

公路工程隧道施工塌方治理措施的探讨

王海洋

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 650000

摘要：隧道施工塌方是公路工程建设中的重大安全隐患，科学有效的治理措施对保障施工安全至关重要。本文系统分析了隧道塌方的地质、设计及施工成因，提出以安全优先、快速响应和综合治理为核心的治理原则，重点探讨了临时支护、塌方体处理及长期加固等关键技术措施。通过超前地质预报、规范施工工艺和完善应急管理，可显著降低塌方风险。

关键词：隧道施工；塌方治理；成因分析；支护技术；预防措施

引言：公路工程隧道施工环境复杂，塌方是常见且危害大的问题，不仅影响施工进度，还威胁人员安全与工程质量。随着交通建设发展，隧道工程增多，面对的地质条件更复杂，塌方风险加大。深入研究隧道施工塌方的成因、治理原则、技术措施及预防管理办法，对保障隧道施工安全、提高工程效益具有重要意义，本文就此展开探讨。

1 隧道施工塌方成因分析

1.1 地质因素

围岩稳定性差是引发隧道施工塌方的关键地质因素。不同地质条件下的围岩物理力学性质存在显著差异，在软弱破碎岩层中，岩体自身完整性不足，抗剪强度和承载能力较低，难以承受隧道开挖后产生的应力重分布^[1]。当开挖作业扰动围岩时，原本处于相对平衡状态的岩体结构易发生破坏，导致岩块松动、剥落，若未能及时控制，极易引发塌方。地下水活动对隧道施工安全构成直接威胁。地下水渗透会改变围岩的物理性质，降低岩体的粘结力和内摩擦角，使围岩强度大幅衰减。在富水地层中，地下水的长期作用可能软化软弱夹层，加剧岩体风化，水流冲刷还会带走围岩中的细小颗粒，形成空洞或裂隙，破坏围岩的整体性。随着开挖进程推进，地下水压力逐渐释放，进一步加剧围岩失稳，为塌方发生创造条件。

1.2 设计因素

支护结构设计不合理会为隧道施工塌方埋下隐患。支护结构的作用是抵抗围岩压力、维持隧道开挖面稳定，若设计时对围岩压力估算不足，支护参数选择偏小，或支护结构形式与实际地质条件不匹配，就无法有效约束围岩变形。在围岩压力持续作用下，支护结构易产生过度变形、开裂甚至破坏，失去对围岩的支撑作用，进而引发塌方。开挖方法选择不当直接影响隧道施

工的安全性。不同地质条件适用的开挖方式存在差异，若在软弱围岩段采用全断面开挖，会使开挖面暴露时间过长，围岩应力集中现象加剧，难以控制围岩变形。而开挖进尺设置不合理，如进尺过大，会导致支护作业滞后，无法及时封闭开挖面，增加围岩失稳的风险，为塌方发生提供可能性。

1.3 施工因素

施工工艺不规范是导致隧道施工塌方的重要诱因。开挖作业中，若爆破参数控制不当，过度爆破会对围岩造成强烈扰动，破坏岩体原有结构，扩大围岩破碎范围。支护作业时，若支护材料质量不达标、支护工序执行不到位，如锚杆锚固力不足、喷射混凝土厚度不够等，会导致支护结构无法发挥预期作用。开挖与支护工序衔接不紧密，间隔时间过长，会使围岩长时间处于无支护状态，加速围岩失稳进程。监测与预警缺失会使隧道施工失去安全保障。施工过程中，围岩变形和应力变化是判断隧道稳定性的重要依据，若未建立完善的监测体系，或监测点布置不合理、监测频率不足，就无法及时掌握围岩动态。当围岩出现异常变形时，不能及时发出预警信号，施工人员难以及时采取应对措施，导致险情不断升级，最终引发塌方。监测数据的分析解读不及时、不准确，也会影响对隧道安全状态的判断，错失预防塌方的最佳时机。

2 隧道塌方治理原则

2.1 安全优先原则

确保人员与设备安全是隧道塌方治理的核心前提。塌方发生后，现场环境复杂且存在持续风险，需第一时间对受影响区域进行隔离，划定危险范围并设置警示标识，防止无关人员进入。针对被困人员，需通过专业手段判断其所处位置及安全状态，制定科学救援方案，避免救援过程中因二次塌方造成新的伤害^[2]。对于现场

设备，需根据塌方影响程度评估其保留价值与移动可行性。对处于危险区域的设备，在保障救援通道畅通的前提下，采取稳固措施防止因塌方进一步扩大导致设备损坏或阻碍救援。所有治理环节均需以安全为前提，各项操作需符合安全规范，避免因急于推进治理而忽视潜在风险，确保人员与设备在可控环境中开展作业。可借助无人机侦察塌方区域内部情况，为救援方案制定提供更精准依据，减少人员直接进入危险区的风险。

2.2 快速响应原则

及时控制塌方扩展是遏制险情恶化的关键。塌方发生初期，岩体仍处于不稳定状态，若不能迅速采取措施，可能导致塌方范围扩大，增加治理难度与风险。需在最短时间内组织专业团队抵达现场，通过现场勘察与监测数据，初步判断塌方规模、发展趋势及潜在隐患。基于判断结果，立即实施临时支护措施，如采用速凝混凝土喷射加固暴露岩面，或架设临时钢支撑限制围岩变形。对塌方区域周边进行封闭，防止外界因素干扰加剧岩体失稳。快速响应需兼顾效率与科学性，避免盲目操作，通过精准施策在短时间内形成有效控制，为后续治理奠定基础。可提前储备应急支护材料于隧道内合适位置，缩短材料调配时间以提升响应速度。

2.3 综合治理原则

结合地质与施工条件制定方案是实现塌方有效治理的根本要求。不同塌方场景背后的成因存在差异，需全面分析地质勘察数据，明确围岩性质、断层分布、地下水状况等关键信息，同时梳理施工过程中的工艺参数、支护方式、监测记录等内容，找出引发塌方的核心因素。在此基础上，将地质条件与施工实际相结合，制定多维度治理方案。针对软弱破碎围岩，可采用超前注浆加固与分步开挖相结合的方式；面对富水地层塌方，需同步实施排水降压与支护强化措施。治理方案需兼顾短期控制与长期稳定，既解决当前塌方问题，又预防后续施工中类似险情发生，通过系统性措施实现隧道结构的安全恢复。方案实施过程中需动态监测围岩变形数据，根据数据变化及时调整治理手段，保证治理效果与实际需求相符。

3 隧道塌方治理技术措施

3.1 临时支护技术

喷射混凝土加固是控制塌方初期围岩变形的关键手段。通过高压设备将掺加速凝剂的混凝土混合料喷射至围岩表面，能在短时间内形成连续的刚性壳体，封闭岩面防止风化剥落，将局部围岩应力传递至整体结构^[3]。在喷射过程中需控制喷射厚度与平整度，确保混凝土与岩

面紧密粘结，对于裂隙发育区域可增加喷射层数，通过分层固化提升支护效果。该技术适用于各类围岩条件下的临时加固，尤其在破碎岩层中能快速形成防护屏障，为后续施工争取时间。钢拱架支撑为隧道塌方段提供刚性支护保障。根据塌方区域断面尺寸定制钢拱架，采用分段安装方式，通过螺栓连接形成整体框架结构，直接承载围岩压力。钢拱架间距需根据围岩稳定性确定，在软弱破碎段可缩小间距增强支撑强度，与围岩之间采用混凝土填充，避免出现受力空隙。安装过程中需保证钢拱架轴线与隧道轴线一致，确保受力均匀，通过与喷射混凝土结合形成复合支护体系，进一步提升临时支护的整体承载能力。

3.2 塌方体处理技术

注浆固结通过填充裂隙与加固岩体改善塌方体性质。选用水泥浆或化学浆液，利用注浆泵通过预埋导管注入塌方体内部，浆液在压力作用下渗透至岩体裂隙中，凝固后形成网状骨架结构，提升松散岩体的粘结力与整体性。注浆参数需根据塌方体密实度与渗透性调整，对于富水区域可采用双液注浆缩短凝固时间，防止浆液被水稀释。注浆完成后需通过取芯检测验证固结效果，确保塌方体强度达到后续施工要求。分步开挖回填遵循“短开挖、快支护”原则处理塌方体。按照从上至下、从外到内的顺序划分开挖单元，每个单元开挖完成后立即实施临时支护，避免围岩长时间暴露。对于稳定性极差的区域，可采用预留核心土的开挖方式，保留中心部分岩体作为临时支撑，待周边支护完成后再逐步清除。开挖过程中产生的弃渣可筛选后作为回填材料，通过分层回填压实填充开挖空间，减少外运量的同时增强围岩稳定性，实现开挖与回填的协同作业。

3.3 长期加固技术

二次衬砌加强为隧道结构提供持久承载能力。在临时支护基础上浇筑模筑混凝土，形成封闭的环形结构，作为隧道的永久受力主体。二次衬砌厚度需根据计算确定，在塌方影响段可适当加厚，同时增设钢筋网提高抗裂性能。浇筑过程中需控制混凝土坍落度与振捣密实度，避免出现蜂窝麻面等质量缺陷，养护阶段保持湿度与温度稳定，确保混凝土强度稳步增长。二次衬砌与临时支护共同构成复合结构，通过协同受力抵御长期围岩压力。锚杆与预应力锚索应用通过深层锚固强化围岩稳定性。锚杆采用全长粘结型，钻孔后植入锚杆体并注入砂浆，利用锚杆与岩体的粘结力限制围岩深层位移，将局部岩体拉力传递至稳定地层。预应力锚索则通过张拉产生预紧力，对围岩施加主动压力，压缩岩体裂隙提高

整体强度，适用于高应力区域的长期加固。锚杆与锚索的布置需根据围岩应力分布确定，形成立体加固网络，与衬砌结构共同作用，实现隧道长期稳定。在具体施工中，需精准控制锚杆与锚索的安装角度和深度，确保其与岩体有效结合。对于地质条件复杂的塌方段，可结合两种技术的优势，通过合理配比布设密度，进一步提升加固体系的可靠性，为隧道长期安全运营提供坚实保障。

4 塌方预防与施工管理措施

4.1 超前地质预报

物探技术通过非开挖方式探测隧道前方地质情况，为施工提供基础数据。利用地震波反射法可识别断层破碎带、岩性界面等地质构造，通过分析波速变化判断岩体完整性；电磁法能有效探测地下水分布范围与富水程度，为防排水设计提供依据^[4]。物探操作需结合隧道轴线走向合理布置测线，确保数据覆盖开挖影响范围，同时对不同方法获取的结果进行交叉验证，提高预报准确性。钻探技术作为物探的补充手段，通过钻孔直接获取岩芯与水样，验证物探结果的同时提供更精准的地质参数。钻探孔位需根据物探异常区布置，深度应超前开挖面一定距离，确保对前方地质情况的提前掌握。钻探过程中需记录岩芯采取率、钻进速度、水位变化等信息，结合室内试验分析岩体物理力学性质，为优化施工方案提供直接依据。

4.2 施工过程控制

规范工艺是保障隧道施工质量的核心环节。开挖作业需严格按照设计参数执行，在软弱围岩段采用台阶法或CRD法，控制循环进尺与开挖轮廓，减少对围岩的扰动；支护施工需保证材料规格与施工工序符合要求，锚杆安装确保锚固深度与角度达标，喷射混凝土需均匀覆盖岩面且厚度满足设计标准。各工序衔接需紧凑有序，避免因工序间隔过长导致围岩失稳。监测反馈通过实时数据掌握围岩与支护结构状态，为施工调整提供依据。在隧道周边布设位移监测点与应力传感器，定期采集数据并绘制变化曲线，分析围岩变形速率与支护受力情况。当监测数据超出预警值时，需及时暂停施工，结合地质条件重新评估施工方案，调整支护参数或开挖方式。监测频率需根据施工阶段与地质条件动态调整，在围岩稳定性较差区域增加监测次数，确保异常情况早发现、早处理。

4.3 应急管理

预案制定需结合隧道工程特点与潜在风险，明确塌方应急处置的组织机构、职责分工与处置流程。预案内容应包括险情报告程序、救援资源配置、临时支护措施等具体内容，针对不同规模塌方场景制定分级响应方案，确保应急处置有序高效。预案编制完成后需定期组织评审修订，结合类似工程案例与施工实际情况优化处置措施，增强预案的针对性与可操作性。人员培训是提升应急处置能力的关键。通过理论教学讲解塌方成因、预警信号与处置要点，使施工人员掌握基本应急知识；开展实操演练模拟塌方场景，训练人员在紧急情况下的疏散撤离、临时支护搭设、设备操作等技能。培训需覆盖所有施工人员，定期组织复训巩固技能，通过考核检验培训效果。培训过程中注重培养人员的风险意识与协作能力，确保在实际险情中能够快速响应、有效处置。施工过程中还需建立应急物资储备制度，在隧道内合理位置存放速凝混凝土、钢支撑、注浆设备等应急材料与工具，定期检查物资完好性与数量，确保应急时能够及时调用。同时加强与外部救援力量的联动，明确联络方式与协同机制，形成内外结合的应急保障体系，全方位提升隧道施工的抗风化能力。

结束语

公路工程隧道施工塌方治理是一项系统工程，涉及成因分析、治理原则、技术措施及预防管理等多方面。通过全面剖析塌方成因，遵循安全优先、快速响应、综合治理原则，运用临时支护、塌方体处理、长期加固等技术，结合超前地质预报、施工过程控制、应急管理等措施，可有效预防和治理塌方。未来，需不断优化治理技术与管理方法，提升隧道施工安全水平，推动公路工程隧道建设高质量发展。

参考文献

- [1]沙永生.公路工程隧道施工塌方治理技术应用研究[J].工程管理,2023,4(4):44-46.
- [2]朱成.公路工程隧道施工塌方治理技术探究[J].数字化用户,2023,29(3):88-90.
- [3]王代飞.公路工程隧道施工塌方治理技术的探究[J].工程技术研究,2025,7(2):137-139.
- [4]李先哲.塌方治理技术在公路工程隧道施工中的应用[J].交通世界,2023(32):5-7.