

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.04.009

基于埋入式压电智能骨料的裂缝修补深度 质量检测试验研究

周建河

(福建博海工程技术有限公司, 福建 福州 350300)

摘要: 在缺陷混凝土构件的裂缝修补问题中,仅通过外观检测无法准确判断其修补质量,而目前缺少高效、规范的无损检测手段。通过在结构中预先埋入压电“智能骨料”,对比分析应力波在不同介质条件下发射及接收信号的差异,以及应用信号处理技术的相关知识,对裂缝修补不同阶段产生的信号变化进行研究,并由此评估裂缝修补质量。研究表明:混凝土裂缝深度大小对“智能骨料”接收端接收到的应力波波形有着很大的影响,通过对接收信号进行时域分析,进而利用小波包分解处理后的能量分析后发现,即使初始裂缝深度不同,修补完好的构件将具有相近的能量值。因此,在该方法中将基于小波包能量得到的裂缝修补质量的评价指标是切实可行的。

关键词: 压电智能骨料; Lamb波; 裂缝修补质量; 小波包分解; 能量指标分析

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0060-06

Experimental Analysis of Concrete Cracks Mending Depth Recognition Based on Embedding Piezoelectric Intelligent Aggregate

ZHOU Jianhe

(Fujian Bohai Engineering Technology Company Limited, Fuzhou, Fujian 350300, China)

Abstract: In order to solve the problem of crack repair of defective concrete members, the repair quality can not be accurately judged by appearance inspection only, and there is a lack of efficient and standardized nondestructive testing means. By pre-embedding piezoelectric "smart aggregate" in the structure, the difference of stress wave transmitting and receiving signals in different media conditions is compared and analyzed, and the relevant knowledge of signal processing technology is applied to study the signal changes generated in different stages of crack repair, and thus evaluate the quality of crack repair. The research results show that the depth of concrete cracks has a great influence on the stress wave shape received by the receiving end of "smart aggregate". Through time domain analysis of the received signals, and then energy analysis after wavelet packet decomposition, it is found that even if the initial crack depth is different, the repaired components will have similar energy values. In this method, the evaluation index of crack repair quality based on wavelet packet energy is feasible.

Keywords: piezoelectric intelligent aggregate; Lamb wave; mending quality of cracks; wavelet packet decomposition; energy index analysis

在建筑工程中,混凝土作为一种常用的建筑材料,承担着重要的结构功能。然而,随着时间的推移和外部环境因素的作用,混凝土往往会出现裂缝。这些裂缝不仅影响着建筑物的美观和结构完整性,

还会对其功能性和耐久性造成不利影响。因此,对混凝土裂缝进行修补是至关重要的一项工作。然而,目前存在一个普遍的问题,即缺乏有效的方法来检验混凝土裂缝修补的质量。因此,迫切需要开发

收稿日期:2024-03-19

修稿日期:2024-05-16

基金项目:福建省自然科学基金(2021J01602)

作者简介:周建河(1979—),男,高级工程师,主要从事工程检测房屋结构安全性鉴定等方面工作。E-mail:1437758556@qq.com

出一种可靠的适用于各类混凝土裂缝修补工程的质量检验方法。

基于智能骨料的应力波无损检测技术近年来在各大领域都有了成功的应用范例,具有灵敏度高、实时性强的优点^[1-2]。其中 Lamb 波是由 Lamb 于 1917 年提出的^[3]。Lamb 波混频可以通过不同频带的多段声波的叠加和在介质缺陷附近的波形路径不同导致的差异化对材料损伤及缺陷进行有效检测^[4-6]。同时 Lamb 波在混凝土结构内部传播范围广、能量衰退小、可以对结构疲劳损伤进行实时监测^[7-9]。Stawiarski 等提出了圆孔边缘裂纹的损伤识别方法,可以实现毫米级的裂纹损伤检测^[10-11]。吕姣姣结合 Lamb 波波动方程和弯曲波散射模型,实现了钢板裂纹损伤定位^[12]。

针对在混凝土裂缝中存在的识别问题,PZT(压电陶瓷)片可以同时进行信号发射与接收,并且具有迅速的响应速度以及良好的线性关系。本文将通过裂缝修补试验检验不同修补深度下接收信号变化情况,重点研究修补效果与信号能量的关系,通过小波包能量分析,以获得混凝土裂缝修补质量的检验指标,其结果将会对后续相关研究提供一种有效的无损检测方案。

1 裂缝修补深度识别方法

压电“智能骨料”应力波发射原理是当对激励端发射电信号,结构在该处将产生瞬态弹性波并向远端传播,由于结构内部缺陷的存在,信号传播路径与完好结构将会有一定差异,则在接收端将可以对差异信号进行分析从而检测结构损伤^[13-15]。该方法与其他检测方法的区别体现在需要外界的作用来进行应力波信号的发射,并且对微小到 0.001 mm 的裂缝该方法也能作出相应的反应,所以可以将其应用于识别裂缝修补深度变化的试验中。本次试验过程中将在混凝土试件的内部预埋封装 PZT 片,让其作为同时具有驱动和传感功能的“智能骨料”。试验中采用的智能骨料组成示意图如图 1 所示。

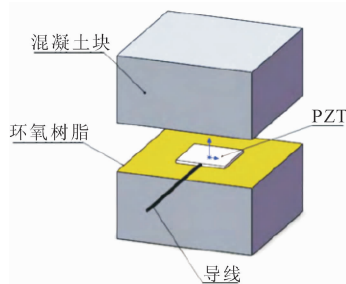


图 1 “智能骨料”组成示意图

2 仿真分析

2.1 分析流程

为了验证 Lamb 波检测对混凝土裂缝及不同修补深度问题是否具有一定的敏感性,在试验前首先通过 Abaqus 软件建立具有不同深度裂缝缺陷的混凝土梁,模拟 Lamb 波激励并对接收端信号进行分析。绘制混凝土梁和裂缝修补材料模型,其中材料单元采用弹性的本构关系,分别定义结构加固胶以及混凝土材料的物理参数,将两种材料进行装配并定义彼此间的约束,然后对分析类型和参数进行定义,再对结构施加荷载和约束并进行网格划分,最后对结果进行分析。

2.2 小波包能量分析

采用 db2 的小波作为小波函数,对有裂缝状态下和完好状态下接受端的信号进行能量分析,并使用 Matlab 编写小波包能量分析程序计算不同裂缝状态下的小波包能量值。

2.3 裂缝模拟

Lamb 波对混凝土裂缝修补后的质量检测研究中,对于裂缝的建模将是重中之重。在有限元软件中,仿真过程所采取的模拟裂缝的方法是在创建部件时拉伸删除后的线条,这可以对裂缝的深度进行有效的控制。

2.4 竖向裂缝修补质量的检测

通常竖向裂缝会蔓延到梁高的中部,深浅不一,有时可以达到 100 mm~200 mm,甚至可能贯穿整个梁的高度,对结构的安全性造成严重影响。

对深度为 130 mm 的竖向裂缝进行模拟分析,通过修补深度与反射波能量关系的变化来判断裂缝修补的质量。所建混凝土梁详细参数如表 1 所示,跨度为 6 m,截面尺寸为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,裂缝宽度为 1 mm。

表 1 混凝土梁的物理参数

材料名称	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比
混凝土	2400	31200	0.20
修补材料	2150	1000	0.38

使用 Abaqus 输出 Lamb 波传播不同时段位移值并绘制时域信号图,缺陷构件的接收端信号将可以看到始发波、散射波和缺陷回波,如图 2 所示。利用软件的后处理模块,截取缺陷回波信号后,将可以对比不同构件的缺陷回波峰值。图 2 所示为对缺陷

构件的修补深度由 10 mm 到 60 mm 再到 130 mm 的变化过程中的时域信号,对比可以看出,随着修补不断进行,散射波波包在不断减弱,当缺陷都修补完好

时散射波就会从图上消失,如图 2(d)中仅剩下始发波及缺陷回波。因此,时域信号的对比也可以作为修补质量的评判标准之一。

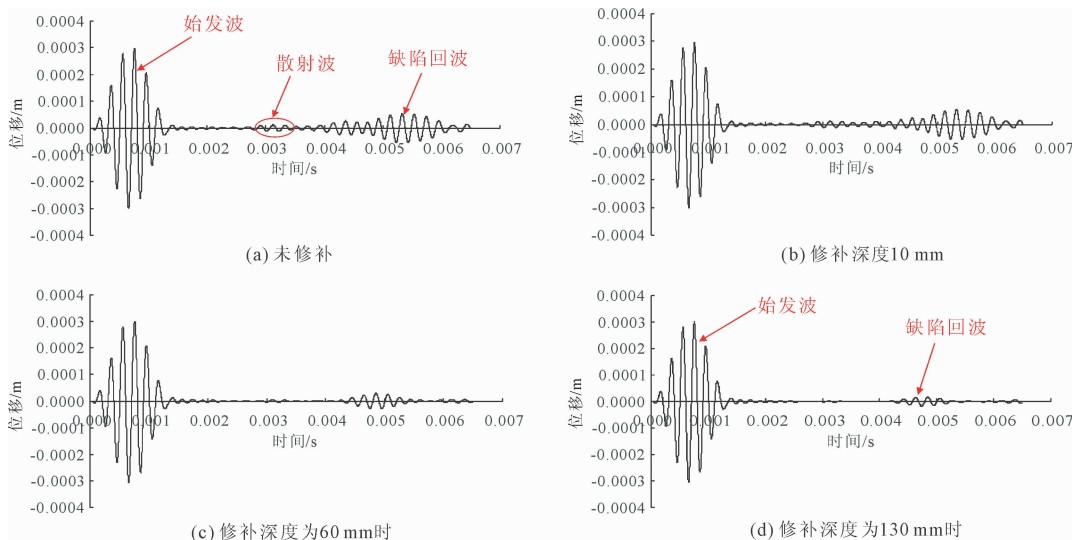


图 2 裂缝深度为 130 mm 时的时域信号图

如图 3 所示为深度为 150 mm 裂缝的回波峰值和峰值差百分比,峰值差百分比的计算式如下:

$$\eta = \frac{\beta - \beta'}{\beta} \times 100\% \quad (1)$$

式中: β 及 β' 分别为初始裂缝状态及修补后的回波峰值。

图 3(a) 与图 3(b) 分别为初始裂缝深度 150 mm 的构件在不同修补深度下的结构回波峰值对比。

度的不断增加,接收端所得到的回波峰值一开始会略有上升,之后大体呈现递减状态。由此可以看出,该趋势虽然可以在一定程度上反映结构修补过程,但仅仅依靠回波峰值的绝对值并不能判定结构修补是否符合质量要求。

2.5 单一高频正弦激励模式下混凝土梁中 Lamb 波的传播

Lamb 波在混凝土中传播时波长较小,激励频率较高,所以需要确定一个适当的模型尺寸以控制划分网格的数量与计算时间,因此试验中的模型将选用矩形截面梁,截面尺寸为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ($h/b = 2.0$),预设缝宽为 1 mm。

如图 4 所示,假定裂缝位置设置于构件的跨中,假定初始裂缝深度为 150 mm 的垂直裂缝,激励端与接收端压电陶瓷横跨均匀布置于裂缝两侧。将接收端与发射端的高度设置为平齐,且与裂缝的垂直距离设定为 70 mm。经过试算,将应力波发射端初始激励的频率设为 30 000 Hz,激励时间为 0.00015 s,加载方式为沿长边激励。图 5(a) 为裂缝未修补时的应力云图,通过图中的色谱可知,裂缝右侧区域的应力非常小。图 5(b) 为修补深度为 70 mm 时应力波传至裂缝右侧时的应力云图,从图中可知,以当 $t = 1.34 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时为例,即在同一时刻,右侧的应力在进行了裂缝修补后得到了一定的提升,该现象说明有应力波通过了已修补的区域从而使右侧应力提升。

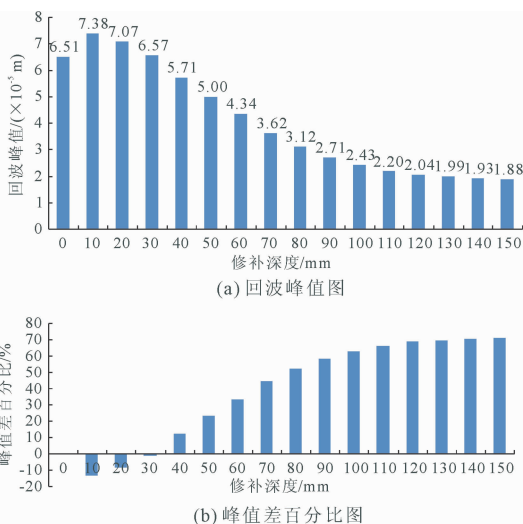


图 3 深度 150 mm 裂缝在不同修补工况下的回波峰值与峰值差百分比

从图 3 可知,从初始缺陷构件出发,随着修补深

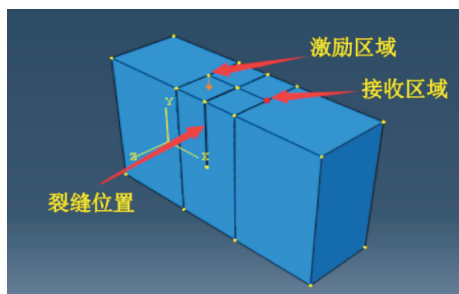
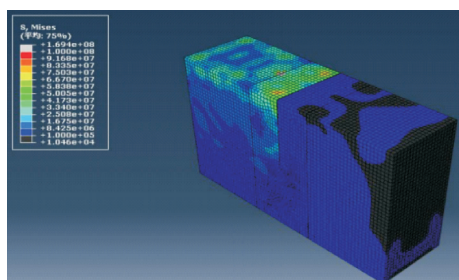
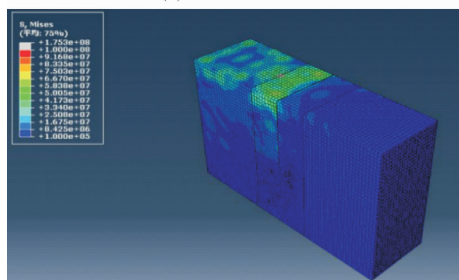


图 4 加载方式示意图



(a) 裂缝未修补时



(b) 修补深度 70 mm 时

图 5 $t = 1.34 \times 10^{-4}$ s 的应力云图

通过分析结果可知,单一高频正弦激励信号能量比较分散,并且在传播中的衰减也比较快。对比图 5(a)与图 5(b)裂缝未修补时与修补深度为 70 mm 时的应力云图可以看到,使用高频正弦信号在短距离检测时作为激励信号,修补前后依旧会有明显的应力变化。因此可以根据在裂缝修补经历的不同时段,建立接收区域的能量值与裂缝修补深度间的关系。

3 试验设计

试验基于 PZT 智能骨料,应用应力波的发射原理对比不同的混凝土裂缝修补深度对接收端应力波信号带来的不同影响。在本次试验中制作了三个竖向裂缝深度不同的混凝土试件,依次为 130 mm、150 mm 以及 170 mm。选取合适的单一高频正弦激励信号,记录不同工况下的应力波状况,研究信号变化与裂缝修补深度之间的关系。

3.1 PZT 片及 PZT 智能骨料制作

试验中采取 PZT-5 型的压电陶瓷片,采用厚度

方向的伸缩振动模式。这种模式下所发射的信号不仅强度高、类型单一,而且方便后续分析处理,最有利于识别混凝土裂缝修补深度。试验中采用的 PZT-5 型的压电陶瓷片“智能骨料”的相关物理参数如表 2 所示。

表 2 PZT-5 型压电陶瓷片的物理参数

尺寸 /mm	杨氏模量 /MPa	电容 C_0 /pF	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	介电损耗角正切 $\tan\delta/\%$
15 × 15 × 0.3	66700	4200	7500	0.4

试验以大理石块作为“智能骨料”的外包层。将导线分别焊接到所选取的 PZT 片的正负极上,放置于大理石块间,以环氧树脂材料为填充物,在自然环境下放置、风干。如图 6 所示为试验过程中所采用的“智能骨料”。



图 6 试验过程中采用的“智能骨料”

3.2 试验构件的制作

试验制作了三个截面尺寸为 150 mm × 300 mm 混凝土试件,长度为 500 mm,且混凝土强度等级均为 C30。为了考虑预设缺陷的影响,先分别在试件跨中设置了不同深度预埋钢板,钢板厚度为 1.7 mm,模拟的裂缝深度依次为 130 mm、150 mm 以及 170 mm。在混凝土强度稳定之后拔出之前预埋的光滑薄壁钢板,以此来模拟对应深度不同的竖向裂缝。制作好的压电“智能骨料”预埋在模具上的指定位置上,分别作为驱动器与传感器,对称布置于裂缝两侧且各相距裂缝 70 mm。

3.3 试验设备的选择

试验使用计算机进行激励信号的发射,通过 NI 公司的 USB-6366 模块进行数据采集,其中的 NI 信号读写技术能同时实现双向传输模拟等功能。试验使用 Labview 进行操作,并设置激励电压为 10 V,采样频率为 1 MHz,激励频率为 30 kHz,激励时间为 0.0001 s。

3.4 试验过程

试验采用的正弦激励信号频率为 30 000 Hz,电压幅值为 10 V,激励时间为 0.0001 s,表达式如下:

$$U(t) = 10\sin(2\pi ft) \quad (2)$$

为保证混凝土裂缝的注胶效果及检测结果的准确性,通过以下一系列步骤进行裂缝灌胶修补作业:

(1) 清理裂缝表面两侧 30 mm~40 mm 范围内的杂质,可以视情况打磨裂缝表面,以提升试用封口胶的粘结程度。并注意及时清理裂缝中的杂物。

(2) 灌缝作业时做好对深度的记录,确保裂缝的修补深度的精确度。

(3) 灌胶嘴与骑缝对齐并粘贴于指定位置,对准缝隙保证导流畅通,封闭灌胶嘴底盘四周,同时避免出胶口堵塞。

(4) 在标注的灌注深度基础上,沿裂缝表面涂抹封口胶,密封裂缝,并等待封口胶固化,在达到一定强度后才可进行后续操作。

(5) 根据灌注深度确定每次配制容量。将填充好的注胶器固定在注胶底座以进行自动压入式注胶。

(6) 观察注胶速度和注胶量,让胶液填充所需灌注的深度。填满后卸下注胶器并用灌胶嘴堵头堵上注胶口,用工业酒精清洗。

(7) 等待灌缝胶完全固化硬结后再进行后续工作。

试验采用封口胶的型号为 ZP-701,灌缝胶的型号为 ZP-700。在试验过程中把所制的混凝土试件倒立注胶是为了有效控制裂缝修补深度为 50 mm 以及 100 mm 这两种工况。

对于裂缝修补深度为 130 mm、150 mm 以及 170 mm 的裂缝无需进行倒立注胶,使用正向注胶的方式即可。需要注意在注胶过程中避免封口胶堵住注胶底座之外的区域,这种现象会导致无法顺利将裂缝里的空气排出,使得内部压强增大,进而导致向裂缝里填充胶液的进程变得困难。为解决这一问题,在涂抹封口胶前将注胶底座粘贴于试件另一面的裂缝顶部。

3.5 试验结果分析

试验结果分析以裂缝深度为 150 mm 的试件,即 2 号试件为例,经过 filter 函数滤波之后埋深为 50 mm 的“智能骨料”所接收到的信号为例,提取各个状态下的时域信号图,如图 7 所示。

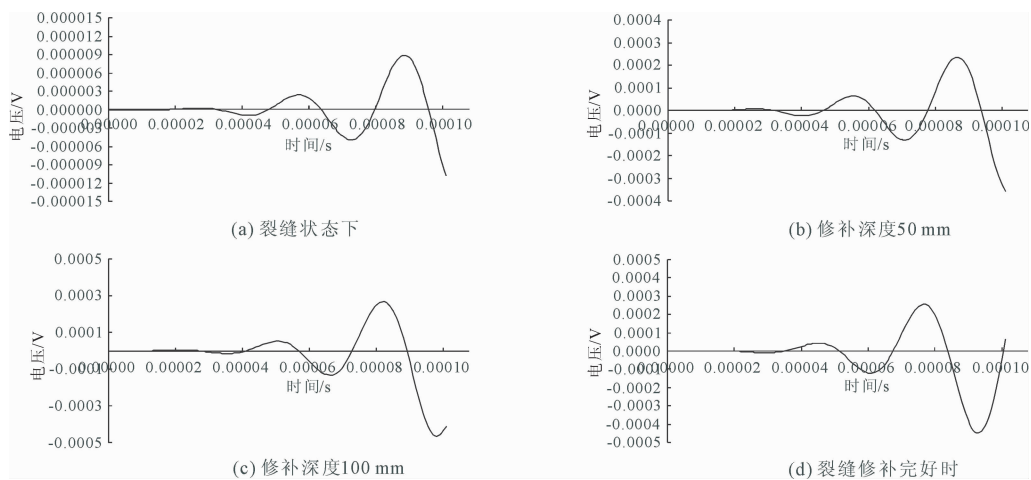


图 7 不同修补深度的时域信号图

图 7(a)~图 7(d) 时域信号的前一段,即时间相对小时呈一条水平直线,这是因为在 Lamb 波从激励区域到接收区域需要经过一定的距离、花费一定的时间,说明此时 Lamb 波还未传播到接收区域,在时域空间上没有发生位移,另外还可以发现,接收区域所接收的能量随着裂缝修补深度的增加而增加。同时在相同的发射信号条件下,接收端接收到的时域信号的变化在不同工况下的波形和幅值均有了很大变化。为了寻求可以量化的指标以对比不同裂缝修补深度带来的影响,下文将通过使用 Matlab 依次计算试件在不同修补深度工况时接收端信号的小波包能量值,结果如表 3 和表 4 所示。

通过表 3 可知,裂缝未修补时,50 mm 埋深的传感器接收到的能量值依次为 $0.0172 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.0136 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.0105 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$,当裂缝修补深度为 50 mm 时,接收到的能量依次放大了 659 倍、906 倍以及 1 113 倍,当裂缝修补深度为 100 mm 时,则依次放大了 1 304 倍、1 617 倍以及 2 119 倍,并且当三个试件处于同一种工况时,彼此所接收到的信号能量值相差不大。以上结果说明该“智能骨料”在混凝土裂缝修补质量检测问题上应用时具有高灵敏度的特点。

通过表 4 可知,裂缝未修补时,50 mm 埋深的传感器接收到的能量依次为 $4.4929 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、

$3.001 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以及 $2.6012 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$, 该种工况下传感器接收到的能量很小, 当裂缝修补深度为 100 mm 时, 能量值则达到了 $17.1250 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $12.2540 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以及 $14.5710 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$, 以上数据说明了当传感器埋深比裂缝修补深度深时并不会大的反应, 但会明显的体现在能量值上, 说明传感器可以获取浅层裂缝修补深度变化的信息。

表3 传感器埋深 50 mm 时的小波包能量值

工况	小波包能量值/($\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)		
	1#试件	2#试件	3#试件
裂缝未修补	0.0172	0.0136	0.0105
修补深度 50 mm	11.3360	10.5150	10.6390
修补深 100 mm	22.4370	21.9850	22.2510
裂缝完全修补好	23.7410	23.3360	23.0210

表4 传感器埋深 100 mm 时的小波包能量值

工况	小波包能量值/($\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)		
	1#试件	2#试件	3#试件
裂缝未修补	2.1568	0.9887	0.6579
修补深 50 mm	4.4929	3.0010	2.6012
修补深 100 mm	17.1250	12.2540	14.5710
裂缝完全修补好	29.4920	30.1020	30.538

对比表3和表4的数据可以验证, 本次试验的三个试件接收到的能量值都随着裂缝修补深度的增加而增加。以表4裂缝完全修补好时的数据为例, 三个试件所接收到的能量值依次为 $29.4920 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $30.1020 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以及 $30.5380 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$, 数值之间的差距不大, 这对提出一个完善的、统一的裂缝修补质量的评价指标是很有帮助的。综上所述说明该“智能骨料”在用于检测混凝土裂缝深度及识别修补后的修补质量是可行的。

4 结论

试验对裂缝深度为 130 mm、150 mm、170 mm 的试件进行研究, 结果表明, 基于 PZT-5 型的封装埋入式压电“智能骨料”在裂缝修补深度为 100 mm 时, 能量依次放大了 1 304 倍、1 617 倍以及 2 119 倍, 说明对能量的变化非常敏感。并且由于埋深不同, 其对裂缝修补深度的敏感程度也不同, 埋深 50 mm 时的接收区域具有更好的识别性, 传感器便可以很迅速的获取不同裂缝修补深度下损伤变化情况, 由此证明了压电“智能骨料”结合小波包分析理论在裂缝修补质量检测中的应用可行性。

参考文献:

- [1] 程建春, 田 静. 创新与和谐: 中国声学进展[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 吴惠敏. 结构混凝土现场检测新技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1998.
- [3] Lamb H. On waves in an elastic plate[J]. Proceeding of the Royal Society of London Series A, Containing Papers, 1917, 93(648): 114-128.
- [4] 刘素贞, 权 泽, 张 闯, 等. 疲劳裂纹的电磁超声混频非线性检测[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1694-1703.
- [5] 孙茂循, 项延训, 肖 颺, 等. 超声导波混频表征和定位早期局部损伤的研究进展[J]. 声学技术, 2022, 41(3): 313-322.
- [6] 银 信, 朱武军, 孙茂循, 等. 裂纹尖端塑性区非线性超声混频定位表征[J]. 声学学报, 2021, 46(3): 463-470.
- [7] Matsushita M, Mori N, Biwa S. Transmission of Lamb waves across a partially closed crack: Numerical analysis and experiment[J]. Ultrasonics, 2019, 92: 57-67.
- [8] Zhao G, Liu C, Jiang M, et al. Early fatigue crack damage identification by multi-classification support-vector machine based on lamb waves and temperature compensation[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(11): 9159-9172.
- [9] Zhao G, Liu C, Sun L, et al. Aluminum alloy fatigue crack damage prediction based on lamb wave-systematic resampling particle filter method[J]. Structural Durability & Health Monitoring, 2022, 16(1): 81-96.
- [10] Stawiarski A, Barski M, Pajak P. Fatigue crack detection and identification by the elastic wave propagation method[J]. Mechanical Systems Signal Processing, 2017, 89: 119-130.
- [11] Barski M, Stawiarski A. The crack detection and evaluation by elastic wave propagation in open hole structures for aerospace application[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 81: 141-156.
- [12] 吕姣姣. 基于 Lamb 波的地铁转向架构架裂纹损伤识别及定位技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [13] 纪洪广, 裴广文, 单晓云. 混凝土材料声发射技术研究综述[J]. 应用声学, 2002, 21(4): 1-5.
- [14] 耿荣生, 沈功田, 刘时凤. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23-28.
- [15] Kageyama K, Murayama H, Ohsawa I, et al. Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete structure by applying new fiber-optic sensors[J]. Smart Material Structures, 2005, 14(3): 52-59.