

# 基于压电陶瓷的钢管混凝土柱早期强度监测

何明星<sup>1,2</sup>, 吴方红<sup>1,3</sup>, 刘向东<sup>1</sup>, 管文强<sup>1</sup>, 杜国锋<sup>1</sup>

(1. 长江大学 城市建设学院, 长江大学 结构工程与防灾研究所, 湖北 荆州 434023; 2. 长江大学 基本建设处, 湖北 荆州 434023;

3. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:**为研究钢管混凝土柱内部早期强度的增长规律, 该文在现有混凝土早期强度监测技术基础上, 提出一种基于压电智能骨料的早期强度检测方法。制作钢管混凝土柱试件, 通过在钢管混凝土柱内部预埋智能骨料作为传感器和激励器, 发射和接收信号, 对混凝土早期强度增长过程中传感器采集到的数据进行分析, 结果表明, 传感器接收信号的电压幅值随着混凝土早期强度的增加而减少, 混凝土早期强度在初始的1周内以较快的速度增长, 1周后增长速度减慢, 28 d后强度为1个定值。与此相应, 传感器接收信号电压幅值在初始1周内以较快的速度下降, 随后下降速度减慢, 最后达到稳定, 电压幅值变化曲线与早期强度变化曲线相似。利用压电智能骨料能对混凝土早期强度发展过程进行有效监测。

**关键词:**压电陶瓷; 智能骨料; 钢管混凝土; 早期强度; 监测

**中图分类号:** TN06; TU317.01

**文献标识码:** A

## Study on Early-age Strength Monitoring of Concrete Filled Steel Tube Based on Piezoelectric Ceramic

HE Mingxing<sup>1,2</sup>, WU Fanghong<sup>1,3</sup>, LIU Xiangdong<sup>1</sup>, GUAN Wenqiang<sup>1</sup>, DU Guofeng<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, Institute of Structural Engineering and Disaster Prevention, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Dept. of Basic Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 3. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to study the increasing law of early-age strength in the concrete-filled steel tube columns, a kind of early-age strength monitoring method based on the embedded piezoelectric transducers was put forward on the basis of existing concrete early strength monitoring technology. One concrete filled steel tube column specimen was designed and manufactured. Some smart aggregates for transmitting and receiving signals were pre-buried in concrete-filled steel tube columns as sensor and actuator. The collected signal data from sensors in the process of concrete early-age strength growing were analyzed. The experimental study show that the amplitude of voltage response decreases with development of concrete early strength. The concrete early-age strength increases at a rapid rate in the first week and a slowly rate after the first week. It reaches the peak value after 28 days. Correspondingly, the voltage amplitude drops quickly during the first week and then decreases slowly with hardening of concrete, the variation curves of voltage amplitude matches the curves of concrete early strength. The proposed piezoelectric-based smart aggregate monitoring method can be used to monitor the development process of concrete early strength effectively. The results can provide reference for engineering practice.

**Key words:** piezoelectric ceramics; smart aggregates; concrete filled steel tube; early-age strength; monitoring

### 0 引言

混凝土结构广泛的应用于工程实际建设, 早期强度是判断混凝土结构在施工和后期使用中的一个重要性能评价参数。对于混凝土早期强度监测的传统方法主要有实时测定和提前预测两类<sup>[1-3]</sup>。实时监测是指在施工现场或实验室基于现有的规范和标

准对混凝土早期强度进行监测, 主要包括回弹法、超声法、超声回弹综合法、拔出法和钻样取芯法等。提前预测法是指根据混凝土早期强度变化曲线来推定混凝土早期强度实时变化趋势, 主要包括快速试验强度, 快速测定水灰比, 利用成熟度推定和早龄期强度推定等方法。虽然这些混凝土早期强度测定法都已

收稿日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378077); 湖北省自然科学基金(创新群体)资助项目(2015CFA029); 湖北省教育厅科技计划重点基金资助项目(D20131205)

作者简介: 何明星(1992-), 男, 河南信阳人, 硕士生, 主要从事智能材料与钢管混凝土结构的研究。E-mail: hmx669562@163.com。通信作者: 杜国锋(1975-), 男, 教授, 博士。E-mail: gfd\_1125@126.com。

较成熟,各具优点,但这些方法需在现场或实验室进行大量的试验,需很多复杂特殊的设备及大量的现场试验操作,这样使整个监测过程复杂且目的单一。

近年来,压电智能骨料成为了土木工程领域研究的热点,尤其是在结构损伤和健康监测方面<sup>[4-7]</sup>,大量学者对此作出了广泛的研究并取得了相应的成果,部分成果应用到了实际工程中。本文基于压电陶瓷兼具激励和传感的功能来实现对混凝土早期强度的监测,通过监测预埋在钢管混凝土内部压电智能骨料在混凝土早期强度发展过程中信号幅值的变化,判断混凝土早期强度随龄期的增长情况,验证所提方法的有效性。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设计与制作

选取 Q235 钢材作为试验模型,钢管柱的尺寸为 200 mm×200 mm×500 mm,壁厚 2.03 mm,钢材的材料性能参数如表 1 所示。将智能骨料(SA)预埋于钢管预定的位置,如图 1 所示。SA 尺寸为 20 mm×20 mm×25 mm,底板尺寸为 24 mm×24 mm,厚度为 5 mm,主要考虑了后期对钢管混凝土内部的应力监测及损伤监测,如图 2 所示。混凝土设计强度等级取 C30,混凝土配合比为  $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{石子})=175:343:621:1\ 261$ ,混凝土实测 28 d 立方体抗压强度为 29.42 MPa。

表 1 钢材的性能参数

钢材规格	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	抗拉强度 $f_u/\text{MPa}$	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Q235	289	396	7 850

钢材规格	泊松比	管壁厚 度/mm	钢管高 度/mm
Q235	0.30	2.03	500

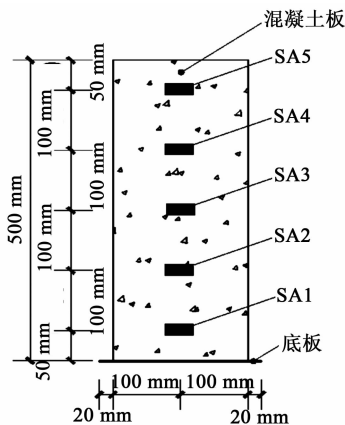


图 1 SA 布置关系图



图 2 智能骨料

### 1.2 试验装置及实验过程

试验装置由 RIGOL 生产的 DG1000 函数发生器、HK9209 电荷放大器、RHb21 压电陶瓷驱动电源、INV3018C 数据采集系统、智能骨料和试件构成。试验中由 DG1000 产生信号经 RHb21 驱动电源进行功率放大传递给激励器 SA3,由 SA3 产生应力波经混凝土传递,其他传感器接收的应力波信号经 HK9209 放大,最终由 INV3018c 采集,实验装置示意图及现场分别如图 3、4 所示。考虑不同频率的影响,激励频率分别采取 10 kHz、30 kHz、50 kHz。SA1、SA2、SA4、SA5 作为传感器,SA3 作为驱动器。试验养护环境为自然环境,实测实验室平均温度为 27 °C,试验过程中未考虑温度和湿度对混凝土早期强度的影响。

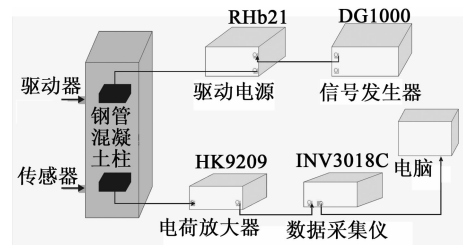


图 3 试验布置示意图



图 4 试验装置

## 2 压电效应基本原理

### 2.1 压电效应

压电效应是压电材料的一项重要特性。当压电

材料在外荷载作用下时,元件会产生机械变形,导致材料内部的正负电荷向元件的2个对立表面移动而产生极化,在表面形成异号的束缚电荷,这种现象称为正压电效应。在压电材料的表面施加电压,在电场作用下,材料内部的电荷产生相对移动,使压电元件产生变形,这种现象称为逆压电效应。

利用压电元件的正负压电效应可将压电陶瓷制作成能带有发射和接收功能的驱动器和传感器,将传感器预埋在混凝土构件内部,可用于对结构的健康监测和损伤监测。

## 2.2 压电波动法原理

压电波动法的原理是将成对或多个压电智能骨料预埋在构件的内部,将一个智能骨料作为驱动器发射应力波,其他智能骨料作为传感器接收应力波信号。通过判断构件在不同条件下传感器接收信号与激励器发射信号和接收信号相互间的差异,以此来判断结构的健康状态以和进行损伤诊断及早期强度监测,其中信号的差异包括能量幅值衰减、模态变化、相位变化、时间延迟等。

## 2.3 早期强度监测原理

混凝土的早期强度发展是指混凝土浇筑后随着养护时间的增加,混凝土逐渐凝结硬化,强度逐渐增加的一个过程。在自然条件下,混凝土早期强度在初始的一个周内增加较快,迅速的凝结硬化,随后逐渐减慢,28 d后强度达到稳定。这个过程中伴随着混凝土弹性模量的变化,应力波在混凝土不同条件下传播的幅值会产生变化。波动方程<sup>[8]</sup>为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_b^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $c_b^2 = E/\rho$ ,  $E$  为材料的弹性模量,  $\rho$  为材料的密度;  $u$  为位移;  $x$  为特定位置坐标。

经一段时间后,反应谱的平均功率  $P$  可表示为

$$P = EA^2 \omega^2 / (2c_b) = \sqrt{E\rho} A^2 \omega^2 / 2 \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为频率;  $A$  为信号幅值,且

$$A = \left( \frac{1}{\omega} \right) \left( \frac{4P^2}{E\rho} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

国内《混凝土结构设计规范》规定在标准养护条件下混凝土早期强度与弹性模量  $E_c$  间的关系<sup>[9]</sup>为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (4)$$

式中  $f_{cu}$  为混凝土龄期 28 d 立方体抗压强度。

由式(3)可知,  $A$  主要与信号的频率、功率及材

料弹性模量与密度有关,给定的激励信号功率和频率不变,因而材料的弹性模量是影响信号幅值大小的主要因素。由式(4)可知,随着混凝土的硬化,弹性模量随着混凝土的强度增加而增加,信号幅值会随着弹性模量的增加而减少。弹性模量决定混凝土的强度,因此,可通过观察信号幅值的衰减来判断弹性模量的状态,以此评估混凝土早期强度的发展情况。

## 3 试验结果及分析

混凝土浇筑完成后持续 28 d 内在同一时间点对钢管混凝土柱的各个智能骨料进行监测。混凝土 28 d 标准立方体抗压强度是混凝土强度等级的评价指标,是混凝土结构设计的重要参数,实测混凝土试块 28 d 立方体抗压强度平均值为 29.42 MPa。图 5~7 分别为激励频率 10 kHz、30 kHz 和 50 kHz 作用下 4 个传感器在不同时间点对应的电压幅值。图 8 为文献[8]中经试验机按混凝土强度标准测定方法测出的混凝土早期强度变化曲线。图 9 为 SA4 在不同激励信号下的电压幅值。

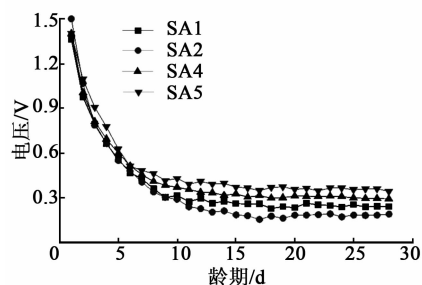


图 5 10 kHz 下的电压幅值

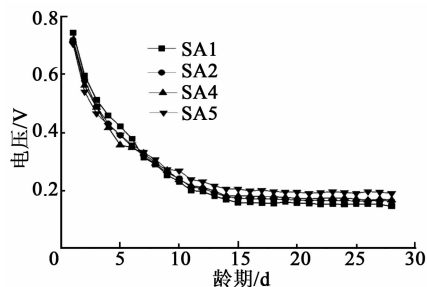


图 6 30 kHz 下的电压幅值

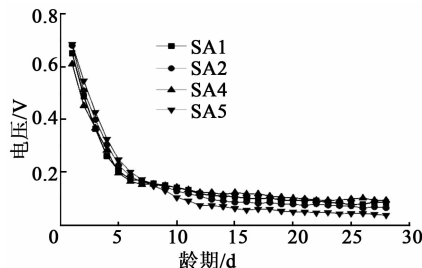


图 7 50 kHz 下的电压幅值

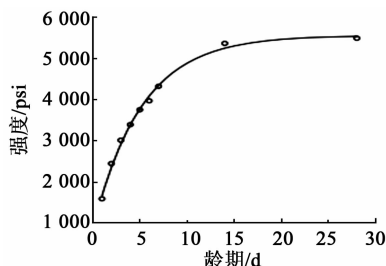


图8 混凝土早期强度增长曲线

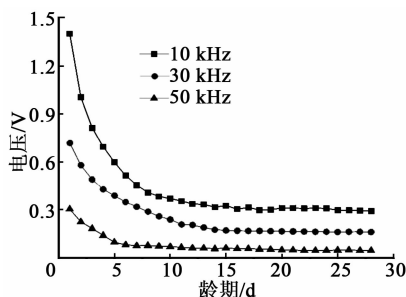


图9 SA4在不同激励频率下的电压幅值

由图5~7可看出,各个传感器接收到的信号变化趋势相似,在初始的1周内,信号幅值以较快的速度减小,在随后的时间里,幅值减小速度减慢,在28 d后信号幅值变为1个定值。由图8可看出,混凝土的早期强度在初始的1周内以较快的速度增长,随后增长速度减慢,在28 d达到1个定值。传感器信号幅值随龄期的变化曲线与混凝土早期强度增长曲线变化趋势相反,说明信号幅值随着混凝土强度的增加而减少。图中各个智能骨料输出电压幅值存在差异,与此同时,输出电压幅值在混凝土浇筑1周后不等,主要是因各个智能骨料沿钢管混凝土柱竖向布置,驱动器位于柱子中部使传感器至其距离不同,应力波在混凝土中传播时会产生衰减,使应力波能量随着路径的增大而减少,传播路径越长衰减幅度越大。

由图9可知,在不同的激励频率下,各个传感器有相同的变化趋势,同一时间点所监测到的信号激励频率越高所对应的信号幅值越小,由于应力波在混凝土介质中传播时衰减系数随应力波的频率增加而增大,这与文献[10]中的结论相似。低频信号下频谱曲线衰减的斜率大于高频信号下的斜率,说明低频下传感器接收信号的幅值随着混凝土强度增加变化越明显。因此,对混凝土早期强度监测宜采用低频激励信号来进行激发。

#### 4 结论

1) 根据波动方程的理论,推导出了压电智能骨料监测混凝土早期强度的原理,传感器接收信号幅值与混凝土的弹性模量的增长呈相反的趋势。

2) 信号幅值衰减的趋势与混凝土强度增长趋

势相似,在初始的1周衰减速度较快,1周后衰减速度减慢,最终达到稳定。混凝土强度增长趋势是在初始的1周内增长速度较快,1周后增长速度减慢,最终达到1个恒定值。

3) 低频信号相对于高频激励信号对于混凝土早期强度监测的效果更显著。

4) 智能骨料(SA)可用于对结构多种参数进行监测,既可用于前期的混凝土早期强度监测,还可用于后期对结构的健康监测和损伤监测。

#### 参考文献:

- [1] 张建仁,王海臣,杨伟军. 混凝土早期抗压强度和弹性模量的试验研究[J]. 中外公路, 2003, 23(2): 89-92. ZHANG Jianren, WANG Haichen, YANG Weijun. Experimental study on early compressive strength and elastic modulus of concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(2): 89-92.
- [2] 余亮平. 基于封装埋入式 PZT 的混凝土强度监测试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [3] MORI K, SPAGNOLI A. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete[J]. NDT & E International, 2002(35): 399-406.
- [4] 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.
- [5] 杜国锋, 吴方红, 周博, 等. 基于压电阻抗方法的钢管裂纹损伤识别试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 226-229. DU Guofeng, WU Fanghong, ZHOU Bo, et al. Experiment on crack damage identification of steel pipeline based on piezoelectric impedance method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(2): 226-229.
- [6] HOU S, ZHANG H B, OU J P. A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(10): 105035.
- [7] 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. XU Bin, LI Bing, SONG Gangbing, et al. Detection of the debonding defect of concrete-filled steel tubes with piezoceramics [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 86-96.
- [8] GU H, SONG G, DHONDE H, et al. Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(6): 1837-1845.
- [9] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范(GB50010—2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 孙威, 阎石, 蒙彦宇, 等. 压电陶瓷混凝土结构应力波衰减特性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(5): 833-837. SUN Wei, YAN Shi, MENG Yanyu, et al. Experimental research on stress wave attenuation behavior of concrete structure with piezoelectric ceramic sensors[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(5): 833-837.