

# 山区高速公路网完善背景下岩溶发育区隧道突水突泥灾害预测与防控技术

魏加文

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 650000

**摘要:**随着我国“交通强国”战略的深入推进,山区高速公路网络正以前所未有的速度向地质条件更为复杂的区域延伸。在西南、华南等广泛分布的岩溶发育区,隧道建设面临着严峻的突水突泥灾害威胁,此类灾害具有突发性强、破坏力大、救援困难等特点,严重制约了工程进度与运营安全。本文立足于山区高速公路网完善的时代背景,系统梳理了岩溶区隧道突水突泥灾害的成因机制与主要类型,深入探讨了以地质勘察、数值模拟、智能监测为核心的多维度综合预测技术体系,并详细阐述了包括超前地质预报、注浆加固、泄水降压、风险动态管控在内的全过程防控关键技术。最后,文章指出了当前技术体系中存在的不足,并对未来的发展趋势进行了展望,旨在为复杂岩溶区隧道工程的安全建设与长效运营提供理论支撑与实践指导。

**关键词:**岩溶隧道;突水突泥;灾害预测;风险防控;山区高速公路;超前地质预报

## 引言

21世纪以来,我国基础设施建设成就斐然,高速公路网从东部平原向中西部山区拓展。“十四五”等规划下,构建山区高速公路网对区域发展等意义重大。但我国西南、华南等地碳酸盐岩地层广布,经长期地质演化形成复杂岩溶地貌,地质构造活跃、水文地质条件极端复杂,地下暗河等交错,是隧道建设的“地质禁区”。在岩溶发育区修隧道,突水突泥灾害风险突出。它指隧道掘进时,因开挖扰动使围岩应力场和渗流场失稳,高压地下水携泥沙等瞬间涌入隧道,常毫无征兆或征兆期短,能在短时间内造成严重后果,如某西南地区隧道因溶洞突泥,涌出物超10万立方米,工程停工一年,损失惨重。在山区高速公路网加速完善的背景下,科学精准预测岩溶隧道突水突泥风险、构建防控技术体系,是保障单个隧道工程及整个区域路网建设安全高效推进的关键。开展本课题研究,对提升我国复杂地质交通基础设施建造水平、推动隧道工程防灾减灾技术进步,有重要理论与现实意义。

## 1 岩溶隧道突水突泥灾害特征与成因机制

### 1.1 灾害主要类型

根据水源性质、物质组成及触发方式,岩溶隧道突水突泥灾害可分为以下几类:(1)管道型突水:主要由揭露地下暗河或大型岩溶管道引起。其特点是水量大、水压高、流速快,但泥沙含量相对较少,灾害过程迅猛,破坏力集中。(2)溶腔型突水突泥:隧道揭穿封闭或半封闭的充填型溶洞。溶洞内通常充填有黏土、砂

砾、碎石等松散物质,在水压驱动下,这些充填物与水一同涌入隧道,形成典型的“泥石流”式灾害,涌出量巨大,清理困难。(3)断层破碎带型突水:隧道穿越导水断层或节理密集带。这些构造带本身是良好的导水通道,常与远处的岩溶水系相连。开挖后,构造带内的裂隙水或储存水瞬间释放,若带内有软弱夹层,则极易诱发突泥。(4)滞后型突水:灾害并非发生在开挖揭露的瞬间,而是在开挖后一段时间(数小时至数天)内,由于围岩应力重分布、裂隙逐渐贯通或水压力持续积聚而最终失稳所致。此类灾害更具隐蔽性和欺骗性,防范难度极大。

### 1.2 成因机制分析

岩溶隧道突水突泥灾害的发生是一个复杂的系统失稳过程,其根本原因可归结为不良地质体、高水头压力差与隧道开挖扰动三者的耦合作用。首先,不良地质体的存在是灾害发生的物质基础。大型溶洞、暗河、富水断层及节理密集带等构成了潜在的水源库和突水通道,特别是当这些空间被可塑性强的黏土或松散砂砾充填时,便具备了突泥的物质条件。其次,高水头压力差是灾害发生的直接驱动力。山区岩溶含水层往往具有承压性,且与高位地表水体或溶蚀洼地之间存在显著水位差,隧道开挖相当于在高压水体与大气之间开辟了一条低阻通道,巨大的水头压力成为突水突泥的强大推手<sup>[1]</sup>。最后,隧道开挖扰动是灾害发生的外因和触发条件。掘进过程打破了原有的地应力与水力平衡,导致围岩产生松弛圈和塑性区,原有裂隙张开、扩展,甚至萌生新的

破裂面,这一系列变化极大地削弱了围岩的隔水能力和自稳能力,为高压水体的突破创造了临界条件。综上所述,只有当这三个要素同时具备并相互作用时,突水突泥灾害才具备发生的充分必要条件。

## 2 岩溶隧道突水突泥灾害综合预测技术体系

### 2.1 精细化地质勘察与风险识别

地质勘察是预测工作的基石,必须摒弃粗放式做法,转向精细化、系统化的综合勘察模式。在宏观层面,应充分利用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术,对线路走廊带进行大范围岩溶发育规律分析和水文地质单元划分,初步圈定高风险区段,为后续工作提供方向指引。进入地面详细勘察阶段,需在高风险区段加密布置钻孔,并辅以槽探、井探等手段,以查明地表岩溶形态、覆盖层厚度及主要构造线走向等关键信息。尤为重要的是,必须同步开展系统的水文地质试验,如抽水试验和压水试验,以获取含水层渗透系数、储水系数等核心参数,为后续数值模拟提供可靠依据。隧道开挖后,勘察工作并未结束,反而进入一个动态验证与修正的关键阶段。通过及时进行掌子面地质素描,详细记录岩性、产状、节理裂隙发育情况及地下水出露点等信息,并将其与前期勘察资料进行对比分析,可以不断修正和完善地质模型,实现风险的动态识别与再评估,从而为施工决策提供实时、准确的地质支撑。

### 2.2 多源信息融合的超前地质预报

超前地质预报是施工阶段洞察前方未知地质情况的核心手段,其有效性高度依赖于多种方法的组合应用与信息融合。TSP(隧道地震波预报)凭借其远距离探测能力(可达100-200米),对断层、破碎带等波阻抗差异明显的界面具有良好的敏感性,适用于长距离的宏观地质风险筛查。地质雷达(GPR)则以其高分辨率见长,能够对掌子面前方30米以内的小型溶洞、空腔及富水区做出灵敏反应,但其信号易受钢筋、钢架等金属构件干扰,适用范围受限。瞬变电磁法(TEM)对低阻体,如富水区或黏土充填体,探测效果尤为突出,且不受金属干扰,是探测前方隐伏水体的有效补充手段<sup>[2]</sup>。然而,任何单一物探方法都存在局限性和多解性,因此必须辅以超前水平钻探作为最终验证。通过钻孔取芯和孔内电视成像,不仅可以直观、准确地获取前方地质信息,还能兼作排水泄压孔,实现“探”与“治”的结合。未来的发展方向在于建立多源数据融合解释模型,通过交叉验证和综合判读,有效降低单一方法的误判率,从而显著提升超前预报的整体准确性与可靠性。

### 2.3 耦合数值模拟与风险量化评估

在获取详实的地质与水文信息后,建立水-力耦合(THM)数值模型,是实现风险从定性描述向定量评估跃升的关键步骤。该过程始于利用三维建模软件(如GOCAD、Rhino)构建包含溶洞、断层、隧道结构在内的精细化地质实体模型,并将其无缝导入FLAC3D、COMSOL等专业数值分析平台。模型的生命力在于参数的合理性,因此必须严格依据勘察和试验数据,为不同地质单元赋予准确的力学参数(如弹性模量、泊松比、抗剪强度)和水力学参数(如渗透系数、孔隙率)。在此基础上,通过模拟隧道开挖的全过程,可以动态追踪围岩应力、位移、塑性区的演化规律,以及渗流场中水压力、流速的空间分布与时间变化。分析的重点应聚焦于潜在突水点处的水压力梯度和能量积聚速率,这些指标往往是灾害发生的先兆。最终,结合成熟的突水突泥判据(如临界水压力阈值、能量释放率临界值等),对隧道不同区段进行科学的风险等级划分(如高、中、低风险),从而为后续差异化、精准化的防控措施选择提供坚实的量化依据,真正实现“让数据说话,用模型决策”。

## 3 岩溶隧道突水突泥灾害全过程防控关键技术

### 3.1 分级设防与动态设计

面对岩溶地质的高度不确定性,僵化的静态设计理念已无法满足安全施工的需求,必须转向基于风险的分级设防与动态设计理念。该理念的核心在于根据预测评估得出的风险等级,采取与之相匹配的工程措施。对于低风险区段,可加强常规支护并完善洞内排水系统,以应对一般性渗漏水问题。当中风险出现时,则需采用局部超前支护措施,如超前小导管或管棚,并辅以针对性的局部注浆,以增强围岩的短期自稳能力。而对于高风险区段,必须上升到专项工程管理的高度,制定周密的专项施工方案,通常需要采用全断面帷幕注浆或大直径向注浆,并在施工组织上预留充足的安全距离和应急预案。更重要的是,设计不应是一成不变的蓝图,而应是一个随施工进程不断反馈、优化和调整的动态过程。通过将施工中揭露的实际地质信息实时反馈至设计端,可以对原设计方案进行必要的修正,真正做到“动态设计、信息化施工”,从而在不确定性中把握确定性,最大限度地规避风险。

### 3.2 超前预注浆加固技术

超前预注浆是防控突水突泥灾害最核心、最有效的技术手段,其本质是通过人工干预,在隧道开挖面前方预先构筑一道兼具止水与承载功能的加固屏障。注浆的成功与否,首先取决于材料的选择。普通水泥浆因其成本低廉、操作简便,适用于填充较大的岩体裂隙;而在

动水或需要快速凝固的场合,水泥-水玻璃双液浆因其凝结时间可控而成为首选;对于微细裂隙的封堵,则需依赖超细水泥浆或聚氨酯等化学浆液,它们能渗透到更细微的空间,实现更彻底的封堵<sup>[3]</sup>。在工艺层面,应根据前方地质体的自稳性灵活选择注浆方式。前进式分段注浆适用于自稳性极差的松散地层,边钻进边注浆,能有效防止钻孔坍塌;而后退式分段注浆则更适用于相对完整的基岩,效率更高。无论采用何种材料与工艺,注浆效果的检验都是不可或缺的环节。必须通过布置检查孔进行取芯,并开展压水试验,以直观验证加固圈的厚度、均匀性及其渗透性是否达到设计要求的止水和承载标准,杜绝“注而不实、注而不止”的隐患。

### 3.3 主动泄水降压技术

在某些极端情况下,例如面对水量巨大、水压极高的含水构造时,单纯依靠“堵”的策略不仅成本高昂,而且可能因水压持续积聚而带来更大的失稳风险。此时,应审慎考虑“疏”的策略,即主动泄水降压技术。该技术的核心思想是化被动为主动,通过人为设置泄水通道,提前、有序地释放水体能量,将不可控的灾难性突水转化为可控的、可疏导的涌水。具体实施方式包括在主隧道侧方或上方平行设置专门的泄水洞,或者在掌子面直接钻设大口径的泄水孔。这些泄水通道能够有效降低前方含水构造的水头压力,从根本上消除突水的动力来源。与此同时,必须在隧道内同步构建强大的临时和永久排水系统,确保任何涌水都能被迅速汇集并排出洞外,防止积水长时间浸泡围岩,引发围岩软化、强度下降等次生灾害,从而形成“泄-排”联动的主动防控格局。

### 3.4 智能化监测预警与应急响应

现代隧道工程的安全保障,离不开一个集“感知-分析-预警-处置”于一体的智能化监测预警与应急响应体系。该体系的前端是布设于掌子面及后方关键部位的多元传感网络,包括微震传感器、多点位移计、渗压计、水质分析仪等,它们如同工程的“神经末梢”,能够7×24小时不间断地实时采集围岩微破裂活动、变形趋势、水压力变化及水质浊度等关键前兆信息。海量的监

测数据通过物联网技术被汇集至云端数据中心,借助机器学习算法(如LSTM、随机森林等)构建的智能预警模型,能够自动识别出灾害发生前的异常模式,例如微震事件的丛集性增加、水压力的非线性骤升或水质浊度的急剧恶化,从而实现从传统的“阈值报警”向更先进的“趋势预警”升级<sup>[4]</sup>。然而,再先进的预警系统也必须与高效的应急响应机制相匹配。因此,必须针对不同类型的突水突泥场景,预先制定详尽的应急预案,明确逃生路线、救援物资储备、人员分工及通讯联络方式,并定期组织贴近实战的应急演练。唯有如此,才能确保一旦险情发生,现场人员能够快速、有序、高效地进行疏散与处置,将生命财产损失降至最低。

## 4 结语

本文聚焦山区高速公路网完善下岩溶隧道突水突泥灾害的预测与防控。研究表明,该灾害是多种因素耦合的复杂产物,类型多样、危害大,单一预测方法乏力,需构建综合预测技术体系实现精准识别与量化评估;防控要贯彻相关原则,推行分级动态设计,运用核心技术,依托监测预警系统形成全生命周期防控链条。展望未来,岩溶隧道突水突泥灾害防控技术将深度融合与协同创新。通过技术融合构建“数字孪生”地质模型迈向“透明地质”;人工智能等赋能,使风险预警更智能精准;研发新型注浆材料、探索非开挖技术提供绿色防控路径;建立协同风险管控云平台提升本质安全水平。相信科技与经验助力下,能攻克这一世界级难题,保障山区高速公路网建设。

## 参考文献

- [1]俞剑.岩溶隧道突水突泥致灾构造评判方法研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(06):109-114.
- [2]王升,韦芹,李利平.隧道突水突泥灾变机理研究现状及发展趋势[J].现代隧道技术,2025,62(04):15-25.
- [3]沈立中,王丹锋,徐波.公路隧道突泥特征及处治措施研究[J].公路,2025,70(05):441-446.
- [4]舒清.隧道突泥涌水事故风险控制措施及现场监测分析[J].西部交通科技,2025,(03):183-186.