

城市暗挖隧道施工风险控制措施研究

谢鑫浩 陈方东 吕少杰

中国建筑第七工程局有限公司 河南郑州 450000

摘要: 城市暗挖隧道施工因地处复杂地质与密集市政环境, 风险具有隐蔽性、突发性和连锁性特点, 已成为制约工程安全与效率的核心瓶颈。本文以风险管控全流程为逻辑主线, 先明确城市暗挖隧道施工风险的核心特征, 再从地质勘察、设计优化、施工过程、应急管理四个维度, 系统分析风险的诱发机制与传导路径。基于此, 提出“勘察精细化—设计差异化—施工动态化—应急系统化”的风险控制体系, 结合山体地层加固、穿山隧道工序优化、洞身智能监测等关键技术手段, 实现对风险的超前预警与精准管控。研究成果可为城市暗挖隧道施工提供实操性强的风险控制方案, 助力提升工程施工安全水平。

关键词: 城市暗挖隧道; 市政穿山隧道; 施工风险; 地质勘察; 动态控制; 应急管理

引言

城市化进程加速推动交通路网立体化发展, 市政穿山隧道作为连接城市不同区域、破解山体地形阻隔的核心交通载体, 建设需求持续攀升。暗挖法因对山体地表植被、周边既有设施干扰小, 成为城市近郊及山体区域隧道施工的首选方案, 但穿山隧道所穿越的山体地质条件复杂多变, 破碎岩层、断层带、山间渗水及山体表层构筑物交织, 易引发洞身坍塌、突泥涌水及山体边坡失稳等风险, 威胁生命财产安全。近年来多地穿山隧道施工事故频发, 暴露出现有风险管控体系的短板与措施滞后问题^[1]。为此, 亟需突破传统模式, 深挖山体地质环境下的风险规律, 构建精准管控体系, 这对保障工程安全、促进城市交通网络健康发展意义重大。

一、城市暗挖隧道施工风险的核心特征与诱发因素

1. 风险核心特征

城市暗挖隧道施工风险与露天工程、普通地下隧道存在显著差异, 其核心特征集中体现在三个方面。一是隐蔽性强, 施工区域位于山体内部, 山体岩层分布、断层位置、地下水赋存状态等关键信息难以通过地表勘察完全掌握, 很多风险隐患在施工扰动后才逐渐暴露, 如局部破碎岩层的突然塌陷、山间裂隙水的突涌等, 给风险识别带来极大难度。二是连锁性突出, 穿山隧道与山体结构关联性极强, 某一环节出现风险极易引发连锁反应, 例如隧道拱顶坍塌可能导致上方山体坡面开裂, 进而诱发边坡滑塌, 形成“洞身坍塌—坡面破坏—山体失

稳”的连锁风险链。三是影响范围广, 施工区域多位于城市交通廊道沿线, 周边常分布乡村聚落、公路及管线设施, 一旦发生风险事故, 不仅会造成施工人员伤亡、设备损坏, 还可能导致区域交通中断、居民疏散等一系列社会问题, 社会影响远大于工程本身的经济损失^[2]。

2. 主要诱发因素

风险诱发因素可分为地质环境、工程设计、施工操作、管理体系四大类, 各类因素相互交织, 共同作用于施工全过程。地质环境是基础诱因, 山体复杂的岩土体性质与地质构造直接决定风险发生的概率与强度, 如风化砂岩层因胶结性差、渗透性强, 在地下水作用下易发生流砂、管涌; 断层破碎带因岩体松散、富水性强, 大幅增加坍塌与突水风险。工程设计存在缺陷是重要隐患, 设计中对山体特殊地质条件考虑不足, 支护结构参数取值保守或激进, 均会带来风险, 如支护结构强度不足造成洞身变形过大, 过度支护会加大施工扰动, 诱发新的风险点^[3]。施工操作不规范是直接诱因, 如开挖进尺过大、支护不及时、爆破参数控制不当等, 均会破坏山体原有的应力平衡状态, 导致风险事故的发生。管理体系不完善是风险管控的薄弱环节, 安全管理制度不健全, 人员培训不到位, 风险监测流于形式等, 导致风险萌芽状态得不到及时发现和处置, 直至演化为事故。

二、城市暗挖隧道施工风险控制的关键环节与技术要点

1. 精细地质勘察, 风险源头管控

地质勘察是风险控制的基础, 只有全面、准确地掌

握山体地下环境信息,才能为后续设计、施工提供可靠依据。以钻孔取样为主要方式的传统勘察方式,勘察盲区大,数据精度低,难以适应市政穿山隧道施工的需要,应通过“综合勘察技术体系”来实现精细化勘察。在勘察方法上,要结合多种技术手段,形成“地表普查—地下探测—动态补勘”的三级勘察模式。地表普查阶段,通过地质测绘、遥感技术初步判断山体地质构造、岩层分布规律及坡面稳定性;地下探测阶段,采用地质雷达、地震波勘探、电法勘探等无损探测技术,精准定位山体内部断层、溶洞、软弱夹层等隐患区域,其中地质雷达可有效识别隧道开挖范围内的岩层界面与裂隙分布,分辨率达到厘米级,能够提前规避地质突变风险;动态补勘阶段,在施工过程中根据掌子面揭露的地质情况,及时调整勘察方案,通过超前钻探、超前地质预报等手段,补充勘察前方岩层性质与含水情况,确保勘察数据与实际地质条件高度匹配^[4]。在勘察成果应用上,需建立“地质信息数字化模型”,将勘察数据转化为可视化的三维地质模型,清晰呈现岩层分布、地下水赋存、断层走向等信息,为设计方案优化、施工工序安排提供直观依据。同时,针对勘察发现的高风险区域,如断层破碎带、富水岩层,提前制定专项勘察报告,明确风险等级及初步管控建议,实现风险的源头预防。

2. 设计方案差异化, 风险精准规避

设计方案是风险控制的核心载体,应打破“一刀切”的设计模式,应根据山体不同区段的地质条件、坡面稳定性要求,制定不同的设计方案,以实现“地质适配、风险可控”的设计目标。在支护结构设计方面,因地层稳定性差应采用不同的支护形式。对于稳定性较好的完整硬岩地层,采用“喷射混凝土+锚杆”的简易支护体系,减少施工成本与扰动;对于中等稳定的砂质岩层,采用“格栅钢架+喷射混凝土+钢筋网”的复合支护体系,增强支护结构的整体性;对于稳定性极差的断层破碎带、富水地层,采用“超前小导管注浆加固+管棚支护+二次衬砌”的强化支护体系,超前注浆改良破碎岩体性质,同时通过数值模拟计算确定支护参数,利用FLAC3D等数值分析软件,模拟施工过程中山体应力变化与洞身结构变形的情况,优化支护间距、钢架型号等关键参数,确保支护结构与地层受力相匹配。在施工工法设计上,要结合隧道断面大小和山体表层构筑物分布选择适当的施工工法。对于小断面隧道且山体表层无重要设施的区域,可采用台阶法施工,提高施工效率;对

于大断面隧道或穿越山体浅埋段的区域,采用CRD法、双侧壁导坑法等分部开挖工法,将大断面分解为多个小断面依次开挖,减少单次开挖对山体应力平衡的扰动范围,控制坡面沉降与滑塌风险。

3. 施工过程动态化, 实时风险管控

施工过程是风险发生的关键阶段,山体地质条件的动态变化、施工操作的不确定性都可能引发风险。建立“动态监测—实时反馈—及时调整”的动态管控机制,实现对风险的实时跟踪与精准处置。动态监测体系的核心是构建全方位监测网络,必须覆盖隧道结构、周边山体岩层、山体表层构筑物三大监测对象,形成立体监测格局。在隧道内设置拱顶沉降、收敛变形、钢架应力等监测点,采用全站仪、收敛计、应变计等设备,实时采集结构变形与受力数据;在隧道周边山体设置深层沉降标、孔隙水压力计,监测岩层沉降与地下水压力变化;在山体表层建筑物及边坡上设置沉降观测点、倾斜观测点,采用精密水准仪、倾角仪等设备,监测建筑物沉降与边坡稳定性。同时要根据施工进度与风险等级进行动态调整,对穿越断层破碎带等高危区域,可提高至每2h1次,对远离风险源且数据稳定的部位,可适当降低至每天1次,以便及时发现风险隐患。以监测数据的分析与应用为重点,建立“数据采集—数据分析—预警处置”的闭环流程。通过数据传输系统实时上传监测数据至监控中心,利用大数据分析技术对数据进行趋势研判,一旦数据出现异常波动,便会启动预警机制,根据预警等级采取相应的处置措施。一级预警:风险即将发生,立即停止施工,组织人员撤离,并采取应急加固措施;二级预警:风险较大,减缓施工进度,加密监测频率,调整施工参数;三级预警:潜在风险,加强现场巡查,密切注意数据变化。对各工序的操作流程进行严格的规范,重点控制开挖、支护、注浆等关键工序。在开挖工序中严格控制开挖进尺与开挖顺序,杜绝超挖、欠挖现象,超挖增大岩层暴露时间,欠挖影响支护结构贴合度,均会带来风险;在支护工序中坚持“短开挖、快支护、勤量测”的原则,开挖后及时封闭掌子面,确保初期支护在规定时间内完成,避免岩层长时间暴露;在注浆工序中根据岩层性质与含水情况调整注浆材料与参数,在富水地层采用水泥—水玻璃双液注浆,提高注浆凝结速度,快速封堵地下水,在破碎岩层采用超细水泥注浆,增强注浆扩散范围,改良岩层承载能力^[5]。

三、城市暗挖隧道施工风险的应急管理保障体系

1. 应急管理体系构建

应急管理体系要包含预案编制、应急队伍建设、应急物资储备三大核心内容。应急预案的编制要体现针对性与可操作性，不套用通用性预案模板，结合市政穿山隧道的风险特点（如洞身坍塌、山体滑坡、突泥涌水等）编制专项应急预案，明确各类风险的应急处置流程、责任分工、救援路线等关键信息。应急队伍建设需要兼顾专业性与全员性，组建由施工技术人员、安全管理人员、专业救援人员组成的应急救援队伍，定期开展山体边坡加固、洞身坍塌救援等专项应急演练，提升队伍的应急处置能力^[6]。同时，对全体施工人员进行应急培训，确保施工人员掌握基本的应急避险知识、救援设备操作技能，在风险发生时能够快速响应、科学处置。应急物资储备需遵循“足额储备、定期检查、快速调配”的原则，根据风险类型储备相应的应急物资，如应对坍塌与边坡滑塌风险的钢支撑、千斤顶、应急照明灯，应对涌水风险的大功率排水泵、注浆设备、防水板，以及急救药品、逃生设备等。

2. 保障体系完善

保障体系包括组织保障、技术保障、管理保障三大维度，为风险控制提供全方位支撑。组织保障方面，成立以项目经理为第一责任人的风险管控领导小组，明确各部门、各岗位的风险管控职责，形成“项目经理统筹、技术部门主导、施工班组执行、安全部门监督”的责任体系，确保风险管控各项措施落到实处。技术保障方面，组建专业的技术团队，针对施工中遇到的复杂山体地质问题、技术难题，开展专项研究，提供技术支持，与科研院校合作，采用智能监测、数值模拟等先进技术，提高风险管控的技术水平。管理保障方面，建立健全风险分级管控制度、隐患排查治理制度、施工操作规程等安

全管理制度，形成“制度管人、流程管事”的管理模式。加强人员管理，严格执行“三级安全教育”制度，对特种作业人员实行持证上岗，定期开展技能培训与安全考核，增强施工人员的安全意识与操作水平。

结束语

城市暗挖隧道施工风险控制是一项系统工程，要立足全生命周期，从地质勘察、设计方案、施工过程、应急管理四个维度，构建全方位、多层次的管控体系。一是地质勘察精细化，通过综合勘察技术，准确掌握山体地下环境信息；二是设计方案差异化，依据地质与环境差异，设计适配的方案；三是施工过程动态化，通过动态监测与工序管控，实现风险实时处置；四是应急管理系统化，通过预案、队伍、物资建设提升风险应对能力。唯有如此，才能有效规避施工风险，保障市政穿山隧道工程的安全与高效推进，为城市交通建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 汤海祥. 地下大截面暗挖隧道施工工艺及风险控制[J]. 汽车画刊, 2025, (07): 137-139.
- [2] 曹锐. 乌鲁木齐地铁某线小断面隧道土建施工安全风险研究[D]. 新疆大学, 2023.
- [3] 刘天奇. 地铁车站工程暗挖法施工风险管理研究[D]. 北京交通大学, 2023.
- [4] 王权. 地铁湿陷性黄土暗挖隧道的施工风险及沉降控制措施[J]. 居舍, 2020, (16): 75-76.
- [5] 羊山发. 地下大截面暗挖隧道施工工艺及风险控制研究[J]. 价值工程, 2024, 43(25): 65-67.
- [6] 秦凯. 隧道施工安全风险研究[J]. 交通科技与管理, 2023(10): 0141-0143.