

面向古建筑木构件内部缺陷勘测的应力波临界速度确定

廖春晖¹,张厚江^{1*},黎冬青²,王喜平³

(1.北京林业大学 工学院,北京 100083;2.北京市古代建筑研究所,北京 100050;

3.美国农业部林产品实验室, Madison, WI, USA 53726-2398)

摘要:利用 Fakopp 应力波检测仪对北京市古建筑中较常使用材落叶松、琼楠、杉木进行检测,结合统计学中置信区间估算方法,处理应力波仪检测出的应力波在健康材料中的传播速度,总结出一套古建筑木构件现场缺陷检测的应力波传播临界速度的计算方法,期望利用此方法建立一个应力波速度检测依据,使在今后现场检测当中能快速、准确判断出古建筑木构件中是否存在缺陷及缺陷的位置,以便进一步的检测。

关键词:古建筑木构件;应力波;置信区间;临界速度

中图分类号:S781

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2013)04-0158-04

Method to Calculate the Critical Velocity of the Stress Wave in Defect Detection of Ancient Architecture Wood Parts

LIAO Chun-hui¹, ZHANG HOU-jiang^{1*}, LI Dong-qing², WANG Xi-ping³

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Research Institute of Architectural Heritages, Beijing 100050, China; 3. USDA Forest Products Laboratory, Madison WI, 53726-2398, USA)

Abstract: The stress wave test technology has a wide range of application in internal defect detection of the wood parts in ancient architecture. A stress wave measuring equipment, Fakopp was adopted to carry out the test on 3 woods that were conventionally used in ancient architectures in Beijing, including larch (*Larix gmelinii*), nanmu (*Beilschmiedia*), and fir (*Cunninghamia lanceolata*). Comparing with the those which were measured with defects free materials, the obtained data were processed by a statistic method, confidence interval, a set of calculation methods for the defect detection was summed. It was hoped to extend this methods for a quick and accurate on-site detection of the defects in wood parts for ancient architecture.

Key words: ancient architecture wood members; stress wave; confidence interval; critical velocit

木结构古建筑的保护修缮既是木材保护的重要内容,也是无(微)损检测技术应用的一个重要领域。作为天然生物材料的木材,在长期使用过程当中容易受到有害生物的侵蚀出现空洞、腐朽、裂纹等缺陷^[1-3],从而严重影响古建筑木构件的承载能力和整个木结构的安全性。古建筑木构件无(微)损检测主要包括缺陷检测和力学性能检测,判断木构件能否继续使用首先需要检测出其内部是否出现空洞、腐朽、裂纹等缺陷。无(微)损检测是一种以不破坏

检测对象使用性能前提的检测技术,应力波检测、微钻阻力检测、超声波检测、断层成像检测等无(微)损检测技术虽然已逐步应用到古建筑木构件检测中。国内外学者对木材检测技术十分重视,并已经取得一定的成绩^[4-6,12-15],但一些检测技术缺少标准,在检测结果判断过程中存在一定的模糊区域。象应力波检测技术在现场木构件内部缺陷检测时一直欠缺一个判断依据,即应力波临界速度。使得现场古建筑木构件缺陷检测的效率偏低。针对这一问题,分

收稿日期:2012-10-12 修回日期:2013-03-20

基金项目:林业公益性行业科研专项(201304512)。

作者简介:廖春晖,男,硕士研究生,研究方向:木材无损检测。E-mail:cloudy_c119@163.com

* 通信作者:张厚江,男,博士,教授,研究方向:无损检测。E-mail:hjzhang6@bjfu.edu.cn

别以落叶松、杉木、琼楠材作为试验对象,利用 Fakopp 应力波测量仪并结合统计学中置信区间计算方法计算出应力波在健康材中传播速度,以此作为判断木构件内部是否存在缺陷的临界速度。为检测古建筑木结构提供依据。

1 试验材料及仪器

1.1 材料

选用北京市古建筑较常用材料落叶松 (*Larix gmelinii*)、琼楠属 (*Beilschmiedia*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 为对象,选取木质健康部位进行试验,常温环境下放置空旷区域 4 周以上。木材含水率在 9%~12% 之间,处于可试验水平。其中,落叶松木构件来自北京圆明园正觉寺修缮拆卸下的旧构件,杉木和琼楠木构件来自十三陵裕陵修缮拆卸下的旧构件。落叶松材和杉木材是圆柱形木结构,可以分别进行径向速度与弦向速度检测;而琼楠材是方形挑尖梁木结构,通常在古建筑木构件检测中认定此木构件应力波检测均为弦向检测,所以琼楠材进行弦向速度检测。落叶松材为 2 根直径 32 cm 左右的圆柱形材料,含水率 9%~12%;杉木材为两根直径 40 cm 的圆柱形材料,含水率 9% 左右;琼楠材为 3 块宽度 10~20 cm 的方形材料,含水率 9% 左右。

1.2 试验仪器

1.2.1 应力波测试仪 采用匈牙利公司制造的

Fakopp 应力波测量仪。利用脉锤撞击木材,使其内部产生应力波的传播,通过测量应力波传播速度的变化来确定木质材料的性质^[7]。测定时,先将应力波测量仪的 2 个探针插入被测木构件表面;检测方形木构件时,2 探针在构件界面上相对垂直插入构件表面;检测圆形木构件时,2 探针插入方向同样要保持在同一直线上,用锤子敲击输入端获得应力波传播时间,再根据两传感器之间的距离,计算出应力波传播速度。

1.2.2 含水率测定仪 木材含水率测定仪,采用探针式,北京英业达公司制造的 YM-50 两用型木材含水率测试仪。检测之前先根据待测木材树种和温度进行设定,再将探针插入待测木构件,停顿几秒以后得到含水率。

2 应力波临界速度确定方法

2.1 应力波在健康材中传播速度检测

应力波是指材料受外力作用时被迫产生形变,为了抵抗这个形变,其内部会产生与外力互斥的力,这种力以机械波的形式传播^[8-9]。在进行应力波检测试验时,先后用锤子 4 次敲击输入端并获得 4 组应力波传播时间,将第一次敲击的结果舍去,取后 3 次检测结果的平均值作为该检测的测试结果,根据检测到应力波的传播时间及 2 传感器之间的距离计算传播速度(图 1)。



图 1 应力波速度检测试验

Fig. 1 The experiment of Fakopp

2.2 应力波临界速度确定方法

先利用 Fakopp 应力波测量仪,针对 3 个树种的多个木构件及其同一木构件不同部位,检测出多个应力波在健康材中的传播速度,作为数据样本;再通过置信区间计算方法来计量其总体应力波在健康材中传播速度,从而得到单侧置信区间的下端点,即临界速度。

置信区间展现的是在总体满足正态分布的参数

的真实值按一定概率被该随机区间包含在其中的程度。置信区间的计算步骤:第 1 步:求一个样本的均值 \bar{x} ;第 2 步:计算出抽样误差 $\frac{S}{\sqrt{n}}t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$;第 3 步:用第 1 步求出的“样本均值”加、减第 2 步计算的“抽样误差”,得出置信区间的 2 个端点^[10]。

$$u = \bar{x} \pm \frac{S}{\sqrt{n}}t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \tag{1}$$

由于缺陷的存在会使得应力波在木材中传播速

度下降,所以应力波传播速度在理论上是不存在上限的,所以当应力波传播速度大于某个下限速度时,均可判定此木构件是健康材。所以只需要得到所求置信区间的下端点,即为临界速度。由于应力波检测速度可以看作是正态分布或近似正态分布的随机变量,本试验利用单侧置信下限公式(2)^[11]的计算方法处理试验数据。计算公式为:

$$u_1=\bar{x}-\frac{S}{\sqrt{n}}t_{\alpha}(n-1)$$

(2)

表 1 各试件的应力波速度

Table 1 Stress wave velocity of the samples

树种	检测方向	检测数	含水率/%	传播距离/cm	传播时间/ μ s	应力波速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
落叶松	径向	60	9.1~12.2	26.2~32.4	190~241	1 338~1 680
	弦向	30	9.1~12.2	22.8~28.7	176~219	1 281~1 599
琼楠	弦向	30	8.6~9.4	10.9~20.4	71~130	1 450~1 859
杉木	径向	60	8.8~10.0	37.7~40.0	199~264	1 540~1 893
	弦向	30	8.8~10.0	24.0~35.0	142~220	1 512~1 782

3 种健康材木构件应力波传播速度见表 2,根据试验材料的特点,落叶松材和杉木材分别进行了径向速度和弦向速度的检测,琼楠材进行了弦向速度的检测,得到 5 组应力波传播速度的样本均值。利用公式(1 或 2)计算其总体参数的估计区间,即置信区间。

表 2 置信水平为 95%应力波临界速度

Table 2 The critical speed of stress wave velocity on 95% confidence level

树种	检测路径 (方向)	样本数 /n	均值 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	标准差 /(S)	显著性水平 /(α)	α 显著性水平 下的系数(t_{α})	抽样误差 $\frac{S}{\sqrt{n}}t_{\alpha}$	单侧置信区间下端 点 u_1 (临界速度)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
落叶松	径向	60	1 533.4	82.7	0.05	1.645	17.6	1 515.8
	弦向	30	1 450.2	90.3	0.05	1.645	27.5	1 422.7
琼楠	弦向	30	1 618.2	68.8	0.05	1.645	20.7	1 597.5
杉木	径向	60	1 717.9	117.0	0.05	1.645	24.8	1 693.1
	弦向	30	1 640.7	79.5	0.05	1.645	23.9	1 616.8

利用公式(2)分别计算出 3 种木材在置信水平为 95%的单侧置信区间,所得置信区间下端点即为我们想要的应力波在健康材中传播的临界速度。从上表可看出,落叶松和杉木的径向应力波临界速度均大于其弦向应力波临界速度,与实际情况相符;同样是弦向应力波临界速度时, $v_{\text{杉木}}>v_{\text{琼楠}}>v_{\text{落叶松}}$ 。现场检测时,应力波速度大于临界速度时,可认为该木构件内部不存在缺陷。反之,可初步确认存在内部缺陷,需进行进一步的详细检测。

利用统计学置信区间原理处理后得到的应力波传播临界速度,不仅在一定程度上提高了临界速度的可靠程度,提高了古建筑木构件现场检测的效率,并为今后的应力波检测古建筑木构件缺陷时提供了一个科学依据。

4 应用实例

为了检验应力波临界速度在实际检测当中能否

其中: u_1 为单侧置信区间下端点; \bar{x} 为实验样本平均值; S 为样本标准差; n 为样本数; α 为显著性水平; t_{α} 为 t 分布的该显著性水平下的系数(单侧分位数)。

3 结果与分析

3.1 应力波在健康材中传播速度检测结果

利用 Fakopp 应力波测量仪完成检测试验,所得各组合含水率和应力波速度结果如表 1 所示。

3.2 利用置信区间计算临界速度

在统计学中,常用的置信水平分别为 90%、95%和 99%^[10]。本文选取置信度为 0.95,应用公式(2)分别算得落叶松、琼楠、杉木的置信水平为 95%的置信区间下限,如表 2。

可行,本试验取一块带有空洞(自制)和裂纹的圆盘落叶松材进行检测试验,得到以下应力波速度结果。

表 3 落叶松圆盘应力波速度

Table 3 Stress wave velocity of circular larch disk

树种	缺陷半径 r /mm	应力波速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)					
		1	2	3	4	5	6
落叶松	35	1 191	1 159	1 198	1 218	1 172	1 438

从表 3 可以看出,1、2 径向检测速度值均<径向临界速度 $1\,515.8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;3~5 弦向检测速度<临界速度 $1\,422.7\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;6 弦向检测速度>临界速度。从图 2 可以看到 1、2 路径上存在 1 个空洞;3~5 路径上存在裂纹;6 路径是健康的。检测结果基本与实际情况相符,故此方法在实际检测中可行。

5 结论

现场快速、准确勘测古建筑木构件内部缺陷的研究一直是相关科研人员关注和探索的问题之一。

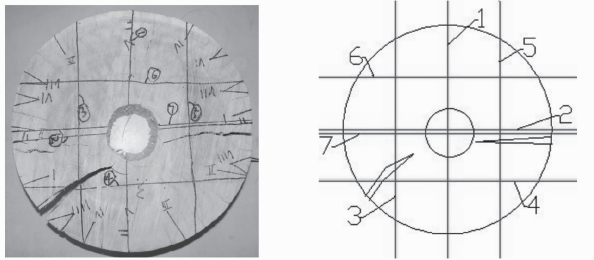


图 2 落叶松圆盘试验材

Fig.2 Cross section sample of larch

本文提出的利用 Fakopp 应力波测量仪结合统计学原理计算应力波在健康材中传播的临界速度的方法。得到落叶松径向和弦向应力波临界速度约为 $1\,515.8$ 、 $1\,422.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；杉木径向和弦向应力波临界速度约为 $1\,693.1$ 、 $1\,616.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；琼楠弦向应力波临界速度约为 $1\,597.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此方法所得结果对今后现场木构件缺陷检测具有较大意义,可以一定程度提高现场检测效率和准确度。应力波临界速度标准的建立需要大量试验材料作为基础,本试验因条件限制,暂时只针对北京市古建筑较常用材中的 3 种木材做了试验。今后需要收集更多试验材料进行试验统计,完善应力波临界速度标准,使得无损检测技术在古建筑木结构缺陷检测上的应用更加成熟。

参考文献：

[1] 段新芳,李玉栋,王平. 无损检测技术在木材保护中的应用[J]. 木材工业,2002,16(5):14-16.
DUAN X F,LI Y D,WANG P. Review of NDE technology as applied to wood preservation[J]. China Wood Industry,2002,16(5):14-16. (in Chinese)

[2] 黄荣凤,王晓欢,李华,等. 古建筑木材内部腐朽状况阻力仪检测结果的定量分析[J]. 北京林业大学学报,2007,29(6):167-171.
HUANG R F,WANG X H,LI H, *et al.* Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture[J]. Journal of Beijing Forestry University,2007,29(6):167-171. (in Chinese)

[3] 陈允适. 古建筑木结构与木质文物保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[4] 段新芳,王平,周冠武,等. 应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(1):112-

114.
DUAN X F,WANG P,ZHOU G W, *et al.* Nondestructive evaluation of dynamic MOE of ancient wooden structure members by stress wave method[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(1):112-114. (in Chinese)

[5] 李华,刘秀英,陈允适,等. 古建筑木结构的无损检测新技术[J]. 木材工业,2009,23(2):37-42.
LI H,LIU X Y,CHEN Y S, *et al.* Effective non-destructive testing techniques for ancient wood buildings[J]. China Wood Industry,2009,23(2):37-42. (in Chinese)

[6] 段新芳,王平,周冠武,等. 应力波技术在古建筑木构件腐朽探测中的应用[J]. 木材工业,2007,21(2):10-12.
DUAN X F,WANG P,ZHOU G W, *et al.* Detection of decay and insect attacked ancient wood members with stress wave methods[J]. China Wood Industry,2007,21(2):10-12. (in Chinese)

[7] 殷亚方,罗彬,张之平,等. 浅谈无损检测方法在木结构古建筑中的应用[J]. 古建园林技术,2010(3):20-23.

[8] 孙燕良,张厚江,朱磊,等. 木构件材料力学性能快速检测研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(2):245-248.
SUN Y L,ZHANG H J,ZHU L, *et al.* Rapid test mechanical properties of wooden components[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(2):245-248. (in Chinese)

[9] 杨学春. 王立海. 应力波技术在木材性质检测中的研究进展[J]. 森林工程,2002,18(6):11-12.
YANG X C,WANG L H. Research progress of testing timber characteristics by using stress wave technique[J]. Forest Engineering,2002,18(6):11-12. (in Chinese)

[10] 0.95 的置信区间[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/409226.htm>.

[11] 潘鸿,张小宇,吴勇民. 应用统计学[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.

[12] PARK H M,BYEON H S. Nondestructive evaluation of strength performance for finger-jointed wood using flexural vibration techniques[J]. Forest Products Journal,2005,55(10):37-42.

[13] WANG X H,HUANG R F,ZHENG H K, *et al.* Quantitative analysis on measure results by resistograph for wood decay of ancient architecture[J]. Chinese Forestry Science and Technology,2006,5(4):16-20.

[14] ROSS J R,BRASHAW B K,WANG X, *et al.* Wood and timber condition assessment manual[M]. Madison,USA:USDA Forest Products Society,2004.

[15] PELLERIN F R,ROSS J R. Nondestructive evaluation of wood[M]. Madison,WI,USA:USDA Forest Products Society,2002.