

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023042224041983

文章编号: 1674-599X(2024)02-0071-08

引用格式: 钟华, 梁崇辉, 陈璐, 等. 浅埋大跨度隧道大变形演化特征与防治方法[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 71-78.

Citation: ZHONG Hua, LIANG Chonghui, CHEN Lu, et al. Characteristics of large deformation and prevention methods for shallow buried large span tunnels[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 71-78.

浅埋大跨度隧道大变形演化特征与防治方法

钟华¹, 梁崇辉², 陈璐², 高山³

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530000; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

3. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 为解决浅埋大跨度隧道在施工中常出现的初期支护大变形及冒顶病害等问题, 本研究依托广西壮族自治区百色市某隧道工程, 分析了该隧道的大变形及冒顶灾害特征。基于PFC离散元软件, 分析了隧道失稳演化规律, 提出了隧道初期支护大变形处治技术。研究表明: 浅埋大跨度隧道施工时, 容易受围岩条件及支护强度等影响, 从而引起围岩大变形或塌方灾害。采用地表注浆加固或临时仰拱与洞内反压等技术处理后, 围岩变形得到了有效控制。现场施工时, 应通过建立管理体系, 加强人员培训, 设置安全通道, 安排安全人员, 强化安全意识, 建立评估与预警机制等保障措施, 降低安全风险。该研究成果可为浅埋大跨度隧道施工灾害防治提供参考。

关键词: 浅埋大跨度隧道; 施工病害; 治理方案; 初期支护大变形

中图分类号: U456

文献标志码: A

Characteristics of large deformation and prevention methods for shallow buried large span tunnels

ZHONG Hua¹, LIANG Chonghui², CHEN Lu², GAO Shan³

(1. Guangxi Road & Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530000, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

3. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: In order to solve diseases such as large deformation of initial support or roof caving that occurs frequently in the construction of shallow-buried large-span tunnels, the characteristics of large deformation and roof caving disaster were analyzed based on the tunnel in Baise City Guangxi Province. The PFC discrete element software was used to analyze the evolution of instability. The treatment technology of large deformation of tunnel primary support was put forward. The results show that, during the construction of shallow-buried large-span tunnel, it is easy to be affected by factors such as surrounding rock conditions and support strength, resulting in large deformation or collapse of surrounding rock. The deformation of surrounding rock can be effectively controlled by means of surface grouting reinforcement, temporary inverted arch and back pressure in tunnel. Security risks can be reduced by establishing management system, strengthening personnel training, setting up safety channels, arranging safety personnel, strengthening safety awareness, and establishing evaluation and

收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 广西重点研发计划项目(AB22080020); 广西交通运输行业重点科技项目(2020-24)

通信作者: 钟华(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事公路工程方面的研究工作。E-mail: 369588368@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

early warning mechanisms. The research results can provide reference for the prevention and control of construction disasters in shallow buried large-span tunnel.

Key words: shallow large-span tunnel; construction damage; treatment plan; initial support deformation

随着中国交通基础建设的发展,长大隧道建设技术取得了显著进步。但浅埋大跨度隧道容易受地质条件等因素的影响,存在围岩变形,甚至塌方等病害等问题^[1-3]。因此,如何有效防治隧道变形及坍塌的问题,成了当前隧道工程领域亟须解决的问题。

近年来,国内外学者围绕隧道变形、受力特征及支护方案等问题开展了研究。如雷明锋等^[4]基于相似理论研究了隧道衬砌的受力特征,分析了浅埋偏压隧道围岩压力、衬砌结构应力的动态变化规律。韩惊伟等^[5]利用ABAQUS有限元软件建立了隧道施工过程的三维有限元模型,给出了隧道衬砌结构在岩溶地层中的应力分布规律。贾锋等^[6]通过现场数据及数值模拟,研究了在不同掘进工法下深埋软岩小净距隧道的变形规律,并结合工程问题,提出了对应的施工方案。孙州等^[7]基于地质特征建立了三维数值计算模型,分析了隧道拱顶沉降、边墙收敛、围岩压力、锚杆轴力随开挖的动态演化规律。此外,学者们针对隧道大变形提出了相应的处治方法。如梁裔举等^[8]利用有限元软件分析岩溶地区浅埋隧道变形问题,并针对该隧道提出了注浆充填和支护加固处治措施。康宝祥等^[9]基于理论分析和现场监测,研究了隧道产生大变形的原因及起始位置,并提出了注浆加固掌子面等预防隧道大变形的技术手段。王栋等^[10]对采用台阶法和全断面法开挖隧道的拱顶沉降、仰拱隆起及水平收敛的变化规律进行研究,并优化支护方案。柴宝红等^[11]提出了绿色外加剂注浆的方式,分析了绿色外加剂在不同凝结时间的最优掺量。刘宇鹏等^[12]在隧道建立了一种长、短锚杆联合支护力学模型,为高地应力软岩隧道对长锚杆支护长度的设计提供一种计算方法。沈向前等^[13]为解决软岩隧道掌子面大变形问题,提出采用预应力锚杆对掌子面进行临时加固的方法。陶志刚等^[14]研发了具有高恒阻力、大变形特性的负泊松比(negative Poisson's ratio, NPR)新材料,并提出了以NPR新材料为核心的主动支护方法。郭新庆^[15]分析了超前支护对隧道拱顶沉降和应力分布的影响,发现超前小导管可有效减小拱顶

沉降。

综上可知,国内外学者针对隧道施工变形问题已经开展了较多研究,但针对浅埋大跨度隧道施工变形问题和塌方冒顶等病害的防治技术还有待进一步研究。因此,本文基于广西壮族自治区百色市某隧道,分析浅埋大跨度隧道的变形失稳特征,提出采用地表注浆或临时仰拱与回填反压等多种技术处理浅埋大跨度隧道的变形失稳问题,保证隧道的安全施工。

1 工程背景

1.1 工程概况

以广西壮族自治区百色市某城镇主干路分离式隧道为例,双洞单向四车道,汽车荷载等级为城-A级,行车速度为40 km/h,全长1 496.000 m,最大埋深约245.000 m,洞口埋深约2.800 m。隧道的纵坡均为单向坡,左右线坡率均为2.3%。隧道净宽14.250 m,净高5.000 m,开挖断面较大,形状扁平。隧道围岩以强中风化石灰岩、石灰块及粉质黏土为主,围岩条件较差,多为IV级~V级围岩。隧道洞口为粉质黏土,重度19.5 kN/m³,凝聚力33 kPa,内摩擦角13°,承载力160 kPa。隧道开挖采用双侧壁导坑法,左右导坑开挖高度约7.000 m,分部施工,循环进尺为1.000 m。在施工过程中,围岩变形较大,为确保施工安全,需采用灵活的开挖方法和多种支护措施,包括洞口管棚超前支护、洞内超前小导管注浆预加固、系统锚杆、钢拱架及喷射混凝土作为初期支护等。

1.2 塌方情况

2019年7月27日21时,隧道左洞ZK1+160.8右侧导洞开挖出碴时,发现钢拱架变形较大,洞顶开始掉块,21时35分掌子面后方发生了塌方、冒顶,如图1所示,其中冒落体主要为受溶蚀裂隙切割的大块岩体。冒顶结束后,隧道内拱顶位置塌穴纵向约15.000 m,环向约25.000 m;地表塌穴呈圆形,直径约15.000 m。该处位于超浅埋地段,埋深约8.000 m。洞顶塌陷区与洞内掌子面位置关系如图2所示。



(a) 洞内冒顶



(b) 地表塌方

图1 坍塌情况

Fig. 1 Collapse situation

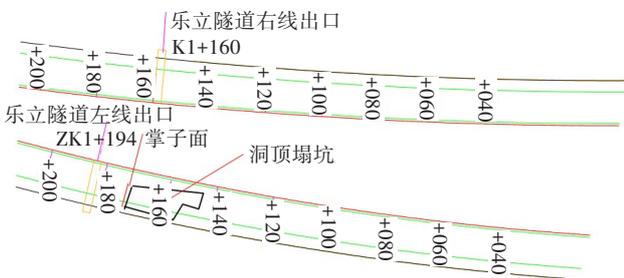


图2 塌方位置示意图

Fig. 2 Schematic of the collapse location

1.3 塌方冒顶调研分析

通过分析塌方灾害发生后的现场勘查报告,总结出事故原因。具体如下:

- 1) 围岩条件差,塌方处为土石交界,易发生坍塌、冒顶病害;
- 2) 围岩破碎、裂隙发育,且受溶蚀裂隙的影响,存在层间夹泥情况,稳定性较差;
- 3) 在施工期间,持续降雨,导致地表水丰富,破碎缝隙渗流,残坡积层粉质黏土软化,土质抗剪能力降低,隧道赋存条件进一步恶化;
- 4) 初期支护承载力不足,导致上部初期支护变形较大;
- 5) 隧道处于浅埋偏压段,地表出现纵向裂缝,

对隧道支护结构有一定影响。

1.4 紧急处理措施

为保证隧道安全施工,施工单位对地表塌穴及周边松散土体进行注浆加固来稳定塌穴土体,如图3所示。注浆的范围为纵向30.000 m (ZK1+182~ZK1+152),横向为隧道中心线左、右各15.000 m。注浆孔按梅花形布置,间距1.000 m×1.000 m,注浆管采用 $\varnothing 50$ mm小导管,水泥浆液的水灰比1:1,注浆压力不小于1 MPa。注浆深度为拱顶开挖线以上50.0 cm。由现场注浆试验结果可知,地面注浆加固后,土体强度提高了50%~100%。



(a) 地表注浆处治



(b) 临时仰拱



(c) 洞内反压回填

图3 临时处治措施

Fig. 3 Temporary disposal measures

从图3可以看出,为防止地表水入渗,在塌穴四周喷一层5.0 cm的厚C25网喷混凝土封闭表面。在

洞口处设置临时仰拱,并利用外运渣土(碎石土)反压回填封闭围岩,提高支护结构的整体承载能力。

2 数值模拟

2.1 模型设置

根据现场条件,运用PFC离散元软件建立浅埋大跨度隧道模型,如图4所示。基本模型宽80.000 m,高50.000 m,颗粒约14 000个。其中,土体颗粒直径0.100~0.166 m。

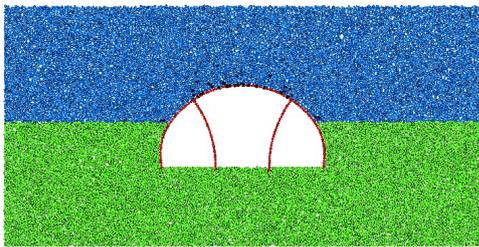


图4 隧道模型

Fig. 4 Tunnel model

模型左右两侧选用位移边界条件,约束横向位移,模型顶部设置为自由边界,模型底部为固定边界。隧道开挖前,对模型进行了自重平衡计算。颗粒间的破裂采用Mohr-Coulomb破坏准则。本次模拟共设计以下三种工况:工况一为导洞及中壁开挖;工况二根据现场处理范围及加固强度,等效提高注浆范围的材料参数;工况三针对内部支撑拆除后的情况,增加临时仰拱,闭合支护系统,然后进行回填。各参数通过无侧限压缩试验和直接拉伸试验,得到隧道土体及支护结构的物理力学参数,见表1。

表1 数值模拟参数

Table 1 The numerical simulation parameters

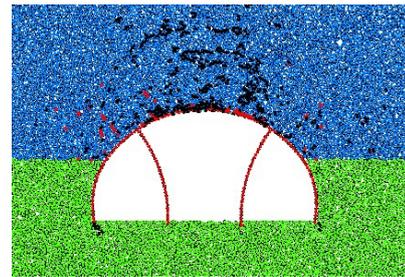
对象	密度/ (kg· m ⁻³)	颗粒有 效模 量/GPa	内摩擦 角/(°)	接触抗 拉强度/ MPa	接触 内聚力/ MPa	接触 刚度比	接触有 效模量/ GPa	摩擦 系数
原状 土	1 950	0.034	5	0.04	0.06	1	0.034	0.3
加固 土	2 100	0.051	5	2.00	3.00	1	0.051	0.3
钢护 支架	7 850	2.000	10	28.80	38.40	1	2.000	0.3

2.2 失稳演化特征

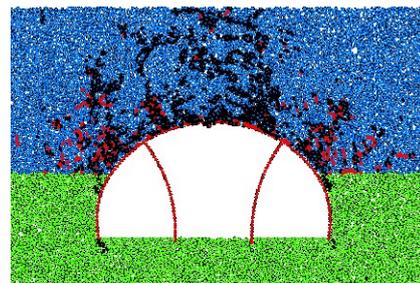
受围岩条件、支护强度等因素影响,隧道开挖后出现了拱顶冒落现象。从裂纹与位移演化角度进行分析,得到隧洞失稳演化特征。

1) 裂纹演化。

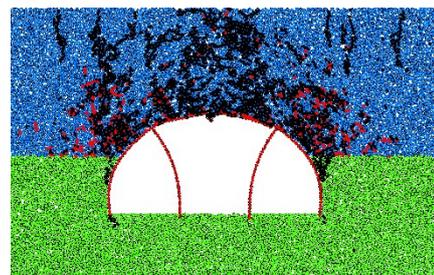
初始条件下,双侧导洞及中壁开挖后围岩裂隙演化及失稳过程如图5所示。



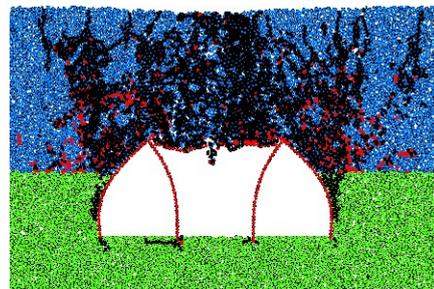
(a) 拱顶岩体裂纹



(b) 支护变形



(c) 地表裂纹



(d) 顶板坍塌

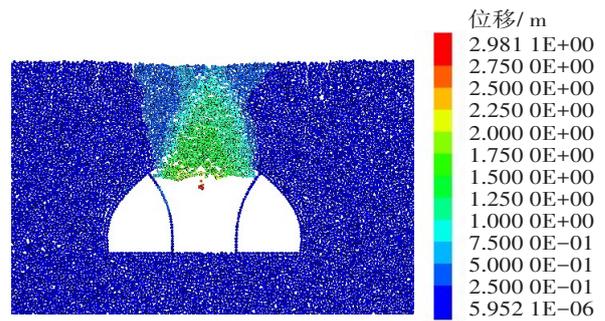
图5 失稳演化

Fig. 5 Instability evolution

从图 5(a)可以看出,双侧导洞及中壁开挖后,隧道拱顶围岩开始产生裂纹,随拱顶围岩裂纹的持续演化,拱顶支护结构出现大变形,见图 5(b)。因拱顶支护结构逐渐丧失承载能力,顶板岩体开始冒落,地表出现多条竖向裂缝,见图 5(c)。两侧导坑的临时支护形成了闭环,产生了一定承载能力,仅中壁上方顶板出现了坍塌,见图 5(d)。

2) 位移演化。

隧洞开挖后围岩位移演化如图 6 所示。从图 6 可以看出,中壁开挖后,隧洞围岩出现了非均匀变形,拱顶位移较大,且导坑临时支护的中部位置变形较大。拱顶支护结构最初能保持稳定,然后开始失稳,最大变形达 50.0 cm。当拱顶围岩变形成明显的塌落拱后,中壁拱顶岩体在重力作用下逐渐垮落。



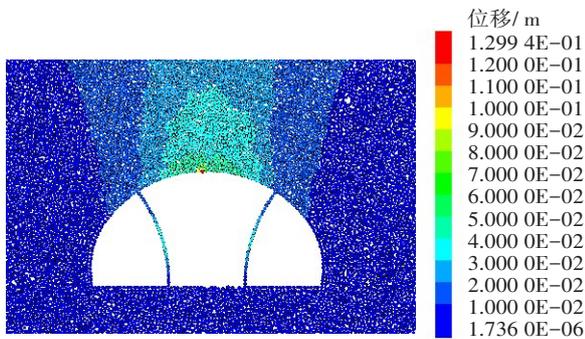
(d) 拱顶岩体垮落

图 6 位移演化

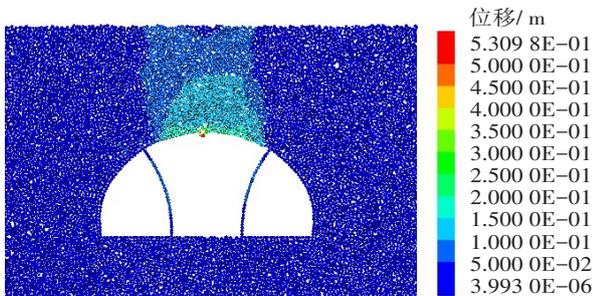
Fig. 6 Displacement evolution

2.3 紧急处理效果分析

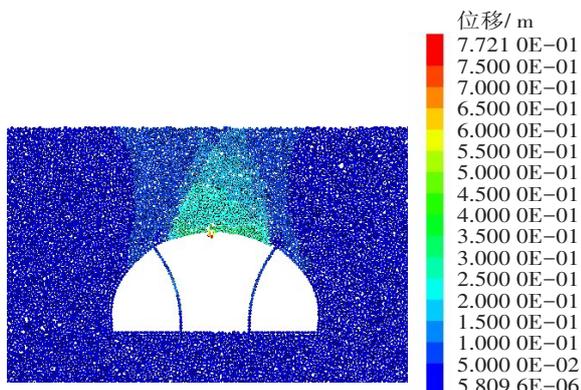
隧洞开挖冒顶后,施工单位对隧道顶部岩体进行注浆处理。本研究根据现场处理方案,开展了模拟分析。在地表注浆条件下,双侧导洞及中壁开挖后围岩裂隙及变形规律如图 7 所示。



(a) 顶板下沉



(b) 变形集中



(c) 拱顶岩体失稳

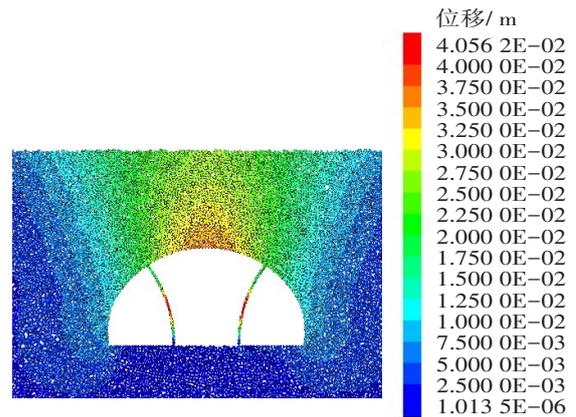


图 7 地表注浆处理效果

Fig. 7 Surface grouting treatment effect

从图 7 可以看出,隧洞开挖后,围岩裂隙较少,且拱顶围岩最大变形仅为 4.0 cm。这表明,通过地表注浆加固,有效提高了隧洞拱顶围岩体承载力。

现场施工时,在隧道两侧导洞拆除了临时支护,设置临时仰拱,并外运渣土对临时仰拱进行了回填反压。采用临时仰拱及回填反压处理后,围岩的变形规律如图 8 所示。

从图 8 可以看出,设置临时仰拱并回填反压后,围岩最大变形为 4.4 cm。这表明,设置临时仰拱后,初期支护结构形成了闭环,并通过回填反压,限制了拱底的变形,进一步提高了支护体系的抗变形能力。

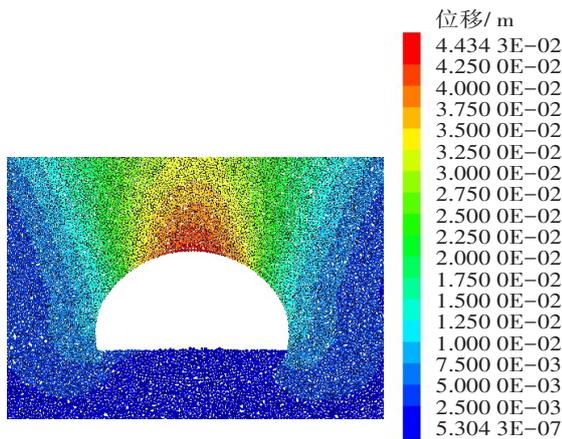


图8 临时仰拱与回填反压处理效果

Fig. 8 Temporary inverted arch and backfill pressure treatment effect

3 初支大变形处治技术

由工程失稳案例与数值模拟分析可知,在浅埋大跨度隧道开挖过程中,易出现顶板冒落、塌方等病害。在施工过程中,应基于失稳演化特征和围岩变形情况,采取适当的处理方案和保障措施。

3.1 初支大变形特征

深入分析本次病害及数值模拟,总结隧道初支大变形的特征,具体如下:

1) 初支结构出现变形和裂缝。

在隧道初次掘进施工过程中,由于地质环境复杂,初支结构所处位置的深度较浅、应力较大,易发生变形、裂缝等现象。这些变形和裂缝可能会导致初支结构的承载力下降,影响隧道的稳定性。

2) 初支结构整体下沉或位移。

初支结构所处的地质环境具有不确定性,可能导致初支结构整体下沉或位移。特别在地质条件复杂的地区,隧道在初次掘进施工时最易出现这种情况。

3) 初支结构的周围地层失稳。

隧道采用钻爆法等方法进行初次掘进施工时,影响了周围地层,造成地层失稳。

3.2 初期支护大变形处理方案讨论

基于工程实践与数值模拟结果,为控制浅埋大跨度隧道变形与坍塌灾害,提出以下5项措施:

1) 利用现场监测数据。

隧洞施工时,在现场监测数据和各工况实施情况的基础上,对隧道施工中可能出现的灾害或病害进行预测或控制,并评价隧道安全,进而指导隧道

施工。通过优化施工参数,合理安排施工工序,降低隧道施工中的失稳风险,保证隧道的施工安全。

2) 实时评估地质条件和支护设计。

隧道施工过程中,根据现场条件,特别在出现初期支护大变形后,实时评估地质条件和支护设计,判断是否需要更改支护方案和加固措施。

3) 加固和维护现有支护结构。

支护结构及围岩变形后,应对已施工的支护结构进行加固和维护,包括已损坏的支护结构,确保支护结构的完整性和稳定性。

4) 实施加固措施。

根据重新评估的地质条件和支护设计结果,采取加密锚杆、加固喷锚网、加固喷射混凝土等加固措施,提高支护体系的稳定性。在实施加固措施时,需要注意加固措施与原支护结构之间的衔接。

5) 监测和预警。

隧洞施工过程中,应对支护结构及围岩进行监测和预警,及时发现并处理异常情况,防止再次发生大变形。常用的监测参数包括变形、地下水位、应力和温度等。

3.3 安全保障措施

为确保大跨度软岩隧道施工中的安全,避免或减少相关事故的发生,提出以下6项保障措施:

1) 建立完善的安全管理体系,成立安全领导小组,配备足够的安全生产管理人员,明确每个岗位的安全管理责任,确保施工过程中的安全。

2) 所有参与施工的工人必须接受相关的施工工序、工艺和安全培训,并进行现场技术交底。在经过考核合格后,方可上岗作业。

3) 在洞内设置安全逃生通道,并在洞口配备必要的抢险物资,如工字钢、方木、急救药品、纱布、强光手电、救援管道、食品以及应急车辆和设备等。

4) 现场设置专职安全值班人员,防止违章作业和违纪行为,并随时观察初支变形情况。如果发现异常或紧急情况,应立即停止施工,组织现场人员迅速撤离。此外,应实行24 h监控和巡查,及时发现并处理相关安全问题。

5) 强化安全意识和安全文化建设。定期开展安全培训和演练,提高员工的安全意识和应急处理能力。

6) 建立安全风险评估和预警机制。根据施工实际情况,及时评估和预警潜在的安全风险,采取必要的措施控制,消除安全风险。

4 工程应用

4.1 隧道初支变形监测方案

为验证处治技术对控制隧道变形的有效性,密切监测隧道初支结构的变形情况。综合考虑初支结构的位置、类型、变形和监测设备情况等因素后,沿隧道掘进方向,每隔5.000 m,在隧道顶板布置3个沉降监测点,覆盖初支结构的全部范围。施工监控量测的设备为三维激光扫描仪、全站仪和精密自动安平水准仪等。

4.2 施工效果

加固处理后,隧道左洞出口沉降结果如图9所示。

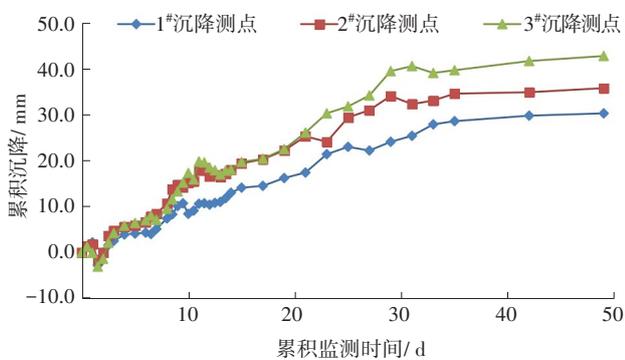


图9 沉降监测

Fig. 9 Settlement monitoring

从图9可以看出,隧道拱顶沉降及最终变形明显下降,拱顶沉降速度小于0.5 mm/d,地表沉降、拱顶沉降和洞内沉降的收敛变形均趋于稳定。拱顶最大沉降约4.0 cm,与数值模拟结果基本一致。因此,针对浅埋隧道的变形问题,采用支护措施和注浆加固等方案,可以得到有效控制。针对浅埋隧道塌方问题,采用地表注浆加固和洞内反压回填等方案,可达到良好效果。此外,本研究建议隧道沉降达到沉降总量的80%时,应进行二次支护或及时施作二衬,以确保隧道的安全稳定。

5 结论

本研究以广西壮族自治区百色市某隧道在施工过程中发生的塌方病害为例,分析其成因,结合数值模拟,探讨浅埋大跨度隧道初期支护结构大变形与失稳演化特征,提出有针对性的技术处理方案,得出以下结论:

1) 浅埋大跨度隧道施工时,易受围岩条件及支

护强度等因素的影响,出现围岩与支护体系承载力不够而引起塌方灾害的情况。

2) 采用地表注浆加固或临时仰拱与洞内回填反压等技术手段,可有效控制隧道围岩的变形,隧道的最大变形量分别为4.0、4.4 cm。

3) 为有效降低隧道施工风险,可基于围岩稳定性分析、隧道变形监测,建立安全管理体系、人员培训、安全通道、专人专岗和预防机制等隧道安全施工保障措施。

参考文献(References):

- [1] 沙鹏,伍法权,李响,等.高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征[J].岩土力学,2015,36(5):1407-1414. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.024.
SHA Peng, WU Faquan, LI Xiang, et al. Squeezing deformation in layered surrounding rock and force characteristics of support system of a tunnel under high in-situ stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1407-1414. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.024.
- [2] CHENG R S, CHEN W S, HAO H, et al. Performance of road tunnel subjected to BLEVE occurring inside adjacent tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105292. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105292.
- [3] 陈璐,周子龙,高山,等.高应力隧道爆破研究现状与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):849-865. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.03.006.
CHEN Lu, ZHOU Zilong, GAO Shan, et al. Research status and prospects of blasting excavation of tunnel under high stress condition [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 849-865. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.03.006.
- [4] 雷明锋,彭立敏,施成华,等.浅埋偏压隧道衬砌受力特征及破坏机制试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(8):3316-3325.
LEI Mingfeng, PENG Limin, SHI Chenghua, et al. Model research on failure mechanism and lining stress characteristics of shallow buried tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3316-3325.
- [5] 韩惊伟.岩溶地区隧道衬砌受力及变形特征的有限元分析[J].路基工程,2017(5):129-131. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2017.05.28.
HAN Jingwei. Finite element analysis of stress and

- deformation characteristics of tunnel lining in the Karst Area [J]. *Subgrade Engineering*, 2017 (5) : 129-131. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2017.05.28.
- [6] 贾锋, 杜永强, 杨文波, 等. 不同掘进工法下软岩中深埋小净距隧道变形规律研究[J]. *工业建筑*, 2023, 53 (11): 21-28. DOI: 10.13204/j.gyjzG22091803.
- JIA Feng, DU Yongqiang, YANG Wenbo, et al. Research on deformation laws of deeply buried tunnels with small clearance in soft rock by different tunnelling methods[J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(11): 21-28. DOI: 10.13204/j.gyjzG22091803.
- [7] 孙州. 基于施工过程的大断面隧道变形动态释放规律分析[J]. *公路与汽运*, 2022(2): 139-142, 157. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.036.
- SUN Zhou. Analysis of dynamic deformation release law of large-section tunnel based on construction process[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2022 (2) : 139-142, 157. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.036.
- [8] 梁裔举, 高山, 陈璐. 岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(2): 49-54. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230403001.
- LIANG Yiju, GAO Shan, CHEN Lu. Research on deformation analysis and treatment technology of shallow buried tunnels in Karst Area [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(2) : 49-54. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230403001.
- [9] 康宝祥, 宋战平, 张庆贺, 等. 倾斜煤系地层大断面客专隧道大变形原因分析及处治[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(2): 89-99.
- KANG Baoxiang, SONG Zhanping, ZHANG Qinghe, et al. Causal analysis and disposal on large deformation of large section passenger dedicated line tunnel in inclined coal strata [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(2): 89-99.
- [10] 王栋, 彭雪辉, 黄戡, 等. 层状岩体隧道变形特征及非对称支护研究[J]. *公路与汽运*, 2021(2): 132-136. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.02.033.
- WANG Dong, PENG Xuehui, HUANG Kan, et al. Study on deformation characteristics and asymmetric support of layered rock tunnel [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2021 (2) : 132-136. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.02.033.
- [11] 柴宝红, 史红英, 梅坤, 等. 岩溶地区高速公路隧道绿色注浆试验研究[J]. *交通科学与工程*, 2022, 38(3): 107-112. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u. 2022.03.013.
- CHAI Baohong, SHI Hongying, MEI Kun, et al. Study on green grouting test of highway tunnel in Karst Area [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38(3): 107-112. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.013.
- [12] 刘宇鹏, 夏才初, 吴福宝, 等. 高地应力软岩隧道长、短锚杆联合支护技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 105-114. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0426.
- LIU Yupeng, XIA Caichu, WU Fubao, et al. A combined support technology of long and short bolts of soft rock tunnels under high ground stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39 (1): 105-114. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0426.
- [13] 沈向前, 陈道云, 郑超. 隧道掌子面预应力锚杆支护作用效果研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(2): 150-156. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.02.027.
- SHEN Xiangqian, CHEN Daoyun, ZHENG Chao. Study on the effect of pre-stressed bolt support on tunnel face[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2023, 43 (2) : 150-156. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579. 2023.02.027.
- [14] 陶志刚, 谢迪, 隋麒麟, 等. 复杂地质条件下隧道围岩大变形负泊松比锚索主动支护方法及控制效果研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(2): 275-286. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0301
- TAO Zhigang, XIE Di, SUI Qiru, et al. Study on active support method and control effect of NPR anchor cables for large deformation of tunnel surrounding rock under complex geological conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43 (2) : 275-286. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0301
- [15] 郭新庆. 黄土软弱围岩下隧道开挖支护技术分析[J]. *国防交通工程与技术*, 2023, 21(5): 61-64, 80. DOI: 10.13219/j.gjgyat.2023.05.013.
- GUO Xinqing. Analysis of support technology of tunnel excavation under loess soft surrounding rock [J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2023, 21 (5) : 61-64, 80. DOI: 10.13219/j. gjgyat. 2023. 05.013.

(责任编辑:罗容;英文编辑:陈璐)