

# 压电智能骨料的动态响应性能试验研究\*

张晓悦<sup>1</sup>, 任晓丹<sup>1</sup>, 李 杰<sup>1,2♣</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 基于压电陶瓷材料, 设计制作了能够埋入混凝土内部的“智能骨料”, 作为传感器进行动态应力测量。根据压电陶瓷片尺寸将传感器分为 A 型和 B 型。采用电荷放大器和 LMS 数据采集系统, 对应力传感器在动力加载下的响应进行试验分析。研究发现, 传感器表面实测应力与电荷放大器输出电压之间有良好的线性关系; 在相同的加载速率下, B 型应力传感器的灵敏度系数要高于 A 型应力传感器, 量程小于 A 型应力传感器。

**关键词:** 压电陶瓷; 混凝土; 应力传感器; 动态响应

**中图分类号:** TM282

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)01-0165-06

## 0 引言

正确测量混凝土结构中的应力分布状况, 对结构的性能监测、健康诊断和灾害防御均有重要意义。传统的应力测量大都采用在构件表面粘贴应变片的方法, 通过测量应变、结合材料的弹性模量间接获得应力数据。这种方法虽然简单直观、成本低廉, 但并不能测定结构在非线性受力阶段的应力, 并且难以通过粘贴应变片的方法获得混凝土内部的应力数据。为测量混凝土内部应力, 需要发展新的应力传感器。

1880 年居里兄弟发现压电效应, 在此后的 100 多年间, 对压电材料的研究受到越来越多的重视 (张福学, 2001)。压电材料具有优良的频率特性和可集成特性, 频响范围宽、敏感频率高, 在土木工程健康检测、结构振动控制及压力与应力测量方面有广泛的应用。压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramics, PZT) 作为压电材料的一种, 能够有效实现电信号与力信号的转换, 为应力测量提供了可能。Tracy 和 Chang (1998a, b) 率先将压电陶瓷作为传感器用以识别复合板受到的冲击作用。陈雨等 (2005) 通过分级加载试验, 发现 PZT 元件参数 (如压电陶瓷在谐振点和反谐振点处的阻抗、静态电容与动态电容等) 与应力之

间有着近乎线性的关系。Song 等 (2007a) 将 PZT 传感器埋入钢筋混凝土梁, 通过冲击试验发现力锤输出的力信号峰值与 PZT 传感器输出的电压信号峰值间有明显的线性关系。湖南大学许斌团队 (李立飞, 2011; 刘益明, 2013) 发明了基于压电陶瓷的混凝土动态应力传感器, 并提出了相应的标定方法, 对传感器在冲击荷载、简谐荷载及方波荷载作用下的灵敏度进行了标定。研究发现, 由于压电陶瓷材料的压电常数本身有一定的离散性, 而压电陶瓷片的焊接和封装过程难免会有一定差异, 因此制成的传感器的灵敏度也会有一定的离散性。截至目前, 对于在混凝土研究中应用的压电陶瓷应力传感器, 大多数研究主要集中于冲击荷载作用试验。本文在前人基础上, 设计并制作了一批压电陶瓷应力传感器, 通过系列动力加载试验测量传感器表面荷载与输出电压, 建立应力—电压关系, 为混凝土中的应力测量提供新方法。

## 1 压电常数测定

当对压电陶瓷施加机械变形时, 就会引起内部正负电荷中心发生相对移动而产生点的极化, 从而导致元件两个表面上出现符号相反的束缚电荷, 电荷密度与单位面积上的外力成比例, 这种

\* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51261120374, 91315301, 51208374) 资助.

♣ 通讯作者: 李杰 (1957~), 同济大学特聘教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事随机动力学, 混凝土损伤力学、生命线工程研究等. E-mail: lijie@tongji.edu.cn.

现象称为正压电效应。压电常数是表征压电材料压电性能的重要参数。一般认为,压电常数越高,压电材料实现电能与机械能间相互转换的能力越强,材料的压电性能越好(李春雷等,2009)。

本文试验采用上海联能科技有限公司生产的 PZT-5A 型压电陶瓷,如图 1 所示,压电陶瓷分为 5 mm×5 mm×0.3 mm (A 型) 和 10 mm×10 mm×0.3 mm (B 型) 两种尺寸类型,生产厂商给出的压电常数参考值为  $450 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$ 。选择两种规格尺寸的压电陶瓷片各 75 片,采用该公司生产的 YE2370A 型  $d_{33}$  测量仪进行压电常数测量,

表 1 压电常数  $d_{33}$  测量结果 (单位:  $10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$ )

Tab. 1 Measurement results of piezoelectric constant  $d_{33}$

尺寸规格	均值	标准差	变异系数	测量值与均值间最大偏差	仪器误差
A 型	489.82	16.157 2	3.30%	41 (8.37%)	$\pm 5$
B 型	441.17	17.060 1	3.87%	34 (7.71%)	

结果如表 1 所示。由表 1 可见,压电陶瓷片的压电常数具有一定离散性,且样本均值与生产厂商给出的参考值之间有一定偏差。图 2 为测得压电常数分布情况及按照高斯分布拟合的结果,从图中可知,对于同批次、同尺寸的压电陶瓷,其压电常数近似满足正态分布。

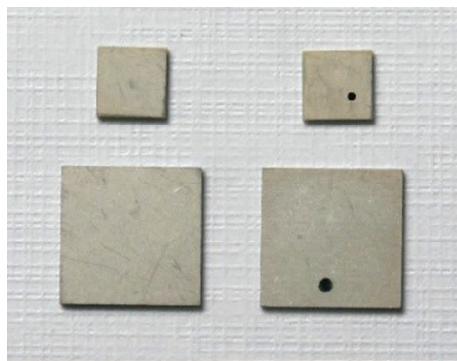


图 1 两种尺寸类型的压电陶瓷片

Fig. 1 Two kinds of PZT in different sizes

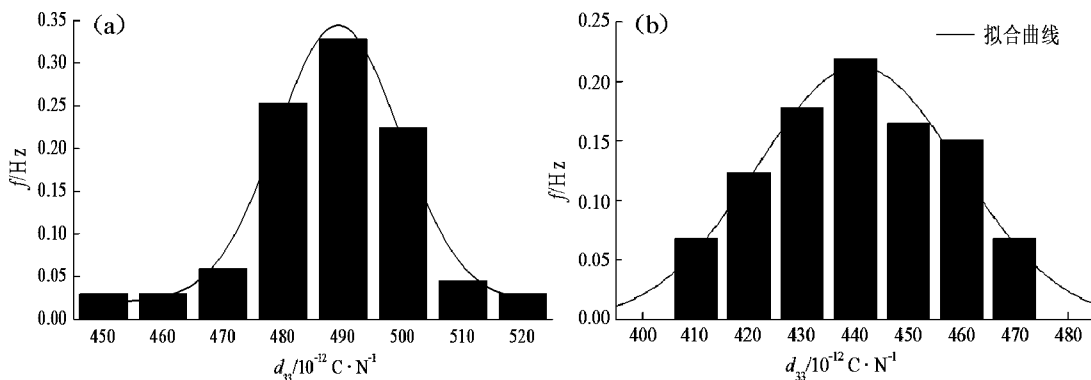


图 2 A 型 (a)、B 型 (b) PZT 压电常数分布情况及拟合曲线图示

Fig. 2 Distribution and fitting curve of piezoelectric constant  $d_{33}$  of PZT in the A (a) and the B (b) type

## 2 应力传感器设计

压电陶瓷片与结构主体有粘贴式和埋入式这两种结合方式(孙威,2009)。“智能骨料”即为埋入式的代表(Song *et al.*, 2007b; 蒙彦宇等, 2009)。本文试验所制作的应力传感器由基座、压电陶瓷片、导线、环氧树脂及盖板组成,如图 3a 所示。基座由水泥净浆浇筑而成,浇筑时预留尺寸约为  $2.0 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的凹槽。制作应力传感器时,首先在导线一端焊接压电陶瓷片并做防水绝缘处理,如图 3b 所示,在导线另一端焊接 BNC 接头。用 502 胶水把处理过的压电陶瓷粘结在基座

上,如图 4 所示,并将导线及焊点置于凹槽内,使得压电陶瓷片与基座表面紧密结合。为满足防水绝缘性能和一定的机械强度,在导线与凹槽之间填充环氧树脂。最后在压电陶瓷表面涂抹环氧树脂胶,覆盖钢盖板,保证传感器受力面水平。

## 3 应力传感器的标定试验

由于压电陶瓷传感器的输出阻抗较高,输出信号非常微弱,为保证一定的测量精度,必须使其接入一个高输入阻抗的前置放大器(赵燕, 2010)。测量系统联接如图 5 所示。由于压电传感器既可以等效为一个与电容串联的电压源,又可

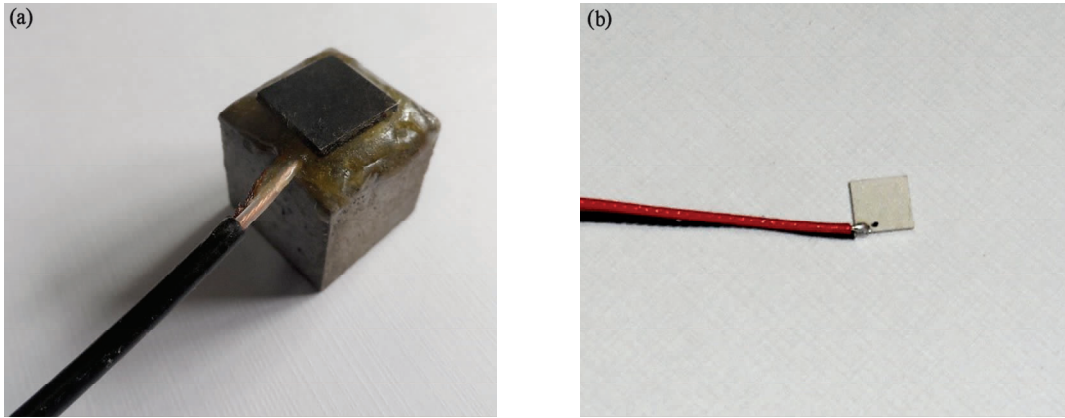


图 3 压电陶瓷应力传感器 (a) 及焊接导线的 A 型压电陶瓷片 (b)

Fig. 3 PZT stress sensor (a) and PZT in A type with welded wire (b)

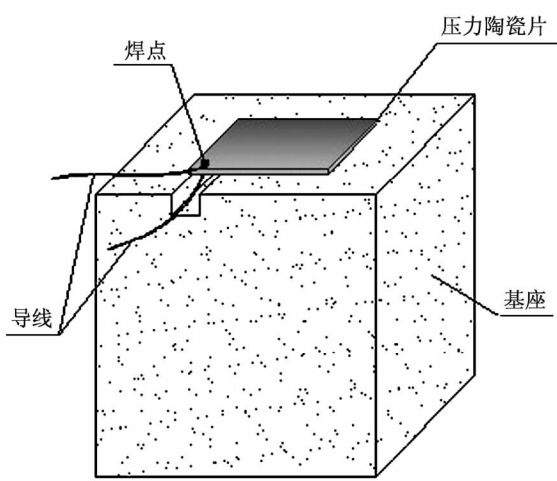


图 4 PZT 与水泥基座粘结示意图

Fig. 4 Sketch map of PZT coherent with cement basement

以等效为与电容并联的电荷源，因此对应前置放大器也有两种形式：电荷放大器与电压放大器（周继明等，2005）。本实验采用瑞士奇石乐（KISTLER）公司生产的 ICAM5073A 工业型电荷放大器。图 6 所示为简化后的等效电路图，图中  $C_a$ 、 $C_c$ 、 $C_i$  和  $C_f$  分别为压电陶瓷的电容、电缆电容、放大器的输入电容和反馈电容。当放大器增益  $A$  足够大、但传感器工作频率很低时，放大器输出电压的幅值为

$$U_0 = \frac{-\omega Q}{\sqrt{(1/R_f)^2 + \omega^2 C_f^2}}. \quad (1)$$

式 (1) 表明，电荷放大器的输出电压幅值  $U_0$  不仅与输入电荷量  $Q$  有关，而且与反馈网络的元件

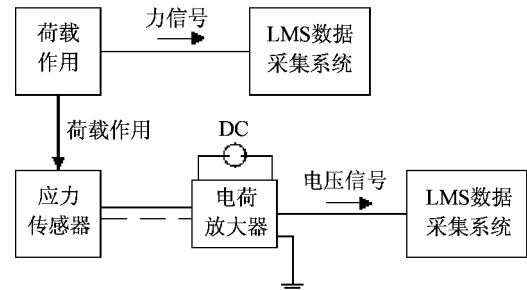


图 5 测量系统联接示意图

Fig. 5 Sketch map of measurement system connection

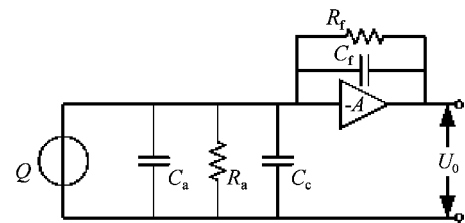


图 6 传感器与电荷放大器联接的简化等效电路图

Fig. 6 Simplified equivalent circuit of sensor connected with charge amplifier

参数  $C_f$ 、 $R_f$  和传感器信号频率  $\omega$  有关。若  $C_f$ 、 $R_f$  与  $\omega$  不变，则输出电压幅值与输入电荷量成正比。

### 3.1 试验装置

为满足加载需求，试验使用圆钢、钢板与六角螺母制作了简易的反力架，其中圆钢直径为 36.18 mm，底钢板厚度为 40.03 mm，上部钢板厚度为 30.27 mm，如图 7a 所示。试验选用安瑞（ANRUI）公司生产的 KMB 垫圈力传感器（电阻式力传感器），实际灵敏度校准值为  $0.59676 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$ 。采用 LMS 数据采集系统及其

配套装置收集信号。图 7b 所示为试验加载装置, 从上到下依次为压电陶瓷应力传感器、刚性垫块、KMB 垫圈式力传感器和分离式油压千斤顶。应力传感器编号及加载速率设定如表 2 所示。

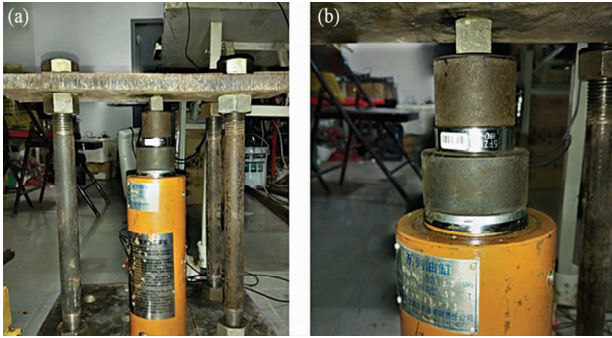


图 7 简易反力架 (a) 及加载装置 (b)

Fig. 7 Simplified reaction frame (a) and the loading device (b)

表 2 应力传感器编号及加载速率设定

Tab. 2 The number of stress sensor and the setting of loading rate

应力计编号	应变率/ $s^{-1}$	压电陶瓷尺寸/ $mm^3$	应力计尺寸/ $mm^3$
A-11(12~16)	$10^{-2}$	$5 \times 5 \times 0.3$	$20 \times 20 \times 20$
B-11(12~16)	$10^{-2}$	$10 \times 10 \times 0.3$	$20 \times 20 \times 20$
A-21(22~26)	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 5 \times 0.3$	$20 \times 20 \times 20$
B-21(22~26)	$5 \times 10^{-3}$	$10 \times 10 \times 0.3$	$20 \times 20 \times 20$

### 3.2 试验结果

设定采样频率为 16 384 Hz, 空采 4 s 噪声, 从第 4 s 开始加载。每完成一次加载即可通过 KMB 传感器得到一组力的时程曲线, 如图 8a 所示。将测量荷载除以应力传感器受荷面积即得到应力时程曲线, 通过压电陶瓷应力传感器可以得到一组电压时程曲线, 如图 8b 所示。将两条曲线的初始时刻点与峰值点之间的部分进行线性拟合, 即得到应力传感器的灵敏度系数, 如图 9 所示。绘制所有样本的应力—电压关系, 并按所有有效样本给出拟合曲线应力—电压关系, 如图 10 所示。

A 型和 B 型应力传感器在动载作用下的应力与电压线性相关系数及传感器灵敏度系数的均值、标准差、变异系数如表 3 所示。由表 3 可见: 电压信号与应力信号的线性相关系数均在 0.95 以上, 线性相关度较高, 可以认为压电陶瓷应力传感器的测量结果能够反映真实应力水平。B 型应力传感器的灵敏度系数均值要远大于 A 型应力传感器,

根据式 (1), 在  $C_f$ 、 $R_f$  与  $\omega$  不变时, 电荷放大器输出电压幅值与输入电荷量成正比, 而 B 型应力传感器的平面尺寸比 A 型应力传感器大, 表面应力相同时, B 型应力传感器产生更多的电荷量, 因此其灵敏度系数大。但由于数据采集系统电压采集范围一般在  $\pm 10$  V 范围内, B 型应力传感器的灵敏度系数大, 势必造成其测量的应力范围小。表 3 统计结果显示, A 型应力传感器灵敏度系数离散性要大于 B 型应力传感器, 这是因为压电陶瓷片在焊接和封装过程中难免存在差异, 电荷在传输过程中也会受到一定干扰, 产生电荷损耗, 而压电陶瓷材料的尺寸越小, 同等应力水平下产生的电荷量越少, 这些误差的相对影响就越明显。

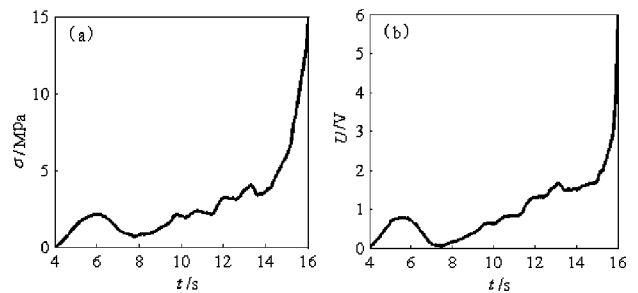


图 8 A-21 压电陶瓷应力传感器的荷载 (a) 与电压信号 (b) 时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of stress (a) and voltage signal (b) of A-21 PZT stress sensor

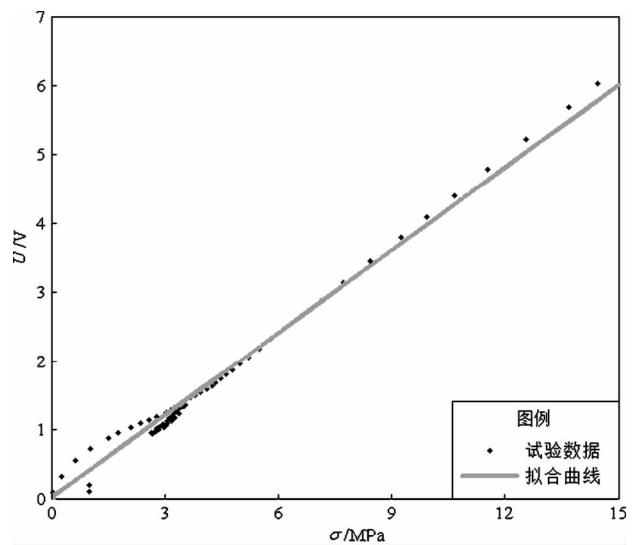


图 9 A-21 压电陶瓷传感器应力—电压曲线及线性拟合结果

Fig. 9 Stress-voltage curve and linear fitting result of A-21 PZT sensor

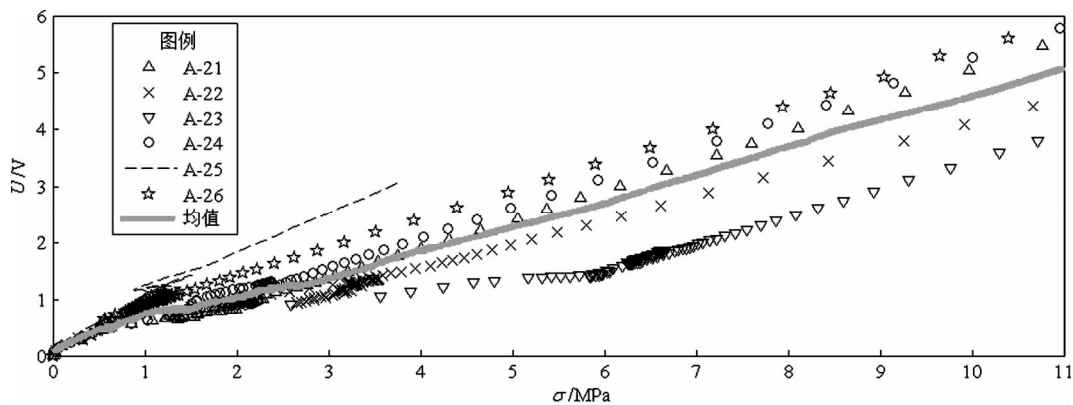


图 10 A 型应力传感器试验结果（应变率单位： $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）

Fig. 10 Test result of stress sensor in type A (the unit of strain rate is  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

表 3 应力传感器线性相关系数与灵敏度系数

Tab. 3 Linear correlation and sensitivity coefficients of stress sensor

应力计编号	应变率/ $\text{s}^{-1}$	线性相关系数			灵敏度系数/ $\text{V} \cdot \text{MPa}^{-1}$		
		均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数
A-11 (12~16)	$10^{-2}$	0.965 4	0.038 3	3.98%	0.463 7	0.104 8	22.59%
A-21 (22~26)	$5 \times 10^{-3}$	0.981 2	0.016 7	1.70%	0.556 9	0.103 9	18.66%
B-11 (12~16)	$10^{-2}$	0.965 9	0.016 1	1.66%	4.397 8	0.673 8	15.32%
B-21 (22~26)	$5 \times 10^{-3}$	0.966 1	0.031 4	3.25%	3.802 7	0.691 3	18.18%

因此，虽然 A 型压电陶瓷片压电常数的离散性小于 B 型，但 A 型应力传感器灵敏度系数的离散性却大于 B 型。综合考虑，笔者认为 A 型应力传感器的性能优于 B 型。

4 结论

本文基于压电陶瓷材料设计制作了能够埋入混凝土内部的“智能骨料”，并对其进行动态响应试验，通过分析得到以下结论：

- (1) 压电陶瓷应力传感器在应变率为  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的动荷载作用下，输出的电压信号与作用在传感器上的荷载呈现明显的线性关系，线性相关系数在 0.95 以上。结果表明：应变率不小于  $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时，A、B 型应力传感器均可以反映实际的应力水平及其变化趋势。
- (2) 在相同的加载速率下，B 型应力传感器的灵敏度要远高于 A 型应力传感器，但其量程要远小于 A 型应力传感器。可通过减小面积等方法来突破量程方面的限制，以提高应力传感器的使用范围。

(3) 应力传感器的灵敏度系数具有一定的离散性，灵敏度系数的变异系数一般在 20% 左右，这会对实际测量造成一定影响。在实际应用中，可以通过改进焊接方法、严格控制封装过程等手段，尽可能控制应力传感器灵敏度系数的离散性。

参考文献：

陈雨,文玉梅,李平等. 2005. 混凝土中压电陶瓷在变载荷作用下的特性研究[J]. 压电与声光,27(6):700-703.

李春雷,李吉超,赵明磊. 2009. 压电铁电物理[M]. 北京:科学出版社,73-79.

李立飞. 2011. 基于压电陶瓷的应力测量和混凝土构件的损伤识别研究[D]. 长沙:湖南大学.

刘益明. 2013. 基于嵌入式压电陶瓷的混凝土动态应力监测研究[D]. 长沙:湖南大学.

蒙彦宇,阎石,孙威. 2009. 利用压电波动法对混凝土偏心受压柱裂缝实时监测的试验研究[J]. 混凝土,(9):10-13.

孙威. 2009. 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.

张福学. 2001. 现代压电学(上册)[M]. 北京:科学出版社,84-90.

赵燕. 2010. 传感器原理及应用[M]. 北京:北京大学出版社,136-143.

周继明,江世明,彭解华. 2005. 传感技术与应用[M]. 长沙:中南大学出版社,135-140.

- Song G, Gu H, Mo Y L, *et al.* 2007b. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 3(16):959–968.
- Song G, Olmi C, Gu H. 2007a. An overheight vehicle-bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2(16):462–468.
- Tracy M, Chang F. 1998a. Identifying impacts in composite plates with piezoelectric strain sensors, Part I: Theory [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9(11):920–928.
- Tracy M, Chang F. 1998b. Identifying impacts in composite plates with piezoelectric strain sensors, Part II: Experiment [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9(11):929–937.

## Research on Dynamic Response Performance Experiment of PZT – based Smart Aggregate

ZHANG Xiaoyue<sup>1</sup>, REN Xiaodan<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>

(1. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

(2. *State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

### Abstract

Based on the piezoelectric ceramics (PZT), we designed and manufactured the smart aggregate which can be embedded in concrete to measure the dynamic stress as stress sensor. According to the size of PZT, we divided the stress sensors into type A and type B. Using charge amplifier and LMS data acquisition system, we tested the response of the stress sensors under dynamic loading. The experimental result shows that there has a fine linear relationship between the sensors' surface stress and the output voltage signal from charge amplifier. Under the same loading rate, the sensitivity coefficient of stress sensor B is higher than that of the sensor A, but the range of sensor B is smaller than that of the sensor A.

**Key words:** piezoelectric ceramics; concrete; stress sensor; dynamic response