

文章编号:1671-6833(2018)04-0012-06

炭黑改性沥青混合料的动态响应主曲线分析

栗培龙¹, 马松松¹, 李建阁¹, 张东阳^{1,2}

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘 要: 为了分析炭黑改性沥青的动态响应, 在不同试验温度及加载频率下进行基质沥青混合料和炭黑改性沥青混合料的简单性能试验(SPT), 分析了两种混合料动态模量和相位角的变化规律, 并根据试验数据, 采用 Sigmoidal 模型, 得到了沥青混合料的动态模量移位因子及模型参数, 形成了两种沥青混合料动态模量和相位角主曲线, 并对其进行对比分析. 结果表明, 炭黑改性沥青混合料的活化能 ΔE_a 和移位因子 $\lg[\alpha(T)]$ 在低于参照温度时小于基质沥青混合料, 而在高于参照温度时大于基质沥青混合料. 随着加载频率的升高, 动态模量主曲线呈“S”形曲线逐渐增大, 而相位角主曲线先增大后减小, 但不如动态模量主曲线光滑, 尤其在低频范围内数据分散. 动态模量主曲线和移位因子可以较好地描述加载频率和试验温度对炭黑改性沥青混合料黏弹性响应的影响. 炭黑改性沥青混合料在低于 37.8℃ 时的动态模量更大, 具有更好的抗变形能力; 随着温度的升高, 当温度超过 37.8℃ 时, 两种混合料的黏弹性响应差异不大, 即在低频或高温条件下的炭黑改性效果不显著.

关键词: 道路工程; 炭黑改性沥青混合料; 简单性能试验(SPT); 动态模量; 相位角

中图分类号: U414.1 **文献标志码:** A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.022

0 引言

废轮胎裂解炭黑在材料领域具有广泛的应用前景, 一些学者开展了炭黑基本结构及其改性应用技术研究^[1-2]. 但炭黑在沥青及沥青混合料改性方面的研究尚不完善, 郑远等^[3]分析了炭黑改性沥青的老化特性; 陈森等^[4]进行了 SBS/白炭黑复配改性沥青的高温、低温以及感温性能分析. 沥青混合料是一种多相颗粒性材料, 其黏弹性动态响应与沥青路面的车辙、开裂、疲劳等病害密切相关, 因此沥青混合料的黏弹性动态响应越来越受到国内外道路领域研究者的关注^[5]. Little 等^[6]采用单轴蠕变试验数据, 进行了沥青混合料动态响应及永久变形特性分析; Chang 等^[7]建立了热拌沥青混合料黏弹性本构模型, 并进行了微观力学模拟分析; Schwartz 等^[8]进行了沥青混合料黏弹塑性模拟分析; 孙雅珍等^[9]进行了高黏弹沥青砂的黏弹性模型

参数研究; 周志刚等^[10]用黏弹性理论评价了沥青混合料的高温稳定性. 栗培龙等^[11]分析了试验温度、应力水平以及级配等沥青混合料黏弹性影响因素. 在 NCHRP-29^[12] 项目中, 开发了简单性能试验 (simple performance test, SPT), 并提出了表征沥青混合料黏弹性的动态模量和相位角等评价参数. 王昊鹏等^[13]讨论了两种高模量改性沥青混合料的动态模量, 并进行了性能预测分析. 刘红等^[14]分析了掺入聚酯纤维的沥青混合料在不同温度及荷载频率下的动态模量.

为了研究炭黑改性沥青混合料的动态响应特性, 本研究采用 SPT 试验, 分别测定不同试验条件下炭黑改性和基质沥青混合料的动态模量和相位角, 根据时温等效原理以及 Sigmoidal 模型, 计算沥青混合料的动态模量移位因子及模型参数, 分别得到了两种沥青混合料的动态模量主曲线和相位角主曲线, 用以分析炭黑改性沥青混合料的黏弹性力学响应.

收稿日期:2017-12-20; 修订日期:2018-03-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008031), 交通运输部基础研究计划项目(2014319812151), 陕西省自然科学基础研究计划项目(2014JQ7242), 中央高校科研业务费项目(300102218405; 300102218513)
作者简介:栗培龙(1980—), 男, 江苏邳州人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事道路材料与结构方面的研究, E-mail: peilong_li@126.com.

1 试验材料

采用 SK70#基质沥青和废橡胶裂解炭黑制备炭黑改性沥青,并分别拌制 AC-13 基质沥青混合料和炭黑改性沥青混合料,进行 SPT 试验. 两种沥青性能指标和集料级配如表 1 和表 2 所示. 两种沥青混合料动态模量和相位角如表 3、表 4 所示. 粗细集料选用角闪岩,石灰岩矿粉用作填料,采用马歇尔设计方法确定最佳沥青用量,两种沥青混合料的最佳沥青用量均为 4.5%,设计空隙率分别为 3.95% 和 4.18%.

表 1 沥青基本指标			
Tab.1 Properties of asphalt binders			
试验项目		基质 沥青	炭黑改 性沥青
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/(0.1 mm)		73	59
软化点/℃		50.7	49.7
延度(15 ℃,5 cm·min ⁻¹)/cm		48	42
闪点/℃		276	288
针入度指数		-0.682	—
薄膜加热试验 (163 ℃,5 h)	质量损失/%	0.06	0.197
	针入度比/%	90.0	86.8
	残留延度(15 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	23	24

表 2 混合料级配										
Tab.2 Mixture gradation										
矿料级配	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
级配上限	100	100	85	68	50	38	28	20	15	8
级配下限	100	90	68	38	24	15	10	7	5	4
试验级配	100	95.6	72.7	40.4	30	19.4	14.5	10.3	8.1	5.1

表 3 两种沥青混合料动态模量							
Tab.3 Dynamic modulus data of mixtures							
混合料 种类	温度/℃	加载频率/Hz					
		25	10	5	1	0.5	0.1
基质沥青 混合料	4.4	16 622	15 889	15 253	13 544	12 545	10 091
	21.1	10 549	8 961	7 581	5 726	5 003	3 381
	37.8	3 959	2 923	2 218	1 419	1 155	855
	54.4	1 098	836	633	494	397	287
炭黑改性 沥青混合料	4.4	18 811	18 284	17 221	15 704	14 333	12 382
	21.1	12 596	10 719	9 487	7 563	6 266	4 800
	37.8	5 250	3 841	2 619	1371	1 037	715
	54.4	958	776	605	400	336	280

表 4 两种沥青混合料的相位角							
Tab.4 Phase angle data of mixtures							
混合料种类	温度/℃	加载频率/ Hz					
		25	10	5	1	0.5	0.1
基质沥青 混合料	4.4	13.6	15.3	17.2	20.5	22.3	25.2
	21.1	27.6	29.0	30.7	32.3	33.7	35.1
	37.8	35.7	37.7	37.2	34.1	33.1	31.2
	54.4	36.6	34.3	32.4	30.3	28.9	26.2
炭黑改性 沥青混合料	4.4	10.1	11.7	13.1	15.2	16.8	18.8
	21.1	21.1	23.0	24.3	26.5	27.9	30.7
	37.8	31.6	32.7	35.0	33.4	32.2	30.0
	54.4	36.7	34.4	31.8	29.8	27.8	25.7

2 试验方法

采用 Troxler 4140 型旋转压实仪,成型 $\phi 150\text{ mm} \times H\text{ }150\text{ mm}$ 的圆柱形试件,再钻取芯样

切割后得到 $\phi 100\text{ mm} \times H\text{ }110\text{ mm}$ 的试件. 采用 SPT 设备,在 50 ~ 150 μs 下对应的应力水平进行正弦波加载;试验温度分别为 4.4、21.1、37.8、54.4 ℃;荷载频率分别为 0.1、0.5、1、5、10、

25 Hz. SPT 试验设备及试件分别如图 1 所示.



图 1 SPT 试验设备及试件
Fig.1 SPT equipment and samples

3 结果分析及讨论

3.1 动态响应参数分析

沥青混合料是典型的黏弹性材料,动态模量与相位角是表征沥青混合料黏弹性的重要参数,能较好地反映沥青路面的实际受力状况与动态响应^[15].不同试验温度条件下,炭黑改性沥青混合料和基质沥青混合料的动态模量和相位角随加载频率的变化如图 2 和图 3 所示.

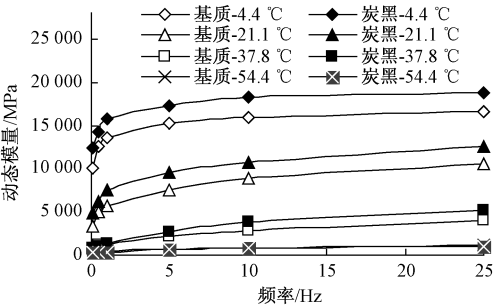


图 2 沥青混合料的动态模量
Fig.2 Dynamic moduli of mixtures

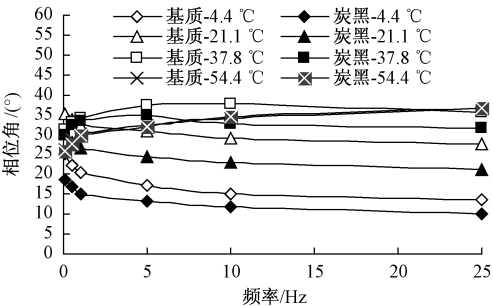


图 3 沥青混合料的相位角
Fig.3 Phase angles of mixtures

由图 2 可知,随着加载频率的增大,不同温度条件下的炭黑改性和基质沥青混合料的动态模量均不断增大,但在不同频率范围内,其增大幅度存在差异,在较低的频率范围内(0.1 ~ 1 Hz),动态模量急剧增大;而在较高的频率范围内(5 ~ 25 Hz),动态模量增加幅度越来越小.炭黑改性后,相同条件下的动态模量增大,但随着试验温度逐渐升高,炭黑改性混合料与基质混合料的动态

模量之间的差异越来越小,两者在 54.4 °C 时的动态模量几乎没有差异.

由图 3 可以看出,随着加载频率的增大,炭黑改性混合料与基质混合料的相位角的变化趋势基本一致,相同条件下,炭黑改性沥青混合料的相位角小于基质沥青.随着加载频率的增大,在较低温度 4.4 °C 和 21.1 °C 时的相位角逐渐减小,在较高温度 54.4 °C 时的相位角逐渐增大.在中等温度 37.8 °C 时的相位角先增大后减小,但出现极值的频率不同:基质沥青对应的极值频率为 1 Hz,而炭黑改性后,对应的极值频率为 5 Hz.

3.2 动态响应参数主曲线模型及参数

作为黏弹性材料,试验温度和加载频率在很大程度上影响沥青混合料的力学响应,二者具有一定的等效性.由于设备参数和试验条件的限制,难以获取全温度域和频率范围内的沥青混合料响应参数,可以通过时温转换法进行转换绘制主曲线,从而预估某一给定温度条件下的动态响应.

Sigmoidal 模型可以用来描述沥青混合料的动态模量主曲线^[17],采用非线性最小二乘法,将不同条件下的试验数据进行拟合来获得移位因子实现平移,如下式:

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma \lg(f_f)}}, \tag{1}$$

式中: E^* 为动态模量,MPa; δ 为最小动态模量,MPa; α 为动态模量的最大值,MPa; β 、 γ 分别为回归参数,与沥青性质有关.

对于给定的参考温度,将加载频率进行水平移动的幅度称为移位因子,移位因子 $\alpha(T)$ 与缩减频率 f_f 之间的关系:

$$f_f = f \cdot \alpha(T), \tag{2}$$

式中: f_f 为缩减频率,Hz; f 为加载频率,Hz; $\alpha(T)$ 为移位因子.

为了确定动态模量主曲线,移位因子可由下式计算:

$$\lg[\alpha(T)] = \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right), \tag{3}$$

式中: ΔE_a 为活化能,J/mol; T_r 和 T 分别为参考温度和试验温度,℃.在参考温度下,移位因子 $\alpha(T) = 1$.

缩减频率可用 Arrhenius 方程按下式计算:

$$\lg f_{\gamma} = \lg f - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right),$$

(4)

式中: f_{γ} 为缩减频率,Hz; f 为试验频率,Hz.

进而可得到主曲线方程:

$$\lg(\lg|E^*|) = \delta + \frac{\alpha - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \left[\lg f - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \right]}}.$$

(5)

参考温度为 21.1℃,将不同条件的动态模量数据,采用 Origin 软件对 Sigmoidal 函数进行拟合,得到两种沥青混合料的 ΔE_a 及移位因子如表 5 所示,动态模量主曲线回归参数列于表 6 中.

计算分析过程中参数初始值: $\beta = -1.0, \gamma = -0.5, \delta = 0.5, \Delta E_a = 200\,000$.

表 5 两种沥青混合料的移位因子

Tab.5 Shift factors of mixtures

混合料种类	转换温度/℃	活化能 ΔE_a /J	移位因子 $\lg[\alpha(T)]$
基质沥青混合料	4.4	216 631	2.314
	21.1	0	0
	37.8	230 132	-2.194
	54.4	221 054	-3.989
炭黑改性沥青混合料	4.4	208 657	2.228
	21.1	0	0
	37.8	231 061	-2.203
	54.4	225 022	-4.060

表 6 动态模量主曲线的回归参数

Tab.6 Fitting parameters of dynamic modulus master curve

混合料种类	α	β	γ	δ	R^2
基质沥青混合料	4.322 05	2.071 60	-1.109 36	-0.532 70	0.994 70
炭黑改性沥青混合料	4.374 54	2.180 26	-1.156 43	-0.620 96	0.998 65

将试验数据沿着对数频率坐标轴水平移动可以得到动态模量主曲线,从而将加载频率和温度函数的动态模量简化为频率的函数.活化能反映了动态响应参数向主曲线移动时需要克服的能垒,活化能越大则说明曲线移动越困难,与 α 移位因子具有一致性.在低于参照温度时 $\lg[\alpha(T)] > 0$;高于参照温度时 $\lg[\alpha(T)] < 0$;等于参照温度时 $\lg[\alpha(T)] = 0$.由表 5 可知,在低于参照温度时,基质沥青混合料的活化能和移位因子高于炭黑改性沥青混合料;而在高于参照温度时,炭黑改性沥青混合料的活化能和移位因子绝对值大于基质沥青混合料.

3.3 动态响应参数主曲线分析

主曲线反映了沥青混合料动态响应与加载频率之间的关系,依据主曲线可以获知沥青混合料

在很宽加载频率范围的力学特性.炭黑改性和基质混合料的动态模量和相位角主曲线分别如图 4 和图 5 所示,动态模量及相位角主曲线对比如图 6 所示.

由图 4 可知,随着加载频率的增大,沥青混合料的动态模量逐渐增大,主曲线呈扁平状的“S”形分布.动态模量随温度的升高呈逐渐减小趋势,可见在较低的温度下,混合料主要表现为弹性,而在较高的温度下混合料的黏性更加显著.由图 5 可以看出,随着加载频率的增大,沥青混合料相位角先增大后减小,但在低频区数据较为分散,相位角主曲线不如动态模量主曲线光滑.随着温度的升高,沥青结合料的黏性越来越显著,相位角逐渐增大;但随着温度继续升高,相位角受矿料骨架的影响较大而又逐渐减小.由此可见,主曲线和移位

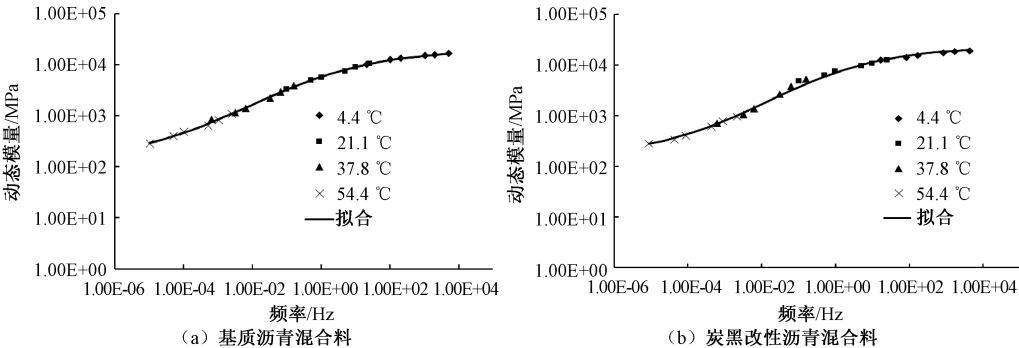


图 4 动态模量主曲线

Fig.4 Dynamic modulus master curve

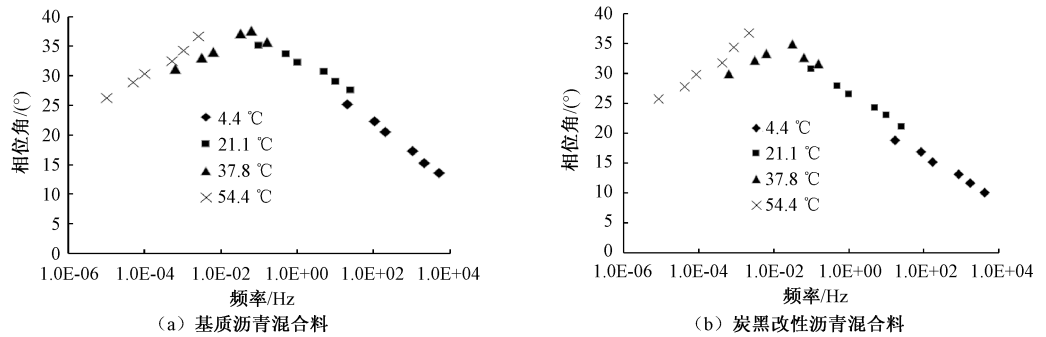


图 5 相位角主曲线
Fig. 5 Phase angle master curve

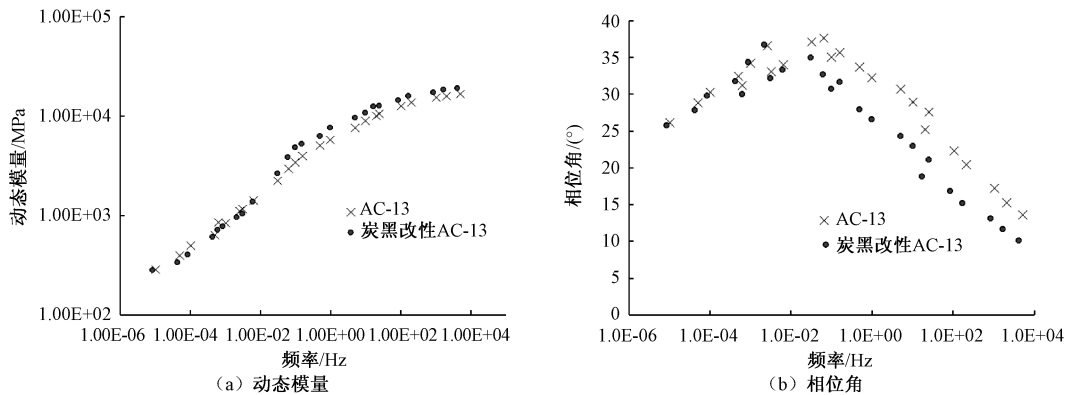


图 6 动态模量及相位角主曲线对比

Fig. 6 Comparison of dynamic modulus and phase angle master curves

因子可以用来表征加载频率和试验温度对炭黑改性沥青混合料的黏弹性动态响应。

由图 6 可以看出,在较高频率范围内,炭黑改性沥青混合料的动态模量稍高于基质沥青混合料,相位角显著低于基质沥青混合料;而在较低频率范围内,两种混合料的动态模量和相位角差异均不显著.如前所述,对于沥青混合料等黏弹性材料而言,加载频率和温度条件具有等效性.因此,结合图 2 和图 3 可知,炭黑改性沥青混合料在低于 37.8 °C 的动态模量更大,具有更好的抗变形能力;随着温度的升高,当温度超过 37.8 °C 时,两种混合料的黏弹性响应差异不大,即在低频或高温条件下的炭黑改性效果不显著。

4 结论

(1)炭黑改性沥青混合料与基质沥青混合料的动态模量和相位角变化趋势一致,随着温度的升高,两者的差异越来越小。

(2)炭黑改性沥青混合料的活化能 ΔE_a 和移位因子 $\lg[\alpha(T)]$ 在低于参照温度时小于基质沥青混合料,而在高于参照温度时大于基质沥青混合料。

(3)随着加载频率的增大,动态模量主曲线呈“S”形曲线逐渐增大,而相位角主曲线先增大后减小,但不如动态模量主曲线光滑,尤其在低频范围内数据分散.动态模量主曲线和移位因子可以较好地描述加载频率和试验温度对炭黑改性沥青混合料黏弹性响应的影响。

(4)炭黑改性沥青混合料在低于 37.8 °C 的动态模量更大,具有更好的抗变形能力;随着温度的升高,当温度超过 37.8 °C 时,两种混合料的黏弹性响应差异不大,即在低频或高温条件下的炭黑改性效果不显著。

参考文献:

[1] 郭应臣, 乔占平. 废橡胶制备燃料油和炭黑[J]. 环境污染与防治, 2001, 28(2): 82 - 83.
[2] 彭小芹, 肖国良. 废轮胎裂解炭黑的深加工及应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(4): 142 - 145.
[3] 郑远, 叶奋. AW、BLE、炭黑改性沥青的老化性能研究[J]. 公路, 2007(2): 127 - 130.
[4] 陈森, 陈浩, 王洪涛, 等. SBS/白炭黑复配改性沥青性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(6): 64 - 66.
[5] ZHU X Y. Influence of interfacial zone between asphalt mastic and aggregate on the elastic behavior of

- asphalt concrete[J]. Construction and building materials, 2013, 49(6): 797–806.
- [6] LITTLE D N, BUTTON J W, YOUSSEF H. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential[J]. Transportation research record, 1993(1417):49–57.
- [7] CHANG K G, MEEGODA J N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt[J]. Journal of materials in civil engineering, 1997, 12(5): 495–503.
- [8] SCHWARTZ C W, GIBSON N H, SCHAPERY R A, et al. Viscoplasticity modeling of asphalt concrete behavior[C]//Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. New York: ASCE, 2002: 144–159.
- [9] 孙雅珍, 朱传江, 吴刚兵, 等. 高黏弹沥青砂的黏弹性模型参数研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 244–247.
- [10] 周志刚, 傅搏峰. 用黏弹性理论评价沥青混合料的高温稳定性[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 54–56.
- [11] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲. 沥青混合料黏弹性响应影响因素分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(3): 96–100.
- [12] WITCZAK M W, KALOUSH K, PELLINEN T. Simple performance test for superpave mix design[R]. Transportation Research Board, Executive Committee Subcommittee for NCHRP. National Academy Press, Washington D. C., 2002.
- [13] 王昊鹏, 杨军, 施晓强, 等. 高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 12–17.
- [14] 刘红, 孔永健, 曹东伟. 加入聚酯纤维对沥青混合料动态模量的影响[J]. 公路交通科技, 2011, 28(8): 25–29.
- [15] 徐志荣, 常艳婷, 陈忠达, 等. 沥青混合料动态模量试验标准研究[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 1–8.

Analysis of Dynamic Response Master Curve of Carbon Black Modified Asphalt Mixture

LI Peilong¹, MA Songsong¹, LI Jiange¹, ZHANG Dongyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road Structure & Material Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou, 510507, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic response of carbon black modified asphalt mixture (CBMAM), the simple performance test (SPT) was conducted on CBMAM and base asphalt mixture under the different test conditions of test temperature and loading frequency. The change law of dynamic modulus and phase angle for the two mixtures was analyzed. Using the Sigmoidal model, the shift factor of dynamic modulus and model parameters were gained according to the data. The master curves of dynamic modulus and phase angle of asphalt mixture are obtained and analyzed comparatively. The results indicated that the activation energy ΔE_a and the absolute value of shift factor $\lg[(T)]$ of CBMAM were smaller than those of base asphalt mixture respectively at the temperatures lower than the reference temperature, while they were contrary at the temperatures higher than the reference temperature. The master curve of dynamic modulus went up like "S" curve continuously with an increase in loading frequency. Phase angles of asphalt mixtures go up firstly and then dropped with the increase in frequency. But the master curves of phase angle were not as smooth as those of dynamic modulus especially at high temperatures. The dynamic modulus master curve and shift factor could reflect the effect of loading frequency and temperature on the visco-elastic response of CBMAM. The dynamic modulus of CBMAM was bigger at temperatures lower than 37.8 °C, which has better resistance to deformation. When the temperature increased higher than 37.8 °C, there was no significant difference in the dynamic response of the two mixtures, the modification effect of carbon black for asphalt mixture was not very significant under the conditions of low frequency and high temperature.

Key words: road engineering; carbon black modified asphalt mixture; Simple Performance Test(SPT); dynamic modulus; phase angle