

doi: 10.12097/gbc.2023.09.003

基于分布式光纤传感技术的北京宋庄地面沉降和地裂缝综合监测

沙特^{1,2}, 罗勇^{1,2}, 雷坤超^{1,2}, 田芳^{1,2}, 王新惠^{1,2}

SHA Te^{1,2}, LUO Yong^{1,2}, LEI Kunchao^{1,2}, TIAN Fang^{1,2}, WANG Xinhui^{1,2}

1. 北京市地质环境监测所, 北京 100195;

2. 城市地下水安全防控技术创新基地, 北京 100195

1. *Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100195, China;*

2. *Urban Groundwater Safety Prevention and Control Technology Innovation Base, Beijing 100195, China*

摘要: 针对地面沉降及地裂缝, 传统点式监测技术手段难以实现地质体变形的连续监测, 且无法通过地面沉降、地裂缝的综合监测定量分析两者之间的关系。基于钻孔全断面分布式光纤监测技术实现了地面沉降和地裂缝同步监测, 根据监测结果对北京宋庄地区地下水-地面沉降-地裂缝之间的关系进行了分析。监测结果表明, 宋庄地面沉降主要受到地下水开采影响, 含水砂层抽水发生压缩变形, 地裂缝两侧均存在明显的地面沉降, 且差异沉降显著; 差异沉降量和地裂缝变形量均持续增大, 但增大速率放缓。地面沉降、地裂缝同步监测结果表明, 该地区地裂缝发育主要受地层差异沉降影响。

关键词: 分布式光纤; 钻孔全断面光纤监测; 地面沉降; 地裂缝; 差异沉降; 北京

中图分类号: P642.2; P694 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)05-0859-09

Sha T, Luo Y, Lei K C, Tian F, Wang X H. Comprehensive monitoring of land subsidence and ground fissures in Songzhuang, Beijing, based on distributed optical fiber sensing technology. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 859-867

Abstract: Traditional point-based monitoring techniques are insufficient for continuous monitoring of geological deformation related to land subsidence and ground fissures. Moreover, they cannot quantitatively analyze the relationship between land subsidence and ground fissures through comprehensive monitoring. Based on distributed fiber optic monitoring technology along the full section of boreholes, simultaneous monitoring of land subsidence and ground fissures was achieved. A case analysis of the relationship between groundwater, land subsidence, and ground fissures located in the Songzhuang area of Beijing city was conducted based on the monitoring results. The results indicate that land subsidence located in Songzhuang is mainly influenced by groundwater extraction, resulting in compression deformation of the aquiferous sand layer. Significant land subsidence occurs on both sides of ground fissures, with noticeable differential subsidence. Both the amount of differential subsidence and the deformation of ground fissures continue to increase, albeit at a slower rate. Synchronous monitoring of land subsidence and ground fissures reveals that ground fissure development in the area is primarily influenced by differential subsidence of strata.

Key words: distributed optical fiber; full-section optical fiber monitoring technology of borehole; land subsidence; ground fissure; uneven subsidence; Beijing

北京位于华北平原北部, 第四系广泛分布。在人类工程建设、超采地下水及内动力地质作用下, 北京地区地面沉降、地裂缝等地质灾害频发, 造成了严

重的地面变形。1955 年, 北京开始出现明显地面沉降, 随着人口剧增和工业化发展, 大量开采地下水使北京地面沉降区域逐渐扩大。截止到 2016 年, 最大

收稿日期: 2023-09-23; 修订日期: 2023-12-18

资助项目: 北京市自然科学基金项目《京津高铁差异性沉降区段桩-土变形耦合机制研究》(编号: 8212042)

作者简介: 沙特 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 从事地质灾害监测研究。E-mail: 113455998@qq.com

累计沉降量达 1864 mm。另外,在邢台地震和唐山地震后,北京地区新出现的多处地裂缝也多发育在地面沉降区(罗勇,2016;赵龙等,2019)。地面沉降和地裂缝带来的灾害已经严重影响到北京的经济发展和社会活动。因此,对北京地面变形灾害进行监测,可以为工程决策提供基础资料。

目前,地表变形监测方法主要包括 InSAR、GPS 和水准测量等技术(孙张涛等,2015;刘平利等,2020),针对地面沉降分层监测还有基岩标、分层标等技术(刘贺等,2022)。但这些基于空间的监测技术难以实现地质体变形的连续精准监测(Galloway et al., 2011)。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、可远程感测等优势,在地面沉降、地裂缝等地面变形监测中具有较大优势,已经得到了广泛的应用。例如,施斌等(2018)提出的钻孔全断面分布式光纤监测技术,将光缆布设在钻孔中,采集沉降过程中不同类型数据,实现对地面沉降的精细化监测;刘苏平等(2018)利用分布式光纤感测技术获取了连云港徐圩钻孔全断面的土层变形分布信息,为地面沉降监测提供了一种精细化分布式观测手段;何健辉等(2021)通过时分复用技术,基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统,实现密集准分布式监测,并成功应用于河北省衡水市地面沉降自动化监测中。在地裂缝监测方面,卢毅等(2016)提出了基于布里渊散射的分布式光纤感测技术对已有地裂缝和潜在地裂缝进行分布式监测,并在无锡杨墅里验证了该技术可有效监测到地裂缝的变形;张诚成等(2019)结合传感光缆特点,提出地裂缝形成判断准则,并针对空间分辨率效应、缆-土界面效应、温度效应等进行了探讨。

地裂缝的发育与区内地下水超采诱发的地面沉降有着密不可分的关系。已有研究虽然对地面沉降或地裂缝开展了较多的监测工作(张鹏,2021;李玉梅等,2023),但通过两者同步监测结果定量分析其发育关系的研究工作开展较少。因此,本文基于钻孔全断面光纤监测方法,利用布里渊光时域反射测量计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)技术,在北京宋庄工程现场对地面沉降、地裂缝进行同步监测,克服了传统监测技术的局限性。通过同步综合监测实现了对宋庄地区地面沉降与地下水、地裂缝与地面沉降之间关系的定量分析。本文对深入研究宋庄地裂缝的成因及防治具有重要意义。

1 监测原理及技术路径

1.1 监测原理

1.1.1 BOTDR 监测原理

BOTDR 的原理为:当光纤受到应变和温度的扰动时,扰动位置的布里渊散射光的频率会发生漂移(图 1),漂移量与应变和温度的变化呈良好的线性关系。根据这一特性,能够获取光纤的温度、应变等多种数据(Horiguchi et al., 2019;Gao et al., 2021)。

光纤上每点布里渊散射光谱的峰值功率所对应的频率即是布里渊频移 ν_B 。

$$Z = \frac{cT}{2n} \quad (1)$$

式中: Z 为发生散射位置至脉冲光入射端的距离; c 为真空中的光速; n 为光纤的折射率; T 为发出的脉冲光与接收到的散射光的时间间隔。

当温度变化小于 5°C 时,光纤的应变变量与布里渊频移可以表示为:

$$\nu_B(\varepsilon) = \nu_B(0) + \frac{d\nu_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \varepsilon \quad (2)$$

式中: $\nu_B(\varepsilon)$ 为当应变为 ε 时的布里渊频率漂移量; $\nu_B(0)$ 为当应变为 0 时的布里渊频率漂移量; $\frac{d\nu_B(\varepsilon)}{d\varepsilon}$ 为比例系数,约为 $493 \text{ MHz}/\%$; ε 为光纤的应变变量。

1.1.2 地面沉降与地裂缝监测原理

地面沉降与地裂缝变形量监测均是将传感光缆轴向应变值的变化量沿光缆轴向长度积分,从而获得光缆轴向上的拉伸量和压缩量。

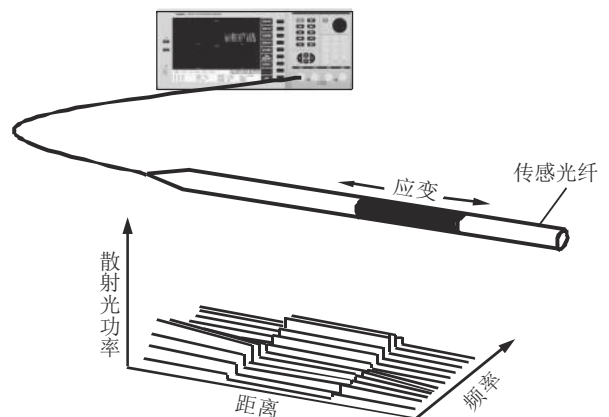


图 1 BOTDR 的监测原理

Fig. 1 The measurement principle of BOTDR

$$\Delta L = \sum_{l_1}^{l_2} \varepsilon(l) dl \quad (3)$$

式中: ΔL 为 l_1 和 l_2 之间传感光缆的轴向拉伸量或压缩量; $\varepsilon(l)$ 为 l 处的应变值。

其中, 地面沉降监测地层的垂向变形, 光纤材料竖向埋置在光纤监测孔内, 获取地层的压缩或回弹(图 2); 地裂缝监测是将传感光缆水平布设在浅层土体中, 使传感光缆与地裂缝垂直相交, 监测地裂缝的发育情况(图 3)。

1.2 监测工作技术路径

基于上述监测技术, 本次地面沉降、地裂缝同步监测工作的技术路径如图 4 所示。首先, 通过地面沉降监测获取各钻孔的沉降量并确定主要沉降层,

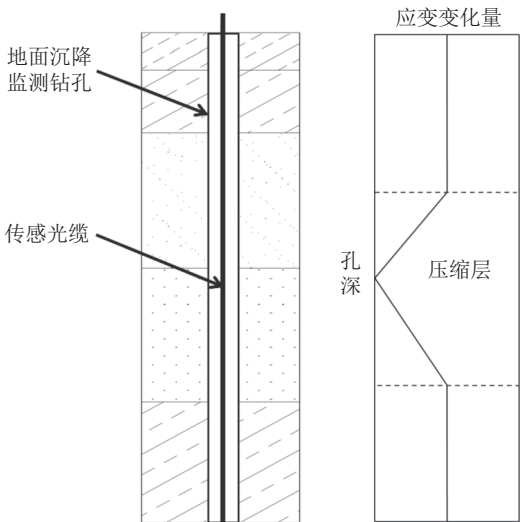


图 2 地面沉降监测原理

Fig. 2 Principle of land subsidence monitoring

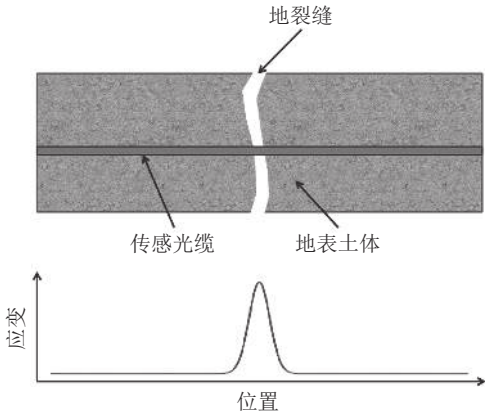


图 3 地裂缝监测原理

Fig. 3 Principle of ground fissure monitoring

对地裂缝两侧的沉降发育进行对比研究; 其次, 通过地裂缝监测获取地裂缝发育情况; 最后, 对裂缝两侧差异沉降及裂缝发育情况进行综合分析, 揭示地面沉降和地裂缝之间的联系。

2 场地概况及监测方案

2.1 场地概况

宋庄地裂缝位于北京市通州区宋庄镇, 南起小中河, 向东北发育至平家疃村, 长度约 8.7 km (图 5-a)。本次地面沉降和地裂缝监测地点位于双埠头村西南侧林地, 该地区宋庄地裂缝地表破坏现象明显, 地表有多处串珠状土洞及塌陷坑, 整体呈北东走向(图 5-b)。研究区地处永定河、潮白河及温榆河冲洪积平原, 具有典型的砂层与粘土层互层特点, 这种土层结构在过量抽采地下水的情况下易发生地面沉降。ZK1 地层观测钻孔位于地裂缝西北侧, 孔深 100 m, 经过全孔取芯、详细编录获得研究区浅部地层岩性, 区内地层在埋深 63 m 内为砂粘互层, 埋深在 63 m 以下存在较厚的砂层(表 1)。

2.2 监测方案

以往研究表明, 宋庄地裂缝垂向发育深度较浅,

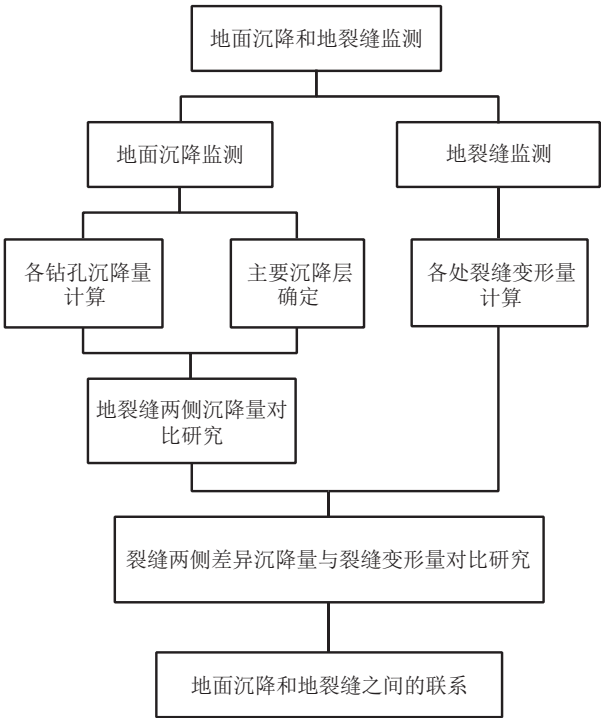


图 4 地面沉降和地裂缝监测技术路径

Fig. 4 Technical path for monitoring land subsidence and ground fissure

表 1 场地地层岩性
Table 1 Strata lithology of site

深度/m	地层性质
0~0.6	杂填土
0.6~3.5	砂质粉土
3.5~7	粘质粉土
7~14.3	细砂
14.3~16	粉质粘土
16~17.9	细砂
17.9~20.8	粉质粘土
20.8~22.5	粘质粉土
22.5~25.4	粉质粘土
25.4~31.7	细砂
31.7~37.9	中砂
37.9~43.5	粉质粘土
43.5~46.7	中砂
46.7~49	细砂
49~57.1	中砂
57.1~63.3	粉质粘土
63.3~100	中砂

研究区附近以耕地为主,农业用水主要来源于浅层地下水开采,开采深度在 100 m 以内(赵龙等, 2018; Zhao et al., 2021)。为了实现地裂缝两侧沉降量及地裂缝变形量的同步监测,本次监测方案设计了 2 个地面沉降监测钻孔 ZK1、ZK2 和 1 条地裂缝水平监测光纤,地面沉降监测孔分布于地裂缝监测线路两侧。同时利用地下水监测井 SJ-1 和 SJ-2 对研究区地下水位进行动态监测, SJ-1 和 SJ-2 的井深分别为 50 m 和 100 m,井口高程为 24 m(图 5-c)。地面沉降监测孔实际深度 106 m,受钻孔底部沉渣影响,导头连同光纤传感器实际布设深度为 100 m,感测光缆有效测试深度 100 m,在导头处构成“U”形回路(图 6-a)。地裂缝监测线路挖沟布设实际深度 80 cm,实际宽度 30 cm,传感光缆呈回路布设,单向监测线路长 50 m,现场实际布设安装如图 6-b 所示。监测孔和地裂缝监测路线沟槽内埋设分布式定点应变感测光缆(图 6-c),采用独特的内定点结构,可实现介质的离散非均匀变形测量,其轴向抗压抗拉性能优越,兼具极好的机械性能,与岩体、土体的耦合性能良好,施工便捷,且能满足多种复杂施工环境。地面沉降钻孔中使用 10 m 间距定点光缆,地

裂缝监测中使用 5 m 间距定点光缆,技术参数如表 2 所示。

表 2 光缆技术参数
Table 2 Technical parameters of the fibre optic cables

参数类型	参数值
光纤类型	SM G.652b
纤芯数量	1
光缆直径	光缆 5 mm, 定点 8 mm
定点距离	5 m、10 m

3 监测结果与分析

3.1 地面沉降监测结果与分析

3.1.1 地下水动态变化特征

地面沉降的发展与地下水动态密切相关,图 7 为 2019 年 12 月 10 日—2021 年 5 月 21 日研究区域地下水位的变动情况。2 个监测井地下水位的变化规律相近,季节性周期变化特征明显。从 6 月—次年 3 月,水位整体呈现上升趋势,其中,6—9 月水位上升较快,随后上升速度减缓,这是由于北京降水主要集中在 6—9 月份,进入夏季后降雨入渗补给大幅增加,水位快速抬升,随着降雨的减少,水位升高趋势也逐渐变缓。从 3—6 月,地下水位出现较快下降,这是由于该时间段降雨入渗补给较少,农业用水开采增加,导致地下水位持续下降。监测井 SJ-1 与 SJ-2 分别监测着不同含水层,其中 SJ-2 监测井水位整体波动幅度相对较大,且不同时间周期水位出现了同比下降,这是因为 50~100 m 为主要地下水开采层,监测位置附近存在大量农业用水的地下水开采。

3.1.2 地面沉降监测结果分析

选取 2019 年 11 月 19 日采集的数据作为初始值,2020 年 7 月 17 日和 2021 年 5 月 21 日采集的数据在初始值上进行差值处理,得到监测钻孔垂向应变随孔深的变化量 $\Delta\varepsilon$ 值,对其积分可获得不同深度对应的地层变形量,其中正值表示拉伸,负值表示压缩。

如图 8 所示,地层应变随孔深变化曲线可分为 3 个区域。I 区域位于地表至地下 3 m 左右深度,2 个监测钻孔内的定点光缆均产生了较大的正应变,主要是浅层光缆受温度影响所致。II 区域位于孔深 3~50 m 区域,该区域 2 根定点光缆监测的应变量较小,微应变值普遍在-50~20 范围内变化,表明该区间

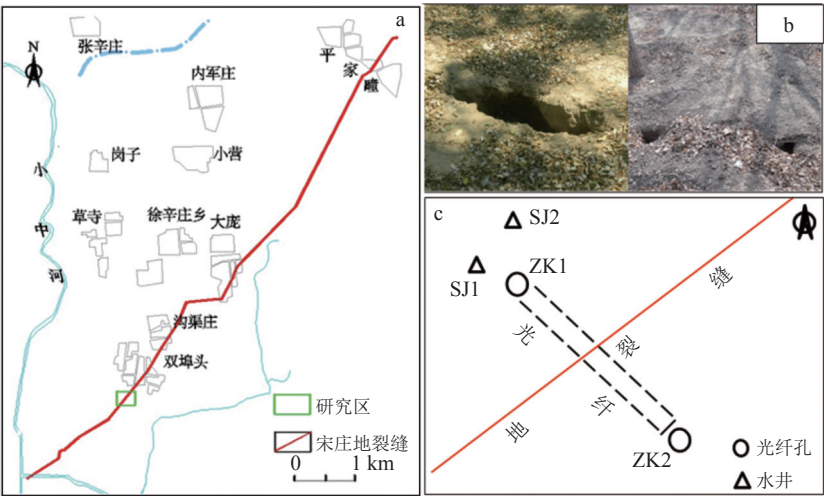


图 5 场地概况及监测光缆布设

Fig. 5 Situation of site and layout of the monitoring cable

a—研究区位置; b—地裂缝灾害点; c—监测设施布设位置

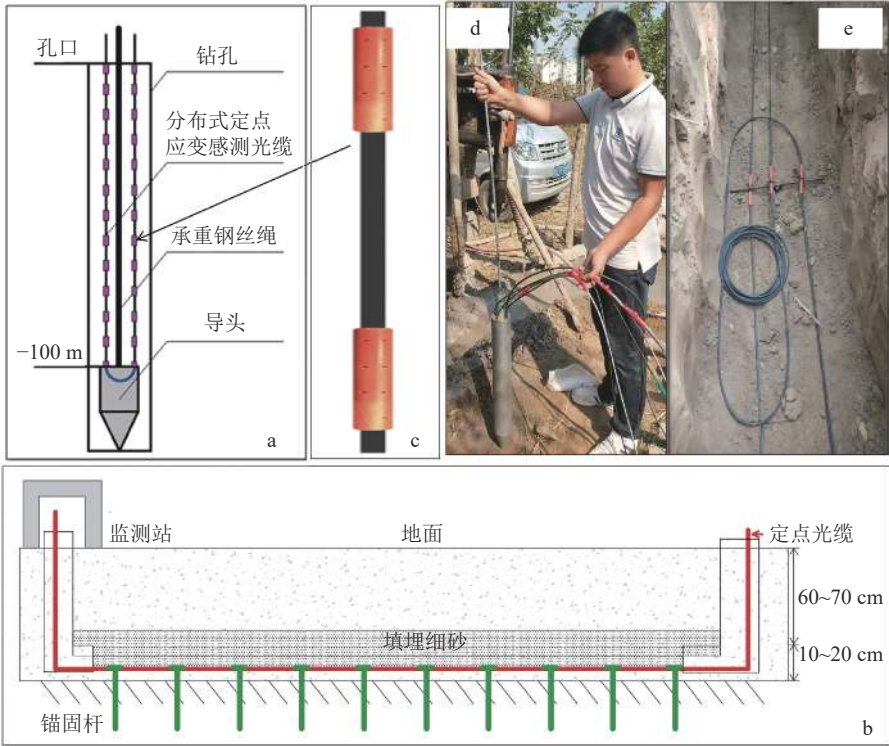


图 6 地面沉降监测孔及地裂缝光缆实际布设图

Fig. 6 Layout of land subsidence monitoring borehole and ground fissure optical cable

a—地面沉降监测孔示意图; b—地裂缝监测示意图; c—传感光缆; d—光缆下放; e—光缆埋设沟槽

内的地层未发生明显的垂向变形。Ⅲ区域位于孔深 50~100 m, 该范围内 2 条光缆相对Ⅱ区产生了明显的连续负应变, 表明区间地层为主要沉降层。其中, ZK1 监测孔应变值较大, 在 57~63 m 范围内产生了较大的连续负应变; ZK2 监测孔应变值相对较小, 变

化较平稳, 微应变值普遍在 -200~-50 范围内。

对 2 个光纤孔应变值进行积分, 得到沉降量随孔深变化(图 9)。由于孔深 3 m 内受地表温度变化影响, 取孔深 3 m 处的沉降量作为每个钻孔监测的地面沉降量。从图 9 可以看出, 地层压缩变形主要

发生在 50~100 m, 该深度范围内地层主要为中砂层, 中间夹杂部分粉质粘土层。其中, 57.1~63.3 m 的粉质粘土层压缩变形相对其他层位更明显。2 个监测钻孔的地面沉降量及 57.1~63.3 m 的粉质粘土层压缩量见表 3, 相对该粉质粘土层的厚度, 其在 2 个监测孔内的沉降贡献率均较大, 尤其在 ZK1 中该地层发生了明显的压缩变形, 其沉降贡献率高达 40% 左右。50~100 m 地层中砂层占比大, 粉质粘土层厚度占比为 10%, 这种地层结构在含水层水头下降的情况下, 渗透性较差的粘土层向含水层释水, 土层孔隙压密产生压缩变形。

将同时期钻孔地面沉降量与 100 m 孔深的地下水位进行对比(图 10), 2 处地面沉降钻孔监测到地面沉降量与水位埋深均持续增大, 且变化速率有变缓的趋势, 地面沉降与地下水变化具有很强的相关性。50~100 m 地层作为主要的开采层, 由于含水砂层抽水, 水头下降孔隙水压力减小, 有效应力增大, 地层发生压缩变形, 导致地裂缝两侧产生明显的地面沉降, 且差异沉降显著。

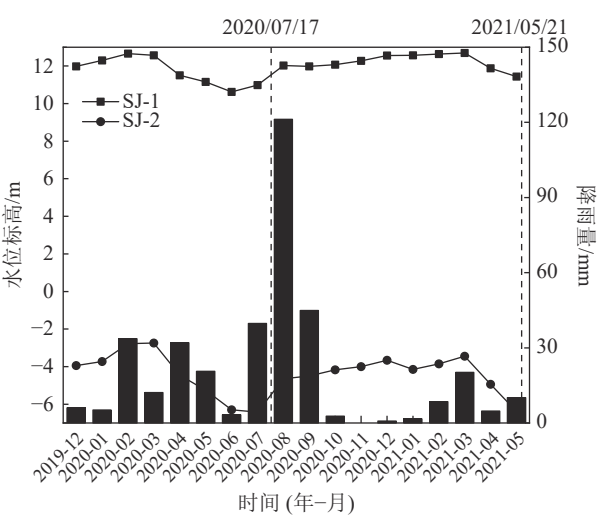


图 7 地下水位动态变化

Fig. 7 Dynamic change of groundwater level

3.2 地裂缝监测与分析

由于监测地裂缝的传感光缆埋深较浅, 易受地表温度变化影响, 因此在布设传感光缆时, 地裂缝监

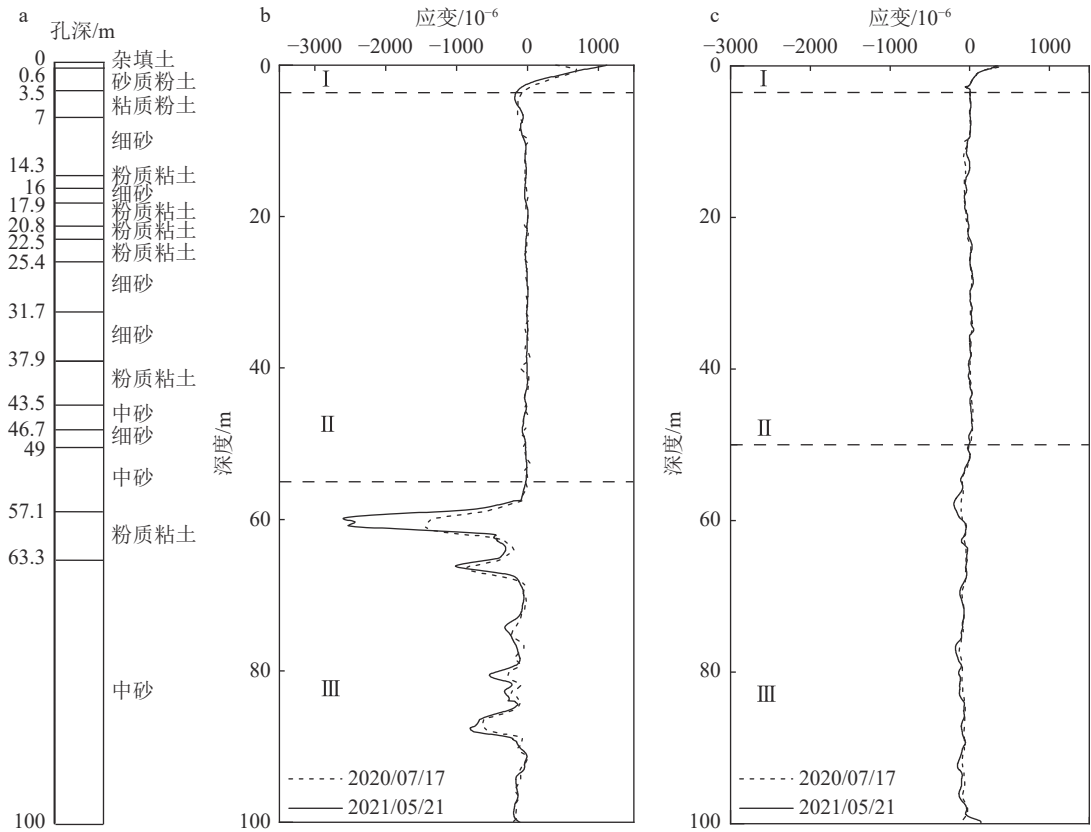


图 8 应变随孔深变化图

Fig. 8 The variation of strain with hole depth

a—钻孔柱状图; b—ZK1 孔监测结果; c—ZK2 孔监测结果

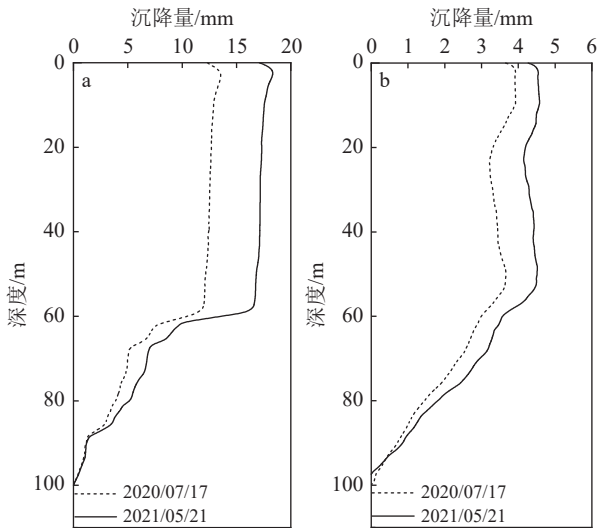


图 9 沉降量随孔深变化图

Fig. 9 The variation of settlement with hole depth

a—ZK1 孔监测结果; b—ZK2 孔监测结果

表 3 地面沉降量及 57.1~63.3 m 土层压缩量

Table 3 Land subsidence and deformation of 57.1~63.3 m soil layer

监测孔	时间	57.1~63.3 m 土层压缩量/mm	地面沉 降量/mm	沉降 贡献率/%
ZK1	2020年7月17日	4.8	12.89	37
	2021年5月21日	7.42	17.55	42
ZK2	2020年7月17日	0.5	3.9	12
	2021年5月21日	0.7	4.5	16

测线路中预留 5 m 段对其他位置的传感光缆进行数据矫正, 实现温度补偿。

同样选取 2019 年 11 月 19 日采集的数据作为初始值, 2020 年 7 月 17 日和 2021 年 5 月 21 日采集的数据在初始值上进行差值处理后, 减去温度补偿段的差值, 得到整个地裂缝监测线路上光缆各位置的应变变化情况, 其中, 正应变表示拉伸, 负应变表示压缩。

从图 11 可见, 地裂缝监测线路感测光缆在 2020 年 7 月 17 日和 2021 年 5 月 21 日监测时点应变数据的变化。从图 11 可以准确判断出地裂缝发育位置, 在地裂缝处, 感测光缆监测到应变不断增大。

如图 12 所示, 地裂缝处监测到的最大应变和地裂缝变形量呈现逐渐增大趋势, 且扩张速率变缓。监测结果显示, 2020 年 7 月 17 日和 2021 年 5 月 21 日地裂缝处的变形量分别为 17.04 mm 和 26.65 mm。

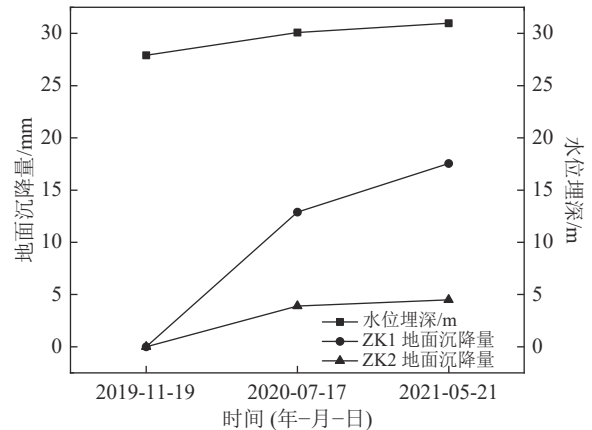


图 10 各钻孔沉降量及水位埋深

Fig. 10 Settlement changes of each borehole and groundwater depth

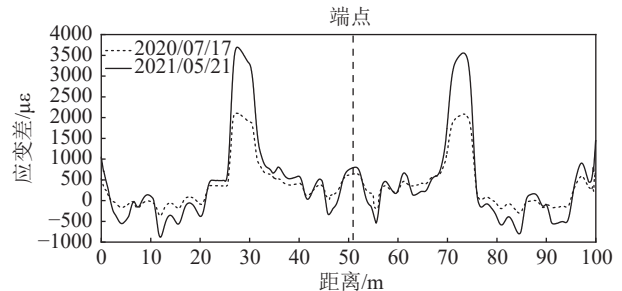


图 11 地裂缝监测应变变化

Fig. 11 Ground fissure monitoring strain variation

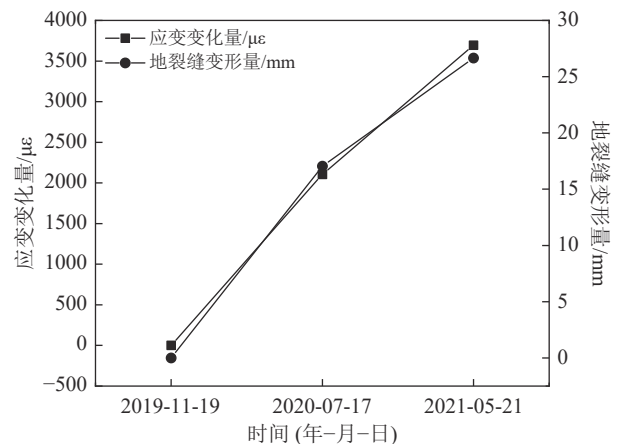


图 12 地裂缝处监测的最大应变变化

Fig. 12 Maximum strain and deformation of ground fissure

3.3 综合分析

根据感测光缆的监测结果, 地裂缝两侧出现明显的差异沉降, 地面沉降量和地裂缝两侧差异沉降量均持续增大, 地裂缝处变形量也持续增大。如图 13 所示, 将 2020 年 7 月 17 日和 2021 年 5 月

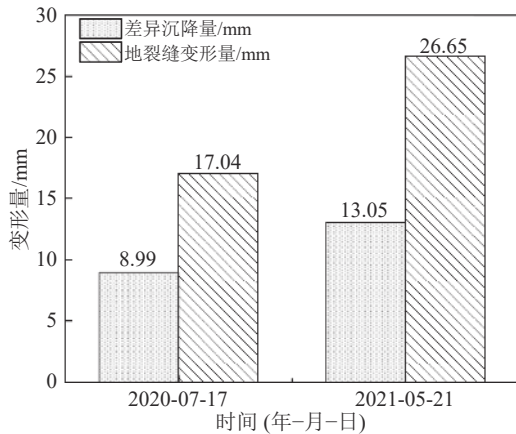


图 13 差异沉降量与地裂缝变形量对比

Fig. 13 Value of uneven subsidence and ground fissure deformation

21 日的钻孔差异沉降量与地裂缝变形量进行对比,发现差异沉降量与地裂缝变形量均持续增大,差异沉降量由 8.99 mm 增大至 13.05 mm,地裂缝变形量由 17.04 mm 扩张至 26.65 mm,但两者增大速率变缓。经计算,两次监测的差异沉降量与地裂缝变形量之比为 52.75% 和 48.96%,存在较强的线性关系。

4 讨 论

以上分析结果表明,宋庄地区差异沉降及地裂缝变形具有高度的相关性,证实了差异沉降是宋庄地裂缝发育的主控因素。本次研究成果与前人(赵

龙等, 2018; Zhao et al., 2021) 研究结论一致,以往研究认为地裂缝位于超采区及严重超采区(图 14),地下水过量开采引起水位下降,导致区域差异沉降持续增加,应力集中在软弱地区释放,导致土体破裂形成地裂缝。

通过对比发现,分布式光纤技术在地面沉降及地裂缝综合监测中可确定沉降主要贡献层,准确识别地裂缝发育位置,定量分析两者之间的发育关系。本次研究工作开展于宋庄地裂缝发育显著区域,但由于地裂缝发育长且范围广,基于分布式光纤的小区域监测无法覆盖整条地裂缝,其研究成果具有一定的限制性,未来可进一步开展地裂缝其他区域的综合监测工作,以提高对宋庄地区地面沉降及地裂缝的认识。

5 结 论

(1)通过地面沉降监测研究发现,地层压缩主要发生在地下水开采层,其中粉质粘土层的压缩变形最大。引起地面沉降的主要原因是地下水开采导致水位下降,土体内孔隙水压力减小,有效应力增大,地层被压缩变形。

(2)通过对地裂缝进行监测,准确获取了裂缝的发育位置,并监测到地裂缝变形量持续增大,但扩张速率减缓。

(3)地裂缝两侧地面沉降呈现明显差异,差异沉

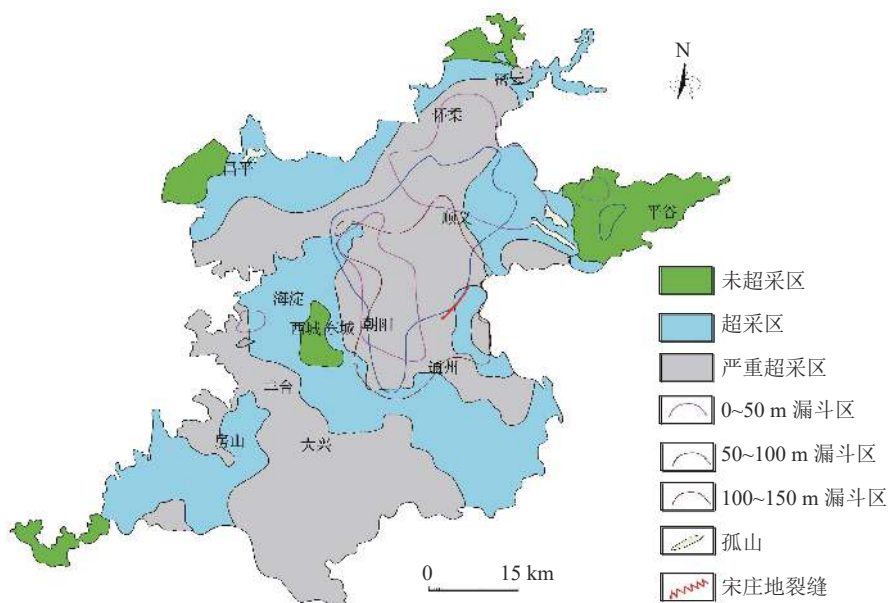


图 14 地下水开采情况及地下水漏斗分布图

Fig. 14 The chart of groundwater exploitation and distribution of groundwater funnels

降量与地裂缝变形量存在相同变化趋势,表明该地区地裂缝发育主要受地层差异沉降影响。

(4)通过光纤同步监测,定量分析了宋庄地裂缝与差异沉降之间的发育关系,由于地裂缝形成受多种因素影响,下一步可通过开展物理模型及数值模拟试验,深入分析宋庄地裂缝发育的影响因素及变形机理,为地裂缝防治及预警提供理论支撑。

致谢:衷心感谢参与本论文研究的所有人员及单位,感谢审稿专家提出的宝贵建议使得论文质量得到了进一步的提升。

参考文献

- Galloway D L, Burbey T J. 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction[J]. *Hydrogeology Journal*, 19(8): 1459–1486.
- Gao L, Han C, Abdulhafidh O, et al. 2021. An Application of BOTDR to the Measurement of the Curing of a Bored Pile[J]. *Applied Sciences*, 11(1): 418–430.
- Horiguchi T, Masui Y, Zan M S D. 2019. Analysis of Phase-Shift Pulse Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry[J]. *Sensors*, 19(7): 1497–1508.
- Zhao L, Li Y M, Luo Y, et al. 2021. An extension-dominant 9-km-long ground failure along a buried geological fault on the eastern Beijing Plain, China[J]. *Engineering Geology*, 289(5): 106–168.
- 何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 2021. 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*, 48(1): 146–153.
- 李玉梅, 罗勇, 赵龙. 2023. 北京市平原区地面沉降研究进展与思考[J]. *灾害学*, 38(4): 1–10.
- 刘平利, 申晓丹, 刘家橘, 等. 2020. GPS 技术在地面沉降监测中的应用[J]. *地理空间信息*, 18(10): 52–54, 4–5.
- 刘贺, 崔文君, 罗勇, 等. 2022. 基于分层监测的北京天竺地面沉降、地下水位与孔隙水压力变化规律[J]. *地质通报*, 41(4): 692–701.
- 刘苏平, 施斌, 张诚成, 等. 2018. 连云港徐圩地面沉降 BOTDR 监测与评价[J]. *水文地质工程地质*, 45(5): 158–164.
- 罗勇. 2016. 北京市地面沉降监测年度报告[R]. 北京市水文地质工程地质大队.
- 卢毅, 施斌, 魏广庆. 2016. 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*, 27(2): 103–109.
- 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 2018. 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*, 26(2): 356–364.
- 孙张涛, 范景辉, 王如意, 等. 2015. 基于高分辨率 SAR 数据的地面沉降监测——以印度尼西亚雅加达为例[J]. *地质通报*, 34(10): 1910–1917.
- 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 2019. 分布式光纤探测地裂缝的理论基础探讨[J]. *工程地质学报*, 27(6): 1473–1482.
- 张鹏. 2021. 北京顺义隐伏活动断裂及其诱发地裂缝灾害研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文.
- 赵龙, 李玉梅, 崔文君, 等. 2018. 北京宋庄地裂缝灾害特征及影响因素分析[J]. *工程地质学报*, 26(6): 1600–1610.
- 赵龙, 罗勇, 李玉梅, 等. 2019. 北京平原区地裂缝受灾体形态特征及影响因素[J]. *水文地质工程地质*, 46(6): 156–164.