

# 高速公路隧道施工安全风险识别与控制措施

崔志豪

云南交投公建桥梁工程有限公司 云南 昆明 650000

**【摘要】**：西南山区高速公路隧道地质条件复杂，断层破碎带与软弱富水围岩分布广泛，施工中易发生突泥涌水、围岩失稳及地表变形等安全风险，严重制约工程建设安全与进度。本文以西南山区典型高速公路隧道为研究对象，依托实际工程案例，系统识别不良地质、水文变化及施工工艺缺陷引发的安全风险，提出超前地质探测、围岩加固支护、动态监测预警等关键防控技术，并应用于突泥涌水、围岩失稳、地表变形风险的专项治理。工程实践表明，该技术体系可有效控制施工安全风险，为同类山区隧道施工提供技术参考。

**【关键词】**：高速公路隧道；施工安全风险；突泥涌水；围岩加固；动态监测

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.042

我国西南山区地形起伏大、地质构造活跃，受板块挤压影响，区域内断层密布、岩体破碎且富水性强，是高速公路隧道建设的高风险区域。随着西部交通路网不断完善，山区高速公路隧道工程数量与规模持续增长，隧道穿越软弱页岩、破碎断层等复杂地层时，极易诱发突泥涌水、围岩坍塌等灾害。此类灾害突发性强、处置难度大，不仅威胁施工安全，还会造成工期延误与经济损失。因此，针对西南山区高速公路隧道施工安全风险开展系统性研究，明确风险诱因并制定科学防控技术，对保障隧道施工安全、推动山区隧道工程技术发展具有重要意义。

## 1 工程概况

本次研究依托西南山区典型高速公路隧道工程，该隧道为区域高速路网关键控制性工程，采用双向四车道分离式设计，设计行车速度 80km/h，隧道最大埋深达 260m。隧道左洞起止桩号为 ZK29+950 至 ZK32+465，全长 2515m；右洞起止桩号为 K29+975 至 K32+555，全长 2580m，隧道正洞最大开挖跨径 12.50m，紧急停车带加宽位置最大开挖跨径增至 15.74m，断面尺寸突变明显。隧道所处区域地质构造复杂，位于新街弧形压性断层与长虫街弧形压性断层交界带，区域受印度洋板块与欧亚板块挤压作用强烈，岩体破碎且褶皱发育显著，围岩以全风化至强风化软质黑色页岩为主，呈泥质结构，隧道上部覆盖 30m 至 50m 厚硬质砂岩，施工主要在软弱围岩地层中开展。隧道施工期间正值雨季，左洞 ZK30+569 至 ZK30+594 加宽带段出现初期支护变形、坍塌及大规模突泥涌水灾害，突泥量达 1.2 万 m<sup>3</sup>，掩埋隧道长度 100m，造成施工设备损毁、工期延误，凸显该类地质条件下高速公路隧道施工的高风险性。

## 2 高速公路隧道施工安全风险识别

### 2.1 不良地质条件引发的固有风险

西南山区典型高速公路隧道穿越区域性弧形压性断层交界带，长期地质构造运动持续扰动地层形态，岩体原生完整性遭到严重破坏。区域内褶皱构造发育强烈，岩体表面与内部遍

布密集节理裂隙，在地层内部形成大量天然软弱结构面，同时多处区域形成应力集中区域<sup>[1]</sup>。隧道围岩主要由全风化至强风化软质黑色页岩构成，岩体自身密实度不足，整体力学强度偏低，颗粒间胶结牢固程度较差，自然赋存状态下便具备明显失稳特性。水体侵入岩体内部后会快速造成岩体质变软化解体，岩体膨胀率可达 30%，各项物理力学指标随之大幅下降，岩体抗剪切承载能力显著削弱。隧道洞身上方覆盖厚度区间 30m 至 50m 的硬质砂岩层，和下层松软页岩构成软硬相间的复合地层，岩性性质差距造成地层内部应力分布失衡。隧道掘进作业会打破原有地层应力平衡，局部应力快速释放，相继出现围岩表层脱落、块状塌落等现象，严重时引发围岩整体失稳垮塌。这类先天存在的不良地质条件无法依靠施工操作规避，是引发隧道坍塌、突泥涌水灾害的核心地质根源，始终对现场施工安全形成持续威胁。

### 2.2 水文环境变化诱发的动态风险

西南山区降雨时空分布存在明显差异，雨季降水汇聚性强且单次降雨体量偏大，地表积存水源顺着岩体裂隙缝隙与断层破碎构造不断向下渗透，在地层内部构筑出结构繁杂的地下水渗流体系。隧道现场施工时段恰好处于多雨时节，地下水整体补给体量大幅上涨，围岩岩体长久处于水分饱和状态，地层内部孔隙水压力稳步攀升，岩体有效承载应力随之下降，自身稳定承载性能持续减弱。全风化页岩接触水分后逐步转化为泥质形态，生成含水丰富的软弱夹层，该层体流动性能突出，抵御渗水破坏的能力偏弱，掘进施工产生的扰动作用极易催生突泥涌水流通路径。地下水不断侵蚀软化围岩结构，同时冲刷剥离软弱夹层，渗流通道范围随之不断拓展，零星渗水逐步发展为大规模涌泥涌水现象，灾害发作突然、演进速度较快，预判防控难度较高。水文条件伴随季节更替不断产生动态改变，雨季水环境劣化进一步加剧原生地质隐患，地质与水文相互叠加催生动态风险，大幅增加隧道施工现场安全管控的整体难度。

### 2.3 施工工艺缺陷导致的人为风险

隧道加宽带作为断面突变区域，开挖跨度由 12.50m 增至

15.74m, 应力集中效应显著, 围岩扰动范围扩大, 对支护体系的承载能力与施工工艺精度提出更高要求。原设计采用常规复合式衬砌结构, 初期支护选用 I20b 工字钢拱架, 纵向间距 60cm, 该支护参数在软弱富水围岩条件下刚度不足, 难以有效抵抗围岩松散荷载。施工过程中初期支护施作滞后, 二次衬砌未及时跟进, 支护体系未形成闭环受力结构, 无法有效约束围岩变形。开挖采用常规分步工艺, 单次开挖长度偏大, 对围岩扰动频繁, 加剧围岩应力释放与失稳发展<sup>[2]</sup>。锁脚锚固、纵向连接等关键工序施工质量把控不严, 钢拱架未形成棚架超静定结构, 横向成拱、纵向成梁的整体受力效果无法实现, 导致支护体系局部失效, 最终诱发初期支护扭曲变形、坍塌等灾害, 凸显施工工艺管控缺陷对隧道安全风险的直接诱发作用。

### 3 高速公路隧道施工安全风险防控关键技术

#### 3.1 超前地质探测与风险预判技术

采用地表地质钻孔与自动化测斜孔组合探测技术, 在隧道上方山体不同高程与平面位置布设多组深度不等的测斜孔, 孔深覆盖 48.5m 至 195m 范围, 形成立体监测网络。通过数字测斜仪按设定频率持续采集深部岩体位移数据, 精准掌握山体内部变形深度、位移大小及变化速率, 捕捉岩体变形演化全过程。同步开展地表地质钻探作业, 获取连续完整岩芯样本, 直观揭示地层岩性、结构面发育及破碎程度, 明确坍塌体空间分布形态, 探明坍塌体高度约 55m、宽度约 60m, 呈漏斗状松散堆积特征, 整体无自稳能力。结合现场地质参数, 通过数值计算构建精细化山体稳定性分析模型, 划定潜在滑裂面位置并求解安全系数, 量化评估山体整体稳定状态, 确定隧道拱顶上方 16m 为安全隔离距离。综合探测数据与计算结果, 精准圈定突泥涌水高风险区段, 明确松散荷载规模为常规 V 级围岩荷载的 4 倍, 为后续加固方案设计提供量化地质依据, 实现不良地质体的精准识别与风险等级预判。

#### 3.2 围岩加固与支护强化防控技术

实施超前帷幕注浆技术, 针对突泥涌水高风险区段开展加固作业, 对掌子面前方 30m 范围内的围岩划分三环结构依次递进注浆处理, 三段施工长度依次为 12m、10m、8m, 注浆区域末端预留 6m 厚度的止浆岩盘, 以此阻挡浆液向外渗漏, 维持作业过程注浆压力处于稳定状态。注浆选材依据地层含水情况灵活调整, 常规工况选用普通水泥浆, 富水发育地段更换为水泥-水玻璃双液浆, 依托后退式施工工艺逐层填补围岩内部裂隙, 实现水体封堵与松散岩体固结成型<sup>[3]</sup>。拱部同步架设  $\phi 108$  规格热轧无缝钢管大管棚, 管材长度 25m、壁厚 6mm, 布设外插角把控在  $5^{\circ}$  至  $15^{\circ}$  区间, 于拱部  $120^{\circ}$  区域按照 40 厘米环向间距排布, 相邻管体纵向搭接长度 5m, 管体内部加装钢筋笼强化自身抗弯性能。现场搭配安置双层  $\phi 42$  钢管超前小导管, 单根管材长度 4.5m, 相邻杆件纵向搭接 3.5m, 注浆固结后形成完整密闭的拱顶防护圈层。初期支护更换为 I25b 工字钢

拱架, 构件纵向排布间距 50cm, 喷射 C25 标号混凝土厚度加厚至 32cm, 搭配 6m 长  $\phi 89$  锁脚钢管与 I16 纵向连接型钢, 组合搭建整体受力棚架超静定结构, 全面增强支护结构承载性能。

#### 3.3 动态监测与实时预警防控技术

在初期支护与围岩、初期支护与二次衬砌的接触界面, 按断面关键位置均匀布设压力盒, 实时采集不同施工阶段围岩压力变化数据, 精准掌握围岩与支护体系间的相互作用规律及应力传递特征。在二次衬砌受力主筋内部埋设钢筋计, 沿纵向与环向合理布置测点, 持续监测钢筋应力变化, 及时捕捉结构内力异常波动与应力集中现象。隧道二次衬砌表面安装静力水准仪与激光收敛计, 重点监测结构水平收敛与竖向沉降变形, 收敛精度严格控制在毫米级, 确保变形数据真实可靠<sup>[4]</sup>。山体深部通过自动化测斜孔实时传输深部岩体位移数据, 建立围岩变形、支护受力、山体位移的多维度监测数据联动体系, 实现全过程动态追踪。设定变形速率、累计位移等分级阈值预警指标, 当监测数据超出预警范围时自动触发预警信号, 及时捕捉围岩失稳前兆信息, 为施工工序动态调整与应急处置提供实时数据支撑, 保障隧道施工全过程安全可控。见图 1。

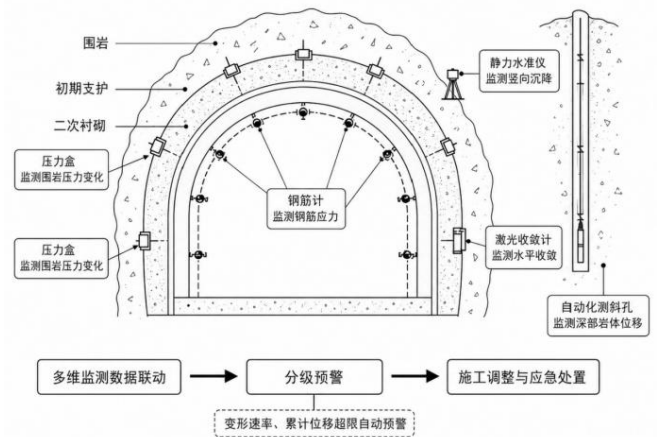


图 1 隧道施工安全多维动态监测体系示意图

### 4 高速公路隧道施工安全风险控制工程实践

#### 4.1 突泥涌水风险的专项治理实施

针对隧道加宽带出现大规模突泥涌水的危险区段, 选取降水偏少的旱季时段推进专项治理作业, 以此避开雨季充沛地下水持续补给带来的施工阻碍。治理范围划定 ZK30+569 至 ZK30+619 区间, 现场排布两轮超前帷幕注浆工序, 单次注浆作业纵深设定为 30 米, 整体划分三环层级依次推进施工。三段注浆施工距离分别为 12 米、10 米与 8 米, 注浆区域尾部留存 6 米实体岩盘, 有效阻隔浆液向外渗透流失。注浆物料以普通水泥浆作为基础用料, 含水裂隙发育位置调配水泥-水玻璃双液浆使用, 统一按照 0.5:1 标准把控水灰配比, 依托后退式施工手法作业, 注浆压力稳定维持在 0.1MPa 至 0.5MPa 之间, 促

使松散泥质岩体紧密固结,彻底封堵内部渗水路径。同步在拱部架设 $\Phi 108$ 热轧无缝钢管大管棚,单根管材规格长度25米、壁厚6毫米,管体内部加装钢筋笼提升抗弯强度,管材沿拱部一百二十度范围排布,环向间隔四十厘米,相邻钢管纵向搭接五米,构筑稳固的拱顶刚性防护体系。开挖作业前布置两层 $\Phi 42$ 钢管超前小导管,杆件单长4.5米,相邻构件搭接3.5米,浆液充盈岩体缝隙后形成多层防护加固圈层,从源头切断突泥涌水流通路径。

#### 4.2 围岩失稳风险的现场处置应用

隧道开挖采用三台阶预留核心土工艺,严格控制单次开挖长度不超过0.5m,减少对软弱页岩围岩的扰动,上、中、下台阶分步推进,核心土预留宽度不小于开挖跨度的三分之一,维持掌子面临时稳定。初期支护体系升级为I25b工字钢拱架,纵向间距调整为50cm,拱架接头处采用I16短工字钢纵向连接,每3m设置一道并焊接牢固,增强纵向整体性<sup>[5]</sup>。喷射C25混凝土厚度增至32cm,钢筋网按15cm $\times$ 15cm网格布设,提高喷层抗裂能力。拱脚位置施作6m长 $\Phi 89$ 锁脚钢管,打设角度为水平逆时针45°,每榀拱架设置4根,锚入稳定岩体深度不小于4m,抑制拱架下沉与侧移。仰拱初期支护紧跟下台阶,距离掌子面不超过25m,及时闭合支护成环,二次衬砌采用80cm厚C40钢筋混凝土,主筋选用 $\Phi 25$ 钢筋、纵向间距10cm,距离掌子面不超过45m,形成刚性承载结构,有效控制围岩塑性变形发展。

#### 参考文献:

- [1] 彭浩,韩玉,梁铭,等.基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态评估技术研究[J].岩土工程学报,2025,47(09):1893-1902.
- [2] 吕宏宇,李琳.隧道施工安全风险评估及防控措施研究——以晋阳高速牛王山隧道工程为例[J].工程技术研究,2025,10(07):146-148+191.
- [3] 周鸣亮,李泽豫,黄宏伟,等.考虑施工时序的隧道工作面坍塌风险分析方法与验证[J].防灾减灾工程学报,2024,44(03):579-595.
- [4] 姜枫,贺鹏,王刚,等.隧道施工全过程安全管控与智能决策系统及其工程应用[J].隧道建设(中英文),2024,44(S2):266-285.
- [5] 陈俊武,李国锋,王明江,等.云南南景高速阿比村隧道加宽突泥涌水原因分析与处治技术[J].现代隧道技术,2022,59(S1):858-865.

#### 4.3 地表变形风险的全程管控落实

隧道上方山体布设多组自动化测斜孔,涵盖不同深度监测断面,孔深从51.5m至195m不等,采用C17PRO数字测斜仪采集深部岩体位移数据,监测频率设定为每日2次,持续追踪山体内部位移演化规律。测斜数据实时传输至数据采集系统,精准捕捉157m深度处最大位移变化,A方向最大位移75.09mm、B方向最大位移61.48mm,合位移97.05mm,明确变形集中层位。结合地表裂缝分布特征,圈定山体变形影响范围,针对性调整隧道支护参数,按75m松散荷载标准设计衬砌结构,提升结构抗变形能力。二次衬砌施工完成后,布设静力水准仪监测地表沉降、激光收敛计监测水平位移,构建深部与地表联动监测网络,持续监测周期不少于12个月,实时掌握地表变形收敛趋势,确保山体位移逐步趋于稳定,阻断地表变形向隧道结构传递路径。

#### 5 结语

西南山区高速公路隧道施工受复杂地质与水文条件制约,突泥涌水、围岩失稳及地表变形等风险突出,是工程安全管控的重点与难点。依托典型工程实践,通过精准识别固有地质、动态水文及工艺缺陷类风险,构建超前探测、加固支护、动态监测相结合的技术防控体系,实现高风险区段的有效治理。实践验证,该技术体系针对性强、实施效果可靠,可有效降低山区隧道施工安全隐患。相关技术路径与处置经验,为类似复杂地质条件下高速公路隧道的安全施工提供了切实可行的参考,具备良好的工程应用价值与推广意义。