

基于压电陶瓷波动法的预制拼装结构 界面损伤识别研究

徐舟¹, 周旺¹, 刘扬^{1,2*}, 鲁乃唯¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要:针对因荷载及环境等多因素影响下预制拼装结构中拼缝界面出现脱黏、滑移、分离等问题,提出了一种基于压电陶瓷波动法的预制拼装结构界面损伤识别方法。该文设计并制作了一个预制拼装试件,将压电陶瓷通过水泥浆进行封装并预先埋置在试件内部作为驱动器与传感器,再利用千斤顶给试件施加剪切力模拟试件剪切破坏,运用压电陶瓷波动法的结构健康监测原理及均方根偏差 $RMSD$ (Root Mean Square Deviation) 公式,定义了预制拼装结构界面的损伤指标 DI (Damage Index),通过监测预埋在预制拼装试件中的智能骨料 SA (Smart Aggregate) 的频谱值变化规律,并对比预制拼装试件的健康状态工况、轻度损伤状态工况及重度损伤状态工况下的小波包能量值与损伤指数。试验结果表明:预制拼装结构界面损伤指数 DI 会因界面损伤程度增加而增大,且能有效地量化预制拼装结构的损伤程度。上述研究成果验证了压电陶瓷波动法在监测预制拼装结构界面损伤的可行性。

关键词: 压电陶瓷; 预制拼装结构; 界面损伤监测; 小波包分析; 波动法; 健康监测

1 前言

预制拼装结构以其标准化的建筑设计、高质量的建筑部件生产、快速的现场装配、易于拆卸和再利用,为建筑业的可持续发展带来了新希望。但预制拼装拼缝界面一般通过环氧树脂胶(拼缝胶)黏剂连接,在荷载和环境(风、温度、雨水、地震等)等多种因素作用下胶结界面容易发生剪切效应,容易产生界面的脱黏裂缝、滑移及分离等现象,以至于大幅削弱预制拼装结构的整体性和承载能力,严重威胁人们的生命财产安全。由于拼缝胶对混凝土的牵拉作用,容易导致拼缝处产生竖向劈裂裂缝,从而给界面损伤带来不确定性。因此,预制拼装结构界面损伤检测是一个非常复杂的问题。

现有结构健康监测的检测方法可分为两类:①破坏性检测技术;②非破坏性检测技术。破坏性检测技术通常指钻芯取样法和加载试验法,导致结构发生不可逆转的人为永久损伤。而非破坏性评价技术指超声波法、敲击法、红外热成像法、电磁脉冲法、激光剪切成

像法、冲击回波法、探地雷达法等^[1]。Li and Han 等提出了一种利用超声波检测钢管混凝土试件的钢筋与混凝土脱黏的方法,结果表明:测得的声学参数可以反映钢管与混凝土墙体的黏结状况^[2];Azenha 等利用红外热像技术,对混凝土立方体的内部和表面温度场进行了测量,以更好地了解水化过程中的温度变化^[3];FengMQ 等采用电磁脉冲法监测路基结构中的裂缝^[4];TangP and Huber D 等通过激光剪切成像法监测混凝土表面微小的不可见裂缝^[5];Chia-TsungHsieh, YichingLin 等探讨了采用冲击回波法(IE法)评价近表面贴装碳纤维增强聚合物(NSM CFRP)环氧-混凝土界面脱黏的可行性^[6];Buyukozturk 等提出了利用探地雷达技术检测 GFRP-混凝土柱的脱黏和混凝土裂缝的方法,该方法在识别 GFRP 混凝土界面缺陷和脱黏方面具有很大的潜力^[7];Kharkovsky 等开发了一种新颖的近场微波检测系统,以产生两个正交偏振图像,可以检测碳纤维增强复合材料结构中的脱黏和脱层^[8]。

压电传感器 PZT (Piezoelectric Ceramics Trans-

收稿日期:2021-01-08(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(编号:51908068)

作者简介:徐舟,男,硕士研究生。

* 通信作者:刘扬,男,博士,教授。E-mail:liuyangbridge@163.com

ducer, 锆钛酸铅) 补足了传统结构检测技术的一些缺点。压电材料具有形状多样、频响快、频带宽、精度高、制作方便、价格低廉、能够同时作为驱动器和传感器对结构进行损伤检测和状态监测等优点, 在结构健康监测和损伤检测领域有着广泛的应用^[9]。赵晓燕等采取在钢筋混凝土框剪模型表面粘贴 PZT 片的方法, 对试件的损伤进行了有效的监测^[10]; 蒋田勇等基于压电阻抗法对预应力波纹管的密实度性能进行了研究^[11]; 刘智等基于波动分析法对结构损伤识别特征参量进行了研究^[12]; 许斌等采用了基于压电陶瓷的新型智能骨料装置(SA)来监测钢管混凝土柱的损伤情况, 提出了基于小波包能量谱的损伤指标, 试验表明损伤指标对于试验模型的界面损伤区域能进行准确的识别^[13]; 杨映泉等采用压电陶瓷表面波来检测钢管混凝土试件的界面剥离情况^[14]。已证明, 压电陶瓷 PZT 检测方法是一种有效的手段。该文针对因荷载及环境等多因素影

响下的预制拼装结构中拼缝界面出现脱黏、滑移、分离等问题, 提出了一种基于压电陶瓷波动法的预制拼装结构界面损伤识别方法, 并进行相应的试验研究。

2 检测原理

2.1 基于波动法的压电智能监测方法

波动分析方法主要是将压电陶瓷驱动器以及传感器放在混凝土结构表面或者内部, 与混凝土结构共同组成压电智能结构。驱动器主要靠交流电信号激励, 基于逆压电效应下, 压电陶瓷将电信号转化为应力波在结构内部传播, 基于正压电效应下, 可实现向电信号的转变, 最后输出电信号。

该文将压电陶瓷传感器主动传感技术波动法应用于监测预制拼装结构接缝处脱黏损伤。监测原理如图 1 所示。

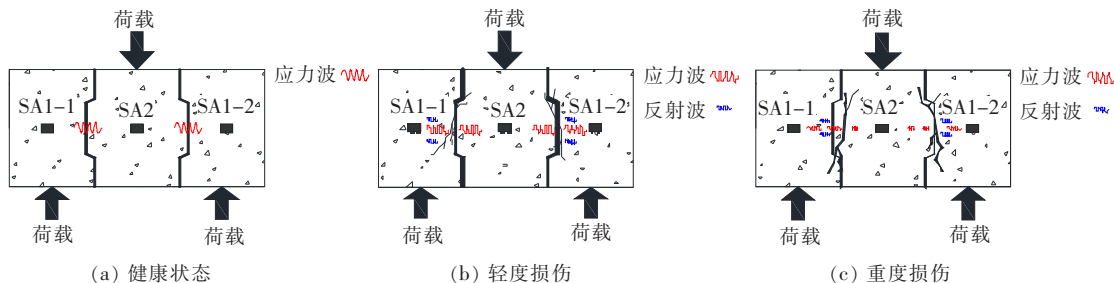


图 1 预制拼装结构脱黏损伤波动法原理

混凝土中嵌入智能骨料分别用作驱动器和传感器。驱动器产生应力波, 应力波从一个混凝土试件内部穿过界面接缝传播到另一个混凝土试件, 在混凝土中共嵌入 3 个智能骨料, 左右两个作为驱动器, 中间的智能骨料作为传感器。为了模拟预制拼装结构拼缝界面损伤状态, 对预制拼装结构进行了剪切试验。在初始条件下, 当没有损伤时, 来自传感器的接收信号视为基本信号, 代表样本的健康状态。随着剪切试验的进行, 当脱黏裂缝发生后, 产生反射波, 信号能量衰减。通过分析信号的时频域、小波包能量值和损伤指标可以识别界面损伤的严重程度。

2.2 小波包分析

小波包分析是已经被证明的一种有效的结构健康监测方法。不仅具有傅里叶和小波分析的优点, 还具有对低高频进行更精细的分解能力。因此, 该文利用小波包分析计算不同加载下接收能量的对应值, 其原理是将信号进行小波包分解重构, 提取小波包能量, 并基于下述公式所形成的损伤指数来识别结构界面损伤

程度。

$$DI_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2^N} (E_{k,i} - E_{1,i})^2}{\sum_{i=1}^{2^N} (E_{1,i})^2}} \quad (1)$$

式中: $E_{1,i}$ 为结构健康状态时信号能量; $E_{k,i}$ 为结构损坏状态(第 k 次加载阶段)的信号能量; DI_k 为第 k 次加载阶段结构损伤引起的传输能量损失, 如裂纹、脱黏和黏结滑移等; N 为小波分解级数。

在剪切试验前, 当不存在脱黏裂缝时, 结构处于健康状态, 损伤指数值为零。当损伤指数大于某个阈值时, 意味着在剪切试验中, 界面之间会发生脱黏裂缝。损伤指数值越大表示结构的裂缝扩展程度越高。

2.3 智能压电材料基本性能

压电陶瓷根据振动特性的不同可分为压缩型和剪切型, 压缩型原理如图 2 所示。由于压电材料质地较脆, 为保证其监测效果与监测寿命, 必须在运用过程中采取适当保护措施。将选好的压电陶瓷片封装在鼓形

水泥砂浆或者细石混凝土石块中,石块体积为 $8\sim 10\text{ cm}^3$,然后进行养护,养护完成即可置于结构中。在电线末端焊接了一个BNC(Bayonet Nut Connector)连接器,用于信号传递,具体如图3所示。砂浆和细石起到支撑和保护作用,且有能力承受一定程度的载荷,此外,也可以和混凝土结构有效融合,同真实骨料发挥的

作用一致。包裹在内部的压电陶瓷具备智能功能,所以一般将外层包裹的砂浆和细石的PZT材料称之为智能骨料SA(Smart Aggregate)。智能骨料作为一种低成本多功能的装置,可用于混凝土试件的综合监测,如混凝土裂缝监测、混凝土水化特性监测和钢管混凝土结构脱黏监测等。该文智能骨料相关参数见表1。

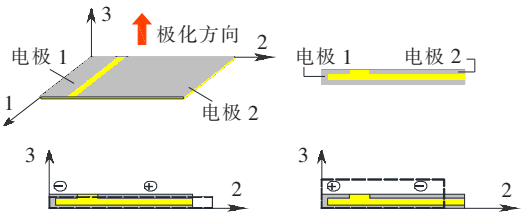
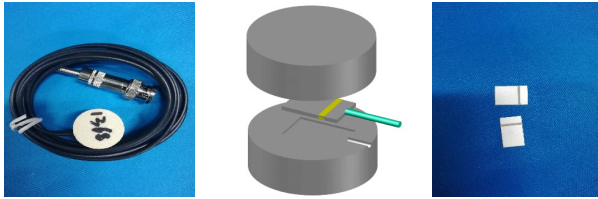


图2 PZT压缩型原理



(a) 智能骨料实物 (b) 智能骨料3D模型 (c) 压电陶瓷片

图3 智能骨料

表1 智能骨料参数

压电陶瓷片大小/ (mm×mm)	压电陶瓷片 厚度/mm	智能骨料 直径/mm	智能骨料 厚度/mm	弹性模量/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	压电应变常数 $d_{33}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$
15×15	0.3	25	20	46	7.45	670

3 波动法监测预制拼装结构界面损伤试验

3.1 试样制作

试件由3个单齿状混凝土组成,采用环氧树脂进行拼装,并将智能骨料预埋至混凝土板中,采用C55混凝土制备试验试件,混凝土板尺寸为 $600\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,如图4所示。图5为该板的尺寸情况。利用3块智能骨料组合成阵列来研究不同载荷情形下结构损伤情况,试验中采用钢丝来固定骨料。其中SA1和SA2两大骨料分别位于节段梁的中间。

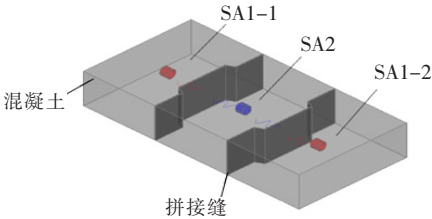


图4 试件3D模型

3.2 试验装置

试验所使用的装置主要包含有环氧树脂拼缝的混凝土试件、数据采集系统(NI—USB 6366)、带有支持软件的笔记本电脑以及液压式千斤顶加载装置,如图

6所示。NI—USB 6366集信号发生器和信号接收器于一体,可以向一个SA(驱动器)产生正弦波信号,而从另一个SA(传感器)采集响应信号。监测信号选取正弦扫描信号,其频率范围为 $100\sim 150\,000\text{ Hz}$,信号

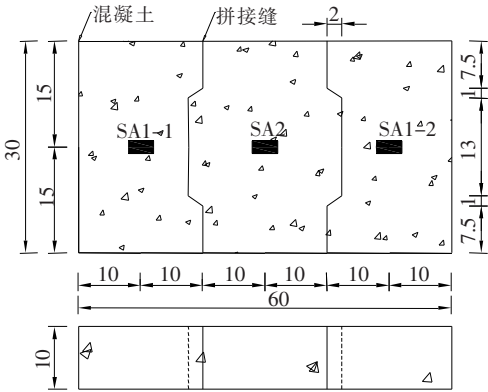


图5 试件平面图(单位:cm)

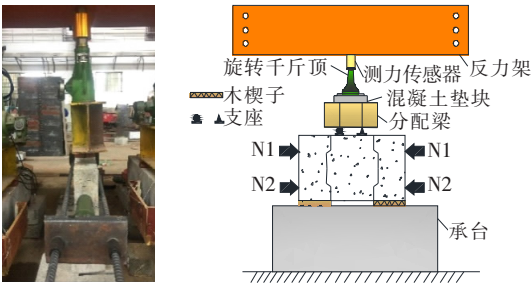


图6 试件加载系统

的幅值和周期分别为 10 V 和 1 s。这种采集方式最突出的优势在于能准确捕捉损伤情况,符合随机要求。用于收集 SA 信号的数据采集系统采样率为 2 MHz。

3.3 试验过程

试验过程中,首先将电脑与数据采集系统(NI-USB6366)相连,并且在试件左右两侧安装 SA1-1 和 SA1-2,这类骨料可被视为监测装置的传感器,用于接收信号;而安装在梁中间位置的 SA2 作为驱动器,用于发射信号,由此组成完整的压电陶瓷波动法的监测系统。图 6 为试件加载装置情况以及如何加载。具体试验时,采用液压式千斤顶对试件施加荷载,进而转化为剪切力,与此同时利用压力传感器控制荷载大小,不断增大荷载值,进而对混凝土板实施破坏试验。开展此次试验的目的是为研究当损伤程度加强时,监测信号损伤指数随着胶接缝处裂缝的发展而变化的具体趋势,最终达到量化损伤程度的效果。具体所选择的参数为:① 胶接缝采用环氧树脂胶;② 接缝为单齿模式;③ 胶接缝厚度为 2 mm;④ 横向压应力通过 N1、N2 调整;⑤ 试件为常规混凝土 C55。损伤监测系统由信号产生、信号采集和信号分析 3 部分组成,如图 7 所示。开展试验监测过程中,按照图 7 的数据监测系统,可以完成输出激励信号和输入采集信号等操作。压电陶瓷传感器激励信号本身的频率值偏高,连续采集数据量非常大,不便于数据处理,为了使试验效果更加明显,可参照压力传感器给出的荷载值实施间隔同步采集,即以 5 kN 为一个加载工况,每个工况激励一次驱动器,对监测区域展开扫描,由此可将加载过程分为 8 个工况 OC(Operating Condition),分别对应 0、20、25、30、35、40、45、50 kN 的加载力。自制 C55 混凝土养护 28 d 后达到其标准强度,开始加载试验。试验过程中,采用如图 6 所示的加载方法。通过压力传感器控制施加荷载,信号采集系统用于采集信号,最终收集信号输入到电脑终端。利用反馈的监测信号,进行

试验数据的处理。通过时频分析、小波包能量及损伤指数等多种分析方法分析其数据的变化规律,能对预制拼装结构的损伤情况做出有效判断。

4 试验结果

4.1 时频分析

仪器显示结果如图 8、9 所示。每张图反映了传感器从对应工况扫频正弦波信号中得到的信号响应。结果表明:当试样界面出现剪切微裂纹时,信号幅值明显减小;随着裂纹扩展程度的增加,信号幅值衰减速率更加明显。OC7 至 OC8 工况时,振幅变化不大,表明垂直劈裂裂缝达到环氧树脂厚度极限水平,结构裂缝超过 2 mm。由图 8、9 初步判断,OC4 为轻度损伤,OC7 为重度损伤。在试验监测阶段,将试件破坏过程中的 3 个工况点(OC1、4、7)作为试验数据的重要采集点,对应试验过程中如下状态:① 未加载时,试件处于完全健康状态;② 进行加载时,试件开始出现轻微损伤,裂纹明显;③ 加载试件直到裂纹发展成严重损伤。各阶段混凝土梁的损伤状态如图 10 所示。为进一步分析接收的信号频率,将信号采用傅里叶变换。图 11、12 为主要节点(OC1、4、7)对应时域的频域信号,与时域信号相比,幅度在频域内下降趋势更明显。

4.2 小波包能量分析与损伤指数

采用小波包能量分析方法对信号能量进行计算,以量化加载过程中监测到的信号能量。加载过程中 SA1-1 和 SA1-2 传感器的能量水平如图 13 所示。从总体上看:随着荷载不断增大,能量逐渐减小,尤其在 OC4,试件发生脱黏裂纹,小波包能量值急剧下降。说明小波包能量具有监测脱黏裂纹萌生的能力。脱黏裂纹发生后,能量递减值不断监测脱黏裂纹的发展。同样,为了分析预制拼装试件的界面损伤程度,计算了 SA1-1 和 SA1-2 的小波包损伤指数,如图 14 所示。根据损伤指数的定义,OC1 代表试件的健康状态。可以看出:SA1-1 和 SA1-2 的损伤指数值随着荷载的增大而增大。图 14 中在 OC4 时,荷载增至 30 kN 且试件界面开始出现微裂纹,可以发现每个 SA 的损伤指数都增大至 0.6~0.8,损伤程度存在显著增加,并且由图 13 可知:在对应的工况下,小波包能量减弱至 100~200 V²。经过损伤指数 DI 与小波包能量相互验证,初步分析认为,剪切试验的 30 kN 阶段(OC4)发生脱黏破坏,导致应力波在传播过程中能量急剧损失。因此,OC4 说明界面开始被破坏。当荷载不断增大,

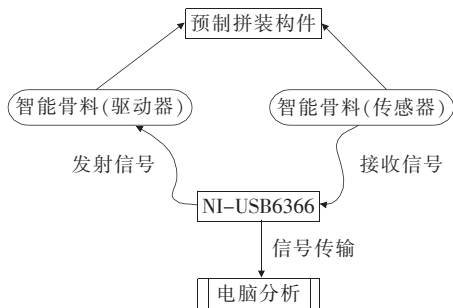


图 7 试验监测系统

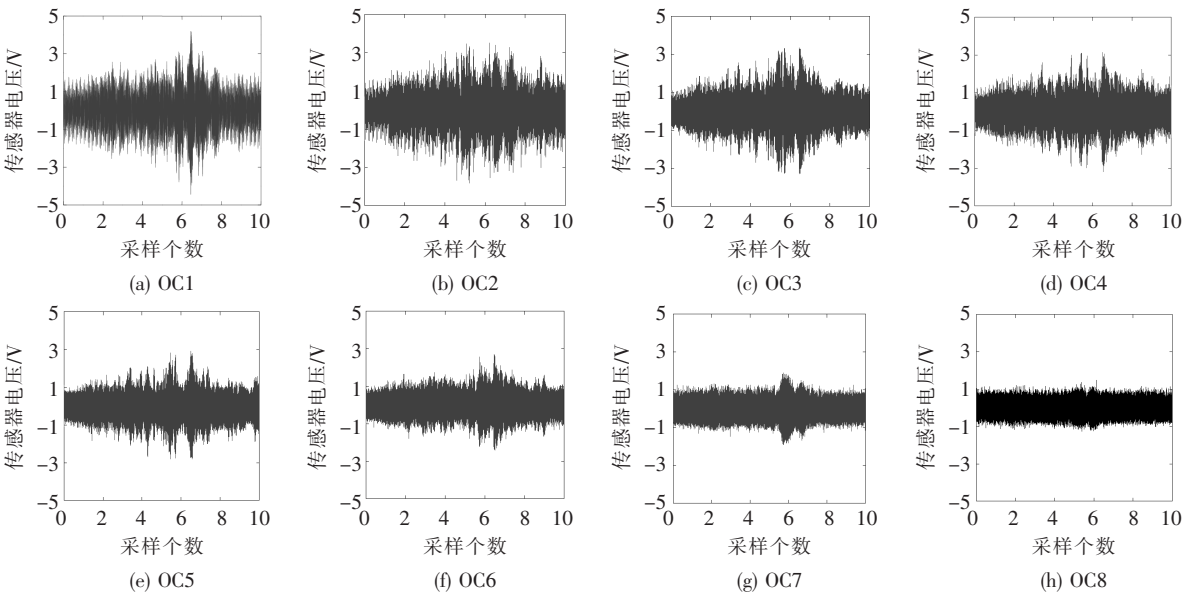


图 8 SA1-1 传感器在不同工况下的时域信号

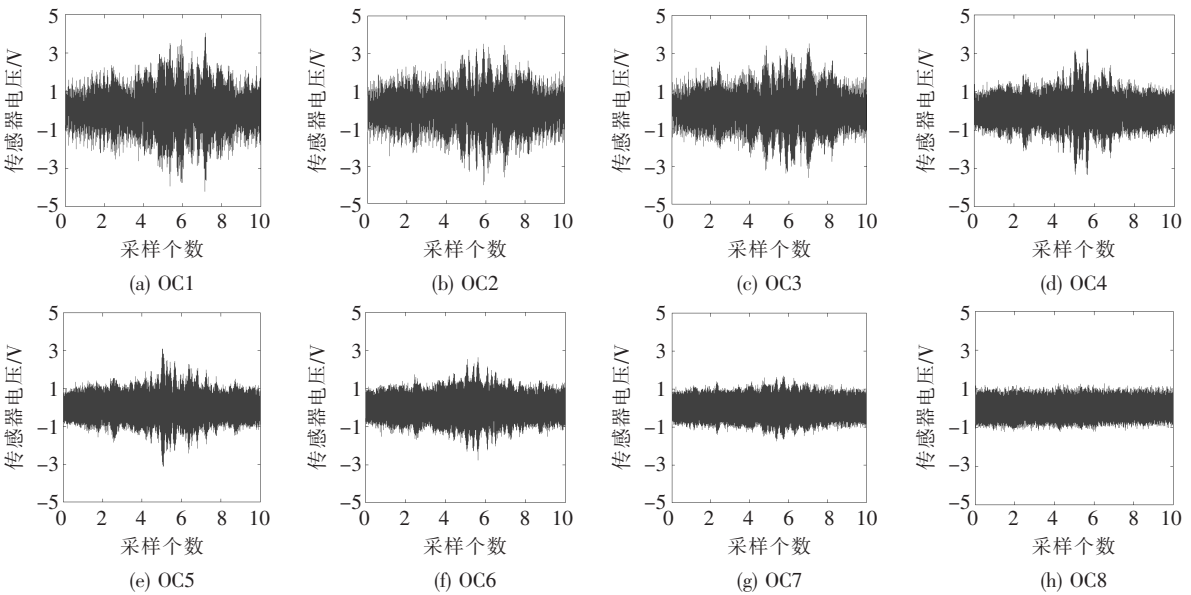


图 9 SA1-2 传感器在不同工况下的时域信号



图 10 混凝土板的各个阶段的状态

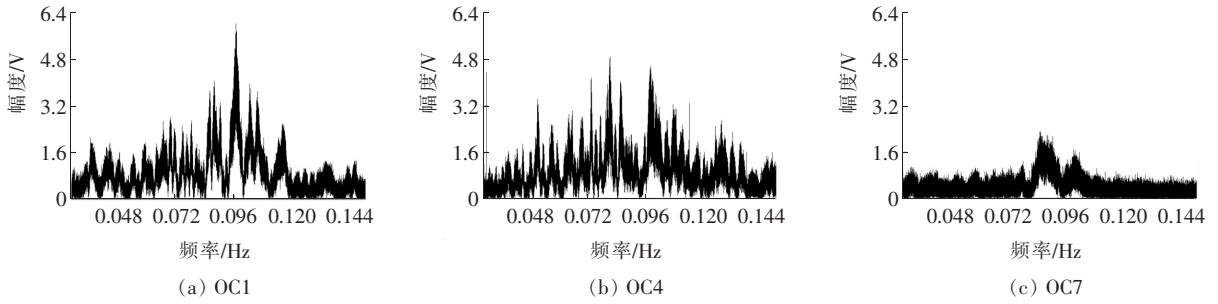


图 11 SA1-1 传感器在不同工况下的频域信号

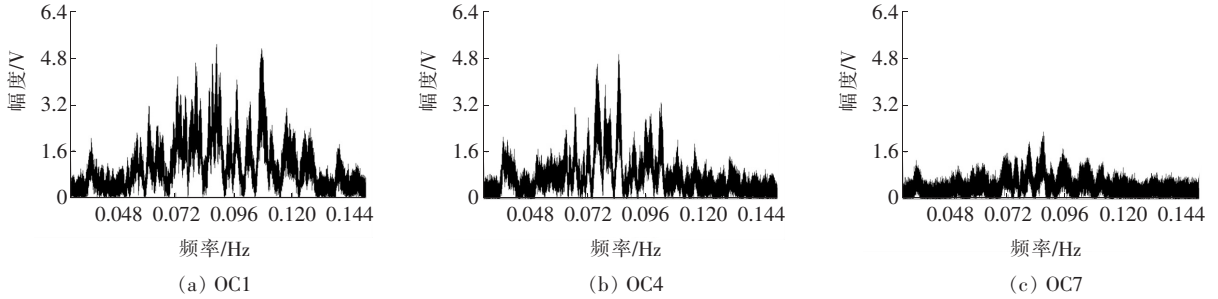


图 12 SA1-2 传感器在不同工况下的频域信号

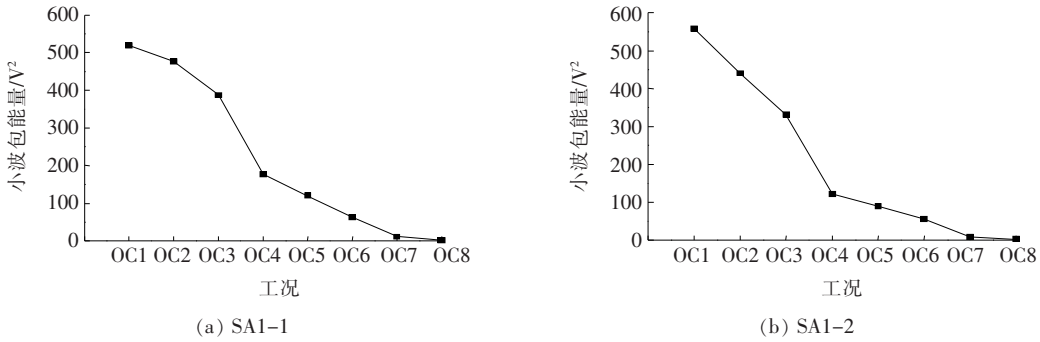


图 13 不同工况下 SA1-1 和 SA1-2 传感器的小波包能量

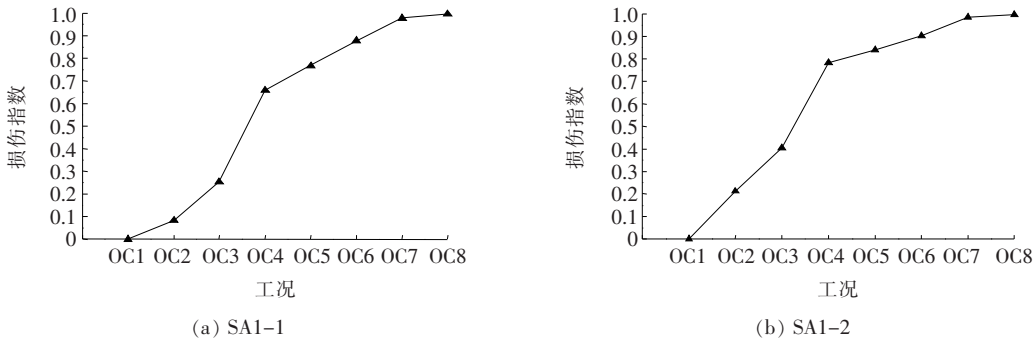


图 14 SA1-1 和 SA1-2 传感器在不同工况下的损伤指数

微裂纹逐渐延伸扩展直至发展为裂缝,最终裂缝宽度超过环氧树脂胶黏剂厚度(2 mm),称为严重损伤。这种现象发生在 OC7 中,且 OC7 的 DI 值接近 1,这意味着预制拼装试件的接口处于完全脱黏状态。OC7 之后的 DI 值保持在 1 附近,结构已经完全破坏。这

一分析结果与图 8~12 的结果一致,表明压电陶瓷波动法对预制拼装结构的损伤程度监测具有可行性。

4.3 小结

基于压电陶瓷监测原理,整理总结试验数据发现,在整个加载工况下的时域信号、频域信号、小波包能量

有相同的变化规律。在加载初期剪切微裂纹还未出现时,信号振幅、PSD能量、小波能量呈现较缓下降,当试件出现剪切微裂纹时,信号振幅、PSD能量、小波能量呈现明显减少。接口处于完全脱黏状态后再继续加载则信号基本无变化。

5 结论

提出了一种监测预制拼装结构界面脱黏的主动监测技术,通过采用智能骨料传感器,针对混凝土结构受到荷载作用而产生的裂缝损伤展开监测测试,利用数据采集仪采集不同工况下的压电传感器所接收到的应力波值,并进行小波包分析与时频分析,得出损伤指数 DI 与时频信号。通过分析、归纳总结不同工况下的时频信号与损伤指数 DI ,得到以下结论:

(1) 压电传感器的应力波时频信号的变化规律与预制拼装结构损伤程度存在着紧密联系。随着损伤程度的不断增加,时频曲线的峰值逐渐减小。

(2) 压电传感器的应力波频域信号的峰值变化比时域信号更大,即对于预制拼装结构的损伤监测,频域信号的变化更加明显。

(3) 随着损伤程度的不断增加,其损伤指数 DI 呈现增大趋势,当发生界面破坏时,对应的损伤指数突然增大,随后加载过程中试件胶结界面会出现肉眼可见的微小裂缝;当裂缝宽度发展超过 2 mm,该损伤指数接近于 1,可判定界面已完全处于脱黏状态;当荷载进一步增加,裂缝随之增大,结构完全破坏,此时损伤指数为 1。

(4) 将压电传感器的时频信号变化、小波包能量变化与损伤指数 DI 值的改变进行对比,可以很好地验证损伤指数 DI 对预制拼装结构的损伤程度所做出的量化分析的准确性。当结构的 DI 值为 0.6~0.8,表示结构出现轻度损伤,此时对应的应力波时域信号与频域信号出现明显减弱,小波包能量值迅速减小;当结构破坏时, DI 值为 1,此时应力波大幅减弱,能量值趋近于 0。通过信号变化与能量变化能有效验证 DI 值能量化预制拼装结构的损伤程度。

参考文献:

[1] Kok Zee Kwong, Yee Yan Lim, Willey Yun Hsien Liew.

Non-Destructive Concrete Strength Evaluation Using PZT Based Surface Wave Propagation Technique - A Comparative Study[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 47: 02014.

[2] 李利群,韩晓键.超声法检测钢管混凝土质量[J].南京建筑工程学院学报,2000(2):26-32.

[3] Miguel Azenha, Rui Faria, Helena Figueiras. Thermography as a Technique for Monitoring Early Age Temperatures of Hardening Concrete[J]. 2011, 25(11): 4 232 - 4 240.

[4] Feng MQ, Kim F and Flaviis YJ. Use of Microwaves for Damage Detection of Fiber Reinforced Polymer - Wrapped Concrete structures [J]. J Eng Mech ASCE, 2002, 128(2): 172-183.

[5] Tang P, Huber D and Akinci B. Characterization of Laser Scanners and Algorithms for Detecting Flatness Defects on Concrete Surfaces[J]. J Comput Civ Eng., 2011, 25(1): 31-42.

[6] Chia-Tsung Hsieh, Yiching Lin. Detecting Debonding Flaws at the Epoxy-Concrete Interfaces in Near-Surface Mounted CFRP Strengthening Beams Using Time-Reflectance Method [J]. NDT & E International, 2016, 83(1): 1-13.

[7] O. Buyukozturk and T. Y. Yu. Far-Field Radar NDT Technique for Detecting GFRP Debonding from Concrete [J]. Construction Building Mater, 2009, 23(4): 1 678-1 689.

[8] S. Kharkovsky, A. C. Ryley, V. Stephen, et al. Dual-Polarized Near-Field Microwave Reflectometer for Noninvasive Inspection of Carbon Fiber Reinforced Polymer - Strengthened Structures [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2008, 57(1): 168-175.

[9] 李宏男,李军,宋钢兵.采用压电智能材料的土木工程结构控制研究进展[J].建筑结构学报,2005,26(3):1-8.

[10] 赵晓燕.基于压电陶瓷的结构健康监测与损伤诊断[D].大连理工大学博士学位论文,2008.

[11] 蒋田勇.基于阻抗法的预应力波纹管密实性试验研究[J].实验力学,2017,32(4):495-505.

[12] 刘智,阎石,孙威.基于 PZT 传感器的混凝土裂缝损伤监测敏感因子的提取[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):15-18.

[13] 许斌,李冰,宋钢兵.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.

[14] 杨映泉,许斌.基于表明压电波动测量的钢管砼剥离检测试验[J].压电与声光,2018,40(3):437-441.