

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210126004

剪应力压电智能骨料标定方法研究*

侯爽¹, 杨树森¹, 冷志鹏²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 宁波杉工智能安全科技股份有限公司, 浙江 宁波 315153)

摘要: 剪切破坏是混凝土结构主要的破坏形式之一, 震害较为严重, 且难以通过构造措施完全避免。混凝土结构缺少直接、可靠的剪应力监测方法。基于剪应力压电陶瓷的压电智能骨料标定方法尚不成熟。为此, 提出了利用混凝土深梁的压电智能骨料标定剪应力场设计方法。将混凝土三点加载深梁加载点与支座连线中点处的剪应力场作为标定区域。首先, 建立了二维有限元模型, 分析了深梁截面高度和监测区域尺寸对剪应力场均匀性的影响, 确定了深梁试件尺寸及监测区域尺寸; 其次, 研究了梁底配筋与开裂荷载、剪应力幅值及混凝土最大压应变之间的关系, 提出了梁底不开裂条件下监测区域达到较高剪应力水平的深梁试件合理配筋方案; 最后, 在设计的深梁上进行了标定试验, 共布置了16个剪应力压电智能骨料, 通过应变花获取监测区域平均剪应变, 确定了剪应力压电智能骨料灵敏度的概率统计参数, 验证了用于标定的剪应力场设计方法的可靠性。研究表明, 设计的剪应力场应力均匀、应力水平较高、不受混凝土开裂的影响, 标定试验结果可靠, 灵敏度系数可直接应用。

关键词: 剪应力监测; 压电智能骨料; 均匀剪应力场; 标定试验

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0844-06

A Calibration Method of Shear Stress Piezoelectric Smart Aggregate

HOU Shuang¹, YANG Shusen¹, LENG Zhipeng²

(1. School of Civil & Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. NingBo ShanGong Intelligent Security Technology Co., Ltd., Ningbo 315153, China)

Abstract: Shear failure is one of the main failure modes for concrete structures under seismic load. Shear failure damage is usually severe and is hard to completely avoid through structural design measures. At present, there is a lack of direct and reliable shear stress monitoring methods. The piezoelectric smart aggregate (SA for abbreviation) for shear stress monitoring lacks an appropriate calibration method. Therefore, a stress field calibration technique is proposed by using SA sensors in a three-point loading concrete deep beam. Firstly, the effect of cross-section height and monitoring area size on the uniformity of the stress field is analyzed through finite element analysis, and the dimension of the deep beam and the monitored area are determined. Secondly, the relationship between the reinforcement and the cracking load of the deep beam as well as the correlation between the related shear stress and compression strain is studied. A reasonable reinforcement layout of the deep beam is proposed to assure no crack occurs at the beam bottom at a higher shear stress level. At last, the shear

* 收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51978284)、宁波市海曙区科技计划项目(201804F027)资助

作者简介: 侯爽(1977—), 男, 教授, 博士。主要从事钢筋混凝土结构地震损伤监测及钢筋混凝土结构非线性分析与建模研究。E-mail: cthous@scut.edu.cn

stress calibration test is carried out on the designed concrete deep beam with a total of 16 SAs. The shear strain of the monitored area is obtained through the strain rosette. The probability statistical parameters of the shear stress sensitivity of SA are determined and the reliability of the shear stress field design method for SA calibration is verified. The results show that the designed shear stress field is not affected by concrete cracking with uniform and relatively high shear stress. The calibration test results are reliable, and the sensitivity coefficient can be applied directly.

Keywords: shear stress monitoring; smart aggregate; uniform shear stress field; calibration

引言

我国地震多发,地震导致了大量建筑物、桥梁及工程设施损坏、倒塌,威胁人类生命安全^[1]。震害调查表明,大量框架柱由于剪跨比较小、轴压比较大,箍筋约束不足、混凝土强度不足等原因导致抗剪强度降低因而产生剪切斜裂缝、混凝土剥落,甚至在柱身处被剪断,呈明显剪切破坏特征^[2-3]。因此,对混凝土内部剪应力进行监测,探究剪力受力机理及破坏特征,具有一定的研究意义。

C.R.Farrar等^[4]分别通过加速度计与位移计对剪力墙振动台试验进行监测获取结构频响函数及其刚度。J.Hegger等^[5]采用激光干涉法研究了混凝土梁开裂前后的剪力受力机理及破坏特征。P.R.Prem等^[6]采用声发射技术研究了钢筋混凝土梁在四点弯曲下的破坏特征及损伤机理,建立了声发射参数与结构损伤程度之间的关系。S.Liu等^[7]揭示了混凝土梁截面剪应力分布与声发射分布之间的强相关性,采用声发射技术可实时地反映混凝土梁的剪切应力。G.Wang等^[8]采用光纤传感器监测了四点弯曲梁两侧的剪切应变,研究了水泥基复合材料外加固的钢筋混凝土梁的抗剪性能。G.Rodriguez等^[9]将分布式光纤传感器与光散射反射计连接,用于监测混凝土构件剪切破坏下的裂缝开裂及扩展模式。但上述监测方法均无法直接可靠地获得混凝土内部的剪应力。

而压电材料由于低成本、高带宽、固态激励,以及主动感应等优点,被广泛应用于结构健康监测中^[10]。G.Song等^[11]将通过防水处理后的PZT片埋置于水泥砂浆中形成水泥基压电智能骨料,并应用于超高车辆对桥梁的碰撞监测研究中。X.Yang等^[12]将水泥基压电智能骨料埋置于混凝土试件中,并通过单轴受压试验标定,将其应用于框架结构的监测中。W.Gao等^[13]设计并制作了一种基于压电

陶瓷管的管状智能骨料,其特殊的几何形状适用于二维混凝土结构(如剪力墙、楼板及混凝土路面)的健康监测中。为了监测混凝土内部剪应力,S.Hou等^[14]基于剪切型压电陶瓷设计了一种剪应力压电智能骨料,标定得到了该传感器在两侧面受剪时的灵敏度系数。但在实际结构中,传感器的受力状态与两侧面受剪时显著不同,不能反映该传感器的实际灵敏度。侯爽等^[15]2018年完成了一个三点加载的深梁标定试验及数值模拟,得到了该传感器的灵敏度系数。然而,该试验未对监测区域剪应力的均匀性进行研究,监测区域的平均剪应力较小,剪应力场不够均匀,因此需要进一步进行标定。

为了得到一个用于标定传感器的均匀剪应力场,本文对混凝土深梁进行了有限元二维模拟,分别研究了截面高度、监测区域尺寸对应应力场均匀性的影响,梁底配筋与开裂荷载、监测区域剪应力幅值及受压区混凝土最大压应变之间的关系,设计出了一个剪应力水平较高且应力均匀、不受混凝土开裂影响的剪应力场;将16个剪应力压电智能骨料埋入混凝土深梁中,进行了标定试验,得到了剪应力压电智能骨料在真实受力状态下的灵敏度系数。

1 剪应力压电智能骨料

剪应力压电智能骨料(SA)的结构简图如图1

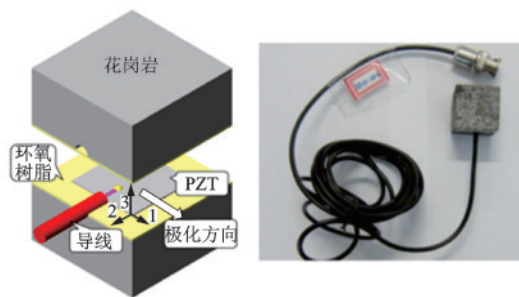


图1 剪应力压电智能骨料

Fig.1 Shear stress smart aggregate

所示,SA由花岗岩、环氧树脂及P-5G剪切型PZT压电陶瓷(PZT)、导线及接头封装而成。封装后的SA尺寸为25 mm×25 mm×25.2 mm,该传感器的具体参数见文献[14]。

2 均匀剪应力场设计

本研究选取三点加载混凝土深梁试件用于标定,研究了试件尺寸、监测区域尺寸对剪应力场均匀性的影响,通过设计梁底配筋确保构件在预期应力水平下不开裂。

2.1 试件尺寸与监测区域尺寸对剪应力均匀性的影响

根据混凝土结构设计规范^[16]的相关规定,结合工程中常用的混凝土梁截面尺寸,设计试件长宽高之比为4:1:2。用于剪应力标定的应力场取正方形,其中心点为加载点与支座连线中点。截面高度取600、700、800、900、1 000 mm。监测区域边长取50、100、150、200 mm。取应力场内剪应力的变异系数作为评价剪应力场均匀性的指标。

由于简支梁受弯时剪应力沿截面宽度方向近似于均匀分布,故采用有限元软件ABAQUS建立二维模型进行数值模拟。混凝土为网格尺寸5 mm的CPS4R单元,梁顶施加荷载的加载区域宽度为300 mm,梁底支座宽度为100 mm。图2为梁高900 mm时的剪应力云图。如图2可见,加载点与支座连线中点区域的应力水平较高,适合作为剪应力压电智能骨料的标定区域。

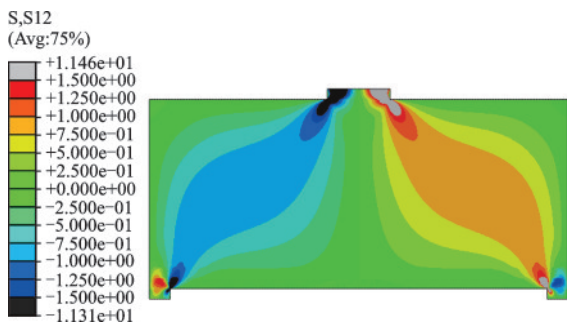


图2 梁高900 mm时的剪应力云图

Fig.2 Shear stress contour of beam with a height of 900 mm

应力场剪应力变异系数随梁高及监测区域边长的变化规律如图3、4所示。随着梁高增加或边长增加,剪应力变异系数呈降低趋势。本文将变异系数控制在1.8%以下,由此在95%保证率下监测区

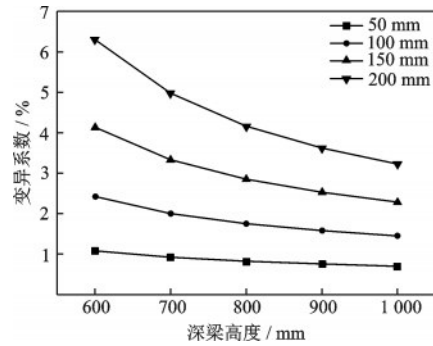


图3 不同试件尺寸下的变异系数

Fig.3 Coefficients of variation under different specimen sizes

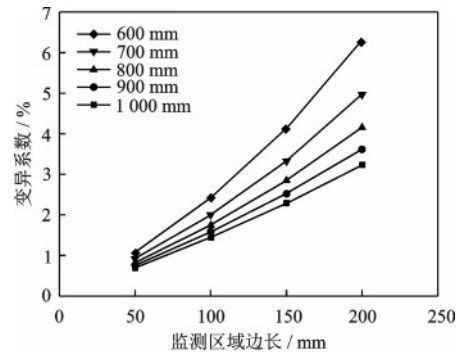


图4 不同监测区域尺寸下的变异系数

Fig.4 Coefficients of variation under different monitoring area sizes

域内剪应力变化不超过±3%。为此,监测区域的边长不大于100 mm,梁高不小于900 mm。本文选取的梁高为900 mm,监测区域为边长100 mm的正方形区域。

2.2 抗裂配筋设计

混凝土深梁开裂将显著影响监测区域剪应力场的均匀程度。为了保证在产生较大剪应力的情况下,混凝土梁底仍不开裂且受压区混凝土未进入塑性,本文研究了配筋率对监测区域剪应力场的影响。在上述二维有限元模型中加入了不同配筋率的钢筋,忽略钢筋与混凝土之间的黏结滑移作用,将二者的约束关系定义为嵌入。采用网格尺寸为5 mm的T2D2单元划分钢筋单元。为保证混凝土不开裂,梁底跨中拉应变控制为100 με。不同配筋率下混凝土开裂对应的外荷载、监测区域平均剪应力及受压区混凝土最大压应变的关系如图5所示。

随着配筋率增加,混凝土开裂所需要的外荷载,监测区域的平均剪应力及受压区混凝土最大压应变都呈增大趋势。当钢筋混凝土梁配筋率超过5%时,工程中难以实现,且此时混凝土受拉区

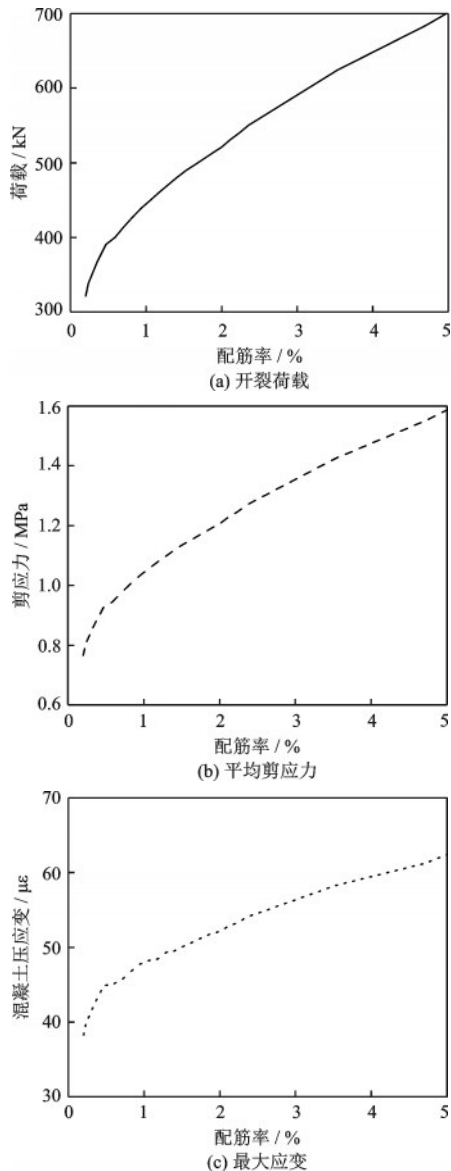


图5 不同配筋率下深梁监测区域混凝土参数

Fig.5 The parameters of the monitored concrete area under different reinforcement ratio

高度过小。在5%配筋率以内,受压区混凝土不会进入塑性,在保证混凝土梁底不开裂的情况下,可获得的最大剪应力为1.587 MPa。文献[17]指出,混凝土抗剪强度约为其抗压强度的0.095~0.121倍,本文混凝土轴心抗压强度的平均值取为30 MPa,对应混凝土抗剪强度约为3 MPa,在此选取混凝土抗剪强度的1/3作为均匀剪应力场的设计目标,即为1 MPa左右。结合工程中常用的钢筋直径,在混凝土梁底部配置直径20 mm、共8根HRB335钢筋,钢筋分两排布置,配筋率为0.66%,监测区域平均剪应力约为0.942 MPa,变异系数为1.58%。

3 标定试验

在深梁两侧各布置8个剪应力压电智能骨料(SA)。首先,将SA固定在 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的模具内(图6(a)),SA最小净间距为50 mm,模具中间穿过2根平行的直径为6 mm的HRB335钢筋,使用与混凝土梁同一配合比的混凝土浇筑模具,并在混凝土终凝后脱模、凿毛处理,形成预制块体(图6(b))。然后,将预制块体通过预埋的钢筋精确定位在混凝土深梁中。

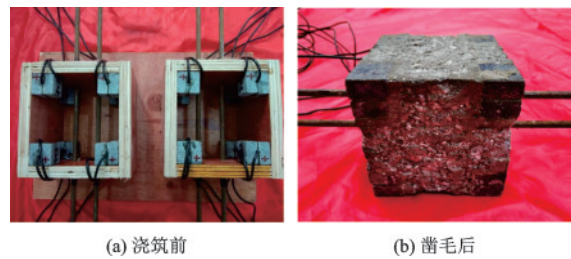


图6 预制块体

Fig.6 The prefabricated block

监测区域剪应力通过应变花监测剪应变并结合混凝土的剪切模量计算得到。在混凝土梁前后两表面监测区域内粘贴了直角应变花(图7),应变花输出的应变信号通过HK9304动态应变采集仪采集(图8)。梁顶通过MTS电液伺服驱动器施加100~400 kN的正弦荷载,通过力传感器采集荷载信号。SA电荷信号经HK9209电荷放大器转换成电压信号,反馈电容设置成500 nF。荷载信号、应变信号及SA电压信号经NI9234模块转化为数字信号并存储到电脑中(图7、图8)。

由应变花监测得到的剪应力如图9所示,梁两侧测得的剪应力大小几乎一样,表明荷载传递路径准确可靠。400 kN荷载下应变花测得的剪应力约为

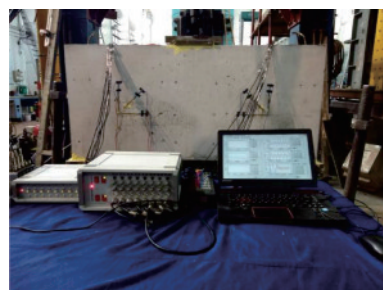


图7 标定试验

Fig.7 Calibration test

1.08 MPa,与模拟值接近,验证了数值模拟的准确性。

SA在正弦加载下表现出很好的一致性,输出电压随外荷载的变化而变化(图10)。如图11所示,

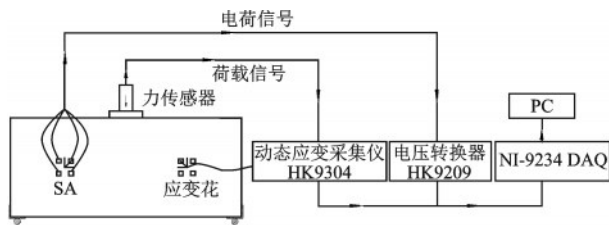


图8 加载设备及数据采集系统

Fig.8 Loading equipment and data acquisition system

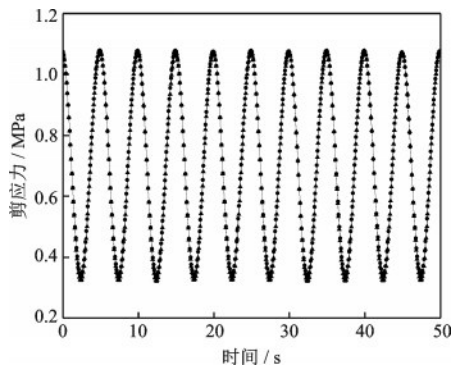


图9 剪应力时程曲线

Fig.9 Time history curve of shear stress

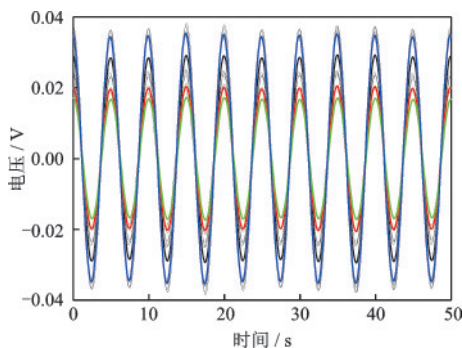


图10 剪应力压电智能骨料输出电压

Fig.10 Voltage output of SA

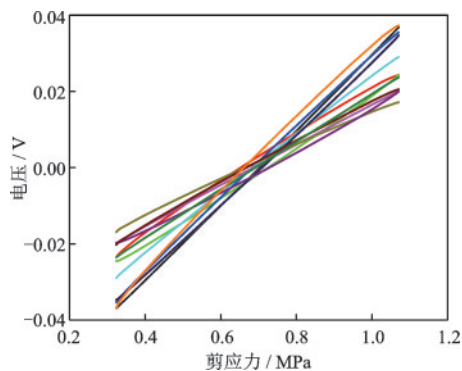


图11 剪应力压电智能灵敏度

Fig.11 Sensitivity of SA

正弦荷载下SA输出电压与剪应力基本呈线性关系,曲线斜率即为SA受剪灵敏度系数。由试验得到的SA受剪灵敏度均值为0.072 7 V/MPa,或 $3.63 \text{ pC} \times 10^3 / \text{MPa}$,变异系数为0.27。灵敏度离散性的原因可能与混凝土材料的细观离散性及内部存在微裂缝有关。

4 结 论

提出了一种用于受剪压电智能骨料标定的混凝土剪应力场设计方法,该剪应力场应力均匀、应力水平较高、不受混凝土开裂的影响。混凝土试件采用深梁形式,分别研究了截面高度、监测区域尺寸对剪应力场均匀性的影响,提出了达到较高剪应力水平的混凝土抗开裂的配筋方法。最后,进行了剪应力压电智能骨料的标定试验。结论如下:

(1)在加载点与支座连线中点处的监测区域,剪应力场均匀性与深梁高度正相关,与监测区域尺寸负相关。截面高度为900 mm、监测区域边长为100 mm时,深梁的剪应力场应力变化范围可控制在3%以内,且应力均匀,适合进行标定试验。

(2)增加深梁底部配筋率可提高深梁的抗开裂水平,随着配筋率的增加,混凝土开裂所需要的外荷载,监测区域的平均剪应力及受压区混凝土最大压应变都呈增大趋势。本文设计的深梁可产生最大的剪应力为1.587 MPa。

(3)通过均匀剪应力场的标定试验得到本文使用的剪应力压电智能骨料的灵敏度均值为 $3.63 \text{ pC} \times 10^3 / \text{MPa}$,变异系数为0.27。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 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 and Beijing Jiaotong university. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008,29(4):1-9. (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 joint mission [J]. Building Structure, 2012,42(4): 1-20. (in Chinese)
- [4] Farrar C R, Baker W E. Measuring the stiffness of concrete shear walls during dynamic tests[J]. Experimental Mechanics, 1992,32(2): 179-183.
- [5] Hegger J, Sherif A, Gortz S. Investigation of pre-and postcracking shear behavior of prestressed concrete beams using innovative measuring techniques[J]. ACI Structural Journal, 2004,101(2): 183-192.
- [6] Prem P R, Murthy A R. Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending[J]. Applied Acoustics, 2017,117: 28-38.
- [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,doi.org/10.1002/stc.2528.
- [8] Wang G, Yang C, Pan Y, et al. Shear behaviors of RC beams externally strengthened with engineered cementitious composite layers[J]. Materials, 2019,12(13): 2163.
- [9] Rodriguez G, Casas J R, Villalba S. Shear crack pattern identification in concrete elements via distributed optical fibre grid[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019,15(12): 1630-1648.
- [10] Song G, Gu H, Mo Y L, et al. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2007,16(4): 959-968.
- [11] Song G, Olmi C, Gu H. An overheight vehicle - bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(2): 462-468.
- [12] Yang X, Li Z. Application of cement-based piezoelectric sensing system to concrete structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,32(5): 111-118.
- [13] Gao W, Li H, Ho S. A novel embeddable tubular piezoceramics-based smart aggregate for damage detection in two-dimensional concrete structures [J]. Sensors, 2019,19(7): 1501.
- [14] 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.
- [15] 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 shear stress smart aggregate[J]. Structural Engineers, 2018, 34(Sup1): 102-108. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 施士昇.混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量[J].土木工程学报,1999(2):47-52.
Shi S S. Shear strength, shear modulus and elastic modulus of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1999(2): 47-52. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)