

极端降雨条件下公路与城市道路路基病害防治技术研究

焦建文

宁夏交通建设股份有限公司 宁夏 银川 750000

摘要：近年来，受全球气候变化影响，极端降雨事件频发且强度显著增强，对公路与城市道路基础设施构成严重威胁。路基作为道路结构的基础承载层，其稳定性直接关系到整个道路系统的安全与耐久性。本文系统分析了极端降雨条件下路基常见的病害类型及其成因机制，包括边坡失稳、路基沉降、翻浆冒泥、冲刷掏空等；在此基础上，从设计优化、材料改良、排水强化、智能监测与韧性提升等多个维度，综合评述了当前主流及前沿的路基病害防治技术；最后，结合未来发展趋势，提出了构建“预防—监测—响应—恢复”一体化的韧性路基防护体系建议。研究成果可为极端气候背景下道路工程的规划、设计、运维提供理论支撑与技术参考。

关键词：极端降雨；路基病害；防治技术；排水系统；韧性交通；智能监测

引言

根据世界气象组织（WMO）报告，近十年来全球多地遭遇历史罕见的强降雨过程，引发严重洪涝、滑坡、泥石流等次生灾害。我国作为季风气候显著的国家，近年来亦频繁遭遇“百年一遇”甚至“千年一遇”的极端降水事件，如2021年河南郑州“7·20”特大暴雨、2023年京津冀地区强降雨等，均对交通基础设施造成毁灭性破坏。公路与城市道路作为国家经济命脉和社会运行的重要载体，其路基在极端降雨作用下极易发生结构性损伤。路基病害不仅导致路面开裂、沉陷、塌陷等表观破坏，更可能引发交通中断、安全事故乃至生命财产损失。传统道路设计多基于历史气象数据和常规降雨强度，难以应对突发性、高强度的极端降雨冲击，暴露出抗灾能力不足、排水系统滞后、监测预警缺失等系统性短板。因此，深入研究极端降雨条件下路基病害的发生机理，发展高效、可持续的防治技术，构建具有气候韧性的道路基础设施体系，已成为当前交通工程领域亟待解决的重大课题。

1 极端降雨对路基的作用机制与典型病害类型

1.1 极端降雨对路基的作用机制

首先，在短历时高强度降雨条件下，雨水迅速入渗至路基浅层，导致非饱和土体含水率升高、基质吸力降低，从而削弱土体抗剪强度。对于未充分压实或采用细粒土（如粉土、低塑性黏土）填筑的路基，这种软化效应尤为显著，可能引发局部沉降或表面松散。其次，地表径流在缺乏有效导排的情况下，沿边坡或路肩形成高速水流，对土体表面产生强烈冲刷作用，细颗粒被带走后形成空洞，严重时可导致上部结构悬空失稳。此外，在半填半挖路段、顺层斜坡上的路基，或穿越软弱夹

层、风化破碎带等不良地质区域的线路。在这些位置，持续降雨可显著抬升地下水位或在潜在滑动面处积聚孔隙水压力，降低有效应力与抗滑力矩，当累积效应超过稳定安全阈值时，便可能触发浅层滑塌或深层滑移^[1]。上述三种机制往往相互叠加，在极端降雨持续期间形成“入渗—软化—冲刷—失稳”的连锁反应，极大加速路基结构的劣化进程。

1.2 典型路基病害类型

1.2.1 边坡失稳与滑塌

边坡失稳是山区公路及城市高架引道在极端降雨中最常见的病害形式。雨水入渗软化坡体内部结构，显著降低土体的内摩擦角与黏聚力，削弱其整体抗滑能力。在重力主导下，坡体沿潜在滑动面发生位移，轻则表现为表层剥落、裂缝扩展，重则导致大规模滑塌，完全阻断交通。2023年北京门头沟区在连续强降雨后，多处国道边坡发生滑移，部分路段被掩埋数十米，修复周期长达数月（109国道部分路段直至2023年10月甚至11月才逐步恢复通行），凸显此类病害的突发性与破坏性。

1.2.2 路基沉降与不均匀变形

在平原地区尤其是软土地基上修建的城市道路，极端降雨常引发显著的路基沉降问题。雨水长期浸泡使原本已固结的土层重新软化，压缩模量下降，产生附加沉降。若地下水位因暴雨抬升，还会在冻融交替区域诱发“翻浆”现象——即春季解冻期水分向上迁移，在路面下方积聚形成泥浆，导致路面鼓包、龟裂甚至泥浆外溢。此类病害虽进展缓慢，但反复发生将严重削弱道路平整度与行车舒适性，增加后期养护成本。

1.2.3 冲刷掏空与结构破坏

桥梁锥坡、涵洞进出口、急流槽等部位因水流集

中，极易在极端降雨中遭受冲刷掏空。高速水流携带泥沙对土体产生持续侵蚀，细颗粒被冲走后形成内部空洞，进而使上覆结构失去支撑而开裂、倾斜甚至坍塌^[2]。在城市道路中，检查井周边由于水流汇聚与涡旋作用，也常出现环向掏蚀，导致井周路面塌陷，形成安全隐患。此类病害具有隐蔽性强、发展迅速的特点，往往在无明显征兆下突然恶化。

1.2.4 排水系统失效引发的内涝

当前多数城市道路排水系统设计标准偏低，普遍采用1至3年一遇的降雨重现期，难以应对50年甚至100年一遇的极端暴雨。当降雨强度远超管网承载能力时，地表迅速积水，深度可达数十厘米。长时间浸泡使路基土体饱和软化，承载力骤降，加速沥青面层疲劳开裂与基层结构破坏。更为严重的是，内涝还可能倒灌地下通道、隧道等低洼设施，造成系统性瘫痪。因此，排水能力不足已成为城市道路在极端降雨下失效的关键诱因。

2 路基病害防治关键技术体系

2.1 设计阶段的韧性提升

提高道路基础设施在极端气候下的适应能力，必须从源头设计入手。首要任务是修订现行设计标准，将重要干线公路及城市主干道的排水设计重现期提升至50至100年一遇，关键节点如立交桥、隧道入口等应采用200年一遇标准，以匹配未来气候风险。同时，应积极引入“海绵城市”理念，在道路红线范围内系统布局低影响开发（LID）设施。例如，通过设置植草沟、下凹式绿地、透水铺装等，实现对降雨径流的就地滞蓄、渗透与净化，有效延缓峰值流量，减轻下游排水压力^[3]。在横断面设计方面，宜采用宽肩式断面以增强横向排水能力，并在边坡设计中适当放缓坡比，增设多级平台与截水沟，防止坡面径流集中冲刷。对于地质条件复杂的高陡边坡，还需进行精细化稳定性验算，必要时配置抗滑桩、锚索框架梁等主动支挡结构，从设计层面筑牢安全防线。

2.2 路基材料改良技术

针对不良土质路基在雨水作用下的易损性，材料改良是提升其水稳定性的核心手段。无机结合料稳定技术已被广泛应用，通过掺加水泥、石灰或粉煤灰等胶凝材料，可显著提高高液限黏土、膨胀土等软弱土体的加州承载比（CBR）与抗水分散能力。研究表明，仅掺入5%的水泥即可使膨胀土的自由膨胀率降低60%以上，有效抑制其遇水膨胀变形。此外，土工合成材料的应用也为路基加固提供了新路径。土工格栅通过加筋作用分散车辆荷载，抑制不均匀沉降；土工布则兼具反滤与隔离

功能，防止细颗粒流失并维持排水通畅。在软基路段，可结合碎石桩与土工格室构建复合地基，大幅提升整体承载力与抗液化性能。近年来，生态护坡技术也日益受到重视，植生混凝土、三维植被网、椰纤维毯等材料在保障力学性能的同时，促进植被生长，增强水土保持能力，实现工程安全与生态修复的协同发展。

2.3 排水系统强化技术

高效的排水系统是抵御极端降雨的第一道屏障。现代道路工程应摒弃单一地表排水模式，转而构建“地表—路基—地下”三位一体的立体化排水网络。地表层面需加密边沟、急流槽，并合理设置拦水带，引导水流有序排出；路基内部则应埋设纵向透水管与盲沟系统，及时排除渗入土体的水分，防止内部积水软化；地下层面则需与市政排水管网无缝衔接，必要时配置强排泵站，确保极端情况下积水能快速外排^[4]。在此基础上，智能排水设施的应用进一步提升了系统响应能力。例如，在易涝点安装液位传感器与自动启闭闸门，结合AI算法预测积水风险，可实现“雨前预排、雨中调控、雨后清淤”的全流程智能管理。深圳部分隧道已试点此类系统，显著缩短了内涝处置时间。此外，透水路面技术在人行道、非机动车道及低交通量车行道中展现出良好前景。透水沥青或透水混凝土能使80%以上的降雨就地下渗，大幅削减地表径流，配合地下储水模块还可实现雨水资源化利用，兼具防灾与环保双重效益。

2.4 监测预警与应急响应

面对极端降雨的不确定性，建立动态感知与快速响应机制至关重要。当前，光纤光栅（FBG）、合成孔径雷达干涉（InSAR）、全球导航卫星系统（GNSS）等先进传感技术已可实现对路基位移、含水率、孔隙水压力等关键参数的实时监测。通过融合BIM与GIS技术，可构建数字孪生路基模型，直观反映结构健康状态。在此基础上，基于机器学习的风险预警模型正逐步成熟。利用随机森林、长短期记忆网络（LSTM）等算法，输入实时气象与地质数据，即可输出路基病害风险等级，为分级应急响应提供科学依据。灾后抢修同样需要技术创新支持。高聚物速凝注浆材料可在数分钟内固化，快速填充路基空洞；装配式路基模块便于运输与安装，适用于交通中断后的紧急恢复；无人机投送系统则能在道路损毁情况下精准投放应急物资，极大提升救援效率。这些技术共同构成了“监测—预警—处置—恢复”的闭环管理体系。

3 案例分析：郑州“7·20”暴雨后的道路修复经验

2021年7月20日，郑州市遭遇历史罕见的特大暴雨，

单日降雨量高达624.1毫米，远超城市排水系统设计标准（通常按3—5年一遇设计），造成严重内涝灾害。大量道路因长时间被洪水浸泡，路基结构受损，出现大面积掏空、沉陷甚至塌陷，交通系统几近瘫痪。灾后修复工作不仅聚焦于“恢复原状”，更着眼于提升城市道路系统的气候韧性，形成了一套系统性、前瞻性的修复与改造经验。在京广北路隧道，修复团队创新采用“清淤—检测—注浆—加固”四步法。首先彻底清除淤泥和杂物，随后利用地质雷达等无损检测技术精准识别路基内部空洞；继而引入高聚物注浆技术，该材料遇水迅速膨胀并具备优异粘结性能，可在数小时内完成填充并固化，有效防止二次塌陷；最后对路面结构层进行整体加固，确保长期稳定性。这一流程显著缩短了工期，提升了修复质量。在农业路高架桥区域，相关部门新建大型地下调蓄池并配套强排泵站，实现“蓄排结合”。调蓄池可在暴雨期间临时储存超量雨水，缓解管网压力，泵站则在雨停后快速排出积水，极大增强了区域排水韧性。更重要的是，郑州以此次灾害为契机，全面推进“海绵道路”建设。在新建及改建道路中广泛采用透水沥青、透水砖等透水铺装材料，辅以生物滞留带、雨水花园、植草沟等绿色基础设施，实现雨水就地消纳、自然渗透与净化，从源头削减地表径流峰值。

4 未来发展趋势与建议

面向气候变化新常态，路基病害防治需向韧性化、智能化与绿色化深度融合。首先，应加快修订国家及行业设计规范，明确极端降雨情景下的设计参数与安全冗余，引入“韧性指标”作为道路工程评价的新维度。其次，推动数字孪生技术在道路全生命周期管理中的应用，建立覆盖感知、诊断、决策与执行的智慧运维平

台，实现从被动抢修向主动预防的转变。第三，大力发展战略性新兴产业，鼓励工业固废如钢渣、赤泥在路基改良中的资源化利用，减少天然材料消耗与碳排放；同时推广碳汇型生态护坡，助力交通领域“双碳”目标实现。最后，亟需完善跨部门协同机制，打通交通、气象、水利与应急管理的数据壁垒，建立统一的极端天气交通应急响应平台，提升多灾种耦合下的综合应对能力。

5 结语

极端降雨已成为威胁公路与城市道路路基安全的主要自然致灾因子。本文系统剖析了其通过水分入渗、动水冲刷与力学失稳等多重机制诱发边坡滑塌、路基沉降、冲刷掏空及内涝等典型病害的过程，指出传统设计标准与防治手段在超标准降雨面前存在明显不足。研究表明，通过提升设计韧性、改良路基材料、构建智能立体排水系统、部署实时监测预警网络等多维技术集成，可显著增强路基在极端气候下的抗灾能力与恢复能力。未来，应以“韧性交通”为核心理念，推动道路基础设施从被动防御向主动适应转型，构建覆盖“预防—监测—响应—恢复”全链条的综合防护体系，为保障国家交通命脉安全、服务高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]周鹏飞,丁辰.南方多雨地区城市道路路基病害原因分析与处置措施[J].青海交通科技,2020,32(02):56-61.
- [2]马雪梅,冯愈霖.公路路基常见病害及防治对策研究[J].低碳世界,2025,15(09):145-147.
- [3]王春晖.公路路基路面病害检测及治理措施[J].交通建设与管理,2025,(03):85-87.
- [4]李才华.公路路基病害成因分析及整治措施研究[J].交通科技与管理,2025,6(09):49-51.