

# 基于复杂城区环境的浅埋暗挖隧洞施工安全风险识别与防控研究

李瑞军<sup>1</sup>, 普恒<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500;  
2. 云南省滇中引水二期工程有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要** 复杂城区环境下浅埋暗挖隧洞施工面临诸多安全挑战, 地质条件不明、地面沉降、邻近建筑影响等问题易引发安全事故。本文系统识别了城区浅埋暗挖施工中的主要风险因素, 分析动态风险评估防控对策, 提出精细化管理与技术手段协同优化路径, 以期对实现风险可控、施工高效的目标有所裨益, 进而保障工程质量与周边环境的稳定性, 推动隧道工程可持续发展。

**关键词** 复杂城区环境; 浅埋暗挖; 隧洞工程; 安全风险识别

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.035

## 0 引言

在城市轨道交通和地下管廊工程中, 浅埋暗挖法因其对地表扰动小、适应性强而广泛应用于城区地下施工, 受限于城市密集建筑、地下管线复杂、地质条件多变等因素, 浅埋暗挖隧洞施工安全风险显著提升, 如何在复杂城区环境中有效识别风险、构建科学的安全管理体系, 成为当前隧道工程领域的重要研究课题<sup>[1]</sup>。

## 1 浅埋暗挖隧洞施工安全风险识别体系构建与评估方法

### 1.1 风险影响机制分析

1. 地质条件引发风险机制。浅埋暗挖隧洞施工常处于人工填土、淤泥质土、粉砂层与风化岩等多种岩土交替叠置区, 下述三点为主要风险机制: (1) 围岩分层厚度差异: 人工填土厚度约 3 m, 淤泥质土厚度约 2.5 m, 风化岩仅 1 m, 软硬层交替导致开挖面附近围岩发生不均匀收敛, 开挖时必须采用超前支护; (2) 节理裂隙密集发育: 在断层或褶皱带段, 裂隙间距仅 0.3~0.6 m, 裂隙面倾角多变, 每隔 4 m 需布设钻孔探测一次以掌握裂隙走向及孔隙水压力; (3) 局部应力集中效应: 开挖面前缘围岩动载激活节理带, 裂缝迅速扩展形成塑性区, 常见裂缝带宽度可达 0.8 m, 若支护设计未提前考虑此荷载增量, 支护滞后将导致掌子面局部失稳<sup>[2]</sup>。

2. 施工扰动与地表沉降风险机制。(1) 开挖一支护节奏失配: 当单次开挖环节长度超过 1.5 m 且支护跟进落后超过 6 h, 扰动引发的围岩收敛量常超过 3 mm,

地表沉降漏斗随之出现; (2) 沉降传导路径: 扰动区范围一般为开挖直径的 1.7 倍, 在最严重的工况下监测网格点(网格间距 5 m)上日累积沉降量可达到 2.2 mm, 通过管形水准仪和倾斜计实时监测<sup>[3]</sup>; (3) 振动诱发二次沉降: 施工振动幅度超过 4 mm 时, 泥质土层内的剪切弱带会扩展, 导致应变局部放大并加快沉降速率。严格控制单次环段开挖长度为 1.2 m 以内, 支护同步率保持在开挖后 30 min 内完成并配备微振监测仪, 对振动水平进行在线预警与调整<sup>[4]</sup>。

3. 地下水条件对工程风险的影响机制。(1) 孔隙水压力释放: 隧顶若位于含水层顶板下 1 m 范围内, 一旦破坏水力平衡, 涌水流量可达到 15 L/min, 易形成管涌并引发坍塌; (2) 渗流侵蚀与空洞形成: 在渗透系数为  $1 \times 10^{-4}$  m/s 的砂土中, 长时间渗流会在支护背后冲刷出直径约 0.5 m 的空洞, 削弱背后土体支撑; (3) 降水引发附加沉降: 采用井点降水法时, 井点间距 2 m、单井抽水量 25 L/s, 可将水位降低 2 m, 伴随地表平均沉降梯度约 1.4 mm/m, 需平衡降水方案与沉降控制。

### 1.2 安全风险评价指标体系构建

构建浅埋暗挖隧洞施工安全风险评价指标体系, 需明确评价维度及其相应指标, 总体可划分为“地质环境”“施工工艺”“结构响应”“环境影响”四大准则层, 每层设置 4 至 5 项具体评价指标共计 17 项指标, 地质环境维度包括围岩类别指数、地层厚度、节理裂隙密度与地下水位深度, 施工工艺维度涵盖单环开挖长度、支护同步率、施工振动幅度和降水方式; 结构响应维度由掌子面收敛量、环向应力峰值、支护变形量和数

值模拟安全系数组成,环境影响维度则包含地表沉降量、邻近建筑裂缝等级、管线位移量和施工噪声级。层次分析法,专家问卷与现场监测数据对各指标进行比较判断,可获得初步权重向量,采用熵权法对监测数据进行客观赋权,校正主观权重,最后通过权重互补融合得到综合权重。例如:地质环境维度权重为0.30,施工工艺为0.25,结构响应为0.23,环境影响为0.22,结合现场监测得到的掌子面平均收敛数值、地表最大沉降数值及支护应力测点读数等原始数据,利用归一化处理 and 加权求和方法生成综合风险得分,综合得分大于0.65时启动红色预警并实施应急方案,介于0.45~0.65之间维持黄色预警并加强监控,小于0.45则为绿色安全区,该评价体系既能依据连贯的结构逻辑揭示风险要素,又能结合实时监测数据实现动态分级预警,为施工安全管理提供量化依据和决策支持。

## 2 复杂城区浅埋暗挖隧洞风险类型及特征分析

### 2.1 地表沉降与邻近建筑损伤风险

在复杂城区环境中,浅埋暗挖隧洞施工所引发的地表沉降主要由隧道开挖扰动、支护滞后及土体自重释放三大因素共同作用而成,开挖过程中围岩收敛和隧顶拱部变形沿开挖面外部不断传导至地表,使隧道中心线两侧形成沉降漏斗,其影响半径一般可达开挖直径的两倍,微振动和施工振动会加速近地表软土层内部剪切变形并叠加大变形,形成不规则沉降形态,常在附着排水层与软土夹层交界处出现沉降突变。基于监测网格布设,可对沉降轮廓进行拟合,预测施工完成后地表最大沉降及波及范围,邻近建筑物其变形控制要求需满足沉降差值 $\leq 1$  mm/m,倾斜度 $\leq 1$  mm/m,裂缝宽度控制在0.3 mm以内,超限时应立即采取注浆加固或桩基下托等补救措施。具体容许标准可参照《城区建(构)筑物基础沉降规范》,对不同结构类型(框架、砖混、钢筋混凝土剪力墙)制定分级限值并结合工程监测结果实施分段预警,以有效防止沉降对构筑物安全造成的损伤<sup>[5]</sup>。

### 2.2 掌子面稳定性与坍塌事故风险

掌子面的稳定性是浅埋暗挖隧洞安全的关键指标,其评价判据通常采用结构安全系数和围岩变形量相结合的方法:一方面,通过数值模拟或理论分析计算掌子面应力分布,获取最大主应力与岩体抗剪强度比值作为安全系数;另一方面,结合现场测得的掌子面收敛量、围岩裂缝宽度和支护变形量进行对比,当收敛量超过3 mm或裂缝宽度超过0.5 mm时视为不得继续掘进状态。坍塌事故多因围岩软弱、支护滞后或超挖荷载作用而起,当掌子面出现裂隙贯通、滚石脱落或

喷锚混凝土层破碎时,即为预警信号,需立即停止开挖并实施超前排桩、注浆或冻结加固,将掌子面稳定性监测数据与数值模拟结果实时对照,可动态调整支护形式与施工节奏,防范坍塌风险对施工进度和周边环境造成的严重影响。

### 2.3 地下水突涌及管涌风险

隧洞开挖扰动引发的地下水突涌主要发生在含水饱和和砂土或砂卵石地层中,当隧道开挖面破坏了原有的水力平衡,孔隙水压力快速释放并沿围岩节理或支护背后路径渗涌涌入开挖空间,形成“水柱”喷射现象,突涌流量可达10 L/min,水流携带的土体颗粒在支护背后累积成直径约0.3 m的淤砂柱,若不及时截洪和排水则淤砂区与原土体界面产生空洞,引发局部坍塌甚至大范围透水破坏,管涌则多出现在隧底或附属排水设施处,地下水自底板缝隙或管道接口处高压喷出形成轴向或横向渗流通道,淤砂堆积高度可达0.5 m,持续排水后导致底板承载减弱与支护结构下沉,管涌事故的诱因包括施工中未进行充分的降水预报与控制、注浆帷幕不连贯、支护环间隙过大以及周边已有地下水排水管网影响,在监测端应结合孔隙水压力传感器与流量计,对突涌点进行全天候监控并在探测到水流或压力突变时立即启动注浆封堵或合流排放措施,避免突涌与管涌风险扩大对隧洞结构和周边地层稳定的严重威胁。

### 2.4 城市管线损坏与次生灾害风险

浅埋暗挖隧洞施工所穿越的城市管线网络通常包括给水、燃气、电力、通信和排水等多种类型,管线埋深多在1.5~2.5 m之间,管径从100~800 mm不等,材料以球墨铸铁、钢管和聚乙烯管为主,开挖震动和围岩收敛会导致管线发生弯曲、错位或裂缝,尤其当管线与隧道轴线平行或交叉角小于30°时应力集中效应更为显著。管线损坏后会造成供水中断或燃气泄漏,泄漏介质自高压管道喷溅入隧洞极易形成积水或可燃气体聚集,引发电气短路、火灾或爆炸等次生灾害。给水管破裂产生的湍急水流还会冲刷邻近土体形成地表沉陷或下沉漏斗,严重时在道路或建筑物下方出现开放性塌陷,依托管线信息化管理平台与地质雷达对管线走向、埋深及结构状态进行实时核查,以杜绝管线损坏带来的重大次生事故。

## 3 城区复杂环境下浅埋暗挖施工安全管理水平提升对策

### 3.1 优化设计与前期调查

在浅埋暗挖隧洞工程中,设计方案的科学性与前期调查的精准性关系到整个施工过程的安全控制能力,

城区复杂环境下地质、水文、市政设施密集交错,优化设计与调查策略不仅是技术准备的必要环节,更是系统性风险防控的关键前置手段。第一,深化工程地质与环境风险调查,构建高分辨率风险图谱。前期调查需突破传统钻孔式调查“点状信息”不足的局限,应结合高密度物探技术、激光扫描与地质信息建模,全面获取浅层结构、断裂带、软弱夹层、富水区等关键风险源的空间分布特征,将地下管线、基坑、高层建筑基础、地铁线路等与施工区域存在物理干扰的外部设施纳入调查范围。第二,优化设计参数与施工方案匹配,增强方案适应性与韧性。设计阶段充分考虑复杂地质条件下的变形机理与力学响应,采用非线性有限元分析或数值模拟技术,开展多情景工况模拟,评估不同支护结构、开挖方法与衬砌组合的稳定性与经济性,设计应体现“强支护—快封闭—分步施工”的原则,预留工艺调整空间,满足不同地段与突发变化的适应能力。

### 3.2 强化施工监控与技术保障

施工阶段是浅埋暗挖隧洞安全风险暴露最频繁、事故发生概率最高的时期,尤其在城区密集建筑与既有管线交织的环境下,任何细微扰动都可能引发系统性连锁反应,必须构建以“主动预警+技术支撑”为核心的多维监控与技术保障体系,实现施工风险的实时掌控与智能调控。第一,构建“全要素—多维度—高频次”的智能化监控系统。施工过程中围绕掌子面、拱顶、隧道周边、覆土层及邻近建筑等关键部位部署监测设备,形成涵盖地表沉降、围岩变形、支护结构应力、水位变化、瓦斯浓度等在内的多参数监测体系,采用自动化采集与远程传输技术,将数据实时汇聚至项目监控平台设置合理的预警阈值与响应梯度,实现“秒级感知、分钟级反馈、小时级响应”的风险控制能力。第二,引入数值仿真与施工反馈耦合机制,实现过程动态优化。结合施工进度与实时监测数据,构建数值反演模型与地下空间力学响应模拟系统,动态评估结构稳定性与围岩应力演化过程,如在拱顶沉降加速时可加强喷锚支护并缩短循环长度,在侧壁位移突增时则考虑加设中间支撑或改变开挖形态。第三,完善“监测—预警—处置”联动体系,确保快速响应落地。监控系统不仅要“看见问题”,更要能“处理问题”,项目部应设立风险指挥小组,实时分析监测数据波动并比对预案触发条件,对应风险等级自动生成响应措施建议,如加固支护、暂停开挖、疏散人员等并同步推送至调度平台、手机终端与值班系统,实现从感知到响应的快速闭环。

### 3.3 完善安全培训与管理制度

在城区复杂环境中,作业空间受限、工序交叉密集,任何疏忽都可能放大安全风险,必须以制度建设为支撑,以人员素质提升为抓手,全面构建“制度保障+人员能力”双轮驱动的管理体系。第一,强化分工明晰与岗位责任制,构建制度性安全网。项目应建立“横向到边、纵向到底”的安全责任体系,明确各岗位的安全职责与监督流程,从项目经理、安全总监到各班组长,应分级签署安全责任书,形成压力层层传导、责任逐级落实的组织架构,完善危险源辨识、隐患排查、违章行为通报等制度,设置奖惩机制,激励一线安全执行力,推动管理制度从“纸面化”走向“行为化”。第二,开展精准化、常态化的安全教育培训,提升实操能力与风险意识。进场施工人员实行“三级安全教育+专项技术培训”制度,确保其熟悉工程特点、施工工艺与应急流程,针对掌子面作业、注浆止水、支护施工等高风险工种采用“理论讲解+现场实训+情景演练”的混合模式,提升其应对突发事件的反应能力与处置规范性,项目部应定期开展典型事故案例剖析会和安全技术交底,推动安全知识向作业层面深度渗透。

## 4 结束语

城区复杂环境下的浅埋暗挖隧洞施工,安全风险高度集中,涉及地质、水文、设计、施工与管理等多个环节,只有实现“前期精准识别—中期动态控制—后期制度保障”的闭环管理,才能有效应对复杂城市地下工程中的多重风险,为类似项目提供系统性、实用性的安全管理参考,提升城市基础设施建设的安全水平与工程运维的长效机制建设能力,推动地下空间开发的规范化、智能化与可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 李建贺,许然,高仝,等.浅埋暗挖隧洞下穿高速公路路基沉降控制[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(07):1252-1263.
- [2] 程玉泉,李明,李炜杰,等.浅埋暗挖输水隧洞塌腔处理复合技术[J].水利科技,2024(01):49-53.
- [3] 田盛兰.浅埋暗挖施工技术在隧洞穿越河流中的应用[C]//水与水技术(第9辑).辽宁水利土木工程咨询有限公司,2019.
- [4] 魏欣.基于浅埋暗挖法的桥梁涵洞隧道工程施工技术[J].工程机械与维修,2024(02):105-107.
- [5] 高德存,张笑林.浅埋暗挖隧洞穿越防渗墙施工技术[J].建筑技术,2023,54(16):2006-2008.