

文章编号:1671-6833(2010)02-0047-05

移动荷载下半刚性基层沥青路面剪应变研究

闫卫红¹, 孟枫林², 董忠红³

(1. 河南省交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450052; 2. 河南德郑高速公路有限公司, 河南 开封 475200;
3. 长安大学 道路施工与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了研究半刚性基层沥青路面早期破坏现象, 采用移动荷载下黏弹性层状体系动力学模型, 分析典型路面结构的动力响应, 研究轴重、速度和胎压对面层底部剪应变和面层内部剪应变分布的影响。结果发现, 随着轴重和胎压的增加, 当速度减小时, 面层内部剪应变和面层底部剪应变均增加; 轴重较小时, 车辆对路面产生的破坏主要发生在上中面层, 而轴重较大时, 产生的破坏主要发生在中下面层; 胎压的变化对 2~8 cm 深度范围内的剪应变影响严重, 随着胎压的升高, 出现最大剪应变的深度位置减小。

关键词: 道路工程; 剪应变; 动力响应; 轴重; 速度; 胎压

中图分类号: U463.33

文献标识码: A

0 引言

半刚性基层沥青路面的基层刚度大, 整体性强, 车辆荷载下面层底部的弯拉应变和路基顶部的竖向压应变小。笔者通过典型半刚性基层沥青路面的试验公路, 在施工过程中埋入传感器, 检测重型车辆下路面结构的动力响应。结果发现, 移动车辆荷载下路面结构动力响应与静态荷载下的理论分析结果差异较大; 同时还发现, 常温状态下, 即使轴重达到 20 t, 面层底部拉应变依然小于国外研究的永久性路面设计控制要求^[1]。一方面说明在力学性能上半刚性基层沥青路面结构与柔性基层结构和全厚式结构的差异较大, 无法简单借用国外研究成果评价我国的路面结构; 另一方面证明了面层底部弯拉应变不适宜作为半刚性基层沥青路面主要设计控制指标。为解决目前我国高速公路普遍出现的严重的早期破坏现象, 需要深入研究移动荷载下路面结构的动力响应规律。

笔者通过所建立的黏弹性层状体系动力学模型, 研究半刚性基层沥青路面的面层底部剪应变和面层内部剪应变在移动荷载下的分布关系, 为路面结构设计提供理论支撑。

1 动力学模型简介^[2]

对于不考虑重力的影响的小变形连续体, 其

平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

几何方程^[3-5]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

三维 Kelvin 本构关系^[4-5]:

$$\begin{cases} s_{ij} = 2Ge_{ij} + 2\eta\dot{e}_{ij} \\ \sigma = 3Ke_p \end{cases} \quad (3)$$

通过平衡方程、几何方程和三维 Kelvin 本构关系建立的动力学模型, 可以推导出黏弹性层状体系各个动力响应参数的时间历程, 具体参数介绍及推导过程详见文献[2]。

2 计算参数

取面层厚度为 15 cm; 基层采用 34 cm 厚的水泥稳定碎石; 底基层采用 20 cm 厚的水泥石灰砂砾土。建立动力学模型, 研究交通荷载下路面结构的剪应变。表 1 为计算模型的路面结构及相应材料参数。

经研究证明, 加载频率和温度对沥青混凝土的剪切模量和黏度影响较为严重。笔者除剪切模量和黏度随加载频率的关系采用 Gordon^[6]等人的试验研究成果外, 其余材料参数均为定值。

笔者采用矩形均布压力分布模式来模拟轮胎

收稿日期: 2009-09-30; 修订日期: 2010-01-14

作者简介: 闫卫红(1977-), 男, 河南温县人, 河南省交通规划勘察设计院工程师, 主要从事路面工程研究, E-mail:

weihong0371@126.com.

对地面的作用,认为轮胎接地压力等于胎压。

表 1 路面结构及材料参数

Tab.1 Pavemen structure and pavameter					
结构层	厚度 /cm	剪切模量 /MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	黏度/ (MPa·s)
面层	15	Gordon ^[6]	2 400	0.35	Gordon ^[6]
基层	34	540	2 340	0.20	—
底基层	20	480	2 340	0.30	—
土基	200	36	1 730	0.40	1

如图 1 所示,采用公路交通运输中重型车辆常用轮胎为 10.00R20-16PR,单个轮胎的接地宽度 B 为 210 mm,两个轮胎总接地宽度 L_x 为 540 mm。

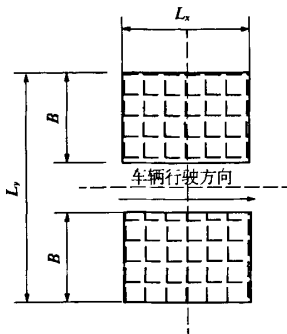


图 1 车辆行驶轮迹
Fig.1 Vehicles wheel tracks

笔者建立的动力学模型中,认为轮胎接地宽度 B 不变,轮胎接地长度 L_x 由计算得到:

$$L_x = \frac{Wg}{2.16P} \tag{7}$$

式中: W 为轴重,kg; g 为重力加速度, $g=9.8\text{ N/kg}$; P 为胎压,Pa。

3 动力学仿真及结果分析

3.1 轴重对路面结构剪应变的影响

为考查车辆轴重对半刚性基层沥青路面剪应

变的影响,我们对 9 个轴重等级下的动力学进行了分析。轴重分别为 29.5,60,80,100,130,150,170,200 和 250 kN。其中轴重 29.5 kN 代表空车工况;轴重 60 和 80 kN 代表常见的欠载工况;轴重 100 kN 为路面结构设计时的标准轴载;轴重 130,150 和 170 kN 为常见的超载工况;轴重 200 和 250 kN 为严重超载工况。车辆速度为 60 km/h,胎压为 0.7 MPa。

图 2 分别给出了面层底部纵向和横向剪应变随轴重的变化,不同轴重下两个方向的面层内部剪应变分布。为了使曲线清晰,易于对比分析,只给出了 29.5,60,100,130,170 和 200 kN 等 6 个轴重等级下的面层内部剪应变分布。从图 2 可以看出:

(1) 面层底部纵向剪应变和横向剪应变均随着轴重的增加而增大,但面层底部剪应变与轴重不是简单的线性关系。对于面层底部纵向剪应变,轴重较小时,剪应变随轴重增加速度显著。轴重从 60 kN 增加到 150 kN,剪应变从 108.8 $\mu\epsilon$ 增加到 183 $\mu\epsilon$,增加了 68.2%;轴重较大时,尤其是轴重超过 170 kN 后,随着轴重的增加,剪应变变化很小。对于面层底部横向剪应变,随着轴重的增加,剪应变显著增加。轴重从 60 kN 增加到 250 kN,剪应变从 72.3 $\mu\epsilon$ 增加到 189.7 $\mu\epsilon$,增加了 162.4%。面层底部的剪应变破坏了面层与基层之间的粘结,使两者之间材料发生流动变形,面层在失去基层的水平约束后,流动性增大,弯拉应变增加,疲劳破坏加速。当沥青路面与半刚性基层之间的粘结强度较弱时,沥青路面容易发生破坏。因此,要提高半刚性基层沥青路面的使用寿命,关键在于提高面层与基层之间的粘结强度。

(2) 在 29.5 kN 和 60 kN 2 个等级较小的轴重下,面层内部的最大纵向剪应变发生在 4 cm 深度的位置,超过该深度后,纵向剪应变迅速下降,

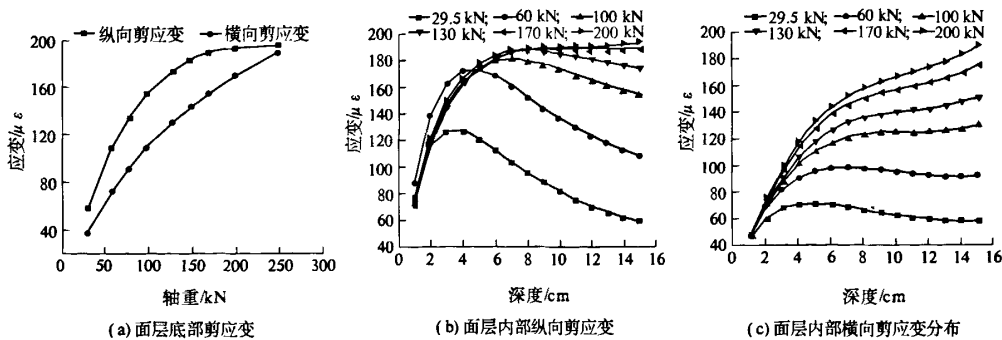


图 2 面层不同位置剪应变
Fig.2 Shear strain in different parts of the surfacelayer

轴重越小,下降速度越快;而对于轴重 ≥ 100 kN的4种超载工况下,面层内部最大纵向剪应变出现在深度为6~9 cm范围内.轴重越大,最大纵向剪应变出现的深度越大,而且,超过最大纵向剪应变位置后,面层内部纵向剪应变缓慢下降,甚至不下降.因此,欠载或额定轴重下,面层内部纵向流动变形引起的破坏主要发生在较浅的范围内.而车辆超载情况下,较深位置甚至面层底部也发生严重的纵向流动变形.

(3) 29.5 kN轴重下,面层内部横向应变最大值出现在深度为4 cm位置,而后逐渐减小;60 kN和100 kN两个轴重等级下,面层内部最大横向剪应变出现在6~9 cm深度范围内.最大横向剪应变出现的深度随着轴重的增加而增加,超过该位置,横向剪应变下降,但下降速度很小.而轴重 ≥ 100 kN后,随着深度的增加,面层内部横向剪应变一直增加.因此,轴重越大,面层深度的横向流动变形增大.

(4) 相同轴重下,面层内部纵向剪应变大于横向剪应变.但对于渠化交通车辆荷载下,沥青混凝土在纵向剪应变作用下产生的流动变形可以自行恢复.而横向剪应变作用下产生的流动变形缺乏自动恢复功能,变形不断累积.因此,横向剪应变对路面结构的破坏作用较纵向剪应变的破坏作用更为严重,路面结构设计时应将面层内部最大横向剪应变作为一个主要控制指标.

3.2 速度对路面结构剪应变的影响

为考查车辆速度对半刚性基层沥青路面剪应变的影响,我们在9种速度等级下进行了动力学分析.车辆速度分别为10,20,30,40,50,60,70,80和90 km/h等.轴重为100 kN,胎压为0.7 MPa.

图3给出了面层底部纵向和横向剪应变随速度的变化.图4和图5给出了不同速度下两个方向的面层内部剪应变分布.为使曲线清晰,易于对比分析,只给出了20,40,60和80 km/h等4个速度等级下的面层内部剪应变分布.

由图3~图5可知:

(1) 速度对路面结构动力响应有较大的影响,面层底部剪应变和面层内部剪应变与速度成反向关系.速度从10~90 km/h,面层底部纵向剪应变从242.9 $\mu\epsilon$ 减小到141.4 $\mu\epsilon$,减小了41.8%;面层底部横向剪应变从162.9 $\mu\epsilon$ 减小到101.7 $\mu\epsilon$,减小了37.6%.速度为10~40 km/h时,动力响应随速度变化明显;速度为40~90 km/h时,变化较小.

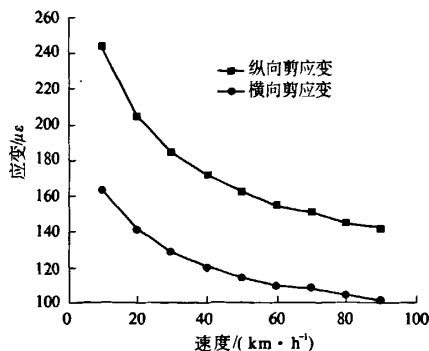


图3 面层底部剪应变和速度的关系

Fig.3 The relationship between shear strain at the bottom of Surface layer and velocity

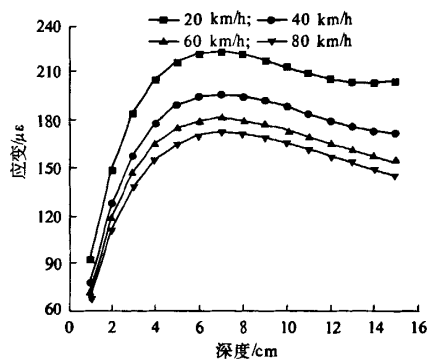


图4 不同的车速下面层内部纵向剪应变

Fig.4 Surface shear strains with the vertical at different speed

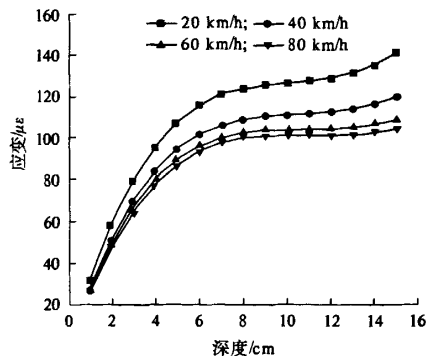


图5 不同速度下面层内部横向剪应变

Fig.5 Surface shear stain within the transverse at different speed

(2) 4种速度等级下,面层内部最大纵向剪应变均发生在深度为6 cm位置,而后随着深度的增加面层内部纵向剪应变减小.对于横向剪应变,随着深度的增加,剪应变增加,最大横向剪应变出现在面层底部,尤其是在20 km/h的低速状态,

15 cm深度位置的横向剪应变较6 cm深度位置的增加22.5%。如果面层与基层粘结良好,面层在基层的水平约束下,虽然12~15 cm深度位置的剪应变较大,但流动变形仍较小,主要流动变形依然发生在中面层和上面层的上部。如果面层与基层的粘结遭到破坏,下面层的流动性大幅增加,更容易发生车辙。

(3) 10~20 km/h速度下路面结构的动力响应基本能够反映静止状态路面结构的力学行为。实际交通运输中,常见重型车辆速度为50~70 km/h,超载越严重,速度越低,严重超载车辆速度常常在40 km/h左右。从图4可知,车辆速度从20 km/h增加到60 km/h,面层内部最大纵向剪应变减小了19%,最大横向剪应变减小了22.5%。速度越低,面层底部剪应变和面层内部剪应变越大,车辆对路面的破坏越严重。

3.3 胎压对路面结构剪应变的影响

为考查胎压对半刚性基层沥青路面剪应变的影响,我们对7种胎压等级下的动力学性质进行了分析。7种胎压等级分别为0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1和1.2 MPa等。其中,0.6 MPa胎压代表常用欠压工况;0.7 MPa胎压路面结构设计时的额定胎压;0.8, 0.9和1.0 MPa胎压代表普通重载车辆胎压工况;1.1 MPa胎压为超载车辆常用胎压;1.2 MPa胎压代表极限胎压。轴重为100 kN,车辆速度为60 km/h。

图6给出了面层底部纵向和横向剪应变随胎压的变化,图7和图8给出了不同胎压下2个方向的面层内部剪应变分布。由图6~图8可知:

(1) 胎压对面层底部剪应变和面层内部剪应变分布具有一定的影响,随着胎压的增加,剪应变增大。

(2) 相对而言,胎压对2~8 cm深度范围内的剪应变影响较大,对面层底部的剪应变影响相对较小。胎压从0.6 MPa增加到1.2 MPa,面层底部纵向剪应变增加了26.6%,而面层内部最大纵向剪应变增加了83.5%;面层底部横向剪应变增加了14.9%,而面层内部最大纵向剪应变增加了22%。另外,随着胎压增加,出现最大剪应变的深度位置减小,0.7 MPa胎压下,面层内部的最大纵向剪应变出现在深度7 cm的位置,最大横向剪应变出现在面层底部(深度15 cm的位置);而1.2 MPa胎压下,面层内部的最大纵向剪应变出现在深度5 cm的位置,最大横向剪应变出现在深度7 cm位置。因此,提高胎压增加了轮胎对路面

的破坏作用,对2~8 cm深度范围内的破坏作用影响更严重。

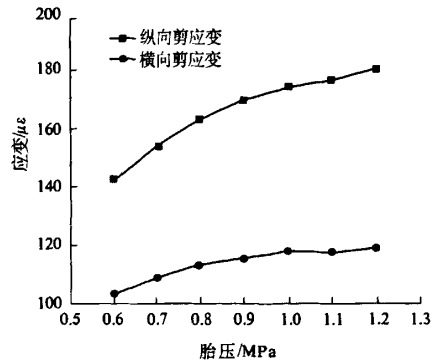


图6 面层底部剪应变随胎压变化

Fig. 6 The Shear strain at the bottom of surface layer with the tire pressure change

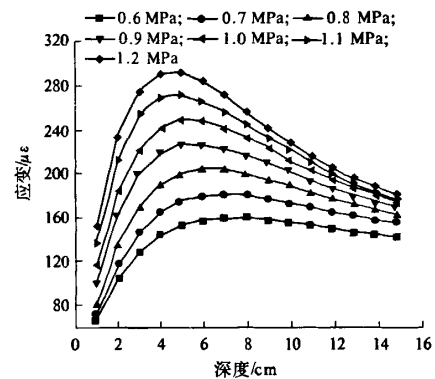


图7 面层内部纵向剪应变分布随胎压变化

Fig. 7 The vertical shear strain distribution within the surface layer changes with the tire pressure

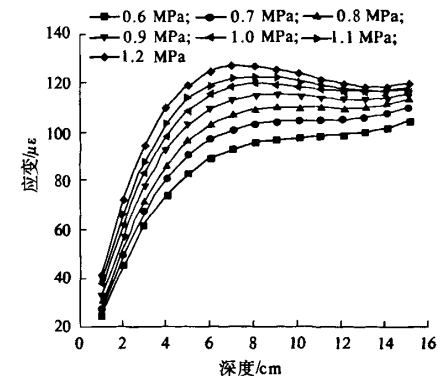


图8 面层内部横向剪应变分布随胎压变化

Fig. 8 The transverse shear strain distribution within the surface layer changes the tire pressure

4 结论

(1)轴重、速度和胎压对面层内部剪应变和面层底部剪应变的分布影响比较严重.随着轴重和胎压增加,速度减小,面层底部剪应变和面层内部剪应变均增加.

(2)轴重较小时,剪应变主要发生在路表附近,产生的破坏也主要发生在路表附近,可以通过铣刨上面层和中面层的上部来进行维修.而轴重较大时,产生的破坏主要发生在较深位置,加上半刚性基层材料反射裂纹作用,容易产生严重的结构性破坏.

(3)低速状态下,面层底部剪应变与面层内部剪应变分布受速度影响严重.但速度超过40 km/h,速度对路面结构动力响应影响较小.实际交通运输中,路面结构动力响应较等量静态荷载下的力学响应小,车辆速度从20 km/h增加到60 km/h,面层内部最大纵向剪应变减小19%,最大横向剪应变减小22.5%.

(4)胎压升高不仅使面层内部剪应变和面层底部剪应变增大,而且对面层内部剪应变影响较

大.随着胎压的升高,出现最大剪应变的深度位置减小.相对而言,胎压对2~8 cm深度范围内的剪应变影响严重,对面层底部的剪应变影响相对较小.

参考文献:

- [1] 董忠红,吕彭民.轴载与速度对半刚性沥青路面动力响应影响[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):47-49.
- [2] 董忠红,吕彭民.交通荷载下沥青路面结构动力响应理论研究[J].郑州大学学报:工学版,2007,28(4):88-91.
- [3] 陆明万,罗学富.弹性理论基础[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [4] 郭大智,任瑞波.层状黏弹性体系力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [5] 杨挺青.粘弹性力学[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [6] AIREY G D, RAHIMZADEH B, COLLOP A C. Linear viscoelastic limits of bituminous binders[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002,71(1):247-268.

Study on the Shearing Strain of the Semi - Rigid Base Asphalt Pavement under Moving Load

YAN Wei - hong¹, MENG Feng - lin², DONG Zhong - hong³

(1. Henan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. Henan Provincial De - Zheng Expressway Co. Ltd., Kaifeng 475200, China; 3. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To study the premature disruption of the semi - rigid base asphalt pavement, a multi - layer viscoelastic dynamic model where the vehicle load is handled as moving load was used to analysis the dynamic response of the typical semi - rigid base asphalt pavement, and the influences of the axle load, the vehicle speed and the tire pressure on the shearing strain at the bottom of the AC layer and the shearing strain distribution in the AC layer were studied. It showed that the shearing strains increase with the increase of the axle load and the tire pressure, and increase with the decrease of the vehicle speed. Especially, when the axle load is rather small, the destory of the vehicle exerting on the pavement is mainly took place at the wearing surface layer and the middle surface layer, while when the axle load is rather big, the destory is mainly set at the middle surface layer and the low surface layer. The tire pressure has a notable influence on the shearing strain at the depth range from 2cm to 8cm. With the increase of the tire pressure, the depth where the maximum shearing strain occures becomes shallower.

Key words: road engineering; shearing strain; dynamic response; axle load; speed; tire pressure