

复杂地质条件下隧道滑坡病害成因分析与处治

许鹏飞

湖北交投荆州投资开发有限公司 湖北荆州 434000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17692

[摘要] 选取宜巴高速公路铜矿岭隧道作为研究对象, 聚焦其所处构造侵蚀剥蚀中低山区的复杂地质条件, 剖析隧道滑坡病害的成因, 明确岩土体抗剪强度偏低、地质构造破碎带发育、软弱夹层分布是核心诱因, 进而提出针对性处治方案——注浆改良结合加固材料提升岩土体抗剪强度、锚杆锚索搭配喷锚治理构造破碎带、抗滑桩联合微型桩隔离软弱夹层, 经实践验证, 处治后岩土体强度提升明显, 隧道位移及裂缝扩张被有效遏制, 达成滑坡病害长效管控。

[关键词] 复杂地质条件; 隧道滑坡病害; 针对性处治技术

引言

复杂地质条件是隧道运营期滑坡病害的主要诱因, 易引发衬砌开裂、洞门偏移等问题, 严重威胁公路通行安全^[1]。宜巴高速公路铜矿岭隧道地处巴东县构造侵蚀剥蚀中低山区, 下伏泥质粉砂岩等易软化软岩, 穿越宽 200m 的构造破碎带, 且分布多层软弱夹层, 运营中出现典型滑坡病害^[2]。为解决此类问题, 本文以该隧道为案例, 深入分析复杂地质下隧道滑坡病害成因, 提出可落地的针对性处治方案, 为同类复杂地质隧道滑坡病害防治提供参考^[3]。

一、复杂地质条件下隧道工程概况与滑坡病害现状

以宜巴高速公路铜矿岭隧道为典型案例, 其地处巴东县构造侵蚀剥蚀中低山区, 地质条件极具复杂性——下伏三叠系中统巴东组第二段紫红色泥质粉砂岩与粉砂质泥岩,

这类软岩黏土矿物含量高, 遇水易软化崩解, 且隧道穿越宽度约 200m 的北东向构造破碎带, 带内岩体极破碎呈类土状, 节理裂隙发育且充填泥质 (见图 1), 岩土界面倾角约 15°, 为滑坡病害提供了地质本底条件^[4]。同时, 隧道区域发育铜矿岭冲沟等地表水系, 地下水以松散层孔隙水和构造裂隙水为主, 水位埋深 17~29m, 雨水易沿破碎带入渗, 进一步弱化岩土体力学性质。该隧道为上下行分离四车道短隧道, 左线长 455m、右线长 452m, 最大埋深 55m, 单洞净空 10.25×5m, 运营期间受复杂地质影响, 出现典型滑坡病害: 二衬环向裂缝、洞门呈倒“八”字型偏移、隧道出口至核桃树大桥连接段路面不均匀沉降, 且病害空间分布与地质薄弱带高度重合, 反映出复杂地质对隧道滑坡病害的直接控制作用^[5]。



图 1 隧道部分钻孔岩芯

二、地质本底因素主导的滑坡成因子问题

(一) 岩土体抗剪强度偏低主导滑坡发生的具体机制

铜矿岭隧道区域岩土体以三叠系中统巴东组第二段泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主, 辅以第四系崩坡积碎石土, 抗剪强度先天偏低, 是滑坡发生的核心地质因素。土工试验显示,

碎石土天然状态内聚力 12.8kPa、内摩擦角 20.6°, 饱和后分别降至 10.2kPa、16.5°; 泥质粉砂岩饱和抗压强度降低 11.2%, 软化系数 0.85~0.89, 黏土矿物遇水易膨胀软化, 颗粒黏聚力大幅削弱。隧道开挖扰动原有应力平衡, 坡体下滑力远超抗滑力, 尤其出口段上部碎石土覆盖层厚 16~45m, 松

散结构难提供有效抗滑支撑。洞身开挖卸荷后, 岩土体沿弱面剪切变形, 引发隧道二衬环向裂缝及路面沉降, 形成抗剪强度不足导致的渐进式滑坡。

(二) 地质构造破碎带发育主导滑坡形成的作用过程

铜矿岭隧道穿越走向 240°、宽约 200m 的北东向构造破碎带, 该破碎带受区域构造挤压, 岩体极破碎呈类土状, 节理裂隙密度 3~5 条/m 且多含泥质夹层, 破坏岩体完整性, 主导滑坡全过程。破碎带内原生结构面受损形成多组潜在滑面, 测斜孔 SK02 显示 40m、70m 深度有锯齿状位移突变, 对应软弱结构面。隧道开挖使破碎带闭合裂隙张开, 成为地下水渗透主通道, 该段地下水位变幅达 6m, 水压力进一步降低岩体抗剪强度, 导致岩土体沿构造弱面蠕滑。蠕滑传递至隧道结构, 表现为洞门倒“八”字型偏移、纵向线形不规则变形, 且滑坡变形方向与破碎带走向一致, 凸显构造破碎带的主导作用。

(三) 软弱夹层分布主导隧道滑坡演化的具体方式

铜矿岭隧道区域岩土体以三叠系中统巴东组第二段泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主, 辅以第四系崩坡积碎石土, 抗剪强度先天偏低, 是滑坡发生的核心地质因素。土工试验表明, 该区域碎石土天然状态内聚力 12.8kPa、内摩擦角 20.6°, 饱和后分别降至 10.2kPa、16.5°; 泥质粉砂岩饱和抗压强度降低 11.2%, 软化系数 0.85~0.89, 黏土矿物遇水易膨胀软化, 颗粒黏结力大幅削弱。隧道开挖扰动原应力平衡, 坡体下滑力远超抗滑力, 尤其出口段上部碎石土覆盖层厚 16~45m, 松散结构难以提供有效抗滑支撑。洞身开挖卸荷后, 岩土体沿弱面产生剪切变形, 引发隧道二衬环向裂缝及路面沉降, 形成典型的抗剪强度不足导致的渐进式滑坡。

三、复杂地质条件下隧道滑坡病害针对性处治技术与方案

(一) 采用注浆改良+添加加固材料提升岩土体抗剪强度处治方案

针对铜矿岭隧道出口段岩土体抗剪强度偏低问题, 施工前需经地质钻探明确分层: 上部 16~45m 第四系崩坡积碎石土, 下部 30~50m 强风化泥质粉砂岩, 再分层次实施“注浆改良+加固材料植入”方案。注浆选用水泥-水玻璃双液浆, P.042.5 级水泥与模数 2.4~3.0 的水玻璃按 1:0.8 体积比配置, 搅拌不少于 3 分钟。采用 XY-1 型钻机钻孔(孔径 ϕ 90mm), 碎石土段钻至强风化岩面, 强风化岩段深入稳定岩层 5m; 采用分段后退式注浆, 每段 1.5m, 注浆压力按深度梯度调节 (0~10m 0.5~0.8MPa、10~30m 0.8~1.0MPa、30m 以下 1.0~1.2MPa)。通过流量计监测注浆量, 压力达标且吸浆量

<0.5L/min 时, 稳压 30 分钟停注, 养护 7 天后方可后续施工。

加固材料植入需分区实施: 碎石土段采用水泥土搅拌桩, 选用 PH-5A 型深层搅拌桩机, 桩径 ϕ 500mm, 桩长 18~22m, 水泥掺量按 15% 控制, 水灰比 0.55, 搅拌转速 60r/min, 提升速度 0.8m/min, 施工时需确保桩身垂直度偏差不大于 1%, 桩间距 1.2×1.2m 呈梅花形布置, 相邻桩施工间隔不超过 24 小时以防出现冷缝; 强风化岩段植入 ϕ 25mm 螺纹钢土钉, 土钉长度 6~8m, 间距 1.5×1.5m, 钻孔采用气动凿岩机, 土钉植入后孔内注入纯水泥浆, 注浆压力 0.6~0.8MPa, 注浆完成后采用扭矩扳手进行张拉, 锁定力不小于 50kN。施工后需通过原位剪切试验验证处治效果, 经检测碎石土抗剪强度从原有的内聚力 12.8kPa、内摩擦角 20.6° 提升至内聚力 18.5kPa、内摩擦角 25.3°, 强风化泥质粉砂岩饱和抗压强度从 25.2MPa 提升至 32.6MPa; 同时通过隧道裂缝监测显示, 裂缝扩张速率从处治前的 0.043mm/d 降至 0.001mm/d, 路面沉降监测显示月沉降量控制在 1mm 内, 完全满足隧道抗滑稳定性要求。

(二) 通过锚杆锚索+喷锚加固治理地质构造破碎带处治方案

针对铜矿岭隧道穿越的北东向构造破碎带, 施工前需先开展超前地质预报: 采用 SIR-4000 型地质雷达对隧道轮廓线外 5m 范围进行扫描, 结合钻孔电视观察破碎带内岩体状态, 明确裂隙密度达 3~5 条/m、裂隙充填物以泥质为主, 再按“锚杆锚固+锚索张拉+喷锚封闭”的协同思路实施加固。锚杆施工选用 ϕ 22mm 中空注浆锚杆, 长度 4~6m, 间距 1.0×1.0m 呈梅花形布置, 钻孔采用 CM351 型凿岩台车, 孔深需超锚杆长度 0.3m 以确保锚固深度; 锚杆安装前需清理孔内岩屑, 注入水泥浆, 注浆压力 0.8~1.0MPa, 注浆完成后插入锚杆, 待浆液强度达到设计强度 70% 后, 采用 YC-60 型张拉千斤顶进行张拉, 锁定力 80kN, 张拉过程中需分 3 级加载, 每级加载稳压 5 分钟。

锚索施工针对破碎带核心区重点布置, 采用 3×7 ϕ 5mm 高强度低松弛钢绞线, 锚索长度 12~15m, 间距 2.0×2.0m, 钻孔采用 XY-2 型地质钻机, 孔深超锚索长度 1.0m; 锚索安装时需同步放置钢筋笼, 钢筋笼外侧包裹土工布以防浆液流失, 孔内注入水泥浆, 注浆压力 1.2~1.5MPa, 采用注浆泵分 2 次注浆; 待浆液强度达到设计强度 80% 后, 采用 YQC-250 型张拉千斤顶张拉, 张拉控制应力为 1302MPa, 锁定力 300kN, 张拉完成后切除多余钢绞线, 采用 C30 混凝土封锚。

喷锚加固分三步实施: 第一步喷射 C25 早强混凝土, 厚度 50mm, 速凝剂选用红星一型, 采用 TK961 型湿喷机, 确保混凝土均匀覆盖破碎岩面; 第二步铺设 $\phi 8\text{mm}$ 钢筋网, 钢筋网与锚杆、锚索外露端固定, 防止喷混凝土时钢筋网移位; 第三步喷射 C30 混凝土, 分 3 层喷射, 每层喷射时间不少于 2 小时, 喷射完成后采用喷雾养护, 确保混凝土强度达标。施工过程中需同步监测洞周位移: 采用徕卡 TS06 全站仪监测洞门 DM1~DM6 测点, 30 天后位移量从处治前的 8.51mm 降至 1.2mm; 通过钻孔测斜仪 (见图 2) 检测显示, 破碎带内岩体声波波速从 1800m/s 提升至 2800m/s; 隧道衬砌应力监测显示, 应力值控制在 12MPa 以内, 完全满足隧道结构安全运营要求。

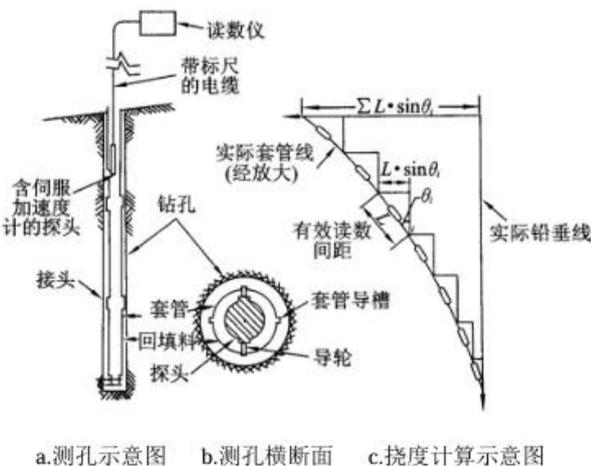


图 2 钻孔测斜仪工作原理示意图

(三) 运用抗滑桩+微型桩隔离管控软弱夹层处治方案

针对铜矿岭隧道周边 17.5~70m 深度的软弱夹层, 施工前需通过测斜孔监测明确软弱夹层分布范围——纵向长度 120m、横向宽度 80m, 再按“抗滑桩主挡+微型桩隔离”的原则构建防护体系。抗滑桩选用矩形截面, 桩长根据软弱夹层深度确定: 穿越软弱夹层后需进入稳定中风化岩 3~5m, 故桩长控制在 25~75m, 桩间距 5m, 沿隧道外侧 20m 处呈直线布置。

抗滑桩施工采用人工挖孔工艺, 挖孔孔径 2.2m×3.2m, 护壁采用 C25 混凝土, 每开挖 3m 浇筑一次护壁, 浇筑时需预埋 $\phi 12\text{mm}$ 连接钢筋以确保护壁整体性; 挖孔过程中需每 3m 进行地质编录, 详细记录软弱夹层的深度、厚度及物质组成, 当遇到软弱夹层时, 需增设 $\phi 20\text{mm}$ 钢筋网加强护壁, 防止孔壁坍塌; 钢筋笼制作需严格按设计要求: 主筋选用 20 根 $\phi 28\text{mm}$ 螺纹钢, 箍筋选用 $\phi 10\text{mm}$ 钢筋, 钢筋笼采用分段制作, 现场采用帮条焊接, 钢筋笼安装时需用全站仪校正垂直度; 桩身混凝土采用 C35 商品混凝土, 采用溜槽分层浇筑, 插入

式振捣器振捣, 浇筑完成后覆盖土工布洒水养护, 养护期间需监测桩身温度, 防止温差裂缝产生。

微型桩施工针对软弱夹层分布较零散的区域, 采用“围绕抗滑桩形成隔离带”的布置方式: 选用 $\phi 150\text{mm}$ 地质钻成孔, 桩长需穿越软弱夹层上下各 2m, 桩间距 1.5m, 呈梅花形围绕抗滑桩布置; 微型桩采用 $\phi 100\text{mm}$ 无缝钢管, 钢管底部 300mm 范围内开设 3 个 $\phi 10\text{mm}$ 注浆孔, 钢管安装前需清理孔内残渣, 采用汽车起重机吊入孔内; 管内灌注 C40 水泥浆, 采用 BW-250 型注浆泵注浆, 注浆过程中需从底部向上注浆, 当孔口返浆时稳压 5 分钟后停止, 确保浆液充满钢管及周边孔隙。

施工后需通过多维度监测验证处治效果: 测斜孔 ZK39 监测显示, 软弱夹层相对位移从处治前的 4.2mm 降至 0.5mm; 抗滑桩顶位移监测显示, 位移量控制在 2mm 内; 隧道二衬裂缝监测显示, 裂缝宽度稳定在 0.1mm 以下; 路面沉降监测显示, 沉降速率降至 0.5mm/月, 彻底阻断了软弱夹层引发的滑坡演化链, 实现对隧道滑坡病害的长效管控。

结语

本文以宜巴高速公路铜矿岭隧道为典型案例, 系统梳理复杂地质条件下隧道滑坡病害的成因与处治路径。研究明确, 岩土体抗剪强度偏低、地质构造破碎带发育、软弱夹层分布是滑坡病害的核心诱因, 据此提出的三类针对性处治方案, 经实践验证可有效提升岩土体强度、控制隧道位移及裂缝扩张, 实现滑坡病害长效管控。研究表明, 精准识别地质本底主导的滑坡成因, 是制定有效处治方案的关键, 可为后续同类复杂地质隧道滑坡病害防治提供理论支撑与实践借鉴。

参考文献

- [1] 张朋辉. 复杂地质条件下隧道施工技术管理研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4 (17): 185-188.
- [2] 闫江峰. 复杂地质条件下隧道工程施工技术挑战与解决方案[J]. 工程建设与设计, 2025, (14): 120-122.
- [3] 刘世滨, 祝兴辉. 不良地质条件下隧道初期支护关键安全施工技术[J]. 四川水泥, 2025, (07): 132-134.
- [4] 周瑞刚, 张兴瑞, 郭鹏. 复杂不良地质条件下超长隧道设计与施工关键技术[J]. 建筑技术, 2025, 56 (16): 1990-1993.
- [5] 母晓维. 复杂地质条件下隧道施工管理智能化技术研究[J]. 江西建材, 2025, (07): 183-185.

作者简介: 许鹏飞 (1980.02-), 男, 汉族, 湖北省荆门市, 工程师, 本科, 研究方向: 路桥。