

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.16

基于 BOTDR 与 FBG 的地裂缝定点分布式 光纤传感监测技术研究

卢 毅¹, 施 斌², 魏广庆³

(1. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 江苏 南京 210049;
2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 3. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 221008)

摘要: 地裂缝监测是科学防治和有效治理地裂缝灾害必不可少的工作之一。本文结合现场工程实例, 将基于 BOTDR 和 FBG 的定点分布式光纤传感监测技术应用于裂缝监测领域, 详细介绍了 BOTDR 和 FBG 定点分布式感测原理, 对感测光缆进行了室内标定试验, 并以江阴市地裂缝为监测点进行了现场测试试验。结果表明: 基于 BOTDR 与 FBG 的定点分布式光纤传感技术可有效捕捉到分布于 2 个定点间地裂缝的发生和发展过程; 能有效的对已发育地裂缝进行监测, 并能较好地预测潜在的地裂缝发育趋势, 该技术稳定性好, 测量精度可以达到 0.15mm; 通过网络化铺设方式加强地裂缝活跃区域的监测, 提高地裂缝监测的密度, 因此该技术在裂缝监测领域有着较好的应用前景, 对防治该类型地质灾害具有很好的现实意义。

关键词: 地质工程; 地裂缝; 变形监测; 感测光纤; BOTDR; FBG

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0103-07

BOTDR and FBG fixed-point distributed optical fiber sensor monitoring technology for ground fissures

LU Yi¹, SHI Bin², WEI Guangqing³

(1. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resource (Geological Survey of Jiangsu Province), Nanjing, Jiangsu 210049, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 3. Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 2210008, China)

Abstract: The monitoring plays an important role in the prevention and management of ground fissures. In this study, BOTDR and FBG fixed-point distributed optical fiber sensor monitoring technology is used to monitor ground fissures, fixed-point distributed sensing principle based BOTDR and FBG is introduced, calibration test of sensing cable is carried out, and field monitoring of ground fissures located on Jiangyin is studied. The results showed that the occurrence and development of ground fissures between two points can be obtained by BOTDR and FBG fixed-point distributed optical fiber sensor monitoring technology, the developed ground fissures and its trends can be given effectively, this technology has good stability and its measurement accuracy is 0.15mm. The monitoring density of ground fissures can be improved by means of gridded laying of optical fiber. Therefore, it is a good prospect to use this technology in the monitoring of ground fissures and the prevention of the geological disasters.

收稿日期: 2015-08-13; **修订日期:** 2016-05-26

基金项目: 国土资源部公益性行业专项资助(201511055); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20151011); 江苏省国土资源科技项目(KJXM2015024)

第一作者: 卢 毅(1983-), 男, 福建人, 博士, 主要从事地质灾害监测研究。E-mail: lynju@163.com

Keywords: geological engineering; ground fissures; deformation monitoring; sensing optical fiber; BOTDR; FBG

0 引言

地裂缝灾害是地面变形地质灾害之一^[1]。我国是地裂缝灾害多发国家,据不完全统计,全国有 12 个省、市、区的 200 多个县市存在较大的地裂缝,其中地裂缝灾害严重区主要分布在西安、太原、沧州、无锡、常州等地区^[2-8]。地裂缝造成房屋开裂、地面设施破坏和田田漏水等危害^[9-11]。地裂缝灾害给人民群众的生命财产带来很大隐患,制约了城市的可持续发展,科学防治地裂缝地质灾害刻不容缓。

地裂缝监测是科学防治和有效治理地裂缝灾害必不可少的工作之一。近年来,随着监测技术的不断发展,合成孔径干涉雷达 (INSAR) 和全球定位系统 (GPS) 等技术开始应用于该领域,并取得了一系列重要成果^[12-13]。但在实际应用中,上述技术的监测精度受地面农作物等因素影响较大,并且不能对土体内部潜在在裂缝的发生和发展进行有效监测和预警,因此探索一种能够有效监控地裂缝发育过程的新型监测手段,是一项紧迫的任务。

光纤传感技术是二十世纪八十年代伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展而迅速发展起来的一种以光为载体,光纤为媒介,感知和传输外界信号(被测量)的新型传感技术。该技术具有分布式、单端检测、长距离、耐久性好、抗干扰强、可植入性强与操作简便等优点。目前该技术已广泛应用于桩基、桥梁、隧道等岩土工程的监测与检测中^[14-17]。本文采用布里渊散射光时域反射法 (Brillouin Optical Time Domain Reflectomet, 简称 BOTDR) 和光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, 简称 FBG) 感测技术,结合室内和现场试验详细介绍了光纤传感监测技术的技术原理和监测方法,验证了该技术在裂缝发生和发展过程中监测的有效性。

1 光纤感测原理

1.1 BOTDR 定点分布式感测原理

BOTDR 的感测原理是光纤的一端注入一定频率的脉冲光,脉冲光与光纤里面的声学声子相互作用,产生了布里渊散射。BOTDR 的受光部和信号采集单元主要是对沿着光纤原路返回到脉冲光注入端的背向布里渊散射光进行分析处理。通过光电二极管使得光信号转换为电信号,由宽带放大器将电信号放

大,进入电外差接收器,并对所得到的数字信号进行平均化处理,最后得到光纤沿线各个采样点的散射光谱。布里渊散射同时受到温度和应变的影响,即当光纤轴向产生拉伸(压缩)或光纤沿线温度发生变化时,光纤的拉伸(压缩)段或温度变化段的布里渊频谱将产生频率漂移。通过试验测得,频率的漂移量与光纤温度和应变的变化均具有良好的线性关系,因此,通过计算背向布里渊散射光的频移变化量就可以得到整条光纤的温度和应变分布情况。BOTDR 技术具有独特的单端监测系统,测量精度达 $50 \mu\text{e}$,监测范围达 80 km,可对大范围、长距离的构筑物 and 岩土体进行分布式监测。

定点分布式感测原理,即在感测光缆上人为施加固定点,使得光缆能够感知两个相邻固定点间的变形。固定点之间的感测光缆应变不受光缆周边环境的影响,只决定于两固定点之间的相对位移。固定点间相向位移时,感测光缆压缩,所测应变为负;相背位移则拉伸,应变为正。根据固定点间感测光缆应变的测量值,通过积分计算可得相邻固定点之间的位移值,从而获得整个感测光缆各固定点间的位移值。定点感测光缆原理示意图见图 1。

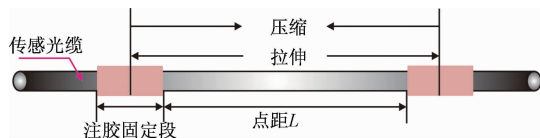


图 1 定点感测光缆原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fixed-point sensor cable

1.2 FBG 感测原理

FBG 通常采用相位掩模法进行写入,即利用光敏光纤的光致折射率变化,将光敏光纤贴近相位掩模,利用相位掩模的近场衍射所产生的空间干涉条纹在光纤中形成折射率的周期性变化,从而形成光纤光栅。布拉格光纤光栅的折射率沿光纤轴向呈周期性分布,具有良好的波长选择特性,满足布拉格衍射条件的入射光(波长为 λ_B) 在 FBG 处被耦合反射,其它波长的光会全部穿过而不受影响,反射光谱在 FBG 中心波长 λ_B 处出现峰值。

布拉格衍射条件可表示为:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \cdot A \quad (1)$$

式中: λ_B ——FBG 中心波长/nm;

n_{eff} ——纤芯的有效折射率,量纲 1;

Λ ——光纤光栅折射率调制周期/nm。

影响 FBG 中心波长 λ_B 发生漂移的外界因素主要是温度和作用在光纤光栅上的外界应力。外界应力对光栅的拉伸或者压缩,使得光栅的 Λ 发生变化,并且光纤自身具有弹光效应使 n_{eff} 也随着外界应力的变化而变化,最终导致 FBG 的反射波长 λ_B 发生相应的变化。利用反射波长与应变、温度的线性关系,即可测得光纤沿线的应变及其温度分布情况。FBG 感测技术与 BOTDR 不同在于,FBG 需要采用时分复用、波分复用、频分复用或空分复用等复用技术将多个 FBG 进行多点串联同步测量,将单点的光栅扩充为多点串联的准分布式。FBG 技术具有精度、动态响应灵敏度高和复用性能好等特点。该技术的测量精度可达 $1 \mu\epsilon$,适用于实时和高精度的工程监测。

2 感测光缆标定试验

传统的固定方式的应变分摊现象,往往导致应变异常区扩大,不利于对地裂缝带的精确监测。因此课题组与苏州南智传感科技有限公司联合研发了定点分布式感测光缆,以解决非定点光缆在地裂缝变形监测中存在的问题。

定点分布式感测光缆是在现有的直径为 4mm 的铠装光缆上附加固定点组合而成。具体的步骤如下:①剥去固定点处的聚氨酯表层;②套上内径 5mm、长 5cm 的铝合金管;③注入胶水将内部光纤、螺旋金属铠和铝合金管胶结为一体;④套上 10cm 长热缩管对其进行热缩固定。定点分布式感测光缆封装示意图见图 2,其固定点易于固定,并能很好地保护纤心,有效防止应变的扩散。为了更好地了解该感测光缆的测量效果,对其进行室内标定试验。

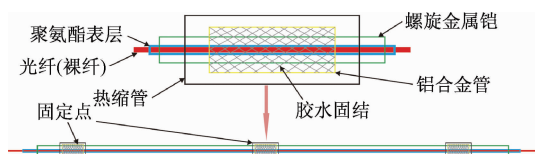


图2 定点分布式感测光缆封装示意图

Fig.2 Schematic diagram of fixed-point distributed sensor cable

2.1 标定试验方案

本实验选用拉伸试验台,该试验台具有不同约束点距、逐级施加变形、高精度测量拉伸量、拉伸力施加等功能。试验中定点感测光缆的间距为 5m。将光缆

两端固定在拉伸试验装置上,待约束点完全固定后开始测试。测试前先调整拉伸装置,当光纤在约束点距内的测试段无下坠余长时视为初始状态,采集基准值(即初值数据),同时拉伸量测试设备(千分表)清零。测试过程中逐级施加应变量,采用千分表的读数控制拉伸量,每级应变施加完成后,当千分表读数在连续两个 15 分钟内变形量小于 0.01mm 时,则判定本级拉伸结束,然后采用 BOTDR 解调仪进行数据采集,并记录相对应的千分表拉伸量。

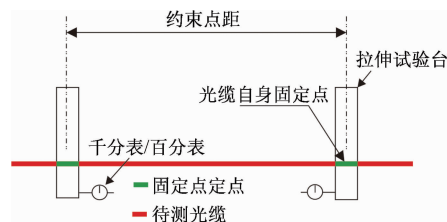


图3 点式分布式光缆拉伸实验示意图

Fig.3 Schematic diagram of fixed-point distributed sensor cable in tension test

2.2 标定试验结果

BOTDR 所测的感测光缆应变值通过公式(1)计算获得光缆的拉伸或压缩量。

$$\Delta L = \int_{Z_1}^{Z_2} \epsilon(z) dz \quad (1)$$

式中: ΔL ——光纤在长度为 Z_1 到 Z_2 之间的压缩或拉伸量;

$\epsilon(z)$ —— Z_1 到 Z_2 之间各个采样间隔点的应变值,根据不同的监测要求有以下几种采样间隔:1 m、0.5 m、0.2 m、0.1 m、0.05 m。如设置采样间隔为 0.1 m,那么在 1 m 的感测光纤上就有 10 个采样点。

千分表实测位移值与通过光缆应变计算得到的位移值见表 1。从表 1 可知,百分表实测位移即实际位移量,与传感光缆应变计算所得位移值的误差极小,平均误差为 0.6mm,最大误差为 0.98mm。最大误差的产生主要是由于拉伸级别较小时,作用于固定点处的拉力还没有完全传递到纤芯造成的,可以通过改进固定点从而降低传递损耗误差。

不同拉伸量条件下的感测光纤应变曲线图见图 4。从图中可清楚的看出感测光缆在定点区域受拉时,其受拉区(两定点之间)内应变较为均匀,产生应变光纤主要集中在两固定点区间,对区间外的光纤不造成影响。因此定点分布式感测光缆能够有效防止应变向定点区域外扩散,提高了事件点的定位精度。

表1 实测位移与计算位移汇总表

Table 1 Summary of displacement between measured and calculated

实际拉伸量/mm	光缆应变/ $\mu\epsilon$	实测位移/mm	计算位移/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
4	708	4	3.54	0.46	11.5
8	1425	8	7.13	0.87	10.875
12	2210	12	11.05	0.95	7.917
16	3003	16	15.02	0.98	6.125
20	3838	20	19.19	0.81	4.05
24	4643	24	23.22	0.78	3.25
28	5481	28	27.41	0.59	2.107
32	6264	32	31.32	0.68	2.125
36	7045	36	35.23	0.77	2.139
40	7854	40	39.27	0.73	1.825
44	8673	44	43.37	0.63	1.432
48	9523	48	47.62	0.38	0.792
52	10343	52	51.72	0.28	0.538
56	11176	56	55.88	0.12	0.214
60	11997	60	59.99	0.01	0.017

上述标定试验结果表明定点分布式感测光缆具有定点受拉区域内应变分布均匀、防止应变扩散和测量误差小等优越性能,可很好地定位拉伸点,可以满足地裂缝变形监测要求。

3 现场测试试验

为了验证定点式分布式光纤感测监测技术的可行性,选取江苏省江阴市地裂缝监测点进行现场测试试验。监测点位于江阴市祝塘镇河湘村四房巷,具体位置见图5。

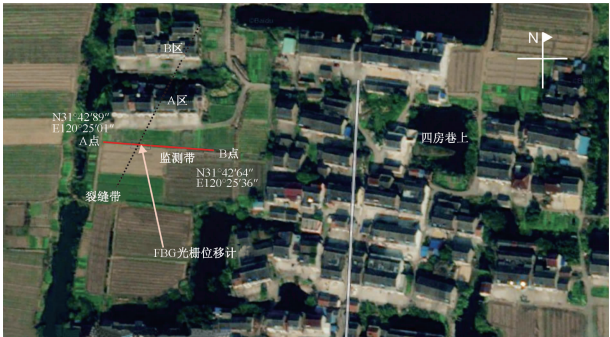


图5 江阴市地裂缝监测点位置图

Fig.5 Ground fissure monitoring location in Jiangyin city

3.1 现场试验方案

根据现场A区、B区房屋开裂情况以及A区南部水泥路面的破损情况,推测地裂缝分布总体呈东北-西南走向,并且向北侧延伸。选取A区房屋南面的稻田作为光纤监测区(图5)。采用在监测带上开挖沟槽后直接埋设感测光缆,然后回填沟槽。沟槽的长为87m,深为75cm,宽为40cm(图6)。

感测光缆的埋设步骤:①用细砂将沟槽底部整平,铺设厚度为10cm;②在沟槽上标示出各个定点的位置,点距为3m,并将锚固杆件打入土中,入土深度为50cm,使得光纤锚固点与土体变形一致;③用拉力计对感测光缆施加一定的预拉力,使感测光缆具有初始应变 $900\mu\epsilon\sim1200\mu\epsilon$,采用扎带进行捆扎,并加注少量

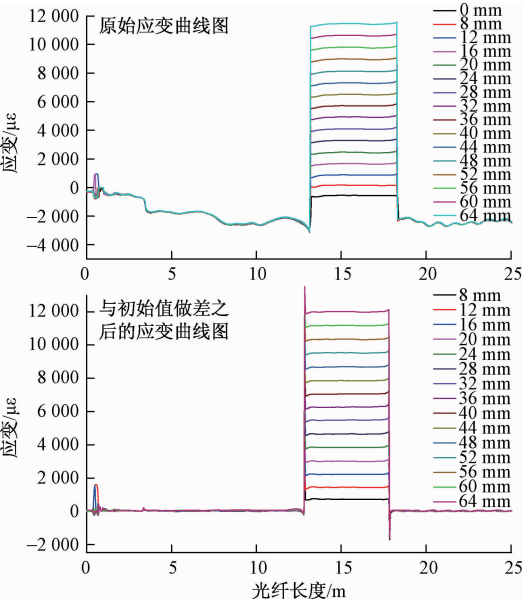


图4 BOTDR测量光纤应变曲线图

Fig.4 Strain curve of optic fiber measured with BOTDR

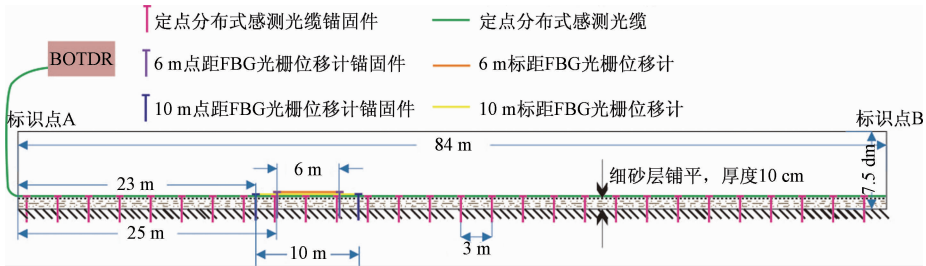


图6 定点感测光缆铺设示意图

Fig.6 Schematic diagram of fixed-point sensor cable laying

的环氧树脂将其固定于锚固点;④将 FBG 光栅位移计铺设于裂缝带内,10m 点距的 FBG 位移计两端固定点分别位于距离 A 点 23m 和 33m 的位置,6m 点距的 FBG 位移计两端固定点分别位于距离 A 点 25m 和 31m 的位置,固定点用锚钉打入土体进行固定;⑤用 5~10cm 厚度的细砂对感测光缆填埋整平,并分层对沟槽进行回填;⑥在沟槽两端引出感测光缆,熔接尾纤,建立工作箱安放尾纤,对其进行相应的保护。

四房巷地裂缝分布式光纤监测点于 2012 年 11 月 20 日建成,并于 2012 年 11 月 20 日进行初值采集,并将该数据作为应变的初始基准值,已采集的周期见表 2。

表 2 江阴市地裂缝光纤监测数据采集周期表
Table 2 Periodic table of ground fissure monitoring data acquisition in Jiangyin city

序号	日期	说明
1	2012 年 11 月 20 日	初始基准数据
2	2012 年 12 月 26 日	监测期采集
3	2013 年 03 月 03 日	监测期采集
4	2013 年 04 月 28 日	监测期采集
5	2013 年 05 月 23 日	监测期采集
6	2013 年 09 月 12 日	监测期采集
7	2013 年 11 月 25 日	监测期采集

3.2 现场试验结果与分析

定点分布式感测光缆的应变变化曲线见图 7。根据本次定点感测光缆铺设的感测原理,该应变即为该位置相邻两个固定点间(相距 3m)的平均应变变化情况:固定点间相向位移时,感测光纤压缩,所测应变为负;相背位移则拉伸,应变为正。

从图 7 中可看出,在第一、第二个监测周期内,感测光缆基本处于受压状态,主要表现为土体自身的固结。从三周期开始,应变曲线均存在主要变形区域,该区域位移距离 A 点约 19.5m 处。2012 年 12 月、2013 年 3 月这两个周期内,变形主要以沟槽土体自身的固结为主,感测光缆表现为压缩应变。2013 年 4 月、2013 年 5 月、2013 年 9 月、2013 年 11 月监测期内,感测光缆的变形已呈现拉伸状态,根据积分公式,计算出主要变形区域(距离 A 点 18m~21m)分别拉伸了 0.4mm、0.7mm、1.4mm、0.8mm,并且有增大的趋势。测试得到的应变异常区域位于距离沟槽 A 点 18m~21m 区域,根据现场房屋、地面的破损情况,该区域为裂缝带区域。

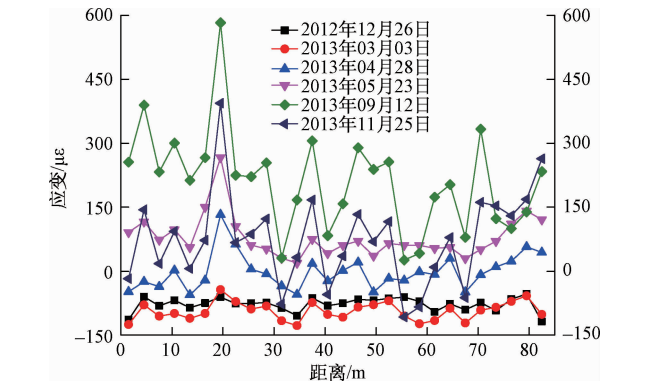


图 7 定点分布式感测光缆各监测周期应变变化图
Fig.7 Strain curve of fixed-point distributed optic fiber in the monitoring period

标距为 10m、6m 的 FBG 光栅位移计在监测周期内与 BOTDR 感测光缆在相应位置的位移值见表 3。从图 6 可得 10m 点距的 FBG 位移计是头尾两端分别固定在距离 A 点 23m 和 33m 处,测试所得的位移数据为距离 A 点 23m 到距离 A 点 33m 区域 10m 长度的拉伸或者压缩变化量。6m 点距的 FBG 位移计是头尾两端分别固定在距离 A 点 25m 和 31m 处,测试所得的位移数据为距离 A 点 25m 到距离 A 点 31m 区域 6m 长度的拉伸或者压缩变化量。

表 3 FBG 位移计与相对应 BOTDR 感测光缆的位移量
Table 3 The displacement of FBG and BOTDR sensor cable

日期	23 ~ 33m		25 ~ 31m	
	FBG	BOTDR	FBG	BOTDR
2012/12/26	-0.17	-0.79	-0.26	-0.44
2013/03/03	-0.38	-0.95	-0.35	-0.50
2013/04/28	0.06	0.09	0.03	0.02
2013/05/23	0.13	0.42	0.31	0.32
2013/09/12	0.79	0.72	0.72	0.68
2013/11/25	0.24	0.33	0.38	0.30

根据公式(1)对感测光缆与 FBG 位移计相应的位置 23~33m 和 25~31m 区间的应变值进行积分运算,得到其位移量(表 3)。FBG 位移计与相对应 BOTDR 感测光缆的位移量曲线见图 8。从图 8 可看出,在 10m 和 6m 点距的 FBG 位移计所测量的距离 A 点 23~33m 和 25~31m 区间,FBG 和 BOTDR 所测量的位移量和各周期变化较为相近。结合现场情况,该监测区的地裂缝存在进一步发生的可能。需说明本次试验由于是尝试性试验,没有对监测区进行网格化铺设,同时 FBG 也没有在所有的监测带全面使用,在以后的应用中需进一步完善。

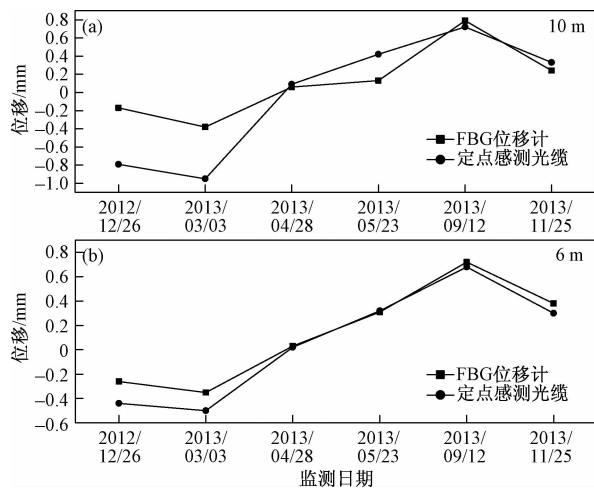


图8 FBG位移计与相对应BOTDR感测光缆的位移量曲线

Fig.8 The displacement curve of FBG and BOTDR sensor cable

4 结论

上述通过对基于BOTDR与FBG的地裂缝定点分布式光纤传感监测技术开展了室内标定和现场测试试验,得出以下结论:

(1)基于BOTDR与FBG的定点分布式光纤传感技术能够有效的对已发育地裂缝进行监测,并能较好地预测潜在的地裂缝发育趋势,该技术稳定性好,测量精度可以达到0.15 mm。

(2)采用定点分布式的方法,可提高BOTDR感测光缆的监测精度和量程,同时结合FBG光栅位移计能够精确测得点距间土体的平均位移量,可有效捕捉到分布于2个定点间地裂缝的发生和发展情况。

(3)通过室内实验和现场工程实例,验证了定点式地裂缝分布式光纤传感器在地裂缝监测领域具有较强的适用性和较大的推广价值。

(4)可通过网络化铺设方式加强地裂缝活跃区域的监测,提高地裂缝监测的密度;可尝试在同一变形区域应用不同点距,以检验不同点距对地裂缝发育状况的敏感性,提高地裂缝的监测精度。

参考文献:

- [1] 王兰生. 地面沉降与地裂缝及其防灾对策[J]. 中国科协2002年减轻自然灾害研讨会论文集汇编, 2: 13-16.
WANG Lansheng. The disaster prevention countermeasures of land subsidence and ground fissure [J]. China Association for Science and Technology to Reduce Natural Disasters Discussion Papers Compiled

in 2002, 2: 13-16.

- [2] 李忠生, 李新生, 高虎艳, 等. 西安地铁1号线沿线地裂缝性质研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(4): 75-79.
LI Zhongsheng, LI Xinsheng, GAO Huyan, et al. Ground fissure research along Xi'an metro No. 1 [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(4): 75-79.
- [3] 徐继山, 卢全中, 付恒阳. 西安地铁四号线沿线地裂缝的灾害分析与对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 76-82.
XU Jishan, LU Quanzhong, FU Hengyang. Ground fissures along Xi'an subway line 4: hazard analysis and countermeasures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(1): 76-82.
- [4] 宋彦辉, 李忠生, 李新生, 等. 临潼—长安断裂带内地裂缝特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 50-54.
SONG Yanhui, LI Zhongsheng, LI Xinsheng, et al. Characteristics of ground fissures located at Lintong-Chang'an fault zone [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and control, 2012, 23(1): 50-54.
- [5] 朱兴贤, 于军, 武健强. 基于ANN的苏锡常地裂缝预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 28-32.
ZHU Xingxian, YU Jun, WU Jiangqiang. Prediction of ground fissures in Suzhou-Wuxi-Changzhou area based on ANN analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 28-32.
- [6] 王光亚, 施斌, 王晓梅, 等. 江阴南部地面沉降及地裂缝研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 117-122.
WANG Guangya, SHI Bin, WANG Xiaomei, et al. Land subsidence and earth fissures in southern Jiangyin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2): 117-122.
- [7] 马施民, 王洋, 杨雯, 等. 山西煤矿潞安矿区地裂缝发育特征及形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 28-32.
MA Shimin, WANG Yang, YANG Wen, et al. Characteristics of ground fissures development and formation mechanism in Lu'an mining area, Shanxi province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 28-32.

- [8] 张玉宝,刘军波. 河北唐山市巍山长山地裂缝及其预防[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 83-85.
ZHANG Yubao, LIU Junbo. Feature and prevention of Weishan ground fracture in Tangshan city [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and control, 2013, 24(1): 83-85.
- [9] 郭果,陈筠,叶永青. 贵州威宁房屋裂缝与地质灾害的关系探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 79-82.
GUO Guo, CHEN Jun, YE Yongqing. Discussion on the relationship between cracks on buildings and geological hazard in Weining county of Guizhou province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1): 79-82.
- [10] 李忠生,宋彦辉,高虎艳,等. 西安地铁工程中的地裂缝地质问题[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2014, 34(4): 98-103.
LI Zhongsheng, SONG Yanhui, GAO Huyan, et al. Geological study on ground fissures in Xi'an metro engineering [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(4): 98-103.
- [11] 胡志平,彭建兵,黄强兵,等. 地铁盾构隧道30°斜穿地裂缝的物理模拟试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(4): 63-68.
HU Zhiping, PENG Jianbing, HUANG Qiang-bing, et al. Physical modeling test on shield tunnel crossing ground fissure with 30° [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 63-68.
- [12] 赵超英,张勤,丁晓利,等. 基于InSAR的西安地面沉降与地裂缝发育特征研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(3): 389-392.
ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, DING Xiaoli, et al. InSAR based evaluation of land subsidence and ground fissure evolution at Xian [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 389-392.
- [13] 李勇. 西安地裂缝常规监测方法及近期活动规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 33-37.
LI Yong. The monitoring methods and recent activities orderliness of Xi'an fissure ground [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 33-37.
- [14] 朴春德,施斌,魏广庆,等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 976-981.
PIAO Chunde, SHI Bin, WEI Guangqing, et al. Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 967-981.
- [15] 施斌,徐洪钟,张丹,等. BOTDR应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493-499.
SHI Bin, XU Hongzhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 493-499.
- [16] 丁勇,施斌,孙宇,等. 基于BOTDR的白泥井3号隧道拱圈变形监测[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 649-653.
DING Yong, SHI Bin, SUN Yu, et al. Monitoring on the arch rings deformation in the no. 3 tunnel of Bainijing with BOTDR based strain measurement technique [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 649-653.
- [17] 崔何亮,施斌,徐洪钟,等. BOTDR光纤温度监测技术在土木工程中的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 252-256.
CUI Heliang, SHI Bin, XU Hongzhong, et al. BOTDR Optic Fiber Temperature Monitoring Technique and Its Application in Civil Engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(3): 252-256.