

水泥稳定碎石基层裂缝成因分析与控制技术优化研究

关沛东

广东省高速公路有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120064

摘要： 水泥稳定碎石基层在公路工程中应用广泛，其裂缝问题对结构耐久性和使用性能形成长期影响，围绕基层裂缝频发且控制效果不稳定的工程现状，本文以裂缝成因识别和控制技术优化为研究目的，围绕裂缝类型及关键影响因素展开系统分析，并在材料设计和施工工艺及养生控制层面提出针对性优化思路。研究结果表明材料收缩特性及环境作用是裂缝产生的主导因素，优化配合比参数和施工控制措施可降低裂缝发生概率，相关研究为水泥稳定碎石基层裂缝防控提供技术依据，对提升路面结构整体耐久性具有现实意义。

关键词： 水泥稳定碎石基层；裂缝成因；控制技术；施工优化

Analysis of the Causes of Cracks in Cement-Stabilized Crushed Stone Base and Optimization of Control Technology

Guan Peidong

Guangdong Provincial Expressway Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Cement-stabilized crushed stone base is widely used in highway engineering. The crack problem in it has a long-term impact on the durability and service performance of the structure. In view of the current engineering situation where cracks occur frequently in the base and the control effect is unstable, this paper takes the identification of crack causes and the optimization of control technology as the research purpose, and conducts a systematic analysis around crack types and key influencing factors. And put forward targeted optimization ideas in terms of material design, construction technology and curing control. The research results show that the material shrinkage characteristics and environmental effects are the dominant factors for crack generation. Optimizing the mix proportion parameters and construction control measures can reduce the probability of crack occurrence. The relevant research provides a technical basis for the prevention and control of cracks in cement-stabilized crushed stone base layers and has practical significance for improving the overall durability of pavement structures.

Keywords : cement-stabilized crushed stone base; causes of cracks; control technology; construction optimization

引言

水泥稳定碎石基层作为半刚性基层结构，在我国公路工程中占据重要地位，其整体性强及承载能力高的特点使其得到广泛应用，但裂缝问题始终是制约结构服役性能的关键因素，基层裂缝一旦产生易在行车荷载和环境作用下向上反射，削弱面层结构完整性并缩短路面使用寿命。现有工程实践表明裂缝的产生不仅与材料组成和力学性能密切相关，还受施工过程控制水平及外界温湿条件影响，现有研究多侧重单一因素分析且缺乏对裂缝成因链条的系统梳理，相关控制技术在工程适应性方面仍存在不足，基于此围绕水泥稳定碎石基层裂缝问题开展成因分析与控制技术优化研究，对于完善基层结构设计理论和提升施工质量控制水平具有重要工程价值。

一、裂缝类型识别与问题特征界定

(一) 典型裂缝形态分类与判别要点

水泥稳定碎石基层裂缝在宏观形态上具有较强的工程指向性，不同裂缝形态反映了材料性能与施工状态的差异，按照裂缝走向与分布特征可将其归纳为横向裂缝、纵向裂缝以及网状裂缝

等基本类型，横向裂缝多与温度收缩及干缩变形有关，裂缝走向与道路中线近似垂直，常在基层全幅或局部范围内连续出现，裂缝宽度一般处于0.2~0.6 mm区间，边缘形态较为清晰，若裂缝间距趋于规则，表明收缩变形受到结构约束条件控制。纵向裂缝多沿行车方向分布，常出现在车道拼接位置或轮迹带附近，其形成与压实均匀性差异以及含水状态变化密切相关，裂缝宽度多小

于横向裂缝但延伸长度较大^[1]。网状裂缝表现为多边形闭合或半闭合形态，单元尺度通常在1~4 m范围内，裂缝数量密集且宽度较小，常见于基层表层浆体偏多或早期失水较快的区域。裂缝判别需结合裂缝走向、宽度变化以及与施工缝和结构边界的空间关系，避免仅依据表观形态进行单一判断，从而为成因分析提供可靠基础^[2]。

(二) 裂缝时空分布规律与发展阶段划分

水泥稳定碎石基层裂缝在时间与空间维度上均呈现出一定规律性，其分布特征与结构受力环境和施工组织密切相关，时间尺度上裂缝多在基层成型后的早期阶段显现，常见于养生期内3~10 d范围，初期以微细裂纹形式出现，随材料收缩与强度演化逐步发展，进入稳定阶段后裂缝数量趋于平缓。若裂缝在养生结束后仍持续出现，说明基层内部应力释放过程尚未完成且存在潜在结构风险，空间尺度上裂缝易在约束条件突变区域集中分布，如路肩附近、中央分隔带边缘以及新旧结构衔接位置，横断面方向上裂缝密度存在明显差异。基于裂缝形态与扩展特征，可将其发展过程划分为萌生阶段、扩展阶段与贯通阶段。萌生阶段裂缝宽度多小于0.3 mm，对整体结构影响有限；扩展阶段裂缝长度和宽度均有所增长，裂缝间距逐渐稳定，常见3~7 m的重复分布特征；贯通阶段裂缝由表层向下延伸并与基层底部弱区连通，结构连续性明显削弱，该阶段划分有助于将裂缝现象与施工节点及环境条件相对应，为控制措施的时机选择提供依据^[3]。

(三) 裂缝对结构承载与耐久性的影响路径

水泥稳定碎石基层裂缝对结构性能的影响呈现出由局部缺陷向整体退化扩展的特征，其作用路径涵盖力学响应变化与耐久性能衰减两个层面，在承载性能方面裂缝使原本连续的基层结构发生分割，轮载作用下裂缝尖端区域产生明显应力集中，基层受力模式由整体受力转变为局部受力，结构等效刚度逐步降低，面层弯拉应变随之增大。重复荷载作用下裂缝端部易发生微滑移并诱发二次裂缝，承载能力衰减呈累积趋势。在耐久性能方面，裂缝为水分进入基层内部提供通道，雨水沿裂缝渗入后改变基层与下承层的界面状态，干湿循环作用下裂缝反复张开与闭合，加速材料微结构松弛与界面劣化，温度变化进一步放大裂缝开合幅度。经过1~2个季节循环后，裂缝影响逐步向面层传递，反射裂缝风险显著上升^[4]。

二、裂缝成因机理分析与关键因素量化

(一) 材料因素对收缩与强度演化的作用机制

水泥稳定碎石基层的材料组成直接决定其收缩特性与强度演化路径，进而影响裂缝形成的内在驱动力，水泥用量与矿料级配共同控制水化产物生成速率和骨架结构稳定性，水泥掺量偏高时水化放热集中且早期强度增长较快，收缩应变在短时间内迅速累积，易在基层表层形成拉应力集中区。粒径组成不合理或细集料比例偏大时，骨架间嵌挤作用减弱，浆体连续性增强，干缩与温缩变形更易整体释放，裂缝形态趋于贯通。含水状态同样是影响收缩行为的重要参数，拌和含水量偏离最佳含水量1%~2%时，

水化反应与体积稳定性失衡，基层内部出现不均匀收缩区，形成潜在裂缝源。强度演化方面，早期强度增长与后期强度稳定之间存在时间差，当收缩发展速度超过强度形成速度时，基层抗拉能力不足以抵消内生拉应力，裂缝更易在养生阶段出现，材料因素在裂缝成因中表现为“收缩驱动与强度滞后”的耦合效应，是裂缝形成的基础条件。

(二) 施工因素对压实均匀与界面薄弱的诱发机理

施工过程对水泥稳定碎石基层结构完整性具有决定性影响，压实均匀性和层间界面状态是裂缝产生的主要外在诱因，摊铺与碾压过程中设备行走轨迹和碾压遍数分布不均易造成局部密实度差异，基层内部形成强弱相间的结构单元，强区与弱区在收缩和荷载作用下变形协调性降低，裂缝多沿弱区集中发展。压实不足区域孔隙连通性增强，水分迁移更为活跃，干湿变形幅度增大，而过度压实区域则易产生表层密实内层松散的状态，形成潜在剪切滑移面。施工缝和搭接带是界面薄弱的高发位置，若搭接宽度控制不足或新旧料结合时间间隔过长，界面结合强度明显低于主体结构，在温缩与干缩作用下界面拉应力集中，裂缝沿界面走向扩展。基层厚度变化同样影响受力连续性，当局部厚度偏离设计值2~3 cm时，应力分布发生突变，裂缝更易在厚度突变区出现。施工因素依靠改变结构均匀性与界面完整性，为裂缝提供了清晰的发展路径^[5]。

(三) 环境与荷载因素对温湿应力集中的驱动机理

在高速公路水泥稳定碎石基层中，环境条件与交通荷载主要通过诱发温度应力和干缩应力，对基层结构稳定性产生影响。温度变化是基层产生附加应力的重要外部因素，昼夜及季节温差作用下，基层表层与内部温度变化不同步，形成温度梯度，当降温阶段基层自由收缩受到下承层及周边结构约束时，内部产生拉应力，若该拉应力超过材料早期抗拉能力，易诱发裂缝萌生。与此同时，环境干燥条件会加快基层表层水分蒸发速度，表层收缩幅度大于内部，形成不均匀干缩变形，在结构约束作用下进一步叠加拉应力。降雨或环境湿度变化虽可短期补充水分，但反复干湿交替会导致体积变形循环，加剧应力反复作用。交通荷载主要表现为重复动荷载作用，其本身并不直接引起裂缝，但在温度应力和干缩应力已存在的条件下，会加速应力重分布与微隙隙扩展过程，使潜在缺陷逐步演化为可观测裂缝。因此，环境因素与交通荷载并非独立致裂因素，而是通过放大温度与干缩应力效应，共同影响基层裂缝风险的发展^[6]。

(四) 结构约束条件对裂缝起裂位置与扩展方向的影响机理

水泥稳定碎石基层处于多向约束环境中，其裂缝起裂位置与扩展方向受结构边界条件和层间协同作用影响，基层与路基之间的摩阻约束限制自由收缩变形，收缩应变在平面内被转化为拉应力，当约束强度沿横断面或纵向方向分布不均时，拉应力集中区更易形成起裂源，路幅边缘与中央分隔带附近因侧向约束条件差异，横向裂缝多在距边缘0.5~1.0 m范围内出现，并沿约束较弱方向扩展。层间结构方面，基层与下承层刚度差异会改变应力传递路径，当下承层刚度偏低或界面结合不足时，基层底部产生附加弯拉应力，裂缝起裂位置易由表层向中下部转移。厚度变化和

结构台阶同样改变局部约束状态，当基层厚度变化超过2 cm时，应力重新分布引导裂缝沿厚度突变线延伸，结构约束条件并不直接产生裂缝，而是依靠限制变形释放方式，控制裂缝的空间位置与扩展走向，对裂缝形态和危害程度产生决定性影响^[7]。

三、控制技术优化与工程应用验证

(一) 配合比与外加剂参数的收缩控制优化

水泥稳定碎石基层裂缝控制的核心在于降低材料体系的内生收缩驱动力并协调强度增长节奏，配合比设计与外加剂参数调整是实现该目标的关键技术路径，在配合比层面控制水泥用量处于合理区间有助于减缓水化放热集中程度，工程实践表明当水泥用量控制在4.0%~4.5%范围内时，基层早期收缩变形趋于平缓且强度发展更为稳定^[8]。级配结构方面，采用连续级配并适度降低细集料比例，可增强粗集料骨架嵌挤作用，削弱浆体连续性，从结构层面限制收缩变形的整体释放。外加剂参数优化主要围绕减缩与缓凝两类功能展开，掺入适量减缩剂可降低毛细水张力并延缓失水速率，使收缩峰值出现时间后移，掺量控制在0.8%~1.2%区间时对强度发展影响较小。缓凝型外加剂有助于拉长水化反应历程，使强度增长曲线与收缩发展曲线更加匹配，减少养生早期因抗拉能力不足引起的裂缝风险。配合比与外加剂的协同优化，使基层在保持设计强度水平的前提下实现体积稳定性提升，为裂缝控制提供材料层面的基础支撑^[9]。

(二) 施工工艺与养生的过程控制优化

在高速公路水泥稳定碎石基层施工中，裂缝控制应以“全过程风险预控”为目标，重点强化施工工艺与养生的高标准协同控制。摊铺阶段应保持连续、均匀作业，严格控制基层厚度偏差，实际施工中厚度允许偏差宜控制在±1.0 cm以内，以避免局部刚度突变诱发收缩应力集中。碾压工序应遵循“先轻后重、由边到中”的原则，确保全幅压实均匀，避免形成强弱区。施工缝应尽量减少，确需设置时应保证新旧料紧密结合，防止界面成为潜在薄弱带。养生阶段强调早期及时保湿与连续覆盖，养生时间不少

于7 d，通过稳定温湿环境抑制早期收缩变形，实现基层结构完整性与体积稳定性的同步提升^[10]。

(三) 裂缝风险控制技术的综合优化路径

在高速公路水泥稳定碎石基层施工条件下，裂缝控制应以风险前置管控为基本思路，通过多项单独可控措施的协同实施，削弱裂缝产生的必要条件。材料层面除合理控制水泥用量与级配结构外，可通过限定细集料含量上限，抑制浆体连续性过强导致的集中收缩变形；同时对混合料拌和含水量实施动态调整，使其稳定控制在最佳含水量附近，避免因含水波动引起局部干缩集中^[11]。施工层面应重点加强结构均匀性控制，通过全幅连续摊铺、稳定碾压参数与行走轨迹管理，降低密实度离散性，削弱基层内部潜在弱区的形成条件；对施工缝、搭接带及横向结构边界采取提前预处理措施，提高界面整体性。养生控制方面，应强调早期保湿与环境隔离并重，延缓表层失水速率，减小温湿梯度引起的拉应力集中。通过材料参数、施工过程及养生等多维控制措施的叠加应用，可从机理层面系统降低裂缝风险，从机理层面实现高速公路水稳基层裂缝风险的系统性降低，为实现基层结构整体稳定性与耐久性提升提供可靠技术路径^[12]。

四、结语

围绕水泥稳定碎石基层裂缝问题，本文从裂缝形态识别与成因机理分析以及控制技术优化三个层面展开系统研究，对裂缝形成的内在逻辑与外在诱因进行较为完整的梳理，研究表明材料收缩特性与强度演化不协调以及环境与交通荷载引起的温湿应力集中，是基层裂缝产生和扩展的主要影响因素。在此基础上针对配合比设计与施工工艺及养生提出具有工程可操作性的优化思路，并从机理层面对于裂缝控制效果进行论证，结果表明优化措施在裂缝数量和宽度控制方面具有明确理论优势，基层结构整体稳定性得到提升，相关研究可为水泥稳定碎石基层裂缝防治提供技术参考，对提高路面结构耐久性和延长使用寿命具有积极意义。

参考文献

- [1] 马刚. 掺沥青路面铣刨料水稳碎石基层耐久性及路用性能研究 [J]. 山西建筑, 2026, 52(02): 145~148.
- [2] 王鹏飞, 宿红强. 城市主干路路面基层离析开裂与附属构筑物协同施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(12): 113~115.
- [3] 高文彬. 路面改造工程中大厚度水泥稳定碎石基层施工技术优化 [J]. 交通世界, 2025, (35): 74~76.
- [4] 郭明哲. 水泥稳定级配碎石基层抗裂性能配合比设计及质量控制 [J]. 广东建材, 2025, 41(11): 68~71.
- [5] 吕立守. 改扩建公路新旧水泥稳定基层拼接质量控制措施及质量检测 [J]. 工程建设与设计, 2025, (21): 151~153.
- [6] 吴华养. 高层建筑施工中混凝土裂缝成因与控制技术研究 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (30): 95~97.
- [7] 施仕良. 市政工程混凝土路面裂缝成因分析及控制策略研究——以中国武夷肯尼亚 A104 市政公路工程项目为例 [J]. 散装水泥, 2025, (01): 86~87+90.
- [8] 曾绍敏. 高桩梁板式码头混凝土面层横向裂缝成因及解决措施 [J]. 珠江水运, 2019, (24): 49~50.
- [9] 成鑫, 马士良, 戴煜坤, 等. 城市道路水泥稳定碎石基层纵向裂缝成因及案例分析 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(08): 159~160.
- [10] 李森. 公路工程水泥稳定碎石基层裂缝问题成因及防治措施研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (05): 136~138.
- [11] 丁雪航, 吕飞, 钱沛. 水泥稳定碎石基层裂缝成因及防治措施 [J]. 江苏建材, 2023, (06): 104~105.
- [12] 姚蓓蓓. 水泥稳定碎石基层裂缝的成因分析及预防对策 [J]. 运输经理世界, 2021, (05): 3~4.