

# 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用

何岳松

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用广泛, 可有效提高路基的稳定性和使用寿命。本文基于典型公路高边坡工程, 分析锚杆防护的作用原理与结构优势, 阐述了精确测放、钻孔控制、锚杆安装、注浆加固、张拉锁定以及喷护成层等应用环节的施工工艺, 旨在系统优化施工流程, 有效提升锚固质量与坡面整体稳定性, 为高边坡支护提供可参考的技术路径。

**关键词** 高边坡锚杆防护施工技术; 公路路基工程; 精确测放; 钻孔控制; 锚杆安装

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.030

## 0 引言

高边坡是公路路基结构中应力集中的薄弱环节, 其稳定性直接关系到道路运行的长期安全。受地形地质条件制约, 高边坡常面临岩土破碎、节理裂隙发育以及降雨侵蚀频繁等多重不利因素, 极易诱发滑坡等地质灾害。锚杆防护技术以其主动加固特性, 在改变坡体应力分布、增强结构协同承载能力等方面展现出独特优势。同时“锚固体—岩土体”协作体系, 可提升潜在滑移面抗剪强度, 并维持坡面完整性, 是现代高边坡治理中的重要支护手段。

## 1 工程概述

某高速公路拓宽改建工程全长 18.6 km, 其中 K5+320 至 K5+740 段为典型路堑高边坡, 地形破碎起伏明显, 原始坡体高差达 28 m, 部分段落陡率达到 1:0.4。边坡岩性以中风化凝灰岩夹碎屑泥岩为主, 结构松散, 裂隙发育, 受降雨浸润影响后强度迅速下降, 存在顺层剪切与结构面崩解的复合滑移风险。工程区属中等地震烈度区, 浅层地震波传播速度快, 对边坡稳定构成动态扰动。设计采用预应力锚杆加框架梁支护形式, 配合临空面径向排水孔削减孔隙水压力, 锚杆采用 HRB400 级螺纹钢, 直径  $\Phi 32$  mm, 锚固深度控制在 10~12 m, 支护水平间距 2 m, 竖向间距 1.8 m。坡面覆土层厚度变化较大, 地表径流易形成冲刷侵蚀, 设置三维植被网与喷混植草同步构建生态防护体系。

## 2 高边坡锚杆防护的优势与原理

### 2.1 高边坡锚杆防护的原理

高边坡锚杆防护的基本原理在于人工设置的锚固体系, 有效传递外界荷载与不稳定岩土体的自重、滑

动力至深层稳定结构中, 形成内外约束共同作用的支护机制。锚杆穿透潜在滑移面或弱结构层, 紧密结合基岩, 能在荷载作用下产生轴向拉力, 建立主动控制应力传递路径的受力状态。自由段可调节张拉力, 保证整体锚固系统具备应力协调能力, 并借助锚头将荷载反力封闭于框架梁与坡面结构间<sup>[1]</sup>。同时, 锚杆受力后会改变坡体内部剪应力与主应力方向, 抑制结构面剪切破坏, 在边坡内部形成“剪切补强+拉力抗滑”复合力学体系, 增强整体防护体系的稳定性, 有效控制边坡的变形发展。

### 2.2 高边坡锚杆防护的优势

高边坡锚杆防护是边坡支护体系的重要构成形式, 具备结构轻质、布局灵活以及受力明确等综合优势。在复杂地质条件或不良地貌发育区域, 借助锚杆与岩土体形成复合受力体系, 可有效改变边坡原有应力分布状态, 提升坡体整体稳定性。锚杆系统能将荷载传导至稳定岩层深处, 形成连续稳定的抗滑支撑带, 具备良好的抗剪、抗拉与抗拔性能。锚固技术对原生岩土扰动小, 支护施工工序相对简洁, 适用于不同边坡形态<sup>[2]</sup>。在动态荷载作用频繁的边坡段, 锚杆体系能够迅速分担瞬时应力, 降低滑移诱发概率, 提升抗震响应能力。而锚固体的预应力施加, 也有助于进一步提升结构刚度, 具备良好的长期耐久性。

## 3 高边坡锚杆防护施工技术具体应用分析

### 3.1 精确测放定位孔位, 提升施工初控精度

在高边坡锚杆防护施工过程中, 测量放样是先导工序, 直接关系到锚固系统的精度。锚杆布置的几何精度对后续钻孔、注浆以及张拉等工序具有传导效应,

若初始孔位偏差,将导致锚杆倾角与结构主应力方向错位,降低锚固效率<sup>[3]</sup>。精确定位要求施工人员综合分析边坡坡度、岩性分布及滑移带特征,依据设计图纸与实际地形条件定位三维坐标,严控横纵向误差,进而提升施工首道控制点的工程可靠性,也为边坡支护提供规范化、序列化施工基础。

在 K5+320 至 K5+740 段高边坡支护工程中,边坡平均高度约 26 m,最大坡率达 1:0.4,坡体由中风化凝灰岩与碎屑泥岩互层构成,节理裂隙多向发育,稳定性极差。根据地质勘查成果与坡面地形实测数据,施工人员应采用预应力锚杆配合框架梁防护形式,按照 2 m 水平间距、1.8 m 竖向间距布设锚杆,钻孔入岩深度不小于 10 m,倾角控制在 15°。施工现场采用中纬 ZT30R 全站仪与数显测斜仪,定位孔位的三维定点,并结合坡面实际高差校核坐标。测量放样环节技术人员引入激光垂直投点设备,同步调整设计角度与钻进方向,保证钻孔轴线与结构滑移趋势反向交叉,增强锚固效果。现场测放完成后,项目部还要组织专项复核,统一调整误差超过 5 cm 的孔位,剔除受滑塌威胁的边缘锚点,从而提升锚杆入岩精度,显著降低高差误差对整体支护体系稳定性的影响。

### 3.2 严控钻孔参数工艺,保障锚固结构质量

钻孔是高边坡锚杆施工的核心环节,其参数直接决定锚固结构的承载性能。为确保钻孔质量,项目部需采用低扰动钻进技术控制入岩节奏,配置具有抗扭性能的钻具系统,在钻进过程中维持恒定推进力,及时排渣降温,减少孔壁坍塌风险<sup>[4]</sup>。同时,实时监测钻孔角度与方位,引入测斜系统持续校核轴线方向,避免因地质变化造成锚固无效,提升支护系统整体可靠性。

在 K5+320 至 K5+740 段高边坡支护施工中,锚杆布设密度高、岩层差异显著,钻孔作业面多位于陡峭坡体,孔位周边岩体节理裂隙分布不均,易引发塌孔与轴向偏移。施工单位应使用液压履带钻机,配合  $\Phi 90$  mm 合金钻头与高韧性钻杆,控制钻孔倾角在 15°,入岩深度 10~12 m。施工前对钻机平台进行稳固处理,采用锚固桩与钢构基座加固,避免钻进过程中平台位移造成钻具倾斜。钻孔初期采用低转速低风压参数推进,控制进尺速率在 5 cm/min 以内,钻至稳定层后提升转速与风压,以应对岩体强度变化。每完成 50 cm 钻进,技术人员即用数显测斜仪校核孔轴角度,保证轴向偏差不超过  $\pm 2^\circ$ 。为防止孔壁坍塌,每钻进 1 m 施工人员即实施一次高压气吹清孔作业,清除碎屑,保证孔底洁净无积水。针对强风化泥岩段钻孔易缩孔现象,技术组调整进尺策略,缩小步进长度至 30 cm,

在孔壁同步注入稀释黏结剂以临时固壁,增强成孔稳定性。施工过程中设专岗质检,定期记录每孔的孔深、孔径、孔向以及孔口稳定性,并符合关键工位二次钻进方案。钻孔完成后立即进行封孔,避免长时间暴露引发孔壁变形,进而降低锚固力衰减风险,保障整体防护系统在高边坡路段的适应性。

### 3.3 规范制作安装锚杆,确保杆体受力稳定

锚杆安装质量直接关系到整体支护系统的受力性能,项目部应控制锚杆材质、几何尺寸、连接方式及安装姿态等全过程,保证杆体严格按照设计参数选用螺纹钢,延伸率与抗腐蚀等性能满足工程等级要求。在安装过程中,工程人员需以轴线对中、角度精确、推力均匀的方式缓慢将锚杆插入预设孔位,避免强行冲击造成杆体变形,并配置定位器控制杆体姿态,提升锚固效果,预埋灌浆管,便于后续浆液充填密实。若安装过程中未达预定入孔深度,不得扭转或撞击杆体矫正,而应排查孔内残障后重新清孔,进而保证锚固张拉均匀与结构协同变形。

在高边坡支护工程中,项目部可以采用  $\Phi 32$  mm HRB400 级螺纹钢锚杆,控制锚固长度在 10~12 m,单根杆体由全长滚丝端头加工、中心段防腐涂层处理及螺帽锁定端预设锚具。同时于工区内封闭式钢筋加工棚加工,使用数控滚丝机加工两端螺纹,由质检人员逐件检验螺纹饱满度与尺寸偏差,且使用环氧富锌底漆进行防腐处理,全长喷涂厚度在 120  $\mu\text{m}$  至 150  $\mu\text{m}$  间,干燥后统一编号分类堆放,严禁交叉堆压。安装环节中每根锚杆均要配置两道定向定位器,保持其在插入过程中与孔轴重合,双人协同缓推,严禁用撬棒等方式助力。入孔后立即插入高压注浆管与  $\Phi 10$  mm 通气软管,双管距在 120 cm 以内,确保浆液可均匀充盈孔底、排除孔内空气。若遇局部孔位插杆受阻,工程人员立即启动清孔操作,使用高压风水交替冲洗直至障碍排除。安装作业完成后统一封口处理,设置临时支撑防止杆体位移,进而提升锚杆构件受力一致性,为后续注浆与张拉环节奠定基础,确保边坡锚固系统长期稳定运行。

### 3.4 优化注浆配比流程,增强岩体结合强度

注浆施工质量直接决定锚固系统与岩体的黏结性能及荷载传递能力,合理的配比体系能兼顾流动性、稳定性,保证浆液在注入后能够充盈孔壁缝隙、紧贴杆体表面并固结成型,形成高强度的锚固界面<sup>[5]</sup>。由此,技术人员需根据现场岩体裂隙特征与孔壁粗糙度调整水灰比、添加剂种类,且动态调整注浆压力,防止浆液离析、沉降等质量隐患,进而实现优化注浆配比流程。

施工中宜采用机械搅拌方式保障浆液均质性,借助反压或段塞注浆工艺提升注浆饱满度,并有效封闭孔壁裂隙,提高锚固段与基岩的整体强度,为后续施工环节提供可靠保障。

在实际工程中,施工人员要采用水泥基注浆材料,基础配比为水泥:水=1:0.5,掺入3%高效减水剂与0.5%膨胀剂,在施工前进行室内试配试验,控制初凝时间在45分钟以内,保证28天抗压强度不低于30 MPa。搅拌环节采用双轴卧式搅拌机,控制拌合时间在120 s,浆液经循环管道送至注浆泵系统,防止二次沉降。注浆采用单孔单管压密注浆工艺,注浆压力控制在0.6~1.2 MPa之间,压入速度约为2 L/min,现场施工人员根据孔口返浆情况及孔内压力变化动态调整注浆速率。每孔注浆前还要设定试压段,观察孔口是否漏浆,确认密闭性良好后再行注入。为提升注浆密实度,在主注浆完成后管理人员还应设置间歇补浆程序,于初凝前再次注入同等配比浆液,保障孔壁接触面与杆体表面形成连续无空腔浆膜层,保障高边坡支护工程的长期稳定运行。

### 3.5 落实张拉锁定制度,防止预应力应力流失

在高边坡预应力锚杆防护体系中,若张拉控制不当或锁定程序不严,将导致应力值偏低、传力失衡,甚至出现预应力衰减等现象。施工人员应在锚固段强度达到标准值后进行锚杆张拉,采用多点同步控制策略,保证张拉力均匀传递至锚固体中,并实施双控管理,即以控制张拉力为主、伸长量为辅,量化受力过程。锁定锚具时,技术人员还要充分考虑锚夹回缩与应力回弹,预留安全裕度,形成可靠的应力保持机制,进而建立标准化张拉锁定制度,有效落实设计张力,也为锚杆系统后期维稳提供技术支撑。

施工现场需设专用张拉平台,配置双缸同步千斤顶与数字张拉仪,实时读取张力数据。锚杆张拉前,由技术人员使用超声波实测锚固段注浆强度,确认其已达到设计要求的75%以上并不低于15 MPa。预张拉阶段采用50%、80%以及100%分级加载法,观察锚具夹持状态与杆体响应变化,判断锚固体是否黏结孔壁。张拉至设计张力后,技术人员立即测定实际伸长值,理论允许误差控制在±10%,如实测偏离明显,则启动复张并校核孔内施工参数。同时按标准程序操作锁定环节,在张力达到设计值1.1倍后缓降至设计张力,实施锚具夹片压紧,避免瞬时卸载引起回缩。锁定完成后,杆体外露部分涂覆环氧树脂封闭层,防止环境因素影响锚具性能,有效确保预应力系统稳定运行,为高边坡长期安全提供有力保障。

### 3.6 完善混凝土养护层面,巩固坡面结构完整

混凝土养护主要承担抗风化侵蚀等多重功能,既能提供锚杆杆体外露段的防护隔离,又能紧密贴合框架梁、坡面基层,提高整体结构的抗变形能力。施工中技术人员需控制喷射压力、喷嘴角度与作业间距,保证混凝土均匀附着、密实成层。为提升成型质量,施工人员应分层分段逐次推进,在初凝前及时修补空鼓、脱落部位,避免界面脱离导致结构裂损。高质量的喷护层可有效减缓地表水冲刷、热胀冷缩及干湿循环破坏坡面结构,进一步巩固高边坡锚固系统的稳定性。

在高边坡支护工程中,喷护层厚度需控制在6~8 cm之间,混凝土强度等级为C25,骨料最大粒径不超过10 mm,配比控制为水灰比0.42,掺入早强剂与微膨胀剂以提升收缩补偿性能。施工前施工人员系统清理坡面,清除风化层、浮石以及植被残根,使用高压水枪湿润作业面,降低界面吸水率,提升黏结效果。喷护作业时采用双料腔干喷机,喷嘴距离在1.2 m以内,喷射角度保持垂直于坡面±15°,推进顺序自上而下、先梁后面,保证锚杆周边喷层密实贴合,且遣专人修补锚杆周边,填实边角空隙、消除死角积灰。喷层作业完成后洒水养护72小时以上,保持喷面湿润状态以促进水化反应,并在喷护完成后设置表面防裂网格层,铺设Φ4钢筋焊网搭接固定喷护层,提升其抗拉性能。进而封闭坡面不稳定结构暴露面,显著提升了边坡的整体完整性。

## 4 结束语

高边坡锚杆防护技术是应对复杂地质条件下边坡稳定问题的重要手段,其结构性能依赖全过程工艺。施工过程中需要结合坡体构造特征与受力机制,构建高度匹配的技术响应体系。借助系统化、标准化的施工路径,有效构建坡面稳定结构,强化锚固与岩体间的关系,提升整体结构适应环境扰动的能力,为高边坡支护提供安全、耐久的工程支撑。

### 参考文献:

- [1] 邓铭武.高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J].工程技术研究,2023,08(21):26-28.
- [2] 黄富兴.高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J].交通世界,2023(18):38-40.
- [3] 蔡泽辉.高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J].工程建设与设计,2022(21):186-189.
- [4] 邢宗锐.高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J].交通世界,2021(33):129-130.
- [5] 余健雄.高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用[J].中华建设,2021(08):100-101.