

高速公路路基边坡冲刷变形特征监测及防护措施研究

霍君英 赵娜 张治

河北省交通规划设计研究院有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 高速公路路基边坡冲刷变形易引发路基失稳, 威胁行车安全。本文分析了路基边坡工程地质特征、冲刷变形力学机理及影响因素, 总结冲刷变形的时空分布与阶段性特征。重点研究边坡冲刷变形监测指标、常用技术及实施流程, 优化监测数据处理方法, 结合不同地质条件与冲刷等级, 提出针对性防护原则、常用技术及优化方案。研究可为高速公路路基边坡冲刷变形监测与防护设计提供实用参考。

关键词: 高速公路路基边坡; 冲刷变形特征; 监测技术; 防护措施

引言: 随着高速公路建设规模扩大, 路基边坡冲刷变形问题日益突出, 频繁引发坡面剥蚀、溜塌等病害, 影响道路通行效率与安全, 增加养护成本。河北省地处华北地区, 降雨分布不均, 部分路段边坡地质条件复杂, 冲刷变形隐患突出。目前现有监测与防护技术仍存在适配性不足等问题。基于此, 本文聚焦高速公路路基边坡冲刷变形特征监测及防护措施, 结合工程实际开展研究, 为解决边坡冲刷难题、保障交通工程安全稳定提供技术支撑。

1 高速公路路基边坡冲刷变形理论基础

1.1 路基边坡工程地质特征

路基边坡的工程地质特征是其冲刷变形的基础条件, 直接决定边坡抗冲刷能力。高速公路路基边坡多由填土、粉质土、砂类土及岩石等材料构成, 不同地质材料的物理力学性质差异显著。填土边坡颗粒级配、压实度不足易导致孔隙率过大, 遇水后强度骤降; 粉质土边坡黏聚力较弱, 雨水渗透后易发生软化、崩解; 岩石边坡则受节理裂隙发育程度影响, 裂隙导通雨水会加速风化剥落。

1.2 边坡冲刷变形的力学机理

边坡冲刷变形本质是坡面水流与边坡岩土体相互作用的力学过程, 主要分为水力侵蚀和力学破坏两个阶段。水力侵蚀阶段, 坡面径流通过冲击、磨蚀作用, 带走边坡表层松散颗粒, 使岩土体结构逐渐松散; 随着冲刷加剧, 边坡岩土体有效应力减小、孔隙水压力增大, 抗剪强度显著降低, 进入力学破坏阶段。此时, 边坡内部形成渗透通道, 岩土体抗滑力不足, 易发生浅层溜塌、坡面冲刷沟等变形, 严重时甚至会引发整体滑坡, 破坏路基稳定性, 影响高速公路正常通行。

1.3 影响边坡冲刷变形的主要因素

影响高速公路路基边坡冲刷变形的因素可分为自然

因素和人为因素。自然因素中, 降雨强度、历时及频率是核心, 强降雨会形成高速坡面径流, 大幅提升冲刷能力; 地形地貌决定坡面径流路径与流速, 坡度过陡、坡面过长会加剧冲刷。人为因素主要包括路基施工质量, 如填料选择不当、压实不达标; 边坡防护设计不合理, 未结合地质条件选用适配防护措施; 以及运营期间的养护不到位, 未能及时修复坡面破损, 导致冲刷隐患持续发展, 最终引发边坡变形^[1]。

2 高速公路路基边坡冲刷变形特征

高速公路路基边坡冲刷变形具有明显的时空分布特征和阶段性, 贴合实际工程中边坡冲刷的真实表现, 且与地质条件、降雨工况密切相关。空间上, 变形主要集中在边坡中下部及坡脚, 此处坡面径流流速最大、冲刷力最强, 易形成冲刷沟、坡面剥蚀等现象, 坡脚掏空后会进一步诱发上部边坡溜塌; 岩质边坡变形多沿节理裂隙发育区域分布, 土质边坡则以大面积表层软化、颗粒流失为主。时间上, 变形呈现阶段性, 降雨初期以表层轻度冲刷为主, 随降雨持续逐渐发展为深层冲刷, 雨后若养护不及时, 变形会持续加剧。

3 高速公路路基边坡冲刷变形监测技术

3.1 监测指标选取与布设原则

依据高速公路路基边坡冲刷变形实际特征, 监测指标需聚焦坡面冲刷、坡体变形及水文工况三大核心, 布设需遵循以下方面: (1) 核心监测指标: 一是坡面冲刷指标, 包括冲刷深度、冲刷面积及冲刷沟发育尺寸, 重点反映表层岩土体流失情况; 二是坡体变形指标, 涵盖边坡位移、沉降及坡体裂缝宽度, 监测深层变形隐患; 三是辅助监测指标, 包括坡面径流流速、降雨量及岩土体含水量, 为冲刷变形分析提供基础数据。(2) 布设原则: 监测点优先布设在边坡中下部、坡脚等冲刷高发区域, 以及地质条件薄弱、节理裂隙发育部位; 位移监测

点需沿边坡纵向、横向均匀布设,间距控制在5-10m,坡面冲刷监测点需避开植被遮挡,确保数据采集准确;辅助监测设备需布设在径流汇集处及边坡顶部,避免受坡面冲刷影响。

3.2 常用实际监测技术及设备应用

结合高速公路现场施工及运营特点,选取技术成熟、操作便捷、适配野外环境的监测技术,具体应用如下:(1)坡面冲刷监测技术:采用测针法与冲刷槽法结合,测针按网格布设,插入边坡表层岩土体,定期测量测针外露长度,计算冲刷深度;冲刷槽法在边坡中下部布设固定冲刷槽,记录不同时段槽内泥沙淤积量,换算冲刷强度,设备成本低、操作简单,适配各类土质边坡。(2)坡体位移监测技术:以GNSS定位监测为主,辅以测缝计、沉降计。GNSS监测点固定在边坡稳定部位及变形敏感点,实时采集三维位移数据,数据精度可达毫米级;测缝计嵌入坡体裂缝处,监测裂缝开合度变化;沉降计布设在坡脚及边坡平台,监测坡体竖向沉降,适配岩质、土质边坡的长期监测。(3)水文及岩土体参数监测技术:降雨量采用自动雨量计,实时记录降雨强度及历时;坡面径流流速采用旋杯式流速仪,布设在坡面径流汇集处;岩土体含水量采用时域反射仪(TDR),插入边坡不同深度,定期采集含水量数据,为分析冲刷变形诱因提供支撑。

3.3 现场监测实施流程

依据高速公路现场工况,监测实施遵循“前期准备-设备安装-数据采集-日常维护”的流程。(1)前期准备:现场勘察边坡地质条件、冲刷现状,确定监测范围及重点区域,明确监测指标及精度要求,编制详细监测方案,准备监测设备及耗材,对监测人员进行现场操作培训。(2)设备安装:按照布设原则,依次安装测针、GNSS监测点、测缝计、雨量计等设备,确保设备固定牢固,接线规范,调试设备参数,进行试运行,确认设备正常采集数据后,正式投入使用。(3)数据采集:采用自动采集与人工巡检相结合的方式,GNSS、雨量计等设备实时自动采集数据,每日导出;测针、冲刷槽等每周人工测量1次,降雨期间加密监测频次,记录监测数据及现场工况。(4)日常维护:定期检查监测设备,清理设备表面泥沙、杂物,排查设备故障,及时更换损坏部件;定期校准设备精度,确保监测数据准确;整理监测记录,建立监测档案,为后续数据处理及分析提供依据^[2]。

4 高速公路路基边坡冲刷变形监测数据处理与分析

高速公路路基边坡冲刷变形监测数据处理与分析具体流程如下:(1)监测数据预处理。首先对采集的原始

数据进行筛选,剔除因设备故障、环境干扰导致的异常值、缺失值,采用线性插值法补充缺失数据,保证数据连续性;对坡面冲刷、位移、含水量等不同类型数据进行标准化处理,统一数据单位与精度,消除量纲影响,为后续分析奠定基础。(2)监测数据分类分析。针对坡面冲刷数据,计算不同时段冲刷深度、面积的变化量,梳理冲刷强度的时空分布规律;对位移、沉降及裂缝宽度数据,分析其变化速率与累计变化量,判断坡体变形趋势;结合水文及岩土体参数数据,关联冲刷变形与降雨、含水量的相关性。(3)数据验证与整理。采用误差分析方法,校验处理后数据的精度,确保数据误差控制在允许范围内;将处理后的有效数据、分析结果按监测时段、监测点位分类整理,形成规范的数据报表,留存原始数据与处理记录,为后续防护措施设计、变形趋势预判提供基础数据支撑^[3]。

5 高速公路路基边坡冲刷防护措施设计

5.1 防护措施的设计原则与要求

高速公路路基边坡冲刷防护措施设计,需结合边坡地质条件、冲刷变形特征及工程实际工况,遵循科学合理、经济适用原则,确保防护效果贴合现场需求。具体要求如下:(1)针对性原则:结合边坡岩土体类型、坡度、高度及冲刷程度选用防护技术,杜绝盲目套用,土质边坡重点防控表层冲刷崩解,岩质边坡防控节理裂隙冲刷剥落,坡脚防控掏空破坏,实现因地制宜。(2)经济性与实用性原则:在保障防护效果的前提下,优先选用技术成熟、施工便捷、造价合理的措施,降低施工及养护成本,适配现场进度,避免过度防护浪费。(3)整体性与耐久性原则:防护措施需与路基、边坡协同,构建完整体系,兼顾坡顶、坡面、坡脚防护,选用抗冲刷、抗风化、耐腐蚀材料,保障长期稳定。(4)合规性要求:严格遵循相关规范,满足边坡稳定性验算标准,确保可抵御设计范围内降雨、径流冲刷,避免设计违规导致防护失效。

5.2 常用冲刷防护技术及适用条件

结合高速公路路基边坡实际冲刷场景,常用冲刷防护技术分为坡面防护、坡脚防护两大类,各类技术适配不同地质条件和冲刷等级,具体如下:(1)坡面防护技术:核心是减少坡面径流冲刷力、保护表层岩土体,重点防控表层冲刷,适用于不同类型边坡。一是植草防护,选用狗牙根、紫穗槐等耐旱耐贫瘠、根系发达的植物,通过根系固定土体、减缓径流,适用于坡度 $\leq 1:1.5$ 、冲刷较轻的土质边坡,施工简单、造价低廉且具生态性,需定期养护。二是喷播植草防护,将草籽、

营养土、粘结剂混合后喷播于坡面形成植被层,适用于1:1.5~1:2.0、坡面不平整的土质边坡,固土和抗冲刷能力优于普通植草,适配中度冲刷。三是浆砌片石护坡,采用达标抗风化片石与水泥砂浆砌筑,坡面设泄水孔排渗水,适用于1:1.0~1:1.5、冲刷严重的土质或岩质边坡,防护强度高、耐久性好,但施工复杂、造价高,需严控砌筑质量。四是三维植被网防护,铺设网体后喷播植草,利用网体分散径流、增强固土效果,适用于冲刷中等、易表层溜塌的土质边坡,兼顾生态性与防护性,适配范围广。(2)坡脚防护技术:作为防护关键环节,主要防控坡脚掏空、冲刷,适用于各类边坡坡脚。一是浆砌片石护脚,坡脚砌筑挡墙,高度按冲刷深度确定(通常1.5~3.0m),底部嵌入稳定土层或岩层,顶部衔接坡面,适用于坡脚冲刷严重、有掏空风险的各类边坡,可有效固定坡脚。二是抛石防护,选用15~50cm抗冲刷石块,坡脚抛投形成厚度不小于50cm的抛石层,适用于坡脚水流冲击强烈、地质复杂的边坡(如河道附近),施工便捷、成本适中,可按需补充抛石。三是格宾石笼防护,镀锌钢丝格宾笼内填石块铺设于坡脚,形成柔性防护结构,适用于坡脚冲刷剧烈、有水流淘蚀的边坡,可适应微小变形,抗冲击、易维护。(3)辅助防护技术:配合主防护提升整体效果。一是截水沟防护,边坡顶部、平台设截水沟,汇集雨水径流引流至排水系统,减少坡面径流,适用于降雨量大、坡面较长的边坡,需定期清理防堵塞。二是泄水孔设置,护坡结构上按2~3m间距设泄水孔,排出渗水、降低坡体孔隙水压力,避免岩土体软化,适用于浆砌片石护坡、挡墙等结构^[4]。

5.3 针对性防护方案的优化设计

结合高速公路路基边坡不同地质条件、冲刷等级,针对现有防护技术不足进行针对性优化,确保方案适配现场实际,具体如下:(1)土质边坡防护优化:针对土质边坡易软化、易冲刷的特点,优化组合防护技术。缓坡($\leq 1:1.5$)采用“植草+截水沟”组合方案,兼顾经济性与生态性;陡坡(1:1.5~1:2.0)采用“三维植被网喷

播+坡脚浆砌片石护脚”方案,增强坡面固土能力和坡脚稳定性,同时在坡面增设泄水孔排出渗水,减少坡体软化隐患。(2)岩质边坡防护优化:针对岩质边坡节理裂隙发育、易风化剥落的特点,对节理裂隙密集区域,采用“水泥砂浆勾缝+浆砌片石护坡”方案,封堵裂隙防止雨水渗透;对坡度较陡、冲刷严重的岩质边坡,优化护坡厚度、增加泄水孔密度,避免雨水在坡体内部积聚,同时在坡脚增设抛石防护,抵御径流冲击,提升整体稳定性。(3)特殊工况防护优化:针对降雨量大、汇水集中的边坡,优化截水沟布置,采用梯形截水沟增大排水能力,同时在坡脚设置格宾石笼防护,提升抗冲刷能力;针对填方边坡,防护设计前优化路基填料压实度,选用抗冲刷性能优良的填料,从源头减少冲刷隐患,防护方案采用“喷播植草+坡脚护脚”组合,适配填方边坡变形特性,保障防护效果^[5]。

结束语:本文围绕高速公路路基边坡冲刷变形特征监测及防护措施展开系统研究,明确了边坡冲刷变形的理论基础、特征规律,优化了监测技术与数据处理方法,提出了适配不同工况的防护方案及优化策略。研究成果可有效指导高速公路边坡冲刷监测与防护设计。后续可结合更长周期的监测数据,进一步优化防护方案的长效性,同时探索智能化监测技术的应用,为高速公路边坡安全防控提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1]屈江.高速公路路基边坡冲刷变形特征监测及防护措施研究[J].工程技术研究,2025,10(5):25-27.
- [2]王增录,袁翔.高速公路路基边坡稳定性分析与安全防护技术[J].中国住宅设施,2025(6):187-189.
- [3]郭华江,安邦超.高速公路临河填方边坡变形机理分析及处治技术研究[J].土工基础,2025,39(4):565-570+579.
- [4]蒙永乐.公路路基滑坡稳定性评价及防治研究[J].西部交通科技,2024(12):32-35+182.
- [5]郭志滨.高速公路路基高边坡防护措施应用研究[J].工程建设与设计,2023(20):21-23.