

岩溶地区城市运营隧道病害区域结构变形监测分析

余前勇

上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司 上海 200125

摘要：针对岩溶地质条件下城市运营隧道结构病害问题，本文依托贵阳市某隧道为工程背景，采用多种监测设备，对隧道病害区域开展长期动态监测。结果表明：地下岩溶裂隙水对道床结构影响显著，监测期内出现明显的上抬，而隧道拱部与侧壁变形等指标变化幅度较小，隧道整体结构呈现良好稳定状态。研究揭示了岩溶水对存在病害的隧道结构，尤其是对道床产生了显著影响，为类似地质条件下隧道运营期病害防治提供了数据支撑和技术参考。

关键词：轨道交通；岩溶裂隙水；隧道结构；变形监测

引言

随着我国城市化速度的加快，城市轨道交通已经变成缓解交通拥堵的关键措施。贵阳市作为我国典型的喀斯特山地城市，岩溶发育区域所占比例较大，运营隧道穿越区域普遍存在着溶洞、裂隙网络以及季节性波动地下水等复杂的地质条件。岩溶裂隙水对隧道衬砌具有显著的腐蚀性影响，导致混凝土强度降低及钢筋腐蚀性开裂^[1]，严重影响在运营隧道的结构安全。针对在役隧道，除了需及时运用多种综合检测技术^[2]进行病害的精确探测外，亦必须对病害区域实施长期的跟踪监测，以监控隧道结构的变形状况。廖海山^[3]等人运用测量机器人对运营隧道结构进行监测，取得了显著成效。张文静^[4]利用静力水准仪对地铁隧道进行监测，能够实时反映隧道的变形情况。石勇^[5]等通过综合运用多种监测设备，并进行多源数据融合，显著提升了运营隧道监测的精确度。

本文选取贵阳市某运营隧道作为研究对象，针对该区间隧道出现的突发突泥现象，本文综合运用多种监测设备，采取人工监测与自动化监测相结合的策略，及时分析监测数据，评估隧道结构的变形状况，并为隧道结构病害区域的治理施工提供精确的变形数据支持。

1 工程概况

贵阳市位于贵州省中部，属于亚热带湿润气候，平均海拔高度为1100m。该地区四季分明，气候温和，降水量丰富。贵阳市年均降水量约为1190mm，雨季持续时间较长，主要集中在4月至10月期间，其中5月至8月的降雨量占全年总降雨量的60%^[6]。

贵阳市某运营隧道下穿山岭，山体上部多为较宽缓的分水岭，中部为平缓斜坡，下部为狭窄的陡坡谷地，峰谷延伸方向与地质构造方向基本一致，属于溶蚀地貌。该隧道采用矿山法施工，全长约3km，结构防水分为全包防水段与半包防水段。隧道竣工后，区间右线

YDK39+671（全包防水）附近二衬结构预留泄水孔中有黄泥流出，且多处发生渗流计涌水现象，其中有一处泄水孔出水，且出水量为0.6L/s，在暴雨季节，水中含泥沙。根据物探测试成果显示，YDK39+661~YDK39+681段隧道右侧道床板附近有明显异常，异常区内的岩体较为破碎，为岩溶裂隙发育位置，确定为病害区段。本病害区段隧道洞身穿越摆佐组及黄龙组中厚-厚层块状粉晶白云岩、白云质灰岩，岩层产状 $115^{\circ}\sim 145^{\circ}\angle 25^{\circ}$ ，洞顶及侧壁围岩为中风化灰岩，整体完整性好，围岩稳定性较好，隧顶埋深约为170m，隧道主体位于地下水位以下，局部发育溶洞构造，存在沿岩溶裂隙带发生线状渗流及突发涌水的潜在风险。

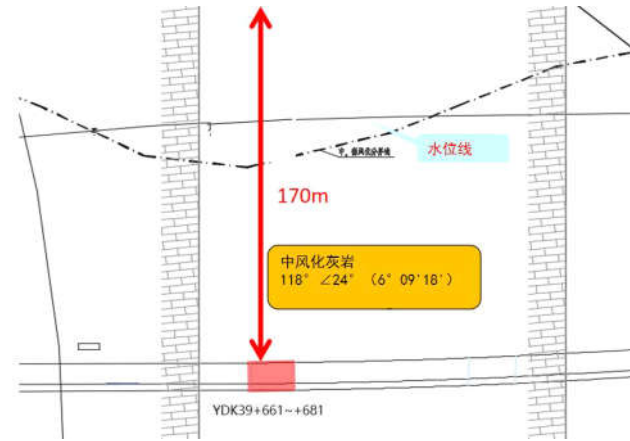


图1 隧道地质剖面图

2 监测方案设计

2.1 监测网的布设

本次监测对象为病害区段YDK39+661~YDK39+681范围，监测点布设范围覆盖本病害区段并两端各超出30m，监测范围长约105m，采用自动化监测与人工监测相结合的监测方式。

1) 监测基准点布设

监测基准网由平面控制基准点和高程控制基准点组成,其中,平面控制基准点采用本隧道病害区段50m范围外已布设的CPⅢ点作为工作基点,高程控制基准点采用隧道病害区段50m范围范围外运营监测基准点作为工作基点。

2) 变形监测断面布设

本病害区段范围监测点断面均按照5m间距布设5个监测断面,在超出该区域大小里程分别按照5m、10m、15m、20m的间距布设监测断面。每个监测断面设置6个监测点,其中隧道顶部布设1个人工监测点,隧道侧壁布设2个人工监测点、1个自动化监测点(收敛监测点),道床布设1个人工监测点和1个自动化监测点,如图2所示。

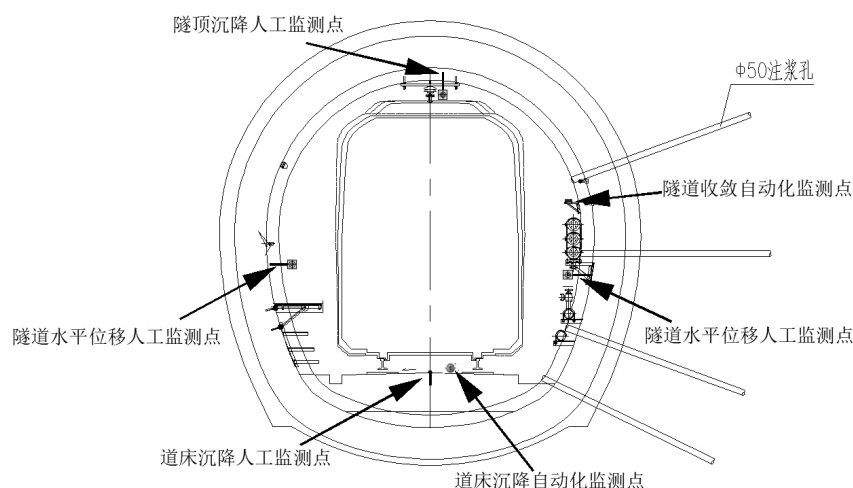


图2 隧道结构监测点布置剖面(断面)图

2.2 监测预警

为了及时发现病害区段隧道的变形异常情况,设定了监测项目报警的判定标准。监测项目的报警值采用“累计变化”和“日变化量”作为双控指标,监测报警值详细参数值见表1。

表1 各监测项目监测报警值一览表

序号	监测项目	报警值	
		日变化量 (mm/d)	累计变化 (mm)
1	道床上浮	3	1
2	道床沉降	5	2
3	隧顶沉降	3	3
4	隧道收敛	3	3
5	隧道水平位移	3	3

2.3 监测数据采集

监测网布设完成后,开展自动化监测设备的测试和监测基准网的测量。平面控制网测量以本病害区段两端车站CPⅢ点作为基准点,与病害区段附近的CPⅢ点进行联测;高程控制测量以距本病害区间段较近一侧的车站地面二等水准控制点作为起算点,通过引测至病害区段范围附近的工作基点。

1) 自动化监测数据采集:静力水准起算点以病害区段右线YDK39+661~YDK39+681两侧50m范围外的工作基点作为起算点,自动化测量每个点的相对变化值;隧道

结构净空收敛采用激光测距仪进行量测,数据采集频率为1次1天。

2) 人工监测数据采集:隧道水平位移及结构沉降测量以CPⅢ点作为后视点,采用“全圆测回法”逐一照准每个测点及CPⅢ点;道床沉降以病害区段范围外的工作基点作为起算点,采用二等水准联测,测量每个道床沉降监测点;人工监测数据采集频率设置为1周测量1次。

3 变形监测数据分析

本文采集了病害区段从2021年11月到2022年12月的观测数据,观测周期横跨了一个完整的自然年,旨在全面了解岩溶区域隧道结构一年中的变化情况。鉴于列车运行可能对自动化监测设备产生干扰,因此监测数据是在列车停运后采集的稳定观测值。

1) 道床沉降监测

通过对比自动化监测数据与人工监测数据,自动化监测与人工监测的数据累计变化趋势整体表现一致,见图3(a)、图3(b);2022年5月6日里程YDC39+670~YDC39+685范围的道床出现上抬,较2022年5月5日最大上抬33mm,且里程YDC39+675~YDC39+685范围最为明显,日变化量和累计变化均超出红色监测预警指标,见图3(c)。5月6日-5月12日道床明显下沉,后转为持续缓慢下沉状态,见图3(a)。由此,道床底部衬砌可能存在渗水通道,雨季降水后地下水得到充分补

充，岩溶裂隙水水压加大，造成道床结构局部上抬。

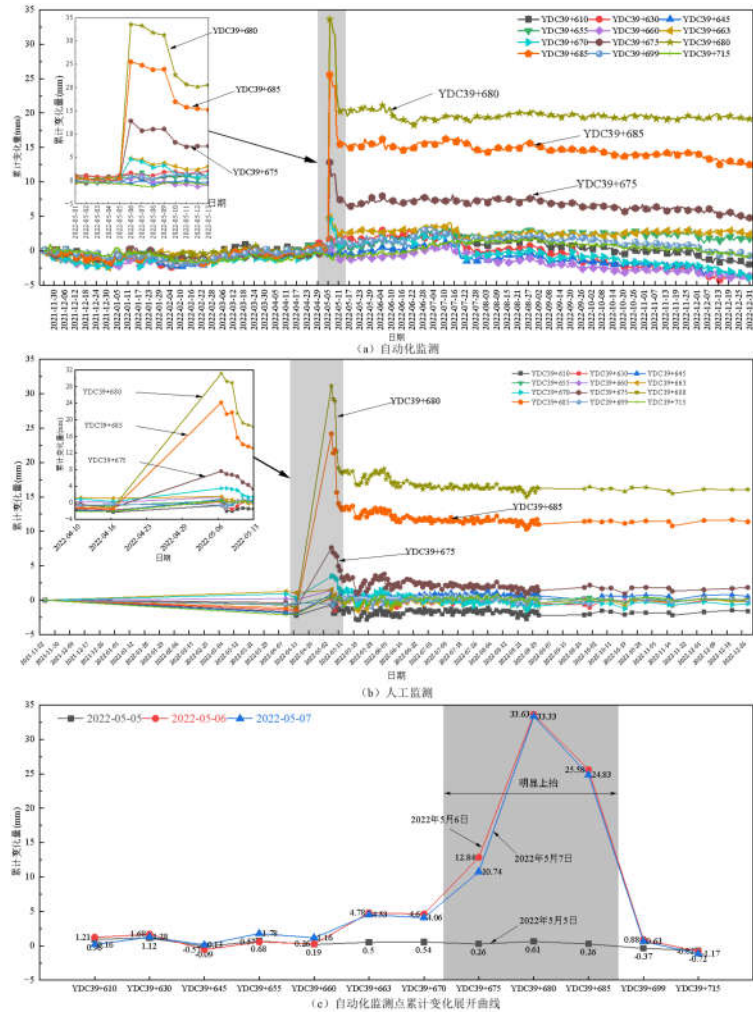


图3 道床沉降累计变化时间序列图

2) 隧道收敛监测

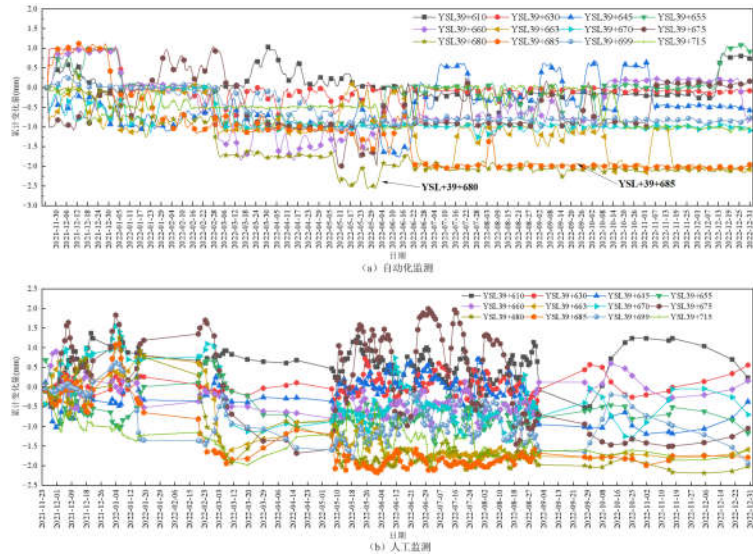


图4 隧道收敛累计变化时间序列图

自动化监测设备位置及观测时间相对固定,人工监测受实际条件约束无法连续固定观测时间;隧道收敛自动化监测数据和人工监测数据均未出现明显突变情况,未出现监测报警情况;自动化监测数据阶段性平稳状态,人工监测数据呈现波动无序状态,自动化监测较人工监测具有较好的观测稳定性,见图4(a)、图4(b)。隧道净空收敛的年度变化幅度较小,且对雨季地下水位波动的敏感性较低。

3) 隧顶沉降监测

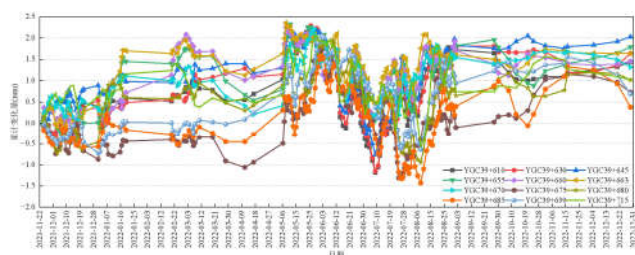


图5 隧顶沉降累计变化时间序列图

隧顶沉降采用人工监测方法,本病害段隧顶部结构随时间变化整体呈现波动变化,6月以前隧顶缓慢上抬,6月至9月期间,整体呈缓慢的“V”型变化,9月至12月趋于平缓波动变化,期间隧顶监测数据累计变化及日变化量均未超过监测预警值,见图5。因此,隧道顶部结构在雨季地下水作用下表现出一定的形变,然而该形变幅度较小,可不予考虑。

4) 隧道水平位移监测

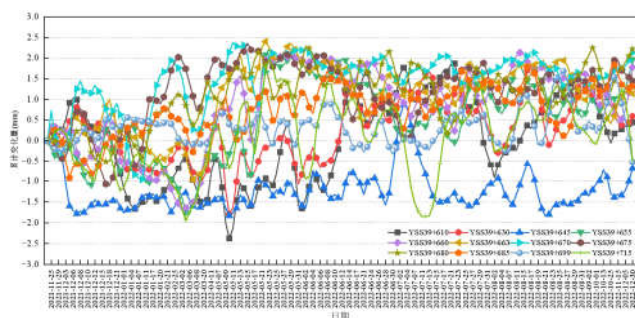


图6 隧道水平位移累计变化时间序列图

本病害段隧道水平位移监测点整体呈波动变化,最大累计变化及日变化量均未超过 $\pm 2.5\text{mm}$,6月-9月雨季期间监测数据显示无明显突变情况,且未触发监测预警,见图6。由此,全年隧道结构水平方向受地下水的影响可忽略。

4 结束语

本研究通过对岩溶地区城市运营隧道病害区域的结构变形监测数据分析,得出以下结论:

1) 在岩溶发育区域开展隧道运营期持续监测具有显著必要性。特殊地质环境中的溶洞、裂隙及地下水动态作用易诱发结构非均匀变形,通过自动化实时监测可有效捕捉毫米级位移变化,建立结构健康状态与外部环境响应的关联模型,为隧道安全运营提供动态预警阈值。

2) 监测数据表明,岩溶区隧道顶拱及侧墙受地下水侵蚀作用的影响程度相对有限,而道床结构在既有施工缺陷区域则呈现出显著差异性沉降特征,局部上抬量达33mm,印证了地下水渗流对道床混凝土基底作用的空间选择性,建议将道床接缝、施工冷缝等薄弱部位列为重点监测对象。

3) 对比分析揭示,自动化监测系统在数据采集的连续性和稳定性方面相较于传统的人工监测方法具有显著优势。特别是在溶洞发育区域的突发渗水或涌水情况下,其动态响应时间可以根据需求进一步缩短,从而避免了人工监测所固有的时效滞后和数据断层问题。

4) 建议建立“监测预警-风险评估-自适应处治”的递阶决策框架,以早期识别潜在病害区域,并及时实施加固与防水措施,从而为岩溶区隧道的全寿命周期健康管理提供一个集实时监控与预测性分析于一体的解决方案。

参考文献

- [1]蒋英礼.运营岩溶隧道水害机理与长期安全性评价[D].广州大学,2024
- [2]陈湘生,徐志豪,包小华,等.隧道病害监测检测技术研究现状概述[J].隧道与地下工程灾害防治,2020,2(03):1-12.
- [3]廖海山,李盈洲.自动变形监测系统在运营地铁隧道监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2021,44(02):193-195+198.
- [4]张文静.静力水准自动化监测在运营地铁隧道的应用研究[J].天津建设科技,2024,34(02):1-4.
- [5]石勇,易佳,熊桂开,等.基于多源监测传感设备的运营轨道隧道安全分析[J].测绘通报,2024,(S2):7-11.
- [6]汪莹,宋小庆,王飞,等.基于连续小波—互相关分析的降雨—地下水水位动态响应特征研究——以贵阳岩溶盆地为例[J].中国岩溶,2024,43(04):843-853.