

极端气候条件下高速公路运营边坡安全风险 评估与应急处置研究

谭其震

广西交通投资集团河池高速公路运营有限公司 广西 河池 547000

摘要: 极端气候下边坡风险防控需融合“评估-监测-处置”闭环体系,通过智能装备前置布设、多源数据驱动决策及工程-管理协同,显著降低灾害链式反应风险。未来重点需深化气候-地质-交通流耦合模型,以支撑韧性路网规划。在极端气候条件下,高速公路运营边坡安全风险评估与应急处置需整合多维度技术与管理措施,地质与结构因素:包括岩土性质、边坡坡度、支护结构完整性及地下水活动状态(如强降雨诱发软化效应)。

关键词: 极端气候;高速公路运营;边坡安全风险评估;应急处置

降低自然灾害影响需坚持“工程固本、生态调蓄、智能预判”三位一体原则。重点区域应定制防护方案(如南方强化排水、北方防控冻胀),并通过定期健康检测(尤其超15年运营路段)实现全生命周期风险管理。

1 气候条件如何影响高速公路边坡稳定性

1.1 降雨:核心破坏因子。岩土强度衰减,雨水入渗使岩土体饱和,降低黏聚力与内摩擦角,抗剪强度最大降幅可达27%。强降雨(>30mm/h)或持续降雨导致孔隙水压力骤增,削弱结构面抗滑力,诱发深层滑动。软化效应:地下水活动软化岩层(如泥岩、页岩),加速结构面贯通,尤其对节理发育的岩质边坡破坏显著。水动力作用,静水压力:坡体裂隙充水产生侧向推力,推动滑体下滑。动水压力:渗流冲刷带走细颗粒,形成管涌通道,加剧土体流失(如粉质黏土边坡)。

1.2 温度与冻融循环:结构性破坏。冻胀-融沉效应,低温时孔隙水结冰膨胀,挤压岩土颗粒;升温后冰融导致土体松散、孔隙率增大,反复循环使边坡表层剥离。案例:北方地区春季融雪期滑坡高发,因冻融使土体抗剪强度降低40%以上。热应力裂缝,温度骤变引发岩体热胀冷缩,加剧原有裂隙扩展(如花岗岩边坡),为雨水入渗创造通道。

1.3 复合气候灾害链。暴雨-洪涝联动,强降雨叠加地表径流,冲刷坡脚形成临空面(如2024年梅大高速塌方),同时引发泥石流掩埋路基。风化-侵蚀协同,高温高湿地区化学风化(如溶蚀作用)降低岩体完整性,后续降雨加速侵蚀,凹形边坡因汇水效应更易失稳。

1.4 防护关键措施。水文调控,优化坡面截水沟与地下盲沟系统,减少雨水滞留;对高风险段采用透水性材料回填(如砂砾石)。结构强化,框格锚杆支护提升抗

滑力(安全系数提高至1.3以上),坡面覆盖彩条布防冲刷。智能预警,布设微气象站+渗压计,实时监测降雨强度与孔隙水压,触发分级响应(如能见度<100m且降雨>30mm/h时封闭路段)。

2 自然灾害对高速公路边坡的破坏作用分析

2.1 主要破坏作用机制。强降雨诱发滑坡,岩土软化:雨水入渗饱和岩土体,黏聚力与内摩擦角下降(抗剪强度最大降幅27%),尤其对泥岩、页岩等软弱地层影响显著。水压力作用:裂隙充水产生静水压力推动滑体;渗流动水压力冲刷细颗粒,形成管涌通道(粉质黏土边坡最敏感)。例:2024年思南强降雨致省道路面破裂,山体滑坡挤压挡土墙引发道路中断;2025年天柱县强降雨引发500立方米塌方阻断交通。地震触发连锁灾害,直接破坏:地震波振动使岩体结构面松动,诱发崩塌或深层滑动(如2022年泸定6.8级地震致路基开裂、隧道塌陷)。次生灾害链:震动叠加降雨易引发泥石流,冲击桥梁衔接段(2025年雅康高速隧间桥因山洪泥石流垮塌)。冻融循环与热应力,冻胀-融沉:北方地区反复冻融使土体孔隙率增大,春季融雪期抗剪强度降低40%以上,导致浅层剥落。裂隙扩展:温度骤变引发岩体热胀冷缩,加速原有裂隙发育(如花岗岩边坡)。

2.2 关键防控技术。灾前防御,结构加固:高风险边坡采用框格锚杆支护(安全系数提升至1.3以上),坡面覆盖防冲刷材料。排水系统:优化截水沟与盲沟网络,减少雨水渗透(如平定高速项目验证水文调控有效性)。智能监测预警,布设微气象站+渗压计,实时监测降雨强度与孔隙水压。建立4级响应机制(如能见度<100m且降雨>30mm/h时封闭路段)。应急处置,灾中:塌方路段立即封闭,彩条布覆盖坡面防持续冲刷,机械

清方结合应急回填。灾后：建立边坡健康档案，超15年运营路段优先改造。

2.3 未来防控方向。深化多灾种耦合研究：构建“气候-地质-交通流”耦合模型，预判暴雨地震叠加效应。跨部门协同：推广“一路四方”演练（交通、气象、应急、水利联动），提升临灾响应效率。

3 路基材料如何影响高速公路边坡稳定性

路基材料的物理力学性质、水稳定性及结构适应性对高速公路边坡稳定性具有决定性影响。

3.1 材料性质对稳定性的核心影响。抗剪强度特性，黏性土（如黏土、粉质黏土）：内摩擦角（ φ ）与黏聚力（ c ）较低，遇水易软化，饱和状态下抗剪强度降幅可达27%，易诱发浅层滑移（如坡面冲刷或小型滑坡）。砂砾石/碎石土：高透水性减少孔隙水压力，内摩擦角较大（ $\varphi > 30^\circ$ ），抗滑能力显著优于黏性土，适用于高填方路基坡脚回填。岩质材料：节理发育的岩体（如风化页岩）结构面抗剪强度低，降雨渗入后易沿软弱面滑动。水文敏感性与渗透性，低渗透性材料（如黏土）阻碍排水，延长雨水滞留时间，加剧静水压力及土体饱和软化风险。高透水材料（如级配砂砾）可快速疏导水流，减少渗流对岩土体的侵蚀，抑制动水压力导致的管涌破坏。变形与耐久性，冻融敏感材料（如黄土）：反复冻胀-融沉使孔隙率增大，抗剪强度下降40%以上，北方地区春季易发生表层剥落。高黏沥青改良材料：添加SBS改性剂提升黏度至200,000Pa·s，增强路面层间黏结力，减少水分下渗对路基的侵蚀。

3.2 材料优化的工程防控措施。水力调控设计，坡体内部设砂砾石排水层，加速雨水导出（孔隙率 $> 25\%$ ），削弱静水压力；坡面覆盖透水性差的改良沥青层（空隙率 $< 5\%$ ），减少入渗量。结构强化应用，高陡岩质边坡采用喷射混凝土+锚杆支护，抑制结构面扩展；冻融区路基掺入石灰改良土体，降低冻胀敏感性。材料寿命协同，沥青路面设计寿命（通常15年）到期后及时翻修，避免裂缝引发路基水土侵蚀；超龄服役路段优先采用聚合物改性材料，延长防水层耐久性。

3.3 区域差异化选材策略。多雨区（年均降雨 $> 800\text{mm}$ ）：优选透水砂砾+高黏沥青面层组合，降低孔隙水压力积累风险；冻融区：采用低含水率水泥稳定土，铺设保温层减缓冻深发展；地震带：避免使用松散砂土，改用加筋土结构增强抗震延性。路基材料通过抗剪强度-渗透性-耐久性三维度调控边坡稳定性。未来需研发气候适应性材料（如相变控温填料），并通过材料-结构-水文耦合模型优化区域定制方案。

4 减少自然灾害对高速公路边坡影响的方法

4.1 工程防护措施。强化支挡结构，挡土墙/抗滑桩：重力式挡土墙适用于低矮边坡（ $< 6\text{m}$ ），悬臂式结构应对高陡岩质边坡；抗滑桩嵌入稳定地层深度需 $>$ 滑面以下3m，有效拦截深层滑动。锚固体系：预应力锚杆（拉力 $\geq 100\text{kN}$ ）结合格构梁，提升岩体结构面抗剪强度30%以上，抑制崩塌风险。优化排水系统，地表截流：坡顶设截水沟（宽度 $\geq 0.6\text{m}$ ），拦截坡外径流；坡面铺设混凝土排水沟，纵坡坡度 $\geq 0.5\%$ 。地下导水：盲沟填充级配砂砾（孔隙率 $> 25\%$ ），搭配泄水孔导出裂隙水，降低孔隙水压力。坡面防护技术，柔性防护网：覆盖钢丝绳网（抗冲击能 $\geq 1000\text{kJ}$ ），拦截落石并吸收冲击能量，适用于节理发育岩坡。喷射混凝土：封闭表层裂隙（厚度 $\geq 10\text{cm}$ ），减少风化侵蚀与雨水渗入。

4.2 生态治理与材料革新。植被固坡技术，种植深根系植物（如紫穗槐、狗牙根），根系锚固深度达1.5m，提升表层土体抗冲刷能力40%。草灌混播覆盖坡面，减少降雨溅蚀并调节表层水文循环。抗灾材料应用，改良填土：冻融区采用石灰稳定土（石灰掺量6%~8%），降低冻胀敏感性；多雨区路基换填砂砾石混合料，加速排水。高黏沥青封闭层：坡肩铺设改性沥青（空隙率 $< 5\%$ ），阻隔雨水下渗侵蚀路基。

4.3 智能监测与应急响应。灾害预警系统，布设渗压计+位移传感器，实时监测孔隙水压与坡体形变，数据联动预警平台。设定响应阈值：单日降雨量 $> 50\text{mm}$ 或位移速率 $> 5\text{mm/d}$ 时启动巡查。灾时快速处置，滑坡初期覆盖防雨彩条布，减缓土体软化；采用机械清方+砂袋反压坡脚，48小时内恢复临时通行。

5 高速公路边坡安全风险评估方法

高速公路边坡安全风险评估采用“总体评估定风险等级、专项评估控施工风险、动态监测防突发灾害”的三级防控体系，

5.1 风险评估框架与方法。双阶段评估流程，总体风险评估：在项目开工前，依据边坡高度、地质条件、诱发因素（如降雨、地震）等指标打分，确定风险等级（1~4级）。风险等级 ≥ 3 级时需启动专项评估。专项风险评估：针对高风险边坡，在分项工程开工前进行，采用指标体系法（如边坡高度、坡形坡率）和专家调查法，完善施工方案并制定防控措施。示例：土质边坡高度 $\geq 40\text{m}$ 时，基本分值75~100分，结合坡形偏离自然坡度值（ $\Delta\alpha \geq 15^\circ$ 时加75分）综合定级。核心评估维度，地质稳定性：分析岩体节理发育程度、软弱面抗剪强度（如页岩遇水软化风险）。环境敏感性：统计年均降雨

量(>800mm区域风险翻倍)、冻融循环次数、地震烈度。结构缺陷:检查支挡结构裂缝、排水沟破损、防护网失效等。灾变预警阈值,实时监测响应:位移速率>5mm/d、孔隙水压突增20%时启动预警。应急响应机制:风险等级4级边坡需每水文年检测1次,灾后72小时内复评。

5.2 区域差异化评估策略。多雨山区:重点监测裂隙水压力,采用水文-地质耦合模型(权重占评估体系40%)。案例:厦蓉高速猴子河大桥因强降雨诱发滑坡,事后评估提升排水权重。冻融区域(如北方高原):增加冻胀敏感性指标(冻融循环>15次/年评高风险),坡面增设保温层。地震带(如川藏线):引入动力稳定性系数,禁用松散填料,采用加筋土结构。

5.3 技术创新方向。智能装备应用,无人值守监测系统:远程采集裂缝图像+渗压数据,AI自动判别风险等级。三维地质雷达扫描:精准探测隐蔽节理面(如湖北水布垭350m高边坡工程)。跨部门协同机制,推广“一路四方”模式:交通、气象、应急部门共享数据,演练暴雨-地震链式灾害响应。

6 高速公路边坡应急处置策略

6.1 灾前预防与监测。智能预警系统,布设位移传感器+渗压计,实时监测坡体变形与孔隙水压,设定阈值(位移速率>5mm/d或水压突增20%自动报警)。多雨区重点监控裂隙水压力,冻融区增加冻胀频次监测(年冻融>15次/年高风险)。隐患点强化防护,节理发育岩坡:安装钢丝绳防护网(抗冲击能 $\geq 1000\text{kJ}$)拦截落石。土质高填边坡:坡脚回填砂砾石排水层(孔隙率>25%),坡面种植深根系植物(如紫穗槐)提升抗冲刷力40%。

6.2 生命救援优先。车辆坠坡救援:采用锚固绳索系统固定车体,破拆驾驶舱转移伤员(参考猴子河大桥垮

塌救援方案)。人员跌落护坡:利用担架+安全带垂直转运,避免二次伤害。交通疏导创新,单幅阻断时:拆除路侧护栏,借用村道分流车流(如百色高速滑塌处置案例)。全幅阻断时:启用“单道通行”应急车道,引导车辆摩擦护栏减速。

6.3 灾后恢复关键技术。滑塌体治理,浅层滑坡:削坡减载+格构梁锚固,抑制变形扩展。深层滑动:抗滑桩嵌入稳定地层>滑面以下3m,桩间浇筑混凝土挡板。排水系统修复,重建截水沟(宽度 $\geq 0.6\text{m}$)与盲沟,填充级配砂砾加速导水。坡肩铺设高黏沥青封闭层(空隙率<5%),阻隔雨水下渗。材料寿命协同,灾后修复优先选用石灰改良土(掺量6%~8%)或水泥稳定土(无侧限抗压>1.5MPa),提升抗灾耐久性。

6.4 区域差异化策略。暴雨区(年均降雨>800mm):侧重坡面防水层+排水廊道组合,减少孔隙水压力积累。地震带:禁用松散填料,采用加筋土结构增强抗震延性。冻融区:路基掺入SBS改性沥青,增设XPS保温板减缓冻深发展。核心原则:坚持“监测前置-分级响应-材料抗灾”闭环管理。重点路段需每水文年检测1次,超15年运营段纳入AI全周期监控。

总之,高速公路边坡风险评估需以“双阶段量化分析+区域因子定制+智能预警前置”为核心。未来需强化隐蔽节理面探测技术,并建立全生命周期健康档案(超15年运营路段优先纳入AI监测)。

参考文献

- [1]刘莲.浅谈极端气候条件下高速公路运营边坡安全风险评估与应急处置.2023.
- [2]张菊华.极端气候条件下高速公路运营边坡安全风险评估与应急处置探讨.2022.