

基于压电波动测量的竹梁界面剥离监测试验

马晓倩¹,许斌^{2,3},李俊¹

(1. 湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410082; 2. 华侨大学土木工程学院,福建厦门 361021;
3. 华侨大学福建省结构工程与防灾重点实验室,福建厦门 361021)

摘要:作为天然绿色材料胶合竹材在建筑和土木工程上的应用引起广泛关注,对外荷载作用下竹结构的状态进行监测具有重要应用价值。该文对一竹梁构件模型进行分级加载直至破坏,基于压电应力波传播与测量对其各受力状态下的状态进行监测。通过对比不同荷载等级时简谐激励信号下压电传感器的测量信号的幅值和扫频激励下小波包能量的差异,定义相应的损伤指标,实现了对竹梁构件在加载过程中损伤状态的有效监测。

关键词:胶合竹材结构;压电陶瓷;界面剥离;波动分析法;小波包能量;健康监测

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Experiment on Interface Delamination Monitoring of Glued Bamboo Beam Based on Piezoelectric Wave Measurement With PZT Patches

MA Xiaoqian¹, XU Bin^{2,3}, LI Jun¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Key Lab. for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The application of glued bamboo in construction and civil engineering as a typical green construction material has attracted wide attention and the condition monitoring for the glued bamboo structures is important for engineering application. In this paper, a glued bamboo beam specimen is tested and the condition monitoring for the specimen under different loading levels is carried out using the wave measurement with piezoelectric ceramic patches. By investigating the variation in the measurement signal amplitude under the sinusoidal excitation and the wavelet packet energy under the sweep frequency excitation, the damage condition of the specimen is monitored with defined damage index. The results show that the damage condition can be detected effectively based on the wave measurement with piezoelectric patches.

Key words: glued bamboo structure; piezoelectric ceramic; interface delamination; wave propagation analysis method; wavelet packet energy; health monitoring

0 引言

作为一种可再生绿色建筑材料,近年来竹材在土木工程中的应用引起重视^[1]。胶合竹材具有特定的纤维排列方式,具有施工速度快,建筑材料环保,原料来源广泛,造价低等优点。胶合竹材可通过材料纤维的设计控制各方向的力学性能,且没有木材的结疤、斜纹等天然缺陷,在建筑和桥梁结构中得到应用^[2-4]。作为一种新的建筑结构,在不同荷载作用下胶合竹结构状态和损伤监测成为重要的研究课题。

近年来,基于压电陶瓷的健康监测技术的研究和应用得到较好发展^[5-7]。在复杂钢管混凝土构件界面剥离、核心混凝土损伤方面发挥较明显的优势^[8-11]。本文对竹梁构件进行分级加载直至破坏,基于压电应力波测量对竹梁构件状态进行监测。结果表明,该方法可有效监测胶合竹梁结构的损伤状态。

1 基于压电应力波测量的损伤监测基本原理

将压电陶瓷贴片在构件表面中段及中段两侧等距离处对称布置分别作为驱动端和传感端。根据逆压电原理,通过电信号激励压电驱动端,产生应力波

收稿日期:2016-12-20

基金项目:国际科技合作与交流专项基金资助项目(2014DFE70230)

作者简介:马晓倩(1990-),女,湖南长沙人,硕士生。通信作者:许斌(1972-),男,湖北孝感人,教授,博士,主要从事大型复杂结构的损伤监测、防护与结构分析研究。E-mail:binxu@hqu.edu.cn.

在构件内部传播,传感端由于正压电效应将接收的应力波转变为电信号输出。构件胶结面剥离,会导致应力波在传播过程中发生衍射、反射及透射等现象,引起信号幅值的衰减、模态变化及传播时间延迟等现象。通过分析压电传感端接收信号的差异实现竹梁构件从健康状态到发生胶结面剥离状态的过程监测。其原理如图 1 所示。

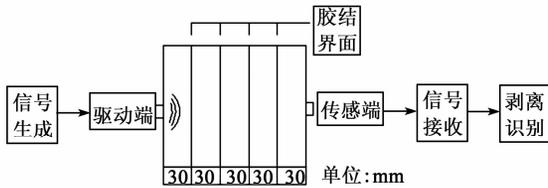


图 1 基于波动法的结构损伤监测原理

时域信号的小波包分析可在对信号低频部分进行分解的同时,对高频部分也进行相同层数的分解。这种分解为全面而准确分析压电信号提供了保障。本文基于小波包理论对测量的电信号进行分析,并采用小波包能量值作为评价指标^[9]。通过小波包能量值来监测分级施加集中荷载时竹梁构件的胶结面剥离情况。

假设 S 为原始监测信号,经过 N 层小波包分解重构后可得到 2^N 个等宽度频带的子信号 s_i ,则

$$S = s_1 + s_2 + \dots + s_{2^N} = \sum_{i=1}^{2^N} s_i \quad (1)$$

式中 s_i 为第 i 频带对应信号, i 为频带编号。

经小波包分解后末层信号中各频带子信号能量向量为

$$\mathbf{e}_i = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}\} \quad (2)$$

式中 e_{im} 为末层各频带信号的能量,且

$$e_{im} = \sum_{m=1}^n |x_m|^2 \quad (3)$$

式中: n 为原始信号采样点数; x_m 为信号分解重构后末层频带 i 子信号的数据点。

信号 S 经小波包分解重构后总能量的向量和为

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 + \dots + \mathbf{e}_i + \dots + \mathbf{e}_{2^N} = \sum_{m=1}^{2^N} \mathbf{e}_m \quad (4)$$

归一化小波包能量为

$$E' = \mathbf{E} / E_0 \quad (5)$$

式中 E_0 为健康状态下的传感器总能量的向量和。

2 构件界面剥离损伤监测试验

2.1 构件设计及加载方案

胶合竹材一般分为薄板和厚板两种形式,薄板

一般作为辅助结构材料,包括墙板、地板、屋面板等。厚板一般用于梁、柱、强骨架及桁架体系等。薄板厚度一般约 10 mm,而厚板约为 30 mm。本文胶合竹材梁构件横截面采用 5 片厚板呈竖直向叠合粘结而成。梁长 200 cm,宽 15 cm,高 20 cm。

采用极限状态设计方法(MFLSD)确定本构件的承载力^[12]。根据受弯构件的抗弯承载能力式:

$$\frac{M}{W_n} \leq f_m \quad (6)$$

式中: M 为弯矩; W_n 为净截面抵抗矩; f_m 为材料抗弯强度值。

计算本文竹梁构件采用跨中施加集中荷载方式加载,可得极限承载力设计值为 158 kN。

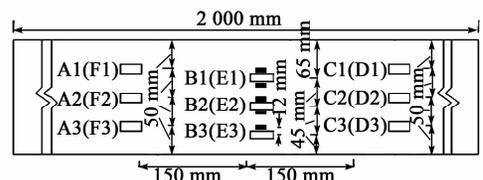
对竹梁构件运用竖直作动器逐级加载。预测破坏形态为胶合面剥离,表面纤维撕裂而导致试件破坏。荷载步为 20 kN,直到构件破坏。

2.2 压电陶瓷片的布设

本试验中采用尺寸为 0.3 mm × 15 mm × 10 mm 伸缩型锆钛酸铅压电陶瓷贴片。图 2 为压电陶瓷片的布置。压电陶瓷片粘贴于竹梁构件表面中段及中段两侧等距离处,编号为 A1~A3、B1~B3、C1~C3,背面相对应贴片编号为 F1~F3、E1~E3、D1~D3。每加载一级,构件稳定后,依次采用某一单一压电陶瓷片作为信号驱动端,而与其位置对应的压电陶瓷片作为信号传感端,如 A1(F1)作为驱动端,F1(A1)作为传感端,以此类推。每组数据重复测量 3 次,取 3 次测量结果的平均值进行分析。



(a) 试件以及试验装置图



□ 压电陶瓷(梁反面压电陶瓷) - 应变片
(b) 压电陶瓷片简明布置图

图 2 压电陶瓷片监测布置图

另外,在梁跨中从上往下布置了一列共5个电阻式应变片(500 mm×3 mm),测量竹梁构件在加载过程中的应变。

2.3 试验监测方法

试验中采用任意波形/函数发生器对压电陶瓷片驱动器进行驱动。驱动信号采用简谐信号和正弦扫频信号两种。简谐激励信号峰值为8 V,频率为10 kHz;正弦扫频激励信号扫频范围为1~20 kHz。扫描5.12 s。采样频率均为102.4 kHz。

3 试验结果及数据分析

3.1 简谐激励下信号幅值分析结果

从试验观测得知,竹梁构件在加载到120 kN时,胶结界面开始出现破坏,并伴随着轻微的竹材劈裂声。加载147 kN时最终被完全破坏,5层厚板胶结界面间全部存在不同程度的剥离现象。中段侧面出现竹板劈裂,底部纤维部分被分层拉断(弯曲应力引起),且出现斜向撕裂(剪切应力引起)。构件破坏时底面的破坏形态如图3所示。



图3 构件底面破坏形态(中段底部)

图4为构件中段B1发射E1接收、B2发射E2接收情况下接收信号时域图。

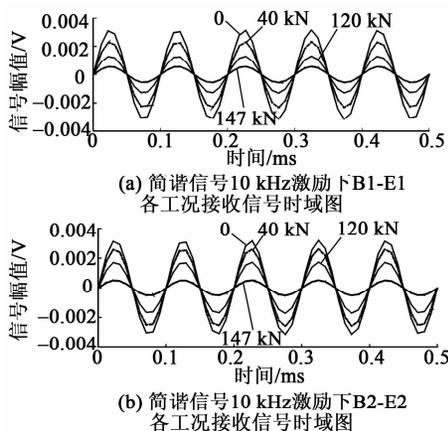


图4 外贴式压电陶瓷片各工况下接收信号时域图

由图4可看出,随着竖向荷载的增加,在驱动端B1与传感端E1间,构件内部产生缺陷,E1传感端的接收信号幅值明显小于健康状态下接收信号幅值,且随荷载增加信号幅值逐级降低。E2测量幅值与E1有类似规律。从全部测点监测数据可见,随着每一级竖向荷载的增加,在驱动端和传感端间构件逐渐发生胶结面剥离和纤维分层拉断等现象,测量信号幅值逐步下降。

为进一步定量描述构件中剥离缺陷和测量信号幅值间的关系,定义了基于信号幅值损伤指标为

$$DI_{mm} = \left| \frac{H_n - D_{mm}}{H_n} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中: H_n 为健康状况下第 n 个传感器接收正弦信号重复测量的平均值; D_{mm} 为在 m 工况下第 n 个传感器接收正弦信号重复测量的平均值。

图5为基于信号幅值的损伤指标变化情况。由图可知,传感端信号幅值随着竖向荷载的增大而减小,损伤指标则随着竖向荷载的增大而增大。陶瓷片B3与E3位于竹梁构件跨中侧面底部应力较大位置,是可能最先发生剥离损伤的区域,信号幅值变化较其他测量点更明显。

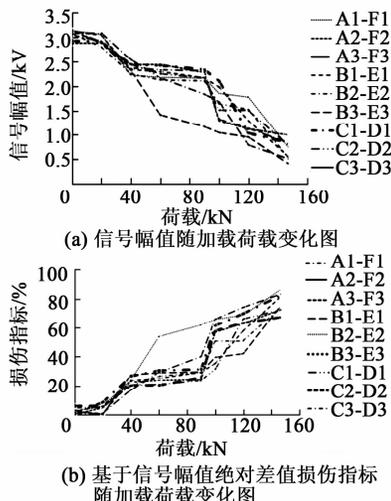


图5 基于信号幅值的损伤指标图

3.2 扫频激励下信号小波包能量分析结果

在扫频激励下,选取构件中段底部B3作为激励器,E3作为传感器时的测量信号时程为例,健康状态、加载60 kN、147 kN 3种工况下E3测量时程如图6所示。由图可看出,在扫频激励信号下信号幅值变化明显。本文选取‘db9’小波包对测量信号进行3层小波包分解,并计算小波包能量。

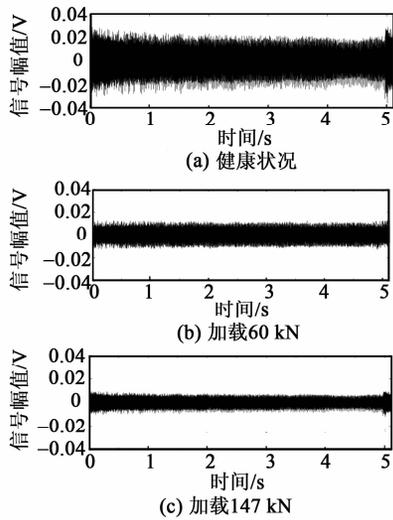


图 6 扫频激励下 B3-E3 各工况下接收信号的时域波形

不同工况下,根据式(5)定义的归一化损伤指标体现了传感端接收信号的小波包能量同健康状态下接收信号的小波包能量之比,若归一化损伤指标小于 1,则说明该传感端所测信号的能量低于健康状态能量值,该处可能存在损伤。

通过对比分析可知,归一化损伤指标随试验工况的变化来判断构件内部健康状况变化。图 7 为在扫频激励下,各传感端接收信号归一化小波包能量随荷载的变化情况。由图可看出,随着竖向荷载的逐级增加,构件界面发生剥离,归一化损伤指标随之减小。

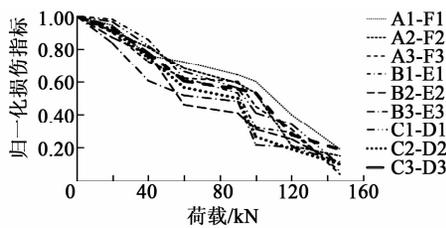


图 7 各传感端接收信号归一化小波包能量变化

3.3 应变数据对比分析

电阻式应变片被安排在竹梁构件的跨中位置横截面上(见图 2(b)),从下往上依次编号 1~5,以采集不同负荷水平下的竹梁构件的应变数据。

图 8 为每一级施加荷载后不同应变片所对应的应变测量数据。在 0~120 kN 范围内各测点应变与荷载大致呈线性关系,平截面假定依然适用。跨中截面的应变测量难以反映竹梁各厚板之间界面的剥离损伤。直到荷载施加到 147 kN 时,应变数据出现较大变化,此时构件发生脆性破坏。

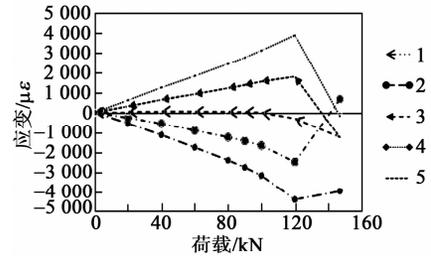


图 8 不同荷载工况下应变片数据图

对比压电传感器监测结果及应变片数据可知,通过压电传感器接收信号幅值及小波包能量值的变化,在胶合竹梁构件发生界面剥离缺陷的初期,以及构件仍处于较好线性行为的状态下,可对界面剥离作出有效监测。本文方法具有明显优势。

4 结论

本文首次提出基于压电应力波测量的胶合竹梁结构的损伤监测方法,将该方法应用于竹梁构件的全过程加载破坏试验中的损伤监测,取得良好的监测效果,为胶合竹结构的健康监测提供了新方法。基于试验和分析结果,可得结论:

- 1) 简谐激励下接收信号幅值随着胶合竹结构分层损伤程度的增大而减小,损伤指标可有效描述竹梁构件损伤状况。
- 2) 扫频激励下基于信号小波包能量的损伤指标与竹梁构件损伤情况直接相关。
- 3) 即使在胶合竹梁结构整体处于线性阶段时,基于压电波动测量的方法可有效监测界面分层剥离状况。

参考文献:

[1] 肖岩,李佳. 现代竹结构的研究现状和展望[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 1-6.
XIAO Yan, LI Jia. The state of the art of modern bamboo structures [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 1-6.

[2] 肖岩,杨瑞珍,单波,等. 结构用胶合竹力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 150-157.
XIAO Yan, YANG Ruizheng, SHAN Bo, et al. Experimental research on mechanical properties of glulam [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11): 150-157.

[3] 高黎,王正,常亮. 建筑结构用竹质复合材料的性能及应用研究[J]. 世界竹藤通讯, 2008, 6(5): 1-5.
GAO Li, WANG Zheng, CHANG Liang. Properties and utilization research of structural bamboo-based composites[J]. World Bamboo and Rattan, 2008, 6(5): 1-5.