

基于光纤布喇格光栅的测斜技术实验研究

刘 斌^{1,2}, 黄肖迪¹, 徐 剑³

(1. 解放军理工大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 68023 部队, 甘肃 兰州 730050; 3. 61243 部队, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:与传统的测斜仪相比,基于光纤布喇格光栅(FBG)的测斜技术可实现自动实时监测。该文首先介绍了基于光纤光栅传感技术的测斜仪,通过建立理论模型和差分算法,根据测点处 FBG 测得的应变值计算出该点的挠度值,并将此挠度值与百分表实测挠度进行对比。通过实验验证了光纤光栅测斜技术的可行性。同时对 FBG 粘贴在 3 种材质测斜管表面的应变传递率进行了标定。结果表明,在聚氯乙烯(PVC)管的应变传递率可达 95%,且 PVC 管的价格低,因此更适合在实际工程中应用。

关键词:光纤布喇格光栅(FBG);测斜;实时监测;差分算法;应变传递率

中图分类号:TN253

文献标识码:A

Experimental Study on Incline-measurement Technology Based on Fiber Bragg Grating

LIU Bin^{1,2}, HUANG Xiaodi¹, XU Jian¹

(1. State Key Lab. of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, PLA University of Science and

Technology, Nanjing 210007, China; 2. Troops 68023, Lanzhou 730050, China; 3. Troops 61243, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Compared with the convention inclinometer, the incline-measurement technology based on FBG can realize automatic real-time monitoring. Firstly, the inclinometer based on FBG is introduced. Then the deflection value of the measuring point is calculated according to the strain measured by FBG through the theoretical model and the difference algorithm, and compared with the measured deflection value in the dial indicator. The feasibility of incline-measurement technology based on FBG is verified by experiment, and the strain transfer rate of FBG bonded on the surface of the inclined tube fabricated by three kinds of materials is calibrated. The experimental results show that the strain transfer rate of PVC tube is 95%. Since the price PVC tube is relatively low, it is more suitable for engineering applications.

Key words: fiber Bragg grating(FBG); incline-measurement; real-time monitoring; difference algorithm; strain transfer rate

0 引言

随着现代城市建设的立体化,一方面高层建筑成为城市建筑的主要形式,另一方面城市地下空间也不断得到开发利用,如高层建筑的多层地下室、地铁及其车站、地下停车场、地下人防工程及多种用途的地下民用和工业设施等在城市内不断兴建,由此产生大量的深基坑工程。为保证施工的顺利安全进行,必须对基坑工程进行全面的监测,并对基坑工程的安全性作出及时的预测和评估。其中,土体和桩体的深层水平位移监测是评价基坑稳定性和对周围

建筑影响程度的重要内容。

传统的深层水平位移测量主要采用测斜仪法,但人工测量耗时较长,实时监测难,且人为测量的偶然性误差较大^[1-3];只能进行现场测量,无法实现远程监测;测量仪器的抗干扰性、耐久性和长期稳定性等特点较差,难以适应长期监测的要求。本文研究的光纤光栅传感器则具有抗电磁干扰、抗腐蚀和耐久性好等特点,且其体积小,质量小,便于铺设和安装,植入后对监测对象的性能和力学参数等影响较小^[4-6]。

收稿日期:2016-12-05

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)基金资助项目(2010CB732003);江苏省自然科学基金资助项目(BK20141067)

作者简介:刘斌(1987-),男,甘肃兰州人,硕士生,主要从事岩土工程的研究。导师:许宏发(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程的教学和研究工作。通信作者:黄肖迪,男,浙江绍兴人,硕士生,主要从事国防工程结构健康监测。E-mail:1170464993@qq.com。

20世纪80年代后,国内、外研究人员开始将光纤传感技术应用于岩土工程的结构健康监测。裴华富等^[7]利用光纤布喇格光栅传感技术对攀田某高速公路的边坡进行了长期的安全监测研究。M. Hisham等^[8]利用分布式光纤传感器对基坑的桩体位移进行了监测。Zhang等^[9]开发了一种新型光纤光栅测斜仪用于边坡的变形监测。

本文通过实验对基于光纤光栅的测斜仪进行了研究,建立了理论模型将测斜管表面的应变转换为其挠度,并通过差分算法代替积分来计算出挠度值。本次实验采用3种不同材质的测斜管进行测量,通过实验标定其应变传递率,并找出一种更适合于工程应用的测斜管。

1 实验

本次实验在3 m长的测斜管外侧成180°的2个方向上分别粘贴光栅串,光栅间隔为0.5 m,并将布设好的光纤光栅传感器两端简支,加载方式为中间悬挂砝码逐级加载。实验对聚氯乙烯(PVC)、铝合金及丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)这3种最常见的测斜管进行多次加载,以减小偶然误差带来的影响。因为加载实验在室内进行,且加载时间较短,不考虑温度变化对光栅布喇格光纤(FBG)的影响。在粘贴FBG的相应位置放置百分表,以检验FBG测量数据及理论模型的合理性。实验装置如图1所示。

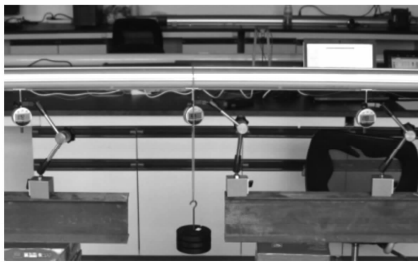


图1 实验装置

实验所用解调仪为美国MOI公司生产的sm125-500静态光纤光栅解调仪。该解调仪可识别中心波长为1 510~1 590 nm的光纤光栅传感器,波长分辨率可达1 pm,能实现4通道同步2 Hz采样,外接扩展模块后最多可进行16通道同时测量。

2 测斜管挠度理论推导

如图2所示,对于均匀弹性圆形测斜管,其任意点因弯曲产生的应变 $\epsilon_m(r, \theta, z)$ (其中 r 为任意点距圆心的距离, θ 为任意点与 r 方向的夹角, z 为任意

点在 z 方向上的距离)与其曲率半径 $\rho(z)$ 的关系为

$$\epsilon_m(r, \theta, z) = \frac{y(r, \theta, z)}{\rho(z)} \quad (1)$$

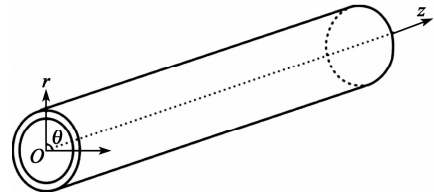


图2 测斜管理论模型

本文中光纤位于测斜管外侧,且光纤与最大应变方向的夹角 $\theta = 0^\circ$,故

$$\epsilon_m(z) = \frac{R}{\rho(z)} \quad (2)$$

式中 R 为测斜管外径。又由

$$\frac{d^2 \omega(z)}{dz^2} = \frac{M(z)}{EI} = \frac{1}{\rho(z)} \quad (3)$$

式中 ω 为测斜管的挠度; M 为弯矩; EI 为刚度。则

$$\frac{d^2 \omega(z)}{dz^2} = \frac{\epsilon_m(z)}{R} \quad (4)$$

隋海波等^[10]用积分法计算挠度,需要对应变曲线进行拟合,误差会逐渐累积而导致计算结果偏差较大。因此本文通过差分法求解挠度。该方法可反映工程中离散变量的取值与变化规律,通过离散变量间满足的平衡关系来建立差分方程。一阶差分方程为

$$\Delta f = \frac{f(i+1) - f(i)}{h} \quad (5)$$

相应的二阶差分方程为

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta f) &= \\ \frac{1}{h} \left[\frac{f(i+1) - f(i)}{h} - \frac{f(i) - f(i-1)}{h} \right] &= \\ \frac{f(i+1) - 2f(i) + f(i-1))}{h^2} &= \frac{M}{EI} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 h 为间隔。因此,光纤光栅测斜仪的应力、应变关系方程为

$$\frac{f(i+1) - 2f(i) + f(i-1))}{h^2} = \frac{1}{R} \frac{MR}{EI} = \frac{\epsilon_i}{R} \quad (7)$$

式(7)可改写为以下的矩阵形式:

$$\frac{R}{h^2} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 f_0, f_{n+1} 为边界端的挠度值; $f_i (i=1, \cdots, n)$ 为

第 i 个光栅传感器位置的挠度值; h 为相邻 2 个传感器间的距离, 文中取 1 m; $\epsilon_i (i=1, \dots, n)$ 为第 i 个光栅传感器测得的应变值。本文中测斜管采用两端简支, 因此边界点的挠度 f_0 和 f_{n+1} 均为 0, 代入式 (8) 可得

$$\frac{R}{h^2} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

消去式 (9) 中系数矩阵第一列和最后一列, 改写成以下形式:

$$\frac{R}{h^2} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式 (10) 中的系数矩阵为方阵且可逆, 因此, 可通过矩阵运算直接求得位移和传感器所测应变的关系, 即

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \frac{h^2}{R} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 1 & -2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 实验数据分析

根据理论推导, 将各组测得的应变值换算为挠度值, 并与百分表测量结果进行对比, 如图 3~5 所示。

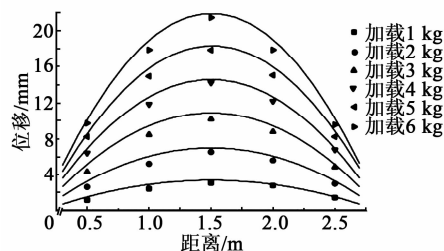


图3 ABS管测量结果对比

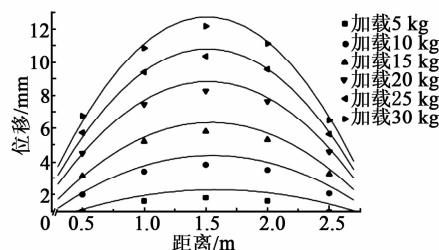


图4 铝合金管测量结果对比

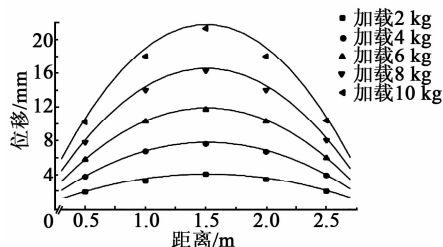


图5 PVC管测量结果对比

图 5 中各曲线由百分表测量挠度拟合得到, 数据点由 FBG 测量应变计算得到。由图 5 可知, 通过理论模型将 FBG 测量的应变值转换成的挠度值与相应位置百分表实际测得挠度值较吻合。这不仅说明了基于光纤光栅的测斜仪在实际工程测量中有很好的可行性, 也验证了理论模型的合理性。由图还可看出, 由 FBG 得到的挠度值普遍小于百分表的测量值, 这是由于 FBG 与测斜管表面存在粘结层, 应变在传递过程中会产生损耗, 从而导致 FBG 测量的应变值小于实际应变, 即两者之间存在一个应变传递率。测斜管材质不同会对 FBG 的应变传递率产生影响。由图也可看出 3 种材质测斜管的应变传递率不同。其中 FBG 粘贴在 PVC 管表面的应变传递率约为 95%, 而在 ABS 管和铝合金管表面分别为 91% 和 89%。

4 结论

本文对基于 FBG 的测斜技术进行了研究, 通过建立理论模型将测斜管表面的应变推算为其挠度值, 并对 3 种不同材质的测斜管进行了实验验证, 可得结论:

1) 通过在测斜管表面粘贴 FBG 可很好地测量出其挠度值。因此, 基于 FBG 的测斜技术可代替传统测斜仪对深基坑和边坡的土体水平位移进行测量。

2) 通过梁的弯曲理论公式和差分算法, 可以由 FBG 测点的应变值计算出测斜管的位移值。

3) 基体材料会对 FBG 的应变传递率产生影响, 在 PVC 管上的应变传递率可达 95%, 且其价格低, 因此更适合在实际工程中应用。

参考文献:

- [1] 叶帅华, 陈长流, 寇巍巍, 等. 兰州市某深基坑工程位移监测及变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 440-445.

- Displacement monitoring and deformation characteristics of a deep foundation pit in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2):440-445.
- [2] 陈昆, 闫澎旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4):1075-1082.
CHEN Kun, YAN Pengwang, SUN Liqiang, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4):1075-1082.
- [3] 郑艳, 麻凤海, 金鑫. 地铁车站深基坑施工中的变形监测研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 149-154.
ZHENG Yan, MA Fenghai, JIN Xin. Study and monitoring on deformation during deep foundation pit construction for subway station[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2012, 31(2): 149-154.
- [4] UDD E, KUNZLER M, LAYOR M H, et al. Fiber grating systems for traffic monitoring[C]// S. l.: Proceedings of SPIE, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, 2001:510-514.
- [5] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. 工程地质学报, 2008, 16(01): 135-143.
SUI Haibo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Review on fiber optic sensor-based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(01): 135-143.
- [6] CHAN T H, YU L, TAM H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: background and experimental observation[J]. Engineering Structures, 2006, 28(5):648-659.
- [7] 裴华富, 殷建华, 朱鸿鹄, 等. 基于光纤光栅传感技术的边坡原位测斜及稳定性评估方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1570-1576.
PEI Huafu, YIN Jianhua, ZHU Honghu, et al. In-situ monitoring of displacements and stability evaluation of slope based on fiber bragg grating sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1570-1576.
- [8] HISHAM M, PETER J, KENICHI S, et al. Distributed optical fiber strain sensing in a secant piled wall[C]// S. l.: Proceedings of the Seventh International Symposium on Filed Measurements in Geomechanics, 2007: 22-31.
- [9] ZHANG Hong, WU Jianjia, HUANG Xianming. Application of fiber Bragg grating inclinometer to deformation monitoring of geotechnical slope[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2015, 34(4): 60-65.
- [10] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 基坑工程 BOTDR 分布式光纤监测技术研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 184-191.
SUI Haibo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Distributed optical fiber sensor-based monitoring for foundation pit engineering[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 184-191.
-
- (上接第 762 页)
- [10] ZHOU Q, KENNEDY B J. High temperature structure of BaBiO_{3-x} synchrotron X-ray powder diffraction study [J]. Solid State Commun, 2004, 132(6): 389-392.
- [11] KLINKOVA L A, NIKOLAICHIK V I, BARKOVSKII N V. Thermal stability of the perovskite BaBiO_3 [J]. Solid State Chem, 1999, 146(2): 439-447.
- [12] SLEIGHT A W, GILLSON J L, BIERSTED P E. High-temperature superconductivity in the $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ system[J]. Solid State Commun, 1975, 17(1): 27-28.
- [13] CAVA R J, BATLOGG B, KRAJEWSKI J J, et al. Superconductivity near 70 K in a new family of layered copper oxides[J]. Nature, 1988, 336(6196):211-214.
- [14] THORNTON G, JACOBSON A J. A neutron diffraction determination of the structures of $\text{Ba}_2\text{SbVBi}^{\text{III}}\text{O}_6$ and $\text{Ba}_2\text{BiVBi}^{\text{III}}\text{O}_6$ [J]. Acta Crystallogr B, 1978, 34(2): 351-354.
- [15] LUO Y, LIU X Y, LI X Q. Electrical properties of binder-free thick film $\text{BaY}_x\text{Bi}_{1-x}\text{O}_3$ NTC thermistors [J]. J Alloy Compd, 2011, 509(2): 463-465.
- [16] 周秀娟, 袁昌来, 陈国华, 等. Mn 掺杂 $\text{Ca}_{0.16}\text{Sr}_{0.04}\text{Li}_{0.4}\text{Nd}_{0.4}\text{TiO}_3$ 微波介质陶瓷介电性能的研究[J]. 人工晶体学报, 2014(9):2224-2230.
ZHOU X J, YUAN C L, CHEN G H, et al. Dielectric properties of Mn-doped $\text{Ca}_{0.16}\text{Sr}_{0.04}\text{Li}_{0.4}\text{Nd}_{0.4}\text{TiO}_3$ Microwave dielectric ceramics [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014(9):2224-2230.