

Study on Collaborative Protection of Earthquake Resistance, Flood Damage Resistance and Slope Stability of Mountain Highways and Safety Risk Emergency Technology

Mengqi Xu*

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

【Abstract】 Aiming at the overlapping risks of multiple disasters such as earthquakes, flood damage and slope instability faced by mountain highways, as well as the problems of lagging safety risk assessment and low emergency response efficiency, this study constructs an integrated technical system of "multi-disaster collaborative protection - dynamic safety risk assessment - rapid emergency disposal". In terms of protection technology, a collaborative scheme of earthquake resistance (flexible energy-dissipating supports + ductile retaining walls), flood damage resistance (ecological revetments + drainage blind ditches) and slope stability (anchor lattice + vegetation slope fixation) is proposed. Verified by FLAC3D and ABAQUS numerical simulations, the pavement displacement under earthquake action is controlled within 15mm, the scouring depth of flood-damaged sections is reduced to 0.5m, and the slope stability safety factor is increased to 1.35. In terms of risk assessment, a dynamic assessment model based on Analytic Hierarchy Process (AHP)-fuzzy comprehensive evaluation is established, with a risk identification accuracy of 92% and a risk level determination error $\leq 5\%$. In terms of emergency disposal, the technology of "UAV survey + modular emergency components" is developed, which shortens the disaster response time to 1.5 hours and improves the road emergency repair efficiency by 40%. The research results are applied to a mountain highway in Ya'an, Sichuan. The incidence of multiple disasters has decreased by 65% in 3 years of operation, and the emergency repair time has been shortened from 8 hours to 3 hours, providing technical support for disaster protection and safety guarantee of mountain highways.

【Keywords】 Mountain Highways; Multi-Disaster Collaborative Protection; Earthquake and Flood Damage Resistance; Slope Stability; Risk Assessment; Emergency Disposal

山区公路抗震 - 抗水毁 - 边坡稳定协同防护及安全风险应急技术研究

徐梦琪 *

重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074

【摘要】 针对山区公路面临的地震、水毁、边坡失稳等多灾害叠加风险, 以及安全风险评估滞后、应急处置效率低等问题, 本研究构建 “多灾害协同防护 - 安全风险动态评估 - 应急快速处置” 一体化技术体系。在防护技术方面, 提出抗震 (柔性耗能支座 + 延性挡墙)、抗水毁 (生态护岸 + 排水盲沟)、边坡稳定 (锚杆格构 + 植被固坡) 协同方案, 通过 FLAC3D 与 ABAQUS 数值模拟验证, 地震作用下路面位移量控制在 15mm 以内, 水毁路段冲刷深度降低至 0.5m, 边坡稳定安全系数提升至 1.35; 在风险评估方面, 建立基于层次分析法 (AHP) - 模糊综合评价的动态评估模型, 风险识别准确率达 92%, 风险等级判定误差 $\leq 5\%$; 在应急处置方面, 开发 “无人机勘察 + 模块化应急构件” 技术, 灾害响应时间缩短至 1.5 小时, 道路抢通效率提升 40%。研究成果在四川雅安某山区公路应用, 运营 3 年多灾害发生率下降 65%, 应急抢通时间从 8 小时缩短至 3 小时, 为山区公路灾害防护与安全保障提供技术支撑。

【关键词】 山区公路; 多灾害协同防护; 抗震抗水毁; 边坡稳定; 风险评估; 应急处置

1 引言

1.1 研究背景与意义

山区公路作为连接偏远地区与城市的重要通道,受地形地质复杂、气候条件多变影响,易遭受地震、水毁、边坡失稳等多灾害叠加破坏。据统计,我国西南山区公路年均因地震导致的路面开裂、桥梁损毁率达 18%,汛期水毁路段占比超 25%,边坡滑坡引发的道路中断事件年均超 300 起 [1]。传统防护技术多针对单一灾害,存在“重局部轻整体”“重建设轻运维”问题:抗震设计未考虑水毁对结构的削弱,抗水毁工程缺乏地震后的稳定性保障,边坡防护与周边灾害防护协同不足,导致多灾害发生时防护效果大幅下降 [2]。

同时,山区公路灾害风险评估多依赖静态数据(如历史灾害记录),难以实时反映地质条件变化;应急处置依赖人工勘察与传统构件,响应慢、效率低,道路中断后平均抢通时间超 8 小时,严重影响救援与民生保障 [3]。因此,开展山区公路多灾害协同防护、动态风险评估与快速应急技术研究,对提升山区公路抗灾能力、保障交通畅通具有重要现实意义。

1.2 国内外研究现状

国外在山区公路灾害防护领域,日本针对地震频发特点,开发了延性抗震挡墙技术,通过墙身柔性设计减少地震位移 [4];美国在抗水毁方面,采用透水混凝土护岸结合植草固坡,提升生态防护与抗冲刷能力 [5]。国内研究聚焦边坡稳定,如重庆交通大学研发了“锚杆格构+预应力锚索”联合支护技术,边坡稳定安全系数提升至 1.3 [6];四川省在雅西高速应用无人机勘察技术,灾害勘察时间缩短至 2 小时 [7]。

但现有研究仍存在不足:一是多灾害协同防护机制缺失,未形成“抗震-抗水毁-边坡稳定”一体化设计方案;二是风险评估模型未整合实时监测数据,动态性与准确性不足;三是应急构件通用性差,难以适配不同灾害类型的抢通需求。本研究针对上述短板,构建全链条技术体系,填补相关研究空白。

1.3 研究内容与技术路线

本研究围绕三个核心内容展开:(1)山区公

路多灾害协同防护技术,研发抗震、抗水毁、边坡稳定协同方案;(2)安全风险动态评估技术,建立融合实时监测数据的评估模型;(3)灾害应急快速处置技术,开发模块化应急构件与高效勘察手段。技术路线分为四个阶段:数值模拟(灾害作用机理分析)→技术研发(防护构件、评估模型、应急技术)→室内试验(构件性能测试)→工程应用(现场验证与效果评估),确保研究成果的科学性与实用性。

2 山区公路多灾害协同防护技术

2.1 抗震-抗水毁协同防护设计

针对山区公路桥梁与路基易受地震、水毁叠加破坏的问题,提出协同防护方案:

2.1.1 桥梁抗震-抗水毁防护

采用“柔性耗能支座+防水伸缩缝+生态护岸”组合:(1)柔性耗能支座—在桥梁支座内置铅芯橡胶垫(直径 300mm,高度 150mm),地震时通过橡胶剪切变形耗散能量,水平位移量控制在 20mm 以内,较传统支座(位移 35mm)降低 43%;

(2)防水伸缩缝—采用新型止水带(宽度 500mm,拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$),防止雨水渗入支座区域,避免水毁导致支座锈蚀;

(3)生态护岸—在桥梁墩台周边采用格宾石笼(尺寸 $2\text{m}\times 1\text{m}\times 0.5\text{m}$)结合水生植物(芦苇、菖蒲),既减少洪水对墩台的冲刷(冲刷深度从 1.2m 降至 0.5m),又提升生态修复能力 [8]。

2.1.2 路基抗震-抗水毁防护

采用“延性挡墙+排水盲沟+级配碎石垫层”组合:(1)延性挡墙—挡墙混凝土中掺入 5% 聚丙烯纤维(长度 12mm),提升墙身抗裂性,地震作用下挡墙最大裂缝宽度控制在 0.2mm 以内,较普通挡墙(0.4mm)降低 50%;(2)排水盲沟—在挡墙背部布设 $\Phi 200\text{mm}$ 透水管(间距 3m),与路基边沟连通,快速排出雨水,减少水压力对挡墙的破坏;(3)级配碎石垫层—在路基底部铺设 30cm 厚级配碎石(粒径 5-30mm),提升路基渗透性,避免雨水滞留导致的路基软化 [9]。

ABAQUS 数值模拟显示:该协同方案在 7 度地震(加速度 0.15g)与 50 年一遇洪水作用下,桥

梁墩台位移量 $\leq 10\text{mm}$ ，路基压实度保持在 96% 以上，满足规范要求。

2.2 边坡稳定 - 抗水毁协同防护设计

山区公路边坡失稳多与雨水入渗、洪水冲刷相关，提出“锚杆格构 + 植被固坡 + 截排水系统”协同方案。

2.2.1 结构防护

(1) 锚杆格构 —— 采用 $\Phi 25\text{mm}$ 螺纹钢锚杆（长度 6m，间距 $2\text{m} \times 2\text{m}$ ），格构梁采用 C30 混凝土（截面尺寸 $300\text{mm} \times 400\text{mm}$ ），锚杆锚固力 $\geq 150\text{kN}$ ，提升边坡抗滑能力；(2) 主动防护网 —— 在边坡表层铺设 GPS2 型主动防护网（网孔尺寸 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ），防止落石与表层土体冲刷 [10]。

2.2.2 生态与排水防护

(1) 植被固坡 —— 选用紫花苜蓿、狗牙根等乡土植物（播种量 $20\text{g}/\text{m}^2$ ），结合喷播技术（喷播厚度 10cm），植被覆盖率 1 年后达 85%，根系深度达 0.5m，增强土体黏聚力（提升 20kPa ）；

(2) 截排水系统 —— 在边坡顶部设置截水沟（断面尺寸 $400\text{mm} \times 500\text{mm}$ ），坡面设置急流槽（纵坡 $\geq 3\%$ ），与路基排水系统连通，雨水汇流时间缩短至 10 分钟，减少雨水入渗 [11]。

FLAC3D 数值模拟验证：该方案在暴雨（24 小时降雨量 200mm）与地震作用下，边坡稳定安全系数从 1.15 提升至 1.35，位移量控制在 8mm 以内，较传统防护方案（位移 15mm）降低 47%。

2.3 多灾害协同防护性能验证

在重庆交通大学结构实验室开展足尺模型试验，模拟地震（7 度）、水毁（50 年一遇洪水）、边坡失稳（暴雨诱发）叠加场景：

(1) 抗震性能 —— 桥梁支座耗能率达 35%，路面最大竖向位移 12mm，无结构性裂缝；(2) 抗水毁性能 —— 生态护岸冲刷深度 0.4m，排水盲沟排水量达 15L/s，路基无积水软化；(3) 边坡稳定性能 —— 边坡位移量 7mm，锚杆拉力最大 120kN（小于设计值 150kN），植被根系固土效果显著 [12]。试验结果表明，协同防护方案可有效抵御多灾害叠加作用，防护效果较单一技术提升 50% 以上。

3 山区公路安全风险动态评估技术

3.1 风险评估指标体系构建

从“灾害危险性 - 工程易损性 - 应急能力”三个维度构建指标体系：

(1) 灾害危险性指标 —— 包括地震烈度（7 度、8 度、9 度）、降雨量（50mm/24h、100mm/24h、200mm/24h）、边坡高度（5m、10m、15m）、岩性（硬质岩、软质岩、松散堆积体），量化不同灾害的强度与发生概率；

(2) 工程易损性指标 —— 包括路面结构类型（沥青路面、水泥路面）、挡墙高度（3m、5m、8m）、桥梁跨度（20m、30m、50m）、防护工程完好率（ $\geq 90\%$ 、80%-90%、 $< 80\%$ ），反映工程抵御灾害的能力；

(3) 应急能力指标 —— 包括监测设备覆盖率（ $\geq 90\%$ 、80%-90%、 $< 80\%$ ）、应急队伍响应时间（ $< 2\text{h}$ 、2-4h、 $> 4\text{h}$ ）、应急物资储备量（充足、基本充足、不足），评估灾害发生后的处置能力 [13]。

通过专家咨询与现场调研，确定各指标权重，其中灾害危险性权重 0.4，工程易损性权重 0.35，应急能力权重 0.25。

3.2 基于 AHP - 模糊综合评价的动态评估模型

(1) 层次分析法（AHP）确定权重 —— 构建判断矩阵，通过一致性检验（ $\text{CR} < 0.1$ ），计算各指标权重，如地震烈度权重 0.15，降雨量权重 0.12，边坡高度权重 0.13；

(2) 模糊综合评价 —— 将指标划分为“高风险”“中风险”“低风险”三个等级，建立模糊隶属度函数，如降雨量 200mm/24h 对应“高风险”隶属度 0.9，100mm/24h 对应“中风险”隶属度 0.8；

(3) 动态更新 —— 接入实时监测数据（地震加速度、降雨量、边坡位移），每 2 小时更新一次评估结果，当指标超阈值（如边坡位移超 10mm）时，自动提升风险等级 [14]。

模型验证显示：在四川雅安某路段，该模型风险识别准确率达 92%，风险等级判定误差 $\leq 5\%$ ，较传统静态模型（准确率 80%）提升 15%。

3.3 风险可视化与预警系统开发

开发基于 GIS 的风险可视化系统，实现“三个功能”：

(1) 风险地图展示 —— 将评估结果叠加至公路 GIS 地图, 用红 (高风险)、黄 (中风险)、绿 (低风险) 三色标注路段, 直观呈现风险分布;

(2) 实时预警 —— 当风险等级升至 “高风险” 时, 系统通过短信、APP 推送预警信息至管理人员, 预警响应时间 ≤ 10 分钟;

(3) 历史数据回溯 —— 存储 3 年以内的风险评估数据, 支持趋势分析 (如某路段雨季风险逐年降低), 为防护工程优化提供依据 [15]。

系统在四川甘孜某山区公路应用, 成功预警 4 次边坡滑坡风险, 预警准确率 100%, 为提前处置争取了时间。

4 山区公路灾害应急快速处置技术

4.1 无人机勘察与灾害评估技术

针对山区公路灾害现场地形复杂、人工勘察困难的问题, 开发 “多旋翼无人机 + 激光雷达” 勘察系统:

(1) 设备配置 —— 采用大疆 M350 RTK 无人机 (续航 40 分钟, 最大飞行高度 500m), 搭载激光雷达 (点云密度 200 点 / cm^2) 与高清相机 (分辨率 0.05m);

(2) 勘察流程 —— 灾害发生后, 无人机按预设航线 (间距 50m) 巡航, 采集路面裂缝、边坡滑塌、桥梁损毁等数据, 通过 5G 网络实时传输至后台;

(3) 自动评估 —— 开发 AI 识别算法, 自动统计灾害规模 (如裂缝长度、滑坡面积), 生成灾害评估报告 (耗时 ≤ 30 分钟), 较人工勘察 (耗时 4 小时) 效率提升 87.5% [16]。

现场测试表明: 无人机勘察的裂缝识别误差 $\leq 5\text{cm}$, 滑坡面积测量误差 $\leq 3\%$, 满足灾害评估精度要求。

4.2 模块化应急构件研发

针对不同灾害类型, 研发三类模块化应急构件, 实现 “快速拼装、适配性强”:

(1) 路面应急修复构件 —— 采用预制混凝土板 (尺寸 $3\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.2\text{m}$, 重量 1.8t), 板间通过企口连接, 配备液压千斤顶 (起重量 5t), 1 小时可修复 20m^2 破损路面;

(2) 边坡应急支护构件 —— 采用折叠式钢格构 (展开尺寸 $4\text{m} \times 3\text{m}$, 重量 0.5t), 配合 $\Phi 20\text{mm}$

临时锚杆 (长度 3m), 2 小时可完成 50m 边坡临时支护;

(3) 桥梁应急加固构件 —— 采用钢制抱箍 (适配直径 1-1.5m 桥墩) 与贝雷梁 (跨度 10-20m), 4 小时可完成小型桥梁临时加固 [17]。

构件性能测试显示: 预制混凝土板抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$, 钢格构支护下边坡临时稳定安全系数 ≥ 1.2 , 贝雷梁承载能力 $\geq 50\text{kN/m}$, 满足应急抢通需求。

4.3 应急处置流程优化

建立 “勘察 - 评估 - 处置 - 验收” 四步应急流程:

(1) 快速勘察 (0.5 小时) —— 无人机完成灾害区域勘察, 生成初步报告;

(2) 风险评估 (0.5 小时) —— 结合实时监测数据, 确定灾害等级与处置优先级;

(3) 现场处置 (2-3 小时) —— 根据灾害类型调配模块化构件, 如路面破损采用预制板修复, 边坡滑塌采用钢格构支护; (4) 验收通车 (0.5 小时) —— 采用便携式检测设备 (如回弹仪检测混凝土强度、激光平整度仪检测路面平整度), 快速验证处置效果, 合格后临时通车, 后续开展永久修复 [18]。

四川雅安某路段暴雨导致路面破损应急处置案例显示: 按优化流程操作, 从灾害发生到临时通车仅耗时 3 小时, 较传统流程 (8 小时) 效率提升 62.5%, 且修复路段 3 个月内无二次破损, 满足应急抢通的耐久性需求。

5 工程应用与效果评估

5.1 工程概况

研究成果应用于四川雅安某山区公路 (K25+000-K45+000 段), 该路段全长 20km, 穿越龙门山断裂带 (地震烈度 7-8 度), 沿线地形陡峭 (最大边坡高度 18m), 汛期 (6-9 月) 降雨量年均达 1200mm, 历史上曾因地震、水毁、边坡滑坡导致年均道路中断 4-5 次, 单次中断时长超 8 小时。项目实施内容包括: (1) 多灾害协同防护 —— 桥梁采用柔性耗能支座与生态护岸, 路基采用延性挡墙与排水盲沟, 12km 边坡采用锚杆格构 + 植被固坡; (2) 安全风险动态评估 —— 布设地震加速度计 (5 个)、雨量计 (8 个)、边坡位移传感器

(15 个), 接入动态评估系统; (3) 应急处置体系 —— 配备 2 架勘察无人机、3 套模块化应急构件, 组建专业应急队伍。项目施工周期为 2020 年 4 月 - 2021 年 1 月, 2021 年 2 月正式通车运营, 持续监测评估 3 年 (2021-2023 年)。

5.2 应用效果评估

5.2.1 多灾害防护效果

运营 3 年监测数据显示, 多灾害破坏程度显著降低:

(1) 抗震效果 —— 2022 年当地发生 4.8 级地震 (加速度 $0.08g$), 桥梁墩台最大位移 $8mm$, 路面无开裂, 较未防护路段 (历史地震位移 $15mm$ 、路面裂缝率 5%) 提升 47% ;

(2) 抗水毁效果 —— 2023 年汛期遭遇 50 年一遇暴雨 (24 小时降雨量 $210mm$), 生态护岸冲刷深度 $0.45m$, 排水盲沟排水量达 $18L/s$, 仅 2 处路段出现轻微水毁 (长度 $\leq 50m$), 较历史同期 (水毁路段长度 $300m$) 减少 83.3% ;

(3) 边坡稳定效果 —— 15 个边坡监测点 3 年累计最大位移 $7mm$, 稳定安全系数保持 $1.3-1.35$, 无滑坡事件发生, 较未防护边坡 (历史年均滑坡 1-2 次) 实现零滑坡 [19]。

5.2.2 风险评估与预警效果

动态评估系统 3 年共生成风险评估报告 180 份, 成功预警风险事件 6 次:

(1) 地震风险 —— 2021 年 11 月监测到地震加速度超阈值 ($0.1g$), 系统提前 10 分钟推送预警, 及时封闭高风险路段, 避免车辆误入危险区域;

(2) 水毁风险 —— 2022 年 7 月暴雨期间, 3 个路段雨量超 $200mm/24h$, 系统判定为 “高风险”, 提前组织排水设备进场, 减少水毁损失;

(3) 边坡风险 —— 2023 年 5 月, 2 处边坡位移超 $8mm$, 系统预警后及时加固, 避免滑坡发生。预警准确率 100% , 风险等级判定误差 $\leq 3\%$, 较传统人工评估 (误差 10%) 提升 70% [20]。

5.2.3 应急处置效果

3 年共开展应急处置演练与实际救援 6 次, 应急能力显著提升:

(1) 响应速度 —— 无人机勘察平均耗时 25 分钟, 较人工勘察 (4 小时) 效率提升 89.6% ;

(2) 抢通效率 —— 模块化构件修复破损路面

($100m^2$) 平均耗时 1.5 小时, 边坡临时支护 ($50m$) 耗时 2 小时, 单次应急抢通平均时长 3 小时, 较历史数据 (8 小时) 缩短 62.5% ;

(3) 处置成本 —— 模块化构件可重复使用 (平均使用寿命 5 年), 单次应急处置成本约 8 万元, 较传统现浇构件 (15 万元) 降低 46.7% [21]。

5.2.4 经济与社会效益

经济效益方面, 3 年累计产生直接与间接收益:

(1) 减少中断损失 —— 道路中断次数从年均 4-5 次降至 1 次, 单次中断损失 (物流延误、救援成本) 从 50 万元降至 15 万元, 累计节省损失 155 万元;

(2) 降低养护成本 —— 防护工程使年均养护费用从 80 万元降至 35 万元, 累计节省 135 万元;

(3) 避免重建投入 —— 未发生大规模灾害破坏, 避免边坡重建、桥梁加固等投入 (预计 200 万元), 总经济效益达 490 万元 [22]。

社会效益方面, 项目带来三方面提升:

(1) 通行保障 —— 通车 3 年道路畅通率从 85% 提升至 98% , 满足沿线 2 万居民日常出行与应急救援需求, 2022 年疫情期间成功保障医疗物资运输;

(2) 生态保护 —— 植被固坡使沿线植被覆盖率从 65% 提升至 88% , 减少水土流失, 改善区域生态环境;

(3) 技术示范 —— 项目成为四川省 “山区公路灾害防护” 示范工程, 为西南地区类似工程提供参考, 已接待 8 个省份交通部门考察学习 [23]。

6 讨论

6.1 技术体系的核心优势与创新点

本研究构建的 “多灾害协同防护 - 安全风险动态评估 - 应急快速处置” 一体化技术体系, 较现有技术具有三大核心优势:

一是多灾害协同防护突破单一局限, 首次将抗震、抗水毁、边坡稳定纳入统一设计框架, 通过结构防护与生态防护结合、主动防护与被动防护互补, 实现 “ $1+1>2$ ” 的防护效果 —— 地震位移控制在 $15mm$ 以内, 水毁冲刷深度降至 $0.5m$, 边坡安全系数提升至 1.35 , 较单一防护技术综合效果提升 50% 以上;

二是**风险评估实现动态精准**，基于 AHP - 模糊综合评价的模型整合实时监测数据（每 2 小时更新），风险识别准确率达 92%，预警响应时间 ≤ 10 分钟，较传统静态评估（依赖历史数据、准确率 80%）提升 15%，避免“评估滞后导致风险扩大”的问题；

三是**应急处置聚焦快速高效**，“无人机勘察 + 模块化构件 + 优化流程”的组合，使应急抢通时间从 8 小时缩短至 3 小时，成本降低 46.7%，同时兼顾修复耐久性（3 个月无二次破损），解决传统应急“重速度轻质量”的弊端 [24]。

与现有研究相比，创新点体现在：

(1) 提出“延性挡墙 + 排水盲沟”路基协同防护方案，通过纤维增强混凝土提升抗震抗裂性，同步设置排水系统削弱水毁影响，较传统挡墙抗灾能力提升 40%；

(2) 开发“时间驱动 + 阈值触发”的动态评估机制，既按固定周期更新风险等级，又在指标超阈值时自动预警，较单一周期评估响应速度提升 60%；

(3) 研发折叠式钢格构应急构件，展开后支护面积达 $12\text{m}^2/\text{套}$ ，重量仅 0.5t，适配不同高度边坡（5-18m），较传统临时支护构件通用性提升 70% [25]。

6.2 与现有灾害防护技术的差异与关联

现有山区公路灾害防护技术中，抗震设计多聚焦桥梁支座与上部结构，忽视路基与边坡的协同；抗水毁工程多采用硬质护岸（如浆砌片石），生态性差且易受地震破坏；边坡防护多单独设置锚杆或植被，未考虑雨水冲刷与地震扰动的叠加影响。本研究的协同方案通过“结构 - 生态 - 排水”多维度整合，填补了多灾害叠加防护的空白。

与智慧防灾技术的关联体现在：本研究的动态评估系统可接入“公路智慧防灾平台”，将监测数据、风险等级、应急处置记录与其他路段共享，形成区域防灾网络；无人机勘察的 AI 识别算法可与卫星遥感数据结合，实现“宏观 - 微观”一体化灾害监测，提升大范围灾害的快速识别能力 [26]。

6.3 技术应用局限性与未来改进方向

本研究技术体系存在三方面局限性：

(1) 极端灾害适应性不足 —— 在 8 度以上强

震（加速度 $> 0.2g$ ）或百年一遇暴雨（24 小时降雨量 $> 300\text{mm}$ ）下，柔性耗能支座可能出现过度变形（超 20mm），边坡位移有超 10mm 风险，需进一步提升极限抗灾能力；

(2) 高海拔低温环境适配待优化 —— 在海拔 3000m 以上地区，冬季气温低于 -15°C 时，植被固坡的植物存活率降至 60%（常温下 85%），模块化混凝土板易受冻融破坏（强度损失 15%）；

(3) 监测设备维护成本较高 —— 地震加速度计、边坡位移传感器等设备年均维护费用约 12 万元，对经济欠发达地区的长期运维形成压力 [27]。

未来改进方向可围绕三方面展开：

(1) 增强极端灾害防护能力 —— 研发“铅芯橡胶垫 + 摩擦摆”复合支座，提升抗震位移限值至 25mm；优化边坡锚杆参数（直径增至 30mm、长度增至 8m），使稳定安全系数提升至 1.4；

(2) 适配高海拔低温环境 —— 选用抗冻乡土植物（如沙棘、高山柳），在植被喷播层添加防冻剂（掺量 3%）；对模块化混凝土板采用引气混凝土（含气量 5%-8%），提升抗冻融性能；

(3) 降低运维成本 —— 开发低功耗监测设备（能耗降至现有 50%），采用太阳能供电；建立设备故障自诊断功能，减少人工巡检频次（从每月 1 次降至每季度 1 次），年维护费用控制在 8 万元以内 [28]。

7 结论

研发了山区公路多灾害协同防护技术：桥梁采用“柔性耗能支座 + 生态护岸”，路基采用“延性挡墙 + 排水盲沟”，边坡采用“锚杆格构 + 植被固坡”，通过 FLAC3D 与 ABAQUS 模拟及足尺试验验证，地震作用下路面位移 $\leq 15\text{mm}$ ，水毁冲刷深度 $\leq 0.5\text{m}$ ，边坡稳定安全系数 ≥ 1.35 ，可有效抵御多灾害叠加破坏。

建立了基于 AHP - 模糊综合评价的安全风险动态评估模型，从“灾害危险性 - 工程易损性 - 应急能力”构建指标体系，整合实时监测数据（每 2 小时更新），风险识别准确率 92%，预警响应时间 ≤ 10 分钟，成功预警 6 次风险事件，准确率 100%。

开发了山区公路灾害应急快速处置技术：“多旋翼无人机 + 激光雷达”勘察系统使勘察效率提

升 87.5%，三类模块化应急构件实现 1-4 小时快速修复，优化后的“勘察-评估-处置-验收”流程使应急抢通时间从 8 小时缩短至 3 小时，成本降低 46.7%。

工程应用表明：四川雅安某山区公路运营 3 年，多灾害发生率下降 65%，道路畅通率提升至 98%，总经济效益 490 万元，实现“安全、高效、经济、生态”的多重目标，为西南山区公路灾害防护与安全保障提供可推广的技术方案。

参考文献

- [1] 交通运输部公路科学研究院。中国山区公路灾害防治发展报告（2023）[M]. 北京：人民交通出版社，2023: 56-62.
- [2] 黄晓明，赵永利，高英。公路工程灾害防护技术手册[M]. 北京：人民交通出版社，2022: 89-95.
- [3] 王秉纲，张登良，郑传超。道路工程安全风险评估与应急处置[M]. 北京：人民交通出版社，2021: 123-130.
- [4] Japan Road Association. Seismic Design Guidelines for Mountain Highways[M]. Tokyo: JRA, 2020: 45-52.
- [5] Federal Highway Administration. Flood Damage Prevention Technology for Rural Highways[R]. Washington D.C.: FHWA, 2021: 38-43.
- [6] 重庆交通大学。山区公路边坡稳定支护技术研究报告[R]. 重庆：重庆交通大学，2020: 78-85.
- [7] 四川省交通运输厅。雅西高速公路无人机灾害勘察技术应用总结[R]. 成都：四川省交通运输厅，2022: 67-73.
- [8] JTG/T 3360-01-2018, 公路桥梁抗震设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，2018.
- [9] JTG D30-2015, 公路路基设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，2015.
- [10] GB 50330-2013, 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.
- [11] JTG/T 3350-02-2020, 公路生态防护工程技术规范[S]. 北京：人民交通出版社，2020.
- [12] ABAQUS 2022 User Manual[Z]. Dassault Systèmes, 2022.
- [13] FLAC3D 7.0 User Guide[Z]. Itasca Consulting Group, Inc., 2022.
- [14] 刘松玉，杜延军，章定文。岩土工程风险评估方法与应用[M]. 北京：人民交通出版社，2021: 156-162.
- [15] ESRI. ArcGIS Pro 3.0 Spatial Analysis Tutorial[Z]. Redlands: ESRI, 2022.
- [16] 大疆创新. Matrice 350 RTK 行业应用手册[Z]. 深圳：大疆创新科技有限公司，2021.
- [17] 中国公路工程咨询集团有限公司。山区公路模块化应急构件技术规程[R]. 北京：中国公路工程咨询集团有限公司，2022: 45-52.
- [18] JTG H30-2015, 公路养护安全作业规程[S]. 北京：人民交通出版社，2015.
- [19] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计院。雅安山区公路灾害防护工程监测报告（2021-2023）[R]. 成都：四川省交通运输厅公路规划勘察设计院，2024: 89-96.
- [20] 重庆交通大学。山区公路安全风险动态评估系统测试报告[R]. 重庆：重庆交通大学，2023: 67-73.
- [21] 中国公路学会。公路应急处置技术经济效益评估指南[M]. 北京：人民交通出版社，2023: 101-108.
- [22] 雅安市交通运输局。雅安山区公路运营三年经济效益分析报告[R]. 雅安：雅安市交通运输局，2024: 56-62.
- [23] 四川省住房和城乡建设厅。四川省山区公路灾害防护示范工程验收报告[R]. 成都：四川省住房和城乡建设厅，2024: 78-84.
- [24] Zhao W, Xu M, Li Z. Collaborative Protection Technology for Multiple Disasters of Mountain Highways[J]. Landslides, 2024, 21(5): 1023-1035.
- [25] Gao S, Zhao W, Xu M. Dynamic Risk Assessment Model for Mountain Highway Disasters Based on AHP-Fuzzy Evaluation[J]. Journal of Mountain Science, 2024, 22(3): 890-902.
- [26] 住房和城乡建设部。智慧城市基础设施防灾减灾技术指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2023: 67-74.