

# 徐州地铁4号线岩溶区盾构隧道的综合监测与预警分析

马学祥<sup>1,2</sup>, 刘鑫锦<sup>1,2</sup>, 周志宇<sup>1,2</sup>, 左金朋<sup>3</sup>, 赵玉帅<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>中国地质学会北方岩溶城市地下空间探测与开发利用创新基地, 山东 济南

<sup>3</sup>中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年2月14日; 录用日期: 2025年3月14日; 发布日期: 2025年3月24日

## 摘要

岩溶区盾构施工因复杂的地质条件易引发突水、突泥和地层沉降等事故。本文以徐州地铁工程为例, 提出基于光纤传感等技术的管片变形、地表沉降、地下水与孔隙水压实时监测方案, 进一步搭建了智能预警平台。研究结果表明, 该系统能够及时识别和响应施工风险, 为盾构施工提供了科学的决策支持, 具有良好的应用前景。

## 关键词

岩溶区, 盾构施工, 隧道结构, 环境影响, 实时监测, 光纤传感, 地层变形

# Comprehensive Monitoring and Early Warning Analysis of Shield Tunnels in Karst Area of Xuzhou Metro Line 4

Xuexiang Ma<sup>1,2</sup>, Xinjin Liu<sup>1,2</sup>, Zhiyu Zhou<sup>1,2</sup>, Jinpeng Zuo<sup>3</sup>, Yushuai Zhao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan Shandong

<sup>2</sup>Innovation Base for Underground Space Exploration, Development and Utilization in Northern Karst Cities of the Geological Society of China, Jinan Shandong

<sup>3</sup>School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Feb. 14<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 24<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Due to the complex geological conditions, shield construction in karst area is prone to accidents

文章引用: 马学祥, 刘鑫锦, 周志宇, 左金朋, 赵玉帅. 徐州地铁4号线岩溶区盾构隧道的综合监测与预警分析[J]. 交通技术, 2025, 14(2): 234-240. DOI: 10.12677/ojtt.2025.142024

such as water inrush, mud inrush and stratum settlement. Taking the Xuzhou Metro Project as an example, this paper constructs a monitoring scheme for segment deformation, surface settlement, groundwater and pore water compaction based on optical fiber sensing and other technologies, and further builds an intelligent early warning platform. The results show that the system can identify and respond to construction risks in a timely manner, which provides scientific decision support for shield construction and has a good application prospect.

## Keywords

Karst Area, Shield Construction, Tunnel Structures, Environmental Impacts, Real-Time Monitoring, Fiber Optic Sensing, Stratigraphic Deformation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩溶区地质条件复杂,隧道施工过程中容易发生突水、突泥、地层塌陷等问题,严重影响施工安全和工程稳定性。据统计,我国岩溶区隧道在建设过程中发生突发性灾害的频率最高,约占所有地质隧道事故的 40%,在众多隧道施工方法中,盾构法因其对周围环境影响较小、施工速度较快而被广泛应用于岩溶区隧道施工。不同于其他开挖方法,盾构法施工通过盾构管片支撑四周围岩防止隧道坍塌,因此对盾构管片的稳定性进行全面监测尤为重要。

随着城市轨道交通的快速发展,盾构隧道的安全运营和健康监测成为保障开挖施工安全的关键保障。国内外众多学者针对盾构隧道的结构特点和施工环境,开展了多样化、系统化的监测技术研究。刘胜春[1]等针对南京长江隧道复杂的工程条件,设计了以光纤传感测试技术为主的长效监测系统,为盾构隧道的运营安全提供了技术保障。苏建锋[2]将信息化监测技术应用于天津地铁盾构区间,通过动态分析施工过程中的沉降和变形信息,有效保障了地铁盾构施工的安全。李玉宝[3]等结合南京地铁二号线盾构隧道的变形监测实践,采用收敛监测和拱顶沉降监测相结合的方法,为盾构隧道变形监测提供了系统的数据处理和分析方法。汤继新[4]等采用分布式光纤传感技术和光纤布拉格光栅技术,对宁波轨道交通 1 号线运营隧道的管片变形和差异沉降进行了监测。安小诗[5]等针对管片开合度和管片错台问题,提出了基于应变计算变形的算法,并针对隧道的不均匀沉降提出了直接分析应变的诊断算法。

尽管盾构隧道监测技术在光纤传感、信息化监测、数据处理与分析等方面取得了重要进展,但在岩溶区盾构施工的隧道结构和环境影响分析及实时监测方面仍存在不足。岩溶区的特殊地质条件使得盾构施工过程中隧道结构和周边环境的相互作用更加复杂,需要更加精细化的监测手段和分析方法。因此,本文旨在通过建立综合监测与预警分析平台结合实时监测技术,对岩溶区盾构施工过程中的隧道结构和环境影响进行深入研究,为盾构隧道的安全施工和运营提供科学合理的监测方法。

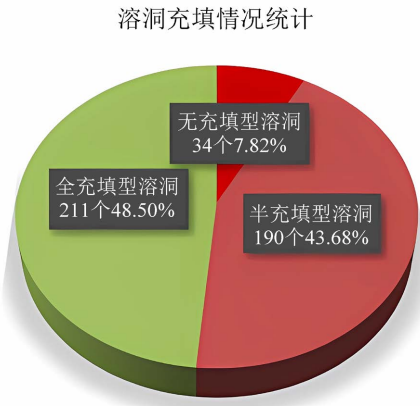
## 2. 工程概况

徐州地铁 4 号线一期工程矿大南湖校区站~泰山路站区间采用盾构法施工,管片内径 5.5 m,外径 6.2 m,拟建场地下伏基岩主要为寒武系石灰岩、页岩、泥灰岩,大里程端分布奥陶系石灰岩,存在不同程度的岩溶发育现象。岩溶主要表现为溶隙、溶孔及溶洞,局部发现串珠状溶洞,属裸露-浅覆盖型岩溶,且较为发育。根据区域地质资料及相关勘察成果,场地溶岩发育主要受构造控制,岩层倾角约 65°~90°,

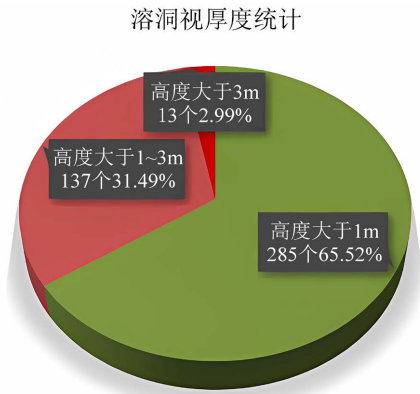
地表水沿节理下渗，地下水运动强烈，岩溶发育方向受层面控制，发育形式以溶蚀裂隙为主，多沿层面发育，为沿裂隙、层面溶蚀扩大化的岩溶裂隙和小型溶洞。勘察揭露的溶洞主要为全充填型及半充填型溶洞，占比分别为 48.50%和 43.68%，溶洞视厚度普遍小于 3 m 占比 97.01%，埋深大多为 20 m 以内占比 69.43%，具体统计表详见表 1、图 1、图 2 和图 3 (数据来源于徐州市城市轨道交通 4 号线一期工程勘察 01 标段岩溶专项勘察报告)。钻孔揭露的溶洞中，21.61%的溶洞处于隧道洞身范围内，隧道顶、底板 5 m 范围内的溶洞占比 52.18%，隧道顶、底板 5 m 范围外的溶洞占比 47.82%，溶洞主要分布在盾构区间隧道顶、底板 5 m 范围内。

**Table 1.** Statistics of karst cave properties (according to the revealed height and filling of karst caves)  
**表 1.** 溶洞性质统计(按揭示溶洞高度及充填情况)

| 按溶洞高度统计     |         |        | 按溶洞充填情况统计 |         |        |
|-------------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| 溶洞大小        | 溶洞数量(个) | 占比(%)  | 充填类型      | 溶洞数量(个) | 占比(%)  |
| 高度小于 1 m    | 285     | 65.52% | 无充填       | 34      | 7.82%  |
| 1~3 m       | 137     | 31.49% | 半充填       | 190     | 43.68% |
| 大于 3 m      | 13      | 2.99%  | 全充填       | 211     | 48.50% |
| 溶洞总个数 435 个 |         |        |           |         |        |



**Figure 1.** Pie chart of karst cave statistics for each filling type  
**图 1.** 各充填类型溶洞统计饼状图



**Figure 2.** Pie chart of cave apparent thickness statistics  
**图 2.** 溶洞视厚度统计饼状图

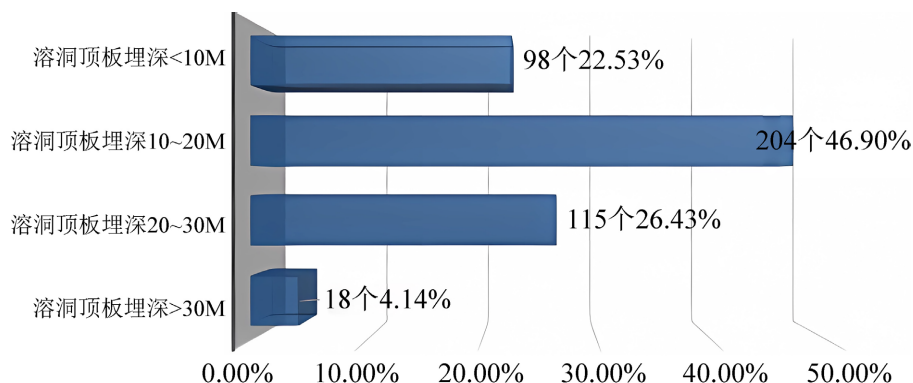


Figure 3. Statistical histogram of buried depth of karst cave roof

图 3. 溶洞顶板埋深情况统计直方图

### 3. 岩溶对工程盾构施工影响

区间内岩溶、地下水与地铁工程关系密切。区间隧道从岩溶区通过时，因溶洞发育位置与地铁隧道位置关系的不同，存在岩溶地面塌陷、地基稳定、不均匀地基以及突水突泥等问题。

#### (1) 溶洞与地铁隧道位置关系

根据统计结果，钻孔揭露的溶洞中，21.61%的溶洞处于隧道洞身范围内，隧道顶、底板 5 m 范围内的溶洞占比 52.18%，隧道顶、底板 5 m 范围外的溶洞占比 47.82%，溶洞主要分布在盾构区间隧道顶、底板 5 m 范围内，施工时应注意盾构机姿态的控制

#### (2) 岩溶地基稳定问题

中风化石灰岩岩体强度较高，是良好的天然地基。但对于岩溶发育的岩体，应考虑岩溶对建筑物地基的影响。当溶洞位于地铁隧道以下，规模较大，且溶洞顶板与地铁隧道底板之间的岩体有效厚度较小时，可能导致溶洞顶板坍塌，施工过程中存在盾构机陷落栽头风险，存在地基稳定问题。

#### (3) 突水突泥问题

本工程岩溶水水位高于隧道底板，当溶洞位于隧道顶板以上、洞身部位及隧道底板下且岩层厚度较薄时，由于溶洞、洞隙中富含岩溶水或充填软塑状黏性土时，地铁隧道施工中岩溶水可能涌入或击穿洞壁，产生突水、突泥等问题。

本工程区间隧道采用盾构法施工，当隧道从基岩中穿过时，遇见溶洞时，由于盾构机本身的密封性较好，突水突泥问题不大，但可能会影响盾构施工开挖面的压力平衡，进而影响盾构机的正常掘进。

#### (4) 溶洞地面塌陷问题

岩溶地面塌陷时指覆盖在岩溶洞穴上的松散土体，在外动力或人为因素作用下产生突发性地面变形破坏。

由以上问题可以看出，隧道施工过程中，岩溶区的潜在风险严重威胁盾构机施工安全，并可能引发一系列连锁反应，如施工进度延误和经济损失。因此，亟需采用一系列相关措施来达到，保障施工安全，及时调整施工策略，降低潜在风险的目的。

### 4. 监测方案及预警分析

基于前述工程特点与风险分析，岩溶区盾构施工因其复杂的地下地质环境和岩溶作用影响，往往面临管片变形、地表沉降、地下水动态变化等多方面风险[6]。为确保施工安全与隧道结构稳定，必须对关键风险指标进行实时监测，并构建智能化预警体系。本文针对岩溶区盾构施工建立了综合监测方案，主

要包括管片变形监测、地表沉降监测、地下水与孔隙水压监测，以及预警平台的搭建，具体内容如下。

#### 4.1. 管片变形监测

盾构隧道的管片构成了隧道支护结构的基本单元，其变形状况直接反映了隧道整体受力及施工过程中的异常状态。受岩溶地质条件及施工工艺影响，盾构隧道在穿越岩溶区时容易产生局部不均匀沉降和管片错台现象，这直接影响着盾构施工隧道结构的使用功能和他安全。因此，对管片进行变形监测是非常重要的。

为此，本研究采用了基于光纤传感技术的管片变形监测方法，首先，在盾构隧道管片关键部位，如拼缝和纵向接缝处，安装高精度应变光纤传感器，并采用埋入与表面粘贴相结合的方式，以确保能够捕捉到管片内部和表面微小的应变变化。为了保证数据的全面性，传感器沿隧道环向和纵向均匀布设，通常间距控制在 5 至 10 米，在岩溶异常区域则可进一步加密至 1 至 2 米。然后，利用分布式光纤传感技术，实现对整个隧道断面管片变形的连续采集，确保数据的全面性和实时性。最后，将采集到的应变、位移数据与盾构机掘进参数及地质勘察数据进行综合分析，通常采用 BP 神经网络、随机森林或支持向量机等机器学习算法，对管片变形特征进行自动识别，从而及时发现异常。在精度方面，光纤光栅应变传感器的测量精度可达到 $\pm 1$  微应变，而分布式光纤传感系统的精度约为 $\pm 5$  微应变，空间分辨率可达到 1 米。依据盾构隧道设计承载能力及相关结构安全规范，通常将管片应变设定为达到 $\pm 1000$  微应变时发出预警，达到 $\pm 2000$  微应变时则触发报警；对于管片错台现象，当错台值达到 2 至 5 毫米时为预警，超过 10 毫米则需报警。通过检测系统，及时识别因岩溶异常引起的局部变形，为盾构机姿态调整和施工工艺优化提供科学依据。

#### 4.2. 地表沉降监测

地铁盾构工程实践证明其施工过程中所引起的地面沉降对建筑物、地层等周边环境的危害是致命的，地下溶洞与岩溶裂隙的存在可能导致地表出现局部或整体的沉降、甚至塌陷现象。因此控制、减缓地面沉降对盾构施工产生的危害影响是非常重要的。

为全面掌握地表沉降动态，本研究提出以下监测方案：首先，进行多手段监测布设，在施工区域内布设高精度 GPS 监测点、全站仪测量点以及激光扫描仪，形成多层次、多角度的地表沉降监测网络，在安装 GPS 监测点时，选用高精度差分 GPS (RTK GPS)，布设点间距约为 50 至 100 米，其静态测量精度可达到 $\pm 3$  毫米。自动化全站仪则布设于基准桩上，每隔约 50 米设定观测点，测量误差通常控制在 $\pm 2$  毫米以内；同时，利用三维激光扫描仪对地表进行每日一次的扫描，其精度可达 $\pm 2$  毫米，有助于分析沉降趋势。之后，利用无线传输技术将监测数据实时传送至数据中心，监测数据通过无线传输实时上传至数据中心后，采用 Kalman 滤波、小波变换等算法进行去噪处理，再结合历史数据和地质资料，基于 LSTM 的深度学学习模型，建立地表沉降变化趋势模型并预测未来沉降。依据盾构施工经验和规范要求，当地表沉降速率达到每日 2 毫米时应发出预警，而达到每日 5 毫米时则触发报警；同时，地表累计沉降量达到 30 毫米为预警阈值，超过 50 毫米则需紧急处理，并对周边建筑物倾斜率设定预警和报警阈值分别为 0.2% 和 0.5%。通过以上手段，达到识别局部异常沉降区域的目的，为防范突发性地表塌陷提供决策支持。

#### 4.3. 地下水与孔隙水压监测

地下水动态及孔隙水压力变化是岩溶区盾构施工安全的重要影响因素，岩溶水的波动可能导致岩体失稳，甚至引发突水、突泥等事故[7]。针对这一问题，本研究采取以下监测措施：

在施工区域内的重点位置及疑似岩溶区设立多个地下水位和孔隙水压监测点，地下水位监测采用压

方式或雷达式自动水位计,其安装点间距通常为 50 至 100 米,测量精度可达到 $\pm 0.5$  厘米;而孔隙水压监测则采用光纤式渗压计,重点布设于岩溶裂隙及溶洞区域,点间距一般控制在 20 至 50 米,监测精度可达 $\pm 0.1$  千帕且响应时间低于 1 秒。监测系统则采用分布式数据采集终端,实现对各监测点数据的连续采样通常情况下,数据采样周期设为 1 分钟;在施工关键期或遇到异常预兆时,可提高至 1 秒甚至更短的采样频率,数据传输过程中,系统通过嵌入式算法采用小波去噪和自适应滤波等技术进行初步校正,以确保数据准确性。结合历史数据,利用时间序列模型(如 ARIMA)对水位和孔隙水压变化进行预测,进而实现自动预警,当地下水位日变化达到 0.5 米时系统便发出预警,而超过 1.0 米时触发报警;类似地,孔隙水压变化达到 50 千帕时预警,超过 100 千帕则报警,并通过短信、邮件以及现场报警装置通知施工监控中心和相关技术人员。

#### 4.4. 预警平台搭建

为了实现对盾构施工过程中各类风险的全面掌控和及时响应,本研究构建了一个集成多源数据、实时动态分析和智能预警的综合平台。该平台旨在将管片变形、地表沉降、地下水与孔隙水压等监测数据进行高效整合,利用先进的数据处理与风险评估算法,实现对工程风险的自动识别、分级预警和应急指令发布,从而为岩溶区盾构施工提供科学、可靠的决策支持[8]。

预警平台采用分层架构,整体设计分为数据采集、数据处理与存储、风险评估与预警以及决策支持与可视化展示四个主要部分,各模块之间通过标准化接口实现数据的无缝传输与联动。首先,在数据采集层,通过部署于盾构隧道和地表的多种高精度监测设备,包括基于光纤传感技术的管片变形监测系统、RTK GPS、全站仪等,实时采集施工过程中关键参数和环境数据。这些数据通过物联网、无线通信或 5G 网络等方式上传到中央数据中心,为平台提供多源、全时段的数据支持。接下来,在数据处理与存储层,平台对原始数据进行清洗、同步校正和归一化处理,利用 Kalman 滤波、小波变换等信号处理技术去除噪声,并通过流式计算技术实现实时数据计算,同时采用时序数据库或分布式存储系统对大规模数据进行高效存储与管理,确保数据准确且连续地传递至后续处理环节。

在风险评估与预警层,平台引入动态阈值算法和多种机器学习模型,结合关联分析对来自管片变形、地表沉降和地下水动态等多维监测数据进行实时分析。系统首先依据历史数据和工程经验设定初始阈值,并通过自适应算法动态调整,实时检测各关键指标是否出现异常波动。当监测指标出现轻微偏差时,系统自动判定为初步风险状态;而当多个指标累计达到或超过预警阈值时,平台便会自动升级风险等级,按照绿色、黄色、橙色和红色等预警级别对风险进行分级,并与具体响应措施相对应。平台在实现自动识别功能时,利用训练好的模型对实时数据进行趋势预测和异常模式识别,确保能够在风险初现时就及时捕捉到异常信号。

与此同时,平台的预警功能与应急指令发布机制实现了全流程的自动化响应。当系统判定风险达到预设阈值后,预警模块会自动生成预警信息,并根据风险级别触发相应的应急响应措施。在较低风险等级下,系统通过短信、邮件或 App 推送提醒现场施工人员注意并进行必要检查;在风险较高时,则自动发出停机、降低推进力、调整盾构机姿态等应急指令整个过程实现了从数据采集、实时处理、动态评估到自动响应的闭环管理,为盾构施工在复杂岩溶地质条件下的安全运行提供了强有力的保障。

#### 5. 结论与展望

目前,盾构隧道监测技术在各类地下工程中的应用已取得一定成果,但在应对岩溶区复杂地质环境的盾构施工风险方面,传统方法仍存在局限。现有的监测手段多侧重于单一参数或单一传感技术,难以全面捕捉地下结构与周边环境之间多维度、动态变化的信息,同时在数据融合、智能分析与实时预警响

应上,智能化水平还有待提升。本文针对岩溶区盾构施工的隧道结构和环境影响进行了深入研究,结合实际工程案例创新性地提出了一套基于光纤传感、GPS、全站仪及激光扫描等多种技术集成的综合监测方案,并构建了一个智能预警平台。该系统不仅实现了盾构管片变形、地表沉降以及地下水和孔隙水压等关键指标的实时、多维监控,而且利用先进的数据处理和机器学习算法对采集数据进行智能化分析,有效提高了对岩溶区施工风险的预测和响应能力。相比传统方法,本研究更注重监测数据的深度融合和趋势预测,能够针对岩溶区特有的地质复杂性进行精准风险评估,从而为盾构施工过程中的决策提供更加科学的支持。

展望未来,监测技术的发展方向将更加侧重于智能化和自动化。随着无人机遥感、自动巡检机器人以及大数据与云计算技术的不断进步,未来可以构建更加高效的监测体系,实现对盾构施工全周期的动态监控,同时提高监测系统的精度和可靠性,加强多学科交叉研究,综合运用多种学科的理论和方法,提高对岩溶区盾构施工的认识和应对能力,为岩溶区盾构隧道的安全施工和长期运营提供更有力的技术支持。

## 基金项目

(1) 山东省交通厅科技计划项目 2022B12; (2) 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 2022TSGC2117。

## 参考文献

- [1] 刘胜春,张顶立,黄俊,等.大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):741-748.
- [2] 苏建锋.地铁盾构施工现场监测实例分析[J].施工技术,2017,46(S1):773-775.
- [3] 李玉宝,沈志敏,苏明,等.地铁盾构隧道收敛和沉降监测数据处理与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(S2):296-301.
- [4] 汤继新,谢长岭,方宝民,等.光纤感测技术在轨道交通运营线路中的应用[J].隧道建设(中英文),2019,39(S2):398-405.
- [5] 安小诗,申文永,朱力.分布式光纤盾构隧道监测数据算法及成果分析研究[C]//中国建筑学会工程总承包专业委员会.2019年全国土木工程施工技术交流会暨《施工技术》2019年理事会年会论文集(下册).《施工技术》杂志社,2019:4.
- [6] 贺勇,米少龙.岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术研究[J].现代隧道技术,2022,59(S1):903-910.
- [7] 刘贺,崔文君,罗勇,等.基于分层监测的北京天竺地面沉降、地下水位与孔隙水压力变化规律[J].地质通报,2022,41(4):692-701.
- [8] 谢雄耀,李军,王强.盾构施工地表沉降自动化监测及数据移动发布系统[J].岩土力学,2016,37(S2):788-794.