

分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用

朴春德, 施斌, 魏广庆, 朱友群, 张丹

(南京大学光电传感工程监测中心, 江苏 南京 210093)

摘要: 布里渊光时域反射计 (BOTDR) 是近年来国际上研发成功的一项新型的分布式光电传感技术, 该技术已开始广泛地应用于结构体的温度、应变、应力检测。尝试将这一技术应用于钻孔灌注桩试桩中桩身轴力分布、侧摩阻力分布及桩端阻力等的检测; 研发了一套传感光纤的埋设工艺; 提出了一种基于小波分析和移动平均法的 BOTDR 检测数据频谱处理方法; 通过一个工程实例对这一技术应用于钻孔灌注桩检测的可行性进行了论证。研究结果表明: 基于 BOTDR 光纤传感技术的钻孔灌注桩桩基分布式检测是一个十分有效的方法, 它与传统的钢筋计、土压力盒等点式检测技术相比, 具有分布式、一端检测、不需回路、长距离、耐久性好、成活率高、抗干扰强和与被测物协调性能好等优点, 可作为一种新型的分布式桩基检测技术加以推广。

关键词: 钻孔灌注桩; BOTDR; 分布式检测; 数据处理; 传感光纤

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)07-0976-06

作者简介: 朴春德(1979-), 男, 博士研究生, 从事岩土工程分布式监测与诊断研究。E-mail: piaochunde@126.com。

Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection

PIAO Chun-de, SHI Bin, WEI Guang-qing, ZHU You-qun, ZHANG Dan

(Center for Engineering Monitoring with Opto-Electronic Sensing, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) was a new distributed optical-electronic sensing technique successfully developed abroad. It had been widely applied in detecting temperature, strain and stress of the structures. BOTDR was employed to detect the distribution of strain, side friction and tip resistance of the bored piles. The technology embedded on the sensing optical fiber was developed, a spectral processing method of BOTDR detection data was presented based on the wavelet analysis and moving average method, and the feasibility of using BOTDR to detect the bored piles was demonstrated through a practical engineering project. It was indicated that the BOTDR-based distributed detection technique for the bored piles was quite effective. Compared with the traditional point-mode monitoring techniques such as strain gauge and earth pressure cell, there were obvious advantages for BOTDR such as distributing, single-end detection, long-distance, durability, high survival rate, strong anti-interference and better coordination, and it was a very potential technique for the pile detection.

Key words: bored pile; BOTDR; distributed detection; data processing; sensing optical fiber

0 引言

钻孔灌注桩作为一种主要的桩基础型式, 其工程质量的优劣直接影响上部建筑物的稳定。钻孔灌注桩属于隐蔽工程, 施工工序多, 在复杂地质条件下, 质量控制难度较大, 稍有不慎易出现桩身缩径、扩径、夹泥、断桩和沉渣过厚、钢筋笼错位等各种形态的质量缺陷, 影响桩身的完整性和单桩的承载能力。因此, 对钻孔灌注桩成桩质量的检测评估是桩基工程中一项必不可少的工作, 也是技术难度较大的一个环节^[1-2]。

目前, 常用的钻孔灌注桩桩基检测技术主要包括桩基静载荷试验、桩基动测以及超声波检测等方法^[3]。

静载试验是目前确定钻孔灌注桩单桩竖向抗压承载力最常用的方法。在静载荷试验中为了测定各级荷载下桩身的应变, 并了解桩的承载机理, 在桩身埋设各种传感元件, 如钢筋应力计、应变片等。但传统的点式传感器有以下缺点: 埋设少时容易出现漏检; 埋设过多时, 则由于引线过多影响桩身结构及承载力的发挥; 以及传感器与传导线的交接处易于接触不良、断裂而

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目 (40225006);
国家自然科学基金项目 (40572154)

收稿日期: 2007-09-03

使检测点失效、成活率较低等缺点, 在检测中不能很好的发挥作用。桩基动测以及超声波检测等方法作为间接的测试方法, 动态成分高, 容易受外界环境的干扰, 很难达到静载荷试验的检测精度。

布里渊光时域反射计 (BOTDR) 是一项全分布式尖端检测技术, 具有分布式、一端检测、不需回路、长距离、耐久性好、抗干扰强与被测物协调性能好等优点, 可以弥补点式检测技术的不足, 已成为一些主要发达国家竞相研发的一项尖端检测技术^[4-5]。

1 BOTDR 的检测原理

光纤传感技术是伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展而迅速发展起来的一种以光为载体, 光纤为媒介, 感知和传输外界信号的新型传感技术, 其核心技术是检测光纤中的背向布里渊散射信号。布里渊散射光受应变的影响, 当光纤沿线发生轴向应变时, 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所受的轴向应变 ε 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频率的漂移量就可以获得光纤的应变值。它们之间比例关系为

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) + \frac{dv_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \varepsilon, \quad (1)$$

式中, $v_B(\varepsilon)$ 为发生应变时光纤布里渊频率的漂移量, $v_B(0)$ 为无应变时光纤布里渊频率的漂移量, $dv_B(\varepsilon)/d\varepsilon$ 为比例系数, 约为 0.5 GHz/(% strain), ε 为光纤的应变值。

由光纤的一端向光纤中注入脉冲光时, 入射的脉冲光与光纤中的声学声子发生作用后产生布里渊散射, 其中背向布里渊散射光沿着光纤返回到脉冲光的入射端。因此, 由某一点返回的布里渊散射光到 BOTDR 的距离为

$$Z = \frac{cT}{2n}, \quad (2)$$

式中, c 为真空中的光速, n 为光纤的折射系数, T 为发出脉冲光至接收到散射光的时间间隔。

本课题所采用的 BOTDR 检测仪是由日本 NTT 公司研制的 AQ8603 光纤应变分析仪, 测量范围为 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80 km; 空间采样间隔为 1.00, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05 m; 空间定位精度为 $\pm (2.0 \times 10^{-5} \times \text{测量范围 (m)} + 0.2 \text{ m} + 2 \times \text{距离采样间隔 (m)})$; 应变测量范围为 $-1.5\% \sim 1.5\%$ ($15000 \mu\varepsilon$); 脉冲宽度为 10, 20, 50, 100, 200 s 时, 空间分解度为 1, 2, 5, 11, 22 m。脉冲宽度为 10, 20 s 时应变测量精度为 $\pm 0.004\%$ ($40 \mu\varepsilon$), 脉冲宽度为 50, 100, 200 s 时, 应变测量精度为 $\pm 0.003\%$ ($30 \mu\varepsilon$); 脉冲宽度为 10 s 时重复性为 $<0.04\%$, 其余为 $<0.02\%$ 。有关 BOTDR 技

术的详细检测原理可参见文献^[6-8]。

应用 BOTDR 对钻孔灌注桩进行分布式检测的原理是: 将传感光纤铺设在钻孔灌注桩钢筋笼的主筋上, 然后随着灌注混凝土将传感光纤植入桩体内, 使它在钻孔灌注桩的静载荷试验过程中与周围钢筋混凝土协调变形, 再在传感光纤一端, 通过 BOTDR 检测仪对桩内传感光纤长度上任一点的应变信息进行检测。

2 传感光纤的埋设工艺与检测步骤

传感光纤既是传感元件又是传输媒介, 它的铺设好坏直接影响到钻孔灌注桩检测结果。因此, 在大量的实验室和工程现场试验的基础上, 笔者总结了以下传感光纤的铺设方法: 从桩端开始到桩顶, 在钻孔灌注桩钢筋笼对称的二根主筋上, 把传感光纤以每隔 30~50 cm 固定一点的“定点粘结”方式, 将传感光纤固定在主筋上。为了确保传感光纤铅直铺设于桩中, 在固定时应对传感光纤给予一定的预应力。铺设在桩中的传感光纤呈 U 字形, 铺设的位置尽量靠近钢筋笼主筋的侧面, 以减少灌浆对传感光纤的破坏。铺设的传感光纤在桩头预留约 20 m, 后期测试时引出接入 BOTDR 检测仪器。为了防止后期桩头处理和养护过程中对传感光纤的破坏, 在桩头处预留的传感光纤应进行特殊保护。传感光纤的铺设工艺见图 1。

BOTDR 对钻孔灌注桩的检测过程是与桩的静载荷试验同步进行的。在检测之前先对桩身进行初值测试, 之后每加一级荷载稳定后约 10 min 对传感光纤检测一次, 直至最大荷载。卸载时, 每隔 1 h 在卸下一级荷载之前读取上一级荷载的数据, 直到试验结束后 3 h 读取最后一次数据。最后数据处理时把每级荷载下所测的变形数据减去初始值就是桩基的变形值。

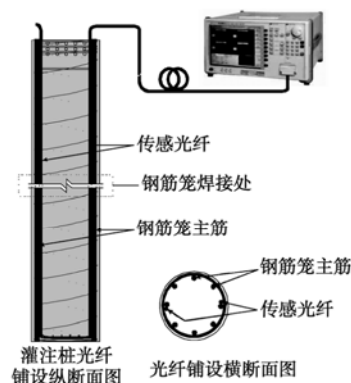


图 1 传感光线铺设示意图

Fig. 1 Sketch map of fiber paving

3 数据处理

BOTDR 对钻孔灌注桩载荷试验的检测结果是传

感光纤段在各级载荷下的应变频谱,因此还需要对检测结果的应变频谱进行去噪和平滑处理。去噪方法采用了小波分析的原理和方法;而平滑处理则采用了移动平均法。

3.1 小波分析除噪

BOTDR 仪器的测量灵敏度较高,由于受环境等多种因素的影响,测得的应变信号不可避免地会含有噪声^[9]。原始信号中一般含有噪声信号的高频信号和真实信号的低频信号,一个含有噪声的一维信号的模型可表示为

$$S(t) = f(t) + \sigma e(t) \quad (t=0,1,\dots,n-1), \quad (3)$$

式中, $f(t)$ 为真实信号, $e(t)$ 为噪声, $S(t)$ 为含噪声的原始信号。因此要准确得到测量信号,将要把真实信号与噪声信号分离开,保留真实信号,去除噪声信号^[10]。

小波变换是一种信号的时间-频率分析方法,具有多分辨率的特点,是一个范围可变的窗口方法。通过小波变换把原始信号进行多尺度分解,随着分解层次的增加高频系数的幅值迅速地衰减,因此要设定合理的阈值,对小波分解中的高频系数用阈值处理,大于阈值的部分保留,低于阈值的系数变为零,最后根据小波分解的底层低频系数和各层高频系数进行一维小波重构。

本文选择长度为 60 m 的桩基,利用 BOTDR 检测桩基的原始数据,通过小波变换,得到去噪后的真实信号,如图 2。图中,原始数据采样点数为 2289,采样距离间隔为 0.05 m,使用的母函数为 Daubechies 小波,采用 5 阶消失矩,分解层数为 3,高频系数是基于 Stein 的无偏估计的阈值处理,然后对信号进行重构。

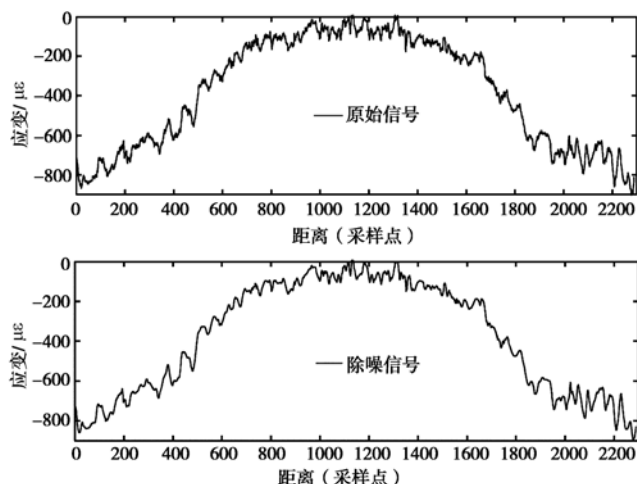


图 2 含有噪声的原始信号与除噪信号

Fig. 2 Original signal and noise removed signal

从除噪信号可以看出,除噪后的曲线清晰,高频

信号得到了有效抑制,除噪效果明显。

3.2 移动平均法修匀平滑

灌注桩中混凝土材料的类型、颗粒大小、级配以及桩土界面的状况等的不同,所测试的数据有一定程度的波动性。因此,当数值受这些因素影响起伏较大,不易显示曲线发展趋势时,运用移动平均法对数据进行修匀平滑,从而减弱或消除偶然因素的作用,显示应变曲线的变化趋势。

移动平均法是统计学中应用广泛的一种修匀方法,按对过去若干历史数据求算术平均数,并把该数据作为以后时期的预测值^[11-12]。计算公式可表示为

$$M_i = \frac{H_i + H_{i-1} + \dots + H_{i-n+1}}{n}, \quad (4)$$

式中, M_i 为第 i 期的累计应变移动平均值, H_i 为第 i 期的应变值, n 为移动平均的项数。

采用移动平均法进行数据处理时,对移动平均的项数 n 的选择非常重要, n 的选择影响着曲线的修匀程度。因此,利用移动平均法对桩基数据进行处理时,要结合桩基类型、桩基的埋设状况、周边土层的分布、桩土界面状况综合考虑确定合适的 n 值。图 3 中实线(拟合曲线)是把具有波动性的虚线(除噪曲线)通过项数 20 (移动距离为 1 m) 进行移动平均法后得到的。

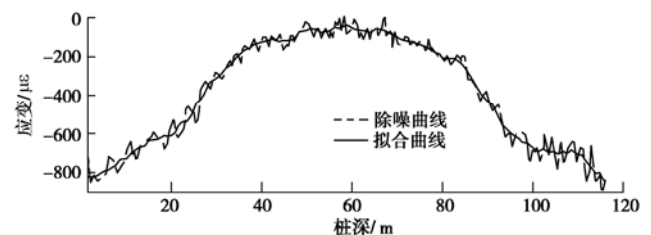


图 3 移动平均法拟合的曲线

Fig. 3 Fitting curve of moving average method

从图 3 中可以看出,通过移动平均法可以把不规则的变动进行修匀,基本消除数据的波动性,显示桩基应变的变化趋势,然后根据趋势线分析桩基的荷载传递状况。

4 BOTDR 在钻孔灌注桩检测中的应用实例

为了更好地说明 BOTDR 技术在钻孔灌注桩检测中的应用,本文结合某工程大直径超长钻孔灌注桩的载荷试验,采用 BOTDR 光纤检测技术对试桩的侧摩阻力和端阻力进行了测试,并与钢筋应力计进行了比较。

4.1 试桩概况

试桩属于某 CBD 中心的大直径超长灌注桩,桩径 1 m,桩长 60 m,采用静荷载试验方式。试桩采用

4 根锚桩加混凝土砌块堆载的方式提供抗压反力, 如图 4, 最大试验荷载值为 24600 kN。



图 4 静荷载试验布置图
Fig. 4 Arrangement of static load tests

为了量测桩顶荷载作用下桩身应力分布和桩基发挥效果, 钻孔灌注桩施工中在钢筋笼主筋上分别安装了传感光纤和钢筋应力计。试桩处地基土的物理力学性质指标见表 1。

4.2 测试结果分析

通过预埋在桩身上的光纤传感器可以得到试桩在各级荷载下的桩身应变分布曲线, 如图 5。

从图 5 中可以看出, 对称分布的两根传感光纤的应变分布曲线基本一致, 说明桩基施工质量良好, 不存在混凝土灌注偏心质量问题。从图中可以看出, 应变曲线在一些断面上有些波动, 这主要是由于桩身材料的不均匀以及在后注浆过程中浆液在桩土界面上不均匀流动造成的。

要对图 5 的应变数据进行滤波和修匀平滑之后可以推算各级荷载作用下的桩身轴力和侧摩阻力, 推算

公式为^[13]

$$Q_i = \overline{\varepsilon_i} E_j A \quad , \quad (5)$$

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{ul_i} = \frac{E_j R}{2l_i} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) \quad , \quad (6)$$

式中, Q_i 为桩身第 i 断面处轴力, $\overline{\varepsilon_i}$ 为第 i 断面处对称分布的传感光线应变平均值, E_j 为第 j 级荷载下的桩身材料弹性模量, A 为桩身截面面积。 q_{si} 为桩第 i 断面与 $i+1$ 断面间侧摩阻力, u 为桩身周长, l_i 为第 i 断面与 $i+1$ 断面之间的桩长, BOTDR 仪器的数据采样间距为 0.05 m, 即 $l_i = 0.05$ m, R 为桩径。

式 (5) 中, 桩身材料的弹性模量是假设不随深度变化时, 可以通过静载过程中桩头受到的应变反演求得。根据式 (5)、(6) 计算得到的各级荷载下的桩身轴力和侧摩阻力的分布图, 如图 6。

由图 6 的桩身轴力和侧摩阻力分布图中可看出, 在试桩过程中, 随着桩顶荷载的增加, 荷载从上向下传递, 桩身轴力和侧摩阻力随桩顶荷载的增大而增大。在桩顶荷载作用下, 试桩桩身轴力随桩深的增加而减少, 同时桩侧摩阻力由上到下逐步发挥出来, 其发挥是一个异步的过程。

本次试桩中, 在桩身上部 0~15 m 范围内, 桩身轴力传递较慢, 曲线较陡, 这主要是由于上部粉土的侧摩阻力较小造成的。刚开始这部分土层的摩阻力随着荷载的增大而逐渐增大, 但当荷载到第六级时已达到极限侧摩阻力, 荷载继续增加时土层的侧摩阻力不再增加反而减小, 由下部的土层继续承担荷载。在桩

表 1 地基土物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical indices of the soil

土层编号	土层名称	层底埋深/m	w/%	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	G_s	e	$S_r/\%$	I_L
1	粉土	5.0	24.0	17.69	2.70	0.735	87.0	0.59
2	粉土	15.0	22.2	18.80	2.70	0.634	95.0	0.65
3	粉砂	26.6	15.3	20.30	2.68	0.451	91.0	—
4	细砂	37.0	19.9	19.10	1.68	0.593	90.0	—
5	粉质黏土	47.7	24.9	18.47	2.73	0.726	93.0	0.31
6	粉质黏土	60.4	22.0	18.82	2.72	0.644	93.0	0.26

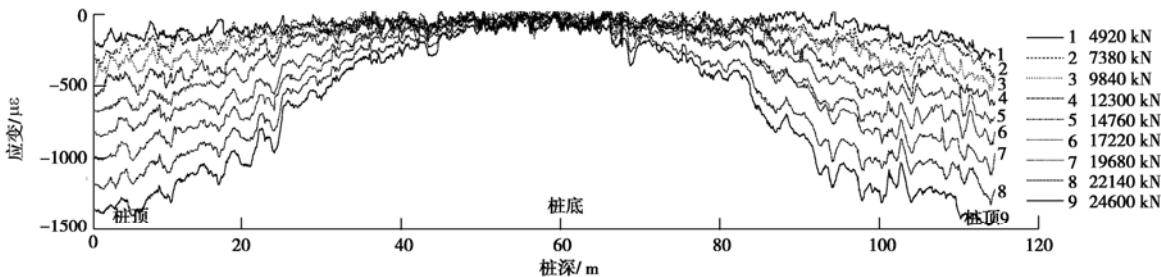


图 5 桩身应变分布图
Fig. 5 Strain distribution of piles

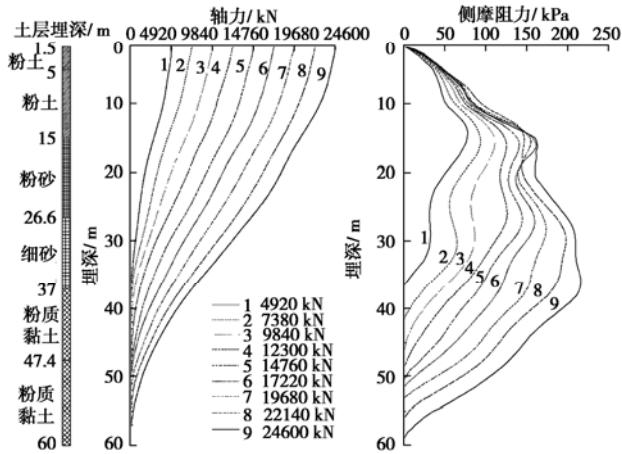


图6 桩身轴力和侧摩阻力分布图

Fig. 6 Distribution of axial force and lateral friction of piles

身15~37 m范围内, 桩周土层以粉砂、细砂组成, 随着荷载的增加侧摩阻力持续增大, 桩身轴力传递迅速, 因此这部分土层为桩基承担荷载的主要部分; 在桩身37~59 m范围内, 由于上面的摩阻力先开始发挥作用, 所以荷载小的时候这部分土层侧摩阻力尚未发挥作用, 第二级荷载开始这部分土层侧摩阻力发挥作用, 并随着荷载的增加侧摩阻力也逐渐增大, 随着埋深的增加轴力也相继趋于零。由此可见, 桩周土层的变化对桩身轴力的传递影响很大, 桩身轴力的变化与周围的土层有良好的对应关系。

从侧摩阻力的分布图中可以看出, 总体上规律很相似, 但传感光纤采样间距只有 0.05 m, 因此从细节中可以了解每个荷载作用下各深度处侧摩阻力的发挥状况, 从而为设计提供可靠的依据。

从检测结果可以得出: 本工程试桩, 即使在最大荷载作用下, 仅有侧摩阻力发挥, 未测到端阻力, 因此该试桩属纯摩擦桩。

4.3 传感光纤与钢筋应力计的对比

为了验证 BOTDR 分布式光纤传感技术应用于钻孔灌注桩检测的可行性, 笔者对试桩受最大荷载时传感光纤所测得的应力值与钢筋应力计测得的应力值进行了对比, 见图 7。

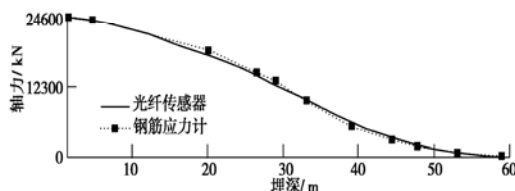


图7 光纤传感器与钢筋应力计的对比

Fig. 7 The comparison between fibers sensor and sensors on reinforcing steel

从图中对最后一级荷载对比曲线中可以看出, 两者数据基本一致, 它们的相对误差最大不超过 10%。

说明 BOTDR 分布式传感技术在钻孔灌注桩检测是完全适用的。

5 结 论

(1) 对比结果表明: BOTDR 分布式光纤检测技术可用于钻孔灌注桩的桩身轴力、侧摩阻力、端承力以及桩身的浇注质量检测, 具有分布式、一端检测、不需回路、长距离、耐久性好、抗干扰强、与被测物协调性能好等优点。

(2) 传感光纤在钻孔灌注桩中的埋设工艺十分重要, 本文中提出的一套埋设工艺和检测步骤是行之有效的, 较好地解决了传感光纤的埋设工艺问题。

(3) 采用小波分析和移动平均法对 BOTDR 检测数据频谱进行处理, 可有效地去除频谱中的噪音和数据波动曲线, 解决了这一技术在钻孔灌注桩检测推广中数据处理难题。

(4) 从检测结果看, 在本荷载试验条件下, 该大直径超长钻孔灌注试桩属于摩擦桩, 桩的端阻力还没有发挥, 表明本试桩的承载能力还可以进一步挖掘。

(5) 本技术在钻孔灌注桩检测中的成功应用, 为我国桩基工程检测提供了一个新的检测手段, 今后还需要在特种传感光纤的研发和异常识别等方面开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 张献民, 蔡靖, 王建华. 基桩缺陷量化低应变动测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 47 - 50. (ZHANG Xian-min, CAI Jing, WANG Jian-hua. Quantitative analysis of defects to piles in foundation with low strain dynamic test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [2] 甘幼琛. 当前桩基工程质量合格控制存在的问题与随机控制新模式的探讨[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 84 - 91. (GAN You-chen. Current problems in quality qualifying control of pile foundation engineering and approach on stochastic control mode[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1): 84 - 91. (in Chinese))
- [3] 李素华, 吴世明, 刘忠孝. 工程桩质量检测技术中的若干问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 133 - 135. (LI Su-hua, WU Shi-ming, LIU Zhong-xiao. Probing into some problems in pile testing technologies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 133 - 135. (in Chinese))
- [4] 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, 2003, 36(11): 83 - 87. (in Chinese))
- [5] 蒋小珍, 雷明堂, 陈 渊, 等. 岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(6): 75 - 79. (JIANG Xiao-zhen, LEI Ming-tang, CHEN Yuan, et al. An experiment study of monitoring sinkhole collapse by using BOTDR optical fiber sensing technique[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(6): 75 - 79. (in Chinese))
- [6] 小島謙一, 伊藤裕昌, 村山修, 等. 土構造物の計測管理に用いる光ファイバーセンサーの基本特性[J]. 土木学会論文集, 2003(750/ III - 65): 51 - 67. (KOZIMA Keniti, ITOU Hiromasa, MURAYAMA Tutomu, et al. Basic characteristic of fiber sensor applying to earth construction measure management[J]. Theses of Civil Engineering Institute, 2003(750/ III - 65): 51 - 67. (in Japanese))
- [7] 崔何亮, 施 斌, 徐洪钟, 等. BOTDR 光纤温度监测技术在土木工程中的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 252 - 255. (CUI He-liang, SHI Bin, XU Hong-zhong, et al. BOTDR optic fiber temperature monitoring technique and its application in civil engineering[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(3): 252 - 255. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 徐洪钟, 施 斌, 张 丹, 等. 基于小波分析的 BOTDR 光纤传感器信号处理方法[J]. 光电子·激光, 2003, 14(7): 737 - 740. (XU Hong-zhong, SHI Bin, ZHANG Dan. Signal processing of the fiber optic BOTDR sensor based on wavelet analysis[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2003, 14(7): 737 - 740. (in Chinese))
- [10] 刘 涛, 曾详利, 曾 军. 实用小波分析入门[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 116 - 120. (LIU Tao, ZENG Xiang-li, ZENG Jun. Practicality wavelet analysis introduction[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 116 - 120. (in Chinese))
- [11] 日下部祐基, 三浦均也, 池田憲二, 等. 光ファイバによる杭のひずみ測定法に関する研究[J]. 北海道開発土木研究月報, 2004(613): 45 - 56. (KUSAKABE Yuuki, MIURA Kinya, IKEDA Kenzi, et al. Study on piles distortion based on fiber monitor[J]. Study Journal of Hokkaido Exploiture Civil Engineering, 2004(613): 45 - 56. (in Japanese))
- [12] 元四华, 费业泰. 应用时间序列移动平均模型预测加工精度的研究[J]. 计量与测试技术, 2002(2): 12 - 13. (QI Si-hua, FEI Ye-tai. Study on the prediction manufacturing accuracy based on the time series mean motion model[J]. Metrlogy and Measurement Technique, 2002(2): 12 - 13. (in Chinese))
- [13] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (JGJ 106—2003 Criterion of piles foundation testing technologies[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))