

滇西北复杂地形公路隧道围岩稳定性及支护方案优化

朱兴锐

云南省建设投资控股集团有限公司，云南 昆明 650000

[摘要] 本文立足滇西北高山峡谷复杂地形与特殊地质工况，系统剖析区域公路隧道围岩失稳的核心机理与现有支护体系的突出问题，结合区域典型隧道工程施工实践，从围岩动态监测、分级稳定性评价、差异化支护设计、施工工艺优化、全过程动态管控等维度，提出一套适配滇西北复杂地质、可落地、可闭环、可推广的围岩稳控与支护方案优化策略。研究成果可有效解决滇西北隧道软岩大变形、偏压失稳、支护失效等行业痛点，提升围岩整体稳定性与支护结构耐久性，为区域同类山区公路隧道工程安全施工、质量提质、风险防控提供实操技术支撑与管理参考。

[关键词] 围岩稳定性；高地应力；软岩大变形；动态施工管控

DOI: 10.64635/ja.2026.1242

中图分类号: U455.7

文献标识码: A

Optimization of surrounding rock stability and support scheme for complex terrain highway tunnels in northwest Yunnan

Zhu Xingrui

Yunnan Construction Investment Holding Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China

Abstract: Based on the complex terrain of high mountains and valleys and unique geological conditions in northwestern Yunnan, this paper systematically analyzes the core mechanisms underlying rock mass instability in regional highway tunnels and identifies critical issues with existing support systems. Drawing on practical experiences from typical tunnel projects in the region, it proposes a comprehensive strategy for rock mass stability control and support system optimization that addresses the region's challenging geological conditions—being implementable, closed-loop, and scalable. The approach encompasses dynamic monitoring of surrounding rock, graded stability assessment, tailored support design, construction process optimization, and full-process dynamic management. These findings effectively address industry challenges such as significant deformation in soft rock, lateral pressure-induced instability, and support failure in northwestern Yunnan tunnels, enhance overall rock mass stability and support structure durability, and provide actionable technical guidance and management references for safe construction, quality improvement, and risk mitigation in similar mountainous highway tunnel projects.

Keywords: rock mass stability; high geostatic stress; significant deformation of soft rock; dynamic construction control

引言

围岩稳定控制与支护体系设计是公路隧道施工的核心关键，直接决定施工安全、工程质量与隧道长期服役性能。现阶段国内隧道研究多聚焦常规山区隧道围岩控制与支护技术，针对滇西北独有复杂地形、高地应力、破碎软岩共存工况下的围岩失稳机理、分级支护优化、动态适配施工的专项落地研究较为匮乏，尚未形成适配区域地质特征的标准化、差异化支护管控体系^[1]。基于此，本文结合滇西北高黎贡山、哈巴雪山、昌宁隧道等区域典型工程实践，精准梳理围岩失稳核心诱因与现有支护体系短板，针

对性提出可落地的围岩稳定性管控方法与支护方案优化策略，实现围岩稳控、支护适配、安全提质的建设目标，为滇西北山区公路隧道高质量建设提供技术支撑。

1 滇西北复杂地形公路隧道围岩及支护现存核心问题

1.1 地质条件复杂多变，围岩失稳机理复杂

滇西北区域受板块挤压构造影响显著，隧道隧址区普遍存在高地应力、岩体破碎、节理裂隙极度发育、软岩流变、地下水富集等多重不良地质问题，围岩稳定性极差。一是高地应力引发岩体脆性破坏与软岩大变形，深埋隧道

岩体受构造挤压作用显著,开挖后应力快速释放,坚硬岩体易出现岩爆、掉块,软弱炭质片岩、变质砂岩易产生持续流变变形,导致围岩收敛量超标;二是断层破碎带与软硬互层广泛分布,岩体整体性差、结构松散,开挖后围岩自稳能力极低,掌子面易失稳坍塌;三是高山峡谷地形导致隧道非对称偏压突出,两侧围岩受力不均,易出现单侧滑移、局部剪切破坏,引发隧道偏压变形;四是裂隙水、承压水富集,地下水持续软化围岩结构、冲刷岩体裂隙,大幅降低围岩强度,诱发涌水突泥、基底隆起等病害。

1.2 支护方案同质化严重,区域地质适配性不足

当前滇西北公路隧道支护设计多采用通用化、同质化参数体系,未结合区域复杂地质差异化优化,支护适配性严重不足^[2]。针对高地应力软岩大变形段落,常规单层钢架、普通喷射混凝土支护刚度不足,无法抵抗围岩持续挤压应力,极易出现钢架扭曲成S型、Z型变形、支护结构开裂破损等问题;针对断层破碎带、富水软弱段落,支护体系缺乏有效的止水、加固、缓冲结构,仅依靠常规支护难以抵御涌水压力与松散岩体压力;针对峡谷偏压地段,支护参数对称布设,未根据非对称受力特征差异化调整,导致单侧支护过载破坏、围岩滑移失稳,支护结构长期处于受力失衡状态。

1.3 施工工艺粗放,围岩扰动控制不到位

滇西北复杂围岩对施工扰动敏感度极高,现有施工工艺粗放、管控不严,进一步加剧围岩失稳风险。一是爆破施工控制不当,常规装药爆破震动强度大,极易扰动破碎软弱围岩,加剧岩体裂隙扩张、结构松散,破坏围岩原有自稳结构;二是开挖工序不合理,部分段落采用大断面一次性开挖,围岩裸露面积大、裸露时间长,应力释放过快,引发持续变形;三是支护施作时序滞后,未严格执行“随挖随支、快速封闭”原则,围岩长期裸露,流变变形持续累积;四是局部施工超挖、欠挖管控不严,超挖空洞回填不密实,形成隐蔽受力缺陷,后期诱发支护局部受力集中、开裂变形。

1.4 动态监测体系缺失,风险预判与调整滞后

多数隧道施工缺乏适配滇西北复杂地质的全过程动态监测体系,围岩变形、应力变化、水压波动等关键指标监测频次不足、监测点位布设不合理,难以实时捕捉围岩失稳前兆信息^[3]。施工过程中普遍存在“重施工、轻监测、轻预判”的问题,无法精准掌握高地应力释放规律、软岩

流变特征、偏压受力变化趋势^[4]。当出现围岩变形速率过快、支护应力超标、渗水量突增等风险隐患时,无法及时预警、快速调整支护方案与施工工艺,导致小隐患演变为大病害,错失最佳处置时机。同时,监测数据未有效指导支护参数动态优化,静态支护方案与动态围岩变化严重脱节。

1.5 支护体系协同性差,闭环管控机制不完善

现有支护体系存在结构衔接不畅、工序协同不足、全过程管控缺失等问题。初期支护、二次衬砌、围岩加固、防水止水各工序衔接不紧密,注浆加固、钢架支护、喷射混凝土施工质量管控不严,局部存在注浆不饱满、钢架间距偏差、混凝土厚度不足等质量缺陷,导致支护整体刚度不足、整体性差。同时,未建立围岩分级、支护分级、动态调整的闭环管控机制,不同地质段落支护参数混用、施工标准不统一,针对突发地质变化无快速优化处置方案,支护失效、围岩失稳问题反复出现,难以实现长效稳定管控。

2 滇西北复杂地形公路隧道围岩稳控与支护方案优化落地策略

2.1 构建围岩分级研判体系,实现精准差异化管控

结合滇西北地质特殊性,建立适配区域的隧道围岩动态分级评价体系,摒弃通用化分级标准,从源头实现精准管控。施工前期通过地质勘察、超前地质预报、现场岩体检测,重点研判高地应力等级、岩体破碎程度、软岩流变特性、地下水压力、地形偏压系数五大核心指标,将隧道划分为常规围岩段、高地应力软岩大变形段、断层破碎富水段、峡谷偏压不稳定段四类等级。针对不同等级围岩制定专属管控标准,明确各段落围岩自稳周期、变形风险等级、施工扰动限值,为差异化支护设计、施工工艺选型、风险管控提供精准依据。施工过程中实时结合掌子面地质变化动态更新围岩等级,杜绝统一标准施工导致的支护冗余或支护不足问题。

2.2 分区差异化支护方案优化,适配复杂地质工况

针对滇西北不同复杂围岩段落,优化分级、分区、非对称支护体系,彻底解决同质化支护适配性不足问题。一是高地应力软岩大变形段,采用“双层初期支护+加密高强度钢架+径向注浆加固+仰拱快速成环”优化方案,选用加粗型钢钢架并缩小布设间距,提升支护整体刚度,通过分层支护、适时施作第二层初支,缓冲围岩流变应力,抵抗持续挤压变形,杜绝钢架扭曲、支护开裂病害;二是断层

破碎富水段,采用“超前帷幕注浆+小导管径向注浆+强支护+堵排结合”方案,优先封堵围岩裂隙、降低地下水压力,固化松散岩体,提升围岩自身承载力,搭配加厚喷射混凝土与加密锚杆,防止涌水突泥、岩体坍塌;三是峡谷偏压地段,采用非对称支护优化设计,根据偏压受力特征,增大受压侧钢架刚度、加密支护间距、加厚混凝土保护层,弱化受拉侧冗余支护,实现支护受力均衡,有效解决单侧滑移、非对称变形问题;四是常规围岩段精简支护参数,在保障安全的前提下控制造价,实现“强风险强支护、低风险简支护”的精准适配。

2.3 优化精细化施工工艺,严控围岩施工扰动

适配滇西北敏感围岩特性,优化全过程精细化施工工艺,最大限度降低施工扰动、保留围岩自稳能力。一是采用微差控制爆破、光面爆破工艺,精准控制装药量与爆破间距,降低爆破震动对破碎软岩、节理岩体的扰动,减少围岩裂隙扩张与表层掉块,保证掌子面岩体完整稳定;二是优化开挖工序,复杂地质段落采用长台阶法、小断面分部开挖方式,摒弃大断面一次性开挖,缩短围岩裸露时间、减小裸露面积,实现分段开挖、分段支护、快速封闭;三是严格把控超欠挖管控,采用精准测量定位、人工修边等方式控制开挖轮廓,超挖空洞采用同级混凝土密实回填,杜绝空洞缺陷;四是规范支护施作时序,严格落实“开挖完成、立即支护、快速成环”原则,缩短围岩无支护暴露周期,有效抑制软岩流变变形与应力释放失稳。

2.4 搭建动态监测预警体系,实现风险前置管控

构建适配滇西北复杂隧道的全方位动态监测预警体系,实现围岩变形、支护受力、水文变化实时可控、风险前置。重点布设围岩收敛变形、拱顶下沉、钢架应力、衬砌压力、孔隙水压力、围岩温度等监测点位,针对高地应力、破碎带、偏压段加密监测点位、提高监测频次,实时掌握围岩动态变化规律。建立分级预警机制,根据变形速率、应力数值设置正常、预警、超标三级阈值,一旦监测数据异常,立即停止掘进、启动应急处置、优化支护方案。同时将监测数据与施工、支护设计深度联动,依据监测反馈动态调整支护参数、开挖步距、支护时机,形成“监测—分析—预警—优化—落实”的动态闭环管控模式,从被动处置转向主动防控。

2.5 完善支护施工质量管控,强化体系协同稳定性

聚焦支护施工薄弱环节,强化全过程质量管控,提升

支护体系整体性与耐久性。严格把控超前注浆、锚杆安装、钢架架设、喷射混凝土、仰拱施工等关键工序质量,确保注浆饱满密实、锚杆锚固可靠、钢架平顺对齐、混凝土厚度达标、仰拱一次性整体浇筑成环,杜绝漏浆、空洞、间距偏差等质量缺陷。优化各工序衔接流程,实现围岩加固、初期支护、防水施工、二次衬砌无缝衔接,提升支护体系整体协同受力性能。建立隐蔽工程专项验收制度,对支护关键工序全程旁站监理、留存影像台账,实现质量可溯源。同时完善现场考核机制,将支护施工精度、围岩稳控成效、隐患整改质量纳入班组考核,倒逼施工标准化落地,保障支护体系长效稳定。

2.6 建立地质动态适配机制,应对突发地质变化

针对滇西北地质突变性强的特点,建立超前预报、动态适配、快速调整的应急管控机制。采用地质雷达、超前钻探、红外探水等综合超前预报技术,精准预判前方围岩、地下水、断层分布情况,提前掌握地质变化趋势。针对施工中突发的软岩富集、断层破碎、涌水突泥等异常地质情况,立即暂停掘进,快速调整施工方案与支护体系,采用临时支撑、应急注浆、排水减压等应急措施快速稳控围岩,再优化永久支护方案,杜绝盲目施工引发的坍塌风险,实现复杂地质条件下隧道施工安全、稳定、有序推进。

3 结语

滇西北复杂地形公路隧道受高地应力、软岩流变、断层破碎、富水偏压等多重不良地质叠加影响,围岩稳定性差、施工风险高、常规支护方案适配性不足,围岩失稳、支护失效、结构变形是制约区域隧道工程建设的核心难题。本文结合滇西北区域隧道工程地质特征与施工实操痛点,系统剖析了围岩失稳机理、同质化支护缺陷、施工工艺粗放、动态管控缺失等突出问题,构建了围岩分级研判、分区差异化支护、精细化施工扰动控制、动态监测预警、全过程质量管控、地质动态适配的六位一体协同优化体系,形成了一套适配滇西北复杂工况、可落地、可推广的围岩稳控与支护优化策略。

本文所提策略充分贴合滇西北高山峡谷隧道工程独有特征,有效解决了区域隧道软岩大变形、偏压失稳、涌水坍塌、支护失效等行业难题,通过差异化支护替代传统同质化设计、动态管控替代静态施工,能够在保障施工安全的前提下,提升围岩稳定性与支护结构耐久性,减少工程病害与返工损耗。研究成果可为滇西北及西南同类复杂地质山区公路隧道的围岩控制、支护设计优化、施工安全

管控提供实操参考与技术支持,助力西南山区交通建设工程安全、高质、高效建设。

[参考文献]

- [1]赵志永,胡伟,段昌晨,等.大断面巷道快速掘进及围岩控制研究[J/OL].金属矿山,1-20[2026-06-05].
- [2]吴波,黄涵,徐世祥,等.基于尖点突变理论的隧道围岩失稳判据与变形控制方法研究[J/OL].河北地质大学学报,1-14[2026-06-05].

报,1-14[2026-06-05].

- [3]李志红,王拓,王宏达.潘三矿煤层群采区系统巷道围岩卸支协同技术研究[J].煤炭工程,2026,58(5):67-75.
- [4]焦钟浩.盾构巷道围岩稳定性控制及支护优化研究[J/OL].山西煤炭,1-11[2026-06-05].

作者简介:朱兴锐(1978.09—),男,汉族,云南省昆明市人,本科,高级工程师,研究方向为公路工程。