

路基稳定性对沥青路面使用寿命的影响

王旭炜

新昌县交通投资集团有限公司，浙江 绍兴 312500

DOI:10.61369/ERA.2025060007

摘要：路基稳定性是决定沥青路面使用寿命的核心因素，其受地质条件、设计施工质量及环境作用的综合影响，本文系统分析了土体力学特性与水文地质特征对路基承载力的制约机制，揭示了弯沉检测、CBR 试验等传统方法与有限元模拟、光纤传感等现代技术在稳定性评价中的协同逻辑，研究证实，路基性能的可持续维护需融合生态排水、全寿命周期成本模型等创新策略，为降低路面病害发生率、延长道路服役周期提供理论支撑与工程实践范式。

关键词：路基稳定性；沥青路面寿命；材料改良

The Influence of Roadbed Stability on the Service Life of Asphalt Pavement

Wang Xuwei

Xinchang County Transportation Investment Group Co., Ltd. Shaoxing, Zhejiang 312500

Abstract： Roadbed stability is the core factor determining the service life of asphalt pavement, which is comprehensively influenced by geological conditions, design and construction quality, and environmental effects. This article systematically analyzes the constraint mechanism of soil mechanics and hydrogeological characteristics on the bearing capacity of roadbeds, and reveals the collaborative logic between traditional methods such as deflection detection and CBR testing and modern technologies such as finite element simulation and fiber optic sensing in stability evaluation. The research confirms that the sustainable maintenance of roadbed performance requires innovative strategies such as ecological drainage and life cycle cost models, providing theoretical support and engineering practice paradigms for reducing the incidence of pavement diseases and extending the service life of roads.

Keywords： roadbed stability; asphalt pavement lifespan; material improvement

引言

随着交通荷载的日益增长与环境变迁的加剧，沥青路面早期病害频发已成为制约公路工程可持续发展的突出问题，路基作为路面结构的承载基础，其稳定性直接决定了上层结构的应力分布与疲劳寿命，本文聚焦路基稳定性的多尺度影响因素，通过力学解析、数值模拟与工程实践相结合的方法，揭示荷载-环境耦合作用下的路基劣化规律，旨在为提升路面耐久性、降低全寿命周期养护成本提供科学依据。

一、影响路基稳定性的核心因素

（一）地质条件

路基的稳定性首先取决于其基础土体的力学特性，包括颗粒组成、密实度及抗剪强度等核心参数，不同土质在荷载作用下的响应差异显著，例如黏性土因其高压缩性和低渗透性，易在水分侵入后发生塑性变形，导致路基局部沉降或侧向位移，此类土体在长期荷载下易产生累积变形，尤其在缺乏有效排水措施时，孔隙水压力逐渐升高，进一步削弱土体骨架的支撑能力；相反，砂性土虽透水性良好且压缩性较低，但其颗粒间缺乏黏结力，在动

态交通荷载反复作用下易发生颗粒重排形成松散结构，进而引发路基整体性下沉，因此在工程实践中需通过土工试验精确测定土体的 CBR 值（加州承载比）和回弹模量并据此选择适配的填筑材料或改良方案，以确保土体力学特性与设计荷载的匹配性^[1]。除此之外，地下水的赋存状态及其动态变化是威胁路基稳定性的另一核心地质因素，当地下水位接近或高于路基基底时，土体长期处于饱和状态，孔隙水压力持续作用于土颗粒骨架，导致有效应力降低，进而诱发软化、液化等灾害，例如：在冲积平原或河网密集区域，季节性水位波动会加剧土体的干湿循环效应，促使黏土矿物膨胀收缩，最终形成贯穿性裂缝，另外毛细水上升作用可将

水分输送至路基上层，在冻结区引发冻胀或在盐渍化区域导致盐分结晶膨胀，针对此类问题，需在勘察阶段明确地下水埋深、径流方向及化学组分，并通过设置隔水层、盲沟或竖向排水体等工程措施，阻断水分迁移路径，进而维持路基内部湿度平衡，避免因水文作用引发的结构性劣化^[2]。

二、设计与施工质量

（一）材料适配性与结构设计的科学逻辑

路基的耐久性高度依赖于材料选择与结构设计的协同优化，填筑材料需与地基土体在刚度、渗透性等参数上形成梯度过渡，以避免界面处因模量突变产生剪切破坏，例如：在软土地基上直接填筑高模量碎石土时，界面处易因应力集中形成滑移面，需通过铺设土工格栅或掺入水泥改良过渡层以增强界面黏结；结构设计层面，合理的横断面坡度与分层厚度可有效分散交通荷载产生的应力波，而排水系统的立体化布局则能加速水分排出，减少其对路基的侵蚀。另一方面，施工质量的控制精度直接决定了设计目标的实现程度，以压实工艺为例，碾压遍数、机械类型及填料含水率的微小偏差均可导致密实度分布不均，形成局部薄弱区，此类区域在后续使用中易发展为应力集中点，加速裂缝扩展与结构层剥离，更隐蔽的风险源于施工时序安排不当，例如在雨季进行填筑作业时，未及时覆盖的土体会因含水量超标而无法达到压实要求，后续干燥收缩将引发不可逆的体积变化，另外地基处理深度不足或排水设施施工误差可能导致预设功能失效，此类问题往往在竣工初期难以察觉，却会在环境与荷载的长期耦合作用下逐步暴露，最终演变为结构性破坏，因此，需通过动态监测与闭环反馈机制确保每道工序的严格落地，进而规避人为失误对路基稳定性的潜在威胁。

（二）环境因素

在季节性气候区，温度周期性变化对路基稳定性的影响尤为显著，冻融循环过程中，土体孔隙水的相变引发体积膨胀与收缩，导致结构内部产生反复拉压应力，以东北地区为例，冬季土体冻结时，水分向冻结锋面迁移并形成冰透镜体，造成路基隆起；春季消融后，土体含水量骤增且承载力骤降，在车辆荷载作用下易形成翻浆冒泥，此类破坏具有显著的方向性特征，常表现为纵向裂缝或网状龟裂且修复后易因未根除的含水层而反复发作。除此之外，降水会作为化学介质参与路基材料的劣化过程，在强降雨区域，地表径流对边坡表土的冲刷可导致防护层剥离，而持续入渗的水分则溶解土体中的可溶盐（如硫酸钠），随毛细作用上升至路基上层，水分蒸发后盐分结晶膨胀产生膨胀应力，逐步撕裂土体结构，除此之外，在工业污染区域，酸雨中的硫酸根离子可与路基材料中的钙质成分反应，生成石膏等二次矿物，造成胶结结构崩解，此类化学-物理耦合作用往往具有潜伏期长、破坏范围广的特点。

三、路基稳定性的评价方法

（一）传统评价技术

弯沉检测作为评价路基承载力的经典方法，其核心在于通过静态或动态荷载模拟实际交通作用，量化路基表面在垂直荷载下的变形量，该技术的理论基础源于弹性层状体系理论，通过测定弯沉值可反演路基各结构层的模量参数，例如：贝克曼梁弯沉仪通过固定轴载的卡车施加荷载，利用位移传感器记录路基回弹变形，进而推算其整体刚度，若弯沉值超出设计阈值，则表明路基存在局部软弱区或压实不足，需通过灌浆或换填进行补强，值得注意的是，弯沉检测的精度受环境温湿度、加载速率及设备校准状态的多重影响，尤其在季节性冻土区域，冻融界面导致的模量突变可能掩盖真实承载性能。另一方面，加州承载比（CBR）试验通过测定标准贯入针在特定压实度土体中的贯入阻力，量化土体抗剪强度与荷载扩散能力，为路基填筑材料的选择提供直接依据，试验过程中，试样需经过浸水饱和和处理以模拟最不利水文条件，其CBR值越高，表明土体在饱和状态下抵抗变形的能力越强，例如：高速公路路基填料的CBR值通常上路床不低于8%，下路床不低于5%，而二级公路可适当放宽至上路床不低于6%，下路床不低于4%，这一指标的工程意义在于通过实验室标准化试验筛选出与设计荷载匹配的填料类型，避免因材料强度不足引发结构性破坏，然而CBR试验的局限性在于其仅能反映土体在特定条件下的局部力学响应，无法全面表征复杂应力路径下的路基行为，因此在工程应用中需结合现场压实度检测与土工合成材料性能测试，形成多维度的材料评价体系^[3]。

（二）现代监测与模拟手段

数值模拟技术通过构建路基、路面与地基相互作用的分析模型，能够研究交通荷载、温度变化及水分渗透对路基稳定性的综合影响，例如在分析冻胀问题时，可通过整合温度场、水分场与力学场的相互作用，得出冻结过程对路基变形的影响规律，与依赖经验公式的传统方法相比，这种技术能够模拟复杂场景（如暴雨与重载交通同时作用下的路基性能衰减）并识别出关键设计参数（如材料刚度、排水效率等），进而优化抗冻措施^[4]。然而其准确性依赖于模型参数的合理设定，需结合现场监测数据进行反复验证，以确保模拟结果与实际工程行为的一致性。另一方面，分布式光纤传感技术通过埋设于路基内部的传感光纤，可实时获取温度、应变与振动信号的连续空间分布数据，实现对路基健康状态的毫米级分辨率监测，其原理基于光时域反射（OTDR）技术，通过解析激光脉冲在光纤中的背向散射信号定位并量化外界扰动引起的微应变变化，例如：在软土路基中，光纤网络可捕捉到沉降发展过程中不同深度的应变累积规律，预警潜在滑动面的形成，该技术的突破性在于突破了传统点式监测的空间局限性，能够全域感知路基的隐蔽性损伤，然而光纤布设工艺的复杂性及长期服役中的信号漂移问题仍需进一步突破，当前研究聚焦于开发自修复光纤涂层与智能算法滤波技术，以提升监测系统的环境适应性及数据可靠性，为路基稳定性评价从“事后诊断”向“事前预警”转型提供技术支撑。

四、提升路基稳定性的技术措施

（一）设计与施工优化

1. 路基材料改良

路基填料的化学改良是通过向天然土体中掺入特定添加剂，改变其矿物组成与微观结构，以此提升力学性能与环境适应性的关键技术，以高液限黏土为例，其天然状态下膨胀性黏土矿物含量高，易在水分变化时发生体积膨胀或收缩，导致路基开裂，通过掺入3%–6%的生石灰，石灰中的 Ca^{2+} 可与黏土矿物发生离子交换反应，中和黏土颗粒表面负电荷、降低双电层厚度，进而抑制膨胀势，同时石灰与黏土中的硅酸盐等矿物反应生成胶凝物质，形成稳定的团粒结构，显著提高土体的抗剪强度与长期水稳性，在工程实践中，此类改良技术需结合室内击实试验与无侧限抗压强度测试，优化掺量配比与养护周期，以确保改良土体在施工碾压后达到设计压实度与CBR值要求^[5]。另一方面，土工格栅、土工布等合成材料的引入，基于增强土体颗粒间的机械咬合与摩擦阻力，可有效抑制路基不均匀沉降与侧向位移，以双向拉伸聚丙烯格栅为例，其纵横交错的肋条结构在填筑层间形成三维加筋网络，当土体受荷载作用产生剪切变形时，格栅通过张拉作用将局部应力扩散至更大范围，降低应力集中风险，在软土地基处理中，分层铺设土工格栅可显著提高复合地基的整体刚度，减少工后沉降^[6]。

2. 合理排水系统设计

路基排水系统的核心功能在于快速排出入渗水分并阻断毛细水上升路径，其设计需综合考虑地形、水文与气候特征，垂直排水体会通过缩短渗流路径加速超静孔隙水压力消散，尤其在软土地基处理中，垂直排水体与预压荷载的联合应用可显著加速固结沉降进程，例如：在滨海滩涂区路基工程中，采用“水平砂垫层+竖向塑料排水板”组合体系，可将工后沉降量降低40%以上，设计过程中需通过达西定律与有限元渗流模拟，优化排水层厚度、间距及坡度，确保排水能力与预期降雨强度及地下水位波动相匹配，避免因排水不畅导致土体长期饱和^[7]。除此之外，传统刚性排水结构（如混凝土边沟）虽能快速导流，但其生态割裂效应与维护成本问题日益凸显，基于海绵城市理念的生态排水技术，通过透水铺装、植草沟等柔性结构，可实现降水资源的自然渗透，例

如：在低交通量公路的路肩区域设置植草沟，利用植被根系对水分的吸收作用与土壤的过滤性能可减少地表径流对路基边坡的冲刷，同时补充地下水，其关键在于平衡渗透速率与路基稳定性需求，透水材料的级配需满足既能快速排水又避免细颗粒流失导致结构松散，植物品种选择则需兼顾抗淹能力与根系固土效果^[8]。

（二）维护与管理策略

路基的长期稳定需依托“监测–分析–决策”的闭环管理体系，其核心在于通过智能化技术实现从数据采集到维护行动的无缝衔接，首先需通过部署多类型智能传感器（如光纤湿度计、倾角变形仪、分布式温度传感器等）实时获取路基关键状态数据，以冻土区为例，由于冻融循环对路基稳定性威胁极大，可在路基不同深度埋设温度传感器网络，实时监测冻结深度与融化锋面的动态变化，例如：青藏高原某冻土路段采用此类技术，发现春季融化期路基表层温度波动可达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，而深层冻土温度变化滞后约15天，此类数据为预测冻胀风险提供了直接依据^[9]。然而，监测过程中产生的海量数据常伴随噪声干扰，例如传感器漂移、电磁干扰或环境突变导致的异常值，针对这一问题，需采用自适应滤波算法（如卡尔曼滤波或小波去噪）对原始数据进行清洗，以某高速公路监测项目为例，通过卡尔曼滤波处理后，变形数据的信噪比提升了60%，显著提高了分析可靠性，同时结合专家知识库（如冻土病害特征库、盐渍化膨胀案例库）对清洗后的数据进行智能识别，可快速定位潜在病害模式，例如：当系统检测到某路段湿度突增且伴随不均匀变形时，可自动匹配知识库中的“渗透性沉降”案例，触发分级预警并推荐注浆加固方案，进而提升预警准确性，缩短从发现问题到制定对策的时间窗口，使维护决策更加精准高效^[10]。

五、结束语

路基稳定性的提升是延长沥青路面使用寿命的核心突破口，本文通过剖析地质条件、施工质量与环境因素的交互作用机制，构建了涵盖材料改良、排水优化与智能监测的综合性技术体系，未来研究需进一步探索新型环保材料、人工智能预警算法在路基维护中的深度应用，推动道路工程向高韧性、低能耗方向转型。

参考文献

- [1] 曹茂宇. 公路沥青路面病害处理技术研究 [J]. 运输经理世界, 2022, (22): 119–121.
- [2] 魏巍. 简谈公路沥青路面病害及防治措施 [J]. 大众标准化, 2022, (06): 107–109.
- [3] 张红梅. 城乡沥青公路路面病害原因及养护对策分析 [J]. 科技资讯, 2019, 17 (19): 55–56.
- [4] 杨荟. 高速公路路基稳定性施工技术研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44 (16): 127–128.
- [5] 王文华. 路桥工程沥青路面面层施工技术分析探讨 [J]. 汽车周刊, 2023(8): 0234–0236.
- [6] 曲磊, 刘刚, 李艳. 公路沥青路面结构层水稳冷再生施工技术应用探讨 [J]. 中国公路, 2022(11): 170–171.
- [7] 喻敏东. 市政工程沥青路面面层施工技术探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2022(4): 0088–0090.
- [8] 李剑锋. 沥青路面就地冷再生施工技术分析 [J]. 江西建材, 2023(5): 358–360.
- [9] 孔令云, 李春萍, 顾韬. 彩色沥青混合料的设计及路用性能的影响因素 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1580–1586.
- [10] 喻杰, 李九苏, 姜舜君, 等. 反应型彩色环氧冷拌沥青混合料制备及性能研究 [J]. 公路与汽运, 2021(5): 53–58.