

高速公路长期性能观测及发展规律研究

马仕亮

(江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为探讨研究高速公路长期服役下的性能发展规律, 通过对野外观测站长期观测数据的统计分析, 总结气象环境、路面性能指标的发展规律及相关性, 建立路面关键指标发展模型, 形成路面关键性能预测方法。研究结果表明, 江苏省夏季高温与冬季低温对路面横向裂缝及车辙病害的形成和发展起到关键作用, 基于发展特征建立的关键指标发展模型可较好地反映路面服役性能的发展, 并科学预测未来路面发展情况。研究成果为高速公路养护决策提供有价值的参考价值。

关键词: 长期观测; 路域环境; 指标规律; 预测模型

中图分类号: U418.6; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0011-04

Study on Long-Term Performance Observation and Evolution Law of Expressways

MA Shiliang

(Jiangsu Zhonglu Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: To explore the performance evolution law of expressways under long-term service, the statistical analysis is conducted on long-term observation data from field stations. The evolution laws and correlations between meteorological conditions and pavement performance indicators are summarized, the evolution models for key pavement indicators are established, and a prediction method for critical pavement performance is proposed. The results show that high temperatures in summer and low temperatures in winter in Jiangsu Province play a key role in the formation and evolution of transverse cracks and rutting distresses in pavement. The evolution models of key indicators established based on evolution characteristics can satisfactorily reflect the evolution of pavement service performance and scientifically predict the future pavement evolution conditions. The research findings provide a valuable reference for expressway maintenance decision-making.

Keywords: long-term observation; roadside environment; indicator law; prediction model

0 引言

我国高速公路常采用沥青路面, 材料特质导致路面性能受环境影响大, 同时随着服役年限的增加, 老化问题逐渐凸显。路面关键指标衰减带来的安全问题值得关注, 通过对既有路面服役性能的长期观测, 有助于我们了解路面性能发展规律, 为养护规划提供预指导。

针对沥青路面服役性能长期观测问题, 大量学者做出了大量的相关研究。刘书含^[1]通过对河南省公路桥梁病害统计, 找出常见的高速公路桥梁病害, 论述了观测周期、预警阈值的设定以及处理措施。

汪宽平等^[2]为验证排水性沥青路面在我国南方多雨地区的设计与施工技术及其工程适应性, 对排水性沥青路面进行了近8年的跟踪观测, 得到了在实际运营状况下关键路用性能的变化规律。相阳等^[3]基于物联网方法, 系统研究了高速公路长期性能观测体系, 通过有效性验证, 明确了结构响应信息、荷载信息和环境信息观测等设备的搭建方法。樊云龙等^[4]通过野外观测站的建设, 建立了长期性能观测指标体系, 并通过多频率、多因素积累实路观测数据, 分析多源数据下路面长期性能演化和发展规律。而在路面使用性能预测方面, 于明明等^[5]使用随机森林回归模型建立了各项路面使用性能预测模型, 并用外部验证集验证了模型的精度。褚丽晶^[6]通过全面综述现有沥青路面性能预测模型, 明确各类预测模型的特征及适应条件。胡鹏坤^[7]通过因子分析

收稿日期: 2026-04-20

作者简介: 马仕亮(1993—), 男, 学士, 工程师, 从道路养护设计相关工作。

等方法完成影响因素筛选降维,进而构建融合多源数据的高精度预测模型。最终形成动态路面养护时机研判的技术体系。

通过文献调研,我们可以发现,现有研究在长期观测方面缺乏观测数据与路面性能指标的联动分析,结合路域环境的研究也较少。路面使用性能预测方面存在对路面关键指标的把握不精准,多指标相互影响,导致预测模型模糊的问题,对于预测模型的建模方法也存在较大的分歧^[8-10]。

可见,虽然大量工作被开展,但问题在实际工程中仍然没有被完全解决,仍然值得深入研究。本文首先介绍已建成的野外长期观测站,再统计分析多年累积监测数据,包含气象、交通量、路面指标等,最后总结路面长期性能发展规律,并建立性能发展预测模型。研究成果可为路面养护方案规划提供指导意义。

1 长期观测站建设

在江苏省宁杭高速建立了一套长期路段性态感知数据采集与处理系统,实现道路状况的快速评估与长期性能追踪。形成了覆盖环境、荷载、结构响应等多维度的监测网络。布设超200个各类先进监测设备。监测包含气象环境信息(大气温湿度、降雨量、风速风向、气压等)、结构环境信息(温湿度等)和结构响应信息(应力、应变、弯沉等)的同步采集机制,路段埋设4组温湿度与应力应变传感器,每组传感器测量12个位置:上面层层顶、上面层层中、上面层层底、中面层层底、下面层层底、上基层层底、下基层层底、底基层层底、土基内部1.0、1.5.0、2.0、2.5m。温湿度传感器采集频率2 Hz,应力应变采集频率2 kHz。

形成了自然服役条件下多参数关联分析的数据基础,为环境持续监测和结构损伤识别提供了理论依据。同时建立了集实时监测、数据采集、数据传输等功能于一体的综合数据处理系统,采用高频采集频率,具备海量数据处理能力,可为长期路段性态感知提供坚实的数据支撑。

目前,基于已有的大量基线数据的性能数据库,可通过对比监测数据的异常变化,快速识别损伤位置和严重程度,显著提高评估的效率和准确性。建立的完整监测体系能够持续追踪路面性能的恢复过程,为养护决策和长期性能预测提供数据支持。野外观测站见图1。

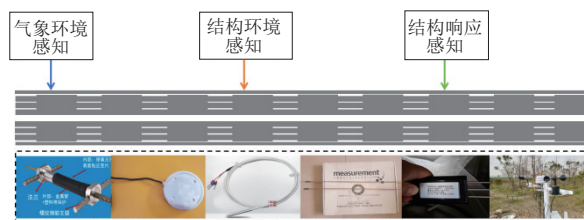


图1 野外观测站

2 气象环境与交通荷载分析

基于野外长期性能观测站监测数据,分析观测路段的气象环境及交通荷载的分布规律。

2.1 气象环境

路面温度场和湿度场能显著影响沥青路面的承载能力和使用性能。温湿度也直接地或间接地与路面的各种常见损坏有关。因此掌握沥青路面在役期间的路面温湿度环境状况变化特征具有重要意义。

江苏省地处南方多雨地区,温度随季节变化明显,月平均温度见图2。

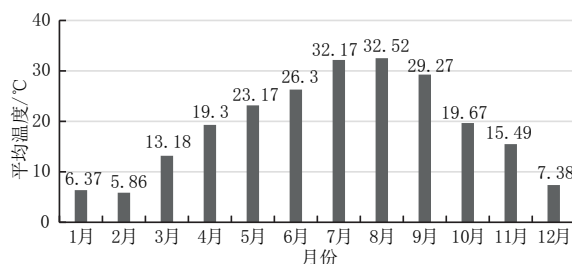


图2 温度场变化情况

由图2可知,温度分布呈现显著的夏季高,冬季低的特征。夏季8月份最高温可达32.52℃,而冬季2月最低温可低至5.85℃,考虑到统计为平均温度,个别时间段还将会出现更极端的温度,可见江苏省高速公路面临极大的周期性温度变化,材料性能抗衰减面临艰巨挑战。

路面结构湿度分布情况见图3。

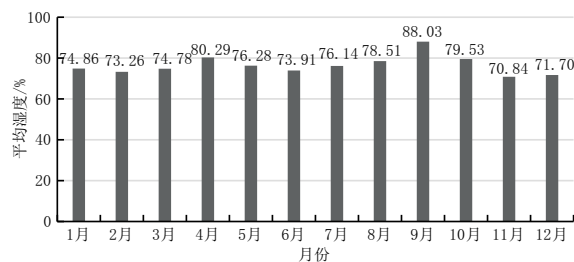


图3 环境湿度分布

由图3可知,高速路段环境湿度值集中于70%~90%之间且分布较为平均,冬季湿度较低,夏季湿度较高。

2.2 交通荷载

交通荷载逐月分布见图 4。

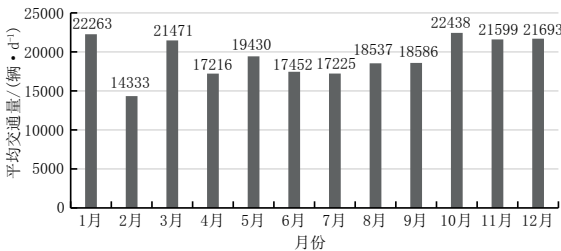


图 4 交通荷载分布

由图 4 可知,全年交通量分布较为平均,在节假日较多月份出现小幅波动,这主要是由于群众出行抄袭导致。可见江苏省高速公路全年交通量荷载处于较高水平,交通荷载引起的路面老化和病害需要持续关注,进行及时路面养护以保证路面良好服役状态。

3 路面服役性能分析

江苏省高速公路主要病害为裂缝及车辙,平整度、抗滑性能等其余性能指标衰减幅度很小,为持续观测路段路面使用性能,自观测站建成前 2015 年养护后即每年进行一次路面性能检测,对路面横缝及车辙进行持续跟踪。

3.1 性能指标跟踪

我国高速公路一般采用半刚性基层路面,易产生反射裂缝,形成水流进入路面结构内部的通道,使得路面产生大面积结构性病害,对横缝发展的持续监测至关重要,横缝如出现暴发趋势需进行及时的养护处治^[11-13]。近年来观测路段的横缝数据见图 5。

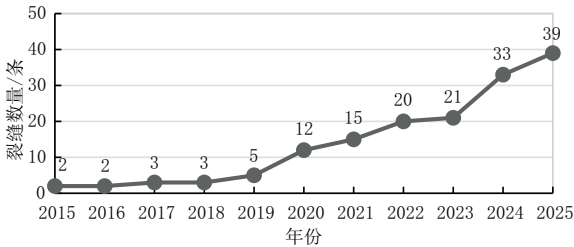


图 5 横向裂缝逐年统计

由图 5 可知,2015 年养护后路面板体性保持良好,前 5 年未出现横向裂缝的大面积暴发,但在养护后第 6 年,横缝开始大规模出现并保持较快的增长趋势,已接近 40 条/km,基于过往研究,当单公里裂缝密度小于 20 m 时,路面结构板体性基本失效,破碎路面板体将不会再出现大规模暴发,故认为观测路段横缝已接近峰值,将趋于稳定。

为提升路面承载力和综合服役寿命,近年来高速公路沥青面层厚度日渐增加,江苏省采用的面层厚度已达约 20 cm,较厚的沥青面层带来不可避免的路面车辙问题^[14-15]。同时江苏省作为经济强省,高速公路承担交通荷载普遍较大,车辙成为除裂缝病害的第二大核心问题。近年来观测路段的车辙深度数据见图 6。

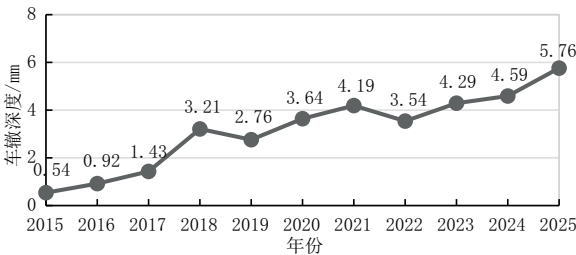


图 6 车辙逐年统计

由图 6 可知,养护后初期压密车辙明显,在第四年增长速率放缓,第十年随着材料性能衰减,再次出现车辙深度快速增长的趋势。

3.2 季节性规律分析

高速公路横缝与车辙病害突出,裂缝产生及车辙加深受温度影响显著^[16],为研究病害季节性发展规律,逐月对观测路段进行指标检测,结果见图 7。

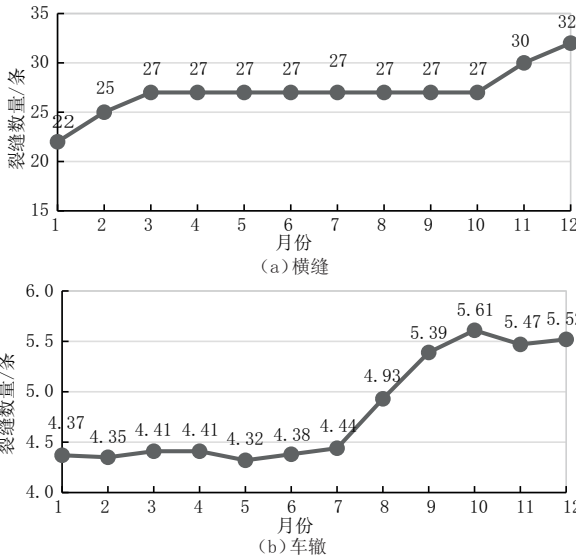


图 7 横缝、车辙逐月统计

由图 7 可知,横向裂缝在冬季出现明显增长夏季保持稳定,可见冬季低温易导致路面产生裂缝,破坏路面板体性,路面材料低温抗裂性能需要进行着重提升。车辙深度在冬季保持稳定,夏季高温时出现不可逆的永久变形导致车辙深度增加,可见夏季高温使沥青软化,易形成车辙病害,路面材料高温稳定性需要进行着重提升。

4 长期性能预测

长期性能预测需建立预测发展模型,针对发展模型的研究,现有的常见方法有:回归法、灰色模型法、时间序列法、神经网络法、马尔可夫模型法等。但不同发展模型建模均存局限:回归法难体现路面指标复杂关系,神经网络可解释性差,灰色模型与时间序列拟合不佳、不适长期预测,马尔科夫模型误差大。高速公路路面性能预测具特殊性,单一传统模型难以科学建模,纯时间序列或单纯回归模型无法系统反映道路工程客观规律。因此,路面指标建模应以机理模型为基础,融入道路关键指标与检测数据,结合回归法确定参数,整合客观发展规律,构建定制化路面性能发展模型。

基于前文横向裂缝及车辙随时间的统计结果及发展特征,采用具有相同特征的机理模型:“S”型逻辑斯蒂函数,建立指标发展预测模型。

路面横向裂缝发展模型见式(1):

C=A2+A1−A21+(t/t0)p(1)

式中:C为公里段内横缝数量,条;T为路龄,年;A1为初始年公里段内横缝数量,条;A2为服役末期稳定后公里段内横缝数量,条;t0、p为增长率相关参数,可由回归得到。

路面车辙发展模型见式(2):

RD=A0+r1t+r2−r1k1ln(1+e^k1(t−t1))+r3−r2k2ln(1+e^k2(t−t2))(2)

式中:RD为车辙深度,mm;A0为初始车辙深度;T为路龄,年;t1、t2为各阶段分界时间点,年;r1、r2、r3为第一、二、三阶段车辙深度增长率;k1、k2为各阶段之间控制过渡速率的参数,值越大过渡越陡峭。

基于宁杭高速数据,回归调整得到发展预测模型见图8和表1。

发展模型与实际路面检测情况相关性较高,可很好地反应路面横向裂缝及车辙的发展趋势,根据模型预测,宁杭高速在2025年后裂缝发展将进入相对稳定阶段,虽不会再爆发式增长,但裂缝间距已达到40m,在后续的养护规划中仍需持续关注横向裂缝的发展。车辙将持续快速加深,需要持续关注并进行及时养护。

2026年最新检测数据显示新扬高速每公里横向

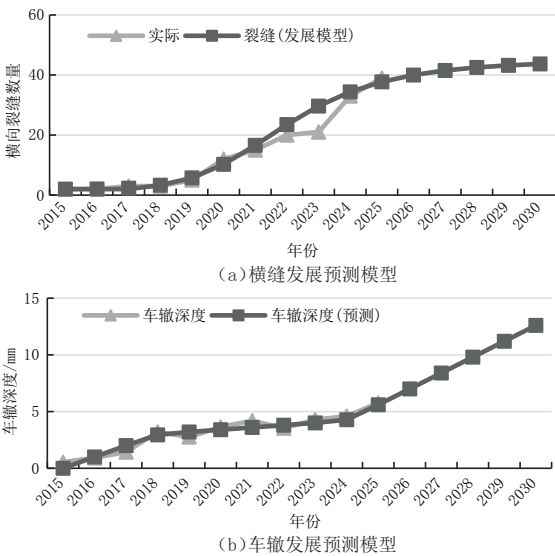


图8 宁杭高速横向裂缝、车辙深度发展模型

表1 宁杭高速横向裂缝、车辙深度发展模型

类型	模型
横缝	$C=45-\frac{43}{1+\left(\frac{t}{8}\right)^5}$
车辙	$RD=-1+t-0.08\ln(1+e^{10t-40})+0.12\ln(1+e^{10t-100})$

裂缝数量为40条,车辙深度为5.89mm,与预测模型预测值非常接近,验证了本研究提出的路况预测模型的科学性和指导意义。

5 结 论

本文基于宁杭高速野外长期观测站及定期检测数据,研究了高速公路长期性能发展规律,得到以下结论:

(1)江苏省地处南方多雨地区,高速公路夏季高温可达32.52℃,冬季低温可低至5.85℃。温度变化带来的材料老化值得重点关注。湿度集中于70%~90%,冬季湿度较低,夏季湿度较高。交通量分布较为平均,在节假日较多月份出现小幅波动。

(2)路面裂缝与车辙逐年增加,与环境温度相关性高,夏季高温引起车辙加深,冬季低温易导致横缝爆发。

(3)根据高速公路沥青路面横向裂缝及车辙的发展规律,选择典型的机理模型为基础,并引入调整参数得到相应的横向裂缝、车辙发展预测模型,可真实反应沥青路面服役预期状态,为养护决策提供支撑。

参考文献:

[1] 刘书含.河南省高速公路桥梁变位长期监测方法研究[J].山西建筑,2025,51(5):156-159;174.

[2] 汪宽平,陈先华,唐国奇,等.盐城至南通高速公路排水性沥青路

(下转第24页)