

文章编号:1671-6833(2007)04-0088-04

交通荷载下沥青路面结构动力响应理论研究

董忠红, 吕彭民

(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:采用移动荷载下黏弹性层状体系动力学模型,分析加厚式半刚性基层结构、改进型半刚性基层结构、倒装式路面结构和全厚式路面结构等4种典型沥青路面结构在标准荷载工况和超载100%工况下的动力响应,研究各种路面结构之间差异.结果发现,面层底部水平剪应变对路面结构使用寿命影响最为严重.

关键词:移动荷载;黏弹性;动力响应;沥青路面;弯拉应变;剪应变

中图分类号: U 414.1 **文献标识码:** A

0 引言

交通荷载下沥青路面结构的性能是目前道路界研究的热点问题之一,是解决实际路面结构复杂破坏问题的基础,尤其是路面结构动力响应研究,是路面结构从静态设计向动态设计转化的理论基础.

孙立军^[1]等人采用数值分析方法,建立路面结构层状体系的静态有限元模型;邓学钧、孙璐^[2]等人采用 Green 函数建立移动荷载下路面结构动力学模型;Siddharthan^[3-6]等人利用弹性力学原理,建立了移动荷载下层状体系动力学模型;Cebon^[7]等人建立了 Winkler 地基上无限长梁在移动荷载下动力学模型.考虑到实际路面结构属于典型的层状体系结构,承受移动车辆荷载作用,车辆轴重、速度、轮迹及路面结构的弹性模量和黏度对其动力响应都有较严重影响,笔者采用线黏弹性理论,基于三维 Kelvin 本构关系,建立了移动荷载下黏弹性层状体系动力学模型,通过试验对比,验证了模型的可靠性.笔者采用该方法,建立4种典型路面结构的动力学模型,研究移动荷载下路面结构的动力响应,为路面结构设计提供参考依据.

1 动力学模型简介

对于小变形连续体,不考虑重力的影响,其平衡方程为^[8-10]

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

式中: $\sigma_{ij,i}$ 为应力张量 σ_{ij} 对独立坐标 x_j 的偏导数; u_i 为位移张量.

几何方程^[8-10]

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

三维 Kelvin 本构关系^[9-10]

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

式中: s_{ij} 为应力偏量; \dot{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 为黏度.

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.简谐信号分量 $A_{nm}e^{i\alpha_n x}e^{i\beta_n y}e^{-i\alpha_n vt}$ 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^[7-10]

$$u_{nm}(x, y, z, t) = U_{nm}(z)e^{i\alpha_n x}e^{i\beta_n y}e^{-i\alpha_n vt} \quad (4)$$

$$v_{nm}(x, y, z, t) = V_{nm}(z)e^{i\alpha_n x}e^{i\beta_n y}e^{-i\alpha_n vt} \quad (5)$$

$$w_{nm}(x, y, z, t) = W_{nm}(z)e^{i\alpha_n x}e^{i\beta_n y}e^{-i\alpha_n vt} \quad (6)$$

将式(4)~(6)代入式(1)和(2),结合方程(3),经复杂推导,求出关于 $U_{nm}(z)$ 、 $V_{nm}(z)$ 和 $W_{nm}(z)$ 的一元六阶微分方程,三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 为由路面结构参数和材料参数决定

收稿日期:2007-09-07;修订日期:2007-11-05

基金项目:国家西部交通建设项目(2005 318 812 12)

作者简介:董忠红(1975-),男,河南开封人,长安大学讲师,博士研究生,主要从事车辆-道路系统动力学研究.

的系数.

利用卡尔丹公式,求出特征方程的根,进而求出 $U_{nm}(z)$ 、 $V_{nm}(z)$ 和 $W_{nm}(z)$ 的表达式. 结合式 (1) ~ (3), 可以求出各个表达式系数之间的关系,对于 N 层黏弹性体系,有 $6N$ 个未知系数. 由层状体系边界条件知道, N 层黏弹性体系具有 $6N$ 个约束方程^[11]. 从而可以解得 $U_{nm}(z)$ 、 $V_{nm}(z)$ 和 $W_{nm}(z)$ 表达式中的系数,进而得到黏弹性层状体系各个动力响应参数的时间历程.

为检验所建立模型的可靠性,笔者在西安—宝鸡高速公路、武威过境高速公路修建时埋设应变传感器,采用重载车辆作为加载设备,野外现场测试重载交通荷载下沥青路面结构的动力响应. 图1为面层底部纵向动应变响应曲线. 试验时路表温度稳定在 24 ℃,采用东风 EQ1146V4/W4 车辆,后桥轴重 10.2 t,前桥轴重 5.8 t,行车速度为 70 km/h(限于篇幅,具体试验过程这里不再赘述,可参阅笔者发表的相关文章). 图2为相应工况计算结果,理论模型即后续典型路面结构 I.

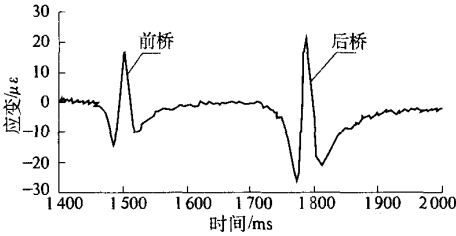


图1 试验结果

Fig.1 Result of experiment

由图1和图2可以看到,车轮到达观测点前,面层底部纵向应变表现为压应变(曲线中表现为负值),车轮到达观测点,面层底部纵向应变表现

为拉应变(曲线中表现为正值),两者规律相同. 另外,试验得到的最大拉应变为 20.9 $\mu\epsilon$,而理论计算得到的最大拉应变为 21.2 $\mu\epsilon$,计算结果与试验结果比较吻合,因此,所建立的模型可以用来分析移动荷载下黏弹性沥青路面结构的动态响应.

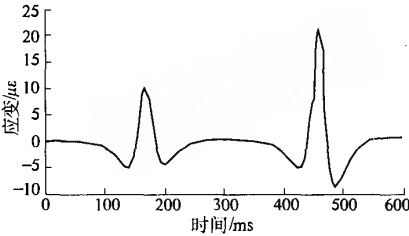


图2 计算结果

Fig.2 Result of calculation

2 路面结构

国内外学者深入研究沥青路面早期破坏现象,提出多种路面结构,笔者选择4种典型路面结构,如表1所示,对比研究各个结构组合的动力响应.

结构 I 为加厚式半刚性基层结构,由于水泥材料具有干缩特性,水泥稳定基层容易开裂,形成裂纹源,在交通荷载和动水压力下,裂纹向上扩展,形成反射裂纹,导致路面破坏,为延长裂纹扩展时间,增加面层厚度是一个常用方法;

结构 II 为改进型半刚性基层结构,减少基层顶部水泥混凝土的水泥使用量,从而减少水泥干缩产生的裂纹量;

结构 III 为倒装式路面结构,在半刚性基层和面层之间增加沥青稳定碎石基层,不但可以消减

表1 典型路面结构

Tab.1 Typical pavement structure

结构	面层		半刚性基层		柔性基层		土基	
	厚度 /cm	剪切模量 /MPa	厚度 /cm	剪切模量 /MPa	厚度 /cm	剪切模量 /MPa	厚度/cm	剪切模量 /MPa
I	20	Gordon ^①	40	540	25	120	200	13
II	12	Gordon ^①	17/34 ^②	400/540 ^②	—	—	200	13
III ^③	26	Gordon ^①	20	540	20	120 ^④	200	13
IV	30	Gordon ^①	—	—	—	—	200	35

注:①表示面层材料动剪切模量采用 Gordon 等人研究成果,剪切模量不为定值;②表示结构 II 的半刚性基层由两部分组成,“-”前为半刚性基层上部分的参数,“-”后为半刚性基层下部分的参数;③该结构柔性基层在上,半刚性基层在下;④该处的柔性基层指半刚性基层和面层基层之间布置的级配碎石层,模量较低.

反射裂纹,还可以疏散进入基层的水,减小动水压力;

结构Ⅳ为全厚式路面结构,沥青混合料直接建筑在土基上,面层比较厚,下面层起到主要承重作用,路基强度对结构承载能力也比较严重,比前3种路面结构的土基强度高.

笔者采用动力学模型,主要动力参数为剪切模量、黏度、泊松比和密度.经大量研究证明,沥青混凝土的剪切模量、黏度和泊松比受加载频率和温度影响严重,这里采用 Gordon^[12]等人试验研究得到的 20℃下剪切模量、黏度和泊松比随加载频率的关系.不考虑其它材料黏度影响.面层材料密度取 2 400 kg/m³;半刚性基层材料密度取 2 340 kg/m³,泊松比取 0.2;柔性基层材料密度取 2 000 kg/m³,泊松比取 0.35;土基材料密度取 1 730 kg/m³,泊松比取 0.4.

3 动力学模型及计算结果

3.1 轮载

作者所建立动力学模型施加矩形均布荷载.选取标准荷载和超载 100% 两种工况进行研究.根据《公路沥青路面设计规范》^[13]要求,标准荷载工况下轴载为 10 t,接触压力为 0.7 MPa.超载工况下轴重取 20 t,接触压力取 0.81 MPa.选用重载车辆普遍使用的双排 10.00-20 轮胎,轮胎接地宽度由野外现场实测得到,接地长度通过计算得到.

3.2 动力响应分析参数

面层底部弯拉应变 ϵ_x 和土基顶面竖向压应变 ϵ_z 是目前基于力学一经验法沥青路面设计时采用的主要设计指标.用面层底部弯拉应变 ϵ_x 控制沥青路面疲劳寿命,防止面层疲劳开裂;用土基顶面竖向压应变 ϵ_z 控制路面整体刚度,防止出现结构性车辙.我国常采用路表弯沉 w_s 作为验收指标.

大量研究发现,移动车辆荷载下,面层底部承受水平剪应变作用,该剪应变破坏沥青混凝土与基层的黏结性,严重时使面层产生拥包,也能够促使面层产生裂纹和裂纹扩展.

作者选择面层底部弯拉应变 ϵ_x 、土基顶面竖向压应变 ϵ_z 、面层底部水平剪应变 γ 和路表弯沉 w_s 4 个动力响应参数作为评价指标,比较 4 种典型路面结构.表 2 为标准荷载工况下的计算结果,表 3 为超载工况下的计算结果,表 4 为超载工况相对于标准荷载工况各个动力响应指标增加百

分比.

表 2 标准荷载工况下典型路面结构动力响应

Tab.2 Dynamic response of typical pavement under standard loading condition

结构	最大拉应变 $\epsilon_x/\mu\epsilon$	最大压应变 $\epsilon_z/\mu\epsilon$	$\epsilon_x/\mu\epsilon$	$\gamma/\mu\epsilon$	w_s/mm
I	21.0	11.7	17.3	85.2	0.066
II	52.3	29.0	11.0	148.7	0.073
III	55.0	11.6	12.2	32.3	0.088
IV	82.0	4.2	187.1	11.2	0.116

表 3 超载 100% 工况下典型路面结构动力响应

Tab.3 Dynamic response of typical pavement under 100% overloading condition

结构	最大拉应变 $\epsilon_x/\mu\epsilon$	最大压应变 $\epsilon_z/\mu\epsilon$	$\epsilon_x/\mu\epsilon$	$\gamma/\mu\epsilon$	w_s/mm
I	30.2	21.2	34.2	146.1	0.101
II	56.4	41.6	21.7	222.7	0.114
III	94.2	22.0	24.1	61.1	0.143
IV	150.7	8.0	355.2	21.8	0.199

表 4 超载工况相对标准荷载工况动力响应增加百分比

Tab.4 The increment percentage of dynamic response of overloading condition than that of standard condition

结构	最大拉应变 ϵ_x	最大压应变 ϵ_z	ϵ_x	γ	w_s
I	43.8	81.2	97.7	71.5	53.0
II	7.8	43.4	97.3	49.8	56.2
III	71.3	89.7	97.5	89.2	62.5
IV	83.8	90.5	89.9	94.6	71.6

从表 1~3 可以看出:

(1)在移动车辆荷载下,面层底部弯拉应变的应变状态既有拉应变又有压应变,车轮即将到达和离去时,呈现压应变状态;车轮到达时,呈现拉应变状态.与笔者野外现场测试结果及国际同类研究测试结果相吻合.本项目组还进行了不同应变比下三点弯曲疲劳试验,结果发现,虽然拉应变对沥青混凝土疲劳破坏起主要作用,但压应变也对疲劳寿命产生一定影响.因此,进行沥青路面结构动态设计时,不仅要考虑面层底部拉应变作用,还要考虑压应变作用.

(2)由表 2 可知,结构 I 和 II 比结构 III 与 IV 的面层底部弯拉应变响应小,但面层底部水平剪应变响应要大得多.而结构 III 与 IV 是国外广泛采用的寿命较长的路面结构,尤其是结构 IV 被称为长寿命路面结构,这说明面层底部剪应变对路面

结构疲劳寿命的影响更为严重.因此,不能单独采用面层底部弯拉应变评价路面结构的疲劳寿命.在剪应变作用下,面层与基层的黏结性遭到破坏,使路面结构从连续结构变为滑动结构.面层底部失去基层水平约束后,不但使得面层底部弯拉应变增大,路面结构产生疲劳破坏;而且增加面层材料的流动性,在纵向水平应变作用下容易形成拥包,在横向水平应变下容易形成车辙.所以对于像结构Ⅰ和Ⅱ这样采用半刚性基层结构的路面,还应重点研究如何提高沥青混凝土面层与半刚性基层之间的黏结强度.

(3)基层刚度与面层厚度对沥青路面动力响应起决定作用.结构Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ都有半刚性基层,基层刚度较大,因此,这三种结构的面层底部拉应变、土基顶部压应变和路表弯沉都比结构Ⅳ的小,而结构Ⅳ却是长寿命结构.这说明采用路表弯沉作为验收指标是不够全面的.

(4)相对于标准荷载工况,超载工况的四个动力响应参数都有所提高,但不同结构、不同参数对荷载灵敏度不同,因此,相同交通条件下,不同路面结构出现的主要破坏形式往往不同.

(5)采用半刚性基层的路面结构Ⅰ和Ⅱ,容易在较大面层底部剪应变作用下产生破坏,而采用全厚式路面结构Ⅳ的成本较高.倒装式路面结构Ⅲ的各个动力响应指标都比较低,且该结构采用柔性基层+半刚性基层结构,既方便排水,又有较丰富施工经验,是一种比较适合的重载交通高速公路路面结构.

4 结论

(1)笔者采用小变形结构的几何方程、平衡方程和三维 Kelvin 本构关系,建立移动荷载下黏弹性层状体系动力学模型.模型中采用 Fourier 变换技术对轮载进行处理,因此可以用来分析复杂轮胎荷载下路面结构动力响应.野外现场路面结构动力试验结果验证了该模型的可靠性.

(2)移动荷载下,面层底部弯拉应变呈现拉压应变交替状态.车轮即将到达和离去时,呈现压应变状态;车轮到达时,呈现拉应变状态.理论计算结果与国内外试验结果吻合.试验研究发现,压应变对沥青路面疲劳破坏有一定贡献,进行路面结构动态设计时,应该既考虑拉应变作用,又考虑压应变作用.

(3)通过分析比较标准荷载工况与超载工况下四种典型路面结构的动力响应,发现面层底部
万方数据

剪应变对路面的使用寿命影响更为严重,采用半刚性基层的路面结构层底剪应变较大,容易产生早期破坏,应重点开展提高沥青混凝土面层与半刚性基层之间的黏结强度方面的研究.

(4)采用半刚性基层的路面结构容易在较大面层底部剪应变作用下产生破坏,而采用全厚式路面结构成本较高.倒装式路面结构的各个动力响应指标都比较低,且该结构采用柔性基层+半刚性基层结构,既方便排水,又有较丰富施工经验,是一种比较适合我国国情的重载交通高速公路路面结构.

参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 邓学钧,孙 璐. 车辆-地面结构系统动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [3] RAJ S, JIAN Y, PETER S. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 120(6): 557-566.
- [4] RAJ S, PETER S. Heavy Off-road vehicle tire-pavement interactions and response[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 13(3): 239-247.
- [5] RAJ S, PETER S. Investigation of tire contact stress distributions on pavement response[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(2): 135-144.
- [6] MAGDY E-D. Further developments of 3DMOVE and its engineering applications[D]. Nevada: University of Nevada, 2003.
- [7] HARDY M S A, CEBON D. Response of continuous pavements to moving dynamic loads[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 9(9): 1762-1780.
- [8] 陆明万,罗学富. 弹性理论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [9] 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.
- [10] 杨挺青. 黏弹性力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [11] 郑传超,王秉纲. 道路结构力学计算[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [12] 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: 88-115.
- [13] JTJ 014-97, 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1997.

- 人民交通出版社,2006.
- [6] 李淑明,许志鸿,蔡喜棉.土工织物对复合式路面结构内力影响分析[J].中国公路学报,2006,19(1):28-31.
- [7] 杨 斌,陈拴发,王秉纲.参数变化对沥青加铺层结构应力的影响分析[J].广西大学:自然科学版,2006,31(1):67-70.
- [8] 杨 斌,陈拴发,王秉纲.沥青加铺层裂纹尖端应力强度因子分析[J].重庆大学:自然科学版,2006,29(5):99-102.
- [9] 锁利军,王秉纲,陈拴发.沥青路面多孔混凝土基层温度应力数值分析[J].郑州大学学报:工学版,2007,28(2):23-26.
- [10] 李祖仲.应力吸收层沥青混合料路用特性研究[D].西安:长安大学,2005.

Analysis of Impact of Sampave Thickness on Stress of Asphalt Overlay

LI Zu-zhong, CHEN Shuan-fa, HUA Min

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The impact of Sampave thickness on load stress and thermal stress of asphalt overlay was analyzed with the 3-D finite element method, which show Sampave may decrease load stress and especially the thermal stress at the bottom of the overlay, and can improve the stress distribution of the whole overlay, reduce the stress concentration at the bottom of the overlay, delay reflective cracks. So Sampave plays an excellent role in delaying and preventing reflective cracks. The results indicate that there is a reasonable scope for Sampave thickness and 2.0~3.0 cm will be recommended.

Key words: road engineering; stress absorbing layer; thickness; finite element method; reflective crack; overlay

(上接第91页)

Theoretical Research of the Dynamic Response of Asphalt Pavement Structure Under Traffic Loads

DONG Zhong-hong, LV Peng-min

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

Abstract: This paper establishes the dynamics model of visco-elastic layer system under moving load. The dynamic responses of four kinds of typical asphalt pavement structure, namely, the thick semi-rigid, the improved semi-rigid, the inverted pavement and the full depth pavement structure, are analysed under the standard load and the 100% overloading condition to study the various differences between the pavement structures. Results show that the life of pavement structure is more seriously affected by the surface bottom shear strain. The shear strain of the semi-rigid pavement structure at the bottom of surface layer is high, which may easily lead to premature failure. The cost of the full depth pavement structure is expensive. The various dynamic response indicators of the inverted pavement structure is lower, especially when this structure uses flexible base and semi-rigid structure. This structure can not only make drainage easy, but get rich experience of construction, so it is a more suitable pavement structure of heavy-load traffic highway.

Key words: moving load; visco-elastic; dynamic response; asphalt pavement; tensile strain; shearing strain