

自动化与人工复核相结合的隧道施工期地表变形监测方法研究

李彪

中铁十四局集团第三工程有限公司 山东 济南 250399

摘要:我国城市地下空间开发强度增大,新建隧道下穿既有建(构)筑物等的情况愈发普遍,精准高效的变形监测是保障施工安全与周边稳定的核心手段。本文以新建铜吉铁路铜岩隧道下穿地表建(构)筑物工程为背景,阐述“自动化监测为主、人工复核为辅”的综合监测方法体系。该体系融合北斗/GNSS高精度定位、静力水准自动化沉降监测等多种技术,详细论述了各类自动化监测点布设原则、安装工艺与技术要求,重点分析人工辅助监测在控制网建立等方面的关键作用。通过规范监测数据成果管理、预警阈值设定等,构建闭环、动态、智能的安全监控系统。研究表明,该模式可全天候、高频率、毫米级实时监控施工扰动区域,克服单一手段局限,提升数据可靠性与决策科学性,为类似工程提供技术范式。

关键词:隧道工程;地表变形监测;自动化监测;人工复核;静力水准仪

引言

进入21世纪,我国高速铁路、城市轨道交通网络快速发展,大量新建线路需穿越城市核心区等,采用矿山法或新奥法施工的隧道开挖会引起围岩应力重分布,导致地层损失和地表沉降,威胁上方各类设施,可能引发灾难性事故。传统地表变形监测依赖人工定期观测,虽精度可靠,但存在监测频率低,难以捕捉瞬时或快速变形;作业效率低下,在复杂或危险区域作业困难且存在安全风险;数据处理滞后,无法满足“实时感知、即时预警”需求等短板。近年来,自动化监测技术因能实现无人值守、连续采集等优势在土木工程领域广泛应用,但长期稳定性与绝对精度仍需校验^[1]。所以,构建“自动化监测为主、人工复核为辅”的综合性监测体系是必然选择,本文依托相关方案,深入探讨该综合监测方法的具体实施路径等。

1 工程概况

新建铜吉铁路铜岩隧道位于贵州省铜仁市境内,是一条重要的区域性铁路联络线。该隧道在施工过程中,需下穿铜仁市第三人民医院、铜仁职业技术学院等人口密集的公共建筑群,以及城市主干道、高速公路、密集的市政管网(包括给水、排水、燃气、电力、通信等)。隧道埋深相对较浅,且穿越区域地质条件复杂,局部地段存在软弱夹层和破碎带。此外,隧道部分区段采用控制爆破法开挖,爆破振动对上方既有结构物构成了额外的动态荷载风险。

2 综合监测体系总体架构

为应对上述挑战,本工程构建了“双轨并行、互为验证”的综合监测体系。该体系由两大核心支柱构成:

2.1 自动化监测主轨

作为日常监控的主体,负责对所有关键区域进行7×24小时不间断、高频次的数据采集。它由多个专业子系统组成,包括道路与管线沉降监测子系统、边坡水平位移监测子系统、建筑物沉降与裂缝监测子系统、爆破振动监测子系统等。所有子系统的数通过4G/5G或光纤网络实时汇聚至云端数据中心,由专业的数据处理平台进行存储、分析、可视化展示和自动预警。

2.2 人工辅助监测副轨

作为对自动化监测结果的周期性校验和补充,主要用于建立高精度的外部控制基准、复核自动化测点的长期稳定性、以及对自动化系统报警的异常点进行现场核实。该轨道采用高精度电子水准仪、测量机器人(自动全站仪)等设备,严格按照国家二等变形测量规范进行作业。

两轨之间通过数据比对与分析环节紧密耦合。当人工复核数据与自动化数据出现系统性偏差时,可及时发现并排除自动化设备的潜在故障;反之,自动化数据的高频特性也能为人工监测提供重点关注区域,优化其作业计划。这种双轨制设计,从根本上保证了整个监测体系的鲁棒性和可信度。

3 自动化监测关键技术与实施

3.1 道路与管线竖向位移自动化监测

3.1.1 道路沉降监测

对于下穿高速公路及城市主干道的路段,采用基于测量机器人的自动化沉降监测方法。沿隧道中线方向,监测点间距为2~5米,并在中线附近适当加密。测点优先布设于路肩或绿化带,以减少对交通的影响。高速公路在路肩处人工开挖约30cm见方的基坑,埋入钢管作为连接件,用水泥砂浆回填固定。待凝固后,将带有小棱镜的强制对中装置固定于钢管顶部。城市道路破除对应位置的整块路缘石,替换为内部预留孔洞的预制混凝土块^[2]。在孔洞内钻孔,埋设 $\Phi 28\text{mm}$ 钢筋并与小棱镜焊接,确保其与地面密贴。最后安装带保护钢罩的棱镜,并修复路面。在施工影响范围外的稳定构筑物上或独立设置观测墩。观测墩高2~3米,基础牢固,墩身采用内灌混凝土的钢管,确保其自身稳定性不受施工干扰。

3.1.2 管线竖向位移监测

由于地下管线通常不具备直接安装监测设备的条件,本方案采用间接监测法。监测点间距5~15米,重点布设在管线节点、转角、三通、阀门井等应力集中部位,以及预测变形较大的区域。直接法(条件允许时)通过钻孔或探挖至管线顶部或侧面,埋设直径 $\geq 18\text{mm}$ 的金属测杆引至地面。测杆顶端焊接棱镜杆,并用PVC管包裹,管内回填砂以隔绝外界扰动。间接法(主路等不便开挖区域)直接在管线正上方的地表设置沉降监测点,通过监测地表沉降来间接推算管线的变形。此方法要求精确探明管线位置,确保测点与管线的空间对应关系准确无误。

3.2 边坡水平位移自动化监测

本工程采用单北斗(GNSS)高精度定位技术对道路边坡进行水平位移自动化监测。在测区内布设1台北斗基准站和若干台北斗监测站(观测站)。基准站和监测站通过天线实时接收北斗卫星信号,并通过4G/5G网络将原始观测数据发送至控制中心。控制中心的高精度数据处理软件利用差分算法,解算出各监测站相对于基准站的三维坐标(精度可达毫米级)。通过与初始坐标的对比,即可获得各监测点的实时位移量。基准站布设要求距离监测区域不超过1公里,以保证定位精度。基础稳固,优选基岩或冻土层以下2米处。视野开阔,10°以上无遮挡,远离大功率无线电发射源(>200m)、高压线(>50m)及大面积水域,以减少信号干扰和多路径效应。监测点(观测站)布设要求与基准站类似,视野开阔(15°以上无遮挡),远离干扰源。设备安装于浇筑好的混凝土基础上,通过螺母和垫片牢固固定。为保护设备,加装自动升降防护罩、外围护栏及监控摄像头。

3.3 建筑物沉降及裂缝自动化监测

3.3.1 建筑物沉降监测

采用静力水准仪自动化系统对下穿的医院、学校等重要建筑物进行沉降监测。静力水准系统由一个储液罐(作为高程基准)、多个液位传感器(安装在各监测点)以及连通它们的液管和通气管组成。基于连通器原理,各传感器处的液面高程相同。当某监测点发生沉降时,该点传感器处的液柱高度发生变化,压力传感器将此变化转换为电信号,从而精确计算出该点相对于基准点的沉降量。布设要求监测点布置在建筑物四角、大转角及外墙每10~15米处。储液罐(基准点)必须设置在绝对稳定的区域。各传感器与储液罐液面的高度差需控制在300mm至传感器量程的2/3以内。通信线缆采用4芯数据线,需核算压降,确保末端传感器供电电压不低于DC9V,必要时采用两端供电。传感器应远离振动源、热源,并避免阳光直射,必要时加装保温棉和保护罩。

3.3.2 建筑物裂缝监测

对于既有裂缝或施工诱发的新裂缝,采用人工监测方法。记录裂缝的位置、走向、长度、宽度,必要时监测深度。在裂缝两侧粘贴或埋设标志,使用精度不低于0.1mm的游标卡尺直接量测裂缝宽度。长度和深度量测精度不低于1.0mm。所有裂缝在施工前需统一编号、建档,记录初始状态。

3.4 爆破振动自动化监测

针对采用爆破法开挖的区段,部署智能化爆破振动监测系统。系统由云振动数据采集箱、三向振动速度传感器、公网服务器数据中心及客户端软件组成。传感器固定在需保护的建筑物基础或立柱上。系统可预设触发电平,当爆破产生的振动波到达时,自动触发采集,并将完整的三向振动波形数字化后,通过4G/5G网络实时上传至云服务器。技术人员可在远程终端实时查看数据、分析振动峰值、主频等参数。布设要点为测点优先布置在下穿医院、学校段隧道中线正上方,并随掌子面推进动态调整^[3]。在覆盖层薄、建筑物质量差的地段重点加密。传感器X轴需朝向预计的爆心方向,水平安装,并用膨胀螺丝牢固固定于平整墙面。户外必须安装保护罩,并考虑备用电源(如太阳能板)。

4 人工辅助监测体系构建

尽管自动化监测提供了海量数据,但其绝对精度和长期稳定性仍需通过高精度的人工测量进行周期性检核。

4.1 沉降控制网(垂直位移基准网)

目的是为道路、管线、建筑物的人工沉降复核提供高程基准。按照《建筑变形测量规程》(JGJ8-2016)二等垂直位移监测网的要求进行观测。布设方法:在施工影响范围之外,每个独立测区至少埋设3个深埋式基准点。

基准点采用深埋标石，确保其长期稳定性。通过闭合或附合水准路线，将工作基点与基准点联测。使用高精度电子水准仪，对各自动化沉降监测点进行定期（如每周或每两周）的水准测量，获取其绝对高程，用以校准静力水准或测量机器人系统的相对沉降数据。

4.2 水平位移基准网

目的是为边坡及部分结构物的水平位移人工复核提供平面基准。采用导线网形式，起始并闭合于施工精密导线上。布设方法：设置3个水平基准点和2个工作基点，合理分布于场地周边。使用测量机器人（自动全站仪），采用极坐标法对各北斗监测点或其他水平位移测点进行定期观测。将人工观测得到的坐标与同期北斗自动化监测数据进行比对，验证其一致性。

5 数据管理、预警与信息反馈

5.1 监测成果与报告体系

建立了分级、定时的成果报送制度：（1）日报：每日生成，包含累计变形量、日变形速率等关键指标。遇变形加速或恶劣天气时，增加分析与建议。当日通过信息平台推送。（2）周报/月报：每周五、每月25日前提交。内容包括监测项目进展、施工工况、时程曲线、趋势预报、超限点分析及建议、测点布置图更新等。（3）最终成果报告：项目结束后两个月内提交，全面总结监测工作、数据分析、变形规律及与工程进度的关联。

5.2 预警阈值与判据

预警体系基于双重判据：（1）变形量阈值：依据《建筑地基基础设计规范》等地基变形允许值，并取其2/3作为预警值。例如，对于中压缩性土上的砌体结构，局部倾斜允许值为0.002，预警值即为0.0013。（2）变形速率阈值：根据位移速率判别稳定性。一般认为，当日变形速率小于0.2mm/d时，可视为基本稳定。若速率持续增大，则需预警。

5.3 信息反馈流程

建立了高效的闭环反馈机制（见图1）：（1）数据采集与传输：自动化设备实时采集数据并上传。（2）平台分析与预警：数据中心自动分析，一旦超限，立即触发预警。（3）即时通知：通过短信、邮件、平台弹窗等方式，第一时间通知建设、施工、设计、监理四方。（4）日报/周

报/月报：定期向各方报送详细分析报告。（5）工程对策：相关单位根据预警信息和分析报告，迅速研究并采取调整施工参数（如减小进尺、加强支护、注浆加固等）或应急措施，确保安全。

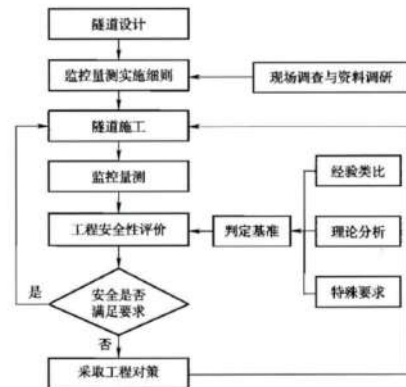


图1：监控量测信息反馈程序框图

结语

本文以铜吉铁路铜岩隧道工程为例，阐述了一套“自动化监测为主、人工复核为辅”的隧道施工期地表变形综合监测方法。该方法整合北斗/GNSS、静力水准等多种先进技术，辅以高精度人工水准与导线测量，构建了立体化监控网络。实践表明，该体系优势显著：自动化系统实现全天候、高频次监控，为风险预警争取时间；人工校验确保数据真实可信；定制化方案适应复杂环境，保障监测人员安全；规范化流程让监测数据成为决策依据，实现从“被动响应”到“主动防控”的转变。这一模式代表了现代隧道工程安全监控发展方向，保障了铜岩隧道施工安全，为类似工程提供经验与范本，且随着人工智能等技术的融入，其智能化和预测预警能力将持续提升。

参考文献

[1]胡磊.隧道施工中地表沉降变形监测及数值模拟研究[J].江西建材,2024,(02):74-76.
 [2]张轩煜,施成华,孙晓贺,等.基于随机场理论的顶管隧道施工地表变形特性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(06):2174-2189.
 [3]蔺文峰,董禹江.地铁隧道施工对地表沉降变形的影响分析[J].中国新技术新产品,2024,(16):120-122.