

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.04.001

# 行车荷载下不同沥青路面结构动力响应测试分析

黄晚清, 曹明明, 游 宏

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**为研究行车荷载下不同沥青路面结构的动力响应,验证、完善我国沥青路面设计方法,在两种倒装式和传统半刚性基层沥青路面结构内部埋设沥青应变计、土压力计和垂直大变形应变计等传感元件,以单后轴货车为行车荷载,现场开展了不同轴重、不同行车速度及制动工况下3种路面结构的动力响应测试。以沥青层层底纵向应变与横向应变、路基顶面土压力和过渡层底部竖向压应力与竖向位移为评价指标,分析了不同沥青路面结构的动力响应规律。结果表明:随行车速度增加,各路面结构沥青层层底应变、过渡层竖向压应力与竖向位移均明显减小;从拉应变循环幅值看,半刚性基层结构随车速的变化更敏感;相同轴重和车速下半刚性基层结构路基顶面的压应力远小于倒装式结构,半刚性基层结构荷载扩散能力更优;相同车速下,3种路面结构沥青层层底纵向应变循环幅值和路基顶土压力均随轴重增加而增大,且半刚性基层结构的增幅相对更大,即半刚性基层结构对荷载更敏感,倒装式结构对荷载适应性更强;车辆制动会引起沥青层层底残余应变、纵(横)向应变与应变循环幅值大幅增加,频繁制动易引起路面车辙变形和加速路面沥青层疲劳破坏。

**关键词:**道路工程;路面结构动力响应规律;现场测试;倒装基层沥青路面;行车速度;轴重

中图分类号:U416.217

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2020)04-0001-08

## Test and Analysis on Dynamic Response of Different Asphalt Pavement Structures under Traffic Load

HUANG Wan-qing, CAO Ming-ming, YOU Hong

(Sichuan Communications Survey and Designing Institution Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic response of different asphalt pavement structures under traffic load, to verify and perfect the design method of asphalt pavement in China, the sensing elements such as asphalt strain gauges, earth pressure gauges and vertical large deformation strain gauges are embedded in the interior of 2 types of inverted and a conventional semi-rigid base asphalt pavement structures. The dynamic responses of 3 types of pavement structures under single rear axle truck load with different axle loads, driving speeds and vehicle braking conditions are tested. Taking longitudinal and transverse strains at bottom of asphalt layer, soil pressure at top of subgrade, vertical compressive stress and vertical displacement at bottom of transition layer as the evaluation indicators, the dynamic response rules of different pavement structures are analyzed. The result shows that (1) The strain at bottom of asphalt layer, the vertical compressive stress and the vertical displacement of transition layer of each pavement structure decrease significantly with the increase of vehicle speed. (2) The tensile strain cyclic amplitude of semi-rigid base structure is more sensitive to the change of vehicle speed. (3) The compressive stress at the top of subgrade of semi-rigid base structure is much smaller than that of the inverted structure with the same axle load and speed, and semi-rigid base structure has better load dispersion capability. (4) The longitudinal strain cyclic amplitudes at the bottom of

收稿日期:2018-06-22

基金项目:四川省交通科技项目(2015自3-1)

作者简介:黄晚清(1978-),男,湖北崇阳人,博士,教授级高级工程师。(50161632@qq.com)

asphalt layers and the soil pressure at the top of subgrades of 3 pavement structures increase with the increase of axle load at the same speed, and the increase of semi-rigid base structure is relatively greater, i. e. , semi-rigid base structure is more sensitive to load, while the inverted structure is more adaptable to load. (5) Braking results in substantial increase in the residual strain, longitudinal strain, transverse strain, and strain cycle amplitude at the bottom of asphalt layer. Frequent braking can easily cause road rutting and accelerate the fatigue damage of asphalt layer.

**Key words:** road engineering; pavement structure dynamic response regularity; field test; inverted base asphalt pavement; vehicle speed; axle load

0 引言

半刚性基层沥青路面在我国应用极为广泛，众多学者和技术人员也进行了大量研究和工程实践，但半刚性基层沥青路面裂缝难以有效解决，裂缝本身对路面性能影响不大，但在多雨地区，雨水一旦渗入，在行车荷载反复作用下极易出现唧浆等病害，特别是当裂缝贯穿整个路面结构层导致路基顶部产生唧浆病害的维修极为棘手。20 世纪 80 年代末，国外开始采用在半刚性基层与沥青层之间设置级配碎石过渡层的倒装式沥青路面结构<sup>[1]</sup>，该结构充分利用了级配碎石过渡层良好的抗反射裂缝和排水性能。我国早期在一些高速公路进行了倒装式沥青路面结构试验研究<sup>[2]</sup>。2000 年以后安徽、福建省已经提出了各自的倒装式沥青路面典型结构。

沥青路面结构的动力响应对路面设计和性能评估具有重要的指导作用，文献 [3-4] 介绍了我国 RIOHTRACK 环道路面结构与材料设计、试验概况和初步成果；文献 [5] 对半刚性基层沥青路面现场测试表明，沥青层层底应变峰值随车速增加逐渐减小；文献 [6] 对半刚性沥青路面基层顶面竖向应力和沥青层底拉应变的仿真分析和试验测试表明，二者随车速提高不断减小。文献 [7] 研究柔性路面结构发现，车速增大，内部应力增加，但增幅与 AASHTO 的相差较大；而柔性路面的现场测试则表明<sup>[8]</sup>，车

速增大，沥青层层底应变大幅减小；文献 [9] 现场实测了车速对柔性路面沥青层层底应变、基层和路基顶面竖向应力的影响，结果表明沥青层层底应变受其影响显著，而对基层和路基顶的竖向应力几乎无影响；美国环道试验表明，温度也会影响行车速度与路面结构动力响应的关系<sup>[10]</sup>。

上述研究结果表明，不同结构沥青路面在行车荷载作用下动力响应表现不一，文献 [11] 的数值计算结果表明，路面结构动力响应随轴重增加而增加，随车速增加而减小，但轴重和车速对不同动力响应参数的影响不同；文献 [12] 的有限元计算结果表明，倒装式沥青路面面层层底拉应力随轴载增加近似呈线性递增，且面层层底拉应力明显小于传统半刚性基层沥青路面面层层底拉应力。国内对倒装式沥青路面结构动力响应研究很少，现场动力响应测试更是鲜有报道。依托四川遂宁至广安高速公路试验段，以沥青层层底应变、级配碎石过渡层和路基顶部竖向压应力为主要指标，现场测试分析不同基层沥青路面结构在不同行车速度下的动力响应。

1 试验段路面结构形式及测试方案

1.1 试验段路面结构形式

3 种试验段路面结构如表 1 所示，结构总厚度均为 89 cm。

表 1 试验段路面结构 (单位: cm)

Tab. 1 Pavement structure of test section (unit: cm)

| 路面结构                |       | S1 (半刚性结构)  | S2 (倒装结构 1) | S3 (倒装结构 2) |
|---------------------|-------|-------------|-------------|-------------|
| 沥青玛蹄脂碎石 SMA-13 上面层  |       | 4           | —           | —           |
| SBS 改性沥青 AC-20C 中面层 |       | 6           | —           | —           |
| 下面层                 | 下面层类型 | 普通沥青 AC-20C | 改性沥青 AC-20C | 普通沥青 ATB-25 |
|                     | 厚度    | 8           | 8           | 12          |
| 级配碎石过渡层             |       | —           | 12          | 12          |
| 水泥稳定碎石基层            |       | 28          | 20          | 20          |
| 水泥稳定碎石底基层           |       | 28          | 24          | 20          |
| 级配碎石垫层              |       | 15          | 15          | 15          |

## 1.2 测试元件布置

选用的测试元件类型、测试指标和埋设层位如表 2 所示, 其平面布置, 如图 1 所示 (以结构 S2 为

表2 测试元件类型、指标和埋设层位

**Tab. 2** Types, indicators and embedding positions of sensing elements

| 序号 | 测试元件类型   | 测试指标            | 布设层位        |
|----|----------|-----------------|-------------|
| 1  | 横向沥青应变计  | 垂直行车方向沥青层层底水平应变 | 沥青层层底       |
| 2  | 纵向沥青应变计  | 行车方向沥青层层底水平应变   | 沥青层层底       |
| 3  | 垂直大变形应变计 | 级配碎石过渡层位移量      | 过渡层中        |
| 4  | 土压力计     | 路基顶面和级配碎石底部动应力  | 土基顶部和基层顶面   |
| 5  | 温度传感器    | 沥青路面温度          | 沥青中面层和下面层中部 |

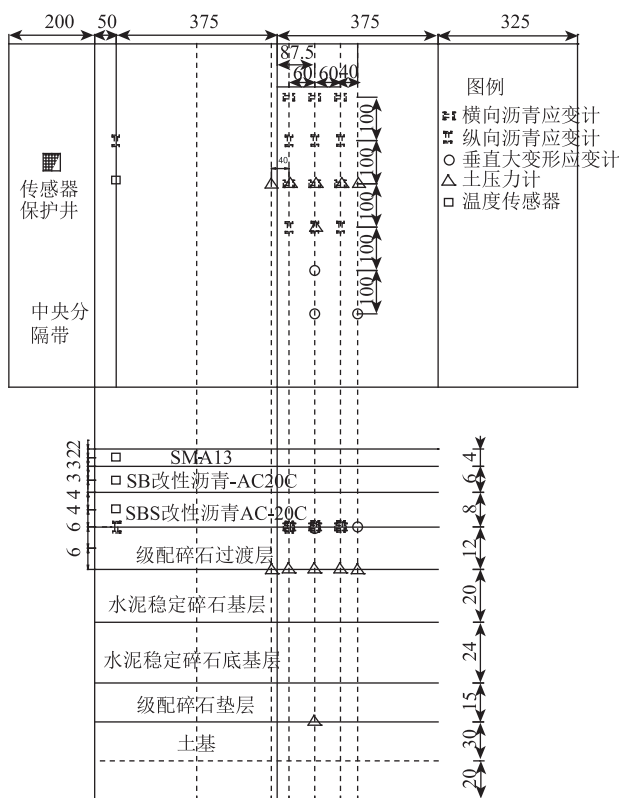


图 1 结构 S2 测试元件布置图 (单位: cm)

**Fig. 1** Layout of sensing elements in structure S2 (unit: cm)

### 1.3 测试方案

本次测试采用单后轴货车（图 2），前轴胎压 0.7 MPa，后轴胎压 1.1 MPa。测试采用最大行车速度为 40 km/h，部分工况下最大行驶速度为 60 km/h，采样频率为 1 kHz。

## 2 路面结构动力响应测试分析

### 2.1 沥青层层底动应变响应分析

沥青层层底应变是评价沥青路面结构性能的最主要指标之一, 现行沥青路面设计规范<sup>[13]</sup>以沥青层层底拉应变为路面结构疲劳验算指标。图3~图4为

例); 其中结构 S2 和结构 S3 传感器布设位置一致, 结构 S1 无级配碎石过渡层, 则该结构内未布置垂直大变形应变计和土压力计。

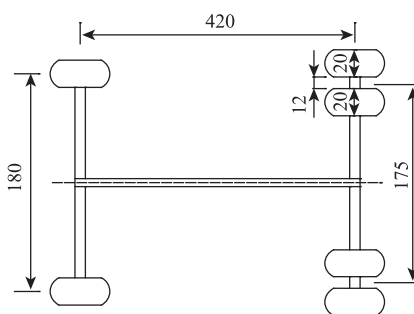


图2 单后轴货车示意图 (单位: cm)

**Fig. 2 Schematic diagram of single rear axle truck ( unit: cm )**

S1, S2 和 S3 沥青层层底纵向应变（行车方向）实测曲线。可看出，行车速度对沥青层层底纵向应变影响显著：速度增大，3 种结构沥青层层底纵向拉、压应变值均减小。不同结构的荷载动力响应变化趋势相同，但拉应变与压应变随速度的变化梯度不同，3 种结构的拉应变变化梯度均较压应变大，该结果与文献 [14] 基于柔性沥青路面类似的现场测试结果相吻合。

从应变循环幅值(拉、压应变峰值之差)指标看,3种结构沥青层层底应变循环幅值均随行车速度增大而减小,但不同结构的应变循环幅值变化梯度不同。当车速由5 km/h 提高到40 km/h 时,倒装结构S2、S3的沥青层层底纵向应变循环幅值降低48%~57%和27%~53%,而半刚性基层结构S1却降低70%~90%,远大于倒装结构,表明就沥青层层底纵向应变循环幅值指标而言,半刚性基层结构对车速的敏感性大于倒装式结构。进一步比较同属倒装结构S2和S3,沥青层层底纵向应变循环幅值对行车速度的敏感性总体大于S3,这主要因S2结构沥青层较薄。

如图 5 所示, 3 种路面结构沥青层层底横向应变

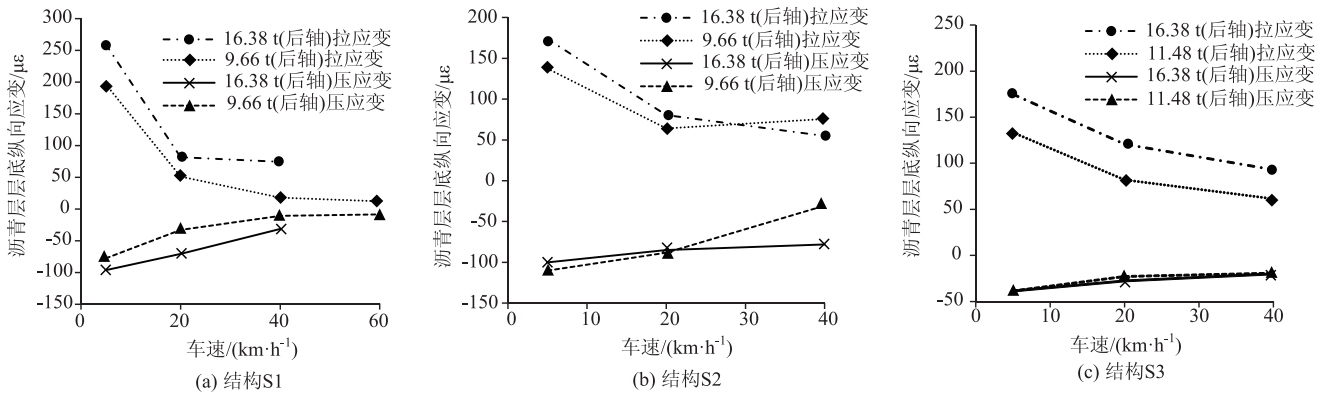


图3 沥青层层底纵向应变与车速关系

Fig. 3 Relation between longitudinal strain at bottom of asphalt layer and speed

## 2.2 路基顶面动力响应分析

由图6所示的路基顶面竖向压应力与车速的关系曲线可知,在测试荷载作用下,路基顶面土压力总体均较小,表明试验段3种路面结构均具有较强的结构承载能力。相同轴重和速度下,结构S1路基顶面的压应力远小于S2和S3,表明结构S1对荷载的扩散能力大于S2和S3。究其原因,尽管3种路面结构总厚度相同,但结构S1的水泥稳定碎石层相对较厚,由于水泥稳定碎石层的扩散角相对较大,结构S1在路基顶面的荷载扩散范围相对较大(见表3),从而使得其下路基顶面压应力相对较小。其中,水泥稳定碎石、级配碎石和沥青混凝土扩散角分别选用 $45^\circ$ ,  $35^\circ$ 和 $26.5^\circ$ <sup>[15-17]</sup>。取值主要考虑水泥稳定碎石成型后为板体结构,荷载扩散能力较强;级配碎石颗粒间无黏结材料,具有消散应力的作用;沥青混合料具有明显的黏滞阻尼特性,尤其在高温条件下,荷载扩散能力较前二者差。

动土压力的测试结果表明设置级配碎石过渡层的路面结构需要更高的路基强度,这正是倒装结构

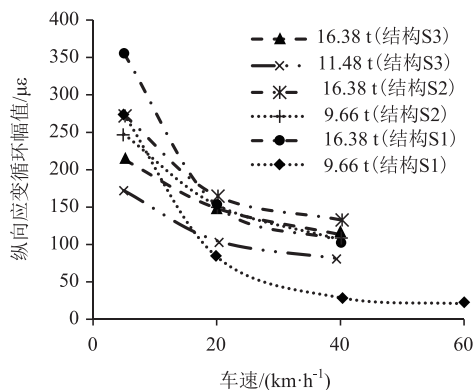


图4 沥青层层底纵向应变循环幅值与车速关系

Fig. 4 Relation between longitudinal strain cyclic amplitude at bottom of asphalt layer and speed

与车速均呈现相同变化趋势,即车速增加,应变峰值减小。该变化规律与纵向应变类似,且横向应变受车速影响的敏感程度与路面结构有关。但与纵向应变不同的是,行车荷载下的横向压应变值很小,表明对横向(垂直行车方向)而言,沥青层层底拉应变(非拉、压循环)是导致沥青层开裂的主要原因。

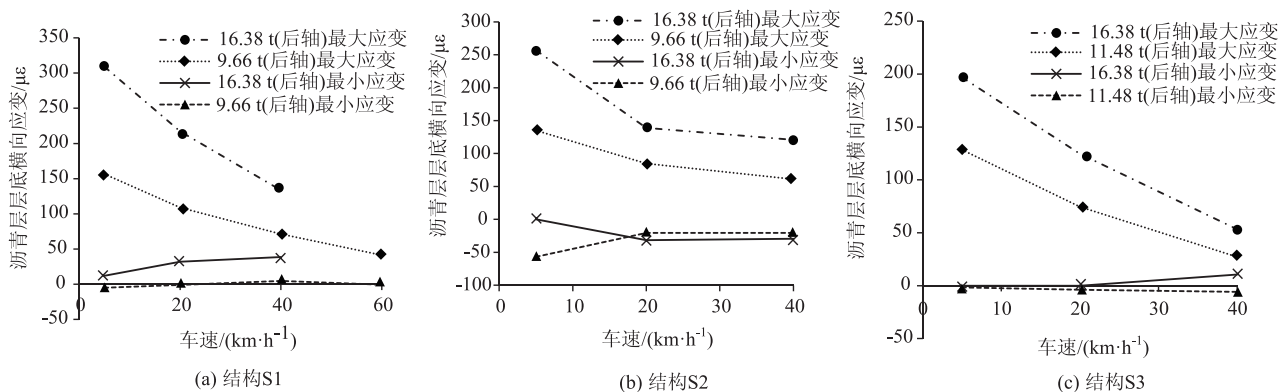


图5 沥青层层底横向应变与车速关系

Fig. 5 Relation between transverse strain at bottom of asphalt layer and speed

出现的根本原因之一, 即为补偿路基强度不足, 避免在重交通荷载作用下路面产生结构破坏, 需在级配碎石过渡层下设置水泥稳定碎石层。但另一方面, 在路面结构实际服役过程中, 由于半刚性基层沥青路面不可避免出现裂缝, 路面一旦开裂特别是裂缝贯穿整个路面结构层, 在南方多雨地区大量雨水将

会渗入滞留在路基顶面、软化路基, 在行车荷载引起动水压力的反复作用下, 细粒土被挤出, 进一步恶化路基支撑条件, 大大降低路面结构的承载能力; 而倒装式路面结构 S2 和 S3, 由于级配碎石过渡层的排水和抗反射裂缝作用, 会有效避免这一现象, 从而保证了路面结构服役过程中的承载稳定性。

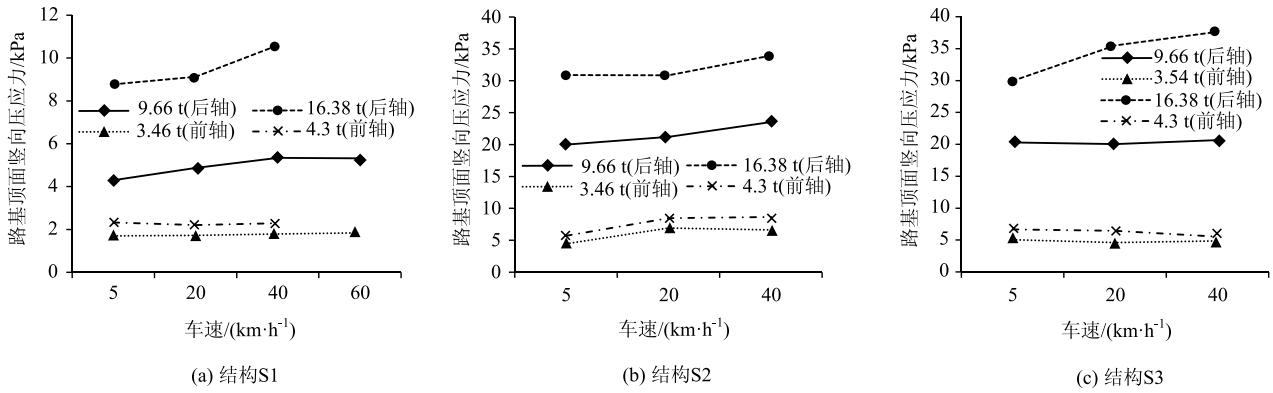


图6 路基顶面竖向压应力与车速关系

Fig. 6 Relation between vertical compressive stresses at top of subgrade and speed

表3 3种沥青路面结构荷载扩散范围

Tab. 3 Load disperse range of 3 asphalt pavement structures

| 层位      | 扩散角/<br>(°) | 结构 S1 |         | 结构 S2 |         | 结构 S3 |         |
|---------|-------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
|         |             | 厚度/cm | 扩散范围/cm | 厚度/cm | 扩散范围/cm | 厚度/cm | 扩散范围/cm |
| 沥青混凝土   | 26.5        | 18    | 8.97    | 18    | 8.97    | 22    | 10.97   |
| 级配碎石过渡层 | 35          | —     | —       | 12    | 8.40    | 12    | 8.40    |
| 水泥稳定碎石  | 45          | 56    | 56.00   | 44    | 44.00   | 40    | 40.00   |
| 级配碎石垫层  | 35          | 12    | 8.40    | 12    | 8.40    | 12    | 8.40    |
| 总扩散范围   | —           | —     | 73.38   | —     | 69.78   | —     | 67.77   |

3种路面结构下路基顶面土压力随车速的变化似乎与轴重有关, 即在较小轴重作用下, 路基顶面土压力随车速变化不明显或总体不变, 重荷载作用下, 路基顶面土压力随速度提高略有增大。通常将 5 km/h 速度视作静载, 随测试速度提高动载效应增加, 表现为土压力增大; 由于路面结构厚度较大, 荷载经路面结构层扩散, 加之土压力传感器分辨率有限, 当轴载较小时, 难以捕捉到路基土压力的细微变化, 表现为总体不变。

### 2.3 过渡层动力响应分析

以倒装式结构 S3 为例, 研究过渡层底部竖向压应力和过渡层竖向位移随车速的变化关系, 见图 7 和图 8。可知, 过渡层竖向压应力和竖向位移均随车速度的提高而减小。由于级配碎石过渡层紧邻沥青层下, 沥青混合料的黏弹塑性及碎石散粒体材料

复杂的非线性特征使过渡层竖向压应力和应变出现这一变化规律。

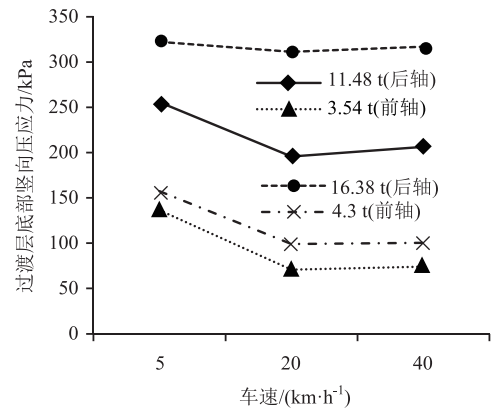


图7 结构 S3 过渡层底部竖向压应力与车速关系

Fig. 7 Relation between vertical compressive stresses at bottom of transition layer of structure S3 and speed



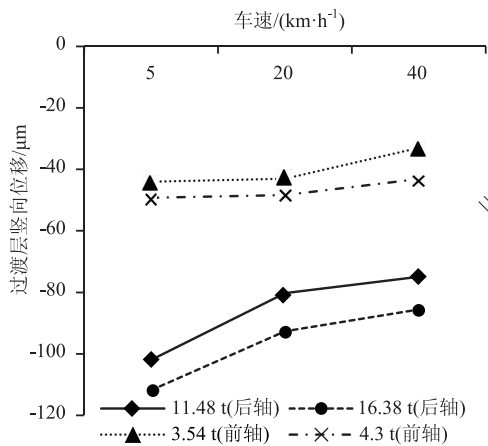


图8 结构S3过渡层竖向位移与车速关系

Fig. 8 Relation between vertical displacement of transition layer of structure S3 and speed

2.4 轴重对动力响应影响分析

各车速下不同轴重荷载作用的沥青层层底纵向应变幅值和路基顶土压力如图9和图10所示。相同车速下,3种路面结构沥青层层底纵向应变循环幅值和路基顶土压力随轴重增加而增大,且半刚性基层沥青路面的增幅相对更大,表明半刚性基层沥青路面对荷载更为敏感,倒装式沥青路面结构对荷载的适应性更强。

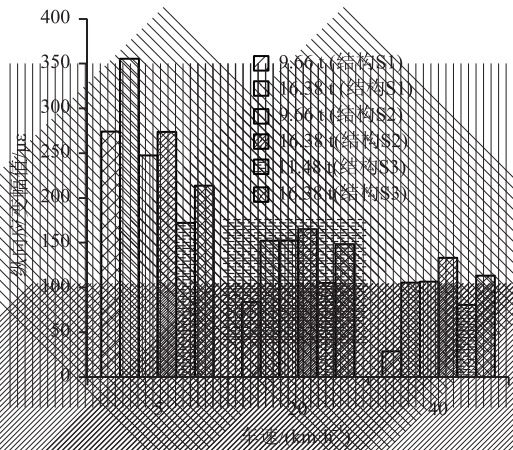


图9 轴重对沥青层底纵向应变循环幅值的影响

Fig. 9 Influence of axial load on longitudinal strain cyclic amplitude at bottom of asphalt layer

3 车辆制动下的动态响应分析

公路沥青路面结构验算不考虑水平荷载,主要因车辆正常行驶时路面结构内的水平作用远远小于竖向作用。但在车辆频繁制动、减速或起步、加速路段,路面易出现波浪、拥包和车辙等病害。采用单后轴货车(后轴重11.48 t)荷载,在结构S3路段以点刹方式减速进行现场测试。采用文献[18]

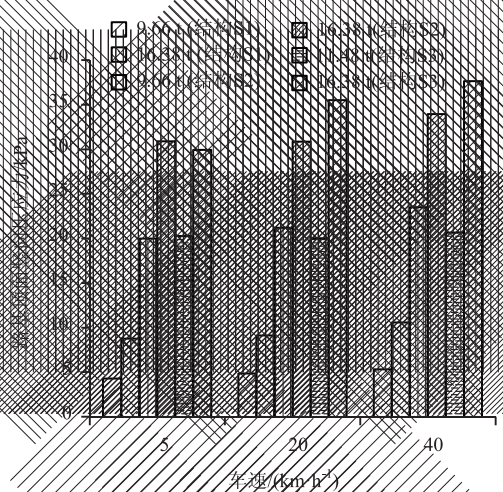


图10 轴重对路基土压力的影响

Fig. 10 Influence of axial load on soil pressure of subgrade

的简化方式,不考虑制动过程中车速变化对动态响应的影响,实测路面动力响应见表4和表5。

表4 车辆制动对沥青层层底应变影响

Tab. 4 Influence of vehicle braking on strain at bottom of asphalt layer

| 测试指标          | 工况   | 压应变/<br>$\mu\epsilon$ | 拉应变/<br>$\mu\epsilon$ | 应变<br>幅值/ $\mu\epsilon$ | 残余<br>应变/ $\mu\epsilon$ |
|---------------|------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 沥青层层底<br>纵向应变 | 正常行驶 | -19.18                | 61.42                 | 80.60                   | 6.92                    |
|               | 制动工况 | -30.05                | 88.48                 | 118.53                  | 15.66                   |
| 沥青层层底<br>横向应变 | 正常行驶 | -5.80                 | 27.12                 | 32.92                   | 6.12                    |
|               | 制动工况 | -4.50                 | 57.21                 | 61.71                   | 22.33                   |

表5 车辆制动对竖向力学指标响应影响

Tab. 5 Influence of vehicle braking on response of vertical mechanical indicator

| 测试指标 | 工况   | 路基顶面竖向<br>压应力/kPa | 过渡层             |                        |
|------|------|-------------------|-----------------|------------------------|
|      |      |                   | 底部竖向<br>压应力/kPa | 竖向位移/<br>$\mu\text{m}$ |
|      | 正常行驶 | 20.67             | 206.48          | -74.93                 |
|      | 制动工况 | 22.83             | 242.99          | -78.17                 |

表4和表5结果表明,相对正常行驶,车辆制动会引起沥青层层底纵(横)向应变峰值大幅增加,层底应变循环幅值大幅增加,由此可推断,频繁制动刹车会加快沥青层的疲劳破坏;考察残余应变指标发现,制动同时引起沥青层层底纵(横)向残余应变发生剧变,表明制动刹车极大增加了路面车辙、推移和拥包等变形病害发生的几率;与沥青层不同的是,车辆制动对路基顶压应力、级配碎石过渡层竖向位移和底部竖向压应力的影响相对较小。

#### 4 基于现场实测数据疲劳寿命预估

鉴于目前没有倒装式沥青路面结构的疲劳模型, 故借鉴文献[15]的疲劳方程, 以不同荷载工况下现场实测沥青层层底拉应变预估沥青层疲劳寿命, 并以此作为各路面结构的疲劳寿命。室内试验确定结构 S1, S2 和 S3 下面层的沥青饱和度分别为 71.6%, 70.5% 和 62.8%。动态模量 (46 °C) 分别取 1 447, 1 212 MPa 和 992 MPa。温度调整系数取 1.46。该高速公路沿线季节性冻土地区调整系数取 1.0。不同工况下预估 S1, S2 和 S3 的疲劳寿命见表 6。可看出, 轴重减小和车速增加均有利于延长沥青路面的疲劳寿命, 半刚性基层沥青路面疲劳寿命对轴重和行车速度的敏感性大于倒装式沥青路面结构。值得指出的是, 该预估寿命没有考虑路面结构的差异, 也没有充分考虑半刚性基层沥青路面开裂后雨水浸入加速结构破坏的影响。

表 6 沥青层疲劳寿命预估

Tab. 6 Prediction of asphalt layer fatigue life

| 结构类型  | 单后轴货车  |                                            | 预估疲劳寿命/<br>( $\times 10^6$ 次) |
|-------|--------|--------------------------------------------|-------------------------------|
|       | 后轴轴重/t | 车速/<br>( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |                               |
| 结构 S1 | 9.66   | 40                                         | 11 047.7                      |
|       | 9.66   | 20                                         | 159.6                         |
|       | 9.66   | 5                                          | 1.4                           |
|       | 16.38  | 40                                         | 63.7                          |
|       | 16.38  | 20                                         | 14.9                          |
|       | 16.38  | 5                                          | 0.5                           |
| 结构 S2 | 9.66   | 40                                         | 77.2                          |
|       | 9.66   | 20                                         | 18.5                          |
|       | 9.66   | 5                                          | 2.7                           |
|       | 16.38  | 40                                         | 31.9                          |
|       | 16.38  | 20                                         | 13.5                          |
|       | 16.38  | 5                                          | 1.8                           |
| 结构 S3 | 11.48  | 40                                         | 99.6                          |
|       | 11.48  | 20                                         | 34.8                          |
|       | 11.48  | 5                                          | 4.9                           |
|       | 16.38  | 40                                         | 25.9                          |
|       | 16.38  | 20                                         | 8.8                           |
|       | 16.38  | 5                                          | 2.1                           |

#### 5 结论

(1) 3 种路面结构沥青层层底应变均随行车速

度增加而减小, 但纵向拉应变相对压应变下降更快; 纵向循环应变幅值随车速增加而减小的敏感程度受路面结构特征影响显著, 传统半刚性基层结构 S1 较倒装结构 S2 和 S3 更敏感。

(2) 路基顶面土压力总体均较小, 相同轴重和速度下结构 S1 的路基顶面压应力远小于 S2 和 S3, 表明 3 种路面结构均具有较强的结构承载能力, 且结构 S1 对荷载的扩散能力优于 S2 和 S3。路基顶面土压力随车速的变化似乎与轴重有关, 即在较小轴重作用下, 路基顶面土压力随车速变化不明显或总体不变, 重荷载作用下, 路基顶面土压力随速度提高略有增大。

(3) 受沥青混合料黏弹塑性和级配碎石材料非线性影响, 紧邻沥青层下的级配碎石过渡层的底部竖向压应力和过渡层竖向位移均随行车速度的增加而减小。

(4) 相同车速下, 3 种路面结构沥青层层底纵向应变循环幅值和路基顶土压力均随轴重增加而增大, 且半刚性基层沥青路面的增幅相对更大, 表明半刚性基层沥青路面对荷载更为敏感, 倒装式沥青路面结构对荷载的适应性更强; 在疲劳寿命方面, 倒装式沥青路面结构对荷载敏感性远小于半刚性基层沥青路面。

(5) 制动刹车导致沥青层层底残余应变急剧增大, 验证了频繁制动刹车会引起路面车辙、推移和拥包等变形病害发生的现象; 车辆制动还会导致沥青层层底纵、横向应变大幅增加、应变循环幅值大幅增加, 表明频繁制动刹车将加速路面沥青层疲劳破坏。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
SHEN Jin-an. Summary of Overseas Asphalt Pavement Design Methods [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 李福普, 陈景, 严二虎. 新型沥青路面结构在我国的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 10-14.  
LI Fu-pu, CHEN Jing, YAN Er-hu. Study and Application of New Asphalt Pavement Structures in China [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 10-14.
- [3] 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): 30-37.

- WANG Xu-dong. Design of Pavement Structure and Material for Full-scale Test Track [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (6): 30-37.
- [4] 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.
- WANG Xu-dong, ZHANG Lei, ZHOU Xing-ye, et al. Review of Researches of RIOHTRACK in 2017 [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (4): 1-13.
- [5] 张静, 魏连雨, 马士宾, 等. 动载作用下半刚性基层沥青路面动力响应现场测试及数值模拟 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (10): 19-24.
- ZHANG Jing, WEI Lian-yu, MA Shi-bin, et al. Field Test and Numerical Simulation of Dynamic Response of Semi-rigid Base Asphalt Pavement under Moving Vehicle Load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (10): 19-24.
- [6] 曹猛. 高等级沥青路面动力响应仿真与试验研究分析 [D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2013.
- CAO Meng. Dynamic Response Simulation and Test Research on High-grade Asphalt Pavement [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013.
- [7] CHEN S S. The Response of Multilayered System to Dynamic Surface Loads [D]. Sacramento, US: University of California, 1987.
- [8] SEBAALY P E, TABATABAEE N. Field Evaluation of Strain Gauges in Asphalt Concrete Pavements [C] // Transportation Research Board 85th Annual Meeting. Washington, D. C.: TRB, 1992.
- [9] SOLAIMANIAN M, PREMKUMAR L, YIN H, et al. Superpave In-situ Stress/Strain Investigation - Phase II. Final Report Vol. I: Summary Report, Project No. HA2006-02 [R]. Philadelphia: Pennsylvania Department of Transportation, 2009.
- [10] WILLIS J R, TIMM D, WEST R. Phase III NCAT Test Track Findings, NCAT Report No. 09-08 [R]. Auburn: Auburn University, 2009.
- [11] 董忠红, 吕彭民. 移动荷载下倒装结构沥青路面动力响应 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28 (5): 111-115.
- DONG Zhong-hong, LÜ Peng-min. Dynamic Response of Inverse Structure Asphalt Pavement under Moving Load [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28 (5): 111-115.
- [12] 陈尚江, 张肖宁. 倒装式基层沥青路面结构力学行为分析 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17 (4): 644-648.
- CHEN Shang-jiang, ZHANG Xiao-ning. Mechanical Behavior Analysis of Asphalt Pavement Structure with an Inverted Base Layer [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (4): 644-648.
- [13] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范 [S]. JTG D50—2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [14] STOFFELS S M, SOLAIMANIAN M, MORIAN D, et al. Field Instrumentation and Testing Data From Pennsylvania's Superpave In-situ Stress/Strain Investigation [C] // Proceedings of the 2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference. Reston: ASCE, 2006: 107-118.
- [15] 李丽娟. 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能影响的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- LI Li-juan. Research on Influence of Pavement on Fatigue Performance of Orthotropic Steel Bridge Deck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [16] 白德容. 级配压实砂石垫层的试验研究 [C] // 中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会地基处理学术讨论会. 北京: 中国土木工程学会, 1995.
- BAI De-rong. Experimental Study on Graded Compacted Sand and Stone Cushion [C] // Symposium on Foundation Treatment of the Foundation Treatment Committee of the Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering of the Chinese Society of Civil Engineering. Beijing: Chinese Society of Civil Engineering, 1995.
- [17] 吴玉. 基于土基模量衰变的路面结构轮致损伤规律、机理及其防治对策 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- WU Yu. Development Laws and Mechanisms of Damage in Pavement Structures with Subgrade Modulus Decay and Corresponding Prevention and Control Measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [18] 董泽蛟, 曹丽萍, 谭忆秋, 等. 移动荷载作用下沥青路面三向应变动力响应模拟分析 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (4): 133-139.
- DONG Ze-jiao, CAO Li-ping, TAN Yi-qiu, et al. Analysis of the Dynamic Response of Three Directional Strains in Asphalt Pavement under Moving Vehicle Loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (4): 133-139.