

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230330001

剪应力压电智能骨料灵敏度便捷标定方法*

侯爽, 谭文玮

(华南理工大学土木与交通学院, 广州 510006)

摘要:大量混凝土结构在地震中出现显著剪切破坏特征,有必要开展混凝土剪应力监测。以PZT压电陶瓷为敏感传感元件的剪应力压电智能骨料传感器已被学者们证实能够实现混凝土内部剪应力的监测。然而,目前剪应力压电智能骨料的灵敏度标定试验依赖于高精密加载设备或大型结构构件,存在试验复杂、成本高以及标定后传感器无法重复使用等问题。本研究首先提出了一种基于单摆装置循环加载的剪应力压电智能骨料灵敏度便捷标定方法;其次,通过有限元和试验方法研究了加载位置变化对及单摆面外运动对灵敏度标定的影响;最后,通过该方法标定了一批剪应力压电智能骨料的灵敏度,并与精密加载获得的灵敏度进行了对比。本研究对提高混凝土结构剪应力监测精度具有重要意义。

关键词:剪应力监测;压电智能骨料;灵敏度标定

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1126-07

A Convenient Sensitivity Calibration Method for Piezoelectric Smart Aggregates for Shear Stress

HOU Shuang, TAN Wenwei

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Significant shear damage has been observed in numerous concrete structures during earthquakes, highlighting the necessity of monitoring shear stress in concrete. Piezoelectric smart aggregate sensors for monitoring shear stress, utilizing PZT piezoelectric ceramics as sensitive sensing elements, have been proven by researchers to effectively monitor the internal shear stress of concrete. However, current sensitivity calibration tests for piezoelectric smart aggregates for shear stress rely on high-precision loading equipment or large structural components, resulting in complex testing procedures, high costs, and non-reusability of sensors after calibration. First, this study proposed a convenient calibration method for sensitivity of piezoelectric smart aggregates for shear stress based on cyclic loading using a pendulum device. Furthermore, the influence of loading position variation and out-of-plane movement of the pendulum on sensitivity calibration was investigated through finite element analysis and experimental methods. Finally, the sensitivity of a batch of piezoelectric smart aggregates for shear stress was calibrated using this method and compared with the sensitivity obtained through high-precision loading. This research is of great significance for improving the accuracy of shear stress monitoring in concrete structures.

Keywords: shear stress monitoring; piezoelectric smart aggregate; sensitivity calibration

* 收稿日期:2023-03-30;修回日期:2023-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51978284)资助

作者简介:侯爽(1977—),男,教授,博导,博士。主要从事钢筋混凝土结构地震损伤及材料性能监测研究。

E-mail: cthous@scut.edu.cn

0 引言

截至目前,我国已投入大量资金与人力用于土木工程结构的发展。为了保持这些投资价值,必须注意对工程结构服役期间的健康状态进行监测与维护^[1]。我国是地震多发国,历次地震已造成大量的建筑物、桥梁及工程设施损坏或倒塌,人民的生命财产面临巨大威胁^[2]。震害调查显示,因剪跨比较小、轴压比较大、箍筋约束不足、混凝土强度不足等因素,大量框架柱抗剪强度不足,在震后出现了剪切斜裂缝、混凝土剥落等现象,甚至在柱身处被剪断,呈现明显的剪切破坏特征^[3-4]。因此,有必要对混凝土进行受剪监测^[5]。

关于直接测量混凝土内部剪应力的监测技术手段的研究国内外均鲜有报道。多数研究仅对混凝土构件的受剪性能进行定性研究,或者仅在混凝土构件的表面特定位置通过测量表面剪应变计算出剪应力,只有很少一部分传感器能够获取混凝土内部真实的剪应力值。J.E. Woods等^[6]将分布式光纤传感器(DOFS)布置于剪力墙表面的FRP板上,在剪力墙加载试验中测量了该剪力墙构件在循环往复加载下的受剪性能。S. Liu等^[7]采用声发射(AE)技术,对12根四点加载梁的剪切试验过程进行监测,验证了声发射源强度分布与梁内的剪切应力分布情况呈强相关性。K. Wilder等^[8]使用数字图像相关技术(DIC)测量了I型预应力混凝土梁的四点弯曲试验中受剪区域的三维位移和平面变形的结果,研究了预应力混凝土梁的剪切承载力和剪切力学行为。然而,以上提到的监测方法通常在构件的表面层次上进行,通过监测应变、频率等信息来间接计算构件局部的剪应力或整体的受剪性能等,无法直接、可靠地获取钢筋混凝土构件内部的剪应力,且受设备与材料的限制,对长期的结构健康监测适应性较差。

土木工程结构设计使用年限可达五十年甚至上百年^[9],因此保障混凝土应力监测传感器长期监测效果的关键是其稳定性以及与混凝土材料的相容性。事实上,许多研究表明,PZT(压电陶瓷)是一种在常温下表现出良好温度稳定性的压电材料^[10],且其压电常数在50年后下降不超过2%^[11],老

化问题可忽略不计,因此PZT十分适合作为混凝土应力监测传感器的传感元件。

为了直接高效地获取混凝土的剪应力,侯爽等提出了一种以PZT为核心传感元件的剪应力压电智能骨料^[12]。为与混凝土良好相容,该剪应力压电智能骨料选用两块相同尺寸的花岗岩作为支撑结构,其间放入P-5G剪切型PZT,并用高强环氧树脂将三者粘结,通过对侧受剪试验揭示了剪应力压电智能骨料对剪应力的敏感性及其应力传递关系。孔志豪等^[13]和杨树森等^[14]为了获取剪应力压电智能骨料在混凝土内部四周纯剪状态下的灵敏度,将上述剪应力压电智能骨料嵌入混凝土深梁后进行受剪试验,在均匀剪应力场内标定了剪应力压电智能骨料对混凝土剪应力的灵敏度。许斌等^[15]制作了一种利用剪切型PZT片作为传感元件的动态剪应力传感器,利用落锤试验机对空心薄壁混凝土圆筒施加冲击荷载的方式标定了传感器的灵敏度系数。Y.L. Ma等^[16]对PZT压电陶瓷块进行切割并用水泥砂浆填充,制备了一种剪应力水泥基压电复合传感器,并通过MTS伺服机对混凝土梁进行三点加载的方式验证了该传感器具有良好的力电线性关系。

然而,上述基于PZT压电陶瓷的剪应力传感器灵敏度标定方法需要通过精密加载设备或大型结构构件获取传感器的灵敏度,试验复杂、成本高,且只能有损标定,标定后传感器无法重复使用。因此有必要发展剪应力压电智能骨料的无损便捷标定方法。

本文提出了一种基于单摆装置加载试验的剪应力压电智能骨料灵敏度便捷标定方法。对压电智能骨料施加由单摆运动产生的周期性拉力,由此标定其灵敏度,并研究了单摆拉力位置影响及其一致性问题。

1 剪应力压电智能骨料灵敏度推导

剪应力压电智能骨料的结构如图1所示,其加工成型后的尺寸为25 mm×25 mm×25.2 mm,与混凝土中一颗粗骨料的尺寸相当,其内部传感元件为P-5G剪切型PZT压电陶瓷,尺寸为15 mm×15 mm×1 mm。

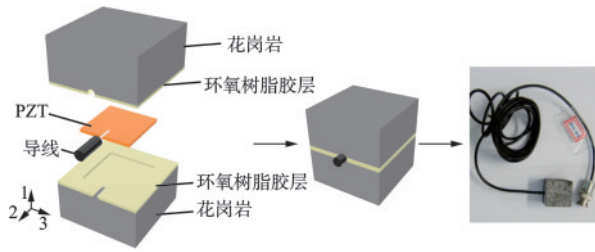


图1 剪应力压电智能骨料的组成结构

Fig.1 Composition and structure of piezoelectric smart aggregate for shear stress

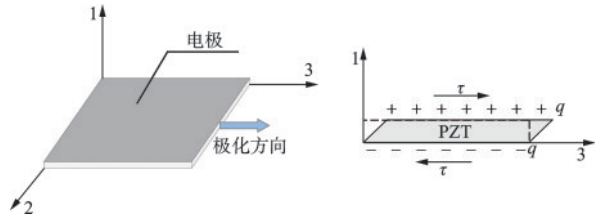


图2 P-5G 剪切型PZT的极化方向示意

Fig.2 Polarization direction diagram of P-5G shear-type PZT

研究表明,PZT压电陶瓷材料具有良好的线性力电关系^[17]。P-5G剪切型PZT的极化方向如图2所示,其在剪应力压电智能骨料内部的边界条件满足电学短路和机械自由^[12],因此当外电场强度 $E=0$ 时,其压电方程可表示为式(1):

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中, T_1 、 T_2 和 T_3 代表1方向、2方向和3方向的正应力; T_4 、 T_5 和 T_6 分别表示处于2-3平面、1-3平面以及1-2平面上的剪应力; d_{ij} 为PZT的压电常数(见表1)。

表1 P-5G剪切型PZT的压电常数

Table 1 Piezoelectric constants of P-5G shear-type PZT			
压电常数	d_{31}, d_{32}	d_{33}	d_{24}, d_{15}
数值/($\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$)	-186	420	660

如式(2)所示,由电荷与电位移向量的物理关系式可推出PZT在各方向受力时产生的电荷总量 Q 。

$$Q = \iint [D_1 \ D_2 \ D_3] \begin{Bmatrix} dA_1 \\ dA_2 \\ dA_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中, dA_1 、 dA_2 和 dA_3 分别为2-3平面、1-3平面和1-2平面的面积微分。1方向为PZT片的厚度方向,因此面积 A_1 远大于 A_2 及 A_3 ,故2、3两个方向的电荷贡献量可以忽略不计。等式(2)可表示为式(3):

$$Q = D_1 A_1 \quad (3)$$

设 τ 为PZT上的剪应力,联立等式(1)和等式(3)可得式(4),即PZT输出的电荷量 Q 与其所受剪应力 τ 的关系式。

$$Q = d_{15} A_1 \tau \quad (4)$$

由式(4)可知, Q 与 τ 成线性关系,两者的比值是常数。因此,压电智能骨料的灵敏度系数 S 可以表征为输出的电荷量 Q 与其所受剪应力 τ 之比,如式(5):

$$S = \frac{Q}{\tau} \quad (5)$$

然而,在典型钢筋混凝土结构剪应力水平下工作时,剪应力压电智能骨料中的PZT片受剪产生的输出电荷信号较弱,加之测量电路不可避免的存在电阻,电荷因此快速流失,信号随即出现损失而导致监测精度大幅下降。因此需要采用电荷放大器将剪应力压电智能骨料的输出电荷量 Q 运算放大后转换成易于采集的电压信号 U ,转换关系如式(6):

$$Q = C_f U \quad (6)$$

式中, C_f 为电荷放大器的反馈电容,分为50 nF、500 nF和5 000 nF三个挡位,本文 C_f 的取值均为50 nF。

此时, S 亦可以通过式(7)计算求得:

$$S = \frac{Q}{\tau} = \frac{C_f U}{\tau} \quad (7)$$

2 剪应力压电智能骨料灵敏度便捷标定

由式(7)可知,当剪应力压电智能骨料受到同样的剪应力 τ 时,灵敏度 S 与输出电压 U 是呈正相关的。基于此规律,本文提出一种采用单摆运动循环往复加载的剪应力压电智能骨料灵敏度标定方法,其设计如图3所示。首先,使压电智能骨料的PZT竖直,使用C形铁夹夹住压电智能骨料一侧,采用细绳一端套住压电智能骨料,另一端绕过滑轮与重物相连。单摆运动将在压电智能骨料上产生周期性剪力。

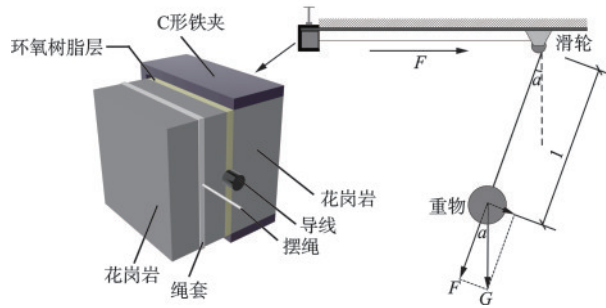


图3 试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of experimental setup

任意角度单摆周期的计算公式为：

$$T = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(0.5\alpha) \sin^2 \varphi}} d\varphi \quad (8)$$

式中, l 为摆长; α 为最大摆角; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。通过式(8)计算出压电智能骨料受到的循环剪力周期为 0.85 s , 对应加载频率为 1.17 Hz , 高于监测系统监测应力的下截止频率 0.04 Hz ^[12], 因此采用单摆装置可满足压电智能骨料灵敏度动态标定的加载频率。

重物在最低点和最高点对单摆的拉力 F_1 和 F_2 分别为：

$$\begin{cases} F_1 = 3mg - 2mg \cos \alpha \\ F_2 = mg \cos \alpha \end{cases} \quad (9)$$

因此一次单摆运动周期内拉力变化为：

$$\Delta F = 3mg(1 - \cos \alpha) \quad (10)$$

该拉力在压电智能骨料上产生周期性剪力。本试验照片如图4所示, 其摆角为 20° , 重物质量为 10 kg , 摆线长度为 0.7 m 。试验数据采集系统如图5所示。压电智能骨料 PZT 受剪而产生的电荷经过导线输出到电荷放大器 (HK9209), 转化成电压信号, 并由 NI 数据采集卡 (NI-9234 DAQ) 采集输入电脑中, 采集卡由软件 LabVIEW 2017 驱动。由数据采集系统可求出一次单摆运动压电智能骨料输出

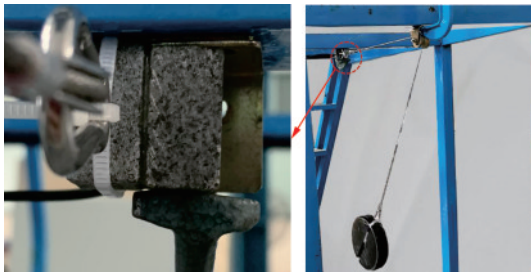


图4 试验装置实物

Fig.4 Picture of experimental setup

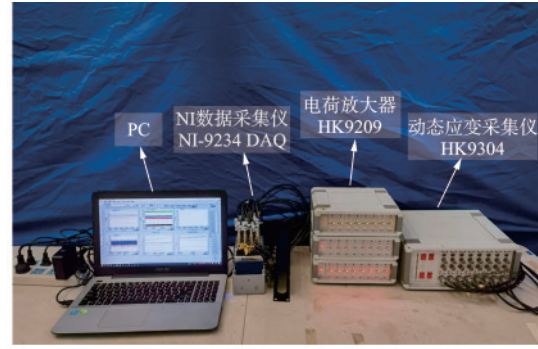


图5 数据采集系统

Fig.5 Data acquisition system

电压的幅值变化。根据式(9)计算可得单摆运动产生的剪力幅值变化为 17.8 N , 压电智能骨料截面尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 压电智能骨料上截面剪应力幅值变化为 0.028 MPa 。根据式(7)可求得压电智能骨料灵敏度。

3 试验装置加载稳定性验证

在进行标定试验前, 本文预先设置了单摆装置加载稳定性的验证试验, 以排除一些潜在的干扰因素, 确保试验结果真实可靠。

由于每进行一次试验都需要更换一次压电智能骨料, 因此在更换压电智能骨料时, 其一侧花岗岩夹取固定的位置可能有所差异。此外, 重物在摆动过程中可能会出现平面外扰动从而造成输出电压信号的扰动。上述两个因素可能会影响到压电智能骨料的输出结果。

针对压电智能骨料夹取固定的位置可能有所差异的情况, 本文共设置三次对比试验, C形铁夹分别夹取剪应力压电智能骨料一侧花岗岩 $1/3$ 、 $2/3$ 和 $3/3$ 的位置, 如图6所示。

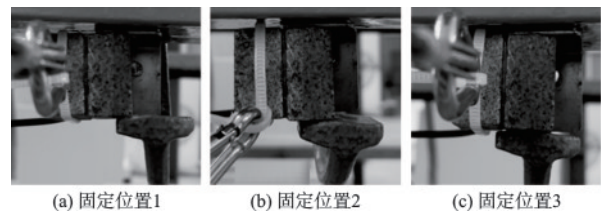


图6 压电智能骨料不同夹取位置

Fig6 Different clamping positions of piezoelectric smart aggregate

试验前对剪应力压电智能骨料在不同固定位置下加载时, 其内部 PZT 上应力变化情况进行了有

限元数值模拟。剪应力压电智能骨料各组成部分的材性见表2。

表2 剪应力压电智能骨料各组成部分的材性参数
Table 2 Material parameters of each component of piezoelectric smart aggregate for shear stress

材料	杨氏模量/GPa	泊松比
环氧树脂	2.5	0.3
花岗岩	51.5	0.3
PZT	43	0.34

PZT、环氧树脂和花岗岩均采用线性六面体八节点 C3D8 网格单元。花岗岩块的网格尺寸为 1 mm。为了使传感元件 PZT 处的计算结果更准确, PZT 和环氧树脂的网格尺寸沿厚度方向加密, 网格沿厚度方向的尺寸为 0.1 mm, 沿其他两个方向为 1 mm, 剪应力压电智能骨料的有限元建模以及网格划分如图 7 所示。

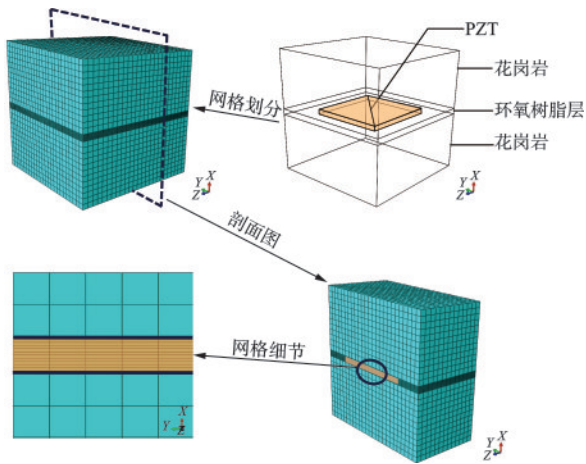


图7 剪应力压电智能骨料有限元建模
Fig.7 Finite element modeling of piezoelectric smart aggregate for shear stress

将剪应力压电智能骨料一侧的花岗岩沿着厚度方向均分成三个区域, 参照图 6 分别设置三种固定位置方式, 边界条件为固接。将参考点 RP-1 与另一侧花岗岩的加载面耦合, 并在其上施加 17.8 N 的集中力, 如图 8 所示。

剪应力压电智能骨料在不同固定位置下加载时, PZT 片上的剪应力云图如图 9 所示。固定位置从 1 到 3 时对应 PZT 片上的剪应力均值分别为 0.041、0.040 3 和 0.039 2 MPa, 三者的变异系数仅 1.8%。

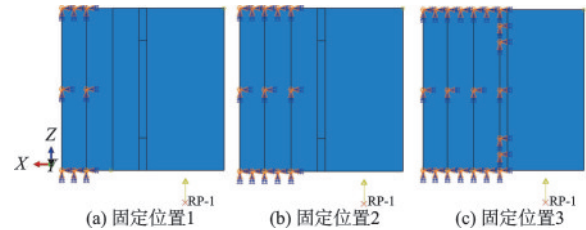


图8 三种不同固定位置的有限元模型

Fig.8 Finite element models with three different fixed positions

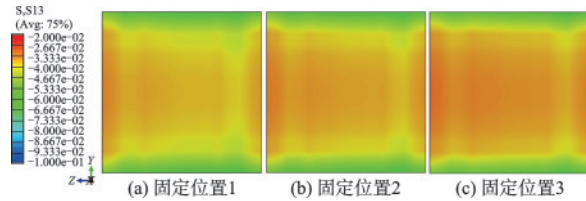


图9 不同固定位置下 PZT 片的剪应力云图

Fig.9 Shear stress contour of PZT at different fixed positions

三种不同的固定位置下加载时剪应力压电智能骨料的输出结果如图 10 和表 3 所示。为了排除重物初始摆动时未完全进入平稳阶段的情况, 从第 20 s 开始往后截取十个周期的电压数据作为试验数据。试验结果表明, 三次试验电压波动相位一致, 标定的灵敏度变异系数仅 0.6%。有限元数值模拟与试验结果均表明, 更换压电智能骨料时, 夹取固定位置的差异对试验结果的影响可以忽略不计。

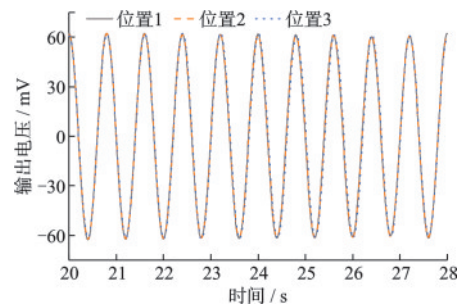


图10 三种不同固定位置下试验得到的剪应力压电智能骨料输出电压时程

Fig.10 Voltage-time history of piezoelectric smart aggregate for shear stress in experiments at three different fixed positions

表3 三种不同固定位置下试验得到的灵敏度值

Table 3 Sensitivity values obtained from experiments at three different fixed positions

峰谷电压差值/mV	120.2	120.4	119.0
灵敏度/(10 ⁵ pC·MPa ⁻¹)	2.11	2.11	2.10

针对重物在摆动过程中可能会出现平面外扰动的情况,同样设置了三次试验。先后分三次(加载1、2、3)对同一个剪应力压电智能骨料进行重复加载试验,试验结果如图11和表4所示。可见,三次试验电压波动相位一致,标定的灵敏度变异系数仅0.9%,三次加载输出结果的差异可忽略不计,表明重物在摆动过程中,压电智能骨料的受力状态是稳定的。

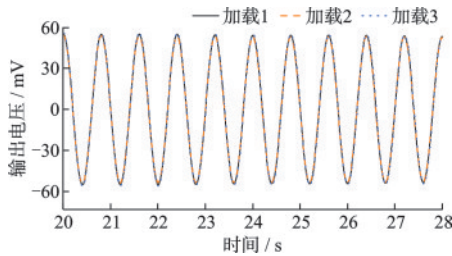


图11 同一固定位置下三次重复试验得到的剪应力压电智能骨料输出电压时程

Fig.11 Voltage-time history of piezoelectric smart aggregate for shear stress from three repeated experiments at the same fixed position

表4 同一固定位置下三次重复试验得到的灵敏度值

Table 4 Sensitivity values obtained from three repeated experiments at the same fixed position

峰谷电压差值/mV	120.4	118.2	119.0
灵敏度/ $(10^5 \text{ pC} \cdot \text{MPa}^{-1})$	2.11	2.08	2.10

上述试验结果表明,单摆装置具有优秀的稳定性,对剪应力智能骨料进行加载时,每个骨料的受力状态均保持一致。

4 灵敏度标定试验结果

本次试验共对30个剪应力压电智能骨料进行灵敏度标定试验。在试验过程中,依次对每个剪应力压电智能骨料进行加载激励,共进行了30次加载试验。试验过程中严格确保加载参数的一致,压电智能骨料电压时程和灵敏度如图12和图13所示。

30个剪应力压电智能骨料的平均灵敏度为 $2.01 \times 10^5 \text{ pC/MPa}$,比文献[12]通过MTS试验机标定的灵敏度 $2.54 \times 10^5 \text{ pC/MPa}$ 低20%。由于摆绳与滑轮之间存在一定的摩擦力,降低了实际传递到压电智能骨料上的剪力,进而导致标定的灵敏度偏低。因此,由该方法求得的压电智能骨料灵敏度需修正,修正系数可取1.2。灵敏度变异系数为

22.7%,各压电智能骨料之间的灵敏度存在一定的差异性,灵敏度的差异与制作误差有关。

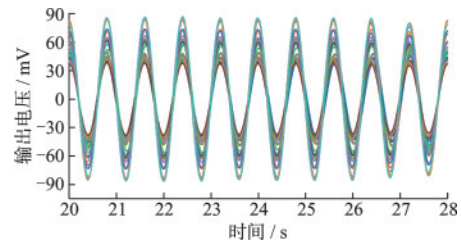


图12 剪应力压电智能骨料输出电压时程汇总

Fig.12 Summary of voltage-time history of piezoelectric smart aggregates for shear stress

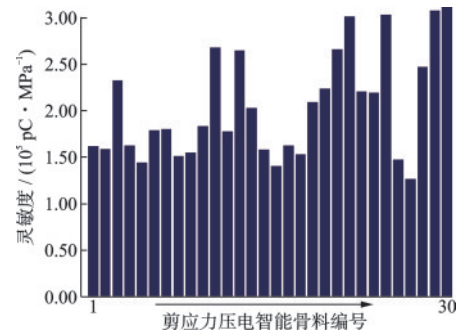


图13 剪应力压电智能骨料标定灵敏度

Fig.13 Calibration sensitivities of piezoelectric smart aggregates for shear stress

本次标定试验的结果是压电智能骨料在对侧受剪下的灵敏度,与混凝土嵌入灵敏度存在线性对应关系。该研究可为今后的监测数据提供修正依据,并进一步提高钢筋混凝土结构剪力监测精度。

5 结论

(1)提出一种基于单摆装置的剪应力压电智能骨料灵敏度简易标定方法,可以快速标定剪应力压电智能骨料的灵敏度。该试验装置的稳定性好,可进行大批量剪应力压电智能骨料灵敏度的标定试验,且标定完成后的压电智能骨料可以取下继续使用。

(2)本文设计的灵敏度标定方法不依赖精密加载设备或大型结构构件,在现场就可以进行灵敏度标定试验。操作简单、快捷,可以极大节省试验成本,提高监测效率。

(3)标定试验结果表明,30个剪应力压电智能骨料的灵敏度平均值为 $2.01 \times 10^5 \text{ pC/MPa}$,变异系数为22.7%。

参考文献:

- [1] 周奎,王琦,刘卫东,等. 土木工程结构健康监测的研究进展综述[J].工业建筑,2009,39(3): 96-102.
Zhou K, Wang Q, Liu W D, et al. Review of research progress on structural health monitoring of civil engineering [J]. Industrial Construction, 2009, 39(3): 96-102. (in Chinese)
- [2] 尹银,周俊山. 地震对人类影响及应对的研究综述[J]. 灾害学,2011,26(1): 118-122.
Yin Y, Zhou J S. Summary of impact and response of earthquakes on human[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 118-122.(in Chinese)
- [3] 中日联合考察团,周福霖,崔鸿超,等. 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012,42(4): 1-20.
China and Japan Delegation, Zhou F L, Cui H C, et al. Inspection report of the disaster of the East Japan earthquake by Sino-Japanese[J]. Building Structure, 2012, 42(4): 1-20. (in Chinese)
- [4] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等.汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Southwest Jiaotong University, Beijing Jiaotong University, et al. Analysis of building seismic damage in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [5] 张海滨,侯爽,欧进萍. 压电智能骨料对动载作用下混凝土损伤的监测[J]. 工业建筑, 2016, 46(8): 85-88.
Zhang H B, Hou S, Ou J P. Monitoring of concrete damage under dynamic load by smart aggregate[J]. Industrial Construction, 2016, 46(8): 85-88. (in Chinese)
- [6] Woods J E, Lau D T, Bao X, et al. Measuring strain fields in FRP strengthened RC shear walls using a distributed fiber optic sensor[J]. Engineering Structures, 2017, 152:359-369.
- [7] Liu S, Wu C, Zhou J, et al. Relation between the shear stress distribution and the resulting acoustic emission variation in concrete beams[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(6): e2528.
- [8] Wilder K, Lava P, Debruyne D, et al. Experimental investigation on the shear capacity of prestressed concrete beams using digital image correlation [J]. Engineering Structures, 2015, 82(1): 82-92.
- [9] 《混凝土结构设计规范》: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.
- [10] Gnanamanickam E P, Sullivan J P, Shelley I W F. Material properties of piezoceramics at elevated temperatures [C]//Proceedings of SPE, Smart Structures and Materials 2004: Active Materials: Behavior and Mechanics. Bellingham, USA: [s.n.], 2004, 5387: 421-431.
- [11] Xu Y H. Ferroelectric and piezoelectric materials [M]. Beijing: Science press, 1978: 188-195.
- [12] 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.
- [13] 侯爽,孔志豪. 剪应力监测压电智能骨料的标定试验 [J]. 结构工程师, 2018, 34(增1): 102-108.
Hou S, Kong Z H. Calibration experiment of smart aggregate for shear stress monitoring [J]. Structural Engineers, 2018, 34(Sup1): 102-108. (in Chinese)
- [14] 侯爽,杨树森,冷志鹏. 剪应力压电智能骨料标定方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4): 844-849.
Hou S, Yang S S, Leng Z P. Research on calibration method of shear stress smart aggregate [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 844-849. (in Chinese)
- [15] 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.
Xu B, Wang D. Development of piezoelectric dynamic shear stress sensor embedded in concrete [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5): 764-767. (in Chinese)
- [16] Ma Y L, Cheng X Y, Jiang Q H, et al. A cement-based 1-3 piezoelectric composite sensor working in d15 mode for charactering the shear stress in civil engineering structure [J]. Smart Materials & Structures, 2018, 27(11): 115013.
- [17] 张福学. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(本文编辑:赵霞)