

OFDR 分布式光纤传感在深层土体水平位移量测中的应用研究*

王中锐¹, 朱少华², 陈 阳³, 卢厚清³, 孙阳阳^{1**}, 韩洪波², 张志刚²

(1.陆军工程大学 国防工程学院,南京 210007;2.江苏省地矿局第四地质大队,江苏 苏州 215129;

3.陆军工程大学 野战工程学院,南京 210007)

摘 要:在光频域反射(Optical Frequency Domain Reflection, OFDR)技术的分布式光纤测量方法的基础上,提出了基于欧拉梁理论推导出光纤测量应变与土体水平位移之间的转换关系,并通过室内实验进行了验证,证实了分布式光纤测水平位移的可行性和应变-位移转换关系的准确性,且将传统测斜仪法与光纤测量方法分别在基坑工程中得到了应用。通过试验,光纤测量方法能够准确详细地量测深层土体在开挖过程中的水平位移变化情况。

关键词:深层土体水平位移;分布式光纤;欧拉梁理论;应变-位移转换关系;基坑工程

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)04-0295-08

Application of OFDR Distributed Optical Fiber Sensing in Horizontal Displacement Measurement of Deep Soil

WANG Zhongrui¹, ZHU Shaohua², CHEN Yang³, LU Houqing³, SUN Yangyang¹,
HAN Hongbo², ZHANG Zhigang²

(1.National Defense Engineering College, Army University of Engineering, Nanjing 210007, CHN;

2.The Fourth Geological Brigade of Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Suzhou Ji-

angsu 215129, CHN; 3.Field Engineering College, Army University of Engineering,
Nanjing 210007, CHN)

Abstract:Based on the distributed optical fiber measurement method of optical frequency domain reflection (OFDR), the conversion relationship between the strain measured by optical fiber and the horizontal displacement of soil based on Euler beam theory was proposed, which was verified by indoor experiments. The feasibility of the distributed optical fiber measurement of horizontal displacement and the accuracy of the strain-displacement transformation relationship were verified. The optical fiber measurement method was applied in a foundation pit project. Through the test, the optical fiber measurement method was testified to be able to accurately measure the horizontal displacement of deep soil in the process of excavation.

Key words: horizontal displacement of deep soil; distributed optical fiber; Euler beam theory; strain-displacement transformation relationship; foundation pit engineering

收稿日期:2021-04-28

* 基金项目:国家自然科学基金(51608528);国防科技基金项目(2019-JCJQ-JJ-009);江苏省地质矿产勘查局科研项目(2018-KY-04)

作者简介:王中锐(1988—),男,硕士,主要从事工程损伤诊断与安全监测的研究;(E-mail:wong14@163.com)

朱少华(1984—),男,高级工程师,主要从事岩土工程设计与监测工作;

孙阳阳(1983—),男,副教授,主要从事光纤传感与结构健康监测研究。(E-mail:majsun@vip.163.com)

** 通讯作者

引 言

近年来,我国大型工程建设显著增长,每年新建工程总量超过全世界其他国家的总和。基建工程的高速发展也带动了工程勘察市场规模的不断扩大,据估算,仅2017年岩土工程检测与监测市场的总额就达到了约183亿元^[1]。市场规模的扩大和对监测结果的准确性要求对岩土工程监测技术提出了更高期待。

现阶段,深层水平位移的监测仍然主要依靠人工完成,国家标准推荐的仍然是测斜仪方法^[2-3]。人工监测的弊端较为明显,其一是结果易受非科学因素干扰,且位移不连续只能反映单一方向的变化,再者是人工成本较高。正因如此,现阶段对水平位移自动化监测的需求越来越强烈^[4]。

目前,可用来进行水平位移自动化监测的技术

产品主要还有全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、测量机器人和固定式测斜仪等^[5-6]。GPS技术适用于大范围监测,其精度在厘米级,不能完全满足毫米级的工程监测需求,且只能监测地表变形难以监测土体内部变形,另外单个GPS接收机价格在万元左右,成本较高;测量机器人在精度上能够满足监测需求,但是单机价格往往在30~40万元/台,且只能进行表面变形观测;固定式测斜仪的测量精度和传感器属性能够满足位移监测的需求,同时可用来实现自动化监测。但固定式测斜仪不易布设安装,埋入被测结构后不可回收,不能实现位移连续测量和多方向位移测量,当需要测量的点位较多,测点较深时,其难以布设且材料成本同样相当可观;遥感和无人机监测技术受限于导航定位原理,则更适用于大范围的整体监测,难以达到工程毫米级监测精度要求^[7-11]。

表 1 水平位移自动化监测方法对比

Tab.1 Comparison of automatic monitoring methods of horizontal displacement

方法	测量精度	特点	成本
GPS	厘米级	适合大范围监测且只能监测地表变形	1万元左右
测量机器人	毫米级	只能进行表面变形观测	30~40万元
固定式测斜仪	毫米级	自动化监测,不易安装,不可回收,不能实现位移连续测量和多方向位移测量	较高
遥感和无人机监测	毫米级	适用于大范围的整体监测	较高

由此可以看出,在当前岩土工程监测与检测领域,人工监测结果易受影响且人工成本高,自动化监测技术材料成本过高,且只能进行单一方向的水平位移监测。目前,亟需一种一次性材料成本低、具有自动化监测能力、可实现连续位移场监测,甚至三维变形量测,并且结果准确可靠的新技术。基于分布式光纤传感的位移监测技术,具备材料成本低、多维度、可分布测量、可自动化监测的特点,成为满足这一需求的热门潜力技术^[12-16]。

2017年以来,随着更高空间分辨率的光频域反射技术(Optical frequency domain reflection, OFDR)技术的引入,分布式光纤变形量测理论和实践实现了质的提升。孙阳阳等^[17]最早开展了基于OFDR技术的深层水平位移场的监测研究,基于梁理论建立了应变-位移转换模型,通过室内试验和场地实验验证了模型的准确性。张清华等^[18]使用LUNA公司的ODISI解调设备,在空间分辨率1 mm条件下,研究了分布式光纤的应变传递分布规律以及影响应变传递分布的主要因素,通过数值模拟与实验检验的方法证明了所提出的分布式光纤

应变量测理论的准确性。章征林等^[19]基于OFDR技术改进了应变-位移转换模型,进一步提高了位移应变转换模型的精度和适用性。仇唐国等^[20]在基坑工程测斜监测实验中,在40 m深度范围内实现了空间分辨率1 cm的连续分布式位移场监测,测量结果很好地证明了OFDR技术适用于岩土工程位移场监测。但由于理论模型与实际工况之间存在较大差异,因此他们的光纤监测结果与现场测斜仪测量结果差别较大。

文章提出了一种基于OFDR分布式光纤技术的深层土体水平位移测量方法,研究了光纤应变与土体水平位移的转换关系,通过相关试验进行了验证,并在基坑工程中成功地得到应用。通过获取测斜管表面的应变场,利用结构健康监测分析系统对所测得数据进行分析,分布式光纤由于具有较高的空间分辨率,可准确地获得应变场。与传统测斜仪相比,分布式光纤可测得位移场,利用分布式光纤测量位移场可得到更准确、更详细的基坑深层土体信息。

1 深层土体水平位移测量原理

1.1 应变-位移变换关系

由于光纤获取的是应变变化,需要将光纤的应变变换为土体的水平位移,根据测斜管在土体的变形情况,建立计算模型,如图1所示。

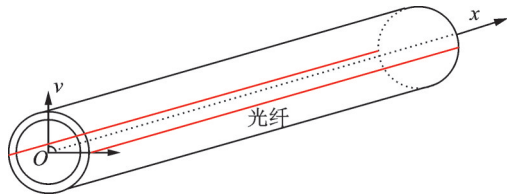
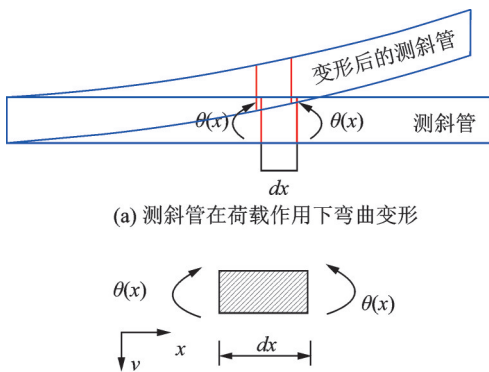


图1 测斜管示意图

Fig.1 Schematic of inclinometer tube

基于欧拉梁理论建立测斜管位移方程。测斜管在土体中受荷载作用弯曲变形,对于测斜管截面,其受力主要来自左右两侧的弯矩,如图2(a)所示,测斜管在土体荷载作用下发生变形,任取微元 dx ,其在左右两侧弯矩作用下弯曲变形。考虑测斜管某一截面受力时,取测斜管长度方向微元受力简图如图2(b)所示,其中 θ 是截面转角, x 为测斜管长度方向, v 为测斜管水平方向的位移。



(a) 测斜管在荷载作用下弯曲变形

(b) 测斜管微元受力简图

图2 测斜管弯曲变形受力分析

Fig.2 Force analysis of bending deformation of inclinometer tube

微元的转角与位移微分方程如式(1)所示:

$$\theta(x) = \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (1)$$

利用有限差分法,将式(1)写成差分格式,如式(2)所示:

$$\theta_x = \frac{v_{x-1} - 2v_x + v_{x+1}}{\Delta x^2} \quad (2)$$

根据平截面假定,截面应变增量可由截面转角

θ_x 计算得到,如式(3):

$$\Delta \epsilon_x = \theta_x \cdot h \quad (3)$$

其中, h 为应变测点的距离,即测斜管的直径。由式(2)可得侧斜管的侧向位移为:

$$v_{x+1} = \frac{\Delta \epsilon_x}{h} \cdot \Delta x^2 + 2v_x - v_{x-1} \quad (4)$$

将测斜管沿纵向方向分成 n 个单元,如图3所示,则底部坐标为 $x=0$,顶部坐标为 $x=n$ 。测斜管长度为 L 。测斜管底部为固定支座。因为测斜管的位移由测斜管壁的应变计算得到,测斜管顶部的边界条件可不用确定。故边界条件为 $v(0)=0$ 和 $dv(0)/dx=0$ 。由边界条件,可得差分方程的初始条件为 $v(0)=0$ 和 $v(1)=0$ 。

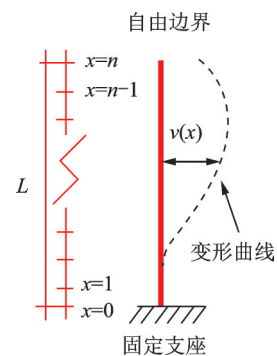


图3 测斜管计算简图

Fig.3 Calculation diagram of inclinometer tube

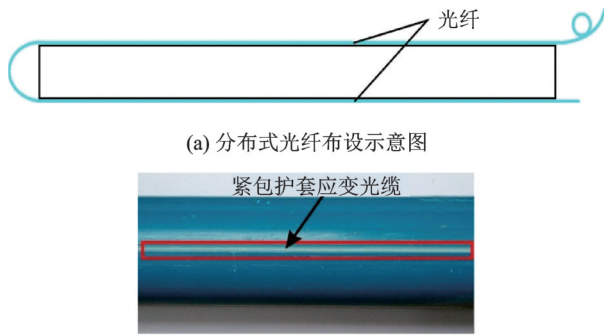
利用有限差分法,即可由管壁应变得到测斜管的横向位移。以上即是应变-位移变换公式,其中水平位移又可称为测斜管的挠度。基坑水平位移的监测一般要花费半年甚至一年时间。监测中须考虑温度效应,但通过温度补偿传感器消除温度的影响会增加监测的复杂性及监控成本。

1.2 理论模型验证实验

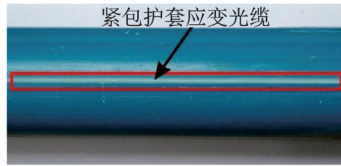
图4为安装在测斜管上的光纤的布局示意图。光纤在测斜管上的布局是U形的,利用光纤的布局来实现温度自补偿。

光纤布设好以后,沿管轴向每隔0.5 m将千分表安装在测斜管下方,共计使用5个千分表。它们可用于测量测斜管0.5 m,1 m,1.5 m,2.0 m和2.5 m位置处的位移变形。在测斜管的两端施加不同的边界条件,其中一端为可自由移动的弹簧支座,另一端为不可移动的固定支座。为使弹簧支座端位移可随机变化,在测斜管和钢支架之间铺设了若干层海绵。在固定支座端使用木工夹将测斜管牢牢固定在支座上,如图5所示。实验装置的边界条件

如图 6 所示。



(a) 分布式光纤布设示意图



(b) 粘贴紧护套光缆的测斜管

图 4 测斜管上的光纤布局

Fig.4 Optical fiber layout on the inclinometer tube

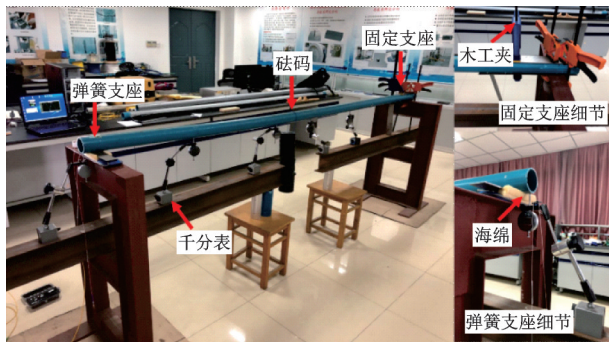


图 5 位移测量实验现场图

Fig.5 Photo of displacement measurement experiment site

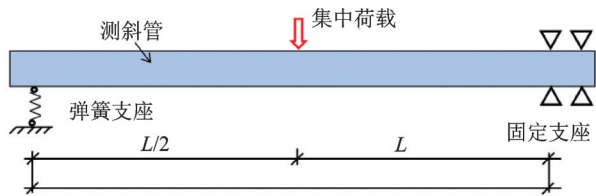


图 6 位移测量实验边界条件示意图

Fig.6 Schematic of the boundary conditions of the displacement measurement experiment

实验过程中,在测斜管正中通过加挂砝码实现向测斜管施加载荷。实验共进行四组,每组荷载分四级加载,加载砝码后,记录下各个位置处的千分表测量的位移。解调仪测得光纤上的应变,根据式 4 应变位移转换模型计算得出测斜管的位移,通过千分表测得位移相对比,判断模型的准确性。

在图 7 中,离散的红色点是千分表测量的对应位置的位移结果,而曲线是由光纤测得的应变场计算出的位移场。

由结果可知,根据应变位移转换模型计算出的位移与千分表测量的位移值非常接近。由此可以

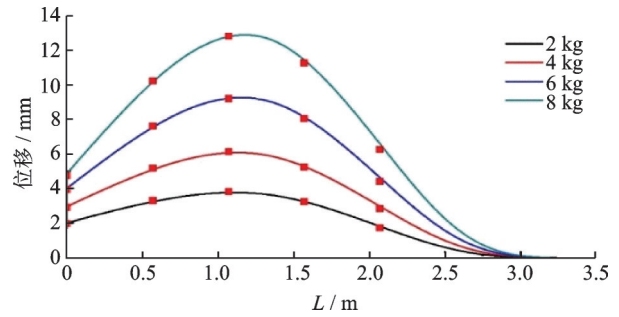


图 7 光纤测得的位移与千分表位移对比

Fig.7 Comparison of displacement measured by optical fiber and dial gauge displacement

得出结论,应变位移模型可以准确地通过应变计算出位移。分布式光纤可以准确地测出测斜管表面光纤覆盖的每一点的位移变形,而千分表只能测出固定位置的变形,由此可见分布式光纤的位移测量优势。

2 基坑工程的应用

将基于 OFDR 的水平位移测量方法应用于苏州某基坑工程。设计最大开挖深度约为 18 m。根据基坑设计,墙体和土体中测斜点的深度均约为 40 m。本掘开式工程采用明挖施工法,箱体为地下二层,开挖深度 11~16.9 m,局部落深处 21.0 m,基坑周长约 590 m,开挖面积约 16 000 m²。箱体由多个功能区块组成基坑,包含地下箱体基坑、高效沉淀池及滤布滤池基坑、东侧进出通道基坑、西侧进出通道基坑、高效沉淀池及滤布滤池基坑、闸门井基坑、进水管道的基坑,基坑位置及周边环境如图 8 所示。

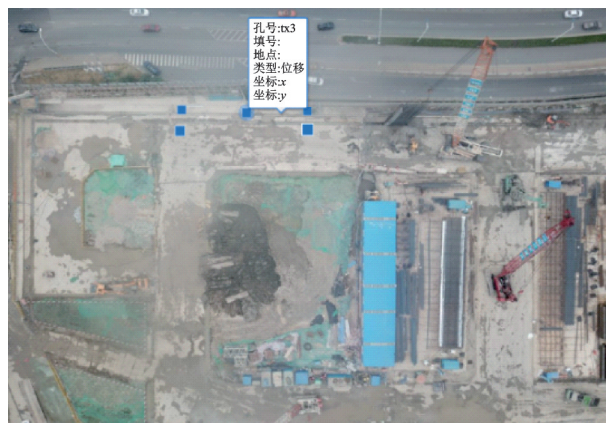


图 8 试验基坑的位置及周边环境

Fig.8 The location of the test foundation pit and its surrounding environment

2.1 传感器设计

工程现场的实验条件比实验室内环境要差,未经保护的光纤无法在工程应用条件中布设。本实验中选用的是带有铠装结构保护的分布式钢绞线应变光缆,即铠装光缆。铠装光缆的结构如图9所示。铠装光缆内部的各层之间都是紧耦合的,以保证结构的变形通过各层之间的剪切应力传导到聚氨酯紧套光纤内部的纤芯,完成应变传递实现传感。为了方便光纤的布设,将铠装光缆附加在PVC测斜管外表面并固定,随测斜管一同布设入钢筋混凝土连墙和土体内。



图9 钢绞线应变光缆

Fig.9 Steel strand strain optical cable

2.2 传感器布设

本实验基坑工程的地连墙和土体测斜的开挖深度达到40 m,而单根测斜管的长度为4 m,现场布设时需要将10根测斜管逐根连接绑扎在钢筋笼上或下放到测斜孔中。本次位移监测实验共布设4个光纤测斜点,分别在地连墙钢筋笼内和土体中各选择两个位置安装光纤测斜管传感器。

为消除温度变化带来的影响对称布设两根光纤,实现自补偿。当测斜管发生形变的时候,两根光纤也都会产生变形,同时地下水等环境的作用会带来光纤附近的温度变化,也会对光纤测量结果产生影响。如前所述,对称布设的光纤可以消除温度变化带来的影响。两根光纤中靠近基坑的命名为该测点的in光纤,远离基坑的光纤命名为该测点的out光纤,测斜管的最终应变可由式(4)计算,实现通过光纤的特殊布设形式达到温度自补偿的目的。

测点分别命名为CX1、CX2和TX3、TX4,后期施工中地连墙内测点CX1、TX3被损坏,只有CX2、TX4两个测点数据可供分析。

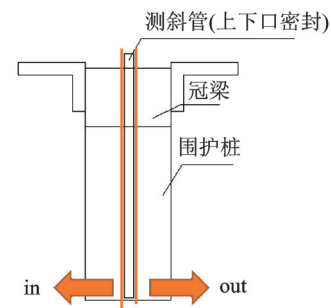
图11中黄色为各测点位置,灰色盒子为光纤外露连接线的保护盒。测斜管保护帽与光纤保护盒之间增加保护套,加强对露出光纤的保护。

2.3 数据采集与去噪

采集频率大约为每月两次,基坑开挖15 m完成



(a) 光纤传感器安装在地连墙钢筋笼 (b) 向测斜孔内下放光纤传感器



(c) 光纤在测斜孔内示意图

图10 地连墙钢筋笼和土体中布设光纤测斜传感器

Fig.10 Fiber-optic inclinometer sensors arranged in the ground connecting wall steel cage and the soil



图11 布设完毕的光纤测斜点

Fig.11 Fiber optic inclinometer point after installation

三道支护。由于OFDR解调设备只有一个通道,也就是每次只能接一根光纤,因此每个测点在进行数据采集时,要分别接in光纤和out光纤。将布设好的应变光缆的一个端部与跳线相熔接,再连接到OFDR解调仪,将解调仪与笔记本电脑用数据线进行连接,即可记录各个测点的应变分布情况。实验依然是使用LUNAODISI A50分布式光纤解调仪采集原始应变数据。

OFDR技术的原理决定了其每次测得的是相对基准频率的变化值,因此基准频率的设定对最后的结果会产生很大的影响。在基坑开挖前一周设



图 12 基坑开挖现场

Fig.12 Photo of foundation pit excavation site

置实验基准频率,后续各次频率的采集与基准频率相减,即可获知频率变化量,并由仪器转换成应变。仪器获得的“原始应变”中在去除了温度的影响后,仍需要进一步去除由于混凝土或土体不均匀带来的测量误差。

文中采用基于密度的含噪声应用空间聚类(Density - Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)算法对每次测量的数据进行降噪处理。DBSCAN是基于一组邻域来描述样本集的紧密程度的,通过将紧密相连的样本划为一类,得到一个聚类类别。通过将所有各组紧密相连的样本划为各个不同的类别,得到最终的所有聚类类别结果。DBSCAN算法在聚类的时候还可以找出异常点,所以选择进行去噪。图 13 是对 CX2 测点 3 500 组应变数据应用 DBSCAN 降噪算法的处理结果。

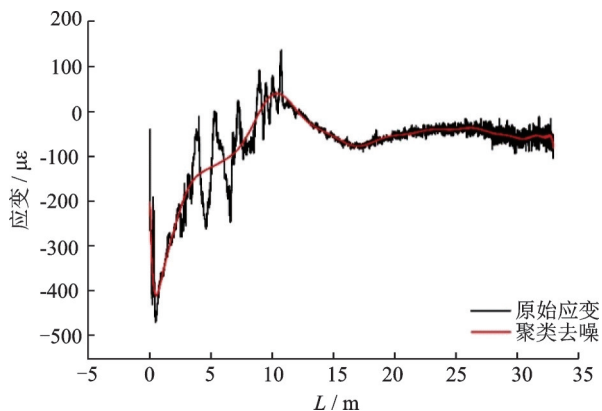


图 13 DBSCAN 算法去噪结果

Fig.13 Denoising results of DBSCAN algorithm

2.4 应变位移转换对比评价

去噪后的应变数据计算位移。以 CX2 为例,考虑到空间分辨率是 1 cm,则 35 m 是 3500 个应变测点,由于应变数据量很大,在这里仅取约 1% 也就是 30 组应变数据说明位移的计算。

根据式 4 所提出的应变位移转换模型计算位移,光纤所测应变数据越多,转换精度越高,位移计算的越准确。CX2、TX4 各测点光纤测斜传感器的垂直深度分别为 35 m、33 m,实验过程中应变点间隔为 1 cm,则每个测点分别有应变测点 3 500、3 400 个,相应计算得到的位移测点数量与此对应。

图 14 为 CX2 测点在确定基准频率后的第一次应变测量结果以及根据式 4 计算所得的位移与测斜仪位移的对比。由图可知,应变变形可以定性反映支护变形情况,当基坑开挖一定深度时,已开挖部分的光纤应变会发生明显变化,而未开挖部分光纤应变基本趋近于 0。两根光纤 in 和 out 的应变变化趋势较为一致,也反映了测斜管的表面变形情况。将结果计算转变为位移以后,可以进一步发现,最大应变位置与最大位移位置并不一致,与理论分析结果相符。位移变形可以精确定量地反映支护结构的变形分布情况。同时发现,钢筋混凝土结构内光纤所受温度影响较小。

图 15 为 TX4 测点在测定基准频率后第一次测量结果以及计算位移与测斜仪位移的对比。由于 TX4 测点埋设在土体里,而 CX2 埋设在钢筋混凝土地连墙内,从应变测量的结果可以发现,钢筋混凝土结构内的应变更符合理论分析,而土体内的应变变化较为复杂,其中一个主要原因是土体内的温度场分布不均匀,导致光纤应变测量结果中掺杂了温度因素。

由结果可知,随着开挖深度的变化,混凝土地连墙内测点 CX2 的应变结果受温度影响相对较小,而 TX4 应变结果波动较大,说明受地下温度场变化影响较大。位移监测结果也证明了温度补偿的重要性,以及光纤布设方法的温度自补偿的有效性。同时也可以看出,应变变形没有位移变形直观,不易于用来指导工程安全监测。

2.5 位移变形误差评价

各测点与测斜仪所测位移对比及误差分析见图 16 和图 17,可以看出,基坑支护结构位移变化根据不同测点介于 16 mm~23 mm 之间。

图 16 和图 17 为各测点的位移与测斜仪位移的对比及误差。分布式光纤测斜传感器所测得的位移如前所述为 1 cm 间隔的位移点连接而成,30 m 深

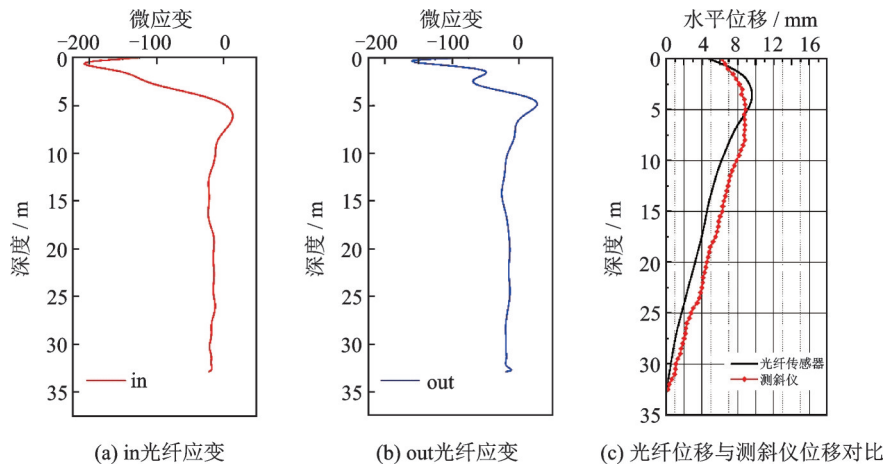


图 14 CX2测点10月13日初始应变及位移对比

Fig.14 Comparison of initial strain and displacement of CX2 measuring point on October 13

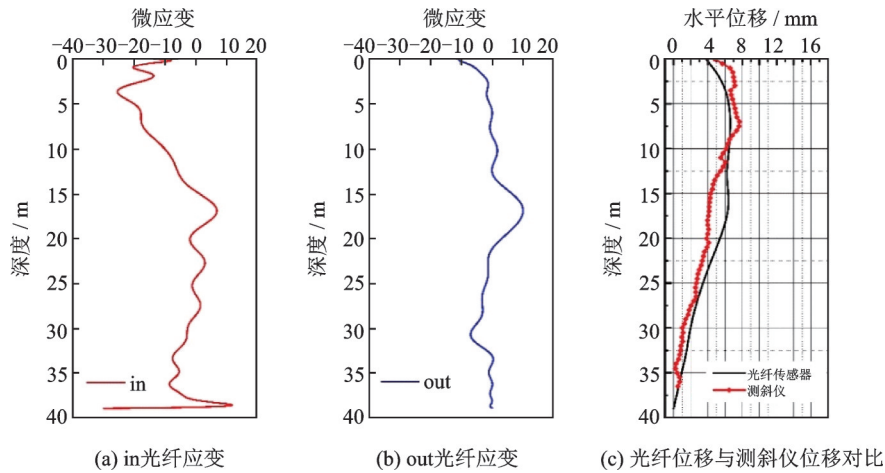


图 15 TX4测点10月15日初始应变位移对比

Fig.15 Comparison of initial strain displacement of TX4 measuring point on October 15

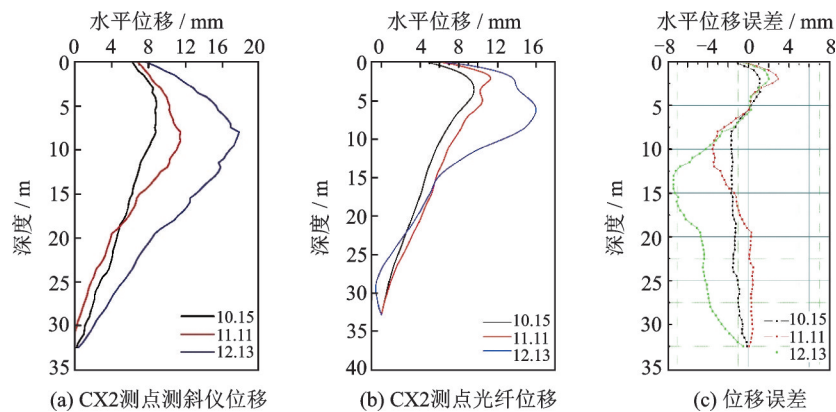


图 16 CX2测点光纤位移与测斜仪位移对比及位移误差

Fig.16 Comparison of fiber displacement of CX2 measuring point and displacement of inclinometer and displacement error

度通常位移点数量在3 000个以上。测斜仪所测位移根据国家标准和规范,通常为每1 m间隔的位移测量结果的离散点拟合而成,30 m测量深度通常包括30个测点。因此从测量点的密度来看,光纤测点远远超过测斜仪,其所测得的位移场是连续非拟合值,反映土体和钢筋混凝土结构的变形粒度更细。

由图 16 和图 17 可以看出,随着基坑开挖深度的增加,地下连续墙中的测点 CX2 和土体中的测点 TX4,所测得的最大水平位移值不断变化,最大位移深度随开挖深度不断下移,最大位移位于对应坑底的 1/3 处,根据工程地质情况可知,测量结果符合工程实验实际情况。地下连续墙体内光纤测得的

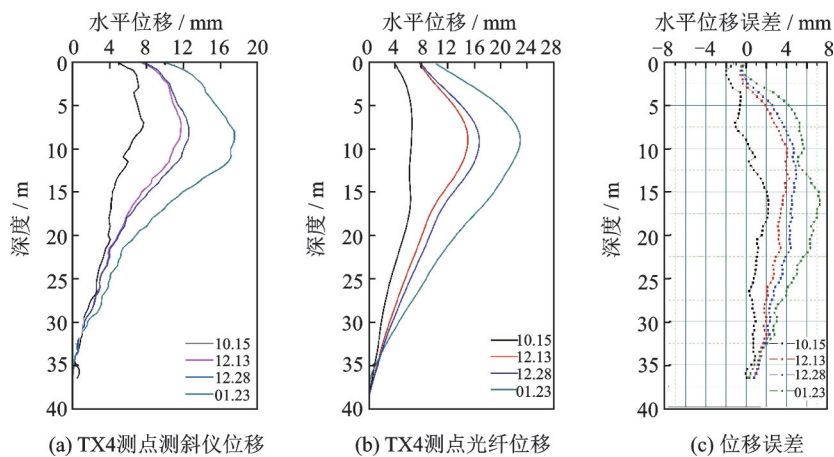


图 17 TX4测点光纤位移与测斜仪位移对比及位移误差

Fig.17 Comparison of fiber displacement of TX4 measuring point and displacement of inclinometer and displacement error

累计位移小于土体内的位移变形,说明钢筋混凝土地连墙支护结构相对土体更为稳定。

由位移误差图可以看出光纤位移与测斜仪位移相比存在一定误差。其主要原因如下:

(1)根据应变传递理论,光纤护套的存在会使得应变在传递过程中产生损耗,而工程现场也必须用封装后的光缆,因此会导致光纤的测量结果产生偏差。

(2)测斜管在埋设过程中可能会发生一定角度的扭转,也会对测量结果带来一定的误差。

(3)测斜仪由于是人工测量,其测量结果也存在误差。

由以上分析可知,光纤测斜技术完全具备代替人工测斜仪进行水平位移测量的潜力,其用于国防工程变形诊断与监测完全可行。

3 结 论

通过室内试验及工程应用,验证了文中提出的光纤测量深层土体水平位移的可行性,以及光纤应变与土体水平位移转换关系的准确性。研究发现:基于分布式光纤传感的位移监测技术,具备材料成本低、多维度、可分布测量、可自动化监测的特点,可实现深层土体的应变场量测和位移场量测。

参 考 文 献

- [1] 龚雪强.地质与岩土工程分布式光纤监测SWOT分析[D].南京:南京大学,2019.
- [2] 陈欣刚,郭唯,班莹.测斜仪新旧版标准的分析与比较[J].水利信息化,2019,6:51-54.
- [3] 中华人民共和国水利部.岩土工程仪器测斜仪:GB/T 38204-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [4] 李元海,朱合华.岩土工程施工监测信息系统初探[J].岩土力学,2002,1:103-106.
- [5] 赵闯,余大梅,金万军.基于小波变换的坝体GPS形变监测分析[J].青海大学学报,2019,37(3):68-74.
- [6] 涂鹏飞,涂伊腾,符林星.利用GPS与CRInSAR融合开展微变形监测的应用研究[J].大地测量与地球动力学,2015,35(3):469-471+476.
- [7] 王静宇.浅谈无人机倾斜摄影测量技术及其应用[J].工程建设与设计,2017(7):200-201.
- [8] 杨国东,王民水.倾斜摄影测量技术应用及展望[J].测绘与空间地理信息,2016,39(1):13-15.
- [9] 廖俊杰.输电线路巡检中无人机航测技术的运用[J].电子测试,2019,12:99-100.
- [10] 杨燕,杜甘霖,曹起铜.无人机航测技术在地质灾害应急测绘中的应用—9.28丽水山体滑坡应急测绘为例[J].测绘通报,2017,1:119-122.
- [11] 许志华,吴立新,刘军,等.顾及影像拓扑SFM算法改进及其在灾场三维重建中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(5):599-606.
- [12] Zhu H, Shi B, Zhang C. FBG-based monitoring of Geohazards: Current status and trends[J]. Sensors, 2017, 17:452.
- [13] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 10(9): 57-79.
- [14] Culshaw B. Optical fiber sensor technologies: Opportunities and perhaps pitfalls [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 39-50.
- [15] 朱鸿鹄,施斌,张诚成.地质和岩土工程光电传感监测研究新进展——第六届OSMG国际论坛综述[J].工程地质学报,2020,28(1):178-188.
- [16] Miguel J, Rodriguez L, Quintela A, et al. Fiber optic sensors in structural health monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011,29(4): 587-608.
- [17] Huang X D, Wang Y, Sun Y Y, et al. Research on horizontal displacement monitoring of deep soil based on a distributed optical fiber sensor[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 65(2): 158-165.
- [18] Zhang Q, Sun Y, Zhang Z, et al. Strain transfer in distributed fiber optic sensor with optical frequency domain reflectometry technology[J]. Optical Engineering, 2019, 58(2):27109.
- [19] Zhang Z L, Sun Y Y, Zhang Q H, et al. Applications of optical frequency-domain reflectometry technology in strain-deformed configuration conversion of structural surface deformed configuration measurement [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(11):1-9.
- [20] 仇唐国,孙阳阳,卢天鸣,等.基于OFDR技术的深层土体水平位移场监测研究[J].压电与声光,2020,42(1):108-112.