

胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析

杨三强^{1,2,3}, 孙爽^{1,2}, 李倩^{1,2}, 刘鑫磊^{1,2}, 秦禄生⁴

(1.河北省土木工程监测与评估技术创新中心,河北 保定 071002;2.河北大学 建筑工程学院,河北 保定 071002;

3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;4.河北交通投资集团公司,河北 石家庄 050091)

摘要:为研究动荷载作用下胶粉改性沥青路面实际的力学响应,依托“全域路面加速加载试验研究”课题,设计不同掺量胶粉改性沥青与混合料试验方案,采用全域路面加速加载试验设备评价路面结构受力变形,通过加速加载试验获取实测动态应变响应数据,研究各结构层应变响应规律。结合有限元数值模拟,基于所编写的加载程序,研究变温条件下胶粉改性沥青路面各层的动力响应情况。结果表明:采用微观测试、马歇尔试验与SHRP试验分析得到70℃沥青改性所用的废胶粉最佳掺量;试验分析得到胶粉改性沥青混合料性能技术参数;借助全域路面加速加载试验,构建有限元模型,对比分析了不同路面结构、不同轴载作用次数下的车辙变形规律。

关键词:胶粉改性沥青;性能试验;加速加载;数值模拟

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 前言

近年来,中国高速公路运输结构呈现出重载、渠化交通及流量大等特点,传统路面结构对荷载及服役环境的不适应性逐渐显露^[1-3]。由于长期承受行车荷载的作用,对路面造成磨损和碾压,加之高速公路使用的沥青材料温度稳定性较差,极易受到天气变化的影响,由此形成车辙、裂缝。为了解决沥青路面常见病害问题,专家学者利用橡胶作为沥青改性剂研究道路材料。Shu^[4]将橡胶粉加入沥青混合料以提高路面抗拉强度,后为解决橡胶粉与沥青结合力不足等问题引入了添加剂;王歌^[5]使用新型活化剂处理后的胶粉用以提升沥青整体的流变性能和高温稳定性能。随着研究进一步深入发现,橡胶粉在加入之前做预处理可以改善橡胶与沥青的相容性^[6-7],通过对废旧橡胶进行高温热解制得液体橡胶,将其与基质沥青混合后在高速剪切设备中进行剪切搅拌用以提高沥青的流变性能、低温性能以及抗老化性能^[8-12]。

胶粉改性沥青的研究目前仍主要集中在室内研究及分析阶段^[13-15],而在工程应用方面的研究尤其是

推广使用有待进一步加强。鉴于此,本文通过布氏黏度试验、动态剪切流变试验等对胶粉改性沥青高温性能及黏弹性指标进行定量分析。借助热重分析仪及红外光谱仪对胶粉改性沥青微观力学性能进行研究,采用全域路面加速加载设备对胶粉改性沥青路面进行结构层应变响应分析,同时结合有限元数值模拟对胶粉改性沥青路面变温条件下各层动力响应进行分析,为胶粉更好地应用于道路工程提供理论指导。

1 原材料指标及试验方案设计

1.1 原材料指标及混合料试验

试验材料由于大量地使用废旧胶粉具有明显的环境效益以及经济效益。胶粉掺量影响胶粉溶胀作用时吸收轻质油分的程度^[16]。因此,采用沥青三大指标及美国公路战略研究(SHRP)计划推荐的布洛克菲尔德旋转黏度、车辙因子评价沥青性能。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[17],选取胶粉掺量为25%、30%、35%的改性沥青进行测试,试验结果如表1所示。

收稿日期:2022-01-12

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(编号:E2018201106);河北省交通运输厅科技项目(编号:TH-201925,TH-201918)

作者简介:杨三强,男,博士(后),教授.E-mail:ysq0999@163.com

表 1 不同胶粉掺量对橡胶沥青指标的影响

项目	针入度/ (0.1 mm)	软化 点/℃	5℃延 度/cm	布氏黏度/ (Pa·s)	车辙因 子/MPa
70# 基质沥青	61.0	49.8	66.9	138(60℃动 力黏度)	1.00
25% 胶改沥青	46.8	71.6	12.9	2.162	5.08
30% 胶改沥青	42.2	78.9	15.7	2.887	3.04
35% 胶改沥青	45.4	79.2	17.5	3.921	2.91
指标要求	40~80	>58	≥10	2.0~4.0	0.1~10
试验方法	T0604	T0606	T0605	T0625	T0628

由表 1 可知:改性沥青高温性能得到了显著提升,低温延伸性能、针入度降低,其软化点比基质沥青高 21~30℃。同时,借助热重分析仪、红外光谱仪等微观手段对改性机理进行研究,结果显示在 180℃ 热处理 2 h 后,沥青失重约 6.1%,含 25% 胶粉的胶改沥青失重约 4.8%,含 30%~35% 胶粉的胶改沥青失重 3.2%~3.6%。失重的成分主要为沥青中饱和分的挥发。含 30% 胶粉的胶改沥青的热稳定性相对较高;将不同掺量的胶粉改性沥青进行 180℃ 热处理,得到不同时间的胶改沥青红外光谱如图 1 所示。由图 1 可见:红外光谱特征峰的峰值发生变化,但没有新的官能团产生,这是由于加入废胶粉引起的,胶粉掺量为 30% 时改性沥青内部发生了氧化分解,羰基含量增加,羧基之间脱水缩合出现酸酐的特征峰,由此解释了 30% 胶粉掺量的胶粉改性沥青热稳定性最高。结合宏观与微观试验,胶粉的最佳掺量为 30%。

为获得最好的路用性能,在分析胶粉掺量的同时,与之相适应的混合料及新型路面结构形式的研究也应该同期进行^[18]。采用选定的 30% 掺量的胶粉改性沥青 SMA-13 进行高温稳定性能、低温抗裂性能、水稳定性能和抗疲劳性能等路用性能试验,试验结果如表 2 所示。

表 2 30% 掺量胶粉改性沥青混合料性能技术参数

试验项目	单位	试验结果	技术要求	试验方案
动稳定度	次/min	6 700.24	≥4 000	车辙试验
低温抗裂性(应变)	με	4 056	≥2 500	小梁低温弯曲试验
水稳定性能	残留稳定度	95	≥85	残留稳定度试验
	冻融劈裂强度比	88	≥80	冻融劈裂强度试验
初始劲度模量	MPa	3 047 ^① 5 151 ^②	—	
抗疲劳性能	初始相位角	38.2 ^① 38.9 ^②	—	四点弯曲试验
	疲劳寿命	988 550 ^① 736 850 ^②	—	

注:①为 30% 掺量胶粉改性沥青 SMA-13;②为 SBS 改性沥青 SMA-13。

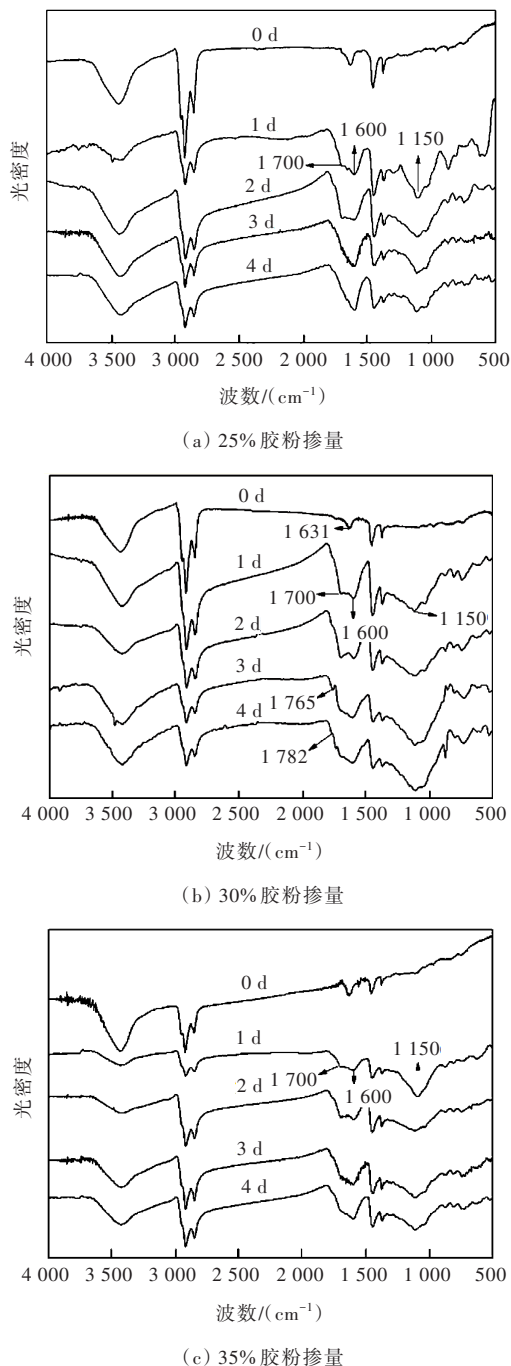


图 1 不同掺量的胶粉改性沥青红外光谱

由表2可知:胶粉改性沥青 SMA-13性能指标优良;由于初始劲度模量及相位角均低于 SBS 改性沥青 SMA-13,说明胶粉能提高改性沥青混合料的抗变形能力且为改性沥青带来更多弹性成分,表现在路用性能方面即为抗车辙能力。

1.2 试验方案设计

加速加载试验采用全域路面加速加载试验设备,如图2所示。通过公路路面设计程序系统(HPDS—2017)计算确定河北省全域路面加速加载试验场直道半刚性橡胶沥青耐久性路面结构方案,新型沥青耐久性路面面层分为3层结构,30%胶粉掺量的改性沥青 SMA-13作为表面层,30%胶粉掺量的改性沥青 ARHM-20和18%胶粉掺量的沥青稳定碎石分别作为中面层及下面层,在面层下设置54 cm的水泥稳定级配碎石基层,在整个沥青道路中起到

主要的承重作用,面层和基层之间设置纤维抗裂层,以此减轻基层上的荷载。对其进行加速加载试验,研究路面结构动力响应随加载次数的变化规律。按照路面结构受力模式与加速加载试验设计方案要求布设传感器,采集路面各层变形情况,通过动态轴载换算完成试验路加载方案设计,具体试验方案如表3所示。



图2 全域路面加速加载试验设备

表3 试验方案

轴载/ kN	加载速度①/ (km·h ⁻¹)	累计加载次数/ 万次	路面结构②	加载 方式	传感器布设
100	16	200	上面层:4 cm厚30%胶粉掺量的 SMA-13(纤维封层)	液压 加载	上面层:距层顶每0.01 m布设应变传感器共4个 黏结层:距层顶每0.02 m布设应变传感器共5个 下面层:距层顶每0.01 m布设应变传感器共4个
	20	400	黏结层:8 cm厚30%胶粉掺量的 ARHM-20(黏层油)		
	24	800	下面层:10 cm厚18%胶粉掺量的沥 青稳定碎石(透层油+纤维抗裂层)		

注:① 加载速度视设备运行情况工作负荷逐渐加大;② 基层为54 cm水泥稳定级配碎石。

2 加速加载试验与数值模拟分析

2.1 加速加载试验

2.1.1 上面层应变与加载次数的关系

以上面层底部弯拉应变为基础,分析加载次数的增加对胶粉改性沥青路面结构的影响。通过现场传感器采集的数据绘制上面层不同深度应变与加载次数的关系曲线如图3所示。

由图3可以看出:荷载作用下半刚性基层胶粉改性沥青上面层以发生拉伸变形为主;不同深度处应变变化规律基本一致,只在数值上存在一定差异,即不同深度变形量呈现出分层现象;加载初期同一深度处随加载次数的增大应变增幅明显,说明上面层早期变形会伴随车辆轴载作用次数加剧,当加载次数大于400万次应变增幅平缓,在长期使用过程中,

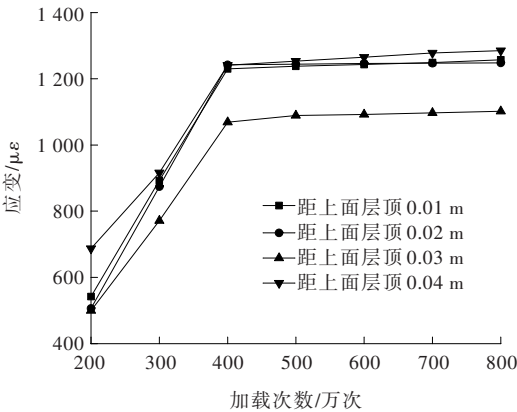


图3 上面层不同深度应变与加载次数关系

变形量逐渐增大。即随着加载次数的增加,上面层沥青路面显现出一定的蠕变特征。

2.1.2 黏结层应变与加载次数的关系

通过对黏结层应变数据的采集,在5种不同深度(距黏结层顶0、0.02 m、0.04 m、0.06 m、0.08 m)处,试

验分别获得了加载次数从200万次增加到800万次的应变值。绘制不同深度下应变随加载次数变化的关系曲线如图4所示。

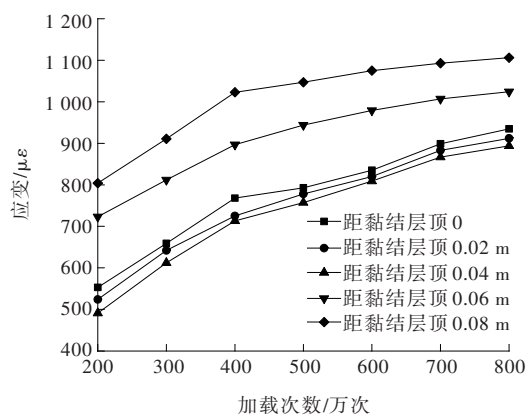


图4 黏结层不同深度应变与加载次数关系

从图4可以看出:加载初期,由于黏结层初期内部存在细微空隙、薄弱界面等,初期荷载作用在这些不良缺陷上,在内部形成应力集中效应,因此作用初期黏结层应变会迅速增大;随着加载次数的增加,这些内部缺陷逐渐愈合,黏结层应变增加速率变缓,当加载次数增加到600万次时应变增幅较慢。加载次数在600万次以下,横向平均剪应变在0~1 100 $\mu\epsilon$ 变化,加载次数为600万~800万次时,横向平均剪应变为700~1 100 $\mu\epsilon$ 。由此可知:黏结层初期累计变形明显,中长期累计变形明显放缓;试验同时发现,黏结层受力变形明显,也是最薄弱的部分。因此,对于半刚性基层沥青路面结构,黏结层的黏结强度是路面使用寿命延长的关键。

依据应变与加载次数关系可知:同一深度下应变与加载次数呈正相关关系。对轴载作用次数与变形量进行线性拟合,相关系数大于0.95,显著性水平小于0.05,拟合结果符合二项式分布规律(表4)。

2.1.3 下面层应变与加载次数关系

通过对动荷载试验数据的采集,在4种不同深度0.01 m、0.02 m、0.03 m和0.04 m的条件下,试验分别获得了加载次数与相应应变的关系,如图5所示。

由图5可以看出:下面层的动态响应以受拉变形为主,初期下面层应变变化稳定但总体呈现上升趋势,加载大于600万次,下面层拉应变增加明显。胶粉改性沥青路面下面层加载次数在600万次以下横向平均拉应变为0~95 $\mu\epsilon$;加载次数为600万~800万次时,横向平均拉应变为60~160 $\mu\epsilon$ 。结合面层分析

表4 黏结层轴载作用次数与变形量拟合关系

拟合公式	R^2	p 值
$\epsilon_1 = 526.971\ 56 + 5.950\ 45E-5N_f - 2.206\ 84E-12N_f^2$	0.963\ 61	0.001\ 32
$\epsilon_2 = 496.146\ 22 + 6.175\ 36E-5N_f - 2.313\ 51E-12N_f^2$	0.974	6.760×10^{-4}
$\epsilon_3 = 457.572\ 74 + 6.805\ 4E-5N_f - 2.702\ 28E-12N_f^2$	0.974\ 28	6.615×10^{-4}
$\epsilon_4 = 686.202\ 23 + 5.949\ 14E-5N_f - 2.672\ 73E-12N_f^2$	0.983\ 17	2.831×10^{-4}
$\epsilon_5 = 767.801\ 78 + 6.895\ 17E-5N_f - 3.508\ 31E-12N_f^2$	0.954\ 23	0.002\ 09

注: $\epsilon_1 \sim \epsilon_5$ 分别为距黏结层顶0、0.02 m、0.04 m、0.06 m、0.08 m位置处。

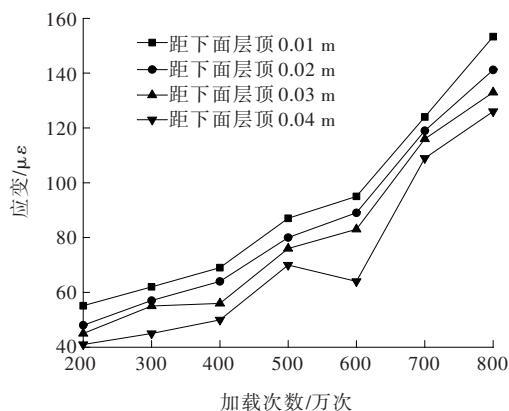


图5 下面层不同深度应变与加载次数关系

可知:在荷载重复作用下路面裂缝通常从路面底部开始发生,朝顶部发展,逐渐形成贯穿整层的纵向裂缝,反复的车辆荷载作用下,纵向裂缝向斜向和横向裂缝发展,直至最后出现网状龟裂疲劳破坏。可见,疲劳设计可以将面层底部拉应力或拉应变作为控制指标。

2.2 数值模拟分析

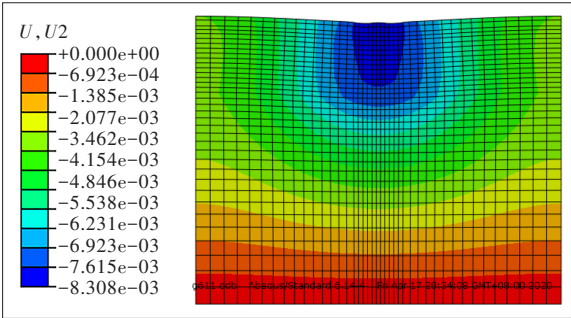
试验路面结构数值仿真模型建立基于Abaqus有限元仿真平台。由于沥青混合料是温度敏感性材料,其路用性能随温度显著变化^[19-22],因此模拟连续变温条件下沥青路面的温度场,建立沥青路面动力响应数值模型。胶粉改性沥青混合料的回弹模量小于SBS改性沥青混合料,但由于沥青膜厚度较大表现出较好的变形能力,因此为使结果更为合理需对胶粉改性沥青混合料的回弹模量进行修正,根据有限元结果分析引入回弹模量修正系数1.4。结合材料的弹性参数及蠕变参数进行有限元计算^[23-24],路面结构部分参数如表5所示。

表5 路面结构参数

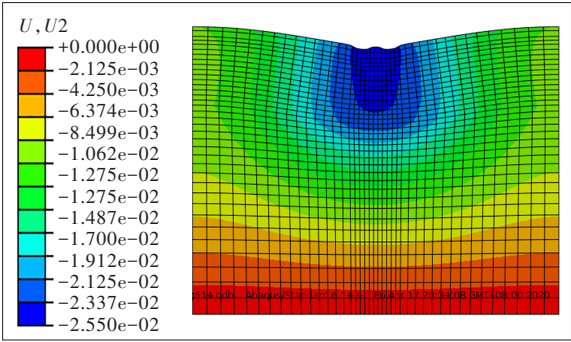
路面结构	材料名称	厚度/ cm	E/ MPa	ν
①	30% 胶粉掺量 SMA-13	4	1 100	0.35
	30% 胶粉掺量 ARHM-20	8	1 000	0.30
	18% 胶粉沥青稳定碎石	10	850	0.30
	ATB-25			
	水泥稳定级配碎石	54	1 300	0.20
	压实土		60	0.40
	SBS 改性沥青 SMA-13	4	1 400	0.25
②	SBS 改性沥青 AC-20	8	1 200	0.25
	沥青稳定碎石 ATB-25	10	1 100	0.25
	水泥稳定级配碎石	54	1 300	0.20
	压实土		60	0.40

注:表中材料参数是 20℃下对应的回弹模量及泊松比,后续材料参数随温度变化。

进行变温车辙计算引入沥青路面结构温度场数据。采用分部累计的方式计算各个加载阶段的车辙深度,得到两种路面结构加载 800 万次路表竖向变形,结果如图 6 所示。



(a) 结构①



(b) 结构②

图6 加载 800 万次路表竖向变形

在变温恒载条件下,研究两种路面结构车辙随轴载作用次数发展变化情况,结果如表 6 所示。

表6 路面车辙深度对比

加载次数/ 万次	车辙/mm	
	结构①	结构②
200	2.13	4.92
300	3.49	9.10
400	4.91	13.15
500	6.02	17.21
600	7.12	19.91
700	7.86	23.05
800	8.31	25.50

由表 6 可以看出:加载初期两种路面结构车辙深度都呈现增加趋势,但胶粉改性沥青路面车辙深度小于 SBS 改性沥青 SMA-13 路面结构;在累计加载 600 万次后,胶粉改性沥青路面对加载次数的响应敏感性降低,SBS 改性沥青 SMA-13 路面随加载次数的增加车辙深度仍呈现增长趋势。这主要是由于半刚性基层沥青混凝土在荷载作用下出现层间滑移和劲度模量衰减,从而产生随加载次数增加的塑性变形累积;而胶粉改性沥青路面由于油石比高、弹性好、油膜厚以及较强的柔韧性提高了道路抗变形能力,表现为车辙深度稳定发展。

为更直观反映路面变形规律,使用探测取值功能,取胶粉改性沥青路面横断面上各层竖向变形进行分析,胶粉改性沥青路面横断面各层竖向变形曲线如图 7 所示。

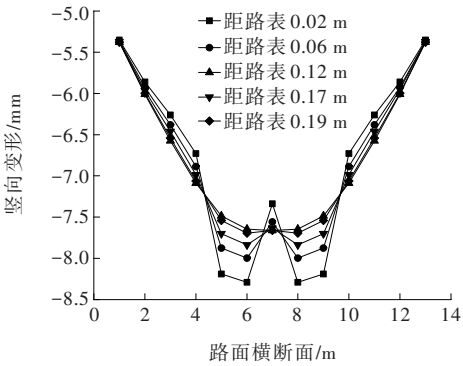


图7 横断面面层竖向变形

由图 7 可知:路面结构面层产生较大的位移,对于沥青面层厚度较大的半刚性基层路面结构而言,基层的永久变形在整个路面结构的变形中所占份额很小。车辙主要由于沥青面层的变形引起。

对胶粉改性沥青路面进行应力响应分析,各结

构层受力情况随深度变化规律如图 8 所示。

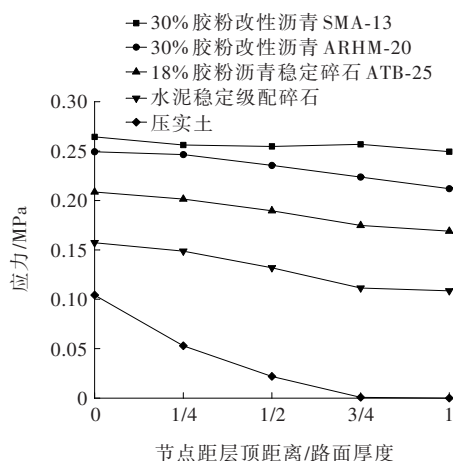
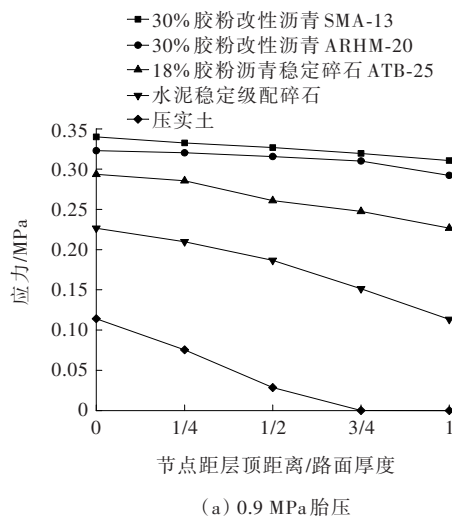


图 8 路面结构层应力分布随路面深度增加的变化



改变轮胎接地压强,分析不同胎压下路面各结构层应力分布情况,图 9 为 0.9 MPa、1.1 MPa 胎压下相应路面结构内部应力响应规律。

由图 8、9 可知:有限元模拟能够较为准确地模拟路面受力状况,路面结构层应力分布随路面深度的增加平缓减小,不同结构层模量越小,应力下降越快;并且在不同材料的接触面会发生应力突然增大现象。应力最大的部位出现于上面层的底部。黏结层使用 30% 胶粉掺量的 ARHM-20,不仅提高了黏结层抵抗永久变形的能力,且为上面层提供了良好的基础环境,加强了路面整体性能,从而提高了结构整体的抗车辙能力。由此可见,为减少路面损坏要严格控制施工。

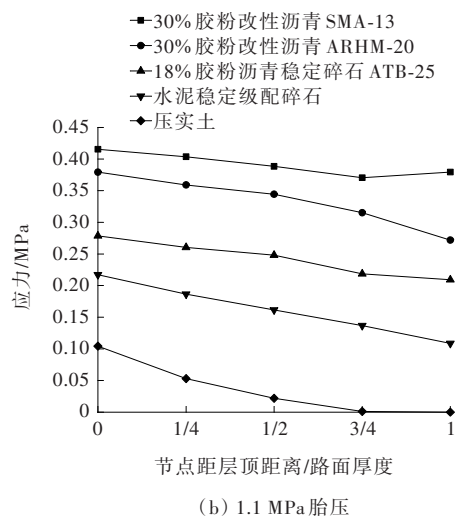


图 9 不同胎压下路面结构层应力分布随路面深度增加的变化

3 结论

以胶粉改性沥青混合料为研究对象,通过沥青宏观性能分析及微观红外光谱等测试结果得到 70# 沥青改性所用的废胶粉最佳掺加量,采用全域路面加速加载试验结合有限元数值模拟分析得到胶粉改性沥青混合料结构受力变形规律。结论如下:

(1) 红外光谱试验结果表明:不同掺量胶粉改性沥青在 180℃ 处理过程中体系化学变化相似,当胶粉掺量为 30% 时热稳定性最高。结合马歇尔试验与 SHRP 试验分析确定 70# 沥青改性所用的废胶粉最佳掺量为 30%。

(2) 通过室内试验评价了胶粉改性沥青混合料

耐高、低温性能,结果表明采用自主研发的环保橡胶沥青为原材料的橡胶沥青混合料,其各项性能指标优良,相比不同种类的改性沥青混合料具有更好的抗车辙及抗水损害能力,其低温时更不易开裂,推广应用前景广泛。

(3) 通过对全域路面加速加载试验结果分析可知,在动力荷载作用下,胶粉改性沥青路面结构在各面层主要呈现出拉应变受力状态,且存在残余应变;各面层结构变形分布范围稳定,但在不同材料的接触面会发生应变突然增大现象,其中黏结层受力变形明显,也是最薄弱的部分,随加载次数的增加累计变形明显放缓。因此,对于半刚性基层路面应提高路面黏结层的黏结强度以提高路面的使用寿命。

(4) 借助全域路面加速加载试验,基于所编写的加载程序构建有限元模型,针对不同路面结构、不同轴载作用次数下的车辙变形规律及各结构层应力分布规律可知,有限元模型能够较为准确地模拟路面受力状况,采用胶粉改性技术的路面结构具有较好的抗车辙效果,可明显延后沥青面层车辙养护维修时间。

参考文献:

- [1] 陈亮,鲁泽康,李巧茹.高速公路养护需求分析方法研究[J].中外公路,2018,38(6):331-337.
- [2] 周丹,马泽欣,刘黎萍,等.基于足尺加速加载试验的现役沥青路面疲劳特性研究[J].公路交通科技,2020,37(1):17-24.
- [3] 敬超,张金喜.沥青路面性能预测研究综述[J].中外公路,2017,37(5):31-35.
- [4] SHU X, HUANG B S. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: an overview[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 217-224.
- [5] 王歌.基于活化技术的高掺量橡胶沥青性能[D].重庆:重庆大学,2013.
- [6] 杨三强,周晓雨,闰明涛,等.废旧胶粉掺量对改性沥青溶胀机理的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2018,13(4):17-22.
- [7] YAO Hongru, ZHOU Shuai, WANG Shifeng. Structural evolution of recycled tire rubber in asphalt[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(6): 42954.
- [8] ASARO L, GRATTON M, SEGHER S, et al. Recycling of rubber wastes by devulcanization[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 133: 250-262.
- [9] 马庆伟,郭忠印,李文博,等.不同因素对橡胶复合改性沥青高温性能影响分析[J].中外公路,2022,42(3):225-230.
- [10] 周超.橡胶粉改性生物沥青的老化特性研究[J].中外公路,2022,42(4):237-243.
- [11] 王国清,曹东伟,王志斌,等.大掺量胶粉改性沥青胶结料流变性能对比研究[J].公路交通科技,2022,39(7):7-14, 22.
- [12] 张飞,王岚,邢永明.温拌胶粉改性沥青混合料的低温性能[J].中外公路,2022,42(3):174-179.
- [13] 冯新军,戴子建.胶粉表面功能化减少胶粉改性沥青离析的研究[J].中外公路,2021,41(6):221-226.
- [14] 蔡斌,王佳,相宏伟,等.超高掺量胶粉改性沥青性能评价及机理研究[J].公路交通科技,2022,39(9):16-22, 109.
- [15] 叶长建,陆少毅,黄秋山,等.废胶粉/天然沥青复合改性沥青流变性能与改性机理研究[J].中外公路,2022,42(3):219-224.
- [16] 李波,李鹏,张新雨,等.废旧胶粉的反应及交联作用对橡胶沥青黏度的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(2):26-34.
- [17] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [18] 杨三强,刘娜,黄勇.寒冷地区橡胶改性沥青及沥青混合料设计及施工技术[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [19] HAN D, ZHU G, HU H, et al. Dynamic simulation analysis of the tire-pavement system considering temperature fields[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 261-272.
- [20] 石立万,王端宜,吴瑞麟.温度荷载联合作用下沥青路面全厚度车辙研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(11):37-40.
- [21] BEHNKE R, WOLLNY I, HARTUNG F, et al. Thermo-mechanical finite element prediction of the structural long-term response of asphalt pavements subjected to periodic traffic load: Tire-pavement interaction and rutting[J]. Computers & Structures, 2019, 218: 9-31.
- [22] 胡贵华,李彦伟,张倩,等.考虑温度梯度和动态模量的全厚式车辙深度预估[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(3):8-12.
- [23] 李倩.车辆-沥青路面结构系统相互作用动力分析及路面损伤机制研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [24] 杨毅,刘忠,辛亚兵,等.动载作用下半刚性基层沥青路面应变响应的演化规律[J].中外公路,2017,37(2):51-55.