

# 冲击下钢筋混凝土桥墩损伤监测试验研究

李俊<sup>1</sup>,许斌<sup>2,3</sup>,樊伟<sup>1</sup>,刘斌<sup>1</sup>,王海东<sup>1</sup>,杨哲铭<sup>4</sup>

(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;4. 海南大学 土木建筑工程学院,海南 海口 570228)

**摘要:**钢筋混凝土桥墩受船舶等撞击后损伤状况的监测对其安全性评估具有重要意义。该文提出一种基于压电应力波传播的钢筋混凝土桥墩损伤状况监测方法,对表面布置有压电陶瓷传感器阵列的钢筋混凝土桥墩缩尺模型进行落锤冲击试验,对比冲击前后简谐激励下测量信号幅值和扫频激励下测量信号小波包能量值,实现试件裂缝损伤监测。监测结果与试件实际开裂情况吻合。结果表明,所提方法能有效地监测桥墩结构在冲击作用后的裂缝损伤状况。

**关键词:**钢筋混凝土桥墩;落锤;压电陶瓷传感器;波动法;裂缝损伤

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.029

## Experimental Study on Crack Monitoring of RC Bridge Piers Under Impact

LI Jun<sup>1</sup>, XU Bin<sup>2,3</sup>, FAN Wei<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, WANG Haidong<sup>1</sup>, YANG Zheming<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** The monitoring for cracks of reinforced concrete (RC) bridge piers after ship collision plays a key role on the condition and safety evaluation of bridges. In this study, a crack monitoring approach using the stress wave measurement by piezoelectric ceramic (PZT) patches for a RC pier specimen under the free-falling-weight impact was proposed. The impact test on a scale RC pier specimen with surface mounted PZT patches was carried out and the cracks of the specimen after impacts were detected using the variation of the amplitudes of the stress wave measurement under sinusoidal excitation and the wavelet packet energy of that under sweep signals excitations. The crack monitoring results agreed well with the test observation. The results showed that the proposed method could effectively monitor the crack damage of the pier structure after the impact.

**Key words:** reinforced concrete pier; falling-weight impact; PZT; wave method; crack damage

### 0 引言

大跨度桥梁等土木工程结构的损伤状况直接关系到人民生命财产的安全和国民经济的正常运行<sup>[1]</sup>。历史上发生过大量船舶撞击桥梁桥墩的事故,对桥梁结构造成损伤,严重情况下甚至引起桥梁破坏而导致人员伤亡和生命财产损失。如2007年九江大桥受到船舶撞击,造成9人死亡的严重事故<sup>[2]</sup>。对钢筋混凝土桥墩在受到冲击后可能产生的裂缝损伤进行有效监测尤为重要。

混凝土结构的抗冲击性能是目前的研究热点之

一。许斌等<sup>[3]</sup>、曾翔等<sup>[4]</sup>研究了钢筋混凝土梁在不同锤重、冲击速度和冲击能量下的抗冲击行为,并采用高速摄像机记录了冲击过程中试件裂缝的产生和发展过程,但缺乏对钢筋混凝土结构受冲击荷载作用后裂缝监测的研究。基于压电陶瓷(PZT)的缺陷检测和监测技术在土木工程结构中的应用得到发展<sup>[5]</sup>。Song等利用埋入混凝土内部的压电智能骨料,采用应力波测量法对混凝土结构内部的裂缝进行了监测<sup>[6]</sup>。Xu等首次提出基于嵌入式压电功能元测量信号的小波包能量和能量谱的钢管混凝土构

收稿日期:2017-04-11

基金项目:国际科技合作与交流专项基金资助项目(2014DFE70230);国家自然科学基金青年资助项目(51308202);湖南省科技计划重点基金资助项目(2014TT1006)

作者简介:李俊(1991-),男,湖南衡阳人,硕士生,主要从事结构损伤监测的研究。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、结构分析工作。E-mail:binxu@hqu.edu.cn。

件缺陷检测方法<sup>[7-9]</sup>。孙威等研究了混凝土的宏观及微观裂缝对应力波的影响<sup>[10]</sup>。赵晓燕等采用波传播法原理对混凝土裂缝进行监测<sup>[11]</sup>。蔡金标等基于压电阻抗技术,对混凝土构件的裂缝深度发展进行了定量分析<sup>[12]</sup>。Xu 等建立了多物理场有限元模型对应力波在钢管混凝土中的传播进行了模拟,分析了不同缺陷尺寸及传播距离对接收信号的影响<sup>[13-14]</sup>。栾乐乐等建立了钢管混凝土截面谱元法模型,分析了界面剥离对应力波传播特性的影响<sup>[15]</sup>。

本文对钢筋混凝土桥墩缩尺模型进行了落锤冲击试验,采用压电波动法,在冲击作用下可能产生裂缝损伤的区域预先布置压电陶瓷传感器阵列,对比冲击前后所接收正弦信号的幅值及扫频信号的小波包能量值,对冲击过程产生的裂缝损伤进行监测识别,取得了较好的效果。

### 1 基于压电波动法的钢筋混凝土桥墩裂缝监测原理

#### 1.1 裂缝对应力波传播的影响

相关研究表明,裂缝对应力波传播的影响主要是使其能量衰减。当桥墩结构受船舶撞击后,一般会出现宽度较大,肉眼可见的裂缝,此时,应力波传播路径发生改变,只能通过衍射的方式绕过裂缝传播。当构件处于健康状况时(见图 1(a)),应力波从驱动器沿直线传播到达传感器;而当构件存在裂缝时(见图 1(b)),从驱动器发出的应力波只能绕过裂缝传播,这导致传感器接收的信号能量衰减。

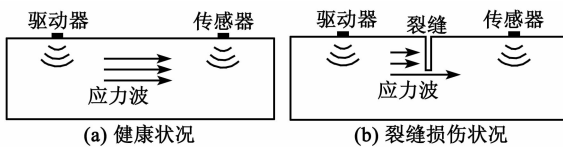


图 1 裂缝对应力波传播的影响机理

#### 1.2 时域信号的小波包分析理论

对采集到的原始信号  $S$  进行小波包分析,可在低频段、高频带进一步分解原始信号。小波包分析将其分解为多个等宽频带组分信号,如图 2 所示。

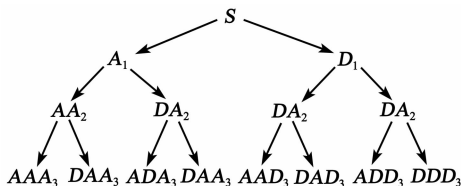


图 2 信号的小波包分解图示

信号  $S$  经过  $N$  层小波包分解重构后可得到  $2^N$  个子信号  $s_i$ ,即

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

信号  $S$  经小波包分解后,末层信号中各频带的子信号能量向量可表示为

$$E_I = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_{2^N}\} \quad (i = 1, 2^N) \quad (2)$$

式中  $e_i$  为经小波包分解后末层第  $i$  个子信号的能量,且

$$e_i = \sum_{j=1}^n |x_{i,j}|^2 \quad (3)$$

式中:  $n$  为原始信号  $S$  采样点数;  $x_{i,j}$  为信号分解重构后得到的末层各频带子信号的数据点。

原始信号  $S$  经小波包分解重构后的总能量,即 PZT 输出电压信号的整体小波包能量的定义为

$$E_S = e_1 + e_2 + \dots + e_i + \dots + e_{2^N} = \sum_{i=1}^{2^N} e_i \quad (4)$$

### 2 钢筋混凝土桥墩模型落锤冲击监测试验

#### 2.1 试验概况

本试验设计了一根圆形截面混凝土桥墩试件,混凝土试件直径  $\varnothing 200$  mm,跨度为 1 400 mm,混凝土强度为 37.8 N/mm,配筋率为 1.92%,箍筋间距 55 mm。在构件外部利用两根高强度钢筋对构件施加 200 kN 的预压力(轴压比为 14.3%)。利用高性能落锤试验机对构件施加冲击荷载,采用单次冲击破坏的方式,落锤质量为 658 kg,冲击高度设置为 2.4 m,冲击力峰值为 671 kN。试件及试验装置如图 3 所示。

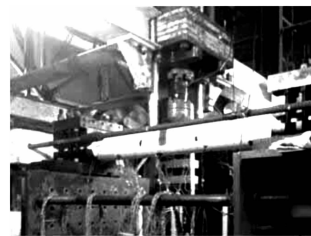


图 3 落锤冲击试验构件及装置图

#### 2.2 压电传感器布置及监测系统

考虑到冲击试验后可能出现裂缝损伤的区域,将压电传感器贴于试件的跨中下侧及支座附近外表面。传感器布置如图 4 所示。其中,  $A_1 \sim A_4$  位于柱跨中受冲击点附近,主要监测跨中裂缝情况;  $B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_4$  位于支座附近,监测支座裂缝情况。

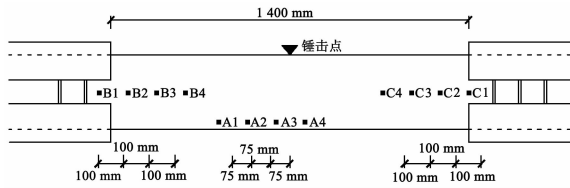


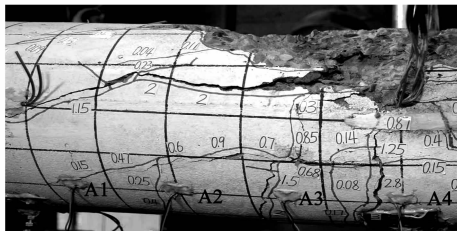
图4 压电传感器布置图

试验监测系统由信号发射源、接收设备和压电传感器构成。激励信号选取正弦简谐信号和正弦扫频信号两种。正弦简谐信号选取频率为 10 kHz,幅值为 8 V;正弦扫频信号选取频率范围为 1~20 kHz,幅值为 8 V,信号时长 5.12 s,扫频模式为线性扫频。信号接收设备由多功能数据采集设备及工作站构成。本文采用传感器 A1、B1 和 C1 作为驱动器发射信号,A2~A4、B2~B4、C2~C4 作为传感器采集信号。在落锤冲击前后分别采集 3 次数据,取 3 次测量结果的平均值进行分析,对比冲击前后不同位置压电传感器测量结果对裂缝进行监测。

### 3 试验现象与结果分析

#### 3.1 试验现象

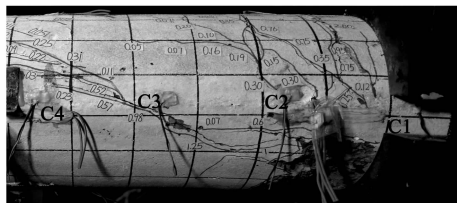
落锤冲击后,试件跨中及支座位置的损伤状况如图 5 所示。跨中位置上侧混凝土由于直接与落锤



(a) 跨中(传感器A1~A4)裂缝分布



(b) 支座(传感器B1~B4)裂缝分布



(c) 支座(传感器C1~C4)裂缝分布

图5 支座及跨中区域裂缝分布图

接触,出现了较大程度混凝土局部破坏。跨中下侧则主要以竖向裂缝为主,在 4 个压电陶瓷传感器 A1~A4 之间各出现一条竖向裂缝。支座位置下侧由于局部受压严重,混凝土出现较大程度的局部破坏。左、右支座处裂缝较对称,以一两条从跨中上侧发展至支座的斜裂缝为主。

#### 3.2 简谐激励下监测结果分析

跨中位置由 A1 发射,A2~A4 采集的简谐正弦信号经滤波处理后如图 6 所示。落锤冲击前后,各传感器接收信号幅值平均值结果如图 7 所示。由图 6、7 可看出,由于落锤冲击下混凝土裂缝的出现,各传感器接收信号幅值在冲击前、后均出现较明显的衰减。其中,各组的 4 号传感器由于距离驱动器较远,与驱动器之间存在多条裂缝损伤,其接收的信号幅值几乎衰减为 0。

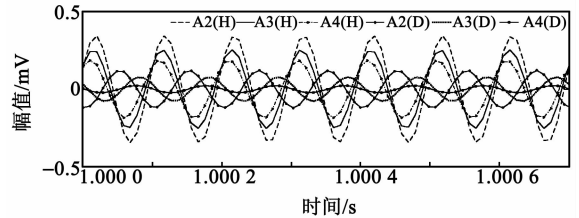
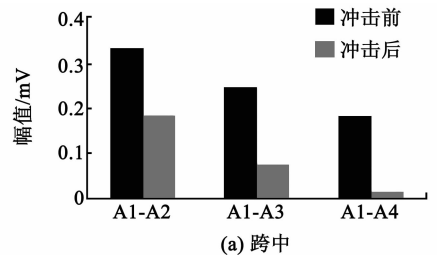
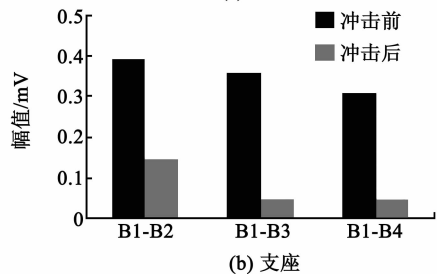


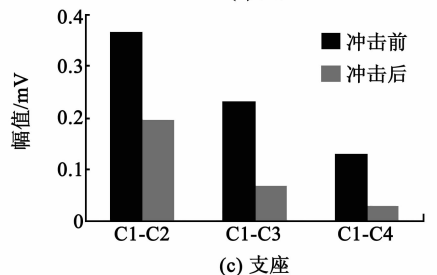
图6 简谐正弦激励下接收信号时域图



(a) 跨中



(b) 支座



(c) 支座

图7 简谐激励下各传感器接收信号幅值

### 3.3 扫频激励下监测结果分析

图 8 为 A2 及 B2 接收信号时域图。由图可看出,由于落锤冲击作用下混凝土出现的裂缝损伤,扫频激励下各传感器接收信号的幅值也发生了衰减。

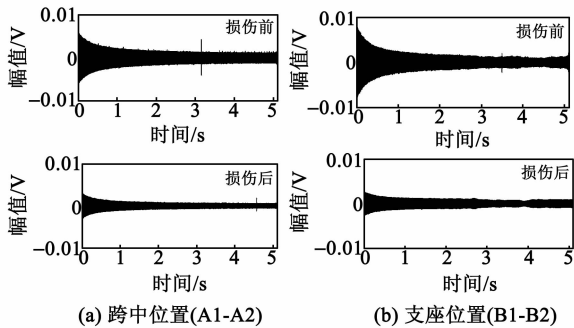


图 8 扫频激励下损伤前后接收信号对比

对各个传感器所接收的信号进行小波包分解并计算小波包能量值,各传感器小波包能量值计算结果如图 9 所示。由图可知,扫频激励下,各组传感器接收信号的小波包能量值在落锤冲击前后均有明显衰减。

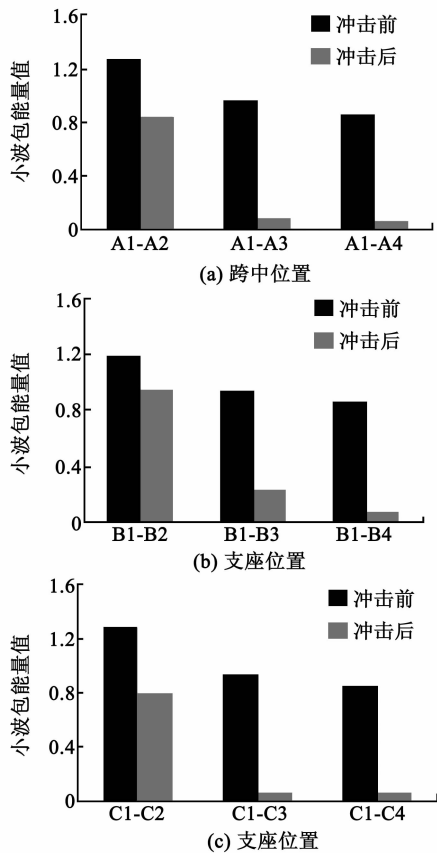


图 9 扫频激励下各传感器接收信号的小波包能量值

对比简谐正弦与扫频正弦激励下的信号衰减程度,发现扫频激励下传感器接收信号的小波包能量

值衰减更明显。试验结果表明,本文提出的监测方法可成功实现落锤冲击下混凝土的裂缝监测。

### 4 结束语

本文在介绍利用压电技术监测钢筋混凝土构件裂缝损伤的原理的基础上,提出了一种基于压电应力波传播的钢筋混凝土桥墩损伤状况监测方法。对表面布置有压电陶瓷片阵列的钢筋混凝土桥墩缩尺模型进行落锤冲击试验,对比冲击前后简谐激励下测量信号幅值和扫频激励下测量信号小波包能量值,实现试件裂缝损伤监测。

监测结果与试件实际开裂情况吻合。结果表明,基于表面粘贴压电陶瓷片分别作为激励器和传感器进行基于应力波主动测量与分析的方法,能有效实现钢筋混凝土桥墩模型在冲击荷载作用后,中间部位以及支座部位裂缝开展的监测。

### 参考文献:

[1] 朱宏平,余璟,张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 2-11.  
 ZHU Hongping, YU Jin, ZHANG Junbing. A summary review and advantages of vibration-based damage identification methods in structural health monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 2-11.

[2] 邵旭东,占雪芳,廖朝华,等. 从美国阳光大道桥被撞重建看现有桥梁防撞风险评估[J]. 公路, 2007(8): 33-37.  
 SHAO Xudong, ZHAN Xuefang, LIAO Chaohua, et al. Risk assessment for collision protection of existing bridge-view from collision and replacement of sunshine skyway bridge[J]. Highway, 2007(8): 33-37.

[3] 许斌,曾翔. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 41-47.  
 XU Bin, ZENG Xiang. Experimental study on the behaviors of reinforced concrete beams under impact loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 41-47.

[4] 曾翔,许斌. 无腹筋钢筋混凝土梁抗冲击行为试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 63-73.  
 ZENG Xiang, XU Bin. Experimental study on the impact-resistant behavior of RC beams without shear-resistant rebar [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 63-73.

[5] 许斌,陈梦琦,王海东,等. 基于压电阻抗的钢管砼柱横隔板剥离缺陷检测[J]. 压电与声光, 2015, 37(1): 172-175.  
 XU Bing, CHEN Mengqi, WANG Haidong, et al. Interface debonding detection of diaphragm for large-scale irregular CFST column based on electro mechanical impedance of PZT[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(1): 172-175.