

DOI: 10.11779/CJGE2014S2087

基于 BOTDA 的地下连续墙分布式变形监测技术研究

丁 勇¹, 王 平², 李鹏飞¹, 夏 涛¹, 唐金龙¹

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 中国第一冶金建设公司, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 介绍了一种利用 BOTDA 分布式光纤传感技术, 监测地下连续墙在基坑开挖过程中受力变形过程的方法。通过在地下连续墙钢筋和 H 型钢上布设分布式光纤传感器, 使之能够在基坑开挖过程中自动获取桩身的应变、弯矩、挠度等数据; 采用双线的测量方法, 具有温度自补偿的能力。

关键词: 地下连续墙; BOTDA; 应变; 弯矩; 挠度; 温度自补偿

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0500-04

作者简介: 丁 勇(1977-), 男, 江苏海安人, 副教授, 从事岩土工程安全监测研究。E-mail: danpub1977@gmail.com。

Monitoring technology of deformation of continuous concrete wall based on BOTDA

DING Yong¹, WANG Ping², LI Peng-fei¹, XIA Tao¹, TANG Jin-long¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. China First Metallurgical Construction Co., Ltd., Wuhan 430081, China)

Abstract: The monitoring method for deformation force of continuous concrete wall during the excavation process of a foundation pit is introduced by using the BOTDA distributed optical fiber sensing technology. Through the distributed optical fiber on the continuous concrete wall of steel and H steel, this technology can automatically acquire the data of strain, bending moment, deflection of piles during the excavation process. The monitoring method adopts double-line measurement and has the capability to self temperature compensation.

Key words: continuous concrete wall; BOTDA; strain; bending moment; deflection; temperature compensation

0 引 言

在工程应用中地下连续墙已被公认为是深基坑工程最佳的挡土结构之一^[1]。传统的地下连续墙监测方法有监测点垂直位移监测、监测点平面位移监测、地下连续墙深层侧向变形监测、地下连续墙应力监测等, 传统监测方法的主要缺点是不能做到实时监测, 监测结果单一, 费时费人工, 不能测量连续的应变、弯矩和水平位移值^[2-3]。

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来的, 光波不怕电磁干扰, 易为各种光探测器件接收。光纤工作频带宽, 动态范围大, 适合于远程监测, 是一种优良的低损耗传输线。因此, 光纤传感技术一问世就受到极大重视, 几乎在各个领域得到研究与应用^[4-6], 成为传感技术的先导^[7]。

本文推出新的监测方法, 运用光纤监测技术在基坑开挖过程中对地下连续墙进行监测, 通过在地下连续墙钢筋和 H 型钢上布设分布式光纤, 使之能够在基坑开挖过程中自动获取桩身的应变、弯矩、挠度等数

据。

1 地下连续墙分布式光纤监测技术

1.1 BOTDA 工作原理

布里渊散射同时受应变和温度的影响, 当光纤沿线的温度发生变化或者存在轴向应变时, 光纤中的背向布里渊散射光的频率将发生漂移, 频率的漂移量与光纤应变和温度的变化呈良好的线性关系, 因此通过测量光纤中的背向布里渊散射光的频率漂移量就可以得到光纤沿线温度和应变的分布信息^[8]。

BOTDA 就是利用这种线性变化关系来工作的, 光纤两端注入脉冲光和连续光, 制造布里渊放大效应(受激布里渊), 根据光信号布里渊频移与光纤温度和轴向应变之间的线性变化关系(见公式(1)), 在温度

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30920130112008); 海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201005006)

收稿日期: 2014-07-28

补偿(或应变补偿)条件下得到光纤的应变变化量(或温度变化量)。

$$\Delta V_B = C_{vt} \Delta t + C_{ve} \Delta \varepsilon, \quad (1)$$

式中, ΔV_B 为布里渊频移量, C_{vt} 为布里渊频移温度系数, C_{ve} 为布里渊频移应变系数, Δt 为温度变化量; $\Delta \varepsilon$ 为应变变化量。

1.2 分布式光纤的布设

在不受气候条件影响的环境(最好是室内, 有遮阳篷的室外也可, 主要是防止雨水和紫外光对光纤和结构胶的破坏)中对钢筋笼进行光纤铺设, 采用结构胶进行粘贴。

(1) 钢筋笼中间位置钢筋上光纤布设

钢筋本身所提供的可以布设光纤的空间很小, 为保证光纤能够顺利粘贴到钢筋上, 首先要对光纤做定点布设, 即用捆扎带固定光纤位置, 进一步用 AB 胶按捆扎带的间隔(1 m)将光纤拉紧固定在钢筋上, 最后在光纤和钢筋上涂刷结构胶。最终通过焊接在钢筋笼上的钢筋凹槽将光纤牵引到上述的铁箱中(具体参照图 1)。

(2) 钢筋笼两边型钢上光纤布设

在焊接完成后, 将型钢平放, 朝钢筋笼一面朝上, 在两边各距离翼缘 10 cm 位置焊接 2 根钢筋(总数 4 根), 也就是说利用 2 根钢筋的缝隙(间距 1 cm)形成一个凹槽, 用以放置光纤, 待光纤放置完成后涂刷结构胶。并在型钢顶部设置一个带可开合式门的小铁箱, 小铁箱是焊接在型钢上的, 主要是临时放置光纤的, 等钢筋笼上光纤全部布设完成, 钢筋笼也捆扎结束后, 将外露的光纤统一牵引到图 1 所述的铁箱中, 光纤同样经焊接的钢筋凹槽牵引。

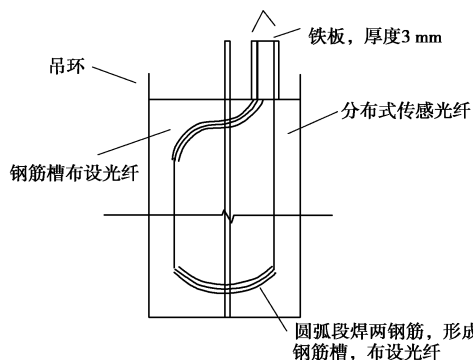


图 1 钢筋混凝土地下连续墙分布式光纤布设示意图

Fig. 1 Layout of distributed optical fiber of reinforced continuous concrete wall

在钢筋笼上沿竖向按 U 形布设分布式传感光纤, 朝向基坑和背向基坑的表面各一条(见图 2), 在接头处的 H 型钢内表面按 U 形布设分布式传感光纤, 各个

接头各一条(见图 3), 因此, 对每个受测钢筋笼布设 4 条分布式传感光纤, 测量基坑开挖过程中钢筋混凝土地下连续墙沿竖向连续的应变、弯矩和水平位移。

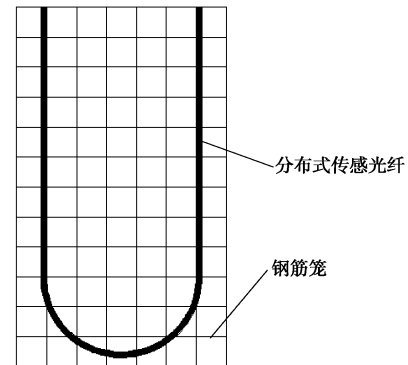


图 2 钢筋笼中部光纤布设示意图

Fig. 2 Layout of central fiber reinforcement cage

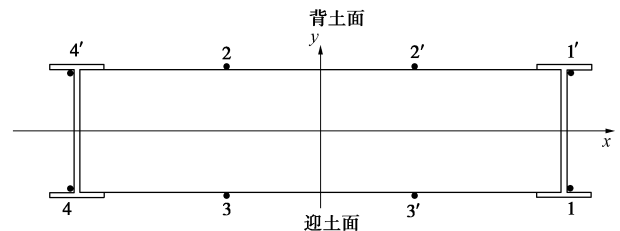


图 3 钢筋笼接头光纤布设示意图

Fig. 3 Layout of connector of fiber reinforcement cage

2 算法分析

2.1 确定中性轴位置

由于受地连墙本身材料性质的不均匀性等因素的影响, 中性轴的位置不一定与中心位置重合, 因此, 在中性轴不确定的情况下, 必须采用数据处理的方法来回避中性轴位置在计算桩身弯矩、挠度中的影响。

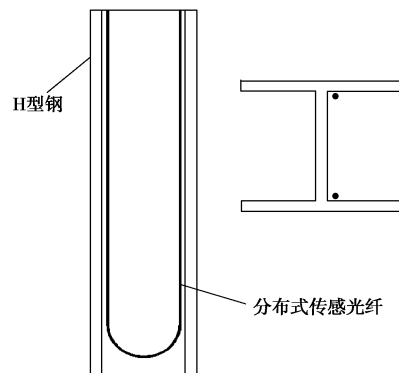


图 4 地连墙钢筋笼横截面光纤布设

Fig. 4 Layout of wall section of fiber reinforcement cage

假定以中性层与地连墙横截面的交线为 x 轴, 横截面的对称轴为 y 轴(见图 4)。在截面处中#2'光纤和

#3'光纤相对于中性面的距离分别为 $y_{2'}$ 和 $y_{3'}$ ，那么根据式 (2) 和 (3) 可推导出式 (4)。

$$M(x) = \frac{I_z E \varepsilon_{2'}(x)}{y_{2'}(x)} = \frac{I_z E \varepsilon_{3'}(x)}{y_{3'}(x)}, \quad (2)$$

$$Y(x) = y_{2'}(x) - y_{3'}(x), \quad (3)$$

$$M(x) = \frac{I_z E [\varepsilon_{2'}(x) - \varepsilon_{3'}(x)]}{Y(x)}. \quad (4)$$

式中 $M(x)$ 为某截面处桩身弯矩； $Y(x)$ 为某截面处 #2' 光纤与 #3' 光纤之间的距离； $\varepsilon_{3'}(x)$ 为某截面处 #3' 光纤受结构作用而产生的真实应变； $\varepsilon_{2'}(x)$ 为某截面处 #2' 光纤受结构作用而产生的真实应变； E 为桩身材料弹性模量（桩身各截面基本一致）； I_z 为桩身截面惯性矩（桩身各截面基本一致）。

虽然不能确知中性轴的位置，但 #2' 光纤与 #3' 光纤之间的距离是可以通过精确测量得到的。又因为 #2' 光纤与 #3' 光纤都是铺设在对称位置，两条光纤基本保持水平，因此 $Y(x)=Y$ ，式 (4) 可简化成为

$$M(x) = \frac{I_z E [\varepsilon_{2'}(x) - \varepsilon_{3'}(x)]}{Y}. \quad (5)$$

根据式 (5) 得出的弯矩分布，利用挠曲线近似微分方程计算桩身挠度分布：

$$I_z E y_D(x) = - \int \left[\int M(x) dx \right] dx + CX + D, \quad (6)$$

式中， C 和 D 为根据边界条件所确定的参数， y_D 为某截面处的挠度。

公式 (6) 中 C 和 D 两个参数值根据基坑的土质情况确定。如果基坑土质较为松软，桩底在基坑开挖的时候会有转角产生，将桩底的侧移量限定为 0，但是桩底的转角值在施工时又无法测量得到。此时可以利用其它监测方式来获得桩顶的水平位移，作为边界条件，计算桩身的侧移量。

如果基坑土质较好，型钢入土后，桩体和土体的接触可以理解成刚性，即在桩底的位移和转角都为 0，而其简化模型也就变成了悬臂梁。如此简化的模型，不需要其它辅助数据，在得到桩身应变的前提下，就能够方便地通过积分获得桩体的挠度分布，大大方便了数据处理，也减小了测量误差。

2.2 温度自补偿

由式 (1) 可知，BOTDA 的测量值包含了温度和应变的共同影响，假定 BOTDA 的测量值为应变测量值，则该应变测量值由两个部分组成^[9]：

$$\varepsilon_c = \varepsilon_e + \varepsilon_t, \quad (7)$$

式中， ε_c 是光纤的应变测量值， ε_t 是环境温度变化造成测量值上的假应变， ε_e 是光纤受结构变形而产生的真实应变。

$$\varepsilon_{2'e} - \varepsilon_{3'e} = (\varepsilon_{2'c} - \varepsilon_{2't}) - (\varepsilon_{3'c} - \varepsilon_{3't}). \quad (8)$$

在同一个温度场环境内的不同光纤，它们的 ε_t 是相同的。因此，式 (8) 可改写为

$$\varepsilon_{2'e} - \varepsilon_{3'e} = \varepsilon_{2'c} - \varepsilon_{3'c}, \quad (9)$$

由式 (5) 和式 (9) 可得

$$M(x) = \frac{I_z E [\varepsilon_{2'c}(x) - \varepsilon_{3'c}(x)]}{Y}. \quad (10)$$

因此，在计算桩身弯矩时可以通过钢筋笼上光纤应变测量值的差值来进行温度补偿，而不需要另外铺设专用的温度补偿光纤，从而实现了钢筋笼的温度自补偿功能。

3 工程案例

武汉绿地中心 606 m 高楼，建于长江之滨，地质条件复杂。大楼基坑周长 900 m，挖深 28~30 m，基坑采用钢筋混凝土内支撑和钢筋混凝土地下连续墙作为基坑支护结构，其中钢筋混凝土内支撑有 4 道，钢筋混凝土地下连续墙深 55 m。

针对大楼基坑的支护方案，考虑主楼和裙楼分两期施工的具体情况，计划采用 BOTDA 分布式光纤传感技术，选取塔楼区域的四幅地墙槽段和两段内支撑，进行全天候光纤监测，获取基坑开挖过程中钢筋混凝土地下连续墙和钢筋混凝土内支撑的应变、弯矩、水平位移等受力变形数据。

基坑开挖过程中，安全监测系统将实时获取钢筋混凝土地下连续墙的内外侧变形数据（见图 5，6）。

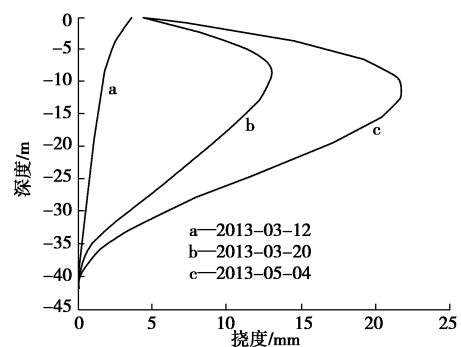


图 5 地连墙桩身挠度分布图

Fig. 5 Distribution of pile deflection of continuous concrete wall

3 月 12 日开挖至第一道支撑，所以在地下连续墙顶点出现最大值，3 月 20 日开挖至第二道支撑（第一道支撑已经浇筑好），位移最大点出现在第二道支撑附近，5 月 4 日开挖至第三道支撑（第一第二道支撑已经浇筑好），最大位移出现在第三道支撑附近。

伴随开挖深度的增大，桩身挠度明显增大，出现水平位移最大的位置也在不断下移。钢筋和 H 型钢挠度图相似，说明钢筋笼和接口处的 H 型钢变形满足变形协调。

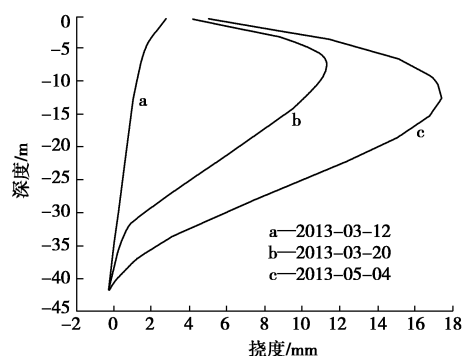


图 6 H 型钢桩身挠度分布图

Fig. 6 Distribution of deflection of H-beam piles

4 结 论

利用 BOTDA 对地下连续墙监测, 连续快速地获取了桩身的应变数据, 实现了远距离和高精度的测量, 提出了独特的双线测量方法, 实现了温度自补偿, 相比传统方法测量应变时需剔除温度效应的影响显得更加简洁和精确。

综上所述, 安装有分布式传感光纤的钢筋笼可以实时获取测量数据, 该方法良好的现场适应性、温度自补偿等特点为其在工程领域中推广应用提供了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 马奕斌, 郑 渊, 陈 辉, 等. 地下连续墙基坑的施工监测方法及原理[J]. 公路与汽运, 2005(4): 146 - 147, 158. (MA Yi-bin, ZHENG Yuan, CHEN Hui, et al. Monitoring of underground continuous wall construction methods and principles of pit[J]. Highways & Automotive, 2005(4): 146 - 147, 158. (in Chinese))
- [3] 覃 睿, 唐光暹, 周永泉, 等. 基坑监测技术的现状及应用[J]. 工程质量 A 版, 2008(8): 18 - 20, 13. (TAN Rui, TANG Light-siam, ZHOU Yong-quan, et al. Pit monitoring technology status and application[J]. Engineering Quality Revision A, 2008(8): 18 - 20, 13. (in Chinese))
- [4] 徐卫军, 侯建国, 李瑞有. 分布式光纤测温系统在景洪电站大坝混凝土温度监测中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 97 - 101. (XU Wei-jun, HOU Jian-guo, LI Rui-you. Application of distributed optical fiber temperature measurement system in Jinghong Hydropower Station Dam concrete temperature monitoring[J]. Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 97 - 101. (in Chinese))
- [5] 隋海波, 施 斌, 张 丹. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3725 - 3731. (SUI Hai-bo, SHI Bin, ZHANG Dan. Study of distributed fiber optic monitoring technology slope engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3725 - 3731. (in Chinese))
- [6] 施 斌, 徐学军, 王 镒. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2622 - 2628. (SHI Bin, XU Xue-jun, WANG Di. Tunnel BOTDR health diagnostic study of distributed fiber optic strain monitoring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2622 - 2628. (in Chinese))
- [7] 王剑锋, 刘红林, 张淑琴. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 865 - 871. (WANG Jian-feng, LIU Hong-lin, ZHANG Shu-qin. Distributed optical fiber temperature sensor based on a new application of Raman spectroscopy and scattering [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 865 - 871. (in Chinese))
- [8] BAO Xiao-yi, MERCHANT M De, BROWN A, et al. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(11): 1698 - 1704.
- [9] 丁 勇, 王 平, 何 宁. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 719 - 724. (DING Yong, WANG Ping, HE Ning. SMW method based on optical fiber sensing technology pile BOTDA distributed measurement study[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 719 - 724. (in Chinese))

(本文责编 明经平)