

## 深基坑支护桩布里渊光时域分布式监测方法研究

索文斌<sup>1</sup>, 程刚<sup>1</sup>, 卢毅<sup>2</sup>, 孙义杰<sup>3</sup>, 施斌<sup>1\*</sup>

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093;

2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 南京 210049;

3. 南京工业大学交通运输工程学院, 南京 211800

**摘要:** 支护桩是深基坑支护结构中的关键组成部分, 其支护效果直接影响到深基坑的稳定性, 因此对支护桩应力应变状态的监测十分重要。该文选择了一种能够单端测量的分布式光纤感测技术—布里渊光时域反射计(简称BOTDR), 将其应用于深基坑支护桩的变形监测, 介绍了这一技术的基本原理、需解决的关键问题及实施技术路线, 并结合南京某深基坑工程, 验证了这一技术方法的监测效果。结果表明, 基于BOTDR的监测方法可以对深基坑支护桩进行全分布式监测, 方法可行, 结果准确, 为深基坑支护桩监测提供了一种新的技术手段。

**关键词:** 支护桩; 分布式光纤感测技术; 深基坑; BOTDR; 监测方法

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2016)04-0724-09

## Study on Distributed Monitoring Method of Deep Foundation Pit Retaining Pile Based on the Brillouin Optical Time Domain Technology

SUO Wenbin<sup>1</sup>, CHENG Gang<sup>1</sup>, LU Yi<sup>2</sup>, SUN Yijie<sup>3</sup>, SHI Bin<sup>1\*</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Key laboratory of Earth fissures Geological disaster, Ministry of Land and Resources, Geological Survey of Jiangsu Province, 210049, China

3. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, 211800, China

**Abstract:** Retaining pile is a key part of bracing and retaining structures which directly affect the stability of deep foundation pit. Therefore, it is important to monitor the strain and stress state of a retaining pile. In this paper, the single-ended detecting distributed optical fiber sensing technology based on the Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer (BOTDR) was used for monitoring the deformation of a PHC type retaining pile in a deep foundation pit. The monitoring method was described and its effectiveness was well verified in a deep foundation pit in Nanjing. The results indicate that the BOTDR-based method is feasible to make a fully-distributed monitoring of the retaining pile in the deep foundation pit. It is expected to be a novel way for monitoring deep foundation pit.

**Key words:** Retaining pile; distributed fiber optical sensing (DFOS); deep foundation pit; BOTDR; monitoring method

**Corresponding author:** SHI Bin, Professor; E-mail: shibin@nju.edu.cn

支护桩是深基坑支护结构的关键组成部分, 一旦失稳将会给工程本身以及周边环境带来不可挽回的损失(张旷成和李继民, 2010; 郑刚等, 其支护效果直接影响到深基坑的稳定性, 基坑一

收稿日期: 2016-08-31; 修回日期: 2016-10-10

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(41427801); 国土资源部公益性行业专项(201511055); 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室开放课题(201401)联合资助

作者简介: 索文斌, 男, 1980年生, 博士研究生, 地质工程专业; E-mail: swbin@nju.edu.cn

\*通讯作者: 施斌, 教授; E-mail: shibin@nju.edu.cn

2014),因此对深基坑支护桩进行监测十分重要(宋建学等,2006;王超等,2014)。常用的基坑支护桩监测技术大多是基于电测和点式感测原理的,这类传感器所测结果较为离散(易漏检,有盲区),偶然误差较大;在地下环境中容易被腐蚀,传感器成活率低、耐久性差;实时、并行和自动化监测程度不高,难以实现长距离和大面积的监测目标(隋海波等,2008)。

分布式光纤感测技术是近十余年来发展起来的新型监测技术,具有分布式、长距离、抗电磁干扰、耐久性好、耐腐蚀等优势,被应用于结构工程、土木工程、岩土工程、地质工程等领域,取得了一系列成果(施斌等,2005;Zhang,2006;魏广庆等,2009;朱鸿鹄和施斌,2013,2015)。分布式光纤感测技术有许多种类,如FBG,ROTDR,BOTDR,BOTDA等,它们各有不同的特点和功能(Sun et al.,2014)。本文选择了一种能够单端测量的分布式光纤感测技术—布里渊光时域反射计(简称BOTDR),介绍了这一技术的监测原理和方法,探讨了其在深基坑支护桩监测应用方面需要规范和注意的技术问题,并结合南京某深基坑工程,验证了这一监测方法的效果。

## 1 支护桩布里渊光时域分布式监测原理与技术特点

BOTDR是基于自发布里渊光散射的一种分布式光纤感测技术。脉冲光在光纤中传播时,会与光纤中的光声子发生作用并产生布里渊散射现象,当光纤沿线温度变化或轴向产生形变时,会产生布里渊频率漂移。布里渊频移变化量与光纤的温度、应变的关系可表示为(黄民双等,1999):

$$v_B(\varepsilon, T) = v_B(0, T_0) + C_1 \varepsilon + C_2 (T - T_0) \quad (1)$$

式中,  $v_B(\varepsilon, T)$  为环境温度为  $T$ 、光纤所受应变为  $\varepsilon$  时,光纤中布里渊频率的漂移量;  $v_B(0, T_0)$  表示温度为  $T_0$ 、应变为 0 时光纤布里渊频率的漂移量;  $C_1$ 、 $C_2$  分别表示与光纤类型有关的应变和温度的比

例系数(简称为温度系数和应变系数)。

光纤发生布里渊频移的位置信息可以通过测量接收到脉冲光与背向布里渊散射光之间时间延迟的而获得,如下式所示(倪玉婷等,2006):

$$Z = cT/(2n) \quad (2)$$

式中,  $c$  为光速;  $n$  为光纤的折射系数;  $T$  为发出脉冲光后至接收到散射光的时间间隔。

对于深基坑支护桩监测,可以通过特殊布设工艺将分布式感测光缆布设于支护桩体内部或表面,基于BOTDR原理可以测量得到感测光缆沿线每一点的应变、温度分布信息。该技术集感测与信号传输于一根光纤,极大的简化了传感器的布设和安装程序,有效提高了监测系统的整体可靠性(魏广庆等,2009)。

## 2 支护桩布里渊光时域分布式监测工法

支护桩种类较多,根据其施工特点,主要可以分为灌注桩和预制桩两种。针对不同的桩型,考虑到感测光缆的成活率、施工安装的可操作性和监测精确度,需处理好感测光缆选择、感测光缆布设方案、温度补偿等关键技术环节。

### 2.1 感测光缆选择

感测光缆为多层结构,分为纤芯、包层、涂覆层、护套等。无护套的感测光缆称为裸纤,纤细脆弱,极易折断,仅适合室内试验研究使用。为应对工程中的复杂工作环境,还需在裸纤外封装护套和保护层以提高光缆的强度和抗破坏能力。表1为两种适用于基坑支护桩监测的分布式感测光缆的传感参数,图1为感测光缆示意图。

基于BOTDR技术的感测光缆在使用前需进行标定,以获得光缆的温度系数和应变系数。根据式(1),光缆的温度系数只需将一段自由光缆(不发生应变),置于可进行温度控制的仪器中(常用的是恒温箱),对其进行逐级加温,记录监测数据,绘制频谱曲线,即可计算出光缆的

表1 感测光缆参数

Table 1 Parameters of optical fiber sensors

光纤	直径(mm)	弹模 (GPa)	重量 (kg/km)	抗拉力 (N)	适用 桩型	频移-应变系数 MHz/ $\mu\varepsilon$	频移-温度系数 MHz/ $^{\circ}\text{C}$
金属基索状感测光缆	5	42	38	2350	灌注桩	0.04900	1.775
海翠料紧包感测光缆	0.9	2	3.8	25-38	预制桩	0.04958	2.990

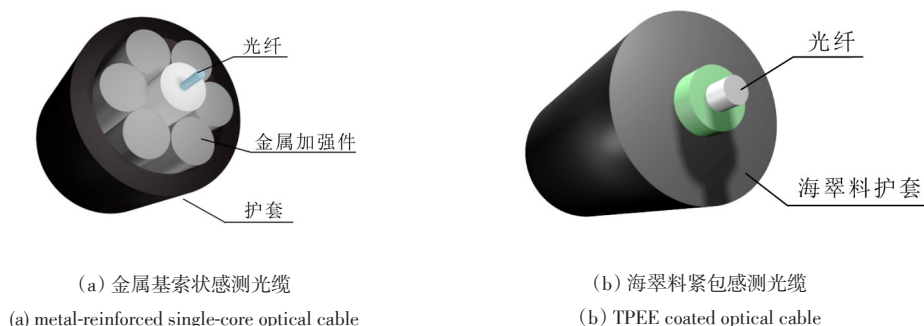


图1 感测光缆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing a fiber optical sensing cable

温度系数。

光缆应变系数需要用特定的方法进行标定,常用的方法有等强度梁法,等应变拉伸法等(索文斌等, 2006)。如图2所示,将光缆固定在等应变定点拉伸试验台或等强度梁上,在恒温条件下,对光缆逐级拉伸,记录监测数据,绘制频谱曲线,即可计算出光缆的应变系数。

## 2.2 支护桩感测光缆布设工艺

感测光缆既是传感元件又是传输媒介,其布设质量直接影响到支护桩变形监测的效果。在大量室内外试验的基础上,笔者总结得到了以下感

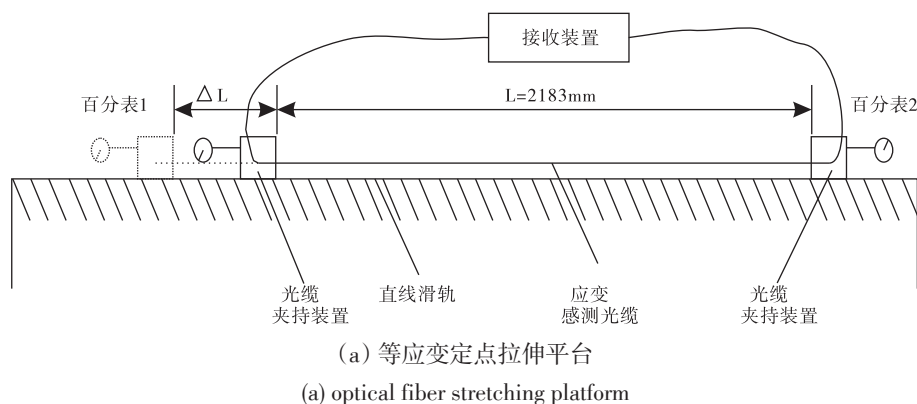
测光缆的布设工艺。

### 2.2.1 灌注类支护桩体的布设

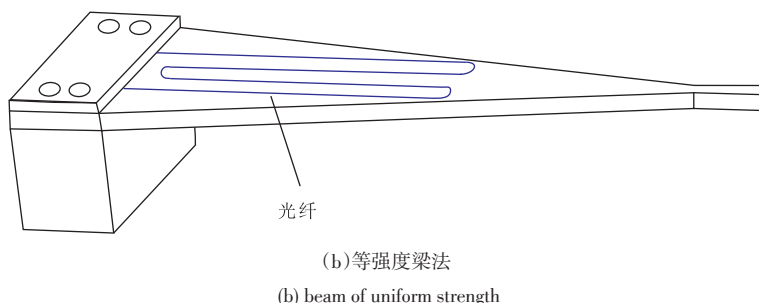
从桩端到桩顶,沿钢筋笼主筋方向竖直布设感测光缆。固定方式以扎带及环氧树脂胶,将光纤按固定间隔点式固定,以防止光缆滑脱。同时考虑到感测光缆的成活率,采用U型进行布设,如图3所示。其主要安装步骤如下:

(1) 放线。将感测光缆沿着钢筋走向放线,穿过横档钢筋,为减少混凝土浇筑对光缆造成损坏,光缆紧贴钢筋笼主筋内侧安装。

(2) 绑扎。光缆一端固定,另一端利用锁线



(a) 等应变定点拉伸平台  
(a) optical fiber stretching platform



(b) 等强度梁法  
(b) beam of uniform strength

图2 光纤应变系数标定装置

Fig. 2 Schematic diagram showing the strain coefficient calibration system

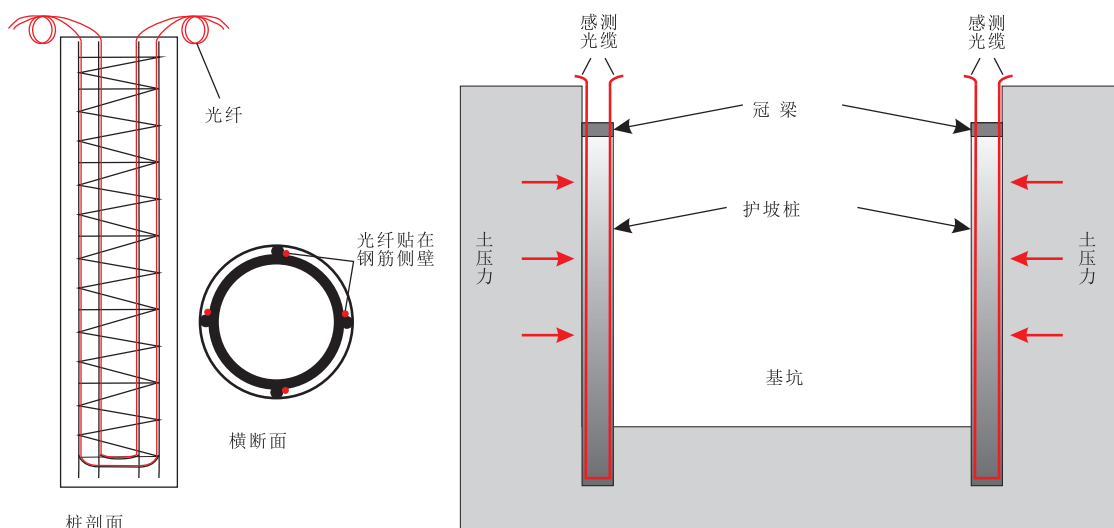


图3 光纤布设示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing the layout of optical fiber

器拉紧。在拉伸两点间用尼龙扎带或胶带按固定间隔进行绑扎固定。

(3) 过弯和出口保护。在光缆弯曲和出混凝土位置套松套管进行保护,防止光缆折断。混凝土灌入过程,引线覆盖保护,防止机械设备破坏。

#### 2.2.2 预制类支护桩体光纤布设

预制桩,特别是PHC管桩,成桩工艺复杂,难以在成桩前布设感测光缆。采用表面刻浅槽植入光纤后再用环氧树脂胶封装布设的方式,可有效提高感测光缆的成活率,其主要工序如下:

(1) 表面切槽。设计布设路线并在桩表面切出一道深约5 mm的V字型凹槽,并对凹槽进行除尘和清洗。

(2) 固定光纤。将调配好的粘结剂在凹槽内预先打底,将光缆沿着布设线路整理好,用定点的方式将光缆草铺在设定的线路上。光缆完全放置在凹槽后,采用粘结剂将凹槽填满。

(3) 对接与保护。布设好光纤的桩按先后顺序沉桩,如分段沉桩则需待桩焊接完成后将上下桩对应的各条光纤进行对接并保护,冗余的光纤盘在桩接头处加特殊保护层后继续沉桩。外露光纤接头采用套管保护后再用缓冲材料包裹固定。

#### 2.3 温度补偿

由式(1)可知,布里渊频移对应变和温度交叉敏感,支护桩温度随季节、地下水位的变化而变化,为得到准确的支护桩变形信息,需降低和

消除环境温度变化的影响。可以采用直接补偿和间接补偿两种方法(朴春德等,2009)进行光纤温度补偿。直接补偿是通过测量环境温度,利用布里渊频移计算公式进行温度修正。间接补偿是在感测光缆旁安装一条不受结构应变影响的温度补偿光缆,将变形监测光缆的监测结果减去温度补偿光缆的测量值,得到被测结构的真实应变。

### 3 某基坑工程PHC支护桩分布式监测

为验证深基坑支护桩布里渊光时域分布式监测方法的可行性,笔者选择了南京奥体地区某深基坑工程进行支护桩监测,对这一监测方法开展了实证研究。

#### 3.1 工程背景

某工程是位于南京奥体地区的大型建筑群基坑,该基坑为矩形,长369 m,宽262 m。普遍挖深13.25 m,局部电梯基坑挖深16.75 m,开挖土方量约113万 $\text{m}^3$ ,为一级大型基坑。

工程所在地处长江河漫滩地带,属于典型的软土地区,基岩埋深较深,层顶埋深平均-50 m,由表层至基岩主要分布粉质粘土、淤泥质粘土、粉土夹砂、粉细砂。水文地质条件较好,地下水资源丰富,分布着大量的潜水,少量的弱承压水。图4所示,本工程为无内支撑支护形式,支护施工采用双排PCMW工法,即在水泥搅拌土硬化前插入预应力管桩,形成预应力管桩水泥土墙复合支护结构。大部分坑段侧壁采用A900@1200 mm三轴深搅水泥搅拌桩内插PHC800(130)预应力



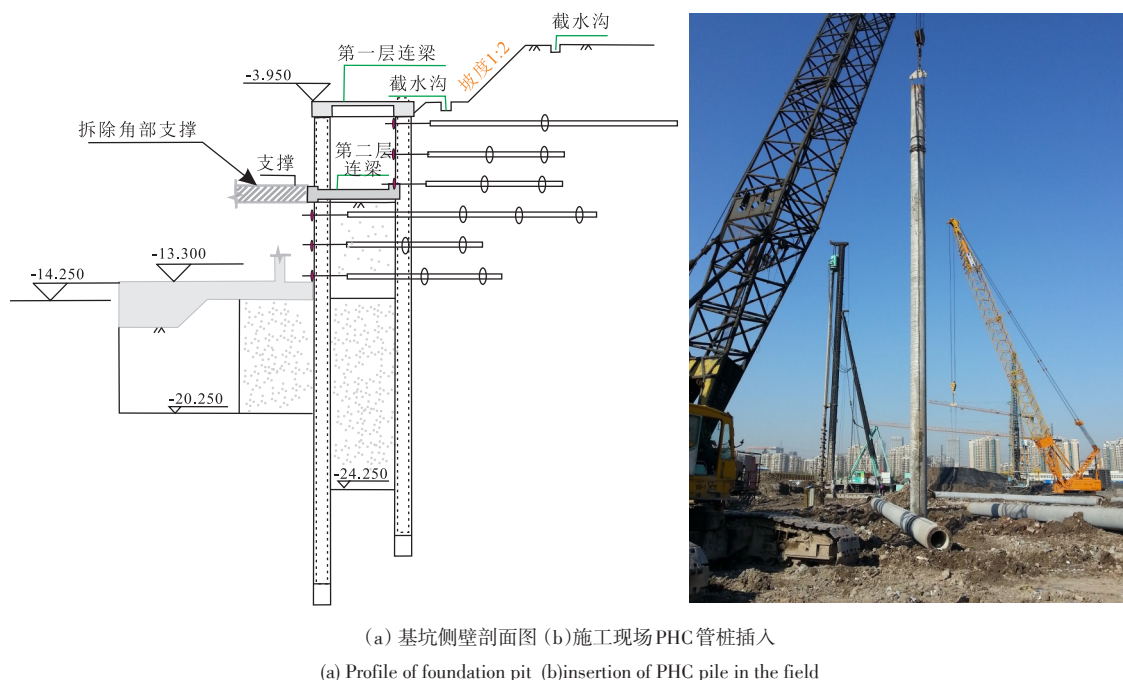


图4 双排PCMW工法桩

Fig. 4 The PCMW pile construction method

管桩，桩长为27 m、25 m，局部区段采用灌注桩加6排锚杆支护结构体系，桩顶标高为-4.7 m，水泥搅拌桩水泥掺量为22%，深度为管桩长+2 m。

### 3.2 监测方案

#### 3.2.1 感测光缆安装及监测步骤

本研究监测对象为双排PCMW工法桩中的PHC管桩，选用0.9 mm的海翠料紧包感测光缆，其相关性能指标见表1。PHC管桩感测光缆布设如图5所示。感测光缆安装方案及监测步骤如下：

(1) 确定监测断面，选择测试桩。根据数值模拟、基坑计算、专家咨询等方式选择了监测重点区域，挑选同一断面的两根测试桩。

(2) 按照2.2.2节介绍的安装方案预先将感测光缆布设到PHC桩表面，加盖环氧树脂胶保护。

(3) 在沉桩时要保证桩身安装光纤的方向和基坑走向垂直，沉桩结束后，将两根桩的感测光缆进行串联，做好PHC桩头感测光缆、串联光缆和引线（连接至BOTDR的光缆）的保护。

(4) 待基坑上覆土开挖至桩头高度时，取出保护好的引线连接至BOTDR，并到基坑外安全区域读取测试初值。

(5) 按照规程要求和工程实际进行监测，分析监测结果做好报警和数据保存。

#### 3.2.2 测试仪器及参数

本文采用的BOTDR仪器（AV6419）是中国电子科技集团第41研究所开发的我国第一款商业化BOTDR设备（图6），于2011年面市，该设备在其测量精度、测量时间较日产的AQ8603型BOTDR均有显著提高，现已应用到隧道、地质灾害、堤坝的变形和安全监测等领域，其参数详见表2。

#### 3.2.3 监测周期

本此测试选取基坑土方开挖、地下室施工阶段

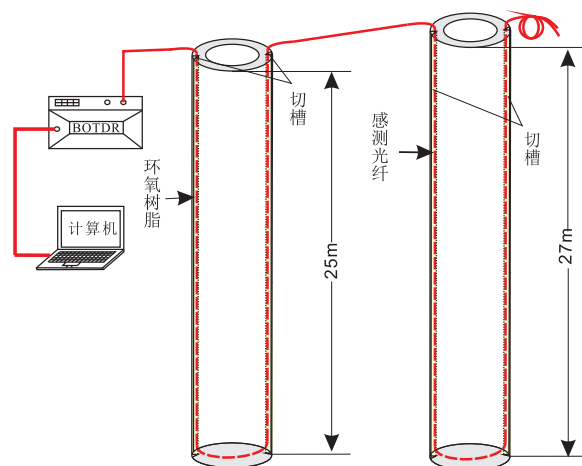


图5 PHC桩光纤布设示意图

Fig. 5 Layout of an optical fiber in the PHC piles

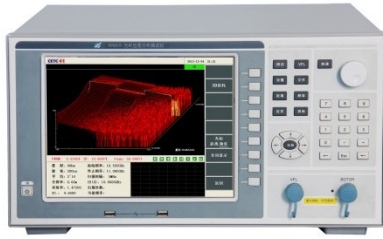


图6 AV6419 型光纤应变分析仪

Fig. 6 AV6419 BOTDR instrument

进行监测。监测周期自2015年3月—2015年12月。

### 3.3 PHC支护桩变形监测结果分析

基坑开挖过程中支护桩起着关键性支持作用,支护桩桩身变形对评价基坑支护效果及研究土体侧向变形规律具有重要意义。根据基坑开挖进度,选取2015年3月10日监测数据为初始值,将以后每次测得的数值与初始值作差,即可得到相应时段内支护桩的受力、变形情况,进而对基坑稳定性做出评价。

依据具体的施工进度选择部分典型数据进行分析。如图7为基坑外侧25 m支护桩桩身应变光纤监测数据。对称布设的一组应变感测光缆有效获得了支护桩身的应变全分布,其中桩身受侧向土压力而发生了偏斜,桩身的迎土面和背土面分别产生了拉、压应变。

根据材料力学理论,由桩身应变测值计算可得到桩身挠曲变形情况。设 $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 分别为支护桩内外侧感测光缆在深度 $z$ 处的应变测试值,则挠曲应变值 $\varepsilon_m(z)$ 为:

$$\varepsilon_m(z) = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \quad (3)$$

图8为根据式(3)得到的基坑内外侧两支护桩挠曲应变。结果显示,随着基坑开挖深度的不断增加,桩身在基坑外侧土压力作用下产生的桩身挠曲应变拉压转变位置也不断下移,两者量值接近。其中基坑外侧桩从起初的4 m到最终约12 m埋深位置,桩身埋深自19 m以下稳固,而未产生明显的挠曲变形;基坑内侧桩从起初的2 m到最终的约14 m埋深位置,桩身埋深自24 m以下稳固而未产生明显的挠曲变形。

假设深埋的桩端底部为坐标零点,则桩身各埋深点 $z$ 处相对桩底的水平向位移 $v(z)$ 可表示为:

$$v(z) = \int_0^z \int_0^z \frac{\varepsilon_m(z)}{y(z)} dz dz \quad (4)$$

式中, $y(z)$ 为桩身半径。图9为根据式(4)计算得到的基坑内外侧两支护桩桩身不同位置处侧向位移。基坑内外侧两根支护桩桩顶变形显著,表明基坑开挖对周边土体扰动作用较明显,并随着深度增加,变形整体呈逐渐减小趋势。提取两桩桩顶位移数据,得到如图10所示的桩顶位移变化过程。数据显示,7月9日25 m桩桩顶位移达到实测最大变形约4.5 cm左右,随后开始逐步降低,并在10月23日出现回弹。27 m桩桩顶位移随着施工进度变形持续发展,于10月23日达到最大值约5.5 cm,随后变形量逐渐减少。

结合现场施工情况可知,根据内外排桩间第二层连梁所处深度(地面埋深-8.3 m,距离排桩顶部约4.5 m位置),可以将基坑开挖过程分为两个阶段。3月29日至6月19日三期监测位于挖土施工第一阶段,即在第二层连梁深度以上;7月9日至10月23日的测期,基坑开挖深度区间为-9.2 m至-14.5 m,已处于连梁深度以下,而在11月下旬,基坑开挖已全部见底。第一阶段,土体开挖初期,外侧支护桩直接承受基坑外侧土体压力,通过第一层连梁,内侧支护桩间接分担部分土压力,外侧桩体挠曲变形大于内侧桩体变形。随着开挖深度至第二层连梁位置以下,由于内外排桩间存在土层,内排桩也开始直接承受外侧土体压力,此时内外排桩间及其与土体间的相互作用变得极为复杂,外侧排桩变形减小,内侧排桩变形开始大于外侧排桩,表明内侧排桩开始承担更大

表2 AV6419 仪器性能主要指标

Table 2 Parameters of AV6419 BOTDR instrument

项目	性能指标				
测量范围(km)	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80				
空间采样间隔(m)	1.00, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05				
最大空间采样点数	20000				
光纤折射率	1.00000~1.99999				
入射脉冲光波长	1.55 $\mu\text{m}$				
频率采样范围(GHz)	9.9~11.9				
频率采样间隔(MHz)	1, 2, 5, 10, 20, 50				
平均次数	$2^{10} \sim 2^{24}$				
空间定位精度(m)	$\pm(2.0 \times 10^{-5} \times \text{测量范围(m)})$ $+0.2\text{m} + 2 \times \text{距离采样间隔(m)}$				
应变测量范围	$-1.5\% \sim 1.5\%$				
脉冲宽度(ns)	10	20	50	100	200
空间分辨率(m)	1	2	5	11	22
动态范围(dB)	2	6	10	13	15
应变测量精度*	$\pm 0.004\%$	$\pm 0.004\%$	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.003\%$
重复性*	$<0.04\%$	$<0.02\%$	$<0.02\%$	$<0.02\%$	$<0.02\%$

\*测量条件:平均次数 $2^{14}$ ,频率扫描间隔10 MHz

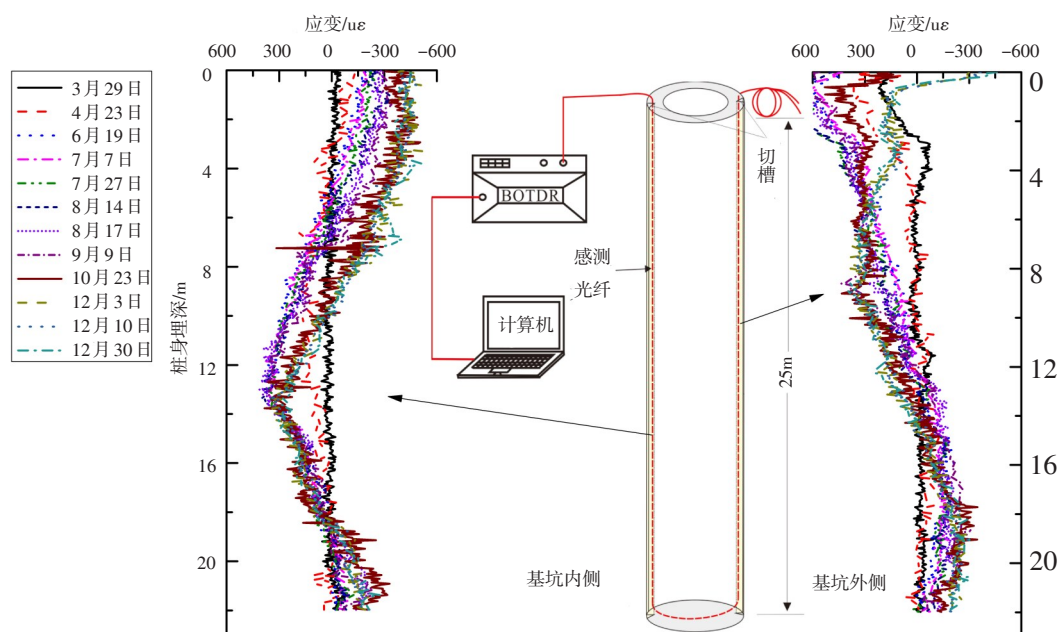


图7 基坑外侧25 m PHC支护桩应变监测结果

Fig. 7 Strain monitoring results of the 25 m long PHC pile

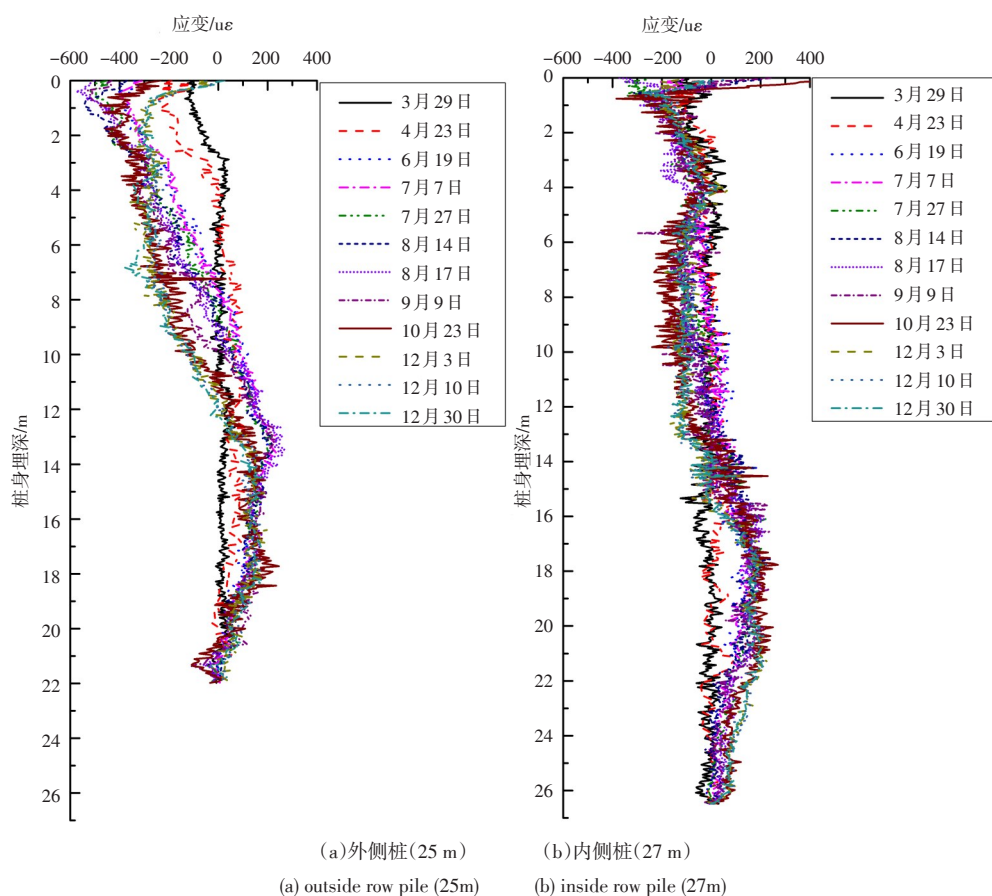


图8 外侧(a)与内侧(b)PHC支护桩挠曲应变

Fig. 8 Bending strain of PHC retaining piles for the outside row (a) and inside row (b)

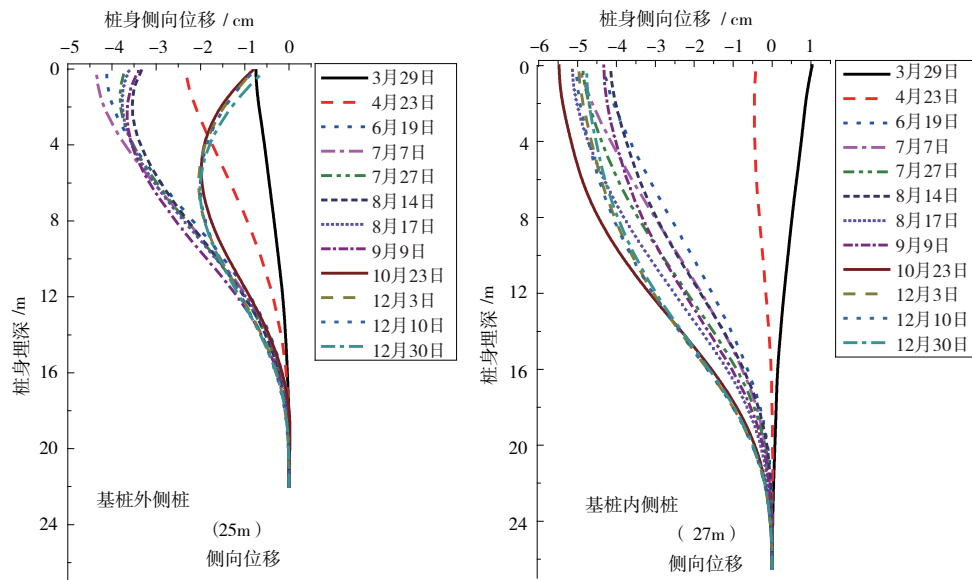


图9 双排桩侧向位移计算结果

Fig. 9 The calculated lateral displacement of the retaining piles

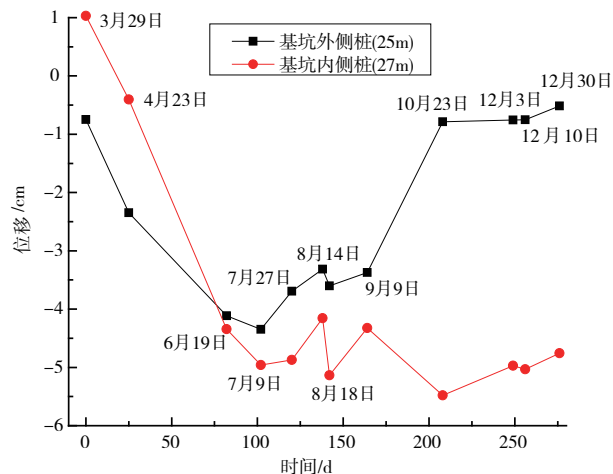


图10 支护桩桩顶位移时程变化曲线

Fig. 10 Displacement vs time curve of the retaining pile at its top

的土体侧压力。在此过程中, 桩土应力进行不断调整, 基坑开挖完成后, 应力调整也基本完毕, 桩体变形基本保持不变, 表明双排支护桩起到了很好的基坑支护效果。

## 4 结论

本文通过将分布式光纤感测技术引入深基坑双排支护桩变形监测中, 得到如下几点研究成果:

(1) 提出了基于BOTDR的深基坑支护桩监测方案, 详细介绍了感测光缆的布设工艺等技术环节, 具有较强的工程指导和借鉴意义, 可复制、可推广、可移植性强。

(2) 采用分布式光纤感测技术, 有效获取了深基坑支护桩连续分布式变形信息, 得到了基坑开挖过程中双排桩变形响应过程, 为深基坑的优化设计和施工调整提供参考依据。

(3) PCMW法双排支护桩工程实例的变形监测结果显示, 在开挖不同阶段, 内外排桩体现不同的变形受力特点, 在第二层连梁开挖深度前, 以基坑外侧排桩承担土压力为主; 第二层连梁深度以下, 则主要体现为基坑内侧排桩的受力变形。

由于对深基坑支护结构及其土体变形的认识 and 解释是一件复杂的系统工程, 需要结合基坑支护设计、工程地质条件、水文条件、施工情况、开挖数据等综合判别。本文提供了一种新的深基坑支护桩监测技术手段, 并将为完善和改进现有基坑支理论, 进一步深入研究深基坑支护结构和土体变形机理提供参考和依据。

## 参考文献 (References):

- 黄民双, 曾励, 陶宝祺, 等. 1999. 分布式光纤布里渊散射应变传感器参数计算[J]. 航空学报, 20(2):137-140.
- 倪玉婷, 吕辰刚, 葛春风, 等. 2006. 基于OTDR的分布式光纤传感器原理及其应用[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 1: 1-4.
- 朴春德, 施斌, 朱友群, 等. 2009. 灌注桩监测中BOTDR温度补偿试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2:161-164.
- 施斌, 徐学军, 王锦, 等. 2005. 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, 24(15): 2622-2628.
- 宋建学, 郑仪, 王原嵩. 2006. 基坑变形监测及预警技术[J]. 岩土工程学报, 28(s1): 1889-1891.



- 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 2008. 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, 28(2): 184-191.
- 索文斌, 施斌, 张巍, 等. 2006. 基于BOTDR的分布式光纤传感器标定实验研究[J]. 仪器仪表学报, 27(9): 985-989.
- 王超, 朱勇, 张强勇, 等. 2014. 深基坑桩锚支护体系的监测分析与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 33(s1): 2918-2923.
- 魏广庆, 施斌, 贾建勋, 等. 2009. 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, 31(6): 911-916.
- 张旷成, 李继民. 2010. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, s1:338-342.
- 郑刚, 程雪松, 刁钰. 2014. 基坑垮塌的离散元模拟及冗余度分析[J]. 岩土学, 2: 573-583.
- 朱鸿鹄, 施斌. 2013. 地质和岩土工程分布式光电传感监测技术现状和发展趋势——第四届OSMG国际论坛综述[J]. 工程地质学报, 21(1): 166-169.
- 朱鸿鹄, 施斌. 2015. 地质和岩土工程光电传感监测研究进展及趋势——第五届OSMG国际论坛综述[J]. 工程地质学报, 23(2): 352-360.
- Sun Y J, Zhang D, Shi B, et al. 2014. Distributed acquisition, characterization and process analysis of multi-field information in slopes [J]. Engineering Geology, 182: 49-62.
- Zhang W, Gao J, Shi B, et al. 2006. Health monitoring of rehabilitated concrete bridges using distributed optical fiber sensing [J]. computer aided civil and infrastructure engineering, 21(6): 411-424.