第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报 特邀论文

光学学报

基于 BOTDR 的海上风力发电机桩基水平荷载性能研究

张洪英[1]，杨志远[1]，崔荣鹏[1]，关鹏[2]，董永康[3*]

[1]哈尔滨理工大学黑龙江省量子调控重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150080；

[2]睿科光电技术有限公司，辽宁 鞍山 114000；

[3]哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 随着海上风力发电技术的发展，风力发电机的功率不断增大，对其桩基的承载力要求也不断提高，因此需要测试桩基的荷载性能来验证工程设计的安全可靠性。首先搭建了 1 m 空间分辨率的布里渊光时域反射(BOTDR)系统，在杭州湾嘉兴市海域的风电项目中，利用该系统对海上风力发电机桩基进行了水平推力加载试验。通过测量和分析不同水平荷载下桩基的应变分布和最大应变位置，得到了其形变情况和位移分布。结果表明，该桩基的水平承载力达到了预期设计的最大荷载 700 kN，验证了 BOTDR 分布式光纤传感技术在海上风力发电机桩基检测中的有效性。

关键词 光纤光学；光纤传感器；布里渊光时域反射；海上风力发电机；桩基检测；应变

中图分类号 O437.2 **文献标志码** A **doi**：10.3788/AOS202141.1306016

Horizontal Load Test on Offshore Wind Turbine Pile Foundation Based on BOTDR

Zhang Hongying[1], Yang Zhiyuan[1], Cui Rongpeng[1], Guan Peng[2], Dong Yongkang[3*]

[1] *Heilongjiang Key Laboratory of Quantum Manipulation & Control, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang* 150080, *China*;

[2] *RealPhotonics Co., Ltd., Anshan, Liaoning* 114000, *China*;

[3] *National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang* 150001, *China*

Abstract With the development of offshore wind power generation technology, the powers of wind turbines are increasing, leading to higher demands for the bearing capacity of their pile foundations. Thus, load performance test on pile foundations is needed to ensure the safety and reliability of engineering design. In this study, we first established a Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR) system with a spatial resolution of 1 m. Then, this system was used to conduct horizontal thrust-loading tests on the pile foundation of an offshore wind turbine in the Jiaxing region of Hangzhou Bay. The deformation and displacement distributions of the pile foundation were determined by measuring and analyzing the strain distributions and positions of the maximum strain of the pile foundation under different horizontal loads. Results show that the horizontal bearing capacity of the tested pile foundation can withstand the expected maximum load of 700 kN, and the BOTDR distributed optical fiber sensing technology in pile foundation tests for offshore wind turbines is validated.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; Brillouin optical time-domain reflectometry; offshore wind turbine; pile foundation test; strain

OCIS codes 060.2370; 060.3510; 280.4788; 290.5830

收稿日期：2020-12-04；**修回日期**：2020-12-10；**录用日期**：2021-03-08

基金项目：国家自然科学基金(62075051)、黑龙江省自然科学基金(LH2020F036)

通信作者：*aldendong@163.com

1 引 言

近年来，光纤传感技术已经逐步应用到了安防、医疗、航空、电力、土木和油气行业等多个领域[1-3]。相比于其他传感技术，光纤传感具有诸多优势：首先，光纤本身尺寸小、重量轻，易于嵌入到各种结构中；另外，由于光纤是非金属，因此不易受到电磁干扰；最后，光纤本身可同时作为传输介质和传感器件，因此可以实现长距离的分布式传感[4-6]。

分布式光纤传感器是将整个光纤作为传感系统，并且利用光纤中发生的散射效应作为传感机制的新型传感技术。常见的分布式光纤传感器主要基于瑞利散射[4]、布里渊散射[5-8]和拉曼散射[9]制成，其中基于布里渊散射的时域分布式光纤传感技术包括布里渊光时域分析(BOTDA)[5,8]和布里渊光时域反射(BOTDR)[6-7]，它们在长距离和高空间分辨率测量等方面性能优异，具有广阔的应用前景。

在海上风力发电机工程中，每次工程实施前都需要对桩基进行水平推力实验[10]，以此来确定桩基的最大水平承载力。传统的桩身内力测试方法采用应变片进行测试，该方法使用的是点式应变传感元件，根据桩身的位置以及应变传感元件布设密度的不同，测试结果也会发生变化；而且其布点位置大多是根据经验的，因此容易漏掉关键结点，无法直观给出桩身整体的应变分布。同时由于应变片连接线路复杂，在打桩过程中易出现应变片脱落或连接线断线的情况，从而导致测试结果误差较大。

分布式布里渊光纤传感技术因具有温度和应变检测能力且传感性能不断提升，在桩基工程领域得到了广泛的应用和研究[11]，其中涉及水电站的混凝土预制桩[12]、高速公路滑坡的抗滑桩[13]、建设工地的 H 型钢桩[14]、跨海大桥桥墩钢管桩[15]、钢筋混凝土钻孔灌注桩[16-18]等多种应用领域和桩基类型。这些研究集中于桩基的竖向静荷载试验，用于对桩身轴力和侧摩阻力等机械性能进行检测和分析；而关于利用分布式布里渊光纤传感技术研究海上风力发电机桩基的水平承载能力的研究则鲜有报道[19]，特别是 BOTDR 技术在该领域的应用到目前为止仍属研究空白。为了探索 BOTDR 技术用于海上风力发电机桩基检测的效果和可行性，本文利用该技术对海上风力发电机桩基在水平荷载下的应变和位移情况进行了检测和研究，说明基于 BOTDR 的分布式光纤传感技术在海上桩基检测领域的适用性。

2 实验装置

首先搭建了 BOTDR 实验系统，如图 1(a)所示。波长为 1550 nm 的窄线宽激光器发出一束连续光，经过 50∶50 的耦合器后被分为两路，其中一路经过脉冲发生器控制的电光调制器后，被调制成脉冲泵浦光，另一路被微波源控制的电光调制器调制后作为参考光。泵浦光首先经过扰偏仪，以确保其对偏振不敏感，然后经过放大器放大后从环形器的 1 号端口进入 2 号端口输出，进入到待测光纤并发生布里渊散射。为了滤除瑞利散射噪声，来自待测光纤的散射光需经过带通滤波器进行滤波处理，然后与参考光在另一个耦合器内进行相干拍频，拍频后得到的信号由平衡探测器探测，最后通过信号采集和处理即可得到传感光纤沿线的应变/温度信息。该实验系统的空间分辨率为 1 m，应变测量精度为 ±20 $\mu\varepsilon$。测试现场的系统实物照片如图 1(b)所示。

采用该 BOTDR 系统对桩基进行检测时，首先需要沿着桩身轴向布设传感光纤，使得桩身由于受到水平推力而发生形变时，传感光纤能与桩身的形变情况相一致，同时光纤因为受到应变影响，其布里渊频移也会发生改变。光纤中的布里渊频移与光纤沿线的温度、轴向应变有关，它们的关系[5]可表示为

$$\Delta\nu_{\mathrm{B}} = C_T \cdot \Delta T + C_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon, \tag{1}$$

式中：$\Delta\nu_{\mathrm{B}}$ 是光纤中总的布里渊频移改变量；C_T 和 C_ε 分别是光纤布里渊频移的温度系数和应变系数；ΔT 和 $\Delta\varepsilon$ 分别是温度和应变的改变量。

从(1)式可知，通过测量光纤布里渊频移的变化并剔除温度的影响，就可以得到光纤的应变值，进而得出桩基的水平位移和形变情况。

3 分布式光纤测试系统

3.1 工程概况

本次试验的海上风电场位于杭州湾嘉兴市海域，场区边界离平湖岸线最近约 17 km，水深 10 m 左右，该区域南北长约 12 km，东西宽约 5.2 km，涉海面积约 47.5 km^2，装机容量为 300 MW。风机基础结构形式为高桩承台基和单桩基结构，试验时，利用高桩承台基的 6 根工程桩作为锚桩和基准桩，中间增加 1 根试验桩，如图 2 所示。该试验桩为直径 2 m、壁厚 25 mm 的钢管桩，其桩顶高程 +12.00 m，桩底高程 −88.00 m，整个桩长 100.00 m，其中入土深度约 76.50 m。

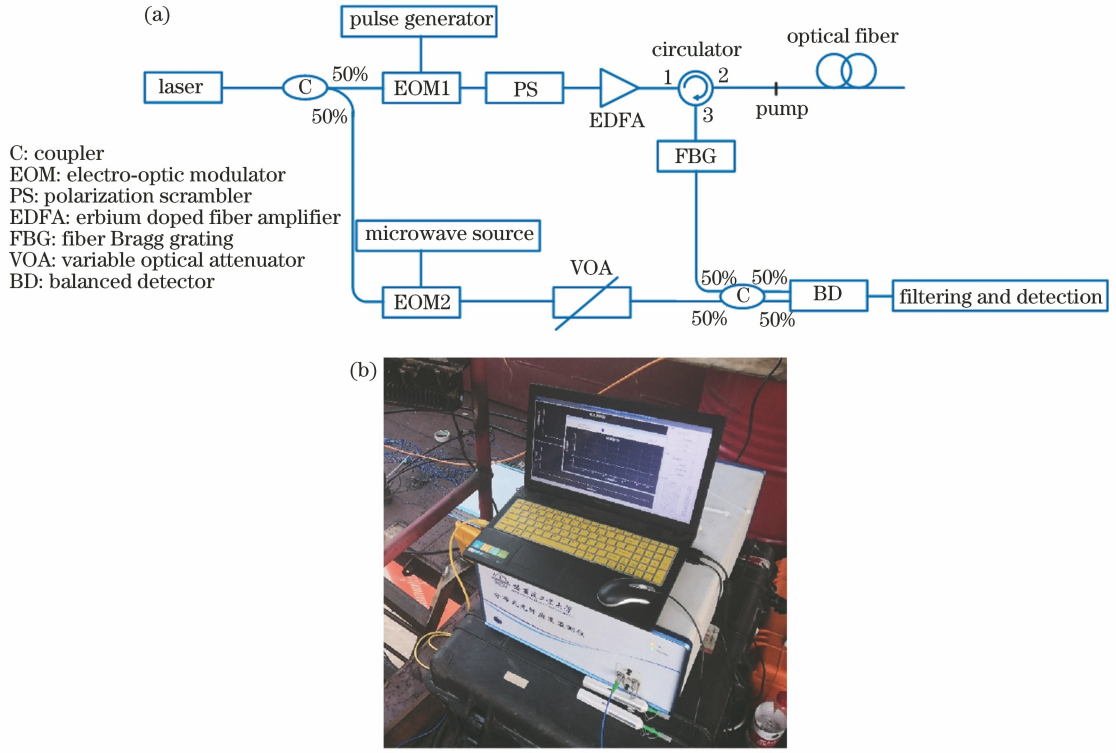

图 1 BOTDR 测试系统。(a) BOTDR 实验装置图;(b)测试系统现场实物照片

Fig. 1 Test system of BOTDR. (a) Experimental setup of BOTDR; (b) photo of the test system

图 2 桩基测试现场

Fig. 2 Test site of the pile foundation

3.2 传感光纤的布设

在测试中采用的应变传感光纤是直径为 0.6 mm 的紧套单模光纤,沿轴向将其布设于桩体表面,其横截面如图 3(a)所示。在试验桩横截面的直径两端分别标定 0°和 180°两个位置,其中 0°位置处为试验水平推力加载位置,两个位置处各布设一根应变传感光纤。设定海平面为标高 0 m 位置,海平面以上标高为正值,以下为负值。光纤在试验桩上测量的高程范围为+11.8～−73.19 m,对应 84.99 m 的有效应变测量长度。采用环氧树脂胶将传感光纤粘贴在桩体的外表面,其由一层碳纤维布保护,在碳纤维布外部再焊接角钢,从而有效地避免光纤在打桩的过程中被损坏,如图 3(b)所示。为确保传感光纤粘贴牢固,在粘贴之前需要对桩体表面进行打磨抛光,以去除锈迹,如图 3(c)所示。图 3(d)为布有传感光纤的试验桩照片,光纤外部已做好碳纤维布和角钢保护。

3.3 水平推力加载系统

水平推力加载装置如图 4 所示,主要由可水平移动的活动梁、100 t 液压千斤顶、固定反力梁组成。固定反力梁从千斤顶后方为其提供反力支撑,使千斤顶将力直接作用在水平活动梁上,后者再将力传递到与之直接接触的试验桩上。力的作用方向为 0°与 180°位置的水平连线方向,受力点位于 0°一侧,高程为+11.8 m。在测试过程中将加载分为 6 个阶段,初始加载荷载为 200 kN,增量为 100 kN,具体加载信息如表 1 所示。每一级荷载加载完成之后桩体处于稳定状态的时间约为

表 1 水平荷载加载信息

Table 1 Information of horizontal loading

Class of load	Load /kN	Data acquisition time
0	0	11:39
Load 1	200	12:14
Load 2	300	12:43
Load 3	400	13:16
Load 4	500	14:03
Load 5	600	14:36
Load 6	700	15:05

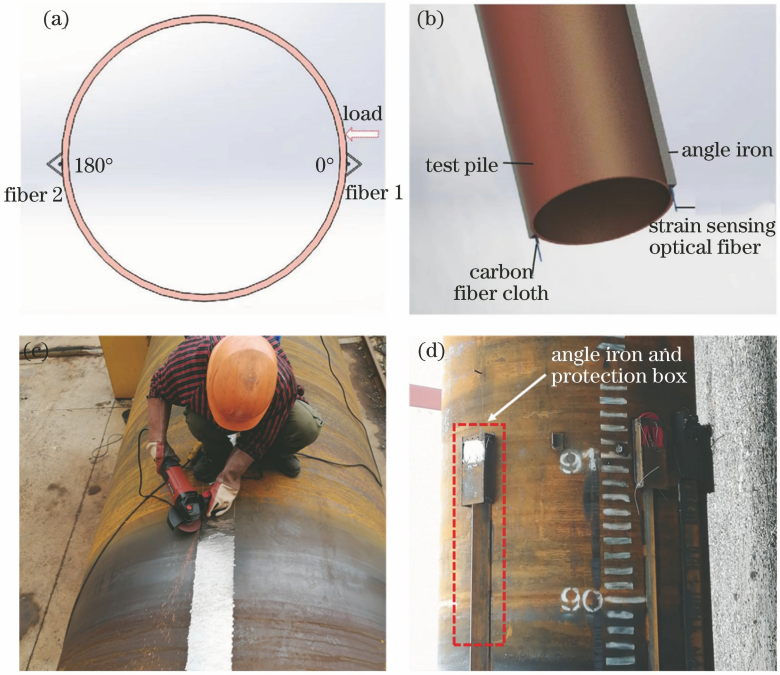

图 3 分布式光纤传感器在试验桩上的布置。(a)横截面;(b)光纤的详细布设方式;(c)试验桩表面的预处理;(d)布设传感光纤的试验桩照片

Fig. 3 Arrangement of the distributed optical fiber sensors on the test pile. (a) Cross section; (b) detailed arrangement of the optical fibers; (c) pretreatment of the test pile surface; (d) photo of the test pile with installed sensing fibers

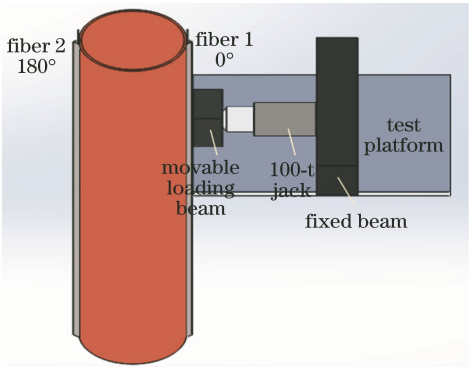

图 4 水平推力加载系统

Fig. 4 Horizontal loading system

30 min,在此时间之内对布里渊谱进行数据采集,每个荷载等级下重复采集 3 组数据,然后分别提取布里渊频移并取平均值作为该荷载下的测量结果。

4 桩基水平荷载试验结果及分析

4.1 桩基的分布式应变测量结果

为便于分析,试验桩可以简化为固定悬臂梁结构[19],在本测试采用的传感光纤布设结构和水平推力加载方式下,光纤 1 和光纤 2 的应变值是反对称的,利用此关系可以得到二者的布里渊频移(BFS)改变量和应变表达式:

$$\Delta l_{\mathrm{BFS,T}} = (\Delta l_{\mathrm{BFS1}} + \Delta l_{\mathrm{BFS2}})/2, \tag{2}$$

$$\varepsilon_1 = (\Delta l_{\mathrm{BFS1}} - \Delta l_{\mathrm{BFS,T}})/C_{\mathrm{S}}, \tag{3}$$

$$\varepsilon_2 = (\Delta l_{\mathrm{BFS2}} - \Delta l_{\mathrm{BFS,T}})/C_{\mathrm{S}}, \tag{4}$$

式中:$\Delta l_{\mathrm{BFS,T}}$ 是温度引起的 BFS 变化值;Δl_{BFS1} 和 Δl_{BFS2} 分别是光纤 1 和光纤 2 实际测得的 BFS 变化值;ε_1 和 ε_2 分别是光纤 1 和光纤 2 的应变值;C_{S} 是光纤布里渊频移的应变系数,对于所采用的单模传感光纤,其值为 0.0482 MHz/$\mu\varepsilon$。

通过(2)~(4)式,可以得到温度补偿的光纤应变分布情况。在不同荷载下,光纤 1 和光纤 2 的应变分布如图 5 所示。可以看出:当荷载增加时,应变量随之增大,根据水平推力的施加方向,桩体向光纤 2 一侧发生弯曲,因此光纤 1 处的桩体因受到拉伸而产生正应变;而光纤 2 处的桩体则因受到挤压而产生负应变。试验桩在不同荷载下产生的应变最大值位于标高−19.66 m 附近,处于预期范围(−18~−23 m)之内;荷载 700 kN 下产生的最大应变值约为 915 $\mu\varepsilon$;在标高约−35.5 m 以下几乎没有应变产生,这是由于在打桩过程中海底的岩石和各种沉积物灌注到钢管桩内部起到填充加固的效果,从而其不易发生弯曲形变。

被测的试验桩是由多节长度为 3 m 的钢管焊接而成,在连接位置有焊缝,不可避免地会导致光纤与桩体表面的贴合不够均匀,因此在图 5 所示的测

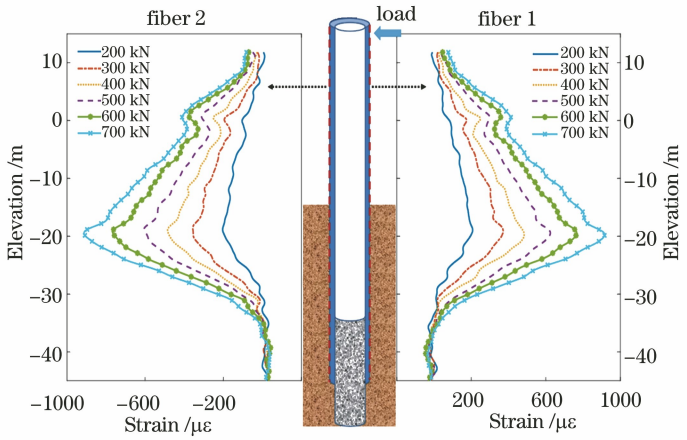

图 5 不同荷载下传感光纤的应变分布

Fig. 5 Strain distribution of the sensing fibers under different loads

量曲线中存在许多微小的波浪起伏。此外需要说明的是，由于在试验测量的过程中两根传感光纤所处位置的光照条件不同，二者的温度存在一定差异，因此在利用(2)～(4)式进行温度补偿处理时就难免会引入误差。此现象主要出现在水面以上的高度(约 12 m)，加之在整个测量时间段内海水的涨落变化，综合因素的影响导致图 5 中 0 m 位置附近出现较为明显的极大值，然而这并不影响本文对试验桩整体性能的分析和判断。

从桩体的应变分布可以得到荷载和最大应变之间的对应关系，如图 6 所示，拟合度 R^2 为 0.9981，说明桩体的最大应变值与荷载成线性关系，桩体处在弹性范围内。因此可以得出，被测钢管桩的水平承载力可达 700 kN，满足该海上风力发电机桩基的水平承载力设计要求。

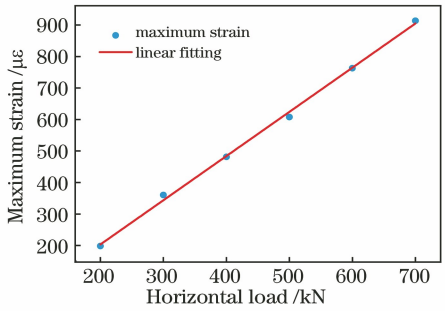

图 6 最大应变值与水平荷载的对应关系

Fig. 6 Relationship between the maximum strain and the horizontal load

4.2 桩基的分布式位移测量结果

可以根据平截面假定对桩体由于受力弯曲产生的形变进行分析。如图 7 所示，微段梁的某个横截面(A-B)在纯弯曲变形后仍为平面(A'-B')，只是转动了一个微小角度 $\mathrm{d}\theta$。弧 $\overset{\frown}{AA'}$ 上的各点距中性轴 OO' 的径向距离用 y_0 表示，各点处的轴向应变相等，可以表示为[19]

$$\varepsilon(y_0,x_0)=\frac{\overset{\frown}{AA'}-\overline{AA'}}{\overline{AA'}}\approx\frac{(\rho+y_0)\mathrm{d}\theta-\rho\mathrm{d}\theta}{\rho\mathrm{d}\theta}=\frac{y_0}{\rho},\tag{5}$$

式中：ε 为轴向应变；ρ 为曲率半径；$\overline{AA'}$ 和 $\overset{\frown}{AA'}$ 分别为弯曲前后 A 和 A' 之间的距离；x_0 为弧 $\overset{\frown}{AA'}$ 上的某点沿中性轴方向与起点的距离。

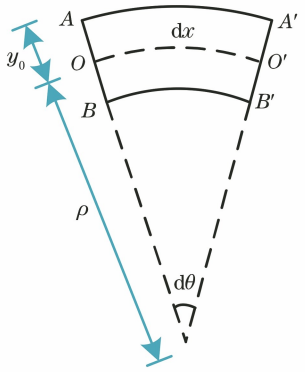

图 7 纯弯曲变形示意图

Fig. 7 Schematic of pure bending deformation

根据曲率的计算公式及其与曲率半径之间的关系，可以得出位移与应变的关系为

$$y''_x=-\frac{\varepsilon(y_0,x_0)}{y_0},\tag{6}$$

式中：x 和 y 分别是中性轴上某一点在笛卡儿坐标系中的横坐标和纵坐标。根据(6)式对分布式应变数据进行二次积分计算，得到桩体的位移分布情况，如图 8 所示。

从图 8 可以看到，测量得到的试验桩水平位移量随着荷载的增加而增大。最大水平位移发生在标高+11.8 m 处，700 kN 荷载下的最大位移值为

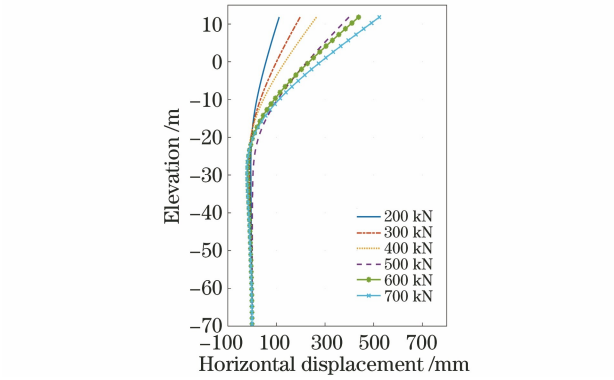

图 8 不同荷载下试验桩的位移分布

Fig. 8 Displacement distribution of the test pile under different loads

0.53 m。最大水平位移与水平荷载之间的关系如图 9 所示，拟合方差为 0.9812。从图 9 可以看出，随着荷载的增加，最大位移逐渐增大，二者呈现出较好的线性关系，说明在 200～700 kN 水平推力下，桩体始终处于弹性形变范围内。

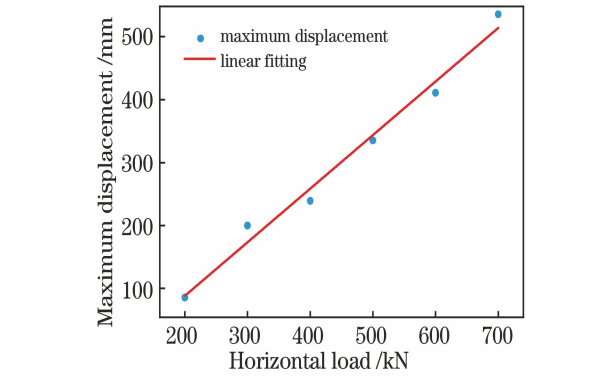

图 9 最大位移与水平荷载之间的关系

Fig. 9 Relationship between the maximum displacement and the horizontal load

5 结 论

利用 BOTDR 系统对海上风力发电机桩基进行了水平荷载试验，获得了试验桩在不同荷载下的应变分布情况，进而通过计算得到桩体的位移分布，从而直观地反映出桩身整体的变形状况。试验过程中加载最大荷载 700 kN 时测得的最大应变值为 915 $\mu\varepsilon$，位置位于标高 −19.66 m 处；计算得到此时对应的试验桩最大位移为 0.53 m，位于标高 +11.8 m 处。分析表明，此时试验桩仍处在弹性范围内，证明其水平承载能力可以达到 700 kN，满足该海上风力发电机桩基的承载力设计标准。对于受力状态类似的海上桩基和其他管桩结构，所提检测方案也可有效地对其进行测试，通过测量桩体沿线的应变分布，分析其受力形变情况和相关性能。因此 BOTDR 技术可以广泛地应用于海上风力发电机桩基以及类似结构的荷载性能测试。

尽管所采用的温度补偿方案对暴露在水面以上的桩体部分的应变测量结果存在一定的误差，但是并不影响对桩基水平荷载性能的整体评估结果。后续的研究工作可以选择在夜间进行，以减小光照因素的影响；此外，通过并排布设，温度传感光纤对每根应变传感光纤分别进行温度补偿，将会获得更加准确的结果。

参 考 文 献

[1] Xia M, Tang X H, Wang Y, et al. Comparative analysis of strain monitoring of the installed optical fiber composite overhead ground wire using BOTDA/R[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1506001.
夏猛, 汤晓惠, 王颖, 等. 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1506001.

[2] Zhang W, Gao J Q, Shi B, et al. Health monitoring of rehabilitated concrete bridges using distributed optical fiber sensing[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2006, 21(6): 411-424.

[3] Inaudi D, Glisic B. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(1): 011701.

[4] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, et al. Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0700002.
张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0700002.

[5] Wang B Z, Pang C, Zhou D W, et al. Advances of key technologies in long-range distributed Brillouin optical fiber sensing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 170484.
王本章, 逄超, 周登望, 等. 长距离分布式布里渊光纤传感关键技术进展分析[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170484.

[6] Ma X J, Zhou L M, Cheng L H, et al. Fast and long-distance Brillouin optical time-domain reflectometry based on Raman amplification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170617.
马祥杰, 周黎明, 程凌浩, 等. 基于拉曼放大的长距离快速布里渊光时域反射仪[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170617.

[7] Bao Y B, Sun J Q, Huang Q. Distributed fiber

sensor based on Brillouin optical time domain reflection technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210002.
包宇奔, 孙军强, 黄强. 布里渊光时域反射仪分布式光纤传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210002.

[8] Wang B Z, Dong Y K, Ba D X, et al. High spatial resolution: an integrative review of its developments on the Brillouin optical time- and correlation-domain analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(5): 052001.

[9] Wang M, Wu H, Tang M, et al. Few-mode fiber based Raman distributed temperature sensing [J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4907-4916.

[10] Gong W M, Huo S L, Yang C, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of large diameter steel pipe pile for offshore wind farm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 34-39.
龚维明, 霍少磊, 杨超, 等. 海上风机大直径钢管桩基础水平承载特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 34-39.

[11] Deng Y S, Wang L, Peng K, et al. Application research of pile foundation detection based on fiber optic sensing technology [J]. Highway, 2017, 62(7): 151-154.
邓友生, 王露, 彭凯, 等. 基于光纤传感技术的桩基检测应用研究[J]. 公路, 2017, 62(7): 151-154.

[12] Lu Y, Shi B, Wei G Q, et al. Application of a distributed optical fiber sensing technique in monitoring the stress of precast piles [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(11): 115011.

[13] Liu Y L, Sun H Y. Research on deformation monitoring and determination of displacement of anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2147-2153.
刘永莉, 孙红月. 抗滑桩变形监测及位移确定研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2147-2153.

[14] Hong C Y, Zhang Y F, Liu L Q. Application of distributed optical fiber sensor for monitoring the mechanical performance of a driven pile [J]. Measurement, 2016, 88: 186-193.

[15] Feng S J, Lu S F, Shi Z M. Field investigations of two super-long steel pipe piles in offshore areas[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(6): 559-570.

[16] Yang J P, Piao C D. Distributed detection and bearing mechanism of squeezed branch piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1232-1235.
杨建平, 朴春德. 挤扩支盘桩分布式检测及承载机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 1232-1235.

[17] Battista N, Kechavarzi C, Seo H, et al. Distributed fibre optic sensors for measuring strain and temperature of cast-in-situ concrete test piles [C] // International conference on smart infrastructure and construction (ICSIC), June 27, 2016, Cambridge, UK. Cambridge: Robinson College, 2016: 21-26.

[18] Pelecanos L, Soga K, Chunge M P M, et al. Distributed fibre-optic monitoring of an Osterberg-cell pile test in London [J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(2): 152-160.

[19] Zhang Z H, Guan P, Xu J L, et al. Horizontal loading performance of offshore wind turbine pile foundation based on DPP-BOTDA [J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 492.