doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.018

水泥基传感器与混凝土的应变协调性分析

王云洋[1],薛常喜[2,3],牛建伟[1],丁思齐[1],韩宝国[1]

(1.大连理工大学 土木工程学院, 116024 辽宁 大连; 2.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨;
3.青岛北洋建筑设计有限公司,266000 山东 青岛)

摘 要: 为研究镍粉水泥基传感器应用于混凝土结构健康监测过程中传感器与周围混凝土的应变协调性,采用有限元软件ANSYS建立传感器与混凝土模型,计算改变传感器的埋设位置及偏斜角度、混凝土强度等级、荷载大小及类型等条件下传感器与周围混凝土的应力和应变值,并采用传感器与混凝土之间的应变相对差对它们之间的应变协调性进行分析.结果表明:传感器应埋设在应变均匀的中心区域,避免埋在表层;小角度偏斜对监测准确性影响不大;传感器应用于混凝土结构健康监测需综合考虑混凝土强度等级、荷载大小及类型等因素对监测结果的影响;应变相对差可以较好地反映传感器与周围混凝土的应变协调程度.

关键词: 镍粉水泥基传感器;结构健康监测;应变协调程度;有限元分析;监测准确性
中图分类号: TB381 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)09-0095-06

Strain compatibility analysis on cement-based sensors and concrete

WANG Yunyang[1], XUE Changxi[2,3], NIU Jianwei[1], DING Siqi[1], HAN Baoguo[1]

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 3. Qingdao Beiyang Design Group Co., Ltd., 266000 Qingdao, Shandong, China)

Abstract: In order to study the strain compatibility of the nickel powder-filled cement based sensors and their surrounding concrete, the models of the sensors and concrete were set up by finite element software ANSYS. The stress and strain of the sensors and their surrounding concrete were calculated based on different embedded locations and angle deflections of the sensors, strength grades of concrete, and magnitudes and types of load. The strain compatibility of the sensors and their surrounding concrete were analyzed through the relative difference of strain. The results show that the sensors should be embedded in the internal homogeneous strain area of concrete members, rather than being embedded in the superficial area. The small angle deflection has little effect on the monitoring accuracy. As the sensors are used for health monitoring of concrete structures, the effect of strength grade of concrete and magnitudes and types of load should be systematically considered. The degree of strain compatibility of the sensors and their surrounding concrete can be better reflected by relative difference of strain.

Keywords: nickel powder-filled cement-based sensor; structural health monitoring; degree of strain compatibility; finite element analysis; monitoring accuracy

采用自感知水泥基复合材料制成的传感器不仅耐久性好、造价低、灵敏度高、埋设工艺简单,而且基体材料是水泥混凝土,与混凝土构件/结构具有良好的相容性,非常适合混凝土构件/结构的性态监测[1-5].研究表明,镍粉水泥基传感器具有应力/应变灵敏度高的优点,在结构健康监测和交通探测领域展现出广阔的应用前景[1,6-8].

镍粉水泥基传感器埋入混凝土构件/结构中并承受荷载时,传感器与周围混凝土的应力相差很大而应变基本协调,传感器可通过与周围混凝土之间的应变协调实现对混凝土应变的监测[4,7],但是传感器与周围混凝土的应变协调程度受多种因素的影响.这些因素主要包括两个方面,一方面是传感器的制作参数,另一方面是传感器使用过程中的影响因

收稿日期: 2014-02-26.
基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0798);
国家科技支撑计划(2011BAK02B01);
中央高校基本科研业务费专项资金.
作者简介: 王云洋(1986—),男,博士研究生;
韩宝国(1976—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 韩宝国, hithanbaoguo@163.com.

素,主要包括传感器的埋设位置、偏斜角度、混凝土强度等级、荷载大小和类型等.

影响镍粉水泥基传感器与周围混凝土应变协调程度的因素很多,仅通过试验方法分析各因素对传感器与周围混凝土应变协调程度的影响需要花费大量的人力、物力及时间,而且传感器埋入混凝土构件/结构中,受力状态较为复杂,试验方法难以获得全面的应力/应变信息.有限元分析方法可以对传感器的受力性能进行全过程分析,然后对各影响因素进行优化,是对结构试验的有效补充[9].本文采用有限元软件 ANSYS 建立模型,通过对镍粉水泥基传感器与周围混凝土的受力性能及应变协调程度进行计算分析,研究镍粉水泥基传感器应用于混凝土结构健康监测过程中的影响因素及其对二者应变协调性的影响程度,为镍粉水泥基传感器应用于混凝土结构健康监测提供理论支持.

1　传感器埋设位置对应变协调程度的影响

首先建立混凝土试件与传感器的几何模型,然后定义单元类型,混凝土与镍粉水泥基传感器均采用 SOLID65 实体单元.接着赋予混凝土和传感器单元相应的实常数和本构关系,并采用映射方式进行网格划分.在传感器与混凝土的接触区域,将混凝土面定义为目标面并采用 TARGE170 单元模拟,传感器面定义为接触面并采用 CONTA173 单元模拟.最后施加约束与荷载,并求解.镍粉水泥基传感器弹性模量和泊松比分别取为 17.48 GPa 和 0.192[8].在无特殊说明的情况下,混凝土的弹性模量取为30 GPa,泊松比取为0.17.

在传感器合适尺寸选择的过程中,考虑了传感器的埋设方便、标定和测试精度等因素,同时参考了普通混凝土力学性能试验方法标准[10]中的标准棱柱体抗压强度试件高宽比值,本文中将传感器的高宽比取为 2.将尺寸为 20 mm×20 mm×40 mm的镍粉水泥基传感器分别埋入 150 mm×150 mm×300 mm 的混凝土试件中心及表层,电压电极间距取为 5 mm,并建立相应的坐标系.传感器在试件中的位置分别如图 1、2 所示,在混凝土试件上端面施加 15 MPa的均布压应力.

在本文以下的研究中,传感器的尺寸和混凝土试件尺寸均与此相同.另外,以下研究设计两个参数:应变相对差 1 和应变相对差 2,二者具体定义为:应变相对差 1 为传感器的平均应变与周围混凝土的平均应变的比值减 1,并以百分数表示,是对传感器与周围混凝土应变协调程度的衡量指标.应变相对差 2 为传感器的平均应变与未埋入传感器时对应位置混凝土的平均应变的比值减 1,并以百分数表示,是对传感器与未埋入传感器时对应位置的混凝土应变协调程度的衡量指标.采用传感器电极范围内的应变平均值作为传感器的平均应变;埋入表层的传感器,取与传感器前后两个侧面接触的电极范围内混凝土的应变平均值作为传感器侧面周围混凝土的平均应变;埋入中心的传感器,取与传感器周围 4 个侧面接触的电极范围内混凝土的应变平均值作为传感器侧面周围混凝土的平均应变.平均应变的计算方法是先计算出对应的位移值,再用位移值除以电极间距.

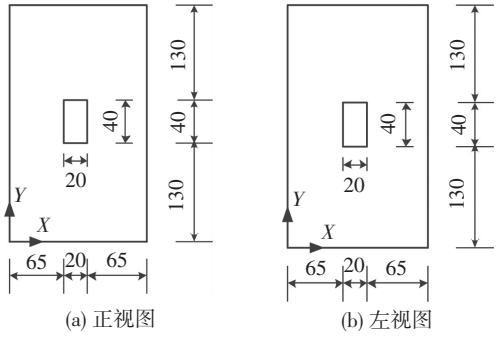


图 1　传感器埋入混凝土试件中心示意图(mm)

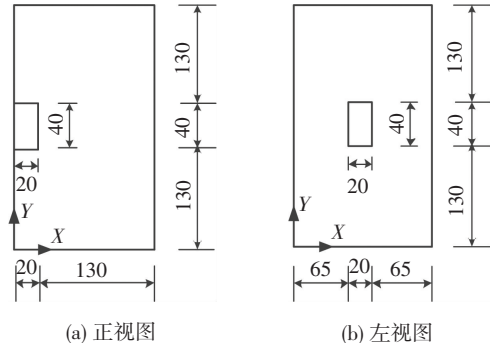
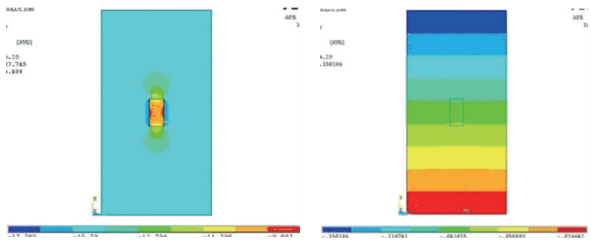


图 2　传感器埋入混凝土试件表层示意图(mm)

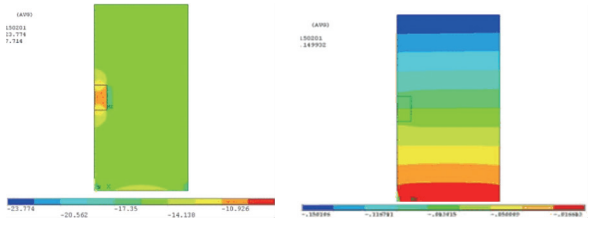
埋入混凝土试件中心和表层的传感器与混凝土试件的受力性能分别如图 3、4 所示.由图 3、4 可见,两种埋设位置的传感器受力性能类似,传感器与侧面周围混凝土的应变基本协调,但应力相差很大,上、下端面周围混凝土的应力减小,侧面周围混凝土的应力增大.埋入表层传感器的应力分布不对称,上、下端面的最大应力出现在右边线的中点(-12.8 MPa),而不是形心处(-12.3 MPa),并且传感器上、下端面的应力有一定程度的增大.传感器埋设在混凝土试件表层时,如图 4(a)所示,上、下端面左右边不对称受力,上、下端面为传感器与混凝土的接触界面,右边线处存在棱角,且为两种材料的临界点,这样容易导致应力集中.故埋入表层的传感器上、下端面的最大应力出现在上、下端面右边线.埋

入表层传感器的平均应变（-590.8×10^{-6}）大于埋入中心传感器的平均应变（-561.0×10^{-6}），埋入表层的传感器侧面周围混凝土的平均应变（-540.8×10^{-6}）大于埋入中心的传感器侧面周围混凝土的平均应变（-531.2×10^{-6}），且都大于未埋入传感器时的混凝土的平均应变（-500×10^{-6}）.埋入表层的传感器的应变相对差 1（9.26%）比埋入中心的传感器的应变相对差 1（5.61%）大 65%，埋入表层的传感器的应变相对差 2（18.16%）比埋入中心的传感器的应变相对差 2（12.20%）大 49%.埋入表层的传感器的应变相对差较大，传感器实际应用中应埋设在应变均匀的中心区域，避免埋在表层.



(a) y 向应力分布　　(b) y 向变形

图 3　传感器埋入混凝土试件中心的应力与变形



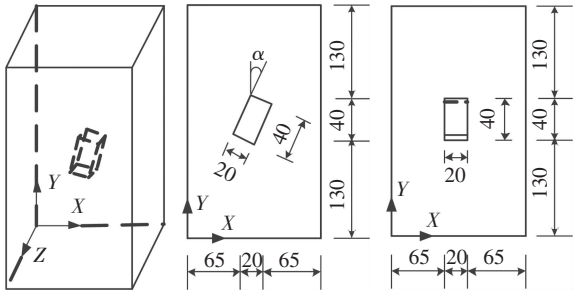
(a) y 向应力分布　　(b) y 向变形

图 4　传感器埋入混凝土试件表层的应力与变形

2　传感器小角度偏斜对应变协调程度的影响

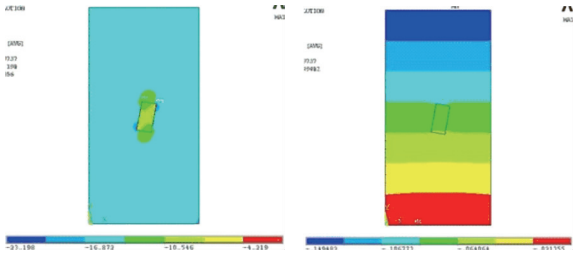
传感器在混凝土构件/结构的浇筑和振捣成型过程中可能发生小角度偏斜，会对传感器及周围混凝土的受力性能产生影响.普通混凝土力学性能试验方法标准[10]中要求将试验误差控制在 15%以内，鉴于此，本文将传感器的埋设角度偏离初始方向的 10%以内定义为小角度偏斜，最大角度偏斜为 90°，因此将不大于 9°视为小角度.为研究传感器小角度偏斜对传感器与周围混凝土应变协调程度的影响，将传感器埋入混凝土试件中心，分别使传感器在 XY 平面内的偏斜角度 α 从 1°变化至 10°，如图 5 所示，并在试件上端面施加15 MPa的均布压应力.

图 6 给出了传感器偏斜 6°时与混凝土试件的受力性能，由图 6 可见，由于传感器的偏斜，传感器及周围混凝土的应力分布更加不均匀，传感器上、下端面的最大应力分别出现在左、右边线处，而不是传感器未偏斜时的上、下端面中心.传感器偏斜时，如文中图 6（a）所示，上端面左边线和下端面右边线相当于突出的棱角，由于是不同的材料接触部位，在外荷载作用下这两个位置最容易产生应力集中.因此，传感器上、下端面的最大应力分别出现在左、右边线.传感器下端面左边线和上端面右边线周围的混凝土有一定程度的应力集中，传感器与侧面周围的混凝土变形基本协调.



(a) 空间分布　　(b) 正视图　　(c) 左视图

图 5　传感器埋入混凝土试件中偏斜示意图（mm）



(a) y 向应力分布　　(b) y 向变形

图 6　埋入混凝土试件的传感器偏斜时的应力与变形

图 7 为不同偏斜角度下传感器的平均应变和应变相对差 2，由图 7 可见，随着偏斜角度的增大，传感器的平均应变先逐渐增大，并在偏斜 3°时达到最大，然后逐渐减小.偏斜角度不超过 6°时，传感器平均应变大于未偏斜时的平均应变，偏斜角度超过 6°后，传感器的平均应变小于未偏斜时的平均应变.偏斜 3°时，传感器的平均应变比未偏斜时的平均应变增大 1%.随着偏斜角度的增大，应变相对差 2 逐渐增大，并在偏斜 3°时达到最大，然后逐渐减小.偏斜角度不超过 6°时，应变相对差 2 大于未偏斜时的应变相对差 2.

传感器的偏斜使得传感器处于复杂应力状态，偏斜角度的大小影响到各个方向应力的分布，从而影响传感器的平均应变.随着传感器发生偏斜，外荷载沿着混凝土试件高度方向传递至传感器时，传感器的受力与混凝土试件的高度方向存在一个小角度，传感器的受力可以分解为沿着传感器高度与垂直传感器高度两个方向.沿传感器高度方向的力使得传感器沿高度方向发生变形，垂直于传感器高度方向的受力使得传感器与混凝土之间存在摩擦力，

而摩擦力会阻碍传感器的变形.在传感器的偏斜角度增加到 3°的过程中,传感器受到沿其高度方向的力使得其沿高度方向的变形增大,垂直于传感器方向的力会产生摩擦力,阻碍变形的增大.同时,小角度偏斜使得传感器受力不对称,容易产生应力集中,也会使得传感器的变形增大.3 种作用效果叠加使得传感器偏斜 3°时平均应变最大.由于偏斜 3°时传感器的应力集中最为显著,此时的传感器与混凝土的协调性最差,因此此时的应变相对差 2 也最大.随着偏斜角度的进一步增大,应力集中现象有所缓和,在以上 3 种作用共同作用下,传感器的平均应变与应变相对差 2 都逐渐减小.

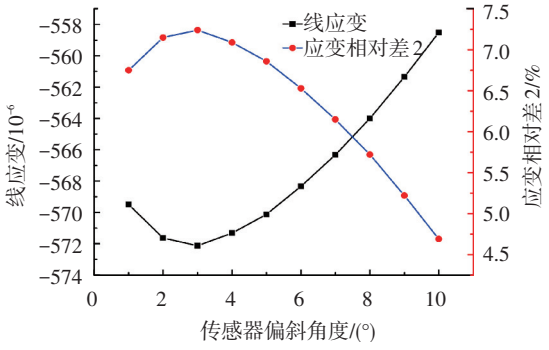


图 7 传感器在偏斜角度下的平均应变和应变相对差 2

小角度偏斜对传感器的平均应变影响较小,应变最大增量为 1%,应变相对差 2 最大值小于7.5%,但小角度偏斜使传感器及周围混凝土的应力分布更加不均匀,尤其使传感器下端面左边线和上端面右边线周围的混凝土出现一定程度的应力集中,对混凝土构件/结构的受力存在不利影响,因此传感器实际应用中应尽量避免偏斜.

3 混凝土强度等级对应变协调程度的影响

镍粉水泥基复合材料弹性模量为 17.48 GPa,随强度等级的提高,混凝土的弹性模量可从 22 GPa 增大到 38 GPa[11],混凝土与镍粉水泥基传感器弹性模量的差值越来越大,弹性模量的差值会对二者的应变协调程度产生影响,为研究这种影响,选取 7 种混凝土弹性模量:20、22.5、25、27.5、30、32.5、35 GPa,分别对镍粉水泥基传感器与混凝土试件的应变协调程度进行分析.

传感器埋入混凝土试件中的位置如图 1 所示.在混凝土试件的上表面施加均布压应力,压应力大小等于混凝土试件在未埋入传感器时产生 500 个微应变对应的应力值.图 8 为不同混凝土弹性模量下传感器、传感器侧面周围混凝土的平均应变,由图 8 可见,传感器的平均应变始终大于侧面周围混凝土的平均应变,并且随着混凝土弹性模量增大,传感器的平均应变快速增大,其侧面周围混凝土的平均应变缓慢增大,二者的差值逐渐增大.

图 9 为不同混凝土弹性模量下的应变相对差,由图 9 可见,应变相对差 1 从小于 1%增大到超过 7%,与混凝土弹性模量近似呈线性关系.应变相对差 2 变化较大,最大值超过 15%,而最小值小于 3%,应变相对差 2 随混凝土弹性模量的变化而变化的规律与应变相对差 1 基本相同.

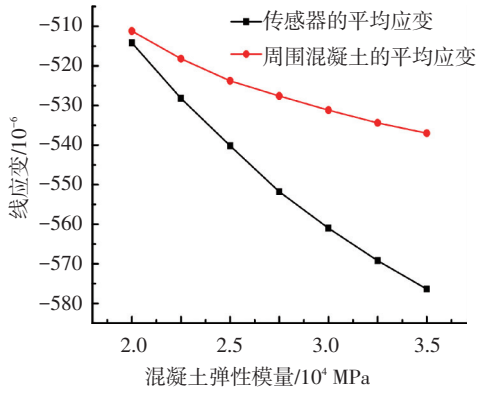


图 8 不同弹性模量下传感器、传感器周围混凝土的平均应变

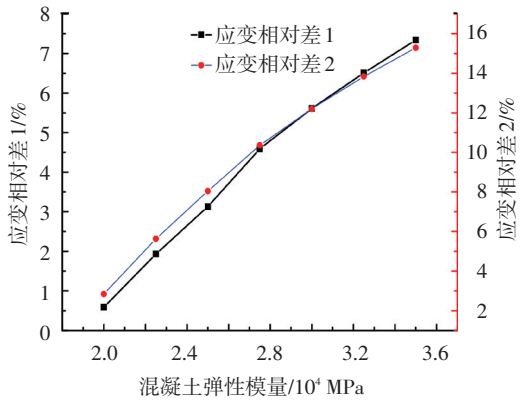


图 9 不同混凝土弹性模量下的应变相对差

上述结果表明,随混凝土强度等级的提高,传感器和侧面周围混凝土的平均应变都在增大,应变协调程度越来越差,应变相对差 2 的变化较为显著.

4 荷载大小对应变协调程度的影响

将传感器埋入混凝土试件中,位置如图 1 所示,选取 9 种均布压应力:3、4.5、6、7.5、9、10.5、12、13.5、15 MPa,分别施加在试件的上端面,研究传感器与周围混凝土的应变协调程度.

图 10 为不同荷载作用下传感器、传感器侧面周围混凝土的平均应变,由图 10 可见,传感器的平均应变始终大于侧面周围混凝土的平均应变,而且平均应变与荷载大小之间都基本符合线性关系.

图 11 为不同荷载作用下的应变相对差,由图 11

可见，当荷载不超过 4.5 MPa 时，应变相对差 1保持在3.8%左右；当荷载从 4.5 MPa 增加到10.5 MPa的过程中，应变相对差 1 随着荷载的增大而增大；当荷载超过 10.5 MPa 后，应变相对差 1 增加得非常缓慢并最终稳定在 6.4%左右.应变相对差 2 与应变相对差 1 的变化规律相同，只是应变相对差 2 的变化幅度相对较小，当荷载不超过4.5 MPa时，应变相对差 2 保持在11.6%左右；当荷载超过 10.5 MPa 后，应变相对差 2 最终稳定在 13.4%左右.由于应变相对差 2 最小值大于 11%，对传感器与周围混凝土的应变协调程度影响较大，而应变相对差 1 最大值小于 6.5%，影响相对较小.在不同大小荷载作用下，应变相对差 2 变化比较显著.

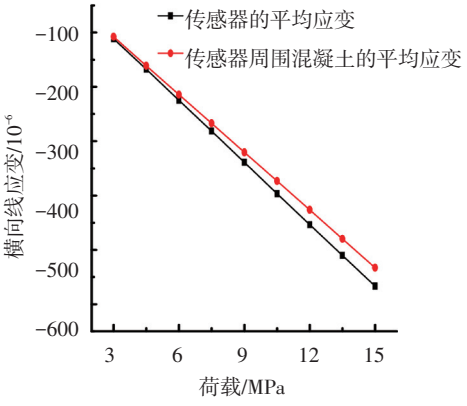


图 10　不同荷载下传感器、传感器侧面周围混凝土的平均应变

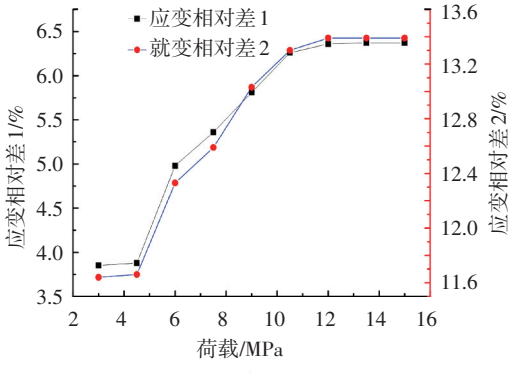


图 11　不同荷载下的应变相对差

5　荷载类型对应变协调程度的影响

5.1　偏压荷载

在偏压荷载作用下，将传感器埋入混凝土试件中压应力较大的区域，传感器在试件中的位置如图 12 所示.在试件的上端面，除了 $X=75\sim150$ mm，$Z=75\sim150$ mm 的区域不施加荷载外，其他区域施加 10 MPa的均布压应力.

传感器与混凝土试件的受力性能如图 13 所示，由图 13 可见，传感器自身的应力分布不均匀，传感器与侧面周围混凝土的应力相差很大，而变形基本协调.

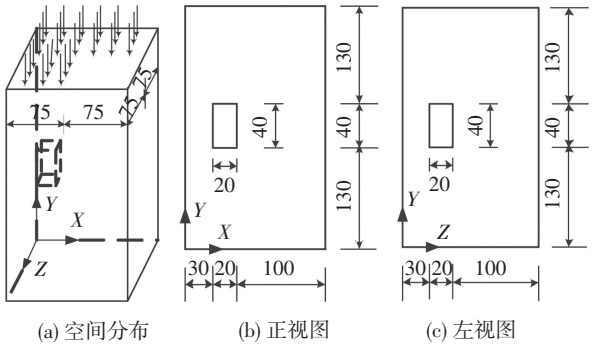


图 12　偏压荷载作用下传感器埋入混凝土试件中的位置(mm)

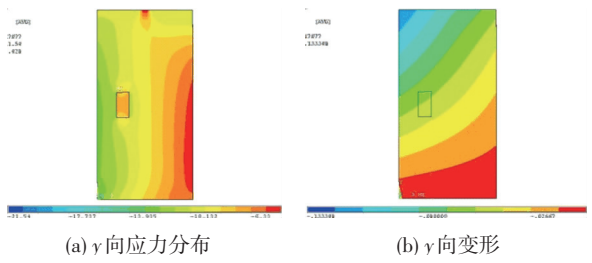


图 13　偏压荷载作用下的应力与变形

在偏压荷载作用下，传感器的平均应变为 -383.4×10^{-6}，其侧面周围混凝土的平均应变为 -371.5×10^{-6}，应变相对差 1 为 3.22%，小于埋入中心的传感器在均布荷载作用下的应变相对差 1(5.61%)，未埋入传感器时传感器占据空间的混凝土的平均应变为 -366.7×10^{-6}，应变相对差 2 为 4.56%，小于埋入中心的传感器在均布荷载作用下的应变相对差 2(12.20%).因此，镍粉水泥基传感器可以实现对偏压荷载作用下混凝土应变的监测，并且应变相对差均较小可以忽略.

5.2　弯曲荷载

将传感器埋入跨度为 1 500 mm 的钢筋混凝土梁中间部位，传感器上端面距梁的上端面30 mm，梁的两端各 100 mm 处为支座，梁采用三分点和二分点加载，荷载大小为 40 kN，梁的尺寸和配筋如图 14 所示，混凝土保护层厚度为30 mm，箍筋间距为 160 mm.受力纵筋采用直径为 12 mm 的二级钢筋，架力筋采用直径为 10 mm 的二级钢筋，箍筋采用直径为 8 mm 的一级钢筋.

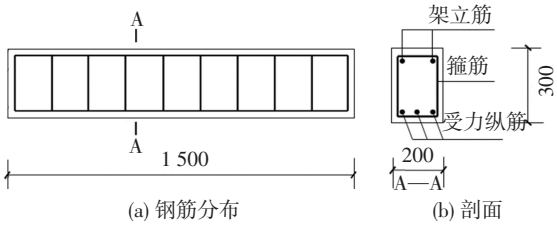
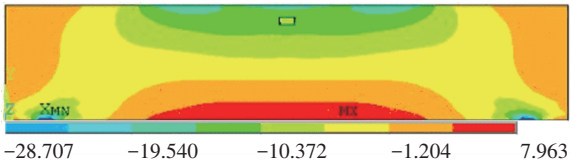


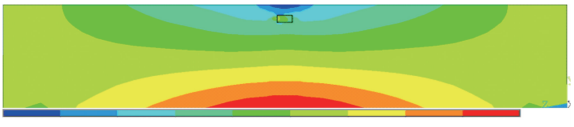
图 14　钢筋混凝土梁构造(mm)

图 15 为四点弯曲加载和三点弯曲加载时梁和传感器的应力图.由图可见，传感器与侧面周围混凝

土的应力相差很大.图 15 (a)的四点弯曲加载,在梁的纯弯段,传感器的平均应变为-479.2×10^{-6},其侧面周围混凝土的平均应变为-456.1×10^{-6},应变相对差 1 为 5.06%,稍小于埋入中心的传感器在均布荷载作用下的应变相对差 1 (5.61%),未埋入传感器时传感器占据空间的混凝土的平均应变为-424.3×10^{-6},应变相对差 2 为 12.94%,稍大于埋入中心的传感器在均布荷载作用下的应变相对差 2 (12.20%).图 15 (b)的三点弯曲加载,传感器的平均应变为-267.5×10^{-6},其侧面周围混凝土的平均应变为-248.3×10^{-6},应变相对差 1 为 7.73%,稍大于埋入中心的传感器在均布荷载作用下的应变相对差 1(5.61%),未埋入传感器时传感器占据空间的混凝土的平均应变为-231.1×10^{-6},应变相对差 2 为 15.8%,大于埋入中心的传感器在均布荷载作用下的应变相对差 2(12.20%).因此,镍粉水泥基传感器可以实现对钢筋混凝土梁的监测,但三点弯曲下应变相对差 2 的变化比较显著.



(a) 四点弯曲



(b) 三点弯曲

图 15 梁和传感器的应力分布

6 结 论

1)镍粉水泥基传感器埋入表层比埋入中心时的应变相对差大,传感器在实际应用中应埋设在应变均匀的中心区域,避免埋在表层.

2)小角度偏斜时对镍粉水泥基传感器的平均应变影响较小,对监测结果影响不大,但传感器的小角度偏斜使得传感器局部出现应力集中.

3)镍粉水泥基传感器和侧面周围混凝土的应变协调程度随着混凝土强度等级的提高而变差;应变相对差随着荷载的增大而增大,最后趋于不变.针对不同的混凝土强度等级和荷载大小,应变相对差 2 的变化较为显著.

4)镍粉水泥基传感器可以实现对偏压和弯剪荷载作用下混凝土构件/结构应变的监测,其中偏压荷载作用下传感器与周围混凝土应变协调性较好,而弯剪荷载作用下的应变协调性较差.

参考文献

[1] HAN B G, YU Y, HAN B Z, et al. Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cement-based sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(2): 536-543.

[2] 姚武,陈兵,吴科如. 碳纤维水泥基材料的机敏特性研究[J]. 复合材料学报,2002, 19(2):49-53.

[3] 范晓明,敖芳,孙明清,等. 嵌入式碳纤维石墨水泥基复合材料的压阻特性[J]. 建筑材料学报,2011, 14(1): 88-91.

[4] HAN B G, WANG Y Y, SUN S W, et al. Nanotip-induced ultrahigh pressure-sensitive composites: principles, properties and applications[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 59: 105-114.

[5] 罗健林,段忠东,赵铁军. 纳米碳管水泥基复合材料的电阻性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010, 42(8): 1237-1241.

[6] 孙明清,李卓球,刘清平. 水泥及水泥基复合材料的机敏性研究[J]. 材料导报,2002(5): 52-54.

[7] HAN B G, ZHANG K, YU X, et al. Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection [J]. Measurement, 2011, 44(9): 1645-1650.

[8] HAN B G, HAN B Z, OU J P. Experimental study on use of nickel powder-filled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 149(1): 51-55.

[9] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[10] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[11] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 魏希柱)