

沥青混合料流变历程与模量演变

张宏超¹, 王 健^{1,2}, 郭仪南^{1,3}, 吴 迪¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院 道路与机场工程系, 201804 上海, zhanghc@tongji.edu.cn;

2. 山东高速路桥养护有限公司, 250031 济南; 3. 成都交通投资集团有限公司, 100048 成都)

摘 要: 为了解沥青混合料的流变特性, 采用 MMLS3 进行沥青混合料的足尺 (Full scale) 加速加载试验, 并利用便携式路面分析仪对沥青混合料流变后的隆起和下陷部分的地震波模量进行测量. 试验结果表明: 在荷载作用下, 沥青混合料下陷量与隆起量的变化值不等; 并且下陷处的地震波模量逐渐增大并趋于稳定, 而隆起处的地震波模量在逐渐减小. 试验证明沥青混合料呈现非匀质流变, 流变后的隆起处与下陷处的力学特性变化规律相异.

关键词: 沥青路面; 流变特性; 地震波技术; 便携式路面分析仪; 行车荷载模拟设备; 地震波模量

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)12-0124-04

Rheological course of asphalt mixture and stiffness change

ZHANG Hong-chao¹, WANG Jian^{1,2}, GUO Yi-nan^{1,3}, WU Di¹

(1. Department of Road and Airport Engineering, School of Transportation Engineering, Tongji University, 201804

Shanghai, China, zhanghc@tongji.edu.cn; 2. Shandong Road & Bridge Maintenance Co., Ltd., 250031 Jinan,

China; 3. Chengdu Communications Investment Group, 100048 Chengdu, China)

Abstract: In order to study the rheological properties of asphalt mixture, MMLS3 was used to conduct full scale accelerated loading test and PSPA was used to test seismic modulus of upheaval and sag when asphalt mixture came into the stage of flowing deformation. The test results showed that the sag and upheaval changed with different degree of variations under the loads, and the seismic modulus of sag increased gradually and tended to be stable, while the seismic modulus of upheaval decreased gradually. It can be proved that asphalt mixture presents non-uniformity rheological course and the change law of mechanical properties of upheaval is totally different from that of sag.

Key words: asphalt pavement; rheological behavior; seismic technology; SPA & PSPA; MMLS3; seismic modulus

近年来, 我国的道路交通出现了一些新的特点, 即多轴次、重轴载、高轮压在交通组成的比重中越来越大, 以及交通流的高度渠化^[1]. 这使沥青路面的表面流变特性表现得更加显著, 具体表现在沥青混合料流变后产生的车辙病害更加突出, 并出现了车辙的影响深度增大、变形速度增快等一些新的特点. 目前对沥青路面流变型车辙的研究只能依靠经验性方法, 这些方法中, 采用固定温

度、简化荷载的轮辙试验可用来评价沥青混凝土的高温变形性质, 试验结果与实际情况建立的回归关系表明了该试验的有限效果^[2]; 或者采用大型的加速加载设备, 模拟若干组实际轮载作用下沥青路面的变形, 如 ALF (Accelerated loading facility)^[3]、HVS (Heavy vehicle simulator)^[4]等. 而上述的这些经验性试验方法都不能获得测试过程中的沥青混合料流变变形的力学信息. 采用对路面芯样后进行的常规力学试验, 既费时费力, 又破坏了路面的连续性, 往往无法得到沥青混合料力学特性连续的演变规律. 因此, 本文采用 MMLS3 加速加载设备在现场铺筑的足尺 (Full scale) 试

收稿日期: 2010-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51008232);

上海市科技启明星项目 (10QA1407200).

作者简介: 张宏超 (1975—), 男, 博士, 副研究员.

验试槽上,在 60 ℃ 的环境温度下进行加速加载,并采用地震波模量测试仪 PSPA——非破坏性测试(Non-destructive test, NDT)设备,对试验路面变形隆起部位和下陷部位进行地震波模量连续跟踪测量,通过分析得出了沥青路面流变历程中其地震波模量的演变规律.

1 试验设备与材料

1.1 MMLS3

MMLS3(Model mobile load simulator)是南非开发的一种小型加速加载设备^[5],如图 1 所示. MMLS3 长 2 400 mm,宽 600 mm,高 1 200 mm,采用 4 组胶轮对试验试件或实际路面进行加载.轮胎直径 300 mm,宽 80 mm,大致相当于标准轮胎的 1/3.轮胎接地压力为 0.56~0.80 MPa,接地荷载为 1.9~2.7 kN.运行最大速度为 2.5 m/s,转速为 120 r/min. MMLS3 配有加热系统,既可以空气加热又可以水浴加热,可以进行不同温度条件下的试验.本文采用轮胎气压为 0.7 MPa,接地荷载为 2.7 kN,转速为 120 r/min.试验采用空气加热,试验温度为 60 ℃.



图 1 MMLS3 照片

1.2 沥青路面足尺结构试槽信息

本文铺筑的试验试槽采用 10 cm 的水泥稳定碎石上铺筑 10 cm 的 AC-13C 型沥青混合料. AC-13C 型沥青混合料级配采用文献[6]所规定的级配中值.采用湖州鹿山坞辉绿岩集料,选用 AK-SBS 改性沥青.采用马歇尔试验方法最终确定最佳油石比为 5.2%,所用沥青混合料采用现场拌制,压实温度在 160 ℃ 以上,压实后,采用钻芯取样测得的压实度大于 96%.

2 地震波模量测量方法

2.1 地震波测量原理及其试验方法

地震波路面分析技术是美国德克萨斯州大学依托战略公路研究计划(SHRP)开发出一套无

损路面测试技术^[7].该地震波技术的目的在不破坏路面连续性的前提下,可获得路面结构的劲度模量和各层厚度,为路面的力学计算以及施工验收提供重要依据.地震波设备原理是通过一个产生地震波的发生器,通过测量至少 2 个以上接收器之间传播的瑞利波波速,获得接收器下方路面表层的平均地震波模量^[8].通过频散曲线可以获得路面的沿深度的模量分布,这可以用来获得路面结构中各层的深度.德州大学由此开发出了 PSPA(Portable seismic pavement analyzer,便携式路面分析仪)^[9],如图 2 所示.

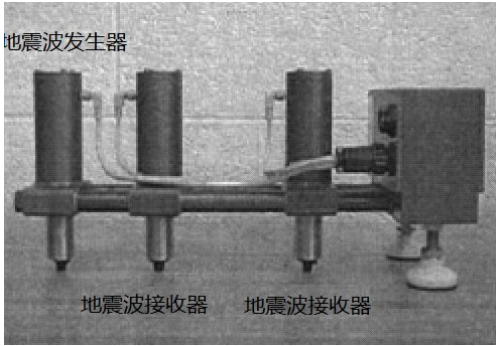


图 2 地震波路面分析仪

2.2 地震波模量与设计模量的相关性

地震波模量是高频低应变时的弹性模量,其发出的频率从几十赫兹到十几千赫兹^[8],故地震波模量并不能代表路面在实际的荷载作用下所反映出来的劲度模量,必须要进行转换才能得到设计时所需要的模量.国外的一些研究提出了从地震波模量到设计模量的转化公式^[10]为

$$E_{\text{design}} = E_{\text{seis}} \left(\frac{\sigma_{\text{c-ult}}}{\sigma_{\text{c-init}}} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_{\text{d-ult}}}{\sigma_{\text{d-init}}} \right)^{k_3}.$$

式中: E_{design} 为设计模量; E_{seis} 为地震波模量; $\sigma_{\text{c-ult}}$ 为最大车辆荷载作用时测量深度处的围压; $\sigma_{\text{c-init}}$ 为无荷载作用时测量深度处的围压; $\sigma_{\text{d-ult}}$ 为最大车辆荷载作用时测量深度处的偏应力; $\sigma_{\text{d-init}}$ 为无荷载作用时测量深度处的偏应力; k_2, k_3 均为回归系数,由室内回弹模量试验确定.

由上式可见,对于同一种沥青混合料,在同一种工况下,其测量深度处的围压、偏应力在最大车辆荷载作用时和无荷载作用时的数值大小应该是一样的,并且 k_2, k_3 等回归系数也应该是固定的.由此,由上式可得出,在本文所采用的试验状况下,在 20 ℃ 下测得的沥青混凝土的地震波模量与其在 20 ℃ 情况下测得的设计模量呈现线性关系.因此,本文所测得的沥青混凝土流变历程中的地震波模量的变化规律可以很准确地反映其设计模量的变化规律.

3 试验试槽结果分析

3.1 MMSL3 作用下沥青混合料流变结果分析

本文利用 MMSL3 加速加载设备,所设定的轮胎的气压为 0.7 MPa,接地荷载为 2.7 kN,在 60 ℃ 的温度下,在 120 r/min 转速下对试验试槽进行加载试验.所得到的沥青混合料永久变形试验结果如图 3 所示.

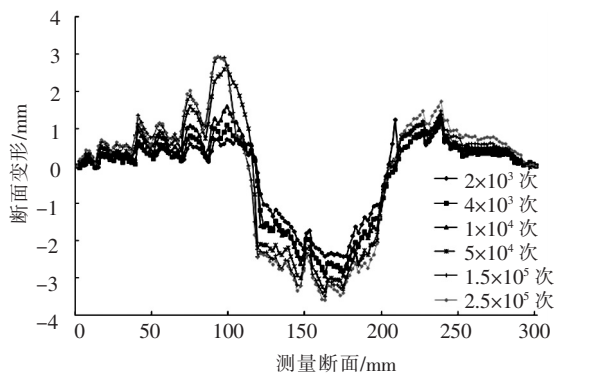


图 3 不同加载次数下车辙横断面曲线

由图 3 可以得出,在荷载的作用下,沥青混合料产生了明显的流变现象,横向在轮迹带上产生明显的下陷,在轮迹的两侧呈现明显的隆起.由于 MMSL3 为单轮作用,横断面呈现明显的“M”形.并且随着加载次数的增加,沥青面层的隆起与下陷变形量都逐渐变大,轮迹带的两侧以及轮迹处的变形较为明显.本文对荷载作用后,车辙横断面的隆起面积与下陷面积进行了整理,结果如表 1 与图 4 所示,可见,下陷面积和隆起面积随着荷载次数的增加均有所增加,并呈现明显的指数函数关系.并且,在不同的加载次数作用下,下陷的面积、隆起的面积以及两者的差值均在不断地变化.这表明,在荷载作用下的沥青混合料流变历程中,

粘滞流变和压实作用是同时存在的.只是在不同的阶段所占的比例不同.由表 1 可知,在荷载作用 4 000 次之前,下陷面积与隆起面积的差值增加,这表明压实作用在荷载作用前期表现更加明显.在荷载作用 4 000 次之后,下陷面积与隆起面积的差值减小,这表明轮迹作用处的压实作用减弱,沥青混合料的粘滞流变作用表现更加明显,轮迹下的沥青混凝土在剪应力的作用下发生了剪切流动,并且这种剪切流动是一种非匀质流变.

表 1 车辙横断面隆起面积与下陷面积

荷载作用次数	下陷面积/cm ²	隆起面积/cm ²
2 000	1.428	0.831
4 000	1.706	0.885
10 000	1.825	1.263
50 000	2.102	1.633
150 000	2.243	1.786
250 000	2.281	1.835

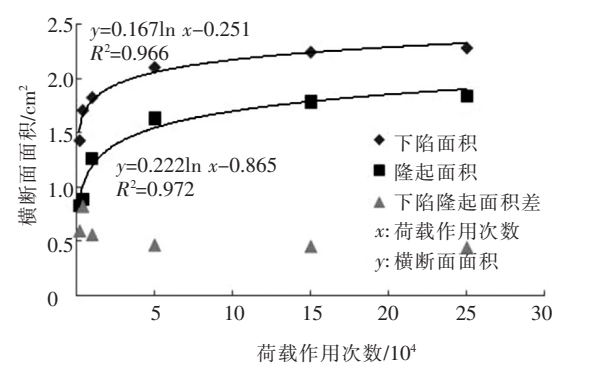


图 4 车辙横断面隆起面积与下陷面积变化

3.2 PSPA 地震波模量测量结果分析

利用 PSPA 地震波模量检测设备对轮迹处以及隆起最高处的沥青混凝土模量在 20 ℃ 的温度下进行了测量.测量结果如表 2、表 3 和图 5 所示.

表 2 不同荷载作用次数下隆起处地震波模量变化

测量序号	地震波模量/GPa						
	0 次	2×10 ³ 次	4×10 ³ 次	10 ⁴ 次	5×10 ⁴ 次	1.5×10 ⁵ 次	2.5×10 ⁵ 次
1	11.2	10.6	9.3	8.7	7.8	7.5	7.1
2	11.1	10.3	9.3	8.8	8.2	7.6	7.0
3	11.1	11.2	9.4	8.5	8.1	7.7	7.2
4	10.9	10.8	9.1	9.0	8.0	7.4	6.9
5	10.7	10.9	9.4	8.9	8.1	7.7	7.1

表 3 下陷处地震波模量随荷载作用次数变化

测量序号	地震波模量/GPa						
	0 次	2×10 ³ 次	4×10 ³ 次	10 ⁴ 次	5×10 ⁴ 次	1.5×10 ⁵ 次	2.5×10 ⁵ 次
1	11.2	11.4	12	12.3	12.7	12.4	12.3
2	11.1	11.1	11.6	12.4	12.6	12.3	12.5
3	11.1	11.2	11.4	11.9	12.1	12.4	12.6
4	10.9	11.3	11.9	12.4	11.9	12.6	12.4
5	10.7	11.4	11.8	12.5	12.6	12.9	12.2

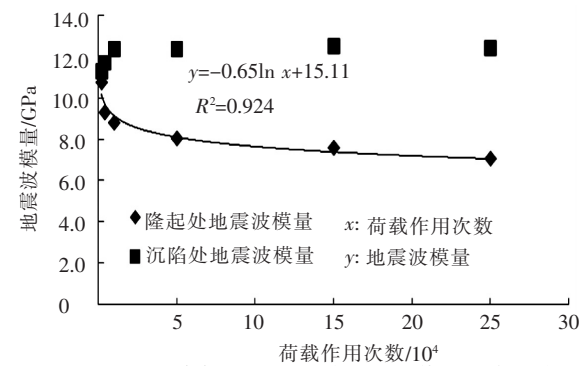


图 5 下陷处与隆起处地震波模量随荷载作用次数变化

可见,沥青混凝土在荷载的作用下,其地震波模量发生了明显了变化.在隆起处,其模量发生了明显的下降;在下陷处,其模量发生了明显的增加.并且随着加载次数的增加,在隆起处的模量随着荷载次数的增加表现为明显的指数函数下降关系.但在下陷处,在 10 000 次之前,其模量发生明显的线性增加关系,而 10 000 次之后,其模量基本保持不变.本文认为,由于试验是在 60 ℃ 的高温下进行加载,随着荷载作用次数的增加,沥青以及沥青胶浆便发生流动,从而使混合料的骨架作用失稳,这部分半固态物质除了部分填充混合料的空隙外,还将发生沥青混合料的剪切流动,从而一部分混合料从轮迹处流动到了两侧的下方,从而造成了两侧的隆起,如图 3 所示.而轮迹两侧混合料的上部并没有外部混合料填充,在其被隆起的过程中,隆起高度并不完全相同,证明其中发生了结构及空隙率等体积指标的改变.由于隆起处下方新料的填充以及隆起处上方混合料结构的改变,造成了隆起处沥青混合料的空隙率随着加载次数的增加而增大,从而地震波模量也发生了明显的变化.在下陷处,由于荷载作用前期,压实作用变得比较明显,随着轮迹处混合料被逐步压实,其地震波模量发生了明显的增加.而随着荷载次数进一步增加,混合料的压实效果逐步减弱,而剪切流动显现表现得更加明显.由于轮迹处的压实程度逐渐稳定下来,其结构和空隙率也渐渐保持稳定,从而其地震波模量在荷载作用后期并没有发生明显的改变.

4 结 论

- 1)随着加载次数的变化,下陷面积与隆起面积的变化值不等,证实压实与隆起部位的混合料密度变化不同,车辙变形呈现非匀质流变.
- 2)通过 PSPA 对荷载作用后沥青混合料隆起部分和下陷部分地震波模量的测量,证明了荷载作用后沥青混合料密度的不同,说明其力学性能

因流变发生了明显的变化,抗变形能力也呈现不同的变化规律.

3)通过试验,进一步证明车辙是轮迹带压实造成侧向流动形成的,而且具有一定的发展规律.在加载作用前期,主要表现为下陷处的压实阶段;在加载作用后期,主要表现为下陷处的混合料向隆起处的非匀质流变阶段.

4)得出了沥青混合料在荷载与高温因素耦合作用下的沥青混合料的流变规律与地震波模量的变化规律,对沥青路面产生永久变形及发展历程的研究提供了一种新的无损测量研究方法.

参考文献:

- [1] 鲁正兰,孙立军.沥青路面车辙预估方法的研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(11):1476-1480.
- [2] OLIVER J W H, TREDREA P F. Relationships between asphalt rut resistance and binder rheological properties [C]//Association of Asphalt Paving Technologists Schedule for 2004 Annual Meeting and Technical Sessions. Baton Rouge: AAPT, 2004: 623-643.
- [3] HUA Jiangfeng. Finite element modeling and analysis of accelerated pavement testing devices and rutting phenomenon[D]. West Lafayette: Purdue University, 2000.
- [4] 曹林涛,李立寒,苏洲,等.沥青混合料车辙试件成型控制研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(3):313-317.
- [5] KOLSTEIN M H. Economic optimization of thick wearing and isolation courses on steel bridge decks[R]. Dutch: Dell Ford Polytechnic University Press, 1990.
- [6] JTG D50-2006. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2006.
- [7] GUCUNSKI N, MAHER A. Evaluation of seismic pavement analyzer for pavement condition monitoring [R]. New Jersey: Department of Civil & Environmental Engineering at Rutgers University, 2002.
- [8] BAKER M R, CRAIN K, NAZARIAN S. Determination of pavement thickness with a new ultrasonic device [R]. El Paso: Center for Highway Materials Research, University of Texas at El Paso, 1995.
- [9] NAZARIAN S, ALVARADO G. Impact of temperature gradient on modulus of asphaltic concrete layers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 18(4):492-499.
- [10] NAZARIAN S, YUAN D. Quality management of flexible pavement layers with seismic methods[R]. El Paso: Center for Transportation Infrastructure Systems, University of Texas at El Paso, 2005.