

# 雨水入渗诱发路面沉陷病害成因与综合治理技术探析

吉刚

新疆公路建设(集团)有限责任公司, 中国·新疆 昌吉 831100

**摘要:** 雨水入渗是诱发公路路面沉陷病害最为普遍且危害深远的环境因素之一, 其作用机制涉及水力学、土力学及材料科学的复杂耦合过程。在极端气候事件频发与交通荷载持续增长的双重压力下, 传统“重排轻防”的治水理念已难以适应现代公路长寿命、高韧性的服役需求。本文系统综述了雨水入渗诱发路面沉陷的多尺度成因机制, 深入剖析了地表径流下渗、内部水分迁移、路基土体软化及动水压力冲刷等关键过程的相互作用规律; 全面梳理了从源头阻水、过程导水到末端加固的综合治理技术体系, 评述了新型排水结构、防渗材料、注浆加固及智能监测预警等技术的应用成效与局限性。

**关键词:** 雨水入渗; 路面沉陷; 水-力耦合; 综合排水; 注浆加固; 智能监测

## Analysis of Causes and Comprehensive Treatment Technologies for Pavement Settlement Induced by Rainwater Infiltration

Ji Gang

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

**Abstract:** Rainwater infiltration is one of the most common and damaging environmental factors causing pavement settlement in highways, involving complex coupled processes in hydraulics, geomechanics, and materials science. Under dual pressures of increasing extreme climate events and growing traffic loads, the traditional "focus on drainage over prevention" philosophy can no longer meet the demands of modern highways for long service life and high resilience. This paper systematically reviews the multi-scale mechanisms behind rainwater-induced pavement settlement, thoroughly analyzing the interaction among key processes such as surface runoff infiltration, internal moisture migration, subgrade soil softening, and dynamic water pressure erosion. It comprehensively outlines a holistic treatment system ranging from source water interception, intermediate flow guidance, to terminal reinforcement, and evaluates the effectiveness and limitations of emerging technologies including new drainage structures, waterproofing materials, grouting reinforcement, and intelligent monitoring and early warning systems.

**Keywords:** Rainwater infiltration; Pavement settlement; Hydro-mechanical coupling; Integrated drainage; Grouting reinforcement; Intelligent monitoring

## 0 引言

公路作为国家综合立体交通网的基础骨架, 其服役性能直接关系到经济社会运行效率与公共安全。然而, 在我国广袤地域内, 尤其是南方多雨区、沿海台风带及西南喀斯特地貌区, 雨水入渗引发的路面沉陷、翻浆、坑槽等病害长期困扰着建设与养护部门。据统计, 我国高速公路早期损坏中约 60% 以上与水损害直接相关, 其中因雨水持续入渗导致路基承载力衰减而诱发的结构性沉陷占比最高、修复难度最大、复发率最强。随着全球气候变化加剧, 短时强降雨、持续性暴雨等极端降水事件频率显著增加, 原有基于历史气象数据设计的排水系统与路基防护标准逐渐失效, 使得“小雨小病、大雨大病”的现象愈发突出<sup>[1]</sup>。

## 1 雨水入渗诱发路面沉陷的多尺度成因机制解析

要制定科学有效的治理对策, 必须首先厘清雨水从地表到路基深层的迁移路径及其对路面结构性能的劣化机理, 避免陷入“见沉治沉”的表象化处理误区。路面沉陷并非孤立事件, 而是水、土、荷三者与时空维度上动态耦合的结果。

### 1.1 地表径流下渗与内部水分迁移的驱动机制

雨水入渗始于地表, 但其危害远超表层。当降雨强度超过路面排水能力或路表存在裂缝、接缝破损时, 雨水迅速沿缺陷通道下渗。沥青面层虽设计为不透水层, 但在长期使用后微裂缝扩展、空隙率增大, 实际渗透系数可提高

1-2 个数量级；水泥混凝土路面的接缝、拉杆孔及板底脱空区更是高效入渗通道。一旦水分突破面层，便在重力与毛细作用下向基层、底基层乃至路基迁移。在非饱和土中，水分迁移受基质吸力控制，形成湿润锋向下推进；当遇到低渗透性夹层或地下水位抬升时，水分横向积聚，形成局部饱水带<sup>[2]</sup>。

## 1.2 动水压力冲刷与路基细颗粒流失的协同破坏效应

静态入渗仅是起点，车辆荷载作用下的动水压力才是触发突发性沉陷的关键推手。当车轮驶过饱水路段时，轮胎接地压力使孔隙水产生瞬时高压脉冲，该压力波在封闭或半封闭的路基结构中反复振荡，形成强烈的泵吸效应。一方面，高压水流冲刷土体骨架，将细颗粒（粉粒、黏粒）从粗颗粒孔隙中带走，造成管涌或潜蚀，导致路基内部形成空洞或疏松带；另一方面，动水压力周期性加载使土体经历反复剪切，加速疲劳损伤累积，尤其在级配不良或压实不足的路段更为显著。这种冲刷-流失-空洞-沉陷的链式反应具有自增强特性：初始微小缺陷在动水作用下迅速扩大，最终引发路面突然塌陷。在桥涵台背、管线沟槽回填区等压实薄弱部位，以及新旧路基拼接段，此类病害尤为高发。值得注意的是，动水压力的大小不仅取决于荷载与含水状态，还与路面平整度密切相关——车辙、波浪等既有病害会放大冲击效应，形成恶性循环。因此，防治沉陷不仅要“止水”，更要“稳流”，通过改善路面平整度、优化排水路径来削弱动水压力的破坏潜能。

## 1.3 地质条件与人为因素叠加下的沉陷风险放大机制

自然水文过程之外，特殊地质背景与人类工程活动常成为沉陷灾害的放大器。在膨胀土地区，雨水入渗引发土体吸水膨胀，干燥后又收缩开裂，反复胀缩导致路基结构松散、强度骤降；在湿陷性黄土区，雨水触发土体结构崩解，产生大幅附加沉降；在岩溶发育区，地表水沿裂隙下渗溶蚀地下空洞顶板，诱发突发性塌陷。这些地质敏感区的沉陷往往具有隐蔽性强、突发性高、治理难度大的特点。同时，人为因素亦不可忽视：施工期压实不足、排水设施堵塞或损毁、取弃土场改变地表汇流路径、绿化灌溉不当等，均可能打破原有水文平衡，制造局部入渗热点。例如，中央分隔带植被灌溉若无防渗措施，水分长期下渗可使路基中心含水率远高于两侧，形成“湿芯”沉陷带。此外，城市化进程中不透水面增加导致区域径流系数上升，汇流时间缩短，峰值流量增大，进一步加重了公路排水系统的负担<sup>[3]</sup>。

## 2 适应水文响应的路面沉陷综合治理技术体系评述

针对上述复杂成因，路面沉陷治理已从被动抢修转向“源头防控、过程疏导、末端加固、全程监控”的综合治理范式。当前技术体系围绕阻断入渗路径、加速水分排出、恢复结构强度三大目标展开。

### 2.1 以功能梯度材料为核心的防渗阻水技术

为从源头减少雨水入渗，工程界发展了一系列高性能防渗材料与结构。在面层层面，推广使用密级配改性沥青混合料、超薄磨耗层或封层技术，降低表面空隙率至 3% 以下，并掺加憎水剂或纳米二氧化硅提升抗渗耐久性；对于水泥路面，采用聚合物改性接缝密封料、弹性嵌缝条替代传统沥青玛蹄脂，延长密封寿命。在基层与路基界面，设置土工膜、复合排水网或水泥稳定碎石隔水层，形成水平阻水屏障，防止上层水分下侵路基。近年来，功能梯度材料理念被引入路面结构设计：上面层高抗渗、中面层高韧性、下面层高排水，实现“外防内导”的协同效应。例如，某南方高速公路在易沉陷路段采用“sma-13+sup-19+atb-25”三层结构，配合聚酯玻纤布应力吸收层，三年内未出现明显水损沉陷。然而，防渗材料的效果高度依赖施工质量：接缝密封必须连续无断点，土工膜搭接宽度与焊接质量需严格检测，否则局部失效将导致整体防线崩溃。同时，过度追求不透水可能阻碍内部冷凝水或毛细水排出，引发次生问题，故需结合当地水文条件进行精细化设计，避免“一刀切”式封堵<sup>[4]</sup>。

### 2.2 立体化排水系统与动水压力消减措施

“排”是治理水损的核心环节，需构建涵盖地表、层间、路基的立体排水网络。地表排水方面，优化横坡、纵坡组合，增设拦水带、急流槽，确保雨水快速导出路域；层间排水通过在基层顶面铺设透水土工布或开级配排水层，将渗入面层的水分横向引至边缘盲沟；路基排水则依靠纵向渗沟、横向排水管及毛细排水带，降低地下水位，疏干路基土体。针对动水压力问题，除改善路面平整度外，还可采用多孔沥青路面或排水式水泥混凝土路面，允许部分雨水垂直下渗并通过基层快速排出，减少表面积水与轮胎水膜厚度，从而削弱泵吸效应。在桥涵过渡段、挖方边坡等高风险区，设置反滤层与集水井，防止细颗粒随水流流失。实践证明，良好的排水系统可使路基含水率降低 8%~12%，回弹模量提升 20% 以上。但排水设施易淤堵、冻胀、生物侵蚀，需建立定期清淤、检查与维护制度，否则“有排无效”比“无排”更具欺骗性。未来应发展自清洁排水

材料与模块化可更换构件,降低运维成本<sup>[5]</sup>。

### 2.3 靶向注浆加固与结构性能恢复技术

对于已发生沉陷或存在隐蔽空洞的路段,注浆加固是恢复结构完整性的关键手段。传统水泥浆液适用于大空洞填充,但流动性差、凝固时间长,易造成二次扰动;化学浆液(如聚氨酯、丙烯酸盐)渗透性好、凝结可控,适合细微裂隙与松散土体加固,但成本高、环保性存疑。近年来,地聚物注浆材料因其早强、微膨胀、耐腐蚀及低碳特性受到关注,尤其适用于酸性土壤或硫酸盐侵蚀环境。注浆工艺亦趋向精准化:通过地质雷达、高密度电法等无损探测定位病害范围,采用分层、分序、低压慢注方式,避免劈裂破坏;结合钻孔电视验证注浆效果,实现“诊断-设计-施工-验证”闭环。某国道沉陷段采用聚氨酯靶向注浆后,弯沉值降低 40%,三年跟踪无明显复发。然而,注浆仅为“治标”,若不解决水源问题,加固体周边土体仍会继续软化,导致新沉陷。因此,注浆必须与排水、防渗措施同步实施,形成“固本清源”的组合拳。同时,应建立注浆材料与环境相容性评估体系,防止地下水污染<sup>[6]</sup>。

## 3 现存挑战与未来发展方向展望

尽管综合治理技术已取得显著成效,但在应对日益复杂的水文-荷载耦合环境时,仍面临深层次挑战,亟需在理论、技术与制度层面寻求突破。

### 3.1 非饱和土水-力耦合机理认知不足与设计标准滞后

现行设计规范多基于饱和土力学或经验公式,难以准确描述非饱和路基在降雨入渗过程中的吸力变化、渗透系数演化及强度衰减规律。设计采用的渗透系数、持水曲线等参数多为实验室理想值,与实际现场条件偏差较大,导致排水能力冗余或不足。未来应加强原位监测与数值模拟结合,建立考虑裂隙、层次、植被等因素的非饱和渗流-变形耦合模型,并将气候变化情景纳入设计基准期,推动从“静态经验设计”向“动态风险导向设计”转型。同时,修订排水系统设计标准,引入基于重现期降雨过程线的动态计算方法,替代单一的暴雨强度公式。

### 3.2 隐蔽病害智能识别与全生命周期性能反馈机制缺位

沉陷前期征兆隐蔽,传统人工巡查与点状检测难以及时发现。虽有无损探测技术,但数据解读依赖经验,自动化程度低。未来应融合车载移动测量、无人机遥感、光纤传感与人工智能算法,构建路面-路基一体化健康监测网络,实现沉陷风险的早期预警与空间定位。更重要的是,

打通建设期、养护期与运营期的数据壁垒,建立全生命周期性能数据库,用实际服役表现反哺设计理论迭代与材料选型优化。唯有让数据驱动决策,才能摆脱“坏了再修”的被动循环。

### 3.3 经济-生态-性能协同的绿色治理技术推广障碍

许多先进技术(如功能梯度材料、智能排水构件)因初期成本高、施工工艺复杂、缺乏地方标准而难以规模化应用。同时,部分化学注浆材料存在环境风险,与绿色公路理念冲突。未来应加大绿色低碳材料的研发与认证力度,制定区域性技术指南与计价依据,通过示范工程验证长期效益,消除市场顾虑。同时,将生态影响纳入治理方案比选指标,推动“工程安全”与“环境友好”的统一。

## 4 结语

雨水入渗诱发的路面沉陷防治,是一场与自然水文节律的深度对话,也是对工程系统韧性的持续考验。我们已走过仅靠加厚面层、频繁补坑的粗放阶段,也必须清醒认识到在气候剧变与交通增长双重压力下,既有知识体系正面临重构的紧迫现实。真正的治理之道,不在于彻底隔绝雨水——那既不可能也不必要——而在于学会与水共处,构建一个能感知水文脉动、疏导水分能量、在湿润环境中保持结构完整性的自适应路面系统。这要求工程师放下“人定胜水”的执念,转而理解土壤的呼吸、倾听水流的节奏、尊重地质的脾性;施工者超越工序执行的惯性,将每一道接缝、每一寸坡度都视为水文系统的一部分;管理者打破部门与阶段的壁垒,让监测数据真正引导预防性养护、让生态考量切实融入技术方案。未来,随着数字孪生、仿生材料与碳中和目标的深度融合,路面沉陷治理或将迎来从“对抗水害”到“顺应水势”的范式跃迁。但无论技术如何演进,对自然规律的谦卑、对细节的执着、对长远责任的担当,始终是公路工程不可动摇的基石。这条通往安全与耐久的道路没有终点,但每一步基于实证的审慎前行,都是对人民出行安全最坚实的守护,对人与自然和谐共生最深刻的诠释。

### 参考文献:

- [1] 贺小军. 基于源头减排的雨水系统排水能力提升研究[J]. 城市道桥与防洪, 2026(5): 276-284. DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.251003.
- [2] 童小东, 张璇, 王思源. 降雨条件下土岩复合地层顺向边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2026, 47(5): 1825-1836. DOI:10.16285/j.rsm.2025.0416.

[3] 任家乐, 谢建斌, 贾荣谷等. 降雨入渗条件下抗滑桩加固高边坡排土场模型试验及数值分析[J]. 工程勘察, 2026, 54(5): 14-22.DOI:10.26923/j.gckc.2026.05.003.

[4] 何玉琼, 钟志群, 赵鋈嬉等. 降雨入渗下根带土水力特性及边坡稳定性研究[J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2026, 57(2): 199-210.

[5] 沈云霞, 张钟珊, 张晓宇等. 降雨入渗对干旱区

土遗址表面疏松层形成的影响[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2026, 56(2): 241-251.DOI:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-003.

[6] 范一鸣, 孟凡香. 保护性耕作与雨水资源化对黑土区增产减排研究进展[J]. 吉林水利, 2026(4): 74-81.DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2026.04.014.