2.935	0.353	12.0	9
9	0.590	0.009	1.5	0.483	0.012	2.5	9

注:不同编号试件的规格尺寸参见前报^[2]

2.2 两种方法测定结果的比较

表面波传播剪切弹性模量与弯曲振动剪切弹性模量的差异比较见表 2。

表 2 胶合板表面波传播、弯曲振动剪切弹性模量的比较
Tab.2 Comparison of test result of plywood shear moduli measured by 2 kinds of method

编号	纤维倾斜角/(°)	平均值之差/GPa	差异相对值/%
1	0	0.066	14.0
2	45	-1.872	-91.2
3	90	0.102	21.2
4	0	0.120	21.5
5	45	-1.937	-87.5
6	90	0.108	19.6
7	0	0.121	22.9
8	45	-1.844	-91.6
9	90	0.107	19.9

注:不同编号试件的规格尺寸参见前报^[2]

由表 1、2 可见,对于纤维倾斜角 0°,90°的胶合

板,两种方法测得的剪切弹性模量相差不大,但对于纤维倾斜角为 45°的胶合板,两种方法测得的结果相差很大,需进一步验证。

3 讨论与分析

3.1 剪切弹性模量的计算

木材属于各向异性材料,其弹性模量与纤维方向有关.另外,对于各向异性材料而言,各个方向的抗弯弹性模量、剪切弹性模量是相互依存的.大量的研究证明,胶合板的抗弯弹性模量和剪切弹性模量与表板的纤维方向具有如下关系^[4, 5]:

$$\frac{1}{G_{\theta}}=\frac{1}{G_{LT}}\cos^22\theta+(\frac{1}{E_L}+\frac{1}{E_T}+\frac{2\gamma_{LT}}{E_L})\sin^2\theta$$
 (1)

$$\frac{1}{E_{\theta}}=\frac{1}{E_L}\cos^4\theta+\frac{1}{E_T}\sin^4\theta+(\frac{1}{G_{LT}}-\frac{2\gamma_{LT}}{E_L})\sin^2\theta\cos^2\theta$$
 (2)

式中: θ —表板的纤维倾斜角;
 G_{θ} —剪切弹性模量;
 E_{θ} —抗弯弹性模量;
 E_L 、 E_T —L、T 向的抗弯弹性模量;
 G_{LT} —LT 面剪切弹性模量;
 γ_{LT} —LT 面的泊松比。

当 $\theta=45^\circ$,式(1)可以变为以下形式:

$$\frac{1}{G_{45}}=\frac{1}{E_L}+\frac{1}{E_T}+\frac{2\gamma_{LT}}{E_L}$$
 (3)

当 $\theta=45^\circ$ 时,式(2)可以变为以下形式:

$$\frac{2\gamma_{LT}}{E_L}=\frac{1}{E_L}+\frac{1}{E_T}+\frac{1}{G_{LT}}-\frac{4}{E_{45}}$$
 (4)

将式(4)代入式(3)中,可得下式:

$$\frac{1}{G_{45}}=\frac{2}{E_L}+\frac{2}{E_T}+\frac{1}{G_{LT}}-\frac{4}{E_{45}}$$
 (5)

即

$$G_{45}=\frac{1}{\frac{2}{E_L}+\frac{2}{E_T}+\frac{1}{G_{LT}}-\frac{4}{E_{45}}}$$
 (6)

将数据代入式(6)中,求得胶合板的剪切弹性模量(有关数据参见前报^[2]),结果见表 3。

表 3 胶合板剪切弹性模量的计算值
Tab.3 Calculation results of the shear moduli of plywood

编号	纤维倾斜角 $\theta/(^\circ)$	G_{cf}/GPa	G_{cp}/GPa
2	45	0.943	0.979
5	45	1.439	1.727
8	45	1.198	1.431

注:不同编号试件的规格尺寸见前报^[2]; G_{cf} 代入弯曲振动弹性模量值计算得到的剪切弹性模量; G_{cp} 代入纵波共振弹性模量值计算得到的剪切弹性模量

3.2 计算值与试验值的比较

如前所述,两种方法测得的45°纤维倾斜角胶合板的剪切弹性模量相差很大,因此,须将两种方法的实测值与理论计算值进行比较,以验证实测值准确与否,结果见表4。由表4可见,表面波传播法测得的剪切弹性模量值与计算值相近。可以认为,表面波传播法测胶合板的剪切弹性模量是可行的;而利用弯曲振动法测量剪切弹性模量时,由于弯曲振动试验中产生弯曲扭转复合振动,对于45°纤维倾斜角的胶合板,弯曲振动共振频率与扭转振动共振频率相近,从而影响了测定值的准确性。因此,弯曲振动法不适于测定纤维倾斜角45°方向上胶合板的剪切弹性模量。

表4 计算值与实验值的比较

Tab. 4 Comparison of calculation results and test results				
编号	G_{cf} 与 G_v 的差 异相对值/%	G_{cp} 与 G_v 的差 异相对值/%	G_{cf} 与 G_f 的差 异相对值/%	G_{cp} 与 G_f 的差 异相对值/%
2	-16.9	-13.2	104.1	101.3
5	14.5	32.5	75.4	59.3
8	9.3	26.9	84.1	68.9

注:不同编号试件的规格尺寸参见前报^[2], G_{cp} 、 G_{cf} 见表3

3.3 剪应力分布系数k

用TGH法虽然可以求得剪切弹性模量,但只能求得 G/k 形式的剪切弹性模量。这里的剪应力分布系数 k 表征梁弯曲时断面内最大剪切应力与平均应力之比。

均质各向同性材料的经典弹性力学,早在18~19世纪已逐渐地形成了一套较为完整的理论,后又进一步充实和完善;而经典的非均质各向异性弹性力学却发展比较迟缓,直到本世纪初,航空工业的兴起及胶合木板等新型材料在工业上的应用推动了这门学科的发展。60年代初,Hearmon^[6]对非均质材料的弹性力学进行了具有代表性的总结。根据Hearmon的研究和总结,下式成立:

$$(1-d)q^3-(1-e+2f)q^2+f(f+2)q-f^2=0$$

..... (7)

式中:

$$q=\frac{pv^2}{C_{66}}, d=\frac{C_{66}}{C_{22}}, e=\frac{C_{11}}{C_{22}}, f=\frac{C_{11}}{C_{66}}-\frac{C_{12}^2}{C_{22}C_{66}}$$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \\ & & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\gamma_{EL}}{E_L} \\ -\frac{\gamma_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} \\ & & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix}^{-1}$$

将数据代入式(7)中(有关数据见前报^[2]),可得以下结果:

对于9 mm厚胶合板:

$$C_{11}=-1.270 \quad C_{12}=-3.580$$

$$C_{21}=-3.580 \quad C_{22}=-2.180$$

$$C_{66}=0.524$$

于是 $d=-0.240 \quad e=0.583 \quad f=8.796$
因此 $(1+0.240)q^3-(1-0.583+2\times 8.796)q^2+8.796(8.796+2)q-8.796^2=0$

解得 $q=0.987$

同理,对于12 mm厚胶合板解得 $q=0.991$;对于15 mm厚胶合板解得 $q=0.992$ 。对于表面波传播,0°,90°纤维倾斜角胶合板的 q 值可以如下式表示:

$$q=1/k \text{ (8)}$$

因此,剪应力分布系数可由式(8)计算。对于9 mm厚胶合板 $k=1.013$;12 mm厚胶合板 $k=1.009$;15 mm厚胶合板 $k=1.008$ 。

4 结论

1)首次提出用表面波传播法来测定人造板的动态剪切弹性模量。对于胶合板,当纤维纹理角 $\theta=0^\circ$ 和 90° 时,表面波传播剪切弹性模量与弯曲振动剪切弹性模量相差不大;当 $\theta=45^\circ$ 时两者相差很大。理论计算证明,表面波传播法测得的剪切弹性模量准确,可认为表面波传播法检测人造板的动态剪切弹性模量更合适,尤其是解决了对纤维倾斜角45°方向上施行胶合板动态剪切弹性模量测定的难题。

2)对于纤维倾斜角为0°,90°的胶合板,剪应力分布系数 $k=1.008\sim 1.013$ 。

参考文献:

[1] Ross J R, Pellerin F R. Nondestructive Testing for Assessing Wood Member in Structure[J]. FPL-GTR-70, 1994.

[2] 胡英成,王逢翔,刘一星,等. 利用振动法检测胶合板抗弯弹性模量的研究[J]. 木材工业,2001,15(2):3~5.

[3] Hearmon R F S. The Influence of Shear and Rotatory Inertia on the Free Flexural Vibration of Wooden Beams[J]. Brit J. Appl Phys, 1958, 9(10):381~388.

[4] Hearmon R F S. Elasticity of Wood and Plywood[J]. Forest Products Research, 1948, 7.

[5] 林毅. 复合材料工学[M]. 日科技连,1971, 552~530.

[6] Hearmon R F S. An Introduction to Applied Anisotropic Elasticity[J]. Oxford University Press, 1961,85~87.