

钢管混凝土柱断面界面剥离缺陷检测试验研究

邓海明¹, 李彦贺², 王鸿章², 许 斌^{1,3}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中建一局集团建设发展有限公司, 北京 100102;

3. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘 要:提出一种基于压电陶瓷激励与传感技术的钢管混凝土柱界面粘结缺陷检测方法。将嵌入式压电功能元和粘贴在钢管外壁的压电陶瓷片分别作为驱动器和传感器, 比较不同频率简谐信号下传感器测量幅值, 发现界面剥离区域传感器测量信号幅值明显小于无剥离区域传感器信号幅值, 探讨了不同激励频率下所定义的损伤指标的变化。

关键词:钢管混凝土; 界面剥离损伤; 压电陶瓷; 嵌入式压电功能元; 健康监测; 应力波传播; 损伤监测装

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Experimental Study on Interface Debonding Defect Detection for a CFST Specimen With PZT

DENG Haiming¹, LI Yanhe², WANG Hongzhang², XU Bin^{1,3}

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

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

3. Hunan Provincial Key Lab on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Changsha 410082, China)

Abstract: In this study, a PZT-based interface debonding defect detection approach for concrete-filled steel tubular (CFST) column section is proposed and validated experimentally. The embedded piezo-based functional elements (EPFEs) and piezoelectric ceramic (PZT) patches bonded on the outer surface of the steel tubular are used as the actuator and sensor respectively. Based on the amplitude of the measurement of the PZT patches under the sinusoidal excitations with different frequencies, the interface debonding defects are detected successfully by comparing the amplitude of the measurement. The defined damage index change with the different excitation frequencies is investigated.

Key words: concrete filled steel tube (CFST); interfacial debonding; piezoelectric ceramic (PZT); embedded piezo-based functional element (EPFE); structural health monitoring; stress wave propagation; damage detection

0 引言

钢管混凝土构件以其承载力高和抗震性能好等优良力学特性在我国超高层建筑和桥梁结构中得到广泛的应用^[1]。研究表明, 钢管内壁与核心混凝土的粘结界面的剥离缺陷会削弱钢管与核心混凝土两种材料的共同工作而影响钢管混凝土构件的力学性能^[2-4], 因此, 开发针对钢管混凝土构件的界面剥离缺陷检测方法具有重要工程应用价值。国内外检测钢管混凝土内部混凝土质量方法主要有超声波检测法、敲击法及钻芯取样法等。目前, 我国《超声法检

测混凝土缺陷技术规程》(CECS21:2000)提出的针对钢管混凝土构件内部核心混凝土质量的检测方法要求钢管混凝土构件的钢管壁与核心混凝土的界面粘结完好, 未提出针对界面粘结缺陷的检测。超声检测法检测结果离散性相对较大, 工作费时, 首波的判断需要检测人员具有较丰富的工程经验, 且测点位置会对检测结果有影响^[5-6]。敲击法主要根据经验判断是否出现损伤, 无客观的数据作为分析对象, 一般仅用作辅助检测手段。钻芯取样法难以适用于钢管混凝土内部检测。目前国内针对钢管混凝土界

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家科技合作与交流专项基金资助项目(2014DFE70230); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120161110023)

作者简介: 邓海明(1988-), 男, 湖南衡阳人, 硕士生, 主要从事结构健康监测的研究。E-mail: 752400540@qq.com。许斌(1972-), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 主要从事结构的损伤监测、结构分析工作。E-mail: binxu@hnu.edu.cn。

面粘结缺陷检测方面的研究报道^[7-8]较少。基于压电陶瓷的结构健康监测用日益广泛^[9-15],本文提出基于波动测量的钢管混凝土构件界面剥离缺陷检测方法,通过具有界面剥离缺陷钢管混凝土试验柱缩尺模型试验,验证该方法对钢管混凝土构件界面剥离缺陷检测效果。

1 钢管内壁剥离缺陷的检测基本原理

1.1 嵌入式压电功能元

压电陶瓷片用于混凝土的缺陷检测可采取表面粘贴式和内部嵌入式两种。由于压电陶瓷片材质较脆、易损坏,为保证其能在混凝土中正常工作,研制了一种基于压电陶瓷片的嵌入式功能元件,可埋置在混凝土内部发射或接收信号,即嵌入式压电功能元(EPFE)。

1.2 基于应力波测量的钢管砼界面缺陷检测方法

基于应力波传播测量的钢管混凝土构件钢管内壁粘结缺陷检测的基本方法是:利用预先嵌入混凝土内部的压电功能元和粘贴于钢管外表面的压电陶瓷片分别作为驱动器或传感器,用交流电信号激励驱动器,在钢管混凝土柱内部产生应力波,应力波穿过钢管内壁与核心混凝土的粘结界面。运用压电传感器的正压电效应测量传播而来的应力波并将其转换成电信号。应力波在传播过程中遇到钢管内壁与核心混凝土的界面粘结缺陷时,声阻抗将发生极大改变,在粘结缺陷处应力波将发生衍射、反射、绕射等现象,引起信号幅值的衰减及传播时间的延迟等。于是,通过分析钢管混凝土构件出现界面缺陷前后传感器接收信号的差异对界面剥离缺陷进行检测,其监测原理如图 1 所示。

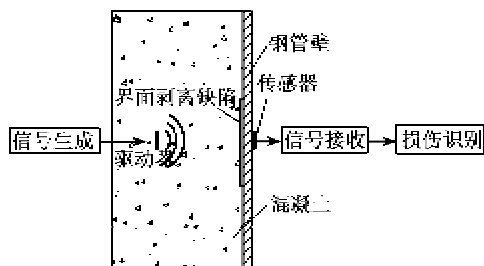


图 1 界面剥离缺陷监测原理

2 钢管混凝土柱模拟缺陷检测试验研究

2.1 试验设计

2.1.1 钢管混凝土试件设计

试验对象是一组设置有钢管内壁与核心混凝土界面粘结缺陷的缩尺钢管混凝土试验柱模型。试件

钢管如图 2 所示。试件钢管柱高 200 mm,长和宽均为 400 mm,壁厚 3 mm,材料为 Q235 钢。界面剥离缺陷有两种类型,其高度都与钢管等高。

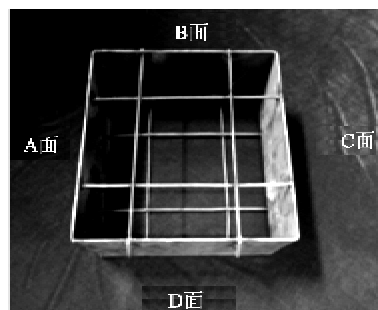


图 2 试件钢管实物图

1) 考虑界面剥离厚度一定,剥离大小对测量信号的影响。取界面剥离厚度为 3 mm,宽度分别为 50 mm、100 mm、150 mm,均布置在 3 个试件的 A 面的边部与 C 面的中间部位。

2) 考虑界面剥离大小一定,剥离厚度对测量信号的影响。取界面剥离宽度为 100 mm,厚度分别为 1 mm、3 mm、5 mm,布置在 B 面的中间部位。D 面为无界面剥离的健康状态。钢管内填充强度等级为 C60 的高强自密实混凝土。

2.1.2 模拟缺陷及激励器和传感器的布设与安装

在浇注混凝土前,在钢管内壁粘贴塑料薄膜包裹的可溶性水溶蜡,待到混凝土成型后再用稀草酸将其溶解,以此来模拟界面剥离缺陷。表 1 为模拟界面粘结缺陷的具体尺寸及所在位置。其中,类型 T 是界面缺陷的宽与高均为固定值,只有厚度是变量;类型 W 为界面缺陷的厚与高是固定值,只有宽度是变量。嵌入式压电功能元的编号以 S 开头作为传感器,粘贴于外表面的压电陶瓷片的编号以 P 开头作为激励器。图 3 为界面剥离缺陷平面布置图。图中, D₁、D₂ 与 D₃ 分别表示 3 个带界面剥离缺陷的试样。

表 1 模拟界面剥离缺陷

试件 编号	界面缺陷 编号	宽×厚×高/ mm ³	激励器和 传感器
D ₁	T ₁	100×1×200	P ₂₂ -S ₂₂
D ₂	T ₂ (W ₂)	100×3×200	P ₂₂ -S ₂₂
D ₃	T ₃	100×5×200	P ₂₂ -S ₂₂
D ₁	W ₁	50×3×200	P ₁₃ -S ₁₃ , P ₃₂ -S ₃₂
D ₂	W ₂ (T ₂)	100×3×200	P ₁₃ -S ₁₃ , P ₃₂ -S ₃₂
D ₃	W ₃	150×3×200	P ₁₃ -S ₁₃ , P ₃₂ -S ₃₂

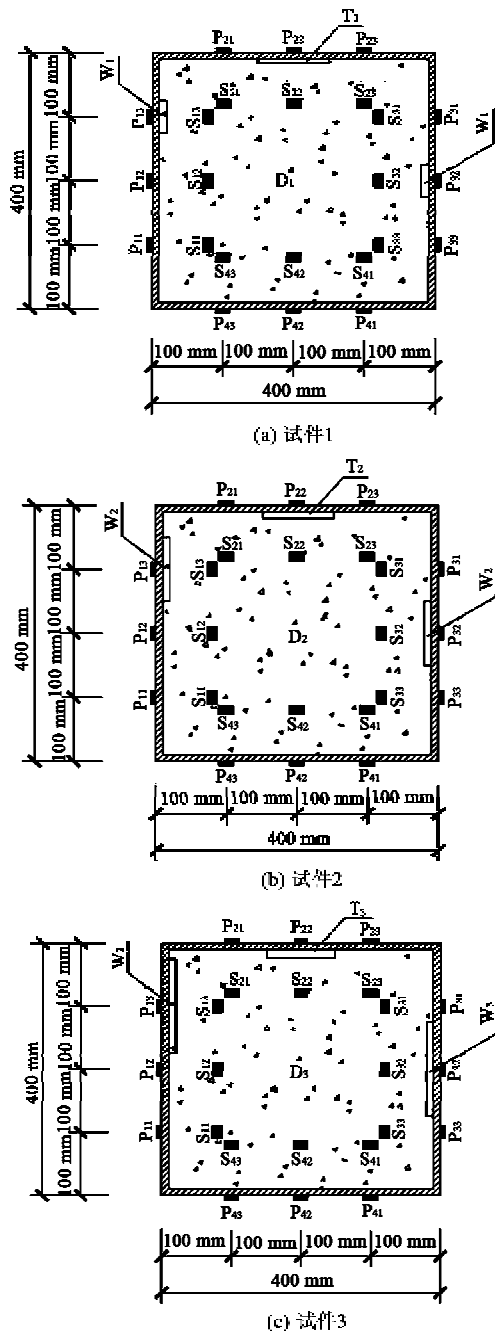


图3 模拟界面剥离缺陷布置平面图

为了实现钢管内壁与核心混凝土粘结界面缺陷检测,在钢管内靠近钢管内壁位置布置嵌入式压电功能元,而在其对应位置的钢管外壁布置外贴式压电陶瓷片。图4为内部压电功能元及缺陷布置、外部压电陶瓷粘贴实际情况。界面粘结状态的检测采用一发一收的形式,如表1所示,如果使用嵌入式压电功能元 P_{22} 发射信号,压电陶瓷片 S_{22} 接收信号,则表示为 P_{22} - S_{22} ,依此类推。

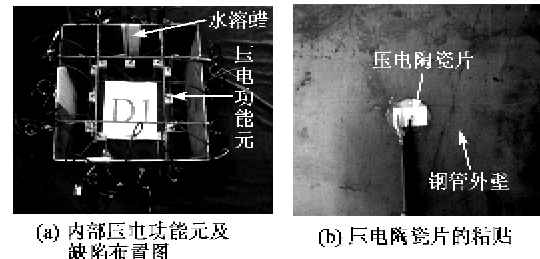


图4 传感器及模拟损伤的布置

2.1.3 试验监测系统

试验采用任意波形/函数发生器产生信号,应用动态数据采集系统采集信号。本研究中激励信号采用多个频率的简谐信号,信号频率取 $0.5 \sim 45$ kHz间的正弦信号,幅值为 6 V。比较收发距离相等的一组传感器接收信号的幅值来识别界面粘结状态。

3 试验结果分析

以激励频率为 10 kHz时的结果为例,各工况下测量信号的时域图如图5所示,其中H为健康状态。可见,由于钢管内壁粘结界面的存在,在存在内壁粘结缺陷的地方测量信号幅值均明显减小。

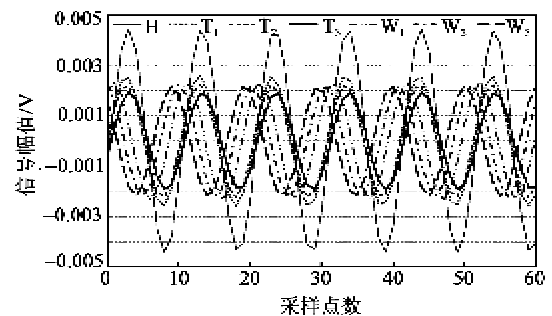


图5 10 kHz下各工况接收信号时域图

图6为不同激励频率下各检测部位压电传感器测量信号幅值的平均值。由图可知,出现界面粘结缺陷时传感器接收信号的幅值明显小于健康状态下的幅值。设置了模拟界面剥离缺陷区域的各传感器测量信号的幅值由于剥离缺陷的尺寸和厚度的不同而不同。剥离缺陷的尺寸与厚度越大,测量信号的幅值越小,信号衰减越明显。此外,随着激励频率的增加,信号幅值呈下降趋势;且在界面缺陷面积一定时,剥离厚度越大,信号衰减越大。在剥离厚度相同时,剥离缺陷面积越大,信号衰减越大。由图5可看出,界面粘结缺陷的厚度对信号的衰减影响比剥离面积显著。简谐信号幅值对界面粘结缺陷的厚度更敏感。

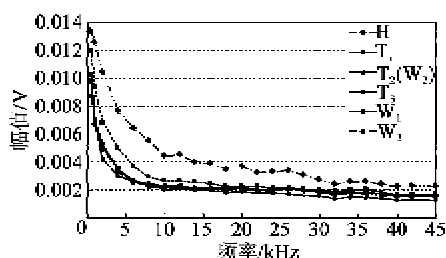


图 6 不同频率下各工况接收信号的主频幅值连线

为了定量说明界面剥离缺陷对信号频率的敏感性,定义基于信号幅值差值的损伤指标(AD)如下:

$$AD(n) = \left| \frac{(\bar{H}_n - \bar{D}_n)}{\bar{H}_n} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\bar{H}_n$ 是激励频率为 n 时健康状态下传感器接收信号幅值平均值; $\bar{D}_n$ 是频率为 n 时各损伤状态下传感器接收信号幅值平均值,并将厚度一致情况下信号幅值取平均值。AD 为界面剥离缺陷下信号幅值相对于健康状态下信号幅值的衰减程度,其取值在 0~1 之间,该值越大表明该激励频率下信号幅值对损伤识别程度越大。

图 7 是界面剥离缺陷为 T 类型时信号基于主频幅值的绝对差值的损伤指标 AD 随激励频率的变化情况。由图可知,在所选用频率范围的激励信号作用下,AD 基本都在 20% 以上,表现出较好的界面剥离缺陷识别能力。在同一激励频率下,界面剥离缺陷厚度越大,其 AD 值也越大。但损伤指标与激励频率不是单调关系,在频率低于 10 kHz 范围内,随着信号激励频率的增大,AD 值先增大后减小。频率超过 10 kHz 后,AD 逐步减小。试验中所得损伤指标随激励频率的变化情况可为实际工程中界面缺陷检测时信号频率的选择提供参考。

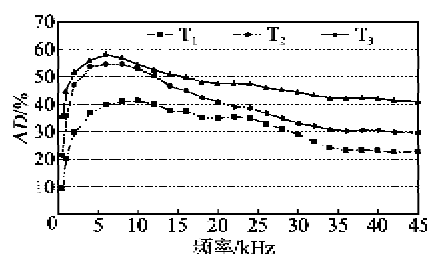


图 7 T 型界面粘结缺陷下损伤指标随频率的变化关系

4 结论

本文提出一种基于压电陶瓷激励与传感技术的钢管混凝土柱的钢管内壁界面粘结缺陷的检测方法。通过采用粘贴在钢管外壁的压电陶瓷片和嵌入核心混凝土中的嵌入式压电功能元作为激励器和传感器,对比健康状态和缺陷状态下测量信号幅值,实

现界面剥离缺陷检测,并得到了测量信号幅值衰减与界面剥离缺陷程度的变化规律,定义损伤指标并考察了不同激励信号频率下该指标对界面粘结缺陷的灵敏性。试验研究得出以下结论:

1) 基于不同激励频率下压电传感器正弦测量信号幅值,可实现钢管混凝土构件的界面粘结缺陷的检测。随着信号激励频率的增加,正弦测量信号的幅值呈下降趋势。

2) 测量信号幅值对界面粘结缺陷敏感,且在同一频率下影响信号幅值衰减程度的主要因素是界面粘结缺陷的厚度,界面剥离面积的影响次之。

3) 对基于正弦信号幅值的损伤指标的分析发现,在所采用的频率范围内测量信号对钢管壁的界面剥离缺陷的识别能力较强。损伤指标在所采用的频率范围内不是单调变化。本试验中所采用的激励信号频率范围及所得损伤指标的范围可供工程实际应用参考。

参考文献:

- [1] 查晓雄. 空心 and 实心钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] TU G Y, YAN D H, SHAO X D, et al. Debonding effects on internal force and stiffness of single tube concrete-filled steel tubular arch rib[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168/170: 1364-1371.
- [3] 黄永辉. 钢管混凝土拱桥拱肋病害机理与影响分析及吊杆更换技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [4] 孙庆新, 杨冬波. 基于 ANSYS 的脱空钢管混凝土拱桥极限承载力分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(2): 47-51.
SUN Qingxin, YANG Dongbo. Ultimate strength analysis of void CFST arch based on ANSYS[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2009, 26(2): 47-51.
- [5] 童寿兴. 钢管混凝土脱粘的超声波检测与验证[J]. 无损检测, 2007, 29(12): 731-732.
TONG Shouxing. Detecting and verifying the quality of concrete-steel pipe by ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(12): 731-732.
- [6] 刘清元, 谈桥. 钢管混凝土内部缺陷的检测[J]. 山西建筑, 2004, 30(3): 63-651.
LIU Qingyuan, TAN Qiao. The defect detection within concrete-filled steel tubular[J]. Shanxi Architecture, 2004, 30(3): 63-651.

(下转第 173 页)