

文章编号:1671-8879(2008)05-0111-05

移动荷载下倒装结构沥青路面动力响应

董忠红,吕彭民

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:为了研究交通荷载下倒装结构沥青路面的动力响应规律,建立了移动荷载下粘弹性层状体系动力学模型,采用多参数评价方法,研究了轴重和车辆速度对倒装结构沥青路面动力响应的影响。研究表明:路面结构动力响应随着轴重的增加而增加,随着速度的增加而减小,但轴重和速度对不同的动力响应参数的影响不同;随着轴重的增加,面层内部出现最大剪应变的位置深度增加,路面的破坏深度增加;BZZ-100 标准荷载下,面层内部 7~8 cm 深度位置剪应变最大,该深度位置应采用稳定性较好的改性沥青。

关键词:机械工程;动力响应;沥青路面;倒装结构;移动荷载;轴重;速度

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Dynamic response of inverse structure asphalt pavement under moving load

DONG Zhong-hong, LU Peng-min

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To study the dynamic response regulations of the inverse structure asphalt pavement under traffic load, a dynamic model of the visco-elastic finite-layer system under moving load was proposed, and the reliability of the model was certified with the field test results. Based on multi-objective evaluation parameters, the influences of the axle load and the vehicle speed on the asphalt pavement response were studied. Results show that the dynamic response increase with the axle load's increasing and the vehicle speed's decreasing, but there is difference between the influences of the axle load and the vehicle speed on different evaluation parameters. With the increase of the axle load, the depth where emerges the maximum shearing strain increases. Under the standard load of BZZ-100, the depth where emerges the maximum shearing strain is about 7 cm. To increase the service life, modified asphalt should be used at the position where emerges the maximum shearing strain. 1 tab, 8 figs, 10 refs.

Key words: mechanical engineering; dynamic response; asphalt pavement; inverse structure; moving load; axle load; vehicle speed

收稿日期:2007-10-15

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200531881212)

作者简介:董忠红(1975-),男,河南开封人,讲师,工学博士,E-mail:NFY@chd.edu.cn.

0 引言

半刚性基层沥青路面结构承载能力和抗变形能力强、公路建设前期投资少,为中国高速公路和一级公路的发展起到了重要作用。近年来,中国高速公路沥青路面结构普遍出现严重的早期破坏现象,有关专家深入分析路面结构损坏机理,从不同角度提出新的路面结构,并铺筑试验路,进行试验验证^[1-2]。倒装结构沥青路面是国际上广泛采用的高速公路路面结构,已引起中国研究人员的普遍重视,在东南沿海等经济发达地区已得到应用。为了研究该路面结构在交通荷载下的动力响应,本文采用小变形结构的几何方程、平衡方程和三维 Kelvin 本构关系,建立了移动荷载下粘弹性层状体系动力学模型。采用该方法,建立倒装结构沥青路面动力学模型,分析移动荷载下路面结构的动力响应,研究轴重和车速对路面结构动力响应的影响。

1 动力学模型

对于小变形连续体,不考虑重力的影响,其平衡方程为^[3-4]

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

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为应力张量 σ_{ij} 对独立坐标 x_j 的偏导数; u_i 为位移分量; t 为时间; ρ 为材料密度。

几何方程为

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

式中: ε_{ij} 为应变分量; $u_{i,j}$ 为位移分量对独立坐标 x_j 的偏导数; $u_{j,i}$ 为位移分量对独立坐标 x_i 的偏导数。

三维 Kelvin 本构关系^[5-6] 为

$$\left. \begin{aligned} s_{ij} &= 2G e_{ij} + 2\eta \dot{e}_{ij} \\ \sigma &= 3K e_p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: s_{ij} 为应力偏量; e_{ij} 为应变偏量; σ 为平均正应力; e_p 为平均正应变; K 为体积模量; G 为剪切模量; η 为粘度。

移动车轮荷载在路面上的分布 $q(x, y, t)$ 可以用 Fourier 展开为一系列的简谐信号之和。在简谐信号分量 $A_{mn} e^{i\omega_n x} e^{i\beta_m y} e^{-i\omega_n t}$ 的作用下,路面结构任一点 (x, y, z) 的 3 个方向的位移响应可以表示为

$$u_{mn}(x, y, z, t) = U_{mn}(z) e^{i\omega_n x} e^{i\beta_m y} e^{-i\omega_n t} \quad (4)$$

$$v_{mn}(x, y, z, t) = V_{mn}(z) e^{i\omega_n x} e^{i\beta_m y} e^{-i\omega_n t} \quad (5)$$

$$w_{mn}(x, y, z, t) = W_{mn}(z) e^{i\omega_n x} e^{i\beta_m y} e^{-i\omega_n t} \quad (6)$$

式中: $u_{mn}(x, y, z, t)$ 、 $v_{mn}(x, y, z, t)$ 、 $w_{mn}(x, y, z, t)$

分别为点 (x, y, z) 在 t 时刻的 x 、 y 、 z 方向的位移响应; $U_{mn}(z)$ 、 $V_{mn}(z)$ 、 $W_{mn}(z)$ 分别为 x 、 y 、 z 方向位移响应的幅值; α_n 、 β_m 分别为 x 、 y 方向的载荷频率; v 为车辆速度。

将式(4)~式(6)代入式(1)、式(2),结合式(3),经推导,可求出关于 $U_{mn}(z)$ 、 $V_{mn}(z)$ 和 $W_{mn}(z)$ 的一元六阶微分方程,3 个微分方程的系数相同,具有相同的特征方程,特征方程可表示为

$$r^6 + ar^4 + br^2 + c = 0 \quad (7)$$

式中: a 、 b 、 c 均为路面结构和材料参数决定的系数。

利用卡尔丹公式,求出特征方程的根 r ,进而求出 $U_{mn}(z)$ 、 $V_{mn}(z)$ 和 $W_{mn}(z)$ 的表达式。结合式(1)~式(3),可以求出各个表达式系数之间的关系。对于 N 层粘弹性体系,有 $6N$ 个未知系数。由层状体系边界条件可知, N 层粘弹性体系具有 $6N$ 个约束方程,从而可以解得 $U_{mn}(z)$ 、 $V_{mn}(z)$ 和 $W_{mn}(z)$ 表达式中的系数,进而得到粘弹性层状体系各个动力响应参数的时间历程。

2 计算模型

2.1 路面结构及材料参数

表 1 为本文建立的倒装结构沥青路面的结构参数及相应材料参数。

表 1 路面结构及材料参数

结构层	厚度/ cm	剪切模量/ MPa	密度/ (kg · m ⁻³)	泊松比	粘度/ (MPa · s)
面层	26	G	2 100	0.35	G
柔性基层	20	120	2 000	0.35	1
半刚性基层	20	540	2 340	0.20	1
土基	200	13	1 730	0.40	1

注:G 为面层材料动剪切模量和粘度采用 Gordon 等人研究成果,这两个参数不为定值。

本文采用的力学模型为动力学模型,主要动力学参数为剪切模量、粘度、泊松比和密度。经大量研究证明,沥青混凝土的剪切模量和粘度受加载频率和温度影响严重,这里采用 Gordon^[7] 等人试验研究得到的 20℃ 下沥青混合料剪切模量和粘度随加载频率的关系,其他材料参数视为定值。

2.2 荷载

为了考查车辆轴重对倒装结构沥青路面动力响应的影响,进行了 9 个轴重等级下的动力学分析。轴重分别为 29.5、60、80、100、130、150、170、200、250 kN。其中,29.5 kN 轴重代表空车工况;60 kN 和 80 kN 轴重代表常见的欠载工况;100 kN 轴重为路面结构设计时的标准轴载;130、150、170 kN 轴重

为常见的超载工况;200、250 kN 轴重为严重超载工况。施加荷载的速度为 60 km/h,胎压为 0.7 MPa,采用均布矩形荷载模式,轮迹为中国常用的 11.00-20 双排轮胎,轮胎接地宽度 210 mm 及轮胎间距 120 mm 参数由现场实测得到,接地长度通过简单计算得到。为了考查车辆速度对倒装结构沥青路面动力响应的影响,进行了 8 个速度等级下的动力学分析。车辆速度分别为 20、30、40、50、60、70、80、90 km/h。施加荷载的轴重为 100 kN,胎压为 0.7 MPa。荷载模式及轮迹同上。

2.3 动力响应评价指标

(1)面层底部弯拉应变 ϵ_x 。面层底部弯拉应变是基于力学-经验法进行沥青路面结构设计时评价疲劳寿命的常用指标。目前进行路面结构动力响应试验研究时,主要通过检测这个指标进行评价。

(2)土基顶部竖向压应变 ϵ_z 。 ϵ_z 为基于力学-经验法进行沥青路面结构设计时评价车辙的指标。

(3)路表弯沉 W_z 。 W_z 为中国沥青路面设计及验收的主要指标,用来评价路面结构的整体刚度。

(4)面层底部纵向剪应变 γ_{xz} 。面层底部纵向剪应变可以破坏面层与基层的连接。尤其对于半刚性基层沥青路面结构,面层与基层的粘结性能比较差,遭到破坏以后,面层脱离了基层的水平约束,成为滑动状态,不但增加面层底部的弯拉应变,减小疲劳寿命,而且增大沥青混凝土的流动性,在纵向剪应变作用下,容易产生拥包、裂纹等多种破坏形式。

(5)面层底部横向剪应变 γ_{yx} 。该剪应变能够破坏面层与基层的横向连接。面层失去基层的水平约束后,不但提高横向弯拉应变,还增大横向流动性,在车辆荷载反复作用下易形成车辙。

(6)面层内部最大纵向剪应变 $\gamma_{xz\max}$ 。在纵向剪应变作用下,沥青混凝土产生纵向流动变形,用来评价沥青混凝土纵向流动变形引起的各种破坏。

(7)面层内部最大横向剪应变 $\gamma_{yx\max}$ 。用来评价沥青混凝土发生横向流动变形引起的各种破坏,尤其是用来评价面层车辙。

3 计算结果及分析

3.1 轴重对沥青路面动力响应的影响

图 1、图 2 给出 5 个动力响应指标(面层底部弯拉应变、土基顶部竖向压应变、面层底部纵向剪应变、面层底部横向剪应变、路表弯沉)随轴重的变化曲线。

(1)5 个动力响应指标均随着轴重的增加而增

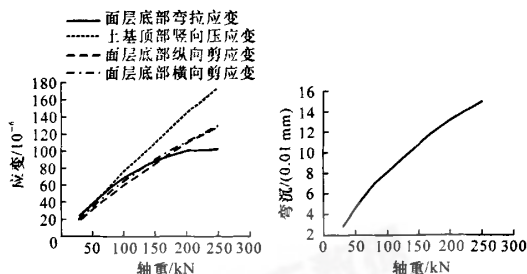


图 1 应变随轴重的变化

图 2 路表弯沉随轴重的变化

加,这符合力学规律。但轴重对各个参数的影响不同,土基顶部竖向压应变、面层底部纵向和横向剪应变与轴重基本呈线性关系,而面层底部弯拉应变和路表弯沉与轴重明显表现为非线性关系,随着轴重的增加,2 个动力响应参数增加速度减小。众所周知,路面结构疲劳寿命与面层底部弯拉应变呈对数线性关系,当面层底部弯拉应变达到一定水平以后,稍微增加面层底部弯拉应变就会使得路面结构疲劳寿命大幅下降。因此,250 kN 轴重较 200 kN 轴重下的路面结构的使用寿命要小得多。由此说明,超载对路面使用寿命影响严重。

(2)对于永久性路面结构,额定荷载下,Monismith 建议,HMA 层底部的弯拉应变不应高于 60×10^{-6} ,土基顶部竖向压应变不高于 200×10^{-6} ;Von Quintus 认为,HMA 层底的弯拉应变不应高于 65×10^{-6} [8]。计算结果表明,BZZ-100 标准荷载下,面层底部弯拉应变为 68.1×10^{-6} ,基本达到永久性路面设计许用值;而土基顶部竖向压应变仅为 75.9×10^{-6} ,远远小于永久性路面设计许用值。主要原因是,该倒装结构沥青路面在土基顶部有 20 cm 的半刚性基层结构,基层刚度较大,减弱了土基顶部的竖向压应变。因此,进行倒装结构路面设计时,土基顶部竖向压应变不适宜作为主要控制指标。从面层底部弯拉应变分析,所建立的面层厚度为 26 cm 的倒装结构沥青路面动力响应已基本达到永久性路面力学性能要求,可为路面结构设计提供参考。

(3)本文采用类似方法讨论了面层厚度为 15 cm 的典型半刚性基层沥青路面动力响应特点[9]。BZZ-100 标准荷载下,面层底部纵向剪应变为 151×10^{-6} ,面层底部横向剪应变为 108.2×10^{-6} 。而该倒装结构面层底部纵向剪应变为 65.1×10^{-6} ,面层底部横向剪应变为 59.5×10^{-6} ,分别相当于半刚性基层的 43% 和 55%,倒装结构的面层底部剪应变远小于半刚性基层结构的面层底部剪应变。面层底部

剪应变将会破坏面层与基层的粘结,当失去基层的水平约束后,不但面层结构材料流动性增大,在循环车辆荷载下形成车辙,而且增加了面层底部的弯拉应变,加速了结构疲劳破坏。这正是倒装结构使用寿命高于半刚性基层结构的力学原因。

图 3、图 4 给出各个轴重下面层内部纵向剪应变和横向剪应变分布曲线。

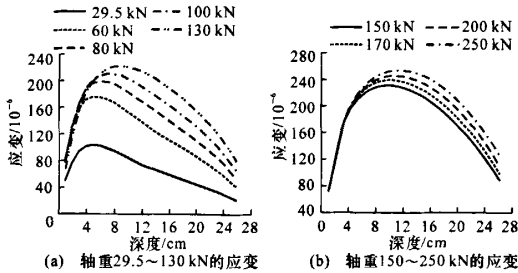


图 3 面层内部纵向剪应变

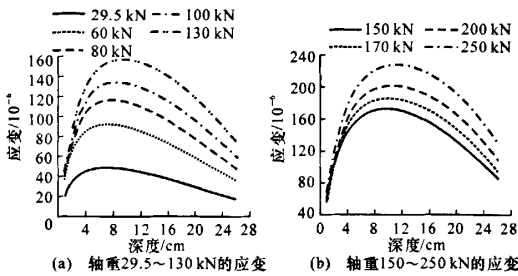


图 4 面层内部横向剪应变

(1)不管是纵向剪应变还是横向剪应变,在相同深度位置,将随着轴重的增加而增加。在相同轴重相同深度位置,纵向剪应变大于横向剪应变。纵向剪应变使沥青混合料发生纵向流动变形,严重时发生裂纹、拥包等破坏;横向剪应变使沥青混合料发生横向流动变形,产生车辙等破坏。沥青混合料产生的纵向流动变形在移动车辆荷载下强制恢复,而横向流动变形则不断累积,对于平整路面,横向剪应变的破坏作用较纵向剪应变大,因此路面设计时应主要关注横向剪应变。但对于长大纵坡路段,路面不但承受垂向荷载作用,而且承受水平荷载作用,纵向剪应变进一步增大,因此,长大纵坡路面设计时,不仅要关注横向剪应变和纵向剪应变。

(2)不管是纵向剪应变还是横向剪应变,随着轴重的增加,出现最大剪应变位置的深度增加。在轴重为 29.5 kN 时,最大纵向剪应变出现在 5 cm 深度位置,最大横向剪应变出现在 6 cm 深度位置;在轴重为 100 kN 时,最大纵向和横向剪应变分别出现在 7 cm 和 8 cm 深度位置;在轴重为 170 kN 时,最

大纵向和横向剪应变均出现在 10 cm 深度位置。另外,1~5 cm 深度位置,各轴重下的剪应变差异较小;深度超过 8 cm 以后,各轴重下的剪应变差异相对较大。因此,不管是什么样的路面结构,都应严格限制车辆轴重。轴重较小时,由剪应变引起的拥包、推移、车辙及表面裂纹等破坏主要发生在路表附近,可以通过铣刨面层材料,加铺新材料的方法改善路面性能。超载严重时,路面下面层甚至基层将受到破坏,需要采用开挖的方法进行维修。

(3)在路面结构设计时,考虑到路表温度较高,为了增加沥青混合料的稳定性,常常采用改性沥青。额定荷载下,从力学角度分析,7~8 cm 深度位置剪应变最大,为减小剪切破坏,也应采用改性沥青。

3.2 速度对沥青路面动力响应的影响

图 5~图 8 为倒装结构各个动力参数随速度的变化曲线。

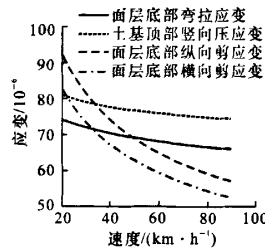


图 5 应变随速度的变化

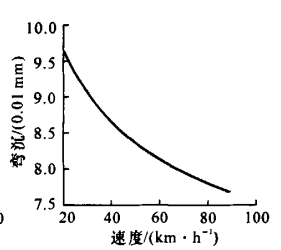


图 6 路表弯沉随速度的变化

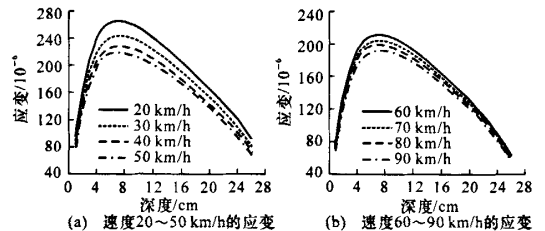


图 7 面层内部纵向剪应变

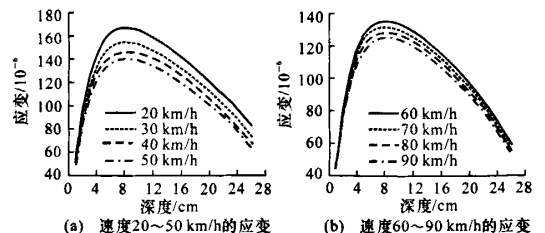


图 8 面层内部横向剪应变

(1)各动力响应均随着速度的增加而减小,这符合粘弹性动力学的力学规律。速度对不同动力响应参数的影响不同,当车辆速度从 20 km/h 增加到 90 km/h 时,面层底部弯拉应变减小 11.3%,土基顶部

竖向压应变减小 8.1%,路表弯沉减小 20%,面层底部纵向剪应变减小 38.1%,面层底部横向剪应变减小 36.3%。由此说明,面层底部弯拉应变和土基顶部竖向压应变受速度影响相对较小,面层底部剪应变和路表弯沉受速度影响较大。因此,车辆速度越低,对路面的破坏作用越严重,尤其是对失稳性车辙等由沥青混合料剪切流动变形引起的破坏影响显著。

(2)在各车速下,面层内部最大纵向剪应变均出现在 7 cm 深度位置,最大横向剪应变均出现在 8 cm 深度位置。这说明,速度对路面结构内部剪应变分布影响较小。

(3)对沥青路面动力响应试验的主要设备有落槌式弯沉仪(FWD)和加速加载设备(AFA)。采用落槌式弯沉仪时,对路面施加冲击荷载,与车辆荷载有较大差异,无法考虑速度对路面动力响应的影响^[10]。而采用加速加载设备时,受滑道长度和起升高度的影响,车轮速度一般小于 5 km/h,路面结构的动力响应与实际交通荷载下的动力响应也有较大差异。因此,开发合理的能够较好地模拟实际交通荷载的设备是进行路面结构动力响应研究的重要条件。

4 结 语

(1)采用三维 Kelvin 微分本构关系,结合小变形连续体的平衡方程和几何方程,建立移动荷载下粘弹性层状体系动力响应模型。模型包括轴重、速度和胎压等荷载参数,以及结构层厚度、材料模量、泊松比和粘度等路面结构物理参数和结构参数。

(2)倒装结构沥青路面动力响应随着轴重增加而增加,随着速度增加而减小,轴重和速度对不同的动力响应参数的影响不同。

(3)随着轴重的增加,面层内部出现最大纵向和横向剪应变位置的深度增加,重载车辆对路面结构纵深位置的破坏更严重。

(4)BZZ-100 标准荷载下,面层内部 7~8 cm 深度位置剪应变最大。为减小剪切破坏,进行路面结构设计时,该深度位置应采用改性沥青。

(5)速度越低,车辆对路面的破坏作用越严重,但车辆速度不影响路面内部剪应变的分布。

参考文献:

References:

[1] 郑木莲,王松根,陈拴发,等.耐久性沥青路面混凝土基层荷载应力的数值计算[J].中国公路学报,2008,21(2):28-33.

ZHENG Mu-lian, WANG Song-gen, CHEN Shuan-fa, et al. Load stress numerical calculation for concrete base of durable asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 28-33.

[2] 李淑明,许志鸿. 沥青路面结构的耐久性分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(4): 467-471.

LI Shu-ming, XU Zhi-hong. Durability analysis of asphalt pavement structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(4): 467-471.

[3] Siddharthan R V, Yao J, Sebaaly P E. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(6): 557-566.

[4] Magdy E D. Further developments of 3DMOVE and its engineering applications[D]. Reno: University of Nevada, 2003.

[5] Araki Y, Hjelmstad K D. Rate-dependent projection operators for frictional contact constraints [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2003, 57(7): 923-954.

[6] 彭妙娟,许志鸿. 沥青路面永久变形的非线性粘弹-弹塑性本构模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 41-47.

PENG Miao-juan, XU Zhi-hong. Nonlinear viscoelastic-elastoplastic constitutive model of permanent deformation for asphalt pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 41-47.

[7] Gordon D A, Behzad R, Andrew C C. Linear viscoelastic limits of bituminous binders [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71(1): 89-115.

[8] 沈金安. 高速公路沥青路面早期破坏分析与防治对策[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[9] 董忠红,吕彭民,徐全亮. 轴重与胎压对半刚性基层沥青路面动力响应影响理论研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 1-7.

DONG Zhong-hong, LU Peng-min, XU Quan-liang. Theoretical study on effect of axle weight and tyre pressure on dynamic response of the semi-rigid base asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7): 1-7.

[10] 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 of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 32-36.