

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.013

文章编号:1672-9331(2022)04-0131-12

引用格式:刘朝晖,朱国虎,柳力,等.考虑协同变形增强的内置感知器件与沥青路面一体化设计方法[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):131-142.

Citation: LIU Zhaohui, ZHU Guohu, LIU Li, et al. Integrated design method of built-in sensing device and asphalt pavement considering collaborative deformation enhancement[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 131-142.

考虑协同变形增强的内置感知器件与 沥青路面一体化设计方法

刘朝晖, 朱国虎, 柳力, 李文博, 傅顺发

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】解决内置感知器件与沥青路面材料因模量差异大造成的变形不协调问题,提出考虑协同变形增强的内置感知器件与沥青路面一体化设计方法。【方法】以埋入式电阻应变传感器为内置感知器件,利用有限元软件建立融合内置传感器的沥青混合料结构模型,通过数值模拟与计算,以10.0%的应力差异率为评价指标,确立内置传感器的应力影响范围作为模量过渡区域;采用环氧树脂材料制作模量过渡区,并对模量过渡区力学性能进行试验评价;运用数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法对内置感知器件的沥青混合料试件开展单轴压缩和四点弯曲加载下的力学响应试验,通过比较传感器实测响应值和DIC法测量结果之间的差异,分析模量过渡区对传感器与沥青路面协同变形增强的有效性。【结果】内置传感器会改变沥青混合料结构的应力分布状态,传感器的竖、横、纵三向影响范围为58 mm×199 mm×82 mm,环氧树脂材质的模量过渡区具有良好的力学性能,其弹性模量为沥青混合料的2.5倍,可在沥青混合料与感知器件之间形成有效的模量过渡区;在逐级压缩和弯拉受力下,设置模量过渡区使传感器测得的试件结构应变差均值分别降低了66.6%和65.9%,设置模量过渡区能显著提高内置感知器件实测响应的稳定性和有效性。【结论】在沥青混合料与感知器件之间设置模量过渡区,使之形成模量梯度过渡结构,是提升两者协同变形的有效手段;在实际工程应用中,协同变形增强一体化设计流程主要包括:模量过渡区范围确定、材料选择、性能评价及协同变形有效性验证。

关键词:内置感知器件;沥青路面;一体化设计方法;协同变形增强;模量过渡区

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

沥青路面结构在外部荷载作用下产生的力学响应是构建设计方法,确定设计参数,进行结构评价及缺陷诊断的重要依据,对路面设计和性能评估具有重要的指导作用^[1-3]。在沥青路面结构内部埋设智能感知器件采集结构力学响应是一种新

型路面状况监测手段^[4-6],为判别路面状况提供有效数据,从而使路面养护工作得以准确有效地开展^[7]。

当前对该方法的研究主要集中于感知器件在路面内部的埋设位置和埋设方法、感知数据采集及基于实测数据的沥青路面动力响应和结构性能分析等方面。AL-QADI等^[8]通过在机场跑道路面层埋设感知器件对荷载类型、大小及速度等数据

收稿日期:2022-09-01;修回日期:2022-09-30;接受日期:2022-10-10

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1600200);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202105);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5578)

通信作者:柳力(1988—)(ORCID: 0000-0002-1697-4315),男,讲师,主要从事沥青路面结构和材料方面的研究。

E-mail:805296712@qq.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

进行收集,并将其用于路面跑道性能预测及路面模型验证。BAYAT等^[9]利用CPATT试验路中感知器件的实测数据对提出的路面响应预测模型进行验证。王旭东等^[10]通过对RIOHTRACK试验环道中感知器件的应力、应变响应规律进行分析,发现应力、应变与路面弯沉间存在一定相关性。潘勤学等^[11]根据应变和温度传感器实测数据的变化规律对现有表征沥青混合料黏弹性本构模型的适用性进行判别。

受路面施工方式及自然环境的影响,脆弱的感知器件作为独立部件埋入沥青路面后难以存活^[12-13]。此外,由于感知器件多采用金属封装材料,其弹性模量远高于沥青混合料的弹性模量,在行车荷载等因素作用下易产生交互影响及变形不协调等问题^[14-16],严重影响传感器测量精度及使用寿命。因此,有必要在感知器件及沥青混合料之间设置模量过渡区,有效化解智能感知器件与沥青混合料模量差异大、变形协调性差和存活率低等问题。

基于上述问题,本研究旨在开发具有模量过渡、延长使用寿命、提升测量精度和存活率等功能的感知器件模量过渡区。首先,利用有限元数值模拟软件界定传感器在沥青混合料中的影响范围,再根据影响范围确定过渡区尺寸,并选取模量介于感知器件与沥青混合料之间的环氧树脂作为模量过渡区材料,对两者进行模量协调过渡。环氧树脂作为一种高分子化合物,具有黏附力强、收缩性小、抗水性及耐久性好等优点^[17],其弹性模量为2.0~4.0 GPa^[18],其各项性能指标均能满足沥青路面使用要求。最后,对成型后的模量过渡区及沥青混合料试件进行多角度试验研究,验证建立模量过渡区的有效性。

1 传感器影响范围界定

1.1 传感器选择

应变参数为我国沥青路面设计的主要指标,本文选用埋入式电阻应变传感器进行相应研究,其具体尺寸如图1所示,部分技术指标见表1。

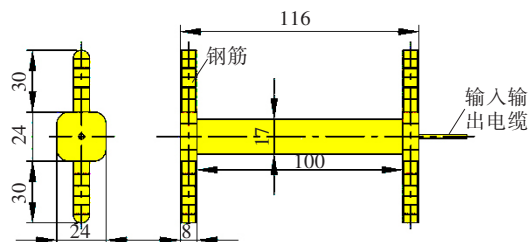


图1 应变传感器结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Structure diagram of strain sensor (unit:mm)

表1 埋入式应变传感器技术指标

Table 1 Technical indicators of embedded strain sensor

标距/ mm	量程/ 10^{-6}	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	额定输出/ 10^{-6}	桥路电阻/ Ω
100	$\pm 5\,000$	-20~200	5\,000	350

1.2 有限元模型建立

1) 有限元模型参数确定。

沥青混合料采用级配为AC-13的SBS改性沥青混合料,设置沥青混合料梁试件模型的弹性模量为1 400 MPa^[19],梁试件尺寸为500 mm×150 mm×150 mm,沥青混合料和传感器模型的具体参数见表2。试件采用四点弯曲加载方式,法向接触关系设置为硬接触,切向接触关系采用摩擦系数为0.7的罚摩擦,指定沥青混合料及传感器网格单元类型均为C3D20R。采用以上参数建立的沥青混合料梁试件及传感器有限元模型如图2所示。

表2 沥青混合料和传感器参数

Table 2 Asphalt mixture and sensor parameters

类别	弹性模量/MPa	泊松比
沥青混合料	1 400	0.350
传感器	50 000	0.305

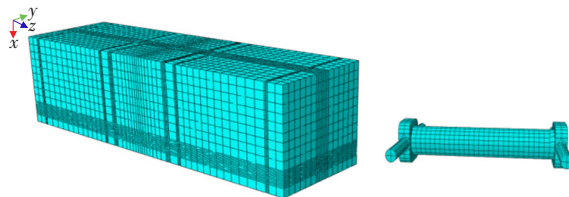


图2 应变传感器与沥青混合料梁试件有限元模型

Fig. 2 Strain sensor and finite element model of asphalt mixture beam specimen

2) 施加荷载大小确定。

通过制作沥青混合料梁试件并对其进行四点

弯曲破坏性试验,得出梁试件在四点弯曲加载模式下的最大破坏荷载为17.0 kN,梁试件上表面三分点处的受力面积为750 mm²,故在梁试件上表面三分点处施加22.67 MPa的弯拉强度。试验现场如图3所示。

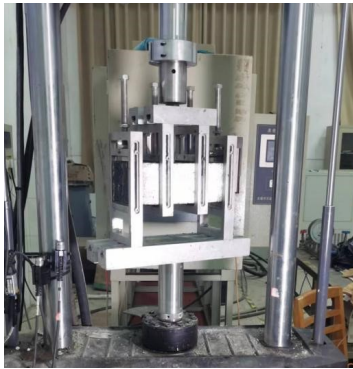


图3 四点弯曲破坏试验现场

Fig. 3 Four-point bending failure test site

1.3 传感器影响范围界定

根据以上参数对有、无感知器件的两种梁试件进行有限元模拟,获得竖向中性面的水平应力剖面云图,如图4所示。

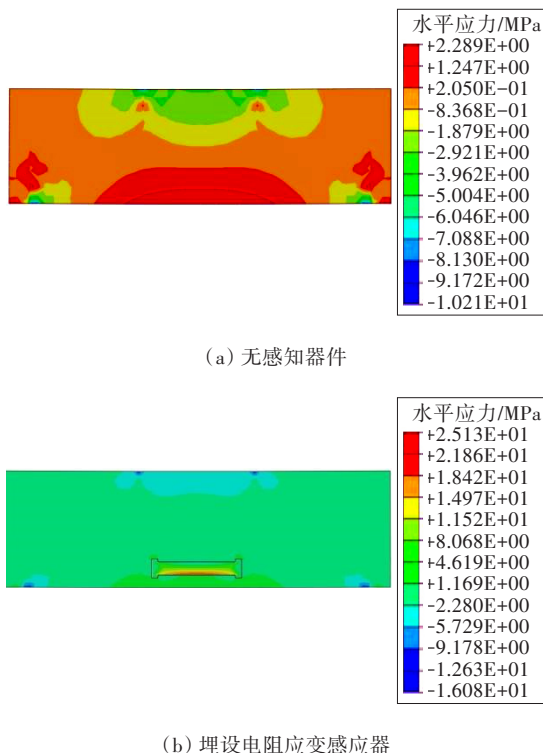


图4 沥青混合料梁试件水平应力剖面云图

Fig. 4 Horizontal stress profile cloud of asphalt mixture beam specimen

从图4可以看出,应变传感器的存在改变了梁试件的水平应力分布状态,且传感器底部产生应力集中现象。为分析传感器在沥青混合料中的影响范围,选用应力差异率作为评价指标,对沥青混合料梁试件在横、竖、纵三个方向上距感知器件不同距离处的水平应力变化情况进行定量分析。各节点的应力差异率 S_i 按公式(1)计算。

$$S_i = \frac{|\delta_{di} - \delta_i|}{|\delta_i|} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_{di} 为埋设感知器件的梁试件距感知器件端部d距离为i的水平应力有限元计算值,MPa; δ_i 为无感知器件的梁试件对应位置处的水平应力有限元计算值,MPa。

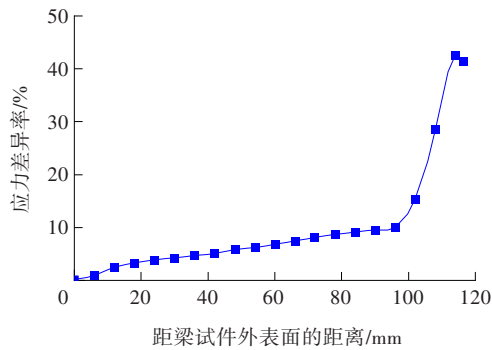
以沥青混合料与感知器件表面在竖向、横向、纵向中心轴处相接触的点为起点,沿各中心轴进行节点应力选取,沥青混合料梁试件距感知器件不同距离处的应力差异率沿各中心轴的分布情况如图5所示。

由图5可知,不同中心轴方向的梁试件应力差异率均呈先缓慢增大后迅速增大的趋势。应力差异率在与传感器接触位置达到最大,且随着距传感器距离的增加应力差异率逐渐减小,这表明应变传感器的埋入对与之接触的沥青混合料力学响应影响最大,随着距离的增加影响逐渐降低,梁试件端部位置已基本不受影响。综合考虑应力差异率的变化趋势,选择10.0%为分界点,应力差异率高于10.0%则认为传感器对该处沥青混合料的力学响应有影响,反之则认为对该处沥青混合料影响较小,由此获得应变传感器在不同方向上对沥青混合料的影响范围,见表3。

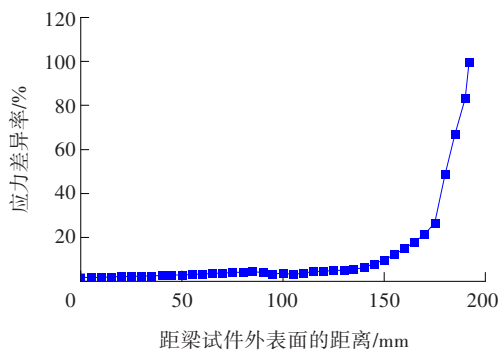
表3 应变传感器在不同方向上对沥青混合料的影响范围

Table 3 Influence range of strain sensor on asphalt mixture in different directions mm		
影响方向	应变传感器影响范围	应变传感器尺寸
竖向	20.47	17.00
横向	41.68	116.00
纵向	32.24	17.00

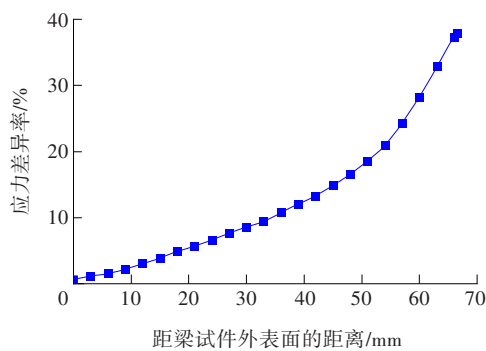
模量过渡区尺寸由应变传感器在不同方向上的影响范围及应变传感器本身尺寸两部分组成,根据表3中应变传感器对沥青混合料的影响范围,结合应变传感器自身尺寸,应变传感器模量过渡



(a) 沿竖向中心轴分布



(b) 沿横向中心轴分布



(c) 沿纵向中心轴分布

图5 梁试件沿不同中心轴方向的应力差异率分布图

Fig. 5 The stress difference rate distribution of beam specimens along different central axis directions

区尺寸按公式(2)计算。

$$\begin{aligned} l &= 2l_1 + l_2 \\ d &= 2d_1 + d_2 \\ s &= 2s_1 + s_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: l 为模量过渡区竖向尺寸,mm; l_1 为应变传感器的竖向影响范围,mm; l_2 为应变传感器的竖向尺寸,mm; d 为模量过渡区的横向尺寸,mm; d_1 为应变传感器的横向影响范围,mm; d_2 为应变传感器的横向尺寸,mm; s 为模量过渡区的纵向尺寸,mm; s_1 为应变传感器的纵向影响范围,mm; s_2 为应变传感器的纵向尺寸,mm。

对计算结果取整,最终确定应变传感器模量过渡区的尺寸为58 mm×199 mm×82 mm。

2 试件成型及传感器测量有效性试验方案

2.1 模量过渡区及沥青混合料试件制作

1) 模量过渡区制作。

采用E-44环氧树脂、593环氧树脂专用固化剂及DF-16消泡剂作为模量过渡区的主要成型材料,环氧树脂、固化剂和消泡剂的质量比为1 000.0:500.0:4.5,将环氧树脂专用脱模剂均匀涂抹于成型模具内壁。

模量过渡区具体制备过程为:首先,在模具内侧涂抹脱模剂,再用胶带将应变传感器导线缠绕于固定铁架上,使应变传感器悬吊于模具正中位置;然后,将固化剂、消泡剂和环氧树脂混合并充分搅拌均匀后倒入模具;最后,将模量过渡区置于室温下固化8 h以上,待模量过渡区初步成型后取出,继续在室温下静置72 h以上。模量过渡区成型过程如图6所示。

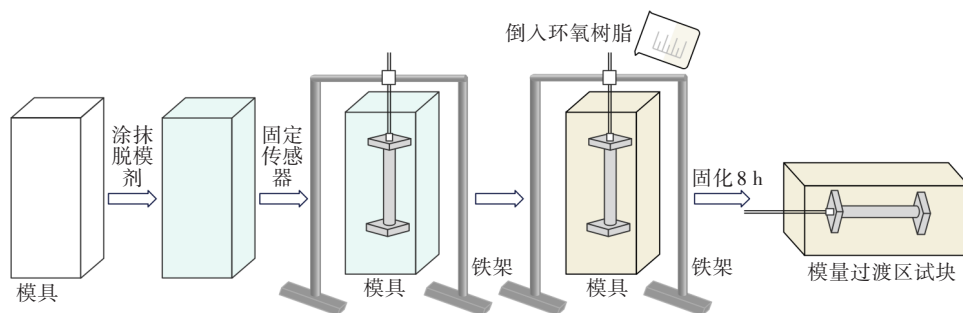


图6 模量过渡区成型过程

Fig. 6 Forming process of modulus transition zone

2) 沥青混合料试件制作。

沥青混合料试件通过轮碾成型方式分两层压实,成型的梁试件尺寸为 300 mm×100 mm×100 mm,模量过渡区埋设于梁试件中部。梁试件成型时先制作尺寸为 300 mm×100 mm×80 mm 的小梁,感知器件位置由占位铁块代替,碾压完毕后将占位块取出,埋入模量过渡区,再进行二次压实成型梁试件,试件制作过程中严格控制沥青混合料温度不低于 160 ℃。此外,为保证模量过渡区试块与沥青混合料的有效黏结,在模量过渡区试块四周涂抹沥青。沥青混合料梁试件成型过程如图 7 所示,成型后的梁试件结构尺寸如图 8 所示。

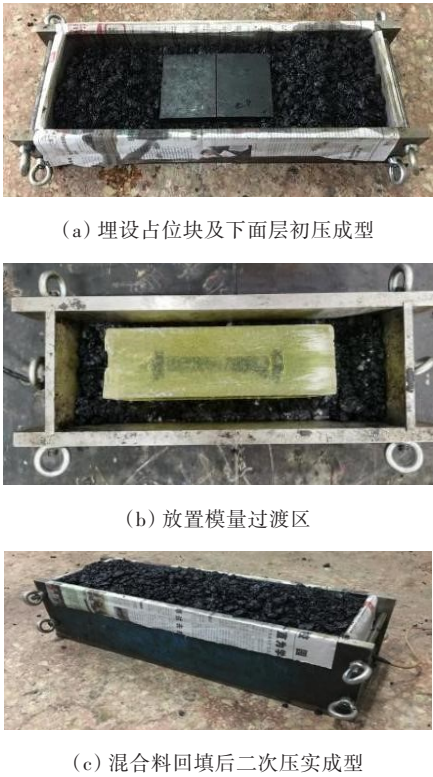


图 7 沥青混合料梁试件制作过程

Fig. 7 Production process of asphalt mixture beam specimen

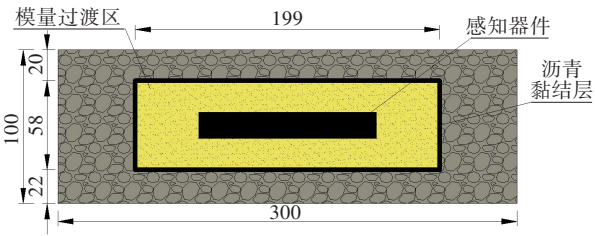


图 8 设置模量过渡区的沥青混合料梁试件结构尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 8 Structure size diagram of asphalt mixture beam specimen with modulus transition zone (unit:mm)

2.2 模量过渡区的材料力学性能试验

利用 MTS-810 万能试验机对未埋设传感器的模量过渡区试件及 SBS 改性沥青混合料试件进行多组单轴压缩及四点弯曲强度试验,验证模量过渡区的力学性能是否满足沥青路面使用要求,试验方法参考《树脂浇铸体性能试验方法》(GB/T 2567—2021)^[20]及《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[21]中的相关要求。模量过渡区力学性能试验结果见表 4。

表 4 模量过渡区的材料力学性能

Table 4 Materials mechanical properties of modulus transition zone

未埋设传感器 试件类型	极限抗压 强度/MPa	极限弯曲 强度/MPa	弹性模 量/GPa
模量过渡区	18.74	16.87	3.21
SBS 改性沥青混合料	2.47	11.33	1.25

由表 4 可知,由环氧树脂制备的模量过渡区极限抗压强度均值为 18.74 MPa,极限弯曲强度均值为 16.87 MPa,其材料力学性能均高于 SBS 改性沥青混合料的相关性能,模量过渡区能满足沥青路面使用要求。模量过渡区弹性模量均值为 3.21 GPa,介于传感器弹性模量 50.00 GPa 与沥青混合料弹性模量 1.25 GPa 之间,能够起到模量过渡的作用。

2.3 试验加载方案

为检验模量过渡区的测量准确性,利用 MTS-810 万能试验机对埋设传感器的模量过渡区进行单轴压缩逐级加载试验,对埋设模量过渡区的沥青混合料梁试件进行单轴压缩逐级加载试验及四点弯曲逐级加载试验,并通过 DIC 方法实时监测模量过渡区及沥青混合料梁试件在施加荷载过程中所产生的应变分布变化情况,以此作为真实应变与模量过渡区中应变传感器的实测值进行对比。

DIC 技术是一种基于计算机视觉原理、数字图像处理 and 数值计算的非接触式、无干扰、全场变形光学计量方法^[22]。该技术能够通过比较沥青混合料在荷载作用下变形前后的两幅数字图像,直接获取沥青混合料表面不同位置位移和应变信息,且测量的理论应变误差小于 10⁻⁷,能够满足比对应变传感器测量准确度的要求,故本研究将 DIC 获取的平均应变作为基准值比对应变传感器的测

量精确度^[23]。测量时先在试件表面喷涂哑光漆,待漆干后喷涂黑色散斑,借助高速相机对试件在加载过程中的变形情况进行快速记录,最后利用VIC-3D9分析软件对拍摄的图像进行分析处理,得到沥青混合料表面与感知器件及模量过渡区相应位置的应变变化情况。

对埋入模量过渡区的沥青混合料梁试件进行单轴压缩逐级加载试验及四点弯曲逐级加载试验,将应变传感器测得的在不同加载等级下的应变实测值,与采用DIC方法测得的应变实测值进行线性拟合,以验证模量过渡区在沥青混合料中的测量有效性,并修正应变传感器实测值。试验加载测量过程如图9所示。

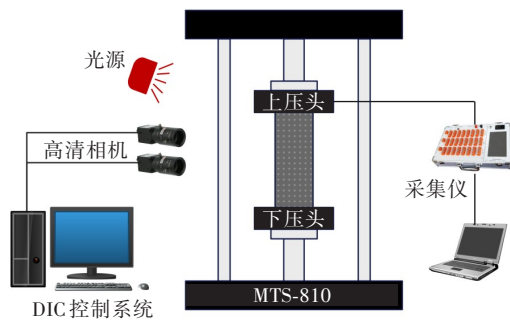


图9 试验过程示意图

Fig. 9 Diagram of the test process

3 感知器件测量有效性验证

3.1 模量过渡区监测有效性验证

采用应力控制模式对模量过渡区进行单轴压缩逐级加载试验,分十级施加瞬时荷载,每级荷载为1.5 kN,荷载间隔时间为15 s。为验证模量过渡区内应变传感器在荷载作用下应变响应的稳定性,绘制DIC及传感器实测应变值随施加荷载的变化趋势,如图10所示。为分析传感器实测应变与DIC实测应变之间的相互关系,将两组传感器在相同情况下测得的实测应变与模量过渡区表面传感器对应范围内的DIC实测应变进行线性拟合,拟合结果如图11所示。

从图10可以看出,分别由DIC及传感器测得的三组应变实测值均随着施加的竖向荷载的增加而增大。两组传感器实测应变在荷载作用下均呈现出较好的线性关系,且两组数据摆动幅度较小,

即各传感器实测应变值在相同荷载作用下较为接近,传感器的测试结果具有较好的均一性,故模量过渡区中应变传感器的荷载稳定性较好。两组模量过渡区中传感器实测应变与荷载拟合后的 R^2 值分别为0.999 38及0.999 27,这表明传感器实测应变与应力荷载关联性较强,即模量过渡区中的传感器在逐级应力荷载作用下能够产生较好的应变响应。此外,DIC实测应变与线性增长的竖向荷载拟合后的 R^2 值为0.999 61,由此可知,DIC实测应变值能够真实反映模量过渡区在荷载作用下的应变变化情况,且具有较高的可靠度,故可以将DIC实测应变值作为模量过渡区在荷载作用下的真实应变。

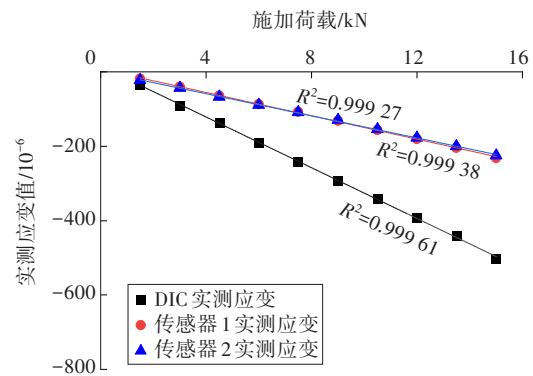


图10 DIC及传感器实测应变与应力关系曲线

Fig. 10 Relation curve of strain and stress measured by DIC and sensor

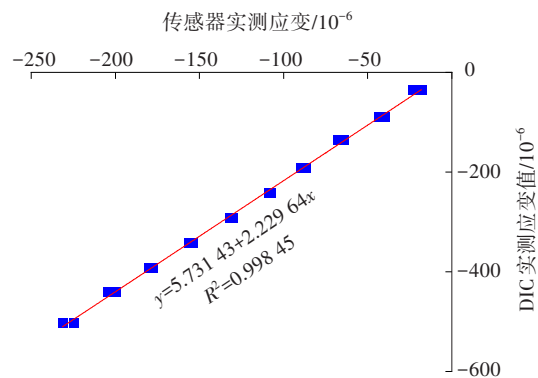


图11 应变传感器修正曲线

Fig. 11 Strain sensor correction curve

由图11可知,模量过渡区中应变传感器实测值与DIC实测值的相关系数 R^2 为0.998 45,这表明应变传感器实测值与DIC实测值具有较好的线性关系,即模量过渡区中的应变传感器能够反映模量过渡区在逐级压缩荷载作用下的真实应变变化情况。因此,环氧树脂制作成的模量过渡区对应

变传感器的裹覆效果较好,且具有相当的传递荷载的能力。

3.2 内置模量过渡区沥青混合料监测有效性验证

3.2.1 单轴压缩逐级加载

考虑到沥青混合料单轴压缩强度较环氧树脂模量过渡区的低,故设置沥青混合料单轴压缩逐级加载,每级荷载为 1 kN,加载间隔时间为 15 s,同时采集未设置模量过渡区的沥青混合料中传感器实测应变值,与对应的 DIC 实测应变值进行比较,验证模量过渡区设置的合理性及模量过渡区中传感器测量的有效性。DIC 及传感器实测应变值随应力荷载的变化趋势如图 12 所示,沥青混合料梁试件中的传感器实测应变与 DIC 实测应变差值随施加荷载的变化情况见表 5。

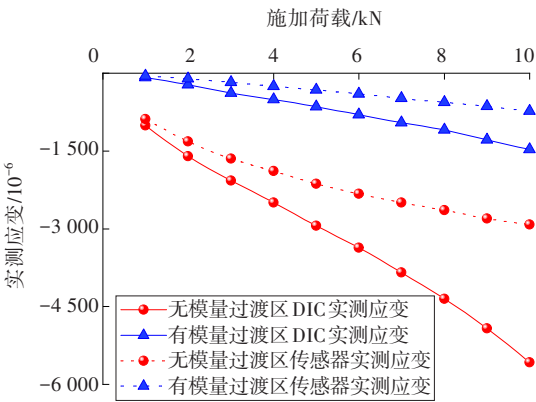


图 12 传感器实测应变与荷载关系曲线
Fig. 12 Relation curve of strain and load measured by a sensor

从图 12 可以看出,四组实测应变响应值均随着施加荷载的增加而增大,这表明四组实测应变在竖向应力作用下均具有较好的荷载响应。在单轴压缩状态下设置模量过渡区的沥青混合料梁试件 DIC 实测应变值及传感器实测应变值均低于未设置模量过渡区的梁试件相应应变值,这表明模量较高的模量过渡区在沥青混合料中产生了加筋作用,增强了沥青混合料的强度,使实测应变值降低。

由表 5 可知,未设置模量过渡区的沥青混合料梁试件 DIC 实测应变与传感器实测应变差值随着施加荷载的增加而迅速增大,且应变差值的增长速度明显大于设置模量过渡区的梁试件应变差值的增长速度。设置模量过渡区的梁试件应变差均值较未设置模量过渡区的降低了 66.6%,故模量过

渡区的设置能够有效提升传感器在压缩状态下实测应变的精确性,且模量过渡区中传感器的测量稳定性得到较大改善。

表 5 DIC 与传感器实测应变的应变差值随荷载变化情况

Table 5 Variation of strain difference between DIC and sensor measured strain with load		
荷载/ kN	未设置模量过渡区 的应变差值/ 10^{-6}	设置模量过渡区 的应变差值/ 10^{-6}
1	129.579	27.077
2	286.951	118.647
3	428.007	205.955
4	610.967	254.387
5	815.957	324.335
6	1 042.681	396.538
7	1 349.329	467.406
8	1 704.659	537.481
9	2 117.299	644.404
10	2 656.805	740.512
均值	1 114.223	371.674

为验证模量过渡区埋入沥青混合料后传感器在竖向加载情况下测量的有效性,把 DIC 实测应变值作为沥青混合料在荷载作用下的真实应变,将沥青混合料中传感器实测应变与沥青混合料表面传感器对应范围内的 DIC 实测应变进行线性拟合,拟合结果如图 13 所示。

由图 13 可知,设置模量过渡区的沥青混合料应变传感器实测值与 DIC 实测值的线性相关系数 R^2 为 0.998 57,与未设置模量过渡区的沥青混合料梁试件的线性相关系数 0.951 88 相比有较大提升,故设置模量过渡区后应变传感器在受压状态下的实测值与 DIC 实测值线性关系良好,即模量过渡区的应变传感器能够有效反映沥青混合料梁试件在逐级压缩荷载作用下的真实应变变化情况。因此,模量过渡区能够和沥青混合料较好地结合,模量过渡区的存在提升了应变传感器在竖向荷载作用下测量的准确性。通过线性拟合得到受压状态下的沥青混合料梁试件中应变传感器实测值的理论修正公式,如公式(3)所示。

$$a_c = 1.031\ 65 + 0.499\ 98b_c \tag{3}$$

式中: a_c 为 DIC 实测应变值, 10^{-6} ; b_c 为传感器实测应变值, 10^{-6} 。

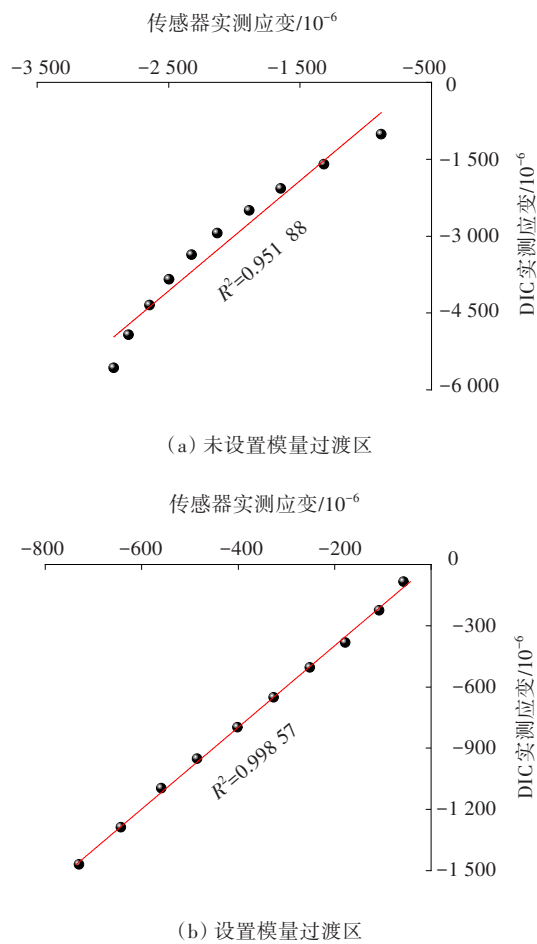


图13 应变传感器修正曲线
Fig. 13 Strain sensor correction curve

3.2.2 四点弯曲逐级加载

沥青混合料梁试件的四点弯曲逐级加载采用位移控制模式,每级加载0.2 mm的位移,共十级。取梁试件两端15.0 mm处为自由端,将中间270.0 mm三等分,上压头位于中间的两个等分点处。未设置模量过渡区的沥青混合料梁试件中的应变传感器位于距梁试件下表面35.0 mm处,使应变传感器处于受拉状态。将未设置模量过渡区的沥青混合料中传感器实测应变值及对应的DIC实测应变值作为对照组,验证模量过渡区设置的合理性及模量过渡区中的传感器在受拉状态下测量的有效性,DIC及传感器实测应变值随竖向位移荷载的变化趋势如图14所示。沥青混合料梁试件中的传感器实测应变与DIC实测应变差值随着施加位移荷载的变化情况见表6。

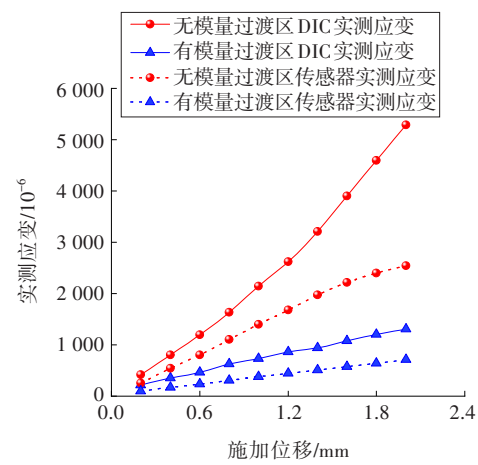


图14 传感器实测应变与位移关系曲线
Fig. 14 Relation curve of strain and displacement measured by a sensor

表6 DIC与传感器实测应变的应变差值随位移变化情况
Table 6 Variation of strain difference between DIC and measured strain with displacement

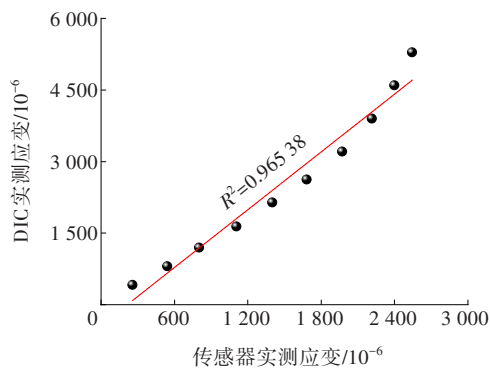
位移/ mm	未设置模量过渡区的 应变差值/ 10^{-6}	设置模量过渡区的 应变差值/ 10^{-6}
0.2	158.676	114.724
0.4	258.435	185.619
0.6	392.783	224.460
0.8	527.401	322.348
1.0	742.680	357.548
1.2	938.357	416.904
1.4	1 237.557	428.325
1.6	1 685.148	499.512
1.8	2 197.872	560.822
2.0	2 741.612	595.075
均值	1 088.052	370.534

从图14可以看出,随着施加的位移荷载逐渐增加,四组实测应变响应值均逐渐增大,即四组实测应变在四点弯曲加载状态下均具有较好的位移荷载响应。在四点弯曲加载状态下,设置模量过渡区的沥青混合料梁试件DIC实测应变值及传感器实测应变值均低于未设置模量过渡区的梁试件相应应变值,这表明模量较高的模量过渡区在沥青混合料中产生了加筋作用,增强了沥青混合料的强度,使实测应变值降低。

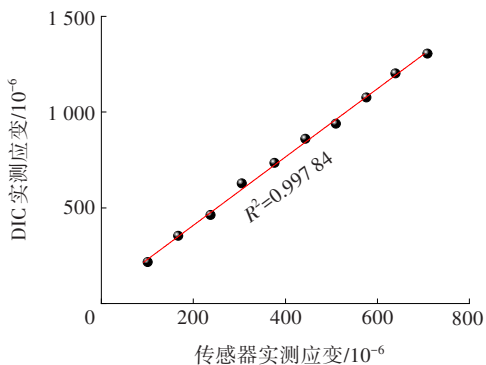
由表6可知,设置模量过渡区的沥青混合料梁

试件 DIC 实测应变与传感器实测应变差值随着施加位移荷载的增大而增大,但其应变差值增长速度明显低于未设置模量过渡区的梁试件应变差值的增长速度。设置模量过渡区的梁试件应变差均值较未设置模量过渡区的降低了 65.9%,因此模量过渡区的设置能够有效提升传感器在拉伸状态下实测应变的精确性,且模量过渡区中传感器的测量稳定性也得到较大改善。

为验证模量过渡区埋入沥青混合料后传感器在四点弯曲加载情况下测量的有效性,同样把 DIC 实测应变值作为沥青混合料在荷载作用下的真实应变,将沥青混合料中传感器实测应变与沥青混合料表面传感器对应范围内的 DIC 实测应变进行线性拟合,拟合结果如图 15 所示。



(a) 未设置模量过渡区



(b) 设置模量过渡区

图 15 应变传感器修正曲线

Fig. 15 Strain sensor correction curve

由图 15 可知,在拉伸状态下,埋入沥青混合料的模量过渡区中应变传感器实测值与 DIC 实测值的线性相关系数 R^2 为 0.997 84,与未设置模量过渡区的梁试件线性相关系数 0.965 38 相比有较大提

升,故设置模量过渡区后,应变传感器在受拉状态下的实测值与 DIC 实测值线性关系良好。由此证明,由模量过渡区裹覆的应变传感器能够有效反映沥青混合料梁试件在弯拉荷载作用下的真实应变变化情况。因此,模量过渡区能够和沥青混合料较好地结合,模量过渡区的存在提升了应变传感器在弯拉作用下测量的准确性。通过线性拟合得到沥青混合料梁试件在拉伸状态下应变传感器实测值的理论修正公式,如公式(4)所示。

$$a_s = -29.019\ 29 + 0.560\ 62b_s \quad (4)$$

式中: a_s 为 DIC 实测应变值, 10^{-6} ; b_s 为传感器实测应变值, 10^{-6} 。

4 基于模量过渡的有效协同变形增强一体化设计方法

沥青面层恶劣的施工与工作环境对内置感知器件材质提出严格的要求。内置感知器不仅要满足耐高温、高压及疲劳破坏等力学性能的要求,同时需具备与沥青混合料结构良好的协调变形能力。当前,用在沥青路面结构中的应变传感器及其封装材料主要为高模量的金属材质,与沥青混合料存在极大的模量差,导致应变传感器在沥青路面结构力学响应中的准确性受到严重制约。为削弱模量差异对内置传感器应变响应的不利影响,本研究基于模量过渡机制,提出融合智能感知器件与路面结构性能一体化设计方法,具体设计步骤如下:

- 1) 利用有限元软件界定感知器件在不同方向的影响范围,确定模量过渡区尺寸。
- 2) 选择合适的模量过渡区材料(模量介于感知器件与沥青混合料之间),在传感器与沥青混合料结构之间设置模量过渡区。
- 3) 对模量过渡区进行相关力学性能测试,判断是否满足沥青混合料力学性能要求。

4) 对模量过渡区及设置模量过渡区的沥青混合料梁试件进行测量有效性验证,保证感知器件在模量梯度过渡结构内的测量有效性。

内置感知器件与沥青路面协同变形增强一体化设计方法的设计流程如图 16 所示。

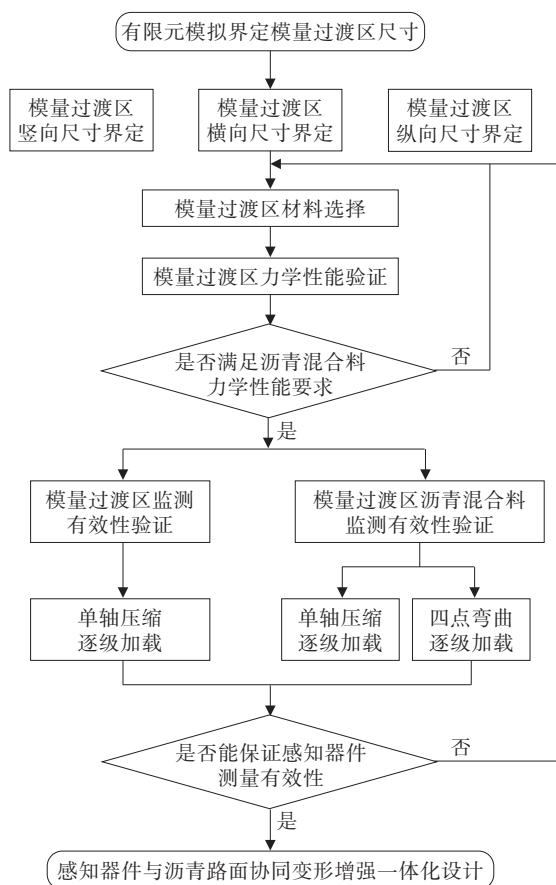


图16 内置感知器件与沥青路面协同变形增强一体化设计方法研究流程图

Fig. 16 Research flow chart of integrated design method for collaborative deformation enhancement of built-in sensing devices and asphalt pavement

5 结论

本研究通过对融合传感器的沥青混合料有限元模型进行计算分析,确定了内置传感器的应力影响范围,提出了一种基于影响范围的应变传感器模量过渡区建立方法,并利用基于DIC技术的室内力学响应试验,对设置模量过渡区增强传感器与沥青混合料协同变形的有效性进行分析,主要结论如下:

1) 内置传感器会改变沥青混合料结构的应力分布状态,以10.0%的应力差异率为评价指标,传感器的竖、横、纵三个方向影响范围为58 mm×199 mm×82 mm。

2) 环氧树脂材质的模量过渡区抗压强度和抗弯曲强度均能满足沥青路面使用要求,弹性模量为沥青混合料的2.5倍,可在混合料与传感器之间形成有效的模量过渡。模量过渡区单轴压缩逐级

加载试验表明:应变传感器能够有效反映模量过渡区在逐级荷载作用下的应变变化趋势,且两者整体性较好。

3) 设置模量过渡区可有效削弱传感器与沥青混合料因材质差异产生的不利影响,使传感器在逐级压缩和弯拉受力下测得的试件结构应变差均值分别降低了66.6%和65.9%,该方法能显著提高内置传感器应变响应的稳定性和有效性。

4) 提出了基于模量过渡机制的内置感知器件与沥青路面协同变形增强一体化设计方法,其流程包括:模量过渡区范围确定、材料选择与性能评价及协同变形有效性验证。

〔参考文献〕

- [1] 刘朝晖,柳力,李文博,等.融合感知特性的道路铺装结构设计体系研究综述及应用展望[J].中国公路学报,2022,35(7):18-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.07.002.
LIU Zhaohui, LIU Li, LI Wenbo, et al. Research review and application prospect of road paving structure design system with perception characteristics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 18-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.07.002.
- [2] QIAN G P, SHI C Y, YU H N, et al. Evaluation of different modulus input on the mechanical responses of asphalt pavement based on field measurements[J]. Construction and Building Materials, 2021, 312: 125299. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125299.
- [3] 王旭东,周兴业,关伟,等.沥青路面结构内部的力学响应特征及分析[J].科学通报,2020,65(30):3298-3307. DOI: 10.1360/TB-2020-0233.
WANG Xudong, ZHOU Xingye, GUAN Wei, et al. Characteristics and analysis of the mechanical response inside the structure of asphalt pavement[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3298-3307. DOI: 10.1360/TB-2020-0233.
- [4] 程怀磊,刘黎萍,孙立军.钢桥面沥青混合料铺装应变动态响应实测研究[J].土木工程学报,2019,52(6):100-109. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.06.009.
CHENG Huailei, LIU Liping, SUN Lijun. Field measurements of dynamic strain responses of asphalt pavement on steel deck bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 100-109. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.06.009.
- [5] DAN H C, YANG D, ZHAO L H, et al. Meso-scale study on compaction characteristics of asphalt mixtures in superpave gyratory compaction using SmartRock sensors[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120874. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120874.

- [6] DI GRAZIANO A, MARCHETTA V, CAFISO S. Structural health monitoring of asphalt pavements using smart sensor networks: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(5): 639–651. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.08.001.
- [7] PAN Q X, ZHENG C C, LYU S T, et al. Field measurement of strain response for typical asphalt pavement[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 618–632. DOI: 10.1007/s11771-021-4626-9.
- [8] AL-QADI I L, PORTAS S, CONI M, et al. Runway instrumentation and response measurements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2153(1): 162–169. DOI: 10.3141/2153-18.
- [9] BAYAT A, KNIGHT M. Field evaluation and analysis of flexible pavement structural responses under dynamic loads[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1): 26–37. DOI: 10.1080/14680629.2011.637026.
- [10] 王旭东, 张蕾, 周兴业, 等. RIOHTRACK 足尺路面试验环道 2017 年试验研究概况[J]. 公路交通科技, 2018, 35(4): 1–13. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.04.001.
- WANG Xudong, ZHANG Lei, ZHOU Xingye, et al. Review of researches of RIOHTRACK in 2017[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(4): 1–13. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.04.001.
- [11] 潘勤学, 郑健龙, 杨博, 等. 沥青路面蠕变响应现场预估方法与试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 10–17. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2017.09.002.
- PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, YANG Bo, et al. Field prediction method and experiment on creep response of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 10–17. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2017.09.002.
- [12] AL-QADI I L, LOULIZI A, ELSEIFI M, et al. The virginia smart road: the impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance[J]. Road Materials and Pavement Design, 2004, 73.
- [13] TIMM D H, PRIEST A L, MCEWEN T V. Design and instrumentation of the structural pavement experiment at the NCAT test track[R]. Auburn: NCTA, 2004.
- [14] LIU Z, GU X Y, WU C Y, et al. Studies on the validity of strain sensors for pavement monitoring: a case study for a fiber Bragg grating sensor and resistive sensor[J]. Construction and Building Materials, 2022, 321. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126085.
- [15] 刘朝晖, 李文博, 柳力, 等. 内置应变传感器与沥青路面结构协同工作性能研究[J/OL]. 中国公路学报, (2022-05-26) [2022-06-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20220525.1527.002.html>.
- LIU Zhaohui, LI Wenbo, LIU Li, et al. Study on the synergistic working performance of built-in strain sensor and asphalt pavement structure[J/OL]. China Journal of Highway and Transport, (2022-05-26) [2022-06-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20220525.1527.002.html>.
- [16] 刘朝晖, 夏红卫, 柳力. 埋入式传感器与沥青混合料的交互影响研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 1–6, 39. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.001.
- LIU Zhaohui, XIA Hongwei, LIU Li. Research on the interaction effect of embedded sensor and asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 1–6, 39. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.001.
- [17] 吴加雪, 张天栋, 张昌海, 等. 高导热环氧树脂的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13198–13204. DOI: 10.11896/cldb.20050180.
- WU Jiaxue, ZHANG Tiandong, ZHANG Changhai, et al. Research status of epoxy resin with high thermal conductivity[J]. Materials Reports, 2021, 35(13): 13198–13204. DOI: 10.11896/cldb.20050180.
- [18] 刘树龙. 光纤 Bragg 光栅在沥青路面性能健康监测中的试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- LIU Shulong. Experimental study on monitoring asphalt pavement performance health using fiber Bragg grating [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [19] 夏红卫. 埋入式应变传感器与沥青混合料的交互影响及协调变形研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2021.000649.
- XIA Hongwei. The research on interactive influence and coordination deformation of embedded strain sensor and asphalt mixture[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2021.000649.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
- [21] 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.
- [22] 范杰, 朱星, 胡桔维, 等. 基于 3D-DIC 的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1009–1019. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1132.
- FAN Jie, ZHU Xing, HU Juwei, et al. Experimental study on crack propagation and damage monitoring of sandstone using three-dimensional digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1009–1019. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1132.

- [23] 赵鸿铎,谷松原,马鲁宽.基于数字图像关联技术的沥青应变计测量准确度比对方法[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(9):1211-1217.DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2018.09.008.
- ZHAO Hongduo, GU Songyuan, MA Lukuan. Measurement accuracy comparison of in-situ asphalt pavement strain sensors based on digital image correlation technique[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(9): 1211-1217. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2018.09.008.

Integrated design method of built-in sensing device and asphalt pavement considering collaborative deformation enhancement

LIU Zhaohui, ZHU Guohu, LIU Li, LI Wenbo, FU Shunfa

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to solve the deformation incoordination problem caused by the large modulus difference between the built-in sensing device and the asphalt pavement material, an integrated design method of the built-in sensing device and the asphalt pavement considering synergistic deformation enhancement was proposed. [Methods] Taking the embedded asphalt strain gauge as an example, the ABAQUS software was used to establish an asphalt mixture structure model with built-in sensors. Through numerical simulation and calculation, the stress difference rate of 10.0% was taken as the evaluation index, and the stress influence range of the built-in sensor was established as the modulus transition area. The modulus transition zone was made by epoxy resin material and its mechanical properties were tested and evaluated. Using digital image correlation (DIC) technology, the mechanical response tests of asphalt mixture specimens with built-in sensing devices under uniaxial compression and four-point bending loading were carried out. By comparing the difference between the measured response of the sensor and the measurement results of the DIC method, the effectiveness of the modulus transition zone on the synergistic deformation enhancement of the sensor and the asphalt pavement was analyzed. [Findings] The results showed that the built-in sensor would change the stress distribution of the asphalt mixture structure. The influence range of the sensor in the vertical, horizontal and vertical directions was 58 mm×199 mm×82 mm. The modulus transition zone of the epoxy resin material had good mechanical properties, and its elastic modulus was 2.5 times that of the asphalt mixture, which can form an effective modulus transition between the asphalt mixture and the sensing device. Under step-wise compressive and flexural-tensile loading, the strain difference of the specimen measured by the transducer was reduced by 66.6% and 65.9% respectively by setting the modulus transition zone, which indicates that the stability and effectiveness of the measured response of the built-in sensing device could be significantly improved by setting the modulus transition zone. [Conclusions] Setting modulus transition zone between asphalt mixture and sensing device to form modulus gradient transition structure is an effective means to enhance the synergistic deformation of the two. In practical engineering applications, the integrated design process of collaborative deformation enhancement mainly includes the determination of modulus transition zone range, material selection and performance evaluation, and verification of collaborative deformation effectiveness.

Key words: built-in sensing device; asphalt pavement; integrated design method; collaborative deformation enhancement; modulus transition zone

Manuscript received: 2022-09-01; **revised:** 2022-09-30; **accepted:** 2022-10-10

Foundation item: Project (2018YFB1600200) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (202105) supported by Science and Technology Progress and Innovation Program of Department of Transportation of Hunan Province; Project (2020JJ5578) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province

Corresponding author: LIU Li (1988—) (ORCID: 0000-0002-1697-4315), male, lecturer, research interest: the asphalt pavement structure and materials. E-mail: 805296712@qq.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)