

加铺小粒径大孔隙沥青混合料薄层罩面的路面结构力学响应分析

徐 洋, 张 翼, 胡 靖

(东南大学, 江苏 南京 211189)

摘 要: 为探究小粒径大孔隙沥青混合料 SLAM 薄层罩面的工程应用可行性, 采用动态模量表征动态荷载条件下 SLAM 材料性能, 并基于 ABAQUS 有限元软件仿真分析不同 SLAM 类型及罩面层厚度条件下加铺 SLAM 薄层罩面的路面结构力学响应规律。结果表明: SLAM 具有良好的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗滑性能和排水性能; 相比 SLAM-II, SLAM-I 的动态模量较小, 动态模量和相位角更易受到荷载频率的影响; 加铺 SLAM 薄层罩面可以提高原有路面各结构层的抗裂性能, 且对中层横向抗裂的改善效果优于纵向抗裂; 与加铺 SLAM-I 薄层罩面的路面结构相比, 加铺 SLAM-II 薄层罩面的路面结构中罩面层底纵向最大应力、横向最大应力、层间剪应力水平均较高, 应采取针对性措施来保证罩面层与表面层之间的层间安全, 在工程应用中应尽量选择模量低的 SLAM 类型。

关键词: 道路工程; 小粒径大孔隙沥青混合料; 薄层罩面; 动态模量; 有限元分析; 力学响应

中图分类号: U416.26; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0262-06

Analysis on Mechanical Response of Pavement Structures Paved with Thin-layer Overlay of Small-size Large-pore Asphalt Mixture

XU Yang, ZHANG Yi, HU Jing

(Dongnan University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of the engineering application of small-size large-pore asphalt mixture (SLAM) thin-layer overlay, the dynamic modulus is adopted to characterize the material performance of SLAM under dynamic loading conditions, and based on the ABAQUS finite element software, the mechanical response rule of the pavement structure paved with SLAM thin-layer overlay under the different SLAM types and overlay layer thickness conditions are simulated and analyzed. The results show that SLAM has the good high-temperature stability, low-temperature crack resistance, water stability, anti-skid performance and drainage performance. Compared with SLAM-II, the dynamic modulus of SLAM-I is smaller, and the dynamic modulus and phase angle are more likely to be affected by the load frequency. The addition of SLAM thin-layer overlay can improve the cracking resistance of the original pavement structural layers, and the improvement effect of transverse cracking of the middle layer is better than the longitudinal cracking. Compared with the pavement structure paved with SLAM-I thin-layer overlay, the maximum longitudinal stress at the bottom of the overlay layer, the maximum transverse stress, and the level of interlayer shear stress are higher in the pavement structure paved with SLAM-II thin-layer overlay. The targeted measures should be taken to ensure the interlayer safety between the overlay layer and the surface layer. The type of SLAM with low modulus should be selected as much as possible for the engineering application.

Keywords: road engineering; small-size large-pore asphalt mixtures; thin-layer overlays; dynamic modulus; finite element analysis; mechanical response

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 2023 年度苏州市关键核心技术攻关社会发展项目(指导性计划)(2023ssd28)

作者简介: 徐洋(1988—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路路面材料与结构研究工作。

通信作者: 胡靖(1987—), 男, 博士, 副教授, 从事道路路面材料与细观结构研究工作。电子邮箱: hujing@seu.edu.cn

0 引 言

路面预防性养护是当路面性能降到一定程度时, 采取相应措施以提高路面性能的方式^[1]。目前预防性养护主要包括雾封层、稀浆封层、微表处以及薄层罩面等措施^[2-4]。其中薄层罩面不仅能有效解决路面平整度差的问题, 还能延缓原有沥青面层

开裂等病害的发展,受到广泛关注^[5]。小粒径(≤ 4.75 mm)提升骨料嵌挤强度,大孔隙($>20\%$)赋予优异排水降噪功能^[6-7]。王晓东^[8]采用公称最大粒径为 4.75 mm 的小粒径集料制备了一种空隙率大于 20% 的薄层罩面用沥青混合料 SLAM,并通过室内试验证明 SLAM 具有良好的路用性能。但 SLAM 薄层罩面在车辆动态荷载下的材料性能及加铺后路面力学响应仍需研究。

目前,众多学者已广泛开展基于仿真模型的沥青路面结构力学响应研究,杨真子等^[9]定量分析了高温重载交通对沥青路面路表弯沉和结构应力的影响规律;任俊达等^[10]基于三维黏弹有限元法研究了沥青路面结构的力学响应;Li 等^[11]研究了新建路面在不同速度、荷载和温度耦合效应下的路面设计动态参数。但当前研究主要聚焦环境温度、行车速度、加载位置等因素对于路面结构力学响应的影响,薄层罩面材料类型及其厚度变化对原有路面结构的力学响应影响尚待进一步研究。

因此,采用单轴压缩试验测试动态荷载条件下 SLAM 的材料性能,并基于 ABAQUS 有限元软件建立动态荷载条件下的加铺 SLAM 薄层罩面的路面结构仿真模型,分析不同 SLAM 类型及薄层罩面厚度变化对原有路面结构的力学响应影响,为 SLAM 的实际工程应用提供理论基础。

1 小粒径大孔隙沥青混合料

1.1 专用高黏改性沥青

由于小粒径大孔隙沥青混合料 SLAM 的空隙率较大,沥青会加速老化,导致薄层罩面容易出现松散、剥落以及坑槽等常见病害^[12]。在 SBS 改性沥青的基础上,采用增黏技术制备了 2 种 SLAM 专用高黏改性沥青,其制备工艺如下。

(1)将 SBS 改性沥青在 165~175 ℃融化后,与高黏改性剂(Ⅰ型、Ⅱ型)按质量比 86:14 分别混合,并在 170~180℃条件下用玻璃棒搅拌 1~2 min。

(2)在 170~180 ℃条件下,采用小型高速剪切仪对搅拌后的混合物进行两阶段的高速剪切。首先采用速率 2 000 r/min 进行 10 min 高速剪切,然后采用速率 5 000 r/min 进行 30 min 高速剪切,从而得到专用高黏改性沥青Ⅰ、专用高黏改性沥青Ⅱ,其性能指标如表 1 所示。

1.2 SLAM 级配设计

本文选取 4.75 mm 作为公称最大粒径进行 SLAM

表 1 SLAM 专用高黏改性沥青性能指标			
沥青类型	针入度(25℃)/ 0.1 mm	软化 点/℃	延度 (5℃, 5 cm/min)/cm
专用高黏改性沥青Ⅰ	51.3	92.0	45.7
专用高黏改性沥青Ⅱ	42.5	96.7	47.0
SBS 改性沥青	58.3	64.3	53.1

级配设计,结果如表 2 所示。将专用高黏改性沥青Ⅰ、专用高黏改性沥青Ⅱ对应的 SLAM 分别记为 SLAM-I,SLAM-II,通过析漏试验和飞散试验确定最佳油石比分别为 4.6%、4.5%。

表 2 SLAM 级配组成			
筛孔孔径/mm	通过率/%	筛孔孔径/mm	通过率/%
9.5	100.0	0.6	6.8
4.75	17.7	0.3	6.1
2.36	11.0	0.15	5.1
1.18	7.0	0.075	4.0

1.3 SLAM 路用性能

SLAM-I、SLAM-II 的路用性能试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,SLAM-I 和 SLAM-II 具有良好的路用性能,其动稳定度、最大弯拉应变、冻融劈裂强度比和构造深度等指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[13]要求。SLAM-I 和 SLAM-II 的渗水系数均超过 5 000 mL/min,具有极其优异的排水性能。

表 3 SLAM 路用性能					
混合料 类型	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	最大弯拉 应变 με	冻融劈裂 强度比/%	构造深 度/mm	渗水系数/ (mL·min ⁻¹)
SLAM-I	8 143	2 784	82.97	0.81	7 215
SLAM-II	8 301	2 896	84.62	0.84	7 279
标准 要求 ^[13]	≥3 000	≥2 500	≥80	≥0.55	—

针对路用性能指标,SLAM 与传统薄层材料(SMA、OGFC)性能对比如表 4,数据来源于《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[13]。

表 4 SLAM 与传统薄层材料路用性能对比				
性能指标	SLAM-I	SLAM-II	SMA	OGFC
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	8 143	8 301	≥3 000	≥3 000
最大弯拉应变 με	2 784	2 896	≥2 500	未作要求
冻融劈裂强度比/%	82.97	84.62	≥80	未作要求
渗水系数/(mL·min ⁻¹)	7 215	7 279	<80	—
排水能力	极优	极优	差	优
降噪效果	显著	显著	一般	显著

与传统薄层材料相比,SLAM 通过小粒径骨料密实嵌挤与大孔隙结构协同作用,在渗水性($>7\ 000$ mL/min)、抗滑性(构造深度 >0.8 mm)、降噪

方面具有显著优势,SLAM是唯一能兼顾三者的薄层罩面材料,其“小粒径密实嵌挤+大孔隙快速排水”的设计逻辑,实现了传统材料(SMA或OGFC)单一功能的突破。

2 SLAM动态模量

动态模量反映的是沥青混合料在动态车轮荷载作用下的强度^[14],其表征的应力应变响应与路面实际交通荷载状况较为接近^[15]。采用单轴压缩试验,在无侧限条件下,通过施加偏移正弦波,测试SLAM在不同温度与荷载频率下的动态模量和相位角变

化。试验严格按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[16](JTG E20—2011)的要求进行,具体试验步骤如下。

(1)试件制备。首先采用旋转压实仪成型高度为170 mm、直径为150 mm的圆柱体试件,然后对试件进行钻芯取样,得到高度为150 mm±2.5 mm、直径为100 mm±2 mm的单轴压缩试验用标准试件。

(2)动态模量测试。采用MTS试验机对步骤(1)得到的标准试件,进行测试温度为0、20、60℃,加载频率为0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、25 Hz条件下的单轴压缩试验,动态模量和相位角试验结果如图1所示。

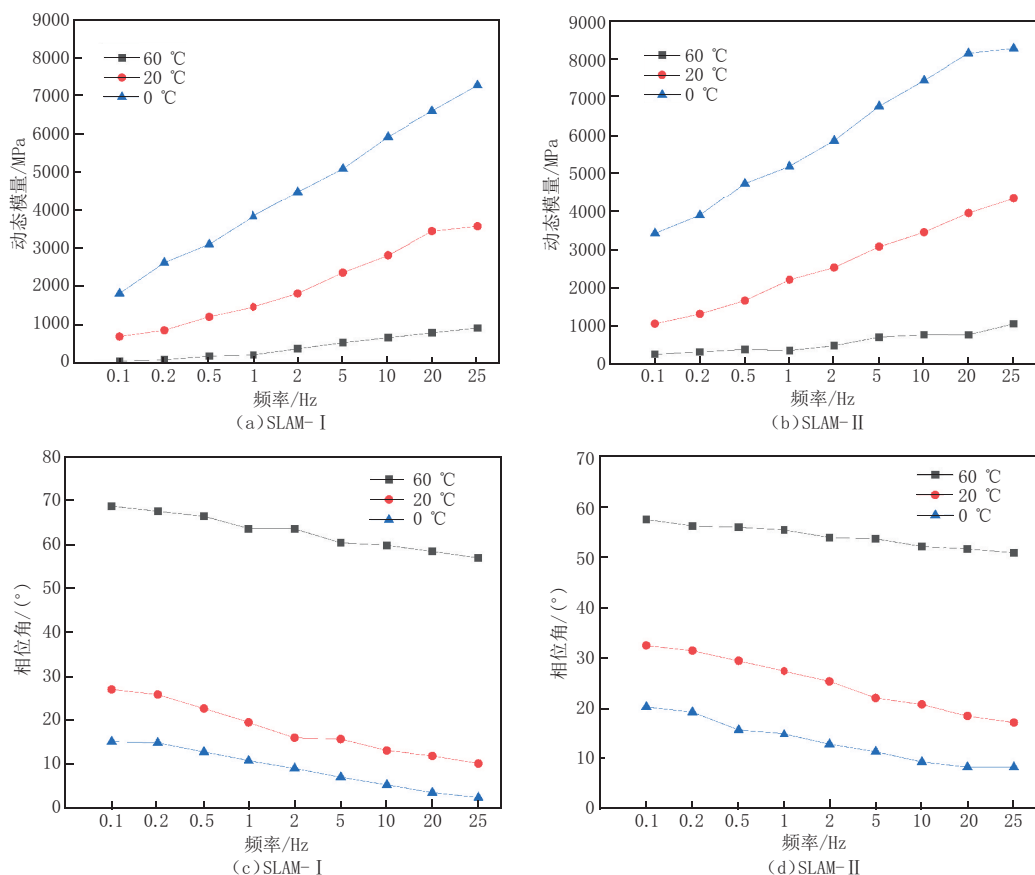


图1 不同温度与荷载频率下SLAM的动态模量和相位角试验结果

由图1可知,SLAM-I和SLAM-II的动态模量和相位角受温度与荷载频率的影响较大,温度越高或荷载频率越小,动态模量值越小,而相位角越大,相比SLAM-I,SLAM-II的动态模量更大,且温度越低,两者之间的动态模量差值越大。当试验温度由60℃下降到0℃时,SLAM-I、SLAM-II的相位角分别平均下降85.6%、75.2%,可见SLAM-I的相位角相比SLAM-II更易受到温度影响。

相比SLAM-II,SLAM-I动态模量和相位角更易受到荷载频率的影响。当荷载频率由0.1 Hz变化到25 Hz时,60℃温度条件下SLAM-I、SLAM-II的动态

模量分别提高740%、346%;0℃温度条件下SLAM-I、SLAM-II的相位角分别下降82.19%、59.01%。分析原因是专用高黏改性沥青I的针入度相对较大,沥青相对更软。

3 加铺SLAM薄层罩面的路面结构力学响应分析

建立加铺SLAM薄层罩面的路面结构三维有限元模型,以路面结构层底横向最大应力、纵向最大应力和层间剪应力为评价指标,研究不同SLAM类型及罩面层厚度变化对原有路面结构的力学响应影响。

3.1 模型构建

基于 ABAQUS 软件^[17]建立路面结构三维有限元模型,各层厚度及材料参数如表 5 所示,其中 SLAM 薄层罩面的材料参数通过单轴压缩试验得到。模型假设路面结构为弹性层状体系,层间完全连续,模型尺寸为长 5 m、宽 4 m;网格单元类型为 C3D8R,节点积分采用减缩积分^[18]。荷载采用标准轴载 BZZ-100^[19],通过 Fortran 语言编写 Dload 子程序以实现模拟移动荷载^[20]。路基底部采用固结约束,限制模型四周的侧向位移。为避免边界条件的影响,以距离边界 1 m 处作为移动荷载的起始位置。加铺 SLAM 薄层罩面的路面结构三维有限元模型如图 2 所示。为不失一般性,选择固定荷载频率为 10 Hz、环境温度为 20 ℃。

表 5 路面结构三维有限元模型各层厚度及材料参数

结构层	材料名称	厚度/cm	E/MPa	μ
罩面层	SLAM-I/SLAM-II	1.5/2/2.5	3 319/4 416	0.30
表面层	SMA13	4	1 400	0.35
中面层	AC20	6	1 200	0.30
下面层	沥青稳定碎石 ATB	24	1 000	0.30
基层	级配碎石 GM	15	500	0.35
底基层	水泥稳定碎石 CTB	20	1 500	0.25
土基	压实土 SG	500	40	0.40

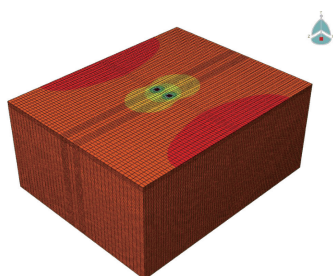


图 2 加铺 SLAM 薄层罩面的路面结构三维有限元模型

3.2 结果分析

不同 SLAM 类型及罩面层厚度条件下加铺 SLAM 薄层罩面的路面各结构层底横向最大应力、纵向最大应力、层间剪应力等力学响应计算结果如图 3 所示,并与未加铺薄层罩面的路面结构进行对比。

(1)由图 3 可知,罩面层底的横向最大应力、纵向最大应力在路面各结构层中均处于最高水平,随着罩面层厚度增加,罩面层底的横向最大应力、纵向最大应力均有所下降,且表面层、中面层、下面层的横向最大应力、纵向最大应力均出现不同程度下降,可见加铺 SLAM 薄层罩面可以提高原有路面各结构层的抗裂性能。

(2)由图 3(a)可知,相比未加铺薄层罩面的路面

结构,表面层底的横向最大应力平均下降 41.6%,中面层底的横向最大应力平均下降 15.5%,说明从纵向抗裂的角度来看,加铺 SLAM 薄层罩面对表面层的保护效果更为显著。由图 3(c)可知,相比未加铺薄层罩面的路面结构,表面层底的纵向最大应力平均下降 41.4%,中面层底的纵向最大应力平均下降 41.2%,说明从横向抗裂的角度来看,加铺 SLAM 薄层罩面对表面层和中面层具有相近的保护效果,由图 3(a)和图 3(c)对比可知,加铺 SLAM 薄层罩面对中面层的纵向最大应力的改善效果优于横向最大应力,即对横向抗裂的改善效果优于纵向抗裂。

(3)由图 3(e)可知,相比路面其他结构层,罩面层底的剪应力水平最高,且随着罩面层的厚度增加而不断下降。因此,为保证加铺 SLAM 薄层罩面的路面结构层间安全,一方面应在条件允许下尽量选择较高的罩面层厚度,另一方面应着重加强罩面层与表面层之间的层间强度设计和施工质量。

(4)对比图 3(a)至图 3(f)可知,与加铺 SLAM-I 薄层罩面的路面结构相比,加铺 SLAM-II 薄层罩面的路面结构中罩面层底纵向最大应力、横向最大应力、层间剪应力水平均较高,分析原因是 SLAM-II 的材料模量较高,相同条件下其在路面结构中需要承担的应力水平也相对较高。

4 结 论

采用动态模量表征动态荷载条件下的小粒径大孔隙沥青混合料 SLAM 材料性能,并基于 ABAQUS 有限元软件分析不同 SLAM 类型及罩面层厚度变化对原有路面结构的力学响应影响,主要研究结论如下。

(1)SLAM-I 和 SLAM-II 在 0~60 ℃范围内具有良好的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗滑性能和排水性能。SLAM 通过小粒径与大孔隙协同作用,在抗滑、排水、应力分散方面显著优于传统罩面材料。但需在寒区工程中补充-10 ℃及更低温度的性能验证。

(2)相比 SLAM-I,SLAM-II 的动态模量更大,且温度越低,两者之间的动态模量差值越大。相比 SLAM-II,SLAM-I 动态模量和相位角更易受到荷载频率的影响,分析原因是专用高黏改性沥青 I 的针入度相对较大,沥青更软。

(3)随着罩面层厚度增加,罩面层底的横向最大应力、纵向最大应力均有所下降,且表面层、中面层、下面层的横向最大应力、纵向最大应力均出现不同

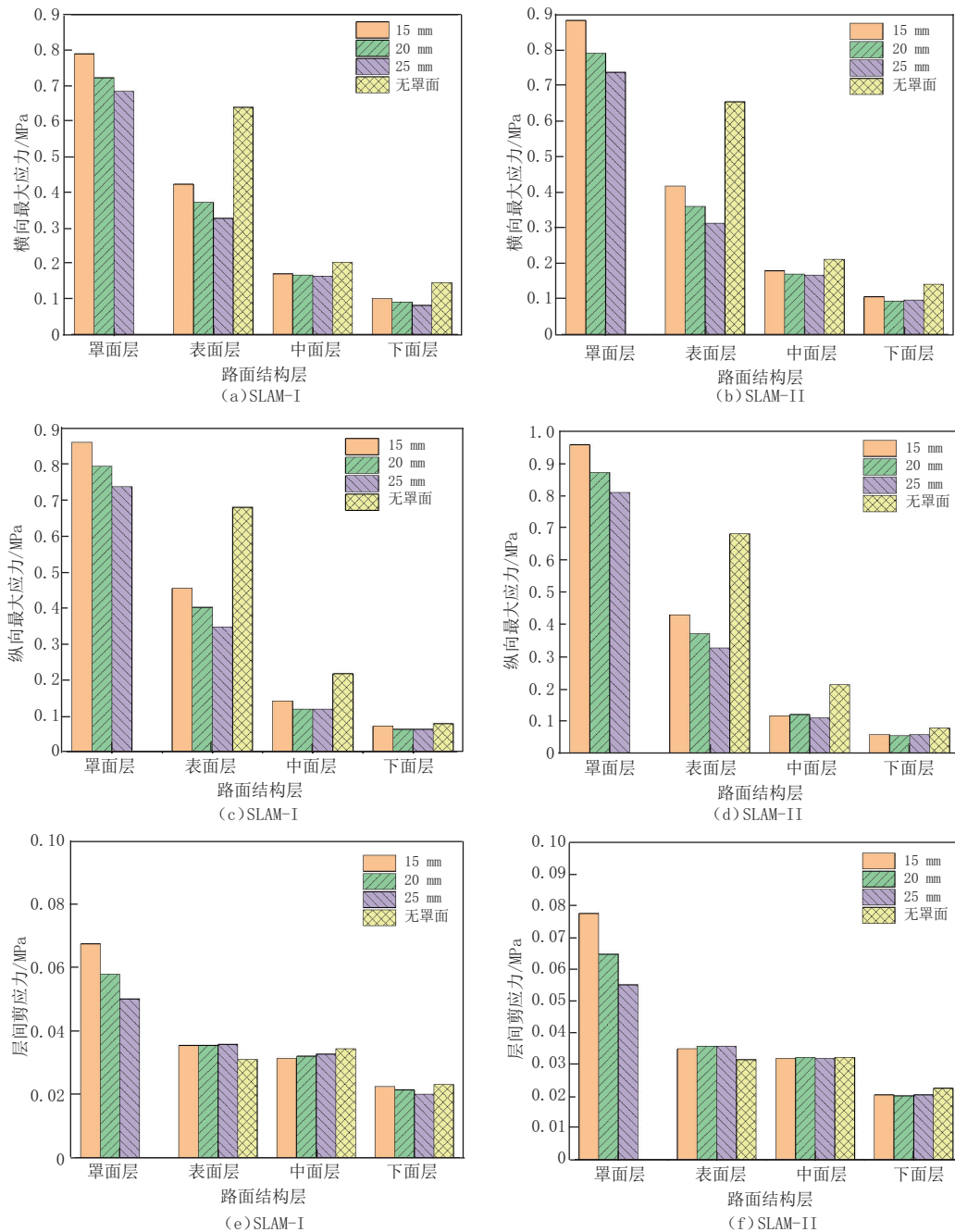


图3 不同SLAM类型及罩面层厚度条件下加铺SLAM薄层罩面的路面结构力学响应结果

程度下降,可见加铺SLAM薄层罩面可以提高原有路面各结构层的抗裂性能。相比路面其他结构层,罩面层底的剪应力水平最高,应采取针对性措施保证罩面层与表面层之间的层间安全。

(4)从横向最大应力来看,加铺SLAM薄层罩面对表面层的保护效果更为显著,从纵向最大应力来看,加铺SLAM薄层罩面对表面层和中面层具有相近的保护效果,加铺SLAM薄层罩面对中面层的纵向最大应力的改善效果优于横向最大应力,即提高中面层横向抗裂的效果优于纵向抗裂。

(5)因SLAM-II的材料模量相对SLAM-I较高,

加铺SLAM-II薄层罩面的路面结构中罩面层底纵向最大应力、横向最大应力、层间剪应力水平均相对较高。在工程应用中,条件允许下应尽量选择模量较低的SLAM类型。

参考文献:

- [1] Zhang HJ, Li H, Zhang Y, *et al.* Performance Enhancement of Porous Asphalt Pavement Using Red Mud as Alternative Filler[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 707-713.
- [2] 罗运辉,安昶. 沥青路面预防性养护应用效果对比研究[J]. 公路, 2022, 67(6): 352-359.
- [3] 贺轩浩,许伟强,唐堂. 四川普通国省干线公路微表处技术应用后

- 评价[J]. 公路, 2023, 68(3): 364-370.
- [4] 史纪村, 岳学军. 同步碎石封层层间黏结强度正交试验研究[J]. 公路, 2016, 61(4): 196-200.
- [5] 罗程, 颜峰, 夏海廷, 等. 钢渣沥青混合料薄层罩面层间剪切性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 4197-4208.
- [6] 贺佳佳. 小粒径排水抗滑型超薄沥青罩面技术在高速公路中的应用[J]. 交通世界, 2025(增刊1): 75-77.
- [7] 何苗苗, 朱祥勇, 廖宇, 等. 小粒径排水沥青混合料路用性能及功能特性实验及效果[J]. 科技和产业, 2025, 25(9): 56-61.
- [8] 王晓东, 刘诗城, 魏小皓, 等. 超薄磨耗层小粒径沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(1): 27-32.
- [9] 杨真子. 高温重载作用下沥青路面结构力学响应分析[J]. 公路交通技术, 2020, 36(2): 20-26.
- [10] 任俊达, 张怀志, 谭忆秋. 基于三维黏弹有限元法的沥青路面结构力学响应分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 15-23.
- [11] Li HT, WANG GQ, QIN LS, *et al.* A Spectral Analysis of the Dynamic Frequency Characteristics of Asphalt Pavement under Live Vehicle Loading[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(2): 486-499.
- [12] 冯新军, 解明卫, 陈安迪. TS高黏度改性沥青的制备和OGFC混合料的路用性能[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1): 8-15.
- [13] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [14] Mohammad L, Wu Z, Myers L, *et al.* A Practical Look at the Simple Performance Tests Louisianas Experience[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2005(3): 557-600.
- [15] 孙红亮, 赵曜, 朱宇杰, 等. 透水性沥青混合料配合比设计和路用性能研究[J]. 森林工程, 2015, 31(2): 130-134.
- [16] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [17] 耿巍, 任海生, 胡帮艳, 等. 高寒强紫外线地区钢混组合梁桥面铺装结构温度-荷载耦合作用分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5): 557-566.
- [18] 魏小皓, 罗桑, 刘鑾, 等. 不同面层组合形式下灌入式复合路面力学特性研究[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(6): 108-114.
- [19] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范[S].
- [20] 李赫. 动静荷载作用下沥青混合料及沥青路面黏弹性力学响应分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.