

基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究

朱鸿鹄¹ 殷建华¹ 靳伟¹ 古冬明²

(1. 香港理工大学, 香港; 2. IMM工程咨询有限公司, 香港)

摘要: 建筑物地基、基础的现场监测技术一直存在着精度低、稳定性差、不易安装等缺陷。论证光纤光栅传感技术在地基和基础结构健康监测中的应用可行性, 并研制光纤光栅应变计、温度计、沉降仪和水平测斜仪等监测仪器, 用于监测地基、基础的应变、温度、位移等。室内标定试验结果显示, 这些仪器具有分辨率高、稳定性好等优点。在香港某建筑物的施工过程中, 在地基和筏式基础中安装了以上的光纤光栅监测仪器, 构成准分布式的地基、基础健康监测系统, 并实现监测的自动化、远程化。分析初期的监测结果, 并针对监测系统实施可能出现的问题提出了解决途径。

关键词: 地基基础; 光纤传感技术; 光纤光栅; 健康监测

中图分类号: TU413.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-131X(2010)06-0109-07

Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology

Zhu Honghu Yin Jianhua Jin Wei Kelvin KUO Tung Ming

(1. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. IMM Consulting Engineers Ltd., Hong Kong, China)

Abstract: Existing techniques for instrumentation of civil structure foundations have limitations, including low accuracy, poor reliability and difficulty in installation. The feasibility of incorporating fiber Bragg grating (FBG) sensing technology into health monitoring of foundation structures is discussed. Innovative FBG strain sensors, temperature sensors, settlement sensors and horizontal inclinometers have been developed to monitor strains, temperatures and displacements in foundations. Results from laboratory calibration tests have shown that these sensors have high resolution and repeatability. These sensors have been successfully installed in the ground and the raft foundation of a building in Hong Kong with the quasi-distributed foundation monitoring system formed with an automatic and remote configuration. The early stage monitoring results are obtained and analyzed. Recommendations are proposed to handle the problems that may occur during the instrumentation.

Keywords: foundation; fiber optic sensing technology; fiber Bragg grating (FBG); health monitoring

E-mail: zhuhonghu@gmail.com

引 言

对于多高层建筑、电视塔、体育馆等大型工程设施而言, 地基基础的变形控制是一个重要的课题。地基基础的受力、变形状态反映的是上部结构、基础、地基的相互作用, 机理较为复杂。在施工期、运营期内, 通过对于地基沉降、基础中的应力、应变等关键指标的监测, 一方面可以验证设计参数, 另一方面可以预报潜在的失稳、破坏, 为及时采取加固措施争取时间^[1]。

在地基基础工程监测中, 各种埋入式的岩土监测仪器, 如测斜仪、伸长仪、沉降仪、倾斜仪等, 发挥了重要的作用。它们通常采用振弦式、电阻式、电感式传感器作为敏感元件, 存在着精度低、耐久性差、易受干扰等缺陷^[1]。近年来, 光纤传感技术日趋成熟, 基于该技术开发出的监测仪器不受电磁干扰, 耐腐蚀, 集成性强, 有着良好的精度和稳定性, 因而在很大程度上弥补了传统监测技术的不足。国内外很多学者将光纤传感技术应用于结构健康监测领域, 做出不懈的努力^[2-7]。在建筑物基础方面, Baldwin Schmidt Hattenberger, Lee 邢皓枫等先后采用光纤传感器对现场桩基试验进行了应变、温度监测, 并基于监测结果分析了桩的受荷变形、荷载传递等性状^[8-11]。赵鸣等在大体积混凝土基础浇筑过程中, 对混凝土水化放热进行了光纤传感温度监测, 并研究了混凝土温度应力

基金项目: 香港理工大学资助项目 (G-YE14 G-YE54 1-BB7U)

作者简介: 朱鸿鹄, 博士, 副研究员

收稿日期: 2008-12-17

的计算、开裂预测等问题^[12]。Kiste等在桩基现场浇筑、上部结构施工时,采用粘贴在桩基钢筋笼上的光纤传感器进行了全程的健康监测^[13]。

本文基于光纤光栅(FBG, fiber Bragg grating)传感技术研制了多种岩土监测仪器,包括应变计、温度计、沉降仪和水平测斜仪。这些仪器可广泛用于监测建筑物基础结构中的应力、应变、温度,以及地基的沉降量及其竖向、水平向分布。本文详细阐述了这些仪器的设计、制作和标定,以及数据采集、传输和处理方案,最后简要介绍了作者正在进行的建筑物筏式基础施工过程光纤光栅监测工作,并分析了初期的监测成果,以及监测中出现的难点及其解决途径。

1 光纤光栅传感技术

1.1 工作原理

根据传感原理,光纤传感器可分为反射型、干涉型、散射型等几类。光纤光栅是一种基于布拉格光栅反射特定波长光特性的传感技术。当宽带入射光进入光纤时,光纤光栅会反射特定波长的光,生成如图1所示的反射光谱。该反射光的中心波长与光纤所受应变、温度有关,可表述为^[14]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = (1 - p^{ff})\epsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 是中心波长的变化量; λ_{B0} 是光纤的初始中心波长; ϵ 和 ΔT 分别是光纤所受应变和温度变化量; p^{ff} 、 α 和 ζ 分别是光纤的光弹系数、热膨胀系数和热光系数。

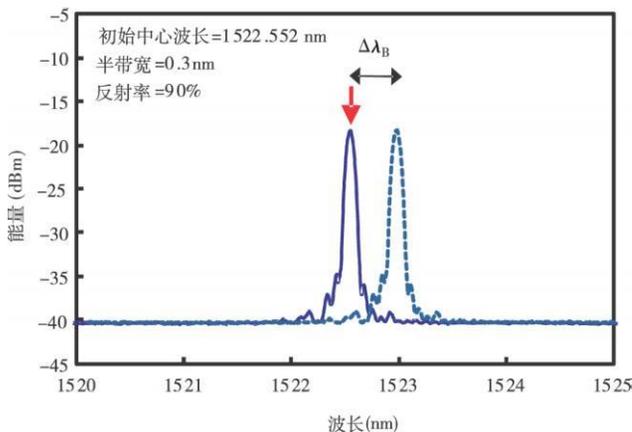


图1 光纤光栅的典型反射光谱及传感原理

Fig 1 Typical reflected spectrum and sensing principle of FBG

令 $\xi = 1 - p^{ff}$, $\eta = \alpha + \zeta$, 则公式(1)可以改写成

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^\epsilon + \Delta\lambda_B^{\Delta T} = \xi\lambda_{B0}\epsilon + \eta\lambda_{B0}\Delta T \quad (2)$$

其中 $\Delta\lambda_B^\epsilon$ 、 $\Delta\lambda_B^{\Delta T}$ 分别为应变、温度引起的中心波长

变化量。对于一般的光纤光栅而言, ξ 和 η 的值大约为 $0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ 和 $6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

光纤光栅的批量制作可采用相位掩模法^[15], 一般包括载氢增敏、缓冲层剥除、紫外激光曝光、重新涂覆和退火处理等步骤。光纤光栅传感机理明确, 是一种优良的应变和温度传感技术。基于目前的解调技术, 光纤光栅应变、温度检测精度可达到 $1 \mu\epsilon$ 和 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。另外, 波长分离复用技术(WDM, wavelength division multiplex)使得光纤光栅可串联使用, 实现准分布式监测。

1.2 在地基基础工程监测中的应用难点

光纤光栅虽然具有精度高、耐久性好、性价比高等优点, 但是由于地基基础施工的粗放型、隐蔽性等特点, 导致光纤传感技术在仪器布设、光缆保护和数据分析等方面存在着障碍, 极大地影响了该监测技术的推广、应用。具体而言, 应用难点主要存在于:

第一, 光纤光栅及其传输光缆的准确安装和现场保护。为了使光纤光栅能够真实反映构筑物的变形、受力等方面的物理量, 需保证光纤光栅和监测对象同步变形。恶劣的施工环境使得仪器埋设、混凝土浇筑过程中, 光纤光栅及其传输光缆易受损坏, 所以必须实施细致、有效的保护措施。

第二, 在长期监测中, 为了准确测量物体的实际应变、温度, 光纤光栅的读数必须进行应变和温度的分离。若不做温度补偿, 环境温度每改变 $1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 就会产生大约 $9 \mu\epsilon$ 的应变误差。由此可见, 若该问题解决不好, 监测数据很难反映现场的真实健康状态。现有的温度补偿方式主要有参考光栅法、双波长叠栅法、长周期光栅组合法等^[7]。

2 基于光纤光栅传感技术的岩土监测仪器

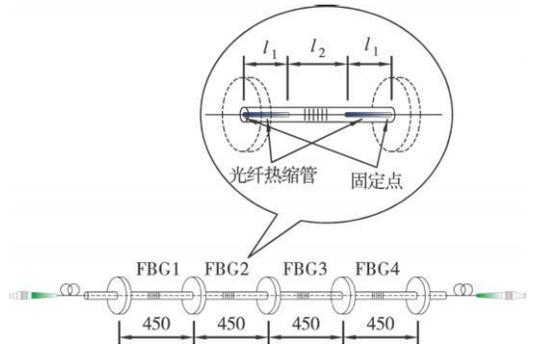
2.1 光纤光栅混凝土应变计

为了保护裸光纤光栅传感器, 目前通常采用金属管材、片材以及玻璃纤维增强材料(FRP)等对其进行封装, 制成表面安装型或埋入型的混凝土应变计。根据地基基础的监测特点, 作者研制了如图2(a)的埋入型混凝土应变计, 并在实验室内进行了标定。该应变计中串联了4个预拉 $1500 \mu\epsilon$ 的光纤光栅, 当埋入混凝土后, 每个应变计两端的法兰盘可保证混凝土应变完全传递给套管内的光栅。根据该设计, 应变计套管两固定点之间(即标距)的平均应变 ϵ' 与光栅所受应变 ϵ 之间存在着 $\epsilon' = \frac{1}{2(1+\mu)}\epsilon \leq \epsilon$ 的关系。所以,

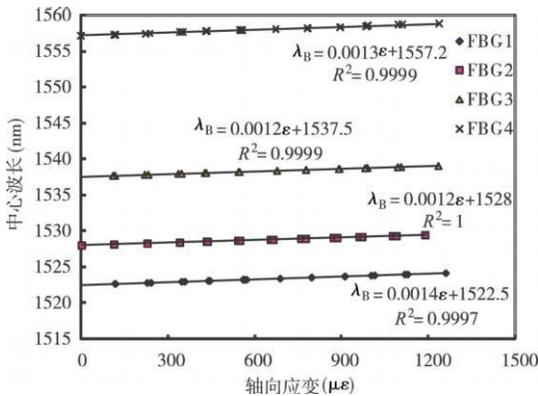
$$\Delta\lambda_B^\epsilon = \Delta\lambda_B - \Delta\lambda_B^{\Delta T} = \frac{2(1+\mu)}{1} \xi\lambda_{B0}\epsilon' = \xi'\lambda_{B0}\epsilon' \quad (3)$$

光纤光栅应变计标距的确定一般取决于混凝土骨料尺寸和对监测精度的要求。通过调整 l_1 、 l_2 取值,可获得比裸光栅更高的应变测试精度。在数据采集时,依次读取 4 个光纤光栅的中心波长读数,即可分段测出混凝土应变沿应变计轴向的分布情况。

在室内标定试验中,用砝码逐级施加轴向应变,然后再逐级卸载。同时,用应变计套管表面粘贴的电阻应变片测量实际施加的应变。典型的标定试验结果见图 2(b)。在多次循环加载中,各光纤光栅中心波长和轴向应变表现出极好的线性关系,应变检测精度高于 $1 \mu\epsilon$ 。在反复加载、卸载过程中亦未发现应变计读数滞后或存在疲劳效应。



(a) 光纤光栅混凝土应变计示意图 (单位: mm)



(b) 典型标定结果

图 2 光纤光栅混凝土应变计的设计及标定

Fig 2 Design and calibration of a FBG strain sensor for concrete

2.2 光纤光栅温度计

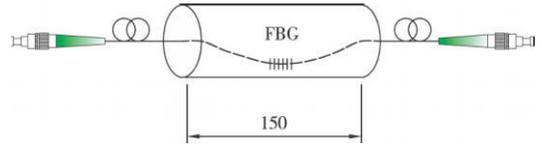
由于胶黏剂、附着体、光纤之间存在着复杂的应变传递效应^[4],以及热膨胀系数、导热系数等参数的差异,所以光纤光栅混凝土应变计的完全温度补偿不易实现。本文采用光纤光栅温度计精确测量基础内各截面的温度场,然后对基础内邻近的应变计读数进行理论修正。

为了实现对于温度的监测,将光纤光栅用直径 5 mm 的金属管进行封装 (见图 3(a)),制成埋入式光纤光栅温度计。制作时保证光纤在管中存在一定余长,使得光栅在未来的使用中始终保持松弛,不会受

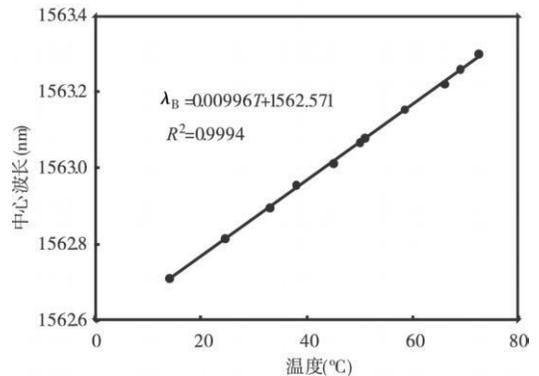
到外界应变的影响。此时,式(2)变为

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^{\Delta T} = \zeta\lambda_B\Delta T \quad (4)$$

该光纤光栅温度计的标定试验在温度可调的水浴内进行,并采用 K 式热电偶测量实际温度。典型的标定试验结果见图 3(b)。试验结果表明,在通常的温度变化范围内 ($10 \sim 80^\circ\text{C}$),光栅的波长和温度之间维持着很好的线性关系,温度测定精度为 0.1°C 。



(a) 光纤光栅温度计示意图 (单位: mm)



(b) 典型标定结果

图 3 光纤光栅温度计的设计及标定

Fig 3 Design and calibration of a FBG temperature sensor

2.3 光纤光栅水平测斜仪

由于光纤光栅只对温度、应变敏感,所以为了实现对于地基位移的测量,需要进行合理的设计,使位移和应变之间存在着对应关系。在外径 30 mm 长 4 m 的 PVC 管的上下两个表面预制小槽,在槽内沿轴向粘贴 2 条光纤,每条光纤上串联 6 个光纤光栅,制成光纤光栅水平测斜仪,如图 4(a)所示。将多个水平测斜仪串联后埋入基础下一定深度的土体中,并保证 2 条光纤各位于测斜仪的顶面和底面。当地基中各点发生沉降时,测斜仪受弯产生变形。管上附着的光纤光栅可以测得管上各点应变 ϵ_i ($i = 1 \sim 6$),通过多项式拟合和积分,可由管的应变求得管的挠度曲线,即

$$v(x) = \frac{1}{R} \int_0^x \int_0^x \epsilon(x) dx dx - \frac{x}{RL} \int_0^L \int_0^L \epsilon(x) dx dx \quad (5)$$

式中: $\epsilon(x)$ 为由光纤光栅读数拟合得到的测斜仪管体应变; l 为测斜仪长度。由于测斜仪与地基共同变形,由该挠度曲线可获得地基沉降沿管长的分布规律。

需要指出的是,由光纤光栅水平测斜仪测得的沉降量是以测斜仪两端为基准点的相对沉降量,为了测得绝对沉降量,需依次串联多个测斜仪,保证测斜仪总长度大于沉降影响范围,或者采用其他测量手段测

出测斜仪两端的沉降量, 再对挠度进行修正。根据这种设计, 光纤光栅水平测斜仪同时具备了高精度、温度自补偿、易于实现自动化、远程化等特点。

在标定试验中, 采用砝码在单根测斜仪跨中逐级施加挠度, 并用位移计 (LVDT) 测量管上各点挠度, 与光纤光栅水平测斜仪获得的监测结果进行比较。典型的标定试验结果见图 4 (b)。试验结果显示, 当跨中发生沉降时, 光纤光栅水平测斜仪的精度高于 0.1 mm。

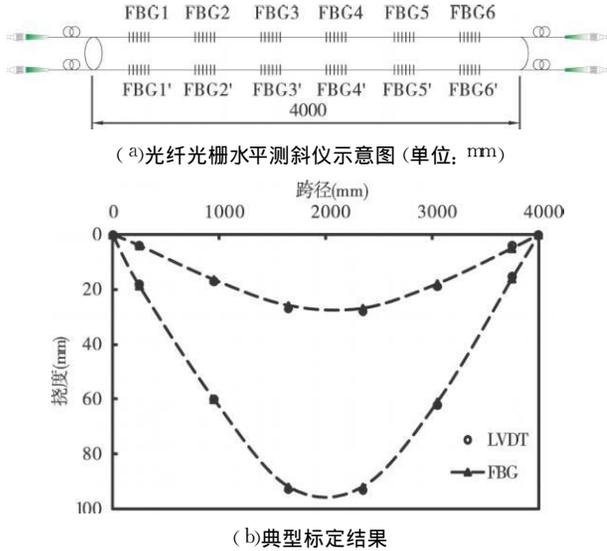


图 4 光纤光栅测斜仪的设计及标定

Fig 4 Design and calibration of a FBG horizontal inclinometer

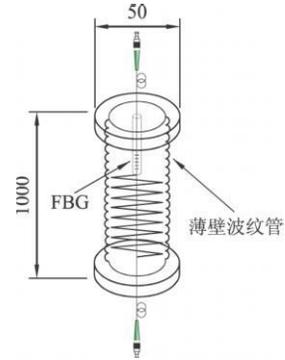
2.4 光纤光栅沉降仪

地基基础的分层沉降一般采用常规的伸长仪、沉降板等进行监测, 存在着读数困难、耐久性差等缺点, 而基于光纤光栅技术的沉降仪可彻底解决这些问题。将光纤光栅预拉 3000 $\mu\epsilon$ 后置于塑料管中, 并与高精度压缩弹簧连接, 即制成钻孔埋设型光纤光栅沉降仪 (见图 5 (a))。当土体发生沉降时, 弹簧产生相应的压缩量, 将力传递给塑料管, 使得光纤光栅发生应变 ϵ 。该应变量和该段内的沉降量 S 是成正比的, 即

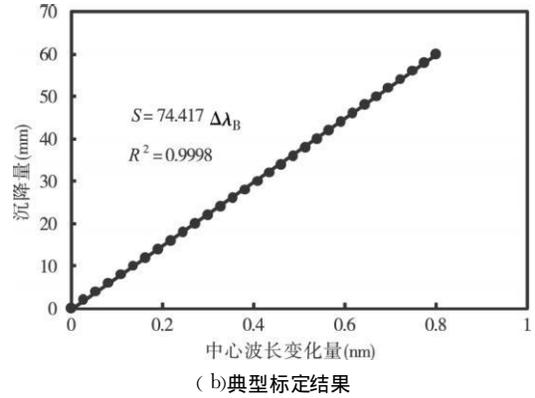
$$S = \left(\frac{\pi d^3 E}{k} + l \right) \epsilon = \left(\frac{\pi d^3 E}{k} + l \right) \frac{(\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_B^{\Delta T})}{\epsilon \lambda_B} \quad (6)$$

式中: E 、 d 和 l 分别为塑料管的弹性模量、管径、壁厚和长度; k 为弹簧系数; $\Delta\lambda_B^{\Delta T}$ 可由一置于同一温度场的另一光纤光栅 (塑料管封装) 测得。将多个光纤光栅沉降仪串联, 埋设于同一个钻孔中, 即可获得地基沿竖向各段的沉降量。

光纤光栅沉降仪的标定试验在改装后的三轴仪上进行, 典型的标定试验结果见图 5 (b)。试验结果表明, 光纤光栅的波长和沉降量线性良好, 该光纤光栅沉降仪的精度高于 0.1 mm, 测量范围为 0~60 mm。



(a) 光纤光栅沉降仪示意图 (单位: mm)



(b) 典型标定结果

图 5 光纤光栅沉降仪的设计及标定

Fig 5 Design and calibration of a FBG settlement sensor

2.5 数据采集、传输和处理

由于以上开发的监测仪器均基于光纤光栅技术, 所以任何仪器之间均可以采用熔接或者 FC/APC 光学接头实现两两串联。通过合理的布线方案, 所有监测仪器可集成为链式的准分布式传感序列。在每条传感序列中, 各个光纤光栅的中心波长必须相互保持一定的安全距离, 以免读数发生重叠现象。

光纤光栅的数据采集系统可根据实际需要选用各种商用解调仪, 并配套使用通道扩展模块、便携式直流电源、无线网卡等。对于串联的光纤光栅准分布式传感序列, 解调仪按照从小到大的次序依次读取各传感器的中心波长, 并通过有线或无线以太网、串口等连接方式将数据发送给数据采集计算机。数据采集计算机将监测界面实时在因特网上通过网页形式发表, 并实现异地实时查询、监控监测进程等功能。通过 Labview 编程, 可为整个监测系统添加多种监测、预警功能, 如定时发布监测报告, E-mail 手机短信自动报警等。

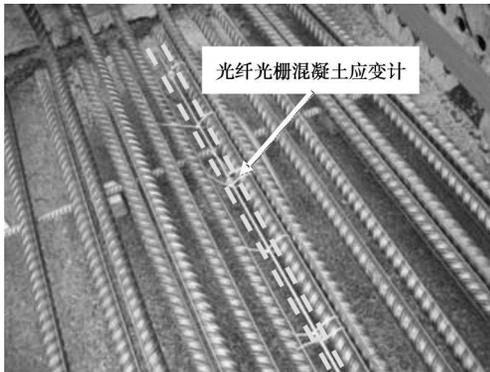
3 筏式基础光纤光栅传感监测实例

3.1 监测仪器布置和安装

香港九龙塘中国神学院是一栋三层的建筑物, 下

部结构采用长 11.6 m 宽 11.4 m 的筏式基础。为了实施为期 1 年的施工期光纤光栅健康监测工作,在筏式基础内沿东西向安装了两排光纤光栅混凝土应变计,每排各串联 6 组应变计(共 24 个光纤光栅应变计),以检测混凝土在荷载作用下的拉应力、应变。为了防止混凝土浇筑冲力损坏应变计,应变计紧贴基础的底层钢筋下表面,并每隔 0.5 m 用尼龙扎带固定。考虑到筏式基础内温度变化较为一致,一共安装了 2 个光纤光栅温度计,亦固定于底层钢筋下,以作混凝土应变的温度补偿。在筏式基础下 100 mm 深处沿东西向埋设了 2 组光纤光栅水平测斜仪,每组由 4 m 长的 3 个光纤光栅水平测斜仪串联而成。测斜仪上一共布置了 36 个光纤光栅传感器,以监测地基沉降分布。在筏式基础下钻取了 2 个 4 m 深的孔,将长 1 m 的 4 个光纤光栅沉降仪首尾相连后安置在每个钻孔内,再用水泥膨润土灌浆。详细的仪器安装过程见图 6。现场布设的传输光缆均为室外铠装光缆,通过基础预设孔逐一引出,并集中到室外集线箱内。现场的数据采集选用美国 Micron Optics 公司的 sm125 便携式光纤光栅解调仪。将传输光缆接驳至解调仪的 4 个通道上,再由数据采集计算机通过无线以太网自动采集、存储各个监测仪器的读数,并实时显示相关的图形、曲线。

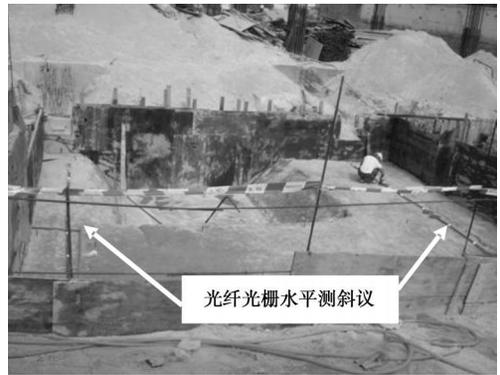
需要指出的是,在光纤光栅沉降仪安装时,由于现场施工人员灌浆操作不当导致输出光缆微弯、宏弯



(a) 光纤光栅混凝土应变计



(b) 光纤光栅温度计



(c) 光纤光栅水平测斜仪



(d) 光纤光栅沉降仪

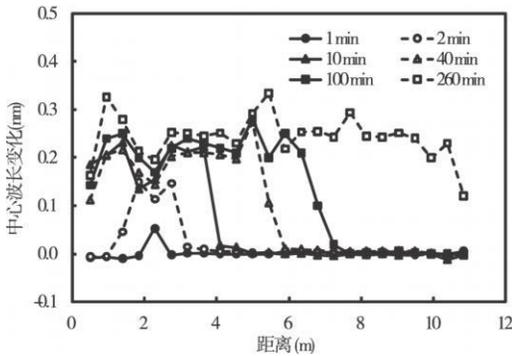
图 6 光纤光栅监测仪器的现场安装

Fig 6 Field installation of the FBG based sensors

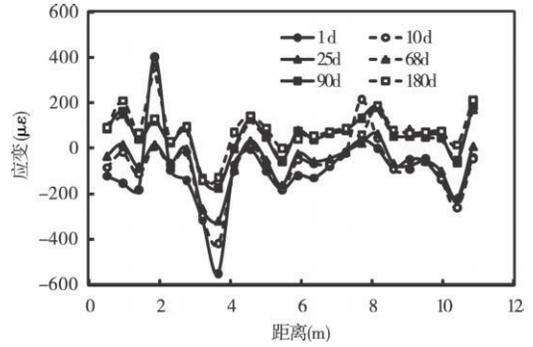
损耗过大,多个光纤光栅沉降仪出现信号衰减过大的现象。另外,在基础模板拆除过程中,一组水平测斜仪的传输光纤被工人锯断,致使该组光纤光栅数据完全丢失。但总的说来,大部分光纤光栅均安装成功,并经历了地基基础施工中混凝土浇筑、振捣的过程,保证了较高的存活率。

3.2 早期监测结果及其分析

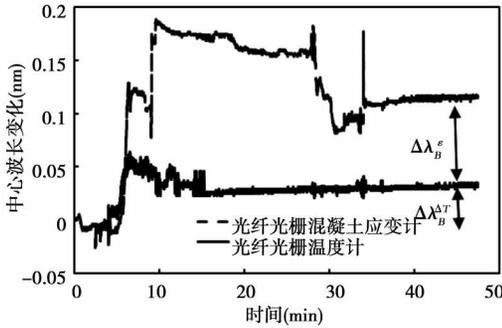
图 7 是混凝土浇筑筏板基础时的应变计、温度计监测数据,由图 7(a)可见,在混凝土浇筑过程中,应变计中各个光纤光栅的中心波长呈依次增大的现象。由于混凝土在初凝之前仍处于流态,此时刚度非常小,难以将其变形有效传递到应变计,因此读数增大主要是由环境温度变化引起的。首先,混凝土水化放热使得邻近的光纤光栅的中心波长由于温度升高而增大 $\Delta\lambda_B^{\Delta T}$;其次,由于该应变计为金属管封装式,金属的热膨胀系数为远远大于石英光纤本身的热膨胀系数,所以管体的受热膨胀使得光纤光栅亦发生受拉应变(热应变)。图 7(b)中是同一位置光纤光栅应变计、温度计的中心波长变化情况。由图可以看出,两者之间存在着较大的差距, $\Delta\lambda_B^{\epsilon}$ 即是热应变造成的。



(a) 光纤光栅应变计读数



(b) 筏式基础内部应变分布曲线

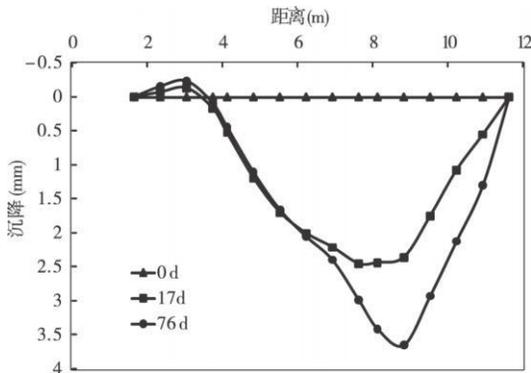


(c) 光纤光栅应变计、温度计读数对比

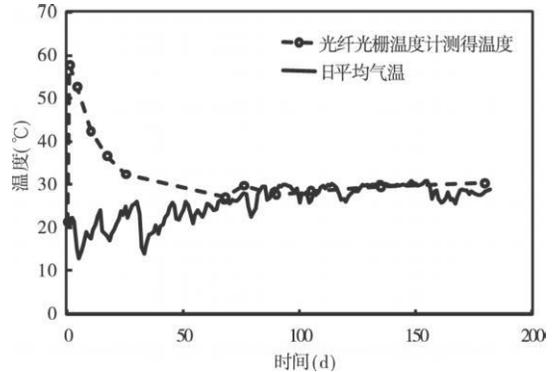
图 7 筏式基础浇筑时光纤光栅监测结果

Fig 7 Monitoring results of the casting of the raft foundation

图 8 是上部结构施工过程中的部分监测结果。由图 8 (a) 可知, 上部结构自重荷载使得地基土体发生了压缩, 产生了一定的沉降量。图 8 (b) 显示了筏式基础混凝土内部应变在不同时间点的分布情况。从监测结果来看, 筏式基础浇筑后混凝土内部产生了一定的压应变, 这是由混凝土硬化过程中的凝结收缩、骨料的锁结和水化物钙硅酸盐晶体的形成所引起的。随着上部结构的逐步施工, 筏式基础混凝土靠近底层钢筋附近拉应变开始上升, 反映基础开始承受上部结构自重传递下来的弯矩作用。目前, 混凝土应变实测值趋于稳定, 说明筏式基础目前的安全储备较高, 稳定性良好。由图 8 (c) 中基础内部温度的监测结果可以看到, 混凝土中水泥水化大量放热, 使得筏式基础内温度上升了接近 40 °C, 之后基础内部的水化热逐渐散发, 70 d 左右即完成混凝土的凝结硬化。



(a) 地基沉降的分布曲线 (上部结构开始施工时)



(c) 筏式基础内部温度随时间变化曲线

图 8 上部结构施工过程中光纤光栅监测结果

Fig 8 Monitoring results during the construction of the superstructure

由以上的分析可以看到, 基于光纤光栅技术的监测仪器的数据稳定可靠, 较为准确地反映了筏式基础的健康状态。

4 结语

本文采用光纤光栅技术成功开发了混凝土应力计、温度计、水平测斜仪、沉降仪等岩土监测仪器, 并解决了光纤光栅监测仪器在地基、基础中的布设工艺。现场仪器安装过程中, 部分传感器由于损坏或光纤微弯曲率过大而无法检测。在混凝土浇筑过程中, 所有存活的监测仪器均经受住了机械振捣和混凝土冲击的考验, 保证了存活率。从初期的监测结果看, 光纤光栅监测仪器的监测数据较好地反映了该筏式基础的健康状态。

现场应用的经验说明, 只要合理布置监测点的位置和传输光缆的走向, 就可以充分利用光纤光栅准分布式的优点, 实现完全集成式的监测网络。针对光纤光栅监测系统实施中可能出现的光缆损坏、传感器失效等问题, 我们应该积极采取预防措施, 一方面要重视对仪器安装人员的技术培训, 确保文明作业, 另一方面务必协调好与建设单位的配合。为了防止传输光缆在混凝土中的弯曲损耗和可能的物理损坏, 应采

用金属软管进行妥善的隔离和保护,并注意线路的弯曲半径必须大于光缆的最小允许弯曲半径。由于传输光缆在基础中的引出段是薄弱部位,容易受到外力拉伸、扭曲,我们应在此处设置接线盒或配线箱,并预设自由接头或一定的光缆余长,以便传输光缆万一出现断裂时可及时更换、接续。此外,必须加强对于工地施工人员的宣传教育,并实施仪器埋设后的监管,防止光纤光栅监测系统在后续的施工作业中可能出现的人为损坏事故。

致谢:本项目的开展得到 IMM 工程咨询公司创始人、原香港岩土工程学会 (HKGES) 主席麦立明先生的支持和指导,作者对此深表感谢。麦立明先生不幸于 2008 年初因病去世。谨以此文对麦立明先生的去世表示深切的哀悼和怀念。冯嘉伟、缪仲辉、李发扬、司徒懿林也参与了光纤传感器现场安装和监测工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Dunn Clifff J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993
- [2] Chan T H T, 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
- [3] Iwakih H, Yanakawa H, Mita A. Health monitoring system using FBG-based sensors for a 12 th story building with column dampers [C] // Proceedings of SPIE, 2001, 471-478
- [4] 欧进萍, 周智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 45-49 (Ou Jinping, Zhou Zhi, Wu Zhanjun, et al. Intelligent monitoring of Heilongjiang Hulan River Bridge based on FBG [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1): 45-49 (in Chinese))
- [5] 高俊启, 施斌, 张巍, 等. BOTDR 检测钢筋混凝土梁分布式应变的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 56-87 (Gao Junqi, Shi Bin, Zhang Wei, et al. An experimental study for measuring the distributed strain of reinforced concrete beam using BOTDR [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 56-87 (in Chinese))
- [6] Glisic B, Inaudi D. Fiber optic methods for structural health monitoring [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007
- [7] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [8] Baldwin C, Pops T, Chen P, et al. Early structural monitoring of composite marine piles using fiber optic sensors [C] // Proceedings of SPIE, 2001, 487-497
- [9] Schmidt-Hattenberger C, Straub T, Naumann M, et al. Strain measurements by fiber Bragg grating sensors for in situ pile loading tests [C] // Proceedings of SPIE, 2003, 289-294
- [10] Lee W, Lee W J, Lee S B, et al. Measurement of pile load transfer using the Fiber Bragg Grating sensor system [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1222-1232
- [11] 邢皓枫, 赵红崑, 叶观宝, 等. PHC 管桩工程特性分析 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 36-39 (Xing Hao Feng, Zhao Hongwei, Ye Guanbao, et al. Analysis of engineering characteristics of PHC Pipe Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 36-39 (in Chinese))
- [12] 赵鸣, 何涛, 李杰. 光纤光栅传感器在大体积混凝土基础温度监测中的应用 [J]. 实验力学, 2005, 20(1): 23-29 (Zhao Ming, He Tao, Li Jie. The application of the fiber Bragg grating sensors in the temperature monitoring of the large volume concrete foundation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1): 23-29 (in Chinese))
- [13] Kister G, Winter D, Gebremichael Y M, et al. Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors [J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2048-2055
- [14] Othonos A, Kalli K. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing [M]. London: Artech House, 1999
- [15] Hill K Q, Malo B, Bibeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037

朱鸿鹄 (1979-) 男, 博士, 副研究员。主要从事土木工程及光纤传感监测技术相关的科研工作。

殷建华 (1956-) 男, 博士, 教授。主要从事岩土工程相关的教学与科研工作。

靳伟 (1964-) 男, 博士, 教授。主要从事光纤传感及器件相关的教学与科研工作。

古冬明 (1970-) 男, 工程师。主要从事土木工程相关的咨询与顾问工作。