

高速公路改扩建工程高模量沥青混合料路用性能研究

卞海洋¹, 黄毅², 郑炳锋², 朱富万²

(1.江苏省高速公路经营管理中心, 江苏 南京 210000; 2.苏交科集团股份有限公司)

摘要: 基于某高速公路改扩建工程,分别选取车辙和弯沉盆参数为指标,对拓宽路面高模量沥青混合料结构(4 cmSMA-13+8 cmEME-14+8 cmEME-14)路用性能进行研究。车辙检测结果表明:高模量 EME-14 路面结构车辙深度仅为 (2.7 ± 2.0) mm,相较于临近对比段降低 28.9%。和常规路面结构(SMA-13+SUP-20+SUP-25)相比,高模量 EME-14 路面结构可以有效减少沥青分层永久变形量,同时可以有效降低沥青层内剪应力、剪应变,从而减少压密型和流动性车辙的产生。通过对弯沉盆参数分析,高模量 EME-14 面层弯沉盆参数 D_0-D_{20} 为 (6.8 ± 4.7) μm ,远低于临近对比段,表明高模量 EME-14 路面结构具有较好承载力。通过对运营一段时间的拓宽车道路用性能的检测评估,表明高模量沥青混合料能够满足改扩建工程拓宽车道重载交通的需求。

关键词: 改扩建; 高模量沥青混合料; 车辙; 弯沉盆参数

1 引言

中国早期建设的高速公路多为四车道,随着区域经济水平的发展、交通量增加,已经无法满足交通运输的需求。改扩建工程通常将四车道拓宽为八车道,有效提升了道路服务水平。基于“分车道设计”理念,拓

宽的第三、四车道将按行驶货车进行管理,这势必给拓宽车道路面结构的抗车辙能力和承载能力提出了更高的要求。车辙及弯沉盆参数作为反映路面结构强度的指标,能够有效评价路面承载力。

多项研究表明:提高沥青混合料的模量能够减小沥青混合料内产生的应变和不可恢复的残余变形,提高路面的抗车辙能力。高模量沥青混合料EME的概

4 结论

(1) 钢棉可以提高沥青混合料抗松散性能,掺量越高抗松散性能越好,但掺量过高会导致钢棉出现相互“缠绕”现象,影响钢棉性能的发挥;钢棉沥青混合料配合比设计时应考虑钢棉使混合料空隙率增大进而引起体积指标、力学性能变化的影响。

(2) 微波加热可以直接对沥青进行加热,而感应加热则需掺入钢棉进行诱导加热。相同功率下微波加热具有较感应加热更高的加热速率,在使混合料达到相同温度条件下,微波加热具有较感应加热更高的愈合率。

(3) 沥青混合料内部空隙发生重组是混合料自愈

的内在机理,同时空隙的改变会导致混合料力学性能的降低,这也是导致愈合率随裂一愈循环次数增加而下降的原因。

(4) 微波加热时间过长使得沥青温度高于闪点温度,导致沥青分解,进而引起沥青理化性质的改变,建议微波加热时间小于 40 s。考虑微波加热温度不易控制,容易引起沥青损伤,从沥青路面耐久性考虑建议优先使用感应加热技术。

——编译自: Norambuena-Contreras J., Garcia A. Self-Healing of Asphalt Mixture by Microwave and Induction Heating[J]. Materials & Design, 2016, 106: 404-414.

收稿日期:2019-05-16

基金项目:江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(编号:BK20151069);江苏省交通运输科技项目(编号:2016Y01,2017T19,2018Y27);吉林省交通运输科技项目(编号:2016-1-14)

作者简介:卞海洋,男,高级工程师,E-mail:736841877@qq.com

念来自法国,其特点是采用低标号硬质沥青和较高的油石比,使得混合料兼顾高模量和耐久性,在改造及新建工程中逐渐得到了应用。

该文结合某高速公路改扩建工程,以车辙和弯沉盆参数为指标评价高模量拓宽路面结构的应用效果。考虑到某高速公路拓宽车道的设计交通荷载等级为特重,设计使用年限内当量设计轴载累计作用次数 Ne_3 达到 5.47×10^7 轴次,以及施工期转换交通中面层临时通行的需求,在上行方向K1 015+105~K1 018+020 铺筑了高模量 EME-14 试验路,施工段长度约为 2.9 km,高模量 EME-14 试验段路面结构形式见表 1。表 2 为高模量沥青混合料 EME-14 的矿料级配范围。

表 1 拓宽路面高模量 EME-14 试验路结构方案

层位	混合料类型
面层	4 cm 改性 SMA-13
	8 cm 高模量 EME-14
	8 cm 高模量 EME-14
基层	21 cm 水泥稳定碎石基层
	21 cm 水泥稳定碎石基层
底基层	20 cm 低剂量水稳碎石

表 2 高模量沥青混合料 EME-14 矿料级配范围

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%					
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	0.075
上限	100	100	82.0	64.0	43.0	8.0
下限	100	80.0	66.0	41.0	28.0	6.0

经过室内试验确定的目标配合比如表 3 所示,设计的 EME-14 高模量沥青混合料矿料比例为 1[#]:2[#]:3[#]:细集料:矿粉=32.0%:20.0%:10.0%:35.0%:3.0%,油石比为 5.8%。高模量 EME-14 体积指标及性能试验结果列于表 4,所有指标均满足相关技术要求。

表 3 高模量沥青混合料 EME-14 目标配合比

筛孔尺寸/ mm	通过率/%	筛孔尺寸/ mm	通过率/%
16.0	100	1.18	20.3
13.2	93.8	0.6	14.4
9.5	73.2	0.3	10.3
4.75	47.4	0.15	8.5
2.36	31.4	0.075	7.3

表 4 高模量沥青混合料 EME-14 体积指标及性能检验结果

试件毛体 积相对 密度	实测理论 最大相 对密度	空隙率 VV(表 干法)/%	动稳定 度/(次· mm ⁻¹)	冻融劈 裂 TSR/ %	低温弯曲 试验破坏 应变/ μm
2.467	2.516	2.0	6 203	91.9	2 406

高模量 EME-14 经过试拌、试铺确定的生产配合比如表 5 所示。各热料仓比例为:4[#]仓:3[#]仓:2[#]仓:1[#]仓:矿粉=35.5%:17.5%:12.0%:30.0%:5.0%,油石比为 5.9%。

表 5 高模量沥青混合料 EME-14 生产配合比

筛孔尺寸/ mm	通过率/%	筛孔尺寸/ mm	通过率/%
16.0	100	1.18	22.0
13.2	96.7	0.6	14.6
9.5	73.4	0.3	9.9
4.75	47.2	0.15	8.0
2.36	35.5	0.075	7.2

2 拓宽路面车辙状况评价

为了更好地分析高模量 EME-14 路面结构抵抗车辙的能力,选取沥青层内竖向压应变、剪应力、剪应变等力学指标,对比分析高模量 EME-14 和常规路面结构方案“SMA-13+SUP-20+SUP-25”在荷载作用下结构内部应力、应变状况。同时对比分析高模量 EME-14 和常规路面结构方案在设计使用年限内当量设计轴载累计作用次数下沥青混合料的永久变形量。

2.1 当量设计轴载累计作用次数下沥青混合料永久变形量分析

根据 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》,预估在当量设计轴载累计作用次数下,拓宽车道沥青混合料的永久变形量。由于沥青层内竖向压应力沿路面深度方向逐渐变小,沥青层内竖向压应力越小,沥青层内产生的永久变形量越小。为了计算沥青层总变形量,将沥青混合料层总共分为 8 个分层。其中:① 40 mm 上面层分为(10+15+15) mm,共 3 层;② 80 mm 中面层分为(20+20+20+20) mm,共 4 层;③ 80 mm 下面层作为 1 层。

采用 Bisar 软件对沥青混合料层各分层顶面的竖向压应力进行计算,竖向压应力的计算点选取位置如图 1 所示。

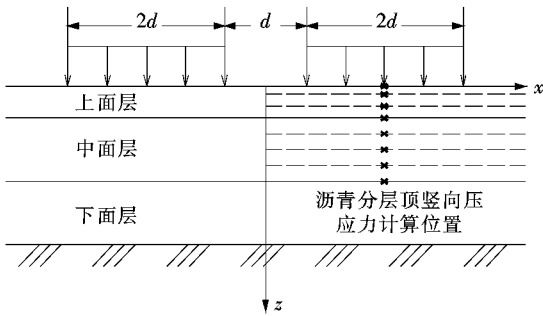


图 1 沥青层内竖向压应力计算位置

路面结构各结构层的模量取值如表 6 所示,其中沥青混合料层采用 20 ℃、10 Hz 条件下的动态压缩模量,无机结合料稳定层采用经过调整系数修正过的弹性模量。路基采用平衡湿度状态下并考虑干湿与冻融循环作用后的顶面当量回弹模量。

表 6 拓宽路面结构层模量取值

材料类型	模量/ MPa	泊松 比	车辙试验总变 形深度/mm
改性沥青混合料 SMA-13	12 000	0.25	1.5
高模量沥青混合料 EME-14	26 000	0.25	1.2
改性沥青混合料 SUP-20	12 000	0.25	1.4
道路石油沥青混合料 SUP-25	12 000	0.25	2.8
水泥稳定碎石	12 000	0.25	—
低剂量水泥稳定碎石	8 000	0.25	—
路基	66	0.40	—

将高模量和常规路面结构沥青分层永久变形量的计算结果绘于图 2 中。相比于常规沥青混合料类型(SMA-13+SUP-20+SUP-25),高模量 EME-14 的沥青分层永久变形量均较低。主要原因为:①中、下面层均采用 EME-14 沥青混合料,有效减少了沥青分层永久变形,尤其是下面层采用 EME-14 取代常规路面结构的 SUP-25,下面层永久变形量由

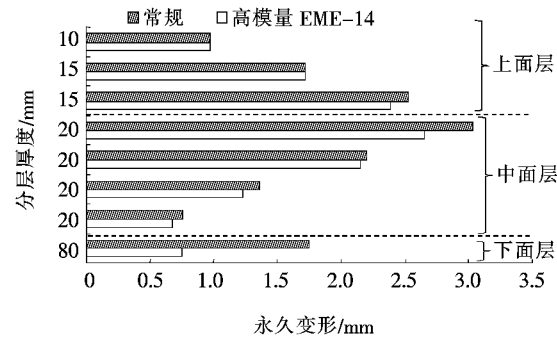


图 2 拓宽路面结构沥青分层永久变形量

1.75 mm 显著降低到 0.75 mm;② 相比于改性沥青混合料 SUP-20 和道路石油沥青混合料 SUP-25,高模量 EME-14 混合料自身具有更高的动稳定度,更好的抗车辙性能。

设计使用年限内,在当量设计轴载累计作用次数下的沥青层总永久变形量如图 3 所示。相比于常规路面结构,采用高模量 EME-14 方案有效降低了沥青层永久变形量,这与现场车辙深度检测结果得出的规律相符合。

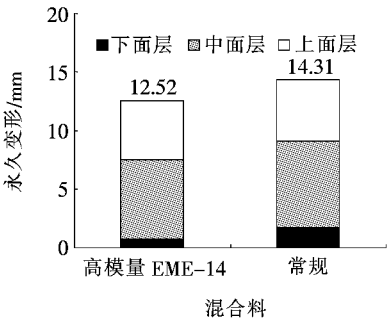


图 3 设计使用年限内沥青层总永久变形量

2.2 沥青层内剪应力和剪应变分析

当沥青混合料受到高温重载作用,由车轮荷载产生的剪应力超过了沥青混合料自身的抗剪强度时,沥青混合料出现侧向位移,产生流动性车辙。降低了沥青混合料的剪应力,剪应变增大,故控制流动性车辙十分重要。下面分别对高模量 EME-14 和常规路面结构沿路表、不同深度的剪应力进行计算,计算点位选取如图 4 所示的 A(0,0,z)、B(0.055 3,0,z)、C(0.159 8,0,z)、D(0.266 3,0,z)共 4 个点,计算结果见图 5。

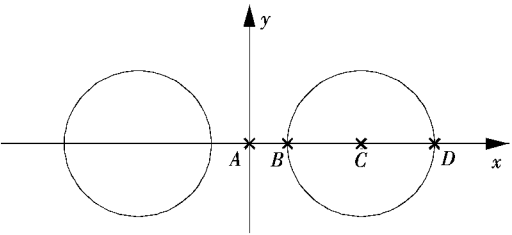


图 4 沥青层内剪应力计算点位分布

由图 5 可知:距离路表深度为 1 和 3 cm 时,B 点和 D 点处剪应力最大,即在沥青混合料上面层内,轮胎两侧边缘位置处的剪应力最大。在距离路表深度为 5~19 cm 时,C 点处剪应力最大,即在沥青混合料中、下面层,双圆荷载中单圆荷载中心点的剪应力最大。在 A 点处,即双圆荷载中心点位置处,沥青面层剪应力最小。

高模量 EME-14 和常规路面结构沿深度方向最大剪应力分布如图 6 所示。

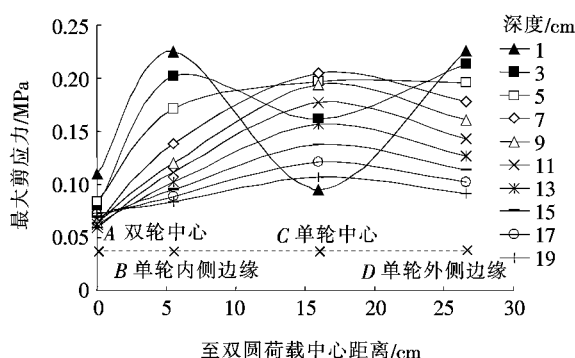


图 5 常规路面结构沥青层内不同计算点位剪应力分布

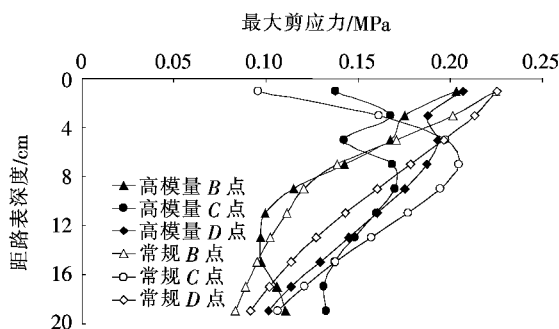


图 6 沥青层内最大剪应力沿深度方向分布

由图 6 可知:在 C 点处,相比常规路面结构,采用高模量 EME-14 沥青混合料最大剪应力降低了 17.1%,且在中面层范围内剪应力均降低,这有利于减少中面层沥青混合料在高温重载环境下流动性车辙的产生。在 B、D 点,高模量 EME-14 和常规路面结构最大剪应力沿深度方向分布基本相当。

分别对高模量 EME-14 和常规路面结构不同位置沥青层内最大剪应变进行计算,结果如图 7 所示。

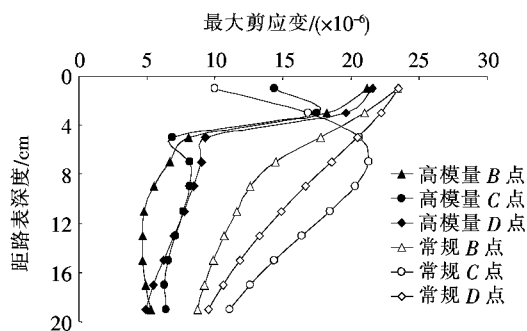


图 7 沥青层内最大剪应变沿深度方向分布

由图 7 可知:常规路面结构中,单侧轮内、外侧边缘(B、D 点)最大剪应变沿路表深度方向逐渐减小。单侧轮中心(C 点)最大剪应变呈现先增后减的趋势,

峰值位于距路表深度 7 cm 的中面层内。

高模量路面结构中,单侧轮载内侧、中心点、外侧(B、C、D 点)最大剪应变沿路表深度方向呈现递减趋势。最大剪应变在上、中、下面层内较常规路面结构均降低,尤其中面层范围内,最大剪应变降低幅度最显著。可见,中、下面层采用高模量沥青混合料 EME-14+EME-14,取代常规路面结构的 SUP-20+SUP-25,有助于降低沥青混合料内最大剪应变水平,进而减少流动性车辙的产生。

因此,在相同当量设计轴载累计作用次数下,采用高模量 EME-14 沥青混合料可以有效减少沥青分层永久变形量。同时,高模量 EME-14 结构可以有效减少沥青层内剪应力、剪应变,能够减少流动性车辙的产生。

改扩建完成通车 1 年后,采用激光断面仪对拓宽车道进行车辙深度检测,每 10 m 输出一个车辙深度 RD。以未使用高模量 EME-14 临近路段作为对比段,对拓宽车道路面车辙状况进行分析(图 8)。

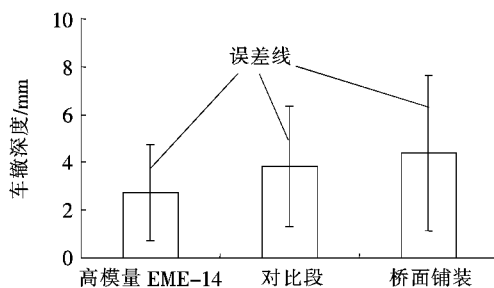


图 8 拓宽路面车辙深度

由图 8 可知:使用高模量 EME-14 沥青混合料路段路面车辙深度相对较小,为 (2.7 ± 2.0) mm,而对比较段和桥面铺装路段车辙深度分别为 (3.8 ± 2.5) mm 和 (4.4 ± 3.2) mm。

3 拓宽路面承载力状况评价

改扩建完成后,对高模量路段和对比段进行了落锤弯沉检测,为了尽可能真实地描述沥青路面结构弯沉盆的曲线形状,在测试时,布设 7 个传感器。随着距离荷载中心位置的增大,传感器的间距适当增大,传感器布设的具体间距为 0、20、30、45、60、90、120 cm。利用检测得到的中心点弯沉 D_0 和弯沉盆数据,对拓宽路面结构的承载力进行评价。

统计中心点弯沉值 D_0 ,结果列于表 7。

表 7 拓宽路面结构中心点弯沉值 D_0

方向	拓宽路面结构	弯沉/(0.01 mm)
上行	高模量 EME-14	3.1 ± 0.4
	对比段	5.2 ± 1.8
下行	对比段	4.9 ± 1.4

由表 7 可得:高模量 EME-14 路段的中心点弯沉值 D_0 最小,为 (3.1 ± 0.4) (0.01 mm)。但由于路面中心点弯沉值的测量结果是各个结构层结构性能的综合反应,因此,需要采用弯沉盆参数对拓宽路面结构的承载力进行进一步分析。

根据应力扩散角理论(图 9)和路面结构层厚度,弯沉盆曲线 0~20 cm 受沥青面层模量影响最大,因此

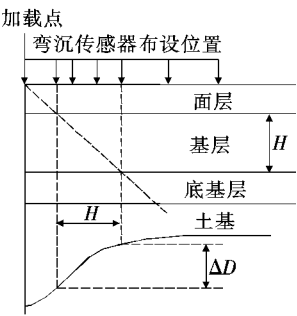


图 9 应力扩散角理论示意图

确定利用弯沉盆参数 D_0-D_{20} 来评价面层响应。分别采用 $D_{20}-D_{60}$ 、 $D_{60}-D_{120}$ 评价基层、底基层状况。由于最远端弯沉点和路基模量相关性较大,采用 D_{120} 评价路基状况(表 8)。

表 8 拓宽路面结构弯沉盆参数

方向	拓宽路面结构	弯沉盆参数 $\Delta D/\mu\text{m}$			
		D_0-D_{20}	$D_{20}-D_{60}$	$D_{60}-D_{120}$	D_{120}
上行	高模量 EME-14	6.8 ± 4.7	13.4 ± 4.8	3.1 ± 2.9	7.3 ± 1.6
	对比段	29.3 ± 18.1	11.2 ± 5.5	2.0 ± 2.3	8.6 ± 2.6
下行	对比段	28.3 ± 13.1	9.6 ± 6.8	2.1 ± 2.9	8.4 ± 2.2

由表 8 可知:上行方向高模量 EME-14 的面层弯沉盆参数 D_0-D_{20} 为 $(6.8 \pm 4.7) \mu\text{m}$,远小于对比路段。而高模量路段和对比段的基层弯沉盆参数 $D_{20}-D_{60}$ 、底基层弯沉盆参数 $D_{60}-D_{120}$ 以及路基弯沉盆参数 D_{120} 均处于相同水平。这表明高模量路段结构承载能力较好的主要原因是面层采用高模量沥青混合料 EME-14,有效提高了路面整体结构承载力。

4 结论

(1) 根据沥青混合料永久变形量预估模型,高模量 EME-14 路面结构(SMA-13+EME-14+EME-14)和常规路面结构(SMA-13+SUP-20+SUP-25)在当量设计轴载累计作用次数下的永久变形量分别为 12.52 和 14.31 mm,表明采用高模量 EME-14 沥青混合料可以有效减少沥青各个分层永久变形量。

(2) 通过对高模量 EME-14 路面结构和常规路面结构沥青层内剪应力和剪应变分析,表明高模量 EME-14 路面结构可以有效减少沥青层内剪应力、剪应变,从而能够减少流动性车辙的产生。

(3) 根据运营 1 年后对拓宽车道车辙状况检测,

结果表明高模量 EME-14 路段车辙深度为 $(2.7 \pm 2.0) \text{ mm}$,低于对比段的 $(3.8 \pm 2.5) \text{ mm}$ 以及桥面铺装段的 $(4.4 \pm 3.2) \text{ mm}$,这与理论分析结果一致。

(4) 高模量 EME-14 路段中心点弯沉 D_0 为 (3.1 ± 0.4) (0.01 mm),面层弯沉盆参数 D_0-D_{20} 为 $(6.8 \pm 4.7) \mu\text{m}$,均优于对比段。表明拓宽路面结构面层采用高模量沥青混合料 EME-14,能够有效提高路面整体结构承载力。

通过对改扩建工程拓宽车道路面的后评估,不难发现,拓宽车道采用高模量 EME-14 结构方案能够有效提高路面抗车辙能力和承载力,满足改扩建工程拓宽车道重载交通的需求。

参考文献:

[1] 廖朝华.多车道高速公路改扩建工程路面分车道设计探讨[J].中外公路,2009(2).
[2] 周岚,倪富健,王浩仰.基于弯沉盆的高速公路沥青混凝土路面结构状况评价研究[J].公路,2015(9).
[3] 罗承轶.高模量沥青混凝土材料组成设计及路用性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.
[4] 丁小军,柴福斌,李刚,等.高模量沥青混合料在阿尔及利亚东西高速公路上的应用[J].中外公路,2009(4).
[5] 靳澍.高模量沥青混合料在宁高高速公路改造工程中的应用[J].现代交通技术,2014(3).