

基于分布式光纤传感技术的隧道监控量测与信息化智能系统的研究

王恬依 王冰如 陈骏 毛琦
(金华职业技术学院, 浙江 金华 321000)

摘要 隧道工程中监控量测工作是其必然程序,但其中存在监测项目多、人工监测效率低、数据处理困难等问题,需要一种信息化智能监测方式来及时诊断与防治。本文介绍了隧道监控量测现有技术及其问题,引出分布式光纤传感技术的优点,提出一种符合隧道施工环境的敷设方案,并结合智能监测、大数据分析、信息化管理的趋势进行展望。

关键词 隧道工程 监控量测 分布式光纤

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)10-0025-03

我国隧道开发体量巨大,据统计,全国隧道长度以每年1100千米的增幅快速增长。但公路隧道工程的施工危险性较大,一旦发生坍塌事故,容易造成群死群伤和巨大社会影响,如2021年全国应急救援、生产安全事故十大典型案例中,就包含广东省珠海市石泉山隧道事故,该事故造成14人死亡、上千万经济损失。事故发生原因是当隧道开挖下穿水库时遭遇富水花岗岩风化深槽,因监测预警不及时、工程措施不得当导致右线隧道拱顶坍塌透水。

确保隧道安全、精准监控量测日益成为隧道工程发展和施工中的一个重要议题,2022年出台的国家应急体系规划中明确要求“扎实做好安全生产、防灾减灾救灾等工作,积极推进应急管理体系和能力现代化^[1]”,特别提出强化风险监测预警预报,利用技术提高灾害事故感知能力;加强隐患治理,完善安全隐患分级分类排查治理标准;搭建科技创新平台,健全主动保障型安全技术支持体系。隧道安全与其自身结构、施工质量、地质情况、气候情况的影响息息相关,在建设和使用中可能出现不均匀沉降、结构错位、裂缝、渗漏水、火灾、地震等各类病害与突发事故,并且病害交杂或恶化可能会再引发其他次生病害,因而隧道监测预警的内容复杂、仪器繁多,日常监测任务重、资料整理保存难度大,隧道监控量测亟需一种常态化、低成本、高精度、智能化解决方案。

1 隧道监控量测项目及安防需求概述

隧道监控量测是针对围岩和支护的探测、分析、研判和预警,是判断围岩稳定性、保证支护合理性、

降低灾害发生概率、减少灾害损失的必然工序与有力手段。由于隧道施工条件与过程的特殊性,目前隧道监控量测呈现项目多元、方法多样的特点。

1.1 隧道施工监控量测项目

隧道监控量测项目细分可多达十余项,按照指标重要性,可将量测项目分为必测项目与选测项目。必测项目对监视围岩稳定、指导设计施工有巨大作用,选测项目数量多、测量难度大、造价较高,但对更深入的围岩稳定和喷锚支护效果有更精细的认定。

1. 必测项目。交通运输部发布的《公路隧道施工技术规范》明确指出必测项目包括拱顶下沉、地表下沉、拱脚下沉、周边位移、洞内外观察^[2]。拱顶下沉可采用水准仪、全站仪和钢尺进行人工测量,要求每5米至100米的断面布置一个测点,项目精度根据预留变形量区别,达到0.5毫米至1毫米。地表下沉与拱脚下沉在软弱破碎的围岩施工中需进行重点监测,测点以隧道中桩作为对称轴对称布置,越靠近轴线测点布置越密集。周边位移要求每5米至100米设置一个断面,每个断面2至3对测点,精度要求同拱顶下沉项目。在洞口段、浅埋段需布置不少于2个断面,每个断面不少于3个测点。精度要求0.5毫米。洞内外观察采用地质罗盘和现场观测法,一般在开挖及初期支护后进行。

2. 选测项目。包括锚杆轴力、钢支撑内力、围岩压力、围岩弹性波速、衬砌内应力等十余项,不同项目可根据自身围岩级别、施工方法与合同特殊约定等,使用钢筋计、位移计、渗压计、声波仪等,在特定情况、特定位置进行测量。

1.2 隧道安全防控需求

1. 全程监测自动预警。《公路隧道施工技术规范》规定各监控量测项目的测量频率,人工测量的情况下每天至少1至2次,后续叠加人工分析计算与报告生成。但从更完善、更高效、更准确的角度出发,自隧道爆破初始至运营通车后期,全寿命周期、全过程、全自动的监测拥有广阔的市场。

2. 自动生成应急预案。隧道监控量测旨在发现问题,及时找补,通常由工程师形成补救方案,但存在突发大型问题应急不到位的可能性。因此安全防控应将应急事件根据其严重性、紧急性、可能造成的人员伤亡与财产损失程度分级,不同的等级和事件情况采取分级响应的方式,系统自动生成应急处理办法。

2 隧道监控量测智能技术及存在的问题

2.1 常见隧道监控量测智能技术

随着科技进步,隧道监控量测技术呈现出智能化、多元化的趋势,主流智能隧道监控量测技术主要包括以下几类:

1. 探地雷达技术。常用于地下工程施工,利用电磁波反射原理,检测不同介质间产生反射波和折射波,通过分析反射波和折射波的振幅和相位可知隧道衬砌是否产生裂缝、孔洞、位移等质量问题^[3]。但是探地雷达技术的探测深度一般小于50米,并且数据分析工作还依赖于人工判断,数据处理能力还需升级。

2. 三维激光扫描技术。依托于激光测距原理,对隧道整体扫描形成一个三维立体模型^[4]。通过隧道原模型与实时模型的对比来量化并监测隧道变形、裂缝、渗漏水等病害。该技术能有效克服隧道施工环境昏暗、人眼观测不准的问题,但是需要庞大数据支持,对数据处理的算法和设备要求都比较高,目前无法实现设备自动化移动巡检。

3. 红外探测技术。利用隧道环境的热辐射来形成红外热成像,目前在隧道工程中多用于水灾和火灾的监测^[5]。但当环境温度差异过小时,该技术生成的图像对比难度较大,且此昂贵的红外成像设备在运输和使用环节产生的成本较高,应用场景限制较多。

4. 冲击回波技术。利用仪器敲击结构表面,通过瞬态冲击产生应力波,应力波在结构内部传播时会因遇到内部缺陷而产生波频变化。该技术检测精度高,受结构水分和钢筋的影响小,可以在混凝土养护时便开展监测工作,但仅能检测混凝土结构内部空腔这一种病害,不能全面覆盖隧道监控量测项目。

2.2 智能隧道监控量测存在的问题

1. 监测项目不够全面。尽管目前隧道监控量测技术储备丰富、测量准确度高,但实际情况下鲜少有项目能满足每条隧道配备一套完整设备的需求,因此一般隧道项目还是以使用水准仪、全站仪等设备的人工测量为主。

2. 施工过程监测困难。隧道施工是一个不断向山体内部循环施工的过程,山体爆破和出碴工作对各类监测技术的安装要求和应变效率要求较高。且在施工情况下,如探地雷达、红外探测等技术容易因原先设定测点的破坏和改变,以及施工过程中产生的强烈震动和高温扰动等原因产生误报。

3. 技术应用成本较高。对于单一隧道施工项目而言,智能监测设备在平时保养、故障维修、运输损耗等方面产生的成本费用过高,项目成本无法承担。尽管一些监控量测技术可以车载方式按照项目需求分阶段进行,但是仍受限于隧道施工环境条件和自然条件,对于远离城市和已建道路的隧道工程,仍然存在通行阻碍大、安装不便、使用成本高的问题。

3 分布式光纤隧道监测系统探究

3.1 光纤材料特点

1. 耐久性。光纤由石英玻璃组成,具有耐水、耐腐蚀、耐高温等特点,耐久性强。隧道内部施工环境通常潮湿阴暗,光纤比金属等材质的传感器更适应施工现场条件,其耐久性能可靠支持隧道工程在施工阶段和运营阶段的全生命周期监测。

2. 抗干扰性。光纤是一种绝缘材料,抗干扰性强。施工现场持续受到机械打孔铲土、岩石爆破、意外落石、车辆行驶等物理震动事件干扰,光纤能有效杜绝电磁干扰和物理干扰。

3. 易安装性。光纤柔韧纤细,对敷设位置要求不高,无需匹配,安装难度低,若某处材料损坏,可使用光纤熔接机修复并接续使用,无需重新敷设整个系统,能有效降低操作难度和工人施工负担。

4. 支持分布式测量。从光纤起点开始便能准确采集沿线任何点位上振动、温度、应力、损伤等信息^[6]。光纤传感系统敷设可按照监测精度要求可繁可简,光纤交错纵横即可构成监测网,实现全点位监测。

5. 长距离。现有隧道监控量测技术一般依赖于机械或人工布置测量点位,与隧道工程长距离的特性相斥。光纤材料可以通过长距离铺设,无需构成回路,实现长达数十公里的全方位连续监测。

3.2 隧道量测光纤敷设系统

分布式光纤监测技术依托于光纤材料的特性和其适应隧道施工环境的敷设系统,能有效整合隧道监控量测多个核心指标,解决传统监测方式和智能监测技术仍存在的问题,为各类隧道工程的质量检测和健康诊断提供有效的解决方案。

1. 监测系统基本组件。振动监测光缆由光纤外依次包裹防水油膏、PBT充油束管、钢带铠装层、聚乙烯外护套和磷化钢丝加强件组成,外径一般可取6毫米左右,整体仍纤细柔韧易安装。光缆在光纤材料本身的优点上,更具有稳定的机械性能,耐水耐高温耐腐蚀,服务时间长,适用于隧道内各种恶劣条件的施工环境。

2. 隧道监测敷设方案。依托于振动监测光缆、分布式振动解调仪和智能数据处理软件组成。目前的分布式光纤测量应用在其他类型工程项目上的敷设方案一般以直线敷设为主,但此方案不能支持隧道监控量测需要多点位监测网的需求。结合隧道监控量测项目内容及《公路隧道施工技术规范》规定测量要求,为使监测系统随着隧道向内挖深可持续工作而不受施工干扰,将光缆在衬砌浇筑之前沿着洞壁间隔一定距离以螺旋状固定在土壤或岩壁上,达到隧道监测网络全覆盖的目的。根据光纤分布式测量无需构成回路的特点,该方案最大程度上节省了光纤原材料的浪费以及工程施工难度,保证隧道监控量测工作简洁清晰。在隧道洞外,以分布式振动解调仪连接光缆起点,保证信号传输顺畅,采用“云+边+端”的模式结合数字化技术,融入物联网大数据处理,研发专有识别算法进行边端计算,达到数据处理过滤、实时上传功能。

3.3 智能光纤监测管理系统

为解决隧道监控量测数据处理慢、纸质资料多等问题,以及响应隧道安全防控要求的需求,推广包含系统集成、自动控制 and 病害预警等功能的,基于分布式光纤传感技术的隧道智能监测与信息管理系统,既是隧道施工客观急需,也是数字化改革发展的必然趋势。

1. 功能集成,系统控制。隧道智能监测系统可以在隧道施工现场不间断形成监测数据,数据处理器上传云端,将隧道结构形变、裂缝坍塌、温度火灾、水灾等灾害的监测预警功能一体集成,通过设备与光纤连接,实时获取光纤传感器中反馈的光信号变化,对数据进行读取、分析、预警、报警等一系列操作,实现隧道结构形变、裂缝坍塌、温度火灾智能化监测预警。同时通过智能算法排除施工中落石、机械运作、车辆

行驶等波形干扰,工作人员在末端系统远程监管数据,数据异常则自动弹窗提醒,达到自动智能监测的目的。

2. 数字化整合,无纸化竣工。智能监测系统可将监控量测原始资料在系统内留存,包含数据记录、误差判断、分析类比、结论对策等,一方面通过留存历史数据,为优化算法提供数据支撑;另一方面精简过程资料,推动无纸化办公进程。同时,隧道智能监测系统响应当代数字化改革浪潮,预设数字政府对场景应用接口,待系统成熟后接入数字政府重大应用,如“浙里城市生命线及地下空间综合治理应用”“浙里工程建设现场管控应用”等,将相关监测数据实时分享,为政府侧对山体隧道工程全生命周期健康监测、预警警告、处置跟踪的闭环管理需求提供精准服务,实现远程监管,保证数据归集。

4 结语

我国隧道建设与运营市场庞大,监控量测作为隧道施工的必然工序,需要更智能化、简洁高效、造价更低的数据诊断和病害识别方法。分布式光纤传感技术能在光纤沿线获得时间和空间上的连续分布信息,耐水耐高温耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高等特点均完美契合隧道监控量测工作要求。相应智能监测管理系统的开发可以满足安全防控要求的同时使隧道监控量测工作更智能、更高效,对隧道施工进行全面、全过程监测,提高病害发现率,制定完善精准的应急预案,数字化体系符合现下的时代要求,具有广阔的应用市场与未来前景。

参考文献:

- [1] “十四五”国家应急体系规划[N].人民日报,2022-02-15(001).
- [2] 交通运输部.公路隧道施工技术规范JTG/T3660-2020[S].2020-08-01.
- [3] 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,2020,02(03):1-12.
- [4] 许潜金.三维激光扫描技术在地形地质测量中的应用[J].中国金属通报,2021(02):223-224.
- [5] 李意,雷志勇,李青松.红外探测技术的应用与发展[J].国外电子测量技术,2018,37(02):80-83.
- [6] 施斌,徐学军,王楠,等.隧道健康诊断BOTDR分布式光纤应变监测技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(15):2622-2628.