

高速公路路基路面排水设计中应该注意的关键问题

任 飞

山西交科公路勘察设计院有限公司 山西太原 030032

摘 要：在全球气候变化引发极端降雨频发、传统排水设计难以适配路基路面水害防控需求的背景下，水对高速公路结构的侵蚀已成为制约道路全生命周期服役性能的核心瓶颈，路基的慢性劣化与路面的系统性崩溃不仅加剧养护成本，更直接威胁交通通行安全。传统“快速排除”的单一设计思维，在流域水文承载失衡与生态效益缺失的现实中逐渐显现局限。本文围绕高速公路排水设计优化展开研究，略述设计理念革新、数字化技术应用、新型材料推广及全生命周期管控等核心内容，旨在探索韧性生态兼具的排水系统构建路径，为工程实践提供理论与技术参考。

关键词：高速公路；路基路面；排水设计；侵蚀机理；全生命周期

引言

长期以来，受传统设计模式局限，部分排水工程存在生态适配性不足、极端天气应对能力薄弱、与流域水文循环脱节等问题，导致水害频发，路基因水分侵入引发的冻胀融沉、边坡坍塌，路面因水损害产生的坑槽、唧泥等病害，已成为道路运维中的突出难题。随着海绵城市理念的推广与数字化技术的快速发展，传统排水设计亟需突破固有框架，如何平衡排水功能、生态保护与抗风险能力，已成为公路工程领域亟待深入探讨的重要难点。

1 水对高速公路结构的侵蚀原因与危害

1.1 路基的“慢性劣化”：从结构稳固到功能失效

路基作为高速公路的“承重基础”，其稳定性依赖于土颗粒间的有效应力平衡，而水的侵入正是打破这一平衡的关键因素。当雨水通过地表渗透、地下水位上升等途径侵入路基内部，会导致土体孔隙水压力急剧升高，有效应力随之大幅降低，进而造成土体抗剪强度显著下降。这种力学性能的劣化具有隐蔽性和累积性，初期难以通过外观察觉，一旦达到临界状态便会引发突发性灾害。在山区公路或深挖方路段，水分长期积聚在边坡土体中，会软化滑带土，降低边坡抗滑力，极易诱发浅层滑坡或边坡坍塌。而在平原地区，路基主体受水分浸泡后会出现不均匀沉降，这种沉降反映在路面上，便是跳车、开裂等病害，成为雨水进一步侵入的“突破口”。更为严重的是，在季节性冻土区，水的冻胀与融沉循环对路基构成“反复冲击”：冬季水分结冰体积膨胀，将土体颗粒挤压松散。春季气温回升，冰块融化导致土体含水

量饱和，强度急剧下降，形成翻浆、沉陷等病害，这种循环往复的破坏堪称对路基的“慢性凌迟”。

1.2 路面的“系统性崩溃”：从表层损伤到支撑失效

路面作为直接承受行车荷载与自然环境作用的“表层结构”，对水的侵入极为敏感。不同类型的路面结构，其受水害影响的表现形式虽有差异，但破坏本质均为水的侵入导致结构力学性能退化。对于沥青路面而言，水分子具有极强的渗透性，能够侵入沥青与集料的界面，破坏两者之间的黏结力，导致沥青膜从集料表面剥离，这便是沥青路面“水损害”的核心机理^[1]。随着沥青膜的剥离，集料逐渐松散，进而在行车荷载作用下形成松散、坑槽等表层病害。同时，雨水通过路面裂缝侵入基层、底基层，导致基层材料含水率饱和，模量与承载能力大幅下降，整个路面支撑体系随之崩溃，病害从表层向深层快速发展。对于水泥混凝土路面，水的“泵吸作用”是主要破坏形式。在行车荷载的反复作用下，板底积水产生周期性压力，将基层中的泥浆从路面接缝或裂缝中唧出，形成“唧泥”现象。这一现象不仅会导致路面接缝破损、板角断裂，更意味着板底基层已被淘空，路面结构失去有效支撑，若不及时处理，极易引发板块断裂、沉陷等严重病害。

2 高速公路排水设计的系统性优化策略

2.1 设计理念革新：构建韧性生态兼具的排水系统

设计理念的革新是排水设计优化的核心前提，应打破传统“快速排除”的单一思维，将海绵城市理念、气候适应性思维与流域系统观念融入排水设计全过程，打造兼具韧性、生态与社会效益的排水系统。

2.1.1 海绵城市理念的深度融入

借鉴海绵城市“源头消纳、过程控制、末端循环”的核心理念，改变以往“雨洪快排”的设计模式，通过在中央分隔带、路侧绿化带设置下凹式绿地、植草沟、生态缓冲带等“海绵体”设施，让雨水在降落初期便得到就地入渗、滞蓄与净化，从源头削减径流总量。例如，在中央分隔带采用透水性填料，配合植草绿化，既能够吸收部分雨水，减少路面径流，又能降低中央分隔带内部积水对路面结构的侵蚀。在路侧区域设置连续植草沟，利用植被根系的固土作用与土壤的渗透性能，延缓雨水汇流速度，减少水土流失。这种设计模式不仅能够有效降低排水系统的负荷，还能回补地下水，改善区域生态环境，实现“排水与生态双赢”。

2.1.2 气候适应性设计的强化

全球气候变化背景下，极端降雨事件频发，给高速公路排水系统带来了严峻挑战。传统基于历史降雨数据的“静态设计”已难以应对突发暴雨引发的内涝风险。因此，排水设计应转向“气候适应性设计”，在充分分析区域降雨规律、极端天气发生概率的基础上，适当提高关键节点（如下穿通道、互通立交、隧道出入口）的设计重现期，增强排水系统的抗风险能力。同时，在排水系统设计中预留强排泵站、应急排水通道等“冗余接口”，当遭遇超标准暴雨时，能够快速启动应急排水措施，避免内涝灾害发生。例如，在互通立交低洼区域，除设置常规排水管道外，增设应急集水井与强排泵，确保极端降雨情况下能够快速排出积水，保障交通通行^[2]。

2.1.3 流域系统思维的贯穿

高速公路排水系统作为区域水文循环的重要组成部分，其设计不能孤立进行，必须树立“流域系统思维”。在确定排水出口位置、设计排水流量时，应充分考虑下游区域的水文承载能力，避免将路面径流集中排入下游河道或低洼区域，加剧下游洪涝灾害风险。同时，将排水设施与沿线景观建设、生态修复工程相结合，使排水系统成为融入自然的“绿色基础设施”。例如，将路侧排水边沟改造为生态沟渠，采用生态混凝土、格宾网等材料进行衬砌，配合水生植物种植，既保证排水功能，又能为动植物提供栖息地，改善区域生态环境。

2.2 技术方法创新：赋能排水设计的精准性与高效性

先进的设计理念需要可靠的技术方法作为支撑，随着

数字化、智能化技术的快速发展，BIM、GIS等数字化工具与新型材料、结构的应用，为排水设计的精准化、高效化提供了有力保障。

2.2.1 数字化技术的深度应用

数字化赋能是提升排水设计科学性的关键手段。充分利用BIM（建筑信息模型）技术的三维可视化优势，构建高速公路排水系统三维模型，将排水管道、集水井、边沟等设施与路基、路面、桥梁等结构进行一体化建模，能够在设计阶段提前发现管线碰撞、水流路径不合理等问题，实现设计方案优化调整。结合GIS（地理信息系统）的空间分析能力，整合区域地形地貌、水文地质、降雨分布等数据，为水文模型提供精准输入参数^[3]。通过SWMM（暴雨管理模型）等专业水文模拟软件，动态模拟不同降雨情景下的路面径流过程、积水分布情况，精准计算排水设施的设计流量与尺寸，实现“设计即仿真，仿真即优化”的设计模式。

同时，利用BIM模型的流体动力学模块，精准模拟不同降雨强度下的积水分布，定位积水关键点位，通过增设大口径集水井与独立出水管，彻底解决了下穿通道的内涝隐患，保障了改造工程的排水安全。

2.2.2 新型材料与结构的推广应用

新型材料与应用是提升排水系统性能、降低养护成本的重要途径。在排水设计中，应积极采用复合土工布、塑料盲沟、透水混凝土等高性能材料，替代传统砖石、混凝土等材料，提升排水效率与耐久性。复合土工布具有良好的过滤、排水与隔离功能，铺设于路基与基层之间，能够有效阻止土体颗粒进入基层，同时排出基层内部积水，避免基层材料软化。塑料盲沟相较于传统砂砾盲沟，具有排水量大、重量轻、施工便捷、耐腐蚀等优势，适用于路基边坡、隧道周边等排水场景。透水路面则能够直接将路面雨水渗入地下，从源头消除路面径流与水滑风险，同时还能降低夏季地表温度，改善区域微气候。例如，在高速公路服务区广场、互通立交匝道等区域采用透水沥青铺装，雨水能够快速下渗至地下储水层，既可以回补地下水，也可通过收集系统回收利用用于绿化灌溉、路面清洗等，实现水资源的循环利用，同时减少了路面排水设施的建设投入^[4]。

2.2.3 智能化运维理念的前置考量

排水系统的长效运行不仅依赖于科学的设计与优质的施工，更离不开高效的运维管理。因此，在设计阶段便应融

入“设计即运维”的前瞻性思维，为后期智能化运维奠定基础。在排水系统关键节点（如集水井、泵站、隧道排水管道）预留传感器布设点位，安装水位、流量、流速等监测设备，构建智慧排水管理平台。

通过平台实时采集排水系统运行数据，实现对排水设施运行状态的远程监控与故障预警。当出现管道堵塞、泵站故障等问题时，系统能够及时发出预警信号，引导养护人员精准处置，避免小问题演变为大灾害。这种“主动预防式”运维模式，相较于传统“事后修复式”养护，能够大幅降低养护成本，提升排水系统的运行可靠性。

2.3 全生命周期管控：保障排水系统的长效运行

高速公路排水系统的设计并非一次性工程，而是贯穿于项目规划、建设、运营、养护全过程的系统工作。必须树立全生命周期管控理念，将可维护性设计与全生命周期成本分析融入设计全过程，确保排水系统从建设到运维的各阶段都能实现效益最大化。

2.3.1 可维护性设计的强化

传统排水设计往往只关注施工阶段的便利性与初期排水效果，忽视了后期养护的可操作性，导致部分排水设施因难以维护而逐渐丧失功能。例如，部分隧道排水管理设于路面结构之下，一旦发生堵塞，必须破路开挖才能进行清淤修复，不仅养护成本高昂，还会造成交通中断。因此，在设计阶段便应站在养护者的角度，充分考虑排水设施的可维护性。合理设置检查井、清淤口的位置与间距，确保养护人员能够便捷接近。采用标准化、模块化的构件设计，便于后期更换维修。对于隧道、下穿通道等特殊区域的排水设施，可采用“检修廊道”等创新结构，将排水管置于廊道内，在日常养护过程中，工作人员可通过检查口进入廊道，对排水管道进行全面检查与清淤作业，彻底解决了隧道排水设施“养不起、修不起”的难题，大幅降低了运维成本。

2.3.2 全生命周期成本（LCC）分析的应用

在排水设计方案比选过程中，不能仅以初期建设投资作为决策依据，而应引入全生命周期成本（LCC）分析方法，综合考量项目建设、运营、养护、维修及因水害导致的交通中断损失等各项成本，选择全生命周期内综合效益最优的设

计方案。SXX 生态智慧高速公路的排水设计便是全生命周期成本分析的成功实践。该项目作为生态智慧公路示范工程，在排水设计中摒弃了传统硬质排水渠，系统性采用了下凹式中央分隔带、路侧植草沟、模块化地下蓄水池等生态排水设施，并结合 BIM+GIS 技术进行精准设计，预留了物联网传感器接口。虽然初期建设投资较传统设计有所增加，但项目通车后经受住了多次特大暴雨的考验，未发生内涝与水害问题，路面病害发生率显著降低，养护成本大幅下降，同时提升了沿线绿化覆盖率，改善了区域生态环境，实现了经济、社会与生态效益的统一。实践证明，基于全生命周期成本分析的排水设计方案，能够实现短期投资与长期效益的平衡，是更为经济、负责任的设计选择^[5]。

3 结语

高速公路排水系统的构建不是单纯的工程技术问题，而是融合水文循环规律、生态保护需求与气候适应能力的系统性任务，其质量直接决定道路结构的耐久性与区域环境的协调性。未来，应持续推动跨学科理念融合，深化数字化工具与生态材料的创新应用，同时强化全生命周期的动态管控与流域系统的协同考量，通过多维度优化实现排水功能、生态效益与交通安全的协同发展，为高速公路高质量建设与可持续运维提供支撑。

参考文献：

- [1] 谢在强. 高速公路路基路面排水设计中应该注意的关键问题 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集 (一). 海南省交通规划勘察设计研究院有限公司, 2025:1378-1381.
- [2] 代静. 高速公路路基路面排水设计中应该注意的关键问题 [J]. 运输经理世界, 2024, (08):22-24.
- [3] 那杨杰. 高速公路施工技术及道路路面施工的质量控制对策分析 [N]. 市场信息报, 2025-08-29(015).
- [4] 蔺娜. 高速公路路基路面设计思路 [J]. 汽车周刊, 2025, (02):53-55.
- [5] 周立森, 边俊超, 杨小天. 高速公路路基路面的施工现场管理措施 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(12):145-147+151.