

DOI: 10.11779/CJGE202006017

地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究

王德洋¹, 朱鸿鹄^{*1, 2}, 吴海颖¹, 朱宝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: 目前, 由于地层塌陷引起的埋地管道突发性事故时有发生, 然而国内外关于这方面的研究相对滞后, 尚无相关理论预测地面沉降过程中管道及周边土体的受力变形规律。通过基于光纤布拉格光栅(FBG)的模型试验, 研究了地层塌陷时管道的受力特征及土层的沉降分布规律, 并推导提出了由光纤应变测值计算管道弯矩的方法。试验结果表明: ①随着塌陷体积的增加, 埋地管道呈现出顶底逐渐受压和侧边受拉的应变状态; ②根据埋设在土体中的FBG应变读数可以将土体变形发展分为应力重分布阶段、土体蠕变压缩阶段和塌陷后的稳定阶段3个阶段; ③地面沉降符合修正高斯分布曲线, 在此基础上建立了光纤水平向应变与地面沉降变形之间的数学模型, 并对比分析了理论计算值与试验值, 发现二者具有良好的一致性。该研究为埋地管道安全性评估和灾变预警提供了一种新的思路和方法。

关键词: 光纤布拉格光栅(FBG); 埋地管道; 光纤传感技术; 地层塌陷; 地面沉降

中图分类号: TU42 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)06-1125-07

作者简介: 王德洋(1991—), 男, 安徽六安人, 硕士, 主要从事埋地管道光纤监测的应用研究。E-mail: wangdeyang@mail.nju.edu.cn。

Experimental study on buried pipeline instrumented with fiber optic sensors under ground collapse

WANG De-yang¹, ZHU Hong-hu^{1,2}, WU Hai-ying¹, ZHU Bao¹, SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Nanjing University High-Tech Institute at Suzhou, Suzhou 215123, China)

Abstract: In recent years, the pipeline accidents caused by ground collapse are frequently reported. However, the relevant studies are still lagging behind, and there are few theories to predict the deformation and mechanical characteristics of buried pipelines and surrounding soils in the process of ground settlement and collapse. In this study, the stress state of the pipeline and soil settlements during ground collapse are investigated through fiber Bragg grating (FBG)-based model tests, and the method for calculating the bending moment of the pipeline using fiber-optic strain measurements is derived. The test results show that: (1) The compressive strains accumulate on the pipeline top and bottom with the increase of collapse volume, and both the pipeline sidewalls are in the strain state of tension. (2) According to the FBG strain monitoring results, the development of soil deformation can be divided into three stages, i.e., the stress redistribution stage, the creep compression stage and the stability stage after collapse. (3) The ground settlement pattern fits well with the modified Gaussian distribution. On this basis, the mathematical model between the horizontal strain measured by the fiber optic sensors and the ground settlement is established. At the same time, the results of theoretical calculation and experimental data are compared, and they appear to agree well with each other. This work provides a new approach to effectively evaluate the safety and implement hazard warning of buried pipelines.

Key words: fiber Bragg grating; buried pipeline; fiber optic sensing; stratum collapse; ground settlement

0 引言

埋地管道作为水、原油和天然气等的主要运输方式, 一旦发生破损、失效, 将导致沿线地区出现火灾、环境污染或工程事故。大量研究表明, 地层沉降、塌陷是导致埋地管道破坏的重要原因之一^[1]。据统计, 中国每年出现的与地层塌陷相关的地下管道事故频率

超过5.6次/d, 直接和间接经济损失分别高达约50亿元和400亿元^[2]。因此, 有必要深入研究地层塌陷作

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1505104); 国家自然科学基金项目(41722209, 41672277); 苏州市科技计划项目(SYG201612)

收稿日期: 2019-06-25

*通信作者(E-mail: zhh@nju.edu.cn)

用下埋地管道的力学特性及地层变形规律。

关于地层塌陷对埋地管道的影响,国内外学者已开展了一系列研究。张土乔等^[3]基于 Winkler 弹性地基梁理论,对地基差异沉降下的管道纵向力学特性进行了理论分析,提出管道变形、剪力和弯矩的计算方法。巨玉文等^[4]通过模型试验和数值模拟,探究了埋地管道在地面塌陷作用下的变形特征,提出了预防地面塌陷造成管道事故的工程建议。周敏等^[5]利用室内大型模型试验,重点研究了地层沉陷引起的 HDPE 管道受力及上覆土层的沉降特征。Wang 等^[6]针对隧道施工引起的地层沉降,研究了 HDPE 管道的变形破坏特征,其研究结果可为管道的变形控制及设计工作提供理论指导。以上这些工作为埋地管道力学性质的研究起到了有益的推动作用。然而纵观目前管-土相互作用的室内和现场试验研究,多采用电阻应变片、沉降标、多点位移计等常规传感器。这类监测技术在使用中普遍存在着精度低、误差大、数据采集效率低等问题,同时还有一定的监测盲区。现场所获取的离散型监测数据,无法全面反映管段位移、土体抗力及其随时间发展的趋势,也很难从整体上捕捉埋地管道在复杂工程地质环境下长期累积的损伤信息。因此,这大大制约了埋地管道安全性的准确预测和评估。

2000 年来,岩土工程光纤感测技术得到了飞速的发展,其中准分布式光纤布拉格光栅(FBG)技术和全分布式布里渊光时域分析(BOTDA)技术在工程中应用较多。光纤传感器具有高精度、全实时、耐腐蚀及抗电磁干扰等优势,在众多的工程领域中得到了好评^[7-10],一些学者近年来开始尝试将之应用于解决埋地管道的监测难题^[11]。Simpson 等^[12]在室内模型试验中,将光纤沿环向和径向布设在管道上,以监测管道整体和管周土体的应变、位移等时空分布信息。Cauchi 等^[13]用光纤感测技术探测了埋地管道在地震作用下的动态响应。在国内,关于管道光纤监测技术的研究还处于萌芽阶段,这些研究中宏观描述的多,定量研究的少,尤其对管道实测数据的深入挖掘更是鲜见。

本文开展了室内模型试验,通过水囊排水法模拟地层塌陷的形成,基于光纤感测技术获取塌陷过程中管道应变及地面沉降的变化规律。在此基础上,提出了基于光纤应变测值的管道弯矩计算方法,并建立了地面沉降和光纤测值之间的数学模型,为埋地管道监测预警提供了一种新的思路和方法。

1 试验设计

1.1 试验材料

本次模型试验中的土样取自南京市栖霞区仙林大

学城某工地,其不均匀系数 $C_u=1.61$,曲率系数 $C_c=1.06$ 。根据土的工程分类标准(GB/T 50145—2007),试验用土为级配不良的细砂,干密度=1.6 g/cm³,含水率=4.0%,最大孔隙比 $e_{max}=0.878$,最小孔隙比 $e_{min}=0.579$,填筑密度=1.46 g/cm³。

试验研究中采用的模型箱由亚克力、铝合金板制成,其外部尺寸为 500 mm×250 mm×500 mm。埋地管道为 PVC 材料,其外径为 100 mm,壁厚为 2.5 mm,弹性模量为 1.25 GPa。在试验中,采用 FBG 应变传感器监测管道的受力变形以及管周土体的沉降变形。如图 1 所示,在管道外壁的 A, B, C, D 4 点处布设 4 个串联的 FBG 应变传感器,在管道正上方和正下方、距离管表面 5 cm 处的土体中各埋设了一串 FBG 应变传感器(标记为 H1, H2),每串上有 5 个光栅。这些传感器均由苏州南智传感科技有限公司提供,其栅长为 15 mm,直径为 250 μm。

本试验利用水囊排水法精确控制管道下部土体的塌陷体积。在模型填筑前,紧贴模型箱底板放置一个水囊,水囊充水体积为 1800 mL,充水后高度约 3 cm。然后分层填筑砂土、埋设管道,静置 2 h 后开始试验。

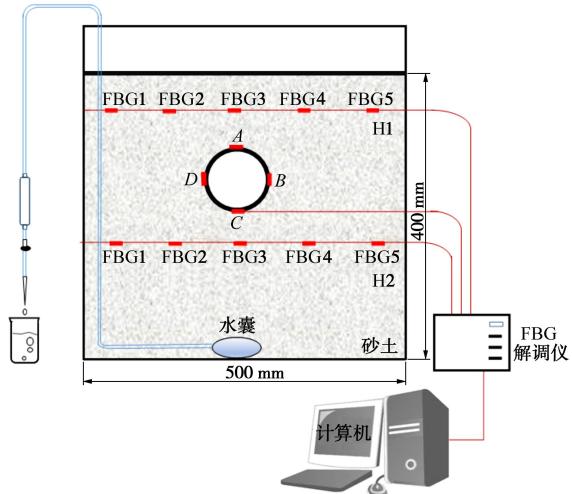


图 1 管道模型试验装置示意图

Fig. 1 Setup of model tests on pipeline

1.2 试验方案

在整个试验过程中,水囊排水的速度控制为约 40 mL/min。采用 A01C 型光纤光栅解调仪自动采集 FBG 波长读数,其波长分辨率为 1 pm,重复性为±3 pm。同时,将数码相机置于模型箱正前方连续拍摄照片,采用粒子图像测速(PIV)技术获取管道周边土体的变形。图 2 为利用英国剑桥大学开发的 Geo-PIV 软件分析得到的管周土体变形过程,据此可以得到地表沉降分布曲线。

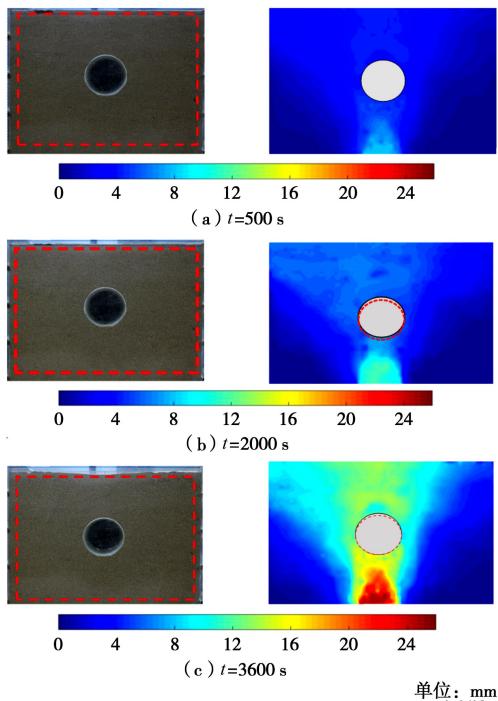


图 2 Geo-PIV 计算得到的土体位移场云图

Fig. 2 Contours of soil displacements calculated by Geo-PIV

2 结果分析及讨论

2.1 土体变形监测结果

以下首先分析管道下方土体中的 FBG 光纤串 H2 的读数。从应变监测数据可以看出, 土体变形发展经历了, 即应力重分布阶段(阶段 I)、土体蠕变压缩阶段(阶段 II)和塌陷后的稳定阶段(阶段 III)3 个阶段, 如图 3 所示。图中拉应变为正, 压应变为负。

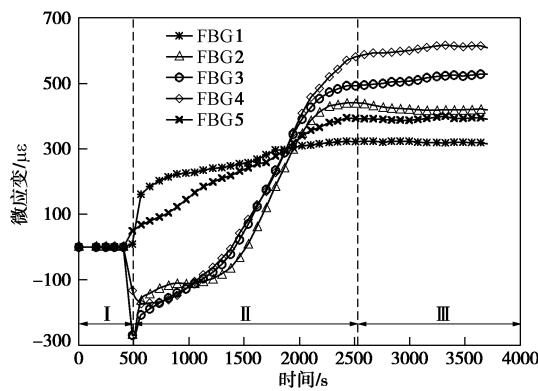


图 3 H2 位置处的 FBG 传感器应变测值

Fig. 3 Strains measured by FBG sensors at H2 location

(1) 当时间 $t=0\sim500$ s, 随着水囊排水量的增加, 水囊对上覆土体的托力减小, 土体在卸荷作用下有逐渐向下移动的趋势。然而, 布设在 H2 位置处的 FBG 传感器读数非常小。这是由于具有一定含水率的砂土颗粒之间存在一定的黏聚力, 土体在局部变形时形成

了稳定的隐伏土洞。由于土拱效应, 变形尚未传递到管道周边, 使得该阶段中管道下方土体中埋设的 FBG 传感器没有明显的反应。

(2) 当时间 $t=500\sim2000$ s, 随着塌陷范围进一步增加, 管道下方的土体发生了明显的陷落, 地面沉降加剧。在张拉应力作用下, 表层土体出现了细微开裂的现象。分析此阶段 FBG 传感器的应变读数, 可以发现, 管道下方的 5 个 FBG 传感器测值在这一阶段均有明显的变化。FBG1 和 FBG5 是对称分布在靠近模型箱侧壁的两个传感器, 其读数反映该处土体在此阶段一直处于受拉状态。理论上来说, 传感器 FBG1 和 FBG5 的读数应该完全一致。因铺设工艺、试验条件等限制, 两个传感器的应变分布并不是完全对称, 这在塌陷引起的土体蠕动压密情况下更加明显。随着水囊的不断排水, 土体进一步垮塌, 布设在水囊正上方的传感器 FBG2、FBG3 和 FBG4 由受压转变为受拉状态。这一现象表明, 刚开始由于管道的存在, 使得管侧的土体向水囊方向滑移造成了光纤局部受压; 但是随着水囊排水体积的进一步增加, 土中应力发生调整, 出现了较为明显的竖向位移, 这使得 FBG 传感器测到了很大的拉应变。值得注意的是, 从阶段 I 过渡到阶段 II 时, FBG 应变读数有突变现象。这一监测结果表明, 光纤传感器可以实时地捕捉到由于地下塌陷而造成的突发性地面沉降。

(3) $t=2000\sim3600$ s 的阶段可称为塌陷后的稳定阶段。在此阶段内 FBG 传感器的监测值趋于稳定, 且 FBG 拉应变值的大小为 $\text{FBG4} > \text{FBG3} > \text{FBG2} > \text{FBG5} > \text{FBG1}$ 。理论上应该为 FBG3 值最大, 但是由于塌陷情况下周边土体应变场的复杂性, 应变峰值区域与中心位置处有一定偏差。

图 4 为埋设于管道上方 5 cm 处的 FBG 串 H1 的应变读数, 对其分析可得到以下认识:

(1) 由于水囊排水造成的地下塌陷引起土层的应力重分布, 从而造成了管道及周边土体应变的变化。根据管道上方埋设的 FBG 测值, 同样可以划分为 3 个阶段, 并且和 H2 光纤的结果具有良好的一致性。需要指出的是, 管道上方的应变读数在阶段 I 基本为零。其原因如下: 管道下方土体塌陷引起的地面沉降使管道周边的土压力重新分布, 同时也增加了管道的抵抗变形能力, 即形成了“管-土相互作用系统”。在这一过程中, 管道上方填土的部分重量被转移至管侧土体中, 使得管道上方土体应变基本不变。

(2) 与之前的分析结果一样, 管道上方的 FBG 传感器读数在 $t=500$ s 时发生了突变现象, 预示着进入了阶段 II。这种突变效应表明, 地下塌陷造成上部土

体变形破坏是一个应变逐渐累积的过程。随着下方土体的持续垮塌，使得上覆土层的原有应力场在很短时间内失去平衡，在地表出现突然的塌陷。

(3) 经过对同一土层内的 FBG 监测结果对比分析后发现，管体正上方的 FBG3 传感器受到很大的压应变，而靠近模型箱边界处的传感器 FBG1、FBG5 测值变化幅度最小。这是由于土体沉降变形的局部化造成的。在模型试验中观测到，地表中心点处的沉降量最大，靠近两侧逐渐减小。

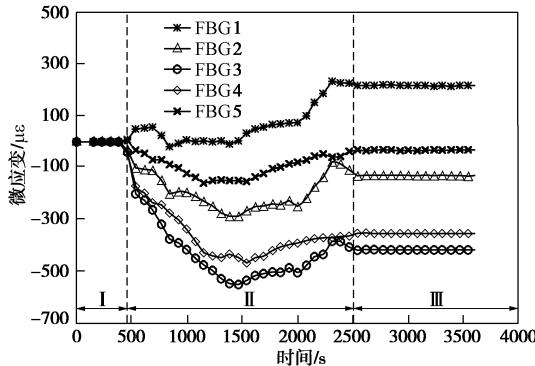


图 4 H1 位置处的 FBG 传感器应变测值

Fig. 4 Strains measured by FBG sensors at H1 location

2.2 管道受力监测结果

图 5 是整个地层塌陷过程中埋地管道外壁的应变监测结果。试验结果表明，管体受力有如下的规律：

(1) 随着水囊排水体积的增大，管道侧壁上的 FBG 应变测值刚开始接近于零，即处在阶段 I；到 $t=0\sim500$ s 时突增，进入阶段 II，之后应变绝对值总体上呈现逐渐增大的趋势。在完全塌陷后的稳定阶段，管体应变绝对值略有减小。这说明，地下塌陷引起的应力扩散造成管道和周边土体的受力变形特征具有一致性。

(2) 在试验过程中，管道外壁顶、底侧基本处于受拉状态，而在左、右两侧处于受压状态。这说明在地层塌陷作用下，管道上方土体的部分重量被转移到管侧土体，使得管道环向发生较大的应力调整。从图 5 中可以看到，管底的应变明显大于管顶，其最大值超过 $200 \mu\epsilon$ 。这主要是由于管道下方土体的塌陷形成脱空，使得管底土压力大幅下降，这种作用使得管底出现明显增大的拉应变。

从以上分析可以看出，FBG 传感器非常灵敏地感测到了管道及周边土体在地层塌陷条件下的变形特征。试验结果显示，不管是土中埋设的 FBG 还是管道上黏贴的 FBG，其读数变化均可以划分为 3 个阶段。这为进一步认识由于岩溶等原因造成地下塌陷，从而引发管道破裂事故的内在机理，提供了一种新的视角。

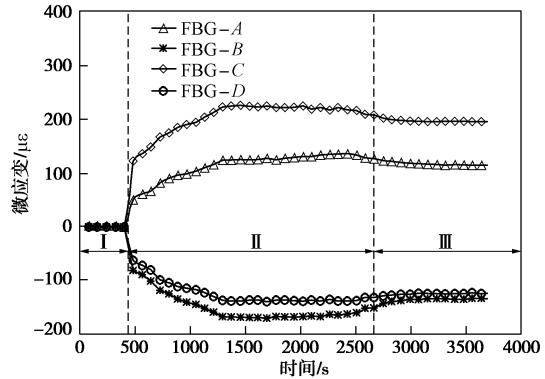


图 5 管道上 FBG 的应变测值曲线

Fig. 5 Strains measured by FBG sensors on pipeline

2.3 管 - 土相互作用计算模型

为了实现管道事故的预警预报，需要根据光纤监测数据推算管道的实时受力状态。模型试验中的实测数据显示，管道在地层塌陷引起的应力重分布作用下发生明显的变形，总体呈“椭圆形”，如图 6 所示。

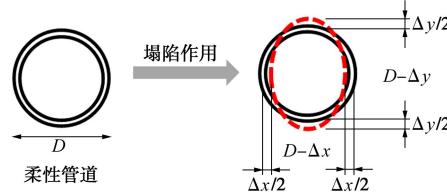


图 6 地层塌陷前后埋地管道形状对比图

Fig. 6 Comparison of buried pipeline shapes before and after ground collapse

如前所述，模型试验结果显示，塌陷过程中管底测得的应变最大，为此取该处的最大应变值作为问题的切入点，同时假定管周的应力为对称分布。如图 7 所示，对于柔性环状结构物，在自重应力和附加应力的作用下，其径向应力可分为均匀分布的径向应力和椭圆形分布的径向应力两部分；在分析地层塌陷造成的附加应力时，可以忽略前者，即令 $\Delta x=\Delta y=\Delta$ ^[14]。

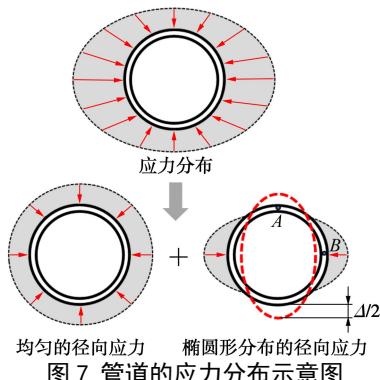


图 7 管道的应力分布示意图

Fig. 7 Diagram of stress distribution of a buried pipeline

考虑在椭圆形分布的径向应力作用下，管道发生了弹性变形，并处于纯剪状态。根据几何关系可求得管道外壁 A、B 点的应变。管道变形可以用以下椭圆方程描述：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad , \quad (1)$$

式中, a , b 为变形后椭圆的中性轴截距,

$$a = r_m + \Delta/2 \quad , \quad (2)$$

$$b = r_m - \Delta/2 \quad , \quad (3)$$

其中, r_m 为管道内半径和外半径的平均值。

根据几何关系, 可得到 A , B 两点的曲率变化量

$$dk_A = \frac{b}{a^2} - \frac{1}{r_m} = -\frac{\Delta(6r_m + \Delta)}{r_m(2r_m + \Delta)^2} \quad , \quad (4)$$

$$dk_B = \frac{a}{b^2} - \frac{1}{r_m} = \frac{\Delta(6r_m - \Delta)}{r_m(2r_m - \Delta)^2} \quad . \quad (5)$$

进一步可得 A , B 两点应变量为

$$\varepsilon_{A(B)} = t_w dk_{A(B)} / 2 \quad , \quad (6)$$

式中, t_w 为管道的壁厚。

由式 (6) 可知, A , B 两点处位移和应变之间满足:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_A &= -\frac{\Delta t_w (6r_m + \Delta)}{2r_m (2r_m + \Delta)^2} \\ \varepsilon_B &= \frac{\Delta t_w (6r_m - \Delta)}{2r_m (2r_m - \Delta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于发生椭圆形变形的结构物, 其各点的径向位移和最大位移、弯矩之间满足函数关系式:

$$y = -\frac{\Delta}{2} \cos(2\varphi) \quad , \quad (8)$$

$$\frac{d^2y}{d\varphi^2} + y = -\frac{R^2}{EI} M(\varphi) \quad . \quad (9)$$

将式 (7) 代入式 (8) 中得

$$M(\varphi) = \frac{3EI}{R} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \cos(2\varphi) \quad . \quad (10)$$

将应变和位移关系式 (7) 代入式 (10) 中得

$$M(\varphi) = \frac{3EI}{RD} \frac{-8\varepsilon_A r_m^2 - 6t_w r_m + \sqrt{64\varepsilon_A r_m^3 t_w + 36t_w^2 r_m^2}}{4r_m \varepsilon_A + 2t_w} \cos(2\varphi) \quad , \quad (11a)$$

$$M(\varphi) = \frac{3EI}{RD} \frac{8\varepsilon_A r_m^2 + 6t_w r_m - \sqrt{64\varepsilon_A r_m^3 t_w + 36t_w^2 r_m^2}}{4r_m \varepsilon_A + 2t_w} \cos(2\varphi) \quad . \quad (11b)$$

上式表明, 在假设管道发生椭圆形变形的条件下, 管道上任意点的弯矩可由 A 或 B 点的应变求出。

2.4 光纤应变和地面沉降特征曲线的关系模型构建

地层塌陷引起的地面沉降槽形状一般符合高斯正态分布。本文用 Klar 提出的修正高斯曲线公式对模型试验中测得的地表沉降进行拟合, 该表达式为^[15]

$$S(x) = \frac{n}{n - 1 + e^{a(\frac{x}{i})^2}} S_{\max} \quad . \quad (12)$$

式中 S_{\max} 为地表沉降的最大位移量; i 为沉降槽的宽度参数; n 为沉降曲线的曲率参数, $n = e^{\alpha} \frac{2\alpha - 1}{2\alpha + 1} + 1$, 其中 α 为修正系数。表 1 和图 8 为不同试验阶段的拟合结果。

表 1 修正高斯曲线公式的拟合参数及地表沉降最大值

Table 1 Fitting parameters of modified Gaussian curve and maximum ground surface settlements

试验阶段	n	i/mm	α	S_{\max}/mm	
				实测	拟合
I	1.3	131.1	0.70	6.0	5.6
II	2.3	160.5	1.20	10.2	10.1
III	2.4	172.0	1.22	17.5	16.2

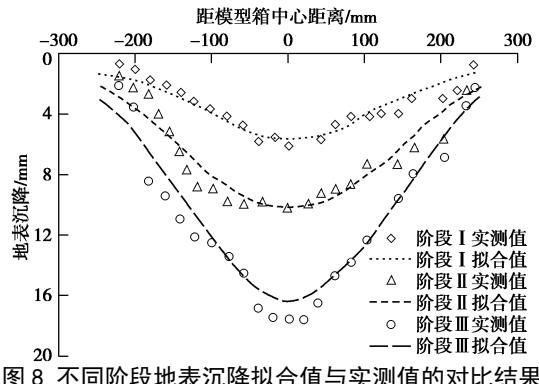


Fig. 8 Comparison of fitted and measured ground surface settlements in different stages

采用 Klar 法拟合得到的地表沉降曲线不仅在曲线分布规律上和实测结果接近, 而且沉降槽宽度系数及最大沉降量的发展规律也和试验相符合。从图 9 可以看出, 地表沉降最大值与塌陷体积呈很好的相关关系, 且线性拟合系数接近 1/1000。在利用水囊排水模拟地层塌陷的过程中, 修正高斯公式可以较好地描述地面沉降的特征。

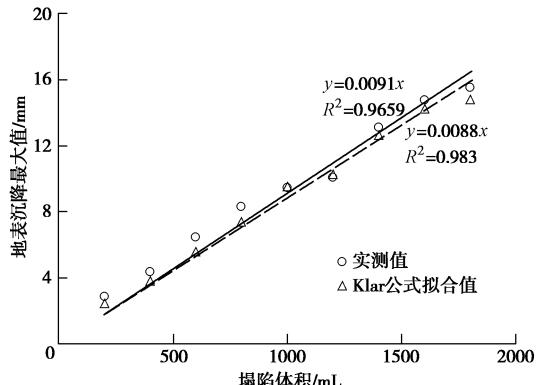


Fig. 9 Comparison of fitted and measured maximum ground surface settlements

为了计算简便, 式 (12) 中 α 取 1/2, 并将修正

高斯型地面沉降模型简化为下式的最简单形式:

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{i^2}} \quad . \quad (13)$$

当光纤被紧密地埋设在土体中时, 将随着土体的变形而被拉伸或压缩。如果变形协调性得以满足, 则光纤的变形特征和沉降曲线保持一致性。以下分析基于光纤和地表变形均满足高斯型模型这一基本条件。

如图 10 所示, 理论上土体中光纤虽然发生了弯曲变形, 但为了分析方便仍然认为其符合材料的连续均匀性假设, 内力在截面上的分布是连续的。因此, 进一步得到光纤中心点处的轴向应变为

$$\varepsilon = \frac{L - 2\Delta x}{2\Delta x} \quad , \quad (14)$$

式中, L 取为变形后的光纤单元长度, $2\Delta x$ 取为变形前的光纤单元长度。

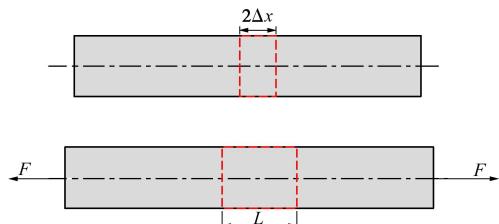


图 10 埋地光纤变形受力示意图

Fig. 10 Diagram of deformation and stress of buried optical fibers

转换式 (14) 得到:

$$L = 2\Delta x(\varepsilon + 1) \quad . \quad (15)$$

根据微积分知识:

$$L = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} \sqrt{1 + S(x)^2} dx \quad . \quad (16)$$

将式 (13) 代入式 (16) 得

$$L = 2 \int_0^{\Delta x} \sqrt{1 + 4x^2 e^{-\frac{x^2}{i^2}}} S_{\max} dx \quad . \quad (17)$$

当光纤和周边土体都发生小变形时, 为了便于计算参数 S_{\max} , 将单位长度内光纤的变形看作圆弧状。假设此时 A 和 B 两点处的曲率半径和 O 点处曲率半径相交于 O' , 如图 11, 根据勾股定理可得

$$|O'A|^2 - |OO'|^2 = OA^2 \quad , \quad (18)$$

即

$$R^2 - (R - S_{\max})^2 = (\Delta x)^2 \quad . \quad (19)$$

又根据几何关系可得

$$\Delta x = R \sin \frac{\Delta x(1 + \varepsilon)}{R} \quad . \quad (20)$$

通过式 (20) 可求得 R 值。

通过以上分析可以得到式 (17), (19) 两个方程, 对这个微分方程组进行求解, 便可得到高斯模型的未知数 i 和 S_{\max} , 从而确定沉降特征曲线。本文基于模型试验中的应变实测数据, 使用 MATLAB 软件计算得到了塌陷 3 个阶段的 i 和 S_{\max} 值, 如表 2 所示。

根据以上的分析可知, 由光纤应变计算出的地表沉降最大位移分别为 5.51, 9.45, 17.24 mm, 和实测值 6.0, 10.02, 17.50 mm 基本相符。这说明, 采用高斯模型可以很好地反映地表沉降的分布趋势。

表 2 由高斯模型计算的参数值

Table 2 Calculated parameters of Gaussian model

试验阶段	S_{\max}/mm	i/mm
I	5.51	25.6
II	9.45	26.7
III	17.24	30.4

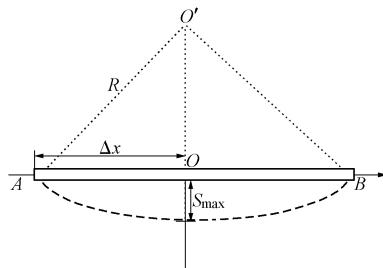


图 11 高斯模型沉降模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of settlement model for Gaussian model

3 结 论

本文基于 FBG 感测技术, 开展了埋地管道的模型试验, 研究了地层塌陷引起管道受力变形及地表沉降的分布特征, 通过对试验结果的分析得到如下 3 点结论。

(1) 将 FBG 感测技术应用于埋地管道监测和安全评估具有可行性。根据 FBG 监测结果, 可将整个试验过程分为应力重分布阶段、土体蠕变压缩阶段和塌陷后的稳定阶段。

(2) 基于椭圆变形假定, 给出了由光纤应变测值计算管道弯矩分布的方法, 为准确地预测和评估埋地管道的安全性提供了一种新的途径。

(3) 模型试验中, 地表沉降形态满足修正高斯模型, 在此基础上建立了光纤应变数据与沉降变形之间的数学关系, 由此得到了一种新的地表沉降计算方法。该方法为分析地层塌陷引起的管道变形和破坏问题提供了一种新的思路, 具有一定的工程实践意义。

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, 仍需在实际工程中进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 徐匆匆, 马向英, 何江龙, 等. 城市地下管线安全发展的现状、问题及解决办法[J]. 城市发展研究, 2013, 20(3): 108–118. (XU Cong-cong, MA Xiang-ying, HE Jiang-long, et al.

- Status, problems and solutions of urban underground pipeline safety and development[J]. *Urban Development Studies*, 2013, **20**(3): 108 – 118. (in Chinese))
- [2] 钱七虎, 陈晓强. 国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, **3**(2): 191 – 194. (QIAN Qi-hu, CHEN Xiao-qiang. Situation problems and countermeasures of utility tunnel development in China and abroad[J]. *Chinese Journal of Underground space and Engineering*, 2007, **3**(2): 191 – 194. (in Chinese))
- [3] 张士乔, 李 涣, 吴小刚. 地基差异沉降时管道的纵向力学性状分析[J]. *中国农村水利水电*, 2003(7): 46 – 48. (ZHANG Shi-qiao, LI Xun, WU Xiao-gang. Analysis of longitudinal mechanical properties for pipeline during foundation uneven settlement[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2003(7): 46 – 48. (in Chinese))
- [4] 巨玉文, 吴际渊, 贺武斌, 等. 地面塌陷对城市地埋管线影响的试验研究及数值分析[J]. *太原理工大学学报*, 2015, **46**(1): 64 – 68. (JU Yu-wen, WU Ji-yuan, HE Wu-bin, et al. Experimental study and numerical analysis on influence of urban underground pipelines under the ground collapse[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2015, **46**(1): 64 – 68. (in Chinese))
- [5] 周 敏, 杜延军, 王 非, 等. 地层沉陷中埋地 HDPE 管道力学状态及模型试验分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(2): 253 – 262. (ZHOU Ming, DU Yan-jun, WANG Fei, et al. Physical modeling of mechanical responses of HDPE pipes and subsurface settlement caused by land subsidence[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(2): 253 – 262. (in Chinese))
- [6] WANG F, DU Y J, YANG X M. Physical modeling on ground responses to tunneling in sand considering the existence of HDPE pipes[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, **38**(1): 85 – 97.
- [7] 朱鸿鹄, 施 斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(4): 821 – 828. (ZHU Hong-hu, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(4): 821 – 828. (in Chinese))
- [8] 丁 勇, 王 平, 何 宁, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(5): 719 – 724. (DING Yong, WANG Ping, HE Ning, et al. New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(5): 719 – 724. (in Chinese))
- [9] 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 Guang-qing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(4): 571 – 576. (in Chinese))
- [10] 丁 勇, 施 斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(3): 338 – 342. (DING Yong, SHI Bin, CUI He-liang, et al. A fiber optic sensing net applied in slope monitoring based on Brillouin scattering[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(3): 338 – 342. (in Chinese))
- [11] 吴海颖, 朱鸿鹄, 朱 宝, 等. 基于分布式光纤传感的地埋管道监测研究综述[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(6): 1057 – 1070. (WU Hai-ying, ZHU Hong-hu, ZHU Bao, et al. Review of underground pipeline monitoring research based on distributed fiber optic sensing[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53**(6): 1057 – 1070. (in Chinese))
- [12] SIMPSON B, HOULTN A, MOORE I D. Distributed sensing of circumferential strain using fiber optics during full-scale buried pipe experiments[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2015(6): 1 – 10.
- [13] CAUCHI S, CHERPILLOD T, MORISON D, et al. Fiber-optic sensors for monitoring pipe bending due to ground movement[J]. *Pipeline and Gas Journal*, 2007(1): 36 – 40.
- [14] MOHAMAD H, SOGA K, BENNETT P J, et al. Monitoring twin tunnel interaction using distributed optical fiber strain measurements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, **138**(8): 957 – 967.
- [15] 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.