

# 基于压电材料的钢筋砼-钢组合塔筒损伤监测

周天翔<sup>1</sup>, 许斌<sup>1,2</sup>, 李彦贺<sup>3</sup>, 蒋凡<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

3. 中建一局集团建设发展有限公司, 北京 100102)

**摘要:** 钢筋混凝土-钢组合塔筒作为一种新型的风电塔架形式, 其混凝土段的开裂对其使用寿命具有重要影响, 对其混凝土段的开裂进行监测具有重要意义。该文提出了一种基于压电陶瓷激励的应力波测量的钢筋混凝土塔段的开裂监测方法, 以某钢筋混凝土-钢塔筒缩尺模型为对象, 以布置在钢筋混凝土塔筒表面的压电陶瓷片为激励器, 利用布置在钢筋混凝土塔筒不同高度位置的压电陶瓷片作为传感器, 实现在不同水平往复加载下的应力波的测量。对混凝土塔段从裂缝开始出现直至构件最终破坏整个过程各压电陶瓷片的响应进行分析, 并定义损伤指标。结果表明, 定义的指标不仅可较好反应裂缝实际出现位置, 且与加载等级相关, 所提出的监测方法可对钢筋混凝土塔段裂缝的发生和发展过程进行有效监测。

**关键词:** 压电陶瓷; 钢筋混凝土-钢组合风电塔筒; 应力波; 损伤指标; 裂缝检测

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A

## Damage Detection of a Reinforced Concrete-Steel Hybrid Wind Turbine Tower Model With PZT

ZHOU Tianxiang<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1,2</sup>, LI Yanhe<sup>3</sup>, JIANG Fan<sup>1</sup>

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

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

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

**Abstract:** The reinforced concrete-steel hybrid wind turbine tower is a new type of wind turbine structure. The initiation of cracks in concrete has obvious influence on the durability of the wind turbine tower and it is critical to monitor the initiation and development of cracks in concrete of the hybrid tower. In this paper, a PZT based stress wave propagation measurement and analysis method for the crack initiation and propagation monitoring is proposed. The experimental study on the crack initiation and propagation monitoring for a scale reinforced concrete-steel hybrid tower model is carried out. A number of PZT patches are mounted on the surface of the concrete tower and some of them are used as actuator and the others are used as sensors for stress wave measurement. The high frequency sine signal from a signal generator is used to actuate the PZT actuator and the stress wave is measured by different sensors under different load cases. A damage index based on the amplitude is defined and it can be employed to detect the location of the cracks in the concrete tower and changes with the development of cracks. The proposed approach can be employed to monitor the cracks in concrete-steel hybrid wind turbine tower.

**Key words:** PZT; reinforced concrete-steel hybrid wind turbine tower; wave propagation; damage indicator; crack detection

### 0 引言

面对世界能源短缺与环境污染问题的挑战, 风能作为一种可再生的清洁能源, 越来越受重视, 近年来我国新增风电装机容量位列世界第一。传统的风

电塔筒均采用全钢结构, 然而纯钢塔筒成本高, 特别是山区风场还存在构件运输难。与纯钢架塔筒相比, 混凝土-钢组合塔筒在成本、运输、施工进度、稳定性等方面均具有优势。然而混凝土段一旦出现裂

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261120374); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120161110023)

作者简介: 周天翔(1992-), 男, 湖南湘潭人, 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, 主要从事结构工程和防灾减灾方面的研究。

缝,并在恶劣自然环境条件及动力荷载作用下,将对组合塔筒的承载力和耐久性带来负面影响。

为保证塔架结构的运行安全,我国已有学者对传统钢架风电塔筒结构进行了相关监测研究<sup>[1-3]</sup>。但对混凝土-钢组合塔筒的监测研究尚未见报道。目前,一些常规的混凝土健康监测方法由于检测范围小,离散型大,成本高等缺点,使其不适用于组合塔筒的损伤监测<sup>[4]</sup>。压电材料作为一种智能材料,具有正压电效应及逆压电效应<sup>[5-6]</sup>,近年来在结构健康监测中发挥了重要作用<sup>[7-9]</sup>。波动法具有实时、动态、响应快,灵敏度高,适用范围广,操作便捷等优点,1999年,Chang等首次运用于复合材料的健康监测中<sup>[10-11]</sup>。Saafi等利用波动法进行试验,验证了其能对界面剥离及剥离位置进行监测<sup>[12]</sup>。本文提出基于压电陶瓷的应力波传播分析混凝土-钢组合塔筒裂缝监测方法。通过对组合塔筒模型的试验研究,在不同加载水平下,压电应力波测量信号幅值的变化对组合塔筒上裂缝的开展进行监测,结果表明,检测结果与混凝土塔段的裂缝产生发展状况相吻合。

### 1 组合塔筒损伤监测试验方案

本文的监测对象为某风机混凝土-钢塔筒的1:10缩尺模型,构件的高2.93 m,由法兰连接上部钢筒段和下部混凝土段,二者用12个8.8级法兰螺栓连接,法兰盘厚25 mm,外径 $\varnothing$ 485 mm,内径 $\varnothing$ 395 mm。钢筒高0.8 m,壁厚6 mm,内径 $\varnothing$ 391 mm,外径 $\varnothing$ 403 mm,选用钢材为Q235。混凝土塔筒高1.6 m,壁厚45 mm,内径 $\varnothing$ 395 mm,外径 $\varnothing$ 485 mm,筒内安装有环向箍筋和纵向受力钢筋。环向箍筋为 $\varnothing$ 2.5 mm@10 mm,采用14#镀锌铁丝。纵向受力钢筋为6根 $\varnothing$ 6 mm的HRB400和6根 $\varnothing$ 8 mm的HRB400均匀间隔布置,如图1所示。

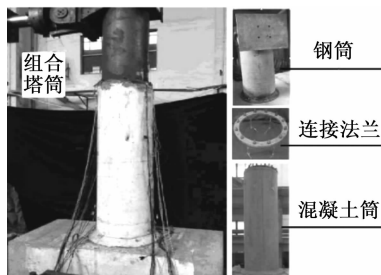


图1 试验构件实物图

对组合塔筒的加载方式为水平作动器作用下由位移控制的往复加载,并在塔筒的轴向用2个液压千

斤顶施加轴向力。前5级加载位移分别为2.5 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm。此后加载位移逐级增加5 mm直到构件破坏,实验加载方式如图2所示。

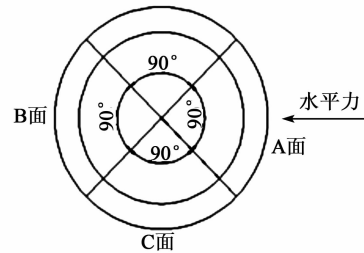


图2 监测面分布图

本试验选取灵敏度较高、稳定性较好的压缩型PZT-5压电陶瓷片作为驱动器和传感器。经前期清理、粘贴及后期保护3个步骤,将PZT贴于构件表面,图3为A面PZT片位置布置。在A面上,驱动器为A4,其余皆为传感器。在C面上,驱动器为C2,C1和C3为传感器。C1、C2、C3分别距离混凝土筒段下端100 mm、200 mm、300 mm。由任意函数信号发生器发射正弦信号至驱动器,电信号在PZT通过逆压电效应转化为应力波在构件中传播进而被传感器接收,然后转化成电信号输出给频谱分析仪储存至电脑。本文试验的正弦信号频率设为8 kHz,采样频率为102.4 kHz,采样时间为6.4 s。

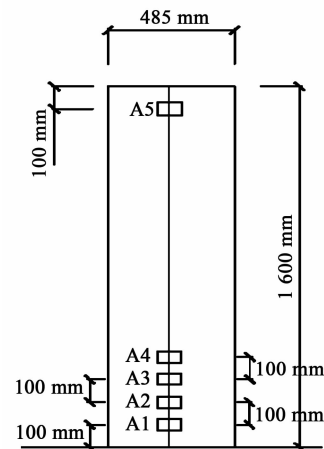


图3 A面PZT传感器布置图

## 2 试验结果及数据分析

### 2.1 监测段A面裂缝开展监测

构件在不同的加载级别下最终破坏,钢筋被拉断,底部混凝土压溃,试件A面裂缝开展情况如图4所示。以在A4作为激励器时A1的测量结果为例,对比各个位移加载级别下的简谐信号测量值,结果如图5所示。



图 4 构件底部 A 面的最终破坏图

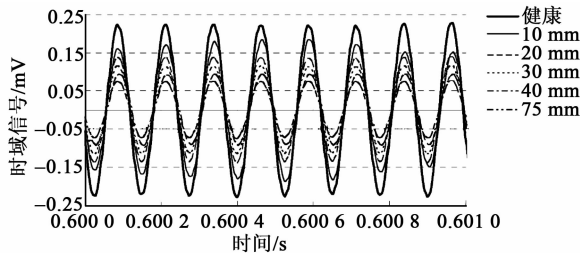


图 5 A1 简谐信号时域图

由图 5 可知,随着加载位移的增加,在激励器 A4 与传感器 A1 间裂缝逐渐发展,A1 的测量信号幅值逐级下降。为定量描述裂缝的开展和测量信号幅值变化间的关系,定义检测段裂缝损伤指标为

$$D_1 = \frac{H_A - D_A}{H_A} \quad (1)$$

式中: $H_A$  为检测段传感器在健康状态下正弦信号幅值; $D_A$  为损伤状态下信号幅值。

图 6 为 A4 作为激励器,A1 与 A5 分别作为传感器时,对应检测区段 A4 与 A1 间、A4 与 A5 间的区段损伤指标。

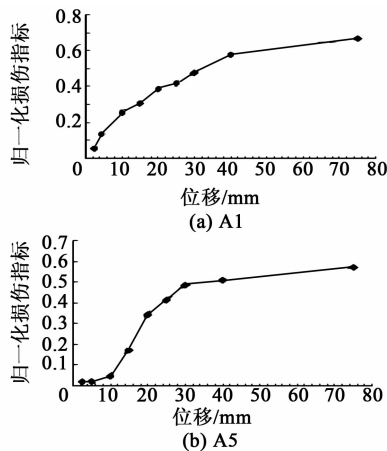


图 6 A1 和 A5 幅值归一化损伤指标图

由图 6 可见,由于信号经裂缝损伤位置时有能量损失,导致传感器测量信号幅值降低,所有通过定

义的区段混凝土开裂损伤指标随着各检测区段裂缝的发生和发展而变化。定义的损伤指标与裂缝的数量和宽度有关。试件加载荷载水平越大,损伤指标值越大,裂缝损伤越严重。

### 2.1.1 A4-A1 区段

实验中,观测到 A1 上部在 2.5 mm 位移加载下出现裂缝,且随着位移加载级别的增大,A4-A1 段裂缝随之发展。在加载位移为 2.5 mm 时,A1 对应的  $D_1$  值达到 0.062,相对其他传感器其损伤指标增加较大。之后每一级位移加载下 A1 的  $D_1$  依次增加。监测结果与实际裂缝出现情况吻合。

### 2.1.2 A4-A5 区段

对于 2.5 mm 和 5 mm 位移加载级别,A5 的  $D_1$  均为 0.025,试验观察发现,在加载位移为 5 mm 以下时,在 A4-A5 区段,没有观测到明显开裂现象。从 10 mm 位移加载开始,A4-A5 区段开始出现裂缝,且随着位移加载级别的增大,裂缝随之发展。由图 6 可看出,在 10 mm 位移加载级别下,A5 的  $D_1$  达到了 0.0503,之后每一级位移加载 A5 的  $D_1$  依次增加。对于 A4-A5 区段,可将损伤指标达到 0.05 作为判断该区段开裂的参考值。

基于实验观测及区段损伤指标的计算结果可发现,对于本实验研究对象,可将  $D_1 = 0.05$  作为组合塔筒混凝土段开裂的判断标准, $D_1 > 0.05$  时,可判断多检测区段裂缝产生。

### 2.1.3 A4-A3 区段

A4 与 A3 之间的裂缝发展通过 A3 的  $D_1$  来反映,如图 7 所示。在 2.5 mm 和 5 mm 下,A3 的  $D_1$  值分别为 0.025 和 0.035,相对 A1 的损伤指标均较小。在 10 mm 位移加载级别下,A3 的  $D_1$  增长到 0.177,实验观测发现,在此位移加载下 A4-A3 间出现了裂缝。之后每一级位移加载 A3 的  $D_1$  依次增加,表明 A4 与 A3 之间裂缝发展。所定义的裂缝损伤指标的变化情况与 A4、A3 间实际裂缝发展情况吻合。

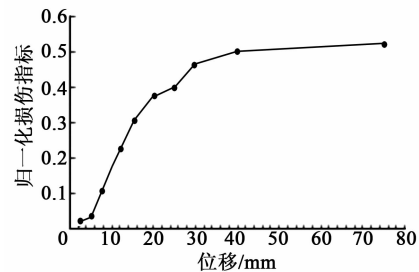


图 7 A3 幅值归一化损伤指标图

## 2.2 裂缝定位

除对混凝土塔段的某一区段的开裂情况进行检测外,对裂缝的位置进行定位具有重要意义。本文作者为实现混凝土塔段裂缝的定位,基于不同传感器的响应测量定义了裂缝定位评价指标。

基于在2个传感器间信号的衰减程度定义裂缝定位评价指标为

$$L_{ij,x} = \frac{D_{i,x} - D_{j,x}}{D_{i,x}} \quad (2)$$

式中: $L_{ij,x}$ 为第 $x$ 位移级别下, $i,j$ 两个传感器之间的幅值衰减; $D_{i,x}$ 和 $D_{j,x}$ 分别为第 $i$ 个和第 $j$ 个传感器在第 $x$ 位移级别下的信号幅值。

本文以A3与A2、A2与A1间的裂缝发展定位为例,计算的裂缝定位评价指标结果如图8所示。

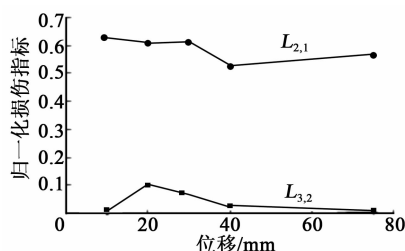


图8 A3-A2及A2-A1信号幅值衰减指标

由图8可看出,A3与A2之间信号损失百分比很小,最大值出现在20mm位移加载级别,为0.105,其余位移加载级别下值均很小,可认为信号在其余荷载条件下传播路径中应力波的损失轻微,A3到A2之间在加载过程中没有裂缝出现,这与实际实验过程中观测到的A3与A2之间的实验结果相吻合。而A2到A1之间的信号损失指标均达到0.53以上,说明从10mm位移加载级别开始A2到A1间已经出现裂缝,分析结果与加载过程中A3到A1之间实际裂缝发展状况相吻合。

## 3 结论

本文针对钢筋混凝土-钢组合塔筒结构混凝土塔段的裂缝的检测以及裂缝的定位问题,开展了钢筋混凝土-钢组合塔筒模型的加载试验,分别定义了检测段裂缝损伤指标和裂缝定位指标,通过对损伤指标与实验观测现象的对比分析,得到结论:

1) 以A4-A1、A4-A3、A4-A5检测区间内裂缝损伤的检测结果表明,定义的裂缝损伤指标的增長情况与实际裂缝发展情况吻合良好,基于此指标能监测到初始裂缝的产生及裂缝的发展。随着位移加载级别的增大,结构裂缝进一步开展,所定义的检测

区段内的裂缝指标相应增加。利用所定义的裂缝指标可实现钢筋混凝土段的裂缝的发生和发展过程的检测。

2) 为实现钢筋混凝土段的开裂位置的定位,定义了基于在相邻传感器之间的信号幅值衰减的裂缝定位指标,以A3与A2、A2与A1间裂缝的开展为例,结果表明,定义的裂缝定位指标与试验中2个区段间裂缝出现的位置观测结果吻合良好。当相邻传感器间出现裂缝时,所定义的裂缝定位指标由于信号幅值衰减显著增加。

本文基于实验研究,表明基于压电材料的应力波测量方法可有效实现钢筋混凝土塔段裂缝的产生和发展过程的监测及裂缝的定位。

## 参考文献:

- [1] 马人乐,马跃强,刘慧群,等. 风电机组塔筒模态的环境脉动实测与数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2011,30(5):152-155.  
MA Renle, MA Yueqiang, LIU Huiqun, et al. Ambient vibration test and numerical simulation for modes of wind turbine towers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5):152-155.
- [2] 卢家森,黄明鑫. 国家体育场卸载过程支撑塔架的应力监测[J]. 结构工程师,2010,26(2):156-161.  
LU Jiasen, HUANG Mingxin. Stress monitoring for temporary supporting tower of the national stadium during unloading procedure[J]. Structural Engineers, 2010, 26(2):156-161.
- [3] 赵艳峰,曹敏,王达达,等. FBG传感技术应用于变电站塔架应变监测的研究[J]. 南方电网技术,2011,5(A01):26-29.  
ZHAO Yanfeng, CAO Min, WANG Dada, et al. Study on the Application of FBG sensing technology to the strain monitoring of substation towers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(A01):26-29.
- [4] 方瑾. 混凝土无损检测常用方法综述[J]. 安徽建筑,2012,18(6):175-177.  
FANG Jin. Common methods review of non-destructive testing of concrete[J]. Anhui Architecture, 2012, 18(6):175-177.
- [5] 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:大连理工大学土木工程学院,2009.
- [6] 张福学. 现代压电学(上)[M]. 北京:科学出版社,2001,84-86.
- [7] 许斌,王丹. 混凝土嵌入式压电动态剪应力传感器研发[J]. 压电与声光,2015,37(5):764-767.

(下转第969页)