

铁路路基边坡水害病害成因及整治施工要点

闫 伟

国家能源集团新朔铁路有限责任公司大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010010

【摘 要】：铁路路基边坡水害是威胁铁路运营安全的常见病害，边坡溜坍占整体水害的 50%以上，汛期强降雨是主要诱发条件。本文依托铁路路基施工规范，从水岩土耦合作用、地表径流冲刷、地下水渗流、路基结构缺陷四个方面分析水害成因。结合现场施工经验，针对性提出源头控水防控、地表排水加固、地下水截排治理、填料与结构补强的成套施工技术，可为铁路路基边坡水害整治与养护工作提供参考。

【关键词】：铁路路基；边坡水害；整治施工

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.031

引言

铁路路基边坡长期受降雨、地下水及岩土特性影响，水害病害频发，严重破坏路基结构稳定性，干扰铁路正常行车。我国多数铁路沿线汛期降雨集中，雨水入渗与坡面冲刷极易引发边坡溜坍、滑坡等病害，缩短路基使用寿命。为有效防控边坡水害隐患，提升路基抗灾能力，本文系统分析边坡水害的形成机理，总结科学可行的整治施工要点，为现场工程治理提供技术依据。

1 铁路路基边坡水害病害概述

铁路路基边坡水害始终是干扰铁路稳定运营的核心病害类型，依据国家铁路局出台的路基病害分类行业标准，运营阶段铁路路基可识别的灾害类型超二十种，水害引发的边坡溜坍、滑坡、泥石流、崩塌落石等问题发生频次最高^[1]。现有工程调研数据表明，边坡溜坍在全部路基水害事件中占比突破 50%，是铁路路基边坡最普遍、最易复发的水害问题。水害问题的发生存在明显的时间规律，每年 7 至 8 月主汛期是病害高发时段，区域短时强降雨强度可达 50mm 至 100mm，快速的雨水入渗过程和持续性坡面冲刷会直接造成边坡土体失稳破坏。特殊岩土分布区域水害问题表现更为突出，膨胀土、黄土、红黏土等土体受水力作用后抗剪强度会出现大幅衰减，热带、亚热带湿润气候区年降雨量超 1200mm，强对流天气频发造成局部径流聚集，坡脚冲刷、滑面土体润滑等问题进一步加剧边坡破损程度。水害造成的工程损害存在明显差异化，轻度水害会造成坡面土体流失、防护结构破损老化，大规模滑坡、崩塌灾害会直接掩埋行车线路，造成铁路行车中断，铁路运输体系的整体安全稳定性面临严峻挑战。

2 铁路路基边坡水害病害成因分析

2.1 水-岩土相互作用是路基边坡水害的核心成因

边坡土体与岩体和水体产生的物理、化学耦合反应是各类边坡水害滋生的内在根本原因。土体浸水后颗粒表面结合水膜厚度增加，土体黏聚力力学指标出现明显衰减，铁路路基岩土室内专项试验的统计数据表明，黏性土饱和状态下的有效黏聚

力较天然状态可降低 35kPa 至 55kPa。膨胀土、红黏土等特殊岩土会随干湿交替环境出现反复胀缩变形，土体内部不断生成新生微裂隙，完整的土体结构逐步破碎解体，可溶性岩土长期受渗流水溶蚀作用会衍生大量孔隙与空洞，岩体原有节理裂隙被水体填充润滑，结构面摩擦抗力持续降低。水体持续渗入岩土内部会改变土体自重应力与有效应力的分布状态，边坡整体抗滑安全储备不断下降，外部环境出现轻微扰动就会出现溜坍、滑移等失稳现象，各类次生水害问题均依托这种水岩、水土耦合作用逐步发展。

2.2 降雨与地表径流冲刷对边坡表层的破坏作用

大气降雨是边坡表层水害发育的主要外部诱因，雨水入渗和坡面径流冲刷会协同破坏边坡表层结构^[2]。铁路防洪监测历年统计数据显示，单次降雨量突破 40mm 后坡面会形成集中径流，坡面水流速度提升后会裹挟表层松散土颗粒形成面蚀病害，长期冲刷作用下坡面会形成深浅不一的冲沟。排水设施配套不完善的边坡不具备快速横向排水条件，雨水沿坡面竖向汇集冲刷，汛期反复作用下冲沟深度、宽度持续拓展，边坡表层防护结构被逐步切割破坏。暴雨天气下雨水快速下渗造成表层土体饱和软化，径流拖拽力会引发坡面土体片状剥落、表层溜塌，坡脚区域长期受汇流水体淘刷，原有压重土体持续流失，边坡临空面范围不断扩大，表层防护砌体出现悬空、开裂问题，局部表层破损会逐步发展为大面积边坡失稳病害。

2.3 地下水渗流与潜蚀对路基内部稳定性的影响

边坡内部存在的上层滞水、层间承压水、基岩裂隙水会形成稳定渗流场，从内部破坏路基整体稳定性。地下水沿土体孔隙、结构裂隙定向流动产生渗透压力与动水压力，软弱夹层出现缓慢滑移趋势，细小土颗粒随水流迁移流失形成潜蚀、管涌病害，长期发育后路基内部会形成贯通性空洞结构。路基病害检测资料统计结果显示，存在持续地下水渗流的边坡区段滑动风险较普通区段提升 2.1 倍，这类内部隐蔽病害发育初期难以通过直观观测发现。地下水位周期性升降会改变渗流方向，土体颗粒排布状态持续受到扰动，软弱结构带力学性能不断弱化，潜在滑动面逐步贯通成型。降雨停止后边坡内部渗流作用

仍会持续进行,缓慢式深层滑坡隐患不断滋生,隐蔽性高、处置难度大是这类内部水害的主要特征,工程治理难度远高于常规表层冲刷病害,也对后续针对性排水整治施工提出严苛技术要求。

2.4 路基填料性质与边坡结构设计的内在缺陷

路基填筑填料选型不当、边坡构造设计不合理,会降低边坡抗水侵蚀能力,大幅加快各类水致病害发展速度。部分路基填筑施工就地取材,填筑土体细粒成分占比偏高,粉质土、淤质土等填料压实均匀性较差,局部压实度无法满足93%的规范设计控制标准,土体内部孔隙发育、透水性能紊乱,雨水极易渗入土体内部并聚集留存。边坡设计坡率偏陡、分级平台尺寸不足会拉长坡面汇水路径,截水沟、泄水槽等排水构造布设间距不合理,排水体系衔接存在盲区,坡面雨水疏导排出效率偏低。部分边坡防护结构形式和区域水文地质条件适配性较差,刚性防护结构开裂后未设置配套防渗漏补救构造,水体沿裂缝持续下渗,填料自身性能短板叠加设计施工疏漏,形成水害发育的先天条件,汛期外部水力作用会快速诱发各类边坡失稳问题。

3 铁路路基边坡水害病害整治施工要点

3.1 基于水作用机理的源头防控施工要点

水土、水岩耦合作用引发的土体强度衰减是边坡水害的核心诱因,源头防控施工以阻隔水体与边坡岩土接触、切断水循环浸润路径为核心目标,各项施工工序均围绕隔水控水构造施工落地开展^[3]。施工前期需要完成全线边坡水文条件摸排勘测,精准定位常年积水洼地、坡面汇水起点、裂隙渗水露头关键点位,将这类区域划定为源头治理重点区段,依据铁路路基防洪施工技术规程的勘测要求,单处汇水面积超800 m²的坡面需要单独编制专项隔水施工方案。存在干湿循环变形问题的膨胀土、红黏土边坡可采用封闭隔水工艺,坡面浮土杂物清理平整后分层喷涂改性乳化沥青防渗涂层,涂层整体厚度控制在2mm至3mm,涂层搭接宽度统一设置为150mm,杜绝拼接缝隙形成渗水通道。节理发育的岩质边坡可通过压力注浆封堵浅表裂隙,注浆压力维持在0.2MPa至0.4MPa,水泥水玻璃双液浆可充分填充闭合张开型裂隙,雨水下渗通道被彻底阻断,结构面水体软化问题得到根治。低洼积水区域提前开挖集水坑并配置临时抽排设备,整治施工全过程严控基底土体含水率,规避施工扰动加剧土体软化变形。

3.2 坡面防冲刷与地表排水系统施工要点

地表径流冲刷引发的坡面剥蚀、冲沟发育、坡脚淘刷是表层水害的主要诱因,现场施工可通过完善地表排水体系、硬化防护坡面的方式抵御径流侵蚀,各类施工工序分步推进,保障排水疏导与坡面防护施工同步成型。施工阶段首先清理坡面冲沟及坍塌松散土体,深度超300mm的冲沟采用级配碎石分层

回填夯实,单层压实厚度控制为200mm,压实度标准不低于95%,指标严格遵循铁路路基边坡防护施工验收规范。地表排水体系施工优先完成坡顶截水沟浇筑施工,截水沟采用矩形截面结构,内侧净宽400mm、净高350mm,纵向坡度不小于0.3%,规避沟内积水淤积问题,截水沟每25m设置一道伸缩缝,缝内填充防渗密封材料,杜绝沟体渗水、侧渗侵入坡体内部。

边坡分级平台位置布设横向排水沟,坡面设置竖向泄水槽实现上下排水构造贯通,泄水槽布设间距依据坡面汇水测算结果控制在4m至6m,所有排水构筑物接缝位置均做防渗抹面处理,避免水流外溢冲刷边坡侧壁结构。坡面防护施工结合冲刷病害程度差异化实施,轻度冲刷坡面采用三维土工网植草防护工艺,土工网平铺拉紧固定,锚固钉入土深度不小于150mm,网面覆土厚度维持80mm左右。病害冲刷严重的坡面采用预制混凝土块满铺防护,块体预留排水缝隙,底部铺设100mm厚级配反滤层,阻断径流裹挟细颗粒土体流失的路径。坡脚位置现浇混凝土挡水埂,结构高度设置为250mm,阻挡坡面径流直接冲刷路基坡脚,有效解决长期淘刷造成的坡脚土体掏空问题。

3.3 地下水截排与路基加固施工要点

地下水渗流、潜蚀管涌引发的深层滑移、内部空洞病害隐蔽性强、治理难度高,现场施工可分为地下水疏导截排、深部路基加固两大模块,地下水治理作业优先开展,消除内部渗流对边坡稳定性的持续弱化影响。施工前期采用地质雷达探测技术精准定位路基内部空洞、渗流通道、软弱夹层的分布范围,上层滞水富集的边坡区段在坡体中部横向布设水平疏干孔,钻孔倾角控制在5°至8°,单孔钻孔深度6m至10m,孔内铺设外包土工布的透水滤管,滤管外接集水管接入整体排水系统,实现内部滞留水体的持续导出。存在层间渗流、潜蚀隐患的边坡可施工竖向截水帷幕,通过连续小直径注浆孔分段注浆形成隔水屏障,阻断水体横向渗流路径,普通硅酸盐水泥浆液为主要注浆材料,注浆速率结合地层吸浆量动态调整,规避注浆压力扰动原有路基结构稳定性。路基内部已形成潜蚀空洞的病害点位采用低压填充注浆工艺,空洞腔体注浆密实度满足路基检测验收标准,彻底消除内部临空结构^[4]。

深层滑移风险较高的边坡同步实施锚固加固施工,锚杆钻孔贯穿潜在滑动面,锚固段有效长度不小于3.5m,注浆固结完成后开展张拉锁定作业,锚杆约束作用可抵消渗透压力产生的滑移推力。边坡底部软弱地基可布设碎石桩完成加固处理,桩体布设间距1.2m,软弱土体置换后路基整体密实度显著提升,渗流作用引发的土体剪切破坏概率大幅下降。既有线路基整治检测数据显示,完成地下水治理与深部加固的边坡,深层滑移病害复发率可降低62%左右。施工收尾阶段在边坡区域布设长期地下水位监测孔,固定周期记录水位变化数据,动态调整水体疏排运行模式,规避地下水位反复波动再次引发渗流破坏,

彻底解决地下水造成的路基内部稳定性隐患。见图1

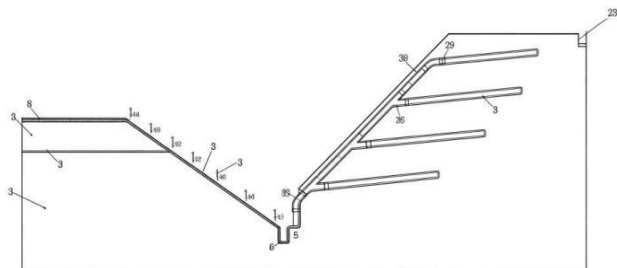


图1 路基边坡地表地下联合排水整治结构示意图

3.4 路基填料改良与边坡结构补强施工要点

填料性能缺陷、边坡结构设计遗留问题会造成边坡抗水害能力先天不足,现场施工通过填料优化整改、边坡结构补强修复补齐路基抗灾短板。原有填筑填料细粒含量超标、压实度不达标的病害路段采用局部挖换施工工艺,挖除土体含水率超标、压实质量不达标的软弱填土,换填粒径5mm至20mm的级配砂砾填料,分层填筑厚度固定为200mm,逐层碾压验收压实度,填筑质量满足不低于93%的路基填筑设计规范标准。不具备大面积开挖换填条件的区段采用原位填料改良技术,土体内部均匀掺入石灰优化性能,结合土工试验结果将掺灰量控制在5%~8%,拌和深度不小于400mm,土体整平碾压后膨胀变形、渗透变形特性得到改善,填料水稳性能显著提升,有效遏

制雨水入渗引发的土体劣化问题。

边坡结构缺陷整改针对陡坡率问题开展自上而下的削坡减载作业,坡面修整至规范设计坡率,人工拍压平整坡面消除局部陡坎造成的汇水集中点位。原有分级平台宽度不足、积水严重的区域开展拓宽修补作业,平台顶面设置2%的向外排水横坡,杜绝平台积水下渗坡体。破损开裂的防护结构剔除松动砌体后重新浇筑混凝土补强,修补区域增设拉结钢筋提升结构整体性,新旧结构接缝位置铺设防渗土工布阻断渗水通道。排水构筑物布设不合理、衔接存在盲区的区域补设小型引水沟槽,补齐排水体系存在的衔接短板。全部补强施工工序完成后开展边坡外形、排水连通性、填筑质量综合验收,核对边坡几何尺寸、填料技术指标、排水构造布设参数的合规性,彻底消除设计与施工阶段遗留的结构缺陷,路基边坡长期抗水蚀能力得到系统性提升^[5]。

4 结语

本文归纳了铁路路基边坡水害的分布特征与危害,明确水岩土相互作用为核心致病因素,梳理了表层冲刷、内部渗流及结构缺陷等辅助诱因。针对不同病害成因,匹配对应的专项整治施工措施,构建了从源头防控、排水优化到结构补强的完整治理体系。研究成果能够有效提升路基边坡抗水害能力,对铁路路基病害治理及安全运维具有实际工程意义。

参考文献:

- [1] 黄一雄.运营铁路路堑边坡病害分析与整治[J].山西建筑,2025,51(1):117-120+124.
- [2] 胡明华,张百永,许魁.填方路堤水毁滑坡机理及加固措施比选研究[J].中外公路,2024,44(3):26-34.
- [3] 李芬,刘亦韬,赵澳权.水位变化对浸水拓宽路基渗流特征和稳定性的影响[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(2):127-134.
- [4] 于佳尧.铁路路基边坡稳定性分析及防护技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(32):68-70.
- [5] 胡欣,熊帮彬,肖剑,等.基于SVM-BP降雨型黄土滑坡灾害安全评价模型研究[J].中国公路学报,2023,36(4):68-80.