

降雨条件下山区公路边坡稳定性分析与加固措施

袁 治

汉源县公路工程质量监督站 四川 雅安 625000

摘 要：山区公路边坡的稳定性受降雨条件影响显著，其失稳现象常引发交通中断、财产损失及生态破坏。本文从降雨作用下的水文地质响应机制出发，系统分析边坡稳定性控制因素，重点探讨地表径流冲刷、土壤含水量动态变化及岩土体物理特性劣化等关键过程。针对性地提出以截排水系统优化、工程结构加固与生态防护协同为核心的治理策略，强调地质勘察与动态监测在防治体系中的基础作用。通过整合工程力学与水文地质学原理，构建适应多雨环境的边坡防护技术框架，为山区公路安全运营提供理论支撑与实践指导。

关键词：降雨条件；边坡稳定性；水文地质；加固措施；工程防护

1 引言

山区公路作为区域经济发展的重要纽带，其边坡稳定性直接关乎交通畅通与生命财产安全。在强降雨频发区域，边坡失稳已成为公路建设与运维的核心挑战。降雨通过改变岩土体含水量、诱发渗流压力及软化结构面，显著削弱坡体抗剪强度，导致滑坡、崩塌等灾害频发。现有研究表明，超过60%的边坡失稳事件与降雨入渗存在直接关联，尤其在构造活跃、地层破碎的山区，水岩相互作用更为剧烈^[1]。然而，传统边坡治理多聚焦于静态力学分析，对降雨动态侵蚀机制及长期水文效应缺乏系统性考量，导致防护措施与灾害演化规律脱节。本文旨在揭示降雨条件下边坡失稳的多尺度驱动机制，并提出兼顾时效性与可持续性的加固技术体系，以填补动态水文环境下的工程防护研究空白。

2 基于降雨条件下山区公路边坡稳定性分析与加固措施的意义

山区公路边坡的稳定性分析需综合考量水文循环与地质构造的耦合效应。降雨不仅通过物理侵蚀改变坡面形态，更通过非饱和-饱和渗流过程引发岩土体力学参数退化，形成渐进式破坏。深入解析这一过程，可突破传统稳定性评价中“静态假设”的局限，实现灾害的早期预警与精准防控。

加固措施的制定需兼顾工程效能与生态可持续性。单一结构防护易因水文环境变化导致功能失效，而植被-工程复合体系可通过根系固土与结构支撑的双重作用，实现抗滑性能的长期维持。锚杆框架梁与三维植被网的组合应用，既抑制了浅表层冲刷，又通过植物蒸腾作用调控土体含水量，形成自适应的防护机制。此类技术革新不仅降低运维成本，更契合生态文明建设导向，推动边坡治理从“灾害应对”向“生态修复”转型^[2]。

3 基于降雨条件下山区公路边坡稳定性分析

3.1 水文地质条件对边坡稳定性的控制作用

山区边坡复杂的水文地质结构在极大程度上决定了降雨入渗的具体路径以及水分的赋存形式，而这两者又对边坡的失稳模式产生着直接且关键的影响。在风化层广泛发育的斜坡区域，表层残积土与下伏基岩的交界面往往会形成优先渗流通道。当降雨集中发生时，大量雨水通过此通道迅速入渗，进而致使接触带孔隙水压力在短时间内急剧升高，最终极有可能诱发顺层滑动现象。以粤北高速公路滑坡的详细勘察为例，强风化千枚岩与上覆黏土层在渗透性方面存在巨大差异，两者的差异程度高达两个数量级。在暴雨期间，该界面犹如一条高效的水力联系“高速通道”，大量雨水快速通过，最终导致坡体发生整体滑移。

相关研究结果表明，当坡体渗透系数各向异性比（ K_x/K_z ）大于10时，水平向优势渗流将显著加快潜在滑动面的饱和进程，使得临界降雨量降低幅度约达30%。这一重要发现为优化截排水工程设计提供了极为关键的参数依据。针对渗透性差异极为显著的层状边坡，需要增设深层排水盲沟，以此截断侧向径流，有效降低坡体内部的的水压力，增强边坡的稳定性。

3.2 径流冲刷与坡面侵蚀的协同破坏机制

坡面径流不仅承载着降雨所携带的能量，同时也是物质迁移过程中的主要驱动力。在长坡距的特定条件下，径流在沿程流动过程中会裹挟大量泥沙，这一行为导致径流的动能不断耗散，进而形成侵蚀-沉积交替出现的复杂过程。当坡长超过某一临界值（通常在50-80米范围内）时，水流剪切力与输沙能力之间呈现出的非线性关系会引发侵蚀量发生突变。以闽南高速公路的长期监测数据为例，坡长为60米的路段年均侵蚀深度达到12厘

米，而相邻的坡长仅为30米的路段年均侵蚀深度仅为3厘米，这一数据对比鲜明地印证了坡长对侵蚀速率具有指数级放大的显著效应。

在进行边坡防护设计时，可采用阶梯式削坡结合横向截水沟的设计方案，既能有效分散径流能量，又可通过阶梯平台对泥沙进行拦截，从而实现侵蚀控制与边坡稳定性提升的双重目标^[3]。

3.3 岩土体物理特性动态劣化规律

在降雨作用的影响下，岩土体的物理力学响应呈现出极为显著的时效特征。黏土矿物在吸收水分后会发生膨胀现象，这一过程导致岩土体微观结构发生重组，具体表现为内聚力与内摩擦角同时出现衰减。相关试验数据表明，红层泥岩在饱和状态下，其黏聚力会降至干燥状态时的40%，而对于蒙脱石含量较高的膨胀土，其内摩擦角的衰减幅度可达50%。

矿物成分与结构构造的差异会进一步对岩土体的劣化进程产生调控作用。以伊利石为主的砂质泥岩在遇水后软化速率相对较慢，而高岭石-蒙脱石混合层状黏土则表现出快速崩解的特性；后者在饱和48小时后，孔隙连通率增加至85%，并形成了贯通性渗流网络。鉴于此类差异，在对边坡进行加固处理时，所采取的措施必须具备良好的地质适应性。对于易软化岩层，可采用注浆改性的方法提高其水稳性；而对于碎裂岩体，则优先选用预应力锚索来提供主动支护，以有效增强边坡的稳定性。

4 基于降雨条件下山区公路边坡加固措施

4.1 截排水系统优化

截排水体系作为调控坡体水文环境的关键核心工程，在实际设计与应用中具有极高的复杂性与精确性要求。在地表排水设计方面，需精准依据汇水面积以及降雨重现期来确定截水沟的容量。以年降雨量超过1500mm的区域为例，截水沟纵坡宜设计为大于3‰，此数值的设定旨在确保截水沟具备良好的自净能力，有效防止杂物淤积。采用复合断面形式，即梯形底部与弧形侧壁相结合，这种独特设计极大地增强了截水沟的抗冲刷性能，能够有效抵御强降雨带来的水流冲击。在地下排水方面，重点聚焦于降低坡体浸润线。在滑坡治理项目中，布设了仰斜式排水孔群，这些排水孔以15°仰角精准穿透潜在滑动面，单孔排水量可达0.8m³/d，通过持续排水，成功使坡体含水量稳定控制在塑限以下，有效增强了坡体的稳定性。

4.2 锚固结构与生态防护的协同加固

预应力锚杆框架梁体系凭借主动施加围压的独特方式，对坡体应力状态进行有效改善。在桂北高边坡工程实践中，采用压力分散型锚索（设计拉力800kN）与现浇

混凝土格梁进行组合应用。在格梁节点处精心设置橡胶垫块，其主要作用是协调不同部位的差异变形，通过这种精细设计，成功将边坡安全系数从初始的0.98提升至1.35，显著增强了边坡的稳定性。针对碎裂岩体的加固处理，全长粘结锚杆发挥着关键作用，其通过界面剪应力的均匀传递，有效抑制裂隙的进一步扩展。锚杆锚固段长度并非固定不变，而是需根据岩体RQD值进行动态调整。当RQD < 50%时，锚杆长度应相应增至岩体完整段的1.5倍，以此确保锚固效果。

生态防护与工程结构的协同创新在近年来成为研究的热点领域。在喷播基材中添加保水剂与缓释肥，能够有效延长植被存活期，为植被生长提供良好的基础条件。玻璃纤维筋格栅的应用则巧妙克服了传统钢筋易锈蚀的难题。在川西某边坡治理项目中，采用客土喷播与微型桩组合的方式，取得了显著成效，使浅层滑移位移减少82%。且经过两年时间，草本植物根系平均深度达1.2m，成功形成生物-力学复合锚固层。这种创新的“以柔克刚”防护模式，尤其适用于降雨诱发型浅层滑坡的治理，为边坡防护提供了一种兼顾生态与工程效益的新思路。

5 工程实例

5.1 厦门同安同南路边坡整治二期工程

5.1.1 项目背景

省道213线同南路山上段边坡地处降雨频繁的闽南山区，在2024年汛期连续降雨期间，出现了土质松散、裂缝等严重地质灾害隐患问题。边坡最高点达56米，根据《公路路基设计规范》（JTGD30-2015），该边坡属于高陡边坡范畴。其地质条件复杂，表层风化严重，经地质勘查显示，风化层厚度平均达3-5米。

5.1.2 关键问题

降雨入渗引发的滑移风险：坡体受降雨入渗影响，孔隙水压力骤增，导致有效应力降低，抗滑力减弱，显著增加了滑移风险。

表层土体冲刷问题：表层土体冲刷严重，年均侵蚀深度达10-15厘米。根据《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007），该区域土壤侵蚀强度属于中度侵蚀。

岩体碎裂化及力学性能劣化：岩体碎裂化明显，岩石质量指标（RQD < 50%）表明岩体完整性差，且岩体力学性能随含水量升高快速劣化，严重影响边坡整体稳定性。

5.1.3 加固措施

截排水系统优化：

地表截水沟设计：地表设置阶梯式截水沟，纵坡3‰，采用复合断面设计（梯形+弧形）。汇水面积计算

基于50年一遇降雨强度,根据当地气象资料,50年一遇降雨强度为120mm/h,确保截水沟在极端降雨条件下仍能有效排水。

地下排水孔群布置:地下布设仰斜式排水孔群,孔径100mm,仰角15°,穿透潜在滑动面。单孔日均排水量0.5m³,通过长期监测数据显示,排水孔群可使坡体浸润线在降雨后3-5天内降低至塑限以下,有效降低孔隙水压力。

锚固-生态协同加固:

预应力锚杆框架梁:采用压力分散型锚索(设计拉力800kN)与现浇混凝土格梁组合。锚固段长度根据岩体完整性动态调整,当RQD < 50%时,锚固段长度增至常规设计的1.5倍。经有限元分析,该加固方式可使边坡安全系数从初始的1.05提升至1.35,满足《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)对边坡稳定性的要求。

喷播复绿技术:基材中添加保水剂与缓释肥,保水剂可使基材含水量在干旱期维持在15-20%,满足植物生长需求。覆盖无纺布保湿,经实测,草籽出芽率提升至90%。两年后根系深度可达1.2米,形成生物锚固层,根据相关研究,根系的生物锚固作用可使边坡表层土体抗剪强度提高15-20%。

5.2 湖北省鹤峰县南鹤公路边坡治理工程

5.2.1 背景与问题

湖北省鹤峰县S341省道边坡为典型的喀斯特地貌,坡面风化严重,岩石裂隙发育^[4]。强降雨诱发危岩坠落频繁,年均塌方事故超过10次。根据《公路养护技术规范》(JTGH10-2009),该边坡已严重影响公路运营安全,急需进行治理。

5.2.2 治理措施

主动防护网与钢轨桩挡墙:采用主动防护网(抗拉强度 $\geq 50\text{kN/m}$),该防护网符合《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1-2017)对防护网的性能要求,能够有效引导落石。结合钢轨桩挡墙(深6米)和格子梁防护,钢轨桩采用I56b型工字钢,间距2米,通过力学计算,该组合结构可承受最大落石冲击力达500kN,有效分散坡体应力。

锚喷支护优化:

材料配比与速凝剂应用:速凝剂选择与掺量,采用液态无碱速凝剂,掺量为水泥重量的3%,确保初凝时间控制在5-20分钟范围内,满足雨季快速封闭岩面需求。混凝土配合比,强度等级C25,水灰比0.4-0.5,砂率45%-55%,骨料粒径 $\leq 15\text{mm}$ (硬质洁净中粗砂与碎石)。

锚杆布设与施工工艺:采用全长黏结式锚杆(如管缝式锚杆),锚杆长度根据风化岩层厚度调整,短锚杆

(0.8-1.0m)与长锚杆(2.0-2.5m)间隔布置,间距 $\leq 0.6\text{m}$,增强围岩整体性。钻孔与注浆,钻孔直径50mm,孔深为锚杆长度的1.5倍;注浆压力4-6MPa,浆液采用水泥砂浆(灰砂比1:1~1:1.5),确保锚杆与岩体黏结强度达标。

喷射混凝土施工要点:分层喷射,初喷厚度3-5cm,封闭岩面裂隙;复喷至总厚度8-10cm,分2-3次完成,避免单层过厚导致开裂。喷头与岩面距离0.8-1.2m,垂直受喷面喷射,回弹率 $\leq 25\%$;喷射顺序自下而上,覆盖钢筋网后确保混凝土包裹密实。

质量控制与检测:黏结强度检测,通过拉拔试验验证喷射混凝土与岩面黏结强度 $\geq 0.8\text{MPa}$,符合《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1-2017)要求。厚度与均匀性检测,采用钻孔取芯或雷达扫描,确保喷射厚度误差 $\leq 10\%$,无空鼓、脱落现象。

配套措施:钢筋网加固,挂设 $\phi 6$ 钢筋网(网格200mm $\times$ 200mm),与锚杆焊接固定,防止岩体局部剥落。在锚喷层内预埋排水管,减少地下水压对支护结构的侵蚀。

5.2.3 成效

工程竣工后,明显提升了边坡稳定性和安全性,基本消除了汛期边坡塌方隐患;经连续12个月的监测,危岩坠落事件归零,年均维护成本显著降低。该工程成为鄂西山区公路边坡治理的示范项目,为类似工程提供了宝贵的经验借鉴。

6 结束语

降雨条件下山区公路边坡稳定性问题本质上是水-岩(土)相互作用的动态平衡过程。本文通过解析水文地质响应机制、径流侵蚀动力学及岩土体劣化规律,揭示了多场耦合作用下的边坡失稳机理。提出的截排水优化、锚固-生态协同加固技术体系,体现了工程防护与自然规律的协调统一。未来研究需进一步突破非饱和渗流参数的现场快速测试瓶颈,发展低能耗、自修复的新型防护材料,并深化人工智能在灾害链预测中的应用。

参考文献

- [1]王晨韬,宋文凯.不同降雨条件下路基边坡稳定性及防治措施分析[J].福建交通科技,2024(1):46-49.
- [2]黄武华,林玮.降雨条件下山区公路边坡的稳定性分析及治理措施数值模拟[J].江西交通科技,2023(4):33-38.
- [3]李嘉.降雨条件下削坡加挡土墙加固山区公路边坡稳定性分析[J].交通世界,2023(23):17-19.
- [4]赵华,陈骏,吴银亮.南鹤公路东乡村滑坡稳定性分析及治理方案研究[J].路基工程,2020(01):178-183.