

文章编号:1671-1637(2025)03-0012-21

半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断综述

朱俊清,尹逸群,马涛*,童峥,黄斯琦

(东南大学交通学院,江苏南京 211189)

摘要:针对半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断方法的进展与存在问题进行文献梳理和总结,在横向裂缝评价方法方面,详细梳理了横向裂缝的评价方法及发展现状,总结提出了基于病害成因机理的分类方法,为成因诊断提供依据;在横向裂缝分类方法方面,详细梳理了横向裂缝的产生机理及其影响因素,构建了横向裂缝成因库;在横向裂缝成因诊断方面,梳理了当前诊断方法存在的主要问题,提出了横向裂缝成因分步诊断框架。研究表明:现有评价方法无法与裂缝成因建立联系,建立的基于成因与发展方向的横向裂缝分类方法可以提供判断依据;构建的裂缝成因库考虑了材料、结构、施工以及荷载环境的不同成因机理,为成因诊断提供了参考;建立的横向裂缝成因诊断框架从路段基础信息调查、特殊因素排除、荷载环境综合分析以及靶区试验精细化诊断四方面为工程实践提供依据。实体工程验证表明:验证路段的裂缝主要成因为基层开裂,在重交通量和重载作用下导致裂缝反射至面层,主要类型为自下而上反射裂缝。建立的沥青路面横向裂缝成因库及成因诊断框架为裂缝处治对策提供了理论基础和实践依据。

关键词:道路工程;横向裂缝成因机理;综述;成因诊断;半刚性基层沥青路面;裂缝处治;养护决策

中图分类号:U418 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2025.03.002

Review of cause diagnosis of transverse cracks in semi-rigid base asphalt pavement

ZHU Jun-qing, YIN Yi-qun, MA Tao*, TONG Zheng, HUANG Si-qi

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: The advancements and existing issues in the cause diagnosis method of transverse cracks in semi-rigid base asphalt pavement were reviewed and summarized. Regarding evaluation methods, current techniques for transverse crack assessment and their development status were comprehensively analyzed, and a classification method based on failure cause mechanisms was proposed to provide theoretical foundations for cause diagnosis. In terms of classification approaches, the formation mechanisms and influencing factors of transverse cracks were reviewed, and a database of transverse crack causes was established. In terms of diagnostic methods, critical limitations in existing practices were identified, and a stepwise diagnostic framework for transverse crack causes was proposed. Research results indicate that existing evaluation methods lack correlation with crack causes, while the proposed classification method based on cause and development trends can provide a basis for diagnosis. The established crack

出版历程:2024-05-12 收稿,2025-01-27 修回,2025-03-12 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52208428)

作者简介:朱俊清(1989-),男,江苏盐城人,东南大学副教授,哲学博士,从事道路智能检测与养护技术研究。

*通信作者:马涛(1981-),男,江苏徐州人,东南大学教授,工学博士。

引用格式:朱俊清,尹逸群,马涛,等.半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断综述[J].交通运输工程学报,2025,25(3):12-32.

Citation:ZHU Jun-qing, YIN Yi-qun, MA Tao, et al. Review of cause diagnosis of transverse cracks in semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(3): 12-32.

cause database incorporates multiple mechanisms involving material properties, structural design, construction practices, and loading/environmental impacts, serving as a reference for cause analysis. The developed diagnostic framework integrates four operational dimensions: baseline pavement investigation, special factor exclusion, comprehensive load-environment analysis, and targeted area testing for refined diagnosis, offering practical guidance for engineering practices. Field validation demonstrates that base layer cracking is the primary cause of cracking in the verified sections, which, under heavy traffic and overload conditions, leads to reflective cracks propagating upward to the surface, with bottom-up reflective cracking being the main type. The proposed transverse crack cause database and diagnostic framework provide both theoretical foundations and practical references for developing effective crack treatment strategies in asphalt pavement engineering.

Keywords: road engineering; transverse crack cause and mechanism; review; cause diagnosis; semi-rigid base asphalt pavement; crack treatment; maintenance decision-making

Publication history: Received 2024-05-12; Received in revised form 2025-01-27; Accepted 2025-03-12

Funding: National Natural Science Foundation of China (52208428)

* **Corresponding author:** MA Tao (1981-), male, professor, PhD, matao@seu.edu.cn.

0 引言

截至2024年底,中国高速公路总里程达到19.07万km,居世界首位。半刚性基层沥青路面是中国高等级公路主要采用的结构,由水泥、石灰等无机结合料稳定粒料基层与沥青面层组成,具有强度高、承载力大、整体性好等特点^[1-2]。随着交通量的增加以及路龄的增长,沥青路面病害成为公路养护管理部门的难题,其中,横向裂缝是半刚性基层沥青路面最典型、最易发生的破坏形式,并且几乎伴随沥青路面的整个寿命周期^[3-5],严重影响路面的服役性能和服务品质^[6-9]。因此,建立横向裂缝的科学处治对策一直以来都是道路工程行业和学界的研究重点问题。

横向裂缝一般表现为与路面行车方向垂直分布的单根裂缝,研究人员从横向裂缝的开裂机理、材料研发、检测以及处治技术等方面开展了大量、持续的研究,取得了丰硕的成果,为沥青路面横向裂缝的预防以及处治提供了重要的支撑。在制定养护对策的时候,需要首先对横向裂缝的成因进行诊断,明确横向裂缝形成的根本原因,从而采取针对性的养护方案,提高裂缝养护的有效性和耐久性。但是,在当前的沥青路面养护工程实践中,对于横向裂缝的成因诊断仍然缺乏可参考、可操作的诊断方法,主要依赖以经验为主的决策方式^[10],易造成横向裂缝反复性发生。半刚性基层沥青路面横向裂缝成因机理复杂,其形成受到交通荷载、气候环境、路面结构与材

料以及施工等多个因素的影响^[11],不同成因造成的横向裂缝产生机理不同,对路面性能的影响不同,采用相同的方式处治不同成因的横向裂缝可能会导致处治效果不佳,目前尚未有文献对半刚性基层沥青路面横向裂缝的成因机理进行系统性的梳理。

本文针对半刚性基层沥青路面横向裂缝的成因机理及诊断方法研究现状开展充分调研,梳理了当前横向裂缝分类与评价方法以及研究进展,从材料、结构、施工、荷载、环境等方面详细论述了横向裂缝的形成原因、形成过程以及研究进展,构建了横向裂缝成因库;在此基础上,提出了横向裂缝成因诊断框架,为建立横向裂缝处治对策提供理论依据,对于实现半刚性基层沥青路面的科学养护具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 横向裂缝评价方法

横向裂缝的评价不仅为成因诊断提供了量化依据,还直接影响裂缝处治的效果。评价方法通常基于裂缝的宽度、长度、深度等指标以判断裂缝对路面性能的影响程度。同时也是各类裂缝检测技术的直接结果,其具有衔接检测技术与养护决策的桥梁作用。因此,本文梳理了国内外对横向裂缝的分类方法及评价方法,旨在发现评价指标与复杂成因之间的联系,辅助横向裂缝成因诊断框架的构建。

1.1 现状

表1所示为主要国家当前的裂缝评价方法,一般可以分为2类,一类是质评法,另一类是量评法。

表 1 横向裂缝不同分类评价方法
Table 1 Evaluation methods for different classifications
of transverse cracks

国家	评价标准	裂缝类型	方法类型
美国	美国联邦公路管理局 《长期路面性能路面 病害调查指南》 (SHRP-P-338)	非荷载低温横缝	质评法
		非荷载反射裂缝	
		荷载反射裂缝	
		轻度:平均缝宽小于 6 mm, 或已封缝,附近无损坏	量评法
		中等:平均缝宽 6~19 mm, 附近有轻微损坏	
日本	《铺装调查试验法 便览》(2019)	温度裂缝	质评法
		细裂缝	
		反射裂缝	
		构造物引起的裂缝	
		施工缝引起的裂缝	
中国	《公路技术状况 评定标准》 (JTG 5210—2018)	轻度:主要裂缝宽度小于或 等于 3 mm	量评法
		重度:主要裂缝宽度 大于 3 mm	
		横向裂缝	质评法
		纵向裂缝	
		块裂	
		龟裂	
英国	《英国路面管理调查 用户指南》 (UK Pavement Management Surveys, UKPMS)	温度裂缝	质评法
		反射裂缝	
法国	法国交通部《道路 工程技术规程》 (2023)	自上而下开裂	质评法
		自下而上开裂	
		反射裂缝	

质评法基于裂缝的发生形态进行评价,通过对裂缝发生形态的分类可以推断裂缝的发生形状、位置以及原因等,如美国联邦公路管理局的长期路面性能病害调查指南的评价方法,将横向裂缝分为非荷载低温裂缝、非荷载反射裂缝和荷载型反射裂缝^[12-13]。质评法依赖工程经验的判断,主观性较强,缺少定量评价,并且没有形成可操作的分类与评价方法体系。量评法基于裂缝的发生程度对裂缝进行定量评价,如裂缝率,是比较常见的定量评价指标,即

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{B} \quad (1)$$

式中: C 为裂缝率; A_i 为第 i 处裂缝的面积; n 为裂缝数; B 为实际检测路面面积。

裂缝率等量评法一般从裂缝的影响面积进行评价,无法确定裂缝在路面上的分布情况,也无法评价单条裂缝细节状况,因此,不能全面反映裂缝对路面质量的影响程度,具有一定的局限性。

1.2 研究进展

随着公路养护的精细化与靶向化发展,为了能够建立针对性的处治方案,对于沥青路面病害的精细分类提出了更高的要求,需要对不同类型的裂缝尤其是横向裂缝提出更准确的评价方法。国内外已有很多学者围绕裂缝的评价方法开展了研究,包括直接评价法、间接评价法以及基于图像处理的评价方法。

1.2.1 直接评价法

基于横向裂缝宏观指标的直接量化评价方法被大多数学者采用。Lytton 等^[14]为了有效地表征和量化现场横向裂缝,引入了裂缝间距、裂缝长度、裂缝深度和裂缝宽度等裂缝细观形态表征指标,同时随时记录 and 评估;Zhou 等^[15]提出采用横向裂缝间距(Transverse Crack Spacing, TCS)与横向裂缝贯穿度(Transverse Crack Width Ratio, TWR)的比值作为横向裂缝状况指数(Transverse Crack Condition Index, TCCI),综合横向与纵向两方面定量评价横向裂缝;卢洁^[16]采用统计软件对 TCCI 值拟合得到横向裂缝评价指数(Transverse Crack Evaluation Index, TCEI),并作为江苏省高速公路裂缝病害的评价指标,其关系如下

$$T_E = 100 - 115.022e^{-0.13977T_C^{0.5475}} \quad (2)$$

式中: T_E 为横向裂缝评价指数(TCEI); T_C 为横向裂缝状况指数(TCCI)。

Xing 等^[17]对比了 4 种不同沥青路面基层的横向收缩开裂试验断面数据,分析了基层类型和温度影响下横向收缩开裂的变化特征,提出了裂缝面积比的概念和计算方法,并通过计算证明了其评价基层导致横向开裂状况的合理性和准确性。直接评价法的优势在于可以完成对裂缝分布状况的量化评价,辅助于公路沥青路面破损状况的评价与养护方案的制定。但是,对于裂缝成因的判断仍无法确定。

1.2.2 间接评价法

众多学者利用其他量化指标实现对横向裂缝的间接量化评价,Khafajeh 等^[18]利用横向裂缝严重程度不同对承载能力影响不同的差异,采用载荷传递效率对横向裂缝进行量化评价;Yang 等^[19]利用车辆在裂纹段和未裂纹段的振动加速度,提取横向裂纹处

的信号特征实现对横向裂缝的定量分析;Yan 等^[20]利用有限元模拟了裂缝损伤前后沥青路面的加速度响应,提出了垂直加速度峰值变化率来表征裂缝损伤对路面加速度的影响;肖满哲等^[21]基于裂缝使弯沉盆的扭曲特性,采用弯沉盆几何形态参数间接评价横向裂缝影响状况。无论是直接量化评价还是间接量化评价,对横向裂缝的计算值都缺乏有效参考,需要更大的验证才可以进一步形成标准。

1.2.3 基于图像处理的评价方法

随着计算机技术的发展,图像检测与处理技术因具有高效非接触式特点^[22]而应用于横向裂缝的量化评价。而目前的方法都是通过对二值裂纹图进行形态学运算和几何计算来对裂纹进行量化^[23-24],这决定了裂纹量化结果在很大程度上取决于裂纹图生成和后续处理的精度^[25-26]。在目前的实践中,基于图像识别的横向裂缝量化仍然不成熟。并且基于图像处理进行裂缝评价的众多研究过于关注裂缝的细观信息与提高检测与提取精度,与裂缝类型与成因密切相关的环境、位置分布等信息在定量分析中难以实现。此外,图像处理技术破坏了裂缝的连贯性,使得关键量化指标难以实现。比如在图像提取的过程中,点状化的裂缝难免有所丢失(或与背景混合),此时裂缝的连续性被显著影响,将原本连续的裂缝处理成断裂,或将原本断开的裂缝融合成连续,这将导致连续性无法作为裂缝分类评价的重要标准。

但是,裂缝检测技术与图像处理技术的发展为从横向裂缝形态学角度进行定量定性评价的研究提供了基础,为诸多指标提供了计算可能,基于形态学与拓扑学理论的指标如线性度、粗糙度和分形维数等^[27-29]可以作为横向裂缝发展状况的定量评价指标,并与现在的评价标准建立相关性关系,实现对横向裂缝的精细化评价。关于裂缝的评价方法,需要基于裂缝形态的评价方法与评价指标,能够直接判断成因,为检测技术的发展提供了新的思路。

1.2.4 横向裂缝评价方法比较

表 2 为横向裂缝评价方法的优缺点与适用性分析,可以看出:直接评价法适合于裂缝成因简单、裂缝形态明显的路面场景,具备操作简便、易于实现的特点,但在应对复杂裂缝成因时存在局限;间接评价法尽管计算复杂,但能深入反映裂缝对路面性能的潜在影响,适用于高精度需求的复杂环境以及科学研究;基于图像处理的评价方法随着技术的发展,具备未来广泛应用的潜力,尤其在非接触式和自动化

表 2 横向裂缝评价方法的优缺点与适用性分析
Table 2 Analysis of advantages, disadvantages, and applicability of transverse crack evaluation methods

评价方法	优点	缺点	适用场景
直接评价法	直观易懂,能够快速量化裂缝形态特征	无法深入揭示裂缝的内部结构及其成因,易忽略复杂环境因素的影响	裂缝形态明显、成因较为简单的路面场景,适合于常规养护管理
间接评价法	能反映裂缝对路面结构性能的潜在影响	计算过程复杂,数据需求较高,依赖大量试验验证,适用性受到限制	需评估裂缝对承载能力或路面结构影响的复杂场景,适合于科学研究及精细化养护决策
基于图像处理的评价方法	非接触检测,高效获取裂缝几何信息,能够实现自动化处理,具备未来广泛应用潜力	技术尚不成熟,处理精度受限,可能影响裂缝的连贯性,环境因素的影响难以控制	非接触检测需求高,适用于需要自动化和高效分析的复杂路面养护管理场景

检测方面。然而,当前技术的成熟度和环境影响仍是其主要瓶颈。

为了优化横向裂缝的评价体系,可以在实际应用中结合多种评价方法,以弥补各自的不足。例如,将直接评价法与基于图像处理的评价方法相结合,在常规养护管理中利用直接评价法的简单高效,同时在复杂场景下借助图像处理技术实现更精细的分析。此外,间接评价法可用于高精度需求的场景,提供补充性的深度分析。这种多方法协同的评价策略,将有助于提高横向裂缝评价的准确性和可靠性,进而为科学的养护决策提供更强有力的支持。

2 横向裂缝分类方法

半刚性基层沥青路面横向裂缝的表现形式及成因机理差异显著,因此,裂缝的分类方法在养护决策过程中具有重要参考价值。如表 1 所示,国内外学者在研究中提出了多种分类方法,依据裂缝的形态、位置、成因等因素,将横向裂缝分为不同类型。然而目前对于横向裂缝的分类存在成因类型分类模糊、精细化程度不够、缺少统一分类标准等问题。

针对横向裂缝成因诊断与养护对策建立的需求,本文在前人的研究基础上,考虑横向裂缝发展形态与成因,总结并提出了基于方向与成因的横向裂缝分类方法,图 1 为基于成因的横向裂缝分类,横向裂缝被分为 4 类,分别为自上而下温度裂缝、自上而下荷载裂缝、自下而上反射裂缝以及对应裂缝,分别对应图 1 中的①~④。其中自下而上反射裂缝根据贯穿程度又可以进一步分为完全贯穿型和不完全贯

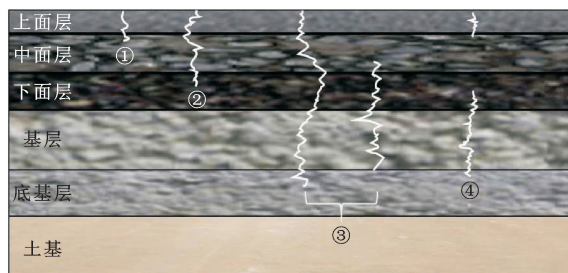


图 1 基于成因的横向裂缝分类

Fig. 1 Classification of transverse cracking based on causes

穿型。通过将横向裂缝分为以上 4 类,可以实现对不同成因的裂缝分级与评价,对于构建横向裂缝成因诊断方法具有重要的意义。下面对每种裂缝的成因机理总结。

2.1 自上而下温度裂缝

自上而下温度裂缝一般近似等间距,并从沥青面层表面开裂,逐渐向下面层和基层延伸、扩展,从而形成了上宽下窄的裂缝。已有研究认为横向低温裂缝有 2 种开裂模式。

(1)温度收缩裂缝:其产生机理为在冬季气温骤降时,沥青混合料的应力松弛不能适应温度应力的增长,温度应力超过沥青混合料的极限抗拉强度,便产生开裂。

(2)温度疲劳裂缝:在周期性变化的温度应力场中,由于材料松弛掉的应力与由于新的降温作用产生的温度应力相差不大,导致路面在相近的应力水平下长时间反复作用,使路面材料的抗拉强度不断下降,若温度应力下降速度小于抗拉强度下降速度,则沥青路面就会出现横向温度疲劳裂缝,这种裂缝一般发生在温度变化频繁的地区。对于路面而言,道路宽度相对不大,纵向应力无法松弛而横向应力可以松弛,因此,温度疲劳裂缝一般为横向裂缝。

2.2 自上而下荷载裂缝

自上而下荷载裂缝一般是由交通荷载作用下产生的表面拉应力引起的。沥青混合料属于非均质材料,其破坏主要受到拉应力的控制,当结构层某点拉应力大于其容许拉应力时产生开裂。沥青路面使用期间经受车辆荷载的反复作用,长期处于应力应变交迭变化状态,在车辆荷载的多次作用后,其容许拉应力降低,使得面层材料逐渐逼近断裂破坏条件。自上而下荷载裂缝的产生受到交通荷载、温度、沥青老化和以及施工离析等因素的影响。

2.3 自下而上反射裂缝

反射裂缝一般等间距出现,几乎贯穿整个路面,形态较为平直,支缝较少,通常为上窄下宽的

裂缝。许多学者通过实验室试验^[30]、有限元模拟^[31]和试验道路观测^[32]对反射裂缝的机理进行了大量的研究。基于已有研究可以认为反射裂缝一般有 2 种开裂模式。

(1)沥青面层层底开裂反射:沥青面层受到交通荷载和温度联合或单独作用产生受拉、剪切与疲劳。当面层与基层黏结状态不良时,面层下部的拉应力超过了面层沥青混合料的极限抗拉强度,在偏荷载作用下的剪应力作用下导致裂缝反射至表面。

(2)基层开裂传导至面层:在冬季低温的收缩应力、干缩应力和半刚性基层底部疲劳作用下,导致基层开裂而失去抵抗拉应力的作用,在开裂位置将应力传递给面层,造成面层在裂缝处的应力集中,即骤增的拉应力与剪应力,而且沥青面层应力承受能力相对低,导致产生反射裂缝。再加上偏荷载主拉应力的作用,其应力值就有可能超过材料的极限强度,从而使面层发生开裂。同时,长期的温度变化引起基层的胀缩,使面层承受拉应力的反复作用引起拉伸疲劳,产生裂缝并导致裂缝沿竖向扩展到路表。

2.4 对应裂缝

传统理论认为,半刚性基层沥青路面反射裂缝多为自下而上,即由面层层底或基层逐渐扩展至表面,但现场观测发现,面层表面与基层同时扩展的表面萌发的新型反射裂缝^[33]占了较大的比例,并在全尺寸试验中得到了验证^[34]。基层裂缝段沥青层损伤分布有 2 个峰值^[35],分别位于沥青层顶部和沥青层底部。不同的路面条件会导致 2 个峰值的相对值发生变化,从而产生表面起裂或底部起裂,在顶部起裂时该种裂缝被称为对应裂缝^[36]。

3 横向裂缝影响因素及成因库

半刚性基层沥青路面横向裂缝的产生受到复杂因素的影响,如图 2 所示,包括路基路面结构、沥青混合料、施工以及交通荷载与温湿度环境等因素都对裂缝的产生和发展起到了影响。对于其病害成因诊断需要首先明确对裂缝产生作用的因素和影响机理。研究人员较多关注了从结构与材料设计的角度提高沥青路面的抗裂性能,尚未见文献从养护角度系统的梳理横向裂缝的影响因素。因此,本文从结构、材料、交通荷载与环境、施工以及其他特殊条件等五方面,详细梳理了半刚性基层沥青路面横向裂缝的影响因素及其影响机理,在此基础上,构建了半刚性基层沥青路面横向裂缝成因库,为成因诊断提供理论依据。

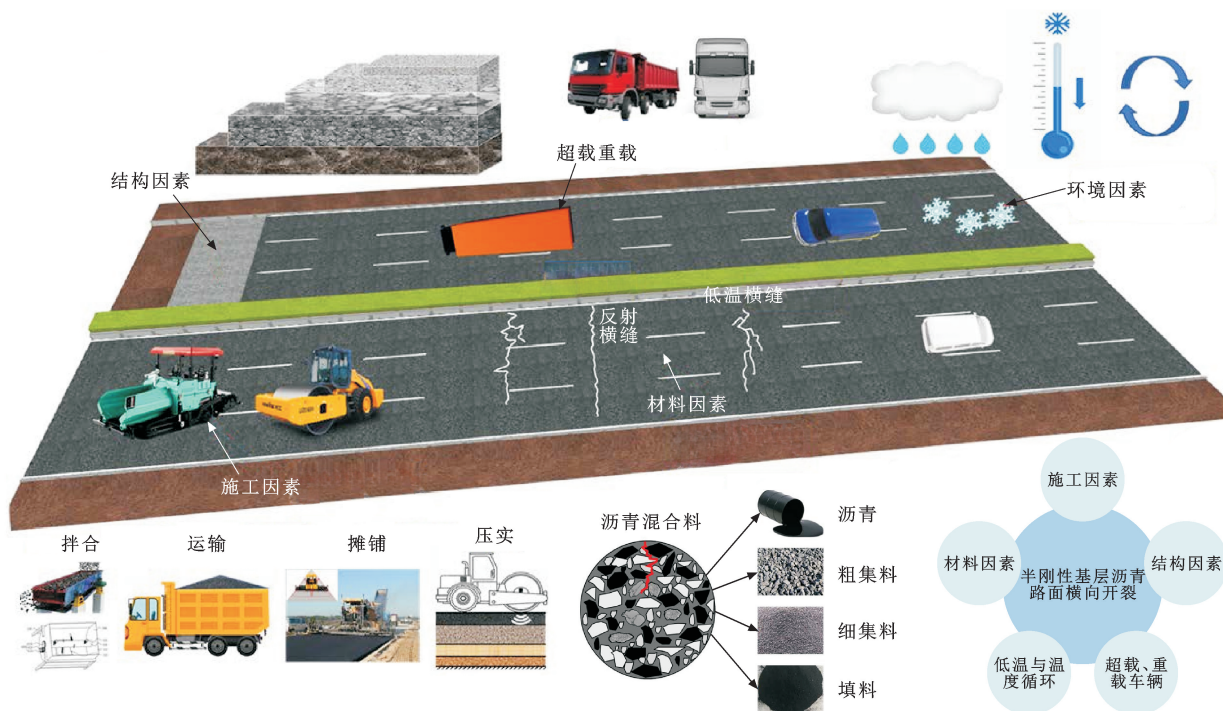


图2 半刚性基层沥青路面横向裂缝成因示意

Fig. 2 Schematic of causes of transverse cracks in semi-rigid base asphalt pavement

3.1 路面结构

3.1.1 结构层厚度

沥青面层厚度对于路面结构的力学响应分布及裂缝的产生具有重要的影响。从断裂力学角度而言,较厚的沥青层在承载应力时能够更均匀地分布荷载,降低裂缝尖端的应力集中,从而延缓了裂缝的扩展。随着沥青面层厚度的增加,应力强度因子降低,沥青路面的抗裂性能提升^[37];但是超过一定阈值后,厚度的增加对路面抗裂性能的提升效果便不再显著,而这由于层间应力传递的衰减导致的,表现为结构中的应力分布逐渐趋于均匀,厚度的进一步增加不再显著改善抗裂效果。在低温条件下,较厚的沥青面层可以起到类似“隔温层”的作用,使得基层不易受到温度影响而产生温缩裂缝。在面层厚10 cm的情况下,基层中的温度梯度可降低10%。这是由于较厚的沥青面层具有更高的热阻,能够有效减缓热流传递,减少基层的温度波动,从而减轻温缩应力的作用,进而降低了温缩裂缝发生的概率。

半刚性基层的总厚度一般为40 cm左右^[38]。较厚的基层不仅能够减缓裂缝表面的开裂速率,还可以通过增加基层刚度,进一步降低应力强度因子和 t 应力,这些变化对延缓自上而下裂缝的发生和扩展具有重要作用,并在有限元分析仿真中得到证实^[39]。同时,Xiao等^[40]采用扩展有限元法模拟自

下而上裂缝的扩展路径和尖端应力响应,得出在含水率得到控制的条件下,较厚的基层可有效延缓半刚性基层收缩导致的反射裂缝的出现和扩展速度。这是由于较厚的基层能够提供更强的约束作用,增加了材料的抗弯刚度,使得表层材料在外力作用下的拉应力降低,从而延缓裂缝的形成与扩展。

3.1.2 结构层模量

结构层模量是衡量结构层抗变形能力的重要指标,研究表明结构层的模量大小与沥青路面开裂状况存在关联^[41]。基于材料力学中的弹性模量与应力-应变关系为:高模量的结构层在外荷载作用下,能够更均匀地分散应力,减小应力集中效应,从而降低裂缝产生的可能性。Sebaaly等^[42-43]通过足尺加速加载试验,比对弯沉测试结果与路面裂缝状况,发现两者具有相同的发展趋势;金辰^[44]通过路面损坏状况调查、钻芯取样和路表弯沉盆检测,进行基层模量与路面开裂状况的相关性分析,结果表明基层模量降低,路面开裂程度加剧,这是因为,基层模量降低意味着材料的抗拉强度和刚度下降,导致在外荷载作用下的应力集中效应加剧,裂缝尖端的应力强度因子随之增大,最终加速裂缝的扩展,同时,这也表明基层模量对裂缝扩展的影响尤为显著。

相对于基层模量,沥青面层的模量对于沥青混合料低温开裂的影响较大^[45],且在沥青面层中,下

面层的模量对反射裂缝的影响最大。面层材料中的微观裂缝和空隙在低温下更容易形成和扩展,这些微观缺陷会导致材料的整体刚度和抗裂性能下降^[46]。但是一些现场试验表明对于非温度循环下的低温开裂,减小面层的弹性模量更能有效防止低温开裂的发生。提高下面层模量对于反射裂缝扩展的防止效果是显著的,但增加模量对其他路用性能(如疲劳抗力)产生负面影响^[47-48]。因此,在设计结构层时,需要综合考虑模量对裂缝控制和整体路用性能的影响。

对于路基土模量,较高的模量能够提供足够的支撑,减少路面层的变形和应力集中,降低裂缝形成的风险;而较低的模量则会导致路基支撑不足,增加路面层的弯曲和拉伸应力,容易引发疲劳裂缝,尤其是在裂缝尖端应力强度因子超过材料断裂韧度时,裂缝会持续扩展直至贯通。单超等^[49]利用应变传感器监测道路结构的应变规律。结果表明,土基回弹模量较低时,原始开裂点在基层及底基层发生;裂缝尖端的应力强度因子均高于材料的断裂韧度,原始裂缝将会由于荷载作用而持续扩张,直至形成贯通裂缝。

此外,环境条件以及结构层材料本身对模量的影响也不容忽视。温度和湿度的变化都会导致材料的模量发生变化,尤其是在极端气候条件下,温度应力和水分侵蚀会显著降低材料的模量,进而加剧裂缝的形成与扩展。

总体来说,半刚性基层模量相较于沥青层以及土基层对裂缝扩展的影响更大^[50]。在横向裂缝成因诊断的过程中,通过试验检测基层材料的力学性能,有助于判断沥青路面横向收缩开裂的成因^[51-52]。

3.1.3 面层与基层的层间黏结性

面层与基层的层间黏结性不良是导致裂缝产生与扩展的重要因素。当基层与面层黏结性较好时,由于基层刚度较大,那么面层底部几乎不可能因为受拉而发生破坏^[53]。层间黏结状态影响着裂缝初期的形成过程,研究人员采用层间裂缝预估法对使用过程中各层路面的裂缝进行预测,结果表明,初始裂纹主要发生在层间连接处、各层自由边界处和较薄层处^[54]。黏结层的材料性质,如模量和抗拉强度,也会对裂缝的扩展具有重要影响;Wang 等^[55]采用接触特性的内聚力模型分析了黏结层对反射裂缝扩展过程的影响规律,发现较低的沥青加铺层与半刚性基层之间的黏性层模量可以提高沥青路面抗反射裂缝的能力。另一方面,由于半刚性基层与沥青

面层的附着黏结性能比级配碎石、沥青稳定碎石等柔性基层差,将使面层有一定自由收缩变形的可能性,混合料的应力松弛性能得不到充分发挥,特别是温度应力无法传递到基层,在面层内部积累,容易产生横向温度裂缝^[56]。因此,在横向裂缝成因诊断中,需特别关注层间黏结性的测试,以提高沥青路面的整体抗裂性能。

3.2 路面材料

3.2.1 沥青混合料

沥青混合料自身的抗裂性能是影响横向裂缝产生的首要因素,沥青混合料是由石质集料、沥青胶结料和空隙组成的一种具有空间网络的多相体系(图 3),其力学强度主要取决于集料颗粒间的摩擦力和嵌挤力、沥青胶结料的黏结性与集料之间的黏附性以及其级配(结构)组成。对沥青混合料强度进行研究时,大部分学者采用摩尔-库仑理论,并引入 2 个强度参数——黏聚力 c 和内摩阻角 φ ,而矿料之间的内摩阻力与沥青与矿料之间的黏聚力也是沥青混合料的强度构成,影响其抗裂性能。下文在考虑 2 个强度参数的基础上分析沥青混合料开裂的影响因素。

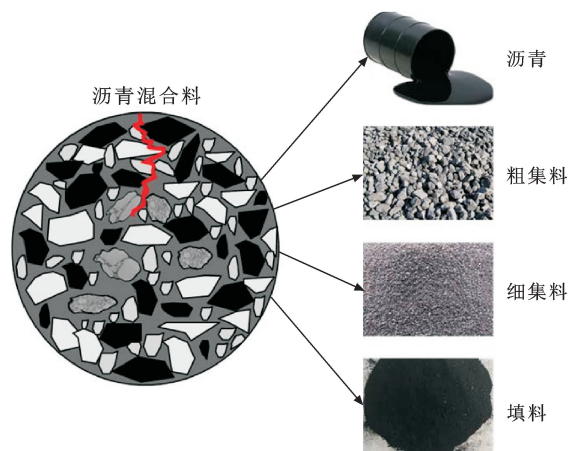


图 3 沥青混合料组成

Fig. 3 Composition of asphalt mixture

(1) 沥青特性

沥青是沥青混合料中发挥胶结作用的部分,起到黏结集料的作用,影响沥青混合料中的黏聚力部分,其应力松弛特性决定了沥青混合料在低温或疲劳状态下的抗裂性能,进而能够为沥青混合料提供更强的黏聚力,从而使得混合料抗裂性能更优越。延度、针入度指数是常用的用来反映沥青抗裂性能的指标^[57-59],通常也被用来作为裂缝成因诊断的依据。Superpave 中的弯曲梁流变试验可以直接反映沥青的低温抗裂性能,通过蠕变劲度来表征。沥青

的蠕变劲度越小,即蠕变柔量大,在低温下的应力松弛性能更强;温度下降时,混合料产生相同收缩应变而引起的内部应力越小,因而低温抗裂性能也就越好^[60]。动态剪切流变仪测定沥青的复数剪切模量 G^* 和转角 δ ,定义 $G^* \sin(\delta)$ 为疲劳开裂因子,通过限定其最大值来控制沥青路面的疲劳开裂^[61]。此外,沥青老化是沥青品质下降进而导致开裂的重要原因,沥青老化会导致其针入度变小、延度降低,沥青变硬变脆进而导致沥青路面容易产生裂缝病害^[62-63]。Li等^[64]通过延度试验、弯曲梁流变仪试验和沥青组成分析试验研究不同类型的沥青在低温条件下的抗裂性能,验证了低温下蠕变柔量较大的沥青表现出更好的抗裂性能。Hajj等^[65]证明了 $G^* \sin(\delta)$ 与疲劳裂缝扩展速率之间的密切关系。他们的研究表明,通过控制 $G^* \sin(\delta)$,可以有效提高混合料的抗疲劳开裂性能。

(2)集料特性

集料在沥青混凝土中起骨架和填充的作用。沥青混合料的力学强度很大一部分取决于集料颗粒间的摩擦力和嵌挤力,采用表面粗糙、形状方正、有棱角的粗集料并适当增加矿料粗度能提高沥青混合料的抗剪强度从而发挥更好的抗裂性能^[66]。对于粗集料,一般采用压碎值和磨耗度衡量其强度与路用性能,因为压碎值和磨耗度决定了集料的内摩阻力。同时,粗集料的碱值决定了集料与沥青的黏结特性,如果粗集料属于酸性,集料与沥青之间的黏结能力将比较差。混合料中的碱与集料中活性组分发生的化学反应,即混合料的碱-集料反应,会引起沥青混合料的开裂。对于细集料,其主要影响混合料的内摩阻角进而影响其抗剪强度,并采用棱角性评价。对于填料,其对于混合料抗裂性能的影响弱于粗细集料,但当填料的用量过少时,会导致混合料黏度变小,感温性变大。Xia等^[67]构建了凸多边形集料模型生成算法,建立了三相沥青混凝土路面的微观结构数值模型,研究表明集料分布对裂纹的主要形态特征影响不大,但对裂纹的位置、数量和扩展路径有一定影响。同时,骨料颗粒之间的联锁不良会导致沥青混合料剥落率高以及沿裂缝的路面局部退化并可能会导致反射裂缝发生^[68]。Cui等^[69]研究了不同集料形状和表面特性对沥青混合料抗裂性能的影响,研究发现,粗糙的表面和有棱角的集料显著提高了沥青混合料的抗剪强度,从而提升了其抗裂性能;Wang等^[70-71]基于分子动力学模型研究了集料与沥青的黏结性能对裂缝扩展的影响,研究表明,黏结性

能较好的集料能显著减缓裂缝的扩展速度。

(3)混合料配合比设计

混合料配合比设计影响着混合料的各材料种类与性能和用量大小,很大程度上影响着混合料整体的强度大小。对于集料级配,一般认为集料为连续级配,按最大密度级配原理设计的悬浮密实结构具有较高的密实度与强度,因而有较好的抗裂性能。较粗或者较细的级配都对裂缝的产生有一定的影响。Gong等^[72]通过多尺度有限元仿真分析发现,合理的集料级配设计显著提高了沥青混合料的抗裂性能。级配离析是指沥青路面中粗、细集料分布不均匀,是沥青路面早期局部损伤的主要原因^[73-74]。当沥青路面发生级配离析时,在粗集料浓度高的区域孔隙率增加,导致抗裂性低。Chen等^[75]的研究表明,粗骨料级配偏析导致混合料劈裂强度和水平拉应力降低,从而降低沥青混合料的抗裂性。

沥青混合料中的油石比小、沥青含量少、孔隙率大、粗集料偏少且细集料偏多均会导致混合料黏聚力与内摩阻力降低进而产生温度应力无法耗散、混合料强度降低的状况,进而导致沥青混合料综合抗开裂强度较低。Tang等^[76]基于室内试验和离散元分析方法,得到集料含量少、级配粗的沥青混合料具有较好的低温抗裂性能;Zhang等^[77-79]的研究表明,过高的粉胶比会降低混合料的柔性,从而增加其开裂的可能性。

3.2.2 无机结合料稳定材料

半刚性基层一般为无机结合料稳定材料,如图4所示,主要包括水泥稳定材料、石灰稳定材料和石灰工业废渣稳定材料,其开裂是导致产生横向反射裂缝与对应裂缝的主要原因^[80],通常包括干燥收缩、低温收缩以及疲劳开裂几种形式。

(1)干缩特性

半刚性基层强度的形成主要与两大因素有关,一是骨料之间的力学强度,二是半刚性基层的无机结合料水化过程产生的水化强度。力学强度与基层级配及压实度有关,粒料含量多并且碾压密实,力学强度就更高;水化强度与含水量有关,水化反应顺利进行需要充足的水分。而干缩裂缝的产生与半刚性基层水化强度低相关。在基层的水化过程中,水分的逐渐流失会导致材料内部应力集中,当应力超过材料的抗拉强度时,便会形成干缩裂缝。研究表明干缩所产生的裂缝一般为横向裂缝,间距为5~10 m,进而会发展为反射裂缝^[81-83]。就无机结合料稳定材料的干缩性而言,稳定细粒土的干缩系数大

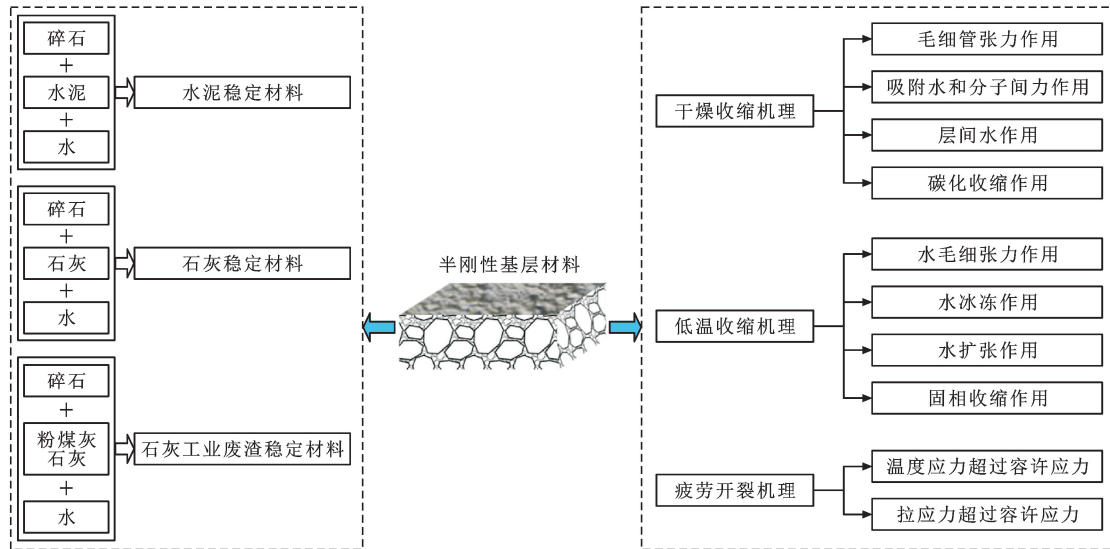


图 4 半刚性基层材料及其开裂机理

Fig. 4 Semi-rigid base materials and cracking mechanisms

于稳定中粒土和稳定粗粒土的干缩系数^[84]。普遍认为失水速率越大,越容易产生干缩裂缝,可以采用经验性回归系数干缩系数来评价其干缩开裂能力,且悬浮密实型水泥稳定砾石基层混合料干缩和温度收缩性能最为明显^[85-86]。此外,石灰、粉煤灰掺量和骨架间隙级配以及含水率都对水泥稳定碎石基层的干缩裂缝具有影响。

(2) 温缩特性

温缩特性是指材料在温度变化下产生的体积收缩或膨胀现象,尤其在温度急剧下降时,材料的体积收缩会导致内部应力集中。当温度应力超过材料的抗拉强度时,便会产生温缩裂缝。半刚性基层在养生后未及时铺筑沥青或沥青层较薄时,容易受冬季低温影响而产生温缩裂缝。一般认为,无机结合料稳定材料的刚性越大,越容易产生温缩裂缝,且裂缝间距越小(多数情况下 3~15 m),缝的开口越宽(冬季 3~30 mm)^[87]。通过室内试验得到石灰和粉煤灰稳定碎石的抗温缩性能最强,而水泥稳定碎石最差^[88],Yan 等^[89]利用室内试验研究了水稳材料温缩性能,结果表明水稳材料在一定范围内中随水泥含量的增加,其抗温缩性能提高。可以用温度收缩系数来评价半刚性基层材料的抗温缩能力^[90]。对于水稳基层,温度收缩系数随水泥掺量的增加先减小后增大,且存在使温度收缩系数最小的最佳水泥掺量^[91]。

(3) 疲劳特性

由于无机结合料稳定材料的抗拉强度远小于其抗压强度,路面结构在交通荷载重复作用下的破坏

类型主要为弯拉破坏,受到弯拉疲劳强度控制。周浩等^[92]研究表明,对于无机结合料稳定材料有以下疲劳特性:强度越大、刚度越小,疲劳寿命越长;不同稳定材料的抗疲劳性能也不同,石灰粉煤灰稳定材料的抗疲劳优于水泥砂砾,在相同应力水平下能承受更多的荷载反复作用次数,但水泥砂砾稳定材料疲劳寿命受应力变化的影响小于石灰粉煤灰稳定材料。此外,半刚性基层疲劳相对沥青层疲劳而言对横向裂缝的产生有更重要影响。Lyu 等^[93]通过直接拉伸、单轴压缩和间接拉伸试验,在多种加载速率和应力水平下对 3 种路面材料的强度和疲劳性能进行了表征,研究得到水稳碎石基层的疲劳敏感程度要高于沥青面层。

3.3 荷载、环境外部因素

裂缝破坏的本质原因即外界应力(或应变)超过材料本身所能承受的最大应力(或应变),而温度、水分等环境因素与车辆荷载是导致道路结构应力产生的主要外部因素^[94]。在车辆荷载的反复作用下,面层材料的强度也会降低,这会导致其抵抗拉应力的能力变弱^[95],从而更容易出现横向裂缝。在重载交通多、交通量大的路段,路面更容易受到荷载的反复作用而产生横向开裂。降温速率、升降温循环次数以及极端最低温度等气候条件也都会对沥青路面温缩裂缝产生影响,当降温幅度增加时,面层的收缩变形增大,且已经受损部位的张开位移也会增加。

温度与荷载耦合作用下的裂缝产生机理是研究人员关注的重点,温度-应力场的耦合作用对路面结构的应力分布影响较大,尤其在冬季温度骤降时,轮

胎载荷作用下的横向裂缝更容易形成和扩展。研究表明,荷载形式、荷载分布情况、荷载相对于横向裂缝的位置都对裂缝的产生有影响,其中车轮与裂纹位置的距离对断裂参数的影响最大^[96-101]。Sun等^[102]采用数字图像处理技术建立了考虑沥青混凝土非均质微观结构的二维局部尺度代表性体积元模型,并采用双线性内聚力模型模拟了沥青混凝土局部尺度损伤的发生与演化过程,结果表明,轮胎边缘外近表面显著的横向拉应力可能是导致自上而下荷载型横向开裂的主要原因;Sun等^[103]提出了一种三维多尺度

建模方法来研究沥青路面在温度-应力场耦合作用下的响应,结果表明,温度应力的存在使轮胎荷载作用下的路面整体最大主应力在冬季增大,而在夏季减小。对于半刚性基层路面,最大主应力的最大值主要出现在双轮胎间隙中心附近的路面表面或单轮胎边缘外且当温度-应力场完全耦合时,轮胎荷载周围的近表面应力在冬季全部为拉应力,而在夏季主要为压缩应力。Dong等^[104]通过有限元模拟分析了温度梯度和荷载耦合作用下裂缝的扩展行为,验证了温度与荷载耦合作用对裂缝扩展的加速效应。

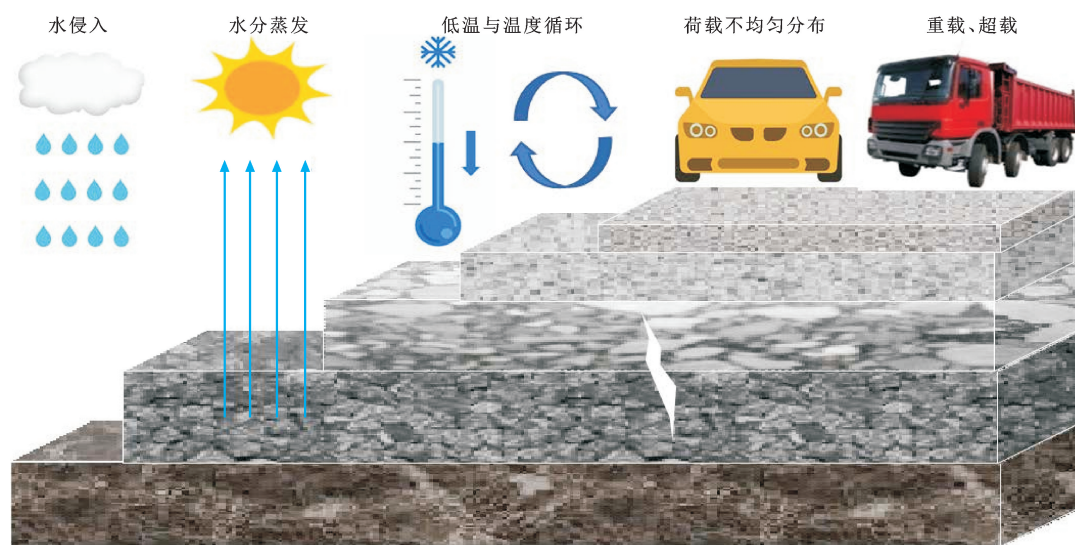


图5 外界环境因素影响开裂示意

Fig. 5 Schematic of cracking influenced by external environmental factors

横向裂缝产生后,在荷载和环境的作用下裂缝会逐渐扩展。研究表明^[105-108],车轮荷载在横向裂缝上移动时会产生3个应力脉冲,2个最大剪应力和1个最大弯曲,第1个应力脉冲是由于车轮荷载接近裂纹时,裂纹边缘之间的垂直运动差。裂缝受荷载最大的一面向下移动,而未受荷载的一面向上移动,在裂缝边缘之间产生剪应力,由于基层的结构强度减弱,其裂缝两端产生较大的竖向位移,如图6(a)所示。第2个应力脉冲是车轮经过裂缝时在裂缝中产生的弯拉应力,如图6(b)所示。第3个应力脉冲的情况与第1个应力脉冲相反,在裂缝边缘之间再

次产生剪应力,这3个应力脉冲导致了横向裂缝的扩展,如图6(c)所示。经车轮荷载反复作用后,裂缝处面层材料便会产生剪切疲劳破裂,并延伸至沥青面层表面。

此外,雨水等的损害也能够加剧路面裂缝的产生^[109],水分逐渐渗透入路面裂缝以及空隙当中,在外力作用下,使得沥青以及集料之间的黏结力受到影响,再加上行车荷载的反复作用,导致水分进一步渗透到沥青与集料的界面当中,进而导致裂缝产生。这种现象主要由“剥离效应”驱动^[110],即水分子渗透到沥青与集料的界面,削弱了两者之间的黏结力,

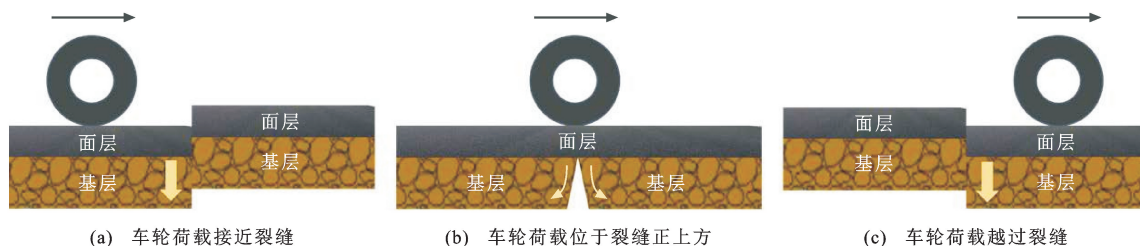


图6 荷载作用下半刚性基层沥青路面横向裂缝扩展过程

Fig. 6 Expansion process of transverse cracks in semi-rigid base asphalt pavement under loads

特别是在动态荷载的反复作用下,沥青膜与集料之间的黏附性减弱,导致集料从沥青膜中剥离。此外,水分在路面孔隙中的存在还会产生孔隙水压力,在车辆荷载通过时,这种压力会加速集料颗粒的相对运动,进一步破坏沥青混合料的结构完整性,导致材料内部产生新的裂缝或扩展现有裂缝。并且,水温状况不良时,路基内水冻结导致路基隆起而引起沥青面层开裂。Nobakht 等^[111]通过数值模拟分析了水分渗透对沥青混合料黏结力的影响,发现高水分条件下黏结力显著下降,且载荷的反复作用使裂缝扩展速度显著增加。

3.4 施工因素

半刚性基层沥青路面的施工质量控制是导致横向裂缝产生的另一个重要因素,存在成因复杂、影响时间长且不可逆的特点,主要从以下方面影响横向裂缝产生。

3.4.1 路基压实不足

路基压实不足会导致其承载力不满足要求,在车辆荷载作用下发生沉降,从而产生裂缝。其他原因包括填筑方法不合理、石料规格不一,原地面软弱(为软土或水易侵入等)并在填筑路基之前未经换土或压实等均可能导致路基本身的下沉,这种沉降会导致路基内部产生附加应力,进而在表层引发裂缝扩展。Wang 等^[112]基于工程实践研究分析了因路基压实不足导致的路面裂缝,研究发现,某高速公路段由于路基填筑材料不均匀且压实度不足,车辆荷载作用下出现了明显的沉降现象,最终导致了表层的横向裂缝形成。

3.4.2 基层压实与养生

半刚性基层在施工过程中的劣化主要有碾压、养生不当等原因。压实不充分的半刚性基层会导致其内部密度不足,进而降低材料的抗剪强度和抗拉强度,这些缺陷在应力作用下会加速裂缝的产生。半刚性基层碾压结束后,如果不及时养生或养生结束后未及时铺筑沥青封层或沥青面层,只要曝晒 2~3 天就可能出现干缩裂缝^[113]。同时,施工期半刚性基层受温缩和干缩作用影响容易开裂,从而影响道路使用寿命^[114]。Majarrez 等^[115]基于西班牙西部的半干旱/干旱气候区半刚性基层路面使用性能,证明在施工中对半刚性基层进行及时铺筑沥青封层与正确养生的重要性,并制定了相应的施工规范。

3.4.3 沥青面层施工质量

沥青混合料的运输、拌合、摊铺、压实等施工期的质量控制不足是造成开裂的主要原因之一^[116]。

沥青混合料拌和不均匀、含水率控制差会导致沥青混合料的体积参数发生变化,混合料颗粒在集料间内摩阻力和黏聚力作用下重新排列,从而导致混合料细集料处开裂;拌和时间过长、拌和温度过高或者在储料仓中存储时间过长,均会导致沥青本身老化而产生横向开裂^[117]。运输时没有对混合料进行保温和防雨处理,会使沥青混合料出现离析问题,在这些区域,内部应力集中更为明显,在外力作用下容易出现裂缝。沥青混合料摊铺均匀性较差等问题,会导致其摊铺质量受到影响。压实温度和压实次数直接决定了沥青混合料的压实度,压实度不同,沥青路面的低温抗裂性亦不同^[118]。艾长发等^[119]研究了压实温度对沥青混合料路用性能的影响,结果表明在低温压实温度范围内随压实温度升高,压实度升高,沥青面层抗裂性提高。此外,雨季施工容易导致水侵入现象的发生,提高裂缝产生的概率^[120]。低温季节施工会影响沥青混合料密实度,降低其抗裂性能。冬季低温雨水结冰膨胀也会导致裂缝扩展^[121]。其他因素包括养护施工中原路面裂缝/接缝处治不当,在行车荷载作用下导致沥青面层产生由原路面裂缝导致的反射裂缝^[122]。

3.4.4 排水设施不良

排水设施主要包括路界地表排水设施、路面内部排水设施和路界地下排水设施,具体包括坡面、排水基层、渗井、引排水沟等,排水设施能够排除地表、地下水,减少水对道路的侵蚀,降低病害发生的概率。当排水不良时,水分进入并留存在沥青路面结构层内,并浸入矿质集料内,由于表面张力和其他化学力的作用,使沥青与石料间的联结被削弱或完全剥离,汽车轮胎对路面的挤压搓揉作用及与路面间的真空吸附作用加速了剥离的进程,致使路面很快损坏,并在很多时候导致横向裂缝的产生^[123-124]。并且当雨水沿裂缝下继续渗时,会使裂缝带附近的地基产生显著的潜蚀、湿陷和软化等复杂的物理和化学作用,导致路基不均匀差异沉降以及脱空等病害。Sybilski 等^[125]基于某高速公路段排水不良导致的路基软化和裂缝问题进行分析。研究发现,由于排水设施缺陷导致雨水沿裂缝下渗,造成路基区域的潜蚀和软化,最终引发了严重的横向裂缝和路基沉降。

3.5 其他特殊条件

道路沿线的特殊情况或设施也会导致横向裂缝的产生。与正常路线相比,曲线内部更容易产生纵向裂缝,而在视线差的曲线上更容易产生横向裂

缝^[126]。这是因为视线差的曲线由于驾驶员频繁调整行驶方向和速度,进一步加剧了路面上的应力集中,从而更容易引发横向裂缝。此外,构造物横穿路基时,在构造物两侧产生的裂缝、桥台与路堤衔接处产生的裂缝、山谷高填方地段与挖方衔接处产生的裂缝、沿河道路水侵害导致软土土基沉降等,这些横向裂缝都是由于特殊环境条件下路基土体的不均匀

沉降导致沉降处产生应力集中而引起的^[127]。

3.6 半刚性基层横向裂缝成因库

基于上述横向裂缝形成与发展影响因素分析,结合前一节基于成因机理的横向裂缝分类方法,针对 4 种主要横向裂缝类型,构建了半刚性基层沥青路面横向裂缝成因库。表 3 为半刚性基层沥青路面横向裂缝成因库。

表 3 半刚性基层沥青路面横向裂缝成因库

Table 3 Transverse crack cause database of semi-rigid base asphalt pavement

横缝成因	材料成因													结构成因			施工成因							荷载环境成因			
	面层										基层			厚度	模量	层间黏结	路基施工	基层施工	面层施工	接缝施工	施工环境	排水施工	荷载	外界环境			
	沥青		集料		混合料与级配设计						干缩	温缩	疲劳性质														
横缝类型	沥青延度小	沥青低温劲度高	沥青老化	集料压碎值、磨耗值不合规	细集料棱角性差	沥青混合料空隙率大	混合料油石比小	粗集料少	级配离析	沥青混合料吸水性强	含水率低	刚度大	强度小、刚度大	无机结合料类型与级配	面层过厚或过薄、基层过薄	面层模量过大、基层模量过小	层间黏结状态差	路基沉陷	半刚性基层养生不当	沥青混合料离析、老化	原有横向接缝处治不当	雨季或极端低温施工	排水设施设计不当	超载、大车流量	极端低温	温度循环	降雨导致雨水渗入
①类	▲	▲	▲	△	△	▲	▲	▲	▲	▲					▲	▲				▲		△	▲	▲	△		△
②类	△	△	▲	△	△	▲	▲	▲	▲	△					▲	▲		△		▲	△	△	▲	▲	△	△	△
③类											▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	△	▲		△	△	▲	△	△	△	△
④类			▲	△	△	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲	▲	▲	▲	△	△	▲		△	△	▲	△	△	△	△

注:▲为较为常见;△为一般常见;①类代表自上而下温度裂缝;②类代表自上而下荷载裂缝;③类代表自下而上反射裂缝;④类代表对应裂缝。

4 半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断框架

传统的成因分析研究以经验分析、实地调研、数据统计等为主要手段。这些分析方法主要基于当前的路面状况,分析过程相对简单、直接且主观性较强。随着计算机和人工智能的发展以及大量养护工程的数据积累,基于数据挖掘的关联分析方法应用于路面病害成因的诊断中^[128-129]。该方法从历史的、综合的角度判断路面病害原因,依靠路线数据库和关联算法实现了病害的科学客观诊断。但其存在数据库需要多条路线建立、缺少路面破坏的力学理论支撑、是否具有通用性有待验证等问题。另一方面,沥青路面病害检测技术快速发展,已实现了对病害的快速识别与评价,为裂缝成因分析的数字化提供了数据储备。然而,随着大数据应用于道路养护决策当中,养护决策越来越依赖数据而缺少对路面破损的本质机理分析。因而导致许多的病害处治未

能从病害本身出发,只是一味提高路面性能数据,仅提高了路面养护的“效率”,但路面养护的“质量”仍亟待提升。目前对于半刚性基层沥青路面的病害成因分析诊断并没有得到系统研究,主要存在以下 3 个问题。

- (1)病害成因诊断只是依赖经验性判断或所给数据而无法准确确定成因及其内在机理。
- (2)病害成因诊断不够全面,只是对裂缝产生给出一种概述性成因并存在忽略成因特殊性的问题。
- (3)缺乏可参考、可操作的病害成因诊断流程与方法体系。

针对上述问题,本文基于前文所建的横向裂缝成因库,综合考虑实际工程操作可行性,建立了横向裂缝成因分步诊断流程框架,包括路段基础信息调查(基于历史数据、路段基础信息和裂缝形态的成因初步诊断),特殊因素排除(基于特殊性的成因分析与排除),荷载环境综合分析(针对荷载环境因素的外在成因分析),以及靶区试验精细化诊断(基于芯

样试验与现场试验的内在成因精细化诊断)等4个步骤,诊断流程如图7所示。

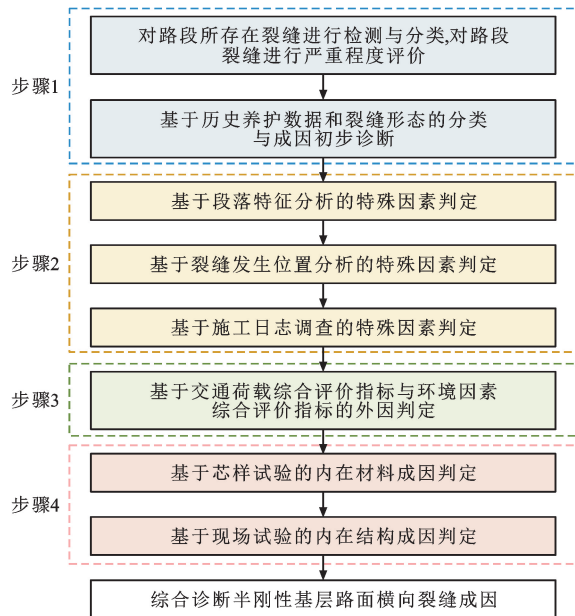


图7 横向裂缝成因诊断流程

Fig. 7 Flow of diagnosis of transverse crack causes

4.1 路段基础信息调查

首先,基于检测数据与历史数据完成横向裂缝的类型与成因初步判断,流程如图8所示。对调查路段进行裂缝检测,利用百米破损率、横向裂缝间距、TCEI等指标对裂缝进行严重程度评价,得到裂缝宏观分布状况并筛选裂缝较为严重段落;对裂缝严重段落检测图像进行细观指标分析,初步判断横缝类型,比如裂缝等间距出现时可大致判定为反射裂缝,而裂缝含有较多支缝且不平直时通常为低温裂缝,该步骤可以结合相关形态学指标阈值完成更加精细化的判断;结合往年历史养护数据、历史检测数据、基本服役状态与最新数据进行比较对照,初步

判断裂缝的成因,如在往年检测数据良好情况下突然出现道路技术状况下降,则可能是由于随服役时间增长而导致的疲劳开裂。

4.2 特殊因素排除

对特殊成因与施工因素进行排除,这是因为特殊因素依赖于对道路环境的分析,而施工因素则依赖于对施工日志与施工图的调查与专家主观判断。其成因相对独立,且在裂缝影响中具有特殊性,并且相对容易判断,提前筛选特殊因素可以避免不必要的工作,该步骤流程如图9所示。分析路段位置的特殊性,主要包括该路段是否位于易受水侵入河堤处,以及是否位于曲线转弯处,分别确定其是否可能为软土路基沉降或车辆推挤导致横缝产生。分析裂缝产生位置的特殊性,主要包括裂缝的出现是否伴随路面沉降、是否位于半填半挖处、是否出现于桥头路堤或构造物横穿处,来判断是否为沉降缝或构造物横穿导致的裂缝。分析施工因素,主要包括面层施工不当、排水设计不当、路基路面压实不均、原有裂缝与接缝处理不当、基层养护不当与雨季施工等。

4.3 荷载环境综合分析

对交通荷载因素与环境因素进行分析,流程如图10所示。由于交通与环境同属外部因素,且容易获得数值型数据,因此,可以结合决策树算法等数据分析手段进行成因判定,其思想为选择相关成因判定指标,利用已有数据训练决策树模型,确定阈值,输入新的测试数据完成诊断。在数据量满足的情况下也可以利用神经网络方法对各个成因指标进行影响程度分析。在交通因素方面,主要引入3个指标,分别为当量累积轴载作用次数、年平均日交通量、客货比,来判定是否存在超载、重载情况,以及具体哪一项指标对裂缝产生的影响最大。在环境因素方面同

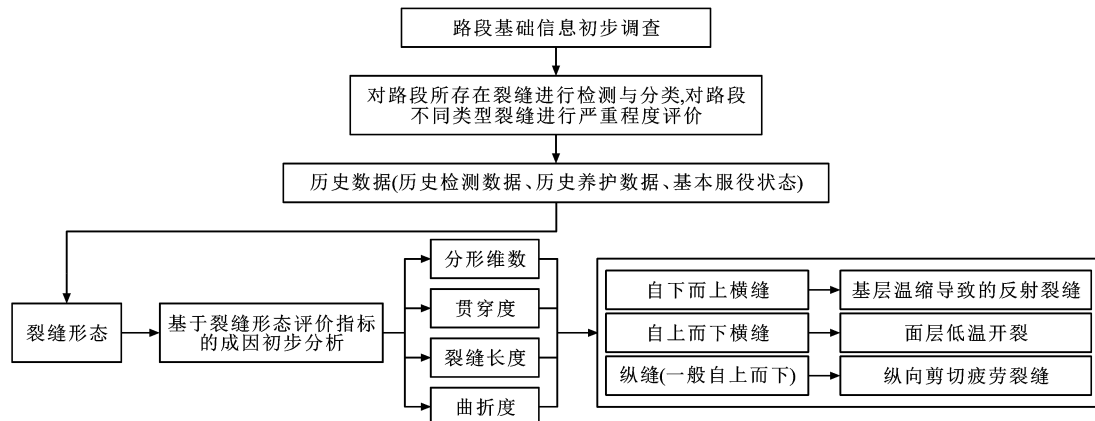


图8 路段信息初步调查流程

Fig. 8 Flow of preliminary investigation of roadway information

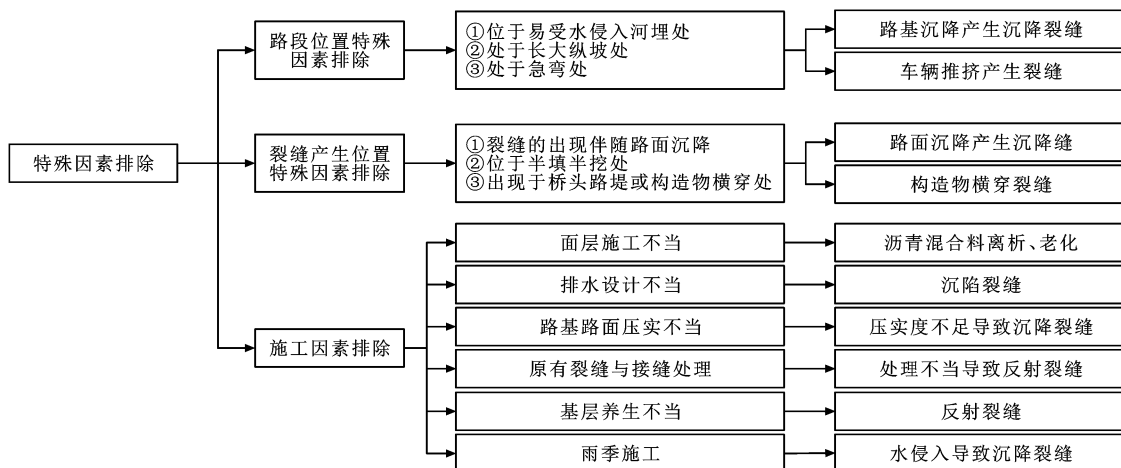


图9 特殊因素排除流程

Fig. 9 Flow of special factor exclusion

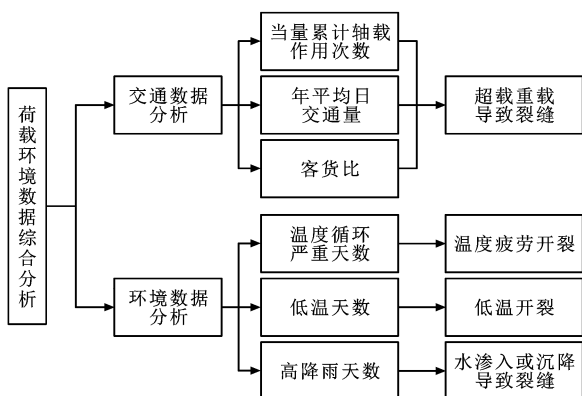


图10 环境数据综合分析

Fig. 10 Integrated analysis of environmental data

样引入3个指标,分别为温度循环严重天数、低温天数、高降雨天数,利用阈值,分别判定裂缝是否为温度疲劳开裂、低温开裂、水渗入或沉降导致裂缝。

4.4 靶区试验精细化诊断

如果上述分析尚不能够判断裂缝成因,则开展选择典型路段进行精细化的诊断,主要结合芯样与

现场试验来完成,流程如图11所示。在芯样试验中,包含对沥青混合料与无机结合料的试验,沥青混合料主要包括沥青回收试验、四点弯曲疲劳寿命试验、抽提试验,对混合料的沥青针入度、配合比、层间黏结状况、疲劳寿命、低温劲度这5个典型指标进行分析,判断沥青面层是否有沥青老化、级配不良、混合料层间黏结差、混合料抗疲劳性能差、抗低温性能差的问题。基层主要包括无侧限抗压强度试验和弯拉/劈裂疲劳试验。对无机结合料的无侧限抗压强度和疲劳寿命2个指标进行分析,判断其是否有抗缩裂或抗疲劳能力差的问题。同时结合弯沉等现场检测手段,对各结构层模量与厚度进行分析判定其是否存在结构层设计不合理的情况。

4.5 实例验证

以江苏省某段典型病害为横向裂缝的高速公路为例,对上述成因诊断框架进行验证和论述。

(1)路段基础信息调查。该路段检测数据显示,横向裂缝为主要病害类型,通过百米破损率筛选出

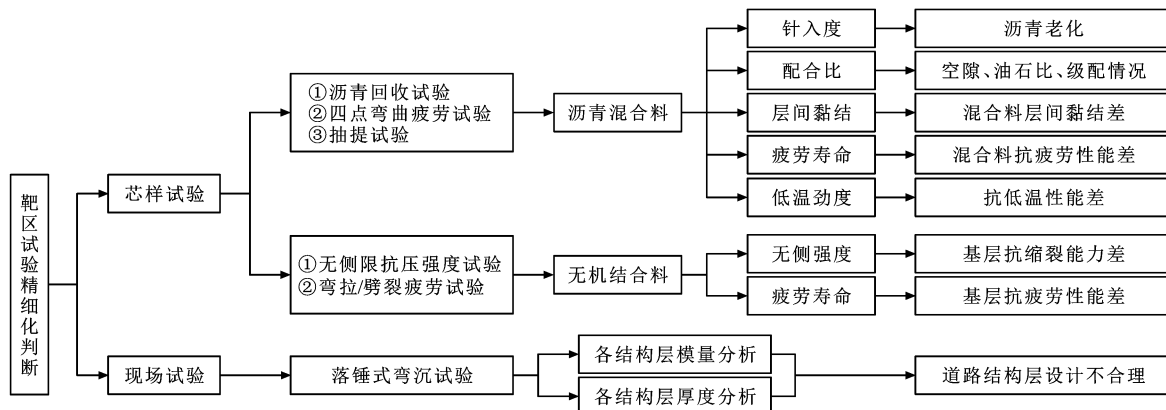


图11 靶区试验精细化诊断

Fig. 11 Refined diagnosis of target area tests

裂缝较为严重的段落并分析发现,大部分横向裂缝在路段范围内每隔一定间距连续出现,整体笔直度高,支缝数量少且连续程度高,初步判断这些横向裂缝大部分为反射裂缝。结合该段高速公路的 2021~2023 年历史养护数据进行分析发现,年养护裂缝密度以及道路技术状况几乎处于平稳状态,因此,暂时无法确定这些横缝是否为疲劳裂缝。

(2)特殊因素排除。该段高速公路位于苏南平原地区,地势相对平坦开阔,为架桥跨河而不存在沿河堤岸的路段,以及长大纵坡或急弯路段。裂缝产生位置不存在由于半填半挖处等路面沉降产生的裂缝,存在部分横向裂缝出现于桥头路堤处,为构造物横穿而导致横向裂缝产生。施工日志调查以及现场环境分析表明,调查路段不存在施工不当状况。

(3)荷载环境综合分析。该路段两轴六轮及以上车辆的年平均日交通量达到 20 920 辆,同时,当量设计累积轴载作用次数达到 6.71 亿次,均大于在本成因分析过程中所设定的指标阈值,由此可以推断重载、重交通量为该路段横向裂缝产生原因之一。通过中国气象数据网获取的当地当年气温数据表明,该地区气候温和湿润,温度循环严重天数(日温差大于 20°C)、低温天数(0°C 以下)、强降雨天数(24 h 内降雨量大于 150 mm),占比分别为 7.4%、9.3%、4.7%,均低于设定阈值,说明低温不是该段高速横向裂缝的主要产生原因。现场调查表明防水设施设计良好,水渗入不为横向裂缝产生原因。

(4)靶区试验精细化诊断。在该路段典型裂缝产生处取芯,进行沥青回收试验与水泥稳定碎石材料无侧限抗压强度试验,结果表明,部分芯样沥青混合料沥青针入度大于设定阈值,部分芯样无侧限抗压强度小于设定阈值,可以判断面层沥青老化是横向裂缝扩展的原因,而基层缩裂可能是横向裂缝的原因之一。大于阈值的芯样也存在基层开裂现象,由此可以说明基层的开裂导致了横向反射裂缝的产生,取芯芯样见图 12;基于现场落锤式弯沉仪试验进行路面结构成因诊断,路面结构强度与代表弯沉值符合路面结构强度要求,弯沉盆值符合路基承载力要求,反算路面结构层模量与厚度均小于所设阈值,与由此可以判断该段高速横向裂缝与路面结构性能无明显关联。

诊断结果表明,该路段沥青路面横向裂缝主要类型为自下而上反射裂缝,主要成因包括基层开裂,在重交通量和重载作用下导致裂缝反射至面层,同时沥青面层老化加剧了横向裂缝的扩展。极少部分



图 12 裂缝段芯样

Fig. 12 Core sample of cracked section

裂缝为接缝处裂缝或构造物横穿导致。

5 结 语

(1)横向裂缝分类与评价方法方面,现有评价方法不能全面反映裂缝对路面性能的影响程度,或者无法与裂缝成因建立联系。本文建立了基于成因机理的横向裂缝分类方法,可以为成因诊断提供依据,但是仅能完成定性的分类。随着路面检测技术的发展,可以获取更丰富、多元的裂缝评价指标,如何建立裂缝评价指标与成因的联系是未来值得探索的研究方向。在这一过程中,未来可能需要开发新的数据分析技术,尤其是在大数据和图像处理领域,以实现评价指标的自动提取与成因的精确匹配。这将为路面维护和修复提供更为科学的依据,提升整体养护效率。

(2)横向裂缝影响因素方面,本文从结构、材料、施工、荷载与环境以及其他特殊条件五方面,详细梳理了半刚性基层沥青路面横向裂缝的影响因素,构建了成因库,为构建横向裂缝成因诊断框架奠定了基础。但是,横向裂缝的形成往往是受到一种或多种因素共同作用产生的,需要结合实际情况甄别。未来的研究可以进一步细化各影响因素之间的相互作用机制,特别是通过模拟和实地试验验证各因素的组合效应。此外,开发针对特定路况的裂缝防治技术也将成为一个重要的研究方向。

(3)横向裂缝成因诊断方面,本文构建了半刚性基层沥青路面横向裂缝成因诊断框架,为实现科学养护处治决策提供了重要理论依据。未来需要进一步探索基于机器学习等人工智能方法的诊断算法,同时结合工程实际提高其可操作性。随着人工智能技术的快速发展,利用深度学习模型对大量路面裂缝数据进行训练,将有助于提高成因诊断的准确性

和效率。此外,如何将这些智能诊断工具有效整合到现有的路面管理系统中,确保在不同环境下的可操作性,也是未来研究的重要方向。

(4)实现沥青路面横向裂缝病害成因诊断与科学养护决策尚有许多工作需要完成,如何基于养护技术与成因的配伍性建立科学的决策方法,构建病害成因诊断与多层级养护决策一体化的智能算法,是未来的研究重点。此外,还需要考虑到经济性和可持续性,将成本效益分析与决策模型相结合,确保在资源有限的情况下实现最佳养护效果。同时,推动这些研究成果的工程应用和实践反馈,将有助于不断完善和优化相关算法和决策框架。

参考文献:

References:

- [1] 沙爱民,胡力群.半刚性基层材料的结构特征[J].中国公路学报,2008,21(4):1-5,42.
SHA Ai-min, HU Li-qun. Structural characteristics of semi-rigid base course material[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 1-5, 42.
- [2] 沙爱民.半刚性基层的材料特性[J].中国公路学报,2008,21(1):1-5.
SHA Ai-min. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5.
- [3] ZHAO M H, XU X N, LIU Y, et al. Microcracking treatment mechanism of semi-rigid base asphalt pavement with discrete-continuous coupling simulation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02850.
- [4] 王宏畅,黄晓明,傅智.半刚性基层表面裂缝影响因素[J].交通运输工程学报,2005,5(2):38-41.
WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming, FU Zhi. Influence factors on surface crack of semi-rigid base course[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 38-41.
- [5] YI Y, JIANG Y J, TIAN T, et al. Investigation of indoor and field tests on asphalt pavement with inverted asphalt layers based on the vertical vibration compaction method[J]. Journal of Road Engineering, 2024, 4(4): 478-489.
- [6] HU Z G, ZHANG W G, PENG T Y. Transverse crack patterns of long-term field asphalt pavement constructed with semi-rigid base[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2024, 17(2): 353-365.
- [7] 马建,赵祥模,贺拴海,等.路面检测技术综述[J].交通运输工程学报,2017,17(5):121-137.
MA Jian, ZHAO Xiang-mo, HE Shuan-hai, et al. Review of pavement detection technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 121-137.
- [8] YIN Y. Disease characteristics and maintenance technology of highway subgrade and pavement[J]. Journal of Architectural Research and Development, 2022, 6(3): 54-60.
- [9] 周岚.高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D].南京:东南大学,2015.
ZHOU Lan. Research of performance evaluation and prediction method of asphalt pavements for highway[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [10] ZHU J, BIAN L, DING T T. Study on method and decision making model for preventive maintenance planning of asphalt pavement[C]//CICTP. Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals. New York: ASCE, 2019: 740-750.
- [11] ADLINGE S S, GUPTA A K. Pavement deterioration and its causes[J]. International Journal of Innovative Research and Development, 2013, 2(4): 437-450.
- [12] SHAHIN M Y. Pavement management for airports, roads, and parking lots[M]. New York: Springer US, 2005.
- [13] ZHANG J L, MA T, CHEN S Y, et al. Evaluation of the shrinkage crack resistance of cement-stabilized aggregate by predicting the crack spacing[J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, 25(2): 291-307.
- [14] LYTTON R L, TSAI F L, LEE S I, et al. Models for predicting reflection cracking of hot-mix asphalt overlays[M]. Washington DC: TRB, 2010.
- [15] ZHOU L, NI F J, ZHAO Y J. Evaluation method for transverse cracking in asphalt pavements on freeways[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2153(1): 97-105.
- [16] 卢洁.江苏省高速公路沥青路面开裂特性研究[D].南京:东南大学,2017.
LU Jie. Research on the cracking characteristics of expressway asphalt pavement in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [17] XING M M, YANG H W, ZHAO Z G, et al. Effect of asphalt pavement base layers on transverse shrinkage cracking characteristics[J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7178.
- [18] KHAFAJEH R, SHAMSAEI M, TEHRANI H G, et al. Proposing load transfer efficiency as criterion for repairing longitudinal and transverse cracks of asphalt pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2021, 147(3): 06021002.
- [19] YANG Q, ZHOU S S. Identification of asphalt pavement transverse cracking based on vehicle vibration signal analysis[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(8): 1780-1798.
- [20] YAN G N, WANG L B, YE Z J, et al. Effects of crack damage on acceleration response of asphalt pavement via numerical analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(7): 04020163.
- [21] 肖满哲,汪林,成豪杰,等.基于弯沉盆几何形态指标的沥青路面裂缝病害定量表征研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(6):1085-1089.
XIAO Man-zhe, WANG Lin, CHENG Hao-jie, et al. Research on quantitative characterization of asphalt pavement cracks based on geometric index of deflection basin[J].

- Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2022, 46(6): 1085-1089.
- [22] IBRAGIMOV E, KIM Y, LEE J H, et al. Automated pavement condition index assessment with deep learning and image analysis: an end-to-end approach[J]. *Sensors*, 2024, 24(7): 2333.
- [23] OLIVEIRA H, CORREIA P L. CrackIT: an image processing toolbox for crack detection and characterization[C]//IEEE. Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). New York: IEEE, 2014: 798-802.
- [24] SHI Y, CUI L M, QI Z Q, et al. Automatic road crack detection using random structured forests[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(12): 3434-3445.
- [25] PAN Z H, GUAN J C, YANG X, et al. One-stage 3D profile-based pavement crack detection and quantification[J]. *Automation in Construction*, 2023, 153: 104946.
- [26] QIU S, WANG W J, WANG S F, et al. Methodology for accurate AASHTO PP67-10-based cracking quantification using 1-mm 3D pavement images[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(2): 04016056.
- [27] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(1): 18-23.
- XIE He-ping. Fractal description of rock joints[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(1): 18-23.
- [28] 陈世江, 朱万成, 张敏思, 等. 基于数字图像处理技术的岩石节理分形描述[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(11): 2087-2092.
- CHEN Shi-jiang, ZHU Wan-cheng, ZHANG Min-si, et al. Fractal description of rock joints based on digital image processing technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(11): 2087-2092.
- [29] CAO T, WANG W X, TIGHE S, et al. Crack image detection based on fractional differential and fractal dimension[J]. *IET Computer Vision*, 2019, 13(1): 79-85.
- [30] WALUBITA L F, FUENTES L, LEE S I, et al. Correlations and preliminary validation of the laboratory monotonic overlay test (OT) data to reflective cracking performance of in-service field highway sections[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 121029.
- [31] XIE P Y, WANG H. Finite element analysis of thermal-induced reflective cracking in composite pavement with mitigation strategies[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 266: 108396.
- [32] BENNETT T, MAHER A. Field and laboratory evaluation of a reflective crack interlayer in new jersey [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, 2084(2084): 114-123.
- [33] 王华城, 吴海林, 吴强, 等. 基于现场实测数据的高速公路裂缝形态特征及开裂模式研究[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(12): 28-34, 41.
- WANG Hua-cheng, WU Hai-lin, WU Qiang, et al. Study on morphological characteristics and cracking mode of expressway crack based on field measured data[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(12): 28-34, 41.
- [34] 王旭东, 张蕾, 周兴业, 等. RIOHTRACK 足尺路面试验环道 2017 年试验研究概况[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(4): 1-13.
- WANG Xu-dong, ZHANG Lei, ZHOU Xing-ye, et al. Review of researches of RIOHTRACK in 2017[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(4): 1-13.
- [35] SHI S, TONG J S, ZHANG Y, et al. Numerical analysis of the initiation cause of the surface transverse cracks in semirigid asphalt pavement[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2023, 149(4): 04023030.
- [36] 沙庆林. 两种机理的“反射”裂缝[J]. *公路交通科技*, 1993, 10(3): 1-7.
- SHA Qing-lin. The reflective cracking of two kinds mechanism[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 1993, 10(3): 1-7.
- [37] LUO H, ZHU H P, MIAO Y, et al. Simulation of top-down crack propagation in asphalt pavements [J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2010, 11(3): 223-230.
- [38] NIE D, WANG S X, SUN P X, et al. Study on anti-crack effect of semi-rigid base pavement with stress absorbing layer[J]. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2023, 70(1): 45.
- [39] ALIHA M R M, ZIARI H, SOBHANI FARD E, et al. Heterogeneity effect on fracture parameters of a multilayer asphalt pavement structure containing a top-down crack and subjected to moving traffic loading[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2021, 44(5): 1349-1371.
- [40] XIAO M M, FAN L. Analysis of the extension behavior of reflective cracks in asphalt pavements based on dry shrinkage property[J]. *SN Applied Sciences*, 2022, 4(4): 88.
- [41] JIANG X, GABRIELSON J, HUANG B S, et al. Evaluation of inverted pavement by structural condition indicators from falling weight deflectometer[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 319: 125991.
- [42] SEBAALY P, TABATABAEE N, BONAQUIST R, et al. Evaluating structural damage of flexible pavements using cracking and falling weight deflectometer data[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1989, 1227: 115-127.
- [43] CHEN D H. Pavement distress under accelerated trafficking[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 1639(1): 120-129.
- [44] 金辰. 基于路面开裂状况的薄沥青路面半刚性基层模量评估[J]. *公路工程*, 2022, 47(2): 97-102.
- JIN Chen. Modulus evaluation of semi-rigid base of thin asphalt pavement based on pavement cracking[J]. *Highway Engineering*, 2022, 47(2): 97-102.
- [45] BODIN D, CHUPIN O, DENNEMAN E. Effect of temperature and traffic speed on the asphalt moduli for fatigue cracking and pavement structural design considerations[C]//Springer.

- 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. Berlin: Springer, 2016: 397-402.
- [46] WANG H Z, WU Y, YANG J, et al. Numerical simulation on reflective cracking behavior of asphalt pavement[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7990.
- [47] WANG H, LIM Y, SZARY P, et al. Structural assessment of asphalt pavement condition using backcalculated modulus and field data [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 943-951.
- [48] ADHIKARI S, SHEN S H, YOU Z P. Evaluation of fatigue models of hot-mix asphalt through laboratory testing[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2127(1): 36-42.
- [49] 单超,郑传峰,杨雪,等.半刚性基层沥青路面反射裂缝形成试验及扩展机理研究[J].路基工程,2021(6):69-74.
SHAN Chao, ZHENG Chuan-feng, YANG Xue, et al. Test study on formation of reflection crack in semi-rigid base asphalt pavement and the crack expanding mechanism[J]. Subgrade Engineering, 2021(6): 69-74.
- [50] GAO Y Y. Theoretical analysis of reflective cracking in asphalt pavement with semi-rigid base[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2019, 43(1): 149-157.
- [51] FILHO W U, GUTIÉRREZ KLINSKY L M, MOTTA R, et al. Cold recycled asphalt mixture using 100% RAP with emulsified asphalt-recycling agent as a new pavement base course[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1): 5863458.
- [52] ALAYE Q E A, LING X Z, DONG Z J, et al. Evaluation of mixture performance recycled asphalt pavement materials as base layer with or without rejuvenator into the asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2020, 35(3): 579-597.
- [53] ALAE M, ZHAO Y Q, ZAREI S, et al. Effects of layer interface conditions on top-down fatigue cracking of asphalt pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(3): 280-288.
- [54] GARCÍA I G, CARTER B J, INGRAFFEA A R, et al. A numerical study of transverse cracking in cross-ply laminates by 3D finite fracture mechanics [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 95: 475-487.
- [55] WANG X Y, ZHONG Y. Influence of tack coat on reflective cracking propagation in semi-rigid base asphalt pavement[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 213: 172-181.
- [56] OREŠKOVIĆ M, SANTOS J, MLADENović G, et al. The feasibility of using copper slag in asphalt mixtures for base and surface layers based on laboratory results [J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131285.
- [57] ZHANG H P, ZHANG H, DING H B, et al. Determining the sustainable component of wax-based warm mix additives for improving the cracking resistance of asphalt binders[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(44): 15016-15026.
- [58] JAIN S, SINGH B. Cold mix asphalt: an overview[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124378.
- [59] 刘涛,郝培文.沥青混合料低温抗裂性评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2002,30(12):1468-1471.
LIU Tao, HAO Pei-wen. Comparison study of evaluation method for low temperature anti-cracking performance of hot mix asphalt [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(12): 1468-1471.
- [60] ZHU J Q, SARGAND S, GREEN R, et al. Performance assessment of unbonded concrete overlays of concrete pavements in Ohio: a forensic practice [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(4): 04020050.
- [61] 王淋,郭乃胜,温彦凯,等.几种改性沥青疲劳破坏评价指标及性能研究[J].土木工程学报,2020,53(1):118-128.
WANG Lin, GUO NAI-sheng, WEN Yan-kai, et al. Study on fatigue damage evaluation indexes and properties of several improved asphalts[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 118-128.
- [62] LAVIN P. Asphalt Pavements: a Practical Guide to Design, Production, and Maintenance for Engineers and Architects[M]. New York: Taylor & Francis, 2011: 132-138.
- [63] 耿韩,李立寒,张磊,等.高模量沥青低温抗裂性能的评价指标[J].建筑材料学报,2018,21(1):98-103.
GENG Han, LI Li-han, ZHANG Lei, et al. Indicators for low temperature cracking resistance of high modulus asphalt binders[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1): 98-103.
- [64] LI L M, GUO Z Y, RAN L F, et al. Study on low-temperature cracking performance of asphalt under heat and light together conditions[J]. Materials, 2020, 13(7): 1541.
- [65] HAJJ R, BHASIN A. The search for a measure of fatigue cracking in asphalt binders-a review of different approaches[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(3): 205-219.
- [66] LIU W Y, YAN K Z, LI J Q, et al. Peridynamics-based simulation of semi-circular bending (SCB) testing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121190.
- [67] XIA X, HAN D D, ZHAO Y L, et al. Investigation of asphalt pavement crack propagation based on micromechanical finite element: a case study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02247.
- [68] MUSHOTA C, MWALE M C, MTEMBO G, et al. Reflective cracking on cement treated base (CTB) pavements in Zambia: an analytical study[C]//ASCE. Application of Nanotechnology in Pavements, Geological Disasters, and Foundation Settlement Control Technology. New York: ASCE, 2014: 62-69.
- [69] CUI P D, XIAO Y, YAN B X Z, et al. Morphological characteristics of aggregates and their influence on the performance of asphalt mixture[J]. Construction and

- Building Materials, 2018, 186: 303-312.
- [70] WANG H, LIN E Q, XU G J. Molecular dynamics simulation of asphalt-aggregate interface adhesion strength with moisture effect[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(5): 414-423.
- [71] XIONG H Z, ZHANG J, XIAO Z Y, et al. Micro-structural behavior and macro-experimental analysis of asphalt mixture cracking at low temperature based on molecular simulation[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2025, 18(2): 528-541.
- [72] GONG M Y, SUN Y R, CHEN J Y. Influence of mesoscopic structural characteristics of asphalt mixture on damage behavior of asphalt pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2023, 149(2): 04023007.
- [73] CONG L, SHI J C, WANG T J, et al. A method to evaluate the segregation of compacted asphalt pavement by processing the images of paved asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 622-629.
- [74] SHEN J. On issues of homogeneity and separation of bitumen mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(6): 20-24.
- [75] CHEN X, AI C F, DU J H, et al. Effect of gradation segregation on low-temperature crack resistance of asphalt pavement using 3D DEM[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 122060.
- [76] TANG J Y, FU Y Q, MA T, et al. Investigation on low-temperature cracking characteristics of asphalt mixtures; a virtual thermal stress restrained specimen test approach[J]. Construction and Building Materials, 2022, 347: 128541.
- [77] ZHANG J P, TAN H Q, PEI J Z, et al. Evaluating crack resistance of asphalt mixture based on essential fracture energy and fracture toughness[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(4): 06019005.
- [78] 张争奇, 张卫平, 李 平. 沥青混合料粉胶比[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(5): 7-10.
ZHANG Zheng-qi, ZHANG Wei-ping, LI Ping. Ratio of filler bitumen of asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(5): 7-10.
- [79] 申爱琴, 蒋庆华. 沥青混合料低温抗裂性能评价及影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(5): 1-6.
SHEN Ai-qin, JIANG Qing-hua. Influencing factor and appraising on anti-cracking of asphalt mixture at low temperature[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(5): 1-6.
- [80] LI P F, LIU J H, HUANG H P, et al. Application of pre-cracking in semi-rigid base to mitigate reflective cracking[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030/1031/1032: 709-713.
- [81] 胡霞光, 王秉纲. 青藏公路路基路面管理系统研究[J]. 重庆交通大学学报, 2002, 21(2): 33-37, 53.
HU Xia-guang, WANG Bing-gang. Research on Qinghai-Tibet highway subgrade pavement management system[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2002, 21(2): 33-37, 53.
- [82] 何兆益, 刘清泉, 黄维蓉, 等. 稳定页岩土基层的温缩特性研究[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(5): 43-47.
HE Zhao-yi, LIU Qing-quan, HUANG Wei-rong, et al. The research on temperature shrinking property of stabilized shale soil used as pavement base[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(5): 43-47.
- [83] YU L T, XIE J, LI R, et al. Study on the performance of emulsified asphalt recycled subgrade based on the evaluation of semi-rigid milling material[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126614.
- [84] CHENG P F, ZHOU X P, HOU E C. Experimental research about shrinkage of cement stabilized gravel base[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 409-412.
- [85] CHEN J C, LI H Z, ZHAO Z H, et al. Investigation of transverse crack spacing in an asphalt pavement with a semi-rigid base[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 18079.
- [86] DING X H, LIU F T, HUANG F Y, et al. Micro-scale investigation on aggregate skeleton behavior of asphalt mixture: Mechanism and monitoring[J]. Construction and Building Materials, 2024, 437: 137062.
- [87] DONG Q, CHEN X Q, GAO Y, et al. Civil Engineering Materials for Transportation Infrastructure[M]. Singapore: Springer Singapore, 2023: 135-172.
- [88] 贾 亮, 连尚承. 石灰-粉煤灰-水泥稳定碎石的力学性能试验[J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49(2): 125-129.
JIA Liang, LIAN Shang-cheng. Experimental study on the mechanical properties of lime-fly ash-cement stabilized macadam[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2023, 49(2): 125-129.
- [89] YAN P F, MA Z G, LI H B, et al. Evaluation of the shrinkage properties and crack resistance performance of cement-stabilized pure coal-based solid wastes as pavement base materials[J]. Construction and Building Materials, 2024, 421: 135680.
- [90] HU L Q, SHA A M. Research on influence factor in semi-rigid base course material temperature shrinkage coefficient test using strain gauge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2007, 2(2): 12-15.
- [91] ZHANG J L, ZHANG Y, MA T. Distinctive mechanism and model for whole-life ratcheting of cement-stabilized aggregates in tensile fatigue tests[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 88: 109182.
- [92] 周 浩, 沙爱民, 胡力群. 半刚性基层材料疲劳试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(3): 6-10.
ZHOU Hao, SHA Ai-min, HU Li-qun. Test on fatigue property of semi-rigid base material[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(3): 6-10.
- [93] LYU S T, WANG P, FAN X Y, et al. Normalized comparative study on fatigue characteristics of different pavement

- materials[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121907.
- [94] MILLIEN A, DRAGOMIR M L, WENDLING L, et al. Geogrid interlayer performance in pavements: tensile-bending test for crack propagation[C]//Springer. Proceedings of 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Berlin: Springer, 2012: 1209-1218.
- [95] ASSOGBA O C, TAN Y Q, SUN Z Q, et al. Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(3): 572-602.
- [96] AMERI M, MANSOURIAN A, HEIDARY KHAVAS M, et al. Cracked asphalt pavement under traffic loading—a 3D finite element analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(8): 1817-1826.
- [97] ZHANG J, CAO D D, ZHANG J X. Three-dimensional modelling and analysis of fracture characteristics of overlaid asphalt pavement with initial crack under temperature and traffic loading [J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130306.
- [98] WU Y, XUE J Y, YU Y H, et al. Research of reflective crack in asphalt pavement using SCB specimen and XFEM; from laboratory test to numerical simulation[J]. Construction and Building Materials, 2023, 406: 133419.
- [99] LIU F M, ZHANG L M, SUN H Y. Analysis on mechanical behavior of typical asphalt pavement structure based on the tire load effect[J]. Forest Chemicals Review, 2021, 338-344.
- [100] SHI Z C, YUE J C, XU L L, et al. Peridynamics for fracture analysis of reflective cracks in semi-rigid base asphalt pavement[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3486.
- [101] ALIHA M R M, SARBIJAN M J. Effects of loading, geometry and material properties on fracture parameters of a pavement containing top-down and bottom-up cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 166: 182-197.
- [102] SUN Y R, DU C, ZHOU C H, et al. Analysis of load-induced top-down cracking initiation in asphalt pavements using a two-dimensional microstructure-based multiscale finite element method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 216: 106497.
- [103] SUN Y R, ZHANG Z, GONG H R, et al. 3D Multiscale modeling of asphalt pavement responses under coupled temperature-stress fields[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022, 148(3): 04022010.
- [104] DONG P J, YUAN Y, CAO X J. Numerical investigation of dynamic stresses in asphalt pavement under the combined action of temperature, moisture and traffic loading [J]. Construction and Building Materials, 2024, 417: 135131.
- [105] IDRIS II, SADEK H, HASSAN M. State-of-the-art review of the evaluation of asphalt mixtures' resistance to reflective cracking in laboratory [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 03120004.
- [106] WANG Z P, ZHU J Q, MA T. Review on monitoring of pavement subgrade settlement: influencing factor, measurement and advancement [J]. Measurement, 2024, 237: 115225.
- [107] SHEN S H, ZHANG W G, WU S H, et al. Long-term field performance of flexible pavements using warm mix asphalt technologies[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2018, 87: 163-198.
- [108] ZHANG W G, SHEN S H, WU S H, et al. Long-term field aging of warm-mix and hot-mix asphalt binders [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2632(1): 140-149.
- [109] CHEN J S, LIN K Y, YOUNG S Y. Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(3): 276-282.
- [110] ALI OMAR H, YUSOFF N I M, MUBARAKI M, et al. Effects of moisture damage on asphalt mixtures[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(5): 600-628.
- [111] NOBAKHT M, ZHANG D R, SAKHAEIFAR M S, et al. Characterization of the adhesive and cohesive moisture damage for asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118616.
- [112] WANG N, CHEN F, MA T, et al. Compaction performance of cold recycled asphalt mixture using SmartRock sensor [J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104377.
- [113] 尹 冉. 水泥稳定碎石半刚性基层施工与质量控制技术研究[D]. 西安:长安大学, 2007.
- YIN Ran. Study on construction and quality control technologies of cement stabilized macadam of semi-rigid base course[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [114] 姚佳良, 袁剑波, 张起森, 等. 蜡制养护剂的隔离机理与效果研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 47-52.
- YAO Jia-liang, YUAN Jian-bo, ZHANG Qi-sen, et al. Research on mechanism of using emulsion wax curing agent as separation layer and its effectiveness[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 47-52.
- [115] MAJARREZ F P. Semi-rigid pavement performance and construction techniques for semiarid areas[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(3): 615-637.
- [116] SANGPETNGAM B, BIRGISSON B, ROQUE R. Multilayer boundary-element method for evaluating top-down cracking in hot-mix asphalt pavements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1896(1): 129-137.
- [117] YENER E, HINISLIOGLU S. Effects of exposure time and temperature in aging test on asphalt binder properties[J]. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2014, 5(2): 112.
- [118] 岳 阳. 厂拌热再生沥青混合料低温性能研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- YUE Yang. Study on low temperature performance of plant-

- mixed heat recycled asphalt mixture[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [119] 艾长发, 邝习东, 陈 炯, 等. 低温压实对沥青混合料路用性能的影响[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 6-10.
- AI Chang-fa, KUANG Xi-dong, CHEN Jiong, et al. Influence of compaction in low temperature on asphalt mixture performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 6-10.
- [120] YANG Q G, NING J C, YANG Y F, et al. Study on the treatment of cracks in the base course of coastal expressways based on the principle of fracture mechanics[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 110: 29-33.
- [121] ESMAEILI R, JAVADI S, JAMSHIDI H, et al. Stripping propensity detection of HMA mixes: with focus on image processing method[J]. Construction and Building Materials, 2022, 352: 129022.
- [122] WANG S Q, ZHU Z H, MA T, et al. Asphalt concrete characterization using digital image correlation: a systematic review of best practices, applications, and future vision[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2024, 52(4): 2589-2623.
- [123] 罗志刚, 周志刚, 郑健龙. 沥青路面水损害问题研究现状[J]. 长沙交通学院学报, 2003, 19(3): 39-44.
- LUO Zhi-gang, ZHOU Zhi-gang, ZHENG Jian-long. Present situation of moisture damage study of asphalt pavement[J]. Journal of Changsha Communications University, 2003, 19(3): 39-44.
- [124] 王端宜, 邹桂莲, 韩传岱. 对沥青路面水损害早期破坏的认识[J]. 东北公路, 2001, 24(1): 23-25.
- WANG Duan-yi, ZOU Gui-lian, HAN Chuan-dai. Early realization for water damage of asphalt pavement [J]. Northeastern Highway, 2001, 24(1): 23-25.
- [125] SYBILSKI D, BAŃKOWSKI W, SUDYKA J, et al. Reasons of premature cracking pavement deterioration-a case study[C]//Springer. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Berlin: Springer, 2012: 1029-1038.
- [126] LI S, SUN Y, XU L K, et al. Asphalt layer cracking behavior and thickness control of continuously reinforced concrete and asphalt concrete composite pavement [J]. Buildings, 2022, 12(8): 1138.
- [127] PEDUTO D, GIANGRECO C, VENMANS A A M. Differential settlements affecting transition zones between bridges and road embankments on soft soils: numerical analysis of maintenance scenarios by multi-source monitoring data assimilation[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 24: 100369.
- [128] 张绍阳, 马玉兰, 王选仓. 基于关联分析的路面病害成因确定方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 98-103.
- ZHANG Shao-yang, MA Yu-lan, WANG Xuan-cang. Genesis judgement method of pavement disease by association analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 98-103.
- [129] 曹 磊, 徐 磊, 杨 菲, 等. 基于关联规则挖掘的路面损坏状况影响因素分析[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(1): 186-193.
- CAO Lei, XU Lei, YANG Fei, et al. Influencing factors analysis of pavement damage based on mining association rules[J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(1): 186-193.