

超声波无损检测技术在古建筑检测中的应用 ——以少林寺初祖庵大殿阑额为例*

刘义凡¹ 李哲瑞² 张晓兰² 滕启城³ 姚孜银¹ 侯同宇¹ 北守颀久² 吕红医⁴ 阙泽利¹

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 京都大学, 日本京都 6110011;

3. 宁波保国寺古建筑博物馆, 浙江宁波 315000; 4. 郑州大学, 郑州 450000)

摘要: 初祖庵作为登封“天地之中”历史建筑群的代表性建筑之一, 有着重要的历史价值。初祖庵大殿作为初祖庵主殿, 是庵内现存时代最早的一座木构建筑, 迄今已有 800 多年历史, 虽然经过屡次修葺, 但目前依然存在大量问题。为了更好地了解初祖庵大殿现有阑额的残损情况, 测量了初祖庵大殿不同位置的 6 条阑额, 并得到其外观尺寸、含水率、挠度等参数, 评价了阑额的安全状态; 通过超声波无损探伤仪对初祖庵大殿 4 条阑额进行检测并初步分析, 介绍了利用箱线图和计算公式选取异常点的分析方法, 得出不同的残损点, 计算了 4 条阑额的动弹性模量与残余弹性模量, 将阑额的力学性能和声学性能结合判断, 为后续古建勘察与修复提供依据。

关键词: 初祖庵大殿; 阑额; 超声波无损检测; 内部残损; 动态弹性模量

DOI: 10.13204/j.gyjzG20112202

APPLICATIONS OF ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUE IN ANCIENT BUILDING TESTING: TAKE THE LINTELS OF THE MAIN HALL OF ANCESTOR'S MONASTERY OF THE SHAOLIN TEMPLE AS AN EXAMPLE

LIU Yifan¹ LI Zherui² ZHANG Xiaolan² TENG Qicheng³ YAO Ziyin¹

HOU Tongyu¹ KITAMORI Akihisa² LYU Hongyi⁴ QUE Zeli¹

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Kyoto University, Kyoto 6110011, Japan;

3. Baoguo Ancient Architecture Museum, Ningbo 315000, China; 4. Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Ancestor's Monastery, as one of the representative buildings of "The Center of Heaven and Earth" in Dengfeng city, has an important historical value. As the main hall of Ancestor's Monastery, it is the earliest wooden structure in the ancestor's monastery. It has a history of more than 800 years. Although after repeated repairs, there are still a lot of problems. In order to understand the damage of the main hall of Ancestor's Monastery, the number of lintels at six different positions in the main hall of Ancestor's Monastery was measured, and the parameters, such as external sizes, moisture content, and deflections, were obtained to evaluate the safety state of the lintels. Ultrasonic nondestructive testing technique was applied on testing and preliminary analysis for four lintels in the main hall. The analysis method of selecting abnormal points by boxplot and calculation formula was introduced, and different damage points were obtained. The dynamic elastic modulus and residual elastic modulus of four lintels were calculated and the mechanical and acoustic properties of those lintels were combined to judge, providing a basis for the subsequent survey and repair of this kind of buildings.

Keywords: the main hall of Ancestor's Monastery; lintels; ultrasonic nondestructive testing; inner decayed; dynamic modulus of elasticity

0 引言

中国古建筑以其悠久的历史和丰富的艺术价值而闻名于世, 影响了日本、韩国及东南亚部分地区的建筑形式^[1]。中国目前依然存在大量的古建筑, 但大多数古建筑由于年久失修、自然灾害等因

* 河南省文物局基金项目(201705061045); 郑州市文物局研究课题(20160220A)。

第一作者: 刘义凡, 男, 1996 年出生, 硕士。

通信作者: 阙泽利, 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, zeliqing@njfu.edu.cn。

收稿日期: 2020-11-22

素导致其长期处于“亚健康”甚至“不健康”状态。为了修缮和维护建筑,必须合理地评估建筑及建筑构件目前的状态。而近些年来越来越多的学者们^[2-3]将无损检测技术应用于构筑物或建筑构件的材性评估。

无损检测是指在不损伤被检测对象结构特性的前提下,利用声、光、磁、电等特性对被检测对象进行宏观缺陷检测、几何特性测量、化学成分、组织结构和力学性能变化评定的一种方法,进而对检测对象进行安全性和可靠性评价^[4]。经过近半个世纪的发展,木材无损检测技术由最初的目测法发展到现在的超声波、应力波、Pilodyn检测、声发射(AE)、声-超声(AU)、近红外光谱技术、CT技术、微波、X射线、计算机层析技术、电磁波雷达等技术。这些技术应用于木材领域的许多方面,其中超声波检测由于指向性好、能量高、检测成本低、速度快、对人体及试件无害的优点,成为当今木材检测的重要方法之一^[5]。而这些特点与古建筑评价的要求不谋而合,且该技术用于非变截面的木结构构件(如梁、柱等构件)的检测更为精确可信。

初祖庵位于登封市西北13 km的五乳峰下,相传为宋代僧侣为纪念达摩面壁而修建的小型建筑群,又称“达摩面壁庵”。庵的整体规模不大,南北长约75 m,东西宽约35 m,依山势而建,后高前低,方向为正西北。明代初年形成山门、大殿、面壁亭、厨舍等殿堂的规模,明代中期已成为三重院落的寺院。现存宋代建筑的一座大殿和清代建筑的两个方亭、千佛阁、山门(1986年重建)等。散存有宋、元、明、清、民国石刻50品。初祖庵作为河南省代表性建筑之一,1996年由国务院核准公布为第四批全国重点文物保护单位,2010年被列为世界文化遗产^[6]。

现存初祖庵大殿位于山门后中轴线中部,是庵内现存时代最早的一座木构建筑(图1),面阔三间(11.13 m),进深三间(10.62 m),平面近似方形。大殿建筑样式在中国古代建筑中称为曹殿或九脊殿(明清称为歇山式)。现存大殿重建年代,最早上推至北宋宣和七年(公元1125年),较李诫编修的《营造法式》^[7](完成于宋元符三年)仅晚25年,登封距当时的政治中心(今开封市)较近,因而这座建筑受《营造法式》影响较深,早已被认为是研究《营造法式》的重要例证^[8]。其后,金、元、明、清屡有修葺,但仍保留了原建时的结构特征。

初祖庵大殿阑额共计12条,根据《80年代河南登封少林寺初祖庵大殿修缮工程初步设计方案说明



图1 初祖庵大殿现状

Fig. 1 The status quo of the main hall of Ancestor's Monastery

书》(简称《修缮说明书》)^[9]中对当时阑额的状况进行了描述:前檐三根阑额糟朽裂缝严重,东山前次间西山后次间阑额通裂,后檐明间阑额弯曲。其给出对应的修缮意见为:阑额糟朽严重者更换,局部糟朽裂缝者以旧料拼接。此外并无任何关于阑额的记载。

阑额恰恰是初祖庵大殿木构架中最底层(初祖庵大殿柱为石柱)的非变截面木材构件,其在古建筑中起横向连接柱及传递上部部分斗拱、屋面等荷载给柱的作用,类似于现代建筑中的过梁,因此对于古建筑来说,阑额的作用至关重要。为分析初祖庵大殿主体构架阑额构件的残损情况,对阑额的位置、挠度及木材含水率、表面腐朽情况进行现场勘测,同时采用超声波探伤仪检测阑额构件内部的木材糟朽与空洞。

1 阑额现状勘察

1.1 构件编号规则

为了充分探清目前初祖庵大殿阑额的残损情况,将大殿阑额进行编号,编号规则如下。

构件编号:轴号索引-跨度-构件类型 & 编号(例如:A-23-E1,表示A行,跨柱A2与A3之间的1号阑额)。如图2所示,初祖庵大殿目前12条阑额情况不一,一部分为全部替换的新料,还有的阑额在老料基础上去掉糟朽后用旧料或新料补齐,也有未替换的老料,差别较大。从阑额在建筑上的位置与上部荷载来看,A-BC-E4、4-CD-E5、D-34-E6、D-12-E8、1-CD-E9、1-CB-E10下部为土墙,跨度中部承载一朵补间铺作,而A-23-E1、A-34-E2、4-AB-E3、D-23-E7、1-AB-E11、A-12-E12下部为板门、直根窗,其中A-34-E2与D-23-E7上部承载两朵补间铺作。为分析初祖庵大殿主体构架阑额构件的残损情况,对阑额的位置、挠度及木材含水率、表面腐朽情况进行现场勘测。由于土墙对勘测的限制,仅对A-23-E1、A-34-E2、4-AB-E3、D-23-E7、1-AB-E11、A-12-E12六根阑额的实际尺寸及挠度进行测量。

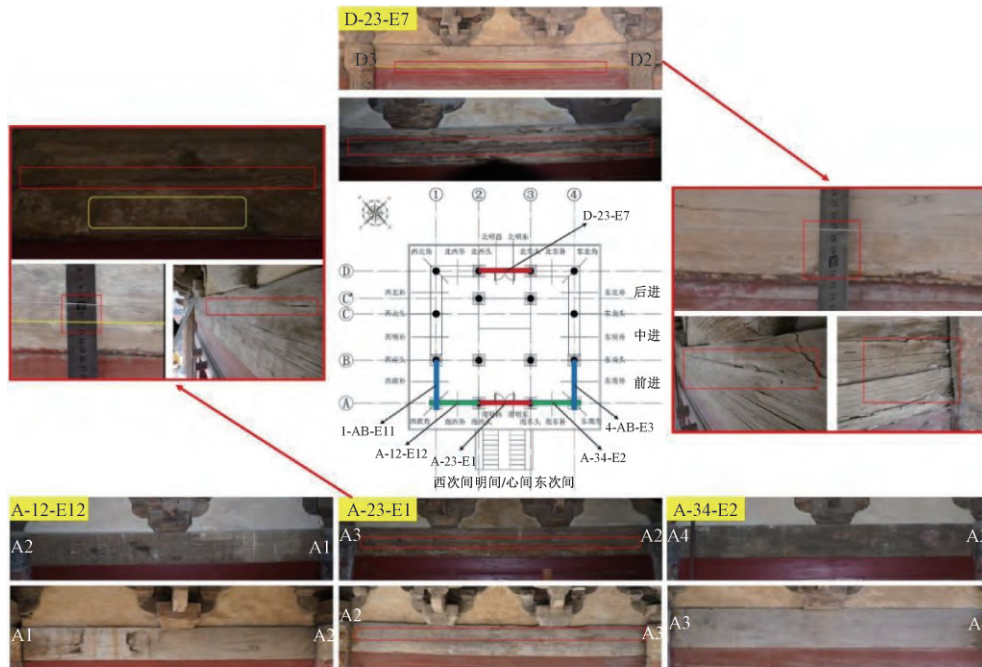


图2 初祖庵大殿阑额轴号索引图及检测的阑额编号

Fig. 2 Index number of the main hall of Ancestor's Monastery and number of lintels

1.2 阑额材质新旧判别及缺陷勘测

根据《修缮说明书》及现场观测发现, A-34-E2、A-12-E12、1-AB-E11 为最近一次修缮中替换的新料, A-23-E1、4-AB-E3、D-23-E7 仍为老料。阑额外侧暴露在露天环境中, 其内外表面状态差异较为明显, 部分阑额(A-23-E1、D-23-E7) 存在上下拼接的现象。参考《修缮说明书》中给出的修缮意见可知, A-23-E1、D-23-E7 阑额为上部去掉糟朽后并以旧料拼接。A-23-E1 为初祖庵大殿南门(正门) 上方阑额, 其上部承载有南明西、南明东两组斗拱及上部梁与屋面荷载。该阑额内侧有通长裂缝, 表面多霉菌附着, 腐朽较为严重; 从阑额外侧图像可以看出, 该根阑额明显由两部分拼接而成, 拼接部位靠近上檐, 拼料高度为 90 mm, 且阑额中部下沿出现腐朽; 斗拱之间的阑额有部分多虫孔, 且面域上分布 6 个木节; 该阑额出现肉眼可见的挠曲变形, 实测下檐挠度为 18 mm。A-34-E2 阑额为新料, 除表面有细小裂纹外未发现较大缺陷, 整体平直, 没有明显的挠曲变形。D-23-E7 阑额位于初祖庵大殿北门(后门) 上部, 其上承载着北明西、北明东两组斗拱及其上部梁架与屋面荷载, 挠曲变形较明显, 阑额内侧腐朽严重, 开裂较大, 依据 LY/T 2146—2013《古建筑木构件的非破坏性检测方法 & 腐朽分级》, 目测腐朽分级为 3 级^[10]; 该阑额为老料拼接新料, 拼料距离上檐 77 mm; 表面风化为“搓衣板状”。A-12-E12 阑额内侧表面状态较好, 外侧沿纤维方向有通长的裂

纹, 且表面有长期积累的雨渍, 通过水平仪测量发现该阑额西侧较高, 这可能与《营造法式》中记载的用柱之制有极大的联系。

2 阑额含水率及挠度分析

2.1 阑额含水率

受测试条件限制, 利用 KT-508 便携式含水率测试仪, 在每条阑额上、下檐各取 4 个点进行测量, 测得了 6 组阑额的平均含水率, 如图 3 所示。

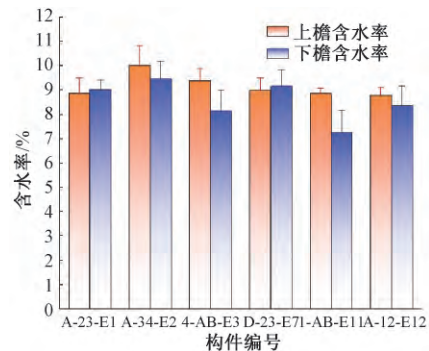


图3 阑额含水率

Fig. 3 Moisture contents of lintels

阑额含水率与外界环境湿度密切相关, 上部含水率一般比下部含水率高, 表明飞檐对上部起到一定的遮蔽阳光照射的作用, 且其上部直接与拱眼壁泥灰墙体接触, 而阑额下部与板门、直棂窗上部分接触, 两种材料不同的水分吸收和传递特性也对阑额上下部分含水率差异有一定的影响, 一般近阳面的阑额(1-AB-E11、A-12-E12) 含水率较背阳面阑额

(A-34-E2、4-AB-E3) 低,而更大可能性为屋面漏雨,水分随着缝隙或铺作传递于上檐阑额。勘测时发现老料 4-AB-E3、D-23-E7 左右两端发生高度收分,而老料 A-23-E1 却无明显收分,可能这三条阑额并不是同一时期的构件。从勘察情况,初步可以看出阑额表面残损和含水率的关系,即阑额上部的残损问题较多,而上檐含水率也较大。现初步推断为雨季时,雨水沿缝隙渗入阑额上檐,导致阑额上部分残损比下部分更多,这也许就是 20 世纪 80 年代对阑额进行修复时,用旧料拼接糟朽部分,而对阑额上部替换情况更多的原因。当然这只是用现象揣测原因,并无更加确凿的证据。

2.2 阑额挠度

阑额的弯曲程度关系到初祖庵大殿架构的整体性,测量结果表明:除 A-23-E1、D-23-E7 这两条阑额中部弯曲变形较明显外,其他 4 组阑额的挠度值并不大,挠度最小的阑额为 A-34-E2,挠度值为 0。阑额 A-23-E1、D-23-E7 因上部荷载较大,挠度较大(肉眼可见),内部腐朽也较为严重,对上部构架及荷载传递影响较大。

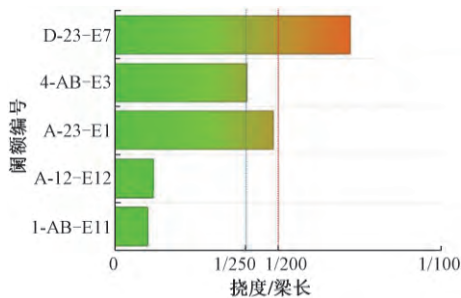


图 4 各阑额依据挠度限值的安全状态

Fig. 4 The safe state of the lintels depends on the deflection limit

依据 GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术规范》^[11] 第 4.1.6 条关于承重木梁枋的残损点的检查及评定, D-23-E7、4-AB-E3、A-23-E1 三条阑额(老料)认定为残损点。GB 50005—2017《木结构设计标准》^[12] 第 4.2.7 条中规定楼板梁类构件计算挠度限值 $[\omega]$ 为 1/250,参考《中国文物建筑保护及修复工程学》^[13],一般认为挠度/梁长不大于 1/200 时,认定为正常状态;挠度/梁长在 1/200~1/100 之间时,表明已接近危险状态,超过此规定认为已经为危险状态;梁枋糟朽超过其断面面积 1/6 以上时,认定为已达危险状态。由图 4 可知:初祖庵大殿北立面中部阑额 D-23-E7 已接近危险状态,且实地观测发现该阑额内表面腐朽较为严重;东立面阑额 4-AB-E3、南立面阑额 A-23-E1 处于参考值范围内的正常状态; A-12-E12、1-AB-E11 两条阑额(新料)状态良好,仍可正常工作。

3 阑额超声波无损检测

3.1 超声波原理及测点的布置

本文使用的探伤仪为脉冲型,而超声波中脉冲波检测木材缺陷的依据是:利用脉冲波在条件相同的木材中传播时间、接收波的振幅和频率等参数的相对变化来判定木材的缺陷。脉冲波在相同条件下木材中传播速度与密度呈正相关。声波在介质中传播时,能量的衰减(损失)决定于声波的扩散、散射(或漫射)及吸收^[14]。当木材为无缺陷材时,超声波在木材中传播距离最短,传播速度最快,能量衰减最小,而在残损木材中传播时传播距离较长,传播速度较慢,能量衰减较大。该仪器进行木材缺陷检测采用的是穿透法,在仪器上有两个端口——发射端和接收端,分别连接超声波探头,超声波携带有其传播过程中的媒介信息。通过分析超声波波形参数,可以得到木材的力学属性和内部残损情况。

通常情况下,超声波的传播方向应沿木材轴向,超声波沿木材轴向传播速度最快,沿径向或弦向传播时较容易发生波折射等现象。而本文使用 MC-6310 非金属超声探伤仪,对阑额内部材质状况进行检测,采样间隔 0.5 μ s,电压为 500 V,接收端和发射端距离 120 mm,选取的木材方向为弦向,这是由于构件的建筑位置导致的,选取 A-12-E12、A-23-E1、A-34-E2、D-23-E7 四条阑额进行无损检测,测点上下之间的距离为 70 mm,左右之间的距离为 500 mm,确保每根阑额的测点排布均匀且有代表性,由于初祖庵大殿明间与次间阑额的长度不同, A-23-E1、A-34-E2、D-23-E7、A-12-E12 四条阑额长度分别为:3 721、2 933、3 759、2 955 mm。根据阑额长度将超声波测点分为 24 点和 18 点,划分好测点后,将接收端和发射端分别涂覆耦合剂,其目的是减少接触面空气。超声波探伤仪主要声学参数有声速、振幅、波形及频率,测点的分布如图 5 所示。

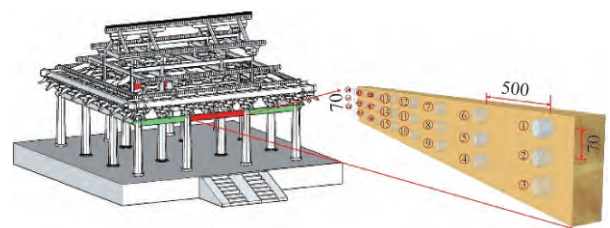


图 5 待测阑额的位置及超声波测点布置 mm

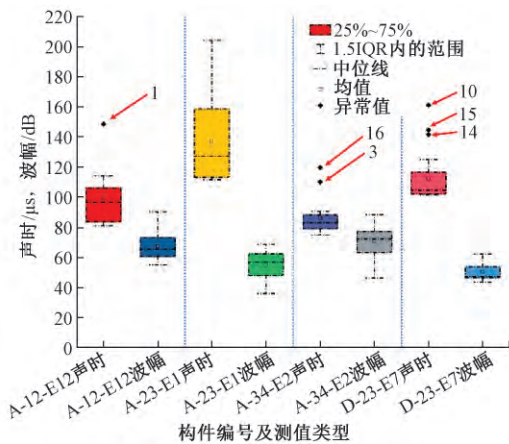
Fig. 5 The position of the lintels to be tested and the arrangement of ultrasonic testing points

3.2 超声波数据的分析

3.2.1 箱线图法

由于利用超声波对木材进行无损检测时,在缺

陷处的数据容易出现突变,故将所测阡额的超声波声时与波幅作箱线图(图6)对图形进行分析得到:阡额 A-12-E12 超声波声时及波幅基本在该组数据中的合理偏差范围内,但有一个异常点,对应该阡额测点为 1 号。由于外观观测该阡额 1 号测点表面并无明显缺陷,故推断该测点内部应有缺陷,导致声速声时异常;阡额 A-23-E1 超声波声时及波幅所有数据都处于合理范围之内,无异常点,与外表观测基本吻合;阡额 A-34-E2 超声波声时出现两个异常点,对应该阡额测点分别为 3 号和 16 号,观测其外部测点,并无明显缺陷,故推断两测点存在不可见缺陷;阡额 D-23-E7 超声波声时出现 3 个异常点,对应阡额测点分别为 10 号、14 号、15 号,观测其外部测点,并无明显缺陷,故推断两测点存在不可见缺陷;分析 4 根阡额的超声波声时均值,阡额 A-23-E1 声时明显偏大,这有可能是在阡额替换修补时更换另一树种所致,此处进一步印证了前面关于收分观测的推断。



IQR 表示第三四分位数与第一四分位数的差值; 1.5IQR 表示正常数据的范围。

图 6 超声波参数箱线

Fig. 6 The box diagram of ultrasonic parameters

3.2.2 公式法

超声波仪器配套的分析软件参考 CECS 21:2000《超声法检测混凝土缺陷技术规程》^[15]中计算方法对异常值进行筛选,首先确定超声波声速值与振幅的临界值。

$$v_1 \geq v_2 \geq \dots v_i \geq \dots v_{n-k} \geq \dots v_{n-1} \geq v_n \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1a)$$

$$v_{\text{avg}} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} v_i \quad (1b)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^{n-k} (v_i - v_{\text{avg}})^2} \quad (1c)$$

$$v_0 = v_{\text{avg}} - \lambda v_s \quad (1d)$$

$$A_{mi} = 20 \lg \frac{a_i}{a_0} \quad (1e)$$

$$A_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{mi} \quad (1f)$$

$$A_{mi} < A_{\text{avg}} - 6 \quad (1g)$$

式中: v_{avg} 为超声波在木材中的平均传播速度, km/s; n 为测量点的数量; k 为移除数据的数量; λ 为剩余统计数量对应的系数; v_s 为 $n-k$ 个测点的声速标准差, km/s; v_0 为超声波波速在该试件中的临界值, km/s; A_{mi} 为 i 测点的振幅测量值, dB; a_i 为测点的首波振幅值, V; a_0 为测点的零分贝振幅值, V; A_{avg} 为超声波振幅的平均值, dB。声速及振幅临界值的确定: 将各测点测得的声速按大小依次排列, 去掉两端 k 个最大值与最小值后, 计算其平均值及标准差, 得到 v_0 并与各测点速度比较大小, 如存在测点速度大于 v_0 则重复上述筛选, 直至 v_0 为最小值, 此时 v_0 为该构件的临界速度; 而振幅的临界值为平均值减去 6, 即所有测量点的数据均需小于临界值, 如不满足上述条件则判定该点数据异常。

如图 7、8 所示, 将测点波速及振幅与临界值(红色点划线为声速临界值, 蓝色点划线为超声波振幅临界值)进行比较, 得出数据异常点(由红圈标出)。而图 7a 的 A-23-E1 中 20 号测点波速较低, 14、23 号测点振幅较低; 图 7b 的 A-34-E2 中 1、3、16 号测点声速较低, 3、7 号测点振幅较低; 图 8a 的 D-23-E7 中测点都为波速异常, 1、5、6、10、12~15、20 共 9 个异常点。图 8b 为 A-12-E12 测点情况, 只有 1 号测点波速较低。

3.3 动态弹性模量与弹性模量的分析

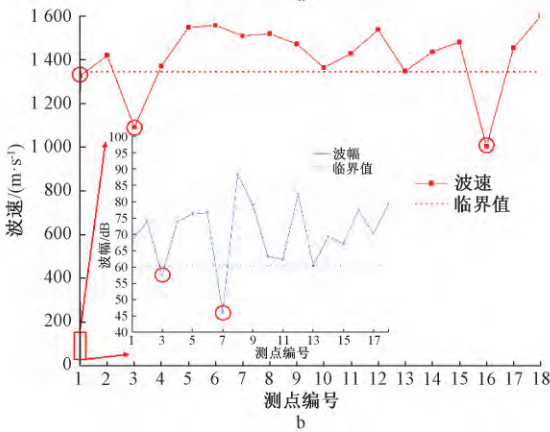
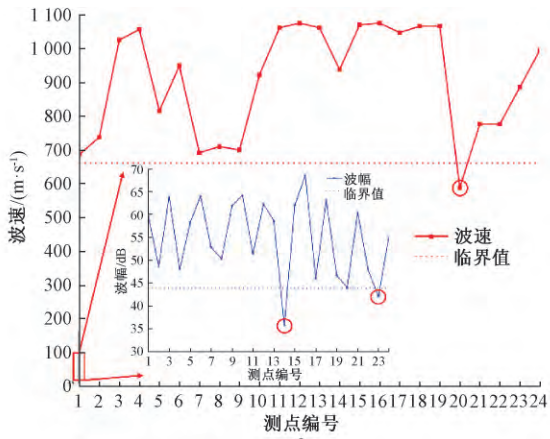
由于初祖庵大殿可试验的材料不足, 故取同一时期修缮时城隍庙替换下来的老料进行补充研究。城隍庙构件如图 9a 所示, 初祖庵替换下的老料构件如图 9b 所示, 进行抗弯弹性模量试验并进行树种鉴定, 得到的弹性模量将用于初祖庵阡额超声波动态弹性模量的预测。

参考国家标准 GB/T 1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》^[16]测定木材老料的抗弯弹性模量, 试件数量为 17 个, 试件尺寸为 20 mm×20 mm×300 mm(跨距 240 mm), 抗弯弹性模量试验采用四点加载(图 10), 测试结果如表 1 所示。

表 1 抗弯弹性模量、抗弯强度数据

Table 1 Bending elastic modulus and bending strength				
样品编号	树种	弹性模量 / GPa	气干密度 / (g·cm ⁻³)	试件含水率 / %
a	落叶松	11.83(±0.97)	0.58(±0.01)	15.83(±0.11)
b	落叶松	11.26(±1.01)	0.62(±0.02)	16.73(±0.63)
平均值	—	11.55	0.60	16.28

括号内的数值为该指标的标准差。



a—A-23-E1; b—A-34-E2.

图7 阙额超声波波速及波幅分析

Fig. 7 Ultrasonic wave velocity and amplitude analysis of the lintels

将试件的弹性模量折算为含水率为 12% 的弹性模量 E_{12} , 则 E_{12} 为 12.29 GPa 并参考标准^[11]要求的明清时期木材折减系数, 推断新材的弹性模量为 15.36 GPa。

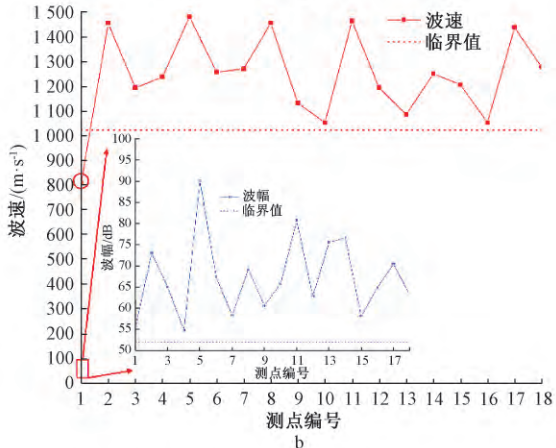
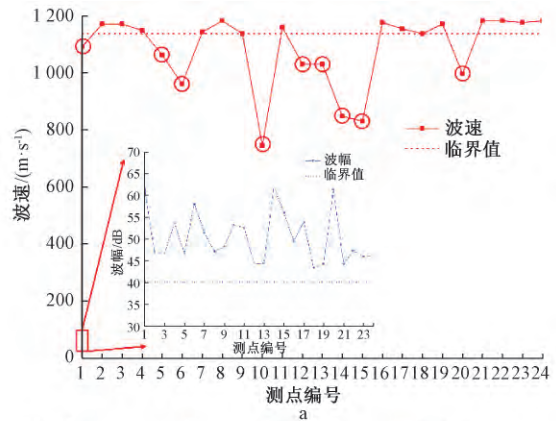
计算出每根阙额的平均声速, 此时的声速为弦向声速, 折算为横纹声速后用式(2a)计算其动态弹性模量值, 参考张训亚给出的相同木材的动态弹性模量与静态弹性模量的相关关系式(2b)^[17], 得出静态弹性模量计算值。由实测弹性模量除以标准给定的折减系数, 预估出当时弹性模量值再与计算值进行对比, 得出残余弹性模量百分比。由表2可知: A-23-E1 与 D-23-E7 的残余弹性模量最低, 分别为 34.57% 与 36.59%, 这点与现场勘测结果相吻合。

$$DMOE = \rho V^2 \quad (2a)$$

$$MOE = 0.43DMOE + 2.11 \quad (2b)$$

式中: $DMOE$ 为试件的动态弹性模量; ρ 为试件密度; V 为超声波在试件中的传播速度; MOE 为试件的静态弹性模量。

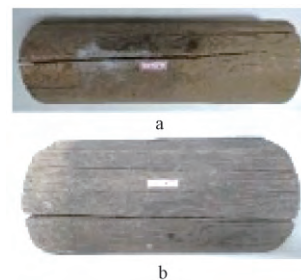
利用现有仪器, 在依据波速、振幅等基础参数判定内部缺陷时, 仅能依据参考值判断内部是否有缺陷, 同时还要结合构件外部情况进行判断。如果需



a—D-23-E7; b—A-12-E12.

图8 阙额超声波波速及波幅分析

Fig. 8 Ultrasonic transmission velocity and amplitude analysis of the lintels



a—城隍庙的檩/榑; b—初祖庵的檩/榑。

图9 待测试的老料构件

Fig. 9 Old material components to be tested



图10 抗弯弹性模量四点加载方式

Fig. 10 Four-point loading mode of bending elastic modulus

要进一步量化内部缺陷, 对仪器的精度有了更高的要求。

表 2 4 根阑额的相关参数对比

Table 2 Comparisons of the parameters of four lintels

阑额 编号	挠度/ mm	平均波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均含 水率/%	DMOE/ GPa	MOE ₁₂ / GPa	残余弹性模 量百分比/%
A-23-E1	18	908 (158)	8.95 (0.52)	6.13	5.31	34.57
A-34-E2	0	1 415 (151)	9.73 (0.82)	14.89	8.22	53.52
D-23-E7	27	1 086 (124)	9.06 (0.61)	8.77	5.62	36.59
A-12-E12	3.5	1 239 (173)	8.56 (0.66)	11.41	6.66	43.36

括号内的数值为该指标的标准差; MOE₁₂ 为试件含水率为 12% 时的弹性模量。

4 结 论

本文通过对初祖庵大殿阑额现存状态的勘测, 结合阑额含水率、挠曲变形的测量, 残损勘测以及超声波检测分析, 表明:

1) 初祖庵大殿已测阑额整体状况良好, 但老旧阑额存在较为严重问题;

2) 阑额的倾斜度受两侧石柱的侧脚和生起影响大; 老料阑额的收分和拼接与后来的修复方案有关, 依据“修旧如旧”的原则, 将已糟朽部分剔除后依然选择旧料进行拼接;

3) 部分阑额挠度较大, 依据规范计算后评定为残损点, 与超声波无损检测所分析的残余弹性模量基本吻合, 已影响结构安全和正常使用, 建议采取加固等修复措施;

4) 运用统计学原理的箱线图和参考混凝土超声波公式法对挑选木结构建筑中非变截面木构件的内部残损点有一定的借鉴作用;

5) 对于超声波数据分析所得出的异常点需要进一步监测; 对于构件内部残损的量化还需要进一步研究。

参考文献

[1] LI Z R, QUE Y L, ZHANG X L, et al. Shaking Table Tests of Dou-Gong Brackets on Chinese Traditional Wooden Structure: A Case Study of Tianwang Hall, Luzhi, and Ming Dynasty [J].

Bioresources, 2018, 13(4): 9079-9091.

[2] FERNANDO T, GIOVANNI C, MAHESH D. A Novel Methodology for Condition Assessment of Wood Poles Using Ultrasonic Testing [J]. NDT & E International, 2012, 52: 149-156.

[3] ADAM S, MEGAN M G, FRANK C B, et al. Detection and Assessment of Decay in Wooden Utility Poles Using an Acoustic Approach [J]. International Journal of Environmental Protection, 2013, 3(8): 13-28.

[4] 索会迎. 超声波无损检测技术应用研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.

[5] 刘铁男. 基于超声波活立木内部腐朽衰减成像的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.

[6] 董丽萍, 刘超文. 初祖庵大殿木构架承重体系结构性能分析 [J]. 结构工程师, 2018(1): 9-15.

[7] 李诚. 营造法式: 四库全书本, 丁本, 陶本, 故宫本, 张蓉镜本 [M]. 北宋: 1103.

[8] 张十庆. 北构南相: 初祖庵大殿现象探析 [J]. 建筑史, 2006(00): 84-89.

[9] 祁英涛. 河南登封少林寺初祖庵大殿修缮工程初步设计方案说明书 [Z]. 郑州: 河南省文物局档案馆, 1982.

[10] 全国木材标准化技术委员会. 古建筑木构件的非破坏性检测方法及其腐朽分级: LY/T 2146—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 古建筑木结构维护与加固技术规范: GB/T 50165—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构设计标准: GB 50005—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[13] 郭志恭. 中国文物建筑保护及修复工程学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.

[14] 《超声波探伤技术及探伤仪》编写组. 超声波探伤技术及探伤仪 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.

[15] 中国工程建设标准化协会. 超声法检测混凝土缺陷技术规程: CECS 21:2000 [S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2001.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 木材抗弯弹性模量测定方法: GB/T 1936.2—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[17] 张训亚. 兴安落叶松木材性质的声-超声技术预测 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.

(上接第 50 页)

[8] 潘毅, 胡文豪, 郭瑞, 等. 碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固 RC 梁的抗弯性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 119-128.

[9] 徐文冰. 基于混凝土塑性损伤理论的 FRP 抗剪加固 RC 梁有限元分析 [D]. 深圳: 深圳大学, 2015.

[10] 何庆锋, 毛佳伟. 碳纤维复材修复损伤钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(6): 14-19.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB

50010—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[12] 杨飞, 董新勇, 周沈华, 等. ABAQUS 混凝土塑性损伤因子计算方法及应用研究 [J]. 四川建筑, 2017, 37(6): 173-177.

[13] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面黏结滑移本构模型 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 10-18.

[14] 陆新征, 滕锦光, 叶列平, 等. FRP 加固混凝土梁受弯剥离破坏的有限元分析 [J]. 工程力学, 2006(6): 85-93.