

考虑交通荷载疲劳累积的沥青路面车辙规律与结构优化

和海鹏¹, 刘国银²

- (1. 兰坪白族普米族自治县搬迁安置服务中心, 兰坪 671400;
2. 西昌学院 旅游与城乡规划学院, 西昌 610000)

摘要: 为探究考虑交通荷载疲劳累积的沥青路面车辙发展规律, 通过室内加速加载模拟试验, 分析了温度、轴重和沥青性能等多因素耦合作用下的车辙发展规律和疲劳累积机理, 并提出结构优化方案。结果显示温度和轴重对车辙的发展有显著的非线性加速作用, 温度从 40 °C 升高到 70 °C 时, 车辙深度从 2.53 mm 暴增到 17.04 mm, 荷载从 0.7 MPa 增加到 1.0 MPa 时, 车辙深度从 6.50 mm 增加至 17.14 mm; PG 82-22 混合料在累积荷载作用 10 000 次后的车辙深度仅为 2.8 mm, 比 PG 64-22 降低了 77.6%, 说明高 PG 等级沥青由于高温黏弹性及弹性恢复能力提高, 塑性应变累积得到延缓。在此基础上提出“强胶结-稳骨架”材料优化、“上强下稳”复合结构设计相结合的综合优化方案。经验证, 在相同的工况下, 优化方案使车辙深度从传统结构的 14.24 mm 降低到 4.2 mm, 降幅达 70.5%, 平均车辙抗力提高到传统结构的 2.42 倍, 明显延缓了车辙加速发展阶段, 研究成果可为重载高温环境下沥青路面长效服役提供理论参考。

关键词: 交通荷载; 疲劳累积; 沥青路面; 车辙深度; 车辙抗力

中图分类号: U416.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0135-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.021

Asphalt Pavement Rutting Progression and Structural Optimization Considering Traffic Load Fatigue Accumulation

HE Haipeng¹, LIU Guoyin²

- (1. Resettlement and Settlement Service Center of Lanping Bai and Pumi Autonomous County, Lanping 671400, China;
2. Xichang University, School of Tourism and Urban-Rural Planning, Xichang 61000, China)

Abstract: To explore the development law of rutting in asphalt pavement considering the fatigue accumulation of traffic load, an indoor accelerated loading simulation test was conducted to analyze the rutting development law and fatigue accumulation mechanism under the coupling effect of multiple factors such as temperature, axle load and asphalt performance, and a structural optimization scheme was proposed. The results show that temperature and axle load have a significant nonlinear accelerating effect on the development of rutting. When the temperature rises from 40 °C to 70 °C, the rut depth increases sharply from 2.53 mm to 17.04 mm. When the load increases from 0.7 MPa to 1.0 MPa, the rut depth increases from 6.50 mm to 17.14 mm. The rut depth of PG 82-22 mixture after 10,000 cumulative loads is only 2.8 mm, which is 77.6% lower than that of PG 64-22. This indicates that high PG grade asphalt delays the accumulation of plastic strain due to improved high-temperature viscoelasticity and elastic recovery capacity. Based on this, a comprehensive optimization scheme combining

作者简介: 和海鹏 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道桥工程施工技术与管理。

通信作者: 刘国银 (1990—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑设计。

收稿日期: 2025-12-16

道桥技术

"strong bonding - stable skeleton" material optimization and "upper strong - lower stable" composite structure design was proposed. It was verified that under the same working conditions, the optimization scheme reduced the rut depth from 14.24 mm of the traditional structure to 4.2 mm, a reduction of 70.5%, and the average rut resistance increased to 2.42 times that of the traditional structure, significantly delaying the accelerated development stage of rutting. The research results can provide theoretical references for the long-term service of asphalt pavement under heavy load and high temperature.

Key words: traffic load; fatigue accumulation; asphalt pavement; rut depth; rutting resistance

0 引言

随着我国公路交通重载化、密集化的发展,沥青路面在长期高温、反复轴载耦合作用下产生的车辙病害日益突出,成为影响高等级公路服役性能和使用寿命的主要问题^[1-2]。车辙不仅严重影响行车安全、舒适性,还会引发基层疲劳损伤,造成路面结构快速破坏^[3]。深入揭示交通荷载疲劳累积作用下车辙的形成和演化规律,提出面向长效服役性能的路面结构优化方法,对提高公路基础设施耐久性、全寿命经济性有重要的理论和工程意义^[4-5]。

沥青路面车辙发展规律一直是公路工程领域的研究重点。王旭东等^[6]利用环道试验,发现在长时间荷载作用下沥青路面存在两种疲劳损伤模式,自上而下的压剪损伤和自下而上的弯拉损伤,提出用层寿命累加法来改进整个结构的疲劳评估;刘刚等^[7]通过力学分析研究了车辙深度对路面结构性能的影响,发现车辙 0~10 mm 内冲击荷载效应明显,基层层底容易出现弯拉破坏,建议车辙养护深度控制在 5~10 mm 以内,以保证结构的寿命;郭晨晨等^[8]通过建立轴载-温度耦合车辙模型,发现长大纵坡由于车速降低而使车辙病害加重,提出了考虑坡度和坡长的轴载换算修正系数,为特殊路段差异化设计提供依据;李骏等^[9]通过多尺度加载及数值模拟,得出温度越高车辙变形量越大;吴润华等^[10]利用算法预测沥青路面车辙深度,得到初始车辙深度、累积轴载等影响因素及变化规律;赵碧全等^[11]通过车辙试验,分析了层间阻隔面积对车辙深度的影响,得到其与车辙深度和变形速率呈正相关;王英帅等^[12]对 AC-13 和 SMA-13 级配下掺与不掺抗车辙剂的沥青混合料性能进行了对比,结果表明 SMA-13 级配的高温、低温、抗疲劳性能更好;戚亮等^[13]利用理论分析和有限元模拟研究车辙形成机理以及其对排水性能的影响,得出轴载和温度的增

加会增大路面的剪应力;李倩等^[14]提出反映高温性能转变的特征动态模量指标以及综合评价体系,证明该指标可以更可靠地评价沥青混合料的抗车辙性能;王强等^[15]通过足尺加载和数值模拟,分析了再生沥青路面车辙规律,得出双层再生结构可以明显减小层间剪应力,从而有效抑制车辙发展;赵春生^[16]运用有限元和灰色关联分析得出结论,沥青路面变形受环境温度、车辆荷载的影响较大,应保持合理的车速来减缓车辙的发展。

基于此,采用室内加速加载试验进行多因素耦合分析,从沥青路面车辙发展的规律和损伤演变机理入手,最终提出相应的结构优化设计方案。研究温度(40~70℃)、轴重(0.7~1.0 MPa)、沥青材料性能(PG6422~PG8222)等参数对车辙发展以及混合料抗变形能力的影响规律,明确非线性累积特性与阈值效应,为高载荷、温差大的沥青路面长久的设计和养护决策提供理论依据。

1 工程概况

云南地区某货运通道高速公路改扩建工程。该路段通车运营以来,受高温天气和重载交通的影响(日平均重载货车超过 2.5 万辆,其中重载率占 40%,最大轴重达 13 t),在沥青路面轮迹带处出现明显车辙病害。不仅严重威胁行车安全性和舒适性,频繁的铣刨加铺修复也带来了较高的全寿命周期成本。渠化交通高频率、高轴重荷载造成疲劳损伤不断累积,原路面材料抗高温变形能力不强,使得车辙病害发展速度加快。

2 车辙发展影响试验

2.1 试验方法

采用室内加速加载模拟试验方法,使用轮碾成型车辙试验系统。该系统主要由恒温环境箱、可调速往复加载装置(配标准橡胶实心轮胎)、高精度位

移传感器和自动数据采集系统组成。试验时，将标准尺寸（300 mm × 300 mm × 50 mm）沥青混合料板状试件置于恒温箱内，在设定的目标温度下保温不少于 6 h，使试件内部温度场均匀稳定，从而准确模拟夏季高温下路面材料的实际状态。加载装置用气压伺服控制系统精确施加并保持恒定的轮胎接地压强，模拟不同的轴重荷载。轮胎以固定的频率（42 次/min）沿试件中部固定轨迹往复行驶，累计作用次数设为数万次，模拟渠化交通下长期重复荷载作用。试验过程中，采用高精度位移传感器来采集车辙深度，并同时记录下对应的作用次数。通过定义车辙抗力为混合料进入稳定变形阶段时单位荷载作用次数内车辙深度的平均增量（即变形速率）的倒数，以量化评价沥青混合料在重复荷载与温度耦合作用下的长期抗变形能力与耐久性。

2.2 试验方案

设置四个主要变量的不同水平。温度设置成 40、50、60、70 °C 这四个水准，将云南地区从常夏到酷暑的路面工作温度范围完整包含进去。荷载水平通过控制轮胎接地压强的办法模拟，设置成 0.7、0.8、0.9、1.0 MPa 四个级别，以此来体现从常载到超重载的轴重谱。沥青结合料的高温性能选择 PG 64-22、PG 70-22、PG 76-22 和 PG 82-22 这四个等级充分评价不同的抗变形等级沥青胶结料的影响。混合料类型选择两种有代表性的级配，即密级配 AC-16 和骨架密实型 SMA-13，具体试验方案见表 1，每一种组合制备 3 个平行试件，在严格控温控载的情况下进行不少于 10 000 次的轮碾试验。

表 1 试验方案
Table 1 Test plan

组号	温度/°C	轴重/MPa	高温等级
1	40	0.7	PG 64-22
2	50	0.8	PG 70-22
3	60	0.9	PG 76-22
4	70	1.0	PG 82-22

3 试验结果

3.1 温度影响

由图 1 可知，温度从 40 °C 上升至 70 °C 时，沥青混合料试件在累计荷载作用下 10 000 次后的平均车辙深度显著增加。40 °C 时为 2.53 mm，50 °C 时为

7.59 mm，60 °C 时为 12.31 mm，70 °C 时为 17.04 mm。从增长趋势来看，在 40~50 °C 之间，车辙深度增长比较平缓，每千次荷载作用的平均增量约为 0.51 mm；当温度超过 60 °C 后，变形进入明显加速阶段，60~70 °C 间每千次荷载作用的平均增量达到约 0.69 mm，增幅约为 35%。温度升高造成沥青混合料黏度急剧下降，弹性模量降低，减弱集料之间的胶结和嵌锁作用，使混合料在重复荷载下更容易产生剪切流动和塑性累积。尤其在 60 °C 以上，沥青的黏弹性行为趋于黏性主导，材料抵抗疲劳损伤的临界阈值显著前移，从而加速了车辙的宏观发展。

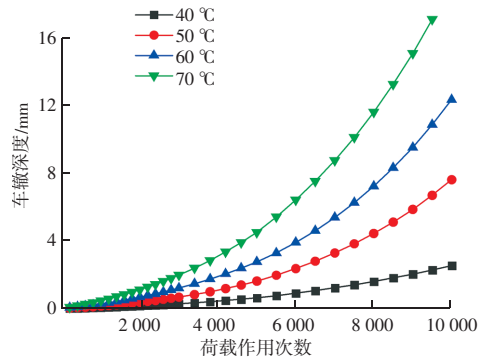


图 1 温度对车辙深度影响

Fig. 1 Effect of temperature on rut depth

对各个工况车辙抗力进行分析，由图 2 可知，车辙抗力与车辙深度呈显著负相关，车辙抗力越高，车辙深度发展越慢。40 °C 下，车辙抗力的初始值为 18 181.82 次/mm，荷载作用次数为 2 000 次时为 9 523.1 次/mm，荷载作用次数为 10 000 次时为 1 536.10 次/mm，降幅约为 91.6%。70 °C 时抗力由 2 941.18 次/mm 降至 226.00 次/mm（降幅 92.3%）。这说明温度升高不但会大大降低材料的初始抗力，

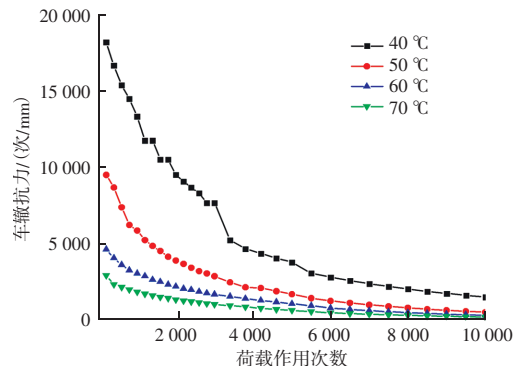


图 2 温度对车辙抗力影响

Fig. 2 Effect of temperature on rutting resistance

道桥技术

还会加速材料在反复荷载作用下性能的衰减。此外,当温度由 60 ℃ 上升到 70 ℃ 时,抗力的初始值减少约 36.8%,最终值仅减少约 32.9%,说明在极端高温下材料抗变形能力在早期已大幅度下降,后期衰减的空间变小。

3.2 轴重影响

由图 3 可知,荷载从 0.7 MPa 增到 1.0 MPa 时,试件累计作用 10 000 次后平均车辙深度呈加速上升趋势:0.7 MPa 时为 6.50 mm,0.8 MPa 时为 9.14 mm,0.9 MPa 时为 12.90 mm,1.0 MPa 时为 17.14 mm。此外,随着轴重增大,车辙发展进入加速阶段的临界作用次数也逐渐提前:0.7 MPa 时在 7 200 次左右出现拐点,0.8 MPa 时提前到 5 800 次,0.9 MPa 时又提前到 4 200 次,而 1.0 MPa 时在约 2 900 次后便开始进入加速变形期。这表明轴重增大不仅直接加大了每次荷载施加的应力,还因加快材料内部损伤的积累速度,使结构提早达到了疲劳损伤的临界值,造成车辙快速产生。

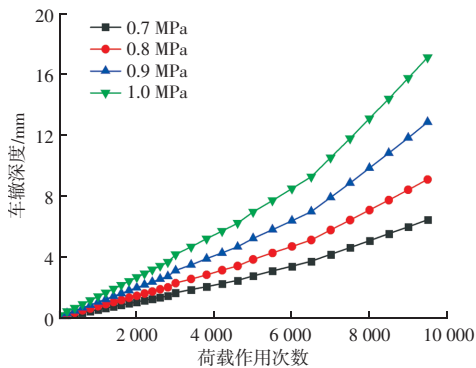


图 3 轴重对车辙深度影响

Fig. 3 Effect of axle load on rut depth

由图 4 可知,随荷载作用次数的增加呈现显著的阶段性衰减规律,并且荷载水平越高,衰减速率越快。荷载作用初期(200 次),0.7、0.8、0.9、1.0 MPa 对应的车辙抗力分别为 1 992.03、1 593.63、1 138.30、885.35 次/mm,说明轴重增加,材料的初始抗变形能力降低。当荷载次数达到 10 000 次时,各个荷载水平下的抗力下降了 578.24、459.12、398.42、378.74 次/mm,下降比例分别为 71.0%、71.2%、65.0%、57.2%。此外,抗力衰减过程有拐点,在 0.7、0.8 MPa 时,抗力在约 3 000 次后第一次出现阶梯状下降,即从 1 992.03 次/mm 降到 995.02 次/mm,

在 0.9、1.0 MPa 时,拐点提前到大约 3 000 次并且下降更多,说明高轴重荷载使材料更早进入性能加速衰减阶段。

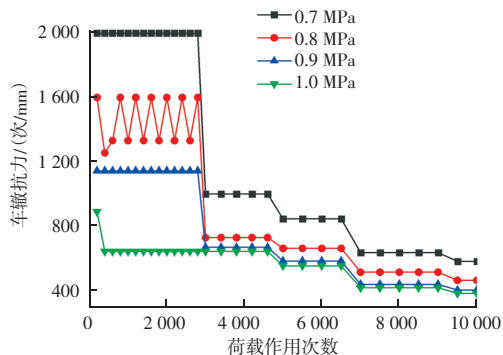


图 4 轴重对车辙抗力影响

Fig. 4 Effect of axle load on rutting resistance

3.3 沥青 PG 高温等级影响

由图 5 可知,累计荷载作用 10 000 次后,PG 64-22、PG 70-22、PG 76-22、PG 82-22 四种混合料的平均车辙深度分别为 14.80、10.51、9.47、7.54 mm。随 PG 等级提高而明显降低,这是由于高 PG 等级改性沥青具有更高的高温黏度和更好的弹性恢复性能。高黏度会抑制沥青胶浆的黏性流动,良好的弹性恢复能力使得材料在荷载间歇期间可以恢复大部分变形,使每次荷载循环产生的不可恢复塑性应变累积大大降低。

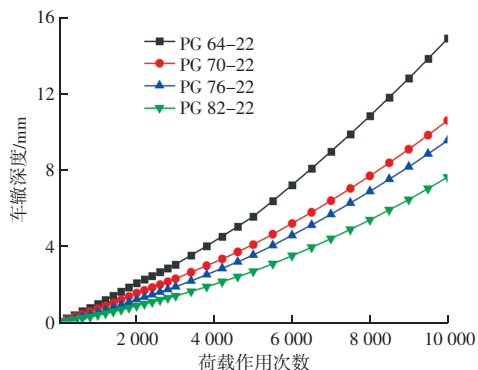


图 5 沥青 PG 高温等级对车辙深度影响

Fig. 5 Effect of asphalt PG high-temperature grade on rut depth

由图 6 可知,四种材料在初始阶段(200 次荷载)即存在明显的性能梯度,PG 82-22 的抗力值达到 3 809.5 次/mm,为是 PG 76-22 的 1.57 倍,是 PG 70-22 的 2.57 倍,为是 PG 64-22 的 3.72 倍,说明高 PG 等级改性沥青在服役初期就具有良好的抗变形能力。随着荷载作用次数的增加到 10 000

次，所有材料的抗力值均呈下降趋势，PG 64-22 的抗力从 1 025.6 次/mm 下降到 675.8 次/mm，降幅为 34.1%；PG 82-22 的抗力从 3 809.5 次/mm 下降到 1 325.8 次/mm，降幅为 65.2%。高 PG 等级沥青由于聚合物改性而具有更高的高温黏度和弹性恢复能力，在重复荷载下可有效地抑制黏性流动变形，在荷载间歇期弹性恢复可以减少塑性应变的累积。

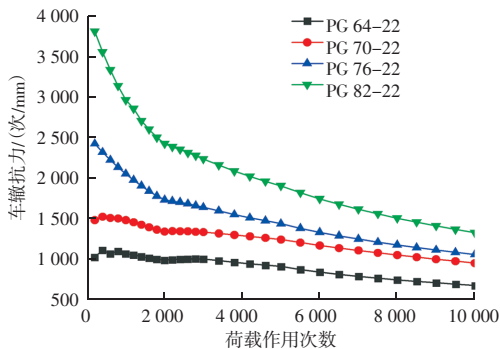


图 6 沥青 PG 高温等级对车辙抗力影响

Fig. 6 Effect of asphalt PG high-temperature grade on rutting resistance

4 结构优化设计

4.1 结构优化方案设计

采用“上强下稳”的复合结构，上层用模量大、抗剪能力强的沥青混合料，直接承受轮载压剪作用，延缓表层塑性流动；中下面层用柔性好、抗疲劳性能好的改性沥青混合料来消散荷载应力，抑制基层层底弯拉损伤。同时，增加沥青碎石过渡层或者级配碎石应力吸收层，以调节竖向应力分布，阻止损伤向基层传递。长大纵坡等特殊路段，根据轴载换算修正系数做局部加厚、模量梯度设计，以抵消因车速降低所造成的荷载作用时间延长效应。

4.2 材料优化方案

选用更高 PG 等级的改性沥青，配合骨架密实型级配，形成胶结强和骨架稳的协同体系。高 PG 等级沥青由于高温黏度增加和弹性恢复提高，可以抑制重复荷载下黏性流动变形，利用荷载间歇弹性恢复减小塑性应变累积。同时 SMA-13 级配由于其稳定的石-石接触骨架结构，具有更好的应力分散能力以及抗剪切变形性能，能明显延缓集料骨架失稳和重新排列。

4.3 优化结构效果验证

在 60 °C、0.8 MPa、累计荷载作用 10 000 次条件下，材料结构优化方案与传统基准结构对比结果如图 7 所示。相同加载次数时，传统结构车辙深度为 14.24 mm，综合优化结构车辙深度为 4.20 mm，降幅达 70.5%。从变形的发展过程来看，综合优化方案明显延缓了车辙的累积速度，传统结构的的车辙深度在约 5 000 次加载后增长明显加快，而优化结构在 9 000 次后增长仍然保持相对平缓的趋势，说明其将车辙发展的加速阶段推迟。根据试验数据计算出的车辙抗力分析结果表明，优化结构在整个荷载作用下平均车辙抗力为 1 126.5 次/mm，而传统结构平均抗力约为 466.3 次/mm，提升 2.42 倍。优化方案通过材料与结构的协同作用，显著提高了混合料本构抗力和结构的耐久性，有效减缓了重载和高温耦合作用下疲劳损伤的累积，为长寿命沥青路面设计提供了关键数据支撑和实践路径。

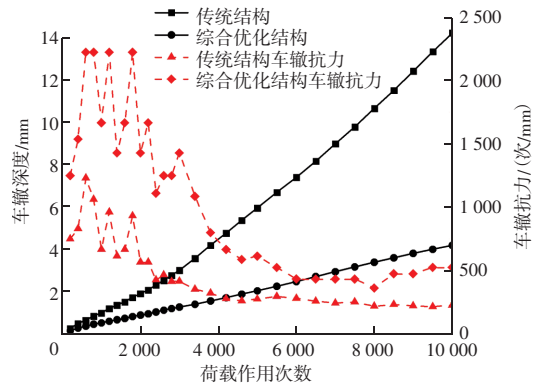


图 7 优化前后车辙深度及抗力对比结果

Fig. 7 Comparison of rut depth and rutting resistance before and after optimization

5 结论

通过室内加速加载模拟试验，分析了考虑交通荷载疲劳累积的沥青路面车辙发展规律，并提出结构优化方案，得出如下结论：

(1) 车辙抗力在荷载作用过程中呈阶段衰减趋势。在高温、重载工况下，车辙抗力的初始值下降较为明显，70 °C 时抗力从 2 941.18 次/mm 降到 226.00 次/mm，下降 92.3%。

(2) 采用高 PG 等级改性沥青和骨架密实型级配可协同提高混合料长效抗变形能力。PG82-22 混合

道桥技术

料在累计荷载作用 10 000 次后车辙深度仅 2.8 mm, 比 PG64-22 降低 77.6%, 初始抗力达到 3 809.5 次/mm, 是 PG64-22 的 3.72 倍。

(3) 提出“上强下稳”的复合结构设计方案, 实施后该优化结构在同等条件下较传统结构降低 70.5%, 结构抗力均值提高至传统方案的 2.42 倍, 证明了材料和结构协同优化的有效性。

参 考 文 献

[1] 郑全成, 张启志. 盐冻融与干湿作用下沥青混凝土的高低温力学性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 77-80, 135.

[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2024 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (3): 1-81.

[3] 张驰. 抗车辙剂在 AC-20F 沥青混合料中的应用研究 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2021, 20 (4): 11-15.

[4] 方昊, JAVILLA B, 磨炼同. 基于车辙试验的沥青混合料车辙评价指标分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2018, 42 (1): 17-20.

[5] 贾丽晓, 刘永梅. 不同级配排水沥青混合料路用性能与透水性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 144-150.

[6] 王旭东, 张蕾, 周兴业. 沥青路面的双向疲劳损伤 [J]. 中国公路学报, 2023, 36 (5): 21-37.

[7] 刘刚, 陈磊磊, 钱振东, 等. 车辙深度对沥青路面结构性能影响性分析 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (24): 36-40.

[8] 郭晨晨, 丁婷婷, 吕鑫, 等. 长大纵坡沥青路面车辙发展规律与轴载换算修正系数研究 [J]. 中外公路, 2024, 44 (1): 30-39.

[9] 李骏, 何超, 刘震, 等. 基于多尺度加载试验的沥青路面结构参数设计方法 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (1): 31-38.

[10] 芮润华, 王静怡, 付东雷. 基于 GBM 的沥青路面车辙深度预测 [J]. 重庆大学学报, 2025, 48 (11): 67-75.

[11] 赵碧全, 冉武平, 王亚强. 基层层间接触状态对沥青路面车辙影响的室内试验分析 [J]. 公路工程, 2023, 48 (4): 64-69, 133.

[12] 王英帅, 万超. 基于 SMA-13 级配的重载交通沥青路面设计及性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 70-75.

[13] 戚亮, 李飞. 车辙变形对长大纵坡路段沥青路面排水性能的影响 [J]. 公路, 2025, 70 (6): 77-82.

[14] 李倩, 王旭东, 周兴业, 等. 沥青混合料高温性能转变特征及抗车辙指标构建 [J]. 西南交通大学学报, 2025, 60 (5): 1203-1212, 1219.

[15] 王强, 卢晓锦, 孙宝生, 等. 基于离散元的再生沥青混合料车辙演化规律研究 [J]. 公路, 2024, 69 (9): 16-21.

[16] 赵春生. 高速公路温度变化下沥青路面变形因素与预估 [J]. 铁道建筑技术, 2023, (1): 191-195.

(上接第 118 页)

[2] 王希云. 重载铁路隧道病害调研与整治技术研究 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (增刊 2): 988-994.

[3] 王勇. 铁路隧道状态综合评价方法及检修周期策略研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.

[4] YASUDA N, TSUKADA K, ASAKURA T. Three-dimensional seismic response of a cylindrical tunnel with voids behind the lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 84399-412.

[5] WANG J, HUANG H, XIE X, et al. Void-induced liner deformation and stress redistribution [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 263-276.

[6] GAO Y, JIANG Y, LI B. Voids delineation behind tunnel lining based on the vibration intensity of microtremors [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 338-345.

[7] 田甜. 含空洞缺陷高铁隧道在列车荷载作用下动力学响应规律研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.

[8] 吕高航. 公路隧道背后空洞致衬砌结构破坏机理及稳定性定量评价 [D]. 济南: 山东大学, 2022.

[9] 刘彦民. 朔黄铁路隧道衬砌承载性能及安全性评价 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.

[10] CAMPIONE G, CANNELLA F. Engineering failure analysis of corroded RC beams in flexure and shear. Engineering Failure Analysis, 2018, 86: 100-114.

[11] 蒲扬东. 考虑岩体参数劣化的洞室围岩稳定性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

[12] 言志信, 郭斌, 樊姝芳, 等. 隧道施工中围岩应力和变形探讨 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35 (2): 108.

[13] 张良山. 隧道衬砌背后空洞上方落石对衬砌结构的破坏机理及整治措施 [J]. 铁道建筑, 2017 (6): 63-67.

[14] 余东洋. 铁路隧道衬砌背后空洞缺陷安全性评价及处治对策研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.

[15] 李玉玺. 铁路隧道衬砌背后脱空及厚度不足整治方案探究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (增刊 1): 122-127.

[16] 李文江, 朱永全. 隧道力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 8.