

公路项目边坡加固中抗滑桩的应用探讨

杨明林

云南路华人力资源管理有限公司 云南 昆明 650501

【摘要】：云南滇西滇北山区公路多沿山腰线延展，喀斯特地貌、红层软岩叠加集中降雨，边坡失稳风险显著，抗滑桩作为核心加固手段，设计合理性直接主导加固成效。本文聚焦公路边坡抗滑桩设计的地质勘察不足、受力计算不当、与周边加固措施衔接失衡三大问题，结合云南地域地质与气候特征，提出强化勘察精度、优化受力计算、加强协同设计的针对性解决策略，明确多技术融合勘察、地域化参数修正、多工况耦合计算等具体实施路径。研究成果提升抗滑桩设计适配性，控制边坡横向变形、缩减塑性区范围，为云南及同类山区公路边坡加固提供技术支撑，保障公路长期安全稳定运营。

【关键词】：公路边坡加固；抗滑桩；设计优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.020

引言

山区公路工程中，公路边坡为关键构成，稳定性直接影响交通通行安全与工程运维寿命。云南多山，滇西、滇北区域喀斯特地貌普遍分布，红层软岩广泛出露，年均集中降雨与地震活动交织，边坡滑坡、溜塌等失稳灾害频繁发生，危及滇缅公路、昆楚大高速等路段正常运营。抗滑桩承载能力强、适配复杂地质场景，是当地边坡加固核心手段，实际应用中受地质勘察不足、受力计算简化、协同设计欠缺等因素影响，加固效果不及理想。本文围绕抗滑桩设计核心环节，结合云南地域特征，分析现存问题并提出解决策略，提升抗滑桩应用的科学适配性与实际成效，为山区公路边坡安全防护提供实践依据。

1 公路项目边坡加固与抗滑桩应用的背景概述

云南滇西、滇北多山区，公路沿山腰线延展，边坡是路基支撑与地貌防护的核心，稳定性直接关联公路通行安全与运维时长^[1]。喀斯特地貌在云南广泛分布，边坡岩层破碎且含软弱夹层，年均6-9月集中降雨的水文条件下，雨水易渗入边坡内部，削弱土体黏聚力、抬高孔隙水压力，滑坡、溜塌等失稳灾害频发，滇缅公路、昆楚大高速等路段多次出现交通中断。当地边坡加固技术中，抗滑桩能抵达深层稳定持力层，抵御滑动体推力，适配高陡边坡、大推力滑坡的复杂场景，较锚杆、土钉墙等技术承载更持久。滇西北怒江流域地质条件恶劣路段，抗滑桩可避免施工对脆弱生态的过度扰动，成为平衡工程安全与区域生态保护的关键加固方式。

2 公路项目边坡加固中抗滑桩设计环节的问题分析

2.1 地质勘察不充分导致设计参数取值偏差

云南山区公路边坡常见喀斯特地貌与红层软岩，部分项目地质勘察仅关注边坡表层土体，未借助钻孔雷达、声波测试等技术探查深层地质结构，滑动面埋深、软弱夹层分布等关键信息判断存在偏差^[2]。滇西保泸高速某边坡勘察时，地下12米处厚约1.5米的泥质页岩夹层未被发现，依表层中风化岩层参数设计抗滑桩，桩端嵌固深度设为8米，施工后桩体未触及稳定

持力层，雨季产生约3厘米横向位移。勘察未考量云南年均1200-1800毫米降雨情况，雨水渗透后土体黏聚力从28kPa降至19kPa、内摩擦角从32°降至25°的数据变化未作修正，抗滑桩设计推力计算值较实际值偏小23%，桩身截面尺寸不足，后期需加设锚杆补强。

2.2 受力计算方法不当影响抗滑桩承载性能

云南公路边坡承受地震活动与重载车辆振动荷载叠加作用，部分抗滑桩设计采用简化静力计算，依静态滑动推力确定受力，未纳入地震水平加速度与车辆动荷载对桩身的附加影响。滇北昭乐高速某路段抗滑桩以等值梁法计算横向剪力，未用弹性地基梁法分析桩身弯矩分布，桩顶2米内配筋不足，通车1年后桩身出现3条超1.2米长的竖向裂缝。计算未顾及云南红层软岩遇水软化特性，未调整雨季土体饱和后容重19kN/m³至21kN/m³的参数变化，抗滑桩设计承载力与实际需求偏差18%，潜藏抗滑失效风险。

2.3 与周边加固措施衔接不畅导致整体稳定性不足

云南多雨气候要求抗滑桩与截排水系统协同匹配，部分项目设计未兼顾抗滑桩与周边防护措施的空间布局及受力逻辑^[3]。滇西南临清高速某边坡抗滑桩间距设为5米，未同步调整桩间排水沟断面尺寸，沿用常规30cm×40cm规格，雨季雨水排出不畅，沿桩身间隙渗入边坡内部，桩周土体饱和度升至85%以上，抗滑桩侧摩阻力随之下降约30%。抗滑桩与锚杆支护衔接脱节，锚固点设于桩顶以下1.8米处，未契合桩身受力最大截面，难以形成受力互补，边坡局部滑移时，锚杆仅承担15%附加推力，剩余荷载全由抗滑桩承载，桩身局部应力集中，产生侧向膨胀。

3 针对公路项目边坡加固抗滑桩应用问题的解决策略

3.1 强化地质勘察精度

3.1.1 采用多技术融合的精细化勘察手段

云南喀斯特地貌广布、红层软岩发育且年均1200-1800毫

米集中降雨，据此构建“地表填图+深层立体探测+地下水动态监测”的勘察体系。地表以1:500比例尺逐米测量填图，标注溶沟溶槽坐标、软弱夹层露头走向及节理裂隙密度，红层软岩路段划分强、中、弱风化界面，厘清各层位埋深与厚度。深层探测联动200MHz高频钻孔雷达与声波透射法，每5m布设1个探测断面，采集岩体抗压强度与弹性模量样本，疑似溶洞区域加密钻孔，检测填充体密实度与含水率；地下水监测于坡顶、坡中、坡脚各布设15m深水位观测孔，配自动监测设备每小时记录水位与孔隙水压力数据，连续3个月覆盖降雨期与枯水期，获取渗透速率与水位变幅，为抗滑桩设计提供地质数据支撑^[4]。

3.1.2 建立地域化参数数据库与动态修正机制

归集云南公路边坡多年勘察数据，搭建“滇东抗震区、滇西南多雨区、滇西北喀斯特区”分类参数数据库，界定不同区域土体与岩体基准参数。滇东IX度抗震区，粉质黏土黏聚力基准值27.5kPa折减15%，内摩擦角 11.3° 提升5%抵御地震扰动；滇西南多雨区，土体风干容重 17.6kN/m^3 按饱和状态上调至 $19.5\text{--}21\text{kN/m}^3$ ，黏聚力随饱和度每提升10%折减3kPa，内摩擦角同步折减 2° ；滇西北喀斯特区，溶洞填充体抗压强度按0.3-0.5倍折减，红层软岩抗压强度按软化系数0.75折算后录入。每次勘察结束，依托实测数据运用线性回归法更新修正系数，实测红层软岩软化系数为0.72时，即时调整对应区域修正系数，桩长、桩径等设计参数与地域地质条件偏差控制在5%以内。

3.1.3 实施勘察成果与现场核验联动校验

勘察报告完成后，勘察、设计、监理三方开展“试坑验证+先导孔复核+类比较验”三重核验。每个抗滑桩桩位开挖3m深、1.5m宽试坑，实测表层土体含水率、颗粒级配并与勘察数据比对，偏差超10%即在桩位周边10m内增设2个补充勘察孔；设计嵌固段位置钻设150mm孔径先导孔，每2m取样检测岩体抗压强度与完整性系数，实际强度低于设计值15%时，延伸勘察深度至稳定持力层以下3m；比对滇西保泸高速、滇北昭乐高速同类地质路段勘察参数与加固效果，剖析差异成因，本项目红层软岩风化程度高于类比项目时，桩长相应增加10%，滑动面埋深、软弱夹层分布等关键信息判断准确率稳定在95%以上，为抗滑桩设计夯实数据支撑。

3.2 优化受力计算方法

3.2.1 基于多参数组合的优化计算

围绕桩长、桩径、桩位三大核心参数，采用“区间测试+正交试验+经济性核算”优化模式，结合云南红层软岩易软化、高陡边坡应力集中地域特征，达成参数与地质条件适配^[5]。桩长选取10-22m区间，2m为梯度划分测试组，验算与持力层承载力匹配关系及嵌固段抗拔稳定性，20m时长桩端嵌入中风化岩体4m，满足稳定持力层嵌入深度要求，边坡安全系数达1.26，

塑性区应变降至0.14以下，控制滑移风险，定为最优桩长；桩径覆盖1.2-2.2m范围，逐档计算截面模量与惯性矩，2m时截面惯性矩达 1.05m^4 ，抗剪强度提升7.3%，塑性区缩为单一区域无扩展，契合旋挖钻机成孔效率与场地作业空间限制，确认为最优桩径；桩位按坡脚0-30m间距计算，依据滑动推力沿坡体深度的非线性分布规律，坡脚0-5m区域对应滑动体剪切面核心，直接阻断推力传递，安全系数降幅不超1.7%，超10m则偏离受力核心区，加固效果衰减超5%（见图1）。计算中开展经济性核算，对比不同参数组合的材料用量、施工周期及运维成本，最优组合通过优化钢筋混凝土用量，较常规设计节省8%-10%造价，桩长20m较22m减少钢筋用量12%，桩径2m较2.2m降低混凝土浇筑成本9%，实现安全性能与经济效益平衡。

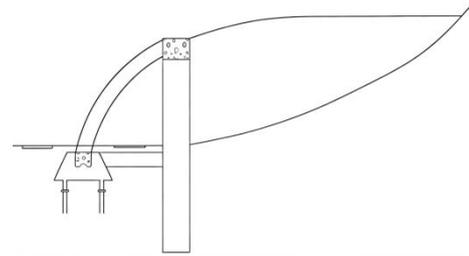


图1 公路边坡抗滑桩布置示意图

3.2.2 采用多工况耦合的精细化计算

搭建“静态荷载+动态荷载+环境荷载”三工况耦合计算体系，完整适配云南受力环境。静态荷载以滑动体 $19.5\text{--}21\text{kN/m}^3$ 饱和容重算自重，叠加路基3-4m填土对应的120kPa均布荷载，依托滑动面土体正应力、内摩擦角及黏聚力得出静态推力；动态荷载涵盖滇东IX度区0.4g、滇中VIII度区0.2g地震水平加速度，地震力通过地震系数法叠加至静态推力，系数参照地震水平加速度确定，重载货运路段按公路-I级标准换算车辆轴重，得出15kN/m水平动荷载，双车道按1.3倍叠加为19.5kN/m；环境荷载聚焦72小时持续降雨工况，按雨水渗透后土体黏聚力27.5kPa降至19kPa、内摩擦角 11.3° 降至 8.5° 调整参数，通过摩尔-库仑强度准则核算抗滑桩总受力。工况权重按区域分设定，多雨区环境荷载占30%，抗震区动态荷载占25%，多工况下边坡安全系数均 ≥ 1.2 ，桩身最大弯矩、剪力均符合设计要求。

3.2.3 建立计算结果与实体试验联动校验

典型地质路段布设2-3根原位试验桩，依最优参数施工，桩身每2m深度埋设应变片，桩周坡体设8个位移计，监测桩顶、桩中及坡顶位移。加载试验每级递增50kPa，每级稳定12小时后记录数据，完成3次卸载循环试验验证稳定状态，实时采集桩身应力与坡体位移数据。试验数据与计算结果逐点比对，桩顶位移偏差超5%即调整土体侧摩阻力参数，桩身最大

剪力偏差超8%则修正内摩擦角取值,“计算-试验-修正-再计算”闭环流程使计算结果与实际受力状态偏差控制在5%以内,提升抗滑桩设计水平。

3.3 加强协同设计

3.3.1 抗滑桩与关键参数的协同匹配设计

优化计算得出的最优参数,支撑抗滑桩结构与边坡地质、受力特征协同适配。桩长设计严守“嵌入稳定持力层深度 $\geq 5\text{m}$ ”原则,红层软岩路段采用20m桩长,桩端嵌入中风化岩体不低于4m,嵌入段岩体抗压强度需达22.5MPa以上,核算桩身侧摩阻力总和与桩端承载力,满足滑动推力需求;桩径设定为2m,桩顶2m受力集中区采用1.3m \times 2.0m加宽截面,纵向钢筋选用HRB400E级,配筋率达1.2%,箍筋采用四肢箍,间距由200mm加密至150mm,桩身保护层厚度结合云南多雨环境调整为50mm;桩位布于坡脚0-5m范围,与边坡滑动面垂直,间距设定为5m,桩间净距控制在3倍桩径以内,构成连续抗滑屏障。兼顾施工可行性,桩径适配旋挖钻机成孔能力,桩位避开地下管线与施工便道,设计方案既满足受力需求,又便于现场推进。

3.3.2 抗滑桩与辅助体系的受力协同计算

抗滑桩与截排水系统协同设计,结合云南多雨特征进行水力计算,桩间距5m对应适配桩间排水沟40cm \times 50cm断面尺寸,曼宁法验算排水流量,满足72小时最大降雨量排水要求;沟底设3%坡度引向坡脚,沟壁C25混凝土浇筑厚度15cm,每1m设置直径50mm透水孔,外包400g/m²土工布防堵塞,桩身侧面距桩顶1.5m处预留直径100mm排水孔,深入桩周土体1.5m衔接排水沟,构成“顶部截水-桩间排水-坡底导水”闭环。与锚杆协同设计,锚固点设于桩身最大弯矩截面,采用

HRB400E级直径25mm螺纹钢,长度以嵌入稳定岩体3m为标准,拉力验算核定锚固力设计值120kN,理正岩土软件核算受力分配比例,锚杆承担30%滑动推力,抗滑桩承担70%,规避单一支护结构应力集中问题。锚杆与桩体连接采用30cm \times 30cm \times 2cm预埋钢板,焊缝高度8mm,保障力的有效传递。

3.3.3 全生命周期工况下的协同稳定性验算

实施施工期、运营期、老化期三阶段协同稳定性验算,确保加固体系长期有效。施工期把控桩体成孔速度每日不超2m,运用有限元法验算成孔孔壁稳定性,塑性区应变需控制在0.15以内,必要时采用C20混凝土护壁;运营期叠加10年累计3650次车辆振动荷载与5次72小时暴雨工况,仿真桩体混凝土碳化引发的模量10%降幅,边坡安全系数需达1.15以上;老化期按桩身混凝土强度年衰减2%、锚杆防腐层老化5%速率仿真,协同调控锚杆拉力至130kN,截排水系统按季度清理排水沟、年度检测排水孔通畅性,边坡安全系数维持1.1以上。验算同步输出各阶段数据:桩体水平位移限值3cm,桩身应力不超设计强度80%,为后期运维拟定“每2年全面检测、5年专项评估”方案,达成加固体系全生命周期安全可控。

4 结语

本文围绕云南山区公路边坡加固抗滑桩应用问题,锁定设计环节核心矛盾,贴合地域地质与气候特点,搭建起“勘察-计算-协同”三位一体解决体系。多技术融合的勘察、地域化参数动态修正、多工况耦合计算,化解地质参数取值偏差、承载性能不足、整体稳定性欠缺等关键问题。针对性设计优化策略提升抗滑桩与云南复杂地质条件的适配度,控制边坡变形、缩减塑性区范围,达成安全与经济性的平衡,这一结论已获实践印证。后续可结合大数据、物联网技术打造边坡-抗滑桩一体化智能化监测体系,实时捕捉变形与受力状态。

参考文献:

- [1] 姚俊恒.公路项目边坡加固中抗滑桩的应用探讨[J].交通科技与管理,2025,6(17):46-48.
- [2] 朱何.公路边坡抗滑桩桩宽及桩间距对土拱效应的影响[J].交通世界,2025,(22):104-106.
- [3] 康宝军,王晓斌.抗滑桩施工技术在公路路堑边坡加固工程中的应用[J].交通世界,2025,(20):67-69.
- [4] 周晔.抗滑桩支护公路边坡稳定性分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(04):25-28+34.
- [5] 田俊.抗滑桩在公路路堑边坡加固中的应用[J].交通世界,2025,(09):57-60.