

文章编号:1671-6833(2010)03-0096-05

沥青混合料黏弹性响应影响因素分析

栗培龙, 张争奇, 王秉纲

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 选择3种级配的沥青混合料进行不同温度和应力水平的蠕变试验, 根据应力应变关系得到的蠕变柔量曲线获取 Burgers 黏弹性模型参数, 分析温度、应力水平、矿料级配以及老化作用对沥青混合料黏弹性的影响。结果表明, 随着温度的升高, 3种沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数总体不断降低, 即沥青混合料软化、模量减小, 但不同温度下3种混合料的黏弹性参数排序并不相同; 应力水平对沥青混合料的黏弹性能有显著影响, 处于中间荷载水平 0.5 MPa 时 4个黏弹性参数的区分度最大, 但不同级配的沥青混合料对应力水平的响应存在差异, 公称最大粒径相近的混合料的某些黏弹性参数变化趋势较一致; 老化是沥青混合料黏弹性变化的重要原因, 但短期老化和长期老化的影响并不相同。

关键词: 沥青混合料; 黏弹性响应; 影响因素; 老化

中图分类号: U414.75

文献标识码: A

0 引言

沥青混合料的黏弹性与沥青路面的车辙、开裂、疲劳等病害有着密切关联, 因此沥青混合料的黏弹性响应受到国内外道路研究者的关注^[1]。Little^[2]采用黏弹性模型模拟沥青混合料蠕变试验; Chang^[3]指出 Burgers 模型可以较好地模拟沥青混合料的微细观力学性能; Schwartz^[4]进行了相同荷载, 25℃到45℃温度下的蠕变试验, 并获取黏弹性参数; 关宏信^[5]推导了沥青混合料疲劳损伤演化的黏弹性疲劳损伤模型; 周志刚^[6]根据动蠕变试验推导出了黏弹性参数, 并讨论了模型参数与车辙动稳定度之间的关系。但以往的研究偏重于对沥青混合料黏弹性某一方面的讨论, 对不同影响因素缺乏深入而系统的分析。作者通过蠕变试验得到 Burgers 模型参数, 分析温度、应力水平、级配以及老化对沥青混合料黏弹性响应的影响, 可以为沥青路面设计和破坏分析提供参考。

1 蠕变试验及黏弹性模型参数

1.1 蠕变试验及蠕变柔量

利用 SBS 改性沥青分别拌制 AC-13、AC-16、

AC-20 3种级配沥青混合料, 采用 MTS 810 材料试验机在不同温度及应力水平下进行单轴静态蠕变试验, 为了减少离散性, 进行3组平行试验。试验条件为 0.7 MPa、40℃、50℃和 60℃, 0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa。为了减小试模边界效应的影响并加速试验进程, 首先采用 Troxler 4140 型旋转压实仪成型 $\phi 150 \text{ mm} \times H110 \text{ mm}$ 的大型试件, 再钻芯得到尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times H110 \text{ mm}$ 的试件。试验过程: ①在 0.005 MPa 下预加载 10 min; ②瞬时施加到所要求荷载并保持载 60 min; ③瞬时卸载到 0.005 MPa 并保持 30 min; ④采用 LVDT 精确测量试件变形随时间变化的数据。

根据试验的应力应变关系可以得到沥青混合料单位应力作用下 t 时刻的应变值(蠕变柔量)。不同试验条件下的蠕变柔量曲线如图 1 所示。

1.2 Burgers 黏弹性模型参数

Burgers 模型可以较好地描述黏弹性材料的蠕变与松弛特性, 在道路工程领域将其表征为沥青混合料的黏弹性本构模型^[7-9]。研究^[1,4,6]表明沥青路面的高温永久变形与混合料蠕变特性的关系为:

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) \quad (1)$$

收稿日期: 2009-12-13; 修订日期: 2010-01-04

基金项目: 西部交通建设科技资助项目(2006-318-812-21)

作者简介: 栗培龙(1980-), 男, 江苏邳州人, 长安大学讲师, 博士, 主要从事路面结构与材料方面的研究, E-mail: peilong_li@126.com.

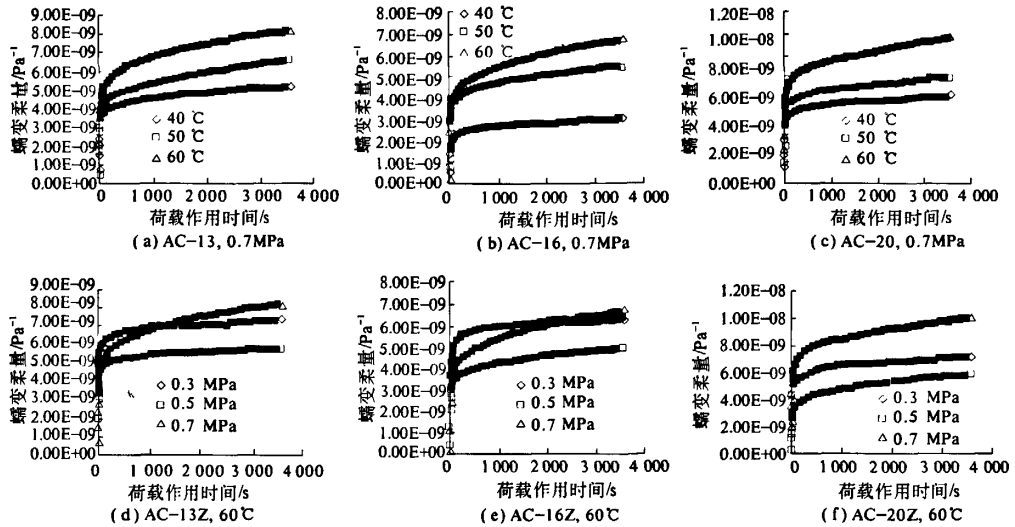


图1 混合料不同试验条件下的蠕变柔量变化曲线
Fig.1 Creep compliance curves under different test conditions

根据式(1)可知,在蠕变试验条件下,蠕变柔量由3部分组成:沥青混合料在荷载作用下的瞬时弹性柔量 J_e 、与时间相关的黏性柔量 t/η_1 、与时间相关的黏弹性柔量 $J_w \cdot (1 - e^{-\frac{k_2}{\eta_2}t})$ 。其中 J_e 反映高速荷载下沥青混合料的抗变形能力,与模型中弹性元件 E_1 的值成反比; η_1 是产生不可恢复残留变形的黏性系数,与沥青混合料的永久变形直接相关,同时也反映沥青混合料高温重复荷载作用产生的累积变形; E_2 、 η_2 反映在长时间荷载作用下及在通常温度条件的荷载作用下,变形既不是很快发展,又不能立即恢复的黏弹性指标,应力松弛性能及变形的回弹性能也有密切关系。采用Origin和1stopt数值处理软件,将蠕变柔量曲线用Burgers模型回归拟合,可以得到以上3种混合料不同试验条件下的蠕变柔量拟合得到的Burgers黏弹性参数列于表1中。

2 试验条件及矿料级配的影响

2.1 试验温度对沥青混合料黏弹性参数的影响

沥青混合料是感温性材料,温度越低,沥青混合料越接近弹性材料;温度越高,越接近黏性材料。对3种沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数取常用对数,试验结果如图2所示。由图2可知:

(1)随着温度的升高,3种级配沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数总体均呈降低趋势,说明温度升高沥青混合料软化,高温性能减弱。

(2)随着试验温度的升高,3种沥青混合料的

瞬时弹性模量 E_1 逐渐降低,即沥青混合料在较高的温度下更容易产生瞬时弹性变形。由40℃升至60℃,3种混合料的 E_1 值分别降低了26.1%,52.1%和32.3%。比较可知AC-13的降低较为缓慢,而AC-16和AC-20的 E_1 降低幅度较大,这说明公称粒径较大的沥青混合料的瞬时弹性模量对温度的敏感性较高。对于参数 η_1 ,由40℃升至60℃,AC-13、AC-16和AC-203种混合料的 η_1 值分别降低了56.0%,74.2%和60.5%,可见AC-16混合料随温度变化的敏感性最大。对于参数 E_2 和 η_2 而言,不同级配混合料的变化趋势不尽相同。随着温度的升高,AC-16和AC-20混合料的 E_2 接近平行的单调减小,而AC-13的 E_2 先增大后减小;对于参数 η_2 而言,随着温度的升高,AC-20混合料的 η_2 不断减小,而AC-13和AC-16的 η_2 值存在先升后降和先降后升现象,可见试验温度对不同沥青混合料的黏弹性响应的影响非常复杂,不仅与集料粒径有关,而且与混合料沥青含量等因素存在交互影响。

沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数大小不仅反映了黏弹性变化,而且表征了混合料在高温荷载下的抗永久变形性能。由图2可知,不同温度下3种级配混合料的参数排序不尽相同,其中40℃和60℃条件下的4个参数以及50℃条件下的 E_1 、 E_2 排序一致,均为:AC-16>AC-13>AC-20;50℃条件下的 η_1 排序为AC-16>AC-20>AC-13, η_2 排序为AC-13≈AC-16>AC-20。总体而

言,AC-16 混合料具有更好的抗变形性能,即具有 更好的高温稳定性.

表 1 沥青混合料的 Burgers 模型拟合参数

Tab. 1 Burgers model parameters of asphalt mixture

温度 /℃	应力 /MPa	级配	Burgers 模型参数/Pa				相关系数 R^2
			E_1	η_1	E_2	η_2	
40	0.7	AC-13	3.30E+08	4.14E+12	7.61E+08	1.37E+11	0.974 1
		AC-16	5.68E+08	8.38E+12	1.23E+09	2.61E+11	0.957 1
		AC-20	2.76E+08	3.95E+12	6.61E+08	9.05E+10	0.966 7
50	0.7	AC-13	2.76E+08	2.01E+12	8.34E+08	2.03E+11	0.985 9
		AC-16	3.12E+08	3.14E+12	8.79E+08	1.94E+11	0.979 9
		AC-20	2.41E+08	2.70E+12	5.56E+08	7.23E+10	0.975 3
60	0.3	AC-13	1.97E+08	5.06E+12	6.27E+08	8.93E+10	0.959 4
		AC-16	2.21E+08	5.71E+12	7.90E+08	9.82E+10	0.971 6
		AC-20	2.28E+08	4.00E+12	5.29E+08	1.05E+11	0.965 4
60	0.5	AC-13	2.23E+08	7.47E+12	1.26E+09	3.90E+11	0.949 1
		AC-16	3.36E+08	3.48E+12	1.01E+09	2.74E+11	0.976 1
		AC-20	4.24E+08	2.15E+12	5.36E+08	7.75E+10	0.983 1
60	0.7	AC-13	2.44E+08	1.82E+12	4.48E+08	1.05E+11	0.982 3
		AC-16	2.72E+08	2.16E+12	7.01E+08	2.37E+11	0.982 5
		AC-20	1.87E+08	1.56E+12	4.05E+08	4.91E+10	0.983 4

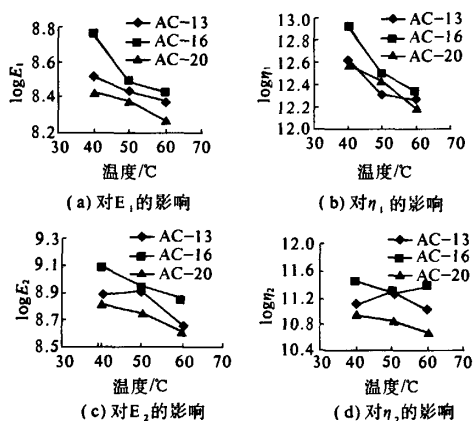


图 2 温度对沥青混合料黏弹性参数的影响

Fig. 2 Effect of temperature on Viscoelastic parameters

2.2 应力水平对沥青混合料黏弹性的影响

由图 3 可知:

(1)随着应力水平的升高,3 种级配沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4 个参数变化规律不尽相同.分析可知,沥青混合料的黏弹性与沥青胶结作用以及矿料之间的相对错位滑动有关.公称最大粒径较小的混合料(如 AC-13)往往有较高的沥青用量,沥青的黏弹性胶结作用占主导作用;公称最大粒径较大的混合料(如 AC-20),矿料的嵌挤作用对混合料抗永久变形的贡献更大,所以不同级配的沥青混合料对应力水平的响应存在差异.

(2)对参数 E_1 和 η_1 而言,AC-16 和 AC-20 混

合料的变化一致, E_1 均先增大后减小, η_1 均逐渐减小;对参数 E_2 而言,3 种级配混合料变化趋势一致,均先增大后减小;对参数 η_2 而言,AC-13 和 AC-16 混合料变化趋势一致,也是先增大后减小,AC-20 混合料则不断减小,可见公称最大粒径相近的混合料的某些黏弹性参数变化趋势存在一致性.

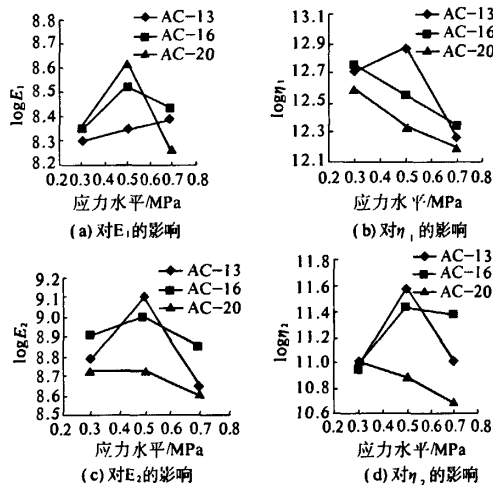


图 3 应力水平对沥青混合料黏弹性参数的影响

Fig. 3 Effect of stress on Viscoelastic parameters

2.3 级配对沥青混合料黏弹性的影响

3 种级配的混合料在不同应力水平下的 Burgers 模型参数如图 4 所示.

由图 4 可知,在 0.3 MPa 应力水平下,3 种级

配沥青混合料的4个参数均较为接近,应力水平增大到0.5 MPa时, E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数均有很大的区分度,当继续增至0.7 MPa后,参数之间的差异又有所减小。这是因为,在0.3 MPa应力水平下,由于应力水平较低,3种混合料的蠕变硬化现象不显著;在0.7 MPa应力水平下,对于无侧限蠕变试验而言,较高的应力水平使得3种混合料均出现显著的矿料颗粒间错位滑动,进而出现膨胀软化现象,模量又有所降低。

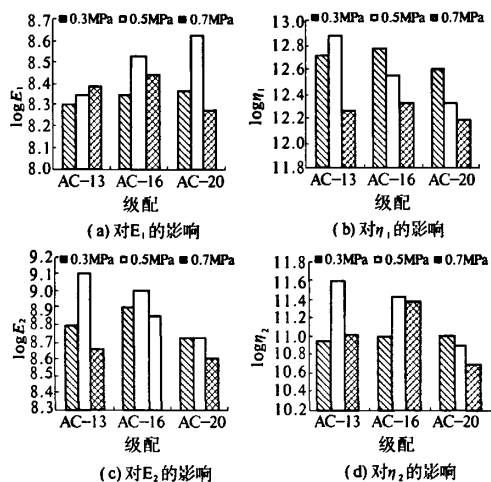


图4 级配沥青混合料黏弹性参数的影响

Fig.4 Effect of gradation on Viscoelastic parameters

当前评价沥青混合料高温性能的车辙试验,均在0.7 MPa荷载、60℃条件下进行,在此试验条件下的3种沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数排序一致,即AC-16 > AC-13 > AC-20,可见AC-16有更高的高温性能,AC-13次之,AC-20最差。

3 老化对沥青混合料黏弹性响应的影响

在老化作用下沥青的流变性能变化将会导致混合料的黏弹性变化,直接影响沥青混合料的路用性能^[10]。根据规范^[11]对试验中采用AC-13、AC-20 2种混合料分别进行短期和长期老化试验,然后在60℃、0.7 MPa条件下进行蠕变试验。

根据静态蠕变曲线求得蠕变柔量,然后拟合得到4种混合料不同老化状态的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个Burgers模型参数,如图5所示。

由图5可知:

(1)对于2种混合料而言,短期老化后 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数均有大幅增加,可见沥青老化后劲度增大,弹性增强,流变性降低,瞬时弹性柔量和黏性柔量均有显著减弱,在荷载作用下抗变形能力大

幅增强。在短期老化的基础上进行长期老化后,反映瞬时弹性响应的 E_1 又有所增大;2种混合料的 E_2 变化并不一致,AC-13稍有增加,AC-20大幅降低;2种混合料的 η_1 和 η_2 均有不同程度的减小。分析认为,沥青混合料的短期老化试验是先对拌制的散料进行老化然后再压实成型,老化后沥青的柔韧性和流动性减弱,压实成型后性能变化的沥青在混合料中是相对均匀分布的,所以整体表现为荷载作用下抗变形能力显著增强;而对于长期老化,试件是成型后再实施老化,沥青老化是不均匀的,在混合料空隙联通处老化严重,尽管沥青的绝对劲度增强,但在荷载作用下更容易产生微裂纹损伤。因此,对于长期老化的试件,黏弹性模型参数变化是沥青性质变化和损伤累积综合作用的结果,参数变化更为复杂。

(2)与AC-13相比,AC-20混合料的变化幅度更大,这是因为沥青老化的主要机理是高温下的沥青分子发生氧化反应,沥青与氧气的接触程度在很大程度上影响老化进程。一般而言,AC-20比AC-13混合料有更大的空隙率,沥青与氧气的接触更充分,因此老化效应更为显著。

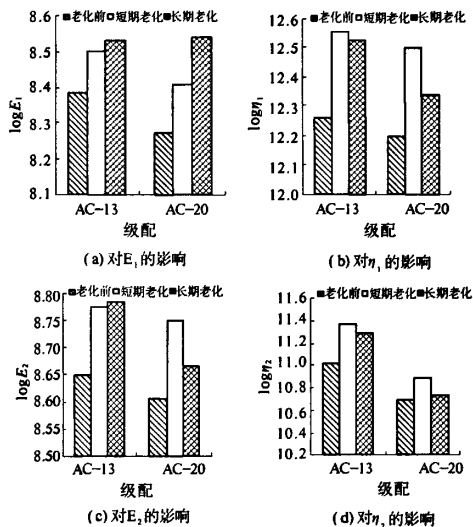


图5 老化对沥青混合料黏弹性参数的影响

Fig.5 Effect of aging on Viscoelastic parameters

4 结论

(1)试验温度对沥青混合料的黏弹性能有显著影响。随着温度的升高,3种级配沥青混合料的 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 4个参数总体上均呈降低趋势,说明温度升高沥青混合料软化,模量呈降低趋势;但不同温度下3种级配混合料的参数排序不尽相同,试

验采用的3种级配沥青混合料中AC-16混合料具有更好的抗变形性能。

(2)应力水平对沥青混合料的黏弹性能有显著影响,其中0.5 MPa下,3种级配沥青混合料的4个参数区分度大于0.3 MPa和0.7 MPa下的参数变化;而且不同级配的沥青混合料对应力水平的响应存在差异,公称最大粒径相近的混合料的某些黏弹性参数变化趋势存在一致性。

(3)沥青混合料老化后Burgers模型参数均有显著变化,即老化是沥青混合料黏弹性能衰变的主要影响因素,但短期老化和长期老化对沥青混合料黏弹性的影响并不相同。

参考文献:

- [1] 栗培龙. 沥青混合料黏弹性力学参数及其应用研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2009.
- [2] 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(1471): 49-57.
- [3] CHANG K G, MEEGODA J N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 12(5): 495-503.
- [4] SCHWARTZ C W, GIBSON N H, SCHAPERY R A, et al. Viscoplasticity modeling of asphalt concrete behavior [C]//The 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. New York: ASCE, 2002: 144-159.
- [5] 关宏信. 沥青混合料黏弹性疲劳损伤模型研究 [D]. 长沙:中南大学土木学院, 2005.
- [6] 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.
- [7] 郑健龙, 吕松涛, 田小革. 沥青混合料黏弹性参数及其应用 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2004, 25(4): 8-11.
- [8] 冯师蓉, 胡霞光, 刘玉. 基于Burgers模型的沥青玛蹄脂DEM数值分析 [J]. 路基工程, 2008(1): 21-23.
- [9] 郑健龙, 吕松涛, 田小革. 基于蠕变试验的沥青黏弹性损伤特性 [J]. 工程力学, 2008, 25(2): 193-196.
- [10] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲, 等. 道路沥青热氧老化模拟试验研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2008, 29(1): 119-123.
- [11] 交通部. JTJ 052-2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

Analysis of Visco-elastic Response Influencing Factors of Asphalt Mixture

LI Pei-long, ZHANG Zheng-qi, WANG Bing-gang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry Of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Three kinds of asphalt mixture were put to static creep test under different temperatures and stress levels. According to creep compliance curves from the stress-strain relations, Burgers visco-elastic model parameters were got to analyze influences on visco-elastic response of temperature, stress level, aggregate gradation, as well as aging effect for asphalt mixture. The results and analysis indicated that four parameters (E_1 , η_1 , E_2 , η_2) continuously reduce with the increasing of the temperature, which shows that asphalt is softening and modulus decrease. But visco-elastic parameters sequence of the three asphalt mixtures were not the same under different temperatures. Stress levels have a significant effect on visco-elastic response and four visco-elastic parameters have the greatest degree of distinction at the level of 0.5 MPa load. However, responses on stress level for different gradation mixture were different. Aging is an important reason introducing viscoelasticity changes of asphalt mixture. But short-term aging and long-term aging have different effects.

Key words: asphalt mixture; visco-elastic response; influencing factors; aging