

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220216003

海岛环境条件下超长灌注桩温度光纤监测研究*

高磊¹, 曹阳¹, 赵子鑫², 叶永锋², 张纶钊¹

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210024; 2. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要: 为了弥补传统监测手段的不足, 更好地掌握海岛环境条件下超长灌注桩温度分布规律, 采用了布里渊光时域反射(BOTDR)技术, 在海岛环境条件下将光纤温度传感器安装在灌注桩上, 对气温变化下116 m长的灌注桩进行了长期温度监测试验。监测结果表明: 本次用于超长灌注桩桩体温度测量的光纤传感器均存活, 说明传感器布设工艺的合理性, 同时从测试结果来看, 光纤温度传感器基本上没有受到外力的干扰; 采用DB5小波对光纤测试数据进行降噪; 从桩体温度变化曲线来看, 海岛环境条件下的超长灌注桩桩体温度变化非常复杂, 桩头位置温度变化量最大, 随着深度增加, 温度变化量逐渐减小, 至18 m深度处温度基本不发生变化; 桩体温度场的变化存在时间效应。

关键词: 海岛; 超长灌注桩; 桩体温度; BOTDR; 光纤监测

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0674-08

Study on the Temperature of Super Long Cast-in-place Pile on the Island Using Optical Fiber Sensing Technology

GAO Lei¹, CAO Yang¹, ZHAO Zixin², YE Yongfeng², ZHANG Lunzhao¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to make up for the shortcomings of traditional monitoring methods and understand the temperature distribution of super long cast-in-place piles on the island, the Brillouin optical time domain reflectometer technology (BOTDR) is used, the optical fiber temperature sensor is fixed on the cast-in-place pile, and the temperature of the 116m long cast-in-place pile under the air temperature fluctuation is measured by long-term monitoring in this paper. The monitoring results show that: the optical fiber sensors used for the temperature monitoring of the super long cast-in-place pile all survived, indicating the rationality of the sensor layout method. It can be inferred from the monitoring results that the optical fiber temperature sensor is not disturbed by external forces; the DB5 wavelet is used to reduce the noise of the optical fiber data. From the pile temperature curve, the temperature change of the super long cast-in-place pile on the island is very complex, the temperature change at the pile head is the largest, and it decreases gradually with the depth. At a depth of 18 m, the temperature does not change, the pile temperature has a time effect.

Keywords: island; super long cast-in-place pile; pile temperature; BOTDR; optical fiber monitoring

* 收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(5207812)、中央高校基本科研业务费(B210202047, B210204020)资助

作者简介: 高磊(1984—), 男, 副教授, 博士。主要从事环境岩土工程与工程地质等方面的研究。E-mail: gaoleihhu@hhu.edu.cn

0 引言

灌注桩在实际工程中,不仅受到力学荷载的影响,温度荷载的影响同样不可忽视。温度的变化使得桩体产生热胀冷缩现象,进而对灌注桩的强度、承载力等产生影响。同时,温度的变化会影响海水的导电率,进而对海水的腐蚀性产生影响,最终影响桩基的使用寿命^[1]。许多专家学者做了大量有益的工作,唐丽云等^[2]研究了气温升高、太阳辐射等对桩的承载性能及工作性状的影响;路宏伟等^[3]与桂树强等^[4]开展了荷载—温度现场联合试验,对换热过程中桩的承载性状及结构响应进行了研究;骆湘勤等^[5]、赵刚等^[6]、A.Di Donna 等^[7]和 S.Yazdani 等^[8]研究了温度变化下桩-土界面抗剪强度、摩擦系数的变化,提出了考虑温度作用的桩-土界面荷载传递模型。

目前已有一些对桩体温度分布的研究,但由于监测手段的制约,尚存在一定的不足。近20年来,分布式光纤感测技术得到了突发猛进的发展,在岩土工程及地质工程领域被广泛应用。S.Bersan 等^[9]和 H.Seo^[10]针对 CFA(Continuous flight auger)桩开展了静力载荷试验,采用光纤传感技术对桩体应变进行监测,对 CFA 桩的竖向承载性能进行了研究;魏广庆等^[11]、朴春德等^[12]、L.Gao 等^[13]、高磊等^[14]采用 BOTDR(Brillouin optical time-domain reflectometer)和 OFDR(Optical frequency-domain reflectometer)技术对竖向荷载作用下灌注桩变形进行了分布式监测,分析了竖向荷载作用下灌注桩的承载机制;李豪杰等^[15]和朱鸿鹄等^[16]采用 FBG(Fiber Bragg Grating)技术开展了模型试验对埋地管线沉降机理及管土相互作用情况进行了探究;亓军强等^[17]、柴敬等^[18]验证了光纤传感技术用于地温场监测的可靠性;王家琛等^[19]采用主动加热光纤法对多层土水分入渗的毛细阻滞过程进行了探究;C.C.Zhang 等^[20]采用光纤传感技术监测边坡的剪切位移,分析了边坡的稳定性;《基桩分布式光纤测试规程》^[21]的颁布,标志着光纤传感技术在基桩测试中的应用迈上了新台阶。随着我国逐步向海洋强国迈进,大量的海岛工程和跨海工程正在建设,由于海洋环境的复杂性和地质情况的不确定性,如何准确掌握海岛环境条件下超长灌注桩的温度场是一

个难题。

本文依托某跨海大桥工程采用 BOTDR 技术开展对超长灌注桩桩体温度的长期监测试验。监测时长达8个月,获取了海岛环境条件下超长灌注桩温度光纤监测数据,探究了海岛环境条件下桩体温度时空分布规律,为进一步研究气温变化下超长灌注桩的热力响应问题提供了基础性科研数据,为未来跨海大桥工程设计和优化提供了科学依据。

1 试验概况

本监测试验依托于浙江省境内某跨海大桥工程开展,该跨海大桥连接大海中的两个小岛,对该桥梁钻孔灌注桩的温度分布情况进行监测。钻孔灌注桩采用双钢筋笼、双护筒设计,桩的直径和长度分别为2.2 m和116 m,两根桩相距28.5 m。该区域土层自上而下分别为36.6 m厚的淤泥质土、8.4 m厚的黏土、17 m厚的粉质黏土、45.1 m厚的砂土和25.8 m厚的粉质黏土。由于桩基础位于大海中,所以桩周土整体处于饱水状态。桩体混凝土强度等级为C30。

本次监测试验采用苏州南智公司生产的光纤布里渊应变分析仪对温度数据进行采集,测试原理参见参考文献[22]。该仪器测试精度为1℃,最大测试量程80 km。每根桩对称地U形布设2根温度传感光纤。各桩的平面位置如图1所示。

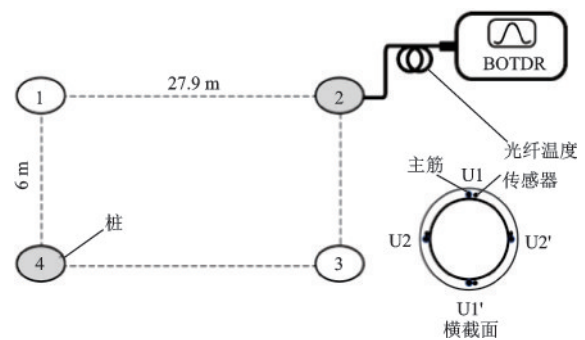


图1 监测示意

Fig.1 Monitoring schematic diagram

采用的光纤温度传感器为苏州南智传感科技有限公司生产的塑封铠装温度光缆,直径为3 mm,短期和长期强度分别为400 N和200 N,正常工作温度为-20~80℃。光纤温度传感器的结构如图2所示。

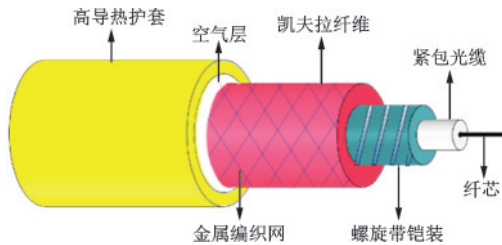


图2 光纤温度传感器结构示意图

Fig.2 Structure of optical fiber temperature sensor

光纤的布置流程如下：

(1)对称地选择钢筋笼上的4根主筋,对其表面进行清洁,方便后期布置工作的开展。

(2)将光纤沿着主筋从底笼的上端穿到下端,再穿过内环箍筋,再沿着对侧的主筋从底笼的下端穿到上端,总体上呈U形,如图3所示。当光纤到达预定布置位置后,用钢丝软管对桩底光纤进行保护。

(3)用扎带每隔0.5 m将光纤与主筋绑扎一次,光纤被绑扎在主筋侧面,最大程度地降低岩土体及导管对光纤的损坏。

(4)将下一节吊装的钢筋笼预先布设好绳索,待钢筋笼对接完成后,将绳索与光纤连接,从钢筋笼外侧牵拉绳索的一端,使光纤达到预定位置,然后绑扎光纤,完成本节钢筋笼的布置。如此循环往复,完成剩余钢筋笼的布置工作。

(5)布置完成后,为防止光纤在破桩头时被损坏,采用钢管对桩头部位光纤进行保护。

待混凝土养护完成后,用跳线将光纤与BOTDR数据采集仪连接,对桩体应变进行测量作为初始应变。之后,每隔一段时间测量应变。应变的变化与温度的变化成正比,比例系数为 $50 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$,由此便可计算出此后各天相对于第一天的温度变化量。

本文监测自2019年3月到10月,由于海岛的复杂环境,为了确保光纤传感器的存活,优先选择了分布式光纤传感监测技术,本文作者驻守在海岛上,人工进行超长灌注桩温度测量,由于BOTDR技术采集包括桩体温度传感器和引线部分数据,受光纤测试长度的影响,每根桩上有四根116 m的光纤温度传感器,每一根桩需要一小时到两小时左右,平均每两天能采集一遍9根桩体光纤传感器的数据,测试时间约为上午8点到下午6点,监测频率约为2~3天/次,共采集了100多次数据,文中仅选取代表性数据进行分析。

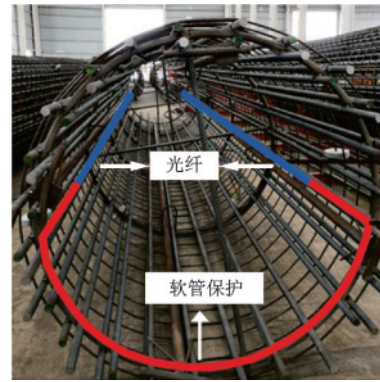


图3 光纤布设现场照片

Fig.3 Photo of the optical fiber layout

2 试验结果分析

为了准确掌握海岛环境条件下超长灌注桩温度场时空变化规律,选取代表性的两根桩进行详细分析。图4为2与4号桩的由U1U1'与U2U2'光纤计算得出的不同深度处的应变差变化曲线。初始监测日期为2019年3月26日,往后各天均与该天应变作差,得到应变差曲线。

如图4所示,应变差呈对称分布。同一根桩的4组应变差曲线总体变化趋势相同:随着深度的增加,应变差呈现出先减小后不变的趋势,最大应变差为 $900 \mu\epsilon$ 左右,当深度增加到18 m左右,应变差趋近于0并基本不再发生变化。并且量值也比较接近,说明温度传感光纤布设较为成功,基本没有受到外力的作用,仅仅受到温度的影响。不同桩的监测结果比较接近,说明该区域的应变差变化情况比较稳定。

由图4可知,由于现场环境条件较为恶劣,湿度的改变、施工机械及人员的扰动均会对监测结果产生微小影响,监测数据存在噪声。为了过滤噪声信号,采用MATLAB小波分析对光纤信号减小降噪。以4号桩3月28日的应变差曲线为例,经反复试算,发现采用DB5小波对曲线进行3层分解,效果最佳,具体情况如图5所示。图5(a)自上而下分别为原始信号s、第3层低频信号a3及各层的高频信号d3、d2、d1。经3层分解,低频信号的平滑程度较为理想,在比较好地去除了噪声信号的同时,也保留了曲线的细节部分,不会造成曲线的失真。小波分解后,采用基于Stein的无偏风险阈值Rigrsure对高频信号进行处理并与低频信号重构得到降噪后

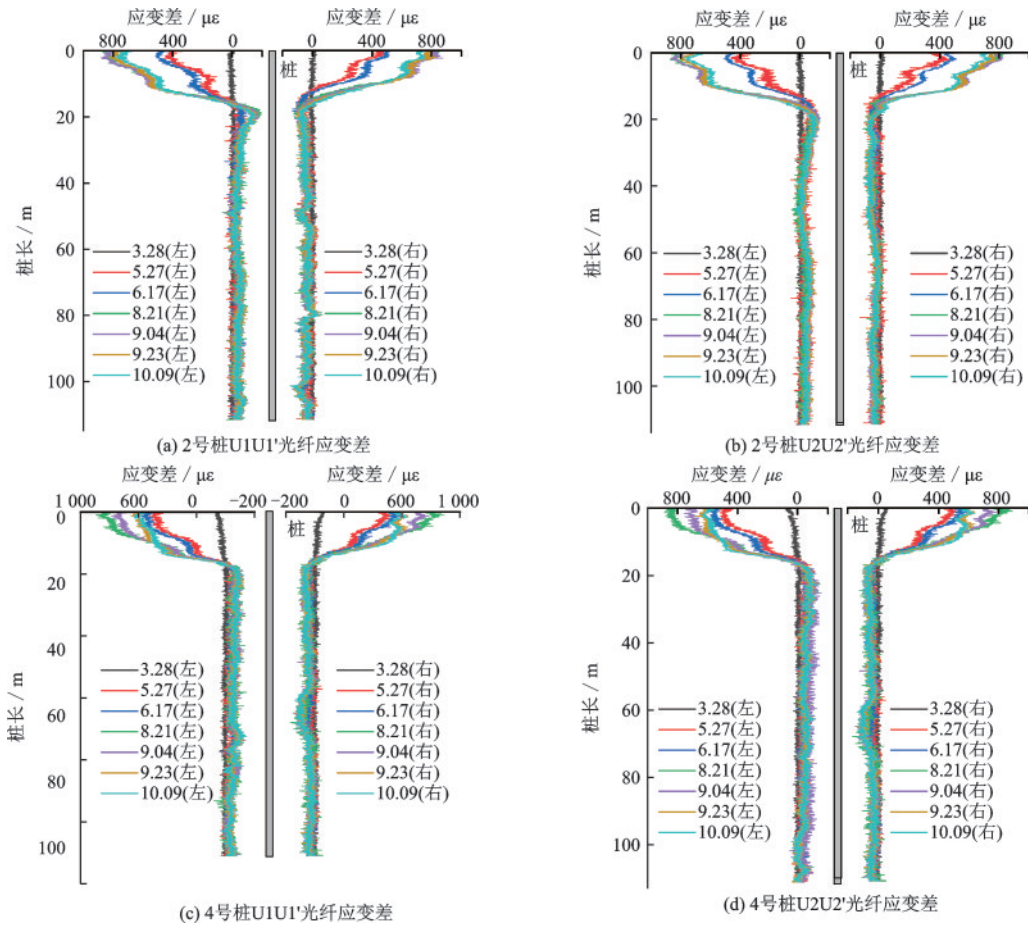


图4 各桩不同布设位置光纤的应变差

Fig.4 Strain difference of optical cable at different positions of each pile

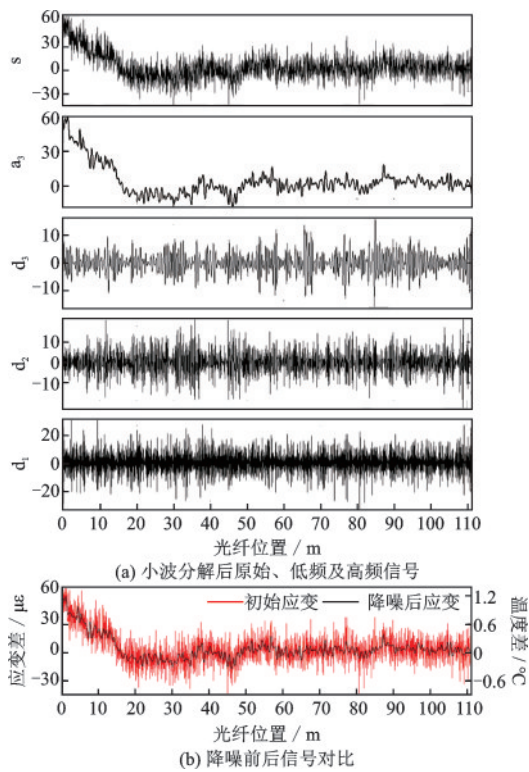


图5 小波分解与降噪

Fig.5 Wavelet decomposition and noise reduction

的信号。图5(b)为除噪前后应变差曲线的对比。由图5(b)可知,采用DB5小波对原始信号进行3层分解后除噪效果较为理想。

降噪后曲线仍存在较大波动,需采用移动平均法对降噪后曲线进行平滑处理。为了确定最佳窗口点数,将窗口点数设置为10、20、30、40、50分别进行平滑,如图6所示。由该图可知,当窗口点数设置为30时,不会过于失真,平滑效果较好。

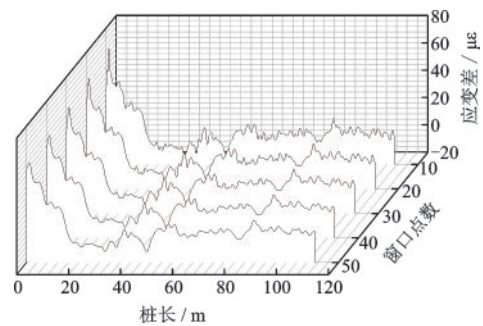


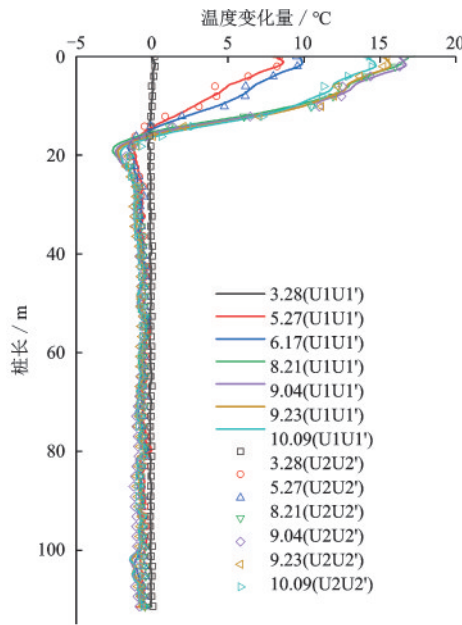
图6 不同窗口点数平滑效果对比

Fig.6 Comparison of smoothing effects of different window points

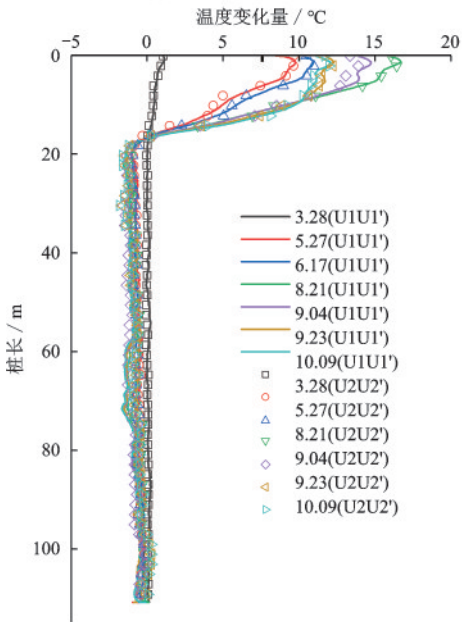
2.1 不同布设位置光纤温度变化量对比

图7为平滑降噪后2、4号桩不同布设位置的光纤U1U1'与U2U2'的温度变化量随深度变化曲线。

由图7可知,以实线为代表的U1U1'光纤与以散点为代表的U2U2'光纤得出的温度变化量曲线基本吻合,进一步证明了温度传感光纤没有受到外力的作用,可准确地监测温度变化。随着日期的增加,0~18 m深度范围内的桩体温度变化量呈现出先增大后减小的趋势,18 m至桩底深度范围内桩体



(a) 2号桩温度变化量对比曲线



(b) 4号桩温度变化量对比曲线

图7 桩体温度变化量对比曲线

Fig.7 Comparison curve of pile temperature change

温度则基本不变。在0~18 m深度范围内,温度变化量随着深度的增加逐渐减小。

为了定量地描述U1U1'和U2U2'光纤温度变化曲线的吻合程度,选择5月27日、8月21日和9月23日监测结果作为代表性数据计算曲线的相关系数 $\text{Correl}(X, Y)$,公式如下:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中, x, y 分别为U1U1'和U2U2'段光纤每一采样点的温度变化量; \bar{x}, \bar{y} 分别为U1U1'和U2U2'段光纤所有采样点的平均温度变化量。

U1U1'和U2U2'光纤温度变化曲线相关系数柱状图如图8所示。由该图可知,U1U1'和U2U2'光纤监测结果高度相关,相关系数均在0.95以上,说明光纤未受外力干扰,测温效果良好。

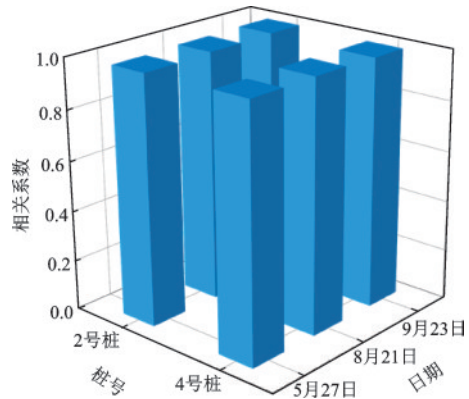


图8 各桩不同监测日期相关系数

Fig.8 Correlation coefficients of different monitoring dates for each pile

2.2 不同桩温度变化量对比

图9为2、4号桩的温度变化量云图。由图9可看出,等值线变化趋势与深度有关。当深度较浅时,等值线随着日期的增加先向下延伸,大致在8月21日达到最低点,随后再逐渐向上移动;当深度较深时,等值线先向下陡降,在5月27日或6月17日出现拐点,在随后的时间范围内等值线保持稳定,基本可看作为不随时间变化的水平线。等值线表现出上述走势的原因是第一次监测日期3月28日与第二次监测日期5月27日和初始监测日期3月26日相比,时间间隔较小,温度变化较小,所以出现陡降段。8月21日正值夏季,所以与3月26日相比,温度变化较大。从8月21日到10月9日,由夏季过渡

到了秋季,气温逐渐降低,所以温度变化量又逐渐减小。4号桩温度变化量最小为 -1.7°C ,最大为 16.6°C ;2号桩温度变化量最小为 -2.1°C ,最大为 17.4°C 。两根桩温度变化范围总体上比较接近,说明该区域的桩体温度变化量在空间上比较稳定,基本不发生变化。

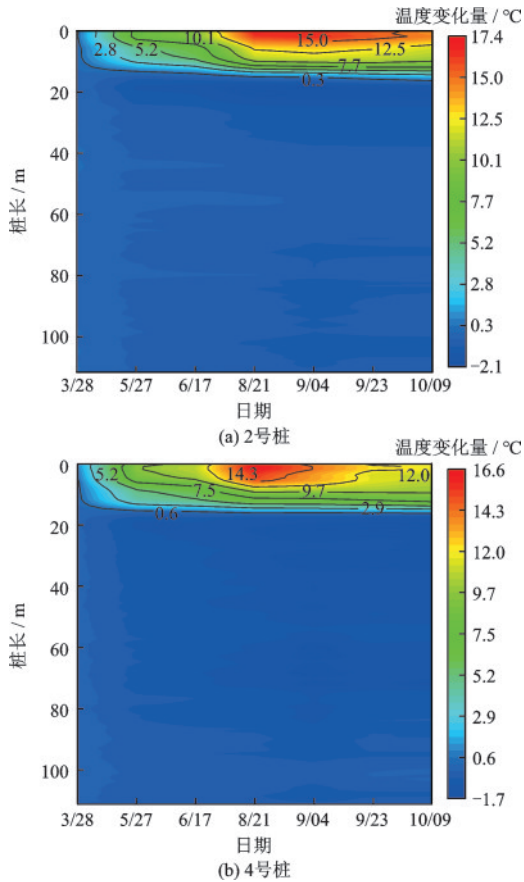


图9 桩体温度变化量云图

Fig.9 Pile temperature variation contour

2.3 不同深度温度变化量对比

各桩在0、4、8、12、16、20 m深度处光纤监测所得温度变化量随时间变化曲线如图10所示。对于4号桩:0、4、8 m深度处的温度变化曲线随着日期的增加先增大后减小,最大值点出现在8月21日;12 m和16 m深度处温度变化曲线随着日期的增加逐渐增大,最大值点出现在10月9日;20 m深度处温度变化曲线基本不产生变化。对于2号桩:0、4、8 m深度处温度变化曲线总体上先增大后减小,最大值点分别出现在8月21日和9月4日;12 m和16 m深度处温度变化曲线总体呈递增趋势,最大值点出现在10月9日;20 m深度处温度基本不发生变化。如

图10(c)所示,随着深度的增加,温度变化量最大值出现的日期逐渐向后推移,说明热量的传递存在时间效应。

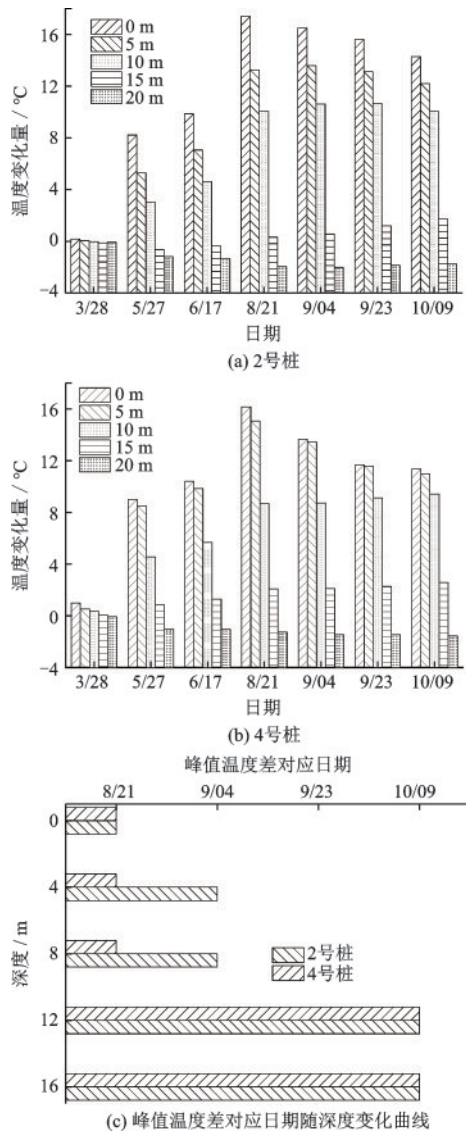


图10 不同深度处的桩体温度变化曲线

Fig.10 Temperature curves of piles at different depths

3 结论

采用BOTDR技术针对某海岛上的超长灌注桩桩体温度开展了长期监测试验,试验结果表明:

(1)本文解决了目前世界上关于海洋条件下超长灌注桩桩身温度的测量难题,传统的电阻式温度传感器无法实现这样的分布式监测,因为桩长达到了116 m,同时采用了分布式光纤传感技术进行桩体温度的测量,这是现阶段采用分布式光纤技术测

桩最长的桩基之一,并持续了接近一年的测量,取得了大量珍贵的研究数据。

(2)对光纤监测的原始结果,采用DB5小波进行3层分解,选择基于Stein的无偏风险阈值Rigrsure对高频信号进行处理后与低频信号进行重构,可达到比较理想的去噪效果,更加真实地反映桩体温度变化。

(3)两根桩的温度变化量云图总体上比较相似,说明在空间上该区域的温度场比较稳定。桩头位置温度变化量最大。随着深度的增加,温度变化量逐渐减小,在18 m及以下深度范围内温度基本不发生改变。

(4)随着深度的增加,温度变化量-日期变化曲线的峰值点所对应日期逐渐向后推移,说明桩体温度场变化存在时间效应。

参考文献:

- [1] Zhang W, Yang H, Fang L, et al. Study on heat transfer of pile foundation ground heat exchanger with three-dimensional groundwater seepage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 58-66.
- [2] 唐丽云,王鑫,杨更社,等.大气温度升高下冻土桩负摩阻力试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1527-1535.
Tang L Y, Wang X, Yang G S, et al. Experimental study on negative friction resistance of pile in frozen soil under raising atmospheric temperature[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6): 1527-1535. (in Chinese)
- [3] 路宏伟,蒋刚,王昊,等.摩擦型能源桩荷载-温度现场联合测试与承载性状分析[J].岩土工程学报,2017,39(2):334-342.
Lu H W, Jiang G, Wang H, et al. In-situ tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 334-342. (in Chinese)
- [4] 桂树强,程晓辉.能源桩换热过程中结构响应原位试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(6):1087-1094.
Gui S Q, Cheng X H. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1087-1094. (in Chinese)
- [5] 骆湘勤,刘干斌,郑言东,等.考虑温度影响的能源桩桩-土界面荷载传递模型[J].岩石力学与工程学报,2019,38(1):171-179.

- Luo X Q, Liu G B, Zheng Y D, et al. A load transfer model of energy pile-soil interfaces under temperature variation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 171-179. (in Chinese)
- [6] 赵刚,李驰,斯日古楞.温度循环下桩土界面特性及桩侧摩阻力数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2017,37(4):546-550,564.
Zhao G, Li C, Si R. Numerical simulation of pile-soil interface characteristics and pile side friction under temperature cycling [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 546-550, 564. (in Chinese)
- [7] Di Donna A, Ferrari A, Laloui L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilisation and behaviour at different temperatures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53: 659-672.
- [8] Yazdani S, Helwany S M B, Olgun G. Influence of temperature on soil-pile interface shear strength [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2019, 18: 69-78.
- [9] Bersani S, Bergamo O, Palmieri L, et al. Distributed strain measurements in a CFA pile using high spatial resolution fiber optic sensors [J]. Engineering Structures, 2018, 160: 554-565.
- [10] Seo H. Monitoring of CFA pile test using three dimensional laser scanning and distributed fiber optic sensors [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 130: 106089.
- [11] 魏广庆,施斌,余小奎,等. BOTDR分布式检测技术在复杂地层钻孔灌注桩测试中的应用研究[J].工程地质学报,2008,16(6):826-832.
Wei G Q, Shi B, Yu X K, et al. BOTDR based distributed strain test on bored pile buried in complicated geological ground [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 826-832. (in Chinese)
- [12] 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的应用[J].岩土工程学报,2008,130(7):976-981.
Piao C D, Shi B, Wei G Q, et al. Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 130(7): 976-981. (in Chinese)
- [13] Gao L, Han C, Xu Z, et al. Experimental study on deformation monitoring of bored pile based on BOTDR [J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2435.
- [14] 高磊,周乐,刘汉龙等.灌注桩桩身变形高精度测量现场试验研究[J].岩土力学,2019,42(7):2004-2014.

- Gao L, Zhou L, Liu H L, et al. Field experimental study on high precision measurement of pile deformation of cast-in-place pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 42(7): 2004-2014. (in Chinese)
- [15] 李豪杰, 朱鸿鹄, 朱宝, 等. 基于光纤监测的埋地管线沉降模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增2): 3645-3654.
- Li H J, Zhu H H, Zhu B, et al. Study on model test of buried pipeline settlement based on optical fiber monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup 2): 3645-3654. (in Chinese)
- [16] 朱鸿鹄, 王德洋, 王宝军, 等. 基于光纤传感及数字图像测试的管-土相互作用试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 317-326.
- Zhu H H, Wang D Y, Wang B J, et al. Experimental study on pipe-soil interaction using fiber optic sensing and digital image analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 317-326. (in Chinese)
- [17] 亓军强, 王宝军, 施斌, 等. 分布式光纤监测技术在地源热泵系统埋管温度场监测中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 758-762.
- Qi J Q, Wang B J, Shi B, et al. Application of distributed optical fiber sensing technology to temperature monitoring of buried pipes of ground source heat pump system [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 758-762. (in Chinese)
- [18] 柴敬, 张丁丁, 李毅, 等. 光纤光栅技术测量地温的方法及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 214-219.
- Chai J, Zhang D D, Li Y, et al. A temperature measurement method for geo-temperature with fiber Bragg grating sensors and its application [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(2): 214-219. (in Chinese)
- [19] 王家琛, 朱鸿鹄, 王静, 等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 147-155.
- Wang J C, Zhu H H, Wang J, et al. Experimental study on capillary block infiltration model based on active heating fiber method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 147-155. (in Chinese)
- [20] Zhang C C, Zhu H H, Liu S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements [J]. Engineering Geology, 2018, 234: 83-96.
- [21] 基桩分布式光纤测试规程: T/CECS 622—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [22] 黄民双, 曾励, 陶宝祺, 等. 分布式光纤布里渊散射应变传感器参数计算 [J]. 航空学报, 1999, 20(2): 42-45.
- Huang M S, Zeng L, Tao B Q, et al. Parameter calculation of distributed optical fiber strain sensor based on Brillouin scattering [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(2): 42-45. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)