

高模量沥青混合料模量的试验研究

汪于凯, 李立寒, 孙艳娜
(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 沥青混合料模量是沥青路面结构分析的重要计算参数. 对 3 种高模量沥青混合料及 SBS 改性沥青混合料和 A-70# 沥青混合料进行动态模量和静态回弹模量试验, 分析沥青混合料模量分布规律、影响因素以及动态模量与静态回弹模量的相关性. 结果表明: 相同试验条件下高模量沥青混合料的模量明显大于对比沥青混合料, 且随着频率的降低, 高模量沥青混合料的动态模量增大倍数增大; 沥青混合料的静态回弹模量与低频下的动态模量呈指数关系, 因此当试验条件受限时可采用沥青混合料静态回弹模量值对动态模量值进行预估.

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 高模量沥青; 动态模量; 回弹模量; 相关性

中图分类号: U 414 **文献标志码:** A

Modulus of High Modulus Asphalt Mixture

WANG Yu-kai, LI Li-han, SUN Yan-na
(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The modulus of asphalt mixture is an important parameter in asphalt pavement structure analysis. The tests for dynamic modulus and static resilient modulus were conducted regarding three kinds of high modulus asphalt mixtures, SBS modified asphalt mixture and A-70# asphalt mixture. The distribution and influential factors of modulus and the correlation between the two kinds of modulus were analyzed. The results indicate that the modulus of high modulus asphalt mixture is significantly larger than that of the contrastive asphalt mixture at the same testing conditions, and the magnification of dynamic modulus increases with the decrease of frequency. The static resilient modulus of asphalt mixture has an exponential relation with the dynamic modulus at low frequency, and the values of static resilient modulus can be used to estimate the dynamic modulus if the test conditions are limited.

Key words: road engineering; asphalt mixture; high modulus asphalt; dynamic modulus; resilient modulus; correlation

随着我国公路交通运输量的快速增长, 特别是重载车辆的增加以及高压轮胎的使用, 沥青路面过早出现了车辙病害, 路面结构的损坏也逐渐加剧. 沥青混合料的模量作为沥青路面结构计算

收稿日期: 2013-04-12
第一作者: 汪于凯(1987-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 道路工程材料. E-mail: wangyukai1987@163.com
通讯作者: 李立寒(1957-), 女, 教授. 研究方向: 道路工程材料. E-mail: lhlh@tongji.edu.cn

的重要参数,一方面可以反映路面结构应力—应变特性,另一方面又可以反映混合料的路用性能. 学者研究发现,提高沥青混合料的模量能够减少相同车辆荷载作用下沥青路面产生的变形. 增强混合料的抗高温能力,延长混合料的疲劳寿命,是解决重交通环境以及高温条件下沥青路面车辙病害的有效途径^[1-2].

高模量沥青混合料在国内的应用尚处于初步阶段,其模量参数一直是学者们关注的重点,包括静态模量和动态模量. 静态模量是我国现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定的模量评价指标,而国内外研究成果提出要用动态参数来取代静态参数,因为动态模量相比于静态模量能够较好地模拟车辆荷载作用下路面的实际受力状况^[3-5]. 因此,同时进行高模量沥青混合料静态模量与动态模量的研究有其现实意义和研究价值. 国内学者还对沥青混合料动态模量的预估^[6]以及动静模量之间的对应关系展开了一定的研究^[7-8],但仍缺乏针对高模量沥青混合料模量参数选取和预估方面的研究. 基于以上问题,本文采用 MTS 810 材料试验机测试高模量沥青混合料的模量,分析了动态模量分布特征及其影响因素和高模量沥青混合料与其它类型混合料动态模量的分布特征差异,还分析了沥青混合料动态模量与静态模量的相关关系,为高模量沥青混合料模量参数的选取以及高模量沥青路面结构的分析和设计提供依据.

1 试验材料与试验设计

1.1 试验材料

本试验研究采用 3 种高模量沥青混合料,分别为:烯烃类、天然沥青类和硬质沥青类高模量沥青混合料. 前两种是在 A-70#沥青中掺加高模量改性剂制得,改性剂掺量为集料质量的 0.6%;硬质沥青类高模量沥青混合料采用成品硬质沥青(15/25#)制得. 另采用 SBS 改性沥青混合料和 A-70#沥青混合料作为对比材料.

沥青混合料类型为 AC-13,试验混合料的合成级配组成见表 1. 集料为玄武岩,矿粉为石灰岩. 采用 Superpave 设计方法^[9]进行试验沥青混合料的目标配合比设计,得到 3 种高模量沥青混合料的最佳沥青用量为 5.0%;对比的 A-70#沥青混合料和 SBS 改性沥青混合料的最佳沥青用量为 4.8%. 试验混合料的基本信息汇总于表 2.

表 1 试验沥青混合料的级配组成
Tab.1 Gradation composition of asphalt mixture

筛孔孔径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36
通过百分率/%	100	96.4	80.6	51.5	40.9
筛孔孔径/mm	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	28.8	19.9	12.7	9.6	6.2

表 2 试验沥青混合料基本信息汇总
Tab.2 Basic information summary of asphalt mixture

混合料类别	混合料类型	沥青	中文简称
高模量沥青混合料	烯烃类高模量沥青混合料	A-70#+0.6%PR.S	烯烃
	天然沥青类高模量沥青混合料	A-70#+0.6%岩沥青	天然
	硬质沥青类高模量沥青混合料	硬质沥青	硬质
对比沥青混合料	SBS 改性沥青混合料	SBS 改性沥青	SBS
	A-70#沥青混合料	A-70#沥青	70#

1.2 试验设计

动态模量的测试参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E—20—2011)中的 T0738—2011 进行. 首先按目标配合比拌制沥青混合料,在成型温度下老化 2 h 后,采用旋转压实仪成型 $\phi 150\text{ mm}\times 170\text{ mm}$ 的圆柱体试件;试件静置养生完全后,钻芯取样 $\phi 100\text{ mm}\times 170\text{ mm}$ 的圆柱体试件;之后采用切割机切除所取芯样两端,保证试件高度为 $150\text{ mm}\pm 2.5\text{ mm}$. 试验温度为 5, 15, 20, 40℃,测试频率为 0.1,0.5,1,5,10,25 Hz.

静态模量的测试参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E—20—2011)中的 T0713—2000 进行. 按目标配合比拌制沥青混合料,在成型温度下老化 2 h 后,采用静压方法成型 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体试件. 测试时加载速率为 2 mm/min,测试温度为 15℃和 20℃.

2 试验结果与分析

2.1 动态模量

采用 MTS 810 材料试验机,对 3 种高模量沥青混合料及 2 种对比沥青混合料的动态模量进行测试,分析频率和温度对混合料动态模量的影响.

2.1.1 频率对高模量沥青混合料动态模量的影响

加载频率对 5 种沥青混合料动态模量的影响如图 1 所示, E_d 为混合料动态模量, f 为加载频率. 分析图 1 可知, 在相同温度条件下, 加载频率对 3 种高模量沥青混合料及两种对比沥青混合料动态模量的影响有着相同规律, 即随着频率的增大, 沥青混合料动态模量增大.

由图 1 还可以得出, 相同温度和频率条件下, 高模量沥青混合料的动态模量明显大于对比沥青混合料的

动态模量, 这表明高模量改性剂的加入可显著提高混合料的动态模量; 且 3 种高模量沥青混合料中, 硬质沥青类的动态模量大于烯烃类和天然沥青类. 分析图 1 (d) 可知, 0.1 Hz 时硬质沥青类和天然沥青类的动态模量相近, 而 25 Hz 时硬质沥青类的动态模量却明显大于天然沥青类; 0.1 Hz 时烯烃类的动态模量明显小于天然沥青类, 而 25 Hz 时烯烃类的动态模量却与天然沥青类相近. 由此可见, 40℃ 时硬质沥青类和烯烃类混合料动态模量对频率的敏感性要大于天然沥青类.

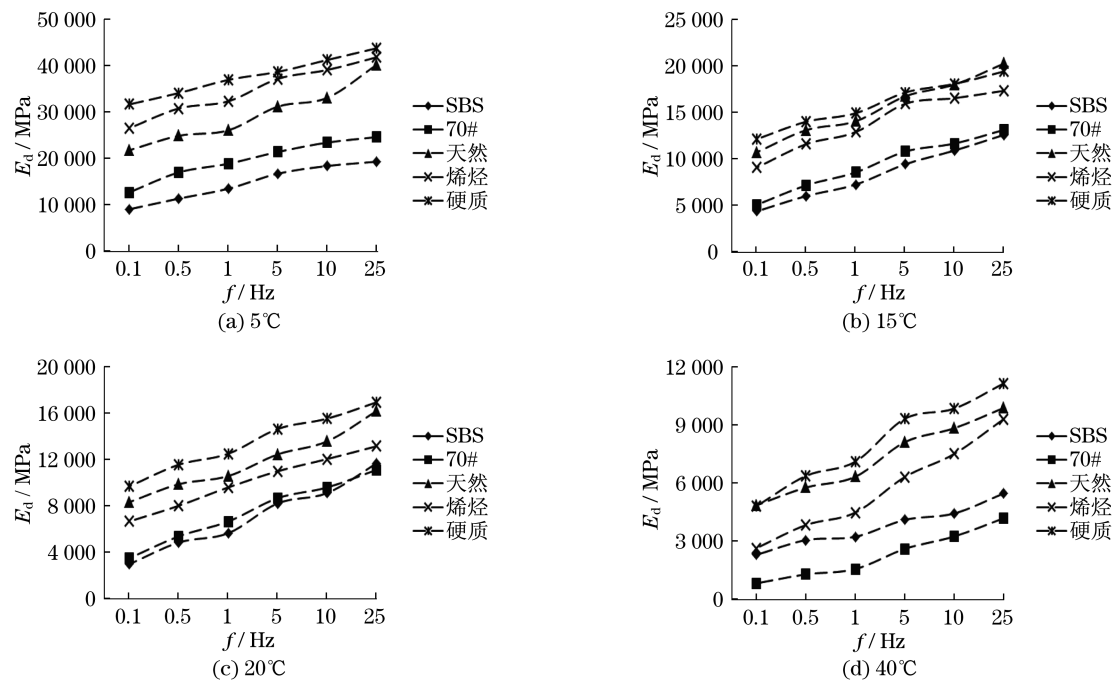


图 1 各温度条件下频率对动态模量的影响

Fig.1 Frequency effect on dynamic modulus under different temperatures

以 15℃ 混合料动态模量数据为例, 分析各频率条件下高模量沥青混合料相对于对比沥青混合料模量增大倍数, 分析结果见表 3. 由表 3 可知, 25 Hz 时高模量沥青混合料的模量是 A-70# 沥青混合料的 1.3 ~ 1.5 倍, 是 SBS 沥青混合料的 1.4 ~ 1.6 倍; 0.1 Hz 时高模量沥青混合料的模量是 A-70# 沥青混合料的 1.8 ~ 2.4 倍, 是 SBS 沥青混合料的 2.1 ~ 2.8 倍. 随着频率的降低, 高模量沥青混合料的模量增大倍数增大. 其它温度下, 频率对混合料模量增大倍数影响与 15℃ 时相似.

2.1.2 温度对高模量沥青混合料动态模量的影响

试验温度对 5 种沥青混合料动态模量的影响如图 2 所示, t 为试验温度. 分析图 2 可知, 在相同的频率条件下, 试验温度对 5 种沥青混合料动态模量的影响也有着相同的变化规律, 即随着温度的增大,

表 3 高模量沥青混合料动态模量增大倍数
Tab.3 Increase multiple of dynamic modulus of high modulus asphalt mixture

混合料对比类型	f / Hz	烯烃	天然	硬质
高模量沥青混合料与 A-70# 沥青混合料对比	25	1.32	1.54	1.48
	10	1.42	1.54	1.55
	5	1.47	1.55	1.59
	1	1.50	1.64	1.74
	0.5	1.61	1.82	1.95
	0.1	1.78	2.10	2.38
高模量沥青混合料与 SBS 沥青混合料对比	25	1.37	1.61	1.54
	10	1.51	1.65	1.65
	5	1.69	1.77	1.81
	1	1.77	1.93	2.05
	0.5	1.92	2.17	2.32
	0.1	2.06	2.44	2.76

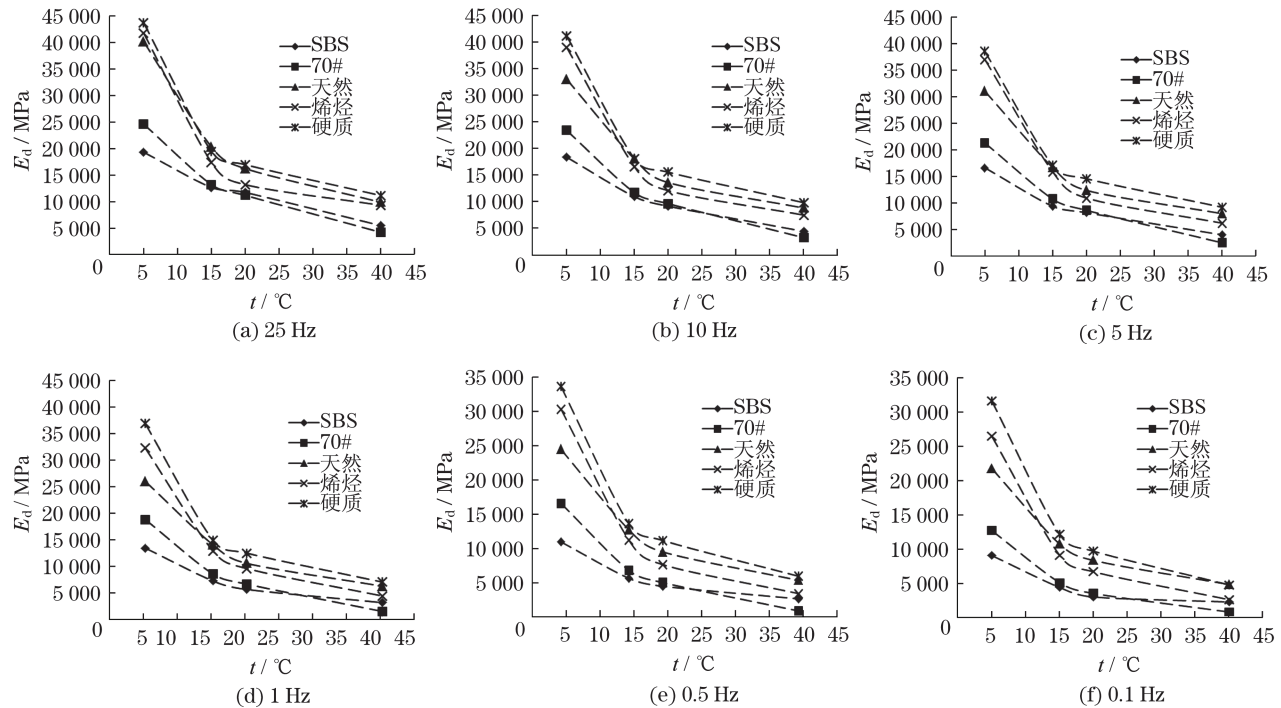


图2 各频率条件下温度对动态模量的影响

Fig.2 Temperature effect on dynamic modulus under different frequencies

混合料动态模量迅速减小。

由图2还可以看出,频率相同时高模量沥青混合料在中低温条件下(5℃和15℃)的动态模量相对于对比沥青混合料SBS和70#有较大的提高;高温(40℃)时3类高模量以及SBS沥青混合料的动态模量相对于70#沥青混合料同样有较大的提高,但SBS与烯烴类沥青混合料在低频(0.1, 0.5, 1 Hz)时的动态模量相差不大;3种高模量沥青混合料中,5℃时烯烴类和硬质沥青类的动态模量相近,大于天然沥青类;40℃时硬质沥青类的动态模量最大,烯烴类最小,天然沥青类位于中间。由此可见,烯烴类混合料动态模量对温度的敏感性要大于硬质沥青类和天然沥青类。

2.2 静态回弹模量

2.2.1 高模量沥青混合料的静态回弹模量特征

采用MTS 810材料试验机,对3种高模量沥青混合料及两种对比沥青混合料在15℃和20℃下的静态回弹模量进行测试,测试结果如图3所示, E_r 为混合料静态回弹模量。分析图3可知,5种沥青混合料回弹模量受温度影响的规律一致,均随着温度的升高而减小。在各温度条件下(15℃和20℃)3种高模量沥青混合料的回弹模量明显高于两种对比沥青混合料,回弹模量的大小排列顺序依次为:硬质>天然>烯烴>SBS>70#。

15℃,20℃时在相同频率条件下(25 Hz,15℃时天然沥青类混合料动态模量稍大于硬质沥青类混合料;20℃时SBS沥青混合料动态模量稍大于70#沥青混合料)5种沥青混合料的动态模量从大到小排列顺序依次为:硬质>天然>烯烴>70#>SBS。对比分析可知,15℃和20℃时3种高模量沥青混合料动态模量与回弹模量的大小变化相对稳定,而SBS沥青混合料与70#沥青混合料的模量值大小排列相反。这是因为回弹模量与动态模量测试的加载方式与方法并不相同,前者是以一定的速率(2 mm/min)对试件加载,属于一种静态的变化,后者是以无间歇时间偏移正弦波为加载波形对试件进行加载,属于一种动态变化。这充分说明70#沥青混合料的模量相对于高模量沥青混合料及SBS沥青混合料对动态变化更为敏感。

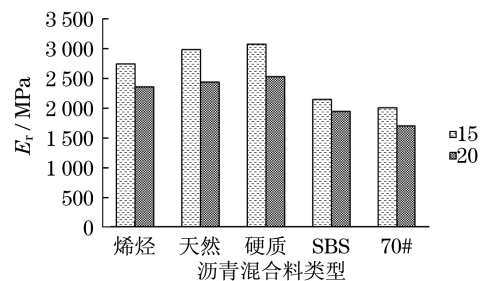


图3 沥青混合料在不同温度条件下的回弹模量

Fig.3 Resilient modulus of asphalt mixtures under different temperatures

2.2.2 静态回弹模量与动态模量相关性分析

将相同温度条件下(15℃和20℃)沥青混合料的静态回弹模量值与不同频率时的动态模量值采用幂指数 $E_d = aE_r^b$ 的形式进行回归分析, a, b 为回归系数, 分析结果见表4及图4. 由表4可知, 沥青混合料静态回弹模量与动态模量呈指数关系, 且随着频率的降低, 确定系数 R^2 呈增大趋势. 这表明沥青混合料的静态回弹模量与较低频率下的动态模量呈较好的指数关系, 因而当试验条件受限无法进行动态模量试验且对所需动态模量值精度要求不高时, 可以用静态回弹模量值对较低频率下的动态模量值进行预估.

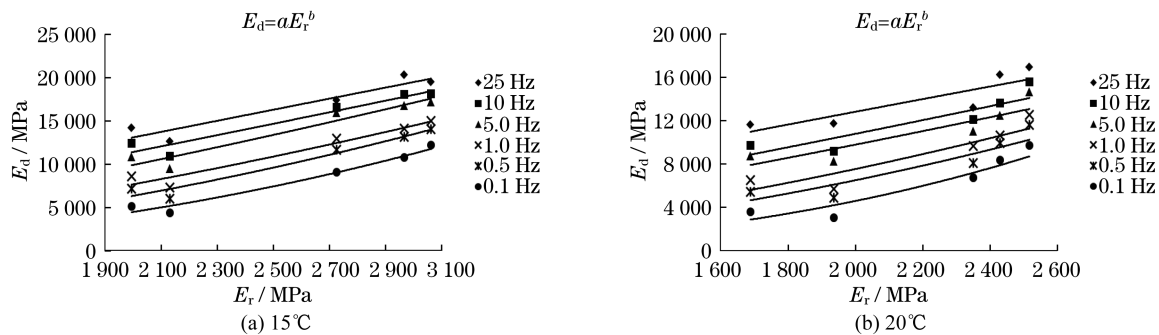


图4 沥青混合料静态模量与动态模量相关关系

Fig.4 Correlation between static modulus and dynamic modulus of asphalt mixtures

表4 沥青混合料静态模量与动态模量的回归结果

Tab.4 Regression results between static modulus and dynamic modulus of asphalt mixtures

$t/^\circ\text{C}$	f/Hz	a	b	R^2
15	25	7.598 0	0.980 3	0.881 0
	10	2.228 3	1.123 7	0.900 4
	5	0.362 6	1.344 1	0.902 2
	1	0.054 5	1.559 8	0.907 2
	0.5	0.004 9	1.852 6	0.919 8
	0.1	0.000 2	2.257 7	0.944 4
20	25	11.964 0	0.917 8	0.771 2
	10	1.539 3	1.164 8	0.798 1
	5	0.655 0	1.264 4	0.802 5
	1	0.011 6	1.760 7	0.811 1
	0.5	0.001 9	1.981 9	0.822 5
	0.1	3E-06	2.795 0	0.842 1

3 结 论

本文通过对3种高模量沥青混合料以及2种对比沥青混合料展开模量试验研究, 可以得出以下结论:

a. 3种高模量沥青混合料动态模量中, 硬质沥青类的动态模量大于烯烃类和天然沥青类. 动态模量对频率敏感性分析中, 硬质沥青类和烯烃类大于天然沥青类. 动态模量对温度敏感性分析中, 烯烃类要大于硬质沥青类和天然沥青类.

b. 高模量沥青混合料的动态模量显著大于 SBS 沥青混合料和 A-70# 沥青混合料. 高模量沥青混合料的动态模量是 A-70# 沥青混合料的 1.3~2.4 倍, 是 SBS 沥青混合料的 1.4~2.8 倍, 且随着频率的降低高模量沥青混合料的模量增大倍数越大.

c. 3种高模量沥青混合料的静态回弹模量大于 SBS 沥青混合料和 A-70# 沥青混合料, 静态回弹模量大小从高到低依次为: 硬质>天然>烯烃>SBS>70#.

d. 沥青混合料的静态回弹模量与较低频率下的动态模量呈较好的指数关系, 在试验条件受限时可采用沥青混合料静态回弹模量值对动态模量值进行预估.

参考文献:

- [1] 王刚, 刘黎萍, 孙立军. 高模量沥青混凝土抗变形性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 217-222.
- [2] 沙爱民, 周庆华, 杨琴. 高模量沥青混凝土材料组成设计方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(3): 1-5.
- [3] 沥青路面设计指标和参数研究[R]. 北京: 交通部西部交通建设科技项目管理中心, 2006.
- [4] NCHRP 1-37A. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures[R]. Washington DC: Transportation Research Board National Research Council, 2004.
- [5] 王旭东, 沙爱民, 许志鸿. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [6] 马翔, 倪富健, 陈荣生. 沥青混合料动态模量试验及模型预估[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 35-39.
- [7] 高英. 基于动态参数的沥青路面设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [8] 赵延庆, 薛成, 黄荣华. 沥青混合料抗压回弹模量与动态模量比较分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(12): 105-107.
- [9] 吕伟民, 孙大权. 沥青混合料设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

(编辑: 丁红艺)