

DOI:10.11918/201901129

宽温度域内沥青路面结构响应规律分析

周兴业^{1,2}, 王旭东^{1,2}, 关伟¹, 肖倩¹

(1.交通运输部公路科学研究院 基础研究创新中心, 北京 100088; 2.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:为研究较宽温度范围内的沥青路面结构实际响应行为,基于RIOHTrack足尺路面试验环道,以落锤式弯沉仪(FWD)作为试验荷载,选择半刚性基层沥青路面和全厚度沥青路面作为研究对象,对两种路面结构2017年全年的服役温度和结构响应进行同步跟踪观测,得到了宽温度域内沥青路面结构响应基本规律,建立了温度与弯沉、温度与应变、温度与应力之间的关系模型,分析了结构内部应变、应力沿深度方向的分布特征。结果表明:温度对弯沉、应变和应力响应具有显著影响,随着季节变化,宽温度域内的沥青路面结构响应数值会出现以年为周期的循环交替变化,冬季时结构响应数值小、夏季时结构响应数值大;可采用指数函数模型描述温度与结构响应参数的相关关系,决定系数 R^2 可达到0.95以上,相关性好;宽温度域内,温度变化除引起结构内部应变或应力数值的单调增减以外,还会改变应变方向。在路面结构计算中,宜选择最不利季节时的温度验算沥青混凝土层的受力状态,以保证结构安全性。

关键词: 沥青路面; 结构响应; 足尺环道; 温度; 弯沉; 应变; 应力

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)09-0063-07

Analysis on response behavior of asphalt pavement structure in wide temperature range

ZHOU Xingye^{1,2}, WANG Xudong^{1,2}, GUAN Wei¹, XIAO Qian¹

(1.Fundamental Research Innovation Center, Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2.School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To study the actual response behavior of asphalt pavement structure in a wide temperature range, a semi-rigid base asphalt pavement and a full-thickness asphalt pavement were selected as research objects and Falling Weight Deflectometer (FWD) as test load based on the RIOHTrack full-scale test track, and the service temperature and structure response of the two kinds of pavement structures were observed synchronously in the year of 2017. The basic rule of asphalt pavement structure response in wide temperature range was obtained, the relationship models between temperature and deflection, temperature and strain, and temperature and stress were established, and the distribution characteristics of strain and stress along the depth direction of the structures were analyzed. Results show that temperature had significant effect on deflection, strain, and stress response. With seasonal variation, the response values of the asphalt pavement structures in wide temperature range changed alternately with annual cycle, and the values were small in winter and large in summer. Exponential function model can be used to describe the correlation between temperature and structural response parameters, and the decision coefficient R^2 could reach more than 0.95 with good correlation. Within the wide temperature range, in addition to the monotonous increase or decrease of the strain or stress values inside the structure, temperature variation could also change the strain direction. In pavement structure calculation, it is suggested to select temperature at the most unfavorable season to check the stress state of the asphalt concrete layer in order to ensure the safety of the structure.

Keywords: asphalt pavement; structure response; full-scale test track; temperature; deflection; strain; stress

沥青路面服役过程中,由于车辆荷载和环境温度变化会使路面内部产生应力、应变、位移等结构响应^[1],开展现场实测是获取这些响应数据最为有效

的一种研究手段。目前,国内外学者们依托实体工程试验路和足尺环道,开展了大量的路面结构响应研究工作,国外具有代表性的有美国 AASHTO 试验路^[2-3]、明尼苏达州 MnRoad 试验路^[4-5]、NCAT 试验环道^[6-8]等,国内具有代表性的有山东滨州试验路^[9-10]、北京六环试验路^[11-12]、交通运输部公路科学研究院 RIOHTrack 足尺路面试验环道^[13]等。然而,已有研究过于关注荷载对路面结构实际响应行

收稿日期: 2019-01-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0840201); 交通运输部公路科学研究院科技创新专项资金(2018-A0027)

作者简介: 周兴业(1982—),男,博士,研究员;

王旭东(1968—),男,研究员,博士生导师

通信作者: 周兴业, zhouxingye1982@163.com

为的影响,更多地集中在真实行车荷载^[14-15]和落锤式弯沉仪(FWD)荷载^[16]作用下的沥青路面动力响应分析上,而在环境温度变化所引起的应力、应变、位移等结构响应变化方面的研究较少。

受季节更替影响,沥青路面的服役温度常表现出以年为单位的交替变化特征,因夏季高温和冬季低温的温差较大,使得年循环内的大气温度和路面结构内部温度会在一个很宽的范围内发生变化,该温度范围即为宽温度域。由于沥青混凝土是一种典型的温度敏感性材料,温度变化对其材料性能和结构受力状态具有显著影响,即使结构形式与荷载参数完全相同,不同温度下的沥青路面结构响应也存在很大差别。此前的少部分研究^[17]虽然注意到了温度对沥青路面结构响应的影响,但因缺少连续性的温度与结构响应观测数据,研究中仅以一年中某些季节的代表性温度进行分析,所采集到的温度范围较窄、结构响应数据的样本量偏少,不能覆盖沥青路面服役过程中的全部温度范围,也很难全面反映沥青路面在整个服役温度范围内的结构响应变化规律。

文献[18]研究发现,某一年度内的温度波动范围,基本可以覆盖沥青路面服役期内的温度变化情况,可作为宽温度域内沥青路面结构响应研究的温度输入参数。为此,本文基于中国RIOHTrack足尺路面试验环道,以半刚性基层沥青路面和全厚式沥青路面作为研究对象,对两种代表性结构2017年全年的服役温度和结构响应开展连续跟踪观测,获得可覆盖沥青路面服役温度范围的荷载-温度-结构响应同步观测参数,分析不同温度下沥青路面的结构响应特征和深度分布规律,建立温度与响应参数的关系模型,以全面描述和表达服役期内的沥青路面结构响应行为。

1 路面结构响应观测方法

1.1 路面结构形式

半刚性基层沥青路面(STR1)由两层水泥稳定土(CS)底基层、两层水泥稳定碎石(CBG25)基层和两层沥青混凝土面层组成,全厚式沥青路面(STR19)由1层水泥稳定碎石(CBG25)、3层沥青混凝土基层和两层沥青混凝土面层组成,两种结构的材料组成和厚度如图1所示。

1.2 温度观测

大气温度使用小型气象站进行采集,前端采集设备为锦州产PC-4,后端采集设备为澳大利亚产dataTakerDT80。沥青路面内部温度采用锦州产PT100铂电阻温度传感器进行观测,分别布置于各

层层底和土基内部距面层顶面1.5、2.0、2.5 m位置处。

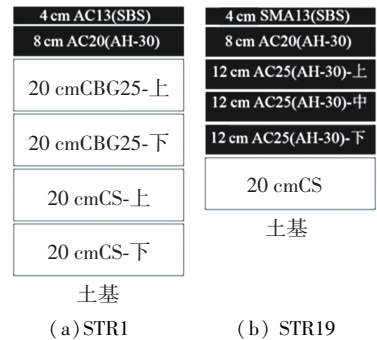


图1 路面结构形式

Fig.1 Pavement structures

1.3 弯沉观测

弯沉采用FWD作为试验荷载,通过9个传感器对其进行观测,9个传感器的编号及其距离荷载中心点的距离分别为 $D_0 = 0$ m、 $D_1 = 0.23$ m、 $D_2 = 0.53$ m、 $D_3 = 0.69$ m、 $D_4 = 0.85$ m、 $D_5 = 1.16$ m、 $D_6 = 1.53$ m、 $D_7 = 1.75$ m、 $D_8 = 2.05$ m。本文研究的试验荷载为5 t。

1.4 应变和应力观测

沥青混凝土结构层的水平方向应变采用TML公司生产的“工字型”KM-100 HAS动态沥青应变计进行观测,如图2(a)所示;水泥稳定土结构层和水泥稳定碎石结构层的水平方向应变采用TML公司生产的KM-100A动态混凝土应变计进行观测,如图2(b)所示。各层层底竖直方向压应力 σ_z ,采用意大利产P252A型土压力计,如图2(c)所示。



(a) 沥青应变计 (b) 混凝土应变计 (c) 土压力计

图2 应变/应力传感器

Fig.2 Strain/stress sensors

压力计和应变计的布置情况如图3所示,每层呈矩形埋设。每层压力计布置1个,位于矩形中心处;每层应变计布置8个,位于矩形四角处,其中顺着车辆行驶方向的纵向应变计(ϵ_y)以及垂直于车辆行驶方向的横向应变计(ϵ_x)各布置4个。为了与国际上通用的结构受力方向表达习惯相统一,本文将应力实测值为正值、应变实测值为负值时的力学响应状态定义为压缩状态,分别对应于压应力、压应变;反之,将应力实测值为负值、应变实测值为正值时的力学响应状态定义为拉伸状态,分别对应于拉应力、拉应变。

2 结果与分析

2.1 宽温度域内沥青路面结构响应的基本规律

图4为2017年STR1和STR19在FWD荷载作用下路面结构响应参数的年变化曲线.由图4可以看出,随着季节更替,弯沉、应力和应变等结构响应会出现明显的周期性波动,总体上表现出以年为单位的循环交替变化规律.在数值上,中心点弯沉 D_0 以及 $h = 12\text{ cm}$ 处的 ε_x 、 ε_y 、 σ_z 的数值均随着季节变化呈先增大后减小的趋势.即:冬季低温时,沥青路面的弯沉、应力、应变等结构响应数值最小;过了冬季,温度升高之后,数值开始逐渐增大,直至夏季高温时达到最大;然后,数值又开始逐渐变小,到了冬季低温时,应力应变又减小至很低的水平.可见,在

较宽的温度范围内,由于受季节变化影响结构内部温度不断变化,也对弯沉、应变和应力等结构响应产生了明显影响.

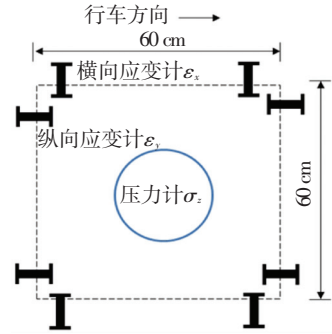
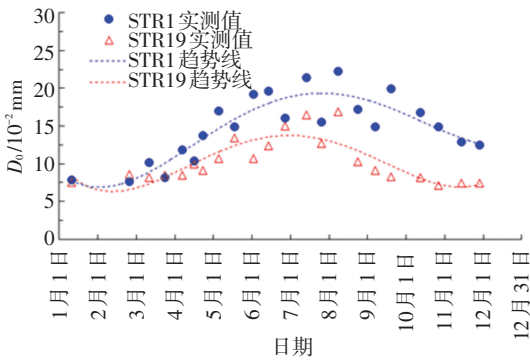
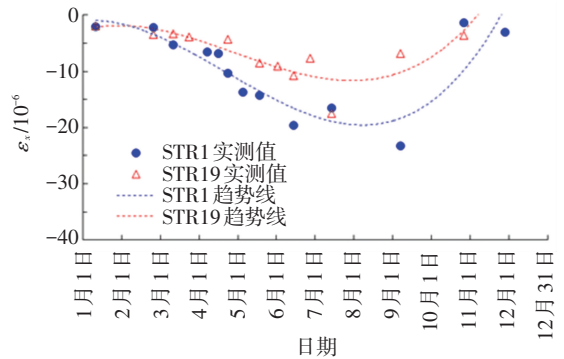


图3 布设示意图

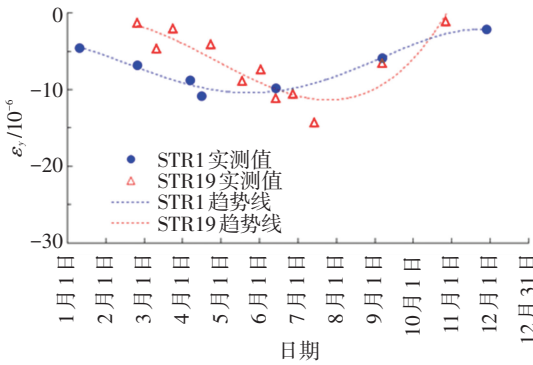
Fig.3 Layout diagram



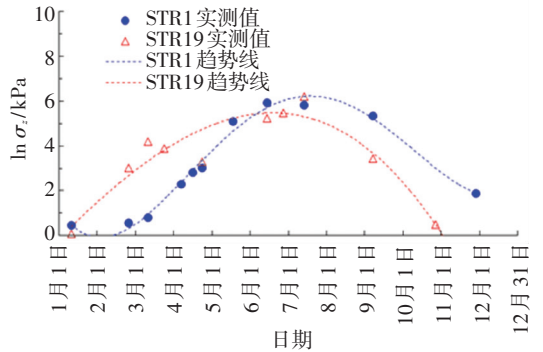
(a) D_0 年变化曲线



(b) ε_x 年变化曲线 ($h = 12\text{ cm}$)



(c) ε_y 年变化曲线 ($h = 12\text{ cm}$)



(d) σ_z 年变化曲线 ($h = 12\text{ cm}$)

图4 宽温度域内沥青路面结构响应的基本规律

Fig.4 Basic response rule of asphalt pavement structure in wide temperature range

2.2 温度与弯沉的关系

弯沉主要反映整体路面结构的变形,国内外学者在研究温度与弯沉关系时,一般采用弯沉检测前5日的大气日平均温度均值 T_a 作为代表性温度进行分析.以图4(a)中两种结构的 D_0 与 T_a 之间建立相关关系,如图5所示.通过2017年温度与结构响应的连续跟踪观测可知,STR1与STR19结构的 T_a 为 $-0.6\sim 30.5\text{ }^\circ\text{C}$,STR1中心点弯沉值 D_0 的变化为 $7.7\sim 22.7(0.01\text{ mm})$,STR19中心点弯沉值 D_0 的变化为 $7.1\sim 16.9(0.01\text{ mm})$,所采集到的温度范围较

宽,结构响应数据较多,可基本覆盖两种路面结构2017年全年的大气日平均温度范围及其实际结构响应.

由图5可以看出,温度会明显影响路面结构弯沉,温度升高以后, D_0 会随之变大,温度对弯沉的影响十分敏感.这是因为沥青混凝土具有感温性,在宽温度域内是一种典型的黏弹性体,当温度较高时,其本构关系会表现为黏性流体,材料偏软、劲度模量偏小,在承受相同荷载时更容易发生变形.从图5中还可以看出, D_0 与 T_a 之间呈单调递增的变化趋势,

二者关系可采用下式进行拟合:

$$l = k_1 \cdot e^{k_2 \cdot T_a} \quad (1)$$

式中: l 为中心点弯沉 D_0 , T_a 为 FWD 荷载作用前 5 d 的大气日平均温度均值, k_1 、 k_2 为回归参数.

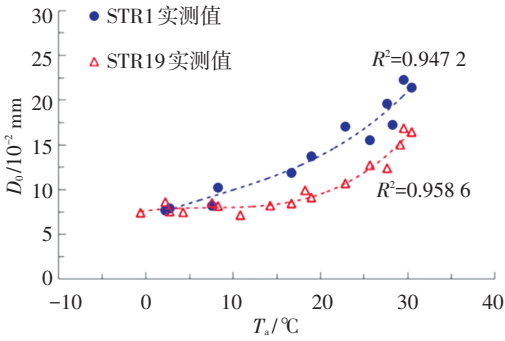


图 5 温度与弯沉的关系曲线

Fig.5 Relation between temperature and deflection

采用式(1)对图 5 中 D_0 与 T_a 之间的相关关系其进行回归, 决定系数 R^2 在 0.95 左右, 拟合效果较好, 回归参数见表 1.

表 1 模型 k_1 和 k_2 回归参数

Tab.1 Regression parameters k_1 and k_2 of model

回归参数	STR1	STR19
k_1	6.936 2	6.603 5
k_2	0.035 9	0.027 4
R^2	0.947 2	0.958 6

2.3 温度与应变的关系

2.3.1 宽温度域内温度-应变相关关系

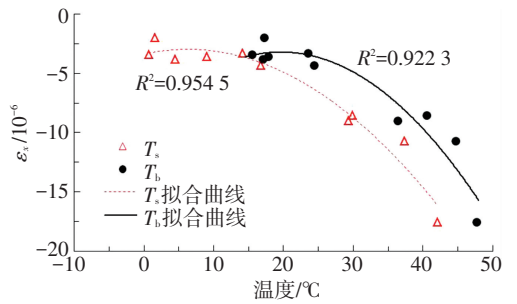
由于路面结构内部温度处于不断变化之中, 为了保证温度取值的合理性, 本文在研究温度与应变关系时, 选择 FWD 荷载作用前后 30 min 内结构内部应变计埋设位置处的温度均值 T_s 以及 FWD 测试时刻的实时大气温度 T_b , 作为代表性温度进行分析. 以图 4(b)、4(c) 中 STR19 结构 $h = 12$ cm 处的 ε_x 、 ε_y 为基础数据, 与 T_s 和 T_b 之间建立相关关系, 如图 6 所示. 通过 2017 年温度与结构响应的连续跟踪观测可知, STR19 结构服役过程中结构内部 $h = 12$ cm 处的 T_s 值为 $-0.7 \sim 42.1$ °C.

由图 6 可以看出, STR19 结构 $h = 12$ cm 处 ε_x 、 ε_y 均为压应变, 应变数值随着温度 T_s 和 T_b 的升高而逐渐增大. 如前所述, 这是因为沥青混凝土具有感温性, 在宽温度域内是一种典型的黏弹性体, 其本构关系会随着温度变化而改变, 从而导致结构的受力状态发生变化. 当温度较低时, 其本构关系会表现为线弹性体, 材料较硬、劲度模量较大, 结构受力较为有利, 应变较小; 而当温度较高时, 其本构关系会表现为黏性流体, 材料偏软、劲度模量偏小, 在承受相同荷载时产生的应变会变大. 观察图 6 中曲线特

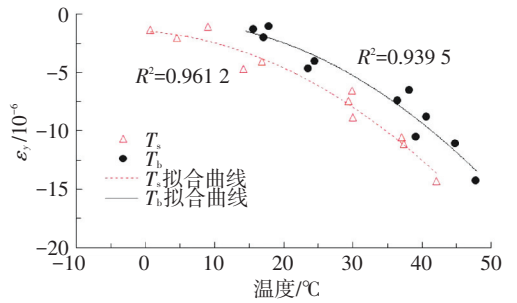
征发现, 温度 T_s 和 T_b 与应变的相关关系均可以采用指数函数模型来描述, 其中, T_s 与应变的相关性明显优于 T_b , T_s 的决定系数 R^2 可达到 0.95 以上, 相关性最好. 因此, 可选择 T_s 作为宽温度域应变分析的代表性温度参数, 建立 $h = 12$ cm 处 STR1 及 STR19 应变响应与温度的关系模型为

$$\varepsilon = k_3 \cdot e^{k_4 \cdot T_s} \quad (2)$$

式中: ε 为水平横向应变 ε_x 或水平纵向应变 ε_y , T_s 为 FWD 荷载作用前后 30 min 内应变计埋设位置处的温度均值, k_3 、 k_4 为回归参数. 模型参数回归结果见表 2.



(a) ε_x



(b) ε_y

图 6 温度与应变关系曲线 (STR19, $h = 12$ cm)

Fig.6 Relation between temperature and strain (STR19, $h = 12$ cm)

表 2 模型 k_3 和 k_4 回归参数

Tab.2 Regression parameters k_3 and k_4 of model

回归参数	STR1		STR19	
	ε_x	ε_y	ε_x	ε_y
k_3	1.952 2	4.314 5	1.896 1	1.603 9
k_4	- 0.056 1	- 0.027 0	- 0.050 4	- 0.052 5
R^2	0.952 3	0.961 0	0.954 5	0.961 2

为进一步研究其他结构层处温度与应变相关关系, 选择 STR19 结构 $h = 24$ cm 处的 ε_x 、 ε_y 进行分析, 如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 在较宽的温度范围内, STR19 结构 $h = 24$ cm 处的 ε_x 、 ε_y , 随温度变化会出现压应变-拉应变-压应变的交替变化现象, 即: 当温度较低时为压应变; 当温度升高之后出现压-拉转换点, 之后转变为拉应变; 当温度进一步升高后, 出现拉-压转换点, 然后转变为压应变. 这种现

象表明,在宽温度域内, $h = 24 \text{ cm}$ 处的受力状态会随着温度的变化而出现应变状态的改变,当温度逐渐升高时,该处受力情况表现为压缩-拉伸-压缩的交替转换,这与 $h = 12 \text{ cm}$ 处的应变变化趋势完全不同. 这是由于沥青路面在服役过程中,环境温度不断变化,随之引起沥青混合料的物理性质、力学性质、黏弹性本构关系等不断交替变化,从而导致结构的受力状态出现交替变化.

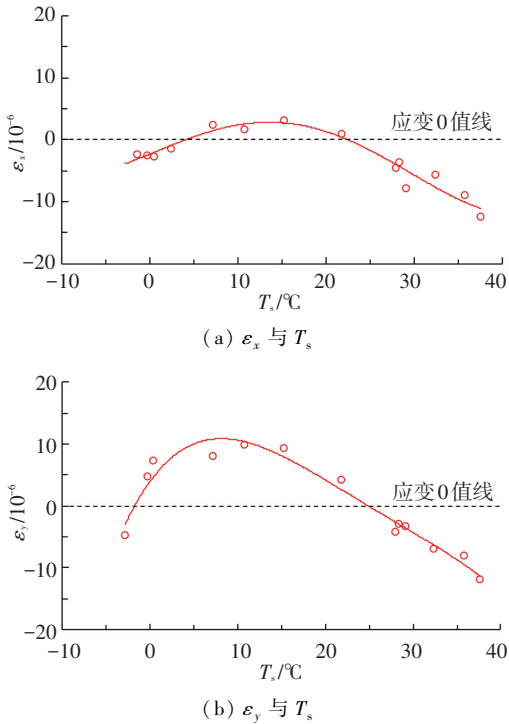


图7 温度与应变关系曲线 (STR19, $h = 24 \text{ cm}$)

Fig.7 Relation between temperature and strain (STR19, $h = 24 \text{ cm}$)

上述研究表明,在宽温度域内,对于沥青路面的应变响应而言,温度不仅影响应变数值的增减,还会改变应变方向. 因为沥青混凝土具有温度敏感性,在宽温度域内是一种随温度变化的典型黏弹性体,当温度较低时,其本构关系会表现为线弹性体,材料较硬、劲度模量较大,可以采用线性弹性层状体系对其进行力学计算;然而,当温度较高时,其本构关系则会表现为黏性流体,材料偏软、劲度模量偏小,此时采用线性弹性层状体系进行力学计算显然并不合理,而应该引入非线性力学理论对层状体系进行修正以后,方可开展力学计算. 正是由于温度对应变的显著影响,为了提高计算分析和结构设计的可靠性,宜使用沥青路面最不利季节时的温度作为力学计算的基本参数.

2.3.2 结构深度-应变相关关系

为研究应变沿结构深度方向的分布规律,在 STR1 和 STR19 服役的温度域范围内,选择最高温

度 T_{\max} 、最低温度 T_{\min} 和中间温度 T_c 作为代表性的温度参数进行应变分析,如图 8 所示.

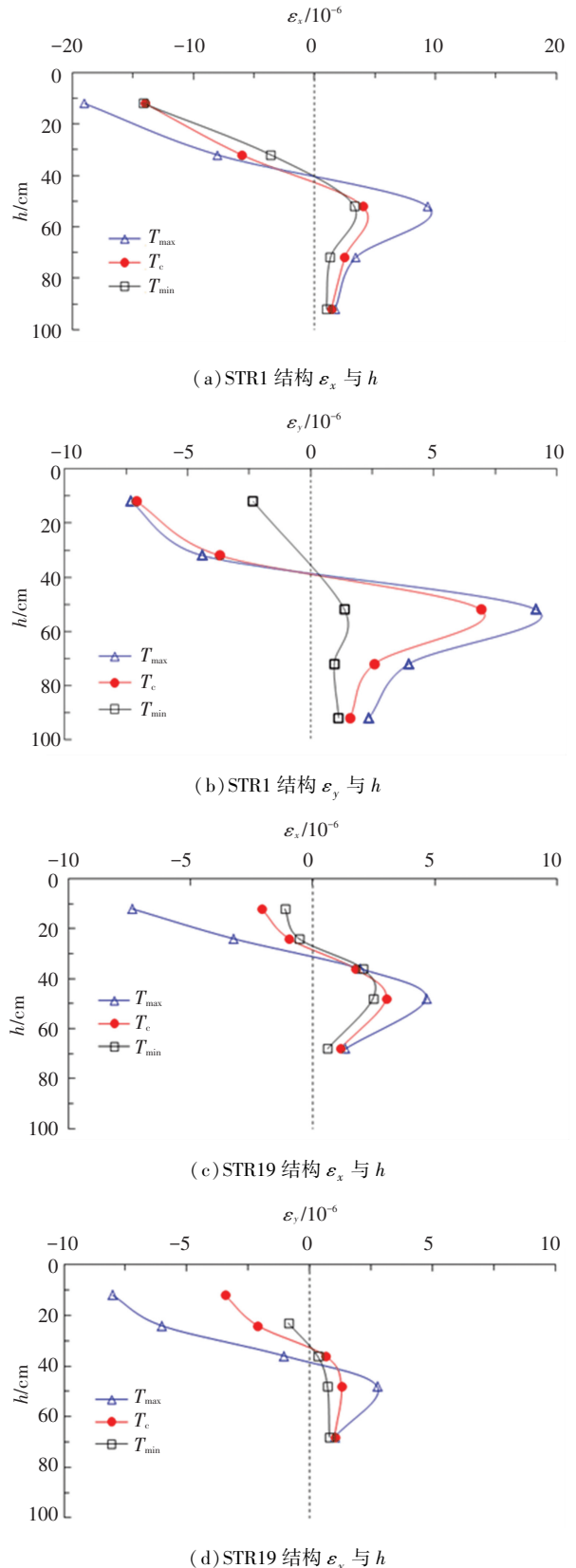


图8 深度与应变关系曲线

Fig.8 Relation between depth and strain

由图 8(a)、8(b) 可以看出,STR1 结构 $h = 12 \text{ cm}$ 的沥青混凝土材料层层底、 $h = 32 \text{ cm}$ 的半刚

性材料层层底均为受压状态;而 $h = 52 \text{ cm}$ 、 $h = 72 \text{ cm}$ 、 $h = 92 \text{ cm}$ 处的半刚性材料层层底均为受拉状态,无论温度如何变化,最大拉应变始终在 $h = 52 \text{ cm}$ 的半刚性材料层层底位置处。

由图 8(c)、8(d) 可以看出,无论温度如何变化,STR19 结构 $h = 12 \text{ cm}$ 的沥青混凝土材料层层底始终为受压状态; $h = 36 \text{ cm}$ 、 $h = 48 \text{ cm}$ 、 $h = 68 \text{ cm}$ 的结构层层底始终为受拉状态,最大拉应变始终在 $h = 48 \text{ cm}$ 的沥青混凝土材料层层底位置处。但 $h = 24 \text{ cm}$ 的沥青混凝土材料层层底受力状态会出现受压-受拉-受压的交替变化,而且从深度上来看,在 $24 \sim 36 \text{ cm}$ 之间的深度,路面结构的受力状态也呈现这种拉压转换,随着温度的升高,拉压转换的应变 0 值线(即拉压转换中性轴)位置会渐渐背离路表而向结构深处转移。这是由于 STR19 结构的沥青材料层较厚,而温度变化对沥青材料层的影响较大,整个路面结构随着沥青混凝土物理、力学性质的变化而出现了受力情况的显著改变。当温度较低时,沥青混凝土结构层更接近于板体,外力荷载可以在沥青混凝土结构层内进行消散,不会再向下传递;当温度较高时,沥青混凝土结构层板体性消失,接近于粘流态体,此时外力荷载无法在上部结构进行消散,只能向下部传递。

2.4 温度与应力的关系

为分析宽温度域范围内温度与应力的相关性,以图 4(d) 中 STR19 结构 $h = 12 \text{ cm}$ 处的 σ_z 为基础数据,与 T_s 、 T_b 之间建立关系,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,STR19 结构 $h = 12$ 、 24 、 36 、 48 cm 处 σ_z 均为压应力,应力数值随着温度的升高增幅十分明显,温度-应力相关关系呈现单调递增的变化规律。这是由于沥青混合料的物理、力学性质会随温度变化出现明显改变,当温度较高时,模量较低,在承受相同荷载时沥青层层底竖向应力会变大。图 9 中,应力与温度 T_s 、 T_b 的相关关系可以采用指数函数模型来描述,其中, T_s 与应变关系的决定系数 R^2 在 0.95 以上,相关性较好,而 T_b 与应变之间的相关性较差。按此方法建立 $h = 12 \text{ cm}$ 处 STR1 及 STR19 应力响应与温度的关系模型为

$$\ln \sigma = k_5 \cdot e^{k_6 \cdot T_s} \quad (3)$$

式中: σ 为竖向应力 σ_z , T_s 为 FWD 荷载作用前后 30 min 内压力计埋设位置处的温度均值, k_5 、 k_6 为回归参数。模型参数回归结果见表 3。

为研究应力沿结构深度方向的分布规律,在 STR19 服役的宽温度域范围内,选择最高温度 T_{\max} 、最低温度 T_{\min} 和中间温度 T_c 作为代表性的温度参数进行应力分析,如图 10 所示。

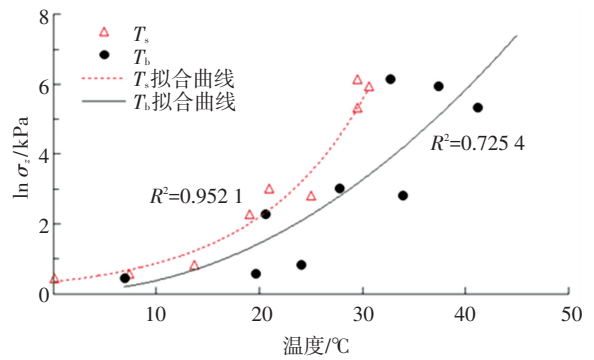


图 9 温度与应力关系曲线

Fig.9 Relation between temperature and stress

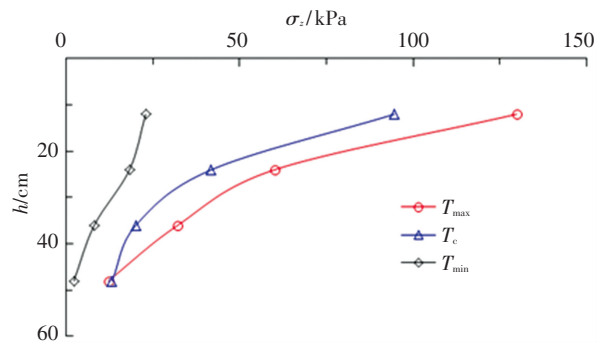


图 10 深度与应力关系曲线

Fig.10 Relation between depth and stress

表 3 模型 k_5 和 k_6 回归参数

Tab.3 Regression parameters k_5 and k_6 of model

回归参数	STR1	STR19
k_5	0.345 5	0.430 6
k_6	0.092 6	0.062 5
R^2	0.962 0	0.952 1

从图 10 中可以看出,对于 STR19 结构而言,随着深度的增加应力响应数值衰减较快,至沥青材料层层底位置 ($h = 48 \text{ cm}$) 处,应力已经衰减到很小的数值。虽然温度较高时,应力数值较大,但其沿深度方向的衰减速度也更快,在沥青材料层中部位置 ($h = 24 \text{ cm}$) 处,应力已经衰减 $h = 12 \text{ cm}$ 处的一半以上。

3 结 论

1) 2017 年 RIOHTrack 的连续观测结果表明,年循环内大气日平均温度变化为 $-0.6 \sim 30.5 \text{ }^\circ\text{C}$,路面结构内部 12 cm 处实时温度变化为 $-0.7 \sim 42.1 \text{ }^\circ\text{C}$,可基本覆盖路面结构的服役温度范围,属于宽温度域范畴。

2) 宽温度域内,沥青路面弯沉数值随季节更替发生以年为周期的循环交替变化,半刚性基层沥青路面弯沉年变化为 $7.7 \sim 22.7 (0.01 \text{ mm})$,全厚式沥青路面弯沉年变化为 $7.1 \sim 16.9 (0.01 \text{ mm})$ 。

3) 温度对弯沉、应变和应力响应具有显著影响,可采用指数函数模型进行描述,决定系数 R^2 可达到 0.95 以上,相关性良好。

4) 在较宽的温度范围内,温度变化不仅会引起结构内部应变、应力数值的增减,还会改变某些结构层的应变方向:由压(拉)应变转换为拉(压)应变。为了提高计算分析和结构设计的可靠性,宜使用沥青路面最不利季节时的温度作为力学计算的基本参数。

5) 沿深度方向上,全厚式沥青路面从压应变到拉应变转换的中性轴位置出现在深度为 24~36 cm 之间,中性轴位置随着温度升高会逐渐远离路表,向结构下部移动。夏季高温时,层底压应力沿深度上衰减较快,至路面结构内部 24 cm 处压应力可减小至 50% 以上。

参考文献

- [1] 周兴业,王旭东,苏波.路面实体结构模型力学响应试验方法研究[J].公路交通科技,2017,34(6):24
ZHOU Xingye, WANG Xudong, SU Bo. Study on mechanical response test method for real pavement structure model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6):24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268. 2017. 06. 004
- [2] AASHTO. The AASHTO road test, history and description of the project. Special report 61A[R]. Washington DC: Highway Research Board, 1961
- [3] BURGGRAF F, WARD E M, ORLAND H P. The AASHTO road test [R]. Washington DC: National Academy of Sciences, 1961
- [4] DEUSEN D V, INVESTIGATOR P. 2013 MnRoad construction report; No. MN-RC-2014-35[R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation, 2014
- [5] DAI S T, Van DEUSEN D A. Digital signal processing for MnRoad offline data; No. MN-PR-1996-09[R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation, 1996
- [6] TIMM D H, PRIEST A L. Dynamic pavement response data collection and processing at the NCAT test track; NCAT Report 04-03 [R]. Washington DC: Highway Research Board, 2004
- [7] 袁迎捷,周进川.美国 NCAT 环道试验第一阶段成果综述[J].中外公路,2005,25(6):109
YUAN Yingjie, ZHOU Jinchuan. Summary of the results of the first phase of NCAT Ring road test in USA[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(6):109. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579. 2005. 06. 032
- [8] 邓泰,周文.美国 NCAT 环道试验第三阶段成果综述[J].中外公路,2013,33(4):284
DENG Tai, ZHOU Wen. Summary of the results of the third phase of NCAT Ring road test in USA[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(4):284. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579. 2013.04.073
- [9] 韦金城,王林,杨永顺,等.永久性沥青路面试验路力学响应分布的数值仿真[J].公路交通科技,2010,27(6):16
WEI Jincheng, WANG Lin, YANG Yongshun, et al. Numerical simulation of mechanical response of perpetual road test asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6):16. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2010.06.003
- [10] 王林,韦金城.滨州永久性沥青路面试验路初期阶段研究综述[J].上海公路,2011(4):1
WANG Lin, WEI Jincheng. Initial stage summary of Binzhou perpetual pavement testing road[J]. Shanghai Highways, 2011(4):1. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109. 2011. 04.005
- [11] 董泽蛟,柳浩,谭忆秋,等.沥青路面三向应变响应现场实测研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(7):47
DONG Zejiao, LIU Hao, TAN Yiqiu, et al. Field measurement of three-direction strain response of asphalt pavement[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(7):47. DOI:10.3321/j.issn:1000-565X. 2009.07.010
- [12] 董泽蛟,李生龙,温佳宇,等.基于光纤光栅测试技术的沥青路面温度场实测[J].交通运输工程学报,2014,14(2):2
DONG Zejiao, LI Shenglong, WEN Jiayu, et al. Real-time temperature measurement of asphalt pavement based on fiber bragg grating measuring technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2):2. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637. 2014. 02. 002
- [13] 王旭东.足尺路面试验环道路面结构与材料设计[J].公路交通科技,2017,34(6):31
WANG Xudong. Design of pavement structure and material for full-scale test track[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6):31. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268. 2017. 06. 005
- [14] 肖川,邱延峻,黄兵.基于车辆加载试验的沥青路面动力响应分析[J].公路交通科技,2014,31(12):13
XIAO Chuan, QIU Yanjun, HUANG Bing. Analysis on dynamic response of asphalt pavement based on vehicle loading test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(12):13. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268. 2014. 12. 003
- [15] 潘勤学,郑健龙,杨博,等.基于光纤光栅传感技术的沥青路面行车工况下力学响应研究[J].土木工程学报,2017,50(4):126
PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, YANG Bo, et al. Mechanical response of asphalt pavement under driving conditions by fiber bragg grating optical sensing technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4):126. DOI:10.15951/j.tmgxb.2017.04.015
- [16] 肖川,邱延峻,曾杰,等.FWD 荷载作用下的沥青路面实测动力响应研究[J].公路交通科技,2014,31(2):2
XIAO Chuan, QIU Yanjun, ZENG Jie, et al. Study on measured dynamic response of asphalt pavement under FWD load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2):2. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268. 2014. 02. 001
- [17] 曾杰,肖川,李保险. FWD 荷载下沥青路面动力响应的温度影响作用研究[J].公路工程,2015,40(1):108
ZENG Jie, XIAO Chuan, LI Baoxian. Study on dynamic response of asphalt pavement under FWD load base on different temperature conditions[J]. Highway Engineering, 2015, 40(1):108. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2015.01.025
- [18] 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
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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-268. 2018. 04. 001