

高模量沥青混凝土路面永久变形

周庆华^{1,2}, 沙爱民²

(1. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了准确评价高模量沥青混凝土的高温特性,利用高温蠕变试验评价高模量沥青混凝土的蠕变行为,并据此建立沥青混凝土材料的蠕变模型,通过 ABAQUS 有限元软件对不同组合类型的高模量沥青混凝土路面的永久变形进行预估,分析材料组成和车速的变化对路面永久变形的影响。研究表明:添加了专用外掺剂制备的高模量沥青混凝土永久变形最小,用 50[#] 沥青制备的高模量沥青混凝土的永久变形要大于 70[#] 沥青混合料的永久变形;沥青之间的温度敏感性存在差异,使得沥青混合料在高温环境下的抗变形能力不能完全由常温下的粘稠程度来准确反映,但通过高温蠕变等试验获取的蠕变参数可对高模量沥青混凝土的高温稳定性作出准确判断。

关键词:道路工程;高模量沥青混凝土;永久变形;蠕变模型

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Permanent deformation of high modulus asphalt concrete pavement

ZHOU Qing-hua^{1,2}, SHA Ai-min²

(1. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to evaluate the high temperature performance of high modulus asphalt concrete exactly, based on the creep test data of high modulus asphalt concrete, the permanent deformations of different types of high modulus asphalt concrete pavements were predicted and the effects of material composition and vehicle speed on the permanent deformation were discussed. The results show that high modulus asphalt concrete pavement composed with 50[#] asphalt has larger permanent deformations than the asphalt mixture composed with 70[#] asphalt, and the high modulus asphalt concrete in which the special additives were added has the smallest permanent deformation. Different temperature sensitivities can cause the inconsistency of asphalt performance in ambient temperature and high temperature, and the accurate evaluation of high temperature performance of high modulus asphalt concrete can be obtained by high temperature creep model. 5 tabs, 2 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; high modulus asphalt concrete; permanent deformation; creep model

0 引言

随着公路交通量的增加和重载车辆的增多,沥青路面的车辙已经成为人们普遍关注的问题。在众多解决车辙问题的技术手段中,通过在道路面层设置高模量沥青混凝土,提高沥青混凝土的整体刚度,改善沥青面层的高温稳定性,是一种被广泛认可的思路。法国、英国等国家的技术人员均展开过关于高模量沥青混凝土路面应用技术的研 究。在中国,高模量沥青混凝土作为改善高等级公路稳定性能的重要措施,在南方地区的长陡坡路段也曾经使用过。纵观中国曾经开展的高模量沥青混凝土项目,多是关于高模量沥青混凝土实际工程应用方面的研究,针对高温路用性能的深入分析还没有进行过系统研究^[1-3]。为此,本文采用不同类型的组成材料,从沥青混凝土的粘弹性行为特征入手,分析高模量沥青混凝土材料特殊的粘弹性产生的复杂变形,以沥青混合料蠕变试验数据为依据,利用 ABAQUS 有限元软件中的蠕变本构方程,对本文所制备的不同类型的高模量沥青混凝土的永久变形进行预估分析,并进一步讨论高模量沥青混凝土路面结构在重载超载车辆多的路段和车速较慢路段的抗变形能力。

1 沥青混凝土粘弹性行为分析

1.1 蠕变试验

1.1.1 原材料

经过前期调研发现,目前能够显著提高沥青混凝土模量的途径主要包括 2 种:一种是使用低标号沥青;另一种是使用高模量专用外掺剂。针对这 2 种途径,本文分别选用了 2 种 50# 沥青(记作 50# 沥青-1 和 50# 沥青-2)和一种高模量专用外掺剂进行试验,同时选取了 2 种 70# 沥青(记作 70# 沥青-1 和 70# 沥青-2)进行对比试验。经过测试,2 种 50# 沥青和 2 种 70# 沥青的技术指标均满足中国沥青材料各项指标,均满足规范中相应类别内 A 级沥青的要求^[1]。

同时本文还按照美国战略研究计划(SHRP)中沥青胶结料路用性能规范中的试验方法,对所选用的沥青材料进行路用等级划分,结果见表 1。

表 1 沥青材料 SHRP 路用等级划分结果

Tab. 1 SHRP grading results of asphalt material

沥青名称	50# 沥青-1	50# 沥青-2	70# 沥青-1	70# 沥青-2
PG 等级	PG64-22	PG70-22	PG64-22	PG70-28

1.1.2 集料级配

集料采用优质石灰岩。经测试,集料的各项指标均满足规范要求。试验选用代表中国规范中值级配的 AC-20 型级配,并通过沥青混合料马歇尔设计方法确定相应油石比,外掺剂的用量采用沥青混合料质量的 0.7%。

1.1.3 蠕变试验

目前国内外所采用的蠕变试验方法主要以单轴静载压缩蠕变和弯曲蠕变最具代表性,考虑到试验的简便性,本文采用单轴静载压缩蠕变试验。采用美国进口的 MTS-810 材料试验机,试件标准尺寸为 $\Phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$;试验温度为 40℃。

不同类型的高模量沥青混凝土蠕变过程中试件竖直方向产生的累积应变随时间的变化规律如图 1 所示。加载阶段,在荷载作用初始,试件首先产生瞬时变形,然后随着恒载的继续作用,试件变形不断增加,最后变形增量逐渐趋于稳定。卸载后弹性变形立即恢复,粘弹性变形随时间逐渐恢复,粘塑性变形因为不能恢复而成为永久变形。按照蠕变累积应变从小到大的顺序为:掺 0.7% 外掺剂的 70#-1 沥青混合料、50# 沥青-2 混合料、70# 沥青-2 混合料、70# 沥青-1 混合料、50# 沥青-1 混合料。在所选的几种混合料类型中,50#-1 沥青混凝土的累积应变最大,说明在持续荷载作用下,其抵抗变形的能力最弱,掺 0.7% 外掺剂的 70# 沥青-1 混凝土累积应变最小,其高温抗变形能力最强。

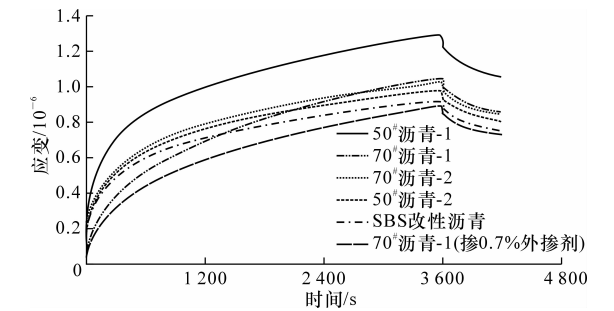


图 1 不同类型沥青混合料蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves of asphalt mixtures

1.2 蠕变参数分析

沥青混凝土是时间、温度和应力依赖型的材料,材料的蠕变变形 ϵ_c 可以表示为温度 T 、应力 σ 和时间 t 的函数,在 ABAQUS 有限元软件中,粘弹性材料的时间硬化蠕变模型(以蠕变率表示)的表达式为

$$\epsilon_c = A\sigma^n t^m \tag{1}$$

式中: ϵ_c 是材料的蠕变应变; A 、 m 、 n 均为依赖于温

度的模型参数,可以通过材料试验确定,通常 A 、 n 为正数, $-1 < m < 0$ 。

为了得到蠕变模型中的参数,本文结合高模量沥青混凝土蠕变性能试验测试结果,并利用专业拟合软件 1stOpt,分别得到 2 种 50# 沥青混凝土、70# 沥青混凝土和添加 0.7% 外掺剂的高模量沥青混凝土在 40 ℃ 温度下的蠕变参数 A 、 n 、 m ,见表 2。

表 2 沥青混凝土蠕变参数拟合结果
Tab. 2 Fitting results of creep parameters for asphalt mixtures

结构方案	混合料类型	蠕变参数		
		A	n	m
方案 A	50# 沥青-1 混凝土	2.35×10^{-7}	0.773	-0.573
方案 B	50# 沥青-2 混凝土	4.91×10^{-8}	0.773	-0.696
方案 C	70# 沥青-1 混凝土	6.83×10^{-8}	0.773	-0.689
方案 D	70# 沥青-1 混凝土 (掺 0.7% 外掺剂)	2.08×10^{-8}	0.773	-0.711
方案 E	70# 沥青-2 混凝土	5.14×10^{-8}	0.773	-0.604

2 路面结构模型的建立

本文选用有限元软件 ABAQUS 来模拟沥青路面结构中车辙产生过程和永久变形的预估。

2.1 模型尺寸及约束条件

模型尺寸为 10 m×10 m,计算时采用平面 8 节点四边形二次减缩积分单元(CPE8R)作为基本的单元类型,从面层底部到土基底面单元尺寸逐渐加大。并假设模型左右两边缘没有 x 方向位移,底面上没有 y 方向位移,层间接触为完全连续。

2.2 行车荷载

按照载荷应力等效的原则,可将 100 kN 的双圆均布标准荷载简化为双矩形均布荷载,轴载为 100 kN,接地压力 0.7 MPa。

2.3 道路结构

采用中国目前常用的半刚性基层沥青路面结构形式,其中高模量沥青混凝土作为中、下面层,其路面结构各组成部分的材料如下:上面层为细粒式沥青混

凝土,中、下面层为高模量沥青混凝土,基层材料为水泥稳定碎石,底基层材料为低剂量水泥稳定碎石。各层材料的具体特性及厚度参数见表 3。

表 3 道路结构层材料参数
Tab. 3 Material parameters for pavement layers

结构层	材料类型	厚度/ cm	40 ℃ 弹性 模量/MPa	泊松 比
上面层	细粒式沥青混凝土	4	500	0.25
中/下面层	高模量沥青混凝土	14	700	0.25
基层	水泥稳定碎石	36	1 500	0.30
底基层	低剂量水泥稳定碎石	16	900	0.30
土基			60	0.40

2.4 荷载作用

实际中路面上的车辙是在频繁的加载、卸载共同作用下产生的,本文按照近似的处理方法,采用荷载作用时间累加的原则,将多次加载-卸载循环作用的加载时间转换成单次长时间加载的时间,按照有关文献中关于这一等效时间的计算公式,计算出轴载作用一次的时间为 0.008 64 s,作用 $1\,000 \times 10^4$ 次的累积作用时间为 86 400 s^[2-4]。

2.5 温度参数

沥青混凝土是典型的温度敏感性材料,其路用性能会随温度发生明显的变化。在车辙预估中温度参数的选取会直接影响计算结果,为了保证预估结果的相对准确性,有必要确定一种车辙等效温度,即全部车辆在该温度下所造成的车辙与这些车辆在不同温度下行驶累积产生的车辙相等,本文按照 SHRP 计划提出的经验法确定出车辙等效温度为 40℃^[5-6]。

3 永久变形计算

3.1 不同面层类型的永久变形

按照上述条件建立路面结构的有限元模型,分别对不同的 高模量沥青混凝土路面结构进行计算,计算结果见表 4。

表 4 车辙深度有限元计算结果
Tab. 4 Calculation results of rutting depth

结构方案	材料类型	表面变形 深度/mm	最大隆起 高度/mm	总车辙深 度/mm	上面层相 对变形	高模量沥青混凝 土层相对变形
方案 A	50# 沥青混凝土-1	17.82	3.57	21.39	0.039	0.071
方案 B	50# 沥青混凝土-2	12.95	1.64	14.59	0.038	0.052
方案 C	70# 沥青混凝土-1	16.49	2.08	18.57	0.039	0.057
方案 D	添加外掺剂的 70# 沥青混凝土-1	10.32	1.36	11.68	0.037	0.039
方案 E	70# 沥青混凝土-2	15.12	1.98	17.10	0.039	0.047

注:表中的相对变形为结构层变形量与结构层厚度的比值。

图 2 显示,不同路面结构方案车辙变形的计算结果中,车辙变形量最大的是方案 A,车辙变形量最小的是方案 D。比较方案 C 和方案 D 的结果发现,添加 PR Module 外掺剂高模量沥青混凝土的车辙深度,仅为未添加外掺剂的路面结构的 63%,说明外掺剂的使用可以明显改善沥青混凝土的高温稳定性。另外还可以看到,同样采用 50# 沥青混凝土作为中下面层材料,方案 A 和方案 B 的车辙深度有较大差异,50# 沥青混凝土-1 的车辙深度接近 50# 沥青混凝土-2 的 1.3 倍,同时此车辙深度也远远超过了 2 种 70# 沥青混凝土路面结构的车辙深度,即出现了 50# 沥青混凝土高温性能劣于 70# 沥青混凝土的现象。这种情况与前文中沥青混凝土高温蠕变试验得到的结论一致,说明沥青标号只是反映混合料高温性能的因素之一,不同的温度敏感性会导致沥青材料在常温和高温环境下抗变形能力的排序不一致。常温下沥青材料的稳定性并不能准确反映其在高温环境中的稳定性,高模量沥青混凝土路面的高温稳定性不能简单地通过沥青材料标号的高低来判断,应该利用沥青混合料的高温性能试验和沥青的高温性能指标综合起来进行判断。本文试验数据表明,沥青混合料的高温蠕变试验可以较为准确地评价沥青混合料的高温稳定性,其蠕变曲线中的累积变形是客观评价沥青混合料高温抗变形能力的重要参数,通过对蠕变模型参数的拟合,可以更好地预估沥青路面的永久变形。

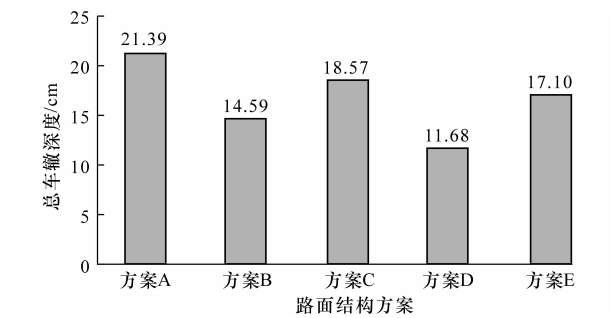


图 2 不同路面结构方案的永久变形

Fig.2 Permanent deformations of different pavement structures

3.2 不同行车速度下的永久变形

对高速公路的现场调查可以发现,在纵坡大的路段,沥青路面产生车辙破坏的几率成倍增长。这主要是长大陡坡路段上车速迅速降低,尽管设计行车速度为 100 km/h,但实际在上坡路段超载货车的行驶车速约为 60~80 km/h,在纵坡较大(2%以上)的路段超载货车车速急剧下降,一般约为 20 km/h,

超载严重的车辆车速甚至不到 10 km/h。车速慢,则车辆对路面的作用时间长,因此在爬坡路段对沥青路面的抗车辙能力的要求更高。按照不同的车速计算荷载累积作用时间,分别对 5 种路面结构方案进行永久变形预估,结果见表 5。

表 5 不同车速下的永久变形

结构 方案	沥青混合料类型	不同车速(km/h)下的永久变形/mm				
		80	60	40	20	10
方案 A	50# 沥青混凝土-1	17.82	29.42	33.40	42.00	53.17
方案 B	50# 沥青混凝土-2	12.95	21.38	24.27	30.52	38.64
方案 C	70# 沥青混凝土-1	16.49	27.22	30.91	38.87	49.20
方案 D	添加外掺剂的 70# 沥青混凝土-1	10.32	17.04	19.34	24.32	30.79
方案 E	70# 沥青混凝土-2	15.12	24.96	28.34	35.64	45.11

表 5 中数据为不同车速下几种路面结构方案在 $1\,000\times10^4$ 次车辆荷载作用后产生的永久变形。结果显示,车速从 80 km/h 降到 10 km/h 时,路表产生的永久变形可增长 2 倍多,使用外掺剂的方案 D 与未使用外掺剂的方案 C 相比,可降低永久变形 38%左右,使用 50# 沥青混凝土-2 的方案 B 与未使用外掺剂的方案 C 相比,可降低永久变形 21%左右。说明使用外掺剂和高温稳定性好的高模量沥青混凝土面层可以在一定程度上减少因车速降低而带来的永久变形。

4 结 语

(1)5 种不同材料类型的道路结构产生的永久变形存在较大差异,其中 50# 沥青-1 的永久变形最大,超过了 2 种 70# 沥青路面的永久变形。表明不同的温度敏感性会导致沥青材料在常温和高温环境下抗变形能力的排序不一致,常温下沥青材料的稳定性并不能准确反映其在高温环境中的稳定性,高模量沥青混凝土路面的高温稳定性不能简单地通过沥青材料标号的高低来判断。

(2)沥青混合料的高温蠕变试验可以较为准确地评价沥青混合料的高温稳定性,其蠕变曲线中的累积变形是客观评价沥青混合料高温抗变形能力的重要参数,通过对蠕变模型参数的拟合,可以更好地预估出沥青路面在不同条件下的永久变形。

(3)使用高温性能良好的低标号沥青和高模量专用外掺剂,可以明显改善沥青混合料的高温稳定性,降低不同车速下路面产生的永久变形。