

巴音沟隧道施工监测技术与难点研究

肖成帅, 卢发亮*

山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为在隧道工程施工期及运营初期精确掌握围岩与支护结构的动态响应、及时识别潜在失稳风险、验证设计合理性并指导安全施工,避免因变形失控、突发性地质灾害导致工程事故、工期延误和成本剧增,采用系统化、高精度的现场监测方法,采用全站仪进行隧道拱顶沉降和周边收敛、地表沉降的连续非接触式测量,精确捕捉空间变形;通过自动化数据采集系统与专业分析软件,对海量监测数据进行实时传输、处理、可视化与预警分析。监测数据结果表明:隧道开挖后围岩变形随施工推进从急剧变化到缓慢变化再到基本稳定的三阶段变化规律,验证设计支护参数在大部分区段的适用性,但在特定软弱围岩区段设计支护强度不足。对隧道监测测点易失效、施工交叉干扰大、环境潮湿粉尘多等问题,采取加固保护测点、优化工序减少干扰、选用耐环境设备并加强校准等措施,同时建立实时系统进行动态分析与预警,确保数据可靠并指导施工安全。

关键词:隧道工程;监测;拱顶沉降;周边收敛;地表沉降

中图分类号:U455

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2026)01-0063-10

引用格式:肖成帅,卢发亮.巴音沟隧道施工监测技术与难点研究[J].山东交通学院学报,2026,34(1):63-72.

XIAO Chengshuai, LU Faliang. Construction monitoring measurement technology and challenges of Bayingou Tunnel[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1): 63-72.

0 引言

在现代交通基础设施建设中,隧道工程作为关键组成部分,其安全性和稳定性直接关系到整个工程的质量与运营安全^[1]。隧道监测作为保障隧道工程安全的重要手段,通过实时监测与分析隧道施工及运营过程中的各种数据,及时掌握隧道结构的状态变化,为工程决策提供科学依据。

隧道监测的核心目的是保障隧道施工与运营的安全可靠,需掌握围岩和支护工作状态,判断围岩稳定性、支护结构合理性及隧道整体安全性,确定二次衬砌合理施作时间,为施工中调整围岩级别、变更设计方案及参数、优化施工方案与工艺提供依据,更好地服务于设计和施工管理。隧道监测贯穿全生命周期,施工阶段通过监测围岩变形、支护结构应力等关键数据,可第一时间预警潜在失稳风险,为人员撤离和应急处置赢得时间,直接守护生命财产安全,同时为动态优化施工方案提供科学依据,确保施工安全、高效、经济;运营阶段则能实时掌握结构健康状况,及时发现衬砌裂损、渗漏水等病害,为维护管理提供指导,延长隧道使用寿命,保障长期稳定运行^[2-5]。监测数据还是验证设计合理性、评估支护体系长期可靠性的重要依据,是工程质量验收和运营期结构健康诊断的基石,能精准识别地质突变、地下水活动等灾害隐患,为主动防控提供决策支撑^[6]。监测技术已从传统人工监测向自动化、智能化发展,测量机器人、分布式光纤传感器等设备应用广泛,数字图像处理、物联网监测平台等已投入使用,但复杂地质条件下监测数据准确性与设备稳定性有待提高。在一些受限于当地条件的场景中,仍需依靠人工采用全站仪观测测

收稿日期:2025-07-22

第一作者简介:肖成帅(2001—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为道路交通运输,E-mail:1537534674@qq.com。

*通信作者简介:卢发亮(1972—),男,济南人,教授,硕士研究生导师,工学硕士,主要研究方向为大跨径、特殊结构桥梁分析、设计及加固技术,E-mail:1812845221@qq.com。

点,实现上述监测目标。

为克服施工现场复杂的环境难题,通过人工精准实施隧道监测,提高隧道施工与运营的安全可靠性,本文通过分析现场常见障碍、优化人工量测工艺流程及精度控制方法,采用案例分析与现场实践相结合的方式,以期形成一套高效、可靠的人工监测实施方案,为隧道工程安全提供坚实保障。

1 项目概况

巴音沟隧道位于新疆 S101 延长线(G217 线至 Y096 温泉段),起讫桩号为 K10+845—K11+458,全长 613 m,为单洞隧道,隧道限高 5 m,限宽 10 m,自然通风,采用灯光照明。

巴音沟隧道埋深 2.49~168.00 m,围岩主要由石炭系巴音沟强风化-中风化灰色、灰黑色薄层状凝灰质细砂岩和粉砂岩夹凝灰质泥岩组成。岩体节理裂隙很发育,为破碎-较破碎状态,主要呈裂隙块状结构,为较软岩。隧道深范围内富水性一般,开挖洞体内可能形成滴渗水。隧道围岩划分为 IV2 级、IV3 级、V1 级及 V2 级,围岩稳定性总体较差,隧道进出口边仰坡稳定性均较差。

隧道明洞采用模筑 C30 混凝土;V2 级围岩采用 S5a 级衬砌,初期支护采用径向注浆锚杆、超前注浆小导管周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体,设计二次衬砌为双层钢筋混凝土结构;V1 级围岩采用 S5b 级衬砌,初期支护采用径向注浆锚杆、超前注浆小导管周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体,设计二次衬砌为双层钢筋混凝土结构;IV3 级段围岩采用 S4a 级衬砌,初期支护采用径向水泥砂浆锚杆、超前注浆小导管周壁预注浆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体,设计二次衬砌为混凝土结构;IV2 级围岩采用 S4b 级衬砌,初期支护采用径向水泥砂浆锚杆、超前水泥砂浆锚杆,钢拱支撑配合喷射混凝土形成整体,设计二次衬砌为混凝土结构。隧道地质平面如图 1 所示,纵断面如图 2 所示,隧道围岩分级情况如表 1 所示。



图1 隧道地质平面图

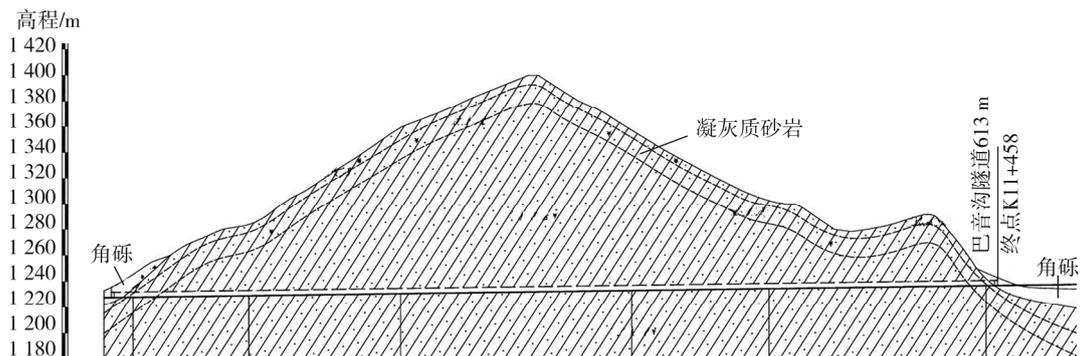


图2 隧道地质纵断面图

表 1 隧道围岩分级情况

起止里程	分段长度/m	围岩名称	围岩级别	影响因素状态
K10+845—K10+860	15	碎石土	V2	围岩浅埋段,自稳能力差
K10+861—K10+940	80	石炭系巴音沟(C2b)薄层状凝灰质细砂岩、粉砂岩夹凝灰质泥岩	V1	围岩深埋段,潮湿或点滴状出水
K10+940—K11+045	105	石炭系巴音沟组(C2b)薄层状凝灰质细砂岩、粉砂岩夹凝灰质泥岩	IV3	围岩深埋段,潮湿或点滴状出水
K11+045—K11+205	160	石炭系巴音沟组(C2b)薄层状凝灰质细砂岩、粉砂岩夹凝灰质泥岩	IV2	围岩深埋段,潮湿或点滴状出水
K11+205—K11+300	95	石炭系巴音沟组(C2b)薄层状凝灰质细砂岩、粉砂岩夹凝灰质泥岩	V3	围岩深埋段,潮湿或点滴状出水
K11+300—K11+450	150	石炭系巴音沟组(C2b)薄层状凝灰质细砂岩、粉砂岩夹凝灰质泥岩	V1	围岩深埋段,潮湿或点滴状出水
K11+045—K11+458	8	碎石土	V2	围岩浅埋段,自稳能力差

2 监测技术的内容

通过实时监测围岩变形、支护受力等参数,可动态掌握隧道结构的稳定性,及时预警塌方、涌水等风险,为调整施工方案提供依据,避免安全事故。同时,能验证设计合理性,优化支护参数,实现经济与安全平衡。监测数据为后续隧道运营维护、同类工程设计施工提供参考,推动隧道工程向信息化、精细化发展,是现代隧道工程不可或缺的关键技术^[7]。监测反馈流程如图 3 所示,安全性评价流程如图 4 所示。

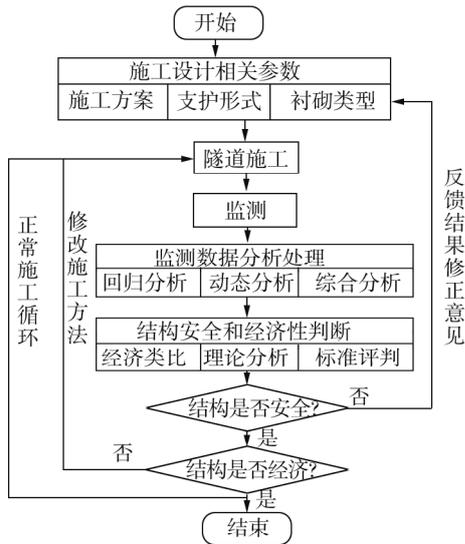


图 3 监测反馈流程

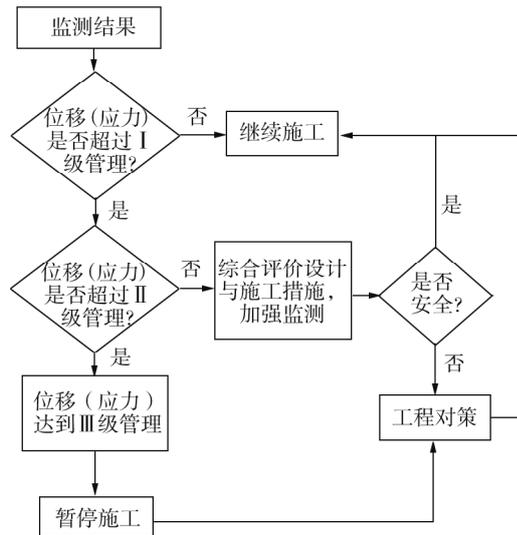


图 4 监测安全性评价流程图

2.1 拱顶沉降和周边收敛

2.1.1 拱顶沉降和周边收敛概述

应将拱顶沉降观测基准点设在距观察点 3 倍洞径以外的稳定点处^[8]。在每个拱顶沉降监测断面拱顶中心或其附近布置 1 个测点,监测时间应延续至拱顶沉降稳定后结束。在每个拱脚沉降监测断面布置 2 个测点,测点应牢固可靠,易于识别并妥善保护。在周边收敛和每个拱顶沉降断面布置 5 个测点,如

图5所示。

根据地质勘探资料, K10+845—K10+940、K11+300—K11+458 为 V 级围岩, 每隔 10 m 布置 1 个监测断面; K10+940—K11+205 为 IV 级围岩, 每隔 20 m 布置 1 个监测断面。

2.1.2 监测频率及方法

各监测断面距开挖面距离分别为 $0 \sim b$ 、 $>b \sim 2b$ 、 $>2b \sim 5b$ 、 $>5b$ (b 为隧道开挖宽度), 监测频率相应为 2 次/d、1 次/d、1 次/(2~3 d)、1 次/(7 d)。

在隧道施工监测中, 采用全站仪观测各点位反射片的操作, 是人工获取围岩及支护结构变形数据的核心环节, 包括以下步骤。

1) 测点与反射片布设

按设计要求在隧道围岩、初期支护表面布设测点, 每个断面布设多个测点(如拱顶、拱腰、边墙位置)。在测点处固定圆形反射片, 与监测面紧密贴合、牢固稳定, 避免因施工振动或外力导致偏移、脱落。

2) 全站仪架设与校准

将全站仪安置在隧道内稳定的基准点或后视点处, 该点位需远离施工振动源, 且能通视大部分监测点。架设仪器后进行对中、整平, 通过后视已知坐标点完成定向校准, 确保测量坐标系与隧道设计坐标系一致, 减少系统误差。

3) 反射片观测

针对每个监测点的反射片, 全站仪发射激光束至反射片表面, 光束经反射后被全站仪接收, 计算光程差, 获取全站仪与反射片间的距离。采用全站仪内置的角度测量系统记录水平角和竖直角, 结合基准点坐标, 自动解算反射片(即监测点)的三维坐标。观测过程中需多次测量取平均值, 消除大气折射、温度变化等环境因素对测量精度的影响, 尤其在隧道内通风不良、湿度较大的环境中, 需缩短观测间隔, 保证数据稳定性。

4) 数据记录与对比分析

每次观测完成后, 记录各监测点的实时坐标, 与前次或初始观测数据对比, 计算沉降, 通过分析沉降变化速率和累计沉降, 判断围岩稳定性及支护结构工作状态, 为后续施工调整提供依据。在整个监测过程需严格遵循测量规范和仪器操作规范, 确保反射片清洁无遮挡, 最大限度减少人工观测误差, 保证量测数据的精准性, 为隧道施工安全提供可靠数据支撑。

2.1.3 监测内容及结论

拱顶沉降和周边位移的测点在同一断面上, 分析 K10+866 断面拱顶沉降和周边位移, 见表 2、3。

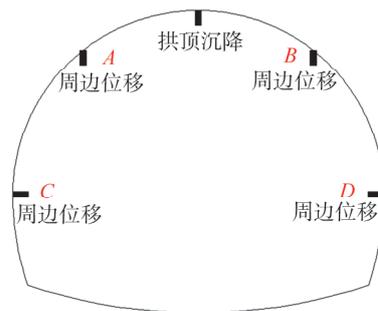


图5 周边收敛和拱顶沉降监测示意图

表2 K10+866 断面拱顶累计沉降及周边累计收敛

单位:mm

监测时刻	拱顶累计沉降	周边累计收敛		监测时刻	拱顶累计沉降	周边累计收敛	
		A-B	C-D			A-B	C-D
2024-09-23T10:00	0	0	0	2024-09-29T17:00	26.6	17.4	21.6
2024-09-23T17:00	4.7	3.1	4.8	2024-09-30T10:00	27.5	17.9	22.1
2024-09-24T10:00	8.9	5.9	7.4	2024-10-01T10:00	28.5	18.5	22.6
2024-09-24T17:00	12.1	8.0	9.1	2024-10-02T10:00	28.9	19.1	23.2
2024-09-25T10:00	15.3	9.8	10.5	2024-10-05T10:00	29.9	19.7	23.8
2024-09-25T17:00	17.6	11.2	13.0	2024-10-08T10:00	30.7	20.1	24.3
2024-09-26T10:00	19.2	12.3	14.2	2024-10-11T10:00	31.4	20.6	24.9
2024-09-26T17:00	20.7	13.2	15.4	2024-10-18T10:00	32.0	21.2	25.4

表 2(续)

单位:mm

监测时刻	拱顶累计沉降	周边累计收敛		监测时刻	拱顶累计沉降	周边累计收敛	
		A-B	C-D			A-B	C-D
2024-09-27T10:00	22.1	13.7	16.7	2024-10-25T10:00	32.5	21.6	26.1
2024-09-27T17:00	23.3	14.6	18.1	2024-11-01T10:00	33.0	22.2	26.6
2024-09-28T10:00	24.4	15.5	19.4	2024-11-08T10:00	33.4	22.7	27.0
2024-09-28T17:00	25.5	16.1	20.4	2024-11-15T10:00	33.8	23.1	27.4
2024-09-29T10:00	26.2	16.9	21.1				

表 3 K10+866 断面拱顶沉降速率及周边收敛速率

单位:mm/d

监测日期	拱顶沉降速率	周边收敛速率		监测日期	拱顶沉降速率	周边收敛速率	
		A-B	C-D			A-B	C-D
2024-09-23	9.4	6.2	9.6	2024-10-02	0.4	0.6	0.6
2024-09-24	7.4	4.9	4.3	2024-10-05	0.3	0.2	0.2
2024-09-25	5.5	3.2	3.9	2024-10-08	0.3	0.1	0.2
2024-09-26	3.1	2.0	3.8	2024-10-11	0.2	0.2	0.2
2024-09-27	2.6	1.4	2.7	2024-10-18	0.1	0.1	0.1
2024-09-28	2.2	1.5	2.3	2024-10-25	0.1	0.1	0.1
2024-09-29	1.1	1.3	1.2	2024-11-01	0.1	0.1	0.1
2024-09-30	0.9	0.5	0.5	2024-11-08	0.1	0.1	0.1
2024-10-01	1.0	0.6	0.5	2024-11-15	0.1	0.1	0.1

由表 2、3 可知:随施工进度推进,变形从急剧变化到缓慢变化再到基本稳定。从开始布置测点到基本稳定约需 50 d, K10+866 断面周边收敛累计 A-B 为 23.1 mm, C-D 为 27.4 mm, 拱顶累计沉降 33.8 mm, 均小于 50.0 mm。各测点变形速率均小于 0.2 mm/d, 围岩基本稳定。

2.2 地表沉降

2.2.1 监测目的及监测方法

监测目的主要是监测地表沉降范围及沉降量,分析地表沉降随工作面推进的变化规律,确定地表沉降稳定的时间。

采用精密水准仪测量高程,地形变化较大时,测量精度为±1 mm,也可采用高精度全站仪近距离测量。平坦地区的测量精度为±0.5 mm。此隧道环境较复杂,采用高精度全站仪测量目标点的三维坐标及其之间的空间关系。

2.2.2 监测频率及地表沉降测点布置

开挖面距监测断面前后小于 2.5b 时,监测频率为 1~2 次/d^[9];开挖面距监测断面前后为 2.5b~<5b 时,监测频率为 1 次/(2~3 d);开挖面距监测断面前后不小于 5b 时,监测频率为 1 次/(3~7 d)。地表沉降观测点第 1 个断面桩号为 K10+853,第 2 个断面桩号为 K10+858,每个断面有 5 个监测点,测点编号分别为 e~i、E~F,共有 1 个基准点,基准点编号为 01。地表沉降测点布置如图 6 所示。

2.2.3 监测内容及结论

实时监测巴音沟隧道进口 K10+853、K10+858 断面,监测结果如图 7~10 所示。

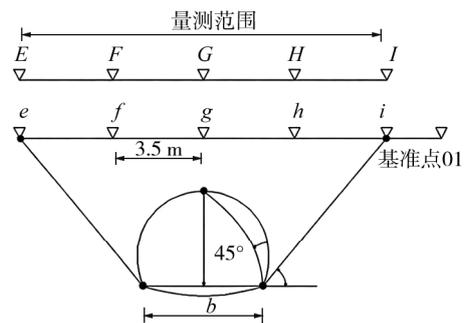


图 6 地表沉降测点布置示意图

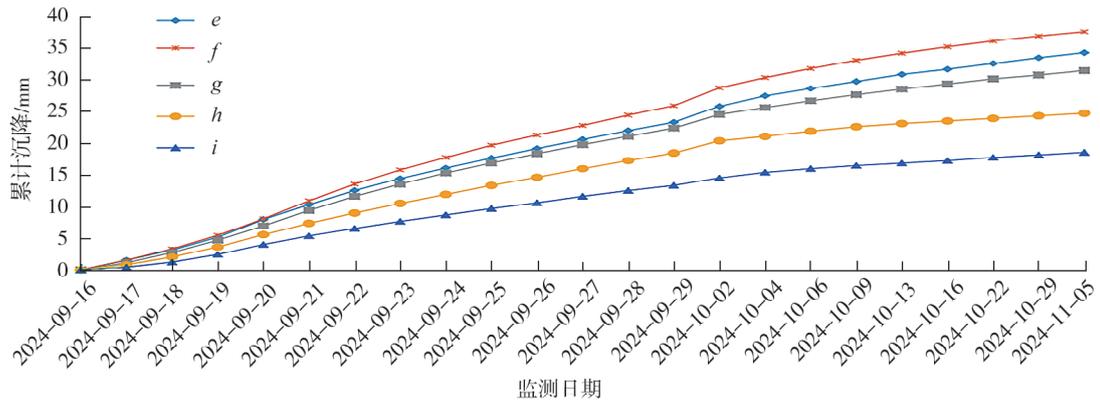


图7 K10+853断面地表累计沉降曲线

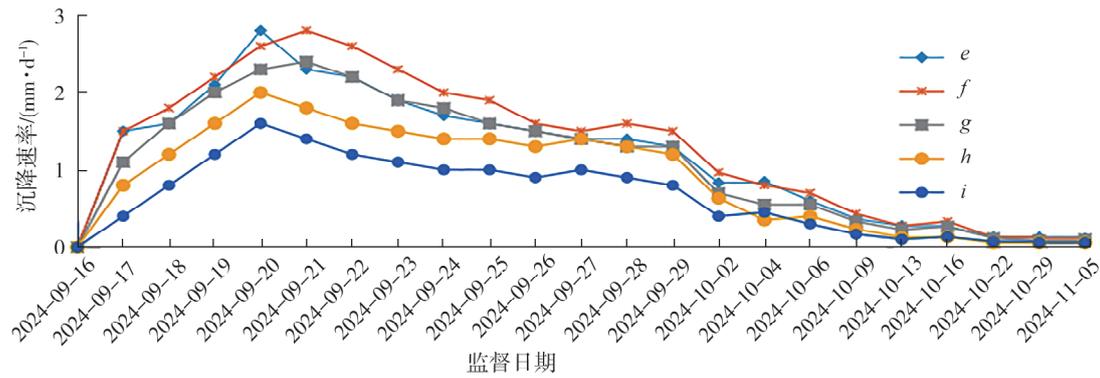


图8 K10+853断面地表沉降速率曲线

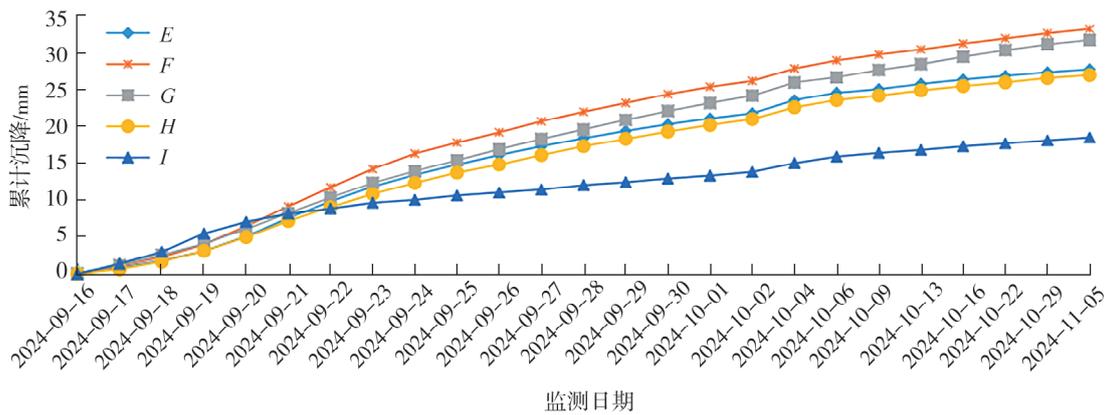


图9 K10+858断面地表累计沉降曲线

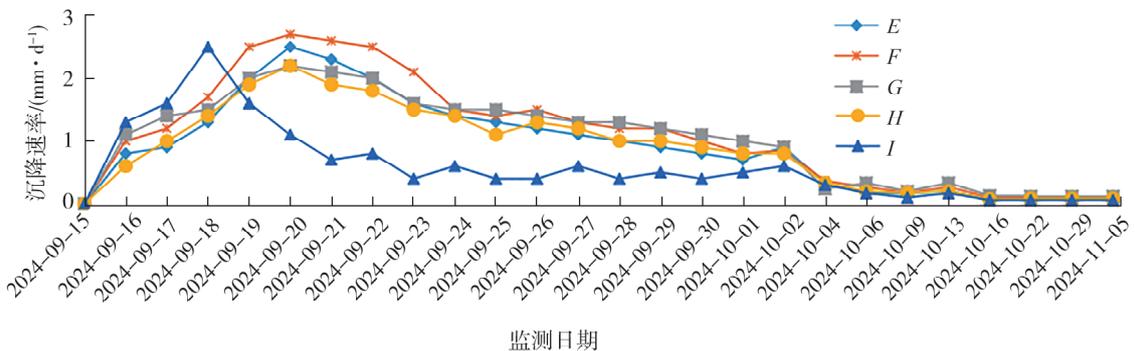


图10 K10+858断面地表沉降速率曲线

由图7~10可知:从开始布置测点到测点基本稳定约需50 d, K10+853、K10+858断面各测点累计沉降分别为18.6~37.6 mm、18.5~33.3 mm,监测过程中未见地表开裂,各测点沉降已趋于稳定。

2.3 隧道洞内外观察

隧道洞内外观察是保障施工安全、优化设计参数、预防地质灾害、确保工程质量和人员生命财产安全的重要基础性措施,为隧道安全建设和顺利推进提供最直接、最关键的第一手信息和决策依据。

洞内观察应进行洞内开挖工作面观察和已支护地段观察。应在每次开挖后观察开挖工作面,及时绘制开挖工作面地质素描图,填写开挖工作面地质状态记录表。应每天观察1次已支护地段,观察围岩、喷射混凝土、锚杆和钢架等的工作状态,记录喷射混凝土表面起鼓、剥落、开裂、渗漏水、钢架变形及发展情况等内容。观察中发现围岩条件变差或支护状态结构异常时,应及时采取相应措施^[10-14]。

洞外观察应观察记录洞口段、偏压段、浅埋段及特殊地质地段的地表开裂、沉降、塌陷,边坡及仰坡稳定状态、地表水渗漏情况、地表植被变化等。应与地表下沉、地表水平位移对照,分析洞口段边坡稳定性。

根据隧道掌子面开始爆破到打通的观察,隧道地表无明显开裂、变形、渗漏水等现象,边坡稳定;掌子面围岩岩体稍破碎,节理裂隙稍发育,整体性一般,岩体裂隙较多,局部呈交错状,未见明显裂隙贯通开挖面,无地下水,掌子面稳定。洞内无渗水现象,初支喷层与围岩接触良好无裂缝,无锚杆破坏现象^[15-18]。

3 监测的困难及解决措施

3.1 测点的布设

隧道监测中布设测点困难,与隧道施工环境复杂有关,也受工程技术条件和管理因素影响。

1) 施工环境恶劣,空间受限

隧道内部空间狭窄,作业面拥挤,机械和人员频繁移动,测点布设易受干扰,甚至被碰撞损坏。围岩破碎、涌水、塌方等险情可能导致作业面不稳定,难以找到安全、牢固的布设位置,且布设过程存在安全风险。洞内光线昏暗、粉尘多、湿度大,不仅影响测点精度,还可能加速测点的失效。掌子面现场施工照片如图11所示。



图11 掌子面现场施工照片

2) 围岩条件复杂多变

不同地质段的围岩稳定性差异较大,测点需适应不同的变形特性,但实际中难以提前精准设计布设方案。破碎围岩可能难以固定测点(如锚杆、预埋件易松动),导致测点脱落或数据失真;因钻孔难度较大,可能增大硬岩段的布设时间和成本。

3) 施工工序干扰大

隧道施工是动态过程,初期支护、二次衬砌、仰拱浇筑等工序交替进行,测点可能被混凝土覆盖、被爆破震松,或因工序衔接紧凑而缺乏布设时间。临时支护的钢拱架、喷射混凝土可能遮挡测点,无法真实反映围岩变形,测点被遮挡照片如图12所示。



图12 测点被遮挡照片

4) 测点保护难度高

在施工环境中,测点易被机械刮蹭、物料撞击,或被粉尘、积水覆盖,导致数据采集失败。长期监控中,测点可能因围岩变形过大而被拉断,或因支护结构开裂导致失效,需频繁更换但难以及时补设^[19-20]。

3.2 全站仪后视点的保留

在隧道监测中,后视点的保留是确保监测基准稳定、数据可靠的关键,但实际操作中常遇到以下问题:1)点位被扰动或破坏。隧道施工环境复杂,后视点可能因爆破震动、机械碰撞、围岩变形、支护结构位移等受到损坏,导致点位松动、移位甚至消失。洞内渗水、粉尘堆积也可能覆盖点位,影响观测时的瞄准精度。2)稳定性不足。若后视点布设位置不当,如选择在围岩破碎带、临时支护或易受施工干扰的区域,可能随时间发生自身沉降、位移,失去基准作用,导致量测数据失真。3)通视条件恶化。掌子面前移、支护结构施工中,如立架、喷射混凝土可能逐渐遮挡后视点与测点间的视线,导致后续量测无法顺利进行,需频繁重新布设或迁站,影响数据连续性。4)标识不清或记录丢失。后视点若未做清晰、耐久的标识,可能被施工人员误碰或遗忘,难以快速找到;若点位信息记录不全或丢失,会导致无法追溯量测基准,数据无效。5)外部环境影响。洞外后视点可能受自然因素的影响,如降雨导致地基沉降、边坡滑塌等,也可能受人为活动影响,如施工机械碾压、周边工程施工等,都会导致点位偏移,洞内后视点还可能受温度、湿度变化引起的仪器误差间接影响稳定性^[21-22]。

3.3 解决措施

监测困难的原因是隧道工程的动态性和复杂性,需通过提前优化布设方案、加强测点及后视点保护措施、协调施工工序等方式解决。在隧道监测中,测点布设与后视点保留需结合洞内、洞外环境差异制定针对性措施,确保测量数据的准确性和连续性。

1) 洞内措施

将测点优先布设在围岩变形敏感区域,V级围岩每隔5~10 m布设1个断面,IV级围岩每隔10 m布设1个断面,采用专用测点或预埋件,拱顶、边墙用带弯钩的钢筋测钉,用高强度砂浆锚固,确保与初期支护、围岩紧密结合。测点表面画黑十字线,附近用油漆标注断面编号、测点位置,便于快速识别。避开施工干扰,远离机械作业区、材料堆放区及爆破飞石范围,确保仪器架设安全;点位高度适中,便于观测。

将全站仪后视点优先布设在仰拱已封闭段,选择已完成且强度达标的二次衬砌。洞内至少布设2个后视点,间距不小于30 m,组成三角形闭合环,便于相互校核稳定性。加装可拆卸的金属保护罩,避免机械碰撞;爆破前用木板覆盖,防止飞石损坏。用反光漆标注编号,悬挂“基准点严禁触碰”警示牌;将后视点点位纳入施工交底,禁止在周边进行重型作业。观测两后视点间相对位移,偏差大于0.5 mm时重新校准;每月与洞外基准点联测1次,确保绝对坐标稳定。若点位被破坏,在原位置附近稳定区域补设新点,通过原基准网校准坐标,保证数据连续性。

2) 洞外措施

洞外观测点主要为地表沉降测点,应沿隧道轴线两侧各3~5倍洞径范围布设地表沉降测点,洞口段加密至每隔5~10 m设置1个测点,形成纵向和横向监测断面。远离施工便道、料场、弃渣区,选择原状土或稳定基岩表面,避免布设在填方区、积水区或边坡滑动带。地表点用混凝土标墩,顶部嵌入不锈钢测钉;边坡点可采用锚杆锚固,防止滑移。标墩刻记编号,周边用水泥浆固化,避免雨水冲刷导致点位裸露。

将洞外后视点布设在隧道影响区外,离洞口有一定距离,选择稳定基岩、永久建筑物基础或原状土山包,确保不受隧道开挖和降水影响。至少设置3个基准点,组成三角网,便于相互校核和替换,若1个基准点失稳,可通过另外2个基准点恢复基准。设置混凝土围栏,顶部加防护网,防止人为踩踏或机械碾压;标墩顶部加装金属保护盖,避免杂物覆盖。标墩刻记“监测基准点”及编号,周边设置警示标牌;将点位坐标、位置报当地测绘部门备案,避免周边工程破坏。与国家等级控制点联测,检查平面和高程位移;遇暴雨、地震后立即复核。记录每次复核数据、点位状态,附现场照片,确保基准可追溯。通过洞内、外的差异化措施,保证观测点精准反映隧道及周边变形,确保后视点长期稳定,为监测提供可靠基准。

4 结束语

隧道施工监测是现代隧道工程安全建造的核心技术保障与信息化施工的关键环节。通过系统、实

时、动态地采集施工过程中围岩与支护结构的关键响应数据,为优化设计施工和工程安全提供预警、验证提供科学依据。监测内容以围岩稳定性为核心,主要包括洞周收敛、拱顶沉降、地表沉降、围岩内部位移以及爆破振动影响等。监测工作贯穿施工全过程,从开挖面暴露前的初始读数,到开挖后变形剧烈期的密集观测,直至变形趋于稳定后的长期监测,形成完整的数据链。通过对海量监测数据的实时处理、分析与反馈,可及时判断围岩稳定状态与支护结构效能,验证支护参数的合理性,预警潜在塌方、大变形等风险,动态调整开挖方法、支护时机与强度,有效控制施工安全风险,最大限度减少对周边环境的不利影响。

隧道施工监测不仅是保障人员设备安全的“眼睛”和“警报器”,更是实现隧道工程动态设计、信息化施工和精细化管理不可或缺的“神经中枢”,对确保工程安全、优质、高效和经济建设具有决定性意义。

参考文献:

- [1] 邓鹏. 基于施工监控量测技术的公路隧道围岩稳定性研究[J]. 运输经理世界, 2024(23): 97-99.
- [2] 唐奇. 长大隧道施工监控量测技术及岩溶防坍塌技术研究[J]. 工程建设与设计, 2024(20): 112-114.
- [3] 王芝原, 罗士雅, 罗天宇, 等. 监控量测技术在高速公路隧道施工中的应用[J]. 科学技术创新, 2023(27): 165-168.
- [4] 叶得欢. 论监控量测信息化在隧道施工中的应用[J]. 建筑工人, 2023, 44(1): 41-44.
- [5] 郭小龙, 谭忠盛, 喻渝. 成兰铁路软岩隧道大变形控制技术及其变形控制基准研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 86-104.
- [6] 杨兴仁. 软岩大变形隧道支护结构应力监测应用[J]. 建材发展导向(上), 2019, 17(1): 180-182.
- [7] 罗朝勇. 高速公路隧道监控量测与实施[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(5): 129-130.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [9] 中国铁路总公司. 铁路隧道监控量测技术规程: Q/CR 9218—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [10] 刘华, 李松. 高速公路隧道施工监控量测技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2023(12): 117-119.
- [11] 吴向东. 基于复杂地质条件下公路隧道施工技术的有效性研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(1): 61-62.
- [12] 刘存伟. 新建蒙华铁路隧道施工监控量测监理工作控制要点分析[J]. 科技资讯, 2024, 22(2): 139-141.
- [13] 曹金泮. 无损检测技术在高速公路隧道监控量测中的应用分析[J]. 运输经理世界, 2023(33): 110-112.
- [14] 姜孝敏, 张福来. 大干沟隧道施工监控量测技术与应用[J]. 云南水力发电, 2020, 36(7): 114-116.
- [15] 刘柳, 姜函, 高桂凤, 等. 高铁隧道施工安全步距分析与调整[J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20(5): 14-20.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[J]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [17] 徐桂林, 彭学先. 非接触监控量测技术在岩溶隧道施工中的应用[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(4): 160-164.
- [18] 杨晓帆, 杨红建, 刘青峰. 微台阶法控制隧道施工安全步距[J]. 云南水力发电, 2020, 36(7): 89-93.
- [19] 牟勇. 高速公路隧道施工监控量测技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2022(18): 84-86.
- [20] 林敢志, 钱瑞轩. 基于施工监控量测技术的公路隧道围岩稳定性研究[J]. 绿色环保建材, 2018(6): 126-127.
- [21] 向琦. 公路隧道施工的安全信息化监控技术探究[J]. 汽车周刊, 2024(6): 232-234.
- [22] 张民庆, 黄鸿健, 盛黎明, 等. 铁路隧道围岩监控量测 CFC 信息化系统的研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(7): 56-61.

Construction monitoring measurement technology and challenges of Bayingou Tunnel

XIAO Chengshuai, LU Faliang*

School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To accurately monitor the dynamic response of surrounding rock and support structures during tunnel construction and early operation phases, promptly identify potential instability risks, validate design rationality,

and guide safe construction practices, systematic and high-precision on-site monitoring methods are implemented. Total station instruments are employed for continuous non-contact measurement of tunnel crown settlement, surrounding convergence, and surface settlement to precisely capture spatial deformation. Combined with geophysical radar for early detection of adverse geological formations ahead, automated data acquisition systems and specialized analysis software enable real-time transmission, processing, visualization, and early warning analysis of massive monitoring data. Post-excavation monitoring data indicate that the deformation of the surrounding rock after tunnel excavation follows a three-stage change pattern, transitioning from rapid change to slow change and finally to basic stability as construction progresses. This validates the applicability of the designed support parameters in most sections, but indicates insufficient support strength in specific weak surrounding rock sections. To address challenges including vulnerable monitoring points, significant construction interference, and humid dust environments, measures such as reinforcing protection points, optimizing workflows to reduce interference, selecting environment-resistant equipment, and enhancing calibration are adopted. A real-time monitoring system is established for dynamic analysis and early warning, ensuring data reliability and guiding construction safety.

Keywords: tunnel engineering; monitor; vault settlement; peripheral convergence; surface settlement

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 43 页)

over a time-dependent road network, aiming to minimize total cost. The model jointly considers fixed vehicle usage cost, transportation cost, refrigeration cost, spoilage cost, carbon-emission cost, and time-window penalty cost. An improved African vulture optimization algorithm (AVOA) is proposed to solve the model by introducing an initialization strategy based on time-window centers and spatial savings, an adaptive parameter-control mechanism, and a multi-level local search strategy, while incorporating the global search strategy of the aquila optimizer. Computational experiments show that, when carbon emissions are considered, the improved AVOA reduces total cost by about 25.7% compared with the original AVOA and decreases the required fleet size from 9 to 7 vehicles. Furthermore, the total cost when accounting for carbon emissions is about 1.13% lower than when carbon emissions are not considered. The improved AVOA demonstrates markedly superior route-search capability over traditional algorithms, simultaneously optimizing distribution routes while internalizing carbon-emission costs to achieve both cost reduction and low-carbon delivery. The proposed approach provides an effective solution for cold-chain logistics routing.

Keywords: cold chain logistics; time-dependent road network; path optimization; carbon emission; AVOA

(责任编辑:赵玉真)