

文章编号: 0451-0712(2006)08-0163-04

中图分类号: U414.02

文献标识码: A

沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析

赵延庆, 吴 剑, 文 健

(江苏省交通科学研究院 南京市 210017)

摘 要: 研究中利用 Superpave 简单性能试验机(SPT)测量了 SMA13 和 Superpave20 两种沥青混凝土在不同温度和荷载作用频率下的动态模量。并分析了温度和荷载频率对动态模量和相位角的影响。本研究还根据时间~温度置换原理,通过非线性最小二乘拟合,确定了两种沥青混合料的动态模量主曲线和时间~温度转化因子,并利用相同的时间~温度转化因子形成了相位角主曲线,从而完全确定了沥青混合料的粘弹性性质。

关键词: 沥青混合料; 动态模量; 主曲线; 相位角; 时间~温度置换原理; 时间~温度转化因子

众所周知,沥青混合料在一个较宽的温度范围内呈现出粘弹性性质。描述材料粘弹性性质的基本参数包括动态模量、蠕变柔量和松弛模量等。这些参数不仅可以用来描述材料的线性粘弹性性质,还可以用来描述材料的非线性粘弹性和破坏特性。事实上这 3 个参数包含的信息是相同的,它们都反映了材料基本的蠕变和松弛特性,所以,这 3 个参数之间是可以转换的。在实践中直接测量松弛模量的恒应变松弛试验操作难以实现。测量蠕变柔量的恒应力蠕变试验虽然较易实现,但在试验中却不可能得到一个真正的矩形荷载,任何仪器都需要一定的时间才能使施加的荷载达到目标值,这使得测量得到的参数中存在一定的误差。而在试验中测量动态模量则比较容易实现,并且其试验精度能得到较好的控制。

本文中采用 Superpave 简单性能试验机(SPT)测量了沥青混合料在不同温度和荷载作用频率下的动态模量,并根据时间~温度置换原理(Time-Temperature Superposition principle)利用非线性最小二乘拟合的方法得到了参考温度下的动态模量主曲线和时间~温度转化因子,并进一步确定了相位角主曲线,用以描述沥青混凝土的粘弹性性质。

1 动态模量试验及结果分析

本研究中沥青混合料的动态模量采用 Superpave

简单性能试验机测定。试验规程为 AASHTO TP-62。动态模量试验可以采用应变控制方式或应力控制方式。本研究中采用应力控制方式,对试件施加正弦荷载,图 1 给出了动态模量试验中典型的应力应变曲线。不管采用何种控制方式,动态模量试验都可以得到 3 个参数:复数模量 E^* 、动态模量 $|E^*|$ 和相位角 φ 。复数模量是一个复数,用来确定粘弹性材料的应力、应变特性,它由实部和虚部两部分组成,如下所示:

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

式中: E' 为存储模量, E'' 为损失模量。动态模量是复数模量的绝对值,反映了材料抵抗变形的能力,动态模量的定义如下:

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (2)$$

动态模量可以通过试验以达到稳定状态时的应力幅值和应变幅值的比值来确定,即:

$$|E^*| = \frac{\sigma_{amp}}{\epsilon_{amp}} \quad (3)$$

式中: σ_{amp} 为应力幅值; ϵ_{amp} 为应变幅值。

相位角 φ 描述材料粘性部分和弹性部分的相对大小,由下式确定:

$$\varphi = 2\pi f \Delta t \quad (4)$$

式中: f 为施加荷载的频率; Δt 为试验中应变滞后于应力的时间。对于完全弹性材料 $\varphi = 0^\circ$, 对于完全粘性材料 $\varphi = 90^\circ$ 。随着相位角的增加,材料的粘

性性质增加。存储模量、损失模量、动态模量及相位角有如下的关系：

$$E' = |E^*| \cos \varphi \quad (5a)$$

$$E'' = |E^*| \sin \varphi \quad (5b)$$

通常通过对试验数据的分析可以得到动态模量和相位角,利用关系式(5)就可以确定该种材料的存储模量和损失模量,进而得到复数模量。应当注意,在许多文献中,为了简便动态模量也用 E^* 来表示,应加以区分。

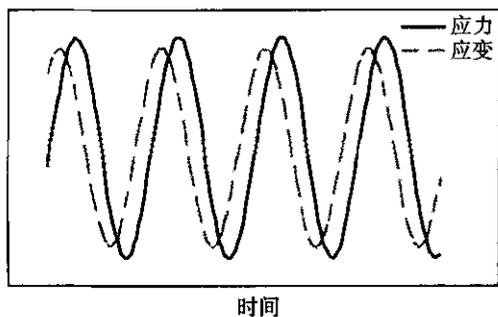


图 1 动态模量试验应力、应变曲线

本次试验中所用的沥青混合料类型为江苏省某高速公路上面层所用的 SMA13 和中面层所用的 Superpave20 混合料。SMA13 和 Superpave20 采用相同的改性沥青和石料,沥青等级为 PG76-22,石料为玄武岩。由于上、中面层施工结束后检测的孔隙率均为 4.1%,所以动态模量试验中两种混合料试件的空隙率也采用 4.1%。试件成型采用 Superpave 旋转压实仪,根据 AASHTO TP-62 的要求,对旋转压实仪成型的试件(180 mm×150 mm)进行取芯,动态模量试验对芯样试件(150 mm×100 mm)进行。本研究中对旋转压实仪成型的试件进行试压和调整,使芯样试件的空隙率达到 4.1%,然后进行试验。

动态模量试验在 5 个温度下进行,分别为 4℃、15℃、25℃、40℃和 55℃,在每一个温度下,在 7 个不同频率下(25 Hz、20 Hz、10 Hz、5 Hz、1 Hz、0.5 Hz、0.1Hz)分别测定动态模量和相位角。图 2 和图 3 给出了 SMA13 和 Superpave20 的动态模量试验结果,图 4 和图 5 分别给出了相位角的试验结果。

可见动态模量和相位角受温度和荷载作用频率的影响很大。随着温度的增加和荷载作用频率的降低,动态模量逐渐减小。而相位角随温度和荷载频率的变化则有所不同。一般来说,随着温度的增加或荷载作用频率的减少,沥青混合料的粘性性质增加,意

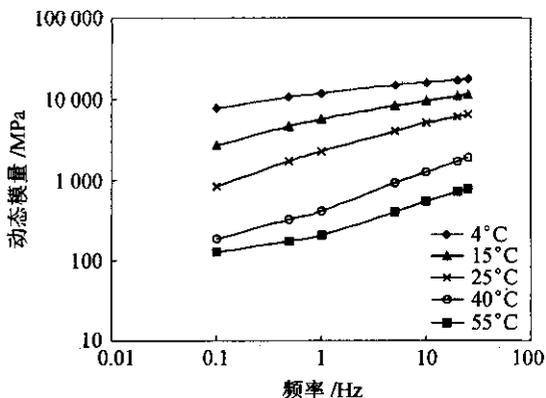


图 2 SMA13 动态模量试验结果

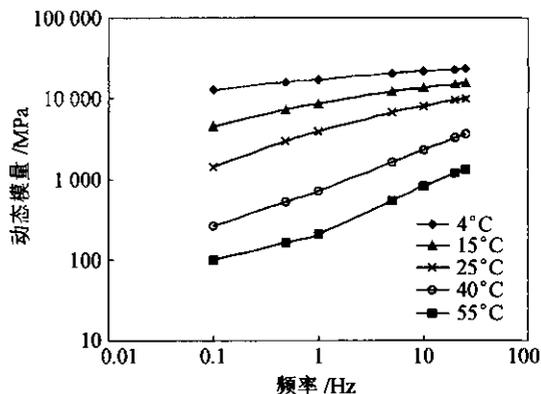


图 3 Superpave20 动态模量试验结果

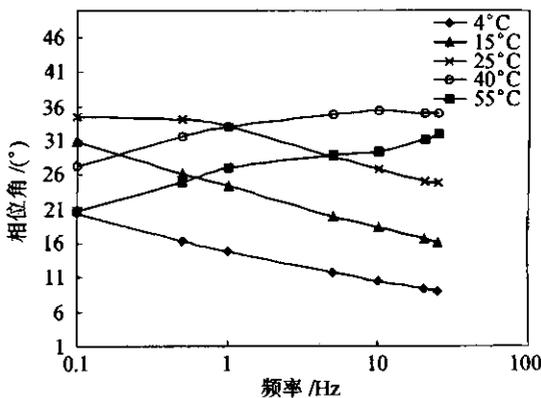


图 4 SMA13 相位角试验结果

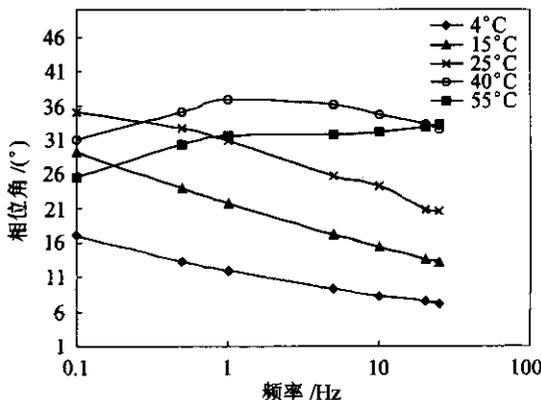


图 5 Superpave20 相位角试验结果

意味着相位角应增加。本研究中当试验温度小于或等于25℃时,两种混合料相位角的变化符合这一规律。然而当温度升高到40℃时,相位角随荷载作用频率的减少先增加后减少。当温度升高到55℃时,相位角随荷载频率的减少而减少。并且55℃时的相位角小于40℃时的相位角(除了Superpave20在25Hz)。造成这种相位角变化规律异常的主要原因是在低温高频荷载作用下,混合料的性能受沥青胶结料性质的影响更大;但在高温低频作用时,沥青胶结料变软,矿料骨架的影响超过了沥青粘性的影响,因为矿料是弹性材料,相位角为零,所以沥青混合料的相位角会下降。

2 动态模量主曲线的确定及分析

沥青混凝土的性质受温度和荷载作用时间的影响很大。对于粘弹性材料,同样的力学性质可以在高温~高荷载频率或在低温~低荷载频率下得到。对于粘弹性材料在不同温度和荷载作用频率下得到的力学性质可以通过平移后形成的一条在参考温度下的光滑曲线,称为主曲线(master curve),这即为粘弹性材料的时间~温度置换原理。利用主曲线,就可以对该粘弹性材料的长期力学性质进行预测,而不必进行很长时间的试验。同样,对于该材料在很短荷载作用时间(或很高频率)时的力学性质,由于仪器设备的限制,不可能从试验中得到,但利用主曲线就可以确定。另外主曲线也是进行粘弹性材料本构关系分析的基本输入参数。

本文利用以上在不同温度、不同频率下得到的沥青混合料的动态模量,根据时间~温度置换原理,确定了本研究中所用沥青混合料的动态模量主曲线。不同温度下的动态模量的水平平移是通过非线性最小二乘拟合实现的,使之形成西格摩德(Sigmoidal)函数,如下式所示^[1]:

$$\lg(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\lg f_r)}} \quad (6)$$

其中:|E*|为动态模量; f_r 为参考温度下的荷载频率,也称为缩减频率; δ 、 α 、 β 、 γ 为回归系数; δ 代表动态模量的最小值, $\delta + \alpha$ 代表动态模量的最大值; β 、 γ 为描述西格摩德函数形状的参数。

本研究中确定的参考温度为25℃下的SMA13和Superpave20的动态模量主曲线分别绘于图6和图7,可见利用动态模量主曲线就可以确定该材料在很高或很低荷载作用频率下的力学参数。

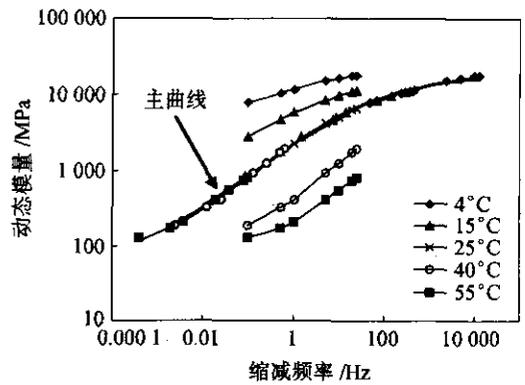


图6 SMA13 动态模量主曲线(参考温度:25℃)

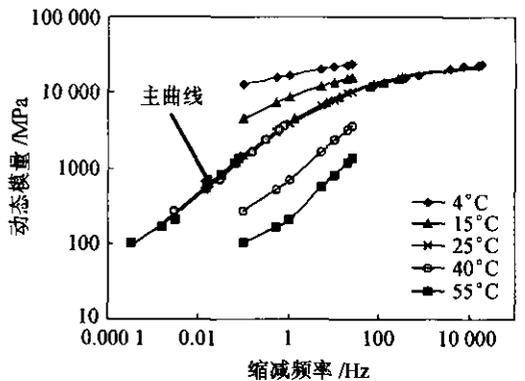


图7 Superpave20 动态模量主曲线(参考温度:25℃)

另外,将不同温度下的动态模量平移形成主曲线,就可以得到各个温度下的时间~温度转化因子 a_T ,时间~温度转化因子代表了各温度下的动态模量曲线到参考温度下主曲线的平移距离,它们可以在非线性拟合中同时确定。式(6)中的缩减频率和时间~温度转化因子有如下的关系:

$$f_r = f \times a_T \quad (7)$$

本研究中得到的两种混合料在不同温度下的时间~温度转化因子见图8。图7中的动态模量主曲线描述荷载作用频率对材料性质的影响,图8中的时间~温度转化因子描述了温度对材料性质的影响,这样动态模量主曲线和转化因子合起来就可以描述粘弹性材料对温度和荷载频率的敏感性。

图8中的时间~温度转化因子是从动态模量主曲线形成过程中得到的。这些因子可以用来形成沥青混合料其他粘弹性参数(如相位角、蠕变柔量、松弛模量)的主曲线。本研究中利用图8所示的时间~温度转化因子,形成了SMA13和superpave20两种混合料在参考温度为25℃时的相位角主曲线,如图9和图10所示。可见,同样的时间~温度转化因子可以用来形成动态模量主曲线和相位角主曲线。

至此本研究中得到了SMA13 和superpave20 的动态模量主曲线、相位角主曲线和时间~温度转化因子, 这些参数就可以全面地描述沥青混凝土的粘弹性性质。

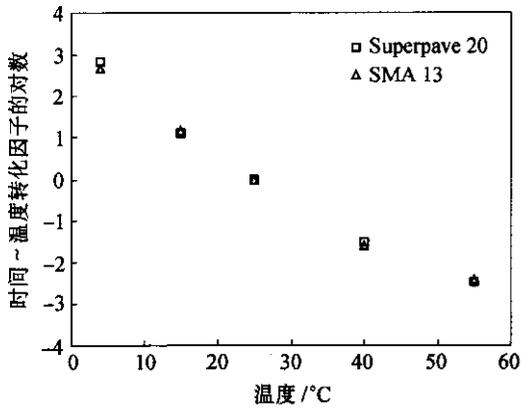


图 8 时间~温度转化因子

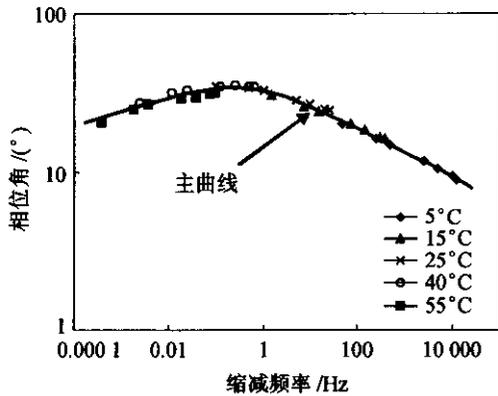


图 9 SMA13 相位角主曲线(参考温度:25℃)

3 结语

本研究中利用 Superpave 简单性能试验机(SPT)测量了SMA13 和Superpave20 两种沥青混凝土在不同温度和荷载作用频率下的动态模量。发现

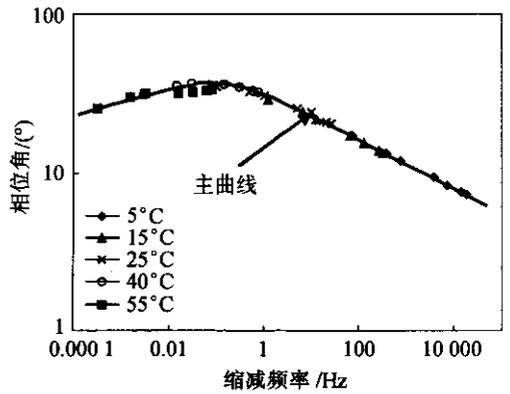


图 10 Superpave20 相位角主曲线(参考温度:25℃)

沥青混凝土的动态模量随温度的增加或荷载作用频率的减小而减小。在温度较低及荷载频率较高时, 相位角随温度的增加或荷载作用频率的减小而增加。但在温度较高及荷载频率越低时, 由于矿料骨架的影响增加, 相位角随温度的增加或荷载作用频率的减小而减小。

本研究还根据时间~温度置换原理, 利用不同温度和荷载频率下的动态模量通过非线性最小二乘拟合, 确定了两种沥青混合料的动态模量主曲线和时间~温度转化因子。并利用相同的时间~温度转化因子形成了相位角主曲线, 从而可以全面地描述沥青混合料的粘弹性性质。

参考文献:

[1] ARA. Guide for Mechanistic-Empirical Design [A]. National Cooperative Highway Research Program 1-37A[M]. Transportation Research Board, 2004.
 [2] Huang Y. Pavement Analysis and Design[M]. Prentice Hall, New Jersey, 1993.
 [3] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.

Determination and Analysis of Dynamic Modulus of Asphalt Mixture and Its Master Curve

ZHAO Yan-qing, WU Jian, WEN Jian

(Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: Dynamic moduli of SMA13 and Superpave20 at different temperatures and frequencies are tested using Superpave simple performance tester (SPT), and the effects of temperature and frequency on dynamic modulus and phase angle studied in this paper. The dynamic modulus master curves and time-

添加北美岩沥青的混合料路用性能试验研究

吴旷怀¹, 伦兴²

(1. 广州大学土木工程学院 广州市 510405; 2. 广州新粤沥青有限公司 广州市 510101)

摘要: 采用不同用量的北美岩沥青(Gilsonite)在高温条件下对石料进行预拌裹覆,然后再添加沥青和改性沥青拌制成沥青混合料,并对其各项路用性能进行了对比试验研究。试验结果表明,添加适量的北美岩沥青后沥青混合料的高温稳定性显著提高,低温性能也有所改善,抗水损害等各项性能指标良好。

关键词: 北美岩沥青; 沥青混合料; 路用性能

天然沥青是石油长期直接与自然界空气、水等接触,其轻质部分在太阳、地热等自然环境的影响下蒸发,经过长达亿万年的沉积、变化,在热、压力、氧化、聚合、触媒、细菌的综合作用下生成的沥青类物质。由于常年与自然环境共存,故天然沥青性质特别稳定。其存在形式有湖沥青(Lake Asphalt)、岩石沥青(Rock Asphalt)、砂石沥青(Sand Asphalt)和沥青岩(Asphaltite)等。

湖沥青(Lake Asphalt)。地下的沥青溢到地表而形成。通常含有大量的泥沙杂质,灰分含量高。其代表有特立尼达湖沥青 TLA 和百慕大湖沥青。

岩石沥青(Rock Asphalt)。沥青流入多空隙的岩石中形成岩石沥青,一般沥青含量在10%左右,岩石沥青砸成小碎片后,可作为集料来使用。

砂石沥青(Sand Asphalt)。沥青渗入砂层形成砂石沥青,一般沥青含量在20%左右,其代表有印度尼西亚的布敦海底沥青 BMA。

沥青岩(Asphaltite)。沥青岩是石油从地壳中冒出,流入岩石裂隙中,经漫长岁月蒸发凝固而形成的天然沥青,沥青岩几乎接近于纯沥青,根据产地和品质的不同,沥青岩主要有硬沥青(Uintaite)、脆沥青

(Grahamite)和辉沥青(Glance Pich)等种类。硬沥青(Uintaite)又名 Gilsonite 或 Uintahite,专指产于美国犹他州东北部的沥青岩,在中国俗称北美岩沥青。由于习惯的原因,国内所说的“岩沥青”实际上不仅包括了沥青含量接近100%的沥青岩,也包含了沥青含量在10%~20%的岩石沥青和砂石沥青。我国在新疆、四川等地也发现了沥青岩矿脉,国内科研机构正在研究我国发现的沥青岩与国外的沥青岩,特别是与美国的硬沥青在结构和性能上的差异^[1]。

在国外,北美岩沥青通常是作为沥青或沥青混合料的改性剂在使用,其特点是能显著提高沥青混合料的水温稳定性,提高抗车辙能力,以干拌法生产的沥青混凝土不仅具有优异的高温稳定性和抗剥落性能,还保持着良好的低温抗裂性能^[2~5]。在国外,用天然沥青来改善道路沥青的性能,提高沥青混合料路用性能已有许多经验。在国内,随着研究^[6~7]的不断深入,天然沥青以其很多独有的特性,也正逐渐被业内所认识和接受。本文采用不同掺量的北美岩沥青(Gilsonite)在高温条件下对石料进行预拌裹覆,然后再添加沥青拌制成沥青混合料,并对它们进行对比试验以评价北美岩沥青的综合路用性能。

收稿日期: 2006-01-28

temperature shift factors of the two mixtures are determined using nonlinear least square regression in accordance with the time-temperature superposition principle. The same time-temperature shift factors are used to construct the phase angle master curves. Thus, all viscoelastic properties of asphalt mixture are determined in this study.

Key words: dynamic modulus; master curve; phase angle; time-temperature superposition principle; time-temperature shift factor