

ECA-10 型沥青混合料动态性能研究

翟晓静, 张庆宇*, 曹胜语

(河北交通职业技术学院 土木工程系, 河北 石家庄 050091)

摘要: 为了确定 ECA-10 型沥青混合料的动态性能,采用简单性能试验仪进行动态模量试验和动态蠕变试验,运用时温等效原理和修正 Burgers 模型分别构建了 ECA-10 型沥青混合料的动态模量主曲线和黏弹性力学模型。研究结果表明:相同温度和加载频率下, ECA-10 型沥青混合料动态模量普遍较高,抗变形能力较强;依据 Sigmoidal 函数方程,建立了参考温度为 20℃时 ECA-10 型沥青混合料的动态模量主曲线,线簇光滑连续,具有较高的拟合度。在相同荷载作用次数下, ECA-10 型沥青混合料随着温度或偏应力的增大,其动态蠕变逐渐增大。建立了重复荷载作用下 ECA-10 型沥青混合料黏弹性力学模型,相关性系数在 0.98 以上,其拟合结果与实测结果吻合较好。

关键词: 道路工程; ECA-10 型沥青混合料; 动态模量; 动态蠕变; 黏弹性力学模型

易密实沥青混凝土(Easy-Compact Hot-Mix Asphalt,简称 ECA)是一种细粒式薄层、抗车辙型沥青混凝土。通常用作沥青路面超薄罩面,是一种预防性养护材料,厚度为 2~3 cm,集料公称最大粒径为 9.5 mm,即 ECA-10。众所周知,行车荷载对沥青路面的作用具有瞬时性,且长期处于应力应变交叠变化状态。采用动态性能试验测试材料的力学参数进行路面结构设计或性能预估研究,已是国内外普遍采用的方法。沥青混合料是一种黏弹性材料,其力学响应依赖加载时间、温度和荷载,永久变形是沥青路面最主要的早期病害之一。该文采用简单性能试验机研究 ECA-10 型沥青混合料动态模量和动态蠕变规律,构建时温等效下动态模量主曲线和黏弹性力学模型,为 ECA-10 型沥青混合料路面结构设计参数和混合料性能评价指标提供参考。

1 试验准备

1.1 原材料及技术性质

(1) 沥青。采用 SBS 改性沥青,其性能指标试验结果满足技术规范要求。

(2) 集料及填料。超薄罩面 ECA-10 型沥青混

合料所采用的粗集料为辉绿岩碎石,细集料为 0~2.36 mm 机制砂,其技术指标满足规范要求。填料为石灰岩矿粉,表观密度实测值为 2.813 g/cm³,满足技术规范不小于 2.5 g/cm³ 的要求。

(3) 聚酯纤维。超薄罩面 ECA-10 型沥青混合料所采用的聚酯纤维为上海某公司生产,聚酯纤维的添加量为沥青混合料质量的 0.25%。技术性能指标如表 1 所示。

表 1 聚酯纤维技术指标

抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	含水率/%	熔点/℃	直径/ μm	长度/cm	比重
≥ 500	≥ 35	≤ 5	≥ 250	15~30	6 \pm 1	1.36~1.40

(4) 温拌剂。一种表面活性类材料,可提高较低温度下沥青混合料的拌和性能和可压实性,温拌剂为上海某公司,温拌剂的添加量为沥青质量的 5%(样品为稀释液)。

1.2 混合料配合比设计

超薄罩面层沥青混合料采用的级配类型为 ECA-10 型,矿料级配依据目标组成设计进行掺配,级配组成如表 2 所示。

收稿日期:2018-12-10

基金项目:河北省重点研发计划项目(编号:172176442);河北省高等学校科学技术研究重点项目(编号:ZD2018201);河北省科技计划项目(编号:16211232)

作者简介:翟晓静,女,博士,副教授,E-mail:441275720@qq.com

* 通信作者:张庆宇,男,教授,E-mail:584464701@qq.com

表 2 ECA-10 型沥青混合料级配组成

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	6.7	9.5	13.2
合成级配	5.7	9.1	12.4	16.1	21.5	27.6	35.5	49.4	87.7	100
下限	4	6	7	10	14	18	20	35	80	100
上限	8	12	20	25	30	36	40	55	100	100

1.3 确定最佳油石比

采用马歇尔试验,按照规范要求,确定 ECA-10 型沥青混合料的最佳油石比为 5.3%。

2 ECA-10 型沥青混合料动态模量研究

2.1 动态模量试验

试验采用简单性能试验机,半正弦波加载,采用 25、20、10、5、2、1、0.5、0.2 和 0.1 Hz 作为试验的加载频率,试验温度为 5、15、25 和 40 °C。采用旋转压实仪 (SGC) 搓揉成型直径为 150 mm、高为 200 mm 的圆柱体试件,钻芯取样,再切割成直径 100 mm、高 150 mm 的圆柱体试件。

试验对 ECA-10 型沥青混合料分别在不同加载频率、不同温度下进行了 3 组平行试验,将 3 次试验的平均值作为试验结果,结果如图 1、2 所示。

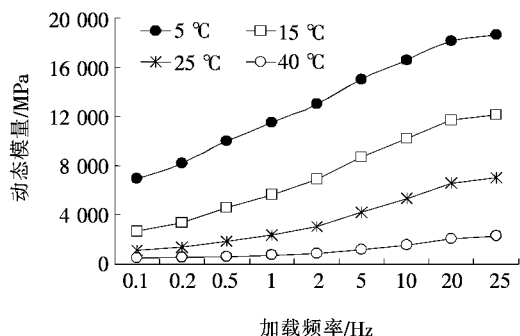


图 1 ECA-10 型沥青混合料动态模量试验结果

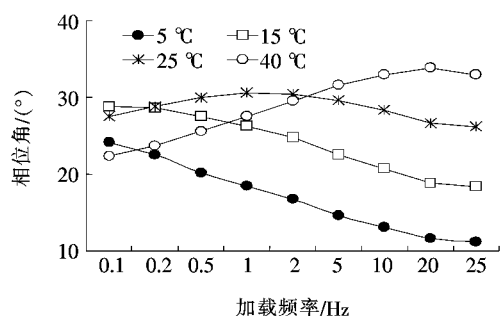


图 2 ECA-10 型沥青混合料相位角试验结果

由图 1、2 可知:ECA-10 型沥青混合料随着温度

的升高,动态模量逐渐减小。温度从 5 °C 升高到 40 °C,动态模量平均降幅高达 91.7%。温度在 5 °C 和 15 °C 时,ECA-10 型沥青混合料的相位角随加载频率的增大而逐渐减小;温度在 25 °C 和 40 °C 时,ECA-10 型沥青混合料的相位角随加载频率的增大呈先增大后减小变化。究其原因,高温低频条件下,集料是沥青混合料的关键,沥青胶结料影响变小,而集料的相位角较小,因此,沥青混合料在高温低频时相位角较小。

2.2 动态模量主曲线

沥青混合料的动态模量主曲线通常运用非线性最小二乘法通过 Sigmoidal 型函数进行数值拟合得到:

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log t_r)}} \quad (1)$$

式中: E^* 为动态模量(MPa); t_r 为缩减时间(s); δ 为动态模量 E^* 的最小值(MPa); $\delta + \alpha$ 为动态模量 E^* 的最大值(MPa); β 、 γ 为描述 Sigmoidal 型函数波形的参数。

将不同温度下的动态模量平移形成主曲线,关键在于求出时间-温度位移系数 $a(T)$ 。时间-温度位移系数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。式(2)为缩减时间、加载时间与位移系数的关系。

$$\log[a(T)] = \log t - \log t_r \quad (2)$$

式中: $a(T)$ 为位移系数; t 为加载时间(s); T 为温度(°C)。

该文采用基于沥青混合料矿料间隙率 VMA 和沥青填充率(沥青饱和度)VFA 确定动态模量主曲线的方法。根据 Christensen 和 Andersen 在 SHRP 计划中的研究结果,通过 Hirsch 模型可以合理地估计动态模量的极大值,如式(3)所示:

$$|E^*|_{\max} = P_c \left[4\,200\,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 435\,000 \times \left(\frac{VFA \times VMA}{10\,000} \right) \right] + \frac{1 - P_c}{\left[\frac{\left(1 - \frac{VMA}{100} \right)}{4\,200\,000} + \frac{VMA}{435\,000(VFA)} \right]} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{\left[20 + \frac{435\,000(VFA)}{VMA}\right]^{0.58}}{650 + \left[\frac{435\,000(VFA)}{VMA}\right]^{0.58}} \tag{4}$$

式中： $|E^*|_{\max}$ 为最大极限模量 [psi (1 MPa = 145 psi)]; VMA 为矿料间隙率 (%); VFA 为沥青填隙率 (%)。

ECA-10 型沥青混合料的 VMA = 15.6%、VFA = 71.2%，采用式(3)、(4)计算最大极限模量，并取对数作为 Max；ECA-10 型沥青混合料的 Max = 6.521。

该文采用阿伦尼斯(Arrhenius)方程计算缩减时间，如式(5)所示：

$$\log t_r = \log t - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \tag{5}$$

式中： T_r 为参考温度(℃)； T 为试验温度(℃)； ΔE_a 为拟合系数。

将式(5)代入式(1)，主曲线方程可表示为：

$$\log(E^*) = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left[\log t - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \right]}} \tag{6}$$

将式(2)和式(5)联立，各个温度下的位移系数可表示为：

$$\log[a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \tag{7}$$

将计算的 Max 和选定的参考温度 $T_r = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 代入式(6)。该文利用 lstop1.5 软件数值拟合在不同温度和频率条件下试验动态模量的对数值与式(6)预估的动态模量对数值之平方误差的总和最小确定拟合参数。拟合结果如表 3 所示。

表 3 Sigmoidal 主曲线方程参数拟合结果

混合料类型	δ	β	γ	ΔE_a	R^2
ECA-10	0.1	-0.145	-0.172	195 618	0.99

由表 3 可知：其相关系数平方接近于 1，表明相关密切，拟合良好。将表 3 中主曲线方程拟合参数代入式(7)，即可求出 $T_r = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同温度的位移系数，如表 4 所示。

表 4 ECA-10 不同温度的位移系数

$\log[a(5)]$	$\log[a(15)]$	$\log[a(20)]$	$\log[a(25)]$	$\log[a(40)]$
1.879	0.605	0.000	-0.584	-2.226

根据表 4 中不同温度的平移因子可建立参考温度 $T_r = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 ECA-10 的动态模量主曲线，见图 3。

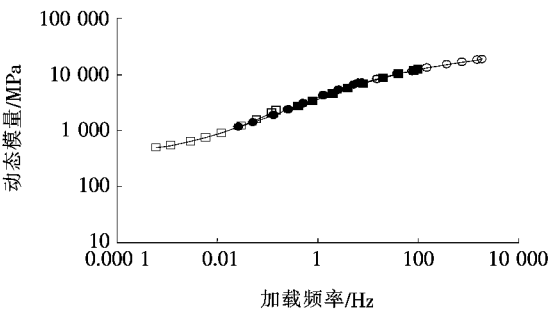


图 3 ECA-10 型沥青混合料动态模量主曲线

3 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变研究

3.1 动态蠕变试验

试验采用 AMPT/SPT 沥青混合料性能测试仪。试验方案：应力水平为 0.4、0.7、1.0 MPa，无围压；试验温度为 40、60 ℃；加载波形为半正弦波；荷载作用次数达到 1 800 次或微应变达到 50 000 $\mu\epsilon$ 时停止试验。60 ℃、1.0 MPa 时 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变破坏如图 4 所示。



图 4 60 ℃、1.0 MPa 时 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变破坏

不同温度和不同偏应力条件下，ECA-10 型沥青混合料动态蠕变规律见图 5、6。

由图 5、6 可知：随着荷载作用次数的增多，ECA-10 型沥青混合料的应变逐渐增大；在温度和荷载作用次数相同时，ECA-10 型沥青混合料随着偏应力越大，其应变越大。

由图 5 可知：ECA-10 型沥青混合料在 40 ℃ 时呈两阶段变形，即变形迁移期和稳定期，以 0.4 MPa 的平均微应变为基准，其 0.7 MPa 和 1.0 MPa 分别增长了 39% 和 132%，可见荷载应力的增大，导致沥青混合料变形成倍增加。

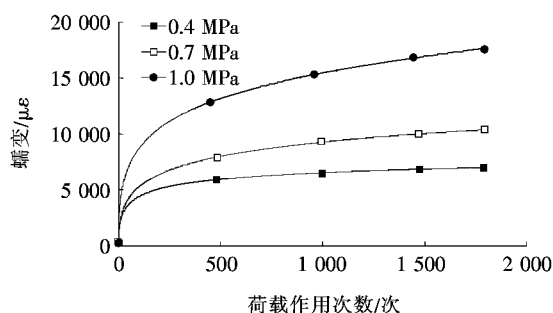


图 5 ECA-10 型沥青混合料在 40 °C 下动态蠕变规律

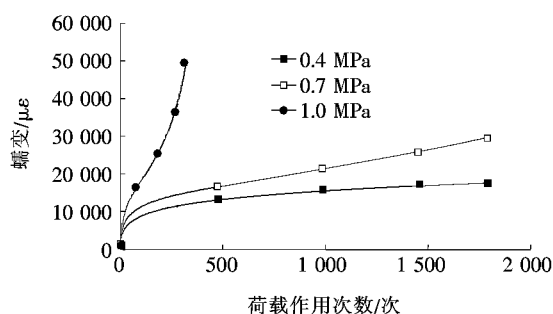


图 6 ECA-10 型沥青混合料在 60 °C 下动态蠕变规律

由 6 可知:在 60 °C 高温阶段,偏应力 1.0 MPa 时, ECA-10 型沥青混合料呈三阶段变形,即变形迁移期、稳定期和破坏期,沥青混合料应变急剧增加,因此,严格控制轮胎的荷载应力是减轻路面永久变形的重要措施。

不同偏应力作用下 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变曲线见图 7。

由图 7 可知:温度是影响 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变的重要因素。在相同偏应力水平下,同一循环荷载作用次数下 ECA-10 型沥青混合料的动态蠕变随温度的升高而增大。

3.2 黏弹性力学模型

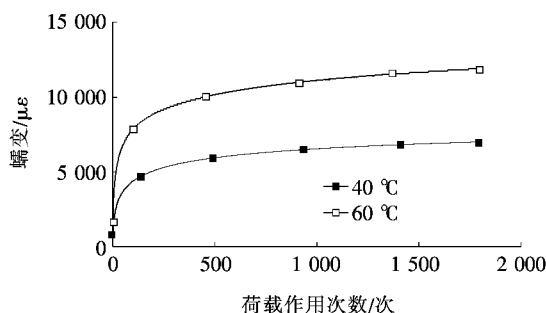
为了更好地表达沥青混合料的黏弹性行为,该文以修正 Burgers 模型为基础,建立了重复荷载作用下沥青混合料黏弹性力学模型,如图 8 所示。

推导可得考虑行车荷载重复作用存在间歇时间的沥青混合料黏弹性力学模型为:

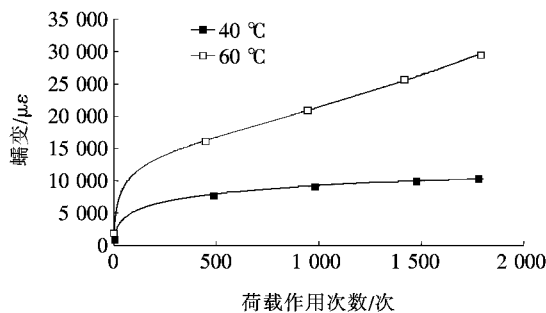
$$\epsilon_{P/N} = \sigma_0 P_1 (1 - e^{-0.2 P_2 N}) + \sigma_0 P_3 (1 - e^{-P_4 N}) \quad (8)$$

采用式(8)对试验数据进行拟合,采用 Matlab 软件编写前述迭代过程相关程序,可得 ECA-10 沥青混合料力学模型拟合参数如表 5 所示。

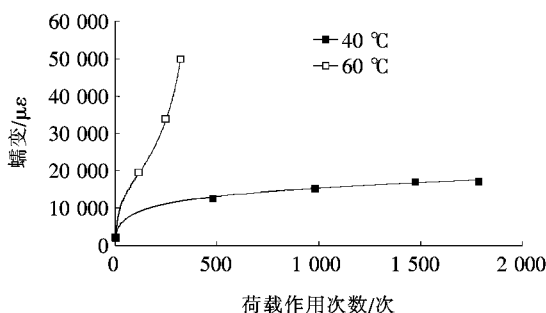
不同温度不同偏应力下 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变曲线较多,以温度 40 °C、偏应力 0.4 MPa 时



(a) 偏应力 0.4 MPa



(b) 偏应力 0.7 MPa



(c) 偏应力 1.0 MPa

图 7 不同偏应力时 ECA-10 型沥青混合料动态蠕变曲线

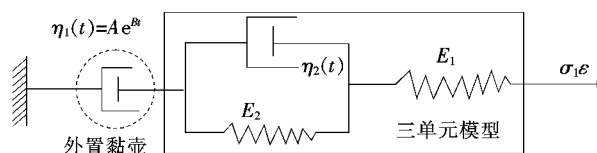


图 8 沥青混合料黏弹性力学模型

ECA-10 型沥青混合料的试验结果和拟合结果为例,其相关性见图 9,其他类似,不再赘述。

由图 9 可见:ECA-10 型沥青混合料黏弹性力学模型的拟合曲线与动态蠕变实测曲线拟合良好,基本一致。由表 5 可知:ECA-10 型沥青混合料黏弹性力学模型拟合参数的相关性系数均在 0.98 以上。综上所述,考虑行车荷载重复作用存在间歇时间的沥青混

表 5 ECA-10 型沥青混合料力学模型拟合参数

温度/ ℃	偏应力水 平/MPa	力学模型参数				相关性 系数 r
		P_1	P_2	P_3	P_4	
40	0.4	7 619.909 9	0.010 7	9 801.278 6	0.051 1	0.99
	0.7	6 804.882 2	0.181 9	8 259.552 9	0.001 6	0.99
	1.0	10 291.915 7	0.006 7	7 961.424 8	0.038 3	0.99
60	0.4	11 799.426 1	0.009 9	17 835.835 5	0.065 1	0.99
	0.7	327 760.123 6	0.000 2	16 117.553 6	0.031 8	0.99
	1.0	5 938.142 1	0.513 1	999 996.914 3	0.000 1	0.98

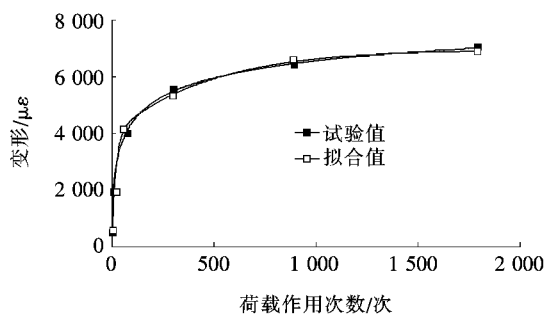


图 9 ECA-10 拟合永久变形曲线和
实测曲线对比(40 °C,0.4 MPa)

合料黏弹性力学模型较好地模拟了沥青混合料永久变形的发展规律,可为沥青路面的永久变形预估提供支撑。

4 结论

(1) 在相同温度和加载频率下,ECA-10 型沥青混合料动态模量普遍较高,抗变形能力较强。根据时温等效原理,构建了 ECA-10 型沥青混合料 20 °C 动态模量主曲线方程,线簇光滑连续,具有较高拟合度。

(2) 在相同荷载作用次数下,ECA-10 型沥青混合料随着温度或偏应力的增大,其动态蠕变逐渐增大。

(3) 建立了重复荷载作用下 ECA-10 型沥青混合料黏弹性力学模型,相关性系数在 0.98 以上,其拟合结果与实测结果吻合较好。

参考文献:

[1] 袁青泉,外掺剂对易密实沥青混凝土性能影响研究[J].公路,2013(8).

[2] AASHTO Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Mixtures[S].

[3] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].

[4] 栗培龙,李建阁,邹鹏,等.沥青混合料的动态响应影响因素分析[J].公路,2017(5).

[5] 尹应梅,张肖宁.基于动态蠕变实验的沥青混合料本构关系研究[J].功能材料,2014(23).

[6] 赵毅,梁乃兴,秦旻,等.PR-Module 改性沥青混合料力学性能[J].长安大学学报:自然科学版,2015(4).

[7] 于雷,郭朝阳,陈小兵,等.橡胶沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].中外公路,2015(2).

[8] American Association of State Highway Transportation Officials.Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixture [R],2005.

[9] Christensen Jr D W, Pellinen T , Bonaquist R F. Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete [J].Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2003, 72:97-121.

[10] 周键伟,王大明,白琦峰.沥青混合料动态模量主曲线研究[J].公路工程,2009(5).

[11] 周志刚,刘飞,冯林.优化理论的沥青混合料蠕变本构模型经验性公式[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2009(1).

[12] 咸红伟,张肖宁.ECA-10 超薄磨耗层在高速公路预养护中的应用[J].中外公路,2011(1).