

市政工程中隧道施工塌方成因及预防研究

仝 威

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘 要】：市政隧道可以有效缓解现代化城市交通压力，保障管道畅通无阻，但施工中易发生塌方事故，现如今已成为制约工程安全的一个突出问题。本文聚焦市政隧道施工塌方，运用理论建模揭示地质、技术、管理及环境因素的耦合作用机制。研究发现，塌方多由不良地质未探明、支护工艺不合理、监测预警失效及周边环境扰动等因素共同诱发。据此提出“勘察-施工-监测-应急”全链条预防策略，包括精细化地质预报、适应性支护技术、智能化监测系统及多部门协同机制。本研究旨在为市政隧道施工安全管理提供理论支撑与实践指导，助力降低塌方风险及经济损失。

【关键词】：市政工程；隧道施工；塌方成因；预防措施

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.005

引言

近些年，我国市政隧道（地铁、综合管廊等）建设规模持续扩大，其施工安全与城市运转及民生保障息息相关。然而，隧道工程穿越地层复杂，常面临软土、富水地层、断层破碎带等不良地质条件，加之城市建成区周边建筑密集、地下管线交错，施工扰动极易引发塌方事故。但现有研究多聚焦于山岭隧道，对市政工程特有的浅埋、小净距、环境敏感等特性关注不足，且对多因素耦合致塌机理的系统性分析欠缺。基于此，本文立足市政隧道施工特殊性，深入探究塌方成因，构建科学预防体系，以为提升城市地下工程安全水平提供切实可行的解决方案。

1 市政隧道施工的特殊性

1.1 施工环境复杂

市政隧道工程多位于城市建成区，施工环境往往面临着多维度的空间约束与高敏感性的外部条件，周边建筑密集导致施工振动、沉降控制要求极高。例如，盾构掘进或爆破作业可能引发邻近老旧建筑开裂，需采用微振动控制技术（如电子雷管精准爆破）及实时监测系统（如自动化全站仪监测建筑位移）。地下管线交错（给水、排水、燃气、电力、通信等）要求施工前进行精细化探测（如地质雷达与管线探测仪联合扫描），施工中采用人工开挖验证，避免误挖导致城市瘫痪^[1]。此外，交通流量大迫使施工采取分阶段导改（如半幅施工+临时便道），但导改过程易加剧拥堵，需与交管部门协同优化信号配时。环境复杂性要求施工方案兼具技术精准性与管理协调性，任何疏漏均可能引发连锁社会影响。

1.2 地质条件多样

市政隧道工程施工经常需要穿越软土、砂土、富水地层等复合地质，且受城市地质勘察精度限制，地质不确定性显著增

加。软土地层（如淤泥质土）具有高压缩性、低强度特性，盾构掘进易导致刀盘结泥饼、螺旋输送机堵塞，需优化渣土改良配方（如添加膨润土与高分子聚合物）。砂土地层透水性强，易引发掌子面坍塌或突水，需采用超前小导管注浆加固（水泥-水玻璃双液浆）或冷冻法止水。富水地层（如承压含水层）施工需构建降水系统（如深井降水+止水帷幕），但降水可能引发周边地面沉降，需动态调整降水参数。城市地质勘察受场地限制（如钻孔间距大、深度不足），导致实际地质与勘察报告偏差率达15%-30%，施工需预留地质风险应对弹性（如预留注浆管、设置应急隔离桩）。

1.3 施工空间受限

我国目前多数市政隧道项目施工作业以浅埋（覆土厚度<1倍洞径）、小净距（两洞中心距<1.5倍洞径）为主，施工对周边环境扰动极为敏感。浅埋隧道开挖易引发地表沉降超限（如地铁隧道施工允许沉降值通常 $\leq 30\text{mm}$ ），需采用浅埋暗挖法（如CRD法、双侧壁导坑法）或地表注浆加固（如袖阀管跟踪注浆）。小净距隧道后行洞开挖对先行洞围岩产生二次扰动，需通过中隔墙加固（如对拉锚杆+混凝土喷层）或预裂爆破减震技术控制振动速度（ $\leq 2.5\text{cm/s}$ ）^[1]。此外，城市施工场地狭小（如隧道口周边50m内无堆料区），迫使设备小型化（如微型盾构机直径 $\leq 6\text{m}$ ）与物料循环利用（如渣土现场制砖），同时需严格限制施工噪声（昼间 $\leq 70\text{dB}$ 、夜间 $\leq 55\text{dB}$ ）与粉尘排放（ $\text{PM}_{10} \leq 1.0\text{mg/m}^3$ ），以符合城市环保标准。空间受限性要求施工从“大规模开挖”转向“精细化作业”，平衡效率与安全性。

2 市政工程中隧道施工塌方成因分析

2.1 地质与水文因素

根据以往经验，复杂地层是市政隧道工程施工塔防的首要

诱因。软弱围岩（如全风化花岗岩、淤泥质土）因强度低、自稳能力差，开挖后易发生塑性流动或坍塌，尤其在浅埋段，覆土自重与地表荷载叠加，加剧围岩失稳。同时，断层破碎带、节理裂隙密集区等地质构造带，岩体完整性被破坏，地下水渗透路径畅通，易形成“水-岩”耦合作用，软化岩体并降低摩擦角，导致掌子面或侧壁突发垮塌。此外，富水地层（如砂砾层、承压含水层）施工中若降水措施不到位（如深井降水井点间距过大、止水帷幕渗漏），地下水压力突破围岩平衡，引发突水涌砂，进而掏空支撑结构形成塌方。另外，城市地质勘察精度受限（如钻孔间距 $>50\text{m}$ 、未揭露溶洞等隐蔽地质），实际地质与勘察报告偏差可能导致支护参数设计不足，为塌方埋下隐患。

2.2 施工技术与工艺因素

除地质条件与水文环境影响之外，人为因素也是导致市政隧道施工塌方的一个关键因素，其中施工工艺选择与执行偏差是最常见的塌方人为诱因。一方面，开挖方法不当，如全断面法用于软弱围岩时未及时支护，或台阶法台阶长度过长（ >3 倍洞径），导致围岩暴露时间超限，应力重新分布引发坍塌。支护体系失效常见于钢拱架间距过大（ $>1\text{m}$ ）、喷混凝土厚度不足（ $<10\text{cm}$ ）或锚杆未穿透滑动面，无法提供有效约束力^[2]。另一方面，爆破参数控制失误（如单段最大装药量超标、掏槽眼角度偏差）可能产生强烈振动，破坏周边岩体完整性，尤其在邻近建筑物或地下管线时，振动波传导加剧塌方风险。此外，施工顺序错误（如先开挖下台阶后支护上台阶）或工序衔接滞后（如超前支护未及时施作），均会削弱围岩自稳能力，最终导致塌方事故。

2.3 管理与监测因素

市政隧道施工期间，管理漏洞与监测失效是塌方防控的薄弱环节。首先，施工组织设计不合理，如未根据地质变化动态调整支护参数（如软土段未加密钢拱架）、未制定塌方应急预案，导致风险应对滞后。其次，现场管理松散，如违规堆放材料增加洞顶荷载、未严格执行“三检制”（自检、互检、专检）导致支护质量缺陷，均会削弱结构安全性。此外，监测体系不完善表现为监测点布设不足（如拱顶沉降监测点间距 $>10\text{m}$ ）、监测频率过低（如每日1次而非实时监测），无法及时捕捉围岩变形信号（如沉降速率 $>3\text{mm/d}$ 未预警）^[3]。另外，数据反馈机制缺失，监测数据仅记录未分析，或分析结论未及时传达至施工班组，导致预警信息滞后于塌方发展，错失最佳处置时机。

2.4 外部环境因素

外部环境主要是指一些不可人为控制的自然因素，环境的

突变可能成为塌方的“最后一根稻草”。极端天气（如暴雨、台风）导致地表水大量汇入隧道，突破排水系统能力（如泵站排水量 $<50\text{m}^3/\text{h}$ ），形成积水浸泡围岩，降低其强度并增加自重，诱发塌方。邻近工程施工（如深基坑开挖、桩基施工）产生的振动或土体位移，可能通过地层传递至隧道，破坏原有平衡状态。例如，地铁隧道上方进行打桩作业时，振动波导致隧道接缝张开，地下水渗入软化围岩，最终引发局部塌方。此外，交通荷载（如重型车辆频繁通行）通过地表传递至浅埋隧道，产生动态附加应力，长期累积下可能引发支护结构疲劳破坏，增加塌方风险。外部环境因素具有突发性和不可控性，需通过加强周边环境监测与施工协调来降低影响。

3 市政工程中隧道施工塌方预防体系的构建

3.1 优化地质勘察与超前预报

确保地质勘察足够精准是预防市政隧道施工塌方的基础，施工前需结合地质钻探（孔距 $\leq 30\text{m}$ ）、物探（如地震波CT、地质雷达扫描）与原位测试（如标准贯入试验、旁压试验）构建三维地质模型，重点识别断层破碎带、软弱夹层、富水区等高风险地质体。针对一些较为复杂的地质环境可引入微动探测技术，尽量减少钻孔数量，降低对周边建筑的影响^[4]。此外，施工过程中还需实施动态超前预报，采用隧道地震波探测或地质雷达每50-100m进行长距离预报，结合超前水平钻探（每20-30m验证）获取实时地质信息，及时调整支护参数并注浆加固，避免塌方事故。

3.2 改进施工技术与工艺

一般而言，软弱围岩采取“短进尺、弱爆破、强支护”原则，应用台阶法或交叉中隔壁法开挖，每循环进尺控制在0.5-1.0m，减少围岩暴露时间；支护体系需“刚柔结合”，钢拱架间距加密至0.5-0.8m，喷混凝土厚度增加至15-20cm，并增设临时仰拱形成闭合环结构。富水地层施工中采用“以堵为主、限量排放”策略，通过超前小导管注浆（水泥-水玻璃双液浆）或冷冻法形成止水帷幕，同时设置排水盲沟与集水井，控制地下水位在开挖面以下1-2m。爆破作业需优化参数，采用电子雷管精准起爆，单段装药量降低30%-50%，并设置减震孔或缓冲层削弱振动波。此外，引入智能化施工设备，如自动喷浆机器人、三维激光扫描仪，提升支护质量与施工精度，减少人为操作误差导致的塌方风险^[5]。

3.3 完善管理与监测体系

建立“三级管控”机制，即项目部、监理单位与第三方监测机构协同作业，每日召开地质风险分析会，根据监测数据动态调整施工参数（表1）。同时，推行“网格化”管理，将隧道划分为若干监测单元，每个单元设置专人负责数据采集与异

常上报。监测体系需覆盖多维度指标，包括拱顶沉降（精度±0.1mm）、净空收敛（频率≥2次/日）、支护应力（应变计量程≥500μ ε）及地下水水位（自动记录仪），数据通过物联网实时传输至云端平台。引入 AI 算法进行趋势预测，当沉降速率>3mm/d 或应力突增 50%时，系统自动触发红色预警并推送至管理人员手机。此外，制定分级响应预案，黄色预警（如沉降速率 1-3mm/d）时加密监测频率，红色预警时立即停工、撤离人员并启动应急注浆加固。

表 1 隧道施工塌方预防“三级管控”体系

管控层级	核心职责	关键技术手段	协同作业要点
项目部 (执行层)	现场实时风险 排查 支护参数动态 调整 应急响应处置	-地质雷达超前预 报（每循环≥30m） -掌子面地质素描 -初支应力实时监 测系统 -人工巡检（每日 2 次）	即时共享地质异常 数据 向监理报送日报 接收第三方预警后 1 小时内响应
监理单位 (监督层)	施工方案合规 性审查 监测数据复核 停工/整改指令 下达	-方案可行性验算 -监测数据交叉验 证 -隐蔽工程旁站验 收（100%覆盖）	每日审核施工/监测 记录 组织三方风险研判 会（每周） 向业主报送风险评 级
第三方监 测机构	自动化实时监 测	-三维激光扫描收 敛监测	实时推送预警信息 （平台+短信）

参考文献:

[1] 刘建文,孙龙.管棚支护在隧道塌方冒顶处治中的应用[J].北方建筑,2024,9(06):88-92.
[2] 邓翔浩.某隧道塌方灾害原因分析及处治方法[J].青海交通科技,2024,36(06):125-128.
[3] 张立爽.隧道关门塌方生命救援预设系统研究[J].中国高新科技,2024,(18):117-118+144.
[4] 何鹏.隧道施工安全数字孪生体的构建与应用[D].大连理工大学,2024.
[5] 刘媛媛.隧道施工塌方事故致因分析与应急决策研究[D].石家庄铁道大学,2024.
[6] 刘志锋,陈名煜,吴修梅,等.基于人工智能方法的隧道塌方风险预测研究[J].水力发电,2024,50(03):31-38.

管控层级	核心职责	关键技术手段	协同作业要点
(独立层)	多源数据融合 分析 分级预警发布	-微震传感网络 -深部位移计（精度 0.1mm） -BIM 风险可视化 平台	提交周/月趋势分析 报告 参与应急预案制定

3.4 外部环境的协同防控

首先，施工前需与周边产权单位（如地铁运营方、管线公司）建立联动机制，共享地下管线图与建筑物基础资料，避免施工误损。针对邻近深基坑、桩基等工程，采用自动化监测仪（如测斜仪、沉降板）实时跟踪其变形，当变形速率>2mm/d 时，要求对方暂停施工并共同制定加固方案。其次，极端天气来临前加固好洞口临时设施，疏通排水系统，并在隧道内设置备用泵站（排水能力≥100m³/h）防止积水倒灌^[6]。交通荷载影响可通过在隧道上方铺设减震垫层（如橡胶颗粒沥青）或设置限高架减少重型车辆通行频率。此外，加强与气象、交通部门的信息共享，利用城市大脑平台整合地质、气象、交通数据，构建“天-地-人”一体化防控网络，实现塌方风险的早期识别与协同处置，最大限度降低外部环境对隧道施工的扰动。

4 结语

总而言之，市政工程隧道施工受地质、技术、管理及环境等多方面因素的干扰，一旦发生塌方事故轻则给施工单位造成严重的经济损失，重则还会危及施工方的生命安全，这就需要构建“精准勘察-科学施工-智能监测-协同管理”的全链条防控体系，最大限度降低塌方概率。未来还需持续融合新技术、完善标准规范，推动隧道施工向本质安全型转型，为城市地下空间开发提供坚实保障。