

基于光纤光栅的基坑深层水平位移量测技术

朱仁民¹ 李益斌¹ 孙嘉莹^{2*} 刘阳³ 张文泽³

1. 江苏苏州地质工程勘察院; 2. 中国人民解放军陆军工程大学; 3. 南京隆沃科技有限公司

摘要: 传统深层土体水平位移采用测斜仪分段测量, 人工读数, 该方法耗费人力成本高, 误差较大。本文提出一种基于光纤光栅传感技术的深层水平位移传感器, 在测斜管内部铺设光纤光栅传感器测量应变, 并通过理论模型介绍应变-位移关系, 计算出深层水平位移。本文利用光纤深层水平位移传感器监测基坑工程周边土体位移变化, 并对传统测斜仪监测数据, 验证该技术方案的准确性和可靠性, 替代传统人工操作中的繁琐流程, 实时监测基坑形变, 为工程安全提供重要保障。

关键词: 光纤光栅传感; 应变-位移; 基坑监测; 安全防护

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.18.014

一、引言

随着众多高层建筑物及地铁、隧道等重大工程项目的建设, 地下空间基坑数量不断增多, 同时也增加了许多基坑开挖的问题。基坑工程是城市建设中的重要组成, 也是危险性较高、易受周边环境的影响的项目, 基坑开挖过程中内外土体将由原来静止土压力状态转向被动或主动土压力状态, 形成应力基础的波动, 产生土体的变形和围护结构荷载的变化, 严重时造成基坑的形变和破坏^[1]。因此, 基坑位移的实时监测对确保基坑安全, 保障工程顺利进行具有重要意义。

基坑水平位移监测是基坑工程中最直接、最重要的监测项目, 反映施工过程中水平位移的重要指标, 包括顶部水平位移监测与深层水平位移监测^[2]。传统的监测方法有激光传感、GPS、全站仪和测斜仪等仪器对基坑进行点位监测, 但该方法需要耗费大量的人工成本, 且仅能够进行单点式阶段监测, 无法实时的采集基坑水平位移数据^[3]。为提高监测数据采集的精度和灵敏度, 本文采用光纤光栅传感技术进行基坑位移监测。

光纤光栅传感属于光纤传感的一种, 是基于反射光波长信息的光纤传感技术, 传感单元为光栅。利用光波在光纤中传输并与光栅产生反射, 分析光信号反射的光强分布, 可实现传感区域的温度、应变等参数的连续监测, 具有体积小、质量轻、耐腐蚀和抗电磁干扰等方面的优势^[4, 5]。近年来, 随着国内光纤传感技术的发展, 学者对光纤在工程应用中的研究不断深入, 其中包括对深层水平位移的监测技术。杜建安^[6]等人以太原火车站蓄水池深基坑工程为例, 利用光纤光栅传感器对地连墙及混凝土横撑进行长期监测, 探讨深基坑开挖过程中地连墙位移的变化。仇唐国^[7]等人提出基于OFDR的分布式光纤深层土体位移监测技术, 并推导了应变-位移变形换算方法, 通过室内实验验证其结果的可靠性, 并将其应用于苏州某基坑工程。

本文提出一种基于光纤光栅传感技术的深层水平位移

传感器, 通过前期实验, 我们得到了大量的实验数据并进行理论验证, 但仍缺乏在实际工程上的应用和长期有效的数据监测。本文在此基础上, 将该技术方法进一步应用于实际工程, 结合基坑深层水平位移长期监测数据, 对比传统测斜仪监测, 探讨技术方案的准确性及适用性。

二、光纤光栅传感监测基坑深层水平位移原理

(一) 应变-位移换算模型

深层水平位移传感器是将光纤光栅传感设施安装在测斜管中, 土体位移变化使测斜管发生应变, 并由光纤光栅产生光信号强度的变化转化为波长, 由于光纤传感器测量的数据为应变分布, 所以需要数学模型将应变转换为位移。

基于光纤传感测斜技术, 不同研究中采用不同的算法对应变-位移的转换进行分析, Sun^[8]等人基于梯形差分法(TIM), 建立了沿测斜仪外壳的挠度与光纤光栅传感器测量的应变之间关系, 得出应变-位移换算公式与实验结果吻合度更高, 更适用于对基坑工程深层水平位移的监测, 具体公式如(5)所示:

$$w_n = \frac{h^2}{4D} \left[(2n-3)\varepsilon_1 + \varepsilon_n + 4 \sum_{i=2}^{n-1} (n-i)\varepsilon_i \right]$$

其中, w_n 为测斜管的弯曲位移, ε 为测斜管中各测量点的应变, D 为测斜管外直径, h 为测斜管内各测量点的测量间距。

(二) 光纤光栅传感测斜工艺

将光纤光栅传感器埋入测斜管中, 对测斜管进行连接后导入基坑周边土体, 当土体发生水平位移变化时, 应变传递至光纤光栅传感器进而改变光信号的反射光强分布, 通过分析反射光强的变化以实现对其周围土体位移的实时动态监测。

光纤光栅传感器由纤芯、包裹层和涂覆层组成, 由于光纤光栅非常脆弱, 在实际的工程上需要进行封装处理, 封装方式可分为埋入式和表面粘贴式^[9], 埋入式即采用特殊胶将光纤光栅粘贴至测斜管凹槽中, 最终形成完整的光纤光栅传感测斜仪, 胶装完成的测斜管再导入支护中进行混凝土固定, 因此基坑中应变传递为: 基坑土体-混凝土支护-光纤光栅传感测斜仪-光纤光栅解调设备, 如图1所示。

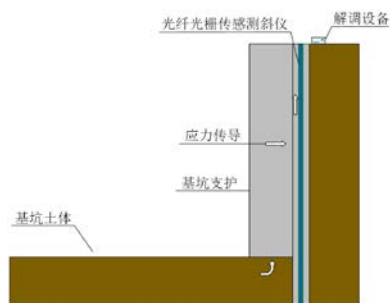


图1 基坑应力传递简图

测斜管全长4m，直径70mm，管内设有对称凹槽，将光纤光栅传感器耦合于凹槽中形成均匀分布的4个光栅点，各光栅点间距为1m，首尾光栅点距离测斜管两端0.5m。光纤光栅传感测斜仪内部示意如图2所示。

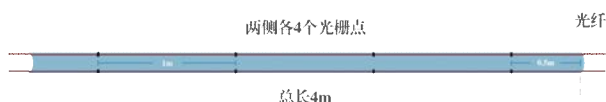


图2 光纤光栅传感测斜仪内部示意图

(三) 光纤光栅应变计算

通过对称布设光纤光栅传感器可有效消除温度对光纤传感的影响，达到温度补偿的效果。基坑工程中，当基坑土体位移发生扰动，光纤光栅传感器感应微小变形，产生应变量 ε ，应变量 ε 包含光纤光栅传感器监测的应变 ε_a ，光纤光栅传感器受温度影响的应变 ε_b ，测斜管热胀冷缩产生的对光纤光栅传感器的应变 ε_c 。根据公式计算 ε_a 如下：

$$\varepsilon_{(1)} = \varepsilon_{a(1)} + \varepsilon_{b(1)} + \varepsilon_{c(1)}, \varepsilon_{(2)} = \varepsilon_{a(2)} + \varepsilon_{b(2)} + \varepsilon_{c(2)}$$

$$\varepsilon_{a(1)} = -\varepsilon_{a(2)}, \varepsilon_{b(1)} = \varepsilon_{b(2)}, \varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{c(2)}$$

$$\varepsilon_{(1)} - \varepsilon_{(2)} = \varepsilon_{a(1)} - (-\varepsilon_{a(2)}) = 2\varepsilon_{a(1)}$$

$$\varepsilon_{a(1)} = (\varepsilon_{(1)} - \varepsilon_{(2)}) / 2$$

三、基坑工程应用

(一) 工程介绍

南京惠通产业基地总部大厦基坑支护项目位于南京市浦口区，该工程基坑周长603m，面积约16600m²，开挖深度达13m。基坑工程位于高新技术产业区，现场环境复杂，南北两侧都有高层建筑物，东侧为星火路，道路管线密集，西侧为空地，布置有管道设施。根据基坑设计，周边采用灌注桩加钢支撑、单排桩、双排桩联合支护。

选取该工程的基坑监测点布设光纤光栅传感测斜仪进行基坑自动化土体位移监测，并与传统测斜仪监测数据进行对比，分析光纤光栅传感测斜仪在实际基坑工程应用中的稳定性、可靠性和适用性。

(二) 光纤光栅传感测斜仪布设

根据施工现场情况，选定基坑东南侧位置布设光纤光栅传感测斜仪，并在其周边相距1m处进行传统基坑测斜仪监测，使其在相同的位置区域实现光纤光栅传感监测与传统测斜仪监测的土体水平位移偏移量对比，如图3所示。光纤光栅传感测斜仪监测点深度为16m。



图3 惠通产业基地总部大厦基坑现场图

由前文可知，每条光纤光栅传感测斜仪管长为4m，在基坑监测中需将4条测斜管进行拼接处理，将每条测斜管内光纤光栅进行相互并联，并直接与解调仪通道相连接，光纤光栅传感测斜仪拼接布设光纤示意如图4所示。

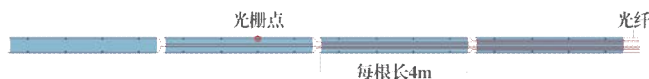


图4 光纤光栅传感测斜仪内部走线示意图

在进行光纤光栅传感测斜仪布设时，需提前进行打孔，该工程基坑土体水平位移监测深度为16m，根据工程经验，在安装测斜管过程中会发生孔内泥沙下陷，导致底部填充泥沙，所以实际工程中对钻孔的需求深度往往多出2m，打孔直径多出40mm。

光纤光栅传感测斜仪布设完成后，为实现测斜管变形与土体位移的吻合，需在孔内浇筑水泥砂浆耦合测斜管与土体结构。在布设过程中对各拼接测斜仪进行标号，最下面测斜仪标为4号，光纤光栅需要向上延伸20m，并联穿过上部三根测斜仪后与解调设施相连接。依此类推，3号测斜仪中光纤光栅长度为16m，2号测斜仪中光纤光栅长度为12m，1号测斜仪中光纤光栅长度为8m，测斜仪之间采用40cm长的测斜管接头相连。

(三) 数据采集及分析

光纤光栅传感测斜仪安装完成后，将光纤光栅解调仪安装在测斜孔旁，光纤光栅传感器接入解调仪中，即可在现场实时解调光纤光栅传导波长，实时监测测斜管应变状态并传输数据，解调仪及现场布置场景如图5(a)(b)所示。



图5 光纤深层水平位移传感器与解调仪现场布置照片

光纤光栅传感测斜仪和解调仪安装完成后，该基坑工程项目于2022年11月29日开始实施监测。根据施工日志记载，基坑东南侧布设光纤光栅传感测斜仪处的开挖时间为2022年12月5日，开挖截至时间为2023年1月4日，开挖深度为5m。据此，根据梯形积分法(TIM)应变-位移计算公式得到光纤光栅传感测斜仪监测基坑水平位移变化如图6所示，并与传统测斜仪监测水平位移变化对比。

图6选取了开挖阶段的四个时间节点进行分析，并用不同颜色曲线分别表示，其中光纤光栅间隔为1m，传统测斜仪测量间隔为0.5m。根据时间节点，2022年12月5日至7日土体水平位移发生较大变化，从地面至地下深度10m处都发生了不同程度的位移变化，其中光纤光栅测斜仪监测地下0m至10m的平均位移变化为4.28mm，传统测斜仪监测地下0m至10m的平均位移变化为3.99mm，

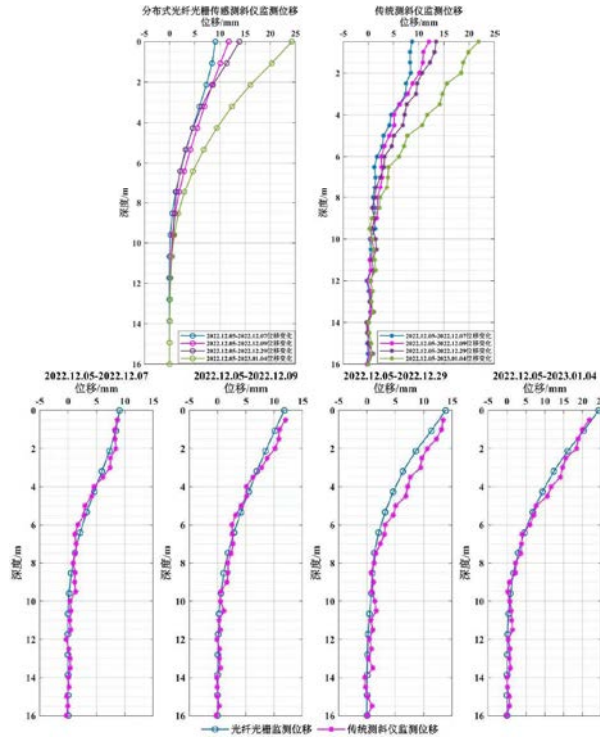


图6 光纤光栅传感测斜仪与传统测斜仪监测水平位移变化对比

吻合度为92.7%。2022年12月5日至9日土体水平位移继续增大,根据光纤光栅测斜仪监测地下0m至10m的平均位移变化为5.33mm,传统测斜仪监测地下0m至10m的平均位移变化为5.05mm,吻合度为94.5%。2022年12月5日至29日期间,水平位移平均每日变化较缓慢,通过了解施工日志情况,在该期间由于疫情等不可抗因素,工地在12月中下旬处于基本停滞状态,根据光纤光栅测斜仪监测地下0m至10m的平均位移变化为5.32mm,传统测斜仪监测地下0m至10m的平均位移变化为5.78mm,吻合度为92%。特别注意,该时期不论光纤光栅测斜仪还是传统测斜仪都监测到地下2m至10m处的土体水平位移均发生了回弹现象,该种情况发生的原因可能是由于前期大规模开挖,土体水平位移的幅度较大,而之后处于施工停滞期间的土体进行沉淀,导致下层土体产生了压实回弹的现象。此后至2023年1月4日开挖结束,光纤光栅测斜仪监测到地下0m至10m的平均位移变化为9.94mm,传统测斜仪监测到地下0m至10m的平均位移变化为9.22mm,吻合度为92.2%。

根据上述监测结果,光纤光栅传感测斜仪监测数据与传统测斜仪监测数据基本吻合,且光纤光栅监测数据经过应变-位移算法拟合,曲线较为平滑,能够更加直观地体现土体水平位移的变化。

四、结论

采用光纤光栅串为传感器的光纤光栅传感测斜仪能够准确监测基坑水平位移变化,并基于梯形积分法(TIM)计算出位移的变化量。将光纤光栅传感测斜仪应用于南京惠通产业基地总部大厦基坑项目,与传统测斜仪监测数据对比,两者吻合度较高,且光纤光栅传感测斜仪监测的基坑水平位移变化曲线更加平滑,表达更加直观,具有更好的应用价值。且通过光纤光栅的自动

化智能监测方式避免了传统监测过程中人工操作的误差与繁琐,便于基坑工程的实际应用,具有极大的推广价值。

参考文献

[1] 施豪. 分布式光纤传感技术的深基坑坑底回弹监测应用研究[J]. 北京测绘, 2022, 6(12): 624-1627.
 [2] 毛红梅, 贾良. 地下工程监控量测[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.11
 [3] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 38204—2019 岩土工程仪器 测斜仪[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
 [4] 廖延彪, 立波, 田芋. 中国光纤传感40年[J]. 光学学报, 2018, 38(03): 10-28.
 [5] 廖光荫, 何建新, 朱玉琴, 王莞. 光纤光栅传感器及其应用[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 142-149.
 [6] 杜建安, 李腾, 杨松松等. 深大基坑开挖过程中地下连续墙位移与应力监测研究[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(06): 900-905.
 [7] 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(01): 108-112.
 [8] Sun Y, Shi B, Zhang D, et al. Internal deformation monitoring of slope based on BOTDR[J]. Journal of Sensors, 2016, 1-8.
 [9] 赵鹏冲, 段建立, 孙阳阳, 张文渊, 岳音, 章征林. 光栅粘贴长度对应变传递影响的实验研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(02): 250-252+256.
 [10] 廖延彪. 光纤传感[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.