

山区公路边坡失稳原因及支护加固方案分析

高改霞

陕西弘东建设工程有限公司 陕西西安 710000

摘要: 岩土工程与道路工程的交叉领域中, 边坡稳定性始终是山区公路建设与长期运营的核心控制要素, 边坡失稳不仅会破坏道路结构完整性, 更会直接影响行车安全与区域交通系统的稳定运行。山区公路所处地形复杂、地质条件多变、气候差异显著, 加之人类工程活动的持续介入, 使得边坡岩土体在长期自然应力与外部荷载作用下, 极易出现结构弱化、强度衰减与整体失稳。边坡失稳的发生并非单一因素作用的结果, 而是地质构造、岩土特性、水文条件、气候环境与工程扰动共同耦合的产物, 其演化过程具有渐进性、隐蔽性与突发性并存的特征。本文通过深入开展山区公路边坡失稳机理与防治技术研究, 不仅能够丰富岩土工程与道路工程的理论体系, 更能为复杂地质条件下公路工程建设提供实践指引, 具有重要的学术价值与工程意义。

关键词: 山区公路; 边坡失稳; 失稳机理; 支护技术; 加固方案

引言

山区公路是区域交通网络的重要组成部分, 也是连接城乡、带动地方经济发展的关键基础设施。受地形起伏、地质破碎、降雨集中等自然条件制约, 山区公路在建设及运营阶段普遍面临边坡失稳带来的安全风险, 滑坡、崩塌、泥石流等灾害时常发生, 不仅造成道路中断、设施损毁, 还可能引发严重的安全事故与经济损失。边坡失稳是山区高速公路建设中最常见也是危害最大的地质灾害之一, 其产生条件、稳定分析及工程治理一直是山区公路建设所关心的主要工程地质问题。因此, 分析研究边坡稳定性对于减少滑坡的发生以及对滑坡的治理都具有非常重要的现实意义。

一、山区公路边坡失稳类型

(一) 滑移型失稳

滑移型失稳是山区公路边坡最为常见的破坏形式, 主要表现为岩土体沿某一潜在软弱结构面发生整体或局部的滑动位移。此类失稳多发生在岩土界面清晰、层理发育、节理密集的边坡区域, 软弱面的存在为滑动提供了天然条件。滑移的发生与岩土体抗剪强度衰减密切相关, 在地下水浸润、外部荷载增加或风化作用持续影响下, 结构面强度不断降低, 摩擦力与黏聚力难以抵抗下滑力, 最终导致边坡沿软弱面发生缓慢或突发滑动。滑移型失稳具有明显的方向性与界面控制性, 其滑动范围、速度与规模直接取决于软弱面形态、倾角与岩土体物理力学性质, 是边坡稳定性评价中重点关注的失稳模式。

(二) 崩塌型失稳

崩塌型失稳以突发性、瞬时性为主要特征, 多表现为边坡上部岩土体在失去支撑后, 发生快速倾倒、坠落与翻滚, 对下方公路结构与行车安全构成直接威胁。此类失稳多见于岩质陡峭边坡, 岩体完整性差、裂隙发育、风化强烈, 在长期卸荷、冻融循环与震动作用下, 岩块之间的联结逐渐弱化, 整体稳定性持续下降。当外部扰动达到临界状态, 悬空岩体失去有效约束, 便会在重力作用下脱离母体形成崩塌。崩塌型失稳难以提前预判, 破坏过程迅猛, 冲击力强, 对公路工程的危害程度极高, 是山区边坡安全防控的重点对象。

(三) 剥落型失稳

剥落型失稳属于边坡表层渐进式破坏, 主要表现为岩土体在风化、冲刷与冻融作用下, 表层结构逐渐松散、破碎并逐层脱落, 使边坡坡面不断后退、形态持续劣化。此类失稳多发生在土质边坡或强风化岩质边坡, 岩土体结构松散、胶结性差, 抵抗自然侵蚀的能力较弱。长期降雨淋滤、风力侵蚀与温度变化反复作用, 会持续破坏岩土颗粒之间的联结, 使表层土体不断剥离、流失^[1]。剥落型失稳虽不具备突发性大规模破坏特征, 但其长期累积效应会显著降低边坡整体强度, 扩大坡面破损范围, 为更深层次的滑动与崩塌创造条件, 是边坡退化的重要起始环节。

(四) 流滑型失稳

流滑型失稳多见于饱水软土、粉质土或黏土类边坡, 其核心特征是岩土体在高含水率状态下失去原有结构强

度,由固态向流塑态转化,形成类似流体的缓慢流动变形。地下水富集、持续强降雨或地表水下渗是诱发流滑的主要外部条件,水分侵入岩土间隙后,降低颗粒间有效应力,削弱土体抗剪强度,使边坡在自重作用下发生持续流变。流滑型失稳具有变形缓慢、范围广泛、持续时间长的特点,往往导致公路路基隆起、侧移、开裂或整体掩埋,治理难度较大,对边坡长期稳定性构成持续威胁。

(五) 塌陷型失稳

塌陷型失稳主要发生在岩溶发育、土体空洞或松散堆积体区域,表现为边坡内部岩土体在流失或压缩后,上部土体失去支撑而突然下沉、陷落,形成塌陷坑或塌陷槽。地下空洞的形成与地下水溶蚀、潜蚀、搬运密切相关,长期水流作用会带走细颗粒物质,扩大内部空隙,使边坡土体结构逐渐架空。当空洞顶部土体无法承受上部荷载与自身重力时,便会发生突发性塌陷。塌陷型失稳隐蔽性强、前兆不明显,一旦发生会直接破坏公路线形与路基结构,造成路面断裂、沉降与交通中断,对公路工程安全运营具有显著影响。

(六) 冲刷型失稳

冲刷型失稳以水流侵蚀为核心动力,主要表现为降雨径流、坡面水流或地下水流动对边坡土体的冲刷、掏蚀与搬运,导致坡面沟槽发育、土体流失、坡脚掏空,最终引发整体失稳。山区地形起伏大,降雨集中且强度高,坡面水流速度快、冲刷能力强,极易在边坡表面形成细沟与冲沟,不断切割土体结构^[2]。坡脚作为边坡稳定的关键支撑部位,一旦被水流持续掏蚀,会直接削弱边坡整体抗滑能力,诱发上部土体滑动或崩塌。冲刷型失稳具有明显的季节性与区域性,在多雨山区尤为突出,是边坡防护体系中必须重点应对的破坏形式。

二、山区公路边坡失稳原因

(一) 地质条件的先天制约作用

地质条件是山区公路边坡失稳的基础性内因,决定边坡稳定性的先天潜力与演化趋势。区域构造运动使山区岩体广泛发育节理、裂隙、层理与断层,破坏岩体完整性与连续性,为水分入渗、应力集中与岩土体弱化提供通道。不同岩性交互分布会形成物理学性质差异显著的界面,在长期应力作用下极易成为潜在滑动面。岩土体自身强度、颗粒组成、胶结状态与风化程度,直接决定边坡抵抗变形与破坏的能力,软弱岩土、强风化岩层与松散堆积体天然具备低强度、高压缩性与易渗透性特征,在外部因素触发下极易失稳。地质构造的复杂性、

岩性分布的不均一性与岩体结构的破碎性共同构成边坡失稳的内在条件,使山区公路边坡从建设初期便处于天然脆弱状态。

(二) 水文环境的动态弱化效应

水文条件是诱发边坡失稳最活跃、最普遍的外部因素,水分入渗与运移持续改变岩土体力学状态与应力分布。降雨入渗使边坡土体含水率上升,孔隙水压力升高,有效应力降低,直接削弱岩土体抗剪强度。水分在岩土间隙中运移会产生渗透压力,改变边坡内部应力场,推动颗粒移动与结构松散化,长期渗透还会引发潜蚀与管涌,破坏土体结构完整性。地下水富集与水位波动会持续软化软弱结构面,降低界面摩擦力与黏聚力,为滑移创造条件。冻融循环使水分在裂隙中反复冻胀与收缩,不断扩大岩体缝隙,加剧结构破碎程度。水文环境的动态变化不断侵蚀边坡稳定根基,使岩土体强度持续衰减,是多数边坡失稳事件的直接触发因素。

(三) 气候与风化作用的长期侵蚀

气候条件与风化作用通过长期、缓慢、持续的作用,逐步改变边坡形态与岩土结构,推动边坡向失稳方向演化。温度变化引发岩土体热胀冷缩,使表层与内部岩体产生应力差,加速裂隙扩展与岩石破碎。干湿循环反复改变土体含水率与体积状态,导致土体结构松散、强度降低。强风、降雨、日照等气候要素共同作用,使边坡表层不断风化、剥落与流失,坡面形态持续劣化。风化作用由表及里逐步深入,降低岩体完整性与整体性,使边坡抵抗外部扰动的能力不断下降。气候与风化作用虽不直接引发突发失稳,但其累积效应会显著降低边坡稳定性,为滑坡、崩塌等灾害提供前提条件^[3]。

(四) 工程活动与外部荷载扰动

人类工程活动是改变边坡应力状态、诱发失稳的重要人为因素。公路开挖过程中,边坡切削改变原始山体应力平衡,使岩土体卸荷回弹,裂隙扩张,稳定性下降。坡脚过度开挖会削弱边坡支撑体系,导致上部土体失去约束,极易引发倾倒、滑动与崩塌。施工过程中的爆破震动、机械振动会传递能量,加剧岩体破碎,弱化结构面强度,降低边坡整体稳定性。工程建设中排水系统不完善、防护措施不到位,会加剧水分入渗与坡面冲刷,加速边坡退化。运营阶段车辆荷载、局部堆载与后续改造工程,会持续对边坡施加动态应力,使已弱化的岩土体进一步损伤。工程活动与外部荷载共同打破边坡自然平衡状态,推动失稳过程加速显现。

三、山区公路边坡失稳防治技术

(一) 坡面防护与表层加固技术

坡面防护与表层加固是阻断边坡退化、提升稳定性的基础手段，核心目标在于保护坡面岩土体、抵御自然侵蚀、改善表层结构强度。通过构建封闭性防护层，可有效阻隔雨水入渗、风力侵蚀与温度变化带来的不利影响，延缓风化进程。柔性防护能够适应边坡轻微变形，在不破坏自然形态的前提下实现固土保坡，适用于土质与强风化岩质边坡。刚性防护可提升坡面整体刚度，抵抗冲刷与剥落，维持坡面形态稳定。多种防护形式的组合运用，可实现优势互补，既提升防护效果，又增强边坡生态适应性^[4]。坡面防护与表层加固不仅能够阻止剥落、冲刷等浅层失稳，还能为深层稳定创造良好前提，是边坡综合治理体系中不可或缺的前置环节。

(二) 支挡结构与抗滑加固技术

支挡结构与抗滑加固是应对滑移、崩塌等深层失稳的核心技术，通过外力支撑与结构强化提升边坡整体抗滑能力。重力式支挡依靠自身重量平衡边坡下滑力，适用于地质条件相对简单、边坡高度适中的路段，具有稳定性强、耐久性高的特点。轻型支挡以受力合理、施工快捷为优势，可适应复杂地形与地质条件，在山区公路边坡治理中应用广泛。抗滑桩深入稳定地层，通过桩体抵抗滑动推力，约束岩土体位移，对控制深层滑动具有显著效果。各类支挡结构合理选型与组合布置，能够有效调整边坡应力分布，抑制变形发展，阻止失稳进一步扩大。支挡体系与边坡岩土体协同受力，共同构成稳定承载结构，是保障边坡长期安全的关键支撑。

(三) 排水系统优化与水文调控技术

水文调控是从根源上提升边坡稳定性的重要技术路径，通过阻断水分入渗、疏导地下水、降低孔隙水压力，实现岩土体强度的有效恢复与保持。地表排水系统可快速汇集与排除降雨径流，减少坡面冲刷与入渗量，保护坡面形态完整。地下排水能够有效降低地下水位，消除空隙水压力，提升岩土体有效应力，增强抗剪强度。科学布置排水设施，形成地表地下协同、顺畅高效的排水网络，可持续改善边坡水文环境，避免软弱面长期饱水软化。排水工程虽不直接提供支撑力，却能从根本上减缓边坡退化，大幅提升支护结构的长期效果，是边坡治理中投资小、见效显著的关键技术^[5]。

(四) 生态修复与长效稳定技术

生态修复与长效稳定技术将工程防护与生态恢复相

结合，在实现加固目标的同时，提升边坡自稳能力与环境适应性。植物根系能够固持土体、增强表层强度、减少水土流失，改善岩土物理力学性质。植被覆盖可降低雨水冲刷、调节温度、减缓风化，实现长期自然防护。生态防护与工程支护协同作用，可形成刚柔并济、长效稳定的综合防护体系，既提升短期抗灾能力，又增强边坡自愈与自稳潜力。生态修复有助于恢复边坡自然平衡状态，降低后期维护成本，延长工程使用寿命，符合绿色交通与可持续发展理念。以生态理念引领边坡治理，能够实现安全、耐久、美观与环保的多重目标，推动山区公路边坡治理向更高质量发展。

结语

山区公路边坡稳定性受地质、水文、气候与工程活动多重因素耦合影响，失稳类型多样、机理复杂、防控难度较高，是道路工程领域长期关注的核心问题。边坡失稳并非偶然发生，而是岩土体结构弱化、应力失衡与环境侵蚀长期累积的结果，科学防控必须立足于类型识别、机理解析与综合施策。坡面防护、支挡加固、排水调控与生态修复协同构建的综合治理体系，能够从表层到深层、从阻断诱因到强化结构，全方位提升边坡稳定性。未来山区公路建设与养护中，应更加注重边坡全生命周期管理，强化预判、防控与修复一体化，推动边坡治理向精准化、长效化、生态化迈进，为公路安全运营与区域高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 向波, 罗晗玲, 郭凯, 等. 山区公路顺层边坡首次失稳长度影响因素及确定方法[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(05): 48-60.
- [2] 赵云峰. 山区高速公路深挖路堑边坡失稳治理探讨[J]. 北方交通, 2024, (09): 65-68.
- [3] 吴昭奕. 山区高速公路反倾板岩边坡失稳影响因素分析及滑坡处治方案[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2024, 37(02): 48-52.
- [4] 曾庆波. 某山区公路下边坡变形失稳特征及应对措施[J]. 上海建材, 2024, (02): 93-95+98.
- [5] 张超, 魏松涛, 刘彬, 等. 山区高速公路灰岩质高陡边坡失稳与加固措施分析[J]. 公路, 2023, 68(07): 264-269.