

基于弱光栅技术隧道深层围岩实时监测应用

顾磊¹, 张文轩², 秦正启²

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²苏州市南智传感科技有限公司, 江苏 苏州

收稿日期: 2022年9月6日; 录用日期: 2022年9月22日; 发布日期: 2022年9月29日

摘要

隧道在开挖施工过程中对围岩变形的动态掌握关乎着隧道施工的安全性和效率性。本文在通过查阅相关文献资料并结合相关领域科研人员研究成果基础上, 利用弱光栅技术对隧洞深层围岩变形进行动态监测, 并综合对比传统监测方式得出结论: 平阳引水隧洞围岩变形符合正常范围, 围岩稳定性总体上较好, 同时弱光纤光栅感测光缆监测结果与传统监测结果基本一致, 符合现场事实情况。同时, 本文监测方案和监测结果可以为其它类似过程监测提供数据参考和理论依据。

关键词

弱光栅感测技术, 隧道围岩变形, 钻孔, 动态监测

Application of Real-Time Monitoring of Deep Surrounding Rock of Tunnel Based on Weak Grating Technology

Lei Gu¹, Wenxuan Zhang², Zhengqi Qing¹

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Suzhou Nansee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

Received: Sep. 6th, 2022; accepted: Sep. 22nd, 2022; published: Sep. 29th, 2022

Abstract

The dynamic control of surrounding rock deformation during tunnel excavation is related to the safety and efficiency of tunnel construction. On the basis of consulting relevant literature and combining the research results of researchers in related fields, the dynamic monitoring of the deformation of the deep surrounding rock of the tunnel is carried out by using the weak grating

technology, and the conclusion is drawn by comprehensively comparing the traditional monitoring methods: The deformation of the surrounding rock of Pingyang diversion tunnel conforms to the normal range, and the stability of the surrounding rock is generally good. At the same time, the monitoring results of the weak fiber grating sensing optical cable are basically consistent with the traditional monitoring results, which conform to the actual situation on the site. At the same time, the monitoring scheme and monitoring results in this paper can provide data reference and theoretical basis for other similar process monitoring.

Keywords

Weak Grating Sensing Technology, Deformation of Tunnel Surrounding Rock, Drilling, Dynamic Monitoring

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国隧道建设工程自改革开放以来飞速发展，但因隧洞深层围岩变形而引发的隧道施工事故频频发生，因此利用现有技术手段对隧道深层围岩变形情况进行准确监测变得十分重要[1]。传统隧道工程监测所采用的传感元件主要是基于电阻式、电感式和钢弦式等点式传感器，这些点式传感技术普遍存在传导线过多难以布设，易受周边电磁场干扰及受地下水腐蚀传感失真等缺点，难以满足现代隧道施工监测的要求[2]。

近年来，光纤传感技术发展十分迅速，为工程监测领域提供了新的技术手段和思路。如吴静红基于光纤光栅感测原理设计了隧道自动化感测系统，对京雄高铁隧道的衬砌环向应变、隧道周边分层沉降进行了长期监测，监测结果直接显示隧道结构健康情况，能够对隧道运营过程中可能发生的灾害进行早期预警[3]；苏胜昔等利用光纤光栅传感技术对张涿高速东马各庄隧道工程中围岩的变形量、变形稳定时间、变形速率进行了远程实时监测，监测结果对隧道安全运营具有重要的指导意义[4]；朱铁栓等设计了基于光纤光栅的铁路隧道围岩变形实时识别系统，若铁路隧道围岩变形程度异常将自动启动安全预警，在短时间内完成铁路隧道围岩变形实时识别[5]。

尽管光纤光栅传感技术已经成熟地应用在隧道监测中，但基于弱光栅技术对隧道深层围岩变形动态实时监测方面研究还是较为薄弱[6]，本文在综合前人研究成果的基础上，针对平阳大断面输水隧洞，设计了基于弱光栅技术的隧洞深层围岩变形监测系统。详细介绍了弱光栅技术的原理和弱光纤光栅感测光缆布设方案，对监测结果进行细致分析，为平阳输水隧洞安全监测提供技术支持。

2. 弱光栅感测技术原理

弱光栅光纤是指反射率极弱的一种特种光纤光栅，其峰值反射率通常低于-30 dB。如图1所示，由于其反射率非常低，相同周期的光纤光栅可以相互穿透，实现单一光纤上大量光栅点复用[7]。将多个FBG传感器布置在空间预定位置上，采用串联或其他网络结构形式连接在一起，通过时分复用技术便可以构成分布式监测网络系统[8]。

弱光栅光纤有如下传感特性：应变和温度传感性能与常规FBG一致，具有同等的感测精度；相同周期的光纤光栅可以同纤复用[9]；可在同一光纤上密集加工数千个光纤光栅感测点，实现准分布式密集监

测；解调速度快，可实时测试。弱光栅光纤结合了光纤光栅的传感优势和光时域技术的定位优势，可实现长距离工程的实时监测[10]。

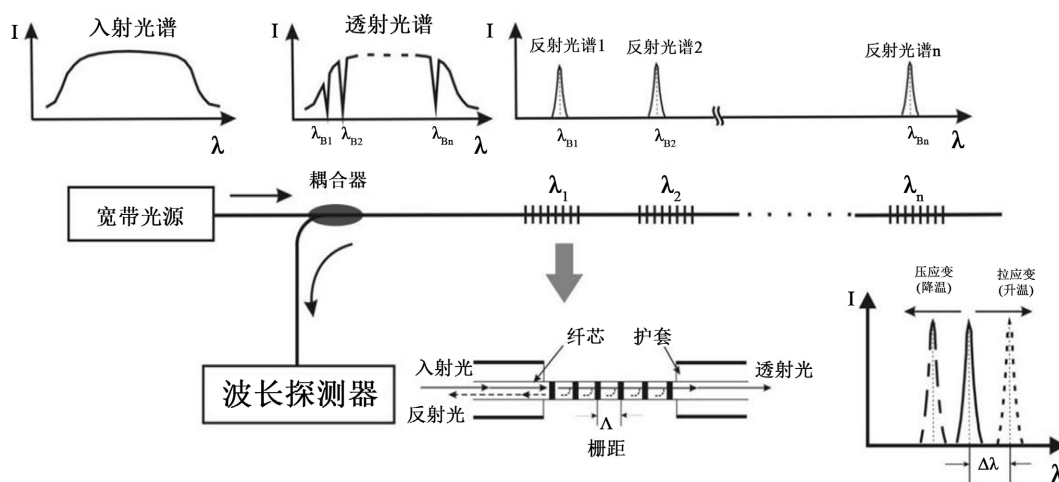


Figure 1. FBG dense distributed sensor measurement schematic
图 1. FBG 密集分布式传感器测量原理图

3. 围岩变形的因素

3.1. 隧道开挖方式与方法对围岩变形的影响

在进行隧道工程施工时，隧道开挖后会对围岩原本的平衡造成破坏，应力场的改变，导致其应力重新分布，寻求再平衡。由此，隧道工程的开挖方式是选择非爆破技术与爆破技术，隧道工程开挖方法是选择分部开挖法或全断面开挖，对围岩的应力状态都存在着直接影响，其影响的主要表现为位移场的变化。在本工程 V、VI 级围岩中开挖方式采取的是台阶法，在台阶法开挖过程中，上半断面在收敛变形后，逐渐趋于稳定，而下半断面开挖，会造成在上半断面扰动，并会伴随着收敛出现变形突变，变形突变幅度大小与断面瞬间所出现的收敛突变接近，但其数值并不大。在隧道工程开挖过程中，针对同一类型的围岩，采取台阶法与全断面开挖方法对围岩变形的影响程度不同，围岩中全断面开挖较之台阶法所引起的变形相对较小。采取台阶法进行隧道开挖，在开挖过程中，上台阶围岩会受到两次扰动。

3.2. 支护结构对围岩变形的影响

采取支护措施，支护结构发挥作用，可以减小塑性圈范围。隧道工程支护结构建立，对围岩的应力与变形存在着直接影响。通过支护系统，限制隧道开挖围岩变形，减少围岩变形。

3.3. 邻近施工对围岩变形的影响

在隧道初期支护之后，围岩变形逐渐趋于稳定，此时的围岩处于一种相对稳定状态。在隧道后期施工过程中，如进行隧道侧壁开挖等作业，会对围岩变形造成影响，围岩变形的特征主要表现为小幅震荡。

3.4. 施工工序对围岩变形的影响

隧道工程施工工序是影响围岩变形的主要因素。在隧道施工中，其主要工序包括隧道开挖、初期支护、仰拱设置、隧道二次衬砌等。通过研究发现，在隧道开挖过程中，围岩变形已经产生，其变形幅度约占总体变形量的 30%，在初期支护施工后，虽然对围岩变形发挥了一定的抑制作用，但围岩仍存在着

40%左右的变形。通过设置仰拱，缩小隧道变形，此时，围岩变形量约为 20%，经过隧道二次衬砌施工后，围岩变形逐渐稳定，变形量低于 10%。在隧道施工之后，围岩重新进行稳定状态。

4. 工程应用

4.1. 工程概况

本工程位于平阳县水头镇，是鳌江干流水头段重要的防洪工程。该防洪工程主要由两条分洪隧洞、进口分洪闸及施工支洞等组成。是为解决平阳县洪灾而实施的一项重要工程。

设分洪隧洞由西向东横穿山体，经门前山，于唐家岭金塔村下穿白岩寨隧道，经上东山、岭头等山体至显桥水闸下游 920 m，山岙排至鳌江干流，分洪隧洞包括 2 条，南线分洪隧洞长 6.538 km，北线分洪隧洞长 6.563 km，由上游无压段、倒虹吸段、下游无压段组成，衬后洞宽 14 m，设计最大分洪流量各 410 m³/s。

选取湖北村支洞作为科研断面，该断面距工作面较近，监测数据更加可靠。该地形坡度 30°~45°，局部有近直立岩体，形成陡崖。覆盖层以第四系残坡积含碎石粉质粘土为主，厚度一般 2~5 m。基岩为燕山晚期侵入岩花岗岩和玻屑晶熔结凝灰岩，新鲜岩石致密坚硬，强风化层厚 5~7 m。

4.2. 监测方案

为了研究大断面输水隧洞深层围岩在施工期及运营期的变形问题，本试验研究了南线和北线隧洞两个科研断面，南线科研断面位于湖北村支洞附近，北线科研断面位于南北线之间，位置如图 2 所示。

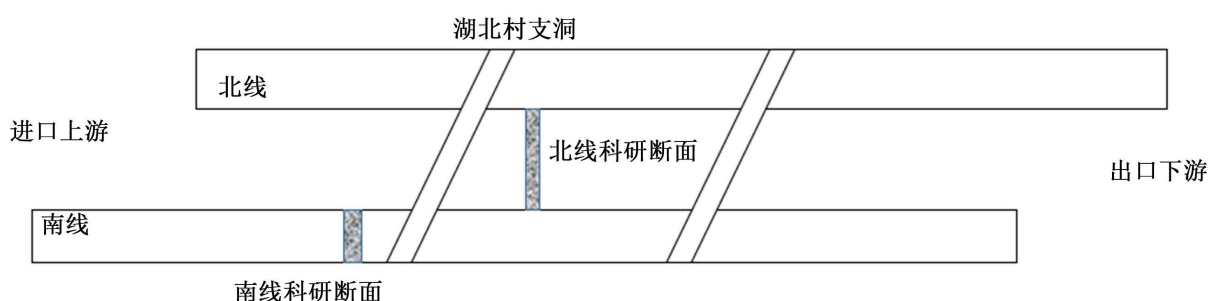


Figure 2. Location of scientific research section

图 2. 科研断面位置

在南线隧洞断面如图 3 所示，本次监测共选取三个钻孔，分别命名为左侧一号孔、右侧一号孔和右侧二号孔，钻孔深度约为 15 m，弱光栅光纤感测光缆每隔 1 m 存在一个光栅点，能够对钻孔各深度围岩变形情况进行监测。北线隧洞监测断面是从支洞南线向北线方向开挖 30 m 深度的钻孔，支洞南线与北线距离约 30 m。开挖钻孔时，南线隧洞已基本完工，北线隧洞还未施工。在该北线隧洞断面布设光缆，可以达到超前监测支洞北线施工期及运营期的围岩变形。

为了能够利用现有光纤光栅技术准确监测围岩变形情况，采用固定在 PVC 管上的弱光栅光纤感测光缆布设于钻孔，对深层围岩变形规模、趋势进行监测分析，探究围岩在施工以及运营期间的稳定性。断面附近的围岩变形情况对于隧洞稳定性具有重要影响。利用弱光纤光栅感测光缆监测装置能够准确监测围岩变形情况。其原理是随着围岩发生变形，与围岩耦合的弱光纤光栅感测光缆会受拉或受压，从而引起波长在栅点处会发生变化，通过解调设备可以记录某一时刻的波长，然后通过计算公式可以计算出围岩变形大小。

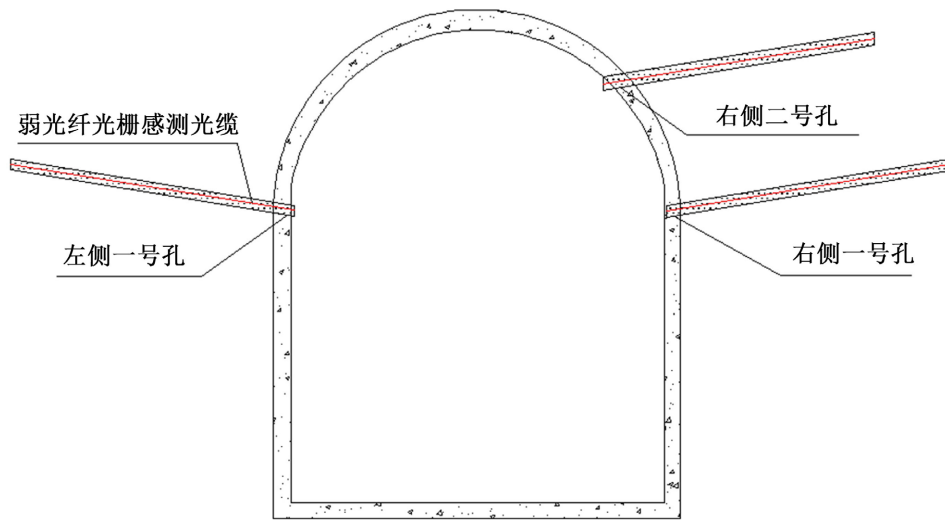


Figure 3. Layout of weak fiber grating sensing optical cable
图 3. 弱光纤光栅感测光缆布设图

4.3. 监测结果分析

监测数据从 2020 年 12 月初弱光栅光缆施工安装使用后取用并作为初始值，监测周期为 80 天，监测目标为湖北村施工支洞南北线隧洞两个科研断面。从现阶段监测数据分析，已经能够观察到一定的趋势。本文规定弱光栅光纤光缆受拉为正应变、受压为负应变，分析弱光栅光纤感测光缆在深层围岩各位置的监测应变数据，得到深层围岩在施工期及运营期的应变情况，同时分析本文设计的弱光纤光栅感测光缆监测装置在深层围岩监测领域的监测效果。

4.3.1. 北洞断面监测结果分析

北线隧洞监测断面是从湖北支洞南线向北线方向开挖 30 m 深度的钻孔，湖北支洞南线与北线距离 30 m，此时支洞北线尚未施工开挖，该钻孔布设光缆，可以达到超前监测支洞北线施工期及运营期的围岩变形情况，该监测断面距离北线隧洞施工进口 224 m，以隧洞施工第一天作为数据分析开始时间，以靠近隧洞口的光缆深度为 0 m。

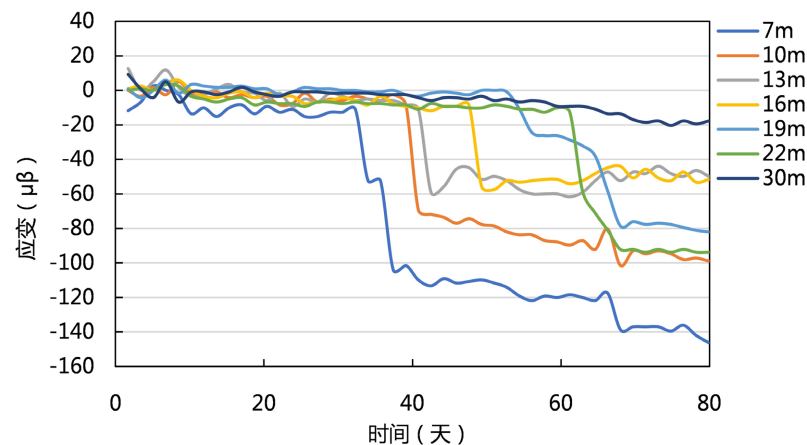


Figure 4. Monitoring time-strain diagram of borehole fiber optic cable in Beidong
图 4. 北洞钻孔光缆监测时间 - 应变图

图 4 分析了从施工起, 北洞钻孔不同深度光缆监测的应变情况。可以看出随着施工时间的增加, 不同深度的围岩应变开始发生变化。在开始施工的 30 天内, 围岩压力基本不变, 施工第 31 天围岩应变开始发生急剧变化, 后缓慢变化, 且在施工 70 天后逐渐达到平衡。考虑隧道爆破施工开挖对岩土体的影响, 开挖会使围岩裂隙不断扩张, 造成岩体松动, 使得围岩压应力急剧增大。但随着围岩压应力释放, 围岩应力由急剧变化状态逐渐变为平稳变化状态。

不同深度的围岩应变发生突变时间不同, 可以看出浅部围岩的应变大于深部围岩发生的应变。

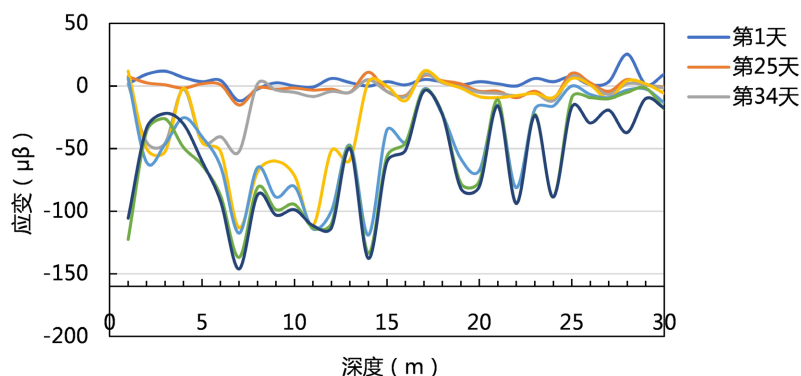


Figure 5. Monitoring depth-strain diagram of borehole fiber optic cable in Beidong
图 5. 北洞钻孔光缆监测深度 - 应变图

图 5 分析了从施工起, 不同时间北洞钻孔光缆监测的深度 - 应变情况。可以看出围岩应变以压应变为主, 主要应变发生范围是 7~15 m。25 m 以上深度围岩发生应变较小。

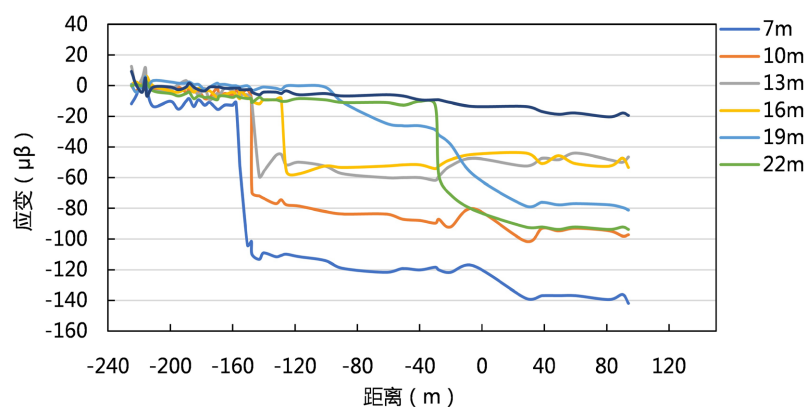


Figure 6. Monitoring distance-strain diagram of borehole fiber optic cable in Beidong
图 6. 北洞钻孔光缆监测距离 - 应变图

图 6 分析了钻孔与施工断面距离和光缆应变的关系。可以看出钻孔与施工断面距离 160 m 时围岩应变开始发生急剧变化, 后达到平衡, 当施工断面靠近钻孔, 围岩应变开始增大, 后达到平衡。

监测期间北洞测点应变以压应力为主, 最大压应变发生在深度 7~14 m 的范围, 最大应变为 $140 \mu\beta$ 。深度 23 m 以上发生的应变较小。

4.3.2. 南洞断面监测结果分析

在南线隧洞断面监测共选取三个钻孔, 分别命名为左侧一号孔、右侧一号孔和右侧二号孔, 钻孔深

度约为 15 m, 弱光栅光纤感测光缆每隔 1 m 存在一个光栅点, 能够对钻孔各深度围岩变形情况进行监测。该断面监测时, 南线隧洞施工基本结束, 主要研究运营期间南洞隧洞断面应变情况。

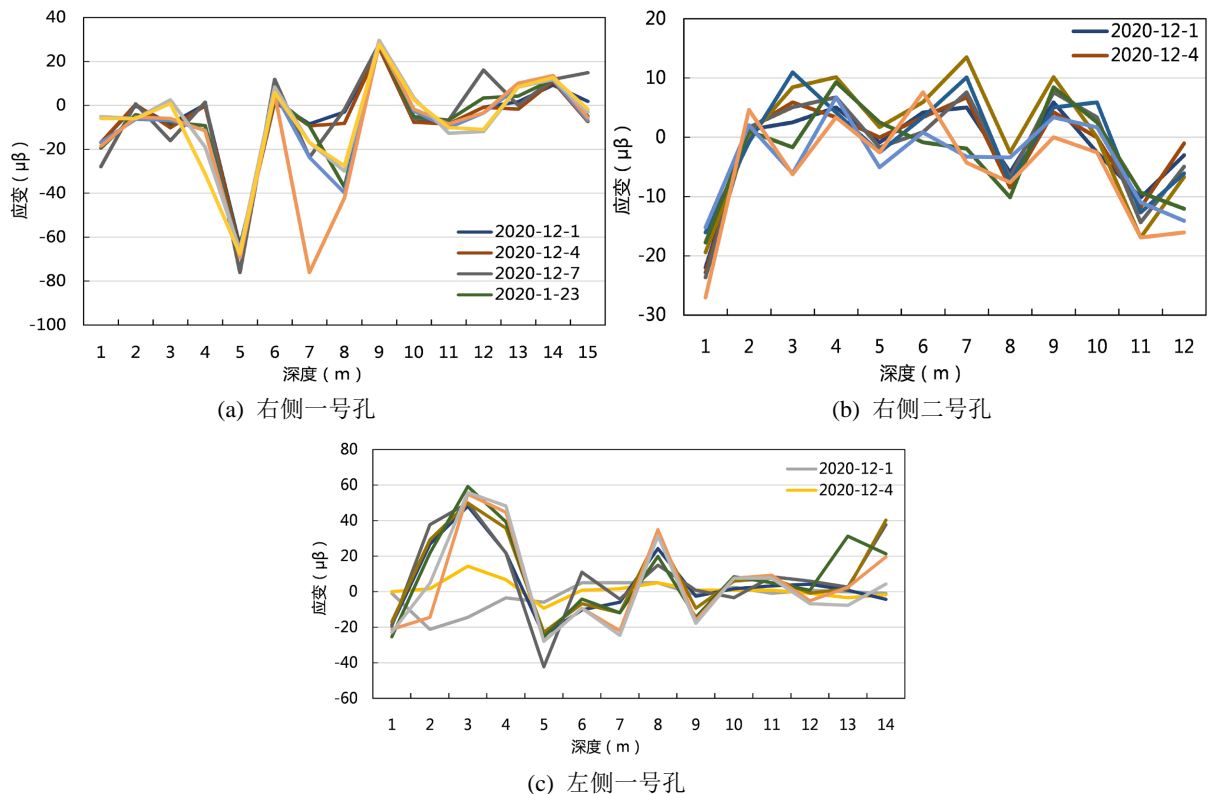


Figure 7. Monitoring depth-strain diagram of Nandong borehole fiber optic cable
图 7. 南洞钻孔光缆监测深度 - 应变图

图 7 分析了运营期间南洞三个钻孔光缆监测的深度 - 应变情况。可以看出隧洞运营期间, 同一断面上围岩应变既有压应变又有拉应变, 应变主要发生范围以前部围 0~10 m 范围内。根据数据结果可以看出右侧一号孔处应变主要为负值, 该位置围岩主要受到压应力的影响, 与左侧一号孔处围岩应变相反, 因此可以判断隧洞围岩整体向左移动可能性较大。

右侧二号孔于深部围岩向隧洞收敛, 从而导致感测光缆受压较大主要为压应变。由于右侧围岩深处感测光缆与围岩在注浆作用下形成整体, 随着隧洞围岩整体向左侧移动, 弱光纤光栅感测光缆受压所致。

监测期间南洞右侧一号孔浅部测点应变以压应力为主, 深度应变以拉应力为主。最大压应变发生在深度 5 m 的范围, 最大应变为 $-76 \mu\beta$ 。深度 10 m 以上发生的应变较小。右侧二号孔各测点的应变范围不大, 都在 $\pm 20 \mu\beta$ 范围内。左侧一号孔围岩主要受到拉应变, 主要拉应变发生在浅部围岩 1~4 m 左右, 最大拉应变为 $59.15 \mu\beta$ 。由南洞三个钻孔各测点最大应变和最小应变与北洞钻孔应变监测数据对比, 可以发现南洞围岩发生应变更大, 最大应变为 $-141 \mu\beta$, 北洞钻孔最大应变为 $-76 \mu\beta$ 。即施工阶段的围岩应变程度远大于运营期发生的应变。做好施工期深度围岩应变监测具有重要意义。

5. 结论与建议

弱光纤光栅监测技术可用于桩基变形、钢结构变形、地面不均匀沉降、路基变形等监测。本文基于弱光栅技术制作弱光纤光栅感测光缆监测装置, 制作方便, 成本低、适应性强, 在平阳县南湖分洪工程

大断面输水隧洞中实现了深层围岩变形实时监测，监测数据结果分析如下：

1) 本文提出的输水隧洞中的弱光纤光栅感测光缆装置方案在注浆完成后存活率高，可以实现监测隧洞围岩的深层变形。

2) 在施工期间，北线隧道围岩主要受压应力，在施工断面距离钻孔 160 m 时，围岩压力急剧增大，后达到平衡。施工断面靠近钻孔位置时，围岩压力再次变大。隧洞施工对围岩深层的变形情况有着重要意义，以围岩收敛变形为主。

3) 南线隧洞左侧一号孔和右侧一号孔处隧洞深层围岩位应变结果相反，其中左侧一号孔处围岩应变呈正值，右侧一号孔处围岩应变呈负值，且在前部围岩位移变化范围较大，因此可以判断隧洞围岩整体向左移动可能性较大。

4) 南线隧洞和北线隧洞围岩发生应变的主要位置以浅部围岩为主，围岩深度增加，应变减小。同时可以看出北洞围岩应变大于南洞围岩情况，因为北洞的监测期为隧洞施工期，北线隧洞围岩的施工监测期已结束。因此加强隧洞围岩在施工阶段的稳定性和支护作用，对隧洞健康施工有着重要意义。

参考文献

- [1] 田四明, 王伟, 巩江峰. 中国铁路隧道发展与展望[J/OL]. 隧道建设(中英文): 1-18[2021-03-15].
- [2] 黄华鹏. 基于极限分析法原理的浅埋隧道围岩受力监测对比分析[J]. 中国水能及电气化, 2021(1): 63-68.
- [3] 吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测研究[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-11[2021-03-15].
- [4] 苏胜昔, 杨昌民, 范喜安. 光纤光栅传感技术在高速公路隧道围岩变形实时监测中的应用[J]. 工程力学, 2014, 31(S1): 134-138+144.
- [5] 蒋奇, 隋青美, 张庆松, 等. 光纤光栅锚杆传感在隧道应变监测中的技术研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 315-318.
- [6] 何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 146-153.
- [7] 武宇. 隧道围岩变形的空间效应研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [8] 王海军. 缓倾顺层围岩超大断面隧道长锚杆作用机理及施工技术[J]. 四川建筑, 2020, 40(6): 223-225.
- [9] 周杰. 自进式锚杆在玄武岩松散堆积体隧道中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(24): 82-83.
- [10] 魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG 在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571-576.