

DOI: 10.11779/CJGE2020S2015

高寒区长距离输水渠道光纤渗漏监测新技术研究

李登华¹, 张桂荣¹, 丁 勇², 孔 洋¹, 何 宁³

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 南京理工大学, 江苏南京 210094;
3. 甘肃电投炳灵水电开发有限责任公司, 甘肃临夏 731600)

摘要: 目前传统的监测技术在长距离输水渠道渗流监测上存在明显的不足, 基于拉曼光时域反射原理, 研发了一种新型渗流监测光缆, 提出了可用于高寒区长距离输水渠道的分布式光纤拉曼渗流监测技术。针对空气、不同含水率的砂土、纯水等不同现场环境进行了室内试验模拟研究, 对比分析光纤温度变化, 结果表明在不同的环境中该新型光缆均可反映出环境特征, 证实了光纤监测的可行性。在北疆干渠开展新型光纤渗漏监测技术现场原型试验, 并在光纤埋设处对应埋设了传统的孔隙水压力计, 对比分析并验证分布式光纤测渗漏技术应用于渠道渗漏监测的可行性及测量精度。本次现场测量光纤采样点间距为 0.5 m, 光纤测量的平均值与孔隙水压力计测值差小于 0.5 m, 差值在理论范围内, 说明光纤渗漏监测技术能够适应现场测量条件, 证实了其在高寒区长距离输水渠道应用的准确性、可行性和可靠性。

关键词: 分布式光纤; 高寒区渠道; 渗漏监测; 原型试验

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0083-05

作者简介: 李登华(1980—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程安全监测和特殊土改良领域的科研工作。E-mail: dhli@nhri.cn。

New technology of fiber leakage monitoring in long-distance water transfer channels in alpine and cold regions

LI Deng-hua¹, ZHANG Gui-rong¹, DING Yong², KONG Yang¹, HE Ning³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China. 2 Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 3. Gansu Electric Power Investment Bingling Hydropower Development Co., Ltd., Linxia 731600, China)

Abstract: In the seepage monitoring of long-distance water transfer channels, the traditional monitoring technology has obvious shortcomings. Based on the principles of Raman optical time domain reflection, a new type of seepage monitoring optical cable is developed, and a distributed optical fiber Raman seepage monitoring technology which can be used in the long-distance transfer channels in cold regions is proposed. The laboratory tests are carried out for different field environments such as air, sand with different water content, pure water, etc. The results show that the new optical fiber cable can reflect the environmental characteristics under different environments, which confirms the feasibility of the optical fiber monitoring. By using the new fiber-optic leakage monitoring technology, field prototype tests are carried out in the main canal of North Xinjiang, and the pore pressure cells are installed in the fiber-optic buried place. The feasibility and measurement accuracy of the distributed fiber-optic leakage monitoring technology for the canal leakage monitoring has been analyzed and verified. The distance between the optical fiber sampling points in the field measurement is 0.5 m, and the difference between the average value of optical fiber measurement and the pore water pressure gauge measurement is less than 0.5 m, which is within the theoretical range. It is shown that the optical fiber leakage monitoring technology is suitable for the field measurement conditions, and the accuracy, feasibility and reliability of its application in the long-distance water transfer channels in cold regions are validated.

Key words: distributed fiber; channel in cold region; leakage monitoring; prototype test

0 引言

长距离引调水工程是一项解决中国北方部分地区水资源匮乏所采用的规模巨大且意义深远的水利基础

建设项目^[1]。近年来, 输水渠道和堤坝工程规模越来

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405100); 国家自然科学基金面上基金项目(51979174)

收稿日期: 2020-08-07

越大，从几公里到几十、几百甚至是上千公里，工程条件复杂、环境恶劣^[2]。引额济乌一期项目位于新疆北部，是一项跨流域、长距离的调水工程。输水渠道在冻融循环、季节性输水、高纬度强光照等影响因素下可能会存在渗漏安全隐患，降低渠堤的渗流稳定性，导致溃堤等安全事故，将会对沿线地区的经济和人民财产安全造成不可估量的损失。

渠堤渗漏监测通常采用渗压计、测压管、量水堰等监测仪器对构筑物的代表性点进行监测，通过单点的测值来反映整体渗流情况。但出于成本考虑，渠道监测断面布置稀疏，受仪器和人员随机误差影响大，极易出现较长距离的漏测、误测的情况，给长距离渠道的安全运行管理带来了挑战。基于分布式光纤温度传感技术，通过监测渠堤不同位置的温度变化值来推算其渗流情况是一种新型的渗流监测技术^[3-4]。与传统渗漏监测方法相比较，分布式光纤测渗技术具有抗高压、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高温、防雷击、成本低廉、施工过程简单等特点，非常适合在岩土体实现长距离分布式监测。随着分布式光纤解析技术的日益完善，大量的学者开展了各类基于分布式光纤的测温系统研究^[5-7]，促进了该技术日趋成熟。

本文提出了一种基于拉曼光时域反射原理的新型渗流监测光缆型式，并研发了可用于长距离输水渠道的分布式光纤拉曼渗流监测技术，通过理论研究、室内试验以及现场应用，验证了该技术的适用性。

1 高寒区渠道渗漏传感光缆设计

现有的 DTS 技术（分布式光纤温度传感技术）是将发热材料产生的热量直接传递给测温光纤，当外界环境存在渗流时，部分热量随渗流向外散失，导致测温光纤接收到的热量减少，测点温度低于无渗流的情形，由此来判断渗流的存在。但在实际工程中，由于测温光纤在渗流存在的情况下依旧能从发热材料接收到较多的热量，温度变化程度较小，敏感度低^[8]。本文设计并制作了采用特殊封装技术和护套材料的测量光缆。该光缆结构为带加热功能双层四纤非铠装拉曼光缆（光缆结构如图 1），该结构可以抵御北疆输水干渠现场零下 20℃的低温，保证光缆安全过冬。

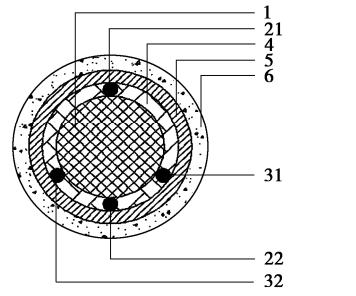
图 1 中 1 为隔热橡胶圆柱、21 为 1 号光纤套管、22 为 2 号光纤套管、31 为 1 号发热导线、32 为 2 号发热导线、4 为氟塑料层、5 为钢带、6 为导热外护套。

2 光纤渗漏监测室内试验

2.1 室内试验设计

室内试验设计将光缆置于不同的预设环境（包括：

空气、干沙、含水率为 5%，10%，15%，20%，30% 和饱和的砂土、纯水）中以验证光缆的适用性。试验装置如图 2 所示。DTS 解调仪是解析光缆温度信息，并将数据传输给电脑的重要仪器设备；环境模拟箱是大型水箱，用来放置试验所需的模拟环境。



1-隔热橡胶圆柱；21-1号光纤套管；22-2号光纤套管；
31-1号发热导线；32-2号发热导线；4-氟塑料层；
5-钢带；6-导热外护套

图 1 光缆结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of optical cable

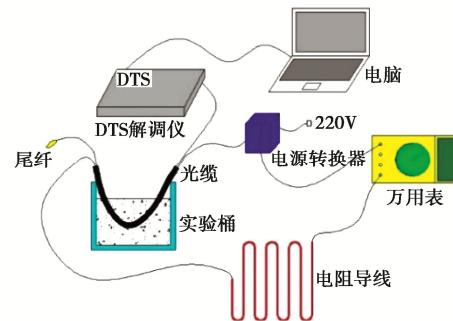


图 2 室内试验装置构成图

Fig. 2 Composition of laboratory test unit

试验时将模拟环境加入环境模拟箱，再将光缆埋设于模拟环境中，开展各种环境下的光缆升温试验。

2.2 室内试验结果分析

综合对比与分析 1 号光纤与 2 号光纤的温升状态，如图 3 与图 4 所示。可以看出光纤在不同环境下的温度变化值均不相同。以 2 号光纤的温升为例，在空气中光纤温升幅度最大，超过了 13℃；在砂环境中光纤温升幅度较在空气环境中小一点，但也超过了 11℃；在纯水环境中光纤温升幅度最小，温度升高了 6.53℃；而在各种不同含水率的砂环境中光纤温升幅度相差不大，但存在差异。这些数据表明，在不同的环境中该新型光缆均可反映出环境特征，验证了光缆用于堤坝渗漏监测的可行性。

3 光纤渗漏监测现场原型试验

为研究新型分布式光纤渗流监测技术的适用性与仪器现场安装埋设技术，依托引额济乌一期工程开展了渠堤渗漏现场试验研究与验证。

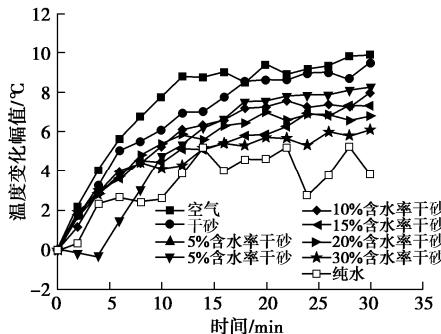


图 3 1号光纤在不同环境下温升对比图

Fig. 3 Comparison of temperature rises of fiber No. 1 under different environments

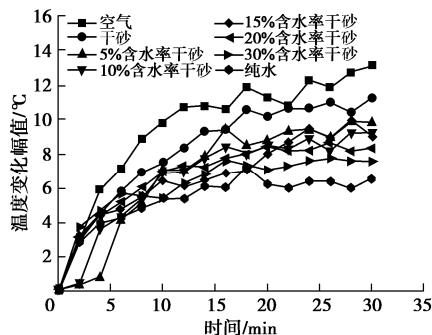


图 4 2号光纤在不同环境下温升对比图

Fig. 4 Comparison of temperature rises of fiber No. 2 under different environments

3.1 试验段布置方案

图 5 为新疆某输水渠道照片。选择在引额济乌总干渠+70 断面附近进行现场试验，该处由于铺设横向排水管的需要，对渠坡原有防渗结构进行了拆除，方便现场安装分布式渗漏监测仪器。考虑到渠道的对称型式，只在渠道一侧的渠堤上布设渗漏光缆（布置剖面见图 6），用于测量渠堤防渗膜后的实际渗漏水位高度，为后期研究渠坡变形破坏提供实测数据。



图 5 非运行期时新疆某输水渠道图片

Fig. 5 Picture of a water transfer in Xinjiang during non-operational period

为验证分布式监测技术的可行性和精度，在试验段的局部位置安装埋设了传统的孔隙水压力计，并加装自动化读装置，通过物联网将测量数据上传至位于南京水利科学研究院的服务器内。如图 7 所示，在渠底防渗膜下部布设两只孔隙水压力计，在坡顶以下

11 m 位置，布设 3 只孔隙水压力计，孔隙水压力计的安装要求参照《土石坝安全监测技术规范（SL551—2012）》。

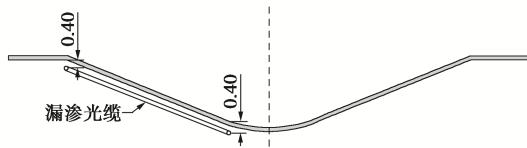


图 6 试验段光缆布置剖面图

Fig. 6 Cross-section of cable layout during field tests

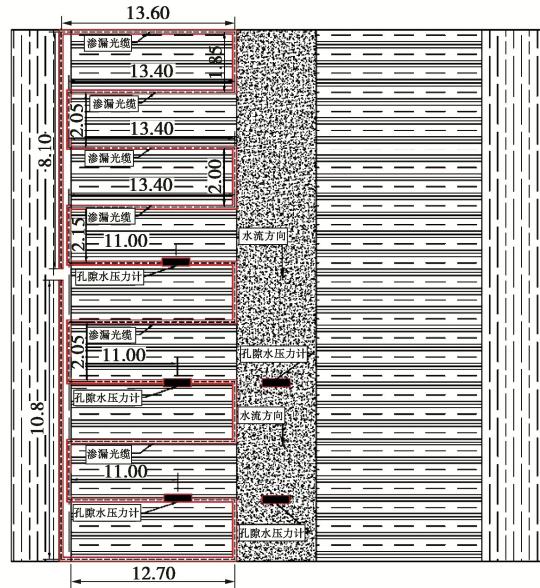
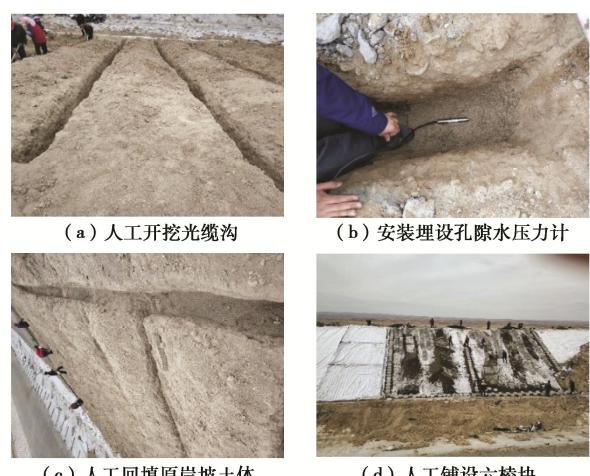


图 7 渗漏光缆和孔隙水压力计布设位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of placement of pore water pressure gauge and cable

3.2 试验段测温光纤安装埋设技术

现场光缆布设方案见图 8。



(c) 人工回填原岸坡土体 (d) 人工铺设六棱块

图 8 渗漏光缆和孔隙水压力计埋设现场

Fig. 8 Field photos in test area

埋设步骤：①将要铺设的光缆一头熔接跳线，另一头相互熔接成一体；②依图 6 和 7 在渠坡土体中开挖宽约 15 cm、深约 50 cm 的光缆沟，光缆沟间隔 2 m，依次开挖 10 条，相互连通；③在光缆沟底部摊铺、压实

厚约10 cm的剔除过大块砾石的原岸坡土料;④在光缆沟内铺设好光缆,光缆检查合格后回填光缆沟,小型振动碾压实;⑤光缆的光损检查合格后,铺设防渗膜和衬砌板。

经现场实际踏勘、放样,依据光缆布设方案安装光缆后将光缆引出至渠顶。同沟埋设孔隙水压力计与光缆,以保证测值的对比性,安装时记录仪器实际安装高程,并将电缆线呈S型顺光缆沟引出至堤顶。

采用光功率计测试光缆的工作状态,检查合格后,采用人工结合小型机械,进行渠坡的削坡、整平和压实工作。待摊铺一层厚约10 cm的素砂浆找平层后,铺设两布一膜,采用防水膜焊接机,将新铺设的两布一膜与老膜连成一体,检测合格后,在两布一膜上部铺设六棱块衬砌板。现场施工完毕后,将孔隙水压力计的电缆线汇集到光缆在渠顶的露头位置,并安装由南京水利科学研究院研制的自动化采集设备,开始监测渠道膜后水位随渠道水位的变化情况。

3.3 光纤测点定位分析

根据渠道运行的规律,分别在渠道通水后、渠道通水期间、渠道停水前逐渐降低运行水位时以及渠道停水后等有代表性的时间点内进行测量。为了更好的发挥渗漏监测光缆的优点,在正式测量前开展了点加热法的光纤定位工作,得到了光缆1号纤和2号纤的起始测量位置和终了测量位置。

如图9所示,为了测量方便,测量前将1号纤和2号纤串联成一根光纤,试验过程中通过拉曼光纤解调仪同时测量,保证了测量数据的时效性和可对比性,能有效减少其他试验因素的干扰。从图9中可以明显看出,在光纤距离向22.5, 189.5, 205.5和370.5这4个点上,光纤测值有明显的变化,说明点加热定位技术在现场条件下能有效定位光纤测点的位置,将光纤测量数据与光纤实际安装位置一一对应。

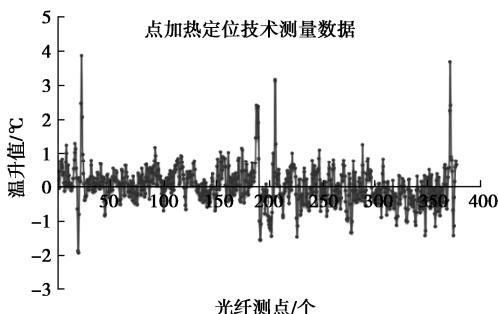


图 9 点加热定位技术测量数据

Fig. 9 Measured data by using point heating location technology

依据笔者已有的监测经验,为有效消除系统测量误差对数据的干扰,本次试验选择加热系统未工作前6次测值的平均值作为各个测点的基准值,待光纤温升数值逐渐趋于稳定,取稳定后6次测值的平均值作为各

个测点加热后的温度值,前后两值相减,即可得到光纤各点的温升值。

3.4 监测结果分析

为更好地通过数值来判断光缆所处位置的渗流情况,对温升曲线进行了拟合,得到相应的量化指标,温升曲线拟合公式如下所示:

$$\Delta T = Kt^2 \quad (1)$$

式中, K 为环境特征值,反映温度的增长速率。

根据光纤渗漏监测室内试验的成果,采用式(1)分析光纤每个点的温升曲线,可得各个点的 K 值,绘制曲线如图10所示。

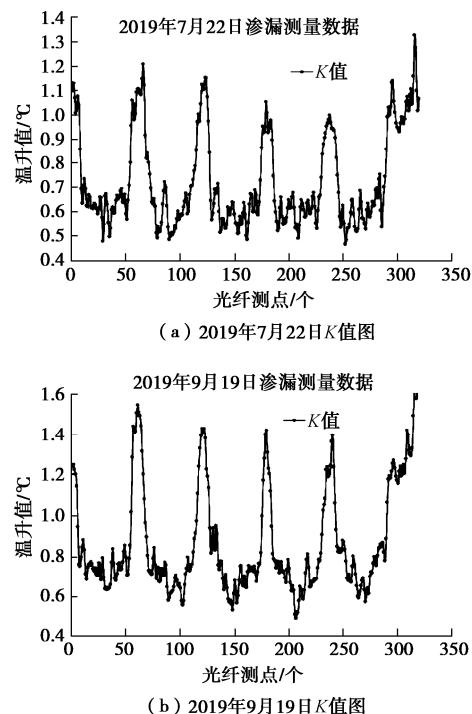


图 10 典型时间点 K 值曲线图

Fig. 10 Values of K at typical time points

由于光缆呈S型布置,从曲线形式上可以看出,渠道膜后渗水对光缆各点 K 值有较明显的影响,即渗水区域的光纤 K 值均在一定区间波动。依据前期室内试验的研究成果,确定温差3°C的点为膜后水位的临界点判断标准, K 值大于0.7为膜后水位的临界点判断标准,现场代表监测数据分析结果如表1所示。

上述的两种分析判断方法,其结果基本一致,与孔隙水压力的测值较为接近。由于本次光纤测量以0.5 m为距离单位进行测量的,可以形象的认为光纤上每隔0.5 m有一个传感器。根据光纤埋设安装图纸可知,当膜后水位位于两个光纤测点之间时,采用光纤数据判断水位的高度,会与孔隙水压力计测值有一定差距,该差值最大值为0.5 m。由于光纤安装呈S型分布,上述对水位的分析判断,往往采用两个边界点,因此该种测量方法与孔隙水压力计测值的最大差值为1 m。

光纤测量的平均值与孔压测值相比, 误差在0.5 m以内, 完全达到了光纤测量精度, 说明采用光纤渗漏监测技术监测现场膜后水位, 测值准确, 能够适应现场测量条件, 证明了光纤渗漏监测技术在高寒区长距离输水渠道应用的可行性和可靠性。

表 1 光纤测渗漏现场测值分析表

Table 1 Analysis of measured values of optical fiber leakage

| 日期 | 光纤在水位以上的长度/m | 水面距离孔压的高度/m | 孔压相应的测值/m |
|-------------------|--------------|-------------|-----------|
| 2019-07-22 温差法 | 56.5~66 | 3.25 | 3.175 |
| | 85.5~93.5 | 3.61 | |
| | 116.5~122.5 | 4.03 | |
| | 144.5~152.5 | 3.62 | |
| 2019-07-22 K值法 | 56~65.5 | 3.25 | 0.685 |
| | 84.5~93 | 3.50 | |
| | 116.5~122.5 | 4.03 | |
| | 144.5~152 | 3.73 | |
| 2019-09-19 温差法 | 50.5~70 | 1.02 | 0.685 |
| | 82~101.5 | 1.04 | |
| | 109~130.5 | 0.57 | |
| | 140~157.5 | 1.50 | |
| 2019-09-19 K值法 | 51~70 | 1.13 | 0.685 |
| | 82.5~101 | 1.26 | |
| | 111~130 | 1.13 | |
| | 141.5~160.5 | 1.16 | |

4 结 论

本文基于拉曼光时域反射原理研发了分布式光纤拉曼渗流监测技术, 提高了光缆测温敏感性和抗冻性, 可用于高寒区长距离输水渠道渗漏监测。结论如下:

(1) 室内模拟试验结果表明新型光缆在不同环境中均可反映出环境特征, 验证了光缆用于堤坝渗漏监测的可行性。

(2) 现场采用点加热定位技术能有效定位光纤测点的位置, 实现了光纤测量数据与光纤实际安装位置的一一对应。

(3) 本次测量光纤采样点间距为0.5 m, 光纤测量的平均值与孔隙水压力计测值差小于0.5 m, 差值在理论范围内, 说明光纤渗漏监测技术监测现场膜后水位测值准确, 完全能够适应现场测量条件。

分布式光纤拉曼渗流监测技术克服了传统方法间隔长、可靠性差、施工成本高等缺点; 可实现长距离分布式测量、施工简便、适应性强, 适合于推广应用。

参考文献:

- [1] 何宁, 丁勇, 吴玉龙, 等. 基于分布式光纤测温技术的堤坝渗漏监测[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 20~27.
(HE Ning, DING Yong, WU Yu-long, et al. Experimental study of distributed optical fiber temperature measurement

technology for measuring lea[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1): 20~27. (in Chinese))

- [2] 翟明杰, 杨进新, 李启升, 等. 长距离正反向输水渠道设计若干问题探讨[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 97~101. (ZHAI Ming-jie, YANG Jin-xin, LI Qi-sheng. Discussion on engineering design of long-distance and bi-directional canal[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 97~101. (in Chinese))
- [3] 朱萍玉, 蒋桂林, 冷元宝. 采用分布式光纤传感技术的土坝模型渗漏监测分析[J]. 中国工程科学, 2011, 13(3): 82~85, 96. (ZHU Ping-yu, JIANG Gui-ling, LENG Yuan-bao. Analysis of seepage monitoring for an earth dam model with distributed optical fiber sensors[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(3): 82~85, 96. (in Chinese))
- [4] 肖衡林, 蔡德所. 基于温度测量的分布式光纤渗漏监测技术机理探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 550~554. (XIAO Heng-ling, CAI De-suo. Discussion on mechanism of distributed fiber optical leakage monitoring technology based on temperate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 550~554. (in Chinese))
- [5] 商峰, 范哲, 朱新民. 基于分布式光纤监测的压力钢管模拟泄漏室内试验[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(3): 208~212. (SHANG Feng, FAN Zhe, ZHU Xin-min. Distributed optical fiber monitoring in simulated leakage test on pressure steel pipe[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(3): 208~212. (in Chinese))
- [6] 李科, 施斌, 唐朝生, 等. 黏性土体干缩变形分布式光纤监测试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1781~1785. (LI Ke, SHI Bing, TANG Cao-sheng, et al. Feasibility research on soil deformation monitoring with distributed optical fiber sensing technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1781~1785. (in Chinese))
- [7] 张巍, 施斌, 索文斌, 等. 冻土瞬态温度场的分布式光纤监测方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2007(5): 723~728. (ZHANG Wei, SHI Bing, SUO Weng-bin, et al. Monitoring and application of distributed optical fiber sensors in transient temperature field of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(5): 723~728. (in Chinese))
- [8] 刘康康. 基于ROTDR的渠道渗漏监测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018. (LIU Kang-kang. Research on Monitoring Technology of Canal Leakage Based on ROTDR[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)