

## 面向 30 年的长寿命沥青路面设计研究

徐衍亮<sup>1</sup>, 吕正龙<sup>2,3</sup>

(1.南京市公路事业发展中心, 江苏 南京 210014; 2.苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019;

3.新型道路材料国家工程研究中心, 江苏 南京 210019)

**摘要:**以江苏省某柔性基层长寿命路面结构为基础,分别采用疲劳极限理论和累积损伤理论进行结构设计研究,分析不同设计理论的关注要点。研究表明,采用疲劳极限理论,模量采用 20℃下动态模量时,沥青路面结构的力学响应显著低于长寿命路面的设计要求,采用最不利条件下实际温度场对应的动态模量时,原路面结构不能满足设计要求,且沥青层内最大水平弯拉应变出现在中面层底;采用累积损伤理论,低剂量水泥稳定碎石底基层的疲劳寿命难以满足设计要求。综合模量、厚度等敏感因素分析,得到符合设计交通量条件的长寿命沥青路面结构。

**关键词:**公路;长寿命沥青路面;柔性基层;疲劳极限;累积损伤

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2023)02-0044-05

在“双碳”战略背景下,面临大流量交通条件下筑路材料短缺、维修养护实施困难的问题,有必要进一步提高公路的服役耐久性,减少因频繁维修养护产生的碳排放和能源消耗,提高路面服役水平,降低运营期油耗。长寿命路面是解决上述问题的一种可靠方式。目前长寿命路面设计主要依据疲劳极限理论和累积损伤理论,其主要区别在于是否容许发生损伤及何种情况存在损伤<sup>[1-2]</sup>。疲劳极限理论的主要原理是当沥青层底弯拉应变小于疲劳极限时,路面将不会发生源于沥青层底部的疲劳开裂。目前欧美国家的长寿命沥青路面设计主要基于该理论,主要有沥青层底弯拉应变和土基顶部竖向压应变 2 个指标,分别用于控制沥青层的疲劳和路面结构的永久变形 2 种损坏模式<sup>[3]</sup>。累积损伤理论的主要原理是沥青路面损伤遵循 Miner 破坏累积法则,荷载每作用一次,则产生一次损伤,损伤以预测交通荷载重复作用次数与允许荷载重复作用次数之比表示。MEPDG(力学—经验路面设计指南)设计方法、JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》均基于该理论<sup>[1]</sup>。鉴于目前疲劳极限理论主要应用于柔性基层,为对比不同设计理论带来的设计结果差异,本文基于江苏省某柔性基层长寿命路面结构,分析采用不同设计理论设计时的关注要点,为柔性基层乃至半刚性基层长寿命路面设计提供参考。

## 1 设计交通量

依托江苏省某高速公路,结合区域收费站实际

车型调查数据,将大型客车及货车细分为 10 种车型,各车型分布系数见表 1。

表 1 车辆类型分布系数

车辆类型	车型分布系数/%	车辆类型	车型分布系数/%
2 类	18.09	7 类	3.54
3 类	20.79	8 类	7.33
4 类	16.63	9 类	8.54
5 类	0.00	10 类	6.85
6 类	17.67	11 类	0.56

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》确定各类车辆的当量设计轴载换算系数,其中非满载车和满载车的比例和当量设计轴载换算系数取全国经验值,非满载车与满载车所占比例见表 2。

表 2 非满载车与满载车所占比例

车辆类型	非满载车比例/%	满载车比例/%	车辆类型	非满载车比例/%	满载车比例/%
2 类	85	15	7 类	70	30
3 类	90	10	8 类	45	55
4 类	65	35	9 类	60	40
5 类	75	25	10 类	55	45
6 类	55	45	11 类	65	35

设计年限为 30 年,车道系数取 0.7,方向系数按经验取 55%,折算交通量年增长率为 3%。根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》计算得到的交通量见表 3。

表 3 设计交通量

项目	数值
二轴六轮及以上车辆的双向年 平均日交通量/(辆·d <sup>-1</sup> )	7 555
方向系数	0.55
车道系数	0.7
年平均增长率/%	3
设计使用年限/年	30
$N_1$	7 082
初始年设计车道日平均 当量轴次/(次·d <sup>-1</sup> )	$N_2$ 568 635
$N_3$	7 082
$N_4$	12 763
$Ne_1$	$1.23 \times 10^8$
设计年限内设计车道上 当量设计轴载累计作用 次数/次	$Ne_2$ $9.87 \times 10^9$
$Ne_3$	$1.23 \times 10^8$
$Ne_4$	$2.22 \times 10^8$

注: $N_1$ 、 $Ne_1$  以沥青层层底拉应变为控制指标; $N_2$ 、 $Ne_2$  以无机结合料层层底拉应力为控制指标; $N_3$ 、 $Ne_3$  以沥青层永久变形为控制指标; $N_4$ 、 $Ne_4$  以路基竖向压应变为控制指标。

2 结构设计

以江苏省某高速公路柔性基层长寿命路面试验路为基础,分别采用疲劳极限理论和累积损伤理论设计设计寿命为 30 年的柔性基层长寿命沥青路面,试验段路面结构及模量参数见表 4。沥青混合料模量从图 1 所示实测动态模量主曲线中获得,SBS 改性沥青 SMA-13、SBS 改性沥青 Sup-20、70# 道路石油沥青 Sup-25 对应的温度和频率分别为 20 ℃ 和 10 Hz,70# 道路石油沥青 ATB-25 对应的温度和频率分别为 20 ℃ 和 5 Hz,级配碎石、低剂量水泥稳定碎石及土基模量根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》推荐值及经验选取。

2.1 基于疲劳极限的长寿命沥青路面设计

根据国内外柔性基层长寿命路面相关研究成

表 4 长寿命沥青路面结构及模量参数

结构层	厚度/cm	模量/MPa
SBS 改性沥青 SMA-13	4	11 211
SBS 改性沥青 Sup-20	6	11 245
70# 道路石油沥青 Sup-25	8	12 304
70# 道路石油沥青 ATB-25	20	6 554
级配碎石	20	400
低剂量水泥稳定碎石	20	8 500
土基	—	100

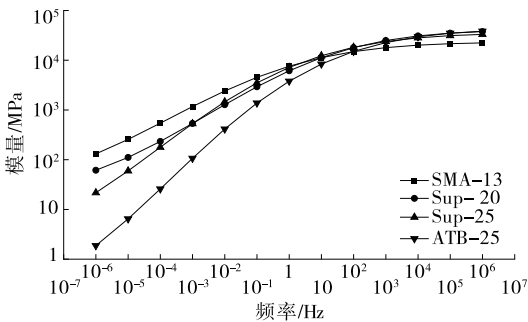


图 1 沥青混合料动态模量主曲线(20 ℃)

果,采用疲劳极限理论设计时,分别采用土基顶部竖向压应变 $\leq 200 \mu\epsilon$ 、沥青层层底弯拉应变 $\leq 70 \mu\epsilon$ 控制路面结构永久变形和沥青层疲劳开裂<sup>[4-5]</sup>。采用 BISAR 软件计算得到的土基顶部竖向压应变和沥青层内不同深度处水平弯拉应变分别见图 2、图 3。从图 2、图 3 可看出:土基顶部竖向压应变和沥青层层底弯拉应变均远低于疲劳极限标准,满足长寿命沥青路面设计要求。

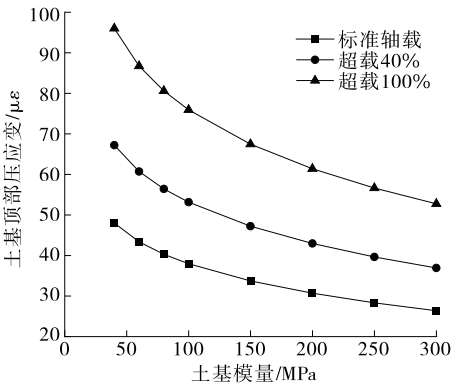


图 2 土基顶部压应变与土基模量的关系

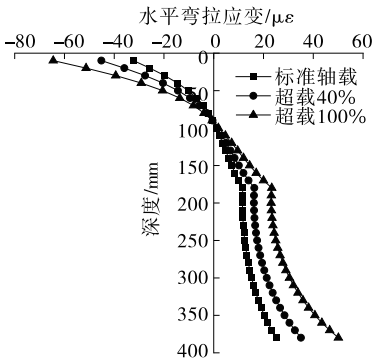


图 3 沥青层内不同深度处水平弯拉应变

在原路面结构的基础上调整 ATB-25 混合料层厚度,计算厚度对土基顶部竖向压应变和沥青层内弯拉应变的影响。ATB-25 混合料层厚度为 4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、20 cm 时土基顶部竖向压

应变和沥青层内弯拉应变分别见图4、图5。从图4、图5可看出:随着ATB-25混合料层厚度的减小,土基顶部竖向压应变和沥青层内不同深度处弯拉应变逐渐增加,在标准轴载条件下能满足长寿命路面的设计要求,但实际运营过程中需加强超载控制。

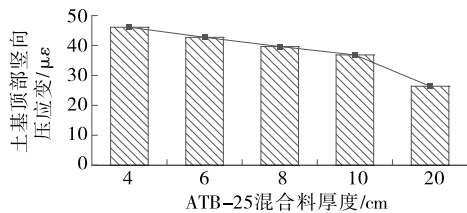


图4 ATB-25混合料厚度对土基顶部竖向压应变的影响

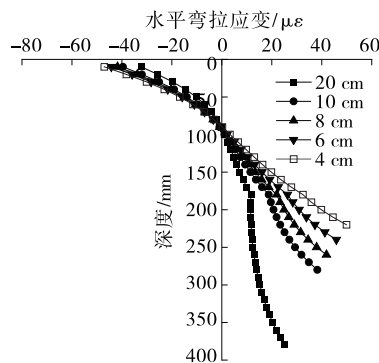


图5 ATB-25混合料厚度对沥青层内弯拉应变的影响

采用疲劳极限理论时,长寿命沥青路面在结构设计层面很容易实现。但力学响应计算过程中,沥青混合料模量作为一个关键参数,不同模量取值标准会造成设计结果很大差异。JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》和JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》均通过力学响应验算设计结构是否合理,前者采用静态回弹模量计算结构层底弯拉应力,后者采用动态模量计算沥青层底水平弯拉应变、无机结合料稳定材料层底水平拉应力及土基顶部竖向压应变。此外,沥青混合料是温敏性材料,不同路面结构温度场条件下模量不尽相同,影响设计结果。

为量化这种影响,分别计算20℃下动态模量、静态模量和实际温度场下动态模量条件下沥青路面结构的力学响应。考虑最不利因素,温度场数据根据江苏省气象服务中心发布的南京市气候数据依据LTPP(沥青路面长期性能)模型计算得到,计算点为各结构层的中间位置。计算得SBS改性沥青SMA-13、SBS改性沥青Sup-20、70#道路石油沥

青Sup-25和70#道路石油沥青ATB-25的当量温度分别为60.4℃、55.5℃、51.9℃、47.8℃。根据该温度结合相应频率得到实际温度场下动态模量(见表5)。

表5 实际温度场下路面结构层的模量参数

结构层	厚度/ cm	20℃平均 抗压模量/ MPa	实际温度 场下动态 模量/MPa
SBS改性沥青 SMA-13	4	1 400	262.5
SBS改性沥青 Sup-20	6	1 200	311.9
70#道路石油沥青 Sup-25	8	1 000	390.9
70#道路石油沥青 ATB-25	20	1 200	928.0
级配碎石	20	400	400.0
低剂量水泥稳定 碎石	20	1 300	8 500.0
土基	—	100	100.0

不同模量下沥青路面结构力学响应见图6~10。从图6~10可看出:采用不同途径获取的模量值,力学响应计算结果差异很大,采用最不利条件下温度场时,路面结构已不满足长寿命路面设计要求,需准确界定模量特性及取值范围以提高设计精度。

## 2.2 基于累积损伤的长寿命沥青路面设计

采用JTG D50—2017设计时,柔性基层路面结

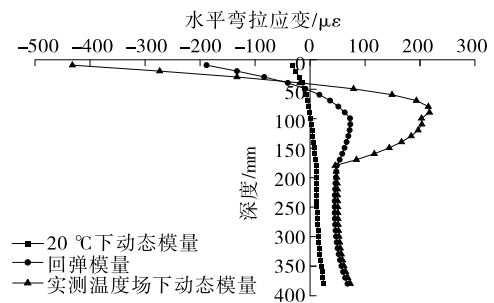


图6 不同模量时柔性基层结构沥青层内弯拉应变分布

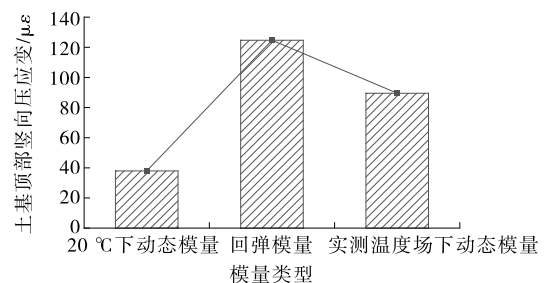


图7 不同模量时柔性基层结构土基顶部竖向压应变分布

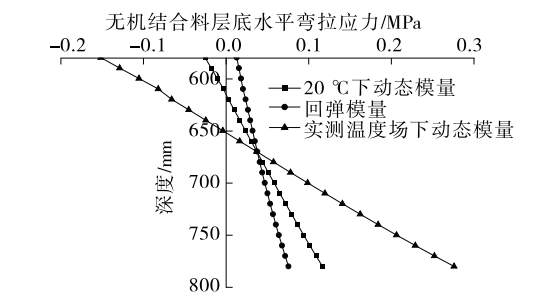


图 8 不同模量时柔性基层结构低剂量水泥稳定碎石层内弯拉应力分布

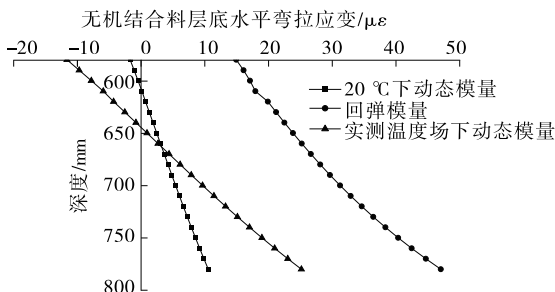


图 9 不同模量时柔性基层结构低剂量水泥稳定碎石层内弯拉应变分布

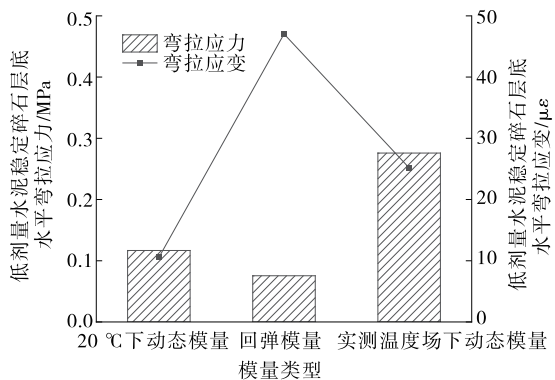


图 10 不同模量时柔性基层结构低剂量水泥稳定碎石层内弯拉应力和应变分布

构的疲劳寿命见表 6。从表 6 可看出:试验路低剂量水泥稳定碎石底基层的疲劳寿命为  $3.79 \times 10^9$  次,而设计标准为  $9.87 \times 10^9$  次,低剂量水泥稳定碎石底基层的疲劳寿命不满足要求。拟通过提高底基层厚度、降低基层模量、提高底基层强度 3 种途径进行结构优化。

表 6 柔性基层沥青路面结构的疲劳寿命

结构层	疲劳寿命/次		是否满足要求
	计算结果	设计要求	
沥青路面	$1.65 \times 10^8$	$1.23 \times 10^8$	是
低剂量水泥稳定碎石底基层	$3.79 \times 10^9$	$9.87 \times 10^9$	否

底基层厚度与低剂量水泥稳定碎石底基层疲劳寿命的关系见表 7。从表 7 可看出:随着低剂量水泥稳定碎石底基层厚度的增加,底基层疲劳寿命增大,底基层厚度达到 50 cm 时,底基层的疲劳寿命满足要求。但相对于原方案,底基层厚度提高 150%。

表 7 不同底基层厚度时低剂量水泥稳定碎石底基层的疲劳寿命

底基层厚度/cm	底基层疲劳寿命/次	底基层厚度/cm	底基层疲劳寿命/次
22	$4.05 \times 10^9$	40	$7.35 \times 10^9$
25	$4.44 \times 10^9$	45	$8.61 \times 10^9$
30	$5.26 \times 10^9$	50	$1.01 \times 10^{10}$
36	$6.83 \times 10^9$		

低剂量水泥稳定碎石模量、强度与低剂量水泥稳定碎石底基层疲劳寿命的关系分别见图 11、图 12。从图 11 可看出:降低低剂量水泥稳定碎石模量可提高底基层的疲劳寿命,但模量降低的同时强度也降低,不符合低剂量水泥稳定碎石底基层的强度要求。从图 12 可看出:低剂量水泥稳定碎石强度降低会导致底基层的疲劳寿命进一步降低,与模量降低的作用相悖,降低底基层模量与提高底基层强度的方案不可取。

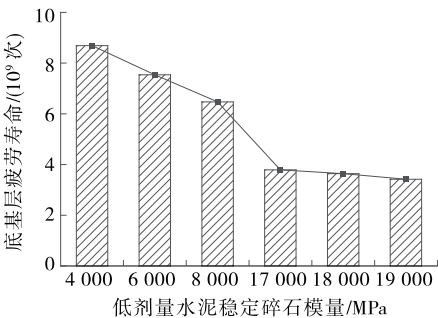


图 11 低剂量水泥稳定碎石底基层疲劳寿命与低剂量水泥稳定碎石模量的关系

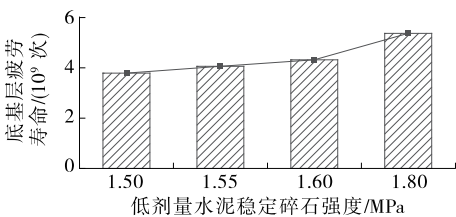


图 12 低剂量水泥稳定碎石底基层疲劳寿命与低剂量水泥稳定碎石强度的关系

考虑到低剂量水泥稳定碎石底基层厚度增加 30 cm 对路面标高、成本等的影响,尝试采用全柔性

沥青路面,即不设置低剂量水泥稳定碎石底基层,初始路面结构设置为4 cm SBS改性沥青 SMA-13+6 cm SBS改性沥青 Sup-20+8 cm 70<sup>#</sup>道路石油沥青 Sup-25+20 cm 70<sup>#</sup>道路石油沥青 ATB-25+20 cm 级配碎石,此时沥青混合料的疲劳寿命为 $4.19 \times 10^7$ 次,不满足设计要求( $1.23 \times 10^8$ 次)。为此,考虑通过增加 ATB-25 和增加中下面层混合料模量等方式提高沥青混合料的疲劳寿命。沥青混合料疲劳寿命与 ATB-25 混合料厚度及中下面层沥青混合料模量的关系见图 13、图 14。从图 13、图 14 可以看出:ATB-25 基层厚度由 20 cm 增至 28 cm 时,沥青混合料的疲劳寿命满足要求;随着中下面层模量的增加,沥青混合料的疲劳寿命增加,但当 20 ℃、10 Hz 条件下动态模量增至 20 000 MPa 时,疲劳寿命仅为设计寿命的 40%。可见,不能单纯依靠改变中下面层混合料模量提高沥青混合料的疲劳寿命。

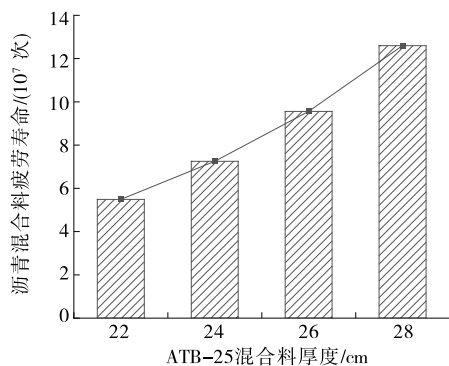


图 13 沥青混合料疲劳寿命与 ATB-25 混合料厚度的关系

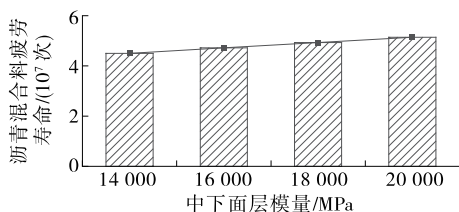


图 14 沥青混合料疲劳寿命与中下面层模量的关系

结合目前高模量沥青混合料的应用背景,考虑到模量提升对混合料疲劳寿命的改善作用,拟定中下面层采用高模量沥青混合料,中下面层厚度与混合料疲劳寿命的关系见图 15。从图 15 可看出:中下面层厚度增加时,沥青混合料的疲劳寿命增加,中下面层厚度从 14 cm 增至 20 cm 时,沥青混合料的疲劳寿命满足要求。

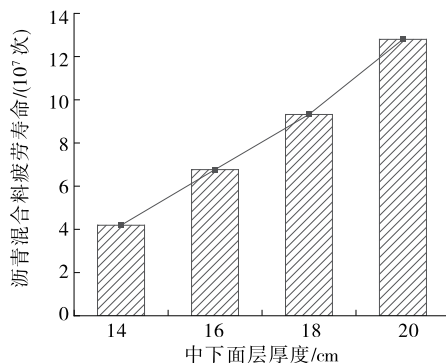


图 15 沥青混合料疲劳寿命与中下面层厚度的关系

根据上述分析,中下面层采用高模量沥青混合料时,沥青层厚度相比原路面结构增加 6 cm,而增加 ATB-25 时,沥青层厚度增加 8 cm。综合考虑沥青层混合料的性能,最终采用 4 cm SBS 改性沥青 SMA-13+10 cm 高模量沥青混合料 EME14+10 cm 高模量沥青混合料 EME14+20 cm 70<sup>#</sup>道路石油沥青 ATB-25+20 cm 级配碎石的路面结构方案。该方案下沥青层永久变形验算结果见表 8。从表 8 可看出:车辙主要集中于上部,符合长寿命沥青路面的理念。

表 8 长寿命柔性基层的永久变形

结构层	结构层的变形/mm	车辙贡献率/%	永久变形/mm
SMA-13	4.11	28.09	14.63
EME14	10.02	68.49	14.63
EME14	0.49	3.35	14.63
ATB-25	0.01	0.06	14.63

### 3 结论

(1) 采用疲劳极限理论设计时,根据 20 ℃ 下动态模量计算沥青路面力学响应,所选路面结构能满足长寿命路面设计要求;采用通过不同途径获取的模量值进行计算,结构层力学响应计算结果差异很大,采用最不利条件下温度场时,路面结构不满足长寿命路面设计要求。建议准确界定模量特性及取值范围以提高路面设计精度。

(2) 采用累积损伤理论设计时,在设计交通量下,原路面结构中低剂量水泥稳定碎石底基层的疲劳寿命不满足长寿命路面设计要求,且通过提高底基层厚度、降低基层模量、提高底基层强度等方式进行优化,效果有限。

(下转第 72 页)

有限公司,2019.

- [3] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面养护设计规范:JTG 5421—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] 孙立军,刘喜平.路面使用性能的标准衰变方程[J].同济大学学报(自然科学版),1995,23(5):512—518.
- [5] 交通部公路规划设计院.公路自然区划标准:JTJ 003—1986[S].北京:中国标准出版社,1986.
- [6] 荣建国,王浩仰.路网级沥青路面使用性能衰变模型的标定[J].交通科学与工程,2019,35(4):22—27.
- [7] 中华人民共和国交通运输部办公厅.关于调整公路交通情况调查车型分类及折算系数的通知:厅规划字[2010]205号[A].北京:中华人民共和国交通运输部办公厅,2010.

- [8] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG H20—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [10] 甘梁刚,毛立举,林茂森.江西省公路养护科学决策管理系统的构建及应用[C]//中国公路养护与管理分会.2014全国公路养护技术学术年会论文集(路面卷).北京:人民交通出版社股份有限公司,2014:138—141.

收稿日期:2022—03—31

\*\*\*\*\*  
(上接第48页)

(3) 综合考虑沥青混合料的性能,采用累积损伤理论设计,得到4 cm SBS改性沥青 SMA—13+10 cm 高模量沥青混合料 EME14+10 cm 高模量沥青混合料 EME14+20 cm 70# 道路石油沥青 ATB—25+20 cm 级配碎石的沥青路面结构,该结构的永久变形主要集中于上部,符合长寿命沥青路面的理念。

#### 参考文献:

- [1] 吕正龙.长寿命半刚性基层沥青路面的设计分析[J].建材装饰,2020(20):43—45.

- [2] 杨永顺,韦金城,高雪池,等.永久性沥青路面设计方法研究[R].济南:山东省交通厅公路局,2008.
- [3] NEWCOMB D E, WILLIS R, TIMM D H. Perpetual asphalt pavements: A synthesis [R]. The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2010.
- [4] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 王伟力,唐中华,孔令云,等.隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):39—45.

收稿日期:2022—04—06

\*\*\*\*\*  
(上接第52页)

- [2] 张金生,马丽莉,陈奕辛.高粘沥青与沥青混合料性能对比研究[J].四川水泥,2020(2):313—314.
- [3] 朱振祥,田隽,王冻,等.高粘弹改性沥青 SMA—5 超薄磨耗层路用性能研究[J].山东交通科技,2019(5):71—73.
- [4] 张海涛,李尚涛.增塑 SBS 沥青与基质沥青老化耐久性的对比研究[J].公路工程,2019,44(6):213—216+239.
- [5] 王卫雷,马柱,李大为,等.胶粉掺量对橡胶改性沥青低温性能的影响[J].城市道桥与防洪,2021(6):278—281.
- [6] 豆怀兵,陈拴发,祝斯月,等.高粘改性沥青胶浆粘弹特性研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(4):53—57.
- [7] 黄卫东,高杰,郝庚任,等.高粘 SBS 改性沥青的流变性能与化学特性研究[J].建筑材料学报,2021,24(5):1024—1031+1038.

- [8] 熊梦日,王辉.预处理废胶粉复合改性沥青制备工艺探讨[J].公路与汽运,2022(1):51—53.
- [9] 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.
- [10] 王律明.掺加不同纤维高粘弹沥青力学性能影响分析[J].山西建筑,2015,41(17):82—83.
- [11] 时敬涛,袁野,张生泉,等.高粘助剂对高粘高弹沥青性能的影响规律研究[J].石油沥青,2019,33(5):7—11.
- [12] 靳可.SBS/废胶粉复合高粘度改性沥青的制备及性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2020.
- [13] 王辉,周争辉,詹诗浩,等.废胶粉/SBS 复合改性沥青混合料 CR/SHMA—13 的级配研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):1—7.

收稿日期:2022—03—22