

Research on Safety Prevention and Control Technology for Shallow Buried Soft Surrounding Rock Tunnel Construction

Zhiying Xu Jianli Li

Zhejiang Jiaogong Jinzhu Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

As a high-risk scenario in tunnel engineering, the construction safety of shallow buried weak surrounding rock tunnels is constrained by multiple factors such as the mechanical properties of the surrounding rock, burial depth conditions, and surface environment. The surrounding rock of such tunnels is often characterized by low strength (uniaxial compressive strength $< 5\text{MPa}$), poor self stabilization ability (exposure time $< 12\text{h}$), and easy softening when exposed to water (strength attenuation rate $> 30\%$). During construction, safety accidents such as collapse of the tunnel face, excessive surface settlement, and sudden water and mud influx are highly likely to occur. This article is based on the full process prevention and control concept of "geological advance warning excavation disturbance control support system strengthening dynamic monitoring feedback", and systematically constructs a safety technology system that adapts to the characteristics of shallow buried weak surrounding rock. By introducing multi-dimensional advanced geological prediction technology, differentiated excavation methods, high-performance initial support materials, and intelligent monitoring systems, combined with engineering case verification, this system can achieve precise control of arch crown settlement $\leq 25\text{mm}$ and surface settlement $\leq 15\text{mm}$, reducing collapse risk by more than 95%, providing theoretical support and practical paradigms for similar projects.

Keywords

Shallow buried weak surrounding rock; Tunnel construction; Safety prevention and control; Advanced forecasting; Dynamic monitoring;

浅埋软弱围岩隧道施工安全防控技术研究

徐志颖 李见利

浙江交工金筑交通建设有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘 要

浅埋软弱围岩隧道作为隧道工程中的高风险场景, 其施工安全受围岩力学特性、埋深条件及地表环境等多重因素制约。此类隧道围岩多表现为强度低(单轴抗压强度 $< 5\text{MPa}$)、自稳能力差(暴露时间 $< 12\text{h}$)、遇水易软化(强度衰减率 $> 30\%$)等特征, 施工中极易发生掌子面坍塌、地表沉降超限、涌水突泥等安全事故。本文基于“地质超前预警-开挖扰动控制-支护体系强化-动态监测反馈”的全流程防控理念, 系统构建了适应浅埋软弱围岩特点的安全技术体系。通过引入多维度超前地质预报技术、差异化开挖工法、高性能初期支护材料及智能监测系统, 结合工程案例验证, 该体系可实现拱顶沉降 $\leq 25\text{mm}$ 、地表沉降 $\leq 15\text{mm}$ 的精准控制, 坍塌风险降低 95% 以上, 为同类工程提供了理论支撑与实践范式。

关键词

浅埋软弱围岩; 隧道施工; 安全防控; 超前预报; 动态监测;

1 引言

随着隧道工程“零开挖进洞”施工绿色理念推进, 浅埋软弱围岩隧道的建设规模逐年扩大。据交通运输部《2023 年公路隧道建设统计公报》显示, 新建隧道中埋深 ≤ 2 倍洞径的浅埋段占比达 38%, 其中 IV - V 级软弱围岩段占比超 60%。此类隧道施工面临三重核心矛盾: 一是围岩强度与开挖扰动的矛盾—软弱围岩难以承受施工荷载, 易因掌子面失

稳引发坍塌; 二是埋深浅与地表保护的矛盾—地表沉降控制要求严苛(城市区域通常 $\leq 20\text{mm}$), 传统施工工法难以满足; 三是水文条件复杂与施工安全的矛盾—软弱围岩多富水, 遇水后强度骤降, 易诱发涌水突泥灾害。

2 浅埋软弱围岩地质特性与施工风险机理

2.1 地质力学特性量化分析

物理指标: 通过对全国 30 个典型浅埋软弱围岩隧道的地质勘察数据统计, 其核心物理指标如下:

天然含水率: 25%-40% (粉质黏土可达 35% 以上);

孔隙比: 1.0-1.5 (是硬岩的 5-8 倍);

压缩系数: $0.5-1.2\text{MPa}^{-1}$ (属高压缩性土);

【作者简介】徐志颖(1980-), 男, 中国浙江金华人, 本科, 从事道路与桥梁管理研究。

渗透系数： 10^{-4} - 10^{-2} cm/s（富水段可达 10^{-3} cm/s）。

力学性能：

单轴抗压强度：1-5MPa（仅为灰岩的1/20-1/10）；

黏聚力（c）：5-15kPa，内摩擦角（ ϕ ）： 10° - 20° ；

弹性模量（E）：0.3-2.0GPa，变形模量（ E_0 ）：0.2-1.5GPa；

围岩完整性系数（Kv）： < 0.3 （破碎状结构）。

时间效应：软弱围岩具有显著的流变特性，根据室内三轴流变试验，在恒定荷载下，100小时内的蠕变变形可达瞬时变形的1.5-2.0倍，且随含水率增加而加剧

2.2 施工风险演化机理

坍塌风险机理：

开挖扰动使围岩应力重分布，当塑性区半径超过隧道开挖半径的1.5倍时，掌子面易失稳。以V级围岩（ $c=8\text{kPa}$ ， $\phi=15^\circ$ ）为例，全断面开挖时，掌子面前方5m范围内

围岩应力集中系数可达3.0-4.0，若支护不及时（延迟 $> 6\text{h}$ ），坍塌概率骤增至70%以上。

地表沉降机理：

浅埋条件下，围岩变形直接传递至地表，形成“漏斗状”沉降区。根据Peck公式计算，埋深6m的隧道开挖引起的地表最大沉降量可达开挖宽度的1.5%-2.5%，若地表存在建筑物（基础埋深 $< 2\text{m}$ ），极易因差异沉降引发结构开裂。

涌水突泥机理：

断层破碎带或富水层中的地下水在水头压力（通常 $> 0.5\text{MPa}$ ）作用下，沿开挖面裂隙渗透，软化围岩并形成管涌通道。当渗透流速 $> 1\text{m/d}$ 时，围岩颗粒被冲刷流失，最终引发突水突泥。

2.3 风险分级标准

基于“可能性-后果严重性”矩阵，将施工风险划分为四级（表1），并制定差异化防控策略：

| 风险等级 | 特征描述 | 可能性 | 后果严重性 | 防控策略 |
|---------|---------------|----------|-----------------------|----------------|
| I级（极高） | 掌子面坍塌、大规模涌水 | $> 30\%$ | 人员伤亡、工期延误 > 60 天 | 暂停施工，专项加固后再开挖 |
| II级（高） | 拱顶持续沉降、小规模涌水 | 10%-30% | 局部返工、工期延误30-60天 | 缩小进尺，强化支护，加密监测 |
| III级（中） | 围岩局部掉块、沉降速率放缓 | 5%-10% | minor修复、工期延误 < 30 天 | 正常施工，加强巡查 |
| IV级（低） | 围岩稳定、沉降趋于稳定 | $< 5\%$ | 无影响 | 常规监测 |

3 安全防控关键技术体系

3.1 多维度超前地质预报技术

立体探测体系：

长距离预报（50-100m）：采用TSP（隧道地震波探测）技术，通过分析反射波速差异识别断层破碎带（分辨率 $\geq 5\text{m}$ ），波速突变段（降低 $> 30\%$ ）提示软弱夹层存在；

中距离预报（20-50m）：使用地质雷达（中心频率100MHz），对富水区形成高分辨率图像（水平分辨率 $\leq 1\text{m}$ ），反射信号强且连续段判定为含水层；

短距离验证（5-20m）：实施超前水平钻探，采用

$\Phi 133\text{mm}$ 钻头，每5m取芯分析，测定围岩含水率（ $> 25\%$ 为高风险）和单轴抗压强度（ $< 3\text{MPa}$ 需专项处理）。

数据融合与风险预警：

建立“三波（地震波、雷达波、声波）一响（钻探数据）”融合模型，通过机器学习算法（如随机森林）实现风险等级自动判定，预警响应时间 $\leq 2\text{h}$ 。某工程应用中，该技术将断层识别准确率从传统方法的75%提升至92%。

3.2 开挖工法与参数优化

根据围岩级别与埋深，采用“分级适配”的开挖工法（表2），核心原则为“短进尺、多循环、快封闭”：

| 围岩级别 | 埋深（m） | 推荐工法 | 循环进尺（m） | 封闭时间（h） | 核心参数 |
|------|----------|--------|---------|----------|-----------------------------------|
| V级 | ≤ 5 | 双侧壁导坑法 | 0.5-0.6 | ≤ 4 | 侧壁导坑宽3m，核心土保留率 $\geq 60\%$ |
| V级 | 5-10 | CRD法 | 0.8-1.0 | ≤ 6 | 中隔壁采用I18钢拱架，台阶错开 $\geq 5\text{m}$ |
| IV级 | 10-20 | 微台阶法 | 1.0-1.2 | ≤ 8 | 上台阶高3m，设临时仰拱（厚20cm） |

工法创新点：

双侧壁导坑法中引入“动态核心土”技术，根据监测数据实时调整核心土开挖量（波动范围 $\pm 0.5\text{m}$ ），在某城市隧道应用中使掌子面稳定性提升40%；

CRD法中采用“异步开挖”工艺，左右导坑开挖间隔 $\geq 12\text{h}$ ，避免应力叠加，减少围岩扰动深度（从2.5m降至1.8m）。

3.3 高性能初期支护体系

喷射混凝土优化：

材料配比：C30早强喷射混凝土，掺加钢纤维（体积率2%）和速凝剂（掺量3%），初凝时间 $\leq 10\text{min}$ ，2h强度

$\geq 5\text{MPa}$ ，28d强度 $\geq 30\text{MPa}$ ；

施工工艺：采用湿喷机（工作压力0.4-0.6MPa）分两层喷射，第一层（10-15cm）封闭围岩，第二层（15-20cm）增强强度，表面平整度 $\leq 5\text{mm/m}$ 。

锚杆-钢拱架协同支护：

锚杆选型：V级围岩采用 $\Phi 25\text{mm}$ 中空注浆锚杆（长度5m），IV级围岩采用 $\Phi 22\text{mm}$ 砂浆锚杆（长度4m），梅花形布置（间距 $80 \times 80\text{cm}$ ），锚固力 $\geq 150\text{kN}$ ；

钢拱架参数：V级围岩采用I20a工字钢（间距50cm），IV级围岩采用I18工字钢（间距75cm），拱脚设 $\Phi 32\text{mm}$ 锁脚锚杆（长4m，4根/根），与钢拱架焊接固定

(焊缝长度 $\geq 10d$)。

防水封闭层:

采用“喷射混凝土+防水板”复合防水体系,防水板选用 1.5mm 厚 HDPE 膜(延伸率 $\geq 400\%$),接缝采用双缝热熔焊接(宽度 $\geq 10mm$),确保抗渗压力 $\geq 0.5MPa$ 。

3.4 智能化监控量测系统

监测参数与布设:

必测项目:拱顶下沉(测点设于拱顶中心,精度 $\pm 0.1mm$)、净空变化(测线沿水平直径布设,精度 $\pm 0.05mm$)、地表沉降(测点沿隧道轴线对称分布,间距 5m,精度 $\pm 0.05mm$);

选测项目:围岩压力(采用钢弦式传感器,量程 0-10MPa)、钢拱架应力(应变片粘贴于拱架内侧,精度 $\pm 2\mu\varepsilon$)。

数据采集与分析:

采用自动化监测系统(如北斗定位终端,采样频率 1 次/30min),数据实时传输至云平台,通过 BIM 模型可视化展示;

引入灰色预测模型(GM(1,1)),提前 24h 预判变形趋势,当预测值达预警值 80% 时自动报警。

动态调控阈值:

沉降速率阈值: V 级围岩 $\leq 1.5mm/d$, IV 级围岩 $\leq 2.0mm/d$;

累计沉降阈值: V 级围岩 $\leq 25mm$, IV 级围岩 $\leq 40mm$;

当超限时,启动调控措施(如下表):

| 超限类型 | 调控措施 | 实施时效 |
|---------------|-----------------------|-------|
| 沉降速率超阈值 | 暂停开挖,加密钢拱架(间距缩小 10cm) | 2h 内 |
| 累计沉降超 80% 预警值 | 地表注浆(水泥浆,压力 0.8MPa) | 12h 内 |
| 净空变化超阈值 | 增设临时横撑(I16 工字钢) | 4h 内 |

4 工程案例验证

4.1 工程概况

某公路隧道全长 1280m,其中 K1+200-K1+600 段为浅埋软弱围岩段(长 400m),最大埋深 18m,最小埋深 7m,围岩为 V 级粉质黏土(天然含水率 32%, $c=7kPa$, $\phi=14^\circ$),地表分布 1 处高压铁塔,距隧道轴线最近距离 8m。

4.2 技术应用过程

超前预报:采用 TSP+地质雷达+超前钻探组合技术,在 K1+350 处探测到富水断层(带宽 5m,渗透系数 $8\times 10^{-4}cm/s$),判定为 II 级风险,提前实施 $\Phi 108mm$ 管棚(长 15m)和注浆堵水(水泥-水玻璃浆)。

开挖与支护:

工法选择:采用双侧壁导坑法,循环进尺 0.6m,每日 1 循环;

支护参数: C30 钢纤维喷射混凝土(厚 35cm), I20a 钢拱架(间距 50cm), $\Phi 25mm$ 中空锚杆(长 5m),拱脚锁脚锚杆(长 4m)。

监控量测:布设拱顶下沉测点 16 个、地表沉降测点 24 个,采用自动化监测系统(采样频率 1 次/30min),数据实时传输至监控平台。

动态调控:在 K1+380 段,监测显示拱顶日沉降达 1.8mm(超阈值 1.5mm/d),立即启动调控,缩小进尺至 0.5m,加密钢拱架至 40cm 间距,24h 后沉降速率降至 0.8mm/d。

4.3 应用效果

安全指标:

最大拱顶沉降 22mm,最大地表沉降 13mm(均未超预警值);

施工期间未发生坍塌、涌水事故,周边居民楼沉降 $\leq 4mm$,无结构开裂;

围岩塑性区半径控制在 1.2 倍洞径以内,掌子面稳定性系数 ≥ 1.2 。

5 结论

综上所述,浅埋软弱围岩的高含水率、低强度及流变特性是引发施工风险的核心因素,需通过“水-力-时间”耦合分析进行风险预判;多维度超前预报技术可实现地质风险的精准识别,将事故预警准确率提升至 90% 以上;差异化开挖工法(如双侧壁导坑法)与高性能支护体系(钢纤维喷射混凝土+密排钢拱架)的结合,可有效控制围岩变形;智能化监控量测与动态调控机制,实现了“监测数据-施工参数”的实时联动,为安全施工提供保障。

参考文献

- [1] JTG/T 3660-2020,公路隧道施工技术规范[S].
- [2] 王梦恕,张顶立.隧道施工力学原理与应用[M].北京:中国铁道出版社,2021.
- [3] 李术才,等.隧道超前地质预报理论与技术进展[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):1-18.
- [4] GB 50446-2017,盾构法隧道施工及验收规范[S].
- [5] Zhang L, et al. A new risk assessment model for shallow tunnel construction in soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 126: 104567.
- [6] 中国岩石力学与工程学会.岩土工程安全防控技术手册[M].北京:科学出版社,2023.
- [7] 交通运输部.2023 年公路隧道建设统计公报[R].北京:交通运输部,2023.