

文章编号:1672-9331(2021)01-0001-06

埋入式传感器与沥青混合料的交互影响研究

刘朝晖¹, 夏红卫¹, 柳力^{1,2}

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究埋入式应变传感器与沥青混合料的交互影响, 利用 ABAQUS 有限元软件, 建立了在四点弯曲加载条件下埋入应变传感器的梁试件有限元模型, 分析了荷载大小、传感器测力杆长度和传感器封装材料模量等因素对沥青混凝土梁试件及传感器的力学响应与应力集中的影响。研究表明: 传感器埋入沥青混合料梁试件后, 在梁试件上与传感器法兰相接触的沥青混合料发生了应力集中的现象, 但应力集中系数较小, 最大值仅为 2.95。传感器的测力杆也发生了应力集中现象, 其应力集中系数最大值为 26.83, 远高于梁试件的应力集中系数。

关键词: 道路工程; 应变传感器; 沥青混合料; 交互影响; 应力集中

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Research on the interaction effect of embedded sensor and asphalt mixture

LIU Zhao-hui¹, XIA Hong-wei¹, LIU Li^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the interaction effect between embedded strain sensor and asphalt mixture, the finite element model of beam specimen embedded with strain sensor under four-point bending loading condition was established by using ABAQUS finite element software. The effects of load size, sensor pull rod length and sensor encapsulating material modulus on mechanical response and stress concentration of asphalt concrete beam specimen and sensor were analyzed. The results show that after the sensor is embedded in the asphalt mixture beam specimen, the stress concentration phenomenon occurs in the beam specimen, which is located in the asphalt mixture contacting with the sensor flange. But the stress concentration coefficient is small, the maximum value is only 2.95. The sensor also has the stress concentration phenomenon in the pull rod, and the maximum value of the stress concentration coefficient is 26.83, which is much higher than that of the beam specimen.

Key words: road engineering; strain sensor; asphalt mixture; interaction effect; stress concentration

在路面结构中埋入传感器是近年来新兴的一种路面结构监测技术^[1-4]。为了满足沥青路面粗

放式的施工条件和恶劣的服役条件, 埋设于沥青路面内部的传感器封装材料的模量一般远高于沥

收稿日期: 2020-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600200); 国家自然科学基金资助项目(51678078); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5578); 长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金资助项目(kfj180101)

通讯作者: 刘朝晖(1968—), 男, 教授, 主要从事道路工程方面的研究。E-mail: 723772885@qq.com

青混合料的模量,这给沥青路面内部结构的力学响应带来了一系列问题^[5-6]。针对传感器封装材料模量普遍高于沥青混合料模量的问题,现有的研究大多集中在传感器的标定校正及开发低模量的传感器方面。

在传感器的标定校正方面,李东升等^[7]考虑了传感器封装层的影响,采用直接埋入式封装传感器的同心柱环模型,通过解析法得出了传感器测量应变和真实应变之间的理论关系,对传感器测量结果的标定校正具有重要的指导意义。谭忆秋等^[8]通过植入传感器的四点弯曲加载梁试验,对单一受力模式下传感器的力学响应进行了研究,建立了传感器实测应变值和理论计算值之间的回归关系。在低模量传感器开发方面,刘艳萍^[9]采用了一种模量较低的新型橡胶封装传感器,试验结果表明此种传感器使用性能较好,但传感器的灵敏度较差。赵逸宁^[10]利用土工格栅和沥青路面协调性好的特点,采用土工格栅封装传感器,结果表明传感器灵敏度较高,但其存活率有待提高。解建光等^[11-12]将一定比例的环氧树脂与增韧剂混合后对传感器进行封装,传感器封装材料模量较小,且与沥青混合料的协调性较好,但其耐久性较差。因此,开发低模量传感器还需要进一步的研究。

由于传感器材料的模量和沥青混合料的模量之间存在差异,将传感器埋入沥青混合料中势必会与沥青混合料产生交互影响^[13],目前这一方面的研究还较少。本研究通过三维有限元力学分析方法,建立了在四点弯曲加载条件下埋入应变传感器的沥青混合料梁试件的有限元模型,考虑了荷载大小、传感器测力杆长度和传感器封装材料模量等影响因素,研究传感器在埋入沥青混合料后与沥青混合料产生的交互影响。

1 三维有限元模型

参考国内外的试验方法,在四点弯曲加载条件下,在梁试件中中性轴以下受拉明显,受力状态简单,与车辆荷载作用下沥青面层底部的受力状态相似,为此本研究建立了在四点弯曲加载条件下埋入水平拉应变传感器的梁试件有限元模型^[14]。梁试件模型尺寸为 500 mm×150 mm×150 mm,

沥青混合料类型为 AC-13,弹性模量为 1 400 MPa,泊松比为 0.35。传感器采用浙江东华测试技术股份有限公司生产的 DH1204 埋入式应变传感器,传感器形状为 H 形,中间测力杆长度为 100 mm,两端为两个法兰,传感器弹性模量为 50 GPa,泊松比为 0.305。在四点弯曲加载条件下,越靠近梁试件底部,水平拉应力越大。但考虑到传感器尺寸,将传感器水平埋设于梁试件中部,距梁底 25 mm。将梁试件中间 450 mm 的部分进行三等分,在梁试件上表面中间两等分点设置两个宽 5 mm 的条带,施加竖直向下的荷载。在试件下表面两端的两等分点设置两个宽 5 mm 的条带,采用完全固定的边界条件。梁试件和传感器的计算网格均采用 C3D20R 单元,网格划分情况如图 1 所示。

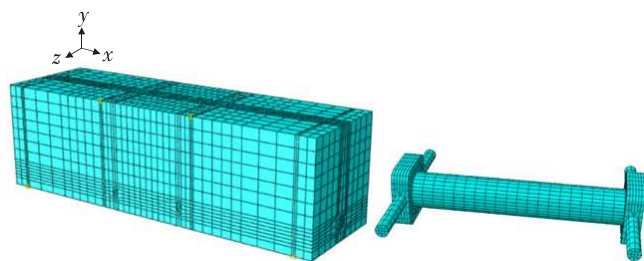


图 1 三维模型及网格划分

Fig. 1 3D model and mesh division

2 有限元计算结果及分析

通过梁试件破坏试验,得到沥青混凝土梁在四点弯曲加载条件下的最大破坏荷载为 17.0 kN,在沥青混合料梁试件顶部的四分点处施加竖直向下的 17.0 kN 耦合荷载,将竖直剖切埋入传感器的梁试件的水平应力与无传感器的梁试件的水平应力进行对比分析,结果见图 2。

从图 2 可以看出:无传感器的梁试件中部纯弯段受力均匀,中性轴以下为受拉区域,中性轴以上为受压区域,符合四点弯曲梁的受力特性。依据文献^[15],当沥青混合料梁试件处于四点弯曲加载条件下时,梁试件纯弯段最大水平拉应力的理论计算值为:

$$\delta_t = \frac{L \times P}{w \times h^2} \quad (1)$$

式中: L 为梁试件跨距; P 为峰值荷载; w 为梁宽; h 为梁高。

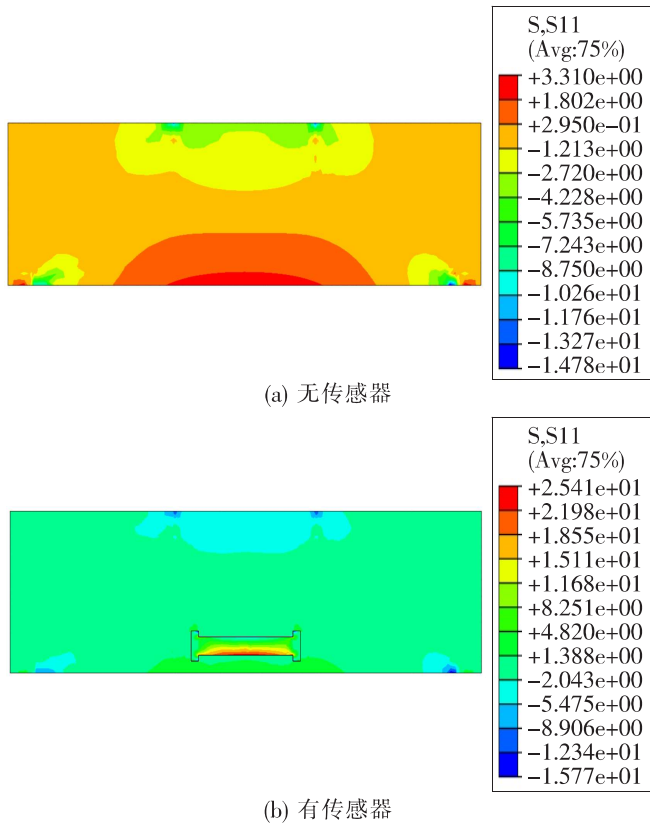


图 2 梁试件的水平应力剖面云图

Fig. 2 Horizontal stress profile nephogram of beam specimen

将梁试件纯弯段最大水平拉应力的有限元计算值与理论计算值进行对比,采用差异率来衡量二者之间的差异:

$$E_{rr} = \frac{|\delta_f - \delta_t|}{\delta_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_f 为最大水平拉应力的有限元计算值; δ_t 为最大水平拉应力的理论计算值。

由式(2)计算得到梁试件纯弯段最大水平拉应力的理论计算值为 2.267 MPa,其有限元计算值为 2.291 MPa,最大水平拉应力的有限元计算值与理论计算值相比,差异率极小仅为 1.06%,说明此有限元模型计算精度高,可用其计算结果进行进一步的研究分析。

在埋入应变传感器后,梁试件的应力场发生了明显变化,最大拉应力从梁试件底部转移到了传感器底部。以传感器下表面及与传感器相接触的沥青混合料为研究对象,考虑到此三维有限元模型的对称性,以传感器中心为原点,取此三维有限元模型的一半进行分析。传感器埋设位置的应力和与传感器相接触的沥青混合料的应力沿水平横向距离的变化以及无传感器时对应位置的应力变化如图 3 和图 4 所示。

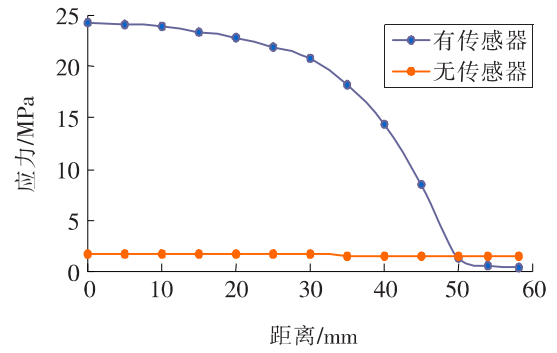


图 3 传感器埋设位置的应力沿水平横向距离的变化

Fig. 3 Variation of stress at sensor embedment position along horizontal transverse distance

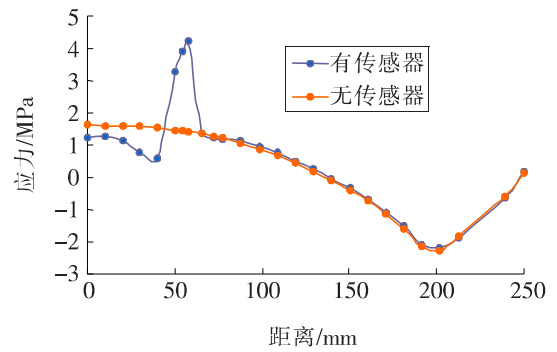


图 4 与传感器相接触的沥青混合料的应力沿水平横向距离的变化

Fig. 4 Variation of stress of asphalt mixture in contact with the sensor along horizontal transverse distance

由图 3 可知:将传感器埋设在沥青混合料中,有传感器时的应力大于无传感器时梁试件对应位置的应力,说明有传感器时发生了应力集中现象,应力集中位置位于传感器的测力杆。传感器的法兰应力低于无传感器时梁试件对应位置的应力,说明传感器的法兰无应力集中现象发生。

由图 4 可知:由于传感器测力杆发生了应力集中现象,导致与传感器测力杆相接触的沥青混合料的应力略有降低。仅在传感器法兰部分,沥青混合料的应力大于不埋设传感器时相应位置的应力,说明与传感器法兰相接触的沥青混合料发生了应力集中现象。

3 沥青混合料梁试件应力集中现象分析

据上述分析,与传感器法兰相接触的沥青混合料发生了应力集中。沥青混合料应力集中的程度可以用应力集中系数表示:

$$a = \frac{\delta_1}{\delta_0} \quad (3)$$

式中: δ_1 为埋入传感器后与传感器法兰相接触的沥青混合料的应力均值; δ_0 为无传感器时对应位置的应力均值。

3.1 荷载大小的影响

以 DH1204 埋入式应变传感器为例,变化梁试件顶部施加的荷载,得到沥青混合料梁试件的应力计算结果,见表 1。

表 1 不同荷载作用下梁试件应力的计算结果

Table 1 Stress calculation results of beam specimen with different loads

荷载/kN	δ_1 /MPa	δ_0 /MPa	a
3.4	0.709	0.288	2.46
6.8	1.417	0.575	2.46
10.2	2.127	0.863	2.46
13.6	2.835	1.151	2.46
17.0	3.550	1.438	2.47

由表 1 可知:沥青混合料梁试件的应力集中系数较小,说明沥青混合料梁试件因传感器埋入引起的应力集中程度较小。变化梁试件顶部施加的荷载,当所施加的荷载从 3.4 kN 增加到 17.0 kN 时,沥青混合料梁试件的应力集中系数仅增加了 0.4%,说明沥青混合料的应力集中程度受荷载大小的影响极小。当施加的荷载为 17.0 kN 时,沥青混合料梁试件的应力集中系数达到最大值。

3.2 测力杆长度的影响

据上述分析,沥青混合料梁试件的应力集中系数受荷载大小的影响极小,在梁试件顶部施加 17.0 kN 的荷载时,沥青混合料梁试件的应力集中系数达到最大值。由于目前沥青路面所用传感器测力杆的长度为 50~120 mm^[16],本研究在此范围内变化传感器测力杆的长度,同时在梁试件顶部施加 17.0 kN 竖直向下的荷载,其他参数固定不变,得到传感器测力杆长度不同时沥青混合料梁试件的应力计算结果,见表 2。

由表 2 可知:随着传感器测力杆的增长,沥青混合料梁试件的应力集中系数不断变大。当传感器测力杆的长度从 50 mm 增长到 120 mm 时,沥青混合料的应力集中系数增大了 44.0%,说明梁试件的应力集中程度受传感器测力杆长度的影响较大。因为传感器的模量高于沥青混合料的模

表 2 测力杆长度不同时梁试件应力的计算结果

Table 2 Stress calculation results of beam specimen with different pull rod lengths

测力杆长度/mm	δ_1 /MPa	δ_0 /MPa	a
50	3.292	1.811	1.82
60	3.362	1.790	1.88
70	3.423	1.766	1.94
80	3.441	1.737	1.98
90	3.487	1.702	2.05
100	3.550	1.438	2.47
110	4.228	1.616	2.62
120	4.096	1.566	2.62

量,使埋入式传感器与沥青混合料之间产生交互作用。将传感器埋入沥青混合料,破坏了沥青混合料的连续性,传感器测力杆长度越长,这种影响就越明显,沥青混合料梁试件的应力集中系数也就越大。

3.3 传感器封装材料模量的影响

据上述分析,梁试件的应力集中系数受传感器测力杆长度的影响较大,且在传感器测力杆长度为 120 mm 时,沥青混合料的应力集中系数达到最大值。由于目前沥青路面所用传感器封装材料的模量为 10~150 GPa^[16],本研究在此范围内变化传感器封装材料的模量,同时在梁试件顶部施加 17.0 kN 的荷载,取传感器测力杆长度为 100 mm,其他参数不变,得到不同传感器封装材料模量下梁试件应力的计算结果,见表 3。

表 3 不同传感器封装材料模量下梁试件应力的计算结果

Table 3 Stress calculation results of beam specimen with different sensor encapsulating material modulus

封装材料模量/GPa	δ_1 /MPa	δ_0 /MPa	a
10	2.545	1.566	1.63
30	3.439	1.566	2.20
50	4.096	1.566	2.62
70	4.214	1.566	2.69
90	4.284	1.566	2.74
110	4.407	1.566	2.81
130	4.533	1.566	2.89
150	4.613	1.566	2.95

由表 3 可知:随着传感器封装材料模量的增大,埋入式传感器封装材料与沥青混合料的模量差也不断增大,传感器封装材料与沥青混合料的

交互作用也更加明显,沥青混合料梁试件的应力集中系数也更大。当传感器封装材料的模量从 10 GPa 增大到 150 GPa 时,沥青混合料梁试件的应力集中系数增大了 81.0%,说明梁试件的应力集中程度受传感器封装材料模量的影响较大。

4 埋入式传感器应力集中现象分析

按照本研究提出的方法,用应力集中系数衡量传感器应力集中程度的大小。此时, δ_1 为传感器测力杆部分的应力均值, δ_0 为无传感器时对应位置的应力均值。

4.1 荷载大小的影响

与上述分析相对应,以 DH1204 埋入式应变传感器为例,变化梁试件顶部施加的荷载,得到不同荷载作用下传感器的应力计算结果,见表 4。

表 4 不同荷载作用下传感器的应力计算结果

Table 4 Stress calculation results of sensor with different loads

荷载/kN	δ_1 /MPa	δ_0 /MPa	α
3.4	4.095	0.316	12.96
6.8	8.296	0.631	13.15
10.2	12.583	0.947	13.29
13.6	16.837	1.263	13.33
17.0	21.085	1.578	13.36

由表 4 可知:传感器的应力集中系数远大于沥青混合料的应力集中系数,说明传感器的应力集中程度比沥青混合料的更大。随着荷载的增大,传感器的应力集中系数也随之增大。当荷载从 3.4 kN 增大到 17.0 kN 时,传感器的应力集中系数仅增加了 3.1%,说明传感器的应力集中程度受荷载大小的影响较小。当荷载为 17.0 kN 时,传感器的应力集中系数达到最大值。

4.2 测力杆长度的影响

据上述分析,传感器的应力集中程度受荷载大小的影响较小,当在梁试件顶部施加 17.0 kN 的荷载时,传感器的应力集中系数达到最大值。在梁试件顶部施加 17.0 kN 竖直向下的荷载,其他参数固定不变,变化传感器的测力杆长度,得到测力杆长度不同时传感器的应力计算结果,见表 5。

由表 5 可知:埋入式传感器的应力集中系数随传感器测力杆长度的变化与沥青混合料梁试件

表 5 测力杆长度不同时传感器的应力计算结果

Table 5 Stress calculation results of sensor with different pull rod lengths

测力杆长度/mm	δ_1 /MPa	δ_0 /MPa	α
50	14.677	1.607	9.13
60	16.535	1.604	10.31
70	17.955	1.599	11.23
80	19.213	1.593	12.06
90	20.231	1.586	12.76
100	21.085	1.578	13.36
110	21.813	1.569	13.90
120	22.432	1.558	14.40

的应力集中系数随传感器测力杆长度的变化类似。传感器的应力集中系数随传感器测力杆长度的增长而不断增大,说明传感器测力杆的长度越长,传感器与沥青混合料之间的交互作用越大,二者的应力集中系数也都随之增大。传感器的应力集中系数受传感器测力杆长度的影响较大,当传感器测力杆长度从 50 mm 增加到 120 mm 时,传感器的应力集中系数增大了 57.7%。

4.3 传感器封装材料模量的影响

据上述分析,传感器的应力集中系数随传感器测力杆长度的增长而增大,且在传感器测力杆长度为 120 mm 时达到最大值。取传感器测力杆长 120 mm,其他参数不变,将传感器封装材料模量从 10 GPa 增大到 150 GPa,得到埋入不同模量传感器的力学响应和应力集中结果,见表 6。

表 6 不同封装材料模量下传感器应力的计算结果

Table 6 Stress calculation results of sensor with different encapsulating material modulus

封装材料模量/GPa	δ_1 /MPa	δ_0 /MPa	α
10	6.561	1.558	4.21
30	14.889	1.558	9.56
50	22.432	1.558	14.40
70	26.261	1.558	16.86
90	30.773	1.558	19.75
110	34.797	1.558	22.33
130	38.454	1.558	24.68
150	41.808	1.558	26.83

由表6可知:埋入式传感器的应力集中系数随传感器封装材料模量的变化与沥青混合料梁试件的应力集中系数随传感器封装材料模量的变化类似。随着传感器封装材料模量的增大,埋入式传感器与沥青混合料的模量差不断增大,传感器与沥青混合料的交互作用更加明显,传感器的应力集中系数也更大。当传感器封装材料的模量从10 GPa增大到150 GPa时,传感器的应力集中系数增加了537.3%,说明传感器的应力集中程度受传感器封装材料模量的影响较大。

5 结论

本研究通过建立有限元模型,对埋入式传感器与沥青混合料的交互影响进行了分析,得到以下结论:

1) 埋入传感器后的沥青混合料梁试件的力学响应大于无传感器的沥青混合料梁试件的力学响应,说明传感器的埋入会导致沥青混合料梁试件发生应力集中,应力集中发生在与传感器法兰相接触的沥青混合料中。

2) 埋入传感器的沥青混合料梁试件的应力集中系数较小,其最大值仅为2.95,说明埋入传感器引起沥青混合料梁试件应力集中的程度较小。

3) 将传感器埋入沥青混合料梁试件后,传感器本身也会发生应力集中现象,应力集中发生在传感器的测力杆上。

4) 传感器的应力集中系数远大于沥青混合料梁试件的应力集中系数,最大值为26.83,说明埋入式传感器的应力集中程度远大于沥青混合料梁试件的应力集中程度。

5) 埋入式传感器与沥青混合料梁试件的交互作用受所施加荷载大小的影响较小,受传感器测力杆长度及其封装材料模量的影响较大。随着传感器测力杆长度的增长,封装材料模量的增大,埋入式传感器与沥青混合料的交互作用也随之增大。

〔参考文献〕

- [1] WANG Lin-bing,王含笑,赵千,等.智能路面发展与展望[J].中国公路学报,2019,32(4):50-72.
WANG Lin-bing, WANG Han-xiao, ZHAO Qian, et al.

- Development and prospect of intelligent pavement[J]. Journal of Chinese Highway, 2019, 32(4): 50-72.
- [2] 罗玉林.智慧道路系统架构研究[J].公路与汽运, 2019(4):24-27, 51.
LUO Yu-lin. Research on intelligent road system architecture[J]. Highway and Automobile Transportation, 2019(4): 24-27, 51.
- [3] 邢丹,罗晓岚.级配碎石复合式基层沥青路面力学响应研究[J].公路工程,2020,45(3):240-246.
XING Dan, LUO Xiao-lan. Research on mechanical performance of unbound graded aggregate composite-based asphalt pavement[J]. Highway Engineering, 2020, 45(3): 240-246.
- [4] 张慧中,臧国帅,孙立军.半刚性基层沥青路面动态应变响应实测分析[J].交通科学与工程,2017,33(1):12-17.
ZHANG Hui-zhong, ZANG Guo-shuai, SUN Li-jun. Field measurement of dynamic strain response of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Traffic Science and Engineering, 2017, 33(1): 12-17.
- [5] 尚阳.基于FBG传感器的道路结构信息监测方法研究[D].西安:长安大学,2013:24-25.
SHANG Yang. Research on road structure information monitoring method based on FBG sensor[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013: 24-25.
- [6] 王虎,张化涛.沥青混合料在重复荷载作用下的黏弹性变形[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2019,16(1):17-21, 65.
WANG Hu, ZHANG Hua-tao. Viscoelasticity study of asphalt mixture deformation under repeated loading[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2019, 16(1): 17-21, 65.
- [7] 李东升,李宏男.埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J].力学学报,2005(4):435-441.
LI Dong-sheng, LI Hong-nan. Strain transfer analysis of embedded fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005(4): 435-441.
- [8] 谭忆秋,董泽蛟,田庚亮,等.光纤光栅传感器与沥青混合料协同变形评价方法[J].土木建筑与环境工程,2009,31(2):100-104.
TAN Yi-qiu, DONG Ze-jiao, TIAN Geng-liang, et al. Fiber Bragg grating sensor and asphalt mixture collaborative deformation evaluation method[J]. Civil Construction and Environmental Engineering, 2009, 31(2): 100-104.

(下转至第39页)

- versity of Science & Technology: Natural Science, 2020, 17(2): 1-9.
- [12] 刘晓薇. 基于 HP-GPC 的温拌改性沥青老化特性研究[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 287-292.
- LIU Xiao-wei. Study on aging characteristics of warm mix modified asphalt based on HP-GPC[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 287-292.
- [13] 黄维蓉, 杨玉柱, 杨东来, 等. 降黏型与表面改性型温拌剂对沥青混合料性能的影响[J]. 公路与汽运, 2020(6): 57-60.
- HUANG Wei-rong, YANG Yu-zhu, YANG Dong-lai, et al. Influence of viscosity reducing and surface modified warm mixture on asphalt mixture performance[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6): 57-60.
- [14] 黄绍龙, 卞周宏, 金帆, 等. 三种沥青温拌剂降黏机理分析[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2017, 39(5): 506-510.
- HUANG Shao-long, BIAN Zhou-hong, JIN Fan, et al. Analysis of viscosity reduction mechanism of three asphalt warm mixing agents[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2017, 39(5): 506-510.
- [15] 陈四来, 延西利, 李鹏, 等. 沥青和沥青胶浆的黏弹性特性[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 12-17.
- CHEN Si-lai, YAN Xi-li, LI Peng, et al. Viscoelastic properties of asphalt and asphalt binder[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 12-17.
- [16] 黄卫东, 傅星恺, 李彦伟, 等. SBS 类改性沥青低温性能评价及指标相关性分析[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 456-463.
- HUANG Wei-dong, FU Xing-kai, LI Yan-wei, et al. Low temperature performance evaluation and index analysis of SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 456-463.
-
- (上接第 6 页)
- [9] 刘艳萍. 橡胶封装 FBG 沥青路面竖向应变传感器的开发与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 57-58.
- LIU Yan-ping. Development and research on rubber encapsulated FBG asphalt pavement vertical strain sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 57-58.
- [10] 赵逸宁. 利用光纤光栅技术监测沥青路面温度与应力场[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 48-51.
- ZHAO Yi-ning. Monitoring temperature and stress field of asphalt pavement using fiber Bragg grating technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 48-51.
- [11] 解建光, 刘树龙. 环氧树脂掺加增韧剂埋入式 FBG 封装技术研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 22-24.
- XIE Jian-guang, LIU Shu-long. Study on embedded FBG packaging technology with epoxy resin and toughening agent[J]. Sensors and Microsystems, 2011, 30(3): 22-24.
- [12] 解建光, 王秋桐, 刘树龙, 等. 光纤 Bragg 光栅监测沥青混凝土应变试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(3): 17-20, 50.
- XIE Jian-guang, WANG Qiu-tong, LIU Shu-long, et al. Fiber Bragg grating monitoring strain test of asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(3): 17-20, 50.
- [13] 曹卫锋. 车辆动载作用下长大上坡沥青路面力学响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 89-92.
- CAO Wei-feng. Research on mechanical response of long-uphill asphalt pavement under vehicle dynamic load[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 89-92.
- [14] 梁晓龙. 半刚性基层沥青路面加速加载 (MLS) 试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 37-41.
- LIANG Xiao-long. Research on accelerated pavement test (MLS) for semi-rigid base asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 37-41.
- [15] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [16] 马宪永. 随机荷载作用下沥青路面力学响应理论求解与监测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 6-14.
- MA Xian-yong. Analytical solution and monitoring method of mechanical response of asphalt pavement to random load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 6-14.