

文章编号: 1007-2993(2022)06-0443-05

# 基于弱光栅技术的大断面输水隧洞 深层围岩变形监测

张红纲<sup>1</sup> 卢斌强<sup>1</sup> 贾立翔<sup>2</sup> 张文轩<sup>2</sup>

(1. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江杭州 310000; 2. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏苏州 215123)

**【摘要】** 隧洞深层围岩变形的准确监测能够提高隧洞的施工效率和安全性。利用弱光栅技术对平阳县某输水隧洞深层围岩变形进行监测。监测结果显示: 隧洞围岩应变变化较小, 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, 符合事实情况。监测方案和监测结果可为类似工程提供参考。

**【关键词】** 光纤光栅; 隧洞施工; 深层围岩; 变形监测

**【中图分类号】** U 459.6; U 456

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.06.003

## Deformation Monitoring of Deep Surrounding Rock of Large-section Water Conveyance Tunnel Based on Weak Grating Technology

Zhang Honggang<sup>1</sup> Lu Binqiang<sup>1</sup> Jia Lixiang<sup>2</sup> Zhang Wenxuan<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

2. Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, Jiangsu, China)

**【Abstract】** Accurate monitoring of the deformation of the deep surrounding rock of the tunnel can improve the efficiency and safety during tunnel construction. Weak grating technology was used to monitor the deformation of the deep surrounding rock of a water conveyance tunnel in Pingyang. The monitoring results show that the strain change of tunnel surrounding rock is small, and the stability of surrounding rock is generally good. The monitoring results of the weak fiber grating sensing cable is basically consistent with the traditional monitoring results, which are in line with the facts. The monitoring plan and monitoring results can provide reference for similar projects.

**【Key words】** fiber grating; tunnel construction; deep surrounding rock; deformation monitoring

### 0 引言

20 世纪 80 年代以来, 我国基础设施建设规模越来越大, 其中隧道建设更是飞速发展, 但随着隧道施工断面逐渐增大, 由深层围岩变形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尤为重要<sup>[1]</sup>。目前, 已经有大量学者针对不同用途的隧道围岩变形情况进行监测, 例如, 吴静红等<sup>[2]</sup>利用光纤光栅传感技术对京雄高铁大断面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; 苏胜昔等<sup>[3]</sup>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、变形速率进行了准确监测, 监测结果对隧道安全运营具有重要的指导意义; 蒋奇等<sup>[4]</sup>将光纤光栅技术与锚杆相结合, 将其运用到隧道围岩变形监测中, 利用 FBG 锚杆监测围岩变形情况, 其监测技术具有灵敏度高、稳定性好、测量范围大、结构简单和能在野外岩土结构工程进行长期有效监测等优点。

尽管光纤光栅传感技术已经广泛运用于隧道围岩变形监测领域, 并取得了一系列成果, 但利用弱光栅技术针对隧洞深层围岩变形进行低成本、长期有效监测仍缺乏研究。本文在综合前人研究成果的基础上, 针对正在施工的平阳大断面输水隧洞, 设计了

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41877212); 浙江省水利科技计划项目(RA1909; RB2030)

**作者简介:** 张红纲, 男, 1978 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程应用研究。E-mail: 987984862@qq.com

**通讯作者:** 贾立翔, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程应用研究。E-mail: jialx@nzsensing.com

将弱光纤光栅感测光缆固定在钢筋上,对隧洞深层围岩变形情况进行监测的技术方案。本文详细介绍了弱光纤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。

## 1 弱光纤光栅技术原理

弱光纤光栅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。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<sup>[5]</sup>。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(见图 1)。

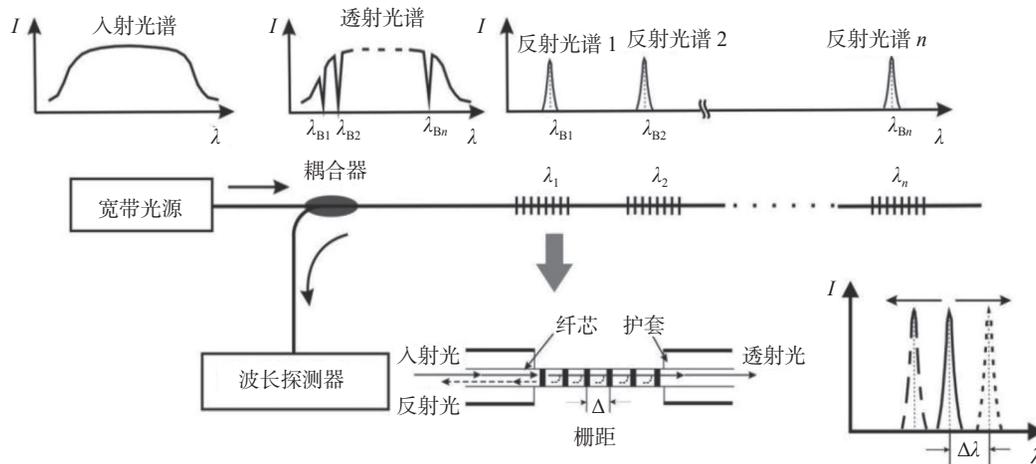


图 1 FBG 密集分布式传感器测量原理图

弱光纤光栅有如下传感特性: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;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。弱光纤光栅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。

## 2 工程应用

### 2.1 工程概况

平阳县南湖分洪工程是鳌江干流水头段重要的防洪工程。工程建设内容由进口分洪闸、分洪隧洞、施工支洞及补偿工程组成。进口分洪闸共计两座,每座闸共计 2 孔,每孔净宽 8 m,底槛顶高程为 7.0 m;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 m<sup>3</sup>/s。本项目建成后能够降低水头段河道洪水位,有效提升水头段干流防洪能力。

工程现阶段正在施工,考虑到围岩变形随时间推移逐渐稳定,因此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<sup>[6]</sup>。

### 2.2 监测方案

针对大断面输水隧洞深层围岩变形问题,为了

能够利用现有光纤光栅技术准确监测围岩变形情况,采用固定在钢筋上的弱光纤光栅感测光缆对深层围岩变形规模、趋势进行监测分析,同时通过对比多点位移计与弱光纤光栅感测光缆监测结果验证弱光纤光栅监测技术的准确性。任一断面的深层围岩变形情况对于隧洞安全施工都具有重要影响,其中临近工作面的断面深层围岩变形更大,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,固定在钢筋表面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。

如图 2 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,弱光纤光栅感测光缆每隔 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。选用快速易安装装置,以便施工时能够满足快速、方便的要求<sup>[7]</sup>,同时,为能够充分利用资源,选择在注浆钻孔中布设弱光纤光栅感测光缆监测装置,但弱光纤光栅感测光缆安置和加固注浆工艺对弱光纤光栅感测光缆存活性影响较大,所以弱光纤光栅感测光缆监测装置的制作、保护和布设过程都较为重要<sup>[8]</sup>。本工程结合前期实验室试验成果,设计出以下一套制作安

装工艺。

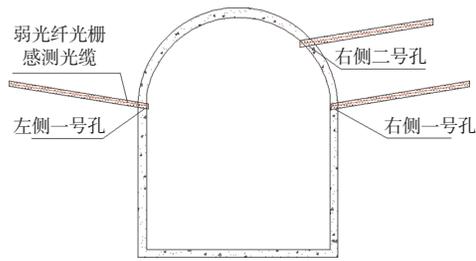


图2 弱光纤光栅感测光缆布设图

(1)选取直径为 25 mm 的带肋钢筋作为支撑,然后用角磨机将钢筋两侧纵向肋纹附近打磨光滑作为弱光纤光栅感测光缆布设路径,将弱光纤光栅感测光缆以绑扎的方式固定在钢筋表面,在其上涂抹一层环氧树脂胶;

(2)在弱光纤光栅感测光缆 1.5 m、4 m、8 m 和 15 m 位置处安装 4 个多点位移计,以便对比弱光纤光栅感测光缆监测结果准确性;

(3)在弱光纤光栅感测光缆监测装置尾端用塑料保护套保护弱光纤光栅感测光缆,同时在弱光纤光栅感测光缆监测装置安装进钻孔和注浆后利用便携式解调设备弱光栅解调仪测试,如果数据异常及时排查检修。引线光缆线路应按照“安全、隐蔽、距离短”的原则设计。

### 2.3 监测结果分析

弱光纤光栅感测光缆监测装置自 2020 年 12 月初已投入使用,由于现场仍在爆破施工,因此监测数据有限,从现阶段监测数据分析能够观察出一定的趋势。规定弱光栅光纤光缆受拉为正、受压为负,在分析弱光栅光纤感测光缆在深层围岩各位置的监测数据后,再比较围岩某一特殊深度处弱光栅光纤感测光缆监测的应变变化和多点位移计监测的位移变化,综合分析对比后,确定深层围岩应变及位移变化情况,同时分析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(见图 3、图 4)。

由式(1)可知,围岩的位移 $\Delta l$ 与栅点距离及围岩应变相关,根据弱光栅解调仪读取应变值结合栅点距离,即可得某一深度处围岩的变形量。

$$\Delta l = \varepsilon l \quad (1)$$

式中: $\Delta l$ 为位移,mm; $\varepsilon$ 为应变; $l$ 为围岩表面至光纤栅点的距离,mm。

科研断面左侧一号孔弱光纤光栅感测光缆监测数据显示,1~5 m 深度围岩应变变化较大,最大值约为 $-130 \mu\varepsilon$ ,随着围岩深度增加,6~15 m 围岩应变变化很小,随时间推移应变增加,最大值约为 $50 \mu\varepsilon$ ,由

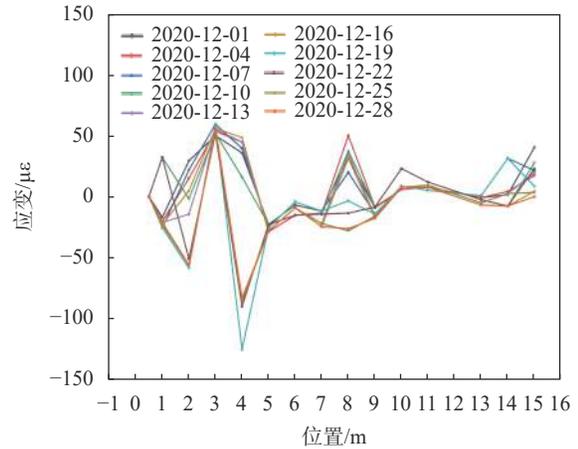
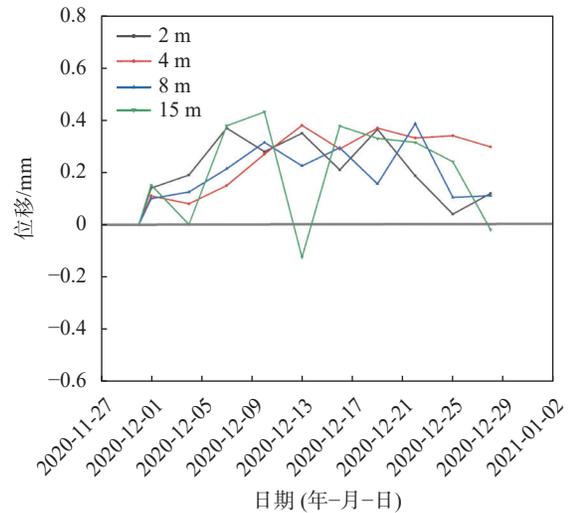
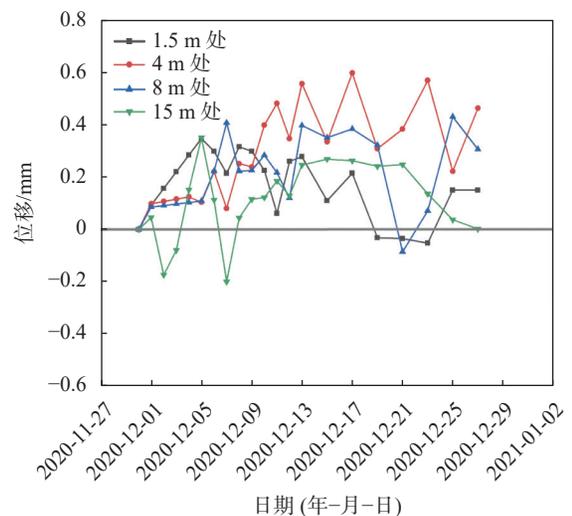


图3 左侧一号孔弱光纤光栅感测光缆监测数据图



(a) 弱光纤光栅感测光缆监测数据



(b) 多点位移计监测数据

图4 左侧一号孔特殊位置监测数据图

监测数据结果可以看出浅部围岩受隧道开挖影响较大,随着深度增加,隧道开挖对围岩的影响延伸至深层围岩后逐渐减小,导致围岩应变变化幅度较小。

通过对比科研断面左侧一号孔弱光纤光栅感测

光缆和多点位移计的监测数据,发现围岩变形范围约为 $-0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ 。对应的多点位移计监测数据并不稳定,由数据结果可以看出多点位移计监测数据整体呈正值,隧道右侧围岩变形较大,导致钢拱架整体向左侧移动,从而使得围岩向深部变形,从而导致安置在钢筋上的弱光栅光纤感测光缆受拉。对比结果显示两种方法监测数据总体上具有一致性,但弱光纤光栅感测光缆监测数据更加稳定。

科研断面右侧一号孔处弱光纤光栅感测光缆监测数据显示,该位置围岩应变主要呈负值,其中 $5 \text{ m}$ 深度处围岩应变变化较大,变化最大值达 $-75 \mu\epsilon$ ,该位置围岩向隧道内收敛,导致感测光缆受压(见图5)。

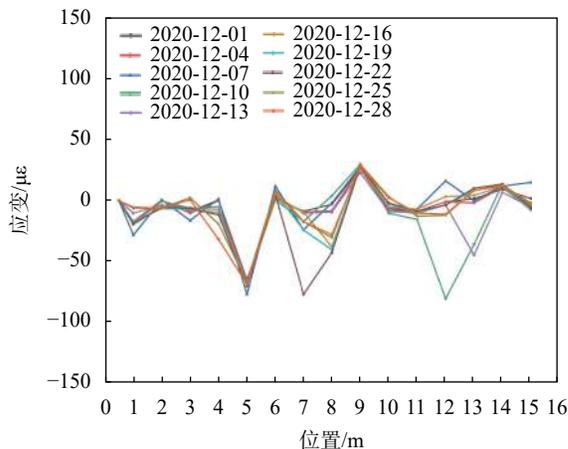
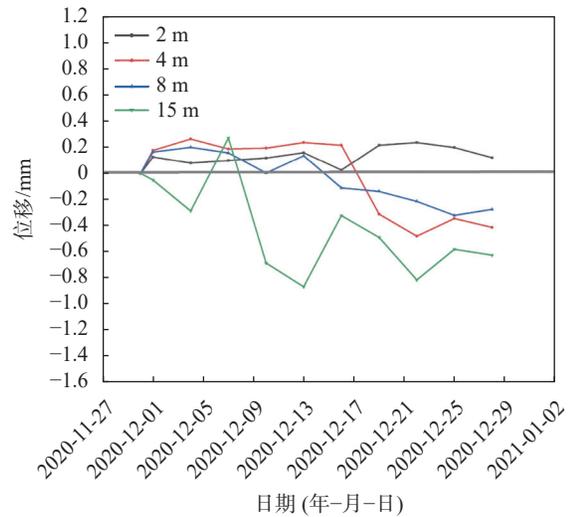


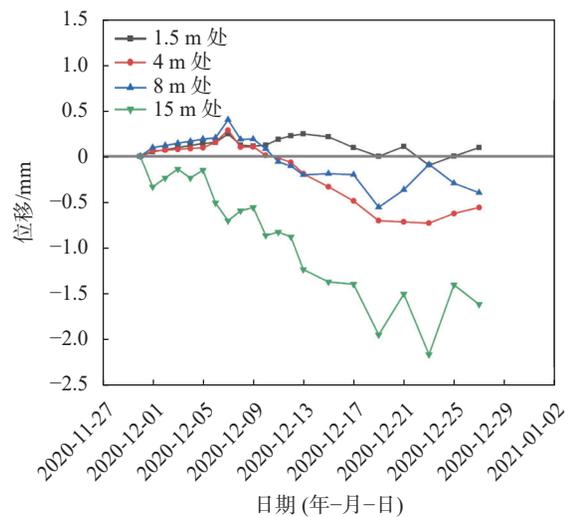
图5 右侧一号孔弱光纤光栅感测光缆监测数据图

通过对比科研断面右侧一号孔处弱光纤光栅感测光缆监测数据和多点位移计监测数据,发现 $15 \text{ m}$ 深度处围岩位移较大, $2 \text{ m}$ 、 $4 \text{ m}$ 和 $8 \text{ m}$ 处围岩位移较小,12月13日—12月15日围岩位移增大,变化最大值达 $-0.8 \text{ mm}$ ,根据数据结果可以看出右侧一号孔处位移主要为负值,与左侧一号孔处围岩位移相反,因此可以判断隧洞围岩整体向左移动可能性较大。此处多点位移计监测数据明显反映出深层围岩处于缓慢变形趋势,且不同深度变形趋势基本相同,围岩变形基本上呈负值,表示右侧围岩产生向隧洞内方向收敛,其中 $1.5 \text{ m}$ 深度处围岩变形程度最小, $15 \text{ m}$ 深度处围岩变形程度最大,根据监测结果可以分析出隧洞围岩表面由钢拱架支撑保护,深层围岩变形情况随深度增加而增大(见图6)。

科研断面右侧二号孔处弱光纤光栅感测光缆监测结果显示此处主要为负应变,约在 $-30 \sim 10 \mu\epsilon$ 范围内变化,其中 $1 \text{ m}$ 和 $15 \text{ m}$ 深度处围岩应变最小,分别约为 $-25 \mu\epsilon$ 和 $-20 \mu\epsilon$ (见图7),由数据结果可以看出隧洞表层围岩感测光缆受压,围岩向隧洞内收敛,随深度增加围岩受影响较小。



(a) 弱光纤光栅感测光缆监测数据



(b) 多点位移计监测数据

图6 右侧一号孔特殊位置监测数据图

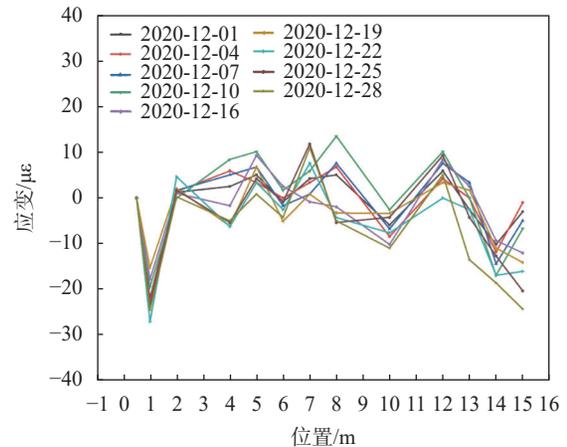
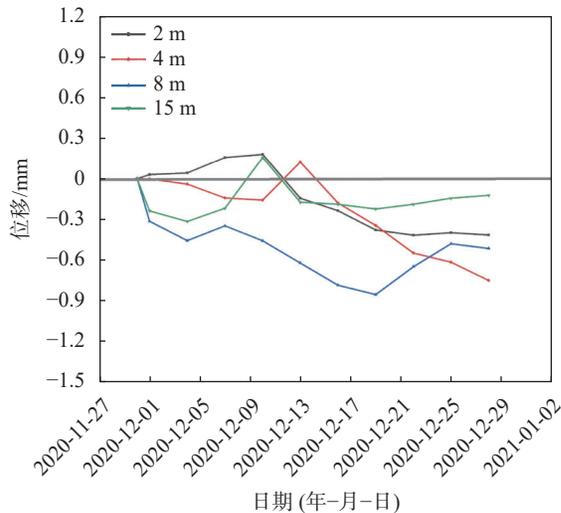


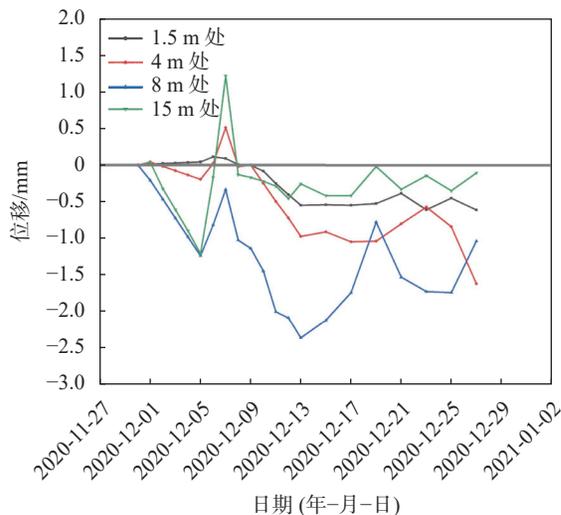
图7 右侧二号孔弱光纤光栅感测光缆监测数据图

通过对比科研断面右侧二号孔处弱光纤光栅感测光缆和多点位移计监测结果发现,深层围岩位移主要为负值,且 $8 \text{ m}$ 深度处围岩位移较大,至12月18日达到 $-0.8 \text{ mm}$ ,根据数据结果可以看出,由于深部

围岩向隧洞收敛,从而导致感测光缆受压较大。多点位移计监测数据显示 1.5 m、4 m、15 m 深度围岩变形较小,在 $-0.5 \sim 0.5$  mm 范围内变化,8 m 处随时间推移,围岩变形逐渐增大,围岩变形最大值达到 $-2$  mm,最终稳定在 $-1.5$  mm 左右,约 15 天左右趋于稳定,这是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(见图 8)。



(a) 弱光纤光栅感测光缆监测数据



(b) 多点位移计监测数据

图 8 右侧二号孔特殊位置监测数据图

### 3 结论

基于弱光栅技术制作弱光纤光栅感测光缆监测装置,成功运用于平阳输水隧洞深层围岩变形监测项目中,经过监测数据分析,能够得出以下结论:

(1)安装在输水隧洞中的弱光纤光栅感测光缆在注浆完成后存活率高,采用弱光纤光栅感测光缆监测装置监测深层围岩变形情况是可以实现的。

(2)弱光纤光栅感测光缆监测数据显示,左侧一号孔和右侧二号孔处隧洞深层围岩位移变化具有对应性,其中左侧一号孔处围岩位移呈正值,右侧二号孔处围岩位移呈负值,且在前部围岩位移变化范围较大,随围岩深度增加,12月12日—12月15日位移变化很小,之后应变增大。所以平阳输水隧洞 1~5 m 围岩受隧道开挖影响较大,深层围岩前期受影响较小,后期受影响增大。

(3)通过比较弱光纤光栅感测光缆和多点位移计监测数据,发现两种监测手段所得出的结果基本一致,同时由于弱光栅感测光缆通过光纤传感器传输数据,避免了类似左侧一号孔多点位移计出现的数据不稳定的情况,所以弱光纤光栅感测光缆监测数据可靠性较高。

### 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].隧道建设(中英文),2021,41(2):1-18.
- [2] 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].激光与光电子学进展,2020,57(21):1-11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 武 宇.隧道围岩变形的空间效应研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [7] 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.
- [8] 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.

收稿日期:2021-05-12