

基于机器学习的横向裂缝修复性养护方案后评价

张永健¹, 朱浩然², 张武兴¹, 王克²

(1. 江苏连徐高速公路有限公司, 江苏 徐州 221000; 2. 河海大学, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对江苏省高速公路沥青路面横向裂缝快速增长的问题, 采用机器学习的方法对2018—2021年间徐淮高速、京台高速、汾灌高速和新扬高速的大修工程数据进行分析。研究比较了单层铣刨预处理、双层铣刨预处理、冷再生预处理和注浆预处理4种不同的裂缝修复方案, 采用“一缝一档”对裂缝的修复效果进行长期跟踪观测, 并提出二次反射率作为方案的评价指标。结果表明, 注浆预处理方案在观测期内未出现裂缝再次反射, 表现出最佳的修复效果; 而冷再生预处理方案的效果最差。通过CART分类决策树模型进一步验证了双层预处理方案对于贯穿单车道的横向裂缝具有较好的抑制效果, 为高速公路沥青路面横向裂缝大修施工方案的选择提供了科学的指导意义。

关键词: 沥青路面; 裂缝修复性养护方案; 二次反射率; 机器学习; CART分类决策树模型

中图分类号: TU746

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0265-05

Post-Evaluation of Repairable Lateral Crack Maintenance Scheme Based on Machine Learning

ZHANG Yongjian¹, ZHU Haoran², ZHANG Wuxing¹, WANG Ke²

(1. Jiangsu Lianxu Expressway Co., Ltd., Xuzhou 221000, China; 2. Hehai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the problem of rapid growth of lateral cracks on the asphalt pavement of expressways in Jiangsu Province, the machine learning methods are used to analyze the overhaul engineering data of Xuhuai Expressway, Jingtai Expressway, Fengguan Expressway and Xinyang Expressway from 2018 to 2021. Four different crack repairing schemes of single-layer milling pretreatment, double-layer milling pretreatment, cold recycling pretreatment and grouting pretreatment are studied and compared. The “one crack and one record” method is used to track the effects of crack repair for the long time. And the secondary reflectance is proposed an evaluation index of the schemes. The results show that in the pretreatment scheme of grouting, no rereflection of cracks occur during the observation period with the best repair effect. The cold recycling pretreatment scheme has the worst effect. The CART classification decision tree model is used to further verify that the double-layer pretreatment scheme has a good inhibition effect on the lateral crack running throughout the single lane, which provides the scientific guidance for the selection of overhaul construction schemes for lateral cracks on the expressway asphalt pavement.

Keywords: asphalt pavement; repairable crack maintenance scheme; secondary reflectance; machine learning; CART classification decision tree model

0 引言

随着通车时间的逐年增加, 江苏省高速公路近年来开始出现了不同程度的横向裂缝, 尤其是对于通车时间超过设计使用寿命的路段, 表现出快速增长的趋势。如汾灌高速、连徐高速公路的横向裂缝数量发展速度相对较快, 年均超过 10 m/km, 针对高

速公路上横向裂缝数量快速增长的问题, 在大修工程中采取了包括单层铣刨预处理、双层铣刨预处理以及近些年新应用的冷再生预处理方案和注浆预处理方案等裂缝专项方案, 对不同严重程度的横向裂缝进行了修复。

国内外学者对于沥青路面养护方案的裂缝修复效果采用了不同的评价指标以及不同的评价方法进行了评价, Momen Mousa^[1]通过评估裂缝密封(Crack Sealing, CS)在路易斯安那州等湿热气候条件下柔性复合路面上的现场性能和成本效益, 并以此开发一个模型, 在给定项目条件下量化CS的预期效益。

收稿日期: 2024-08-08

作者简介: 张永健(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事道路养护相关工作。

通信作者: 王克(1998—), 男, 硕士在读, 从事道路工程研究工作。电子邮箱: 1943919505@qq.com

用随机开裂指数^[2](Random Cracking Index, RCI)和粗糙度指数(Roughness Index, RI)对这些截面的性能进行了评价。根据分析结果,CS仅对随机开裂有显著影响。与未经处理的路段相比,CS延长了路面使用寿命(Pavement Service Life, PSL) 2 a。与原始路面相比,如果在正确的时间实施,CS将柔性路面和复合路面的PSL分别延长了5.6、3.2 a。成本效益分析表明,无论采用沥青乳化液还是橡胶沥青密封胶,CS均具有较高的成本效益。建立一个非线性回归模型^[3],在不需要基于平均日交通量、路面类型和先前路面状况的性能数据的情况下,预测由于CS而导致的PSL扩展。潘旺^[4]围绕半刚性基层沥青路面裂缝扩展机理,以累计轴载作用次数、年降雨量、月均温度方差和使用年限为关键影响因素,分析路面裂缝率与路面综合破损率及路面破损状况指数PCI(Pavement Condition Index, PCI)之间的相关性,提出基于改进灰色模型^[5]的裂缝动态预测方法,并结合PCI构建养护决策树,为科学化、精细化养护提供理论支撑。黄啊奇^[6]通过建立内部裂缝概率数量模型,基于表面反射裂缝的数量来预测内部裂缝的数量以及概率,并通过雷达实测数据与预估的结果来验证预测模型的准确性,结果表明预测模型具有一定的适用性。

然而,鲜有学者对处治后的逐条裂缝进行长期跟踪,通过同一位置,修复前后裂缝再次出现的时间差来评价裂缝修复方案的效果,因此,本文以2018—2021年徐淮高速、京台高速、汾灌高速、新扬高速大修工程的施工明细和破损检测数据为分析对象,对施工后的每一条裂缝桩号逐年跟踪,观测截至2024年每一个已修复的裂缝是否再次反射至路面,提出以二次反射率作为裂缝评价指标来对比不同裂缝修复方案的性能效果。

1 数据预处理

研究团队首先通过查阅大中修设计施工图、横向裂缝检测数据、施工计量表等相关资料来收集必要的信息,根据收集到的数据完整性,将横向裂缝的大修罩面方案分为以下4种不同的裂缝修复养护方案:

方案一(单层预处理方案):铣刨4 cm深左右,底部设置抗裂贴,回填改性SMA-13并加铺4 cmSMA-13罩面。

方案二(双层预处理方案):双层铣刨上中面层10 cm在底部贴抗裂贴,分层重铺6 cmSup-20与

4 cmSMA-13并加铺4 cmSMA-13罩面。

方案三(冷再生预处理方案):上中面层10 cm冷再生,冷再生前对贯穿裂缝继续向下挖补至下面层3 cm,在底部贴抗裂贴,铣刨的3 cm深下面层采用改性SMA-13进行回填,原中上面层再采用铣刨料将回填,然后就地冷再生后加铺4 cm或5 cm的SMA-13罩面。(由于连徐路冷再生路段运行时间短,故选取汾灌高速路段进行补充评价)。

方案四(注浆预处理方案):裂缝处注浆处理后,回填SMA-13后加铺4 cmSMA-13罩面。

本文在进行模型分析时,考虑了路面摊铺材料、车道、修缝贴种类、铣刨厚度、裂缝长度、是否加橡胶应力吸收层等因素是否会影响裂缝修复方案的延长寿命。对每个变量进行赋值,如表1所列,对大修工程的影响因素定义变量。

表1 变量表

变量名	解释	类型
X1	裂缝处治方案	离散值, '1' =单层预处理; '2' =双层预处理; '3' =冷再生预处理; '4' =注浆预处理
X2	高速公路名称	离散值, '1' =汾灌 G15; '2' =京台 G3; '3' =淮徐 G2513; '4' =新扬 S49
X3	车道	离散值, 行车道= '1'; 超车道= '2'
X4	方向	离散值, 上行= '1'; 下行= '2'
X5	铣刨厚度	连续值
X6	裂缝长度	连续值
X7	罩面厚度	连续值
X8	服役年限	连续值
y	裂缝再次反射至路表的时间	连续值

2 大修方案修复效果显著性分析

本文在进行模型分析时说明了零膨胀负二项模型比标准负二项模型更适合此数据样本。考虑到不同高速公路路面结构的差异会影响修复措施实施后横向裂缝出现时间的早晚,研究将模型中添加了个体固定效应,以此来控制由于高速路段的路面结构的不同导致裂缝出现数量的差异,使得预测模型得到的结果更加符合不同路面结构对裂缝的真实修复效果。

在添加logit个体固定效应后,高速公路1、2、3、4在解释变量之外的其他所有确定性效应只随不同高

表 2 ZINB 模型及逻辑回归模型参数估计

影响因素	参数估计值	标准误	Z 值	P>z	95% 置信区间	可信度
是否加橡胶应力吸收层	1.541 46	0.729 08	2.11	0.034	0.112 484 8	2.970 439
罩面厚度	-0.148 55	0.432 255	-0.56	0.574	0.884 816 3	2.579 225
摊铺材料	-0.119 49	0.106 938	-1.12	0.264	-0.329 087	0.090 103
裂缝长度	-0.297 4	0.140 497 5	-2.12	0.034	-0.572 769	-0.022 029
高速公路 1	1.0	1.0	1	1.0	1.0	1.0
高速公路 2	-23.724 9		-0.00	0.996	-10 583.09	10 535.64
高速公路 3	-2.747 15		-3.87	0.000	-4.140 002	-1.354 305
高速公路 4	-19.296 4		-0.01	0.988	-2 604.25	2 565.657
常数项	3.104 074	1.476 128	2.10	0.035	0.210 916	5.997 231
膨胀模型	0.269 145	0.105 3	2.56	0.011	0.062 76	0.475 53
服役年限常数	-2.698 2	1.899 74	-1.42	0.156	-6.421 65	1.025 2
异常参数	-16.610 8	597.867 2	-0.03	0.978	-1 188.409	1 155.187
α 参数异常	6.11×10 ⁻⁸	0.000 036 5			0	0.000 0

速的变化而变化,并且根据往年的施工经验来说,大修 的 4 种方案实施后在 4~6 a 内基本很少再次反射出 裂缝。如表 2 所列,给出了参数估计结果,ZINB 模型 的参数估计包括逻辑回归与负二项回归两部分,其中 逻辑回归部分使用服役年限作为影响 0 元素出现 次数过多的主要因素,以此来解释样本中为何出现 大量的 0 元素,结果表明服役年限的 P 值=0.011 远小 于 0.05,参数估计为 0.269,说明随着服役年限的增 加,裂缝出现的概率增加。

负二项回归部分参数估计的意义是自变量增加 时预测的裂缝数量的变化。可以看出,裂缝长度、是 否加橡胶应力吸收层的 P 值<0.05,对横向裂缝数量 有显著的影响。其中是否加橡胶应力吸收层的参数 估计为 1.54,说明面层和罩面之间铺撒橡胶应力吸 收层使得修复措施实施后产生裂缝的概率降低,裂 缝长度的参数估计为-0.297 4,说明横向裂缝的长度 越长,修复措施实施后产生裂缝的概率增加,而摊铺 材料、罩面厚度的 P 值较大,说明摊铺材料、罩面厚 度对裂缝修复后是否再次出现的影响不是很大。

3 裂缝处治效果评价指标的选取

研究团队查阅了有关横向裂缝处治效果评价指 标的资料,通过比较不同性能评价指标是否适合本 研究,选取其中的一个或者多个指标作为本研究的 性能评价指标。

(1)使用寿命延长时间

由于裂缝采用抗裂贴修补横向裂缝的年份不 同,在观测期末,可能会出现基层的反射裂缝未贯穿 到面层的情况,对于横向裂缝的发展程度,本研究不 予考虑,只分析横向裂缝在修复后的位置处是否再

次反射至路面。对于已使用抗裂贴修复完成的横向 裂缝,统计初始贴铺时间到路面面层出现裂缝所用 的时间计为使用寿命延长时间 T 。

(2)裂缝分布密度

在分析期末,对裂缝分布密度进行评价

$$D = \frac{L_s}{S_A} \tag{1}$$

式中: L_s 为调查路段裂缝长度总和, m ; S_A 为调查路段 路面面积, m^2 。

(3)裂缝二次反射率 G_{cr}

划分每一种方案的处治路段,将第一年内、第二 年内、第三年内……第 i 年内反射出裂缝的数量作为 统计量,裂缝数量的增长率作为性能评价指标,分析 每种方案在第 i 年内对裂缝的抑制效果。

(4)横向裂缝状况指数

横向裂缝状况指数 TCCI 从裂缝的纵向分布疏密 情况和横向严重程度两方面对横向裂缝进行定量分 析,综合描述了沥青路面横向裂缝的破损状况。在 分析期末,以 1 km 为评价单元,对裂缝状况指数进 行评价:

$$TCCI = \frac{TCS}{TWR} \tag{3}$$

式中:TCCI 为横向裂缝状况指数,无量纲;TCS 为横 向裂缝间距, L 是评价路段的长度;TCN 是评价路段 的横向裂缝总数;TWR 为横向裂缝的贯穿度,无量 纲,如果 TWR 大于 1,取 1。

对比 4 个指标,由于每种方案在施工路段上分布 不连续,且对于观测期内再次反射出来的裂缝间距 很稀疏,裂缝分布密度和横向裂缝状况指数这两个 指标不适用于本研究,而使用寿命延长时间由于大

部分修复后的裂缝未反射至路面,这部分裂缝的反射时间无法预知,故无法得出每种方案的使用寿命延长时间。最后,选择裂缝二次反射率(即增长率 G_{cr})作为性能评估的指标。对不同裂缝修复方案中的每条反射裂缝逐一跟踪并分析,将第一年内、第二年内、第三年内……第 n 年内反射出裂缝的数量作为统计量,本研究假设在观测期内,使用抗裂贴修复后的裂缝再次反射到路面即为已失效,分析6种方案在第 n 年内对裂缝的抑制效果。

4 基于分类模型的横向裂缝修复方案效果后评估

研究采用每个节点只产生2个分叉的分类决策树,分析单层预处理方案、双层预处理方案、冷再生预处理方案和注浆预处理方案的耐久性,由于时间的限制,目前裂缝的长期性能观测只追踪到了第四年,后续研究将会持续分析观测路段内裂缝的发展情况将大修的4种裂缝修复方案作为分类结果,自裂缝修复之日起的服务年限、抗裂贴长度、横向裂缝修复之后是否反射出裂缝作为分类重要特征。

输出的最终结果——1维矩阵 $value=[V_1, V_2, V_3]$ 表示了单层预处理方案、双层预处理方案、冷再生预处理方案反射出来的横向裂缝数量。

为了区分裂缝的严重程度,以裂缝长度为分级区间,如表3所列,裂缝的严重程度由轻到重为轻微、未贯穿、贯穿单车道。

表3 裂缝长度分级评价	
裂缝长度分级区间/m	裂缝严重程度
[0,2]	轻微
[2,3.75)	未贯穿
≥ 3.75	贯穿单车道

通过查阅施工设计图、施工记录表、竣工图等资料,调查了淮徐、京台、汾灌、新扬4条高速公路的服役年限,施工时间,交通量等级,裂缝处治方案对应的施工桩号,调查的公里数以及裂缝数量,共统计了878条裂缝以及每条裂缝对应的修复方案,且所有裂缝均分布于重交通路段。

对于大修的878个样本,研究以裂缝的二次反射率作为方案对比效果的评价指标。

通过参数调优,测试集上的预测精确度达到了0.758 5,训练集上的预测精确度为0.739 1,训练集上的表现和测试集上的表现相差不大,所以此分类树

模型未出现过拟合的情况。

在选择分类决策树分类特征的时,前文已通过计数模型零膨胀负二项模型分析了修复效果的显著性,其中裂缝长度、是否加橡胶应力吸收层、服务年限对大修罩面工程修复养护方案的修复效果影响较大。

决策树分析结果如图1所示,由于目前观测到的数据中,注浆预处理方案在前4 a内没有再次反射出裂缝,相较于其他3种方案效果是最好的,故在此分类决策树中没有加入注浆预处理方案进行分析比较。

表4 大修裂缝修复方案分类结果汇总				
服务年限/a	裂缝长度	处理方式	是否出现裂缝	分类
4	轻微未贯穿	单缝处理	未出现裂缝	[0,115,27]
4	轻微未贯穿	单缝处理	出现裂缝	[0,0,2]
6	贯穿单车道	—	未出现裂缝	[218,89,0]
6	贯穿单车道	—	出现裂缝	[28,9,0]

如表4所示,在2019年实施的大修横向裂缝修复方案中,对于轻微、未贯穿并采用单缝处理的横向裂缝,双层预处理方案中有115条未反射至路面,冷再生预处理方案中有27条未反射至路面,2条反射至路面, $G_{cr}=0\%<G_{cr}=6.91\%$,由此说明双层预处理方案对横向裂缝的抑制效果好于冷再生预处理方案。

在2017年实施的大修横向裂缝修复方案中,对于贯穿单车道的横向裂缝,单层预处理方案中在6 a年内未反射至路面的横向裂缝有218条,反射至路面的有28条,双层预处理方案在6 a内未反射至路面的横向裂缝有89条,反射至路面的有9条, $G_{cr}=11.38\%<G_{cr}=9.18\%$,由此说明双层预处理方案对横向裂缝的抑制效果好于单层预处理方案。

5 结 语

本研究对修复后的横向裂缝进行了长期性能追踪,在处治效果评价中,对于重交通,在实施裂缝施工方案后4 a内,注浆预处理方案对横向裂缝的修复效果要远远好于其他3种裂缝修复方案;冷再生预处理方案对裂缝的修复效果是最差的;通过CART分类决策树算法,分析得出在大修罩面工程中,对于裂缝长度贯穿单车道并采取单缝处理的横向裂缝,双层预处理方案对横向裂缝的抑制效果要好于冷再生预处理方案;对于贯穿单车道的横向裂缝,双层预处理方案要优于单层预处理方案。

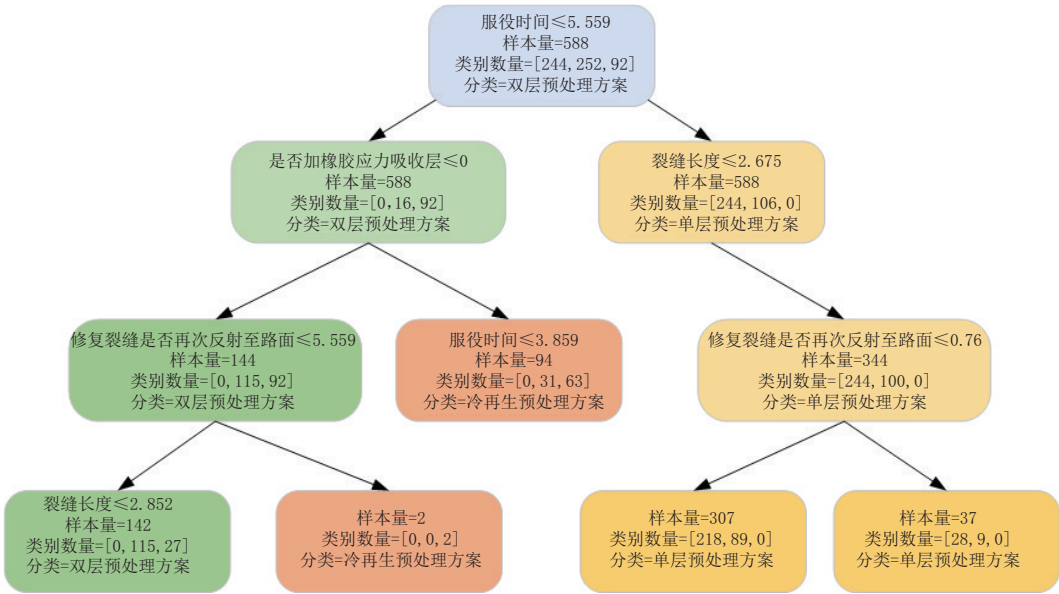


图 1 大修方案 CART 分类决策

参考文献:

[1] Momen M, Elseifi M A, Mohammad B, et al. Field Evaluation and Cost Effectiveness of Crack Sealing in Flexible and Composite Pavements[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(12): 51-61.

[2] 裴莉莉,余婷,张艳红,等.基于 Bayesian-LightGBM 模型的国省道路面性能预测[J].公路交通科技,2023,40(11):18-26.

[3] 骆志元.基于性能预测的路面养护智能决策研究[D].重庆:西南大学,2023.

[4] 侯明业,王晓阳,徐青杰,等.基于强化学习的沥青路面长期性能养护决策方法[J].山东科学,2023,36(3):108-114.

[5] 陈俊豪.基于启发式算法和 SVM 的高速公路沥青路面性能评价与预测研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2023.

[6] 李乾正.基于交通轴载的新疆高速公路沥青路面路用性能预测研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2023.

[7] 刘英.基于机器学习的路面性能预测和预养护时机决策方法研究[D].西安:长安大学,2023.

[8] 裴莉莉.基于多源感知数据的沥青路面服役性能演变预测方法研究[D].西安:长安大学,2023.

[9] 韩诚嘉.沥青路面智能化养护管理关键技术研究[D].南京:东南大学,2022.

[10] 周杰.基于主成分-随机森林模型的高速公路沥青路面使用性能评价研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.

[11] 张金喜,郭旺达,宋波,等.基于随机森林的沥青路面性能预测[J].北京工业大学学报,2021,47(11):1256-1263.

[12] 廖荣凯.基于云模型和 XGBoost 的路面性能评价与预测研究[D].广州:华南理工大学,2021.

[13] 朱贵莹.基于机器学习的路面使用性能评价与预测研究[D].广州:华南理工大学,2021.

[14] 吴博文.基于机器学习组合模型的四川省高速公路路面性能预测方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.

[15] 赵静,王选仓,樊振阳,等.基于支持向量机的沥青路面性能评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(9):116-123.

[16] 倪富健,顾兴宇,于斌,等.数据驱动的高速公路智能养护平台建设及绿色长效养护技术研发[Z].南京:东南大学,2017.

(上接第 264 页)

[13] 凌森林,王永鑫,金辉球,等.灌注式半柔性路面研究进展 2——半柔性混合料路用性能评价方法[J].石油沥青,2021,35(6):1-11.

[14] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[15] JTG F40—2017,公路沥青路面施工技术规范[S].

[16] JTG 3432—2024,公路工程集料试验规程[S].

[17] GB/T 8077—2023,混凝土外加剂匀质性试验方法[S].

[18] GB 50119—2013,混凝土外加剂应用技术规范[S].

[19] GB/T 14684—2011,建筑用砂[S].

[20] T/CECS 1016—2022,城市道路灌入式半柔性路面技术规程[S].

[21] JTG 3420—2020,公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].

[22] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

[23] DB32T 4074—2021,抗车辙半柔性路面应用技术规程[S].