

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

HE Jianhui, ZHANG Jincai, CHEN Yong, YAN Xingguang, SHI Bin, WEI Guangqing, JIA Lixiang, and LIU Suping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201912053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

基于LoRa的地质灾害分布式实时监测系统设计

Design of the distributed real-time monitoring system for geological hazards based on LoRa

郭伟, 王晨辉, 李鹏, 孟庆佳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 107-113

郑州地下水均衡试验场的改建工程——主要测试设施与数据自动化采集

Reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou: mainly test equipments and data automatic acquisition

李俊亭, 张彦辉, 申圆圆, 刘尚杰, 王帅 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 38-43

基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124-132

集束式监测井成井工艺研究

A study of the well-forming technology of a cluster monitoring well

张建良, 李文鹏, 孙梓航, 李长青, 王进卫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 44-48



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201912053

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

何健辉¹, 张进才^{2,3}, 陈勇^{2,3}, 闫星光^{2,3}, 施斌¹, 魏广庆⁴, 贾立翔⁴, 刘苏平¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 河北省地质环境监测院, 河北石家庄 050060; 3. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北石家庄 050060; 4. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏苏州 215000)

摘要: 光纤监测技术具有分布式、精度高等特点, 在地面沉降监测中具有独特优势。但受限于监测成本较高与监测环境复杂, 目前地面沉降光纤监测多通过人工采集数据, 限制了在特殊环境变化情况下地面沉降的实时信息获取。文章在地面沉降钻孔全断面光纤监测技术的基础上, 设计并建立了基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统。该监测系统利用弱反射光栅、时分复用、物联网和数据库等技术, 通过 4G 无线通信手段实现了地面沉降在线自动化监测和远程数据实时采集, 并通过客户端系统软件实现数据的存储、查询和分析。将其应用到衡水地区地面沉降监测中, 结果表明: 钻孔内土层压缩变形主要发生在以黏性土为主的隔水层(Ad2、Ad3、Ad4); 受季节性地下水开采的影响, 钻孔 100~400 m 深度范围内砂土含水层存在波动变化, 在监测期内, 冬季略回弹, 随后春季地下水开采量增大, 地下水位下降, 土层呈现压缩趋势。监测结果验证了该系统的可行性与准确性, 使得整个地面沉降监测流程趋于自动化、规范化和低成本化, 具有广泛的应用前景。

关键词: 地面沉降; 分布式光纤监测; 弱反射光栅; 自动化监测

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0146-08

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

HE Jianhui¹, ZHANG Jincal^{2,3}, CHEN Yong^{2,3}, YAN Xingguang^{2,3}, SHI Bin¹,
WEI Guangqing⁴, JIA Lixiang⁴, LIU Suping¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Hebei Geo-environment Monitoring, Shijiazhuang, Hebei 050060, China; 3. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang, Hebei 050060, China; 4. NanZee Sensing Technology, Suzhou, Jiangsu 215000, China)

Abstract: Fiber optic sensing technique has the features of distributed and high-precision measurement, especially in land subsidence monitoring. Due to the high cost and complicated environment, the monitoring data is mostly collected manually and it limits the real-time acquisition of land subsidence performance under special circumstances. Based on full-section monitoring of land subsidence in boreholes using the distributed fiber optic sensing (DFOS) technique, the automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings is proposed and established in Hengshui, China. The system utilizes the techniques of weak-reflection fiber gratings, time division multiplexing, Internet of Things, database, and 4G network, then realizes automatic monitoring of land subsidence and real-time remote data collection. Through the client system software to realize

收稿日期: 2019-12-23; 修订日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41907232); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0048)

第一作者: 何健辉(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为地面沉降光纤监测。E-mail: hejianhui@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 张进才(1975-), 男, 正高级工程师, 硕士学位, 主要研究领域为地质灾害。E-mail: zjcsjz@126.com

the data storage, query, and analysis. The monitoring results show that the compressive deformation of the soil occurs at aquitards (Ad2, Ad3, Ad4). For the aquifers which composed of sand soil (100 ~ 400 m depth), there is a fluctuating change which influenced by seasonal extraction of the groundwater. Consequently, a slight rebound occurs in winter and then compresses in spring. The feasibility and accuracy of the system have been verified in the field investigation, and the system makes the process of monitoring more automatic, standard, and cost-effective.

Keywords: land subsidence; DFOS; weak-reflection fiber gratings; automatic monitoring

地面沉降是指由地质作用和人为活动引起地面高程下降的一种环境地质现象^[1]。随着经济日益发展,地表水资源日益短缺,人们大量开采地下水以满足用水需求。过量开采地下水成为引起地面沉降的最主要原因之一。地面沉降会引起海水倒灌、建筑物下沉、地裂缝等次生灾害^[2-3],对人类生活、社会经济造成重大危害,是我国城市发展面临的突出问题。地面沉降监测结果精确与否,决定了是否能准确掌握地面沉降机理并对其进行有效预防和治理。

地面沉降监测技术主要包括基于空间的 InSAR、GPS 等技术和基于地面的水准测量、基岩标、分层标等技术^[4-8]。然而基于空间的监测技术通常测量地表位置的相对位移,无法对地层内部变形进行全断面精细化监测;地下变形的监测又存在着成本高、精度差等缺点。分布式光纤监测技术作为一种新型监测技术,具有分布式、长距离、耐腐蚀、抗干扰强、可远程感测等优点^[9],已被广泛用于地质灾害监测与防治、构筑物健康监测等领域^[10-15],尤其在地面沉降监测中具有独特的优势^[16-18]。在钻孔中布设感测光缆,可形成分布式(包括全分布式和准分布式)的钻孔全断面多场、多参量综合监测系统,实现地面沉降的精细化监测^[17]。

目前,受限于传感光缆、解调仪的功能和成本,全分布式光纤监测多通过人工采集数据,实现数据全自动采集与无线传输的成本较高。这限制了在特殊环境变化情况下地面沉降的实时信息获取。基于光纤光栅的准分布式光纤监测可实现自动化监测与数据传输,然而其作为一种准分布式传感器,在实际应用中无法满足复杂、大规模监测的需求。利用光纤光栅的复用性,可以扩大光纤光栅传感网络规模,但都在一定程度上受到带宽和传输损耗的限制^[19-20]。

针对现有分布式光纤监测技术应用场地的限制,结合光纤光栅自动化监测优势,本文提出了基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统。根据弱光栅窄

带宽、弱反射的特点,带宽和传输损耗大大减小,利用时分复用技术可以大幅度提高传感器容量和传感距离,实现高密度、高精度和低成本的自动化准分布式传感监测。

1 弱光栅技术原理

1.1 FBG 原理

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)是通过某种工艺使得光纤纤芯折射率沿纤轴方向发生周期性变化的空间相位光栅,起到光波选择反射镜的作用。当入射光经过光纤光栅时,满足布拉格反射条件的入射光会被反射回来,其余的透射光几乎不受影响,如图1所示。

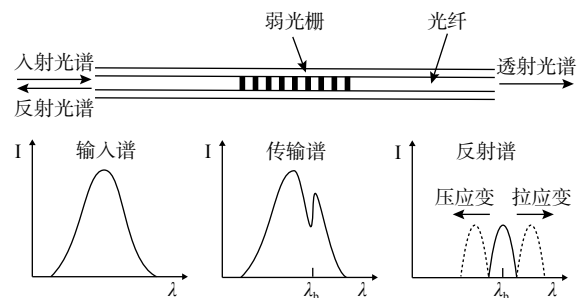


图1 FBG 测量原理

Fig. 1 Principle of FBG measurement

布拉格反射条件为:

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

式中: λ_B ——反射光的中心波长;

n_{eff} ——为纤芯的有效折射率;

Λ ——光栅周期。

光纤轴向应变和沿线温度会引起反射光中心波长的漂移^[21]。在拉、压应变作用下,反射光中心波长漂移可表示为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - Pe)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta\varepsilon$ ——轴向应变;

Pe ——有效光弹系数。

1.2 弱光栅复用技术

光纤光栅的复用技术主要包括波分复用技术 (wavelength division multiplexing, WDM)、时分复用技术 (time division multiplexing, TDM)、混合复用技术等。

波分复用技术利用光栅波长调制特性,不同中心波长的光栅占据不同的频带资源,使得各个频率入射光的功率得到充分利用。但波分复用技术受到入射光谱宽的限制,复用数量只能在 10 个左右^[22]。

时分复用技术,光纤光栅在串联情况下,不同位置光栅对同一入射光的反射时间存在差异,因此可以在同一根光纤上串联复用具有相同中心波长的多个光纤光栅。利用接收反射光的时差可以定位传感器的空间位置,反射光波长漂移反映该传感器位置的物理量变化。时分复用技术不同于波分复用技术,光源带宽不再成为传感器复用数量的限制,可大大增加同一光纤上的传感光栅数量。但由于传输的衰减,越后面的传感器接收到的入射光功率会越小,入射光功率

限制了光栅传感器时分复用数量。弱反射光线布拉格光栅(简称弱光栅)由于其窄带宽、弱反射的特点,光源带宽和入射光功率的限制大大减小,从而大幅度提高光栅传感器复用数量和传感距离,实现高精度的密集分布式传感^[23]。

1.3 传感光缆与土体的变形耦合

传感光缆与周围土体的耦合性决定了监测结果的有效性。张诚成等^[24]使用可控围压下光缆-土体耦合性试验装置(图 2),开展了不同围压下的光缆拉拔试验。提出光缆-土体耦合系数 ζ_{c-s} 对光缆-土体变形耦合性进行评价,定义 ζ_{c-s} 为传感光缆轴向应变积分值与拉拔位移值之比,即:

$$\zeta_{c-s} = \int \varepsilon(x) dx / u_0 \tag{3}$$

式中: ζ_{c-s} ——光缆-土体耦合系数;
 $\varepsilon(x)$ ——光缆轴向应变;
 u_0 ——拉拔位移。

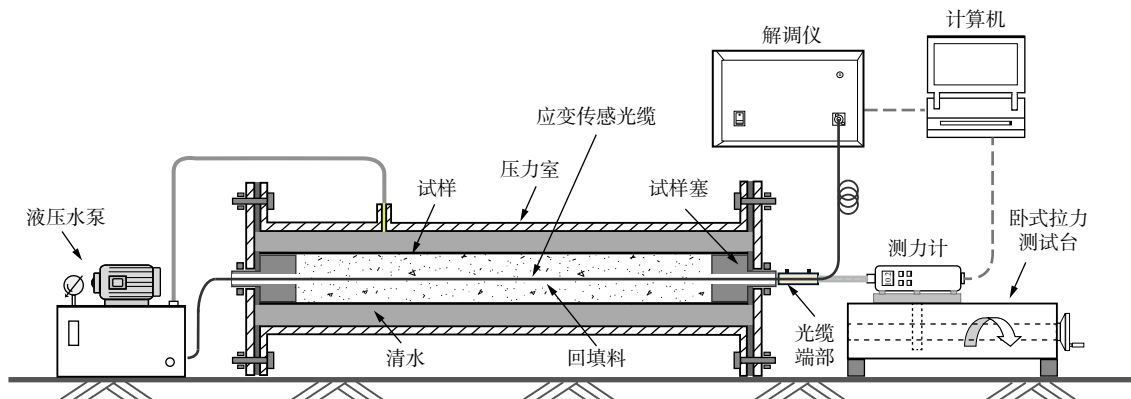


图 2 可控围压传感光缆-土体耦合性试验装置示意图^[24]

Fig. 2 Schematic of confining pressure-controllable apparatus for testing fiber-optic cable-soil coupling^[24]

依据标准,张诚成等提出当围压超过临界值 0.17 MPa 时^[24],光缆与土体具有强耦合性,光纤监测结果可靠。

在现场实际监测过程中,围压随着深度不断增大,光缆-土体之间表现为强变形耦合性。然而在钻孔浅部低围压区域,仍存在传感光缆与土体变形不耦合情况。张松等^[25]通过低围压下锚固点应变传感光缆与土体变形耦合性试验,发现在低围压下锚固点可有效提升传感光缆与土体的耦合性,提升率达 97.41%。

结合上述理论研究与现场实际工况,针对不同地区、不同深度钻孔,可以通过在传感光缆上加装锚固点以提升光缆与土体耦合性。

2 自动化监测系统

2.1 系统构成

地面沉降自动化监测系统利用弱光栅、物联网、

互联网和数据库等技术,通过 4G 无线技术实现对监测对象的实时监测和数据处理,采用互联网技术实现数据报送、发布和异常数据预警,采用 SQLite 数据库实现数据本地化保存和管理,为工程自动化监测提供支持。监测系统主要分由监测传感子系统、信号调制解调子系统、信号传输子系统、数据分析子系统组成(图 3)。

监测传感子系统,采用弱光栅技术,结合时分复用技术,在同一光缆上串联多个等距分布的弱光栅传感器,形成密集准分布式的感测光缆。信号调制解调子系统,主要包括光纤光栅调制解调仪和传输光缆,对传感信号进行解调并对数据进行采集与存储。信号传输子系统,主要为监测点与远程客户端的网络通信。数据分析子系统,主要为远程客户端软件,可以进行数据的实时采集、存储与分析。



图 3 监测系统组成

Fig. 3 Components of the monitoring system

2.2 弱光栅感测光缆与解调仪

针对地面沉降中多场复杂条件与钻孔地质环境, 课题组研发了基于弱光栅技术的密集准分布式定点感测光缆, 具体参数见表 1。光缆内层为紧套光纤; 外层为柔性铠装钢管和不锈钢绞合钢丝; 护套材质为中密度聚乙烯, 具有较高的机械性能和抗拉强度, 极大地提高了光纤的成活率。感测光缆还采取独特的内定点设计, 并在两个定点之间刻写弱光栅, 通过独特的生产工艺, 对光纤内部进行预拉, 保证预拉初始应变的稳定均一。

表 1 弱光栅感测光缆参数

Table 1 Weak-reflection FBG sensing cable parameters

光纤类型	纤芯数量	光栅中心 波长/mm	反射率/ %	应变测试 量程/ $\mu\epsilon$	光缆直径/ mm	定点间距/ m
G.652	1	1 527 ~ 1 568	0.01	15 000	7.2	≥ 0.5

为了确定弱光栅感测光缆的测试性能, 确保监测数据的准确性, 对感测光缆进行率定试验。将光栅两端固定在一长度为 2.17 m 的位移拉伸台上, 采用分级拉伸的方式, 拉伸分为 7 级, 每级拉伸 2 mm, 即拉伸 14 mm。试验装置和结果如图 4 ~ 5 所示。



图 4 试验装置

Fig. 4 Test apparatus

结果显示: 弱光栅感测光缆的波长值与应变值呈现明显的线性关系, $R^2=0.998\ 52$, 测得的波长应变系数为 $89.588\ \mu\epsilon/\text{nm}$ 。

本系统采用了苏州南智传感科技有限公司研发的柜式密集分布光纤解调仪(NZS-QDS-Q01)。整体

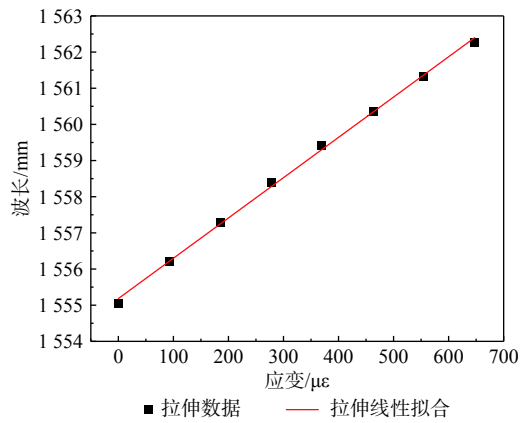


图 5 波长与应变关系曲线

Fig. 5 Relationship between wavelength and strain

由 USP(Uninterruptible Power System) 电源控制模块、柜式密集分布光纤解调仪(NZS-QDS-Q01)、工业无线路由器和机柜组成。

UPS 电源控制模块采用 4 只规格为 100 AH, 24 V 电池, 输出功率 1 kW, 通过 USP 主机可实现稳定、不间断的电力供应。该模块具有独立的“稳压”输出插座, 对负载进行突波保护; 配备 RJ45/RJ11 网络保护接口, 对上网设备进行突波保护; 宽稳压输入范围, 适用于电力环境恶劣的地区; 实现远程监控管理等特点。基于 4G 模块的工业无线路由器内插物联网卡来提供网络, 在同一局域网内, 实现与客户端系统之间的数据传输。

解调仪采用了光纤光栅传感技术(FBG)与光时域定位技术(OTDR), 实现了对准分布式感测光缆的应变多点监测, 具有多参量测量; 长距离准分布式测试; 长期监测稳定性高, 监测精度高; 解调速度快, 可同时采集上千个测点, 系统集成度高; 可进行在线监测, 实现数据无线传输, 具备实时性较强等特点, 具体指标见表 2。

表 2 柜式密集准分布式光纤解调仪技术指标

Table 2 Technical specifications of cabinet compact quasi-distributed optical fiber demodulator

参数类型	参数值	参数类型	参数值
测量范围	波长: 40 nm	最大测量长度	20 km
	应变: 4%	单通道传感点容量	1 500
分辨精度	波长: 1 pm	通道数	4
	应变: 1 $\mu\epsilon$	动态范围	20 dB
测量精度	波长: 3 pm	采集速率	0.1~0.5 Hz
	应变: 3 $\mu\epsilon$	工作温度	-5 ~ 45 $^{\circ}\text{C}$
空间分辨精度	1 m	定位精度	0.5 m
设备尺寸	590 mm \times 325 mm \times 80 mm	设备重量	12 kg
接口类型	USB, RJ45	功耗	75 W

相较于 BOTDR、BOTDA 等全分布式光纤监测技术,该密集准分布式光纤光栅解调仪测试精度可达 $\pm 3 \mu\text{e}$,空间分辨率 1 m,最大测量长度可达 20 km。结合大复用量弱光栅感测光缆,可以使采样密度达到 0.5 m。并且,该系统设备成本由于相关核心光学器件标准化、批量化生产而远远低于全分布式光纤监测设备成本。同时,自动化监测与远程数据传输功能使得系统能够适用于恶劣监测环境中,避免人工采集的不便,实现在特殊环境变化情况下地面沉降实时信息的获取。

2.3 客户端系统软件

客户端系统软件采取多线程模式,可实时的数据监测、采集与分析。软件内可以查询钻孔所在位置及当前钻孔沉降量,各省份钻孔数量及详细信息;数据监测可以实时监测钻孔波长曲线;数据分析可以计算钻孔实施应变、沉降、时域沉降、关键层沉降并绘制沉降曲线;数据查询可查询历史应变曲线、应变对比曲线及应变差值曲线。

3 工程实例与沉降分析

3.1 钻孔地层岩性

本次地面沉降自动化监测系统所采用的钻孔选址河北省衡水市,具体位置见图 6。



图 6 衡水市地面沉降观测孔地理位置

Fig. 6 Location of ground subsidence observation borehole in Hengshui, China

衡水市位于华北平原中部,地貌以冲积平原为主,分布着十分深厚的第四系地层,且多为松散多层结构的泥质、砂质沉积物,含水层发育^[26]。随着 20 世纪 70 年代大量开采地下水,松散土层压密固结引起地面沉降。1981—1990 年累计沉降量为 179 mm,1990—2005 年年均沉降量为 75 mm,2005 年最大沉降量为 1.314 m,至 2015 年累计沉降量大于 1 000 mm 的面积达到 2 125.47 km²^[27-28]。依照华北平原划分含

水层标准,钻孔含水层可分为 4 组,自上而下分别为第 I 含水层组、第 II 含水层组、第 III 含水层组和第 IV 含水层组。第 I 含水层与第 II 含水层的水文特征相似,统一归为浅层含水层,第 III 含水层和第 IV 含水层归位深层含水层。表 3 给出了各含水层组深度及划分。

表 3 钻孔含水层组划分
Table 3 Division of borehole aquifer groups

地层	深度/m	含水层组划分		土层性质
		组	层	
Qh	0~65	I	隔水层(0~55)	粉质黏土
			含水层(55~65)	粉细砂
Qp ₁	65~170	II	隔水层(65~120, 140~170)	粉质黏土
			含水层(120~140)	粉砂
Qp ₂	170~364	III	隔水层(170~242)	粉质黏土夹粉砂
			含水层(242~364)	细砂夹粉质黏土
Qp ₃	364~535	IV	隔水层(364~458, 502~535)	黏土夹细砂
			含水层(458~502)	细-中-粗砂夹黏土

3.2 监测方案设计

监测孔内布设安装弱光栅密集准分布式感测光缆,内定点距采用 2.4 m 间隔。将感测光缆以“U”字型回路缠绕在配重导锤上,随钻机钻杆下放。结合室内试验与现场施工经验,选取合适粒径的砂石及黏土球,以少量多次的方法进行钻孔回填。在下放和回填过程中,保持感测光缆处于拉直状态。回填完以后,将光缆固定于孔口固定架上,避免在封孔材料固结过程中,光缆发生回缩,影响光纤后续测试。

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统于 2018 年 5 月 5 日安装完成。选取最优级配细砂-砾石-黏土球配合比进行钻孔回填,回填材料固结完成后,开槽引线,将光缆引至监测室内,连接至光纤光栅解调仪,并对解调仪和客户端系统软件进行调试。2018 年 8 月 3 日调试结束,系统开始稳定运行测试。从 2018 年 12 月 20 日起开始测量,采集时间为当日 14:20,采集频率设为 14 天/次,至 2019 年 1 月 19 日共采集数据 3 次。从 2019 年 2 月 18 日起,采集时间不变,采集频率设为 10 天/次,至 2019 年 5 月 20 日共采集数据 8 次。2018 年 12 月 20 日至 2019 年 5 月 20 日采集数据共有 11 次。

3.3 监测结果与分析

选取 2018 年 12 月 20 日采集的数据作为初始数据,将之后采集的每一次数据减去原始数据,即可得到监测周期应变随深度的变化(图 7),其中负应变为压应变,正应变为拉应变。

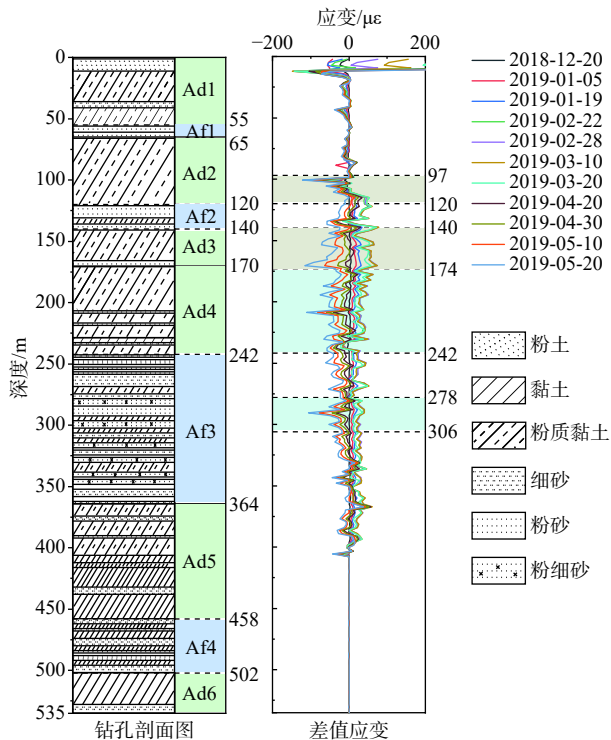


图7 钻孔剖面图及监测结果

Fig. 7 Borehole profile and monitoring results

根据弱光栅自动化监测系统所的数据可以发现,在535 m的钻孔深度范围内,应变变化明显区域有5个。在地表至地下20 m范围内,发生较大拉应变与压应变,这主要受到地表温度变化影响,造成该区域监测结果存在较大误差。在97~120 m、140~174 m深度范围内,弱光栅监测到压应变,且随时间逐渐增大,这表明在监测期内,钻孔内土层压缩沉降变形主要发生在100~170 m深度内与地下水开采层相邻的隔水层中。第II含水层组中的含水层是主要地下水开采层,主要为细砂层,水头下降、孔隙水压力减小、有效应力增大,发生弹性形变及塑性形变;含水层水头下降还会使上下渗透性较差的黏土层向含水层释水,土层空隙压密导致体积变小,黏性土发生不可逆的压缩变形,造成永久的地面沉降。在174~242 m、278~306 m的深度范围内,弱光栅也监测到明显的压应变。结合衡水地区地下水开采层位推测,该深度压应变是由深层含水层抽水引起的。174~242 m主要为黏土层,向下释水,压缩变形,造成地面沉降;278~306 m深度范围内主要为砂层与黏土层互层,砂层弹性形变与黏土层塑性形变造成较大的压应变。

从应变随时间变化趋势来看,2018年12月20日至2019年3月10日,弱光栅监测到在100~400 m范围内整体呈现拉应变,且随着时间有增大的趋势,在

2019年3月10日到达最大值;随后至2019年5月20日,100~400 m范围内整体呈现压应变。分别选含水层Af2(136.8 m)、Af3(290.4 m)和隔水层Ad2(100.8 m)、Ad4(237.6 m)的应变数据做时间趋势变化图(图8)。隔水层主要为黏土层,监测期内持续压缩。含水层为砂层,2019年1月5日至3月10日,土层发生缓慢回弹,且在3月10日达到最大值,随后至5月20日,土层发生快速压缩。该现象与当地地下水年内水位动态特征一致,年初至3月份,地下水埋深减小,水位缓缓上升,并在3月份到达最高值,且土层夹有多层砂层,饱水发生回弹;随着春季农业灌溉用水需求增大,地下水大量开采,导致地下水埋深增大,水位急剧下降,孔隙水压力减小,土颗粒骨架有效应力增大,导致土层空隙压密,土层体积变小。

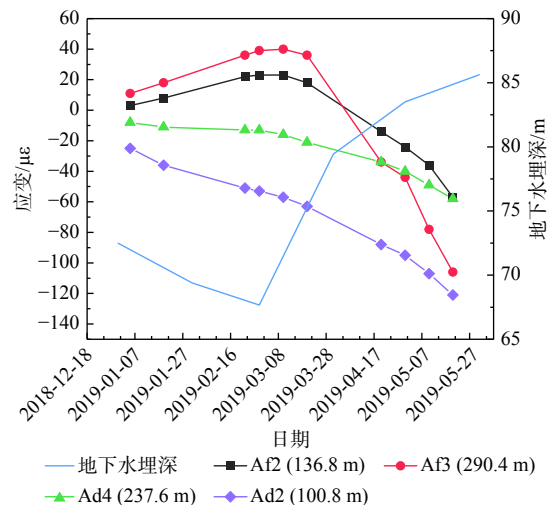


图8 不同埋深地层应变随时间变化

Fig. 8 The changes of strain with time at different depths

4 结论

(1) 钻孔内土层压缩沉降变形主要发生在第II含水层组和第III含水层组中的隔水层,以黏性土为主,发生压缩变形,是地面沉降的主要层位。受季节性地下水开采的影响,钻孔100~400 m深度范围内砂土含水层存在波动变化:在监测期内,冬季略回弹;春季地下水开采量增大,地下水位下降,土层呈现压缩趋势。

(2) 本文设计的地面沉降自动化监测系统,解决了以往地面沉降监测环境恶劣、人工采集效率低、数据采集管理不便等问题,实现了地面沉降在线自动化监测和远程数据实时采集,并通过客户端系统软件实现数据的存储、查询和分析,使得整个地面沉降监测流程趋于自动化、规范化。

(3)通过时分复用技术,可在同一光缆上串联大量弱光栅,实现密集准分布式监测,在满足监测精度的要求下,相比于分布式光纤监测,可大大降低监测成本,为地面沉降监测提供一种新的监测手段。实际监测结果表明:该系统能精细化监测土层压缩与回弹变形,表现出较好的准确性,应用前景广泛。

参考文献 (References) :

- [1] 薛禹群,张云,叶淑君,等.中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J].*第四纪研究*,2003,23(6):585-593. [XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Land subsidence in China and its problems[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 585 - 593. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 殷跃平,张作辰,张开军.我国地面沉降现状及防治对策研究[J].*中国地质灾害与防治学报*,2005,16(2):1-8. [YIN Yueping, ZHANG Zuochen, ZHANG Kaijun. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王哲成,张云.地下水超采引起的地裂缝灾害的研究进展[J].*水文地质工程地质*,2012,39(2):88-93. [WANG Zhecheng, ZHANG Yun. Advances of research on the earth fissure induced by groundwater over-exploitation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 88 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡建平,隋兆显,陈杰.苏锡常地区地下水禁采后的地质环境效应研究[J].*江苏地质*,2006,30(4):261-264. [HU Jianping, SUI Zhaoxian, CHEN Jie. Study on geological environmental effect after banning groundwater pumping in Su-Xi-Chang area[J]. *Jiangsu Geology*, 2006, 30(4): 261 - 264. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王光亚,于军,吴曙亮,等.常州地区地面沉降及地层压缩性研究[J].*地质与勘探*,2009,45(5):612-620. [WANG Guangya, YU Jun, WU Shuliang, et al. Land subsidence and compression of soil layers in Changzhou area[J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(5): 612 - 620. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王巍,徐佳,徐鸣.基于分层标资料的天津滨海地区含水层沉降特征分析[J].*地下水*,2014,36(4):26-27. [WANG Wei, XU Jia, XU Ming. Analysis of aquifer subsidence characteristics in Tianjin coastal area based on layerwise mark data[J]. *Groundwater*, 2014, 36(4): 26 - 27. (in Chinese)]
- [7] AMELUNG F, GALLOWAY D L, BELL J W, et al. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation[J]. *Geology*, 1999, 27(6): 483.
- [8] SATO H P, ABE K, OOTAKI O. GPS-measured land subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan[J]. *Engineering Geology*, 2003, 67(3/4): 379 - 390.
- [9] 施斌,张丹,王宝军.地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[J].*工程地质学报*,2007,15(增刊2):109-116. [SHI Bin, ZHANG Dan, WANG Baojun. Distributed optical fiber monitoring technologies of geological and geotechnical engineering and its development[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(Sup2): 109 - 116. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 卢毅,施斌,魏广庆.基于BOTDR与FBG的地裂缝定点分布式光纤传感监测技术研究[J].*中国地质灾害与防治学报*,2016,27(2):103-109. [LU Yi, SHI Bin, WEI Guangqing. BOTDR and FBG fixed-point distributed optical fiber sensor monitoring technology for ground fissures[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(2): 103 - 109. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 孙义杰,张丹,童恒金,等.分布式光纤监测技术在三峡库区马家沟滑坡中的应用[J].*中国地质灾害与防治学报*,2013,24(4):97-102. [SUN Yijie, ZHANG Dan, TONG Hengjin, et al. Research of distributed fiber optic sensing technology in monitoring of Majiagou landslide of Three Gorges[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(4): 97 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吴静红,刘浩,杨鹏,等.基于OFDR技术的混凝土裂缝识别与监测试验研究[J].*激光与光电子学进展*,2019,56(24):241201. [WU Jinghong, LIU Hao, YANG Peng, et al. Experimental research on concrete crack monitoring based on OFDR technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 241201. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 朴春德,施斌,朱友群,等.钻孔灌注桩压缩变形BOTDR分布式检测[J].*水文地质工程地质*,2008,35(4):80-83. [PIAO Chunde, SHI Bin, ZHU Youqun, et al. Distributed monitoring of bored pile compression

- deformation based on BOTDR[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(4): 80 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 徐洪钟, 周元, 张丹. 基于GIS的岩溶塌陷分布式光纤监测系统的研发[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 120 – 123. [XU Hongzhong, ZHOU Yuan, ZHANG Dan. Development of karst collapse monitoring system using distributed optical fiber sensor based on GIS[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 120–123. (in Chinese with English abstract)]
- [16] WU J H, JIANG H T, SU J W, et al. Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015, 5(5): 587 – 597.
- [17] 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 356 – 364. [SHI Bin, GU Kai, WEI Guangqing, et al. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing techniques[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 356 – 364. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘苏平, 施斌, 张诚成, 等. 连云港徐圩地面沉降BOTDR监测与评价[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 158 – 164. [LIU Suping, SHI Bin, ZHANG Chengcheng, et al. Monitoring and evaluation of land subsidence based on BOTDR in Xuwei near Lianyungang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 158 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [19] WAN X, TAYLOR H F. Multiplexing of FBG sensors using modelocked wavelength-swept fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(21): 1512.
- [20] VALENTE L C G, BRAGA A M B, RIBEIRO A S, et al. Combined time and wavelength multiplexing technique of optical fiber grating sensor arrays using commercial OTDR equipment[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 31 – 35.
- [21] 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. [WEI Guangqing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 571 – 576. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 姜德生, 范典, 梅加纯. 基于FBG传感器的分复用技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(4): 14 – 19. [JIANG Desheng, FAN Dian, MEI Jiachun. Multiplexing/demultiplexing technology based on fiber bragg grating sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(4): 14 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张满亮, 孙琪真, 王梓, 等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 93–98. [ZHANG Manliang, SUN Qizhen, WANG Zi, et al. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical-low-reflective fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 93–98. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张松, 施斌, 张诚成, 等. 低围压下锚固点应变传感光缆与土体变形耦合性试验研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1456–1463. [ZHANG Song, SHI Bin, ZHANG Chengcheng, et al. Experimental study on mechanical coupling between anchored strain sensing optical cable and soil deformation under low confining pressures[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1456–1463. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张诚成, 施斌, 刘苏平, 等. 钻孔回填料与直埋式应变传感光缆耦合性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 1959–1967. [ZHANG Chengcheng, SHI Bin, LIU Suping, et al. Mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11): 1959–1967. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王鸣宇. 衡水地区地面沉降机理及地面沉降预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [WANG Mingyu. Research on land subsidence mechanism and prediction of settlement in Hengshui area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 马云青. 河北省衡水市地面沉降特征及成因分析[J]. *中国科技成果*, 2017, 18(22): 45 – 46. [MA Yunqing. Analysis on characteristics and causes of ground subsidence in Hengshui area[J]. *China Science and Technology Achievements*, 2017, 18(22): 45 – 46. (in Chinese)]
- [28] 张素娥, 寇秋焕, 李志军. 河北省衡水市地质灾害分布特征及其成因分析[J]. *地质灾害与环境保护*, 2006, 17(4): 8 – 12. [ZHANG Su'e, KOU Qiuhuan, LI Zhijun. Distribution features and its origin of the geological disaster in Hengshui City, Hebei Province[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2006, 17(4): 8 – 12. (in Chinese with English abstract)]