# 基于光纤光栅技术的坑底隆起监测装置与应用初探

谢渊洁[[1]](#footnote-1)，徐宇1，师文豪2\*，刘凯文2，马飞2

(1昆山市建设工程质量检测中心，江苏 苏州215300，2 苏州科技大学 土木工程学院，江苏 苏州215000)

**摘 要：**基坑开挖过程中实时监测坑底隆起量对于掌握基坑隆起特征，指导基坑安全施工具有重要实际意义。基于光纤光栅感测技术，根据光线光栅位移计拉杆式的工作特点，研制了一套坑底隆起变形监测装置，通过拉杆传动原理将土体隆起变形转换为光纤光栅位移计的拉伸变形实现隆起量监测，基坑工程现场监测结果与传统基坑回弹监测结果基本吻合。该装置能够实现远程操作监测，监测频率高，测量速度快，为坑底隆起自动化智能监测提供了设备条件。

**关键词：**光纤光栅，坑底隆起，拉伸变形，监测

中图分类号：TU433 文献标识码：A

**Preliminary study on the monitoring device for pit bottom heave based on fiber Bragg grating technology and its application**

Xie Yuanjie1，Xu Yu1，Shi Wenhao2\*，Liu Kaiwen2，Ma Fei2

(1. Kunshan Construction Engineering Quality Inspection Center，Suzhou 215300，China；2 School of Civil Engineering，Suzhou University of Science and Technology，Suzhou 215000，China)

**Abstract：**In the process of foundation pit excavation, it is of great practical significance to monitor the basal heaves of foundation pit in real time for clarifying the heave characteristics of foundation pit and guiding its safe construction. Based on the fiber Bragg grating technology and the pull lever working characteristics of the fiber Bragg grating displacement meter, a device is developed for monitoring the basal heaves of foundation pit. The deformation of soil heave is transformed into the tensile deformation of fiber Bragg grating displacement meter by the drive principle of pull rod. The monitoring results of foundation pit are basically consistent with the traditional monitoring results of foundation pit rebound. The device can realize remote operation and monitoring, with high monitoring frequency and fast measuring speed, which provides equipment conditions for automatic intelligent monitoring of the bottom heave.

**Key words：**Fiber Bragg grating，Basal heaves，Tensile deformation，Monitoring

## 0 引言

基坑开挖过程中坑底土体上覆压力卸除及负孔隙水压力消散导致的吸水膨胀与软化等原因都会引起坑底隆起[1]。当场地土质松软、基坑开挖深度较大时，更容易产生坑底隆起现象。坑底隆起不仅会引起基坑工程本身的质量安全问题，也会对附近构（建）筑物产生不利影响，更严重时会引起周边地面塌陷，引发基坑坍塌事故。现场监测坑底隆起量作为基坑施工的重要环节，通过监测获取第一手资料并及时分析预警，对于指导基坑工程安全施工具有重要的实际意义。

坑底隆起量受基坑尺寸、地质情况、基坑暴露时间、周边环境以及施工质量等多方面因素影响。基坑工程变形监测是确保基坑施工安全和质量的重要环节[2]。厉风等[3]结合哈尔滨市清真寺地铁车站深基坑的工程实例，基于监测数据综合分析了基底隆起的原因和规律，并提出了一些处理措施，有效控制了基坑隆起变形。学者们针对基坑隆起变形特征提出了一些隆起监测手段，如分层垂直位移监测系统，水准测量系统，三维激光扫描仪监测系统，超声波传感器在线监测系统等，其中采用回弹监测标和深层沉降标两种监测装置在目前基坑隆起监测实践中较为常用。田志杰等[4]提出采用埋设临时立柱，以临时立柱顶端的沉降代替基坑回弹值，利用全站仪测量深大基坑回弹量的间接测量方法。喻军等[5]基于杭州地区海量的基坑监测数据，通过统计分析，得到了基坑支护结构与地面沉降和坑底隆起的关系。叶俊能等[6]提出了一种基于压差传感技术的坑底隆起监测方法，通过测点处的液面变化来反映竖向位移，并应用于以宁波轨道交通3号线一期工程高塘桥站基坑工程监测。这些监测方法各有所长，用于基坑隆起变形监测能够满足监测要求，但是对于一些变形控制严格、条件特殊、随时间变化复杂的基坑工程，利用传统监测方式监测频率相对较低，难以获取基坑底部土体隆起变化的全过程规律，坑底隆起监测连续性相对不足。当基坑施工到一定深度或出现险情时，需要提高观测频率至1～2次/d，甚至连续观测[7]。

光纤光栅感测具有较好的监测效率，已广泛应用于水利地质工程、土木工程、航空航天等领域[8]。陈卫南[9]将光纤应变监测技术应用于基坑围护结构深层水平位移监测，取得了较好的测试效果。刘凯文等[10]采用密集分布式光纤光栅感测技术应用于坑底隆起监测，并与中心立柱桩变形和上部结构沉降监测对比验证。本文将光纤光栅技术应用于坑底隆起监测，以获取基坑开挖时基坑底部土体变形全过程的空间效应信息，为坑底隆起智能监测提供参考。

## 1 光纤光栅技术原理

光纤布拉格光栅（FBG）相当于一种带通滤波器，满足布拉格反射条件的入射光在FBG处产生反射，其余波长的光则不受影响，可以完全通过，形成反射和透射2种光谱，彼此互补。反射光谱在FBG波长中心位置出现峰值，其工作原理如图1所示。



（a）入射光反射原理



（b）波长变化原理

图1 FBG工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle

FBG的中心波长*λ*B应满足条件为：

 （1）

式中：*n*eff为光纤芯区的有效折射率，Λ为FBG的栅距。

当光栅受到应变、温度等环境因素影响时，栅距和有效折射率均会随之变化，从而使反射光谱中FBG中心波长发生漂移，波长的变化量Δ*λ*B与应变、温度的关系可表示为：

 （2）

式中：Δ*λ*B为FBG中心波长的变化量，*Pe*为有效光弹系数，*ε*为光纤轴向应变，Δ*T*为温度变化量，*α*为光纤的热膨胀系数，*ξ*为光纤的热光系数。

在实际监测中，通过补偿光栅法可以剔除温度变化对中心波长变化的干扰，得到波长变化量与应变的对应关系，然后根据式（3）进行换算可得到监测的位移变化量*D*：

 （3）

式中：*Kp*和*Kt*分别为比例系数和温度补偿系数，均可通过光纤拉伸试验进行标定，*P*s*、P*0分别为位移光栅测量的波长值和初始波长值，*Pt*、*Pt*0分别为温度补偿光栅测量的波长值和初始波长值。

## 2 坑底隆起变形FBG监测装置

### 2.1 装置构成

坑底隆起FBG监测装置由三部分构成，分别为位移测量传感器、无线光纤光栅解调仪和数据分析系统。其中位移测量传感器是由隆起测量管和连接管两部分组合而成，测量管主要用于应变的光纤光栅电信息采集，内部结构相对复杂，包括光纤光栅位移计、隆起测量环、拉杆、横杆、套管和条形孔等，光纤光栅位移计属于拉杆式位移计，将光纤光栅位移计封装后和一根弹簧串联，并用套管进行保护。坑底隆起FBG监测装置示意图如图2所示。

监测时所用的横杆则是从连接头中空的部分穿过去，架设在隆起测量管两侧事先开好的条形孔中。将隆起测量环从隆起测量管底部穿过至条形孔处，用扎带将隆起测量环与横杆绑扎紧。最后用玻璃胶或电工胶布对光纤光栅位移计进行密封处理，防止光纤光栅位移计在钻孔埋设后接触到地下水。在光纤光栅位移计、拉杆和横杆的外表面上均设有防腐涂层，在长期地下环境的使用过程中，能够防止受到腐蚀作用，保证监测装置在使用过程中的稳定性。



（a）整体结构示意图



（b）位移测量传感器示意图

图2 坑底隆起FBG监测装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FBG monitoring device for pit bottom heave

### 2.2 监测原理

测量管的外壁套设有测量环，内部设置有光纤光栅位移计，测量管上部开设有两个对称的竖向条形孔，设置有一贯穿两个条形孔的横杆，横杆两侧与测量环固定连接，两者一起可沿条形孔上下滑动。光纤光栅位移计与测量环之间通过拉杆和横杆连接，当坑底隆起变形产生后，监测装置内的测量环将会随着土体变形在测量管纵向方向滑动，带动拉杆拉动光纤光栅位移计采集监测环的位移信号，监测坑底隆起变形量。装置中的横杆一方面用于固定测量环，使其能够沿条形孔在测量管外滑动，另一方面确保了测量环两侧同步升降，不会出现倾斜和转动的情况。

光纤光栅位移计通过5mm铠装引线光缆与光纤光栅解调仪连接，光纤光栅位移计将隆起信号传输至光纤光栅解调仪，解调波长信息，进一步通过数据处理系统将其转换为监测土体的隆起位移值。光纤光栅解调仪为无线光纤光栅解调仪，数据分析系统可远程操控光纤光栅解调仪，能够远程操作监测，测量速度快，直观显示，能够实现自动化监测。

### 2.3 安装环境要求

首先在需要测量的地基上钻孔至预定深度后，进行清水换浆形成测量孔。然后需向测孔底回填20~40cm的水泥砂浆，再将底端封闭的连接管放入测量孔中，并使其底端插入水泥砂浆中。连接管居中设在测量孔内，向测量孔与连接管之间的间隙中进行缓慢回填，并使回填物料之间没有空隙，以利于隆起监测环更好地随着土层垂向变化而上下移动，填满后即可测量基坑开挖土体隆起量。

装置埋设时，装置上部结构略低于基坑底部设计标高处地面，在上面覆盖土并压实，以保证与周围土体运动一致。埋设点位一般选择在靠近降水井或格构柱附近，连接管随土体开挖进行加固处理，每2m一个点与降水井或格构柱固定，保证连接管不受施工干扰，始终处于垂直状态。在测斜管内可设置有多段隆起测量管，通过多段隆起测量管能够对不同层的土体进行监测。

## 3 光纤光栅位移计拉伸标定实验

为了检验光栅光纤位移计在受拉条件下测量变形的准确性，开展光纤光栅位移计拉伸标定实验，同时采用两种不同外径的应变光缆辅助测量进行对比验证，0.9mm和2mm的光缆分布式粘贴在光纤光栅位移计两侧表面，并在端部进行熔接串联。光纤光栅位移计与拉杆连接后固定在实验台上，并将一端用夹具固定不动，另一端自由，通过拉动拉杆进行变形控制，如图3所示。试验过程共分20级对拉杆进行拉伸，每级拉伸5mm，每次拉伸稳定后再进行测量，采用三次测量取平均值进行实验。



（a）分布式应变光缆示意图



（b）拉伸试验平台

图3 光纤光栅位移计拉伸实验

Fig. 3 Tensile experiment of fiber Grating displacement meter

图4给出了光纤光栅位移计拉伸标定实验曲线。由图4(a)可知，当拉伸小于25mm时，0.9mm和2.0mm两种分布式光缆在测量区间范围内的应变曲线表现出较好的一致性，当拉伸达到25mm时，2.0mm光缆发生了拉伸断裂，表现为应变曲线随着位置呈不规则波动。由于光缆最大测量范围约20000微应变，理论上1.4m长的光缆测量的最大变形为28mm，实际上，室内标定实验显中2.0mm光缆拉伸至25mm时即发生了断裂。因此，对于基坑隆起变形较大情况下，应用分布式光缆测量变形时有一定局限性，可见光纤光栅位移计测量拉伸变形的适用范围优于分布式光缆。图4(b)表明，在拉伸100mm范围内，光纤光栅位移计测量的拉伸变形与波长具有线性相关性，通过此次标定实验测得光纤光栅位移计的初始波长P0=1533.339 nm，温补光栅的初始波长Pt0=1529.093 nm。



（a）分布式光缆测量的应变



（b）波长与拉伸量的关系

图4 标定实验曲线

Fig. 4 Curves of the calibration tests

## 4 坑底隆起现场监测工程应用

### 4.1 工程概况

以苏州昆山市泰山路东侧的泰山路疏导点基坑工程为例，进行坑底隆起现场测试应用。该工程中地下车库约6450m2，框架结构，桩筏基础，车库底板标高为黄海-6.75 m，基坑开挖深度为10.15～10.65m。坑中坑落深1.0～1.5m，均按照坡角60°放坡开挖。

基坑开挖深度范围内揭露土层主要有第①至第④层。地层参数详见表1。孔隙水主要赋存于第①层素填土等浅部土层中，稳定水位埋深在0.88~1.56之间。微承压水主要赋存于第⑥至⑧层土中，微承压水稳定水位埋深约2.8m，富水性和透水性均较好。

表1土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soils

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 层号 | 名称 | 重度(kN/m3) | 黏聚力(kPa) | 摩擦角(°) |
| ① | 素填土 | 17.5 | 12.0 | 10.5 |
| ② | 粉质黏土 | 18.6 | 26.9 | 13.2 |
| ③ | 淤泥质粉质黏土 | 17.9 | 8.0 | 8.9 |
| ④ | 黏土 | 19.6 | 48.9 | 14.6 |
| ⑤ | 粉质黏土 | 19.0 | 32.9 | 13.1 |
| ⑥-1 | 粉土 | 18.5 | 7.1 | 22.8 |
| ⑥-2 | 粉土 | 18.5 | 6.6 | 24.0 |
| ⑥-3 | 粉砂 | 18.5 | 4.4 | 26.7 |
| ⑦ | 粉土夹粉质黏土 | 18.6 | 7.4 | 23.2 |
| ⑧ | 粉砂 | 18.6 | 4.5 | 26.8 |

基坑采用钻孔灌注桩+钢筋混凝土内支撑+水泥土搅拌桩止水帷幕的围护结构。基坑分为A、B、C、D四块区域，根据分区开挖原则，开挖顺序依次为B、D、A、C。当D区域开挖至底板设计标高后，在该区域布置一测点进行坑底隆起变形监测，此时A、C区域尚未进行土方开挖，监测点分布如图5所示。

### 4.2 监测方案

监测时间为2020年10月12日至18日，18日起该区域将开始浇筑混凝土底板。监测期间设置每天上午9点开始监测，每隔一小时记录一次，直到18点，每天实时监测10次。为了对比分析，在同一点位采取铅锤钢尺法与辅助杆相配合的方法进行传统水准仪测试，每天下午1点测量一次。



（a）监测点布置示意图



（b）监测点现场照片

图5 泰山路基坑隆起监测点

Fig. 5 Monitoring point for foundation pit heave near the Taishan road

### 4.3 监测结果

通过连续7天监测，得到被测点的温补波长和位移波长，根据式（3）计算出监测点位置处土体产生的隆起量。得到此次监测点的隆起量曲线如图6所示。从图中可以看出，12日至17日期间坑底隆起量呈现不断增大趋势，18日起逐渐开始施做混凝土底板，对坑底隆起量起到一定抑制作用，坑底隆起量开始呈一定下降趋势。7天的测量数据中，应用该装置测得最大隆起量出现在17日为13.77mm，最小隆起量出现在初始测试时为3.25mm。

将该测量值与传统方法测量结果对比分析，可以看出两种测量方法所监测隆起量变化趋势基本相同，两个测量值之间的误差基本在10%以内。进一步说明基于光纤光栅的坑底隆起变形测量装置能够较准确地监测基坑底部土体隆起量，达到坑底隆起实时监测的目的。



图6 坑底隆起监测结果

Fig. 6 Monitoring results of pit bottom heave

## 5 结论

针对基坑开挖引起的坑底隆起变形监测问题，基于光纤光栅感测技术和拉杆传动原理，研制了坑底隆起变形监测装置，并进行了初步的工程应用研究，得到结论如下：

（1）光纤光栅位移计拉伸变形量能够满足坑底隆起变形量监测要求，在坑底隆起变形较大的情况下，该装置相比分布式应变光缆适用性更强。

（2）该装置具有操作简单、便于携带等优点，能够远程操作监测，且测量速度快，为自动化智能监测提供设备条件。

（3）应用该装置监测的昆山市泰山路基坑隆起变形量与传统基坑回弹监测结果基本吻合，表现出基坑开挖完成后，坑底隆起变形量随时间增加呈增大趋势，施作混凝土底板后坑底隆起量逐渐得到抑制。

（4）本文研究为基坑隆起监测提供了一种新思路，由于监测数据有限，该装置用于坑底隆起监测的普适性，需通过更多的基坑工程实测数据进一步完善。

## 参考文献

[1] 郑刚, 焦莹, 李竹. 软土地区深基坑工程存在的变形与稳定问题及其控制—软土地区深基坑坑底隆起变形问题[J]. 施工技术, 2011, 40(10): 10-15. (Zheng Gang, Jiao Ying, Li Zhu. Stability and deformation problems during deep foundation excavation in soft soil area and their control measures: heave deformation due to deep foundation excavation in soft soil area[J]. Construction Technology, 2011, 40 (10): 10-15. (in Chinese))

[2] 严伯铎, 苏玉玺, 王宇平, 等. 基坑工程监测常用方法精度分析[J]. 工程勘察, 2018, 46(03): 1-5+67. (Yan Boduo, Su Yuxi, Wang Yuping, et al. Precision analysis of the common used method for excavation engineering monitoring[J]. Geotechnical Investigation ＆ Surveying, 2018, 46(03): 1-5+67. (in Chinese)).

[3] 厉风, 李宏, 智慧渊. 地铁车站深基坑施工中基底隆起规律及控制关键技术研究[J]. 现代交通技术, 2020, 17(06): 89-92. (Li Feng, Li Hong, Zhi Huiyuan. Research on the law and control key technology of base heave in the construction of deep found ation pit of subway station[J]. Modern Transportation Technology, 2020, 17(06): 89-92. (in Chinese))

[4] 田志杰. 关于深大基坑回弹检测方法的探讨[J]. 铁道建筑技术, 2010(10): 62-65. (Tian Zhijie. On monitoring method for rebound of deep foundation pit[J]. Railway Construction Technology, 2010(10): 62- 65. (in Chinese))

[5] 喻军, 龚晓南, 李元海. 基于海量数据的深基坑本体变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(s2): 319- 324. (Yu Jun, Gong Xia-nan, Li Yuanhai. Deformation characteristics of deep excavations based on mass data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(s2): 319- 324. (in Chinese))

[6] 叶俊能, 尹铁峰, 杜培贞. 基于压差传感技术的坑底隆起监测方法及应用[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 96-101. (Ye Junneng, Yin Tiefeng, Du Peizhen. Monitoring method of bottom heave based on pressure difference sensing technique and its application[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(6): 96-101. (in Chinese))

[7] 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. (Shi Bin, Zhang Dan, Zhu Honghu. Distributed Fiber Optic Sensing for Geoengineering Monitoring[M]. Beijing: Science Publishers, 2019. (in Chinese))

[8] 王双龙, 宋军, 吴伟理, 等. 基于变形速率的深基坑工程监测精度研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(07): 41-44+54. (Wang Shuanglong, Song Jun, Wu Weili, et al. Study on accuracy of deep foundation pit monitoring based on the deformation rate[J]. Geotechnical Investigation ＆ Surveying, 2021, 49(07): 41-44+54. (in Chinese))

[9] 陈卫南. 基于应变监测的围护结构深层水平位移监测研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(01): 13-18+72. (ChenWeinan Study on monitoring of deep horizontal displacement of retaining structure based on strain monitoring[J]. Geotechnical Investigation ＆ Surveying, 2021, 49(01): 13-18+72. (in Chinese))

[10] 刘凯文, 王源, 吴静红, 等. 基于密集分布式光纤光栅感测技术的基坑底部隆起研究[J].煤炭科技, 2021, 42(01): 102-108. (Liu Kaiwen, Wang Yuan, Wu Jinghong, et al. Research on heave of foundation pit bottom based on dense distributed FBG sensing technology[J]. Coal Science ＆ Technology Magazine, 2021, 42(01): 102-108. (in Chinese))

1. 收稿日期：

作者简介：谢渊洁（1985―），男（汉族），江苏无锡人，硕士，高级工程师。

\*通讯作者：师文豪（1988―），男（汉族），河南洛阳人，博士，讲师，Email：shiwenhaoneu@126.com。

基金项目：江苏省自然科学青年基金项目（BK20200993） [↑](#footnote-ref-1)