

文章编号: 1000-4750(2008)02-0193-04

基于蠕变试验的沥青粘弹性损伤特性

郑健龙,*吕松涛,田小草

(长沙理工大学公路工程学院, 湖南, 长沙 410076)

摘 要: 通过 BBR-弯曲梁流变仪在不同温度下进行沥青小梁蠕变试验, 得到了不同温度下的蠕变柔量曲线。通过移位, 按 WLF 公式推导得到了不同温度下的移位因子和各个温度下的蠕变柔量主曲线簇。用 Weibull 函数来描述沥青内部缺陷的分布, 将 Burgers 粘弹性模型与连续损伤因子模型二者耦合建立了沥青的粘弹性损伤模型。理论模型和试验结果比较吻合, 表明在沥青粘弹性性能评价过程中考虑损伤效应的影响是必要的。

关键词: 沥青路面; 粘弹性; 蠕变试验; 损伤; WLF 公式; 主曲线

中图分类号: U416.217 **文献标识码:** A

VISCOELASTIC DAMAGE CHARACTERISTICS OF ASPHALT BASED ON CREEP TEST

ZHENG Jian-long, *LU Song-tao, TIAN Xiao-ge

(School of Highway Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: The creep tests of asphalt beam were carried out at different temperatures by using Bending Beam Rheometer (BBR). The creep compliance curves were obtained. By shifting, the shift factors are deduced by Williams-Landel-Ferry (WLF) equation and the creep compliance master curve clusters are obtained at different temperatures. A viscoelastic damage model is established by coupling the continuum damage factor into the Burgers viscoelastic model. The distribution of the asphalt inner flaw is described by Weibull function. The theoretical model shows good agreement with the experiment results, which indicates that it is necessary to consider the influence of damage effect during the evaluations of asphalt viscoelastic characteristics.

Key words: asphalt pavement; viscoelastic; creep test; damage; WLF equation; master curve

沥青材料是一种简单热流变材料, 其变形与温度、加载时间有关^[1-3]。沥青路面的开裂、车辙、疲劳等破坏问题都与沥青的粘弹性特性有关, 因此, 需要在不同温度下进行沥青材料的相关试验。蠕变柔量是表征粘弹性材料的一个重要力学指标, 美国 SHRP 沥青结合料路用性能规范为评价沥青结合料的低温抗裂性能, 提出了采用弯曲梁流变仪 BBR (Bending Beam Rheometer) 的小梁弯曲蠕变试

验及直接拉伸试验 DTT (Direct Tension Test) 两个试验方法对其进行评价。这两个方法中, BBR 是主要的。

本文利用弯曲梁流变仪 BBR 在不同温度下进行沥青的弯曲梁蠕变试验, 结合粘弹性力学的模型理论同时引进损伤因子建立粘弹性连续损伤本构模型。由于在蠕变过程中同时考虑了损伤效应, 即蠕变损伤, 因此, 理论模型与试验结果吻合较好。

收稿日期: 2006-07-17; 修改日期: 2006-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408007); 高等学校博士学科点专项科研项目(20050536001)

作者简介: 郑健龙(1954—), 男, 湖南人, 教授, 博导, 校长, 中国力学学会理事, 湖南省力学学会副理事长, 从事道路工程和固体力学研究 (E-mail: zjl@csust.cn);

*吕松涛(1979—), 男, 河南郑州人, 博士生, 从事路基路面工程研究(E-mail: lstcs@126.com);

田小草(1970—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士, 从事路基路面工程研究(E-mail: tianxiaoge@126.com)。

1 试验简介

在不同的温度($T = -10^\circ\text{C}$ 、 $T = -12^\circ\text{C}$ 、 $T = -15^\circ\text{C}$ 、 $T = -20^\circ\text{C}$ 、 $T = -30^\circ\text{C}$)下采用弯曲梁流变仪(BBR)进行沥青的蠕变试验, 沥青小梁试件的尺寸为 $101.6\text{ mm}(L) \times 12.7\text{ mm}(b) \times 6.4\text{ mm}(h)$, 它利用专用的硅橡胶试模制作。计算机数据采集系统自动采集试验过程中的荷载、变形。

试验时梁的应力和应变以及蠕变柔量按式(1)~式(3)计算:

$$\sigma_0 = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{6h\delta(t)}{L^2} \quad (2)$$

式中: b 为小梁宽度/mm; h 为小梁高度/mm; L 为简支梁跨径/mm; P 为施加的恒定荷载/N, $P = 100\text{ g} \times 9.8\text{ N/kg} = 0.98\text{ N}$; $\delta(t)$ 为随时间 t 变化的跨中挠度/mm。

由应力 σ_0 应变 $\varepsilon(t)$ 可以计算出蠕变柔量, 计算公式如下:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{48I}{PL^3} \delta(t) \quad (3)$$

式中: $J(t)$ 为蠕变柔量/(1/MPa); $\varepsilon(t)$ 为蠕变试验时不同时刻的应变值/(mm/mm); σ_0 /MPa 为蠕变试验时的恒定应力; I 为梁的抗弯刚度/ mm^4 。

不同温度下的蠕变柔量试验结果如图 1 所示。

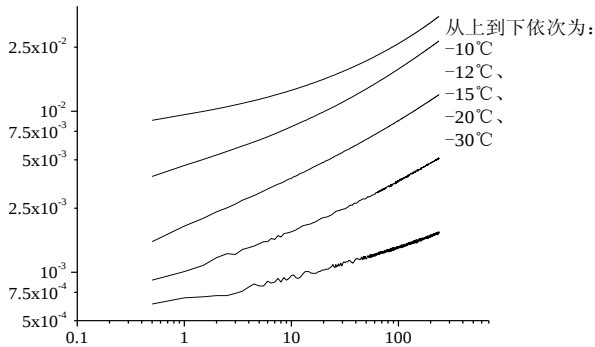


图 1 不同温度下的蠕变柔量曲线

Fig.1 The creep compliance curve at different temperatures

2 理论分析

2.1 沥青粘弹性本构模型的建立

2.1.1 微分型本构关系

微分型本构关系在求解某些问题时比较方便, 在粘弹性理论的早期发展中有广泛的应用。这种应力应变关系的数学表达直接与力学模型相联系。大

量的试验证明沥青是一种粘弹性流体材料, 沥青的力学特性应该包含了弹性、粘弹性及流动极限^[3-4]。材料流变模型的选择与确定, 应该遵循两个原则:

1) 模型能够很好地反映材料的力学特性; 2) 模型应尽可能简单、直观, 便于工程应用。沥青在大多数实际使用情况下, 它们的变形处于粘弹性状态。而在高温和长时间荷载作用下, 其变形则以粘性流动为主, Burgers 模型是一种粘弹性流体模型^[5-6], 可以用 Burgers 模型来描述其流变行为, 该模型已大量应用在沥青及沥青混合料的粘弹性分析当中。所以, 本文选用 Burgers 模型来模拟沥青的粘弹性行为。

Burgers 模型如图 2 所示:

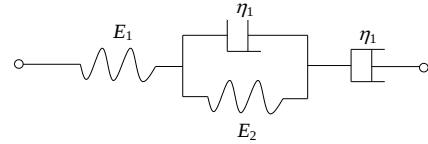


图 2 Burgers 模型

Fig.2 Burgers model

Burgers 模型的微分型本构方程为:

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} = q_1 \dot{\varepsilon} + q_2 \ddot{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: $p_1 = \eta_1 / E_1 + (\eta_1 + \eta_2) / E_2$, $p_2 = \eta_1 \eta_2 / E_1 E_2$, $q_1 = \eta_1$, $q_2 = \eta_1 \eta_2 / E_2$ 。

2.1.2 积分型本构关系

由 Boltzmann 迭加原理可得积分型本构关系为:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) + \int_0^t T(t-\xi) \frac{d\sigma(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (5)$$

式中, $J(t)$ 即为蠕变柔量, 对于 Burgers 模型其蠕变柔量 $J(t)$ 为:

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (6)$$

式中 $\tau = \eta_2 / E_2$, E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 为模型的粘弹性参数。

对于简单蠕变试验, $\sigma(t) = \sigma_0$ 为常量, 所以 $d\sigma(t)/dt = 0$, 因此, 式(5)退化为:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) \quad (7)$$

2.2 连续损伤因子的确定

在外载和环境的作用下, 由于细观结构的缺陷(如微裂纹、微孔洞等)引起的材料或结构的劣化过程, 称为损伤。沥青试件成型时, 内部不可避免地存在缺陷, 在蠕变应力的作用下, 材料内部将形成大量的微观缺陷, 这些微缺陷的形核、扩展(或膨

大)、汇合将造成材料的逐渐劣化直至破坏。从本质上讲,这些微缺陷是离散的,但作为一种简单的近似,在连续损伤力学^[7-8]中,所有的微缺陷背连续化,它们对材料的影响用一个或几个连续的内部场变量来表示,这种变量称为损伤变量。文献指出对于一些简单的情况,损伤演化方程具有指数函数的形式^[7,9],而在岩石、混凝土材料的损伤分析时有许多学者研究结果表明:Weibull 分布比较适合描述改类材料的损伤断裂过程^[9],因此可以用 Weibull 函数来描述这些缺陷的分布:

$$f(t) = \frac{m}{n}(t-\gamma)^{m-1} \exp\left(-\frac{(t-\gamma)^m}{n}\right) \quad (8)$$

损伤演化方程可以定义为:

$$\frac{dD(t)}{dt} = f(t) \quad (9)$$

对式(9)进行积分得:

$$D(t) = \int_{\gamma}^t \frac{m}{n}(x-\gamma)^{m-1} \exp\left(-\frac{(x-\gamma)^m}{n}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{(t-\gamma)^m}{n}\right) \quad (10)$$

这里位置参数 γ 相当于损伤的门槛值。沥青试件成型时可认为门槛值 $\gamma=0$, 则由 Weibull 函数定义的连续损伤因子为:

$$D(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{n}\right) \quad (11)$$

式中 m 、 n 为材料参数,由试验确定。

2.3 粘弹性连续损伤本构模型的建立

沥青小梁在弯拉蠕变过程中,损伤伴随着整个加载过程,因此可建立如下的粘弹性连续损伤本构模型:

$$\varepsilon(t) = [1 - D(t)]^{-1} \sigma_0 J(t) = \exp\left(\frac{t^m}{n}\right) \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \right] \quad (12)$$

由上式可以看出,应变随荷载作用时间的增加而增长,其由两部分共同贡献,一是由荷载产生,另外在蠕变过程中,损伤随加载时间也在不断的增加,损伤的存在加速了应变的增长,这是符合实际的。因此,如果不考虑损伤的影响,则不能反应真实的蠕变过程,得出的粘弹性参数 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 以及粘弹性模型将不合适。

将式(12)中的 σ_0 移到左边,则有蠕变柔量:

$$J'(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \exp\left(\frac{t^m}{n}\right) \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \right] \quad (13)$$

将上式 $J'(t)$ 定义为考虑损伤时的蠕变柔量。

3 理论模型与试验结果的比较

沥青这种简单热流变材料存在时-温等效性,为了得到沥青的蠕变柔量主曲线及在不同温度下的蠕变柔量主曲线簇,需要将试验曲线水平移位,本文在分析时采用的移位因子为 WLF 公式:

$$\lg \phi_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} = -\frac{C_1\Delta T}{C_2+\Delta T} \quad (14)$$

式中: C_1 、 C_2 为材料参数; T_0 为参考温度,本文取 $T_0 = -20^\circ\text{C}$ 。

将图 1 所示的不同温度下沥青的蠕变柔量曲线由时温等效原理按 WLF 移位因子向参考温度 $T_0=20^\circ\text{C}$ 下水平移位,得到移位因子 $\lg \phi_T$ 如表 1 所示。

表 1 温度的改变量对应的温度移位因子

Table 1 The temperature shift factor corresponding to the change value of temperature

温度/ $^\circ\text{C}$	温度的改变量	移位因子
-10	10	-2.341
-12	8	-1.925
-15	5	-1.027
-20	0	0
-30	-10	1.366

将表 1 中的温度的改变量 ΔT 和温度移位因子 $\lg \phi_T$ 绘图,并按式(14)进行非线性曲线拟合得到材料参数 $C_1 = -5.46$, $C_2 = -32.25$ 相关系数 $R^2 = 0.996$, 则:

$$\lg \phi_T = -\frac{C_1\Delta T}{C_2+\Delta T} = \frac{5.46\Delta T}{-32.25+\Delta T} \quad (15)$$

按表 1 给出的移位因子,将图 1 所示的不同温度下的蠕变柔量曲线向参考温度 $T_0=-20^\circ\text{C}$ 的蠕变柔量曲线水平移位得到 $T_0=-20^\circ\text{C}$ 下的蠕变柔量主曲线;然后再利用表 1 给出的移位因子,将 $T_0=-20^\circ\text{C}$ 下的蠕变柔量主曲线向其它温度下进行平移,可得到各个温度下的蠕变柔量主曲线簇,如图 3 所示。

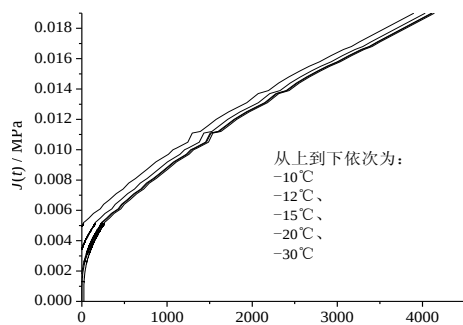


图3 蠕变柔量主曲线簇

Fig.3 Master curves of creep compliance

利用 Origin6.0 的非线性曲线拟合(Nonlinear Curve Fitting)功能^[10]编制如式(13)的拟合函数,对 -20°C 温度下的蠕变柔量主曲线进行改进的最小二乘法 Levenberg-Marquardt 法(L-M 法)拟合,得到考虑损伤的粘弹性模型参数为:

$m = 0.331$, $n = 6.449$, $E_1 = 543.377\text{MPa}$, $\eta_1 = 1.99 \times 10^{23}\text{MPa s}$, $E_2 = 2.339 \times 10^{20}\text{MPa}$, $\eta_2 = 5.523 \times 10^{22}\text{MPa s}$, 相关系数 $R^2 = 0.974$ 。

参考温度 $T_0 = -20^{\circ}\text{C}$ 下的蠕变柔量曲线与试验曲线如图 4 所示,从图 4 可以看出:考虑损伤的理论计算的结果,式(13)与试验结果吻合较好,从而证明该模型的合理、可行性。

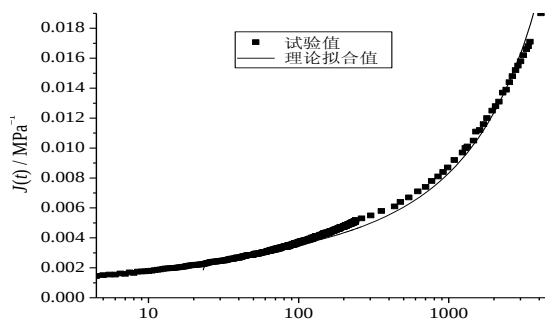


图4 蠕变柔量试验曲线与理论拟合曲线

Fig.4 Test and theoretical fitting curves of master creep compliance

4 结论

通过以上的分析和计算可以得到以下的结论:

(1) 对 Burgers 粘弹性模型与连续损伤因子模型的特性进行了分析,并将二者耦合得到了沥青的粘弹性损伤模型。

(2) 通过不同温度下的沥青小梁蠕变试验得到了不同温度下的蠕变柔量曲线,按 WLF 移位因子移位得到了不同温度下的移位因子及各个温度下

的蠕变柔量主曲线簇。

(3) 通过对理论模型和试验结果比较可以看出理论模型合理、可行,拟合精度比较高,理论模型较真实地反映了实际。

参考文献:

- [1] 张登良. 沥青与沥青混合料[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
Zhang Dengliang. Asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 1993. (in Chinese)
- [2] 张登良. 沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
Zhang Dengliang. Asphalt pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 张肖宁. 实验粘弹原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
Zhang Xiaoning. The principle of experimental viscoelasticity [M]. Harbin: Harbin Shipping Engineering College Press, 1990. (in Chinese)
- [4] Christensen R M. Theory of viscoelasticity: an introduction [M]. New York: Academic Press, Inc. 1982.
- [5] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
Yang Tingqing. Viscoelastic mechanics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)
- [6] 郑健龙. Burgers 粘弹性模型在沥青混合料疲劳特性分析中的应用[J]. 长沙交通学院学报, 1995, 11(3): 32—42.
Zheng Jianlong. The application of Burgers viscoelastic model in the fatigue characters analysis of asphalt mixtures [J]. Journal of Changsha Communications University, 1995, 11(3): 32—42. (in Chinese)
- [7] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
Yu Shouwen, Feng Xiqiao. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [8] Chaboche J L. Continuum damage mechanics, part I and part II [J]. ASME, Journal of Applied Mechanics, 1988, 55: 59—72.
- [9] 董毓利, 谢和平, 李世平. 混凝土受压损伤力学本构模型的研究[J]. 工程力学, 1996, 13(1): 44—53.
Dong Yuli, Xie Heping, Li Shiping. Continuum damage mechanics constitutive model of concrete under compression [J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(1): 44—53. (in Chinese)
- [10] 郝红伟, 施光凯. Origin 6.0 实例教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
Hao Hongwei, Shi Guangkai. Origin 6.0 example tutorial [M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2000. (in Chinese)