

新疆地区LSAM-53柔性基层沥青路面典型结构车辙预估研究

苏宏强¹, 董敏¹, 王浩², 汪波¹, 王勇¹, 张铮¹, 张学渊^{2,3}, 蒲超^{4,5}, 王斌^{4,5}

¹中国葛洲坝集团市政工程有限公司乌鲁木齐绕城高速(西线)工程施工总承包项目部, 湖北 宜昌

²长安大学公路学院, 陕西 西安

³中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安

⁴新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐

⁵新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年7月3日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月8日

摘要

因新疆特殊气候下半刚性基层沥青路面车辙的病害问题, 超大粒径沥青混合料LSAM-53凭借沥青用量少、骨架稳定性好等优势, 本文提出以LSAM-53柔性基层替代传统半刚性基层以提升路面使用性能。通过考虑导致路面车辙的多项关键因素, 构建了车辙预估模型并使用有限元软件模拟车辙板在不同轮压(0.5 MPa, 0.7 MPa, 0.9 MPa)和温度下(50°C, 60°C, 70°C)的剪应力分布, 明确了剪应力与轮压的直接关系。通过室内车辙试验, 研究分析了不同级配(A, B)、温度(50°C, 60°C, 70°C)和轮压条件下(0.5 MPa, 0.7 MPa, 0.9 MPa)的车辙变形规律, 得出骨架结构更密实的级配车辙变形量更小, 且温度和轮压对车辙变形有显著影响。基于试验数据和SPSS回归分析, 研究建立了改进的车辙预估模型, 并通过行驶速度修正, 使其适用于实际行车条件, 能够根据交通参数、路面结构与材料参数预估LSAM-53柔性基层在设计年限内的车辙深度, 或反算动稳定度容许值以优化路面结构设计, 为新疆地区柔性基层沥青路面的设计与应用提供了科学依据。

关键词

超大粒径沥青混合料, 柔性基层, 车辙预估模型, 新疆地区

Study on Rutting Prediction of Typical LSAM-53 Flexible Base Asphalt Pavement Structures in Xinjiang

Hongqiang Su¹, Min Dong¹, Hao Wang², Bo Wang¹, Yong Wang¹, Zheng Zhang¹,
Xueyuan Zhang^{2,3}, Chao Pu^{4,5}, Bin Wang^{4,5}

¹Urumqi Ring Expressway (West Section) Project Construction General Contracting Project Department of China Gezhouba Group Municipal Engineering Co., Ltd., Yichang Hubei

文章引用: 苏宏强, 董敏, 王浩, 汪波, 王勇, 张铮, 张学渊, 蒲超, 王斌. 新疆地区 LSAM-53 柔性基层沥青路面典型结构车辙预估研究[J]. 交通技术, 2025, 14(5): 630-641. DOI: 10.12677/ojtt.2025.145063

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

³China Construction Silk Road Construction Investment Company Limited, Xi'an Shaanxi

⁴Xinjiang Transport Planning Survey and Design Institute Co, Ltd., Urumqi Xinjiang

⁵Xinjiang Key Laboratory for Safety and Health of Transportation Infrastructure in Alpine and High-Altitude Mountainous Areas, Urumqi Xinjiang

Received: Jul. 3rd, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

Abstract

In Xinjiang's unique climate, semi-rigid base asphalt pavements often suffer from diseases. This paper suggests replacing the traditional semi-rigid base with a LSAM-53 flexible base, which is a super-large aggregate asphalt mixture with less asphalt use and better skeleton stability. The study builds a rutting prediction model by considering key factors causing rutting. Using a finite element software, the simulation of the shear stress distribution of a rutting board under different wheel pressures (0.5 MPa, 0.7 MPa, 0.9 MPa) and temperatures (50°C, 60°C, 70°C) shows a direct link between shear stress and wheel pressure. Indoor rutting tests under different gradations (A, B), temperatures (50°C, 60°C, 70°C), and wheel pressures (0.5 MPa, 0.7 MPa, 0.9 MPa) reveal that denser-structured gradations have smaller rutting deformations, with temperature and wheel pressure significantly affecting rutting. Based on test data and SPSS regression analysis, an improved rutting prediction model is established and corrected for driving speed, making it suitable for real conditions. The model can predict the rut depth of the LSAM-53 flexible base within the design life based on traffic, pavement, and material parameters, and it can also calculate the allowable dynamic stability value to optimize pavement design, offering a scientific basis for designing and applying flexible base asphalt pavements in Xinjiang.

Keywords

Large-Size Asphalt Mixture, Flexible Base Course, Rutting Prediction Model, Xinjiang Region

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

路面车辙作为道路服役性能的关键控制指标，始终是道路工程领域的研究重点。由于路面基层主要发挥承重以及扩散荷载的功能，对路面结构整体稳定性有着重要影响，大粒径沥青混合料(Large Stone Asphalt Mixes, LSAM)柔性基层因其独特的骨架嵌挤结构和较高的抗剪强度[1]-[3]，在重载交通条件下表现出更优的抗车辙性能和长期耐久性。LSAM-53 大粒径混合料因其良好的骨架结构被推荐用于柔性基层[4]-[5]，但其在新疆特殊环境下的车辙演化规律尚不明确，因此深入研究其抗车辙变形性能具有重要现实意义。此外，由于柔性基层沥青路面的沥青层结构更厚，其车辙控制指标相较传统路面基层结构更为严格。近年来针对柔性基层车辙预测已形成众多研究成果，但现有模型在新疆地区特殊气候条件与交通条件下的适用性仍存在局限[6]-[8]。基于此，本研究通过系统分析车辙变形量与材料参数、环境因素及荷载条件的相关性，构建了车辙预估模型，进而科学分析 LSAM-53 柔性基层在长期服役过程中的高温抗车辙性能。

2. 车辙预估模型的建立与相关计算

2.1. 车辙预估模型基本形式

建立车辙预测模型时需兼顾准确性、实用性以及实验的可行性,本文以纪小平提出的基础模型(式 2.1)为框架,考虑现实条件进行相关模型参数的调整[9]。主要调整包含两方面:第一,根据新规范要求,将核心参数由“抗剪强度”替换为“动稳定度”(DS),以此直接表征材料的高温性能;第二,鉴于结构层厚度与剪应力的密切关联性以及试验设备对大厚度试件的测试限制,故未考虑厚度变量。通过分析规范数据与既有研究,确定车辙变形量(RD)与动稳定度间符合幂函数关系,最终建立改进的车辙预估模型(式 2.2)。

$$R_d = A(N)^n (T)^t (d)^h \left(\frac{\tau}{[\tau]} \right)^s \left(\frac{v}{v_0} \right)^{-(m+1)} \quad (2.1)$$

$$R_d = A(N)^n (T)^t (\tau)^s \left(\frac{v}{v_0} \right)^{-(m+1)} (DS)^b \quad (2.2)$$

模型考虑的关键因素及其依据如下:

(1) 轴载作用次数 N

轴载作用次数是表征交通荷载的核心参数,其数值大小对于路面车辙病害的产生具有明显的相关性,同时能直接反映道路设计寿命(累计标准轴载作用次数)。试验中通过控制车辙试验轮以 42 次/分钟的速率往复加载,持续 3 小时并每 15 分钟记录一次数据,共获得轴载作用次数从 630 次到 7560 次的 12 组车辙变形量数据,进而分析轴载作用次数对于路面车辙的影响。

(2) 温度 T

温度会影响沥青的粘结性进而显著影响沥青混合料的高温性能。试验设定了 50℃、60℃、70℃ 三个温度梯度进行验证温度的影响,实测数据显示,温度每升高 5℃ 会导致车辙深度明显增加,验证了考虑温度参数的必要性。

(3) 最大剪应力 τ

剪应力是引发路面结构层侧向永久位移即车辙变形的直接力学因素。基于车辙发展的三阶段理论(压实、流动、剪切破坏),该模型以剪应力作为第三个破坏阶段的控制指标,选择沥青混合料层最大剪应力作为结构力学参数。通过有限元软件计算轮压为 0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa 时的结构层最大剪应力,以此替代传统竖向压应力参数,更全面表征力学响应。

(4) 行驶速度 v

试验采用固定加载速度 42 次/分钟。研究表明,车辙深度与行驶速度呈负相关,车辆行驶速度越大,车辆荷载对于路面结构层的作用时间会相对较短,进而车辙深度也会减小。对于道路上各种车辆的混合行驶,车辆行驶速度分布范围较广,故有必要对于行驶速度作为影响因素考虑。

(5) 动稳定度 DS

动稳定度是现行规范推荐的高温稳定性指标,直接反应材料的高温性能,但通过对实际工程情况考虑,路面的高温车辙变形影响因素较为广泛,为确保车辙预估模型的准确性,故未将动稳定度作为直接的影响因素,以其作为表征材料高温性能的参数,与上述因素共同考虑为车辙预估模型的关键因素。

2.2. 剪应力计算

采用 Abaqus 有限元仿真模拟软件建立车辙板仿真模型,模型尺寸为 300 × 300 × 100 mm,边界条件设定为:除轮载作用面外,其余五个面均施加固定约束。轮胎宽度为 50 mm,测试试验轮与车辙板接触

面积，如图 1 所示。通过复写纸与毫米方格纸在车辙仪实测轮胎接触面大致为长 50 mm、宽 20 mm 的矩形，因此在软件中按实际接触面积施加荷载，模型构建及网格划分如图 2、图 3 所示。

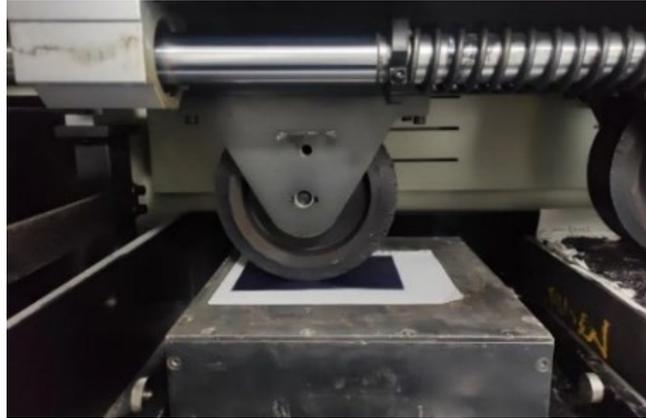


Figure 1. Contact area measurement of rutting test wheel
图 1. 车辙试验轮接触面积测试

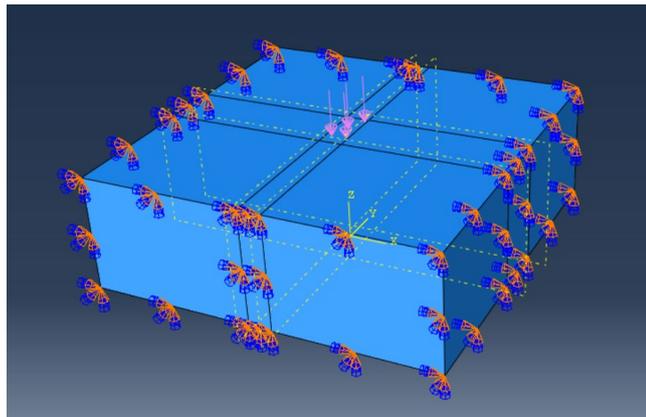


Figure 2. Development of finite element model for rutting slab
图 2. 车辙板有限元模型构建

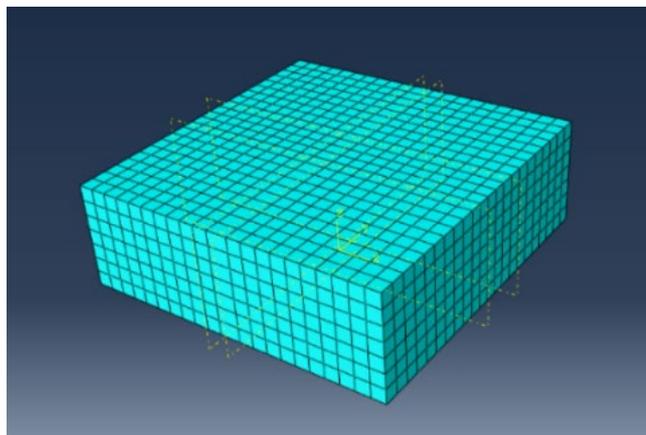


Figure 3. Finite element model meshing
图 3. 有限元模型网格划分

在所构建的模型中,变化上述所控制的参数,轮压分别设定为 0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa,同时材料在 50℃、60℃、70℃时取用不同的模量与密度,模拟结果表明,车辙板内部产生的最大剪应力与材料参数(模量、密度)无关,而仅随轮压的增加而显著增大。车辙板受轮载作用时的荷载分布云图如图 4 所示。剪应力模拟计算结果如表 1 所示。

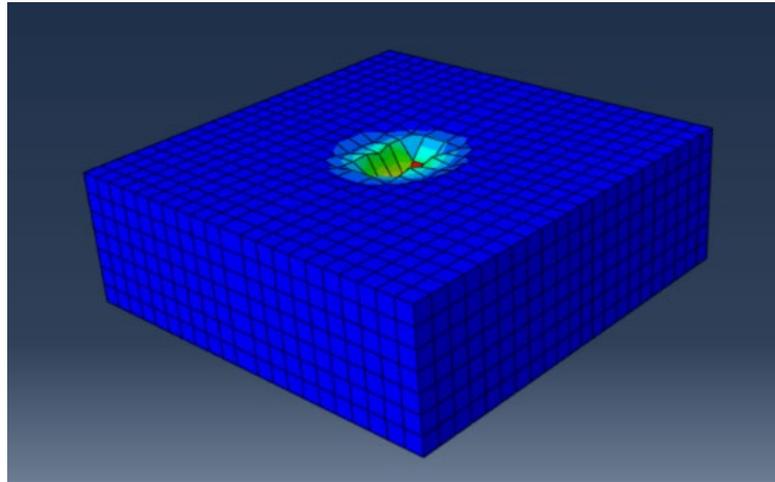


Figure 4. Load distribution contour plot of rutting slab
图 4. 车辙板荷载分布云图

Table 1. Simulation results of shear stress

表 1. 剪应力模拟计算结果

试验温度(°C)	轮压(MPa)	最大剪应力(MPa)
50	0.5	0.1370
	0.7	0.1917
	0.9	0.2465
60	0.5	0.1370
	0.7	0.1917
	0.9	0.2465
70	0.5	0.1370
	0.7	0.1917
	0.9	0.2465

3. LSAM-53 高温稳定性研究

3.1. 车辙实验

为评估预估模型的普遍适用性,本研究采用两种级配进行室内车辙试验:S型级配A和中值级配B,试验采用最佳油石比,测试温度分别为 50℃、60℃和 70℃,轮压设定为 0.5 MPa、0.7 MPa 和 0.9 MPa。试验持续时间为 3 小时,每 15 分钟记录一次车辙变形量,共计获取 12 组数据。试验结果汇总于表 2 至表 3,基于试验数据,绘制了不同温度、轮压及轴载次数下 LSAM-53 车辙变形量的变化趋势图,如图 5 至图 6 所示。

Table 2. Rutting test results of gradation A
表 2. 级配 A 车辙试验结果

	温度 $T(^{\circ}\text{C})$			50			60			70		
	轮压(MPa)	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9		
累计轴载作用次数下的 车辙变形量(mm)	630	0.879	0.972	1.064	1.015	1.116	1.238	1.164	1.279	1.442		
	1260	0.962	1.107	1.243	1.164	1.312	1.509	1.378	1.534	1.765		
	1890	1.012	1.167	1.333	1.224	1.389	1.609	1.482	1.667	1.965		
	2520	1.051	1.206	1.383	1.268	1.436	1.674	1.559	1.765	2.104		
	3150	1.081	1.243	1.429	1.309	1.479	1.728	1.627	1.854	2.203		
	3780	1.106	1.273	1.467	1.347	1.519	1.774	1.680	1.916	2.268		
	4410	1.129	1.302	1.504	1.377	1.553	1.811	1.721	1.962	2.320		
	5040	1.150	1.326	1.533	1.402	1.582	1.844	1.756	1.998	2.362		
	5670	1.167	1.347	1.556	1.426	1.608	1.872	1.784	2.031	2.396		
	6300	1.181	1.364	1.579	1.441	1.626	1.893	1.806	2.057	2.424		
	6930	1.192	1.376	1.597	1.454	1.641	1.909	1.824	2.076	2.443		
	7560	1.202	1.388	1.611	1.466	1.654	1.922	1.836	2.089	2.458		
DS (次/min)	8182	7975	6238	7079	6702	4884	4065	3214	2266			

Table 3. Rutting test results of gradation B
表 3. 级配 B 车辙试验结果

	温度 $T(^{\circ}\text{C})$			50			60			70		
	轮压(MPa)	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9		
累计轴载作用 次数下的车辙 变形量(mm)	630	0.884	1.004	1.095	1.042	1.157	1.263	1.209	1.312	1.429		
	1260	0.992	1.138	1.273	1.193	1.353	1.544	1.409	1.559	1.759		
	1890	1.049	1.204	1.368	1.258	1.423	1.644	1.517	1.682	1.939		
	2520	1.087	1.246	1.423	1.307	1.475	1.712	1.597	1.770	2.047		
	3150	1.124	1.284	1.469	1.353	1.524	1.764	1.666	1.847	2.133		
	3780	1.159	1.323	1.512	1.392	1.566	1.813	1.720	1.912	2.204		
	4410	1.184	1.351	1.549	1.425	1.602	1.852	1.763	1.959	2.263		
	5040	1.206	1.376	1.576	1.452	1.631	1.883	1.799	2.001	2.312		
	5670	1.222	1.393	1.597	1.472	1.651	1.909	1.829	2.031	2.347		
	6300	1.236	1.409	1.614	1.488	1.668	1.928	1.851	2.054	2.374		
	6930	1.249	1.422	1.628	1.501	1.682	1.944	1.869	2.073	2.396		
	7560	1.259	1.433	1.640	1.512	1.694	1.958	1.881	2.087	2.411		
DS (次/min)	8289	7500	5676	6429	6058	4667	3938	3580	2903			

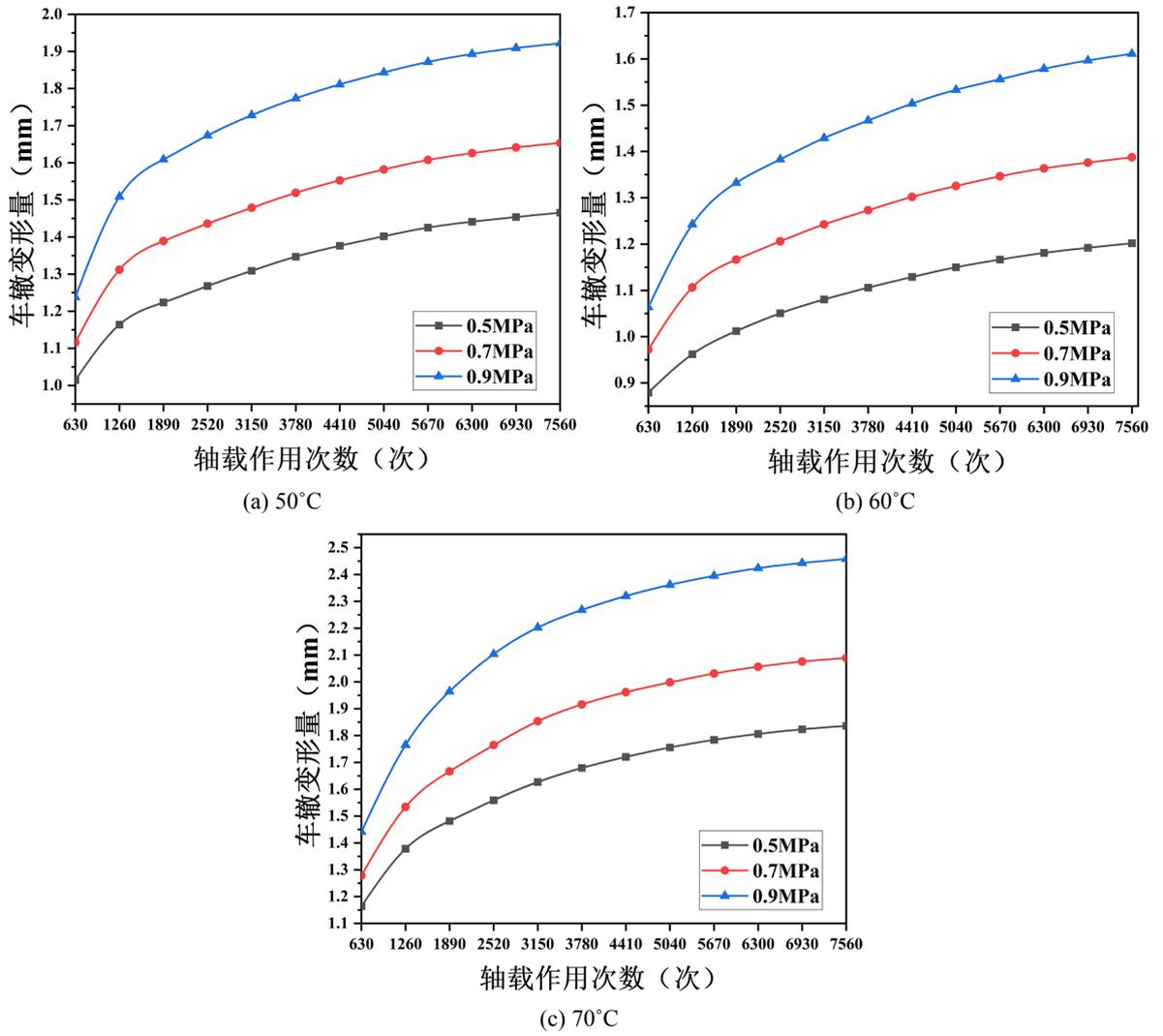
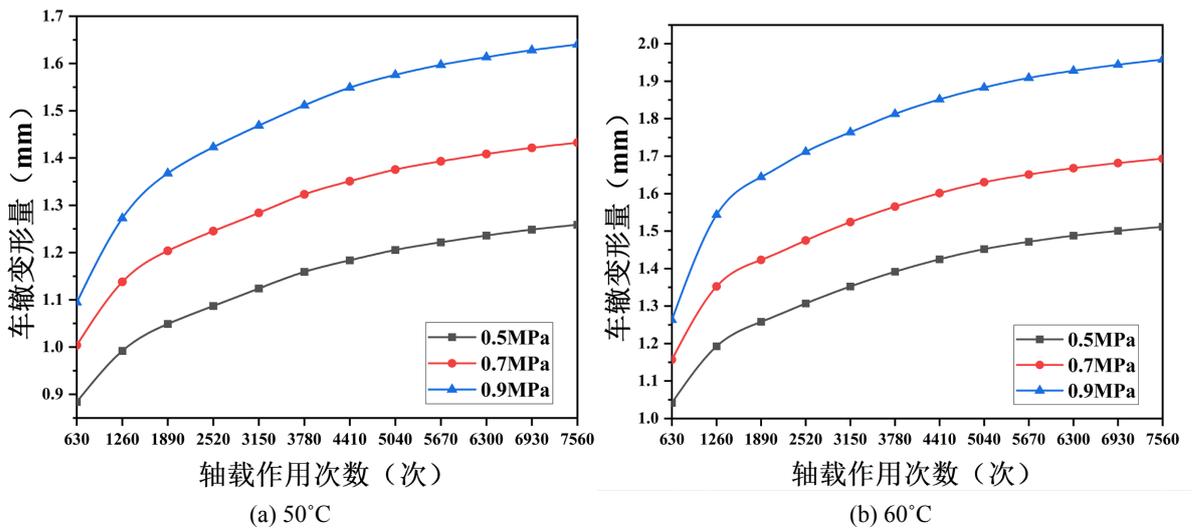


Figure 5. Variation pattern of rutting deformation for gradation A
图 5. 级配 A 车辙变形量变化规律



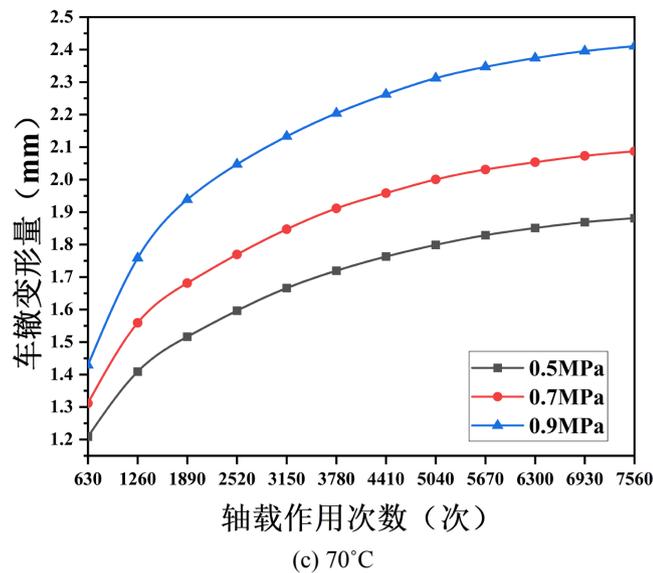


Figure 6. Variation pattern of rutting deformation for gradation B
图 6. 级配 B 车辙变形量变化规律

根据图 5 和图 6 所示, LSAM-53 试验中车辙变形的发展规律具有一致性。结果表明: 骨架结构更为完善、密实度更高的级配, 其车辙变形量显著降低。加载初期, 车辙变形量增长迅速; 随着轴载作用次数的增加(即试验时间延长), 变形速率逐渐减缓, 该现象归因于沥青混合料内部存在初始空隙: 在升温条件下, 沥青混合料软化, 在持续轮载作用下, 上层混合料逐渐填充下方空隙, 随着加载次数的累积, 混合料不断被压密, 空隙率降低, 可供混合料侧向流动的空间减小, 导致车辙变形的进一步发展愈发困难。此外, 研究还发现: 温度升高显著加剧了车辙变形; 轮压增大会在加载初期产生更大的初始变形, 但随着轴载作用次数的增加, 其变形增量速率呈现下降趋势。

3.2. 车辙预估模型的求解与修正

首先基于车辙试验结果求解如式(3.1)所示的简化模型, 速度参数可在求解后的模型上进行修正。

$$R_0 = A(N)^n (T)^t (\tau)^s (DS)^b \quad (3.1)$$

以室内试验车辙深度、轴载作用次数、温度、车辙板剪应力作为基础参数进行计算, 利用 SPSS 软件进行线性回归, 求解得到模型参数: $A=12.4641$, $n=0.1633$, $t=0.1061$, $s=0.1907$, $b=-0.4133$ 。得到车辙预估模型如式(3.2)所示。相关性 $R^2=0.9531$, 说明拟合程度较高, 对比车辙变形量预估值与实测值, 如图 7 所示, 说明车辙预估模型有良好的预估效果。

$$R_0 = 12.4641 \times (N)^{0.1633} (T)^{0.1061} (\tau)^{0.1907} (DS)^{-0.4133} \quad (3.2)$$

由现有研究成果可知, 设计速度与基准速度下的车辙变形存在如式(3.3)所示的关系, m 为蠕变参数, 取 $-1.0 \sim 0$ [9]。

$$R_d = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{-(m+1)} R_0 \quad (3.3)$$

依据现有研究结果, 室内车辙试验行驶速度与实际行车速度有如式(3.4)所示的关系[10]。

$$v_i = 0.466v_0 + 4.689 \quad (3.4)$$

本文所进行的室内车辙试验轮载速度 v_l 为 42 次/min, 相当于实际基准车速为 80 km/h, 因此修正后的车辙预估模型如式(3.5)所示。本文后续研究时设计车速均默认为 80 km/h。

$$R_d = 12.4641 \times (N)^{0.1633} (T)^{0.1061} (\tau)^{0.1907} (DS)^{-0.4133} \left(\frac{v}{80}\right)^{-(m+1)} \quad (3.5)$$

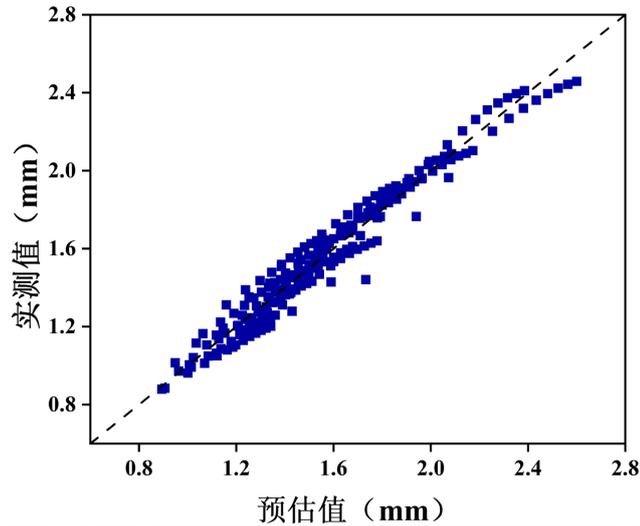


Figure 7. Relationship between predicted and measured values
图 7. 预估值和实测值的关系

3.3. 车辙预估模型的应用

车辙预估模型的应用, 可正向预测 LSAM-53 柔性基层在设计年限内的累积车辙深度, 同时基于规范限定的容许车辙深度可以进行反算 LSAM-53 混合料的动稳定度容许值[11]。

(1) 交通参数分析

根据工程实地情况和要求, 确定路面等级、设计年限等交通参数, 根据规范计算沥青混合料层设计年限内当量设计轴载累计作用次数 N_{e3} 。

(2) 路面结构与材料参数确定

根据工程所在地的实际条件, 确定好路面结构与厚度, 确定好各材料层模量、泊松比等参数。

(3) 路面结构力学响应分析

根据规范进行路面结构力学响应分析。将沥青面层以规范规定的方法分为 n 个分层, 编号为 i , $i=1, 2, \dots, n$, 采集各分层顶面竖向压应力, 记为 p_i , 用于计算面层车辙量; 将 LSAM-53 柔性基层编号为 r , 采集 LSAM-53 柔性基层对应的最大剪应力 τ_r , 用于计算基层车辙量。

(4) 确定 LSAM-53 柔性基层容许车辙深度 $[R_r]$

根据规范计算面层的车辙变形量 R_a 。根据规范中表 3.0.6-1 [12], 取沥青混合料层车辙变形量容许值 $[R_0]$, 则 LSAM-53 柔性基层的车辙变形量容许值 $[R_r]$ 由式(3.6)计算。

$$[R_r] = [R_0] - R_a \quad (3.6)$$

(5) LSAM-53 柔性基层车辙变形量预估

① 计算 LSAM-53 柔性基层的月平均温度

采集现场气温, 计算初始年第 1 到第 j 个月的平均气温; 选用温度预估模型计算第 j 个月 LSAM-53

基层的温度 T_j ，将其作为第 j 个月 LSAM-53 柔性基层的月平均温度。

② 计算月累计标准轴载作用次数

根据规范计算初始年的累计标准轴载作用次数 N_1 ，采用式(3.7)计算第 i 年的累计标准轴载作用次数 N_i ；采用式(3.8)计算第 i 年 j 月的月平均累计标准轴载作用次数 N_{ij} ， $1 \leq j \leq 12$ 。

$$N_i = N_1 \times (1 + \gamma) \quad (3.7)$$

$$N_{ij} = \frac{N_i}{12} \quad (3.8)$$

③ 计算第 j 个月末 LSAM-53 柔性基层的车辙深度 RD_j

拟定 LSAM-53 柔性基层混合料的动稳定度容许值为 $[DS_k]$ ，采用上文研究得到的车辙预估模型，计算 LSAM-53 柔性基层在第 1 个月末的车辙深度 RD_1 ，如式(3.9)所示：

$$RD_1 = 24.9282 \times (N_1)^{0.1633} (T_1)^{0.1061} (\tau_r)^{0.1907} [DS_k]^{-0.4133} \left(\frac{v}{80}\right)^{-(m+1)} \quad (3.9)$$

LSAM-53 柔性基层第 $j-1$ 个月末的累积车辙深度 RD_{j-1} 由式(3.10)计算：

$$RD_{j-1} = 24.9282 \times (N_{j-1})^{0.1633} (T_{j-1})^{0.1061} (\tau_r)^{0.1907} [DS_k]^{-0.4133} \left(\frac{v}{80}\right)^{-(m+1)} \quad (3.10)$$

RD_{j-1} 在温度 T_j 下的历史累计等效轴载作用次数 N_{pjs} 由式(3.11)计算：

$$N_{pjs} = \sqrt[0.1633]{\frac{RD_{j-1}}{24.9282 \times (T_j)^{0.1061} (\tau_r)^{0.1907} (DS_k)^{-0.4133} \left(\frac{v}{80}\right)^{-(m+1)}}} \quad (3.11)$$

LSAM-53 柔性基层第 j 个月末的历史累计轴载作用次数 N_{pj} 由式(3.12)计算：

$$N_{pj} = N_{pjs} + N_j \quad (3.12)$$

LSAM-53 柔性基层第 j 个月末的累积车辙深度 RD_j 由式(3.13)计算：

$$RD_j = 24.9282 \times (N_{pj})^{0.1633} (T_j)^{0.1061} (\tau_r)^{0.1907} (DS_k)^{-0.4133} \left(\frac{v}{80}\right)^{-(m+1)} \quad (3.13)$$

(6) 动稳定度容许值 $[DS]$ 的调整

对比车辙深度 RD_j 与容许车辙深度 $[R_r]$ ，当 RD_j 在 $0.95[R_r] \sim 1.0[R_r]$ 内时，接受 $[DS_k]$ 为动稳定度容许值 $[DS]$ ；否则，调整 $[DS_k]$ ，或者改变路面结构厚度以调整基层容许车辙深度 $[R_r]$ 和基层最大剪应力 τ_r ，重复上述步骤，使得 RD_j 位于 $0.95[R_r] \sim 1.0[R_r]$ 范围内。

4. 讨论

本研究构建的车辙预估模型为新疆地区 LSAM-53 柔性基层沥青路面的设计提供了理论支持，但仍存在以下局限性需进一步探讨：

(1) 模型验证范围受限：模型参数基于室内加速车辙试验标定，虽通过有限元模拟与回归分析优化了适用性，但尚未经过实体工程长期监测数据的充分验证。新疆地域辽阔，实际路用环境中温湿度循环、材料老化等复杂因素的耦合效应可能影响模型结果精度。

(2) 材料普适性不足：研究聚焦于 LSAM-53 特定级配(A、B型)的柔性基层，未涵盖其他大粒径沥青混合料或不同成型工艺的材料体系。

(3) 室内试验未能模拟气候因素影响：新疆特有的冻融循环、紫外线辐射等环境因素对沥青混合料长期性能的影响未纳入模型，可能会弱化模型在沥青路面全寿命周期内的预测可靠性。

(4) 在试验采用的荷载以及环境简化方面：试验采用固定加载速率(42 次/分钟)和较为稳定的温度条件，未模拟实际行车中变速荷载及昼夜、季节性温度波动对沥青路面车辙累积的非线性影响；有限元模型假设材料均质且边界完全约束，未考虑层间接触状态变化(如界面滑移)及基层-土基协同作用差异。

未来研究需依托新疆实体工程开展长期车辙深度监测，融合路面检测技术验证室内模型可靠性；系统开展冻融-高温循环、紫外老化等新疆地域的典型环境变量与新型柔性基层材料的研究，揭示多应力耦合下车辙演化机理；修正车辙预估模型，提升复杂服役环境下的模型的工程适用性。

5. 结论

本研究针对新疆特殊气候，提出采用 LSAM-53 超大粒径沥青混合料柔性基层替代传统的半刚性基层结构形式。通过系统分析材料参数、环境因素与荷载条件对车辙变形的影响，构建了改进的车辙预估模型，适用于实际行车条件，并验证了其在新疆地区的适用性，为新疆地区柔性基层沥青路面结构设计与优化提供了科学依据。主要结论如下：

(1) 材料性能优势：LSAM-53 柔性基层凭借其骨架稳定性好、沥青用量少的特点，显著提升了抗车辙性能。室内试验表明：骨架更密实的级配 A(S 型级配)较级配 B(中值级配)车辙变形量降低约 15%。级配 A(S 型级配)通过优化粗集料比例与粒径分布，形成更为紧密的骨架嵌挤结构，显著提升了集料间的机械咬合与嵌挤阻力，从而有效抑制了高温下沥青胶浆的剪切流动。相较之下，级配 B(中值级配)因细集料含量偏高，骨架结构相对疏松，集料间接触点减少，导致荷载传递路径分散，抗剪强度降低，表现为车辙变形量显著增加(约 15%)。试验结果进一步表明，骨架密度与车辙深度呈显著负相关($R^2 = 0.92$)，验证了优化级配对提升路面高温稳定性的有效性。

(2) 导致路面车辙关键影响因素：温度与轮压是车辙主要因素，温度每升高 5°C ，车辙深度平均增长 12%；经过有限元软件分析得出剪应力仅与轮压线性正相关，轮压每增加 0.1 MPa，剪应力约增大 0.054 MPa；轮压从 0.5 MPa 增至 0.9 MPa 时，车辙变形量最大增幅达 48%。轮压增大直接提升了轮胎-路面接触区的最大剪应力，高轮压(0.9 MPa)下，剪应力集中区域扩展至基层底部，导致路面基层剪切变形的加速出现，表现为加载初期车辙变形速率骤增。

(3) 构建的车辙预估模型：基于试验数据与 SPSS 回归分析，建立了改进的车辙深度预测模型，经行驶速度修正后(基准车速 80 km/h)，拟合度 R^2 达 0.9531，能准确预测设计年限内 LSAM-53 柔性基层的车辙深度，并可通过车辙预估模型反算动稳定度容许值以优化路面结构设计。

基金项目

新疆交通运输厅 2022 年度交通运输行业科技项目，项目编号：2022-ZD-017。

新疆交通规划勘察设计研究院有限公司科研项目，项目编号：KY2022042502。

参考文献

- [1] (1990) Large Stone Asphalt Mixes Design and Construction. NACT Report No. 90-4.
- [2] 刘中林. 大碎石沥青混合料的路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(3): 47-49
- [3] 司青山, 朱岩, 孙兆云, 等. 超大粒径沥青混合料路用性能研究[J]. 山东交通科技, 2022(4): 44-46, 53.
- [4] 沈卫国, 郑小平, 李洪震, 等. 路面基层材料的分类及其服役状况综述[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(9): 1-5.
- [5] 蒋应军, 易勇, 田甜, 等. 超大粒径沥青混合料的黏弹特性及温度影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(4): 327-331, 342.

-
- [6] 周兴业, 肖倩, 单伶俐, 等. 基于足尺环道加速加载试验的沥青路面车辙预估模型校正[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 258-268.
- [7] 牛志力. 柔性基层沥青路面抗车辙性能理论研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(16): 44-46, 71.
- [8] 李丽民, 何兆益, 冯浩雄, 等. 柔性基层沥青路面车辙性能的影响因素[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(4): 575-581.
- [9] 纪小平, 郑南翔, 牛思胜, 等. 基于 ALF 加速加载的沥青混合料车辙标准研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 43-48.
- [10] 孟书涛, 黄晓明. 柔性基层沥青路面沥青混合料优化设计研究[J]. 公路交通科技, 2006(1): 1-4, 19.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50-2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.