

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1992

地面塌陷分布式光纤感测模型试验研究

韦 超¹, 朱鸿鹄^{1,2}, 高宇新¹, 王 静¹, 张 巍¹, 施 斌¹

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学(苏州) 高新技术研究院, 江苏 苏州 215123)

摘 要: 突发性地面塌陷对城市安全构成巨大威胁, 掌握塌陷土体变形过程对地面塌陷事故的预测预报至关重要。基于分布式光频域反射(optical frequency domain reflectometry, 简称 OFDR)和粒子图像测速(particle image velocimetry, 简称 PIV)技术, 开展了地面塌陷模型试验, 研究了塌陷过程中土体沉降的时空分布规律, 并探究了不同应变感测光缆锚固方式对光纤监测结果的影响。结果表明: 光纤应变监测曲线准确地反映了不同塌陷阶段上覆土体的变形状态, 揭示了土体内部应变的演化机制; 在光缆上设置圆片锚板, 可以有效增强光缆与土体界面的耦合变形程度; 在一定的埋置深度下, 随着锚板尺寸的增大, 光缆与土体间的变形协调性越好。研究结果显示, 分布式应变传感技术在地面塌陷变形监测中具有较好的适用性, 为该地质灾害的早期识别提供了一种有力的工具。

关 键 词: 光纤传感器; 地面塌陷; 沉降监测; 界面效应; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 09-2443-14

Model test study of ground collapse using distributed fiber optic sensing

WEI Chao¹, ZHU Hong-hu^{1,2}, GAO Yu-xin¹, WANG Jing¹, ZHANG Wei¹, SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

2. Nanjing University High-Tech-Institute at Suzhou, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: Ground collapse accidents pose a large threat to the safety of cities due to their suddenness. It is very important to understand the development process of internal deformation of collapsed soil for prediction of ground collapse. In this study, based on the optical frequency domain reflectometry (OFDR) and particle image velocimetry (PIV) technologies, ground collapse model test was performed, and the tempo-spatial distributions of ground settlement in the collapsed area were investigated. The influence of anchoring methods of distributed strain sensing cables on the fiber optic monitoring results was explored. The results show that the fiber optic strain measurements reflect the deformation state of the overlying soil in different collapse stages and reveal the internal strain evolution mechanism of the ground soil. The coupling effect of the cable-soil interface is effectively enhanced by adding circular micro-anchor plates and is better with the increase of the diameter of the anchoring circulars at a certain burial depth. The research results show that the distributed strain sensing technology has good applicability in monitoring ground collapse and can provide a powerful tool for mitigating such geohazards.

Keywords: fiber optic sensor; ground collapse; settlement monitoring; interface behavior; model test

1 引 言

地面塌陷是岩土体在自然或人为因素作用下向下陷落, 并在地面形成塌陷坑(洞)的一类地质灾害, 其特点在于隐蔽性、突发性和成因复杂性。地面塌陷常常导致道路交通中断, 诱发邻近建(构)筑物及综合管廊、地铁隧道等城市基础设施的破坏,

甚至造成巨大的人员伤亡和经济财产损失^[1-3]。在城市浅层(50~100 m)地下空间开发利用如火如荼的大背景下, 地面塌陷的安全隐患问题愈发突出。为此, 迫切需提高城市地面塌陷实时监测与风险识别技术水平。

在地面塌陷研究领域, 国内外学者开展了大量室内模型试验^[2-6]和原位监测^[7-9]工作, 对岩土变形

收稿日期: 2021-11-28

修回日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.42077235, No.42077232); 江苏省自然科学基金项目(No.SBK2021022661)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42077235, 42077232) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (SBK2021022661).

第一作者简介: 韦超, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事地质与岩土工程监测方面的研究。E-mail: weichao@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 朱鸿鹄, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程、岩土力学方面的教学和研究工作。E-mail: zhh@nju.edu.cn

模式、滑面形状和发育过程进行了深入的研究。一般来说,监测地面变形是定位不稳定岩土体和捕捉地面塌陷孕育过程的最简便有效的方法。摄影测量^[10]、全球定位系统(global positioning system,简称GPS)^[11]和合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar,简称InSAR)^[12]属于地表变形监测技术,其原理是对地表位置的相对变化进行测量。它们能够在较大的范围内以一定的空间分辨率探测cm级或mm级的变形,缺点是无法测量深部变形。Xiao等^[3]利用激光位移计,对地下水位下降引起的岩溶塌陷开展了模型试验研究,分析了沉降模式、体积和速率等因素。张严等^[13]基于InSAR技术,研究了佛山地铁隧道施工引起的塌陷事故,将事故诱因归结为邻近供水管道的破裂、渗漏;因InSAR数据的采样频率依赖于卫星周期,因此难以实现塌陷全过程的追踪。相比之下,沉降仪^[14]、测斜仪^[15]和引伸仪^[16]等地下变形测量技术,由于成本和技术等方面的限制,仅能获得离散测点处的变形信息,难以满足塌陷全域、全过程监测的需要。对于地面塌陷,传统的点式监测技术很难完整地掌握土体结构系统整体和局部层次上的变形特征、各层次间的变形协调性及发展规律,在工程中容易出现漏检。

近年来,分布式光纤感测(distributed fiber optical sensing,简称DFOS)技术发展迅速,如布拉格光纤光栅(fiber Bragg grating,简称FBG)、布里渊光时域反射(Brillouin optical time-domain reflectometer,简称BOTDR)、布里渊光时域分析(Brillouin optical time-domain analysis,简称BOTDA)、拉曼光时域反射(Raman optical time-domain reflectometry,简称ROTDR)等^[17]。与常规监测技术相比,DFOS技术具有高精度(应变精度通常为 10^{-6} 级)、长测距、易布设和抗干扰性强等特点,可在地表未发生明显变化之前定位出潜在的塌陷位置^[6]。DFOS作为一种可实现分布式应变、温度和振动传感的技术,已成功应用于滑坡^[18-19]、地面沉降^[20-21]及地裂缝^[22-23]等地质灾害的监测中,初步实现了变形场、渗流场和应力场等多场信息的自动获取。蒋小珍等^[2]通过模型试验模拟了岩溶水开采导致塌陷的过程,将监测光纤的变形与塌陷剖面进行对比,验证了光纤监测结果的可靠性。蒙彦等^[4]针对光纤传感技术应用于岩溶塌陷监测预报的3个关键问题,即环境温度影响、光纤敷设和预报模型推导,进行了初步的探究。Chen等^[6]和卢毅等^[9]将BOTDA技术应用于地面塌陷试验,得到了土体变形过程中传感

光缆的应变分布曲线,但受限于解调仪器的空间分辨率,只能判断出塌陷可能发育的区域,而无法得到量化的结论。侯公羽^[24]、程刚^[25]等针对煤层采动覆岩变形破坏引起塌陷问题,利用光纤传感技术揭示了冒落带和裂隙带岩层的变形破坏特征。

粒子图像测速(particle image velocimetry,简称PIV)是一类通过图像匹配实现高精度、非接触、动态的变形测量技术。该技术将被测介质的变形看作为颗粒低速流动的过程,通过比对变形前后照片的关联性,获得目标物的位移场与形变场^[26]。Rui等^[5]和崔蓬勃等^[27]利用该技术跟踪监测了砂土在不同工况下土拱演化的时空特征。Burke等^[28]开展了不同埋深比的Trapdoor试验,利用PIV技术深入分析了砂土中剪切带形成过程和土拱的变形演化特征。王德洋等^[29]结合PIV和光纤传感器的变形监测结果,系统研究了地层塌陷时管道的受力特征及周边土体的沉降分布规律。前述关于塌陷光纤监测技术的研究中存在的问题是宏观描述的多、定量研究的少。与此同时,将光纤传感技术应用于岩土变形监测中的关键问题是保证光纤本身与被测对象间的变形协调性^[30],在此基础上才能实现实时、高精度的分布式监测。对于该问题,Zhu^[30]、Zhang^[31-32]、Wu^[33]等分别开展了室内光缆拉拔试验、土体剪切试验,研究了不同工况下光缆与土体界面(cable-soil interface,简称CSI)的耦合变形特征;柴敬等^[21]也通过煤层开采模型试验,探究了光缆-岩体的变形耦合性。在塌陷工况下,仍需进一步了解和分析光纤与土体间相互作用及其对获取数据的影响,并结合PIV技术对光纤监测数据深入挖掘,从而得到关于塌陷机制的科学认识。

本文将高精度光频域反射(optical frequency domain reflectometry,简称OFDR)传感技术应用于地面塌陷模型试验中,采用水囊排水法精准控制塌陷体积,利用分布式应变传感光缆实现了空间分辨率为1mm的土体变形测量。在此基础上,研究了不同锚固方式和布设位置的光缆对塌陷试验的监测效果,并结合位移计、PIV等结果分析了地面塌陷的变形演化机制。

2 OFDR 传感原理

FBG传感器能较精确地测量应变,但无法实现全分布式测量,相较于传统技术优势不大。而BOTDR、BOTDA等技术基于布里渊散射光原理,空间分辨率低,短距离仅能实现dm或cm级别的空间分辨率,长距离分辨率则降低到m级别,适用

于测试距离长、精度要求不高的应变和温度监测; OFDR 是一类基于瑞利散射的光纤传感技术, 具有极高的空间分辨率和信噪比。

OFDR 的基本原理如图 1 所示。图中, ν 为光源的频率, ΔF 为光源的调谐范围, t 为时间, T 为采样时间, γ 为光源调谐速率, f 和 f_b 分别为干涉信号对应的拍频频率和最大拍频频率, FFT 为快速傅里叶变换。耦合器将光源发出线性扫描的连续光分为两路, 其中一束作为参考光, 另一束作为探测光发射到待测光纤中。探测光在光纤中向前传播时会不断产生瑞利散射信号, 这些信号光与反射回来的参考光经过耦合器并发生拍频干涉, 并被光电探测器检测。当光纤内部某点的温度或应变发生变化时, 光纤内部折射率会发生变化, 相应的瑞利散射信号光的频率也会有变化, 通过对光纤背向瑞利散射信号的频率进行测量, 可以对外界温度场或应变场的变化进行测量(或感知)^[34]。瑞利光谱频率的偏移与应变和温度变化之间的关系可以通过下式得到:

$$\Delta\nu_R = C_\varepsilon \varepsilon + C_T \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu_R$ 为瑞利光谱频率偏移量; ε 为光纤的应变变量; ΔT 为光纤温度变化量; C_ε 和 C_T 均为校准系数。

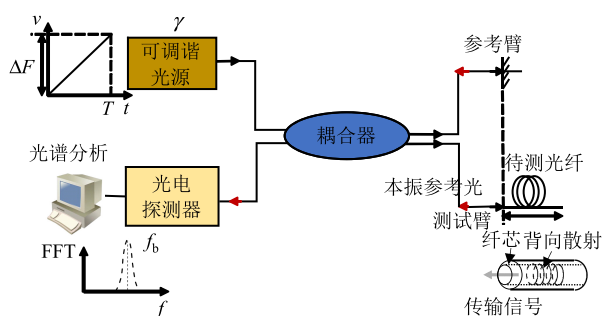


图1 OFDR 工作原理图
Fig.1 Working principle of OFDR

OFDR 解调仪可以在传感长度 100 m 范围内实现 1 mm 的空间分辨率, 相当于在一根 100 m 长的光纤上同时测量 10 万个传感点, 应变传感精度可达 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$, 完全可以满足岩土变形精细化监测的要求。采用 OFDR 技术监测地面变形, 能高精度捕捉塌陷的时空演化过程, 可为建立与实际相符的塌陷力学模型或开展数值模拟提供重要的信息。

3 模型试验

3.1 试验概况

本次模型试验用土取自南京市栖霞区某建筑

工地, 土体的不均匀系数为 1.61, 曲率系数为 1.06, 最大、最小孔隙比分别为 0.878、0.579。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[35], 该土属于级配不良的细砂。

试验中采用的模型箱外部尺寸为 50 cm×25 cm×50 cm (长×宽×高)。砂土填筑密度控制为 1.5 g/cm³, 初始含水率为 0.3%。采用落砂法在模型箱底部先填筑 4 cm 厚的砂土作为垫层, 并在填砂时控制一定的落高。将充水体积为 1 500 mL、高约 4 cm 的水囊置于垫层中心位置, 并调整水囊形状使其在试验过程中均匀出水, 以模拟地面塌陷的整个过程^[29]。之后继续采用分层压实法, 分 5 cm 一层填筑砂土并进行整平压实, 以保证整个试验密度一致。每次夯实之后将表面磨毛, 使上下层填土紧密均匀贴合, 并按照试验方案埋设好光缆。

在整个试验过程中, 通过人工控制控水阀门排水速率来模拟地面塌陷。水囊水量的变化速率与变化量分别约为 33 mL/min 和 100 mL。在试验开始前, 将土样静置 3 h, 使内部应力分布均匀。本试验分为 14 个沉降阶段, 每级排水 100 mL, 全程共计 80 min, 水囊排水量等于土体的体积损失量。

3.2 监测系统

3.2.1 土体应变监测

塌陷试验装置如图 2 所示。在试验过程中, 选用外径为 0.9 mm 的紧包式应变传感光缆监测土体应变。该光缆的护套材料为白色聚氯乙烯 (PVC), 内部为 G652(B)型单模单芯光纤。试验中采用 OSI-S 型 OFDR 解调设备读数, 空间分辨率和采样间隔分别设置为 1 mm、1 cm。

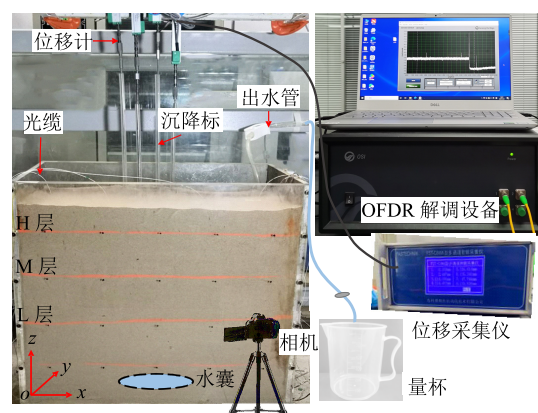
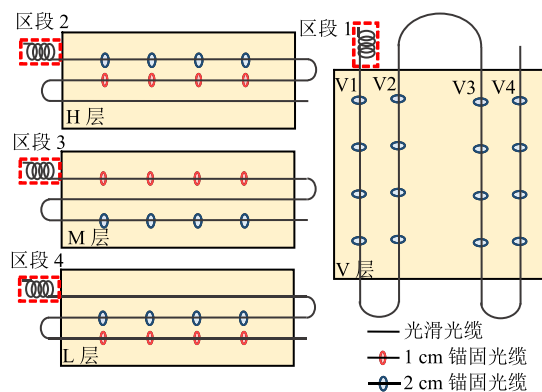


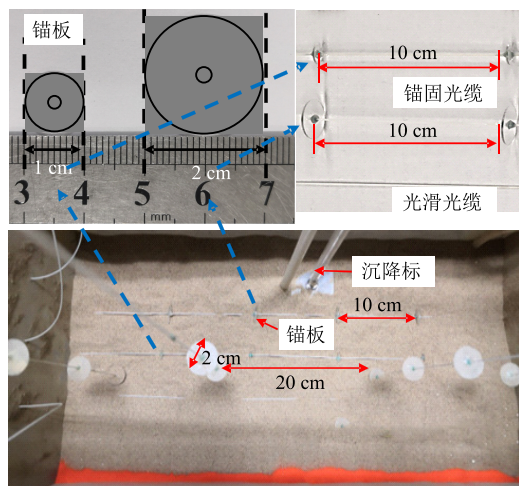
图2 地面塌陷试验装置示意图
Fig.2 Setup of model tests on ground collapse

分布式应变传感光缆采用预埋的方式布设, 即在填筑砂土的同时埋入光缆, 并在光缆上施加一定

的预拉应变, 设定初始预拉状态的光缆应变值为 0。模型箱内土体高度为 45 cm, 光缆布设工艺如图 3(a) 所示, 以模型箱左下角为坐标原点, 沿长度和宽度方向分别为 x 、 y 轴, 竖向为 z 轴。水平光缆分 3 层 (z 分别为 20、30、40 cm, 从低至中到高分别标记为 L、M、H 层), 每层均为 3 根光缆 (y 分别为 7.5、12.5、17.5 cm); 竖向光缆分 4 根 (x 分别为 5、15、35、45 cm, 从左到右分别标记为 V1~V4)。为了达到精确定位和温度补偿的双重作用, 在传感光缆的各个特征位置 (见图 3(a) 中区段 1~4) 均预留出一段光缆。本次试验采用将预留光缆盘绕在特制的开孔塑料盒内的方法, 试验中这些光缆段的瑞利频移量只受温度影响, 而不受外力的影响。



(a) 传感光缆布设示意图



(b) 锚固光缆及装置实物图

图 3 分布式光纤测试系统设置图

Fig.3 Setup of distributed fiber optic test system

为探究光缆锚固方式对光缆-土体界面耦合性的影响, 利用厚度为 1 mm、直径分别为 1、2 cm 的两种 PVC 圆片锚板对光缆进行封装 (下文中两种光缆简称为 1 cm 锚固光缆、2 cm 锚固光缆), 相邻

锚板间距为 10 cm。试验前, 采用环氧树脂胶将锚板黏贴在应变传感光缆表面, 待其黏结牢固形成一个整体后便可用于试验, 制作完成的设置锚固体的光缆如图 3(b) 所示。在同一水平面的不同位置, 未锚固光缆及采用两种锚板锚固的光缆在 L 层到 H 层土层中交替布置, 以便比较塌陷过程中各层土体光纤应变测值的差异程度, 据此量化分析锚板直径对缆-土界面变形协调性的提高作用。竖向光缆均采用直径为 2 cm、间距为 10 cm 的锚板锚固光缆。

3.2.2 内部位移监测

位移测量系统中采用 4 个 LVDT 位移计, 通过在沉降标杆上套上 PVC 管, 可以有效地减小沉降标在监测过程中受周围土体的挤压作用, 使得位移监测更加准确。沉降标布设位置位于水囊正上部 (z 分别为 8、20、30、40 cm, 从低到高依次标记为位移计 1~4, 其中位移计 1 紧贴水囊)。

3.2.3 表面变形监测

试验前, 在模型箱正前方 50 cm 处安装数码相机, 并保证其完全水平。在每一级土体塌陷稳定后进行拍摄, 试验后采用 PIV 技术分析塌陷区内土体的变形情况, 以获取土体位移场与应变场数据, 并与位移计、光纤测量结果进行对比分析, 得出塌陷过程中滑动面的发育规律及土体位移场分布。

4 监测结果与分析

由于光纤传感器在监测过程中, 应变测量值会受环境温度的影响, 为保证测量结果的准确性, 需分析试验过程中温度变化信息, 并评价其对测量结果的影响。图 4 给出了图 3(a) 中所布设的温度补偿区段 1~4 光纤应变变化情况, 温度波动引起的应变变化值均在 2×10^{-5} 内, 可认为本试验中环境温度波动对光纤应变监测结果产生的影响可忽略不计。

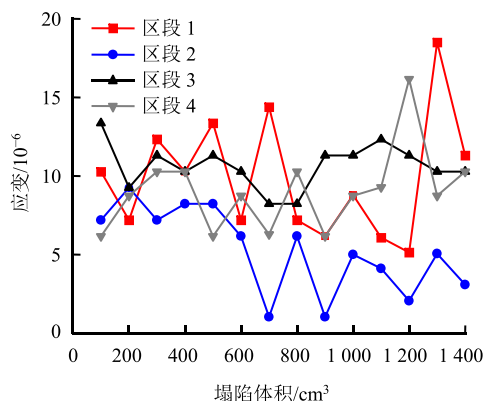


图 4 温度补偿区段感测光缆的应变测值

Fig.4 Strain measurements of fiber optic cables for temperature compensation

4.1 水平向应变

通过对塌陷过程中光纤监测数据进行分析,得到不同层位土体的应变值。随水囊逐级释水,水囊上部土体向下移动,从而形成塌陷区,并向上层土体扩展。选取不同塌陷体积时刻下的H、M和L层中的锚固与光滑光缆的监测结果进行作图分析,分别如图5~7所示,竖点灰色线条代表圆片锚板所在的位置。图中横坐标表示沿塌陷试验中空间直角坐

标系 x 方向的长度,所示拉应变为正,压应变为负。

从图5~7中可以看出,随水囊释水量的逐级增加,水囊对上覆土体的托力减小,土体在卸荷作用下逐渐下移,不同水平层的分布式应变监测段获得的应变值具有一定差异,但其分布形态较为接近,均对沿线土体变形有灵敏响应。为有效增强缆-土界面的耦合变形程度,本文采用了2种尺寸锚板,对比各光缆段的应变分布可以看出:

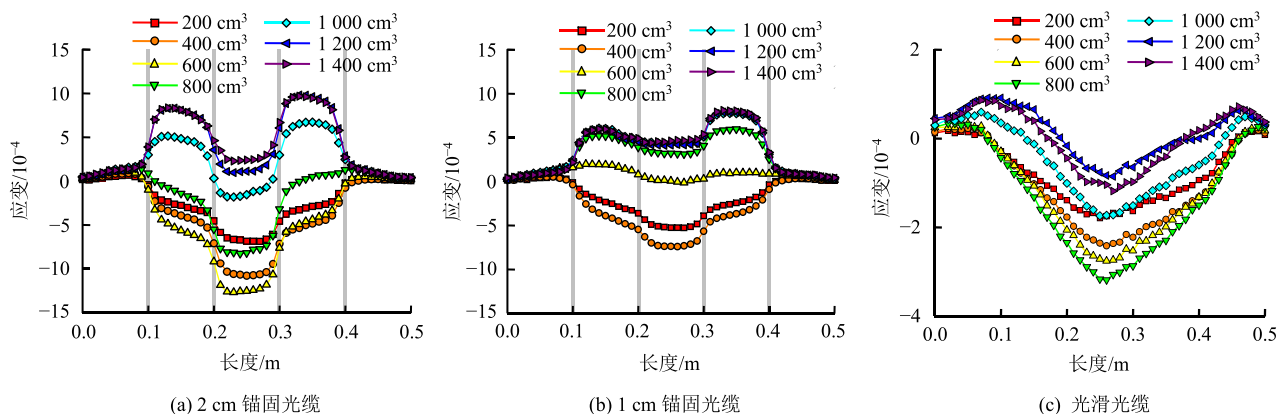


图5 H层光缆的应变分布

Fig.5 Strain distributions on H-layer fiber optic cables

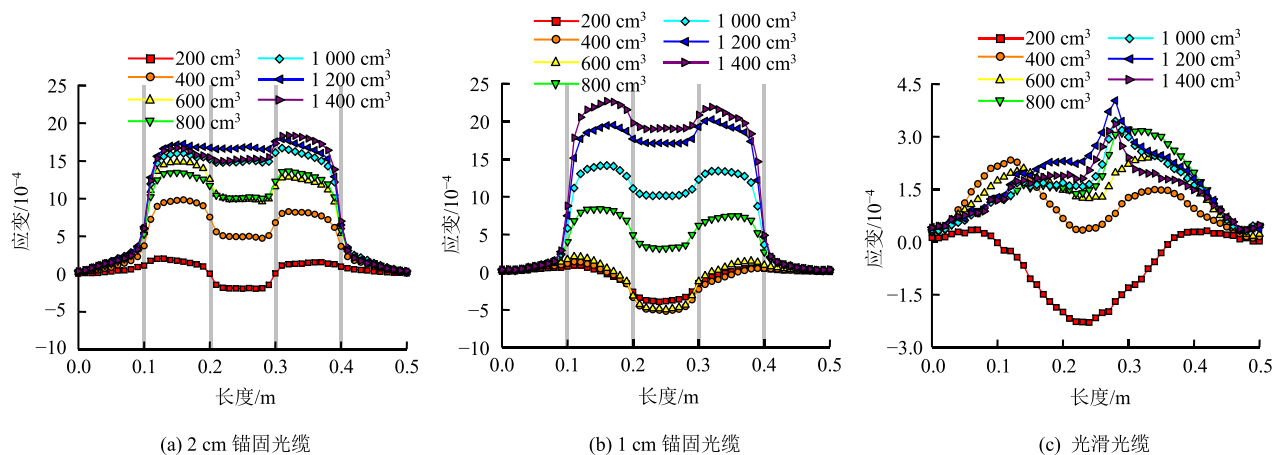


图6 M层光缆的应变分布

Fig.6 Strain distributions on M-layer fiber optic cables

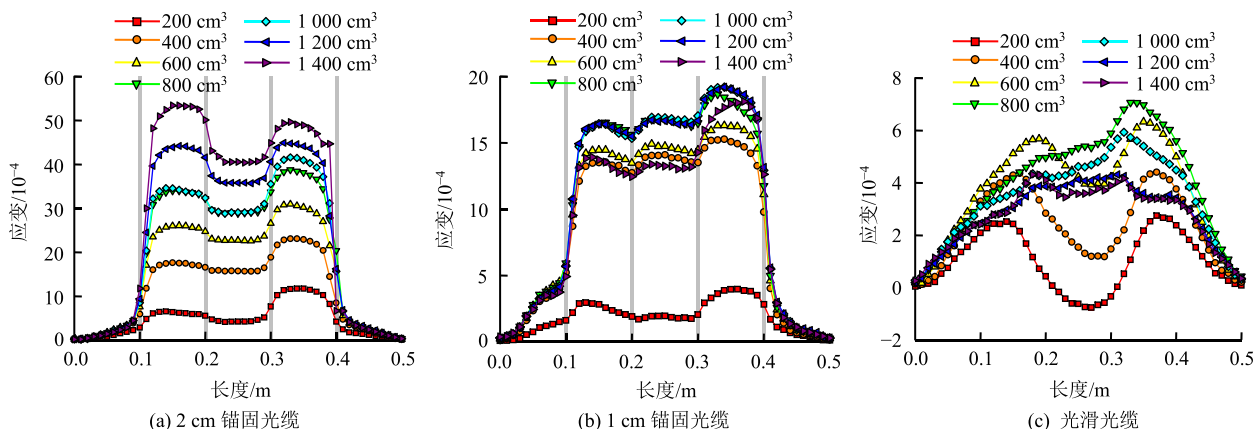


图7 L层光缆的应变分布

Fig.7 Strain distributions on L-layer fiber optic cables

(1) 由于土体埋深和其距塌陷源距离的差异, 引起了沉降局部化现象, 从而导致了各层位光缆应变分布不均匀。在塌陷过程中, 土体先发生蠕动压密, 积累到一定程度后, 逐渐发生垮塌现象。靠近塌陷源的 L 层光缆主要表现为拉应变, 且监测值逐渐增大, 在 3 层中监测获得的应变峰值也最大。M 层光缆中, 2 cm 锚板锚固和光滑光缆在塌陷体积为 200 cm^3 时, 中部区域表现为明显的压应变区, 随塌陷体积的增大, 整体表现为拉应变。H 层中的锚固光缆, 在塌陷前期主要表现为压应变, 随塌陷体积的增大, 土中应力发生调整, 光缆处于受拉状态; 光滑光缆监测结果则主要表现为压应变, 在塌陷体积达 800 cm^3 后, 应变数值逐渐变小。出现这种现象的原因可能是具有一定含水率的砂土颗粒间存在一定的黏聚力, 内部土体在塌陷过程中, 局部变形区域发展为稳定的隐伏土洞。随塌陷的发展, 土拱效应随土体位移逐步发挥^[27], 在变形尚未传递至浅表时, 距离塌陷源较远土层中埋设的光缆应变监测值较小。

(2) 同一水平层位布设的 3 根光缆, 在相同塌陷阶段, 锚固光缆的应变峰值远大于光滑光缆, 且直径为 2 cm 锚板的锚固效果明显优于 1 cm 锚板。对于采用圆片锚板锚固的光缆, 应变分布呈现明显“分段变化”的现象, 与锚固光缆在土中拉拔^[31]、剪切试验^[32]中的结果类似。而对于光滑光缆, 应变沿光缆长度的分布则更为平滑。光滑光缆和 1 cm 锚固光缆随塌陷体积的逐级增加, 部分位置处光缆后期应变数据不再持续增长, 甚至出现下降现象, 而 2 cm 锚固光缆未出现此类现象。这是由于光缆在 2 cm 锚固的作用下, 相较于 1 cm 锚固和光滑光缆与土体的变形协调性得到的提升更大, 较大直径的锚板与土体间的摩擦作用增大, 能更有效地阻碍土体与光缆间的相对滑脱, 从而增强缆-土之间的变形协调性, 其监测到的土体应变也要增长数倍。在土体发生较大变形后, 当光缆-土体界面剪应力大于抗剪强度时, 光滑光缆先与周围土体发生了滑脱, 之后 1 cm 锚固光缆也逐渐发生滑脱现象。

(3) 光缆测试应变数据结果呈两头凸起、中间下凹的“马鞍”型, 曲线存在左、右 2 个峰值。随塌陷体积的增加, 各层位土体均出现了较为明显的竖向位移。在光缆与周围土体未发生滑脱之前, 水平层中各预埋光缆监测所得的应变峰值均呈现逐渐增大的趋势, “马鞍”现象也愈发明显。同时, 在最接近塌陷源的水平层位(即 L 层)监测的应变峰值远大于其余监测位置, 表明塌陷破坏最先对邻近

土层产生影响。

4.2 竖向应变

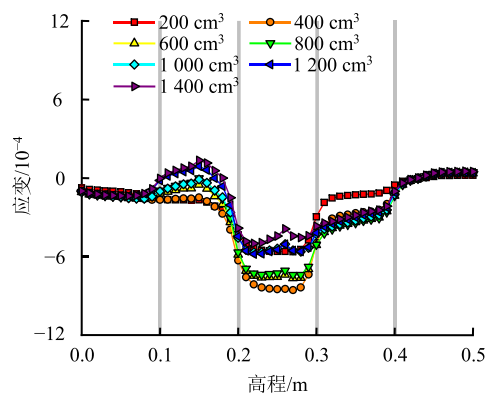
竖向光缆 V1~V4 的监测结果如图 8 所示。竖向各光缆应变监测段在 $0\sim 0.10\text{ m}$ 范围内主要表现为压应变, 且在塌陷过程中应变测值的变化量较小, 表明光缆沿线位置的土体受塌陷发展的影响程度较低。靠近水囊的光缆 V2、V3 在 $0.10\sim 0.45\text{ m}$ 范围内主要表现为拉应变, 随塌陷体积增至 $1\,000\text{ cm}^3$, 拉应变达到峰值, 之后应变测值相较于前一级变化较小。

利用剑桥大学等开发的 GeoPIV 软件对模型箱侧壁选定区域进行分析计算, 得到了如图 9 所示的土体位移场云图。图中白色直线为光缆的布设位置, 白色椭圆区域为水囊所在位置。

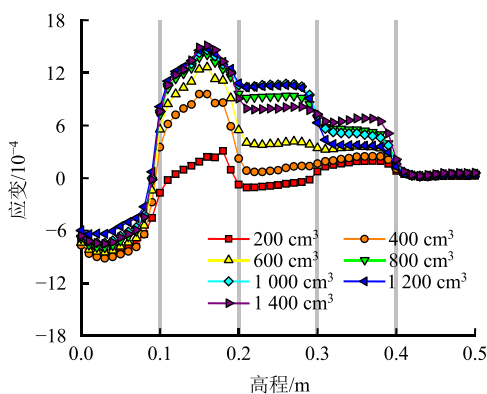
图 9 显示, 塌陷体积在 $1\,000\sim 1\,400\text{ cm}^3$, 主要发生塌陷源上覆土层向下部运动, 侧部土体向塌陷源运动的幅度明显减小, 此时受塌陷影响的土体范围达到最大。当塌陷内部土体发生较大变形时, 土层间会产生空隙。光缆与土体间会发生滑脱现象, 导致光缆随土体协调运动的程度减小, 即发生光缆测到的拉应变相较前一级不变或减小。在同一塌陷体积下, 随高程的增加, 应变测值发生减小, 分析其原因为下层光缆沿线土体的变形幅度大于上层。竖向光缆监测获得的应变曲线形态与 Ou 等^[36]在基坑开挖原位试验中监测获得的侧部土体沉降结果较为吻合, 表明了光纤监测结果不仅可以预测最大沉降位置, 而且能够准确地监测位于最大沉降位置两端土体的沉降和应变。

距离水囊较远的光缆 V1、V4, 高程在 $0.10\sim 0.45\text{ m}$ 范围内主要表现为压应变。随塌陷体积达 400 cm^3 后, 应变监测趋势出现了明显变化, 分析原因为光缆受土体的挤压作用在土体向塌陷源运动过程中不断减小。由图 8 可得, 光缆 V1、V4 沿线土体应变监测变化较大的范围分别为 $0.2\sim 0.3$ 、 $0.1\sim 0.3\text{ m}$ 。理论上, 对称位置的 2 根竖向光缆应变测值的趋势应该一致。但因铺设工艺、试验条件及水囊边界等限制, 导致塌陷引起的土体蠕动压密情况在光缆上表现不同。值得注意的是, 光缆 V1、V4 在塌陷体积为 400 cm^3 时, 应变测值的发展均有明显的突变现象。这说明, 光缆可以较为精准地捕捉到因塌陷造成的突发性变形。

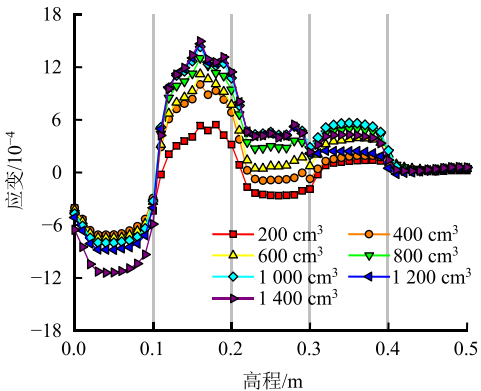
竖向光缆的应变曲线呈“台阶”式发展过程, 表明在同一塌陷阶段、不同位置的光缆由于距离水囊远近的不同及锚固方式的差异, 受到了不同的拉、压应力作用。随塌陷的逐渐发展, 远离塌陷源位置



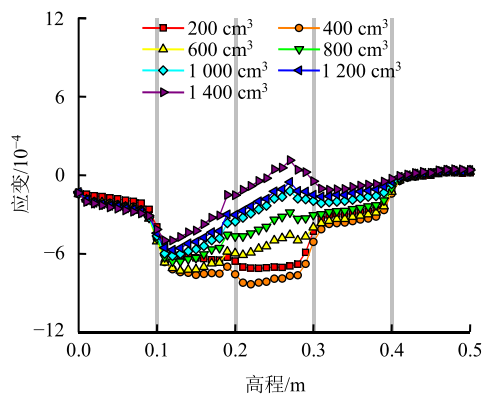
(a) V1



(b) V2



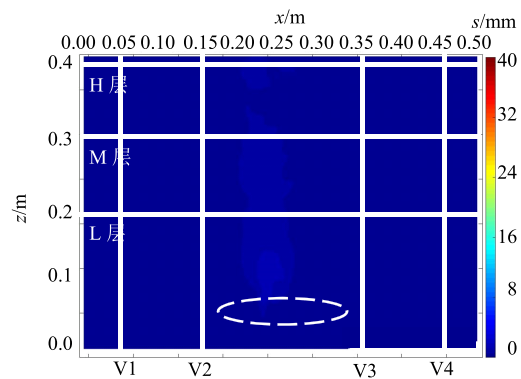
(c) V3



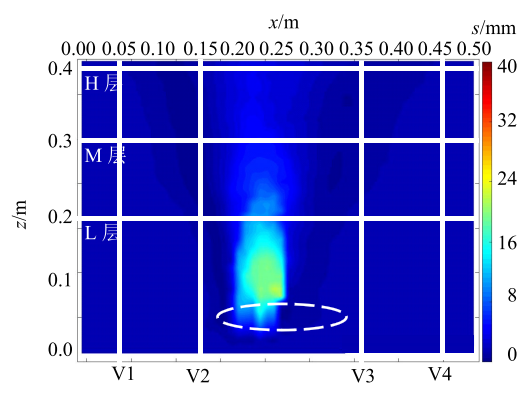
(d) V4

图 8 竖向光缆的应变分布

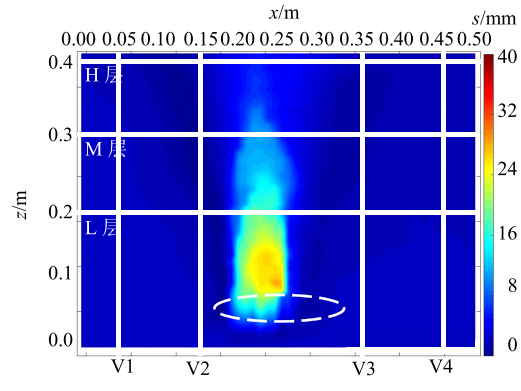
Fig.8 Strain distributions on vertical fiber optic cables



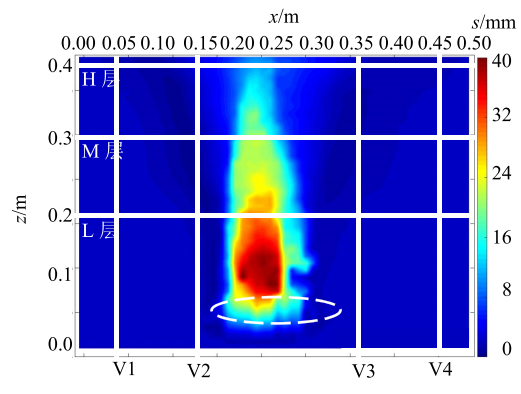
(a) 200 cm³



(b) 600 cm³



(c) 1 000 cm³



(d) 1 400 cm³

图 9 PIV 计算得到的土体位移场云图

Fig.9 Contours of soil displacements calculated by PIV

的光缆受拉、压的状态逐渐明显,其受应力大小与光缆周围土体下沉的程度有关,由此引起光缆在监测区域内呈现各异应变分布特征。因此,光纤监测结果直接反映了塌陷过程中土体变形移动状态,且表征了土体内部应力状态及塌陷变化是从下部向上层土体逐渐发展的过程。

4.3 表面变形

由图 9 可知,在同一塌陷状态下,邻近水囊的土体位移较大。随塌陷体积的增大,水囊上层土体在自身重力作用下逐渐向下部空腔中运移,从而形成浅层空洞^[37]。同时,土体疏松区迅速发展,通过覆盖层传播,并逐渐延伸至地表,土颗粒的位移均逐渐增大,且主要发生在水囊正上部的漏斗形区域内。结合水平布设的光纤监测数据可得,由塌陷造成的上部土体变形破坏是由应变逐渐累积所致。随着下方土体的持续垮塌,使得上覆土层的原有应力在短时间内失去平衡,从而形成地表塌陷^[38]。这与在塌陷试验过程中观测到的现象一致,地表中心区域的土体沉降量最大,靠近两侧则逐渐减小。

图 10 为土体剪应变的云图。可以看到,随塌陷体积增大至 $1\,400\text{ cm}^3$,塌陷源上部及周围土体的应力重分布,距离水囊较近处土体剪应变不断累积。在塌陷体积为 200 cm^3 时,由于释水量较小,土体先发生蠕动压密,在此阶段土体变形甚微,剪应变最大值出现在邻近水囊中心的土层中。随着塌陷体积逐级增大,位于水囊边缘的剪切滑动面从两侧逐渐向上延伸,并且在外部孕育更大的滑动面,其整体分布形态呈宝塔状,并始终处于水囊上部范围内,与 Rui 等^[5]试验结果类似。由图 10 可得,滑动面内部土体发生沉降,土拱效应逐渐增强,当后期土体沉降明显时,带动滑动面外侧土体再次发生主动破坏,滑动的土体在位移影响区域内下沉的同时,对周围土体的应变变化也造成了一定的影响。

利用 PIV 技术对塌陷体积为 $1\,400\text{ cm}^3$ 时各光缆沿线土体剪应变进行估算,如图 11 所示。图 11(a) 表示水平向光缆沿线剪应变分布图,应变变化较大区域为 $0.17\sim 0.33\text{ m}$,应变峰值位于剪切滑动面所在位置,其中 L 层剪切带宽度最大,且在两侧位置均有 2 个应变峰值,表明在该层位出现了 2 个滑动面。M 层剪切带宽度次之, H 层最小,同时 H 层中土体的应变峰值也最小。距模型箱两侧一定范围内的剪应变趋近于 0,验证了本试验基本不存在边界效应。图 11(b) 为竖向光缆沿线剪应变分布图,位于对称位置的光缆 V2、V3 沿线剪应变随高程的增大

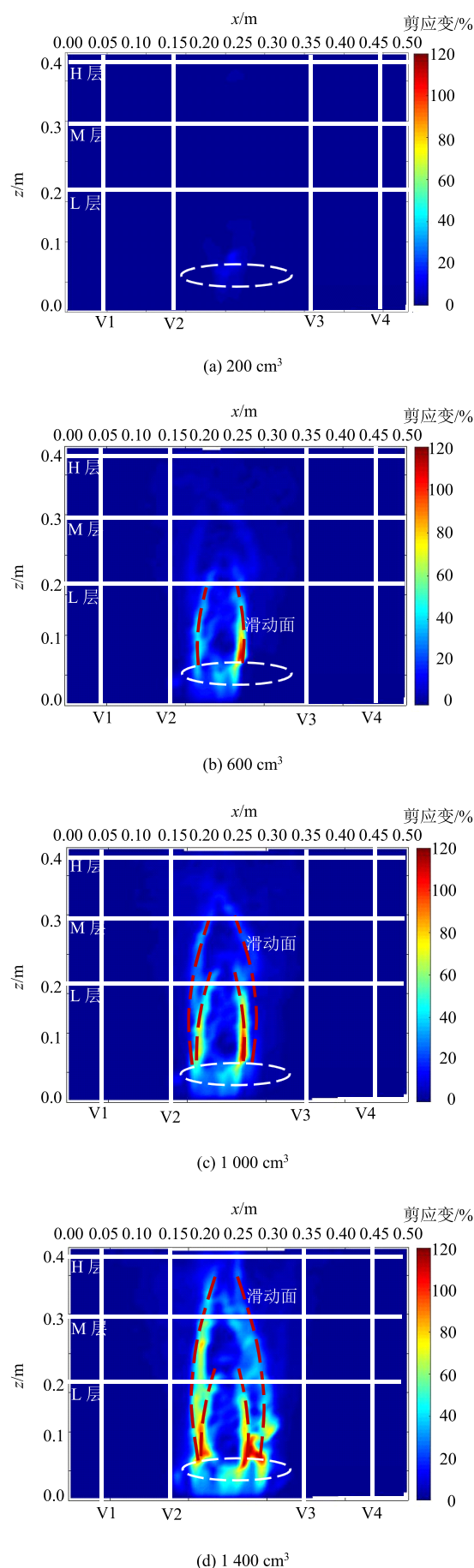
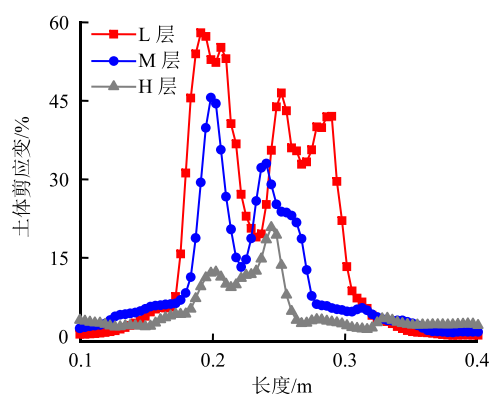
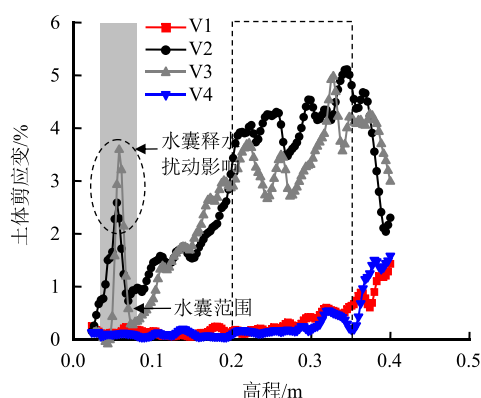


图 10 PIV 计算得到的土体剪应变云图

Fig.10 Contours of soil shear strain calculated by PIV



(a) 水平方向



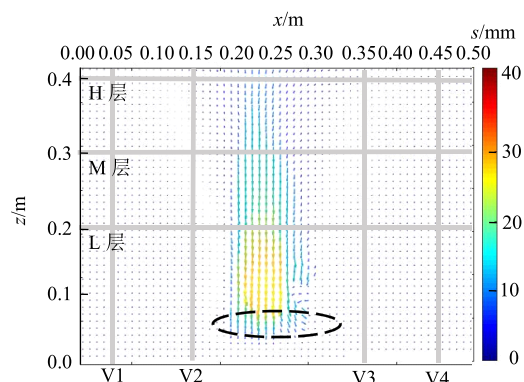
(b) 竖直方向

图 11 光缆沿线的剪应变分布

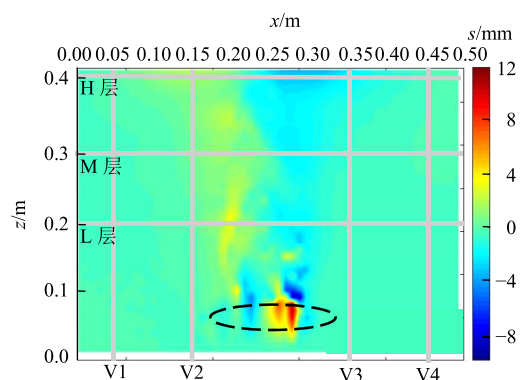
Fig.11 Shear strain distributions along fiber optic cables

而增大,在 0.35 m 位置出现了应变衰减现象,表明该区域土体受塌陷影响程度较小。水囊释水对高程为 0.06 m 处的土体产生了较大扰动,导致应变值较大。光缆 V1、V4 沿线土体的剪应变随塌陷发展变化的趋势较小,在高程为 0.3 m 处剪应变增大,这是由于 V1 和 V4 上部沿线土体处于塌陷位移影响区内,而其下部土体受塌陷的影响程度较小。

为了研究侧部土体的变形演化,试验采用 PIV 技术分析了塌陷体积为 1 400 cm³ 时侧部土体位移矢量和水平位移数据,如图 12 所示。由图 12(a)可知,邻近水囊土体的位移较大,往两侧及上层土体的位移逐渐减小。从图 12(b)中可得,位于塌陷影响区内的土体均存在 x 方向上的位移分量,对该现象进一步分析,在塌陷过程中,塌陷区域外部土体呈现从滑动面外部迁移滑动至空腔内的趋势(正值表示向 x 正向,负值表示向 x 负向),这与图 5、6 中 H、M 层光缆在前期监测过程中发生压缩现象所吻合。图中灰色直线为光缆的布设位置,黑色椭圆区域为水囊所在位置。



(a) 位移矢量



(b) 土体横向位移

图 12 土体的位移矢量和横向位移云图

Fig.12 Soil displacement vector and contour of horizontal displacement

5 讨论

5.1 光缆锚固效果

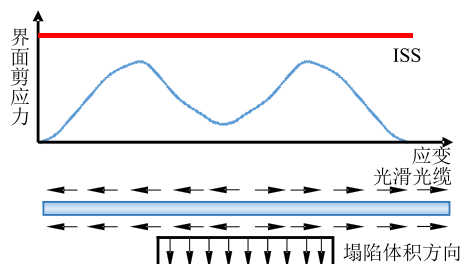
当采用光缆监测结构物变形时,光缆与被测结构体之间是紧密黏接的,监测所得应变可直接用于表达被测结构的应变变化。本文探究了地面塌陷模型试验的分布式光纤测试方法,该方法的应用存在以下局限:①地面塌陷属于大变形问题,当土体发生大变形时,会引起缆-土间发生解耦现象,造成光缆监测所得的应变偏离土体的真实应变。②由于土体是各向异性、不均匀和不连续的材料,光缆与土体之间的应变传递关系较为复杂,会产生较大的差异性,由测试仪器得出的应变只是土体发生变形引起的光纤应变,与土体真实应变还存在一定差异。

基于试验数据,可以对圆片锚板的作用机制作进一步分析,如图 13 所示。通过在光缆上安装圆片锚板,可以同时起到摩擦黏结和点式固定的作用,一定程度上提高了光缆与土体界面的峰值抗剪强度。在同样界面剪应力 ISS 作用下,缆-土界面耦合能力明显增强,有效防止两者之间出现滑脱^[31,33]。然而,由于剪力主要作用在锚板上,相邻锚板间的

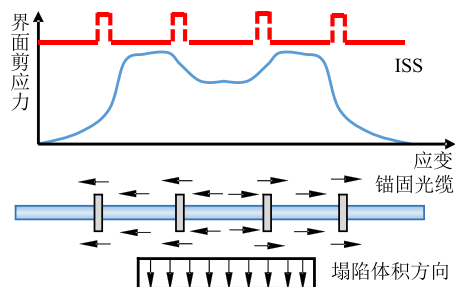
光缆均匀拉伸,因此使用锚板可能会导致应变在两个锚板间均匀分布,出现“应变平均化”现象。

图 13(c)为圆片锚板的受力分析示意图^[39],其中 σ_n 为锚固光缆的上覆压力; σ_b 为锚板所受的轴向应力,在锚板滑脱的极限状态下为其抗拉承载力 $\sigma_{b\max}$; θ 和 β 分别为圆锥形弹性核(主动区)的底角和转动滑动区(被动区)的顶角,其取值分别为 $(\pi/4+\varphi/2)$ 和 $\pi/2$,其中 φ 为土体的内摩擦角。根据 Bergado 等^[39]提出的格栅拉拔承载力计算方法, $\sigma_{b\max} = cN_c + \sigma_n N_q$,其中 c 为土体的黏聚力; N_c 、 N_q 均为承载力系数,其计算式为^[39]

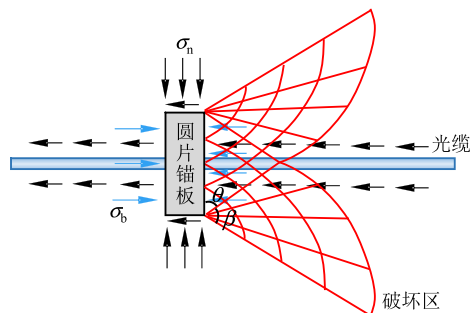
$$\left. \begin{aligned} N_c &= \frac{1}{\sin \varphi} e^{\pi \tan \varphi} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \cot \varphi \\ N_q &= \frac{1}{\cos \varphi} e^{\pi \tan \varphi} \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



(a) 光滑光缆



(b) 锚固光缆



(c) 圆片锚板作用示意图

图 13 塌陷工况下光缆的应变和界面剪应力分布示意图
Fig.13 Distributions of strain and interfacial shear stress along fiber optic cables under collapse conditions

水平光缆的应变测值可反映水囊逐级释水过程中光缆沿线土体变形的大小及范围。选取塌陷体积为 $1\,000\text{ cm}^3$ 时,不同高程处光缆应变测值作图分析,如图 14 所示。在埋置深度及土体位移较大的 L、M 层中,各光缆的应变监测结果均表现为拉应变,其中 2 cm 锚固光缆的监测结果较好。在埋置深度及土体位移较小的 H 层中,光滑光缆和 2 cm 锚固光缆的中部均处于受压状态,表明该层位光缆沿线土体的位移矢量的水平分量占主导地位。在一定条件下,有锚固光缆的应变测值会高于光滑光缆,这反映了锚固光缆与土体间变形协调性更好。由上述分析可得,试验中采用的 2 cm 锚固光缆最适宜应用于塌陷工况监测,监测所得结果可反映塌陷内部土体的沉降时空分布规律。从总体上看,锚固和光滑光缆的监测结果均表明,分布式光纤技术作为一种敏锐、有效的岩土工程监测方法,能够较为准确地得到土体应变分布,但在实际应用过程中,要注意光缆的锚固方式和布设位置。

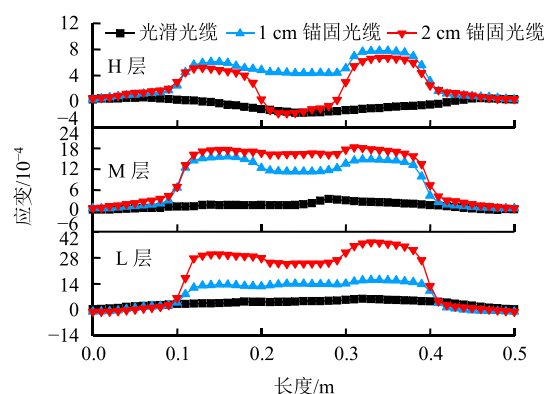
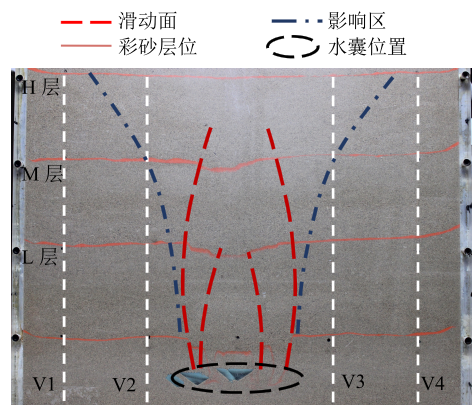


图 14 不同高程处水平层光缆的应变分布
Fig.14 Strain distributions on horizontal layer fiber optic cables at different depths

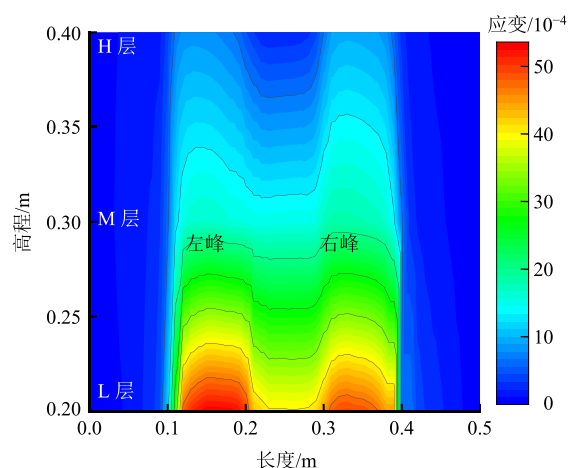
5.2 塌陷变形分析

在塌陷体积达 $1\,400\text{ cm}^3$ 时,塌陷形态如图 15(a) 所示,水平光缆的布置层均处于塌陷影响范围内。选取与土体耦合效果较好的 2 cm 圆片锚固光缆的应变监测数据,可以得到塌陷区上部应变分布云图,如图 15(b)所示。随水囊的逐级释水,靠近塌陷源的 L 层中土体变形量最大,而 H 层中土体的变形量最小。水平光缆的监测应变在长度分布上具有明显的规律性,应变曲线存在 2 个明显峰值。这是因为塌陷过程中,在水囊两侧边界形成了向上发育的滑动面,这将使特定位置处的土体受到两处较大的拉应力,反映到应变曲线上即为 2 个峰值。图 15(c)为 4 根竖向光缆测得的应变云图,应变变化较大区域位

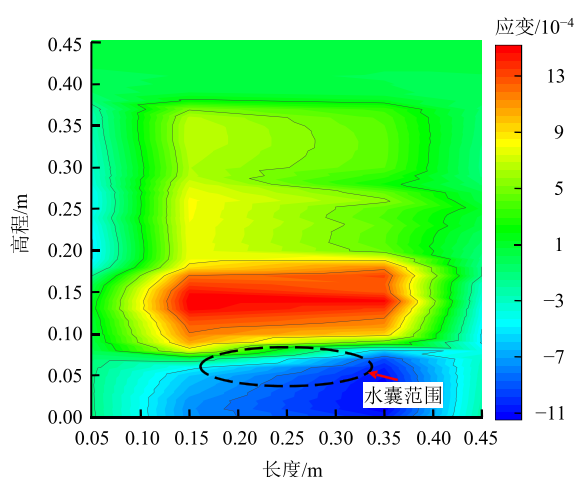
于水囊正上层, 监测结果可以对发生塌陷的具体位置进行精确定位。



(a) 分析区塌陷形态



(b) 水平向光缆测得的应变云图



(c) 竖向光缆测得的应变云图

图 15 塌陷形态与光纤监测结果

Fig.15 Collapse shape and fiber optic measurements

利用 PIV 计算得到不同高程位置的土体沉降值, 并用 Klar 等^[40]提出的修正高斯曲线公式对模型

试验中计算的沉降值进行拟合, 如图 16 所示。随高程的增大, 塌陷的最大位移量在不断减小, 同时塌陷影响范围不断增大。相同土层中, 塌陷位移的最大位置位于中部, 在两端的位移量较小。采用 Klar 法拟合得到的沉降曲线不仅在分布规律上和 PIV 计算结果接近, 且最大沉降量的发展规律也和试验相符合。由 PIV 计算得到高程为 0.08 m (紧邻水囊)、0.20 m (L 层) 及 0.30 m (M 层) 处的沉降最大位移分别为 -39.5、-27.8、-20.6 mm, 与试验中相同位置处位移计监测位移 -39.4、-28.0、-20.5 mm 基本相符。但二者在高程为 0.40 m (H 层) 中沉降的最大位移差别较大, 出现这种现象的原因可能是模型箱侧壁的摩擦效应干扰了土体表面颗粒的移动, 从而导致利用 PIV 分析的位移偏小。

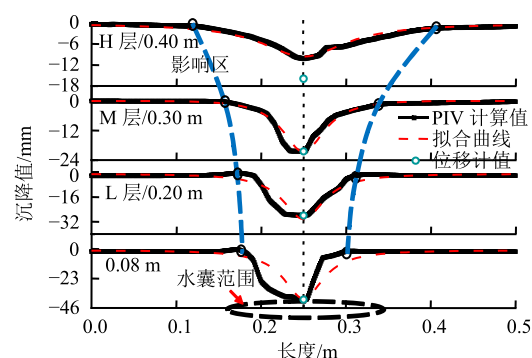


图 16 不同高程处 PIV 计算沉降值与实际值的对比图

Fig.16 Comparison of PIV calculated and actual settlements at different depths

由前述分析, 随塌陷的逐渐发育, 各层位光缆被拉伸或压缩, 其伸长量也发生相应的变化。通过应变积分法^[31]计算得到各层中与土体耦合效果较好的 2 cm 锚固光缆的伸长量, 并与位移计监测结果对比。如图 17 所示, 图中位移为正值表示方向向下。在同一塌陷状态下, L 层中位移值及光缆伸长量最大, 随高程的增大, 位移值及光缆伸长量均不断减小。L、M 层中光缆伸长量与位移计监测位移间具有较高的线性拟合度, 线性决定系数 R^2 分别为 0.985 3、0.836 5。H 层中光缆, 在塌陷前期表现为受压状态, 光缆伸长量为负值, 随塌陷体积的增大, 土中应力发生调整, 光缆逐渐被拉伸。将发生应力调整阶段后的光缆伸长量与位移计监测值间进行线性拟合, 线性决定系数 R^2 达 0.943 9, 线性拟合度较好。在塌陷体积为 1 400 cm³ 时, H 层中锚固光缆的伸长量达 0.21 mm, 结合沉降监测数据, 该拉伸量足以在地表形成塌陷现象, 这与模型箱侧壁 (图 15) 观察结果相吻合。

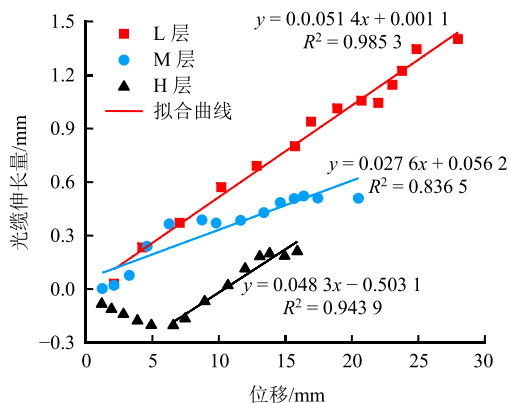


图 17 光缆应变积分值与位移对比图

Fig.17 Comparison of strain integral value and displacement

在监测过程中,可能由于光纤(缆)锚固点的滑移、脱落等原因导致光纤应变测值与土体的真实应变具有一定的差异。在未来的研究中,如何将土体变形量化还需更多的模型试验研究,而试验中光缆与土体界面的耦合问题依然是当前的研究难点。本试验中,圆片锚板的设置效果决定了地面塌陷变形过程中光纤监测数据的质量,因此仍需对锚板直径、间距、材料和安装方式等进行更深入、更系统的研究,最终确定相关的技术指南或规范。

6 结 论

本文通过在不同层位布设水平和竖向光缆对地面塌陷变形进行了监测,同时对塌陷过程中光纤监测结果和 PIV 分析结果开展了研究,得到了以下结论:

(1) 分布式光纤传感技术有效监测了塌陷过程中土体的应变分布,光缆测值不仅可以预测最大沉降位置,而且能够准确地监测位于最大沉降位置两端土体的沉降和应变,并能对塌陷位移影响区进行有效的识别。

(2) 水平向光缆的应变测试曲线呈“马鞍”型,存在 2 个峰值,分别对应地面塌陷左、右剪切滑动面所在位置;竖向光缆测试应变曲线随塌陷的发展呈“台阶”状变化,揭示了塌陷周围土体的应力状态,同时反映了土体变形的大小与范围,可确定塌陷发育的位置,也体现了塌陷是从下部向上层发展的过程。

(3) 光纤监测结果与 PIV、位移计测试结果具有良好的对应关系,验证了光纤读数的准确性,说明埋入式光缆可以有效监测内部变形,能够揭示地面塌陷的变形演化规律,但要注意光缆的锚固方式、

布设位置与量程。

需要指出的是,本文相关结论是基于室内小尺寸模型试验得到的,存在一定的局限性。为了实现地面塌陷更高精度的监测效果,下一步将开展原位监测试验,更加深入地研究不同的锚固类型下光缆与土体的耦合性差异,以期建立理论上科学、合理的光缆应变-塌陷位移的转换模型。

参 考 文 献

- [1] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 303-309.
ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Suppl.1): 303-309.
- [2] 蒋小珍, 雷明堂, 陈渊, 等. 岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 75-79.
JIANG Xiao-zhen, LEI Ming-tang, CHEN Yuan, et al. An experiment study of monitoring sinkhole collapse by using BOTDR optical fiber sensing technique[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2006, 33(6): 75-79.
- [3] XIAO X, GUTIERREZ F, GUERRERO J. The impact of groundwater drawdown and vacuum pressure on sinkhole development: physical laboratory models[J]. **Engineering Geology**, 2020, 279(12): 105894.
- [4] 蒙彦, 管振德. 应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键问题探讨[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 187-192.
MENG Yan, GUAN Zhen-de. A discussion on the key technical problem in monitoring and predicting sinkhole with optical fiber sensing BOTDR technique[J]. **Carsologica Sinica**, 2011, 30(2): 187-192.
- [5] RUI R, VAN TOL A F, XIA Y Y, et al. Investigation of soil-arching development in dense sand by 2D model tests[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2016, 39(3): 415-430.
- [6] CHEN H J, HE J P, XUE Y, et al. Experimental study on sinkhole collapse monitoring based on distributed Brillouin optical fiber sensor[J]. **Optik**, 2020, 216: 1-10.
- [7] 胡静云, 李庶林, 林峰, 等. 特大采空区上覆岩层地压与地表塌陷灾害监测研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1117-1122.
HU Jing-yun, LI Shu-lin, LIN Feng, et al. Research on disaster monitoring of overburden ground pressure and

- surface subsidence in extra-large mined-out area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 1117-1122.
- [8] LINKER R, KLAR A. Detection of sinkhole formation by strain profile measurements using BOTDR: simulation study[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2017, 143(3): B4015002.
- [9] 卢毅, 施斌, 于军, 等. 地面变形分布式光纤监测模型试验研究[J]. **工程地质学报**, 2015, 23(5): 896-901.
LU Yi, SHI Bin, YU Jun, et al. Model test on distributed optical fiber monitoring of land subsidence and ground fissures[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2015, 23(5): 896-901.
- [10] BOOTH A M, LAMB M P, AVOUAC J P, et al. Landslide velocity, thickness, and rheology from remote sensing: La Clapière landslide, France[J]. **Geophysical Research Letters**, 2013, 40: 4299-4304.
- [11] BALDI P, CENNI N, FABRIS M, et al. Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data[J]. **Geomorphology**, 2008, 102(3-4): 435-444.
- [12] HE Y, CHEN Y D, WANG W H, et al. TS-InSAR analysis for monitoring ground deformation in Lanzhou new district, the Loess Plateau of China, from 2017 to 2019[J]. **Advances in Space Research**, 2021, 67(4): 1267-1283.
- [13] 张严, 朱武, 赵超英, 等. 佛山地铁塌陷 InSAR 时序监测及机理分析[J]. **工程地质学报**, 2021, 29(4): 1167-1177.
ZHANG Yan, ZHU Wu, ZHAO Chao-ying, et al. Monitoring and inversion of Foshan metro collapse with multi-temporal InSAR and field investigation[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2021, 29(4): 1167-1177.
- [14] 王启耀, 彭建兵, 蒋臻蔚, 等. 西安典型段地面沉降分层标观测及数值模拟[J]. **岩土力学**, 2014, 35(11): 3298-3302.
WANG Qi-yao, PENG Jian-bing, JIANG Zhen-wei, et al. Numerical simulation and layerwise mark monitoring of land subsidence and ground fissures of typical section in Xi'an[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3298-3302.
- [15] STARK T D, CHOI H. Slope inclinometers for landslides[J]. **Landslides**, 2008, 5(3): 339-350.
- [16] COROMINAS J, MOYA J, LLORET A, et al. Measurement of landslide displacements using a wire extensometer[J]. **Engineering Geology**, 2000, 55: 149-166.
- [17] 施斌, 张丹, 朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 5-11.
SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Hong-hu. Distributed fiber optic sensing for geoenvironmental monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2019: 5-11.
- [18] SCHENATO L, PALMIERI L, CAMPORESE M, et al. Distributed optical fiber sensing for early detection of shallow landslides triggering[J]. **Scientific Reports**, 2017, 7(1): 14686.
- [19] ZHANG C C, ZHU H H, LIU S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements[J]. **Engineering Geology**, 2018, 234: 83-96.
- [20] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 地面沉降分布式光纤监测土-缆耦合性分析[J]. **岩土工程学报**, 2019, 41(9): 1670-1678.
ZHANG Cheng-cheng, SHI Bin, ZHU Hong-hu, et al. Theoretical analysis of mechanical coupling between soil and fiber optic strain sensing cable for distributed monitoring of ground settlement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(9): 1670-1678.
- [21] 柴敬, 欧阳一博, 张丁丁, 等. 采场覆岩变形分布式光纤监测岩体-光纤耦合性分析[J]. **采矿与岩层控制工程学报**, 2020, 2(3): 73-82.
CHAI Jing, OUYANG Yi-bo, ZHANG Ding-ding, et al. Theoretical analysis of the mechanical coupling between rock and optical fiber for distributed sensing of overlying strata deformation[J]. **Journal of Mining and Strata Control Engineering**, 2020, 2(3): 73-82.
- [22] SUO W B, LU Y, SHI B, et al. Development and application of a fixed-point fiber-optic sensing cable for ground fissure monitoring[J]. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, 2016, 6(4): 715-724.
- [23] 张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 分布式光纤探测地裂缝的理论基础探讨[J]. **工程地质学报**, 2019, 27(6): 1473-1482.
ZHANG Cheng-cheng, SHI Bin, ZHU Hong-hu, et al. A theoretical framework for detecting and monitoring ground fissures using distributed fiber optic sensing[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2019, 27(6): 1473-1482.
- [24] 侯公羽, 胡涛, 李子祥, 等. 基于分布式光纤技术的采动影响下覆岩变形演化规律试验研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(3): 970-979.
HOU Gong-yu, HU Tao, LI Zi-xiang, et al. Experimental study on overburden deformation evolution under mining effect based on distributed optical fiber technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 970-979.

- [25] 程刚, 施斌, 张平松, 等. 采动覆岩变形分布式光纤物理模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 926-934.
- CHENG Gang, SHI Bin, ZHANG Ping-song, et al. Physical model test study on deformation of overlying strata during coal mining with distributed fiber optic deformation monitoring[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2017, 25(4): 926-934.
- [26] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(7): 619-632.
- [27] 崔蓬勃, 朱永全, 刘勇, 等. 非饱和砂土隧道土拱效应模型试验及颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3451-3466.
- CUI Peng-bo, ZHU Yong-quan, LIU Yong, et al. Model test of soil arching effect in unsaturated sand tunnel and particle flow numerical simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(12): 3451-3466.
- [28] BURKE T, ELSHAFIE M. Arching in granular soils: experimental observations of deformation mechanisms[J]. **Géotechnique**, 2021, 71: 866-878.
- [29] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1125-1131.
- WANG De-yang, ZHU Hong-hu, WU Hai-ying, et al. Experimental study on buried pipeline instrumented with fiber optic sensors under ground collapse[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(6): 1125-1131.
- [30] ZHU H H, SHE J K, ZHANG C C, et al. Experimental study on pullout performance of sensing optical fibers in compacted sand[J]. **Measurement**, 2015, 73: 284-294.
- [31] ZHANG C C, ZHU H H, LIU S P, et al. Quantifying progressive failure of micro-anchored fiber optic cable-sand interface via high-resolution distributed strain sensing[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2020, 57: 871-881.
- [32] ZHANG C C, SHI B, ZHANG S, et al. Microanchored borehole fiber optics allows strain profiling of the shallow subsurface[J]. **Scientific Reports**, 2021, 11: 9173.
- [33] WU H, ZHU H H, ZHANG C C, et al. Strain integration-based soil shear displacement measurement using high-resolution strain sensing technology[J]. **Measurement**, 2020, 166: 108210.
- [34] DING Z Y, YANG D, DU Y, et al. Distributed strain and temperature discrimination using two types of fiber in OFDR[J]. **IEEE Photonics Journal**, 2016, 8(5): 1-8.
- [35] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [36] OU C Y, TENG F C, LI C W. A simplified estimation of excavation-induced ground movements for adjacent building damage potential assessment[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 106(5): 103561.
- [37] 那晓云, 于军, 王宝军. 地基附加应力分布对城市路面塌陷的影响[J]. 公路, 2019, 64(2): 8-12.
- NA Xiao-yun, YU Jun, WANG Bao-jun. Effects of additional stress of foundation on urban road collapse[J]. **Highway**, 2019, 64(2): 8-12.
- [38] 王滨, 贺可强. 岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 458-462.
- WANG Bin, HE Ke-qiang. Study on limit equilibrium height expression of critical soil cave of karst collapse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 458-462.
- [39] BERGADO D T, CHAI J C, MIURA N. Prediction of pullout resistance and pullout force displacement relationship for inextensible grid reinforcements[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36: 11-22.
- [40] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(6): 461-466.