

公路路基边坡病害成因分析与综合处治技术研究

刘倚溥

云南省公路工程监理咨询有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：以某高速公路泥质砂岩深挖路基边坡病害为研究对象，针对降雨诱发边坡开裂、局部鼓胀滑移、原有支护适应性不足等工程问题，从地层条件、降水作用、原设计支护短板三方面系统剖析滑坡形成机理。采用现场地质勘察、稳定性数值演算、方案比选的研究手段，确立削坡优化、抗滑桩与锚框联合支护、全断面分级排水的综合整治方案，细化逆作施工、锚固注浆、动态监测成套施工控制工艺。通过稳定性验算与现场质量管控完成工程落地实施，边坡变形得到有效遏制，支护体系协同受力满足运营安全标准，总结的成套处治技术可为同岩性山区深挖路基边坡病害治理提供技术参考。

【关键词】：泥质砂岩；路基边坡；滑坡成因；锚固支护；病害综合治理

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.005

引言

山区高速公路建设中深挖路堑边坡开挖扰动原有地层平衡，泥质砂岩地层受自身岩性、构造裂隙及降水影响，极易出现滑移垮塌病害，成为路基工程常态化防控难点。国内西南区域广泛分布白垩系泥质砂岩，岩体风化程度不均、裂隙发育，在集中降雨作用下易出现岩体软化、支护失效等问题，现有常规边坡防护方案常难以适配复杂地质变化。依托某在建高速公路深挖边坡实际病害案例，立足现场滑坡发育实况，系统梳理地质环境、降水作用、原有支护缺陷三类致灾要素，从成因研判、方案优化、施工管控、成效验算多维度开展研究，总结适配软质砂岩边坡的成套处治技术，为同类在建及既有边坡病害治理补充工程参考依据。

1 工程滑坡特征与成因机制分析

1.1 地形地质及岩土体特性

项目边坡地处构造剥蚀低中山地貌，沿单面斜坡构造展布，原生自然坡角 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，坡面植被稀少，缺乏天然防渗透土覆盖层，大气降水易沿坡面裂隙迅速下渗至基岩顶面。场区地层为白垩系下统普昌河组泥质砂岩，划分为强风化、中风化两层，强风化岩体胶结差、破碎严重，岩块易掰碎，风化界限杂乱，局部夹中风化孤石；中风化砂岩岩质偏软，受区域褶皱作用影响，体内节理裂隙密集杂乱、多相互连通，构成降水下渗主要路径。区内地下水属基岩裂隙水，补给来源为大气降雨，入渗水长期浸润软化软弱岩层，持续降低岩土体抗剪强度，从坡体基底不断弱化边坡岩体力学性能，破坏原有平衡状态，逐步降低边坡整体稳定性，在雨水反复入渗作用下边坡失稳风险持续升高。

1.2 强降雨触发作用及变形破坏特征

集中性强降水形成连续入渗水流顺着坡面原有裂隙、层理面向坡体深部持续运移，雨水浸润范围内强风化泥质砂岩基质黏结组分逐步水解弱化，岩土天然重度伴随饱水状态同步抬升，原本依附岩体结构面形成的潜在滑移边界被水体充分润滑，坡体内部孔隙水压力快速抬升并形成附加渗透荷载^[1]。降雨持续作用时段内坡顶外缘率先生成交错延展张拉裂缝，裂隙延展区间可达数米，错动构造顺着软弱夹层逐步向下传导，各级防护框格结构受不均匀土体位移拉扯生成网状开裂病害，下部坡面岩土向外鼓胀凸出，坡脚配套排水构造与路基附属构筑物受基底滑移挤压产生形变隆起，浅表变形由零散裂缝逐步贯通连片，自上而下沿着岩性差异带逐层发育，最终促成分段式蠕变滑移的变形演化模式。

1.3 原支护方案适用性及失稳机理研究

原有支护体系依照五级边坡布设防护构造，一级配置9m长锚杆框格结构，二级局部采用20m预应力锚索支护，剩余段落搭配同规格短锚杆，三四级统一布设12m锚杆框架，五级选用现浇拱形骨架完成坡面封闭，原设计坡率控制在1:1与1:1.25，平台固定两米宽度，依托岩体自身稳定性匹配锚固参数。现场开挖成型后，泥质砂岩受裂隙发育影响，降水沿原有锚固钻孔与框格缝隙持续向内渗流，锚固区段周边软弱夹层长期饱水软化，锚杆、锚索有效嵌固区岩体抗剪参数持续衰减，框格梁依托的坡面岩土逐步出现不均匀沉降变形，各级框架构件被错动应力拉扯产生开裂，坡顶土体在自重与渗水附加荷载作用生成贯通裂缝，原有锚固力无法抵消下滑作用力，支护构造约束能力持续下降，逐步由局部破损演化成整体失稳形态。

作者简介：刘倚溥（曾用名：刘秋梅）（1991.09），女，汉族，云南蒙自人，大学本科，中级工程师，云南省公路工程监理咨询有限公司，研究方向：工程合同管理、费用控制、工程量计量审核、工程变更流程审批、工程中期支付核算与工程造价动态控制，工程台账建立维护、工程量计算书核查及相关造价管理的工程应用研究。

2 综合处治技术方案

2.1 削坡减载与坡形优化设计

依托现场边坡岩土实际赋存状态开展削坡减载与坡形优化布设，对原五级边坡的坡面几何参数进行系统性调整：一级边坡优化后坡比设定 1:1.25，二至五级统一采用 1:1.5 的坡面控制比例，各级边坡保留 8m 标准开挖高度。根据各段地质条件差异，对二级边坡平台采取差异化宽度处理，其中变形显著区段平台宽度经计算确定为 14m，其余分段平台沿用 2m 标准设计宽度。削坡施工依托实测横断面数据划定开挖边界，分层剥离表层松散强风化泥质砂岩与滑移堆积土体，同步修整坡面凹凸缺损部位，优化后的坡面线型贴合地层天然产状，削减坡体自重荷载，从源头降低滑移势能，配合平台硬化与截排水沟槽预埋形成表层控水构造。

2.2 抗滑桩与锚索框架梁联合支护结构

结合坡脚地层软弱的实际地质条件，在一级边坡关键受力区段布设截面尺寸 2m×1.5m、桩身总长 9m 的钢筋混凝土抗滑桩，桩体中心间距固定为 5m，桩身采用 HRB400 主筋与 C30 混凝土一体浇筑成型，依托桩体形成竖向刚性阻滑屏障约束基底岩土滑移变形（见图 1）。坡面分层布设差异化锚索框架结构，二级边坡中段配置 4 束 Φ15.2mm、总长 20m 预应力锚索，其余段落及三至四级坡面改用 Φ32mm、12m 长度普通锚杆构成框架体系，锚索按照 25° 倾角锚入中风化泥质砂岩地层，锚杆布设倾角控制在 15°。框架肋板嵌入坡面岩土形成整体性约束，抗滑桩顶同步衔接坡面框架结构，实现下部刚性锚固与坡面柔性支护的组合受力，配套框格内部排水构造疏导入渗水体，弱化水理作用对锚固岩体的持续软化影响。

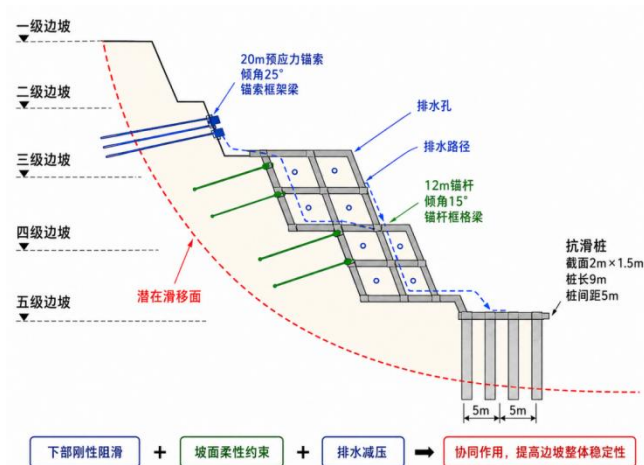


图 1 多级边坡抗滑桩+锚索锚杆框架梁联合支护剖面示意图

2.3 排水系统完善及坡面防护措施

边坡整体采用分级模式设置多层环形截排水结构，坡顶整体浇筑 C25 混凝土封闭式截水沟，沟身结构依照标准定型尺寸完成浇筑施工^[2]。场地原有地形走势用于衔接多处急流槽结构，

各级边坡平台顶面实施 C20 混凝土硬化作业，平台配套截排水沟槽沿横向走势连续布置。坡面预先埋设 110mm 孔径仰斜式排水孔，搭配 DN75 型号 PVC 导水管疏导坡体裂隙积水，排水孔依照标准间距交错贯穿强风化泥质砂岩层。坡面结合各区段地质差异配置对应防护结构，锚索施工区域浇筑 C30 钢筋锚索框架，锚杆施工区域布设同标号混凝土锚杆框格，五级边坡整体浇筑拱形骨架结构，骨架内部依托三维网搭配植生袋构筑生态防护体系，检修踏步与镀锌钢管扶手结合坡面防护结构同步施工，坡面局部低洼位置利用浆砌片石填充找平，有效封堵各类渗水通道。

3 关键施工工艺与质量控制技术

3.1 逆作法施工及锚固工程成孔工艺

边坡整治全流程依托逆作法施工体系组织土石方与锚固工序，坡面开挖遵循自上而下分层分段的作业逻辑，单层级岩土开挖作业完成后随即启动对应锚固结构施工，杜绝大面积裸坡长时间受日晒雨淋引发岩体风化劣化^[3]。锚固成孔统一选用风动干钻工艺开展钻孔作业，严控 110mm 锚杆、130mm 锚索两类孔径尺寸，孔口平面偏差控制在 3cm 以内，孔深实测数值超出设计深度 1m 用以容纳孔底沉渣，钻进途中实时记录岩粉变化与进尺速率。遇松散破碎泥质砂岩地层同步跟进套管护壁措施，塌孔部位暂停钻进并实施固壁注浆静置养护。成孔结束采用 0.2 至 0.4MPa 高压空气清理孔内岩屑，保障孔壁粗糙度，为后续 M30 水泥砂浆注浆粘结创造稳固接触面，锚索钻孔预留超长下料段满足后期张拉施工需求。

3.2 预应力锚索张拉锁定与注浆控制

预应力锚索张拉锁定与注浆控制工序依托分级加载管控标准开展施工，锚索成孔完成后借助 0.2 至 0.4MPa 高压风清除孔内岩粉碎屑，自由段钢绞线外壁均匀涂刷防腐黄油并套套密闭 PVC 套管隔绝注浆浆液，锚固段按一米间距布设架线环保障钢绞线居中布设。张拉作业前完成设备标定校验，按设计荷载的 0.25、0.5、0.75、1.0 倍逐级施加荷载，每级稳压五分钟；加载至 1.1 倍进行超张拉，稳压十至二十分钟后卸荷至 1.0 倍锁定，同步采集钢绞线实际伸长量与理论数值开展双控校核。注浆选用配比固定的 M30 水泥砂浆，采用孔底返浆工艺，注浆压力维持 0.5MPa 从孔底底端匀速灌注，浆液回落时及时补浆填满锚孔空隙，锚体浆液达到设计强度后实施锁定裁切，外露锚头利用同标号混凝土封闭封堵。全程记录张拉与注浆各项实测数据留存管控依据。

3.3 施工监测方案与动态反馈设计

边坡治理全流程配套多层级监测点位布设工作，依照线路既定里程间距布设地表位移标桩与深层测斜管，在边坡各级平台、坡顶裂隙发育区段、抗滑构筑物外缘增设专项监测设备，锚索锚杆锚固受力区域预埋应力传感元件，实现支护结构内力

不间断采集记录。土石方开挖施工阶段压缩监测采样周期，常规施工环境按月汇总整编监测数据，汛期多雨时段加密监测频次执行每日实地勘测。依托深层测斜数据分析边坡滑移面埋深、延展趋势，结合地表沉降与水平位移数据研判边坡整体形变规律^[4]。全部原始监测数据接入动态优化设计体系，当实测变形数据临近预警阈值时，及时优化锚索布置间距与抗滑构件设计参数，依据渗水监测结果调整排水孔布设数量与位置，利用现场实测反馈动态优化施工工序与支护构造，依托全过程监测成果实现边坡支护工程精细化管控。

4 处治效果分析与工程应用评价

4.1 边坡稳定性计算与方案比选验证

依托毕肖普法，以典型失稳断面为基准，依托现场岩土试验参数开展边坡稳定计算，围绕削坡配抗滑桩、削坡配挡墙两种治理方案分天然、暴雨工况分层取用岩土指标，强风化层天然黏聚力 38kPa、内摩擦角 18°，饱水后降至 34kPa、16°，中风化岩体同步折减参数。计算显示，桩体方案天然、暴雨工况稳定系数依次为 1.66、1.45，挡墙方案分别为 1.52、1.33，两类方案稳定系数均达标规范安全限值。经工程量测算，抗滑桩工程造价比挡墙方案更高。鉴于边坡岩体具备长期蠕变属性，项目区域暴雨多发，抗滑桩锚固结构可有效约束深部滑移面，安全富余度优于挡墙支护形式。在可控工程预算范围内，立足边坡长效防灾需求，综合技术安全与服役稳定性对比，最终选用分级锚固搭配抗滑桩的综合治理方案实施施工图设计。

4.2 危险性较大工程安全技术措施

依托深挖路堑边坡施工固有高危属性，围绕基坑开挖、模板支护、锚固施工等危大分项布设成套安全管控技术措施，边坡土石方开挖作业严格遵循自上而下分层开挖的施工准则，杜绝掏底开挖与多区段同步掘进的违规作业模式，石方开挖选用光面爆破工艺，边坡临空面两米范围禁用中大爆破装药。基坑作业区域边沿一米范围内禁止堆载重型机具与土石方原料，降雨天气暂停基坑内部所有施工作业。各类混凝土模板搭设参数对照规范验算承载力指标，支架杆件搭设完成后核验整体稳固性能再开展混凝土浇筑工序^[5]。锚索及锚杆钻孔施工前完成现场危险源摸排，高空锚固作业配套定型防护设施，边坡全周期

地表与深部位移监测数据实时同步安全管控台账，变形数据抵达预警阈值即刻停工落实加固处置，从工序源头化解坍塌、坠物类安全隐患。

4.3 长期监测要求与质量检验标准

结合边坡全周期管控细则布设多维度长效监测体系，监测点位沿病害治理段落按固定里程布设多个地表观测断面，分别配套地表沉降观测桩与深部测斜管材，锚索、锚杆关键锚固区段预埋应力传感元件，施工开挖全周期实行加密观测频次，常态时段按月采集各项监测数据，雨季与强降雨过后调整为逐日实测。各类支护结构质量检验划分锚固构件、抗滑构筑物、坡面防护三大核查板块，锚孔孔径、孔深、倾角参照规范限定允许偏差数值，锚索张拉采用应力与伸长量双控核验模式，抗滑桩从成孔尺寸、钢筋布设、混凝土密实度分层抽检（见表 1），现浇框格与拱形护坡核查混凝土强度及构件密实状态，排水构造同步实测断面尺寸与通水性能，锚具防腐、封锚混凝土厚度等细部指标纳入定点抽样检查内容。

表 1 抗滑桩检测数量要求

序号	防治工程级别	检验数量		检查方法
		占总桩数	最少数	
1	I 级	10%	5	动力检测或钻孔取芯检测
2	II 级	8%	4	动力检测或钻孔取芯检测
3	III 级	3%	2	动力检测或钻孔取芯检测

结语

该段高边坡通过地质条件研判与病害诱因梳理，确定削坡减载结合抗滑桩、锚固体协同的综合治理思路，配套分级布设的截排水体系切断地表水入渗带来的岩体软化问题。全施工周期采用逆作施工工艺，搭配分阶段张拉注浆、全过程动态监测等管控手段，依托稳定性测算优选的治理结构充分约束深部滑移隐患。各类支挡与排水构造协同发挥受力效能，有效消解强降雨诱发的边坡蠕变滑移风险。整套综合治理工艺可为同区域软质泥质砂岩深挖路基边坡的病害整治提供成熟的技术参考，对同类不良地层边坡防灾治理具备实际借鉴价值。

参考文献:

[1] 黄丽梅.临近市政项目施工致高速公路路基边坡滑移成因分析及综合治理[J].福建交通科技,2022,(5):26-30.
 [2] 赵春喜.改扩建公路常见路基病害成因及预防措施[J].黑龙江交通科技,2023,46(9):23-25.
 [3] 陈勛.高速公路路基边坡水毁成因分析及处治[J].运输经理世界,2023,(19):19-21.
 [4] 郭丽洪.公路路基路面病害成因及治理措施[J].工程技术研究,2021,6(12):163-164.
 [5] 王树辉.巫溪至开州高速公路不良地质条件路基边坡病害处治技术[J].工程建设与设计,2022,(18):26-28.