

文章编号: 1000-7598 (2011) 10-3190-06

PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术 及其在试桩中应用

江 宏

(欧美大地仪器设备中国有限公司, 上海 201101)

摘 要: 布里渊时域分析技术 (brillouin optical time domain analyzer, BOTDA) 是近年来在国际上研发成功的一种分布式光电传感技术, 该技术已开始广泛应用于结构体和工业设备等的温度、应变检测。而新一代分布式应变测量技术——脉冲预泵浦-布里渊时域分析 (pulse-prepump-brillouin optical time domain analyzer, PPP-BOTDA), 实现了 10 cm 的空间分辨率和 $\pm 7.5 \mu\epsilon$ 的应变测量精度。文中重点介绍了 PPP-BOTDA 工作原理以及技术验证, 并在国内首次将 PPP-BOTDA 技术应用于管桩桩身应变测量, 与同时进行的滑动测微计实测数据进行对比, 结果表明 PPP-BOTDA 可作为一种新型的桩基测试技术加以推广。

关 键 词: 脉冲预泵浦-布里渊时域分析; 空间分辨率; 管桩检测

中图分类号: TU 197

文献标识码: A

PPP-BOTDA distributed fiber optic sensing techniques and its application to pile tests

JIANG Hong

(Earth Products China Limited, Shanghai 201101, China)

Abstract: The brillouin optical time domain analyzer (BOTDA) is a new distributed optical-electronic sensing technique successfully developed abroad. It had been widely applied to detecting temperature and strain of structures. The new distributed strain measuring technique, pulse-prepump-brillouin optical time domain analyzer (PPP-BOTDA) method realizes the test results of 10cm spatial resolution and $\pm 7.5 \mu\epsilon$ strain measuring precision. This paper describes the basic principle and experimental results of PPP-BOTDA, And its strain measuring method has been firstly applied to the tubular pile test; at the same time, a contrast with the sliding micrometer results is done; and it is shown the PPP-BOTDA is a very potential technique for the pile test.

Key words: pulse-prepump-brillouin optical time domain analyzer; spatial resolution; tubular pile test

1 引 言

PHC 管桩系在工厂预制, 能确保桩身的质量, 且通过贯入形式成桩, 施工方便, 因此 PHC 管桩在工程中被广泛使用。由于 PHC 管桩在制作过程中要经过预应力张拉、离心成型和高温蒸气养护, 现场施工中还要进行压桩、接桩作业, 这些工艺对管桩静载试验中采用传统方法 (应变片、钢筋计等) 测定桩身应变, 了解试桩荷载传递机制就非常困难。

近年来国内有采用瑞士产滑动测微计进行了多次试验, 如广东高明、南沙、武汉乙烯工程等, 均取得了满意的成果, 但该法也存在费用较高、测试费时且不能自动监测等缺点。目前桩基工程检测的

技术和方法正在从传统的点法仪器监测向分布式、自动化、高精度检测的方向发展。近年来兴起的光纤传感器具有抗电磁干扰、防水、抗腐蚀和耐久性长等特点, 特别是分布式传感光纤, 由于光纤既是传感元件又能传送信号, 且能实现真正意义上分布式温度和应变测量, 相对传统方法具有较好的经济性, 故分布式光纤传感技术在桩基工程检测中有着很好应用前景。

国内有学者在钻孔灌注桩检测中应用布里渊时域分析法 BOTDR 技术并取得一定成果, 而脉冲预泵浦 BOTDA (PPP-BOTDA) 技术^[1]采用独创的脉冲预泵浦技术, 突破了以往 BOTDR 技术的界限, 成功地使测量空间分辨率和精度都得到了飞跃般的

收稿日期: 2010-05-09

作者简介: 江宏, 男, 1969 生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程监测以及新型传感器的推广和应用研究。E-mail: jhong@tom.com

提高。目前, PPP-BOTDA 技术在国外主要应用于工业领域, 如管道的变形检测。在日本有学者在预应力混凝土梁弯曲实验中运用该技术检测梁的应变分布, 取得了很好的实验结果。而应用 PPP-BOTDA 技术进行管桩桩身应变测量尚属首次。

为了验证 PPP-BOTDA 技术在试桩中的可靠性, 在现场进行的管桩负摩阻力测试中, 同时采用 PPP-BOTDA 技术和滑动测微计, 测定桩身应变。测试结果表明二者具有很好的一致性, 得到了各级荷载下摩阻力和端阻力的变化规律, 揭示了桩身荷载传递机制。

2 PPP-BOTDA 工作原理

PPP-BOTDA 通过改变泵浦光的形态, 在测量的脉冲光发出前, 增加一段预泵浦脉冲波来激发声子, 测量原理图^[2-3]如图 1 所示。

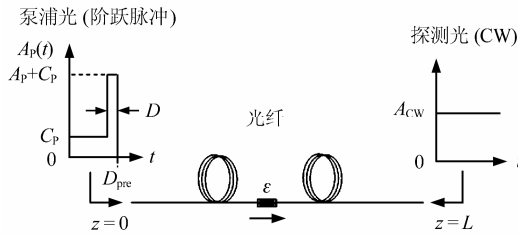


图 1 PPP-BOTDA 工作原理
Fig.1 Basic principle of PPP-BOTDA

预泵浦脉冲描述公式为

$$A_p(t) = \begin{cases} A_p + C_p, & (D_{pre} - D \leq t \leq D) \\ C_p, & (0 \leq t \leq D_{pre}) \\ 0, & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为泵浦脉冲光持续时间; D_{pre} 为脉冲预泵浦光持续的时间; C_p 为脉冲光功率; $A_p + C_p$ 为脉冲预泵浦光功率。

通过适当设置脉冲光与脉冲预泵浦光的功率比即消光系数 R_p , 可以降低多余的输出功率, 见式(2)。

$$R_p = \left(\frac{A_p + C_p}{C_p} \right)^2 \quad (2)$$

利用摄动理论可推导出探测光受激布里渊散射振幅式为

$$E_{cw}(0, t) = A_{cw} [1 + \beta H(t, \Omega)] \quad (3)$$

式中: 右边后面参数代表受激布里渊散射光, β 为摄动参数, 这里取值为 2.2×10^{-4} ; Ω 为声子的频率,

即泵浦光和探测光的频率差; t 为时间参数。一般来说, 受激布里渊散射光谱项由泵浦脉冲光 2 次积分所得, 即

$$H(t, \Omega) = \int_0^L A \left(t - \frac{2z}{v_g} \right) \int_0^\infty h(z, s) A \left(t - s - \frac{2z}{v_g} \right) ds dz \quad (4)$$

如果泵浦脉冲光的轮廓形状由阶梯函数来表述的话, 式(4)可以划分为 4 个时间段, 即

$$H(t, \Omega) = H_1(t, \Omega) + H_2(t, \Omega) + H_3(t, \Omega) + H_4(t, \Omega) \quad (5)$$

表 1 式(5)的时间段代表的物理意义

Table1 Pulse-pre-pump light time segment character

时间段	意义	特性
H_1	泵浦脉冲光	高空间分辨率, 宽光谱范围
H_2	脉冲光与脉冲预泵浦光交互作用	高空间分辨率, 窄光谱范围
H_3	脉冲预泵浦光与脉冲光交互作用	振动噪音和复杂成分
H_4	脉冲预泵浦光	低空间分辨率, 窄光谱范围

从图 2 中可见, 声子受激需要近 28 ns 的时间; 伴随空间分辨率的提高, 布里渊增益频谱 (BGS) 的半值全宽 (FWHM) 逐渐增大, 曲线趋于平坦; 脉冲宽度短于 1 ns (10 cm) 时, BGS 的 FWHM 将接近 1 GHz; 较宽的 FWHM 使得中心频率 ν 的精确测量变得极为困难。

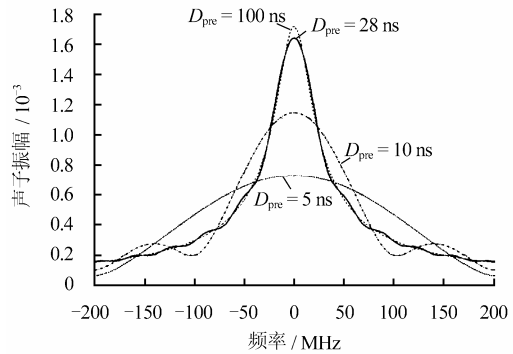


图 2 脉冲预泵浦光持续时间的影响

Fig.2 Stimulation time of phonon and resolution influence

3 PPP-BOTDA 技术验证

本次实验将展示 PPP-BOTDA 技术对布里渊频谱的改善效果以及测量空间分辨率和精度方面进行的验证^[2-3]。验证中, 在实验光纤中设置 20 cm 长的应变段, 并以 3 种脉冲光形态, 分别注入实验光纤; 对实验光纤的 A 点 (远离应变段)、B 点 (应变

段边缘)和 C 点(应变段中心)3 点的频谱进行观察对比,最后将 PPP-BOTDA 条件下的测量结果换算为应变分布曲线。

3.1 验证实验脉冲光形态

本次实验采用 3 种脉冲光分别注入实验光纤,第一种脉冲光为阶梯式脉冲,即 PPP-BOTDA 技术;第二种仅是 1 ns 宽度的脉冲光;第三种仅是 13 ns 宽度的脉冲预泵浦光,如图 3 所示。测试光纤中设置 20 cm 长的应变段,见图 4,在光纤的左端分别注入 3 种形态的脉冲光,在右端注入探测光,观测 A 、 B 和 C 点布里渊散射光频谱曲线。

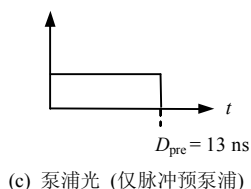
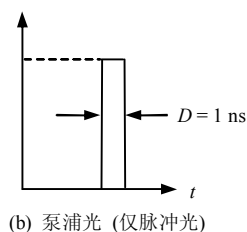
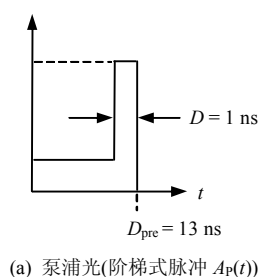


图 3 实验脉冲光形态

Fig.3 Experiment demonstrates pump light

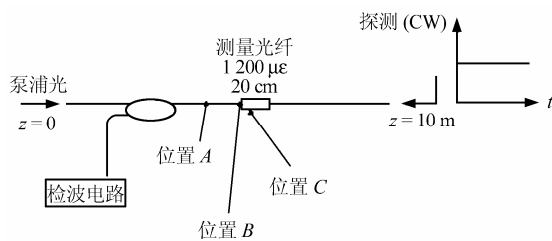


Fig.4 Experiment demonstrates optical fiber

3.2 验证结果分析

通过实验,在 3 种脉冲条件下 $A \sim C$ 点布里渊散射光(SBS)频谱曲线如图 5~7 所示。在不同脉冲光形态下 A 、 B 和 C 点频谱对比图见图 8、9 以及实验光纤应变分布曲线如图 10 所示。

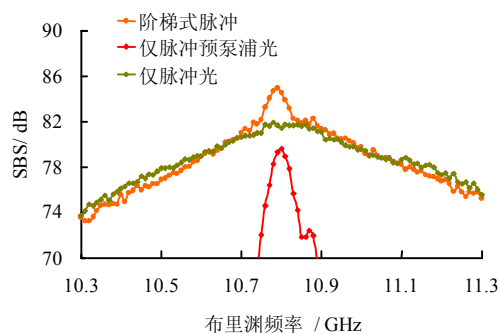


图 5 A 点的布里渊频谱

Fig.5 Spectra of A (3 types of pulse)

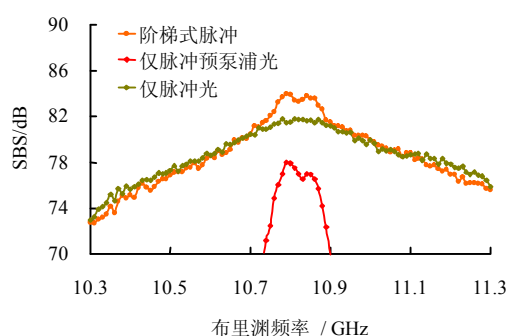


图 6 B 点的布里渊频谱

Fig.6 Spectra of B (3 types of pulse)

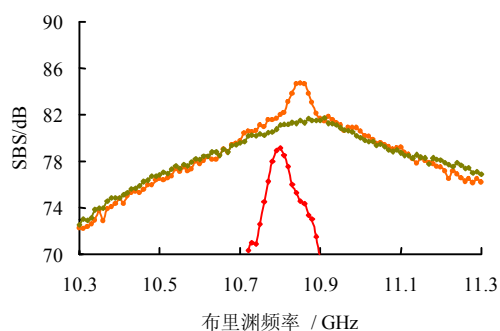


图 7 C 点的布里渊频谱

Fig.7 Spectra of C (3 types of pulse)

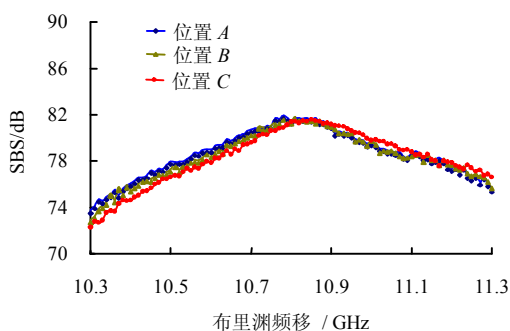


图 8 仅有短脉冲光条件下各点的频谱对比

Fig.8 Comparison of observation points (only pulse)

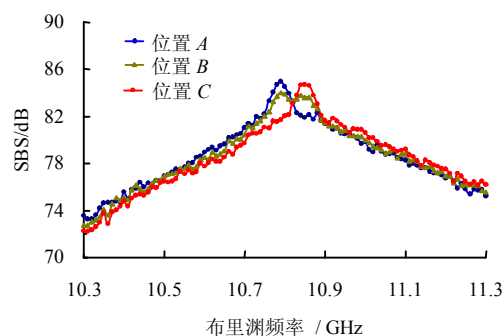


图 9 阶跃脉冲光条件下各点的频谱对比图

Fig.9 Comparison of observation points (PPP)

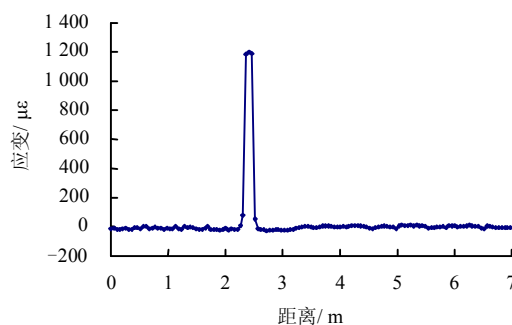


图 10 光纤应变分布曲线

Fig.10 Calculated strain values (from BGS spectrum)

从实验结果可以得到如下结论, (1) 利用 1 ns 的极短的泵浦光脉冲, 本系统也能获得足够的受激布里渊散射光强度; (2) 在 1 ns 的脉冲光入射之前, 导入一个 13 ns 宽的预泵浦脉冲, 布里渊增益频谱的半值全宽将会减少到 80 MHz (从仅使用脉冲光时的 1 GHz; (3) 适当设置脉冲光和脉冲预泵浦光的消光系数, 来自脉冲预泵浦光的信号能够有效控制, 实现 10 cm 的空间分辨率与 7.5 $\mu\epsilon$ 高测量精度。

4 工程实例

本次试验是国内首次采用 PPP-BOTDA 技术进行的桩身应变测试。试验地点位于西安市东南郊的黄渠头, 图 11 为试验桩现场。



图 11 分布式光纤试桩现场

Fig.11 Test site

本次实验采用日本 NEUBREX 公司的 NEUB-RESCOPE NBX-6050 型光纳仪, 光纤最小空间分辨率为 0.1 m, 应变测量精度为 $\pm 7.5 \mu\epsilon$, 采样间隔为 5 cm。

4.1 工程概况

试验桩为预应力混凝土管桩, 管桩直径为 500 mm, 壁厚 125 mm, 共 3 节, 通过打桩机成桩。桩头部分安装有封闭式桩靴, 桩身中空部分安装分布式光纤传感器, 同时安装滑动测微计测环测管, 作为对分布式光纤测试技术的验证。试桩现场地质情况见表 2。

表 2 地基土层参数表
Table 2 Foundation soil layer classity

土层号	土层名称	土层厚度 / m	主要物理力学指标	
			c / kPa	φ / (°)
①	Q ⁴	0.4		
②	Q ⁴ _{el}	3.1	17.3	32.1
③	Q ³ _{col}	9.4	16.6	34.7
④	Q ³ _{el}	5.4	17.1	35.6
⑤	Q ² _{col}	9.5	9.7	37.5

4.2 分布式光纤的埋设工艺

分布式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测试结果。本次实验采用单模紧套光纤。具体铺设方法: 首先在 $\phi 28$ mm 塑料管外侧对称开一细槽, 将传感光纤以每隔 50 cm 左右用 502 胶固定在槽内。在槽表面涂满环氧树脂。所有塑料管通过熔接方式连接成 1 根, 长度和实验桩一致。由于 PPP-BOTDA 技术要求光纤形成回路, 故敷设在塑料管上的传感光纤呈 U 字形。待环氧树脂凝固后随滑动测微管一起放入管桩中, 然后压入水泥浆, 在压浆过程中实时监测光纤传感器是否完好。压浆结束后, 铺设的传感光纤在桩头预留约 5 m, 后期测试时引出接入光纳仪。为了防止后期桩头处理和养护过程中对光纤的破坏, 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如图 12 所示。

PPP-BOTDA 对管桩的检测过程是与桩的静载荷试验同步进行的。在检测之前先对光纤位置进行确定, 并进行桩身应变初值测量, 之后每加一级荷载稳定后在下一级荷载施加前约 10 min 对传感光纤检测一次, 直至最大荷载。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身的变形量。

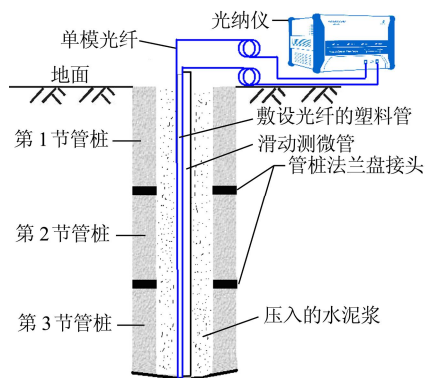


图 12 光纤铺设示意图

Fig.12 Test optical fiber installation profile

4.3 光纤位置的确定

管桩测试中, 实测光纤位置和被测体的对应关系十分重要。将桩头处的光纤浸入热水中, 运行 NBX-6050 型光纤仪, 以某一频率观察布里渊散射光分布 (SBS) 变化情况, 只需 1~5 s, 即可判断出该点所对应的光纤坐标。该方法的定位误差可控制在 5 cm 左右。

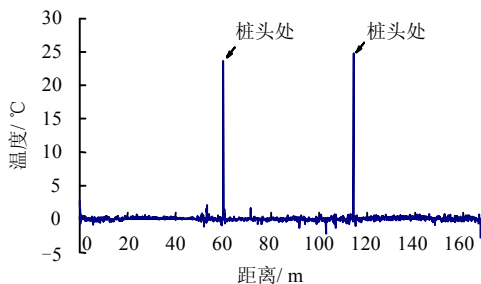


图 13 光纤定位实测 SBS 差值曲线

Fig.13 Identification of fiber location

4.4 光纤温度补偿

布里渊频移与应变和温度都具有相关性。当光纤温度不变时, PPP-BOTDA 的应变测量值即表示光纤变形, 即桩身在荷载作用下变形。本次实验的桩身内部温度由滑动测微计探头进行测量, 温度从桩头到桩头以下 6 m 由 -2.3°C 上升到 14.2°C , 为线性关系; 桩头以下 6 m 直至桩底温度恒定不变。对沿桩身的光纤布里渊频移进行温度补偿, 公式为

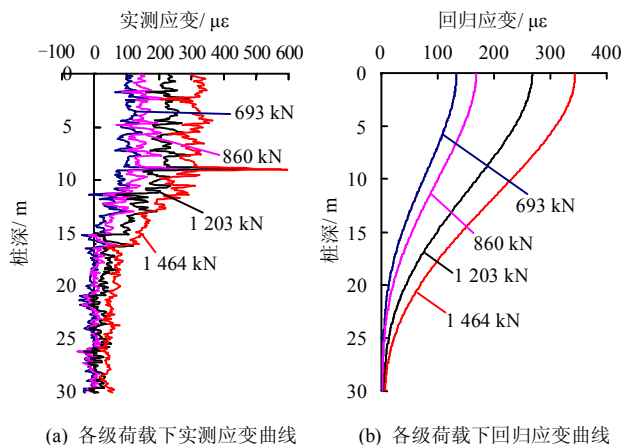
$$\left. \begin{aligned} \nu B(\varepsilon) &= \nu B(0) + C_{11}\varepsilon + C_{12}(T - T_0) \\ \varepsilon &= (\nu B(\varepsilon) - \nu B(0) - C_{12}(T - T_0)) / C_{11} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\nu B(\varepsilon)$ 为由光纤测量出的布里渊频移; $\nu B(0)$ 为在基准温度 T_0 和没有应变状态下的布里渊频移; C_{11} 为 S-fiber 的应变系数 ($d\nu B/d\varepsilon$); C_{12} 为 S-fiber 的温度系数 ($d\nu B/dT$); T 为桩身环境温度;

ε 为桩身的应变。

4.5 结果分析^[4-5]

在管桩加载期间实测的桩身应变分布曲线与回归后的桩身应变曲线如图 14 所示。在实测应变曲线图中发生应变突变的桩身位置正好位于 2 根桩的接桩处。图 15 为根据桩身回归应变曲线计算得到的桩身轴力和侧摩阻力分布曲线。



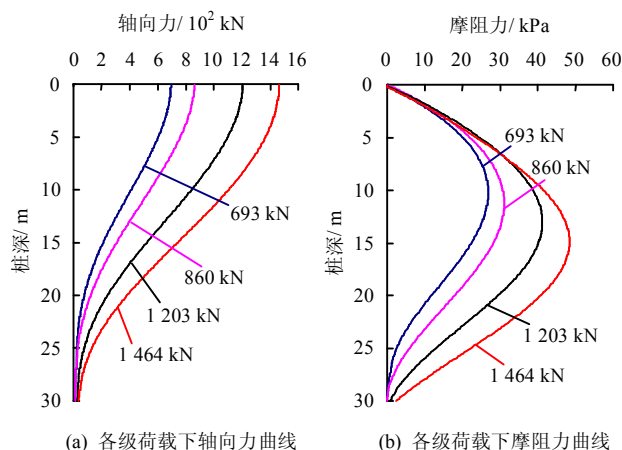
(a) 各级荷载下实测应变曲线

(b) 各级荷载下回归应变曲线

图 14 桩身实测应变分布曲线

Fig.14 The strain distributing chart

通过各级桩顶荷载及相应的桩顶回归应变可计算桩身平均弹性模量与应变量级关系, 见图 16, 计算轴向力时采用与应变量级有关的弹性模量。



(a) 各级荷载下轴向力曲线

(b) 各级荷载下侧摩阻力曲线

图 15 桩身轴力和侧摩阻力分布曲线图

Fig.15 Pile axial force and skin friction distributing chart

4.6 PPP-BOTDA 与滑动测微计结果对比

本次实验同时也采用滑动测微计测试桩身应变, 实测数据对比表明, 二者具有很好的一致性, 验证了 PPP-BOTDA 方法的可行性。对比结果如表 3 所列。

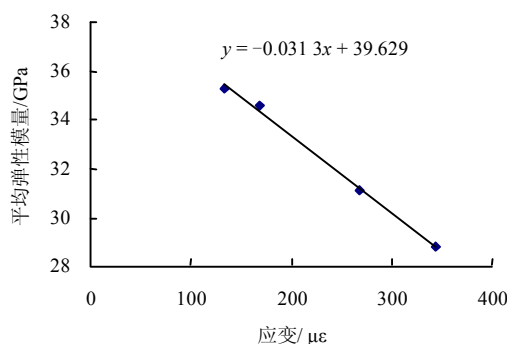


图 16 弹性模量与应变量级关系曲线图

Fig.16 The elasticity module and strain grade

表 3 PPP-BOTDA 与滑动测微计对比

Table 3 Results of PPP-BOTDA and slide meter

荷载 /kN	实测桩身最大应变/ $\mu\epsilon$		桩身无应变起始位置/m	
	PPP-BOTDA	滑动测微计	PPP-BOTDA	滑动测微计
693	133.4	139	21.24	22
860	168.7	175	23.01	25
1 203	268.0	236	26.27	25
1 464	344.4	290	28.12	27

5 结 论

(1) 脉冲预泵浦布里渊光时域分析法 (PPP-BOTDA) 通过改变泵浦光的形态, 在测量的脉冲光发出前, 增加 13 ns 宽的预泵浦脉冲波来激发声子。

(2) 通过试验验证, 适当设置脉冲光和脉冲预泵浦光的消光系数, 来自脉冲预泵浦光的信号能够有效控制, 实现 10 cm 的空间分辨率, 应变测定精度达到了 $\pm 7.5 \mu\epsilon$ 。

(3) 通过对管桩在静载试验中桩身应变的测量, 首次实现真正意义上的应变分布测量, 并能清晰判

定接桩位置情况。

(4) 在同时用滑动测微计进行的桩身应变测试的结果对比来看, 两种方法一致性很好, PPP-BOTDA 可作为一种新型的桩基测试技术加以推广。

(5) NBX-6050 型光纳仪还不能实现 1 根光纤应变和温度的分开测量, 故应在现场设计的应变测量光纤传感器边平行布设光纤温度传感器进行温度补偿, 本次实验由于条件限制未进行该项工作。

参 考 文 献

- [1] 朴春德, 施斌, 魏广庆, 等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 30(7): 976—981.
PIAO Chun-de, SHI Bin, WEI Guang-qing, et al. Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 30(7): 976—981.
- [2] KISHIDA K, LI C H. Pulse pre-pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system[R]. Japan: IEICE, 2004, 48: 15—20.
- [3] LI C H, KENICHI N, MIYUKI M. PPP-BOTDA method to achieve 2 cm spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique[R]. Japan: IEICE, 2008, 42: 39—44.
- [4] 朱国甫, 李光煜. 确定桩侧摩阻力曲线的约束样条拟合方法[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 1—8.
ZHU Guo-fu, LI Guang-yu. Determination of pile friction curves by spline fitting method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(3): 1—8.
- [5] 李光煜, 汪彬. 钢管桩负摩阻力及水平位移测定[J]. 岩土力学, 1988, 15(3): 89—98.
LI Guang-yu, WANG Bing. Measurement of negative-friction resistance and horizontal displacement of steel pipe pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1988, 15(3): 89—98.
- [8] 张铭. 低渗透岩石实验理论及装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 919—925.
ZHANG Ming. Theory and apparatus for testing low-permeability of rocks in laboratory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(6): 919—925.
- [9] 阮小平, 李方全. 三峡坝区水库诱发地震研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [10] 陈群策, 祁英男, 毛吉震, 等. 利用压力脉冲试验测定某地花岗岩体的渗透系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1469—1472.
CHEN Qun-ce, QI Ying-nan, MAO Ji-zhen, et al. Permeability test of granite mass by using pressure pulse test method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1469—1472.
- [11] BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS S S. A method for determining the hydraulic properties of tight formations[J]. **Water Resources Research**, 1980, 16(1): 233—238.
- [12] BAUER C, HOMAND F, HENRY J P. Technical note in situ low permeability pulse test measurements[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(4): 357—363.
- [13] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236—243.
CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 236—243.
- [14] 李小春, 王颖, 魏宁. 变容压力脉冲渗透系数测量方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2482—2487.
LI Xiao-chun, WANG Ying, WEI Ning. Research on measuring method of permeability by using storage-variable transient pulse method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(12): 2482—2487.

上接第 3189 页