

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.018

压电智能骨料动态拉应力标定试验研究*

张海滨^{1,3}, 侯爽², 欧进萍^{1,3}

(1.哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院,广东深圳518055; 2.华南理工大学土木与交通学院,广东广州510641; 3.哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江哈尔滨150090)

摘要:为了监测混凝土内部受拉开裂损伤,提出了混凝土内部拉应力监测压电智能骨料,并对其进行了动态拉应力标定试验研究。首先,制备4个压电智能骨料受拉试件,建立拉应力监测系统;其次,对压电智能骨料施加往复拉应力,标定得到其灵敏度系数;然后,对压电智能骨料试件施加单调荷载直至其受拉破坏,得到其抗拉强度及输出的电压信号,对比了破坏过程的实际与监测荷载。结果表明,往复荷载作用下,SA输出与输入荷载呈良好的线性关系,SA的灵敏度系数一致性较好;单调荷载作用下,各SA抗拉强度均高于混凝土抗拉强度。综上,压电智能骨料有潜力应用于混凝土内部的拉应力监测。

关键词:钢筋混凝土;地震损伤;压电智能骨料;拉应力;标定

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0147-05

Experimental Study on Dynamic Tensile Stress Calibration of Smart Aggregate

ZHANG Haibin^{1,3}, HOU Shuang², OU Jinping^{1,3}

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;
2.School of Civil & Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
3.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: This paper proposed a smart aggregate (SA) sensor for tensile stress monitoring, which can be used to monitor tensile damage in concrete structures. The dynamic tensile stress calibration test was carried out on the sensors. Firstly, four test specimens with SAs were prepared and the tensile stress monitoring system was established. After that, cyclic tensile loads were applied on the SAs, and the sensitivities of SAs were obtained. Finally, monotonic loads were applied on the SAs till its failure. The tensile strength of SAs and their output voltages were obtained. The actual and measured loads were compared with each other. It can be found that there is a good linear relationship between the SA output and the applied load during cyclic reverse loading. Additionally, the sensitivities of SAs are in good consistence. The tensile strength for each SA is larger than the concrete tensile strength in monotonic loading. The test results indicate that the SA has the potential for internal tensile stress monitoring of concrete structures.

Keywords: reinforced concrete; seismic damage; smart aggregate; tensile stress; calibration

* 收稿日期:2019-01-04;修回日期:2019-01-17

基金项目:中国博士后科学基金(2017M621281)、哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室开放基金(HITCE201710)、国家自然科学基金项目(51678250,U1709207)资助

作者简介:张海滨(1988—),男,在站博士后。主要从事钢筋混凝土地震局部损伤监测研究。E-mail:zhanghb01@gmail.com

引言

混凝土结构被广泛应用于重要基础设施中,如大型水坝、核电站等。但是,由于混凝土材料的抗拉强度远低于其抗压强度,在往复动力荷载作用下(地震、疲劳等),极易发生受拉开裂破坏,影响结构的正常使用,甚至造成结构的失效。

近年来,结构健康监测逐渐成为研究热点。其中,混凝土结构内部的应力或应变状态监测已成为评价结构损伤状态的重要手段,可靠的监测传感器是开展健康监测的前提。

各国学者对混凝土结构内部拉应力监测的研究开展广泛。其中,应变片^[1]和光纤传感器^[2]可粘贴于复合或金属材料上,对混凝土内部应力/应变进行监测,但是在在大应变下混凝土与传感器封装材料容易发生界面剥离,导致测量结果失真。压阻传感器^[3-6]是将压敏材料埋入水泥砂浆中制成,具有混凝土相容性好、价格低廉等优点。但其容易受到外界环境温度和湿度的影响,而影响实际应用。G. Song等^[7]提出了压电智能骨料(Smart aggregate,简称SA)的概念,将PZT(Piezoelectric Ceramic transducer, 锆钛酸铅)埋入到水泥砂浆中制备成SA,用于混凝土早期强度、往复荷载作用下混凝土开裂和撞击造成的损伤监测;杨晓明^[8]采用预制的水泥基材料对PZT进行封装,改进了SA的结构,并进行了振动台试验,结果表明SA响应与外界荷载输入的频率特性一致。但是由于砂浆的强度较低,上述SA仅应用于幅值不超过7 MPa的混凝土压应力监测。S. Hou等^[9-10]进一步改进了SA的结构,采用花岗岩/大理石对SA进行封装,提高了其抗压强度,并应用于压、剪应力监测。由于现有SA的解调设备——电荷放大器的低频下限和最大电荷输入不能满足改进SA对混凝土高应力的监测需求;H. B. Zhang等^[11]设计并研发了电荷放大器,并对SA进行了受压标定,结果表明45 MPa以下,SA的线性度、一致性良好;随后,S. Hou团队^[12-15]将SA应用于普通、轻骨料、高强混凝土和钢筋混凝土的压应力监测,取得了良好的监测结果。但是,目前SA仅在受压荷载工况下进行了标定,而受拉荷载作用下SA的响应仍未知。

针对上述问题,本文开展SA在受拉荷载作用下的标定试验研究,共制备了4个受拉SA的试件。

对SA施加往复受拉荷载,建立了荷载输入与SA响应的关系。并对试件进行单调受拉加载直至破坏,得到SA的受拉强度和响应。

1 试件制备及试验装置

为了标定SA的受拉灵敏度,共制作了4个试件,命名为SA_01~04。如图1所示,SA主要由PZT片、大理石保护壳、环氧树脂和导线组成。其中PZT片为传感器的核心敏感元件,环氧树脂用于将PZT和保护壳粘接成整体,并起到绝缘、防潮的作用。SA的敏感方向垂直于其上下表面。所用PZT的边长为15 mm,厚度为0.3 mm,其性能指标详见文献[16]。制备完成后的SA为边长25 mm的正方体。

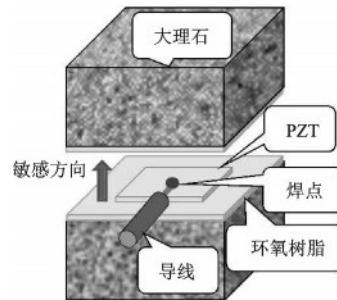


图1 SA组成结构

Fig.1 Schematic diagram of the SA components

将SA上下表面打磨粗糙,利用环氧树脂将上下表面分别与特制的加载连接件粘接为一体,并尽量确保SA的中轴线与连接件的中轴线重合。

所用加载装置如图2所示。采用10 kN液压伺服试验机(型号 ServoPulser 4890, Shimadzu)进行加载。SA输出的电荷通过HK9301电荷放大器转换

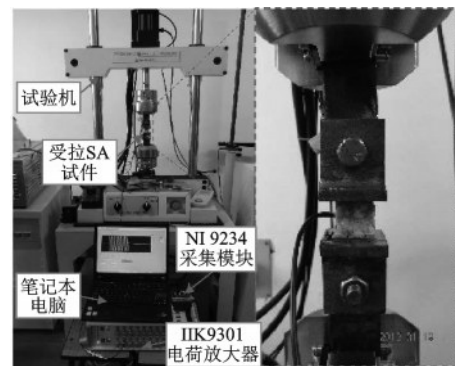


图2 试验装置

Fig.2 Experimental set-up

为电压信号后,采用NI9234模块进行数据采集,并实时反映到监视器上。试验机的荷载传感器信号单独输出。本文通过Matlab软件将SA和荷载信号同步到同一文件中。电荷放大器的增益为0.005,对应其反馈电容为200 nF。采集模块的采样率为1 666 Hz。

2 加载历程

本文采用的加载历程如图3所示。首先,采用力控制将荷载保持在0.6 kN,再采用幅值为0.4 kN的正弦荷载进行加载,对应应力变化范围为0.32~1.60 MPa,加载频率为3 Hz,共10个循环。然后,采用位移控制,对试件施加拉力直至其受拉破坏。

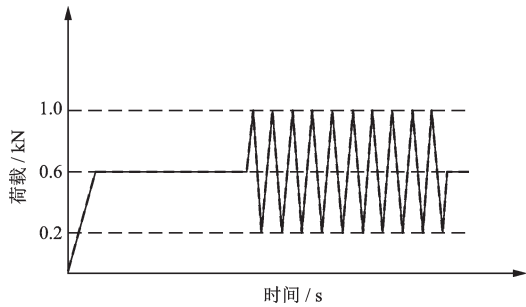


图3 标定试验采用的荷载历程示意

Fig.3 Loading scheme adopted in the calibration test

3 结果分析

以SA_01为例,其输出电压与施加应力如图4所示。由图可见,SA输出与输入荷载的波形、频率一致,无相位差。其余SA的结果与上述结果相似,说明了SA监测结果的可靠性。

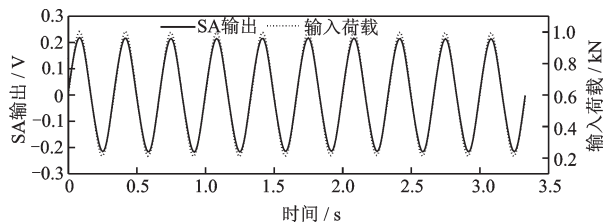


图4 SA_01输出及施加应力

Fig.4 Stress applied on SA_01 and its output voltage

如图5所示,SA_01的电压输出与施加荷载呈良好的线性关系。其中,拟合曲线的斜率即为SA的受拉灵敏度系数,试验中各传感器的灵敏度系数见表1。可见,除SA_02外,其余SA的灵敏度一致

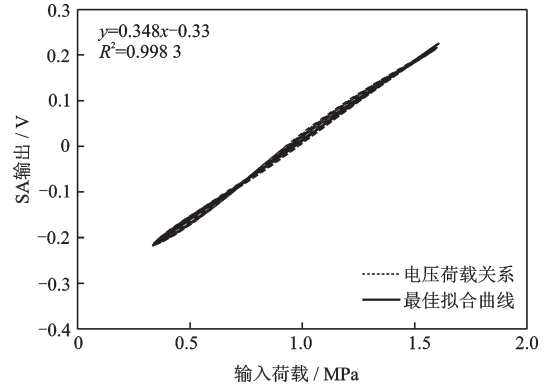


图5 受拉荷载下SA_01的灵敏度曲线

Fig.5 Sensitivity curve of SA_01 under tensile loading

性较好,推测SA_02灵敏度偏低的原因可能是由于上下表面不平行导致的。将SA_02灵敏度剔除,其余SA的平均灵敏度为0.334 V/MPa。根据电荷放大器反馈电容 C 与输入电荷 q 及输出电压 U 的关系为^[11]:

$$U = \frac{q}{C} \quad (1)$$

可得到其受拉灵敏度为 6.68×10^4 pC/MPa,为其受压灵敏度 1.42×10^5 pC/MPa^[11]的47%。造成这种差别的原因可能是由于PZT对拉、压应力的敏感程度不同。

表1 各传感器的灵敏度系数

Table 1 The sensitivity for each SA

编号	SA_01	SA_02	SA_03	SA_04
灵敏度/ (V·MPa ⁻¹)	0.348	0.229	0.321	0.334

对SA施加单调受拉荷载直至其破坏。其破坏模式如图6所示,可见除SA_02的破坏发生在传感器中部的大理石以外,其余破坏均发生在SA上下表面,靠近模具的大理石上。这可能是由于打磨过程中使得SA_02的上下表面不平行,导致加载过程中加载连接件对SA中部产生了弯矩作用,而靠近SA中部的弯矩最大,导致了破坏发生在中部。此外,由于弯矩作用,SA所受的拉应力一部分被弯矩作用产生的压应力抵消,进而造成了SA_02的灵敏度偏低。

以SA_01为例,其受拉荷载时程如图7所示,在230 s前,荷载匀速增加,加载速率约为0.025 MPa/s,破坏时的荷载为5.91 MPa。相应的SA输出电压时程如图8所示。由于破坏前加载速率较低,所用电荷放大器的低频下限不足,使得SA对该荷载响应

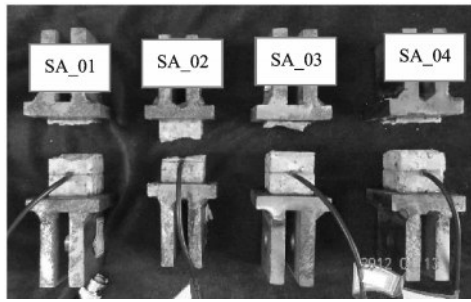


图6 传感器破坏照片

Fig.6 Failure mode of the SA sensor

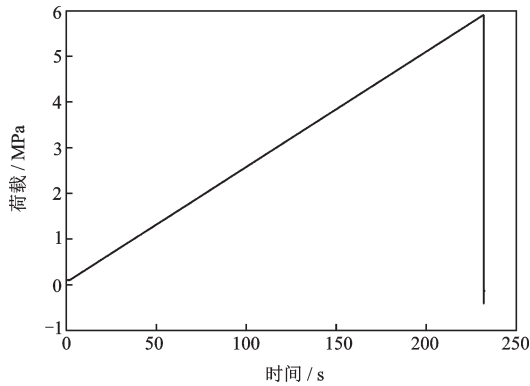


图7 SA_01受拉荷载时程

Fig.7 Time history of tensile stress for SA_01

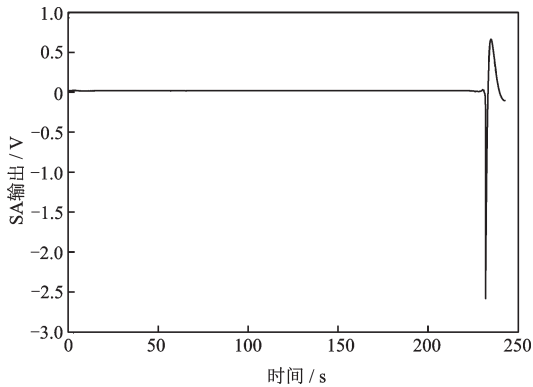


图8 SA_01电压输出时程

Fig.8 Time history of output voltage for SA_01

输出为0;在破坏瞬间,SA最大输出电压为-2.58V。随后产生了如文献[11]所述类似的电荷反向振荡现象。

利用之前标定试验得到的SA_01的灵敏度系数,结合单调加载破坏时SA的电压输出,可计算出破坏荷载应为7.41MPa,较实际的破坏荷载5.91MPa高出约20%,说明开裂破坏过程的受拉荷载被高估。所以受拉破坏过程的SA灵敏度需要进行适当修正。

其余3个试件的破坏强度分别为4.72、5.27、

5.53MPa,均大于普通混凝土的抗拉强度,且其余SA的输出与图8类似。所以,SA有潜力适用于混凝土内部的拉应力监测。值得注意的是,3个试件的抗拉强度变化趋势与其循环加载过程得到的灵敏度变化趋势一致,即灵敏度高的SA,其抗拉强度也相应高,进一步验证了由于各试件上下表面平行程度不同导致了灵敏度的差别的假设。

4 结论

对压电智能骨料SA进行了动态标定试验研究。共制备了4个试件,采用两种荷载类型加载:往复动态加载和单调加载至破坏。得到结论如下:

(1)往复荷载作用下,SA输出与输入荷载呈良好的线性关系。总体上,可能由于各试件上下表面的平行程度不同,导致SA灵敏度有一定差别。除SA_02的灵敏度偏小外,其余SA的灵敏度系数一致性良好,平均灵敏度为 6.68×10^4 pC/MPa,低于受压灵敏度。

(2)单调加载作用下,4个试件得到的抗拉强度均高于混凝土抗拉强度,但SA监测结果高估了实际荷载约20%,所以对于受拉开裂监测需要对SA的灵敏度进行修正。从试件的破坏形态来看,SA_02从试件中部破坏,而其它试件在靠近传感器的上部破坏;而且试件的抗拉强度与灵敏度的变化趋势基本一致,进一步验证了各试件上下表面平行程度不同的假设。

综上,SA有潜力应用于混凝土内部拉应力监测。

参考文献:

- [1] Feng J, Fu G, Belarbi D J. Measurement of concrete internal strain using a three-dimensional transducer system [J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 45 (5) : 467-475.
- [2] Tennyson R C, Mufti A A, Rizkalla S, et al. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10(3): 560-573.
- [3] Han B G, Yu X, Zhang K, et al. Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2011, 1 (1/2) : 17-24.
- [4] Ou J P, Han B G. Piezoresistive cement-based strain

- sensors and self-sensing concrete components[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2009, 20(3): 329-336.
- [5] Sun M Q, Liew R J Y, Zhang M H, et al. Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 65: 630-637.
- [6] Galao O, Baeza F J, Zornoza E, et al. Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 46: 90-98.
- [7] Song G, Gu H C, Mo Y L. Smart aggregates: multifunctional sensors for concrete structures—a tutorial and a review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(3): 33001.
- [8] 杨晓明. 土木工程结构的性能监测系统与损伤识别方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
Yang X M. Research on performance monitoring system and damage identification method for civil engineering structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] Hou S, Zhang H B, Ou J P. A PZT-based smart aggregate for seismic shear stress monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(6): 65012.
- [11] Zhang H B, Hou S, Ou J P. Smart aggregate-based seismic stress monitoring system using a specially designed charge amplifier[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27(3): 418-426.
- [12] Hou S, Zhang H B, Ou J P. SA-based concrete seismic stress monitoring: a case study for normal strength concrete [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 95041.
- [13] Zhang H B, Hou S, Ou J P. Smart aggregates for monitoring stress in structural lightweight concrete[J]. *Measurement*, 2018(122): 257-263.
- [14] Zhang H B, Hou S, Ou J P. Feasibility of SA-based concrete seismic stress monitoring for high-strength concrete [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28(17): 2428-2436.
- [15] Zhang H B, Hou S, Ou J P. Validation of finite element model by smart aggregate-based stress monitoring [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 4062.
- [16] 张海滨. 基于压电智能骨料的钢筋混凝土结构地震应力监测方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
Zhang H B. Seismic stress monitoring for RC structures based on piezoelectric smart aggregates [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)



(上接第 139 页)

- [11] Yaseri A, Bazyar M H, Hataf N. 3D coupled scaled boundary finite-element/finite-element analysis of ground vibrations induced by underground train movement[J]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 60(1):1-8.
- [12] 王子玉. 地铁车辆段环境振动现场试验与仿真分析 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
Wang Z Y. Field test and simulation analysis on environmental vibration of metro depot [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [13] Zhang X, Li X Z, Song L Z, et al. Vibrational and acoustical performance of concrete box-section bridges subjected to train wheel-rail excitation: field test and numerical analysis [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2016, 64(2):217-229.
- [14] ISO2631/1: Mechanical Vibration and shock-evaluation of human exposure to whole body vibration—Part1: General requirements [S]. Washington D. C.: ISO Standard, 1997.
- [15] 邱俊杰. 高架轨道交通引起环境振动的实测与评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
Qiu J J. Practical and evaluation research on the environmental vibration caused by elevated railroad traffic[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [16] 郑鑫, 陶夏新, 王福彤, 等. 轨道交通地面振动衰减关系中局部放大现象形成机理研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(3):35-40.
Zheng X, Tao X X, Wang F T, et al. Mechanism of local amplification in attenuation of ground vibration induced by rail traffic[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(3):35-40. (in Chinese)
- [17] 张啟乐, 刘林芽, 李纪阳. 地铁运行引起地面局部振动放大现象的数值分析[J]. *噪声与振动控制*, 2015, 35(2):116-120.
Zhang Q L, Liu L Y, Li J Y. Numerical analysis of ground vibration amplification phenomenon caused by subway operation [J]. *Noise and Vibration Control*, 2015, 35(2):116-120. (in Chinese)