

DOI: 10.11973/wsje201609008

基于压电阻抗测量的不规则钢骨混凝土柱 界面剥离缺陷检测

许 斌^{1,2}, 李 俊¹, 李彦贺³, 舒志方⁴

(1.湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2.工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 长沙 410082;
3.中建一局集团建设发展有限公司, 北京 100102; 4.长沙市规划设计院有限责任公司, 长沙 410007)

摘 要: 目前大型不规则多腔钢骨混凝土结构在超高层建筑上的应用日益广泛, 混凝土与钢骨壁间的界面结合状况影响二者的共同工作性能。针对不规则多腔钢骨混凝土柱构件, 模拟了混凝土与钢骨内壁之间的界面剥离缺陷, 在钢骨内壁表面粘贴压电陶瓷片, 采用阻抗仪测量了压电材料与结构构成的机电耦合系统的阻抗值。基于存在界面剥离及健康状态处的压电陶瓷片的阻抗测量结果, 将二者的方均根偏差(E_{RMSD})作为损伤指标。结果表明, 存在界面剥离以及健康状态处测量所得的压电阻抗曲线有明显变化, 基于压电阻抗测量的损伤指标可实现不规则多腔钢骨混凝土柱内部隐蔽的界面剥离缺陷的有效检测。

关键词: 健康监测; 钢骨混凝土柱; 压电阻抗; 剥离损伤; 方均根偏差

中图分类号: TN384; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)09-0029-04

Detection of Debonding Defect of Irregular SRC Column Interface Based on PZT Impedance Measurement

XU Bin^{1,2}, LI Jun¹, LI Yan-he³, SHU Zhi-fang⁴

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

2.Hunan Provincial Key Lab of Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, China;

3.China Construction First Group Construction & Development Co., Ltd., Beijing 100102, China;

4.Changsha Planning & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Large irregular multi-chambers steel reinforced concrete (SRC) structures have been widely employed in super high-rise buildings, and the bonding condition between concrete and steel plate is critical. In this paper, the interfacial debonding defect between concrete and steel plate in a complex multi-chamber SRC column is mimicked artificially. With PZT patches surface-bonded on steel plate, the impedance of electromechanical coupled system composed by piezoelectric material and structure is measured. The measurement results of PZT patches in both debonding areas and healthy areas of the interface are compared, and the root mean square deviation (E_{RMSD}) is defined as a damage index to describe the bonding condition of the interface. Results show the figures of PZT impedance in interface debonding areas are quite different from those in healthy areas and PZT impedance measurement based damage index can effectively detect the inaccessible interface debonding defects.

Key words: Health monitoring; SRC column; PZT impedance; Debonding defect; RMSD

收稿日期: 2016-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278185); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120161110023)

作者简介: 许 斌(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构工程和防灾减灾方面研究工作。

通信作者: 许 斌, E-mail: binxu@hnu.edu.cn.

钢骨混凝土结构已被广泛应用于超高层建筑结构中, 并作为重要的竖向受力构件, 这种结构形式可以更好地发挥钢骨与混凝土的组合性能。在大型的不规则多腔钢骨混凝土柱的施工过程中, 由于明显的水化热导致不均匀的温度场, 以及混凝土收缩徐

变的影响,可能出现钢骨壁与混凝土界面剥离缺陷^[1]。钢骨壁与混凝土界面的剥离缺陷对钢骨混凝土构件的力学性能带来负面影响,因此研究混凝土与钢骨壁之间的界面的质量检测技术具有重要意义。对于大型不规则多腔钢骨混凝土构件,传统的超声波法难以适用。而且,其界面结合处存在隐蔽性缺陷,用传统方法对其进行有效检测十分困难。

近年来,压电陶瓷在土木工程结构检测中得到较多应用。利用压电陶瓷对结构进行检测的方法主要有应力波法和压电阻抗法^[2-3]。对钢管混凝土柱的界面结合性能进行检测方面,许斌等首次提出基于压电陶瓷应力波测量小波包能量谱的识别方法,为实际工程提供了一种新思路^[4-5]。蔡萍等利用外贴于钢管外壁的压电陶瓷片作为传感器,通过对监测出的压电陶瓷在不同频段上的波动信号的频响函数进行分析,实现钢管混凝土构件界面剥离损伤监测^[6]。许斌等提出一种基于嵌入式压电功能元应力波测量与分析的新方法,有效地识别了钢管混凝土核心混凝土的损伤^[7]。许斌等针对钢管混凝土构件钢管壁界面以及横隔板界面剥离缺陷,首次将压电阻抗法应用于大型多腔不规则钢管混凝土柱的界面剥离检测中^[8-9]。目前,利用压电阻抗技术检测钢骨混凝土柱界面剥离损伤,特别是对于大型不规则多腔钢骨混凝土柱的研究尚未见报道。

笔者针对大型不规则多腔钢骨混凝土构件的钢骨壁与混凝土界面间结合状况的检测问题,提出了基于钢骨表面粘贴压电陶瓷片的阻抗测量的界面剥离缺陷检测方法,并通过比例模型试验验证了其有效性。该研究为我国目前大规模超高层建筑中大截面复杂钢骨混凝土柱的界面剥离缺陷的检测问题提供了新手段,具有重要的工程应用价值。

1 机电耦合测量阻抗的基本原理

压电材料具有正压电效应和逆压电效应,可以同时作为驱动器和传感器。机电耦合阻抗测量技术(EMI)利用压电材料和被监测对象之间的机电耦合特性,对被监测结构的损伤状况进行评估。这种方法一般被简称为“压电阻抗法”。通常采用锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷片进行阻抗测量。在EMI技术中,PZT压电陶瓷的电阻抗和被监测结构的机械阻抗相耦合。通过测量PZT压电陶瓷的电阻抗来反映结构中由于损伤导致的刚度或阻尼等结构特性的改变,进而识别损伤。通过一维理想机电耦合模型,可说明压电阻抗法进行损伤检测的物理机理^[10]。

2 不规则多腔钢骨混凝土柱比例模型试验

2.1 试验柱

试验对象为一个大型多腔不规则钢骨混凝土柱试件。钢骨混凝土柱的钢骨由多块钢板焊接成一个整体,并且在其中预定的位置设置了水平横隔板,通长设置了纵向加劲肋。混凝土被钢骨分为多个腔,试验柱构件截面尺寸如图1所示。

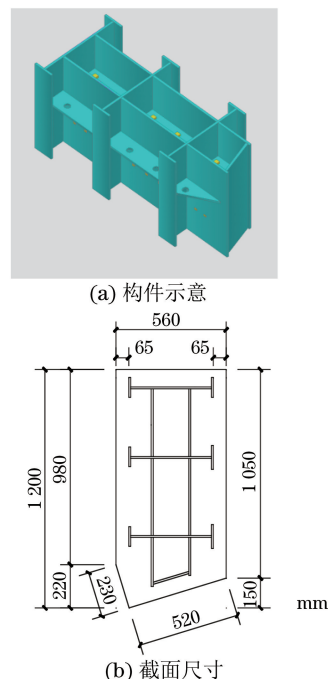


图1 试验柱构件及截面尺寸示意

2.2 钢骨壁人工模拟界面剥离缺陷的设置

为了模拟界面剥离缺陷,通过使用与试验柱同种混凝土预制带凹槽混凝土块。养护后,贴在试验柱钢骨的预定位置,用凹槽模拟剥离缺陷。钢骨混凝土试件设置两种缺陷,缺陷尺寸分别为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 和 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,模拟界面人工剥离缺陷布置如图2所示。

2.3 压电陶瓷传感器布置

将尺寸为 $15\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 的翻边极(正负极在同一面)压电陶瓷片粘贴在钢骨表面。采用两芯屏蔽线与压电陶瓷片的两极焊接。焊接后PZT片经过防水和绝缘处理后,利用AB胶直接粘贴在钢骨混凝土构件的钢骨壁上的指定位置。压电陶瓷片以及焊接后的压电陶瓷片传感器如图3所示。

采用压电陶瓷片进行识别,HP4192A精密阻抗分析仪进行阻抗测量,对比缺陷厚度对识别效果的影响以及传感器与缺陷距离对识别效果的影响。图2中 $A_1 \sim A_{12}$ 表示粘贴于钢骨表面的压电陶瓷片。

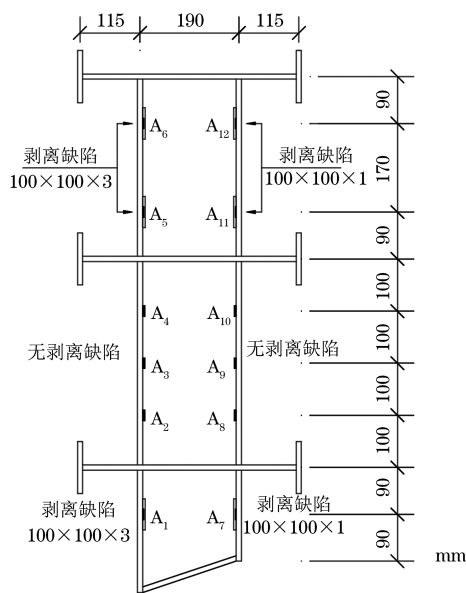


图2 模拟界面人工剥离缺陷以及PZT压电陶瓷片($A_1 \sim A_{12}$)布置示意

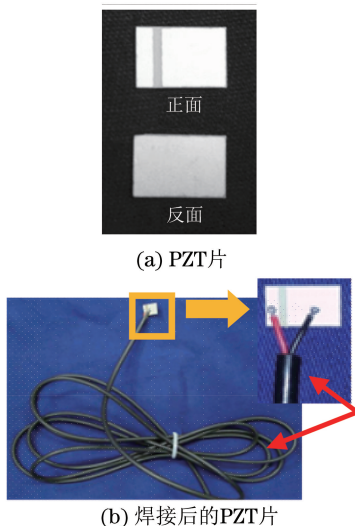


图3 焊接前后压电陶瓷片示意

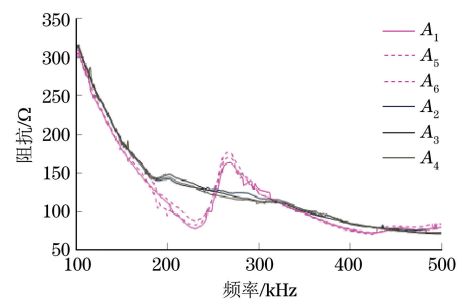
3 压电阻抗测试方案

RAJU等^[11]发现机电耦合阻抗法中采用不同频率的信号对损伤的识别效果有很大的区别。研究关注的界面剥离缺陷属于钢骨混凝土构件内部界面的缺陷,首先应该找出剥离损伤对于构件中压电陶瓷片的机电耦合阻抗值比较敏感的频率段。由于敏感频段目前无法通过计算得到,因此只能采用具有宽频段扫描能力的仪器对结构进行全频段测试。利用阻抗分析仪,对位于钢骨壁上的压电陶瓷片的机电耦合阻抗进行测量。通过比较多个测点阻抗曲线图,选取对结构缺陷敏感的频段。研究所选取的两个测试频率范围如下:低频段选为100 kHz~500 kHz,测量频率

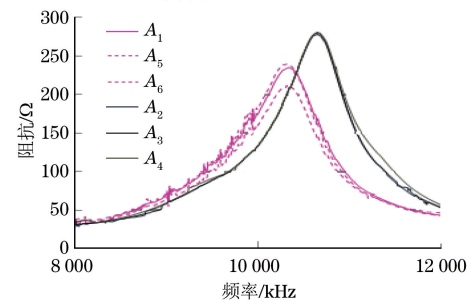
步长取1 kHz;高频段选为8 000 kHz~12 000 kHz,测量频率步长取10 kHz。

4 试验结果与分析

试验采用测得的阻抗模值进行比较分析。试验发现,测量结果具有相似性,故仅选取缺陷厚度为3 mm处对应的阻抗结果进行分析。测量得到的阻抗曲线如图4所示。从图4可以看出:位于无界面剥离缺陷位置的压电陶瓷片(A_2 、 A_3 、 A_4)测量得到的阻抗结构均相互吻合,阻抗曲线几乎完全重合;且健康位置处测点的阻抗曲线比较光滑。



(a) 100 kHz~500 kHz



(b) 8 000 kHz~12 000 kHz

图4 不同频率范围下PZT压电陶瓷片测试结果
(缺陷厚度3 mm)

在剥离缺陷区域测点的阻抗曲线与无剥离缺陷健康位置处测点的阻抗曲线相比,100 kHz~500 kHz频率范围内,曲线出现明显差异,缺陷位置测点的曲线呈现新的波峰波谷。可见剥离缺陷的出现会导致更多频率成分的出现。在8 000 kHz~12 000 kHz频段范围内,曲线出现波峰峰值下降和峰值对应频率偏移的现象。通过阻抗测量曲线图,可直接判断出现界面剥离缺陷的测点位置。由此可说明,通过压电阻抗测量识别复杂大型多腔钢骨混凝土柱钢骨壁界面剥离缺陷的可行性。

5 损伤指标

采用方均根偏差(E_{RMSD})反映结构有缺陷区域测点与无缺陷区域测点阻抗值的变化。 E_{RMSD} 可以

比较客观地反映每个测点测量得到的两种状态的阻抗曲线之间的差别,且 E_{RMSD} 能够很好地反映出该点在结构出现损伤后的损伤程度。

方均根偏差定义式如下:

$$E_{\text{RMSD}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i^1 - Z_i^0)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_i^0)^2}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N 为该测量段内所取的频率点的数目; i 为该频率段内的第 i 个频率点; Z_i^1 为第 i 个频率点的损伤状态阻抗值(阻抗模值); Z_i^0 为第 i 个频率点的健康状态阻抗值(阻抗模值)。

从式(1)可以看出,若损伤位置与健康位置的阻抗值差别越大,则损伤指标越大。当某测试点的 E_{RMSD} 结果小于 5% 时,根据数理统计中小概率事件原理,可以认为该测试点没有损伤。将相同边界条件的每一个测量截面中无损伤健康位置处 3 个测点结果的平均值作为该截面的最终健康状态的值。

不同频段钢骨内壁剥离缺陷 E_{RMSD} 值计算结果如图 5 所示。由图可知,缺陷区域位置处的测点低频段的 E_{RMSD} 值都在 10% 以上;无缺陷区域位置处测点的 E_{RMSD} 值均小于 5%,可以认为该测试点的位置没有发生损伤。

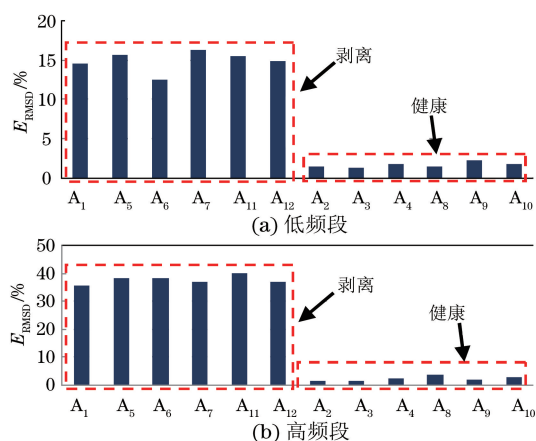


图 5 不同频段的钢骨内壁剥离缺陷 E_{RMSD} 计算值

高频段的 E_{RMSD} 值相对低频段要高很多,说明高频阻抗信号对缺陷更加敏感。无缺陷区域位置处测点的 E_{RMSD} 值均小于 5%。结果表明:厚度为 1 mm 的缺陷处和厚度为 3 mm 缺陷处对应传感器的 E_{RMSD} 值接近,说明基于阻抗测量的界面缺陷损伤识别方法对界面剥离缺陷敏感,一旦出现较小的界面剥离损伤,即能从阻抗测量结果中得到体现。

6 结论

(1) 界面剥离缺陷导致压电阻抗测量值的明显

变化,通过分析比较阻抗曲线图,可以识别测点位置是否有缺陷存在。

(2) E_{RMSD} 值作为损伤指标能够很好地反映出该点的缺陷情况。在试验研究中,有缺陷位置测点的 E_{RMSD} 值均在 10% 以上,无缺陷位置测点的 E_{RMSD} 值均在 5% 以下, E_{RMSD} 结果可以有效识别剥离损伤位置。

(3) 厚度为 1 mm 的缺陷处和厚度为 3 mm 的缺陷处对应传感器 E_{RMSD} 值接近,说明该方法对较小的界面剥离缺陷敏感。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙威.利用压电陶瓷的智能混凝土结构健康监测技术[D].大连:大连理工大学,2009.
- [3] 焦莉,李宏男.PZT 的 EMI 技术在土木工程健康监测中的研究进展[J].防灾减灾工程学报,2006,26(1):102-108.
- [4] XU B, LI B, SONG G. Active debonding detection for large rectangular CFSTs based on wavelet packet energy spectrum with piezoceramics [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2013, 139(9): 1435-1443.
- [5] XU B, ZHANG T, SONG G, et al. Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with PZT techniques using wavelet packet analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(1): 7-17.
- [6] 蔡萍,许斌,周宇.基于外贴压电材料的钢管混凝土界面缺陷检测[J].压电与声光,2015,37(2):337-341.
- [7] 许斌,蔡萍,周宇,等.基于嵌入压电技术的钢管核心混凝土缺陷检测[J].压电与声光,2015,37(3):489-496.
- [8] 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.
- [9] 许斌,陈梦琦,余地华,等.基于压电阻抗的钢管混凝土柱界面缺陷检测研究[J].施工技术,2015,44(11):117-121.
- [10] LIANG C, SUN F P, ROGERS C A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(1):12-20.
- [11] RAJU V. Implementing Impedance-Based Health Monitoring [D]. Blacksburg Virginia: Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University,1997.