2019 年 8 月，第 25 卷，第 4 期，481-486 页
August 2019，Vol. 25，No.4， pp. 481-486

高 校 地 质 学 报
Geological Journal of China Universities

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2018109
引用格式：卢毅，宋泽卓，于军，龚绪龙，季峻峰，陆婧，周钢军. 2019. 基于BOFDA的砂—黏土互层垂向变形物理模型试验研究，25（4）：481-486

基于BOFDA的砂—黏土互层垂向变形物理模型试验研究

卢 毅[1,2]，宋泽卓[3]，于 军[1]，龚绪龙[1]，季峻峰[2]，陆 婧[1]，周钢军[1]

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），南京 210049；
2. 南京大学 地球科学与工程学院，南京 210023；
3. 河海大学 地球科学与工程学院，南京 210098

摘要：地面沉降作为一种常见地质灾害对城市发展造成巨大威胁，有效监测土层的垂向变形过程是地面沉降防治的一项重要工作。文章采用布里渊光频域分析（BOFDA）技术，利用室内地面沉降模型，对砂—黏土互层土体在排灌水循环中的垂向变形进行分布式监测，并结合固结压缩试验对土体的垂向变形进行分析。结果表明：黏土层为地面沉降的主要变形层；在排灌水循环中，土体也会经历压缩—回弹的循环。此外，BOFDA分布式监测技术可以有效地捕捉砂—黏土互层土体在排灌水状态下的垂向变形情况，实现对地面沉降发育过程中土体垂向变形的实时监测。研究结果可为实现地面沉降的有效防治措施提供一定的参考依据。

关键词：地面沉降；分布式监测；BOFDA；物理模型；垂向变形
中图分类号：P642　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-7493（2019）04-481-06

Physical Model Test of Vertical Deformation of Sand-Clay Layers Based on the BOFDA

LU Yi[1,2]，SONG Zezhuo[3]，YU Jun[1]，GONG Xulong[1]，JI Junfeng[2]，LU Jing[1]，ZHOU Gangjun[1]

1. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resource, Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China；
2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China；
3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: Land subsidence as a common geological hazard poses a great threat to urban development. Effective monitoring of vertical deformation process of soil layers is an important task for land subsidence prevention and control. In this paper, Brillouin Optical Frequency Domain Analysis (BOFDA) technology is used to monitor the vertical deformation of sand-clay layers in draining-recharging cycles by using an indoor land subsidence model. Moreover, a compression test is used to analyze the vertical deformation of the soil. The results show that the clay layer is the main deformation layer. In the draining-recharging cycles, the soil also experiences compression-rebound cycles. In addition, BOFDA technology can effectively capture the vertical deformation of sand-clay layers in draining-recharging cycles and monitor in real-time the soil vertical deformation in the process of land subsidence development. The research results provide some reference for the effective prevention and control of land subsidence.

Key words: land subsidence; distributed monitoring; BOFDA; physical model; vertical deformation

First author: LU Yi, Senior Engineer; E-mail: lynju@163.com

收稿日期：2018-09-12；**修回日期：**2018-10-26
基金项目：国土资源部公益性行业专项（201511055）；江苏省自然科学基金青年基金项目（BK20151011）联合资助
作者简介：卢毅，男，1983年生，博士，高级工程师，主要从事地质灾害监测研究；E-mail: lynju@163.com

随着地球人口的不断增长和人类活动范围的不断矿大，全球范围内的环境持续恶化，近年来更是受“厄尔尼诺”的影响，导致各类地质灾害发生的频率增加。地面沉降作为一种最常见的地质灾害类型，分布范围广，持续时间长，影响范围大。随着经济的高速发展，地下水的大规模开采导致的地面沉降已成为大型城市面临的主要地质灾害。据不完全统计，20世纪90年代初，天津、上海、江苏、北京、浙江、河北等地面沉降面积约为$4.87\times10^4\ km^2$，到2003年约为$9.4\times10^4\ km^2$，截至2011年12月，中国已有50余个城市出现地面沉降，其中华北平原、长三角地区和汾渭盆地已成重灾区（殷跃平等，2005；崔振东和唐益群，2007；张阿根和杨天亮，2010）。目前全国地面沉降量累计超过20 cm的地区达到$7.9\times10^4\ km^2$，并且将进一步扩大。根据相关调查，长三角地区因地面沉降造成的经济损失约3000亿元（方正等，2003；于军等，2006，2013），其中上海地区最为严重，其经济损失高达2899亿元（张卫东，2003）。地面沉降已严重影响人们的生产和生活，制约城市的可持续发展。因此，地面沉降的长期监测成为地面沉降防治中必不可少的部分。

现有的地面沉降监测方法主要有InSAR技术、GPS技术、水准测量、基岩标和分层标等（葛大庆等，2014；Ng et al.，2010；朱叶飞等，2010；何庆成等，2006；Fadil et al.，2011；邓清海等，2007；秦洪奎和王平德，2012；谢觉民，1983）。现有的技术可以对地面沉降进行监测，但均存在一定的弊端。InSAR技术和GPS技术的监测成本高，监测精度受地面农作物等因素的影响较大。水准测量自动化程度低，无法满足数字化监测的需求。并且这三种监测方法主要是对地面整体变形的监测，无法实现对各个土层的变形的监测。基岩标与分层标仅能获得安装点的沉降变形情况，而无法获得钻孔内各个土层的土体变形情况。分布式光纤监测技术（DFOS）是一种以光纤为传感介质，以光为载体，感知和传输外界信号的新型分布式传感监测技术。与传统的监测技术相比，它具有与土体变形的协调性好，自动化程度高、观测精度高、数据量充足、监测效率高、施工简便和成本可控等优点。同时，该技术不会因恶劣环境和时间使得传感功能失效，因此可以满足地面沉降土体变形的监测要求。该技术已成为一些发达国家的研究热点，并取得一批重要成果。Kihara等（2002）采用BOTDR分布式光纤监测技术对河流堤坝的变形进行了监测，实现了溃坝的提前预警。Fujihashi等（2003）利用光纤监测技术研发了道路灾害监测系统。Mohamad等（2012）利用BOTDR对双隧道开挖过程进行了监测，并获得了隧道开挖过程中隧道环形圆周的应变分布轮廓。随着DFOS技术的发展，DFOS技术也逐渐在国内开始进行研究与应用。李明坤等（2014）采用BOFDA技术监测了水温度场的动态变化，验证了BOFDA技术测量地下水温度的可行性和优越性。

本文使用布里渊光频域分析（BOFDA）技术，利用室内地面沉降模型，对砂—土互层土体在排灌水循环中的垂向变形进行分布式监测，对其试验结果进行讨论，并结合固结压缩试验对土体的垂向变形进行分析，为地面沉降的机理研究和防治提供一定的参考依据

1 分布式光纤应变监测原理

本文采用的分布式光纤监测技术为布里渊光频域分析（BOFDA）技术，其基本原理如图1所示。如图所示，泵浦光和斯托克斯光在光纤中相向传播。其中，泵浦光的频率为f_m。两种光的频率差为Δf，且每一个Δf均有一组f_m与之对应。将f_m与初始的光信号进行对比可以获得基带传输函数$H(jw, \Delta f)$。基带传输函数可以通过快速傅里叶变换（IFFT）得到脉冲响应函数$h(t, \Delta f)$。

$$H(jw,\Delta f)\xrightarrow{\text{IFFT}}h(t,\Delta f)\xrightarrow{x=\frac{ct}{2n}}h(x,\Delta f) \quad (1)$$

其中，x为应变发生的位置；c为光速；n为光的折射率。x处发生的应变ε与布里渊背散射光的频率漂移Δf呈线性关系，线性关系如式（2）所示。

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

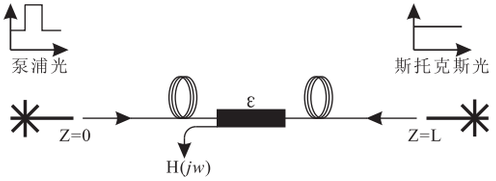


图1 BOFDA技术感测原理

Fig. 1 The principle of the BOFDA

其中，$\Delta f(\varepsilon)$是光纤在ε应变作用下的布里渊频率漂移，$\Delta f(0)$是自由状态下光纤的布里渊频率漂移，ε是光纤的实际应变。

与其他分布式光纤监测技术相比，BOFDA技术的优点在于其较高的精度和空间分辨率。BOFDA技术的精度为±2 με，远高于其他类型分布式光纤监测技术的±50 με（BOTDR）和±25 με（BOTDA）。

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

本文采用的黏土和砂土均取自南京市江宁区。黏土和砂土的粒径分布曲线如图2所示，两者的基本物理性质如表1和表2所示。

2.2　地面沉降模型

本文采用的地面沉降模型如图3所示。模型由有机玻璃制成，内径为0.2 m，高度为1 m。模型底部设有进出水孔，用于控制模型内水位的变化。除此之外，模型底部设置有一个反滤网，用于防止试验过程中土体随水流发生移动。

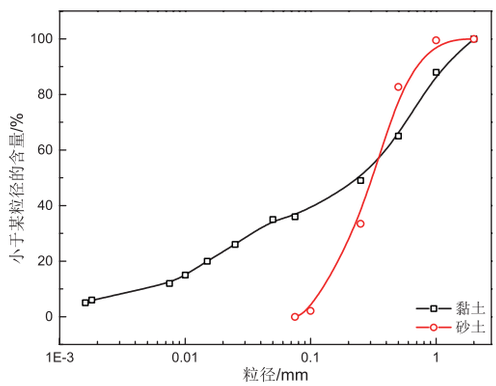


图2　土体的粒径分布曲线

Fig. 2　Particle size distribution curves of soil

表1　黏土的基本物理性质

Table 1　Physical and mechanical properties of clay

比重	最大干密度 /(g/cm³)	塑限/%	液限/%	塑性指数	最优含水率/%
2.71	1.75	20.5	37.1	16.6	16.5

表2　砂土的基本物理性质

Table 2　Physical and mechanical properties of sand

比重	最大干密度 /(g/cm³)	最小干密度 /(g/cm³)	渗透系数 /(cm/s)	内摩擦角/(°)
2.64	1.66	1.34	1.69×10^{-2}	30.12

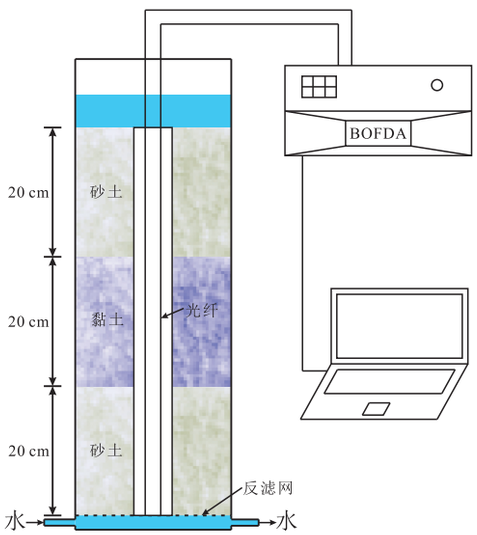


图3　地面沉降模拟试验装置

Fig. 3　Land subsidence simulation test device

2.3　试验过程

（1）光纤布设阶段。

为保证光纤良好的敏感度，需要施加一定的预应力，保证光纤在整个测试当中时刻处于一种紧绷状态。由于光纤直径较小，在土体含水率较高的状态下，容易发生滑移，从而影响试验的测量精度。为了提高光纤和土体之间的变形的耦合性，光纤上每隔 10 cm 垂直于光纤穿一个亚克力圆形稳定片从而提高光纤表面粗糙度。

（2）土体填充阶段。

如图3所示，根据模型的设计填充土体。在填土过程中，每5 cm的土均需进行击实。土体干密度控制为1.45 g/cm³，含水率控制为10%。填土完成之后，将模型静置48 h，使土体在自重应力作用下与光纤充分耦合。

（3）排水试验阶段。

在试验之前，需要对光纤检测仪器进行调试。完成调试后，将水从注水口缓慢的灌入模型中，直至水面高于土体表面10 cm为止。将模型静置24 h。在试验过程中，将水从排水口排出用以模拟地下水抽取，并利用分布式光纤对整个过程进行监测，直至应变稳定。

（4）灌水试验阶段。

在试验过程中，将水从注水口缓慢的灌入模型中，直至水面高于土体表面10 cm停止灌水。从灌水时刻开始进行应变监测，直至应变基本稳定。

3 试验结果与分析

在试验过程中，以初始时刻的应变为参照值，计算各时刻的相对应变。同时，压应变为负，表示土体发生压缩；拉应变为正，表示土体发生回弹。在试验结束后，对各个深度土层的应变进行积分，得到不同深度的土体相对变形量。试验结果如图4所示。

图4a为排水-1过程中土体的垂向应变曲线。由图可知，砂土层和黏土层在排水开始后的第一个小时均出现一定的压应变，但两者的压应变均较小且无明显差异。随着时间的推移，砂土层和黏土层中的压应变都在不断的增加。压应变的最大值出现在深度为37 cm处，大小约为850 με。随着时间的继续增加，土体的压应变趋于稳定，增长速率均发生减小。将砂土层和黏土层进行比较可以发现，黏土层的压应变远大于砂土层的压应变。这主要是应为砂土在整个监测过程中颗粒发生重新的排列，密度增大。同时，由于砂土的弹性模量较大，在相同的应力作用下，其变形的幅度较小。

图4e为排水-1过程中土体的累计变形曲线。由图可知，整个土体处于压缩变形中，最大变形量约为0.28 mm。计算各层的变形量可知，主要的变形出现在黏土层中，变形量占总变形量的57.1%。此外，上部砂土层的变形量约为下部砂土层的两倍。同时由图可知，压缩量的变化速率与压应变大小正相关，压缩量在砂土层的变化速率较小，在黏土层中变化速率较大。

图4b为灌水-1过程中土体的垂向应变曲线。由图可知，在灌水过程中土体出现拉应变，且拉应变随深度增加呈现先增加再减小的变化趋势。砂土层和黏土层在灌水开始后的第一个小时均出现一定的拉应变，但两者的拉应变均较小且无明显差异。随着时间的推移，砂土层和黏土层中的拉应变都在不断的增加。拉应变的最大值约为500 με，最大值出现在上部砂土层中，这主要是因为黏土层上部的土体在渗透力的作用下向上移动，在上部砂土层中与砂土颗粒形成稳定的结

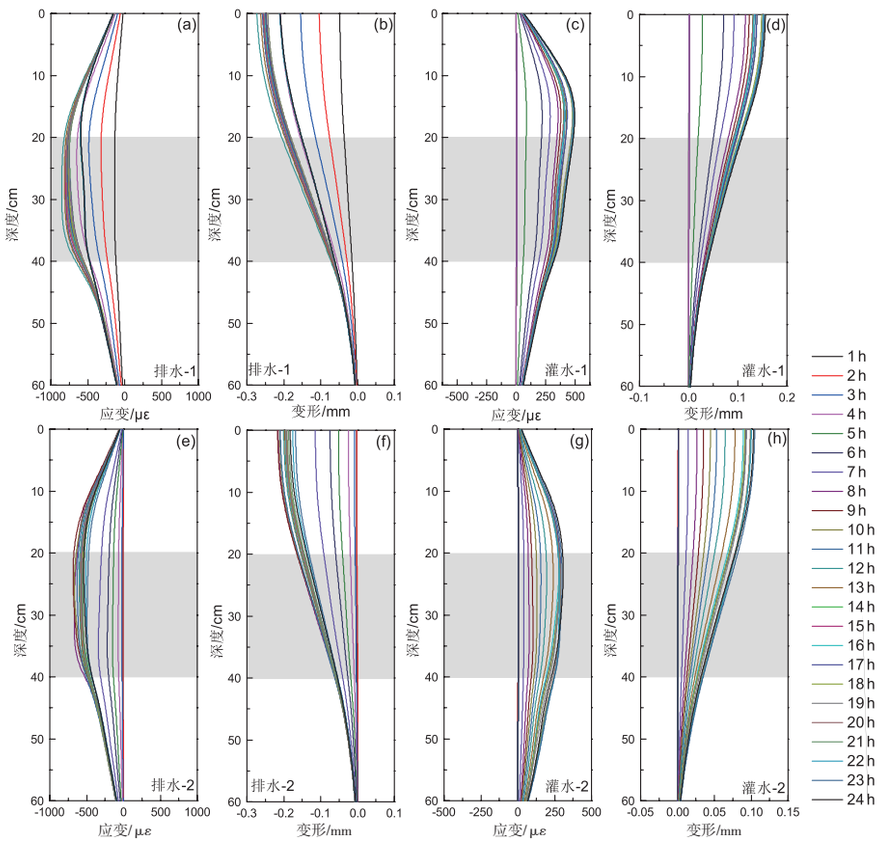


图4 排灌水过程中土体的应变和累计变形曲线

Fig. 4 Soil strain and deformation curves in the draining-recharging cycles

构，使上部砂土层与黏土层接触部位的拉应变显著增加。随着时间的继续增加，土体的拉应变趋于稳定，增长速率均发生减小。总体上看，黏土层中的拉应变远大于砂土层中的拉应变。

图4f为灌水-1过程中土体的累计变形曲线。由图可知，整个土体处于回弹变形中，最大变形量约为0.16 mm。计算各层的变形量可知，主要的变形出现在黏土层中，变形量约为0.104 mm。与排水-1过程中的变形量进行比较可以发现，土体的回弹变形量小于土体的压缩变形量，土体发生不可逆变形。同时由图可知，回弹量的变化速率与压应变大小相对应，回弹量在砂土层的变化速率较小，在黏土层中变化速率较大。

图4c和图4g分别为排水-2过程中土体的应变和累计变形曲线，图4d和图4h分别为灌水-2过程中土体的应变和累计变形曲线。对比图4a和图4c可知，在两次排水过程中，土体均出现明显的压应变。但在排水-2过程中，土体的最大压应变为700 με，小于排水-1过程中的800 με。对比图4e和图4g可知，在排水-2过程中的累计压缩变形为0.18 mm，小于排水-1过程中的0.28 mm。对比图4b和4d可知，在两次灌水过程中，土体均出现明显的拉应变。在灌水-2过程中，土体的回弹量为0.1 mm，略小于灌水-1过程中的0.16 mm。在经过第一次排灌水循环后，黏土颗粒的排列发生较大的改变，且这种重新排列造成的黏土结构变化是不可逆的，进而使得黏土的压缩性降低。

图5为整个试验过程中土体的累计变形和总应变与时间的关系曲线。由图可知，这实验过程中土体发生了两个压缩—回弹的循环。在每个循环中，土体的最终回弹量均小于压缩量，这表明土体在灌排水循环中发生了一定程度的不可逆变形。除此之外，随着循环次数的增加，土体的变形量逐渐减小，土体趋向于弹性变形。

4　垂向变形分析

地面沉降的本质是土体压缩与回弹，为了进一步研究地面沉降的变形发育过程，对试验用的黏土和砂土在不同的荷载下进行压缩固结试验。将试样装入压缩固结仪后，进行饱和。饱和完成后，逐级施加荷载，试样发生压缩变形。待变形基本稳定后施加下一级荷载。试验中，最大荷载分别为800 kPa、1600 kPa和3200 kPa。在最大荷载作用一段时间后开始逐级卸载，最大荷载作用时间分别为1 d、10 d和30 d。开始卸载后，试样发生回弹变形。其结果如表3和表4所示。

表3为不同荷载条件下土体的最终回弹量。由表可知，对于同种且荷载相同的土体，其回弹量会随着固结时间的增加而减小。对于同种且固结时间相同的土体，其回弹量随着荷载的增加而增加。选择固结时间为1d的试样进行比较可以发现，黏土的压缩系数要大于砂土，且在相同的荷载下开始回弹时，黏土的回弹量也大于砂土。在排水阶段的初期，作用在土体上的应力较小。土体在较低的应力作用下的压缩主要是由于土体颗粒的重新排列。这种重新排列造成的变形是不可逆的。随着排水过程的进行，应力逐渐增大，土体中的孔隙水逐渐排出，土体颗粒发生弹性变形。表4为不同土体在固

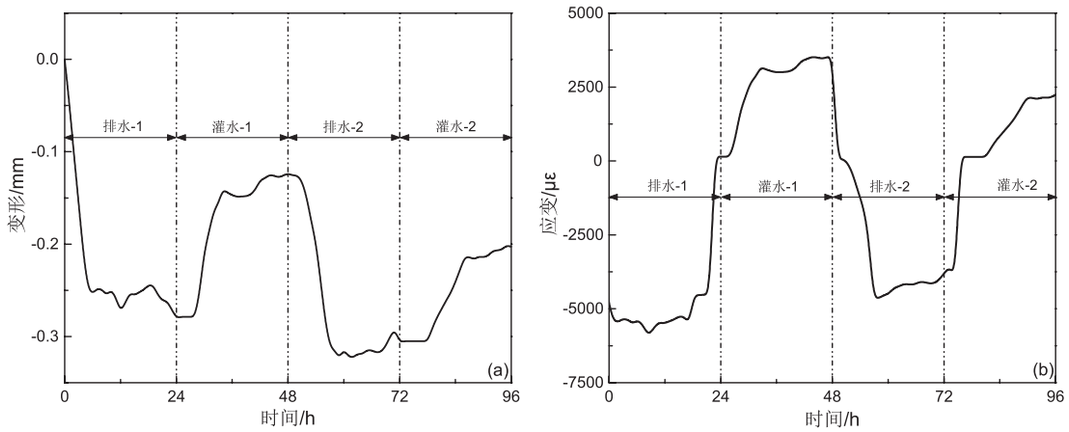


图5　排灌水循环中土体累计变形曲线(a)和总应变—时程曲线(b)

Fig. 5　The cumulative deformation curve of soil (a) and total strain–time curve (b) during the two draining–recharging cycles

表3 不同荷载条件下土体的回弹量

Table 3 Resilience of soils under different loading conditions

固结时间/d	土体的回弹量/mm					
	800/kPa		1600/kPa		3200/kPa	
	黏土	砂土	黏土	砂土	黏土	砂土
1	0.248	0.128	0.431	0.210	0.556	0.274
3	0.235	0.125	0.418	0.192	0.538	0.259
10	0.232	0.109	0.408	0.190	0.517	0.247

表4 不同荷载下土体的孔隙比

Table 4 Void ratio of soil under different loading conditions

土样类型	荷载/kPa	初始孔隙比 e_0	最小孔隙比 e_{min}	回弹孔隙比 e_1	孔隙比差值 e_1-e_0
黏土	800	0.848	0.542	0.565	0.283
	1600	0.848	0.480	0.520	0.328
	3200	0.848	0.423	0.474	0.374
砂土	800	0.799	0.733	0.744	0.055
	1600	0.799	0.694	0.713	0.086
	3200	0.799	0.622	0.692	0.107

结压缩试验中孔隙比的变化情况。由表可知，随着荷载的增加，土体的压缩逐渐增大，最终孔隙率逐渐减小。e_1-e_0的值表示土体的不可逆变形。随着荷载的增加，土体的不可逆变形逐渐增大。综上可述，随着固结时间的增加，在相同条件下，土层回弹量逐渐减小。随着荷载的增大，回弹变形逐渐增大。

5 结论

本文基于布里渊光频域分析（BOFDA）技术，利用室内地面沉降模型，对砂—黏土互层土体在排灌水循环中的垂向变形进行分布式监测，对其试验结果进行讨论，并结合固结压缩试验对土体的垂向变形进行分析。主要的结论如下：

（1）BOFDA分布式监测技术可以有效地捕捉土体在排灌水状态下的变形情况，实现对地面沉降的形成与发展过程中土体的变形的实时监测。

（2）随着排水—灌水过程的进行，土体经历了压缩—回弹—再压缩—再回弹的状态。土体的压缩量大于回弹量，且存在一部分不可逆的压缩。

（3）在反复排灌水条件下，土体的结构发生变化，孔隙度减小，土体的压缩量相对减小，回弹量相对增大，土体逐渐趋近于弹性变形。

（4）黏土层的压缩是造成地面沉降的主要因素，而砂土层的压缩同样也是地面沉降的重要组成部分。地下水位的波动变化造成的地面沉降，随着水位波动次数的增加，变形量会减小，趋近于弹性压缩和回弹。

（5）BOFDA技术具有突出的分布式监测优势，可以准确的测量不同土层的垂直应变以及变形量，为后续地面沉降机理与变形特点的研究提供了一种准确有效的监测方法。同时，为地面沉降的监测和预警提供了一定的参考依据。

参考文献（References）：

崔振东，唐益群. 2007. 国内外地面沉降现状与研究[J]. 地震工程学报，29(3): 275-278.

邓清海，马凤山，袁仁茂，等. 2007. 基于GPS的江阴市地面沉降规律及机理研究[J]. 工程地质学报，15(5): 621-629.

方正，武健强，赵建康. 2003. 长江三角洲地区地面沉降监测[J]. 上海国土资源，2003(2): 2-5.

葛大庆，殷跃平，王艳，等. 2014. 地面沉降—回弹及地下水位波动的InSAR长时序监测——以德州市为例[J]. 国土资源遥感，26(1): 103-109.

何庆成，方志雷，李志明，等. 2006. InSAR技术及其在沧州地面沉降监测中的应用[J]. 地学前缘，13(1): 179-184.

李明坤，高磊，余湘娟，等. 2014. 基于BOFDA的地下水温模拟监测试验研究[J]. 河南科学，2014(12): 2537-2540.

秦洪奎，王平德. 2012. GPS用于天津市地面沉降监测的研究[J]. 测绘地理信息，37(2): 20-21.

谢觉民. 1983. 钢管基岩标在地形变台站的应用[J]. 地震研究，1983(4): 97-106.

殷跃平，张作辰，张开军. 2005. 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，16(2): 1-8.

于军，王晓梅，武健强，等. 2006. 苏锡常地区地面沉降特征及其防治建议[J]. 高校地质学报, 12(2): 179-184.

于军，武健强，王晓梅，等. 2013. 苏北沿海地面沉降区地下水资源管理对策探讨[J]. 地质学刊，37(1): 91-94.

张阿根，杨天亮. 2010. 国际地面沉降研究最新进展综述[J]. 上海国土资源，31(4): 57-63.

张卫东. 2003. 城市地面沉降灾害经济评估[C]// 中国地质矿产经济学会2003年学术年会.

朱叶飞，于军，武健强，等. 2010. D—InSAR与PS—InSAR技术应用于苏州地面沉降监测之比较[J]. 地质学刊，34(3): 289-294.

Fadil A, Sichoix L and Barriot J P. 2011. Evidence for a slow subsidence of the Tahiti Island from GPS, DORIS, and combined satellite altimetry and tide gauge sea level records [J]. Comptes Rendus-Géoscience, 343 (5): 331-341.

Fujihashi K, Uehara H, Okutsu M, et al. 2003. Development of a road disaster monitoring system using optical fiber sensing technology [J]. NTT Technical Review, 1(9): 48-52.

Mohamad H, Soga k, Bennett P J et al. 2012. Monitoring twin tunnel interaction using distributed optical fiber strain measurements [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 138(8): 957-967.

Kihara M, Hiramatsu K, Shima M, et al. 2002. Distributed optical fiber strain sensor for detecting river embankment collapse [J]. Ieice Transactions on Electronics, 85(4): 952-960.

Ng H M, Ge L, Yan Y, et al. 2010. Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia [J]. Engineering Geology, 115 (1): 1-15.