

应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究

段新芳, 王平, 周冠武, 高超英

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:采用无损检测技术对古建筑木结构安全进行定量评价,对古建筑木结构维修和保护具有重要的现实意义。采用应力波测定仪 FAKOPP 对塔尔寺大金瓦殿的脊檩、檩、梁、承檩、房檩等五种木构件的动弹性模量进行了测定,结果表明:应力波无损检测可以有效的测定残余木构件的力学强度,不同种类木构件弹性模量保持率与其承重作用大小相关。

关键词:应力波技术;古建筑木构件;弹性模量

中图分类号:S781.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-7461(2007)01-0112-03

Nondestructive Evaluation of Dynamic MOE of Ancient Wooden Structure Members by Stress Wave Method

DUAN Xin-fang, WANG Ping, ZHOU Guan-wu, GAO Chao-ying

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Ancient timber structures or old building with wood structures are important cultural heritages to China and the world. It is very important to evaluate the safety of old wood structure members by nondestructive testing methods in old wood structures maintenance or protection. Modulus of elasticities (MOE) of five kinds of wood members including purlin on the ridge of the roof, square purlin, round purlin, beam, sprocket from Grand Hall of Golden tile, Kumbum Monastery located in Qinghai Province were measured by using stress wave method. Results showed that stress wave method was a reliable tool to evaluate the MOE of wood, and remaining dynamic MOE of old wood members had the positive relationship with timber structure position.

Key words: stress wave, old wooden structure member, modulus of elasticity (MOE)

古建筑是我国重要的文物和珍贵的历史文化遗产,受到国家重点保护。古建筑木结构使用的木材是建筑的承重构件,体积庞大,是古建筑保护中的重点之一。古建筑木结构维修与保护过程中,目前存在一大技术难题就是在不破坏原有木构件的前提下,如何科学地检测和确定木构件是否有腐朽或虫蛀以及木构件残余力学强度,这是古建筑勘察设计和制定古建筑维修设计方案时急需解决的一个难题。目前我国在古建筑维修前进行设计确定维修或更换木构件,多采用定性的目视鉴别与简单敲击的方法,予以确定,缺乏定量数据。应用无损检测技术对其进行安全测试,能为古建筑维修设计与确定是否维修或是否更换木构件等提供有力的证据。国外在这一方面取得了很多成就,也有较大进展^[1,2]。为此,笔者对青海省塔尔寺进行维修的大金瓦殿的

部分木构件采用应力波无损检测技术进行了检测,测定了这些古建筑木构件的残余强度,为维护与修复古建筑提供一定的科学依据,也为探索选择合适的无损检测设备提供一定的理论依据。

1 应力波无损检测基本原理

应力波技术是对木材和木质复合材进行无损检测最常用的方法之一。本次使用的是声应力波技术,是通过冲击或用给定的应力使被检测物体产生振动,可根据应力波传播速度进行木材动弹性模量的检测。

不同木构件残余动弹性模量测定的原理:采用测定应力波传播速度的方法来进行动弹性模量,这个方法简便易行^[1]。计算公式为:

$$E = 1000 \times D \times (V/1000)^2 \quad (1)$$

其中: E —木构件如檩、梁、椽的动弹性模量(MOE),

单位:MPa;

V —应力波传播速度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

D —木材气干密度,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

2 测试项目和测试方法

2.1 测试项目

对塔尔寺大金瓦殿三层的脊檩、檩、梁、承椽檩、房椽等5种木构件的动弹性模量进行了测定。

2.2 测定木构件的种类和数量

对塔尔寺大金瓦殿的5种木构件进行无损检测,其种类、规格和数量如下:

(1)脊檩(三层脊檩):脊檩分三种,分别位上脊檩,规格为 $313 \text{ cm} \times 18.5 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$;中脊檩,规格为 $300 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$;下脊檩,规格为 $300 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ 。共测定了脊檩8根。

(2)檩:分为圆檩和方檩两种。其中圆檩尺寸为:一种为长 162 cm ,直径 20 cm ;另一种为长 301 cm ,直径 20 cm ;而方檩尺寸为:一种为 $162 \text{ cm} \times 22.5 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$;另一种为 $310 \text{ cm} \times 22.5 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$;方檩也称随檩,主要起辅助作用,而圆檩起主要承重作用。分别测定圆檩4根,方檩6根。

(3)承椽檩:承椽檩分为两种,规格是:一种为短檩, $167 \text{ cm} \times 19 \text{ cm} \times 19 \text{ cm}$,另一种为长椽檩, $318 \text{ cm} \times 19 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ 。其中前者是放在靠近两侧山墙上方部位的,而后的长椽檩是放在房屋正中的前后墙上上面部位的。共测定了6根承椽檩。

(4)梁:分为上梁和下梁,其中上梁规格为 $385 \text{ cm} \times 31 \text{ cm} \times 25.2 \text{ cm}$,下梁规格为 $385 \text{ cm} \times 22 \text{ cm} \times 28.5 \text{ cm}$,共测定了17根梁。

(5)房椽(檐椽):长度为 290 cm ,宽度和高度有变化,有 $17 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$;有 $15 \text{ cm} \times 14.5 \text{ cm}$ 等几种。共测定了59根檐椽。

所测定的所有木构件树种经中国林科院木材材料室鉴定,均为云杉属木材(*Picea* spp.)。

2.3 测试方法

采用匈牙利产的 Fakopp 应力波测定仪进行应力波传播速度的测定。测定时,先测量测定点间的距离,再沿木材纵向测定,应力波两个探针和木材的夹角均为 45° ,第一次敲击的传播时间读数,无效,从第二次开始,连续测定三次所得传播时间读数的平均值作为该试样的测定结果。然后再计算应力波传播速度。

木材密度测定是从检测过的木构件上在其两端和中部分别锯解3小块木材试样,进行气干密度测定。在实验室采用水银体积仪测量体积,称重,然后

测得所取试样的气干密度。

按照公式(1)计算所测木构件的动弹性模量。

3 结果与讨论

3.1 不同木构件的残余弹性模量

对塔尔寺大金瓦殿三层的梁、脊檩、檩、承椽檩、房椽等五种木构件的动弹性模量测定结果如表1所示。表中列出了所测木构件现在的物理力学指标,包括应力波传播速度、木材密度、动弹性模量(MOE)和木材含水率等。

从表1可见,不同木构件残余 MOE 大小不同,其中檐椽 MOE 最高,为 $10\,854.6 \text{ MPa}$;顶层承椽檩次之, $6\,986.7 \text{ MPa}$;其它依次为三层方檩 $6\,744.9 \text{ MPa}$,脊檩为 $6\,637.1 \text{ MPa}$,梁为 $4\,177.6 \text{ MPa}$,而圆檩的 MOE 最低,为 $2\,215.0 \text{ MPa}$ 。这五种木构件的力学载荷作用是不同的,脊檩、梁、圆檩都是主要的承重构件,而方檩是放置于圆檩下主要起辅助作用,承椽檩和房椽承载的力学负荷则小。因此可见,这6种不同木构件残余 MOE 的大小是与其承担的力学负荷大小成正相关。

表1 应力波检测的塔尔寺木构件特征与动弹性模量

Table 1 Dynamic MOE of different ancient wooden structure members in Grand Hall of Golden tile, Kumbum Monastery

木构件种类	数量	密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	传播速度 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	动弹性模量(MOE)/MPa
顶层脊檩	8	0.470	2 272.69	6 637.1
顶层方檩	6	0.414	4 010.70	6 744.9
顶层圆檩	4	0.474	1 734.92	2 215.0
顶层承椽檩	6	0.415	3 892.99	6 986.7
顶层梁	17	0.423	3 095.76	4 177.6
房椽	59	0.442	4 917.72	10 854.6

3.2 木材使用过程中力学强度降低情况的分析

木材在使用过程中力学强度会有所降低,其降低幅度大小对木结构安全十分重要。

塔尔寺当时所用建筑材基本为产于当地木材,所检测树种均为云杉,而当地分布云杉主要有紫果云杉和青海云杉两种。因此对所测木构件的残余动弹性模量与这两种云杉的静弹性模量进行比较。这两种云杉的密度与静抗弯弹性模量实验数据^[5,6]以及与塔尔寺木构件测定结果的比较(表2)。

从表2可见,青海产紫果云杉气干密度为 $0.422 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,而甘肃洮河的为 $0.429 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,四川平武产的 $0.481 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;青海云杉为 $0.411 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。比较发现,塔尔寺云杉木构件的密度与青海、甘肃和四川三地产的紫果云杉木材的气干密度处于相近的分布范围,其中顶层方檩、顶层梁、承椽檩密度与青海产紫果云杉非常接近,这也符合木材

密度的变异规律。

表 2 青海产云杉的密度与静抗弯弹性模量以及与
塔尔寺木构件测定结果的比较

Table 2 Comparison of wood properties between spruce growing
in Qinghai Province and the old structure wood members

树种或 木构件	产地	气干密度	MOE	MOE 保持 百分率/%
		15%/g·cm ⁻³	/MPa	
	青海	0.422	9604 *	
紫果云杉	甘肃洮河	0.429	9016 *	
	四川平武	0.481	11368 *	
青海云杉	甘肃祁连山	0.411	9150 *	
房椽	塔尔寺	0.442	10854.6	95.5, -
顶层承椽檩	塔尔寺	0.415	6986.7	61.5, 76.4
顶层方檩	塔尔寺	0.414	6744.9	59.3, 73.7
顶三层脊檩	塔尔寺	0.470	6637.1	58.4, 72.5
顶层梁	塔尔寺	0.423	4177.6	36.7, 45.7
顶层圆檩	塔尔寺	0.474	2215.0	19.5, /24.2

注:1、带 * 数据为静抗弯弹性模量,其余的是动弹性模量。
2、强度保持百分率中第一个数据是以四川平武产紫果云杉的静弹性模量为 100 来计算出来的,而第二个数据是以青海云杉的静弹性模量为 100 计算出来的,其中“-”表示该处无数值。

两种云杉的静弹性模量都比较接近,其中青海云杉为 9 150 MPa,四川平武产的紫果云杉最大为 11 368 MPa。

一般地,采用无损检测测定的木材动弹性模量和静弹性模量不能进行比较,由于现在无法获得当时使用时的木材强度,只好用小试件木材力学强度数据进行粗略分析。研究表明,采用无损检测测定的动弹性模量比在实验室小试件测定的静态弹性模量数值要高许多^[3,4]。将不同木构件残余动弹性模量与这两种云杉的静弹性模量采用强度保持百分率比较发现,6 种木构件均不同程度降低,除檐椽外,其他四种木构件的残余 MOE 均比青海云杉静 MOE 要低,而 6 种木构件动弹性模量均比紫果云杉低,其中顶层圆檩残余动弹性模量保持率最低,降低最大,

其余依次为顶层梁、三层脊檩、顶层方檩、承椽檩。

而檐椽残余动弹性模量比紫果云杉静弹性模量略高,主要是采用应力波测定的结果比实验室所测要高许多所致。除去测定方法上的差别,还是可以发现檐椽的动弹性模量还是有所降低,但因其基本平铺在房顶,承重受力小,因此其力学强度降低也最小。这说明,不同种类木构件残余 MOE 降低的次序和其承担的负荷是一致的。

4 结论

木构件的力学强度是关系古建筑安全的重要方面,而应力波无损检测仪 FAKOPP 可以测定古建筑木构件的残余动弹性模量,表明采用应力波检测技术评价古建筑木构件的残余力学强度是可行的

不同种类云杉木构件动弹性模量的保持率不同,但和其承担的负荷大小是一致的。

参考文献:

[1] Divos F, Tanaka T. Lumber strength estimation by multiple regression[J]. Holzforschung, 1997,51:467-471.
[2] Tanaka T, DivosF, Fazan T. Nondestructive evaluation of residual bending strength of wood with artificial defects by stress wave[A]. In: Proceedings of the 11th International Sympoium on Nondestructive Testing of Wood[C], Edited by David Pollock, Forest Products Society, Madison, Wisconsin, USA. 1999. 145-149.
[3] 陈载永. 木材长度对应力波传播速度与振动频率之影响[J]. 中华林学季刊,1997,30(2):195-201.
[4] 陈载永 叶政翰. 树种对三种非破坏性测定仪检测木材弹性系数之影响[J]. 林产工业,1996,15(2):285-294.
[5] 车克钧 贺红元. 傅辉恩,等 青海云杉木材物理力学性质试验研究[J]. 福建林学院学报,1991,11(2):219-223.
[6] 中国林科院木材工业研究所主编. 中国主要树种木材物理力学性质[M]. 北京:中国林业出版社,1982.