

基于自动化监测技术的煤系地层运营隧道变形机理分析

张家旭¹, 任育珍², 蔡建华², 郑 鹏², 周庭苇³

¹成都大学机械工程学院, 四川 成都

²中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都

³中国铁路成都局集团有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年11月27日; 录用日期: 2024年12月23日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

为探究煤系地层铁路运营隧道衬砌裂损和轨道上拱的变形机理, 以贵州省安顺市黄织线磨雄隧道为例, 考虑煤系地层及重载振动对隧道的特殊影响, 基于地质调查、病害调查及测量机器人变形监测方法, 进行变形机理综合分析。结果表明: 1) 隧道穿越地质条件较为复杂, 洞身穿越二叠系龙潭组(P2l), 该地层含多层煤, 属高瓦斯地层, 围岩属于整体较破碎的弱风化软岩, 岩体整体稳定性较差; 2) 轨道主要在竖向上产生位移, 在中间K18+638~K18+672监测区域有明显的抬升现象, 在水平方向上也有较大的向左位移趋势, 隧道结构则在监测区域K18+638~K18+672内, 有较大的向隧道两侧位移趋势, 在竖向上也有较弱的沉降现象; 3) 隧道产生的变形由围岩岩性、地应力、地下水、列车荷载等原因造成, 多种应力与荷载相结合后, 会加剧隧道结构受到的破坏, 从而引起隧道的变形。

关键词

自动化, 煤系地层, 运营期, 变形监测

Deformation Mechanism Analysis of Coal Measure Strata Operational Tunnel Based on Automatic Monitoring Technology

Jiaxu Zhang¹, Yuzhen Ren², Jianhua Cai², Peng Zheng², Tingwei Zhou³

¹School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan

²China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu Sichuan

³China Railway Chengdu Bureau Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Nov. 27th, 2024; accepted: Dec. 23rd, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

In order to investigate the lining cracking and deformation mechanism of the railway operation tunnel in coal measure formation and track arch, taking the Moxiong tunnel in Huangzhixian, Anshun City, Guizhou Province as an example, the deformation mechanism was comprehensively analyzed based on the geological survey, disease investigation, and deformation monitoring by measuring robot, considering the special influence of coal measure formation and heavy load vibration on the tunnel. The results show that: 1) The geological conditions of the tunnel are relatively complex, and the tunnel passes through the Permian Longtan Formation (P2l), which contains multiple layers of coal and belongs to the high-gas formation. The surrounding rock belongs to the weakly weathered soft rock with a relatively broken whole, and the overall stability of the rock is poor; 2) The track mainly undergoes displacement in the vertical direction. A distinct uplifting phenomenon is observed in the monitoring area ranging from K18+638 to K18+672. There is also a significant leftward displacement tendency in the horizontal direction. As for the tunnel structure, within the monitoring area from K18+638 to K18+672, there is a considerable displacement trend towards both sides of the tunnel and a relatively weak settlement phenomenon in the vertical direction. 3) The deformation of the tunnel is caused by surrounding rock lithology, ground stress, groundwater, train load, etc. The combination of various stresses and loads will aggravate the damage to the tunnel structure and cause the deformation of the tunnel.

Keywords

Automation, Coal Measure Strata, Operation Period, Deformation Monitoring

Copyright © 2024 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

自动化监测技术是一种利用现代信息技术、传感器技术和网络通信技术等，对环境、工程结构、工业过程等进行实时、连续和自动化监测和管理的技术。这种技术能够提高监测的效率和准确性，减少人力成本，提升预警能力和决策支持能力[1]。

在环境监测领域和工程建设领域中，自动化监测技术已经得到了广泛应用。例如，在污染物总量控制监测上，中国环境监测总站与燕化公司环境保护监测站合作，在化工厂排放口设立了水污染物总量控制自动监测技术示范工程，采用在线流量计、pH计、COD仪、油质监测仪、采样器等设备和技术进行多方面的试验[2]。此外，免棱镜自动化监测技术也在上海市某新建道路地道下穿施工运营中的高速公路工程中得到应用，通过测量机器人免棱镜测量技术，研制了一套同时满足免棱镜和棱镜测量的自动化变形位移监测系统[3]。

目前，自动化监测技术已在多个领域取得了显著进展。例如，为了优化地铁车站基坑监测，李昕等提出了基于建筑信息模型(BIM)的自动化监测系统，通过在 Revit 模型中建立地表沉降监测等多种模块，并将数据导入监测平台，实现了数据的自动采集和实时显示，从而完成了对地铁车站基坑自动化监测体系的建设[4]。为了提高城市深基坑及周边建筑物的安全监测效率，李湧开发了一种基于智能全站仪的自动化监测系统，该系统通过设计监测系统框架结构、明确系统主要功能及核心构成，并采用基准网检校和气象环境补偿算法对观测数据进行平差处理，提高了数据质量[5]。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

黄织线磨雄隧道位于黄织线普定至鸡场坡区间，隧道全长 2068 m，中心里程黄织线 K18+645，起点里程 K17+611，终点里程 K19+679。对既有黄织线磨雄隧道结构监测范围为 K18+600~K18+700 段，共 100 m (重点监测范围为 K18+630~K18+670 段，共 40 m)。其整体地形图见图 1。



Figure 1. Topographic map of Moxiong tunnel

图 1. 磨雄隧道地形图

隧道均采用新奥法施工，使用光面爆破及湿喷技术，II、III 级围岩均采用全断面开挖，IV、V 级围岩均采用台阶法施工，拱墙衬砌一次灌注，采用复合式衬砌，其中 K18+321~K19+679 (1358 m) 段穿过煤系地层，采用全封复合式衬砌。其次，隧道穿越地质条件较为复杂，其主要软岩有粉质黏土、石灰岩、泥灰岩、燧石灰岩、砂质泥岩和煤层，在 K18+476 至 K18+866 区间，围岩分级为 IV、V 级围岩，在隧道进口处的灰岩地段溶蚀强烈，隧道以上发现多处溶洞、落水洞，地面发育封闭洼地，并在隧道 K18+331 处洞顶之上 90~100 m 发育一暗河，且与隧道呈大角度相交，岩溶较发育，岩溶水通过管道向下发育，岩土体整体稳定性较差，容易产生变形。

2.2. 隧道病害情况

磨雄隧道中间 K18+600~K18+700 变形区域内围岩等级为 V 级，复合式衬砌，边墙为曲墙式，隧道埋深 190~200 m，由于该段地下水位较高，围岩所受局部应力和水压力较大，基床出现冒砂现象和明显上



Figure 2. Disease diagram of local tunnel structure

图 2. 局部隧道结构病害图

拱，在洞身标+1025~+1055段(DK19+690~+720, K18+636~+666)内发现衬砌边墙纵向开裂错台10 mm、隧道铺底开裂错台上拱致使侧沟倾斜，洞身标+1050处35#大避车洞兼电缆余长腔处底边隆起最大约15 cm，墙身衬砌多处开裂、错动，部分隧道结构病害图如图2所示。

3. 煤系地层隧道自动化监测

3.1. 自动化监测系统

针对磨雄隧道的病害情况，主要采用自动化监测系统对变形区域进行监测，其主要包含GeoMoS软件、徕卡TM60监测机器人、无线数据传输。而基于测量机器人的自动化监测系统主要由数据采集、数据传输、数据分析处理、供电等子系统组成，典型系统框架如图3、图4所示。

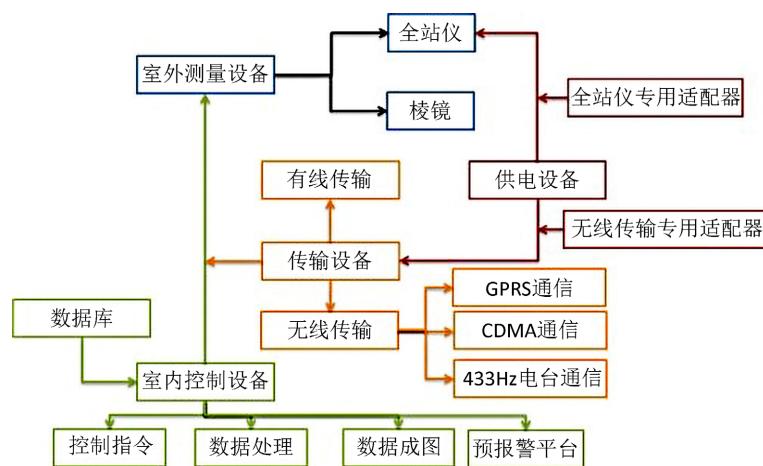


Figure 3. Composition of automatic monitoring system based on measuring robot
图3. 基于测量机器人的自动化监测系统构成

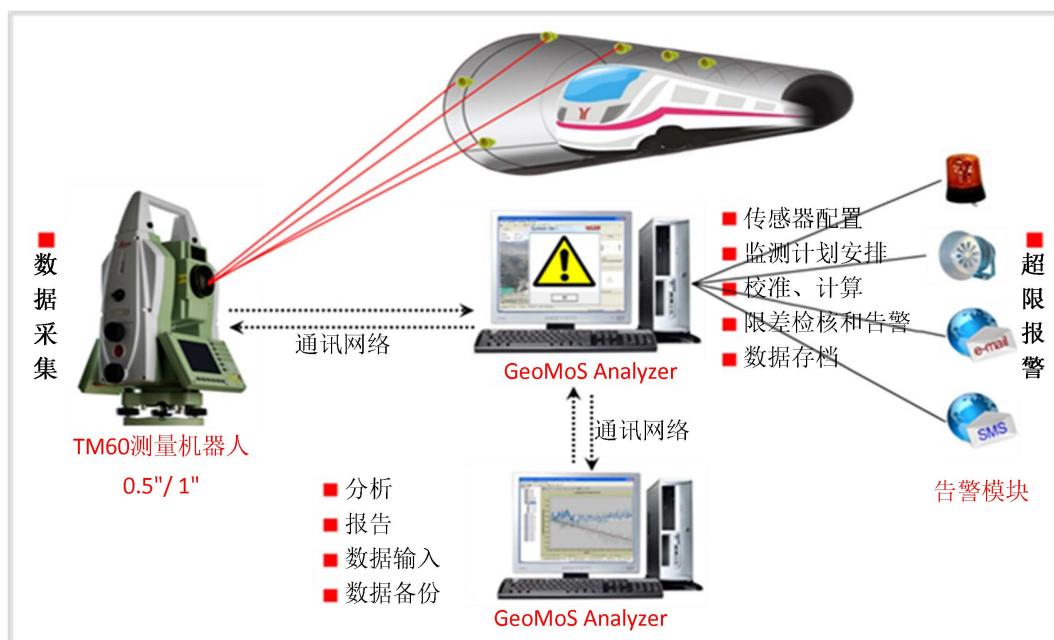


Figure 4. Leica total station automated monitoring solution
图4. 徕卡全站仪自动化监测解决方案

监测工作的主要目的是收集隧道变形区域的变形数据，因此采集系统主要由测量机器人担当[6]。通过软件的设站以及监测频次、观测测回、测点学习等规划好监测流程，测量机器人即可接收控制中心监测平台的指令，按既定流程进行自动化的监测，所获取的角度、距离等观测值将实时进行传输，此外，采用自动化监测的手段也可以避免人工监测设站带来的人为误差[7]。

3.2. 自动化监测方案

在磨雄隧道的变形监测过程中，采用徕卡 TM60 监测机器人和 GeoMoS 软件等相关数据传输软件，对隧道结构位移变化及轨道位移变化进行监测，并通过数据统计、位移曲线分析等方法，针对隧道边墙结构及轨道的变形趋势进行评判工作。

根据现场实际情况，对隧道结构变形及轨道变形进行监测，选择的隧道监测里程为 K18+600~K18+700。监测内容分别为轨道竖向位移、垂线路(X 方向)轨道水平位移、顺线路(Y 方向)轨道水平位移、隧道结构竖向位移、垂线路(X 方向)隧道结构水平位移、顺线路(Y 方向)隧道结构水平位移。隧道结构变形和轨道变形使用全站仪、基准点和监测点进行监测，以上各项目的测试频率为每小时 1 次，每天采用 13 点列车过后的监测数据作为留存记录。

作为运营期煤系地层隧道的核心部分，对运营期隧道采用自动化监测系统是确保维护隧道安全和运营安全的主要手段，同时也是评价隧道围岩稳定性、合理规范现场施工、保障施工现场人员生命财产安全、优化结构设计以及后期合理进行病害处治的重要手段[8]。

3.3. 监测成果分析

分别选取轨道和隧道结构的三个方向位移趋势图进行分析，其中包括轨道竖向位移、轨道垂线路(X 方向)水平位移、轨道顺线路(Y 方向)水平位移、隧道结构竖向位移、隧道结构垂线路(X 方向)水平位移、隧道结构顺线路(Y 方向)水平位移等六个方向位移，监测时间为 2023 年 6 月 22 日至 2024 年 6 月 22 日，最终展示成果为最后一天的位移监测成果，隧道监测点布置图如图 5 所示。

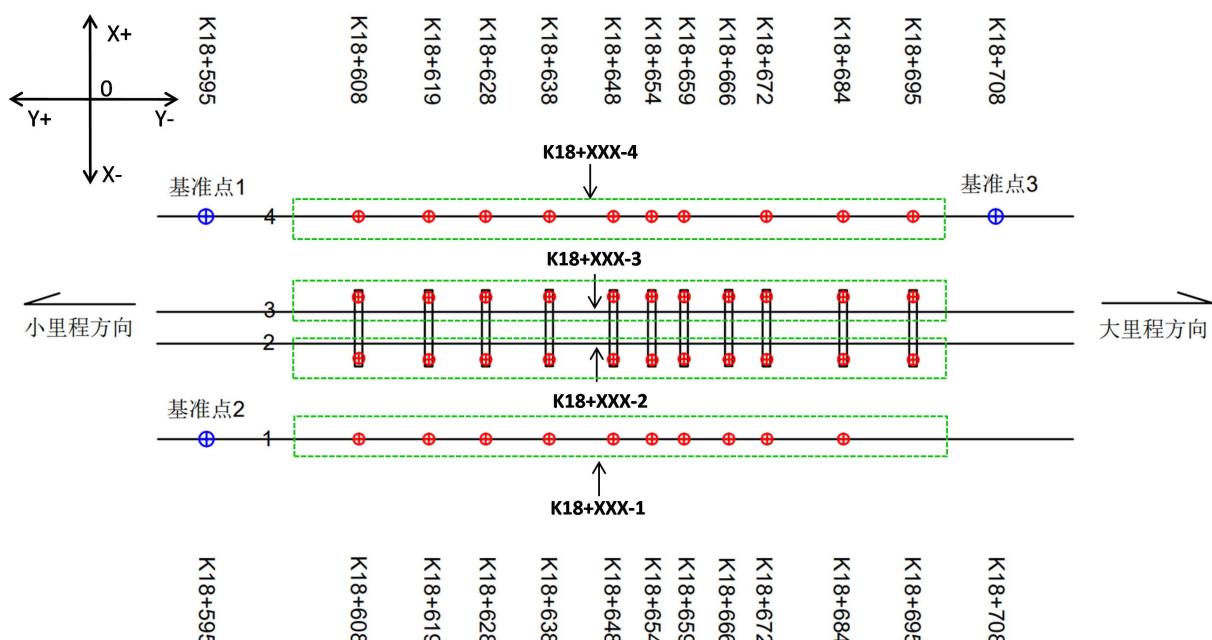
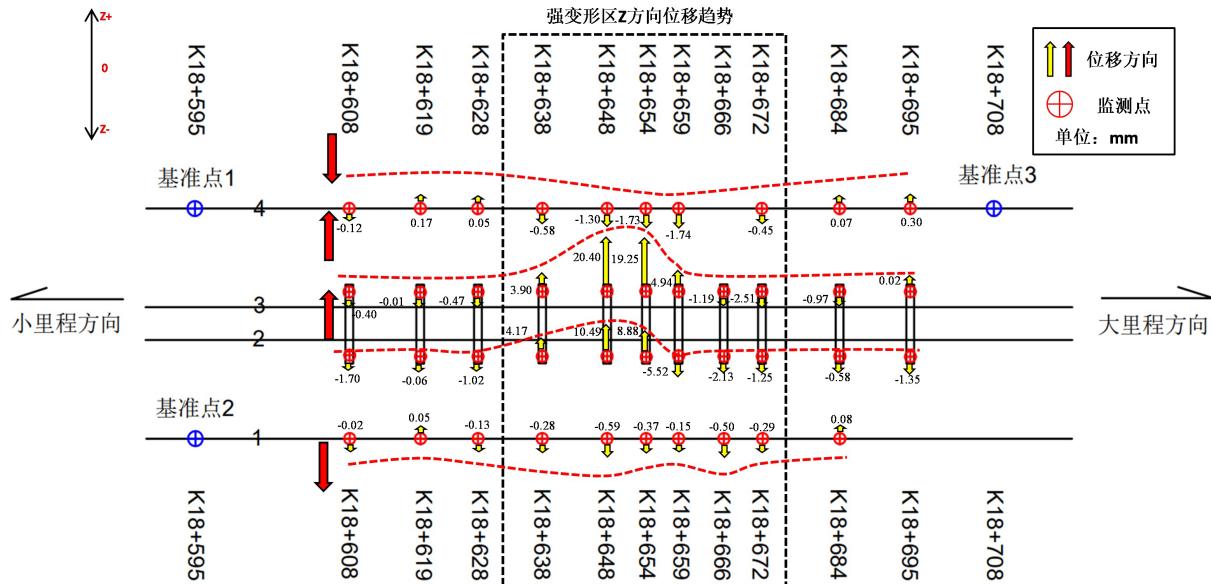


Figure 5. Layout of monitoring points
图 5. 监测点布置图

3.3.1. 坚向位移监测成果分析

本小节选取轨道和隧道结构的竖向累计位移监测成果进行分析, 轨道和隧道结构竖向位移趋势图如图 6 所示。



整体处于稳定波动状态，对列车的正常运行基本不造成影响。

3.3.2. 垂线路(X方向)水平位移监测成果分析

本小节选取轨道和隧道结构的垂线路(X方向)水平位移监测成果进行分析，轨道和隧道结构垂线路(X方向)位移趋势图如图7所示。

分析图7可知，在强变形区K18+638~K18+672中，轨道均有明显的向隧道左侧位移趋势，其中以监测点位K18+648GDS-2、K18+648GDS-3、K18+654GDS-2、K18+654GDS-3的变形最为明显，其垂线路(X方向)位移累计值分别为8.14 mm、7.32 mm、8.09 mm、8.15 mm；而隧道结构则是呈现向隧道两侧缓慢位移的趋势，其中以监测点位K18+648SDS-4、K18+654SDS-4、K18+659SDS-4最为突出，其垂线路(X方向)位移累计值分别为7.19 mm、10.41 mm、6.18 mm。其它区域监测点位则无明显变化，整体处于稳定波动状态。

3.3.3. 顺线路(Y方向)水平位移监测成果分析

本小节选取轨道和隧道结构的顺线路(Y方向)水平位移监测成果进行分析，轨道和隧道结构顺线路(Y方向)位移趋势图如图8所示。

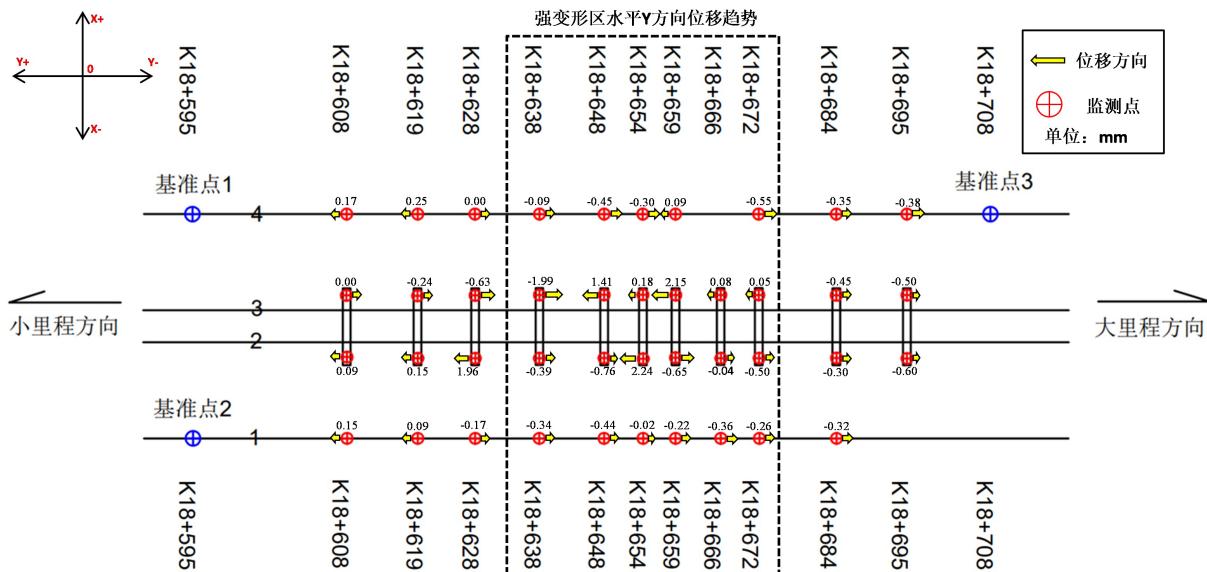


Figure 8. Track and tunnel structure along the line (Y direction) displacement trend diagram
图8. 轨道和隧道结构顺线路(Y方向)位移趋势图

分析图8可知，在强变形区K18+638~K18+672中，轨道和隧道结构在顺线路(Y方向)上变形均不明显，目前轨道上仅个别监测点位有2 mm左右的位移，但经长时间监测数据的判断，数据并未出现增长或下降的情况，应该是当地线路局对轨道进行抬轨作业所导致的，不属于隧道所产生的自然变形，故判定所有监测点在顺线路(Y方向)上无位移趋势，整体处于稳定波动状态。

4. 隧道变形机理分析

根据磨雄隧道的地质调查和自动化监测数据成果来看，轨道与隧道结构的变形主要由围岩岩性、地应力、地下水、列车荷载等因素造成的[9]，其表现为以下几个特征：

1) 磨雄隧道位于黄织线普定至鸡场坡区间，在贵州西部，属亚热带季风气候区，其雨季降雨量大，且降雨集中，暴雨突出；而该地区煤系地层岩性软，具有干裂、吸水性强、遇水膨胀软化，其结构易破坏

而丧失强度等特点，在水和其他外应力作用下易形成软弱带，造成隧道结构变形破坏[10]。

2) 隧道地形地貌复杂、地质灾害易发频发，洞身穿越二叠系龙潭组(P2l)，该地层含多层煤，属高瓦斯地层，各层瓦斯压力为 0.28~0.61 MPa；该段由石灰岩、泥岩、砂岩、砂岩夹煤层构成，围岩属于整体较破碎的弱风化软岩[11] [12]。

3) 隧道上方有多处溶洞、落水洞，岩溶较发育，软岩受溶洞影响，易发生软化作用，导致围岩强度降低，且砂质泥岩、煤层具有较高的含水率和孔隙度，这使得它们在水作用下容易发生膨胀和软化，造成隧道拱顶及边墙区域开裂[13] [14]。

4) 运营期隧道会受到列车运行扰动，列车通行会对隧道结构产生动态荷载影响，这种荷载会通过路基传递到隧道结构上，当隧道结构有薄弱或受力不均匀的地方时，这种动态荷载会加剧隧道结构受到的破坏，导致隧道围岩、衬砌等结构的应力状态发生变化，改变岩体结构，让软岩更易和水结合，使得其力学性能大幅度降低，引发软岩内部产生巨大的膨胀能，从而引起隧道的变形[15] [16]。

5. 结语

目前，自动化监测技术在既有线设备中应用广泛，它能通过安装各类传感器和数据采集器，及时收集并传输各类关键参数信息，如位移、应力等。通过上述隧道地质情况调查与自动化监测数据分析，可得到以下结论：

1) 隧道穿越地质条件较为复杂，其主要软岩有粉质黏土、石灰岩、泥灰岩、燧石灰岩、砂质泥岩和煤层，在 K18+476 至 K18+866 区间，围岩分级为 IV、V 级围岩，在隧道进口处的灰岩地段溶蚀强烈，隧道以上发现多处溶洞、落水洞，岩溶较发育，地面发育封闭洼地，土体整体稳定性较差。

2) 根据监测数据分析可知，轨道主要在竖向上产生变形，在 K18+648~K18+654 区域有明显的抬升现象，也有较大的向隧道左侧位移趋势；隧道结构则是在 K18+648~K18+659 范围内，有较明显的向隧道两侧位移趋势，在竖向位移上也有较弱的向下沉降趋势。

3) 隧道产生的变形由围岩岩性、地应力、地下水、列车荷载等原因造成，其主要特征表现为地区降雨量大且降雨集中，围岩多为石灰岩、泥岩、砂岩、砂岩夹煤层等软岩，在水作用下容易发生膨胀和软化，其次就是受列车荷载影响，荷载会对软岩进行挤压和破坏，改变岩体结构，引发软岩内部产生巨大的膨胀，从而引起隧道的变形。

基金项目

中国中铁股份公司重大专项(2023-专项-05)；工程施工智能技术研究-C(工程施工地质性态智能感知技术研究及设备研制)。

参考文献

- [1] 张春良, 刘红, 向丽, 邓华锐, 景胜, 金苗. GNSS 自动化监测技术的工程应用[J]. 路基工程, 2024(4): 165-170.
- [2] Ranjan, R. and Vinothkumar, C. (2016) An Automated Surveillance System for Measurement and Control of Industrial Parameters. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 9, 883-886.
<https://doi.org/10.5958/0974-360x.2016.00168.2>
- [3] 李怀锋. 免棱镜自动化监测技术的研究与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2021(0): 310-313.
- [4] 李昕, 黄钰超. 基于 BIM 的地铁车站土建施工自动化监测系统的开发与应用技术[J]. 广州建筑, 2024, 52(6): 76-81.
- [5] 李湧. 深基坑全站仪自动化监测系统设计研究[J]. 地矿测绘, 2024, 40(3): 41-46.
- [6] 高鹏. 地质灾害防治自动化监测技术[J]. 电子技术与软件工程, 2019(24): 98-99.
- [7] 赵尘衍, 刘全海, 谢友鹏, 张洋. 自动化监测技术在地铁基坑工程监测中的应用[J]. 城市勘测, 2019(1): 196-200.

-
- [8] 陈德春, 段伟, 肖文龙. 自动化监测技术在基坑开挖周边既有地铁隧道变形监测中的应用[J]. 中华建设, 2020(34): 104-107.
 - [9] 张轩, 谢东海, 袁志刚, 等. 煤系地层隧道围岩变形规律与支护技术[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 119-125.
 - [10] 余建乐. 缓倾内粉砂岩高陡斜坡采空区覆岩损伤与变形机理研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2021.
 - [11] 李生杰, 谢永利, 吴丹泽, 等. 穿越煤系地层隧道围岩大变形机制及处治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3501-3508.
 - [12] 孙昌花, 许浩, 汤达祯, 辛福东, 任鹏飞, 曹立坤. 黔西北龙潭组煤系地层层序-沉积特征及聚煤规律研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 46-55.
 - [13] 吴煌. 黔北龙潭组煤层开采覆岩变形破坏特征及涌水量预测[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
 - [14] 康宝祥, 宋战平, 张庆贺, 许晓静, 周冠南, 潘红伟. 倾斜煤系地层大断面客专隧道大变形原因分析及处置[J]. 土木与环境工程学报中英文, 2024, 46(2): 89-99.
 - [15] 王一鸣, 任登富, 王立川, 李习平, 阳军生. 三联隧道穿越煤系地层软岩大变形控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S1): 1613-1619.
 - [16] 刘志强, 宋治, 胡元芳. 隧道挤压型变形与支护特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 413-418.