

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0695-08

FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验研究

朱友群^{1,2}, 朱鸿鹄¹, 孙义杰¹, 施 斌¹

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093; 2. 无锡山水城规划建设局, 江苏 无锡 214000)

摘 要: 管桩施工过程中常出现桩身裂缝、爆桩等病害。将具有实时动态监测功能的布拉格光纤光栅 (FBG) 准分布式光纤传感监测技术和具有分布式监测功能的布里渊散射光时域分析技术 (BOTDA) 联合应用到管桩打入过程中的监测, 提出了分布式光纤传感技术数据处理方法, 设计了管桩打入过程的模型试验。试验结果表明, FBG 传感技术能够较好地动态监测打入过程中桩身应变变化特征, 反映桩身不同部位随不同深度应变变化规律; BOTDA 分布式光纤传感技术能够较好地监测管桩在打入过程中暂停 (接管) 状态下桩身应变变化特征; 根据应变变化分析管桩受偏心荷载程度, 分析管桩是否出现裂缝、破坏等病害, 研究管桩打入过程中桩土作用规律。试验结果还表明, FBG 联合 BOTDA 光纤监测技术在管桩打入过程中监测管桩质量具有广阔的技术优势和应用前景。

关 键 词: 打桩; 布拉格光纤光栅 (FBG); 布里渊散射光时域分析技术 (BOTDA); 分布式监测; 数据处理
中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A

Model experiment study of pipe pile driving into soil using FBG-BOTDA sensing monitoring technology

ZHU You-qun^{1,2}, Zhu Hong-hu¹, SUN Yi-jie¹, SHI Bin¹

(1. School of Earth Science and Engineering Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Wuxi Landscape City Planning and Construction Bureau, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: In the construction process of pipe pile, the pile blasting or crack diseases often appears. The real-time dynamic sensing monitoring technology of quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) and distributed sensing monitoring technology of Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) are applied to pile driving into soil layer monitoring. The data processing method of distributed optical fiber sensing (DOFS) technology is proposed; the pile driving processing model experiment was designed. The experiment results show that: the FBG sensor can be well used to dynamically monitor the strain variation characters in the process of pile driving; it also can reflect the strain variation rules in pile different parts varied with soil depth; BOTDA distributed optical fiber sensor can monitor the pipe pile body strain variation characteristics during pile adaption (suspended) when driving; according to the strain changes, it can be used to analyze the eccentric loading level and estimate whether the pile cracks and fails, etc; research on the pile-soil interaction rules in the process of driving. The experiment results also show that: the combination of FBG and BOTDA optical fiber sensing monitoring technology in the monitoring quality of piles driving into soil layers has the more advantage; the combined technology has wide application prospect.

Key words: pile driving; fiber Bragg grating (FBG); Brillouin optical time domain analysis (BOTDA); distributed monitoring; data processing

1 引 言

管桩是一种地基处理方法及桩基础形式, 具有施工工期短、施工方便、工业化生产、对施工场地无污染、经济效益可观及适应性强等优点。但是,

管桩在施工过程中常出现桩头破碎、桩身爆裂、桩身难以贯入等问题, 严重影响了管桩的推广和使用, 如田集电厂管桩, 在前期烟囱基桩施打过程中先打入的 58 根桩中, 13 根桩在桩身入土至 20~24 m 深度左右时距桩尖 4~6 m 处桩身发生破坏^[1]; 福州地

收稿日期: 2014-02-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 41230636); 国家科技支撑计划 (No. 2012BAK10B05)。

第一作者简介: 朱友群, 男, 1981 年生, 博士, 主要从事建设工程的管理工作。E-mail: zyqnju@163.com

区某 5×10^4 t 级码头工程选用 $\phi 1\ 200$ mm 大直径 PHC 管桩, 沉桩后部分管桩管壁出现竖向裂缝等^[2], 因此, 管桩桩基打入过程的研究一直是国内外学术界的一个热点问题^[3-5]。

传统的管桩打入过程监测方法有大应变法和电阻应变片法。大应变法对监测环境、传感器安装、桩顶状况、锤击高度、锤重等有比较高的要求, 现场情况难以满足, 其测量曲线和实际情况误差较大, 有些地区质监站已经不认可该项检测。电阻应变片由于其长期稳定性差、成活率低、施工复杂、点式等缺点, 不能很好地满足管桩击入过程的监测需要。

分布式光纤传感技术是近年来各国竞相研发的新一代检测技术, 其分布式、长距离、耐久、抗干扰、施工方便等优点, 越来越得到工程检测与监测部门的青睐, 发展十分迅速^[6-13]。全分布式布里渊散射光时域反射技术 (BOTDR)^[14-16]、布里渊散射光时域分析技术 (BOTDA)^[17-18] 和准分布式布拉格光纤光栅技术 (FBG)^[19] 相继被引入到桩基的检测和监测中, 取得了良好的实施效果。

本文联合两类光纤检测技术即 BOTDA 技术和 FBG 技术对钢管桩击入过程进行模型试验和监测, 采用奇异值检验, 滤波, 回归分析等数据处理方法, 获得了击入过程中管桩模型的应变数据, 在此基础上对管桩击入过程的桩土相互作用进行了分析, 对管桩的质量进行了评估诊断, 为管桩施工积累经验。

2 测量原理

2.1 FBG 原理

光纤布拉格光栅 (FBG) 是指利用掺杂诸如锗、磷等光纤的光敏性, 通过某种工艺方法使外界入射光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用, 导致纤芯折射率沿纤轴方向周期性或非周期性的永久性变化, 在纤芯内形成空间相位结构的光学器件, 如图 1 所示, 图中, 纤芯的明暗变化代表了折射率的周期变化^[13]。

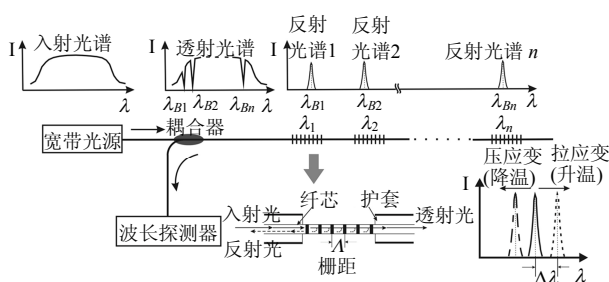


图 1 FBG 准分布式测量原理图

Fig.1 Measurement principle of quasi-distributed FBG

光纤光栅的波长变化率与光栅所在位置的轴向应变与温度变化量有良好的线性关系公式为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \eta\varepsilon + \gamma(T - T_0) \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda/\lambda_B$ 为光纤光栅波长变化率; η 为应变系数; γ 为温度系数; ε 为光纤轴向应变; $(T - T_0)$ 为温度变化量。

FBG 传感器利用波分复用技术进行串联, 可实现高空间分辨率的准分布式测量, 与其他光纤传感器相比, 具有极高的检测精度 (可达到 $1\ \mu\varepsilon$) 和动态实时性。

2.2 BOTDA 原理

光纤内的布里渊散射现象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^[14]:

$$\nu_B(\varepsilon, T) = \nu_B(0) + \frac{\partial \nu_B(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \varepsilon + \frac{\partial \nu_B(T)}{\partial T} T \quad (2)$$

式中: $\partial \nu_B(\varepsilon)/\partial \varepsilon$ 、 $\partial \nu_B(T)/\partial T$ 分别为布里渊频移-应变系数和布里渊频移-温度系数。

布里渊散射分自发布里渊散射和受激布里渊散射。入射光受折射率光栅衍射作用而发生背向散射, 同时使布里渊散射光发生多普勒效应而产生布里渊频移, 称为自发布里渊散射。通过向光纤两端分别注入反向传播的脉冲光 (泵浦光) 和连续光 (探测光), 当泵浦光与探测光的频差处于光纤相遇区域中的布里渊增益带宽内时, 由电致伸缩效应而激发声波, 产生布里渊放大效应, 从而使布里渊散射得到增强, 称为受激布里渊散射。

利用自发布里渊散射技术研究了布里渊光时域反射计 (brillouin optical time domain reflectometer, 简称 BOTDR); 利用受激布里渊散射原理研发了布里渊光时域分析 (brillouin optical time domain analysis, 简称 BOTDA) 技术, 其测量原理见图 2^[14]。无论是自发布里渊散射还是受激布里渊散射, 其信号相当微弱, 检测比较困难。其高端解调技术目前都掌握在少数发达国家, 解调仪都比较昂贵。BOTDA 技术与 BOTDR 相比, 光纤需形成回路, 但其空间分辨率和精度大幅度的提高。目前基于 BOTDA 技术的商业化解调仪可以实现 5 cm 的空间分辨率和 $7\ \mu\varepsilon$ 的应变测试精度。

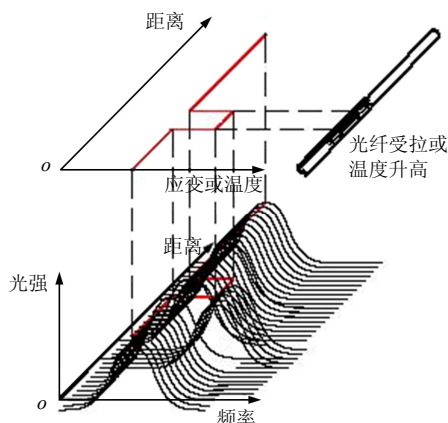


图 2 BOTDA 全分布式测量原理图

Fig.2 Measurement principle of distributed BOTDA

2.3 FBG 与 BOTDA 技术对比

本文采用 FBG 和 BOTDA 技术监测管桩击入过程, 联合了两种传感器的优点。在重点部位布设 FBG 传感器可以精确获取该点动静态过程中的应变数据; 采用 BOTDA 技术可以得到沿桩身应变分布规律和总趋势。表 1 为 FBG 与 BOTDA 技术参数对比。

表 1 FBG 与 BOTDA 监测技术参数对比
Table 1 Contrast of FBG and BOTDA monitoring technology parameters

名称	空间分辨率 / cm	应变精度 / $\mu\epsilon$	测试时间 / s	动静态	测量内容
FBG		1.0	实时	动、静态	温度、应变
BOTDA	10	7.5	最短 5	静态	温度、应变

3 数据处理

利用仪器对现场数据进行监测时, 由于信号特点、检测仪器系统中电子仪器的原因、外界环境干扰或超出某些参数设置范围等情况, 监测信号中不可避免地存在奇异值和噪声。奇异值的存在扰乱了正常的规律, 影响正常规律的判断, 在数据处理环节中应予以剔除。噪声的存在影响系统分辨率, 降低了监测信号的信噪比, 在数据处理时应同样予以消除。

3.1 奇异值检验

对于分布式光纤解调仪沿光纤方向所得应变监测数据序列 $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_N\}$, 采用一级差分方程进行预测, 其表达式为

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_{j-1} + (\varepsilon_{j-1} - \varepsilon_{j-2}), (j = 3, 4, \dots, N) \quad (3)$$

实际值与预测值之差为

$$\Delta\varepsilon_j = \varepsilon_j - \tilde{\varepsilon}_j \quad (4)$$

设监测数据中的误差为 μ (μ 的数值可根据长期监测资料分析得到, 也可取经验数据), 那么由式 (3) 和式 (4) 可计算出实际值与预测值之差 $\Delta\varepsilon_j$ 的均方差 $\sigma = 2\mu$ 。由实际值与预测值之差的绝对值 $|\Delta\varepsilon_j|$, 当 $|\Delta\varepsilon_j| > 3\sigma$ 时, 则认为 ε_j 是奇异值, 予以舍弃。

3.2 滤波器设计

线性滤波器的一般模型表达式为

$$H(s) = \frac{b_1 + b_2s^{-1} + b_3s^{-2} + \dots + b_{n+1}s^{-n}}{1 + a_1s^{-1} + a_2s^{-2} + \dots + a_ns^{-m}} \quad (5)$$

假设输入信号为 $x(n)$, 经过该滤波器后的输出信号可由下面的差分方程表示:

$$y(k) = -a_1y(k-1) - \dots - a_my(k-m) + b_1x(k) + b_2x(k-1) + \dots + b_{n+1}x(k-n) \quad (6)$$

根据 n 和 m 的不同取值, 定义 3 种不同的滤波器。 $m=0, n \neq 0$, 称为 FIR 滤波器, 这时用向量 b 就可以表示该滤波器; $m \neq 0, n=0$, 称为 IIR 滤波器, 需这时用 a 即可以表示该滤波器; $m \neq 0, n \neq 0$, 称为 ARMA 滤波器, 可以用 a 、 b 两个向量表示该滤波器。

在对噪声信号过滤时需要设计滤波器, 滤波器的设计有多种方法, 常用的 IIR 滤波器有 Butterworth 滤波器, Chebyshev 滤波器和 Ellipse 滤波器等。对于给定的阶数和波纹要求, Chebyshev 滤波器的选择性优于 Butterworth 滤波器, 而 Ellipse 函数滤波器优于 Chebyshev 滤波器, 它的过渡带更窄, 带外抑制更加陡峭, 本次试验采用了 Ellipse 滤波器。

3.3 建模分析

经过滤波后的数据与力学、材料学、热力学和现场实际情况结合建立分析模型, 进行趋势分析。常用方法有回归分析法、时间序列分析法、灰色系统、人工神经网络、频谱分析等方法。本次试验研究选取了易于计算的多项式拟合分析方法。

3.4 案例分析

本文选取某边坡测斜管分布式光纤传感应变监测数据, 图 3(a)为 BOTDA 应变解调仪监测的应变原始数据, 根据上文提出的奇异值数据检验计算方法, 得到如图奇异点, 予以剔除。图 3(b)显示为奇异值检验后的数据经过 Ellipse 滤波后得到的数据, 图 3(c)为滤波后的数据通过多项式拟合得到的可以用于数据分析的数据。

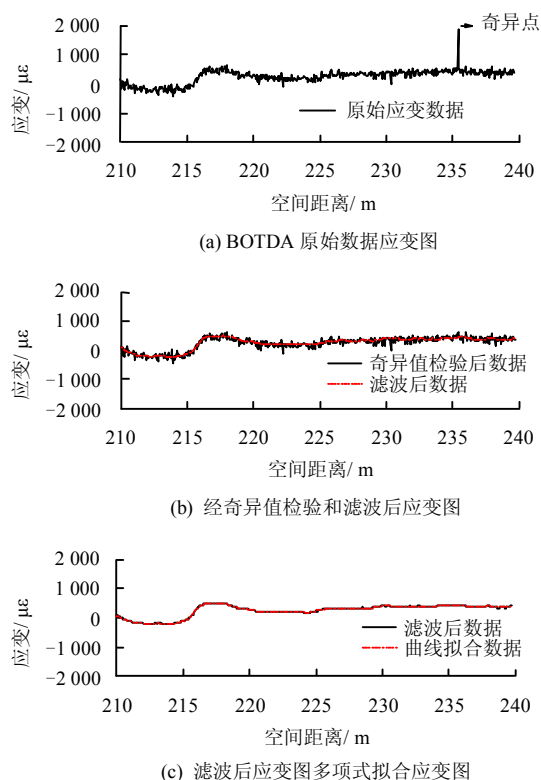


图3 基于分布式光纤传感技术数据处理方法

Fig.3 Data processing method based on distributed optical fiber sensing technology

4 管桩模型试验设计及方法

4.1 试验材料及设备

本次试验所用材料物理力学指标见表2。

表2 试验材料物理力学性质
Table 2 Physico-mechanical properties of materials for test

材料	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	变形模量 /MPa
土体	20	12.3	25.4	75
空心钢管	78.5			206 000

本次试验采用的 FBG 光纤传感器为苏州南智传感科技有限公司自主刻制, 串栅长 8 mm, 栅边距 4 mm, 光栅串纤细柔轻, 直径为 250 μm, 使用前进行标定。BOTDA 分布式光纤传感器采用南智公司自主研发的 $\phi 250$ mm 的传感光纤。该光纤具有粘贴方便, 与结构体变形较协调, 初始值较为平稳等特点。模拟管桩采用矩形空心钢管, 长 120 cm, 外矩形断面 40 mm×20 mm, 内矩形断面 35 mm×15 mm, 壁厚 2.5 mm。具体尺寸见图4, 钢管物理力学指标见表2。模型箱采用南京大学自行设计的可用于加载、降水、光纤传感于一体的模型试验箱。试验箱骨架采用型钢连接, 四周采用钢化透明

玻璃封闭。模型箱尺寸(长×宽×高)为 3 000 mm×1 500 mm×1 500 mm, 容积为 6.75 m³。锤击所用锤子采用福吉斯特(Forgestar)硬木柄圆头锤 24oz 80-52401。FBG 数据采集采用美国 MOI 公司的 SM130 型解调仪, 该设备具有大功率、高速度、多传感器的测量特点。BOTDA 数据采集采用日本 Neubrex 公司的 NBX-6050 型解调仪, 该设备最小空间分辨率 10 cm, 精度达 $\pm 7.5 \mu\epsilon$ 。

4.2 试验过程及方法

试验前先进行传感器的布设和粘贴工作。选取 120 cm×4 cm 尺寸表面为主表面, FBG 传感器间隔布设于钢管主表面中轴处, 选用 5 个 FBG 传感器, 距离桩底分别为 10、23、40、70、100 cm, 编号从下往上分别为 FBG1~FBG5, 中心波长从下到上分别为 1 540.377 54、1 534.815 77、1 545.586 61、1 550.547 52、1 554.859 07 nm。BOTDA 光纤传感器沿桩主表面两端布置, 由于本次试验在地下室进行, 且打入过程时间较短, 设计时未进行温度补偿, 见图4。施工前对管桩主表面进行打磨擦试干净后, 用快速粘结剂将传感光纤固定在钢管主表面上, 同时对传感光纤施加一定的预应力, 使传感光纤段具有一定的初始应变, 以便于检测分析时空间定位。最后在传感光纤部位涂覆粘结剂, 将传感光纤完全粘贴于钢管主表面, 粘结剂完全固化后对“传感钢管”进行检测, 检测合格后准备打入过程试验。

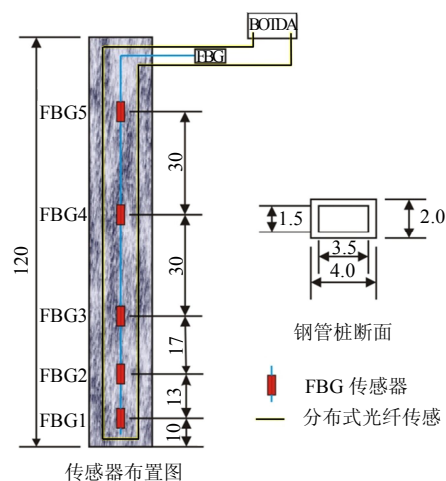


图4 钢管尺寸图及传感光纤布设图(单位: cm)

Fig.4 Pipe size and layout of the sensing optical fiber (unit: cm)

试验开始时, 将各传感光纤和解调仪相连接, BOTDA 测量分布式光纤应变传感器初始值。为模拟管桩接管过程, 到达预定高度后暂停一段时间。FBG 解调仪点击开始, 以同一高度和同一频率开始

锤击, FBG 实时监测, 同时记录锤击数。钢管沉桩到设计高度后, 暂停, BOTDA 开始测量, 如此重复, 直到钢管到达指定设计高度或者沉降已经趋于停止, 如图 5 所示。

5 试验结果及分析

5.1 打入过程中 FBG 中心应变变化规律

管桩在打入过程中, 分别打入不同深度、其间暂停 5 min 内测量击入过程中钢管的 BOTDA 和 FBG 应变。图 6 为打入不同深度动态过程应变图。

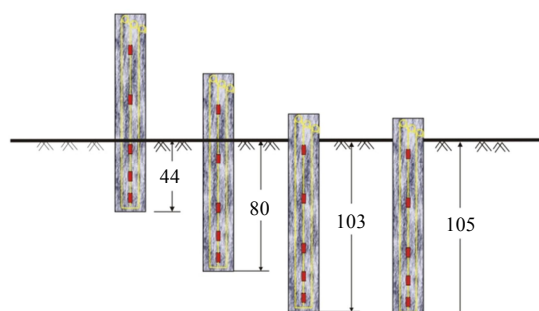


图 5 钢管沉桩过程图 (单位: cm)

Fig.5 The graph of pipe driving processing (unit: cm)

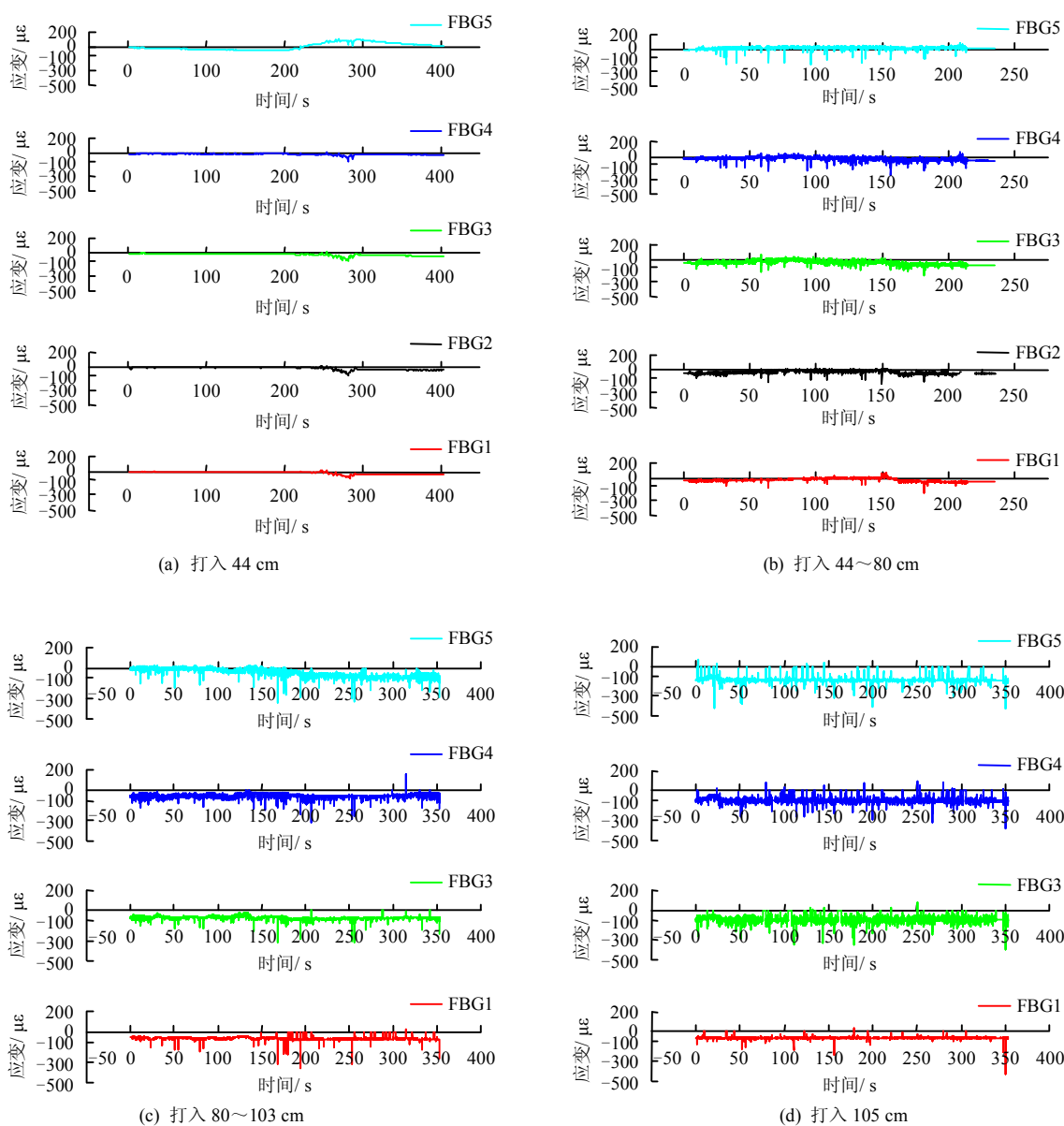


图 6 击入不同深度后 FBG 应变图

Fig.6 FBG strain diagram when pile driving into different depths

44 cm 击入过程中后下段 3 个传感器逐步进入土层中, 上端 2 个传感器未进入土层。从图 6(a)可

以看出, 时间轴上, 前段时间为预热准备阶段, 各传感器中心应变变化不大。大约从 200 s 开始, 管

桩开始打入,各传感器应变开始出现变化。最上端 FBG 传感器 FBG5 表现为拉应变状态,其他传感器表现为压应变状态,分析原因主要为锤击位置出现偏移产生偏心荷载;传感器对锤击表现的较为敏感,锤击时应变出现波动;由图可以判断,在 200~300 s 左右的时间内为钢管打入过程;在入土过程中,下面 3 段压应变大小相差不大,未入土 FBG 传感器 FBG4 和下面入土压应变大小相差也不明显;5 个传感器应变传递显示为较为同步,滞后现象亦不明显。

图 6(b)为击入 44~80 cm 过程随时间应变图,此阶段下段 4 个传感器进入土层中。从图中可以看出,钢管桩桩身应变对锤击较为敏感,锤击作用下应变发生较大范围的波动,锤击敏感度从上往下逐渐降低,进入土层中的传感器基本表现为压应变,未进入土层传感器应变以拉应变为主,管桩上段存在着偏心荷载,但偏心荷载与击入 44 cm 过程相比已经减小;应变传递较为同步,传感器 FBG3、FBG4 压应变均质要大于 FBG1、FBG2。

图 6(c)为击入 80~103 cm 应变随时间演变图,此阶段最上段传感器逐步进入土层,其中 FBG2 传感器出现故障。从图中可以看出,钢管桩身应变对锤击较为敏感,锤击作用下应变发生较大范围的向下波动,但总围绕某一中心应变向下波动,传感器进入土层后全部基本表现为压应变,应变传递较为同步。从整体趋势或平均值来看,上段压应变要大于下段应变。

图 6(d)传感器已经全部进入土层。从图中可以看出,钢管桩身应变对锤击较为敏感,锤击作用下应变发生较大范围的上下波动,与图 8 相比,应变围绕某一中心应变呈现为上下波动的状态,有的还出现拉压应变,这种现象上段传感器要明显于下段传感器,主要原因是土体对钢管有一定的减振效果。从整体趋势和平均值来看,所有传感器都基本显示为受压状态,上面传感器应变要大于下面应变。

结合图 6 各图可以分析出钢管桩沉桩过程中桩身应变变化规律:

(1) 沉桩过程中,同一锤击能量作用下开始打入过程中桩基下沉较快,桩顶实际反作用力较小,FBG 传感器反映出来的应变变化幅度较小,桩顶锤击力使桩上端未入土段产生弯曲变形和偏心荷载,在此作用下,出现拉应变。

(2) 当传感器全部进入土层中,所有传感器基本都呈现为受压状态,在相同土层情况下,上段压应变要大于下段压应变,桩基所受力逐渐传递给土

层。

(3) 随着桩基的下沉,土层所分担的动荷载越来越多,桩基沉桩越来越困难,桩顶反作用力越来越大,应变从原来向下波动到围绕某一中心应变上下波动。波动幅度较大后桩身出现拉应力,如果打入过程中桩基垂直度出现偏差,发生偏心荷载,两种拉应变效应结合在一起大于桩基容许拉应力后桩身容易出现裂缝甚至破坏。

5.2 打入过程暂停(接管)时 FBG-BOTDA 联合感测应变变化规律

按照前面所述数据处理方法,得到沿桩身同一主面 U 形分布式应变分布图,如图 7 所示。

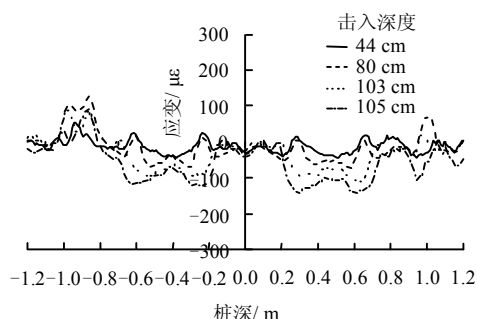


图 7 分布式光纤监测随桩深应变图

Fig.7 Pile strain diagram of distributed optical fiber monitoring with depth

从图 7 中可以看出,入土深度 44 cm 时,入土段桩身主要表现为受压状态,U 形分布图来看,传感器呈现为基本对称受力状态,未入土分布式光纤传感器受力状态局部出现拉应变,桩顶局部受偏心荷载作用;入土深度 80 cm 时,入土段桩身主要表现为受压状态,未入土分布式光纤传感器 80~100 cm 段局部出现拉应变,桩顶局部受偏心荷载作用,但不明显;入土深度 103 cm 时,桩身主要表现为受压状态,但入土上段局部出现拉应力,受偏心荷载作用效果明显;入土深度 105 cm 时,桩身应变主要表现为受压状态,但桩顶受偏心荷载作用效果明显。

由于 FBG 传感器布设在 BOTDA 传感器 U 型分布中间,取 BOTDA 同一截面数据,将其平均后,与 FBG 监测数据对比,如图 8 所示。

从 FBG-BOTDA 联合监测数据可以看出,FBG 监测数据精度高,能够反映被监测点的准确状况,BOTDA 分布式光纤感测技术能够较为全面的把握桩身应变发展总体规律和发展趋势。从 BOTDA 测试的数据来看,打入段主要受压应力,随着深度的

增加, 压应力也逐渐减, 压力逐步传递给土体; 没有打入段, 局部有受拉应力出现, 这与 FBG 监测的数据较为吻合。对比 BOTDA 与 FBG 试验数据, 可以为管桩设计提供参考, 一是打入过程中合理选择锤击的大小; 二要管桩在设计中除要满足受压要求外, 还要满足一定的抗拉要求, 由于混凝土的抗压不抗拉, 也可以解释为何管桩在打入过程中容易爆桩的原因。

FBG-BOTDA 联合监测技术即可以克服 FBG 准分布式传感器以点概面的监测误差, 又可以克服重点部位全分布式传感器精度不足的问题。随着解调技术的成熟, 在全分布式传感光纤上直接刻栅复合利用 FBG-BOTDA 技术。

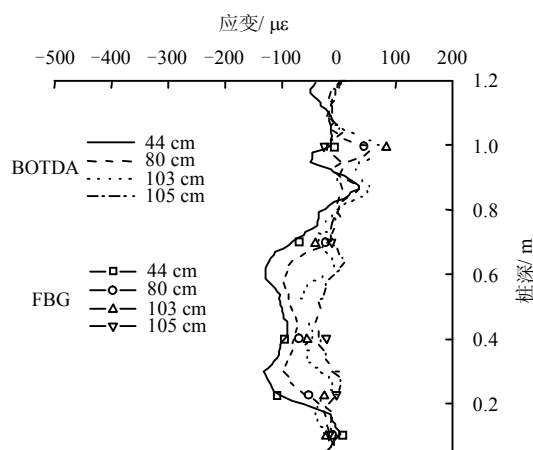


图 8 BOTDA 与 FBG 暂停状态下桩身应变图
Fig.8 Diagram of BOTDA and FBG suspended pile strain

6 结 语

针对管桩在施工过程中经常出现坏桩、爆桩等质量事故, 应用可实时动态具有高分辨率和精度的准分布式光纤传感技术 FBG 和具有高分辨率和精度的分布式光纤传感技术 BOTDA 模拟监测桩基打入过程中的应变变化情况。通过奇异值检验、滤波、模型建立等数据分析和处理方法, 模拟再现了管桩施工过程, 获得了随桩身不同打入深度的应变变化曲线。试验结果表明, FBG-BOTDA 联合监测技术即可以精确获取监测点动静数据又可以全面把握桩身应变发展趋势, 弥补了全分布式传感技术动态监测不足, 又弥补了点式传感器以点概面的误判。随着解调技术的成熟, FBG 与 BOTDA 传感器实现复用, FBG-BOTDA 联合监测技术利用前景十分广阔。文中管桩击入过程和接管过程中所反映的应变变化特点可以为管桩的设计、施工提供很好的借鉴。

参 考 文 献

- [1] 余小奎. 分布式光纤传感技术在桩基测试中的应用[J]. 电力勘察设计, 2008, 15(8): 12—16.
YU Xiao-kui. Research on the testing of piles based on distributed optical fiber monitoring sensing technique[J]. *Electric Power Survey & Design*, 2008, 15(8): 12—16.
- [2] 刘坤义. 某码头工程 PHC 管桩竖向裂缝检测方法加固补强[J]. 引进与咨询, 2006, 15(8): 64—65.
LIU Kun-yi. The PHC pipe pile vertical crack detection method and reinforcement of a wharf engineering[J]. *Introduction and Consultation*, 2006, 15(8): 64—65.
- [3] 李正印, 柯宅邦, 刘东甲, 等. 低应变反射波法判别 PHC 管桩接头质量的研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 209—212.
LI Zheng-yin, KE Zhai-bang, LIU Dong-jia, et al. Tests on PHC pipe pile joint quality by low-strain reflected wave method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2): 209—212.
- [4] 雷国辉, 艾英钵, 何振兴, 等. 粉细砂中敞口 PHC 管桩群桩锤击施工效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 294—302.
LEI Guo-hui, AI Ying-bo, HE Zhen-xing, et al. Driving response of an open-ended PHC pipe pile group in silty fine sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(2): 294—302.
- [5] 刘裕华, 陈征宙, 彭志军, 等. 应用圆孔柱扩张理论对预制管桩的挤土效应分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2167—2172.
LIU Yu-hua, CHEN Zheng-zhou, PENG Zhi-jun, et al. Analysis of pile driving effect of precast tubular pile using cylindrical cavity expansion theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2167—2172.
- [6] 施斌, 徐学军, 王镝, 等. 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, et al. Study on botdr-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2622—2628.
- [7] 张丹, 施斌, 吴智深, 等. BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. 土木工程学报, 2003,

- 36(11): 83—87.
- ZHANG Dan, SHI Bin, WU Zhi-shen, et al. Distributed optical fiber sensor based on botdr and its application to structural health monitoring[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 27(7): 1224—1228.
- [8] 刘杰, 施斌, 张丹, 等. 基于 BOTDR 的基坑变形分布式监测实验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1224—1228.
- LIU Jie, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Experimental study of foundation pit monitoring using BOTDR-based on distributed optical fiber sensor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1224—1228.
- [9] 吴智深, 施斌, 原田隆郎, 等. 可用于结构健康监测的 BOTDR 光纤变形检出特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(18): 56—60.
- WU Zhi-shen, SHI Bin, HARADA TAKAO, et al. An experimental study on the measuring characteristics of BOTDR for structure health monitoring[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(18): 56—60.
- [10] 葛捷. 分布式布里渊光纤传感技术在海堤沉降监测中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1856—1860.
- GE Jie. Application of BOTDR to monitoring sea dyke subsidence[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1856—1860.
- [11] 钱振东, 黄卫, 关永胜, 等. BOTDA 在沥青混凝土铺装层裂缝监测中的应用[J]. 东南大学学报, 2008, 38(5): 799—803.
- QIAN Zhen-dong, HUANG Wei, GUAN Yong-sheng, et al. Application of BOTDA on cracking monitoring for asphalt concrete pavement[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2008, 38(5): 799—803.
- [12] 魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG 在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571—576.
- WEI Guang-qing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(4): 571—576.
- [13] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821—828.
- ZHU Hong-hu, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 821—828.
- [14] 施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493—499.
- SHI Bin, XU Hong-zhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 493—499.
- [15] 魏广庆, 施斌, 贾建勋, 等. 分布式光纤传感技术在预制桩基桩内力测试中的应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 911—916.
- WEI Guang-qing, SHI Bin, JIA Jian-xun, et al. Application of distributed optical fiber sensing to testing inner force of prefabricated piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(6): 911—916.
- [16] LU Y, SHI B, WEI G Q, et al. Application of a distributed optical fiber sensing technique to monitoring the stress of precast piles[J]. **Smart Materials and Structures**, 2012, 21(11), 115011.
- [17] 江宏. PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术及其在试桩中应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3190—3195.
- JIANG Hong. PPP-BOTDA distributed fiber optic sensing techniques and its application to pile tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3190—3195.
- [18] 丁勇, 王平, 何宁, 等. 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, et al. New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 719—724.
- [19] ZHU H, HO A N L, YIN J, et al. An optical fibre monitoring system for evaluating the performance of a soil nailed slope[J]. **Smart Structures and Systems**, 2012, 9(5): 393—410.