

基于压电陶瓷的 PVA-ECC 混凝土柱 裂缝损伤监测

杨文伟^{1,2}, 杨霞¹, 蒙卉恩¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要 目的 基于压电陶瓷传感器对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)进行裂缝损伤识别研究,以指导实际工程. 方法 在实验室浇筑7个PVA-ECC混凝土柱,分别设置了不同深度的人工裂缝损伤,采用基于压电陶瓷的波动分析法对其进行损伤识别,计算监测信号的小波包能量、功率谱密度以及基于小波包变换的损伤指标. 结果 随着裂缝深度的增大,小波包能量和功率谱密度均随之减小,且小波包能量与裂缝深度之间存在线性关系,基于小波包变换的损伤指标对损伤程度敏感性较好. 结论 该监测方法能有效识别PVA-ECC混凝土柱人工模拟的裂缝损伤,研究结果可为PVA-ECC混凝土柱的健康监测提供参考.

关键词 PVA-ECC混凝土柱;裂缝损伤;压电陶瓷传感器;健康监测;小波包能量

中图分类号 TU528.58

文献标志码 A

Crack Damage Monitoring of PVA-ECC Columns Based on Piezoelectric Transducer

YANG Wenwei^{1,2}, YANG Xia¹, MENG Huien¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, China, 750021; 2. Ningxia Center for Research on Earthquake Protection and Disaster Mitigation in Civil Engineering, Yinchuan, China, 750021)

Abstract: Engineered cementitious composite (ECC) is widely used in practical projects such as bridge deck connection and dam repair due to it has significantly improved the toughness, durability and impact resistance of ordinary concrete materials. In order to identify the crack damage of the polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC), 7 PVA-ECC columns with artificial crack damage of different depths were poured in the laboratory. The wave propagation analysis method based on piezoelectric transducer was used to identify the damage and

收稿日期:2020-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51968044);宁夏回族自治区自然科学基金项目(2020AAC02007);研究生创新项目(GIP2019023)

作者简介:杨文伟(1967—),男,教授,博士,主要从事钢结构、组合结构及大跨空间结构等方面研究.

wavelet packet energy, power spectral density and damage index based on the detection signal were calculated. The results showed that the wavelet packet energy and power spectral density both were decreasing with the increase of the crack depth, and there was a linear relationship between the wavelet packet energy and the crack depth. The damage index based on wavelet packet transform was sensitive enough to the level of damage. The detection method can effectively identify the artificial crack damage of the PVA-ECC columns, and the research results can provide a reference for the health monitoring of PVA-ECC columns.

Key words: PVA-ECC columns; crack damage; piezoelectric transducer; health monitoring; wavelet packet energy

纤维增强水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composite, ECC) 是由水泥净浆、砂浆或水泥混凝土作基材,以非连续的短纤维或连续的长纤维作增强材料组合而成的一种复合材料^[1]. 相对于传统混凝土材料, ECC 具有更好的韧性、耐久性、抗冲击性能以及较好的抗疲劳性能,近年来,成为土木工程中广泛使用的新型材料之一^[2-5]. 开展对 ECC 混凝土柱损伤监测研究,对使用该材料的结构可靠性具有重要的现实意义.

压电陶瓷 (PZT) 是目前广泛使用的压电材料之一,因其在传感方面具有频响范围宽、能耗低、响应速度快、易裁剪、价格低廉等特点而在结构损伤识别和健康监测方面存在着巨大的应用潜力^[6-13]. 近年来,已有许多学者开展了基于压电陶瓷的结构健康研究,许斌^[14]采用钢管表面粘贴 PZT 片和混凝土中嵌入智能骨料相结合的方式对钢管混凝土柱界面状态进行监测,并成功监测出了人工模拟的剥离区域. Q. Feng^[15]采用基于压电陶瓷的波动分析法对钢管混凝土柱的注浆过程进行监测,试验结果表明,注浆前后信号幅值变化明显,该方法可用于钢管混凝土柱注浆过程的实时监测. 张继成^[16-17]利用基于 PZT 传感器的主动传感技术对木材的损伤和含水量进行了监测,结果表明,基于压电传感器的主动监测方法能够较好地识别木材的损伤程度和水分变化. 杨文伟^[18]利用基于压电陶瓷的主动传感方法结合小波包分析对土壤压实度进行了监测,结果表明该方法可以有效识

别土壤的压实程度.

虽然已有许多学者采用基于压电陶瓷的传感技术对传统的构件和建筑材料进行了损伤识别研究,但对于 ECC 这种新型复合材料的损伤监测还鲜有报道. 基于此,笔者利用基于压电陶瓷的主动监测法对 PVA-ECC 混凝土柱的裂缝损伤进行研究,以确定其损伤的程度. 采用扫频波对带有裂缝损伤的 PVA-ECC 混凝土柱进行试验,对接收到的信号,通过对比扫频激励下信号幅值和小波包能量的差异,成功的监测到模拟的裂缝损伤,随后定义了基于扫频信号小波包能量的损伤指标,试验结果表明,损伤指标对裂缝损伤程度具有足够的敏感性.

1 监测原理及分析方法

1.1 基于压电陶瓷的波动分析法

波动分析法的基本原理是将压电陶瓷粘贴于结构表面或嵌入结构内部,与被测结构一起构成压电陶瓷智能监测系统. 文中首先使用交流电信号激励贴在 PVA-ECC 混凝土柱一端的压电陶瓷驱动器片 (PZT),由于压电陶瓷的逆压电效应,被激励的 PZT 片将产生高频应力波并以 PVA-ECC 混凝土柱为介质进行传播,此时由于压电陶瓷的正压电效应,位于柱子另一端的 PZT 片将接收到高频应力波并将其转变为电信号,通过数据采集系统传输给电脑. 由于损伤的出现会引发信号幅值的减小、小波包能量的衰减以及信号模态的改变等,因此可通过对接收信号的分

析来识别结构是否存在损伤,以及损伤的位置和程度.基于波动分析法的压电陶瓷主动监测系统如图 1 所示^[19].

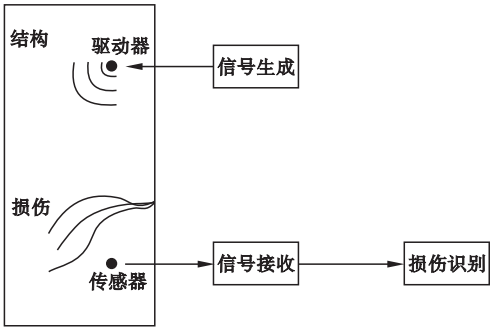


图 1 基于波动分析法的主动监测系统

Fig. 1 Active detection system based on wave analysis method

1.2 小波包能量

小波包变换^[20-21]是在傅里叶变换及小波变换的基础上发展而来的,它解决了傅立叶变换窗口大小及形状固定、分辨率恒定的缺点,克服了小波变换只对信号低频部分做进一步分解的局限性.小波包分解能够根据待分析信号的特征,自适应的选择相应频带,对信号的高频和低频部分均进行分解,这种分解无冗余、无疏漏,可以更好地进行信号的时频局部分析,因而在工程损伤监测中显示出较好的应用前景.

基于小波包分解的小波包能量与原始监测信号能量具有等价关系,因此可用小波包能量表征原始信号携带的能量,通过对比各监测信号小波包能量的差异识别结构的损伤.

1.3 基于小波包能量的损伤指标定义

近年来,在结构健康监测方面,为了更好地表征结构的损伤程度,已有许多学者提出了多种损伤指标,其中 Giurgiutiu 和 Rogers 于 1998 年提出的均方根指数(RMSD)是一种能够较好区别结构健康和损伤两种状态信号的合适的损伤指标^[22].故笔者通过计算健康状态和损伤状态能量向量之间的 RMSD,得

到损伤指标 DI,健康状态的能量向量记为 $E_h = [E_{h,i}]$,损伤状态的能量矢量用 $E_k = [E_{k,i}]$ 表示.其表达式如下:

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2^n} (E_{k,i} - E_{h,i})^2}{\sum_{i=1}^{2^n} E_{h,i}^2}}, (i = 1, 2, \dots).$$

(1)

DI 的最大值为 1,最小值为 0,DI = 1 代表完全损伤状态,DI = 0,代表健康状态,DI 越接近 1,结构损伤越严重.

1.4 功率谱密度分析

功率谱密度分析^[23]是将有限长序列 $x(n)$ ($0 \leq n \leq N_s - 1$) 先分段,每段长为 M ,段与段之间的重叠量为 $M - K$,第 i 个数据段经加窗后可表示为 $x^i(n) = G(n)x(n + iK)$ ($0 \leq i \leq L - 1$, $0 \leq n \leq M - 1$), K 为整数, L 为分段数,它们之间满足关系 $(L - 1)K + M \leq N_s$, $G(n)$ 为窗口函数,得到该数据段的功率谱密度为

$$P^i(\omega) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} X^i(n) e^{-j\omega n} \right|^2.$$

(2)

$$U = (2\pi M)^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} |G(\omega)|^2 d\omega.$$

(3)

式中: U 为归一化系数,使用它是为了保证所得到的谱是真正功率谱的渐近无偏估计.由此可得到平均功率谱值为

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} P^i(\omega) = \frac{1}{LMU} \sum_{i=0}^{L-1} \left| \sum_{n=0}^{M-1} X^i(n) e^{-j\omega n} \right|^2.$$

(4)

2 试验概况

2.1 试件设计

为了研究 PVA-ECC 混凝土柱裂缝损伤的监测方法,在实验室浇筑了 7 个直径为 120 mm、高为 200 mm 的 PVA-ECC 混凝土试件,并在其上设置了不同深度的裂缝损伤(见图 2),试件编号以及裂缝损伤深度见表 1.裂缝宽度均为 1.5 mm,其中试件 ECC-1 作为可参考的健康状态不设置损伤,裂缝位置见图 3.



图2 PVA-ECC 混凝土柱

Fig. 2 PVA-ECC column

表1 试件编号及裂缝设置

Table 1 Specimen numbers and crack setting	
试件编号	裂缝深度/mm
ECC-1	0
ECC-2	2
ECC-3	5
ECC-4	8
ECC-5	11
ECC-6	15
ECC-7	20

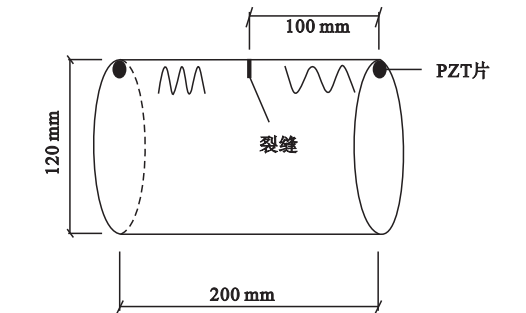


图3 ECC 混凝土柱中损伤位置及压电陶瓷的布置

Fig. 3 Damage locations and placement of PZT in ECC column

试件配合比见表 2. 其中聚乙烯醇纤维采用日本 RECS15 × 12 型 PVA 粗短纤维, 水泥采用宁夏赛马牌 42.5R 普通硅酸盐水泥, 石英砂采用经 0.63 mm 筛孔的细沙, 粉煤灰采用某公司生产的一级粉煤灰, 减水剂采用聚羧酸系高性能减水剂. 每个试件的两端均粘贴有压电陶瓷片, 分别用作驱动器和传感器, 用于发射和接收信号, 粘贴位置见图 3.

表2 PVA-ECC 混凝土配合比设计

Table 2 Mix design of PVA-ECC kg/m³

$\rho(\text{PVA})$	$\rho(\text{水})$	$\rho(\text{水泥})$	$\rho(\text{粉煤灰})$	$\rho(\text{细沙})$	$\rho(\text{减水剂})$
26	314	691	566	503	6.285

2.2 数据采集与分析

2.2.1 压电陶瓷换能器

压电陶瓷是压电材料中应用最广泛的一种材料, 具有响应快、灵敏度高、能量消耗少、生产工艺成熟、成本低、质量轻且形式多样等优点, 此外还具有良好的正、逆压电效应, 既可作为传感器 (Sensor) 接收信号, 又可用作驱动器 (Actuator) 发射信号. 笔者采用表面粘贴的方式布置压电陶瓷换能器, 采用具有较高敏感性的铌镁锆钛酸铅三元系压电陶瓷 (PZT-5H), 直径为 15 mm 且带有铜片 (见图 4), 压电陶瓷材料的参数见表 3.

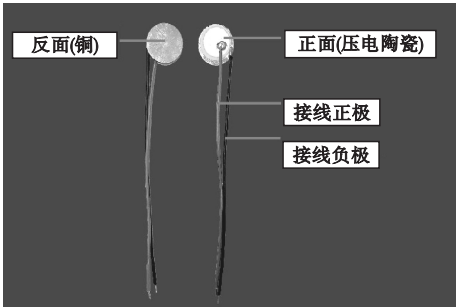


图4 压电陶瓷片

Fig. 4 Picture of PZT sheet

表3 PZT-5H 材料参数

Table 3 The material parameters of PZT-5H				
压电陶瓷	密度/ (kg · m ⁻³)	居里温 度/℃	相对介电 常数	机电耦合 系数
PZT-5H	7 600	300	3 400	0.66

2.2.2 数据采集系统

数据采集系统采用江苏三川智能科技有限公司生产的多功能压电信号监测与分析系统. 此系统集成信号发生器和示波器于一身, 且在数据采集过程中可以进行实时滤波, 在试验过程中, 需要结合装有与此系统配套的 SCHYPZTV3 软件的电脑以进行信号的发射和数据的采集. 图 5 为基于压电陶瓷的主动

监测系统结构图.

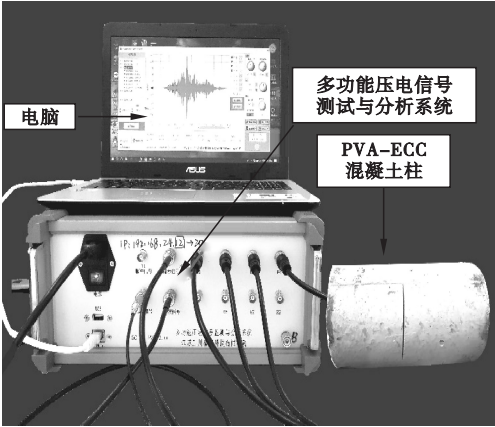


图5 基于压电陶瓷的主动监测系统

Fig.5 The active detection system based on PZT

2.2.3 数据采集参数设置

本次试验均采用主动监测方法,以一发

一收的形式进行,试件两端的压电陶瓷片分别用作驱动器和传感器进行信号的发射和接收.采用扫频正弦波作为激励信号,由于每种材料对信号的频响范围不同,因此为了确定PVA-ECC混凝土结构的频响范围,正式试验前,首先进行多次预试验,即先采用较大范围的扫频波(例如1~500 kHz)对试件进行激励,然后观察采集到信号的时域波形,寻找信号幅值较大的时间段,根据扫频时长推算出该时间段对应的大致扫频范围,然后按照推算出的扫频范围再次激励试件.以上过程反复进行,从而逐步缩小扫频范围直到确定试件主频所在范围,便可将其作为试验扫频范围.按照以上方法,最后选定扫频为10~45 kHz,试验参数见表4.

表4 试验参数设置

Table 4 Test parameters setting

试件编号	裂缝深度/mm	激励信号	扫频范围/kHz	扫频电压/V	步进频率/kHz	扫频时间/ms	采样频率/MHz	采样时间/ms
ECC-1	0	扫频波	10~45	10	1	36	1	42
ECC-2	2	扫频波	10~45	10	1	36	1	42
ECC-3	5	扫频波	10~45	10	1	36	1	42
ECC-4	8	扫频波	10~45	10	1	36	1	42
ECC-5	11	扫频波	10~45	10	1	36	1	42
ECC-6	15	扫频波	10~45	10	1	36	1	42
ECC-7	20	扫频波	10~45	10	1	36	1	42

试验过程中,为了去除噪声、50 Hz 交流电等外界因素对监测信号的影响,数据采集过程中均进行了实时滤波,滤波拓扑结构采用巴特沃斯、带通、阶数为5,滤波为10~60 kHz.同时为了消除偶然误差造成的信号失真,在扫频过程中,每次试验均至少进

行10次激励,直到波形稳定才保存数据.

3 试验结果分析

3.1 基于小波包分解的能量和损伤指标分析

7个试件在扫频正弦波激励下的时域信号如图6所示.

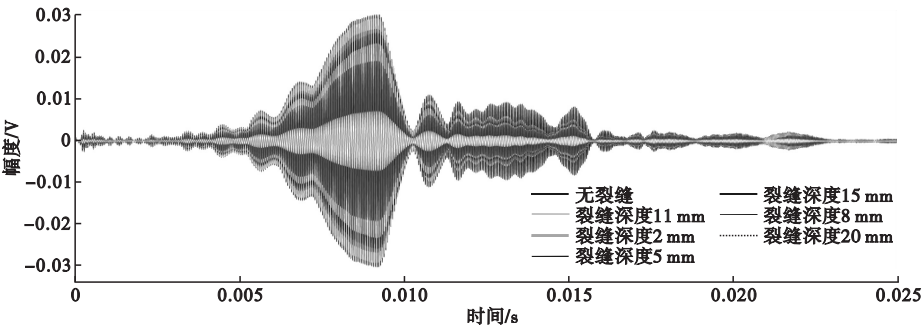


图6 采集数据波形

Fig.6 The waveform of acquire data

从图中可以看出,随着裂缝深度增大,传感器接收信号的幅值随之衰减. 由于空气对声波的衰减作用远大于混凝土,因此在产生裂缝损伤后,声波幅值的这种衰减是可预测的,由此也可以初步说明此监测方法可以有效识别 PVA-ECC 混凝土试件不同深度的裂缝损伤.

为了进一步说明此监测方法的有效性,将信号进行 5 层小波包分解,采用 db3 小波,计算不同深度裂缝损伤下信号的小波包能量如图 7 所示. 由图可以看出,随着裂缝深度的增大,接收到信号的小波包能量也随之发生衰减.

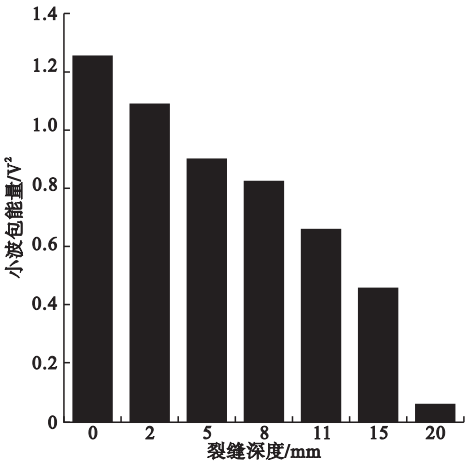


图 7 小波包能量对比

Fig. 7 Comparison of wavelet packet energy

基于此,对裂缝深度和小波包能量的关系进行回归分析,得到回归曲线如图 8 所示.

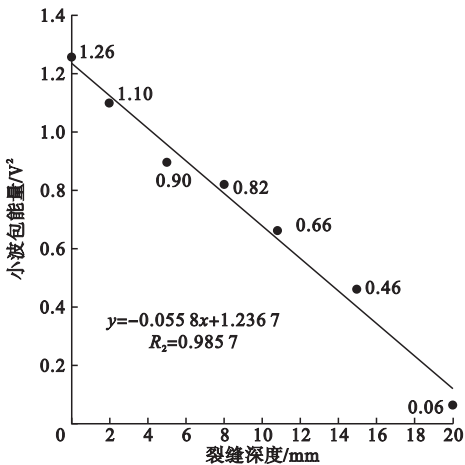


图 8 小波包能量随裂缝深度变化关系图

Fig. 8 Relationship between wavelet packet energy and crack depth

由图可以看出,当裂缝深度在 20 mm 以内时,小波包能量随裂缝深度呈线性变化. 提取 5 层小波包分解后末层 32 个频段内的小波系数如图 9 所示. 由图可以看出,当裂缝深度在 20 mm 以内时,5 层小波包分解后末层 32 个频段内第 1、第 2 频段的小波系数也对 PVA-ECC 混凝土试件以裂缝深度为变量的裂缝损伤敏感,因此这两个频段内子信号的小波系数也可以作为 PVA-ECC 混凝土试件裂缝损伤程度识别的指标之一.

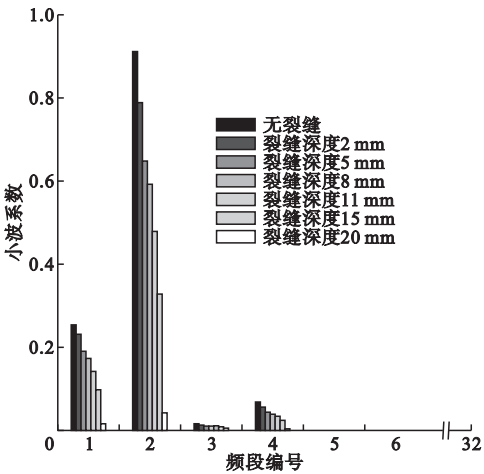


图 9 小波包分解后末层每个频段内的小波系数

Fig. 9 Wavelet coefficients in each band of the last layer after wavelet packet decomposition

以上分析均表明基于压电陶瓷的主动监测方法可有效识别 PVA-ECC 混凝土柱的裂缝损伤,为了进一步对损伤程度进行量化评价,计算不同裂缝深度下采集信号的 RMSD 值(见图 10). 由图可以看出,损伤指标 DI 对 ECC 柱以裂缝深度为变量的裂缝损伤程度敏感. 由此说明,该监测方法可以有效识别 PVA-ECC 混凝土试件不同深度的裂缝损伤.

3.2 基于功率谱密度的结果分析

笔者计算了 7 个试件的功率谱密度,并绘制了不同深度裂缝损伤下试件功率谱密度随频率的变化曲线(见图 11). 由图可以看出,在增加了人工模拟裂缝损伤后,7 个 PVA-ECC 混凝土试件的固有频率仍相同,均

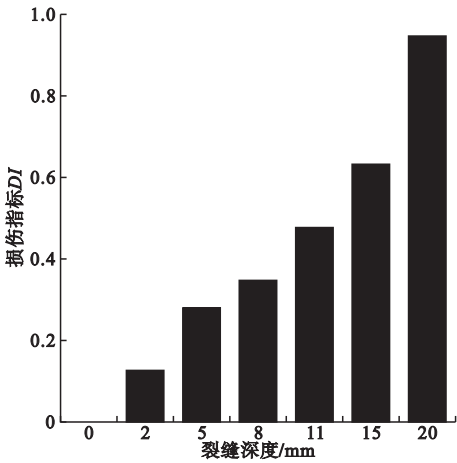


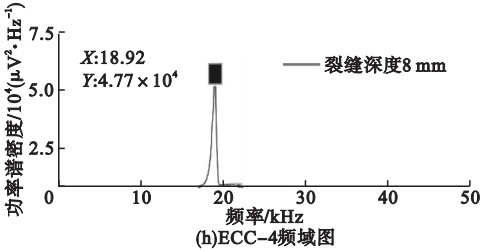
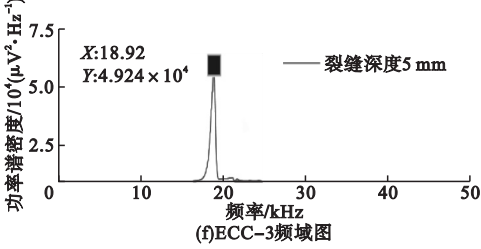
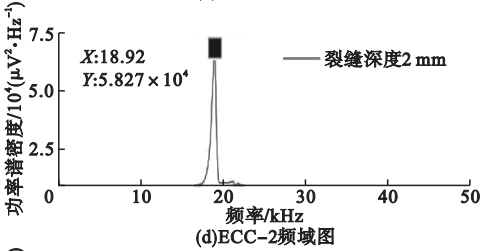
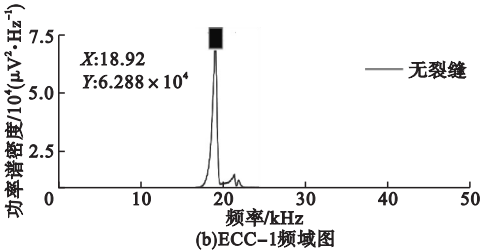
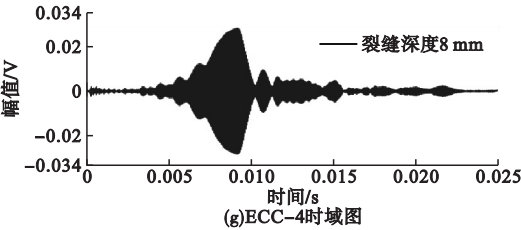
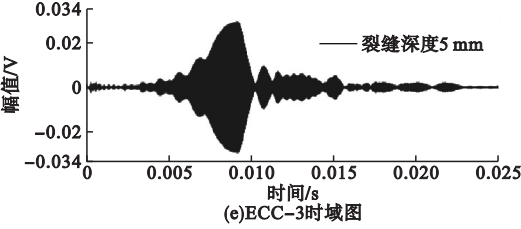
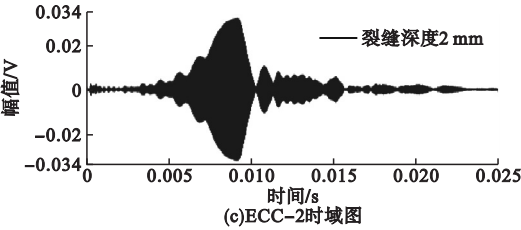
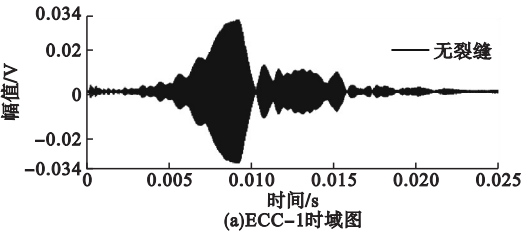
图 10 基于小波包能量的损伤指标对比

Fig. 10 Comparison of damage indexes based on wavelet packet energy

为18.92 kHz,这是因为 PVA-ECC 混凝土与

普通混凝土不同,其组成原材料中没有粗骨料,主要由水泥、细砂、粉煤灰等细骨料组成,在微观构成上与均质材料相似,因此即使其主体构件上产生了裂缝损伤,其结构的主频依然不会改变.

此外由图 11 可知,随着裂缝深度的增大,采集信号功率谱密度的值随之减小,且不同试件的功率谱密度值相差较大,这是由于结构在产生损伤后,波传播路径受阻发生绕行,单位频带内采集信号的功率大小也发生了衰减,从而导致带有不同裂缝深度试件的功率谱密度大小发生变化.由此发现,信号的功率谱密度也可作为识别 PVA-ECC 混凝土结构损伤的一个指标,可根据其值的变化判断损伤是否发生以及损伤的程度如何.



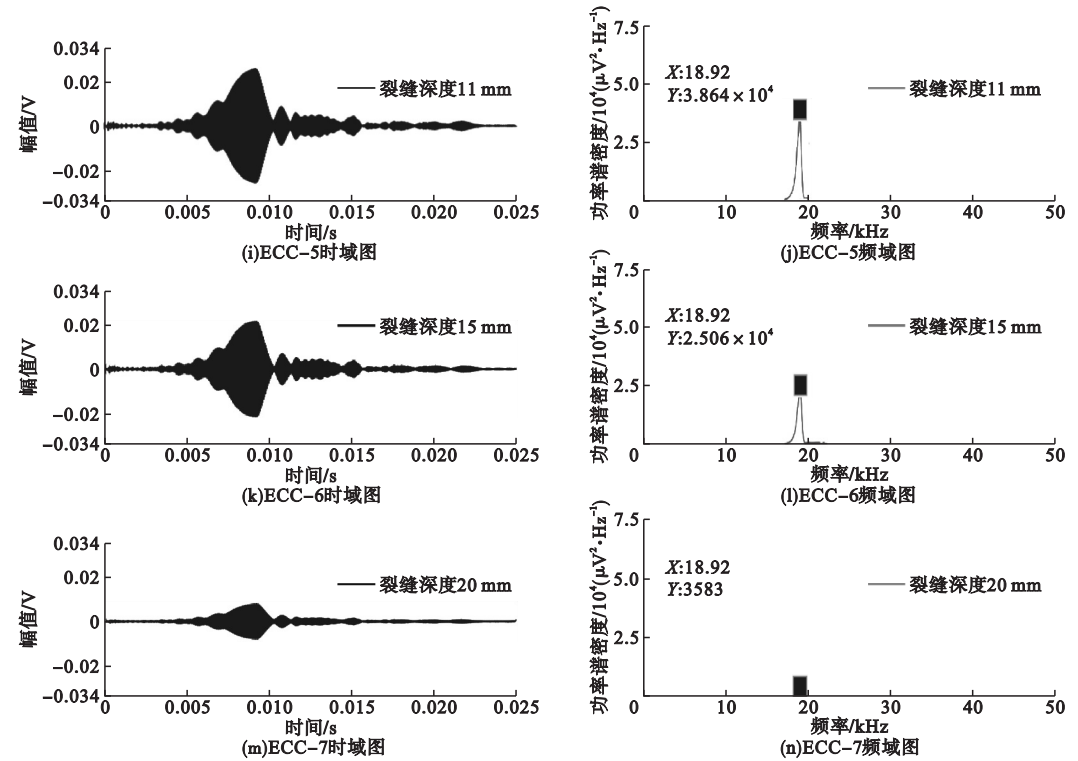


图 11 监测信号的时域及频域图

Fig. 11 Time-domain and frequency-domain diagrams of monitoring signals

4 结 论

(1)笔者提出的监测方法能有效识别 PVA-ECC 混凝土柱的裂缝损伤,且使用的基于小波包能量的损伤指标对损伤程度敏感性较好。

(2)通过试验发现,无论是采用基于扫频波的小波包能量还是扫频波的幅值,均可以有效识别 PVA-ECC 混凝土柱不同深度的裂缝损伤,且基于扫频波的小波包能量对裂缝损伤程度敏感。

(3)通过对裂缝深度与采集信号的小波包能量进行回归分析发现,裂缝深度在 20 mm 以内时,小波包能量与裂缝深度之间存在线性关系.由此可推断裂缝损伤的出现导致扫频波在传播过程中发生了更大的衰减,且随着损伤程度的增大,小波包能量的衰减也更加明显。

(4)计算信号的功率谱密度,发现随着裂缝深度的增大,采集信号的功率谱密度值

随之减小,且变化明显,由此说明信号的功率谱密度也可作为判定 PVA-ECC 混凝土结构是否存在损伤的一个指标。

参考文献

[1] ZHANG J, GONG C X, JU X C. Characteristics of high ductility and low shrinkage engineered cementitious composite and its applications [J]. Journal of hydraulic engineering, 2011, 42 (12): 1452-1461.

[2] 何伟轩. FRP 增强 ECC 梁及 ECC/混凝土组合梁抗剪性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.

(HE Jixuan. Study on shear behaviors of FRP reinforced ECC beam and ECC/concrete composite beam [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)

[3] ATAHAN H N, PEKMEZCI B Y, TUNCEL E Y. Behavior of PVA fiber-reinforced cementitious composites under static and impact flexural effects [J]. Journal of materials in civil engineering, 2013, 25 (10): 1438-1445.

[4] ABUSHAWASHI N, VIMONSATIT V. Material classification and composite elastic modulus of hybrid PVA fiber ferrocement [J]. Journal of materials in civil engineering, 2016, 28 (9): 1-11.

[5] 程智慧, 何政, 欧晓英. ECC 材料对混凝土框

- 架结构倒塌安全储备的提升作用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014(3): 548-555.
(CHENG Zhihui, HE Zheng, OU Xiaoying. Enhancement on collapse safety margin of concrete frame structures using engineered cementitious composite materials[J]. Journal of basic science and engineering, 2014(3): 548-555.)
- [6] 阎石, 马禄哲. CFRP 加固混凝土结构剥离损伤识别试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 69-74.
(YAN Shi, MA Luzhe. PZT-based debonding detection of reinforced concrete structure strengthened with CFRP[J]. Journal of civil engineering and management, 2011, 28(3): 69-74.)
- [7] YANG Wenwei, YANG Xia, LI Shuntao. Monitoring of interfacial debonding of concrete filled pultrusion-GFRP tubular column based on piezoelectric smart aggregate and wavelet analysis[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1-15.
- [8] PARK S, KIM J W, LEE C. Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures[J]. NDT & E international, 2011, 44: 232-238.
- [9] BHALLA, S, KAUR N. Prognosis of low-strain fatigue induced damage in reinforced concrete structures using embedded piezo-transducers[J]. Int. J. Fatigue, 2018, 113: 98-112.
- [10] 陈梦琦. 基于压电阻抗的大型多腔不规则钢管桩柱缺陷监测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
(CHEN Mengqi. Study on defect detection of large-scale irregular multi-cell concrete-filled steel tubular with electro-mechanical impedance of PZT[D]. Changsha: Hu'nan University, 2014.)
- [11] 陈刚, 许雨心, 张大朋, 等. 基于压电阻抗技术的导管架平台的典型节点损伤监测试验研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(4): 889-1000.
(CHEN Gang, XU Yuxin, ZHANG Dapeng, et al. Experimental research on damage detection of typical nodes of jacket platform based on piezoelectric impedance technology[J]. Journal of applied mechanics, 2019, 36(4): 889-1000.)
- [12] 王奕首, 卿新林. 复合材料连接结构健康监测技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1): 1-16.
(WANG Yishou, QING Xinlin. Progress on study of structural health monitoring technology for composite joints[J]. Acta materiae composite sinica, 2016, 33(1): 1-16.)
- [13] LIM Y Y, SMITH S T, SOH C K. Wave propagation-based monitoring of concrete curing using piezoelectric materials; Review and path forward[J]. NDT & E international, 2018, 99: 50-63
- [14] XU B, ZHANG T, SONG G, et al. Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis[J]. Mechanical systems and signal processing, 2013, 36: 7-17.
- [15] FENG Q, KONG Q, TAN J, et al. Grouting compactness monitoring of concrete-filled steel tube arch bridge model using piezoceramic-based transducers[J]. Smart structures and systems, 2017, 20: 175-180.
- [16] ZHANG J, HUANG Y, ZHENG Y. A feasibility study on timber damage detection using piezoceramic-transducer-enabled active sensing[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1-11.
- [17] ZHANG J, LI Y, HUANG Y, et al. A feasibility study on timber moisture monitoring using piezoceramic transducer-enabled active sensing[J]. Sensors, 2018, 18(9): 1-12.
- [18] YANG W, KONG Q, HO S C M, et al. Real-time monitoring of soil compaction using piezoceramic-based embeddable transducers and wavelet packet analysis[J]. IEEE access, 2018, 6: 5208-5214.
- [19] 晏良佳. 基于压电陶瓷的多腔钢管混凝土柱损伤监测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
(YAN Liangjia. Damage monitoring using piezoceramics for multi-cell concrete-filled steel tubulars[D]. Changsha: Hu'nan University, 2013.)
- [20] 许斌, 李冰, 宋刚兵, 等. 基于压电陶瓷的钢管混凝土柱剥离损伤识别研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 86-96.
(XU Bin, LI Bing, SONG Gangbing, et al. Detection of the debonding defect of concrete-filled steel tubes with piezoceramics[J]. China civil engineering journal, 2012, 45(7): 86-96.)
- [21] 孙威, 阎石, 蒙彦宇, 等. 压电陶瓷混凝土结构应力波衰减特性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(5): 833-837.
(SUN Wei, YAN Shi, MENG Yanyu, et al. Experimental research on stress wave attenuation behavior of concrete structure with piezoelectric ceramic sensors[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2010, 26(5): 833-837.)
- [22] KONG Qingzhao. Innovation in piezoceramic based structural health monitoring[D]. Houston: University of Houston, 2015.
- [23] 崔俊, 王秋良. 小波包和功率谱密度分析法在混凝土龄期强度监测中的应用[J]. 传感技术学报, 2017, 30(7): 1131-1138.
(CUI Jun, WANG Qiuliang. Application of wavelet packet and power spectral density analysis in early age of concrete strength monitoring[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2017, 30(7): 1131-1138.)
- [24] 孙丽, 徐自强, 张春巍, 等. 一种大量程双弹簧式光纤光栅位移计[J]. 光电子·激光, 2018, 29(4): 354-362.
(SUN Li, XU Ziqiang, ZHANG Chunwei, et al. A fiber bragg grating displacement meter with a wide range based on dual spring[J]. Journal of optoelectronics laser, 2018, 29(4): 354-362.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)