

文章编号:1671-8879(2016)02-0026-09

# 行车荷载作用下沥青路面动力特性试验

肖 川<sup>1,2,3</sup>, 邱延峻<sup>1,3</sup>, 艾长发<sup>1,3</sup>, 黄 兵<sup>4</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川建筑职业技术学院 交通与市政工程系, 四川 德阳 618000; 3. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031; 4. 四川成德南高速公路有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘 要:**为研究行车荷载作用下不同类型沥青路面的实际动力特性,通过现场车辆加载试验获取了实测动态应变响应数据,分析了车辆轴质量、车速以及路面温度等影响因素对动态响应的影响作用,构建了沥青层底应变响应预估模型,并对预估模型进行了统计检验。研究结果表明:在车辆动力荷载作用下,沥青路面结构在面层和基层底主要呈拉应变受力状态,应变响应过程体现出粘弹性特征;荷载作用时间随车速增加近似呈线性关系增大,且纵向荷载作用时间大于横向荷载作用时间;面层底弯拉应变随温度和轴质量的增加逐渐增大,随车速的提高逐渐减小;路面高温及车辆超载的综合作用会显著加剧沥青层的疲劳损伤;明确了路面温度、车辆轴质量、车速及其耦合作用对不同路面结构沥青层底应变响应影响的显著性,在此基础上可建立能够满足工程分析要求的沥青路面面层底应变响应预估模型。

**关键词:**道路工程;沥青路面;现场实测;动力特性;交互正交试验;预估模型

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A

## Experiment on dynamical characteristics of asphalt pavement under vehicle load

XIAO Chuan<sup>1,2,3</sup>, QIU Yan-jun<sup>1,3</sup>, AI Chang-fa<sup>1,3</sup>, HUANG Bing<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Department of Traffic and Municipal Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, China; 3. Highway Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. Sichuan Chengdenan Expressway Co. Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to study the actual dynamical characteristics of different kinds of asphalt pavements, the dynamic strain data from field measure were obtained through vehicle load test. The influences of axle load, speed and pavement temperature on dynamic response were analyzed. The prediction models for strain at the bottom of asphalt surface were established and statistical test was performed on it. The results show that the dynamic response at the bottom of surface and base are tensile strain, and the response processes reflect typical viscoelastic performance. Load duration is in linear growth with the increment of vehicle speed, and the longitudinal load duration is longer than the lateral one. Bending strain increases with the increment of pavement

收稿日期:2015-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51378438);四川省交通运输厅科技项目(2010B28-2);四川省教育厅科研项目(16ZB0513);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU12ZT05)

作者简介:肖 川(1984-),男,湖南湘潭人,四川建筑职业技术学院讲师,西南交通大学工学博士,E-mail:xcaa6666@sina.com。

temperature and vehicle load, and as vehicle speed increases, the strain response becomes smaller slightly. Fatigue damage of asphalt surface may be aggravated obviously due to the synergistic effects of high-temperature and overload. The significances of influencing factors such as pavement temperature, vehicle load, speed and their coupling influences have been evaluated; furthermore, prediction models for dynamic strain at the bottom of asphalt surface have been established on this basis, that can meet the demand for engineering analysis. 7 tabs, 5 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; field measure; dynamical characteristic; interactive orthogonal experiment; prediction model

## 0 引言

沥青路面的动力特性是进行结构组合设计及性能评价的基础参数,开展行车荷载作用下的沥青路面动力响应规律研究,是探究路面损坏机理、优化路面结构组合,进而提高路面使用寿命的重要基础<sup>[1-2]</sup>。目前,采用置入动力测试元件,检测结构体内部动力响应规律的实测研究工作在中国铁路与桥梁方面应用较广,相比而言,针对路面结构动力响应的试验研究还有待加强。杨果岳等通过在常张(常德—张家界)高速公路埋入应变传感器和土压力传感器,研究了在路面平整的情况下,路面结构层在不同轴质量及速度的行车荷载激励下所产生的动力响应<sup>[3]</sup>;田庚亮等基于光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器开展了沥青混合料与传感器间的协同变形分析,在此基础上利用光纤光栅测试技术进行了沥青路面三向动态应变响应的测试研究<sup>[4-6]</sup>;廖公云等通过在半刚性基层沥青路面结构中埋设振弦式应变计及压力盒,对路面结构内部的动力响应进行分层检测,并结合贝克曼梁弯沉测试,系统研究了路面动力特性的分层检测与分析方法<sup>[7]</sup>;董忠红等采用自主研发的三维动态应变传感器,在西宝(西安—宝鸡)高速公路通过试验段进行野外现场试验,以面层底部动应变为评价参数,研究了不同车辆轴质量及速度参数条件下,半刚性基层沥青路面的动力响应规律<sup>[8]</sup>;董忠红等还在青兰(青岛—兰州)高速公路所铺设的试验路中开展现场动力测试,采集了长大纵坡沥青路面不同位置的动态应变响应,分析了沥青路面动力响应随坡道位置及车辆轴质量的变化规律<sup>[9]</sup>。以上研究所采用的路面结构类型较为单一,分析结论存在一定局限性。杨永顺等在山东滨州的永久性路面试验路埋设沥青应变传感器、温度场传感器,获取了路面动态应变随路面温度及车辆轴质量的变化规律,构建了路面结构沥青层底应变响应预估模型,但研究过程未明确各因素对路面动力响应影响的显著

性,从而降低了预估模型的精度<sup>[10]</sup>。

为此,本文以不同类型沥青路面结构为研究对象,将动态应变响应作为评价参数,开展行车荷载作用下沥青路面动力响应现场测试,研究沥青路面在不同轴质量、车速及路面温度下的动力响应特性;然后通过交互正交试验设计,评价各因素对动态应变影响的显著性,最后选取与应变响应高度显著的影响因素,构建不同类型沥青路面的层底应变预估模型。

## 1 车辆加载试验概况

### 1.1 现场试验路概况

参考国内外沥青路面结构的主导形式<sup>[11]</sup>,综合考虑高温重载条件下路面结构的承载能力及抗疲劳性能,选取半刚性基层沥青路面(S1)、倒装结构沥青路面(S2)、组合式沥青路面(S3)这3种代表性的路面结构,并分别铺设试验路,路面结构形式及各结构层材料类型如下页图1所示。试验路为双向4车道,路基宽度为24.5 m,总长度为900 m。试验段的3种沥青路面结构选择在路基条件相同、纵坡较小的直线填方路段连续铺筑,每段长300 m。位于四川成德南(成都—德阳—南充)高速公路K170+018~K170+918段,地处金堂互通(K166+800)与青白江互通(K171+890)之间,沥青路面使用性能分区属于夏季炎热冬季温湿润区(1-4-2区)。

### 1.2 传感器布设方案

#### 1.2.1 传感器类型

本文以应变响应传感器的准确性、稳定性、实用性为评价标准对各类传感器进行比选分析,最终选定美国AGI(Applied Geomechanics Inc.)公司生产的沥青应变计(asphalt strain gage, ASG)作为沥青路面动力响应现场测试元件。该应变计为电阻应变式传感器,其主要技术指标见下页表1。

#### 1.2.2 具体埋设方案

为测试沥青路面结构层沿道路纵、横向受力状

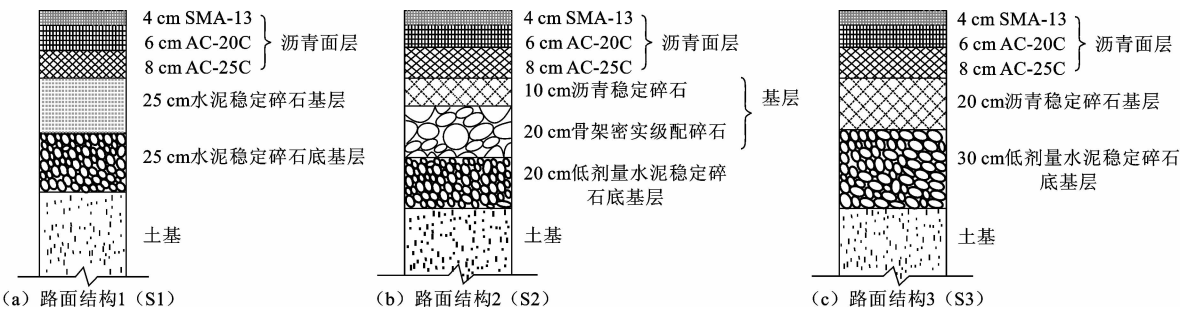


图 1 试验段路面结构及材料组成

Fig. 1 Pavement structures and material compositions of test section

表 1 沥青应变计技术参数

Tab. 1 Technical parameters of ASG

电桥电路	电阻值/ $\Omega$	量程/ $10^{-6}$	灵敏度( $1\,000\times 10^{-6}$ )/ ( $\text{mV}\cdot\text{V}^{-1}$ )	激发电压/V	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	导线	
						直径/mm	规格
全桥惠斯通电路	350	$\pm 2\,000$	约 1.3	$>5.0$	$-34\sim 200$	0.511	4 相绞合屏蔽电缆

态,分别沿车辆行驶方向(纵向)及垂直于行车方向(横向)布设动态应变传感器。传感器的平面位置位于主行车道的左侧轮迹带,沿行车方向平行布设 2 排,轮迹带位置通过在类似公路开展实车加载轮迹测量,并结合车辙位置调查最终确定。在路面深度方向,S1、S3 结构的传感器分别布设在面层与基层底;由于 S2 结构基层采用粒料类材料,基层底无弯拉应变响应,因此传感器仅布设在沥青混凝土面层底。传感器现场埋设方案如图 2 所示。

2 车辆荷载下的沥青路面响应

车辆荷载加载位置的偏差是现场实测结果随机误差的主要影响因素,为尽量减小加载轮迹相对于传感器的位置偏移量对测试结果的影响,在同一工况下保证 3 次平行加载试验,数据采集工作与加载试验同步进行,以其中最大值所对应的测试结果(波形、峰值)评价路面结构的动力响应。

2.1 动态应变响应特征

2.1.1 应变信号时程曲线

下页图 3 为 10 t 单后轴车及 18 t 双后轴车均以 60 km/h 速度行驶时,半刚性基层路面(S1)的层底应变响应时程曲线。

从图 3 可以得出如下结果。

(1)应变响应曲线表征出车辆在高速行驶过程中通过轮胎对路面结构产生的冲击荷载作用,行车荷载下路面结构在面层与基层底主要处于受拉状态。从波形图可以清楚地区分加载车辆的轴型与轴数,每个波峰代表车辆的每根轮轴经过传感器位置所产生的应变响应最大值。由初始响应到应变峰值出现,为车辆由远及近的加载过程;之后随着荷载的逐渐离开,应变响应不断减小。由于沥青路面的粘弹材料特性,响应曲线在卸载过程出现应变时间推迟,应变响应存在延滞回复过程,加、卸载过程的响应具有不对称性<sup>[12]</sup>。

(2)对于单后轴车而言,在前、后轴连续作用下,面层及基层底应变响应相对独立。在双后轴车辆加载过程中,在双联轴荷载作用下面层底出现应变响应的干涉现象,不过类似情况在基层底部的应变响

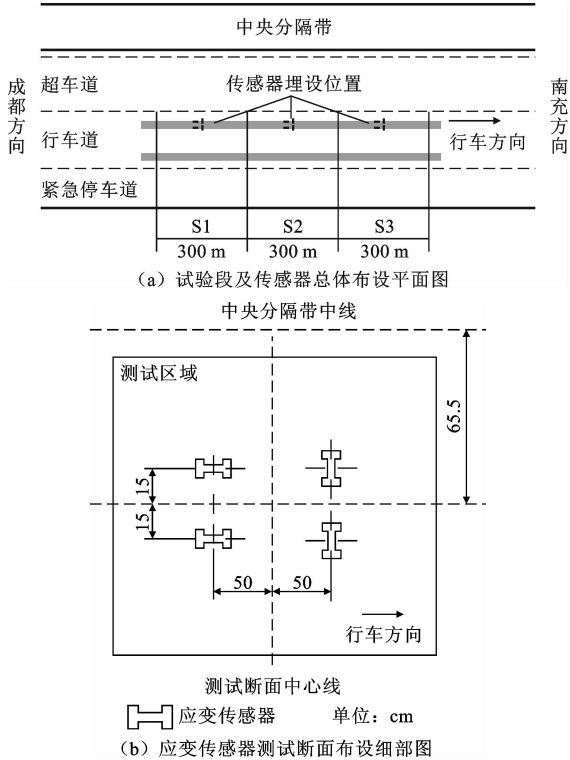


图 2 传感器现场埋设方案

Fig. 2 Laying program of sensors

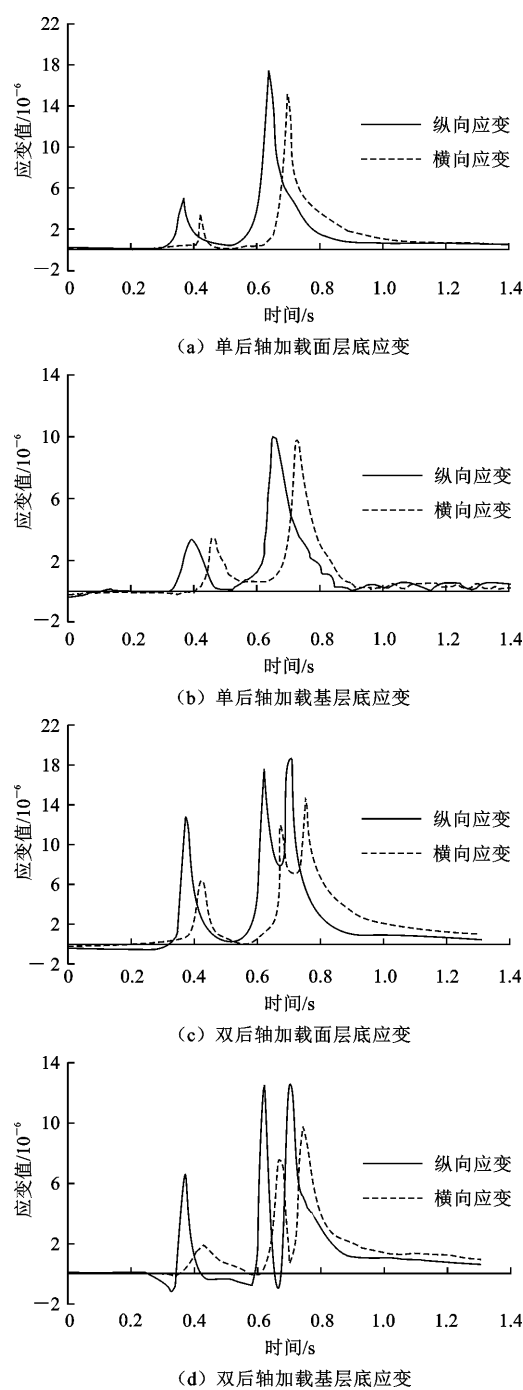


图 3 应变信号时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of strain signal

应中并未出现,因此,本文认为联轴作用下的干涉现象是由沥青材料的粘滞性引起的。由于 2 根后轴的间距小,荷载间隔时间短,前轴加载后,沥青面层的弹性变形回复受到材料粘弹性性质的作用而无法瞬时完成,与随之而来的后轴荷载发生干涉、叠加效应。而 S1 结构的基层采用水泥稳定碎石,其材料强度较高、阻尼较小,具有硬弹簧振动特性,粘性变形表现不明显,因此在联轴荷载作用下应变响应无显

著干涉现象。

(3) 2 种加载车辆产生的纵、横向应变响应波形相似,而纵、横向应变值的大小存在差异性,说明沥青路面具有各向异性的性质,这与车辆荷载的行车方向、路面施工的碾压模式以及路面结构自身的边界条件有关。

### 2.1.2 实测荷载作用时间

若不考虑由于路面不平整引起的车轮附加荷载效应,则车速大小对路面响应的影响主要体现在车辆荷载加载频率(作用时间)的不同。行车速度提高,应力应变脉冲持续时间缩短,将使路面材料动态模量发生变化,进而影响路面结构的动力响应<sup>[13-14]</sup>,因此行车荷载脉冲时间的确定,对于合理确定沥青混合料力学参数及掌握路面动力特征具有重要意义。

根据 3 种典型沥青路面结构在不同加载条件下的实测荷载作用时间,发现路面结构类型及车辆轴质量对荷载作用时间的影响并不明显,其大小主要与行车荷载速度有关。图 4 为标准轴载 BZZ-100 下,不同行车速度对沥青面层脉冲作用时间的影响。

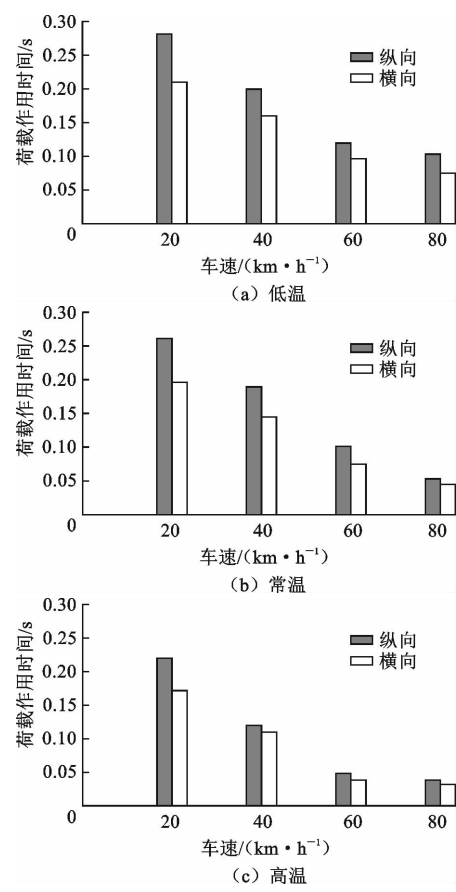


图 4 行车速度对荷载作用时间的影响

Fig. 4 Influence of truck speed on load duration

由图 4 可得如下结果。

(1)实测荷载作用时间能够明确反映车速变化对荷载效应的影响,分别考虑 20、40、60 和 80 km/h 这 4 种车速,不同温度条件下的纵、横向荷载作用时间均随车速增加近似呈线性关系增大,其相关性可通过线性方程描述  $y=ax+b$ ,其中  $y$  为荷载作用时间(s), $x$  为车速(km/h),回归系数  $a$ 、 $b$  见表 2。就线性方程斜率  $a$  所表征的荷载作用时间平均变化率来看,纵向作用时间随车速的变化比横向作用时间更显著。

(2)在相同温度及车速条件下,纵向荷载作用时间大于横向荷载作用时间,以 60 km/h 为例,行车荷载引起的纵向荷载作用时间为横向作用时间的 1.24 倍(低温)、1.36 倍(常温)、1.29 倍(高温)。随着温度升高,荷载作用时间逐渐减小,这与沥青材料的感温性有关。随着温度的升高,沥青混合料硬度降低、模量减小,对荷载的扩散能力减弱,因而荷载作用时间缩短。

2.2 动态应变响应变化规律

实测数据表明,面层底纵向应变大于横向应变,从不利受力状态考虑,本文重点针对沥青面层底纵向应变开展路面动力响应特性分析。

现场试验段的沥青路面使用性能分区属于夏季炎热冬季温湿润区(1-4-2 区)<sup>[15]</sup>。以路表、面层中以及面层底 3 个温度的平均值作为路面结构的等效温度,结合当地气温变化情况,分别在冬季低温、春季常温及夏季高温 3 类典型温度下开展现场测试,以低温、常温以及高温条件下的应变响应平均值作为不同温度条件的路面动力响应代表值,分析动态应变响应的变化规律。测试过程中的沥青路面温度情况见表 3。

下页图 5 为以单后轴车型进行加载试验时,不同温度条件下面层底动态应变随车速及轴质量的变化情况。图中平均值是指当温度及轴质量相同时,不同车速下的应变响应取平均值,用于在不考虑车速影响作用的前提下进行不同温度应变响应的定量对比。

表 2 线性方程回归参数  
Tab. 2 Regression parameters in linear equation

系 数	纵向			横向		
	低温	常温	高温	低温	常温	高温
$a$	-0.003 1	-0.003 6	-0.003 1	-0.002 3	-0.002 6	-0.002 5
$b$	0.328 3	0.331 5	0.260 5	0.251 5	0.247 0	0.211 0
判定系数 $R^2$	0.939 3	0.989 0	0.900 8	0.969 2	0.981 4	0.918 6

表 3 测试过程中的路面温度  
Tab. 3 Pavement temperatures during test

温度类型	最大值/℃			最小值/℃			平均值/℃		
	低温	常温	高温	低温	常温	高温	低温	常温	高温
路表	16.7	24.3	53.7	9.7	18.2	43.9	13.1	21.9	46.9
面层中	15.0	23.0	46.0	10.0	17.0	39.0	12.1	21.3	43.1
面层底	15.0	22.0	41.0	11.0	17.0	38.0	12.0	20.7	40.2
路面等效温度	15.6	23.1	46.9	10.2	17.4	40.3	12.4	21.3	43.4

由图 5 可得如下结论。

(1)3 种典型沥青路面的面层底应变随车速及轴质量的变化规律基本一致,在低温、常温及高温条件下,面层底应变响应均随轴质量的增加逐渐增大,随车速的提高逐渐减小。

(2)在低温条件下,3 种路面的应变水平均较低。结合沥青路面疲劳极限理论可知<sup>[16]</sup>,即使在超载 80%(轴质量 18 t)时应变响应也远低于沥青材料疲劳极限点( $70\times10^{-6}\sim80\times10^{-6}$ )<sup>[17-18]</sup>,沥青面层几乎不会产生疲劳损伤。但随着温度提高,面层底应变显著增大。以轴质量 10 t 为例,高温时不同车速下的面层底应变平均值分别增至低温时的 3.1

倍(S1)、7.1 倍(S2)、3.3 倍(S3),呈现出明显的温度依赖性。比较不同温度条件下 3 种路面的面层底应变响应发现,冬季低温条件下面层底应变水平总体排序为  $S2<S3<S1$ ;而在夏季高温条件下的排序为  $S1<S3<S2$ 。在低温时,S2 的应变值低于 S1 和 S3,但其在高温时的应变水平却增至最高,这表明 S2 结构的动态应变响应受温度的影响作用最为显著。相比而言,由于 S1 结构中半刚性基层材料性能对温度的依赖性较小,故温度对 S1 结构层底应变的影响程度最小。

(3)以常温时标准轴载(轴质量 10 t)下的面层底应变为基准值,当温度不变而轴质量超载 80%

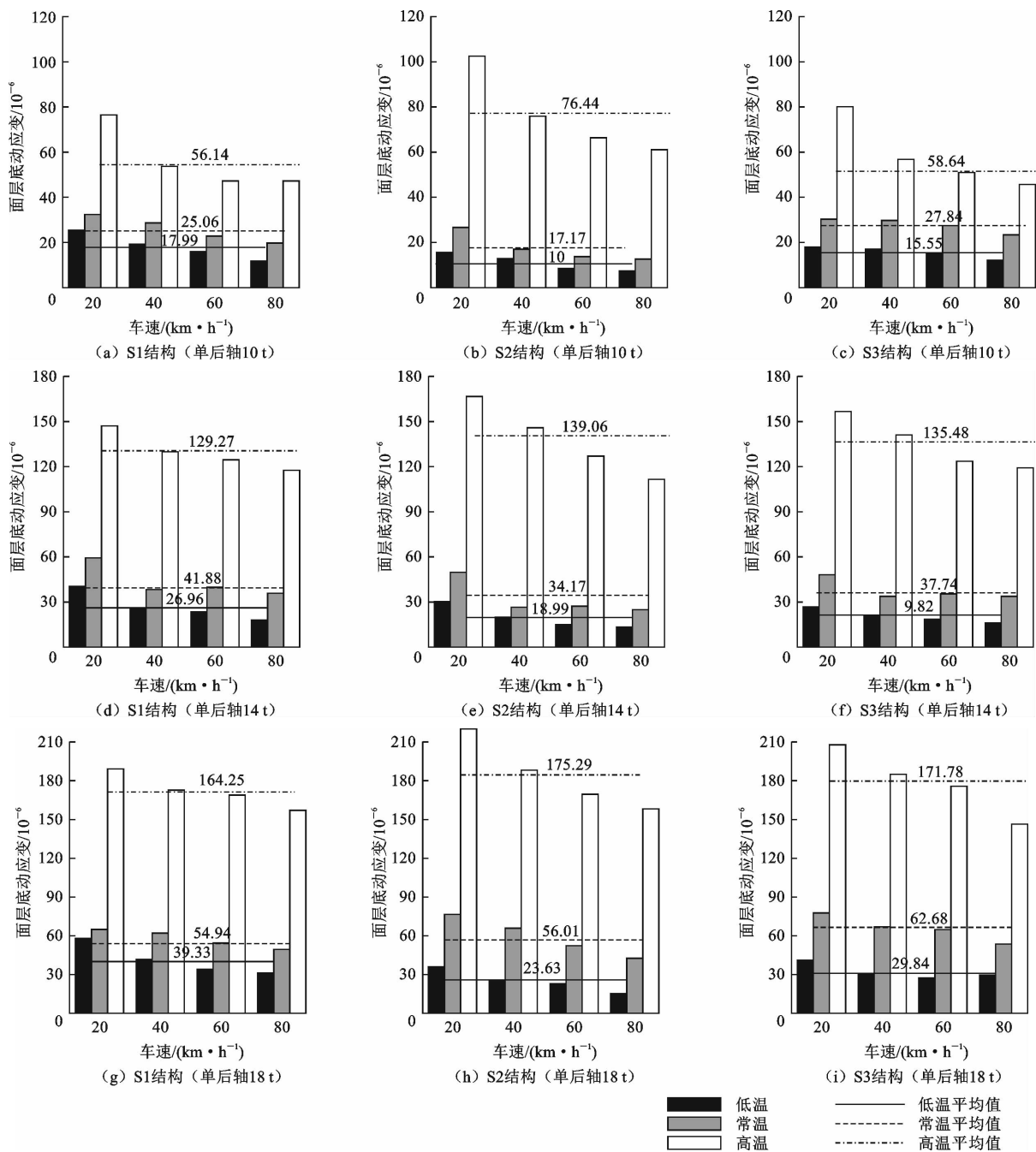


图 5 面层底应变响应变化规律

Fig. 5 Variation of strain response at the bottom of asphalt surface

(轴质量 18 t), 3 种路面的应变值分别增至 2.2 倍 (S1)、3.3 倍 (S2)、2.3 倍 (S3); 当轴质量不变而温度升至高温条件, 其应变值分别增至 2.2 倍 (S1)、4.5 倍 (S2)、1.8 倍 (S3); 当轴质量与温度同时变化, 即轴质量超载 80% 且路面温度升至高温时, 应变值分别增至 6.6 倍 (S1)、10.2 倍 (S2)、6.2 倍 (S3), 表明高温及重载综合效应对层底应变的影响不仅仅是温度及轴质量影响作用的线性叠加。路面高温及车辆超载的综合作用会显著增大层底应变响应, 进而

加剧沥青层的疲劳损伤。其中以 S2 结构的影响最为显著, 在高温条件下应对车辆超载予以严格控制。

### 3 层底应变预估模型

#### 3.1 应变响应的影响因素

沥青路面应变响应是温度条件、车辆荷载参数等多因素综合影响作用下的力学指标。为考察不同因素对应变响应的影响程度, 采用交互正交试验设计方法进行路面温度、车辆轴质量、车速以

及因素间的交互作用对面层底应变的显著性分析,以确定不同类型沥青路面应变响应的关键影响因素。正交试验所选取的影响因素及水平设置如表 4 所示,拟采用 L27(34)交互正交试验表开展现场测试<sup>[19]</sup>。

表 4 正交试验因素水平  
Tab. 4 Factors and levels of orthogonal test

水平	温度条件 A	车辆轴质量 B/t		行车速度 C/ (km·h <sup>-1</sup> )
		单后轴	双后轴	
1	冬季低温(12℃)	10	18	20
2	春季常温(21℃)	14	26	40
3	夏季高温(43℃)	18	34	60

注:温度条件中的温度值为试验过程中路面温度的平均值。

通过交互正交试验的方差分析得到不同因素及其交互作用对面层底应变响应影响的显著性<sup>[20]</sup>,其基本思路为:将实测结果的总离差平方和分解为影响因素的离差平方和与误差平方和,其中影响因素的离差平方和  $S_j$ 、误差平方和  $S_e$  为交互正交表中空白列的离差平方和相加;结合各因素及误差的自由度分别得到影响因素均方和  $\overline{S_j}$  及误差均方和  $\overline{S_e}$ ,最后由各因素均方和与误差均方和构造检验统计量  $F_j$ ,显著性水平  $\alpha$  为 0.01 和 0.05,判断各因素影响作用的显著性。 $S_j$ 、 $\overline{S_e}$ 、 $\overline{F_j}$  的表达式为

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^t K_{ij}^2}{n} - \frac{T^2}{N}$$

(1)

$$\overline{S_j} = \frac{S_j}{f_j}, \overline{S_e} = \frac{S_e}{f_e}$$

(2)

$$F_j = \frac{\overline{S_j}}{\overline{S_e}}$$

(3)

式中: $K_{ij}$  为因素  $j$  在水平  $i$  的应变响应数据之和; $n$  为因素  $j$  在水平  $i$  下的试验次数; $t$  为水平数; $T$  为数据总和; $N$  为数据总个数; $f_j$  为第  $j$  列因素的自由度, $f_j=t-1$ ;  $f_e$  为空白列自由度之和。

表 6 预估模型汇总

Tab. 6 Summary of prediction models

轴型	路面结构	面层底应变预估模型	
		方程编号	预估方程
单后轴	S1	1	$\epsilon = e^{0.027T + 0.066L_1 - 0.008V_1 + 1.460 \times 10^{-3} T_1 L_1 + 2.212}$
	S2	2	$\epsilon = e^{0.053T_1 + 0.092L_1 - 0.016V_1 + 3.079 \times 10^{-4} T_1 L_1 + 2.223 \times 10^{-4} T_1 V_1 + 1.533}$
	S3	3	$\epsilon = e^{(0.016T_1 + 0.042L_1 - 0.008V_1 + 2.550 \times 10^{-3} T_1 L_1 + 3.272) \times 10^{-5} T_1 V_1 + 2.313}$
双后轴	S1	4	$\epsilon = e^{0.059T_2 + 0.070L_2 - 0.008V_2 + 2.447 \times 10^{-4} T_2 L_2 + 2.110}$
	S2	5	$\epsilon = e^{(0.074T_2 + 0.066L_2 - 0.013V_2 + 2.593 \times 10^{-4} T_2 L_2 + 1.855) \times 10^{-4} T_2 V_2 + 1.614}$
	S3	6	$\epsilon = e^{0.065T_2 + 0.058L_2 - 0.008V_2 + 1.876 \times 10^{-4} T_2 L_2 + 2.085}$

注: $T_1, L_1, V_1$  分别为采用单后轴车型的温度、轴质量和车速; $T_2, L_2, V_2$  分别为采用双后轴车型的温度、轴质量和车速。

方差分析结果表明,各因素及其交互作用对应变响应的影响显著性由大到小依次为:温度  $A$ 、轴质量  $B$ 、温度与轴质量的交互作用  $A \times B$ 、车速  $C$ 、温度与车速的交互作用  $A \times C$ 、轴质量与车速的交互作用  $B \times C$ 。各影响因素的显著性评价如表 5 所示。

表 5 基于方差分析的影响因素显著性

Tab. 5 Significance of factors based on variance analysis

影响 因素	S1 结构		S2 结构		S3 结构	
	单后轴	双后轴	单后轴	双后轴	单后轴	双后轴
A	* *	* *	* *	* *	* *	* *
B	* *	* *	* *	* *	* *	* *
C	* *	* *	* *	* *	* *	* *
A×B	* *	* *	* *	* *	* *	* *
A×C	—	*	* *	* *	* *	*
B×C	—	—	*	—	*	—

注:若  $F > F_{0.01}(f_j, f_e)$ , 则该因素的影响作用高度显著,用 2 个星号“\* \*”表示;若  $F_{0.05}(f_j, f_e) < F < F_{0.01}(f_j, f_e)$ , 该因素的影响作用显著,用 1 个星号“\*”表示;若  $F < F_{0.05}(f_j, f_e)$ , 该因素的影响作用不显著,用“—”号表示。其中,  $F_{0.01}(f_j, f_e)$  和  $F_{0.05}(f_j, f_e)$  分别表示检验的可靠程度为 99% 和 95%;  $f_j, f_e$  的含义见式(2)。

3.2 层底应变预估模型

利用交互正交试验中各因素及其交互效应对面层底应变的影响显著性分析结果,选取与应变响应高度显著的影响因素,以指数函数作为回归模型,基于现场实测数据进行多元回归分析,构建沥青路面面层底应变响应的预估模型

$$y_m = e^{a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_n x_n}$$

(4)

式中: $x_1, x_2, \cdots, x_n$  为影响因素; $y_m$  为面层底应变; $a_1, a_2, \cdots, a_n$  为待定系数。

通过适当变换,可将指数函数模型转化为多元线性回归问题,并通过 SPSS 统计分析软件计算确定单后轴与双后轴车型加载作用下,不同类型路面的面层底应变响应预估模型,如表 6 所示。

下页表 7 为针对建立的面层底应变预估方程所

表 7 预估方程检验  
Tab. 7 Verification on prediction models

方程编号	拟合优度检验		方程显著性检验	预估值与实测值比较
	判定系数 $R^2$	$F$	显著性评价	$I_{\text{REA}}/\%$
1	0.956 5	170.51	$F>F_{0.01}(4,31)$ 高度显著	9.26
2	0.976 6	250.88	$F>F_{0.01}(5,30)$ 高度显著	10.12
3	0.964 4	162.50	$F>F_{0.01}(5,30)$ 高度显著	9.95
4	0.976 9	327.66	$F>F_{0.01}(4,31)$ 高度显著	8.81
5	0.979 3	284.43	$F>F_{0.01}(5,30)$ 高度显著	10.84
6	0.979 0	361.22	$F>F_{0.01}(4,31)$ 高度显著	8.52

注:“ $I_{\text{REA}}$ ”为相对误差绝对值的平均值。

进行的模型统计检验。由检验结果可知,各预估方程的判定系数  $R^2$  均接近 1,方程具有较高的拟合优度;通过方差显著性检验( $F$  检验)证明各方程中因变量  $\epsilon$  与各自变量之间的回归效果显著。基于预估方程得到的应变响应计算结果与实测值较为接近,其相对误差绝对值的均值均控制在 11% 以内。由于路面实际应变响应的影响因素较为复杂,本模型仅考虑温度、轴质量、车速及其交互作用,而其他潜在敏感性因素在预估模型中未得到体现,导致应变响应预估值与实测值存在差异。但从整体而言,利用预估模型计算的面层底应变响应与实测值总体吻合,基本上能够满足工程分析的要求。

4 结 语

(1)在车辆动力荷载作用下,路面结构在面层和基层底主要呈现出拉应变受力状态。加载与卸载过程的应变响应波形具有不对称性,卸载过程表现出应变时间推迟,并存在残余应变;双后轴车辆进行高速加载时,2 根后轴在面层底所引起的应变响应具有明显的干涉现象。在相同温度及车速条件下,纵向荷载作用时间大于横向荷载作用时间,不同温度条件下的纵、横向荷载作用时间均随车速增加近似呈线性关系增大。

(2)面层底应变随温度和轴质量的增加而逐渐增大,随车速的提高逐渐减小。就不同温度时的面层底应变响应大小而言,冬季低温条件下应变水平总体排序为  $S2<S3<S1$ ;而在夏季高温条件下的排序为  $S1<S3<S2$ ;温度变化对于应变响应的影响程度为  $S2>S3>S1$ 。

(3)高温及重载综合效应对于层底应变的影响不仅是温度及轴质量影响作用的线性叠加,路面高温及车辆超载的综合作用会显著加剧沥青层的疲劳损伤,为避免路面出现早期疲劳开裂,在高温条件下应对车辆轴载予以严格控制。

(4)结合交互正交试验设计,评价了路面温度、车辆轴质量、车速及其耦合作用对面层底应变的影响显著性,并选取与应变响应高度显著的影响因素,通过多元回归分析建立了能够满足工程分析要求的路面结构沥青层底应变响应预估模型。

(5)本文基于车辆加载试验的路面动力响应测试是在道路运营初期、路面平顺完好的条件下进行的,因此不同类型沥青路面在行车荷载作用下的长期性能还需接受进一步评估。此外,对于预估模型回归分析的实测样本数量有待进一步丰富,以提高研究结论的通用性与合理性。

参考文献:

References:

[ 1 ] 吕彭民,董忠红. 车辆-沥青路面系统力学分析[M]. 北京:人民交通出版社,2010.  
LU Peng-min, DONG Zhong-hong. Mechanical analysis of vehicle-asphalt pavement system[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)

[ 2 ] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京:人民交通出版社,2002.  
WANG Xu-dong. Dynamic characteristics and dynamic parameters of asphalt pavement materials[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese)

[ 3 ] 杨果岳,张家生,王 珏,等. 车辆速度与载重对路面结构影响的现场试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (11): 3099-3103.  
YANG Guo-yue, ZHANG Jia-sheng, WANG Xuan, et al. Experimental research on dynamic response of road pavement under different loads and speeds of vehicles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (11): 3099-3103. (in Chinese)

[ 4 ] 田庚亮,董泽蛟,胡庆立,等. 光纤光栅传感器与沥青混合料协同变形分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(5): 73-76.  
TIAN Geng-liang, DONG Ze-jiao, HU Qing-li, et al. Analysis of coordination between asphalt mixture and fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(5): 73-76. (in Chinese)

- [5] 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. Evaluating method of the coordination deformation between asphalt mixture and fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 100-104. (in Chinese)
- [6] 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):46-51.  
DONG Ze-jiao, LIU Hao, TAN Yi-qiu, 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): 46-51. (in Chinese)
- [7] 廖公云,路畅,黄晓明. 沥青路面结构力学响应的分层检测与分析[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(5):1061-1065.  
LIAO Gong-yun, LU Chang, HUANG Xiao-ming. Layered measure and analysis of mechanical responses within asphalt pavement [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(5): 1061-1065. (in Chinese)
- [8] 董忠红,吕彭民. 轴载与速度对半刚性沥青路面动力响应的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):32-36.  
DONG Zhong-hong, LU Peng-min. Influence of axis's load and speed on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- [9] 董忠红,吕彭民,刘学. 长大纵坡路段沥青路面动力响应试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2013,33(4):7-11.  
DONG Zhong-hong, LU Peng-min, LIU Xue. Test on dynamic response of asphalt pavement at large longitudinal slope section [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(4): 7-11. (in Chinese)
- [10] 杨永顺,王林,韦金城,等. 重载作用下典型路面结构动态响应数据采集与分析[J]. 公路交通科技,2010,27(5):11-16.  
YANG Yong-shun, WANG Lin, WEI Jin-cheng, et al. Typical pavement structure dynamic response data collection and analysis under heavy vehicle loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 11-16. (in Chinese)
- [11] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.  
YAO Zu-kang. Structural design of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [12] 郑健龙,钱国平,应荣华. 沥青混合料热粘弹性本构关系试验测定及其力学应用[J]. 工程力学,2008,25(1):34-41.  
ZHENG Jian-long, QIAN Guo-ping, YING Rong-hua. Testing thermal viscoelastic constitutive relation of asphalt mixtures and its mechanical applications [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 34-41. (in Chinese)
- [13] 张久鹏,黄晓明,高英. 沥青混合料非线性蠕变模型及其参数确定[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(2):24-27.  
ZHANG Jiu-peng, HUANG Xiao-ming, GAO Ying. Nonlinear creep model of asphalt mixture and parameter determination [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 24-27. (in Chinese)
- [14] 赵延庆,王志超,王国忠,等. 移动荷载下沥青路面内应力脉冲的持续时间[J]. 交通运输工程学报,2009,9(6):11-15.  
ZHAO Yan-qing, WANG Zhi-chao, WANG Guo-zhong, et al. Stress pulse durations in asphalt pavement under moving load [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 11-15. (in Chinese)
- [15] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].  
JTG F40—2004, Technical specification for construction of highway asphalt pavements[S]. (in Chinese)
- [16] BUNCHER M, NEWCOMB D, HUDDLESTON J. Perpetual pavements[J]. Asphalt, 2000, 15(3): 20-22.
- [17] 张志祥,陈荣生,白琦峰. LSM 沥青混合料疲劳极限的试验研究[J]. 公路交通科技,2006,23(4):19-22.  
ZHANG Zhi-xiang, CHEN Rong-sheng, BAI Qi-feng. Laboratory study of fatigue limit of LSM base mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 19-22. (in Chinese)
- [18] 平树江,申爱琴,李鹏. 长寿命路面沥青混合料疲劳极限研究[J]. 中国公路学报,2009,22(1):34-38.  
PING Shu-jiang, SHEN Ai-qin, LI Peng. Study of fatigue limit of asphalt mixture for perpetual pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 34-38. (in Chinese)
- [19] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京:科学出版社,2006.  
ZHAO Xuan-min. Design method of experiment [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [20] 李波. 基于交互正交试验的空间用谐波减速器传动性能影响因素研究[J]. 航空学报,2012,33(2):375-380.  
LI Bo. Research of factors affecting transmission performance of harmonic drive in spacecraft based on interactive orthogonal experiment [J]. Acta Astronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(2): 375-380. (in Chinese)