公路路基排水系统设计对路基稳定性的影响分析

江　航

浙江省建投交通基础建设集团有限公司 浙江 杭州 310000

【摘　要】：公路路基长期承受车辆荷载、雨水冲刷和地下水侵蚀，水分聚集容易引发土体软化、承载力下降、边坡滑塌和路面沉降等问题。针对排水设施布置不合理、排水能力不足、地下水控制薄弱等情况，可通过完善边沟、截水沟、盲沟、渗沟和横向排水设施，优化纵横坡度，强化排水材料选用和施工质量控制，形成地表水快速排出、地下水有效疏导的系统化排水结构。合理的排水系统能够降低路基含水率，减轻水害对路基结构的破坏，提高路基抗变形能力、边坡稳定性和道路使用寿命。

【关键词】：公路路基；排水系统；路基稳定性；水害控制；排水设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.019

引言

公路路基作为道路结构的重要承载基础，其稳定状态直接关系到行车安全和道路使用质量。在实际工程中，雨水下渗、地下水上升、边坡汇水和排水不畅等因素，常会改变路基土体含水状态，使路基强度降低，甚至引发沉降、翻浆、边坡滑移等病害。许多路基损坏并非单纯由荷载引起，而是水分长期滞留后削弱结构性能所造成。排水系统设计是否合理，决定了路基内部和周边水分能否及时排出。通过分析排水系统设计对路基稳定性的影响，可以明确不同排水设施在水害控制中的具体应用路径，为路基耐久性提升提供清晰的技术依据。

1 公路路基水害形成机理分析

1.1 地表径流对路基边坡冲刷的影响

地表径流在路基边坡表面形成连续或间歇水流，其流速和流量受坡度、土壤渗透性及降雨强度影响。坡度陡或土体松散时，冲刷作用增强，易导致表层土体侵蚀和沟槽形成，破坏边坡保护层完整性。径流携带泥沙削弱土体结构，并加剧边坡不均匀沉降，降低局部承载力。高频降雨使冲刷累积，降低边坡稳定性，影响路基整体安全。有效地表径流控制成为保持边坡稳定、避免局部破坏和沉降的关键，需要在排水系统设计中通过合理沟槽布置与导流措施，实现快速排水并减缓冲刷力，确保路基结构长期稳固。

1.2 地下水位变化对路基土体强度的削弱

地下水位的升降直接改变路基土体的有效应力和强度特性。当地下水位上升时，土体毛细水和孔隙水压力增加，使土粒间摩擦力和内聚力下降，导致路基承载力减弱[1]。长期高水位状态容易产生软化层，降低土体抗剪强度，并在受荷条件下形成局部沉降或边坡滑移。地下水位波动加快了土体结构松散过程，同时增加孔隙水压力的动态变化，使路基内部形成潜在滑动面。有效的排水系统设计能够控制地下水位，减少土体过度湿润，从而维持路基强度，保证整体稳定性和抗变形能力，是路基耐久性设计的重要环节。

1.3 雨水渗入造成路基沉降变形的原因

雨水渗入路基土体后，沿土壤孔隙渗透并改变含水率分布，增加土体重量和孔隙水压力，降低抗剪强度。不同土质渗透性差异导致水分在路基内部形成不均匀分布，使局部土体产生沉降和不均匀沉降区，增加路面裂缝和变形风险。连续降雨或暴雨事件累积水分，使软弱土层长期受湿润，产生压缩沉降和边坡位移，进而影响道路承载性能。科学的排水设计通过优化纵横坡度、设置截水沟及地下排水管路，实现雨水快速排出和地下水渗透缓解，从而抑制路基土体含水率升高，降低沉降速度，提高路基稳定性和耐久性。

2 排水系统设计缺陷引发的稳定问题

2.1 边沟断面不足导致积水滞留

边沟断面尺寸不足会限制排水能力，导致降雨或地表径流无法及时排出，积水在路基边坡和路肩停滞，增加土体饱和度，降低土体强度。长期积水会引发表层土体软化、局部冲刷以及路基不均匀沉降，降低整体承载力。水流受阻时，沟底水位上升使土壤孔隙水压力增大，形成潜在滑动面，加速边坡滑移。断面优化设计需结合降雨量、坡度和土壤渗透性，保证排水通畅，同时与纵向排水设施衔接，实现地表水快速排出并降低水害风险，从而维持路基稳定。

2.2 纵横坡度不合理造成排水不畅

纵坡和横坡设计不合理会破坏路基排水动力条件，使地表水和地下水排出速度减缓。低纵坡会造成流水滞留和局部积水，高纵坡则增加径流冲刷力，导致边坡土体侵蚀。横坡不足会形成水流聚集区域，使土体长期湿润，增加沉降和滑坡风险。排水不畅还会引起水位升高，增加孔隙水压力，降低土体有效应力，削弱路基抗剪强度[2]。科学坡度设计需兼顾径流疏导效率与土体稳定性，通过合理纵横坡布置优化排水流线，确保水分及时排出路基结构，提高稳定性和使用寿命。

2.3 地下排水设施缺失引起土体软化

地下排水设施缺失或布置不完善，会导致地下水滞留在路基内部，土体含水率升高，形成软化层。水分累积增加孔隙水

压力，降低土体抗剪强度，使路基承载力下降，边坡易出现滑移或局部沉降。缺乏地下排水设施还使雨季和地下水位波动期间，水分在路基内部滞留，削弱土体结构性能。完善地下排水通过盲沟、渗沟或透水管道将地下水有效引出，控制含水率和孔隙水压力，使土体强度维持在安全范围内，从而保障路基稳定性和道路长期耐久性。

3 地表排水设施的优化设计方法

3.1 边沟断面尺寸合理确定

边沟断面尺寸直接影响地表径流的排泄效率及路基边坡稳定性。断面过小会导致降雨期间水流无法及时排出，形成积水滞留和局部冲刷，使边坡土体浸水软化，降低抗剪强度并加速不均匀沉降；断面过大则增加土方开挖量和施工成本，同时可能产生水流冲刷力过强，引起沟底和边坡侵蚀。因此，断面设计需结合设计暴雨强度、流域汇水面积、土壤渗透性及边坡坡度，科学计算流量和流速，实现水流顺畅排出而不破坏边坡。优化设计还需考虑沟槽纵坡的连续性和衔接性，通过调整沟底坡度与边坡角度，使流量均匀分布，减少水流集中冲刷风险。同时，可结合透水或稳固材料增强沟底抗冲性能，实现边沟功能与路基结构的协调统一，确保排水效率和边坡稳定性同步提升。

3.2 截水沟位置根据汇水范围布设

截水沟布设位置应精准控制汇水范围与排水路径，确保地表水在流入边沟前被有效截取，减轻边坡及路基表层土体饱和压力。截水沟布局需依托地形地貌分析，结合路基纵断面坡度、边坡坡长和降雨径流特性确定最佳位置，使雨水在接近路基前迅速分流。截水沟底部需保持稳定斜度，以防止水流滞留或返流，形成局部积水区域，同时与排水出口形成连续排水链路，确保径流沿导水路径顺畅输送[3]。布设过程中需综合考虑汇水面变化对流量的影响，合理设计沟宽、沟深及沟壁防冲处理，通过动态调整排水坡度及衔接断面，使截水沟能够适应极端降雨事件，提高路基水分控制精度，降低土体软化和边坡失稳风险。

3.3 急流槽出水口防冲结构细化处理

急流槽出水口是地表排水系统的关键节点，其防冲设计直接关系到水流能量释放及路基边坡安全。未经细化处理的出水口会产生高速水流冲击，造成槽口及周边土体侵蚀，引发沟槽扩大、土体脱落和边坡失稳。防冲结构设计需在出水口设置缓冲层或导流装置，将水流动能分散并均匀释放，同时控制出口坡度和出水角度，使水流沿安全路径排出。设计应结合水流量计算与土壤承载力评估，确定铺设砾石、格栅或混凝土护坡的形式与规格，实现排水效率与边坡抗冲能力的平衡。完善的防冲处理不仅降低水流冲刷风险，还保持急流槽长期稳定性，提高地表排水系统整体效能，对路基长期稳定性提供重要保障。

4 地下排水结构的针对性控制措施

4.1 盲沟用于降低路基内部含水率

盲沟作为地下排水系统的重要组成，主要作用是控制路基内部土体含水率，防止水分长期滞留引起的软化与沉降。盲沟通过沿路基纵向布设排水管道或透水层，将路基下方的毛细水和孔隙水引出，降低土体含水量。设计过程中需要根据土质渗透性、路基高度和荷载条件确定沟槽间距、深度和排水管规格，以确保地下水分能够均匀排出而不形成局部湿润区域。盲沟布设不仅降低了土体饱和度，还减少孔隙水压力对土体结构的影响，使有效应力维持在稳定范围，增强土体抗剪强度。施工中采用碎石、透水混凝土或无纺布滤层等材料保证盲沟排水通畅，同时阻止细颗粒堵塞管道。通过合理布设盲沟，可实现路基内部水分的动态控制，抑制软化层发展，维持边坡稳定性和路基整体承载性能，为道路长期耐久性提供可靠保障。

4.2 渗沟用于疏导地下水流向

渗沟作为地下排水设施的重要环节，通过设置沿边坡或路基底部的渗透沟道，将地下水沿预定方向引导排出，防止水分集中引起局部滑移或沉降。渗沟设计需考虑地下水流动路径、土壤渗透特性及路基荷载条件，确定沟槽纵深、坡度和排水断面，确保水流沿沟道顺畅输送。通过渗沟控制地下水位，可降低土体孔隙水压力，保持有效应力稳定，增强土体强度和抗剪能力[4]。渗沟内常结合透水材料及滤网设计，防止细颗粒堵塞，保证排水连续性和长期稳定性。合理布设渗沟不仅分散地下水压力，还可以将水流导向边沟或集水设施，实现地表和地下排水协同，提高路基整体稳定性，减少沉降变形和边坡失稳的风险，为路基结构安全提供可靠支撑。

4.3 透水材料用于提升排水通道稳定性

透水材料在地下排水系统中起到支撑排水通道、提升排水效率和防止堵塞的作用。通过采用级配合理的碎石、透水混凝土或排水砖填充排水沟槽，可确保孔隙连通性和水流通畅性，同时分散水流冲击能量，减少沟槽侵蚀和土体扰动。透水材料的设计需结合水流量计算和土体承载能力，优化颗粒级配和压实密度，既保证排水通畅，又维持沟体结构稳定。材料布局应考虑地下水位变化和长期降雨渗透的影响，确保土体含水率得到有效控制，防止局部湿润引发软化或沉降。透水材料还能够形成长期稳定的排水网络，配合盲沟和渗沟协同工作，实现地下水分高效疏导，增强路基内部结构稳定性，提高道路整体耐久性和抗变形能力，为公路路基排水设计提供可持续的技术保障。

5 排水施工质量对路基稳定性的保障

5.1 沟槽开挖尺寸严格控制

沟槽开挖尺寸的精确控制是排水系统施工质量的关键，对路基稳定性具有直接影响。开挖深度不足会导致排水设施埋设

不够深入，地下水无法有效引导，土体孔隙水压力升高，降低土体抗剪强度并增加边坡滑移风险。开挖过深则破坏路基承载层，增加土体扰动和沉降隐患，同时增加施工成本和施工难度。断面宽度若不符合设计要求，会影响排水材料填充和透水层形成，造成排水不畅或局部堵塞。施工过程中需结合设计图纸严格控制沟槽尺寸，并对沟底标高和边坡角度进行动态监测，保证沟槽形态与排水设计一致。高精度开挖能够确保水流顺畅，减少局部积水对土体的影响，使排水系统功能与路基结构紧密结合，从而提升整体稳定性和使用寿命。

5.2 排水材料级配满足渗排要求

排水材料的级配直接决定排水通道的渗透效率和长期稳定性。材料颗粒级配不合理会导致孔隙率下降，阻碍水流通畅，引起堵塞和水分滞留，使路基土体含水率上升，降低有效应力和抗剪强度。过大颗粒或不均匀填充则可能形成局部空隙，导致土体沉降或透水不均匀。材料级配应根据土体渗透特性、设计排水量和水力坡度进行优化，通过科学组合大颗粒、中颗粒和细颗粒比例，形成稳定透水结构[5]。同时需控制压实密度和填充方式，保证材料在排水压力和长期荷载下不产生沉降或位移。合理的材料级配能够确保排水通道持久畅通，快速疏导水分，降低土体软化和边坡失稳风险，实现排水系统与路基结构的功能协同。

5.3 接口衔接减少堵塞渗漏风险

排水管道和沟槽接口衔接质量直接影响排水系统整体运行效率。接口密封不严或衔接不平整会产生渗漏或堵塞，使部分水分滞留在路基土体中，增加孔隙水压力，降低土体承载力和边坡稳定性。接口设计应保证水流平稳过渡，采用密封材料和支撑结构防止管道沉降或错位，同时避免接口处形成局部水流湍动，减少侵蚀和沉降隐患。施工过程中需对接口对齐、管道标高和衔接角度进行严格监测和校正，确保排水流线连续无阻。完善的接口衔接不仅保障排水效率，还降低局部水害风险，使排水系统与路基土体形成整体稳定结构，为路基长期稳定性和道路耐久性提供可靠技术支撑。

6 排水系统运行效果及路基稳定提升路径

6.1 含水率降低增强路基承载能力

含水率降低能够直接改善路基土体受力状态，使土颗粒之间保持较高摩擦力和黏结强度，减少孔隙水压力对有效应力的削弱。排水系统运行稳定后，地表水能够沿边沟、截水沟及时排出，地下水能够通过盲沟、渗沟和透水层持续疏导，路基内部水分不再长期聚集，土体由高湿状态逐渐转向相对稳定状态。含水率得到控制后，路基填料压实度保持能力增强，受车辆荷载反复作用时不易产生塑性变形，路面结构层传递下来的压力能够被路基均匀承受。对于细粒土、粉质土等遇水强度变化明显的土体，排水效果越稳定，软化范围越小，沉降发展速度越慢。绿色低碳建设理念下，排水系统不应只追求快速排水，还应注重水分调控的连续性和结构适配性，通过渗排结合、分层导排和材料耐久配置，减少反复维修造成的资源消耗，使路基承载能力在长期运营中保持稳定。

6.2 边坡排水顺畅减少滑塌风险

边坡排水顺畅能够降低坡体表层冲刷和内部渗透压力，减少滑塌形成的水力条件。降雨进入边坡区域后，若排水路径清晰，坡面水流可经截水沟、急流槽和边沟有序排出，避免水流沿坡面无序漫流造成冲沟、掏蚀和坡脚削弱。坡体内部水分若能通过渗沟或反滤排水层及时释放，孔隙水压力便不易持续升高，潜在滑动面形成概率随之降低。排水顺畅还可减轻坡脚长期浸泡现象，使坡脚支撑条件保持稳定，防止边坡上部土体因支承削弱而产生位移[6]。新发展理念要求排水设施与生态防护协同配置，既要保证水流排泄效率，也要降低硬质工程对坡面自然稳定状态的扰动。通过坡顶拦截、坡面导流、坡脚排放和内部释压形成分级控制体系，可使边坡水分由集中冲刷转为有序排导，滑塌风险得到有效压缩，路基横向稳定性同步增强。

6.3 排水设施协同提升道路耐久水平

排水设施协同运行能够提升路基、边坡和路面结构之间的整体耐久水平。单一排水设施只能解决局部水分问题，边沟、截水沟、急流槽、盲沟、渗沟和透水材料形成连续系统后，地表水、坡面水和地下水才能按照不同路径分层排出，避免水分在路基内部反复迁移。协同排水状态下，路肩积水、边坡浸润、基层受潮和路基软化等问题能够被同步控制，道路结构受水损害程度明显减轻。排水设施之间的衔接质量决定系统运行效率，若出口高程、流向坡度和反滤层设置协调合理，水流便可稳定进入下一级排水通道，减少倒灌、堵塞和局部渗漏。智慧公路建设理念下，可将水位监测、湿度感知和排水设施巡检结合起来，及时识别易积水部位和排水能力衰减区域，提高养护决策精度。排水系统由被动排水转向主动调控后，路基稳定性、路面平整度和结构服役周期能够形成联动提升，公路运行安全性和耐久水平更加可靠。

7 结语

排水系统运行效果显著改善路基含水状态，有效降低土体含水率后提升承载性能；顺畅排水减弱边坡水力作用，从而限制滑塌风险；多类排水设施协同作用提高道路整体耐久性。持续完善排水设计和施工管理，能够为路基稳定性提升提供技术支撑和实践依据。

参考文献：

[1] 石袁.多雨地区公路路基中央分隔带排水系统施工技术[J].产品可靠性报告,2025,(9):158-159.

[2] 魏斌.降雨条件下高速公路路基边坡稳定性研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(22):181-183.

[3] 张茂然.公路路基边坡稳定性及防护措施分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(7):16-19+23.

[4] 黄勇,陈曦.成绵扩容高速公路路基路面排水系统综合设计研究[J].建筑技术开发,2023,50(5):127-129.

[5] 刘炳宇.高速公路路基排水系统的施工要点分析[J].运输经理世界,2022,(28):29-31.

[6] 黄江.高速公路路基路面排水系统施工质量控制措施[J].四川水泥,2022,(1):269-270.