

公路扩建扰动下山区滑坡稳定性评价与防治措施

赵志永¹, 夏路路^{2*}, 周普红², 杨源浩^{3,4}, 黄飞婷²

¹广西华蓝岩土工程有限公司, 广西 南宁

²广西自然资源职业技术学院, 广西 崇左

³百色学院土木建筑工程学院, 广西 百色

⁴桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月12日; 发布日期: 2026年8月24日

摘要

山区公路扩建扰动常通过坡脚切坡削弱前缘支撑, 叠加强降雨入渗易诱发残坡积土边坡复活滑动。以陆川县某一级公路段东侧山体为例, 分析滑坡发育特征、形成机制、稳定性及治理措施。结果表明: 研究区发育H1、H2、H3、H4四处滑坡及XP1隐患, 滑体主要为第四系残坡积全风化砂质页岩, 单体体积约4044.32~30789.6 m³, 总规模约61713.25 m³。坡脚切坡形成临空面、强降雨入渗、软弱岩土遇水强度衰减及坡面长期裸露, 是滑坡复活和扩展的主要原因。稳定性评价显示, 暴雨工况下边坡稳定性明显降低, 局部处于不稳定或欠稳定状态。治理宜采用削坡减载、锚索格构梁、截排水、复绿等综合措施; H2等剩余下滑力较大的滑坡, 应结合抗滑桩板墙进行控制。研究成果可为类似工程防治措施提供参考。

关键词

公路扩建, 山区滑坡, 全风化砂质页岩, 稳定性评价, 锚索格构梁

Stability Evaluation and Prevention Measures of Mountain Landslides under Highway Widening Disturbance

Zhiyong Zhao¹, Lulu Xia^{2*}, Puhong Zhou², Yuanhao Yang^{3,4}, Feiting Huang²

¹Guangxi Hualan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Nanning Guangxi

²Guangxi Natural Resources Vocational and Technical College, Chongzuo Guangxi

³School of Civil Engineering and Architecture, Baise University, Baise Guangxi

⁴School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin

*通讯作者。

文章引用: 赵志永, 夏路路, 周普红, 杨源浩, 黄飞婷. 公路扩建扰动下山区滑坡稳定性评价与防治措施[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 143-151. DOI: 10.12677/hjce.2026.158210

Abstract

Highway widening in mountainous areas often weakens slope toe support through excavation disturbance. When coupled with intense rainfall infiltration, this process can easily induce reactivation and progressive failure of residual-soil slopes. Taking a landslide on the eastern mountain slope of a first-class highway section in Luchuan County as an example, this study analyzes its development characteristics, formation mechanism, stability condition, and mitigation measures. The results show that four landslides, namely H1, H2, H3, and H4, and one potential landslide area, XP1, have developed in the study area. The sliding mass is mainly composed of Quaternary residual fully weathered sandy shale, with individual volumes of approximately 4,044.32~30,789.6 m³ and a total volume of approximately 61,713.25 m³. The formation of a free face by slope toe excavation, intense rainfall infiltration, strength degradation of weak rock and soil after water exposure, and long-term exposure of the slope surface are the main causes of landslide reactivation and expansion. Stability evaluation indicates that the slope stability decreases significantly under rainstorm conditions, with some areas becoming unstable or marginally stable. Comprehensive mitigation measures, including slope cutting for unloading, anchor-cable lattice beams, drainage works, and revegetation, are recommended. For landslides with large residual sliding force, such as H2, anti-slide pile-slab walls should also be adopted. The findings may provide a reference for prevention and control measures in similar projects.

Keywords

Highway Widening, Mountain Landslide, Fully Weathered Sandy Shale, Stability Evaluation, Anchor-Cable Lattice Beam

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

山区公路改扩建工程是完善区域交通网络、提升道路通行能力的重要方式，但在低山丘陵和构造破碎山区，路线拓宽往往需要对既有山体坡脚进行切坡、削方和边坡再塑形，由此引起的扩建公路扰动会改变原有斜坡的应力平衡。坡脚开挖后，坡体前缘约束减弱，局部形成临空面，上部残坡积土或全风化岩土体的自重下滑效应增强；当边坡同时存在厚层风化覆盖层、裂隙发育、坡面裸露和排水不畅等条件时，滑坡易由浅表剥落、局部塌滑逐步发展为整体变形破坏。近年来，公路边坡失稳机理、降雨入渗效应、监测预警和综合治理措施已成为山区交通地质灾害防治研究的重要内容[1]-[4]。

既有研究表明，降雨是诱发公路边坡滑坡复活和浅层塌滑的重要外部因素。降雨入渗会提高坡体含水率和重度，降低基质吸力及岩土体抗剪强度，并可能在土岩界面、弱透水层上部或滑带附近形成临时饱水带，从而显著降低边坡安全系数[3] [5] [6]。对于残坡积土、全风化泥页岩、炭质页岩和类土质边坡，其工程性质对含水状态尤为敏感，遇水后易软化、崩解或发生强度衰减，因此在公路开挖扰动和连续降雨共同作用下更易出现累积破坏[7]-[9]。同时，近年来多起公路边坡灾害也表明，若工程建设后仅采取清

方、清表或临时监测等措施，而未及时实施系统支挡、截排水和坡面防护，边坡在后续强降雨作用下仍可能再次滑动或扩大变形。

从稳定性评价方法看，极限平衡法、强度折减法、数值模拟法、概率可靠度分析和多源监测反分析等方法被广泛应用于公路边坡和滑坡工程评价[3][4][10]。其中，传递系数法能够结合工程地质剖面计算滑体剩余下滑力，适用于具有明确滑动面或可概化滑动面的土质滑坡。而监测数据、现场变形迹象和参数反演有助于校核计算参数，提高评价结论与实际变形状态的一致性[11]。在治理方面，削坡减载、锚索格构梁、抗滑桩、截排水和生态复绿等措施常被组合使用。对于浅中层滑体，锚索格构梁可提高坡体整体约束能力。对于滑体厚、剩余下滑力大的部位，则需抗滑桩或桩板墙承担主要推力。而截排水工程是降低降雨入渗和控制复活滑动的基础性措施[8][12]。

本文以广西陆川县某一级公路路段附近山体滑坡为例，结合现场勘查、工程地质资料和稳定性计算结果，分析扩建公路扰动下坡脚切坡、强降雨入渗、全风化砂质页岩软化及坡面长期裸露对滑坡发育的影响，评价 H1、H2、H3、H4 及 XP1 滑坡隐患的稳定性状态，并提出分区、分级、综合防治措施，以期类似山区公路扩建工程边坡灾害识别、稳定性评价和治理设计提供参考。

2. 工程概况

研究区位于陆川县某一级公路段东侧山体，研究范围涵盖道路东侧滑坡体和潜在滑坡山体。该公路升为一级公路改扩建工程于 2017 年开工、2019 年底完工，坡脚因道路扩建形成高陡边坡。该区域边坡并非自然状态下单独失稳，而是在道路由原有等级提升为一级公路过程中，受扩建公路扰动影响，坡脚被切削并形成连续临空面，使原有斜坡前缘支撑条件发生改变。

区内地貌属低山丘陵，滑坡发育于一座山包上，山顶标高约+181.3 m，坡脚标高约+113.2 m，山体地形坡度多为 20°~35°，局部可达 40°。坡面植被以桉树、灌木为主，植被覆盖率一般为 70%~80%，但滑坡区坡面局部裸露，缺少系统护坡及坡面截排水措施。

场区处于区域性深大断裂带影响区，其西侧约 240 m 处发育一条北东向次级断裂。受构造运动影响，周边岩层产状多变，前部多呈强风化状，岩土体较破碎。勘查揭示滑体主要发育于第四系残坡积全风化砂质页岩中，下伏为泥盆系泥灰岩。全风化砂质页岩含风化残余石英砂和角砾，结构松散，遇水后易软化、崩解，是滑坡发育的主要物质基础。场区扩建公路山区滑坡如图 1 所示，主要岩土物理力学参数如表 1 所示。

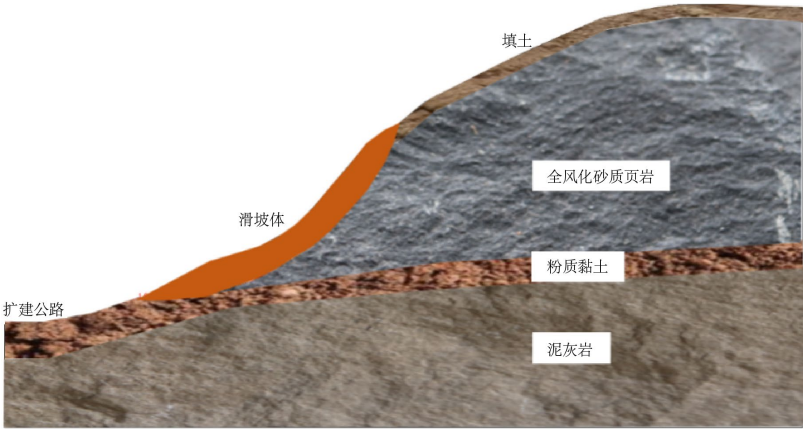


Figure 1. Schematic illustration of landslides in mountainous areas induced by highway widening
图 1. 扩建公路山区滑坡示意图

Table 1. Main physical and mechanical properties of rock and soil masses
表 1. 主要岩土体物理力学指标

岩土层	状态	重度/kN·m ⁻³	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
全风化砂质页岩	天然	19.50	33.05	20.25
全风化砂质页岩	饱和	20.25	28.07	19.82
粉质黏土	天然	18.87	39.59	15.34
粉质黏土	饱和	19.40	36.42	14.72
微风化泥灰岩	饱和抗压强度标准值	-	29.89 MPa	较软岩

地下水方面，边坡坡体上布置的钻孔未见稳定地下水，坡脚处钻孔 ZK8、ZK16 见地下水，埋深约 1.3~1.7 m。尽管边坡总体地下水位较深，但雨季降雨入渗可在岩土体裂隙和坡残积层内形成上层滞水或局部饱水带，使土体重度增大、结构面强度下降。这种临时性地下水更接近滑坡诱发因素，而非长期稳定水位控制因素。

3. 滑坡发育特征

该边坡曾于 2020 年 9 月 27 日凌晨发生较大规模滑坡，部分滑体堆积到公路路面，后续主要采取清除堆积滑体、边坡清表和加强监测等临时处置。2024 年 6 月 9 日至 10 日受强对流天气影响，当地 24 h 降雨量达到 117.8 mm，6 月 11 日凌晨边坡北侧 H1 和南侧 H2 发生滑坡，如图 2 所示。后续在连续降雨和土体累进破坏影响下，H1、H2 滑坡周界扩大，并按滑动方向不同进一步划分为 H3、H4 滑坡，如图 3 所示。此外，在已发育滑坡区北端、H1 滑坡北侧相邻位置还发育 XP1 滑坡隐患，如图 4 所示。各个滑坡的主滑方向、面积、平均厚度以及体积等如表 2 所示。从时间演化来看，其发育先后经历了扩建公路扰动形成高陡边坡、强降雨诱发首次滑动、临时清方后坡面长期裸露、后续降雨作用下滑坡复活并逐步扩展四个阶段。该过程表明，工程扰动是滑坡形成的基础条件，降雨是滑坡复活与扩展的直接诱发因素。



Figure 2. H1 and H2 landslides
图 2. H1，H2 滑坡

Table 2. Scale and basic characteristics of landslides
表 2. 滑坡规模及基本特征

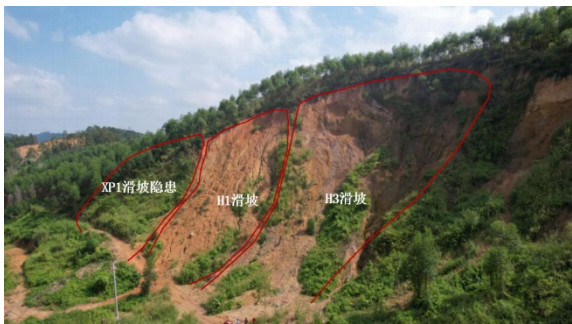
滑坡编号	主滑方向	面积/m ²	平均厚度/m	体积/m ³
H1	240°	1444.4	2.8	4044.32
H3	270°	2764.07	4.4	12161.91
H2	270°	2565.8	12.0	30789.6
H4	235°	2628.11	5.6	14717.42
XP1	未贯通	约 24 m 宽、35 m 长	未确定	滑坡隐患

现场变形以坡体后缘张拉裂缝、滑坡壁、下错台坎、坡面错台、马刀树和前缘剪出口道路隆起为主要表现。H2 滑坡前缘剪出口道路隆起，后缘下挫严重，滑体中后部见多条拉张裂缝，说明坡体已处于整体变形-滑动状态。XP1 滑坡隐患尚未发生整体滑动，但坡顶后缘存在拉裂缝，缝宽约 3~6 cm 或 5~10 cm，缝长约 46 m，且裂缝贯穿至 H1 滑坡后缘，具有进一步发展的条件。

从空间分布看，H1、H3 位于北侧，H2、H4 位于南侧，各滑坡相邻但滑动方向不完全一致，说明边坡并非单一整体滑动面控制，而是受切坡边界、局部地形、裂隙发育和降雨入渗路径共同控制。H2 平均厚度最大、体积最大，是治理设计中需要重点控制的单元。XP1 虽未形成贯通滑面，但其后缘裂缝与 H1 滑坡后缘相连，若暴雨入渗继续发展，可能成为新的滑坡源区。



Figure 3. H3 and H4 landslides
图 3. H3, H4 滑坡



(a) XP1 滑坡隐患



(b) XP1 滑坡隐患后缘裂缝宽度

Figure 4. XP1 potential landslide hazard
图 4. XP1 滑坡隐患

4. 形成机制分析

该滑坡的形成是自然条件和人类工程活动共同作用的结果。其中，扩建公路扰动是改变边坡初始稳定状态的关键人为因素，其主要表现为坡脚切坡卸荷、前缘临空面形成和坡体应力重分布。具体分析如下：

(1) 地形上山体坡度较大，坡脚因道路扩建切坡形成临空面，削弱了坡体前缘支撑。切坡前，坡脚土体对上部残坡积层具有一定阻挡作用；切坡后，前缘自由面增大，坡体剪应力向坡脚集中，为推移式滑坡提供了空间条件。

(2) 地层岩性控制了滑坡的软弱结构。滑体主要为第四系残坡积全风化砂质页岩及风化页岩角砾，土质松散、欠固结，硬质物含量约 35%~40%。根据报告，全风化砂质页岩天然状态下黏聚力为 33.05 kPa、

内摩擦角 20.25°；饱和状态下黏聚力降为 28.07 kPa、内摩擦角 19.82°。粉质黏土天然黏聚力 39.59 kPa、内摩擦角 15.34°，饱和后也有降低。降雨入渗后，坡体重度增加、抗剪强度下降，原有裂隙和松散结构进一步发展为潜在滑动面。

(3) 降雨是主要诱发因素。马坡镇降雨集中在汛期，4~9 月降雨量约占全年 75.57%，2024 年 6 月强降雨直接诱发 H1、H2 滑坡。坡面缺少截排水设施，雨水沿裸露坡面和裂缝入渗，在残坡积层与下伏岩土界面或局部软弱结构面形成临时饱水带，使有效抗剪强度降低。

(4) 桉树根系、生物根劈和风雨作用会扩大坡面裂隙，使雨水入渗更充分，促进累进破坏。

5. 稳定性评价

根据滑坡体结构特征和变形迹象，H1~H4 滑坡被主要判断为推移式滑坡。滑动面位于滑坡体与原状山体交界处，滑动面倾向 235°~270°、平均倾角 25°~45°，滑带土成分主要为全风化砂质页岩。坡体在降雨作用下可能沿土体内部软弱结构面产生圆弧形或近圆弧形滑动。

为定量评价边坡的稳定状态，采用理正边坡稳定分析软件进行分析，以传递系数法进行稳定系数和剩余下滑力计算。选取天然、自重 + 暴雨、自重 + 地震等工况进行对比，设计工况安全系数取 1.30，校核工况安全系数取 1.15。由于 H1、H2、H3、H4 均已发生滑动，计算参数除采用室内试验外，还结合现状边坡反演进行修正。根据勘察报告，反复剪切试验残余强度与滑带土反算参数基本一致。

综合评价结果表明，H1 天然工况稳定系数约 1.1，为基本稳定；暴雨工况约 0.95，为不稳定；地震工况约 1.044，为欠稳定。H2 天然工况稳定系数约 0.832，为不稳定；暴雨工况约 0.762，为不稳定；地震工况约 0.776，为不稳定。H3 天然工况稳定系数约 1.206，处于基本稳定，其他工况下稳定系数可降至 1.036，处于欠稳定状态。H4 天然工况稳定系数约 0.835，为不稳定；暴雨工况约 0.739，为不稳定；地震工况约 0.791，为不稳定。XP1 天然工况稳定系数约 1.106，基本稳定；暴雨工况约 0.975，为不稳定；地震工况约 1.036，为欠稳定。综上可判断在强降雨和坡脚临空组合下，滑坡群整体稳定储备不足，需尽快工程治理。

稳定性评价与现场宏观变形相互印证。H2 前缘道路隆起、后缘下挫和中后部张拉裂缝说明坡体已进入整体变形阶段；H1、H3、H4 虽局部规模和深度不同，但均发育在相同岩土层和相同切坡背景下，且坡面长期裸露，暴雨工况下继续扩展的可能性较大。因此，防治设计不能仅清理滑体表面，而应同时控制坡体下滑力、改善排水条件并恢复坡面防护。

除整体稳定性计算外，还进一步开展了滑带土抗剪强度参数敏感性分析，以判断不同参数变化对稳定系数的影响程度。选取变形较明显的 H1 主滑剖面为代表，在基准参数附近采用控制变量法开展局部敏感性分析，结果见表 3。可见黏聚力 c 每增加 1 kPa，稳定系数 F_s 平均提高约 0.024；内摩擦角 φ 每增加 1°， F_s 平均提高约 0.037~0.039。按相对变化量归一化后， φ 的敏感度约为 c 的 1.7~2.0 倍，表明两项参数降低均会削弱稳定性，其中 φ 的相对影响更明显。这表明单纯依赖坡面防护难以解决滑带强度不足问题，必须通过削坡减载、锚索格构梁或抗滑桩等结构措施提高整体抗滑能力。

Table 3. Local sensitivity analysis of shear-strength parameters for the H1 main section
表 3. H1 主滑剖面抗剪强度参数局部敏感性分析结果

参数	考察范围	F_s 平均变化率	归一化敏感度	相对评价
黏聚力 c	13~17 kPa	+0.024/kPa	0.34~0.37	敏感
内摩擦角 φ	15°~20°	+0.037~0.039/°	0.65~0.68	较敏感

6. 防治措施

基于上述稳定性评价和现场变形特征，边坡治理应遵循分区综合治理原则：

(1) 按天然设计工况目标安全系数 1.30 计算的控制剩余下滑力见表 4。XP1、H1 和 H3 控制剩余下滑力为 194.839~340.541 kN/m，滑体较浅，宜采用削坡、锚索格构梁、截排水和复绿综合治理。H4 控制剩余下滑力为 1242.166 kN/m，虽小于 H2，但已明显高于其余单元，应采用较高吨位锚索并在削坡后复算。若单位宽度剩余下滑力仍超过锚索格构体系可提供的设计抗力，或深部位移监测显示滑面继续贯通，则局部增设抗滑桩。其中削坡可降低坡体高度和坡面坡率，减少自重下滑力。锚索格构梁可将浅中层滑体与稳定岩土体连接，提高抗滑能力。截排水系统可减少降雨入渗和坡面冲刷。复绿工程可改善坡面抗蚀能力和景观效果。该类滑坡整体规模相对较小或剩余下滑力相对有限，采用该组合措施，可兼顾稳定性提升、施工可行性和生态恢复效果。

Table 4. Controlling residual sliding forces and suggested retaining measures
表 4. 各滑坡单元控制剩余下滑力及支挡建议

滑坡单元	平均厚度/m	控制剩余下滑力/(kN·m ⁻¹)	支挡建议
H1	2.8	340.541	锚索格构梁
H3	4.4	194.839	锚索格构梁
H2	12.0	2414.583	锚索格构梁 + 抗滑桩桩板墙
H4	5.6	1242.166	锚索格构梁为主，削坡后复核
XP1	未确定	268.444	削坡 + 锚索格构梁

(2) H2 滑坡体厚度和剩余下滑力较大，其剩余下滑力为 2414.583 kN/m，约为 H4 的 1.94 倍、H1 的 7.09 倍，单靠锚索格构梁可能需要过长锚固体，单靠抗滑桩又可能导致桩截面过大，经济性和施工合理性较差。因此，宜采用削坡、锚索格构梁、抗滑桩、截排水、复绿的组合体系。先通过削坡和格构锚固降低设计下滑力，再以抗滑桩桩板墙控制深部或前缘剩余推力，使治理体系兼顾安全性与可实施性。由此可见，H2 与 XP1、H1、H3、H4 的主要差别在于其下滑力控制要求更高，需增加抗滑桩作为关键支挡构件。

为此，初步设计以治理后天然工况稳定系数 $F_s \geq 1.30$ 、暴雨及地震校核工况 $F_s \geq 1.15$ 为控制目标。方案比选阶段，H2 抗滑桩可按等效桩径 2.0~2.5 m、滑面以下嵌固 6~10 m 初估，桩端宜进入较完整中-微风化泥灰岩 2~3 m；XP1、H1、H3 锚索锁定预应力可取 250~400 kN (约 25~40 t)，H4 及 H2 辅助锚固区可取 350~650 kN (约 35~65 t)。上述参数仅为初步范围，需通过桩身内力验算、锚索基本试验及监测反演最终确定。

(3) 截排水工程是上述各治理单元均需配置的基础性措施，也是控制降雨诱发滑坡复活的关键环节。坡顶截水沟用于拦截山体汇水，减少坡面漫流。坡面排水沟和急流槽用于将汇水有组织排至坡脚，避免水流沿裂缝或格构梁边界集中入渗。坡脚排水系统则应与既有公路排水衔接，防止治理后坡脚长期积水。对于已形成裂缝的 XP1 和 H2 后缘，施工前可采取临时覆盖、导排或封闭措施，降低雨季施工风险。

(4) 施工组织应采用信息法施工和动态设计。施工前应完善边坡监测，特别是坡顶裂缝、道路隆起区和既有滑坡壁的影像及位移观测。施工过程中宜从边坡两侧向中间分段推进，先实施坡脚抗滑桩、压脚墙等控制性工程，再自上而下分级开挖和支护。施工弃土、建筑材料不得堆放于坡顶边缘，避免新增荷载。治理完成后仍需保持一定时段监测，重点关注暴雨后裂缝扩展、坡面冲刷和支护结构变形。监测布

置及初始预警指标见表 5，施工前宜取得不少于 7 d 的基线数据，并在首轮强降雨后结合实测噪声和变形响应校准阈值。

Table 5. Monitoring scheme and initial warning criteria during construction and early operation
表 5. 施工期与运营初期监测及初始预警指标

监测内容	测点布置	监测频率	黄色/橙色/红色预警阈值
地表位移与裂缝	5 条主剖面各设坡顶、坡中、坡脚点，共 15 点；H2、XP1 裂缝重点布点	施工期 1 次/d；暴雨或异常时 2~4 次/d	地表位移 2~5/5~10/>10 mm·d ⁻¹
深部位移	测斜孔 6 孔，H2 设 2 孔，其余单元各 1 孔；孔底进入稳定层 ≥ 5 m	施工期 1 次/d；异常时 2 次/d	深部位移 1~2/2~5/>5 mm·d ⁻¹
孔压与降雨	孔压孔 6 孔，与测斜孔邻近；场区设雨量计 1 套	自动采集 30 min/次；暴雨时 10 min/次	孔压增量 ≥ 10/20/30 kPa·24 h ⁻¹ ；或雨量 ≥ 50/80/100 mm·24 h ⁻¹
支护结构	H2 选代表性抗滑桩，各区选代表性锚索布置测力点	关键工序后及 1 次/周	受力突增或达到设计警戒值时加密监测并复核设计

(5) 复绿工程应在结构支护和排水体系基本形成后实施，其作用不宜仅理解为景观恢复，而应作为坡面长期防护体系的组成部分。喷混凝土坡面虽然施工快、短期防护作用较明显，但大面积混凝土面与周边环境不协调。锚索格构梁结合复绿可在满足防护的同时改善生态效果。对该类残坡积土边坡，复绿还可减轻坡面冲刷和水土流失，但其根系加固作用不能替代结构支护，宜作为锚固、削坡和排水后的辅助稳定措施。

综上，各项防治措施及作用见表 6。本案例对山区公路扩建边坡治理具有一定代表性。其特殊性在于滑坡并非一次性新生灾害，而是在既有公路扩建切坡后经历 2020 年、2024 年两次滑动，并在后续降雨作用下继续扩大和分化。若只从单次滑坡体积或单一剖面稳定系数判断，容易低估相邻滑坡之间的联动风险。工程治理应以整个该路段东侧斜坡带为对象，统筹处理已经滑动区、潜在滑坡隐患区和相邻高陡裸露坡面。因此，分区组合、先控脚后护坡、先排水后复绿，是该类工程较合理的技术路线。

Table 6. Control measures and their functions
表 6. 防治措施及作用

措施	适用对象	主要作用
削坡减载	XP1、H1~H4 及相邻高陡边坡	降低坡高坡率，减小自重下滑力
锚索格构梁	浅中层滑体、坡面裸露区	约束滑体变形，提高整体稳定性
抗滑桩桩板墙	H2 等剩余下滑力较大部位	承担前缘推力，控制深层变形
截排水工程	坡顶、坡面、坡脚	拦截地表水，降低降雨入渗和冲刷
复绿工程	支护后坡面	减少水土流失，改善景观和生态
监测预警	施工期及运营初期	动态掌握裂缝、位移和支护状态

7. 结论

通过对陆川县某一级公路段东侧山体滑坡的工程地质条件、变形特征、稳定性计算结果及防治方案进行分析，可以看出，该滑坡群是在扩建公路扰动形成坡脚临空面的基础上，叠加强降雨入渗、全风化砂质页岩软化和坡面长期裸露等因素逐步发展形成的。其失稳过程具有多期滑动、局部扩展、相邻滑坡

单元联动和暴雨敏感性强等特点,治理上应从整个斜坡带出发进行综合处置。主要结论如下:

(1) 陆川县某一级公路段附近东侧山体滑坡是在公路扩建切坡、强降雨入渗、全风化砂质页岩遇水软化和坡面长期裸露共同作用下形成的滑坡群,已发育 H1、H2、H3、H4 四处滑坡及 XP1 滑坡隐患。

(2) 滑坡主要发育于第四系残坡积全风化砂质页岩中,滑体总体为土质边坡,主滑方向 $235^{\circ}\sim 270^{\circ}$,体积约 $4044.32\sim 30789.6\text{ m}^3$,总规模约 61713.25 m^3 。坡脚为一级公路,威胁过往车辆、行人及道路对侧设施,防治工程等级高。

(3) 稳定性评价显示,天然条件下部分滑坡可处于基本稳定状态,但暴雨工况下稳定系数明显降低,局部为不稳定或欠稳定;该结论与现场所观察到的前缘道路隆起、后缘张拉裂缝和坡面错台等变形迹象一致。

(4) 治理应采用综合措施。XP1 及 H1、H3、H4 宜采用削坡、锚索格构梁、截排水和复绿工程;H2 因滑体厚、剩余下滑力较大,宜在格构锚固基础上结合抗滑桩板墙治理。施工和运营初期应加强监测,并根据现场变形反馈动态调整设计。初步设计以天然工况 $F_s \geq 1.30$ 、暴雨及地震工况 $F_s \geq 1.15$ 为控制目标,并通过地表位移、深部位移和孔压分级预警支持动态设计。

基金项目

校级中青年教师科研基础能力提升项目“崇左地区含铝岩系中火山灰特征研究”(GXZRXXZQ2024)。

参考文献

- [1] 岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 1-12.
- [2] 郑家毓, 李帆, 何耀夫. 某高速公路边坡监测及稳定性模拟分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(2): 36-41.
- [3] 揭鸿鹄, 蒋水华, 常志璐, 等. 融合多源信息的降雨入渗边坡概率反分析及可靠度预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 28-36.
- [4] 霍善欣, 王新刚, 薛晨, 等. 熵权法改进的模糊数学滑坡稳定性评价方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 19-27.
- [5] 侯文腾, 王育奎, 杜相波, 等. 某营运高速公路类土质边坡的稳定性分析及加固设计[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(1): 47-51.
- [6] 席宏平, 李怀鑫, 晏长根, 等. 路堑边坡浅层塌滑的控制因素与生态防治措施——以双达公路边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 70-79.
- [7] 魏东旭, 万利, 刘传利, 等. 卢家湾大桥堆积体滑坡稳定性分析及处治措施研究[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(3): 291-296.
- [8] 叶为民, 孔令伟, 胡瑞林, 等. 膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1295-1309.
- [9] 谢振文, 巢万里, 刘文劼, 等. 基于空-地协同的公路边坡施工监测与策略调控探究[J]. 公路工程, 2022, 47(3): 97-103+142.
- [10] 魏占玺, 谢东武, 毋远召, 等. 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 126-136.
- [11] 凌建明, 张玉, 满立, 等. 公路边坡智能化监测体系研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2118-2136.
- [12] 邵珠山, 赵南南, 吴奎, 等. 多层土质边坡降雨入渗过程及稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2021, 38(3): 981-991.