

基于表面波的钢管砼界面剥离检测模拟分析

陈潜¹,许斌^{2,3},陈洪兵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:钢管混凝土结构充分利用了钢管和混凝土的优点,具有优越的力学性能,被广泛应用于高层建筑及大型桥梁中。然而,钢管和混凝土间的界面剥离缺陷却会给结构力学性能带来负面影响,对隐蔽性的界面剥离缺陷进行有效检测很重要,基于同侧压电陶瓷片驱动与表面波测量进行检测易于实施。该文运用 ANSYS 建立了带界面剥离缺陷的钢管混凝土柱模型,通过在钢管混凝土柱表面同侧粘贴压电陶瓷(PZT)片进行驱动和传感,对具有不同长度缺陷的钢管混凝土柱的信号进行数值模拟分析,并与健康工况下的信号进行比较。数值模拟结果表明,界面剥离缺陷工况下的信号幅值较健康工况下大,且损伤程度与信号幅值改变呈正相关,损伤尺度越大,信号幅值越大。该文提出的基于表面波测量的界面剥离缺陷检测方法有效。

关键词:压电陶瓷;界面缺陷;钢管混凝土;导波;数值研究

中图分类号: TN814; TM282

文献标识码: A

DOI: 10. 11977/j. issn. 1004-2474. 2019. 01. 020

Simulation Analysis of Detection of Interface Debonding in Concrete-filled Steel Tube Based on Surface Wave

CHEN Qian¹, XU Bin^{2, 3}, CHEN Hongbing¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Civil Engineering, Huaqiao University,

Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory of Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province

(Huaqiao University), Xiamen 361021, China)

Abstract: The concrete-filled-steel-tubular (CFST) structures make full use of the advantages of both steel and concrete, has superior mechanical properties, and has been widely used in high-rise buildings and large bridges. However, the interface debonding defects between the steel tube and concrete can have a negative effect on the structural mechanical properties. It is important to effectively detect the concealed interface debonding defects, and this is easy to implement based on the same side piezoelectric ceramic sheet driving and surface wave measurement. In this paper, in order to demonstrate the feasibility of the surface debonding detection approach and to investigate its mechanism, the CFST members with different interface debonding detections and PZT patches as actuator and sensor are numerically modeled and analyzed with ANSYS considering the coupling effect between PZT and CFST member and the piezoelectric effect of PZT patches. The numerical simulation results show that the signal amplitude under the interface debonding defect conditions is larger than that under healthy conditions, and the damage degree is positively correlated with the signal amplitude change. The larger the damage scale, the larger the signal amplitude. The proposed method for detecting the interface debonding defects based on surface wave measurement is effective.

Key words: piezoelectric ceramics; interface debonding defect; concrete-filled steel tube; guided wave; numerical study

0 引言

钢管混凝土结构充分发挥了钢和混凝土的优点,力学性能优越,常作为竖向或轴向承力构件广泛应用于高层建筑及大型桥梁中。然而,由于混凝土

浇筑过程中水化热不均匀,后期混凝土收缩,长期使用过程中的徐变及施工技术与管理的不到位等原因,钢管混凝土结构中钢管和混凝土之间的界面易出现剥离缺陷,这种剥离缺陷将削弱钢管对混凝土

收稿日期:2018-04-05

基金项目:国家自然科学基金委员会国际(地区)合作与交流基金资助项目(51261120374)

作者简介:陈潜(1991-),男,湖南浏阳人,硕士生,主要从事基于压电陶瓷的结构损伤检测的研究。许斌(1972-),湖北孝感人,博士生导师,湖南省“芙蓉学者”特聘教授,主要从事智能结构与材料、健康监测与振动控制的研究。

的约束,从而降低结构力学性能。对钢管混凝土构件的界面缺陷进行有效检测尤为重要。

近年来,针对钢管混凝土结构的界面剥离缺陷检测问题,许斌等^[1]提出基于表面粘贴或混凝土中嵌入压电陶瓷材料进行横向对侧检测的方法,通过系列实验和数值模拟研究证明了其可行性。蔡萍等^[4]通过外贴压电陶瓷片对钢管混凝土柱内部缺陷进行了监测研究,证明了基于压电陶瓷监测结构缺陷的方法的可行性。为提高计算效率,栾乐乐等^[2]建立谱元法模型,对基于对侧法的钢管混凝土界面剥离缺陷的检测方法的机理进行了研究。陈梦琦等^[3]用压电阻抗法检测了钢管混凝土结构的界面缺陷,说明了阻抗法检测结构缺陷的机理。李冰等^[4]对钢管混凝土的剥离损伤进行了识别研究,提出了钢管混凝土剥离损伤的检测方法。彭海阔等^[5]以谱元法为基础,研究了板结构中导波的传播机理以及损伤识别,提出了谱元法模拟板结构损伤识别的方法。

相对于对侧法而言,运用钢管混凝土同侧钢板表面粘贴压电陶瓷片进行驱动和传感的界面剥离缺陷检测法更易于实现。本文利用 ANSYS 有限元分析软件,对在钢管混凝土柱表面同侧粘贴压电陶瓷片进行表面波测量的钢管与混凝土界面剥离缺陷检测方法的可行性进行分析。建立考虑压电效应及压电陶瓷片与钢管混凝土耦合效应的耦合数值模型,探究基于表面波测量的钢管混凝土结构界面剥离缺陷的检测机理。对比健康工况和不同界面剥离缺陷工况下接收信号结果,建立损伤指标,验证了所提出的基于表面同侧粘贴压电陶瓷片进行表面波测量的钢管混凝土界面剥离缺陷检测方法的可行性。

1 基于表面波测量的界面剥离缺陷检测原理

1.1 基于表面波测量的缺陷检测原理

应力波在结构中传播时,遇到缺陷会产生反射和衍射等现象,并绕过缺陷传播,从而携带有结构缺陷的信息,对这些信息进行分析可判断缺陷是否存在及缺陷的大小^[6]。本文针对方钢管混凝土构件的界面剥离缺陷检测,在同侧钢管表面布置压电陶瓷驱动器和压电陶瓷传感器。如图 1 所示,将位于界面缺陷左侧的压电陶瓷片 A 作为驱动器,位于缺陷右侧的压电陶瓷片 B 作为传感器,在图中压电陶瓷驱动器 A 处施加激励信号 F ,压电陶瓷传感器 B 处接收信号,通过分析接收信号幅值并与健康工况下

信号幅值进行比较,对界面剥离缺陷进行检测。

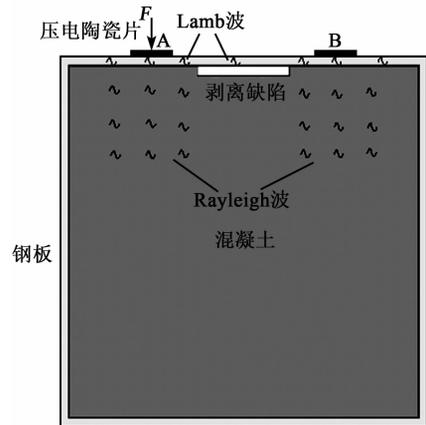


图 1 基于表面波测量的钢管混凝土界面剥离缺陷检测原理

1.2 激励信号的选取

在应力波传播过程中会产生频散效应,其传播速度随导波频率的变化而变化。通常选择合适的窗函数以压缩频域带宽来降低频散效应,同时使信号边缘的截断更平滑来抑制频谱泄漏。常见的窗函数^[7]有汉宁窗、汉明窗、余弦窗、矩形窗、三角窗等。本文采用汉宁窗调制的 10 周期正弦波电压信号对信号进行加窗,信号的幅值为 10 V,频率为 20 kHz。信号的函数表达式为

$$V(t) = 5 \cdot \sin(2\pi ft) \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{10}\right) \right] \quad (1)$$

式中: f 为激励信号的频率; t 为时间。

2 耦合系统表面波传播有限元分析

2.1 压电机械耦合系统

本文用于压电-机械耦合分析的压电方程为

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{c}^E 、 \mathbf{e} 、 \mathbf{e}^T 分别为恒定应力作用下的弹性刚度、压电应力常数张量及其转置张量; $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ 为恒定应变作用下介电常数张量; \mathbf{T} 为应力张量; \mathbf{S} 为应变张量; \mathbf{D} 为电位移; \mathbf{E} 为电场强度。

在 ANSYS 中,输入压电材料的弹性刚度矩阵 \mathbf{C} 、介电常数矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 及压电应力常数矩阵 \mathbf{e} 可表达压电-机械耦合关系。另外,在输入上述矩阵时需考虑压电陶瓷片的极化方向^[7],并按照极化方向对应的矩阵输入。

2.2 压电分析模型的建立

压电分析可采用的耦合单元有 SOLID5, SOLID98 和 PLANE13 等,这些单元都具有电压自由

度,因此可以很方便的进行压电-机械耦合。其中 SOLID5 和 SOLID98 为实体单元, PLANE13 为平面单元。本文采用平面有限元分析,故压电陶瓷片采用 PLANE13 单元,对应的主体结构则采用不具有电压自由度的平面单元 PLANE42 进行模拟。

1) 网格密度与积分时间步长。网格划分的密度要兼顾计算效率和求解精度。网格划分太密则计算效率太低,计算时间过长,网格划分过少则计算精度不高影响计算的准确性。因此,网格划分需满足一定的要求,积分时间步长的设置也是相同的道理。网格尺寸^[8]为

$$l \leq \frac{\lambda_{\min}}{7} \quad (3)$$

积分时间步长 Δt 需同时满足

$$\begin{cases} \Delta t \leq \frac{1}{20f_{\max}} \\ \Delta t \leq \frac{L_c}{C_d} \end{cases} \quad (4)$$

式中: l 为最大单元网格尺寸; λ_{\min} 为最小波长; f_{\max} 为分析信号频率的最大值; L_c 为网格最小尺寸; C_d 为导波的波速。

同时,为使压电陶瓷传感器能捕捉到信号,模拟计算总时间为

$$T \geq \frac{W}{v} \quad (5)$$

式中: T 为模拟计算总时间; W 为信号从驱动器传播到传感器的最短距离; v 为波速。

经计算,本文取网格尺寸为 2 mm, Δt 为 2.5 μ s,模拟计算总时间 2.5 ms。

2) 阻尼模型。本文采用完全瞬态动力分析, ANSYS 中可用于完全瞬态动力分析法的阻尼模型通常有瑞雷阻尼、材料阻尼等。瑞雷阻尼由两部分组成,即与质量有关的阻尼 α 和与刚度^[9-12]有关的材料阻尼 β 。材料阻尼则仅与材料的刚度有关。通常,在 ANSYS 中材料阻尼和瑞雷阻尼不能同时定义。瑞雷阻尼多用于结构的整体分析,而材料阻尼则多用于构件分析且构件中包含多种材料的情况。本文为构件分析且构件中包含钢和混凝土两种材料,故采用材料阻尼。材料阻尼的计算式为

$$\beta = \frac{2\zeta_i}{\omega_i} = \frac{2\zeta_i}{2\pi f} \quad (6)$$

式中: ζ_i 为第 i 种材料的粘滞阻尼比; ω_i 为施加在第 i 种材料上的激励信号的圆频率。

本文中钢材料的粘滞阻尼比取 0.000 2,混凝土材料的粘滞阻尼比取 0.05。

3) 材料参数。压电陶瓷片按型号分类通常可分为 PZT-4、PZT-5 和 PZT-8,按变形性能通常可分为伸缩型、剪切型和弯曲型^[13]。本文采用压电陶瓷片为伸缩型 PZT-5A 压电陶瓷片,尺寸为 15 mm \times 10 mm \times 0.3 mm,材料参数如表 1 所示。

表 1 PZT-5A 材料参数

型号	$d_{33}/$ (pm/V)	$d_{31}/$ (pm/V)	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
PZT-5A	450	-175	1 800	0.35	7 600

钢管采用 Q235 钢,混凝土采用强度等级为 C60 的混凝土。钢管与混凝土材料的力学性能分别如表 2、3 所示。

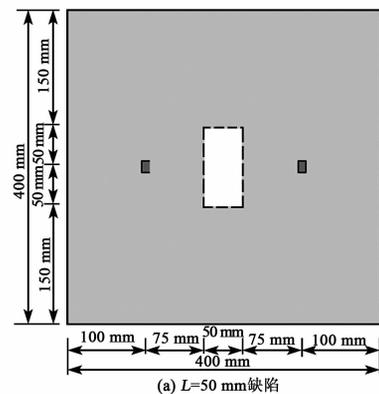
表 2 钢管材料特性

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
钢管	206	0.3	7 850

表 3 混凝土材料特性

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
混凝土	36.5	0.167	2 400

4) 钢管混凝土柱模型分析。本文模拟采用的钢管混凝土柱构件尺寸为 400 mm \times 400 mm \times 400 mm,钢管壁厚为 4 mm,力学边界条件为四边自由,缺陷设置在构件侧立面的正中心钢管与混凝土的交界面处,缺陷尺寸分别为 5 mm \times 50 mm \times 100 mm、5 mm \times 100 mm \times 100 mm 和 5 mm \times 150 mm \times 100 mm,取缺陷长度为 L ,分别记为 $L=50$ mm、 $L=100$ mm 和 $L=150$ mm,压电陶瓷片布置在缺陷两端距缺陷中心 150 mm 的位置,且同侧对称布置,其中一个作为驱动器发射信号,另一个作为传感器接收信号。健康工况及 3 种缺陷工况下压电陶瓷片及缺陷的布置图如图 2 所示。



(a) $L=50$ mm 缺陷

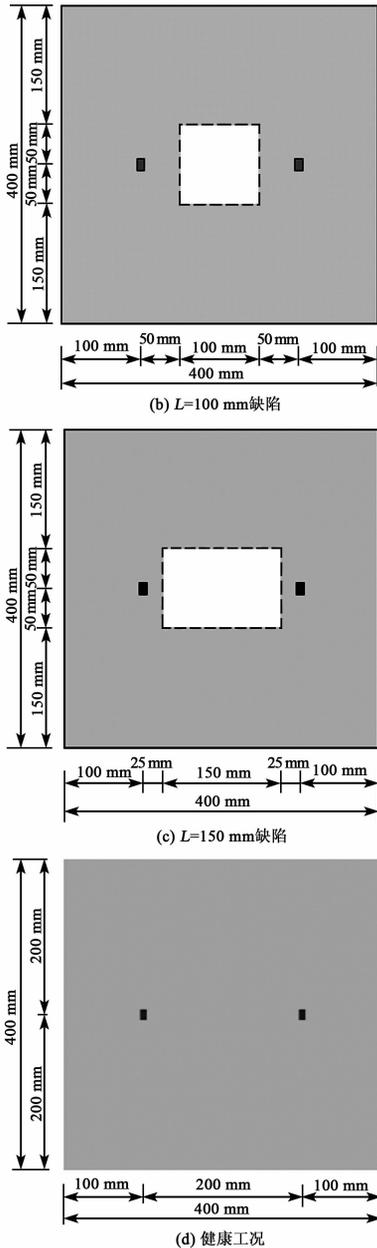


图 2 健康工况及 3 种缺陷工况下压电陶瓷片及缺陷的布置

本文的钢管混凝土柱有限元模型采用二维有限元分析,从钢管混凝土柱的正中间截取一同时穿过压电陶瓷片和缺陷的剖面进行分析,平面有限元模型的四周环绕 4 mm 厚的钢管,内部为 396 mm × 396 mm 的核心混凝土,压电陶瓷片平面尺寸取 10 mm × 0.3 mm,通过挖去对应面积的混凝土单元模拟界面缺陷,剥离缺陷深度均为 5 mm,3 种缺陷工况及健康工况试件的有限元模型如图 3 所示。

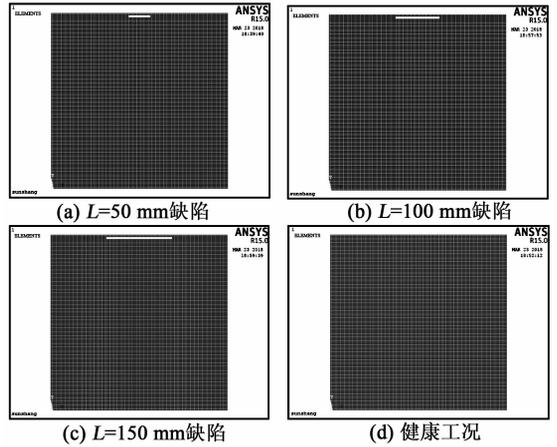


图 3 3 种缺陷工况及健康工况试件的有限元模型

2.3 信号分析

2.3.1 应力波在钢管混凝土中的传播

通过缺陷工况下接收信号与健康工况下接收信号进行对比分析,判断结构是否出现损伤及损伤程度。以 $L=50\text{ mm}$ 缺陷工况为例,健康工况和缺陷工况下钢管混凝土中应力波传播如图 4 所示。图中线条表示应力波的轨迹线。由图可知,应力波基本是以圆形衍射的方式向四周传播的。

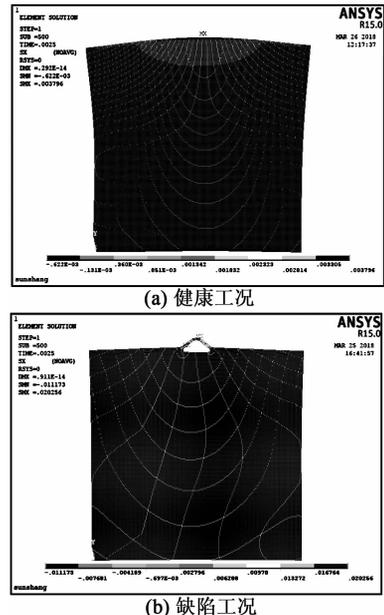


图 4 健康工况和缺陷工况下钢管混凝土中应力波传播

对比发现,健康工况下信号回波峰值点时刻压电传感器所在位置钢管最大应力为 0.003 8 Pa,而缺陷工况下为 0.020 3 Pa,即缺陷工况下,同一测点位置钢管一侧应力明显大于健康工况,说明当应力波到达缺陷时绕过缺陷向钢板进行了传播。

2.3.2 传感器时程结果分析

分别对 $L=0, 50, 100, 150\text{ mm}$ 4 种工况下表面黏贴压电传感器的接收信号时程曲线进行

比较,如图5所示。

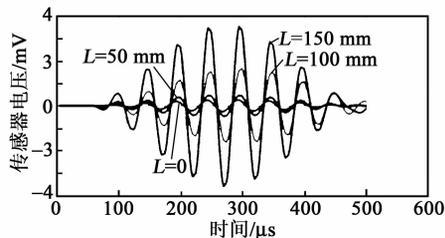


图5 不同缺陷尺寸时回波时程曲线

由图5可知,损伤程度越大接收信号幅值越大。结果表明,本文所采用的基于表面波测量的钢管混凝土结构界面剥离缺陷及缺陷程度检测方法有效。缺陷工况下接收信号幅值大于健康工况下接收信号幅值,是因为当表面波传播到缺陷处时将绕过缺陷,主要沿钢板传播,钢阻尼比更小,混凝土阻尼比更大,相比界面无剥离的工况,应力波大部分选择阻尼比较小的钢管传播,因此,检测信号幅值更大。

为定量描述钢管混凝土界面剥离损伤大小,取各工况下传感器接收信号幅值与健康工况下传感器接收信号幅值的比值作为界面损伤指标,即

$$I = \frac{A_i}{A_0} \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中: I 为界面损伤指标; A_0 为健康工况下接收信号幅值; A_i 为不同缺陷工况下接收信号幅值。图6为不同工况下结构的损伤指标。

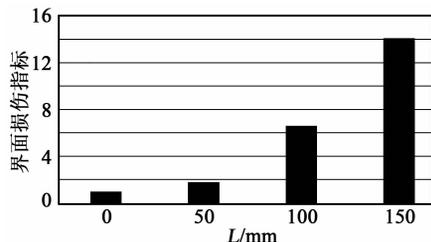


图6 不同工况下界面损伤指标

由图6可知,结构损伤指标与结构损伤程度的关系,钢管混凝土的界面剥离程度越严重,损伤指标越大。其中, $I=1$ 表示结构处于健康状态, $I>1$ 表示结构存在损伤。

3 结论

本文建立了考虑压电材料的压电效应及其与钢管混凝土结构耦合效应的耦合系统有限元模型,利用ANSYS对钢管混凝土构件在同侧外贴压电陶瓷片时进行界面剥离缺陷检测的机理进行了研究,并建立了结构界面损伤指标,发现结构界面缺陷程度与损伤指标的正相关关系。主要结论如下:

1) 表面波在钢管混凝土中传播时遇到界面剥离缺陷会使其向混凝土中传播的成分减小,继续沿材料

阻尼较小的钢管一侧传播,使表面波测量幅值增大。

2) 当同侧外贴压电陶瓷片时,通过分析接收信号的幅值可对钢管混凝土界面剥离缺陷进行检测。

3) 本文定义了界面损伤指标,界面损伤指标与钢管混凝土结构的界面损伤程度直接相关,损伤指标越大,缺陷程度越严重。

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] 栾乐乐,许斌,陈洪兵. 界面剥离钢-混凝土组合结构应力波传播谱元法模拟研究[J]. 工程力学, 2017, 34(2):145-152.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 彭海阔. 基于谱元法的导波传播机理及结构损伤识别研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [6] 何存富,刘增华,郑璟瑜,等. 管道导波检测中传感器数量和频率特性研究[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(4):393-397.
- [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.
- [8] GAZIS D C. Errata: three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. II [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1960, 32(5):573-578.
- [9] 克拉夫. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [10] 张所全,焦四海,丁建华,等. 轧制过程边部线状缺陷形成机理研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018(4):107-110.
- [11] NASEDKINA A, ALEXIEV A, MALACHOWSKI J. Numerical simulation of ultrasonic torsional guided wave propagation for pipes with defects[J]. Manufacturing, Physics, Mechanics and Application, 2015, 175: 475-488.
- [12] 彭芬,许斌,陈洪兵,等. 基于压电超声导波的管道缺陷检测数值模拟[J]. 压电与声光, 2017, 39(3):462-466. PENG Fen, XU Bin, CHEN Hongbing, et al. Numerical simulation of pipeline defect detection based on piezoelectric ultrasonic guided wave[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(3):462-466.
- [13] XU Bin, CHEN Hongbing, XIA Song. Numerical study on the mechanism of active interfacial debonding detection for rectangular CFSTs based on wavelet packet analysis with piezoceramics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86:108-121