

组合结构空洞缺陷检测压电阻抗数值模拟研究

温家宇¹,许斌^{2,3},王海东¹

(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. 福建省结构工程与防灾重点实验室(华侨大学), 福建 厦门 361021)

摘要:钢管混凝土等组合结构在超高层建筑中的应用日益广泛,其核心混凝土的空洞缺陷会严重影响构件的力学性能。该文利用数值模拟法对基于压电阻抗的核心混凝土空洞缺陷检测技术的作用机理进行了深入研究。通过对比有、无缺陷区域的阻抗计算结果,分析判定缺陷位置,并定义偏差均方根损伤指标来评估测点位置的损伤程度。结果表明,核心混凝土空洞缺陷的存在会导致相应位置的嵌入式压电传感器阻抗频率曲线产生显著变化,所定义的损伤指标可有效识别核心混凝土的空洞缺陷,数值模拟法成功验证了基于压电阻抗法的核心混凝土空洞缺陷检测技术的有效性。

关键词:压电陶瓷;压电阻抗法;钢管混凝土结构;空洞缺陷检测;数值模拟;缺陷评价指标

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.030

Study on Numerical Simulation of Piezoelectric Impedance Detection of Composite Concrete Structure Defects

WEN Jiayu¹, XU Bin^{2,3}, WANG Haidong¹

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

Abstract: The concrete-filled steel tubular structures have been widely employed in the super high-rise buildings, while the cavity defect in the core will seriously affect the mechanical behavior of the components. In this study, the action mechanism of the core concrete cavity defect detection technology based on the piezoelectric impedance is intensively investigated by using the numerical simulation method. By comparing the calculation results of impedance with and without defect region, the position of defect is analyzed and determined, and the root-mean-square of deviation damage index is defined to evaluate the damage degree at the detecting point. The results show that the existence of core concrete cavity defects will lead to a significant change in the impedance frequency curve of the embedded piezoelectric sensor in the corresponding position, and the defined damage index can effectively identify the cavity defects of the core concrete. The effectiveness of the core concrete cavity defect detection technology based on the piezoelectric impedance method is successfully verified by the numerical simulation method.

Key words: PZT; piezoelectric impedance method; concrete-filled steel tubular structure; cavity defect detection; numerical simulation; defect evaluation index

0 引言

随着我国经济发展,钢与混凝土组合结构在建筑工程领域得到卓有成效的应用,特别是钢管混凝土柱在结构承重方面更能发挥钢和混凝土组合作用的优异性能。目前,基于压电陶瓷对钢管混凝土柱的缺陷检测研究主要有基于压电应力波的信号分析方法^[1-2]及基于压电阻抗测量的缺陷检测技术^[3]。许斌等^[4]利用压电阻抗法成功检测到钢管混凝土柱

的界面剥离缺陷。现有研究的压电阻抗法主要以试验为主,基于数值模拟的机理研究较少。

本文针对钢管混凝土构件中的核心混凝土空洞缺陷检测问题,利用数值模拟法研究基于压电阻抗测量的缺陷检测技术的机理。利用 ANSYS 有限元分析软件建立嵌入式压电陶瓷传感器的钢管混凝土构件数值模型,考虑压电材料的压电效应及压电材料与混凝土间的机电耦合效应,对构件数值模型进

收稿日期:2017-07-15

基金项目:国际科技合作与交流专项基金资助项目(2014DFE70230);湖南省科技计划重点基金资助项目(2014TT1006)

作者简介:温家宇(1993-),男,广西玉林人,硕士生,主要从事结构健康监测的研究。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、防护与结构分析的研究。E-mail: binxu@hqu.edu.cn。

行阻抗模拟测量,对比阻抗频率曲线差异来分析缺陷位置,最后定义损伤指标来评估损伤程度。该研究成功验证压电阻抗测量技术检测组合结构混凝土内部空洞缺陷的有效性,为目前我国超高层建筑中大截面复杂钢管混凝土柱混凝土空洞缺陷的检测问题提供了新方法,具有较高的工程应用价值。

1 检测原理

压电陶瓷材料具有正逆压电效应,可同时作为驱动器和传感器来使用。机电耦合阻抗测量技术是通过压电陶瓷和主体构件间的机电耦合特性来对主体构件的损伤状况进行评估,这种方法简称压电阻抗法^[5]。由于机电耦合特性的存在,压电陶瓷的电阻抗值能间接反映主体结构缺陷导致的刚度变化,进而能识别被检结构的损伤状况。

为检测钢管混凝土结构的核心混凝土内部空洞缺陷,需将压电陶瓷经过封装后制作为嵌入式压电传感器,放置在构件内部需要检测的位置。通过阻抗仪测量压电传感器的电阻抗数据,观察电阻抗信号的变化,继而实现损伤识别。

2 机电耦合有限元分析理论

机电耦合有限元分析是指利用有限元软件对压电材料与主体结构的耦合效应进行模拟分析,输出电阻抗信息。阻抗仪在压电陶瓷上施加交变电压(谐波激励),有限元分析类型表现为谐响应分析,由控制方程描述。压电陶瓷的正、逆压电效应通过压电方程来描述。

在不考虑热位移和温度应力的情况下,采用的压电方程^[6]为

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e} \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{e}^t \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{T} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{S} 及 \mathbf{E} 分别为应力、电位移、应变及电场强度向量; \mathbf{c}^E 为短路状态下的弹性刚度矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为机械夹持时的介电常数矩阵; \mathbf{e} 、 \mathbf{e}^t 为分别为恒定应力作用下的压电应力常数矩阵及其转置矩阵。

进行耦合系统谐响应分析时采用如下的控制方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\mu}} \\ \ddot{\mathbf{V}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\mu}} \\ \dot{\mathbf{V}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}^Z \\ (\mathbf{K}^Z)^T & \mathbf{K}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,在结构参数和有限元网格给定后, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 唯一确定; \mathbf{F} 、 \mathbf{Q} 分别为压电片所受到的外载荷和外加荷载。

模拟激励为时间 t 的简谐函数,即

$$\mathbf{Q} = \{Q_0 \times \exp(j\omega t)\} \quad (3)$$

方程中将广义位移向量取作结构位移向量 $\boldsymbol{\mu}$ 与压电体节点电势向量 \mathbf{V} 的组合,广义质量矩阵和广义阻尼矩阵中以零扩充,广义刚度矩阵中加入机电耦合矩阵分量 \mathbf{K}^Z 和介电矩阵分量 \mathbf{K}^d 来解决压电耦合问题。

3 数值模型的建立

建立机电耦合有限元分析模型时,压电材料采用 ANSYS15.0 中的三维实体压电单元 SOLID5,而钢与混凝土采用 SOLID185 实体结构单元。

3.1 几何参数

压电陶瓷只在其极化方向产生谐响应。建模时使用映射网格划分单元以提高计算精度。为了计算简便和形象直观,建立三维钢管混凝土数值模型为长 1 500 mm、宽 100 mm、厚 10 mm 的平板,如图 1 所示。共布置 4 个嵌入式压电传感器 EA1、EA2、EA3、EA4。其中,传感器 EA3 对应于混凝土中的空洞缺陷,尺寸为 200 mm×50 mm×10 mm,在编号后面标注 QD。平板上部为钢,下部为混凝土,模型四周为自由边界条件,内部相互粘结。压电陶瓷传感器的尺寸为 15 mm×0.3 mm×10 mm。

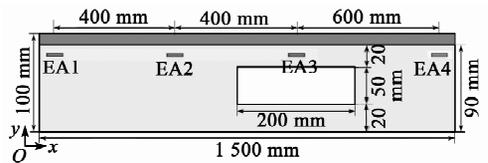


图 1 平面示意图

3.2 材料参数

设置 PZT 的极化方向为 y 轴,材料参数如表 1 所示。根据 ANSYS 的矩阵设置原则将 IEEE 标准中的相关参数进行适当转换或调整^[7],进而得到 PZT 材料对应的相对介电常数矩阵、压电应力常数矩阵、弹性常数矩阵。

表 1 材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
钢材	20.7×10 ¹⁰	0.280	7 800
混凝土	3.65×10 ¹⁰	0.167	2 400
PZT-5A	—	—	7 750

PZT-5A 相对介电常数矩阵为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \begin{bmatrix} \varepsilon_{r11} & & \\ & \varepsilon_{r33} & \\ & & \varepsilon_{r11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 916 & & \\ & 830 & \\ & & 916 \end{bmatrix} \quad (4)$$

PZT-5A 压电应力常数矩阵为

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_N (Z_i^1 - Z_i^0)^2}{\sum_N (Z_i^0)^2}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: N 为该测量段内所取频率点的数目; i 为该频率段内的第 i 个频率点; Z_{i1} 为第 i 个频率点的损伤状态阻抗模值; Z_{i0} 为第 i 个频率点的健康状态阻抗模值。将测量截面健康位置的 3 个测点结果的平均值作为该截面最终的健康状态阻抗模值 Z_{i0} 。从式(9)可看出,若与健康状态阻抗模值差别越大,损伤指标均方根偏差值就越大。

均方根偏差值计算结果如图 4 所示。由图可知,缺陷测点 EA3 的均方根偏差值是 5%,其余健康测点均方根偏差值则小于 1%,可见损伤部位传感器均方根偏差值远大于健康部位传感器均方根偏差值。阻抗数值差异越大,均方根偏差值越高,说明该区域存在空洞损伤的可能性越大,且损伤越严重。该损伤指标验证压电阻抗法检测混凝土空洞缺陷的有效性。

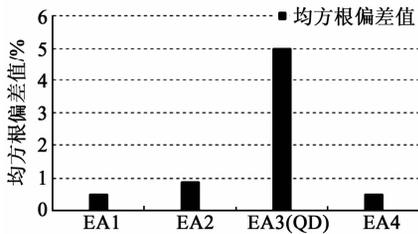


图 4 均方根偏差值

6 结束语

本文利用有限元法对基于压电阻抗的钢管混凝土构件空洞缺陷检测技术进行数值模拟分析。通过数值试验证明压电阻抗测量对混凝土空洞缺陷有敏感性,该方法能有效检测混凝土空洞缺陷。基于数值模拟结果可得结论:

1) 空洞缺陷会导致压电阻抗值发生明显变化,分析阻抗频率曲线的差异可以识别测点位置是否存在混凝土空洞缺陷。附近有缺陷的嵌入式压电传感器的阻抗频率曲线会出现明显的波峰与波谷。

2) 均方根偏差值作为损伤指标能反映出该点附近的缺陷情况。有缺陷测点与无缺陷测点的均方根偏差值对比差异明显,有缺陷测点的均方根偏差值会变大。

3) 基于有限元法的数值模拟结果证明,压电阻抗法检测钢管混凝土内部空洞缺陷可行且有效,有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
CAI Ping, XU Bin, ZHOU Yu. Experimental study on interface debonding detection of concrete-filled steel tubular using surface-mounted PZT[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 337-341.
- [2] 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):489-492.
XU Bin, CAI Ping, ZHOU Yu, et al. Experimental study on defect detection of concrete core of concrete-filled steel tubular with embedded PZT[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(3): 489-496.
- [3] 许斌,陈梦琦,王海东,等. 基于压电阻抗的钢管砼柱隔板剥离缺陷检测[J]. 压电与声光,2015,37(1):172-175.
XU Bin, CHEN Mengqi, WANG Haidong, et al. Interfacial debonding detection of diaphragm for large-scale irregular CFST column based on electric-mechanical impedance of PZT[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(1): 172-175.
- [4] 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.
XU Bin, CHEN Mengqi, YU Dihua, et al. Experimental study on interface debonding detection of a large-scale irregular CFST column with electro-mechanical impedance of PZT[J]. Construction Technology, 2015, 44(11): 117-121.
- [5] 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.
JIAO Li, LI Hongnan. Progress in the EMI technique of PZT in the health monitoring of civil engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(1): 102-108.
- [6] 张福学. 现代压电学(上册)[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [7] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术,2007,26(6):1279-1289.
MO Xiping. Application of ANSYS software in simulation analysis of acoustic transducer [J]. Acoustic Technology, 2007, 26(6): 1279-1289.
- [8] MAKKONEN T, HOLAPPA A, ELLÄ J, et al. Finite element simulations of thin-film composite BAW resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2001, 48(5): 1241-1258.
- [9] 克拉夫. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.