

文章编号: 1007-2993(2021)05-0281-05

BOTDR 分布式光纤传感技术在 桩基测试中的应用研究

黄晓维 郑建国 于永堂 刘争宏 张 龙

(机械工业勘察设计研究院有限公司 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西西安 710043)

【摘要】 对国内外 BOTDR 分布式传感光纤在桩基测试中的研究进展进行总结, 包括 BOTDR 技术原理、仪器设备、安装工艺和实施步骤、数据采集与处理、测试结果分析等。对比分析 BOTDR 分布式光纤传感技术在常用预制桩和钻孔灌注桩中的桩基测试工艺流程, 总结桩身应力应变参数测试结果, 结合工程应用进行了简单评述, 并阐述未来研究的发展方向。

【关键词】 BOTDR; 分布式光纤; 预制桩; 钻孔灌注桩; 桩基测试

【中图分类号】 TU 753.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Brillouin Scattering-based Distributed Optical Fiber Sensing Technology on Pile Foundation Test

Huang Xiaowei Zheng Jianguo Yu Yongtang Liu Zhenghong Zhang Long

(China JK Research Institute of Engineering Investigation and Design, Co., Ltd., Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

【Abstract】 Recent advances of BOTDR distributed sensing fiber in pile foundation test are summarized, including the principle, equipment, installation and implementation, data collecting and processing, and results analysis of BOTDR. The test technique and procedure of the most frequently used prefabricated and bored piles are compared and analyzed, as well as the results acquired. Combined with engineering application, a brief comment is made, and further research topics are suggested.

【Key words】 BOTDR; distributed optical sensing fiber; prefabricated pile; bored pile; pile foundation test

0 引言

桩基作为地下工程的主要类型, 其施工质量和工后变形直接影响上层建筑的稳定性。作为地下隐蔽工程, 以往的测试手段以静载荷试验法以及高应变、低应变动测方法为主^[1], 监测则采用钢筋计、应变片等点式测试技术^[2], 这些技术受外界环境影响大、干扰因素多、埋入传感器成活率不高, 难以对桩基进行实时、有效监测^[3]。随着光纤传感技术的逐步成熟, 其在土木、水利、隧道和桥梁等工程监测领域有着广泛的应用。该技术具有分布式测量、抗干扰强、长距离传输、成活率高、耐久性强和协调性能好等优点, 能满足工程结构全断面监测要求^[4-5]。

近年来, 国内外学者将光纤传感技术引入桩基工程测试中, 取得了一系列成果^[6-8]。国际上主流的传感技术主要包括: 光时域传感技术(OTDR)、基于布里渊散射光时域的分布式光纤传感技术(如 BOTDR、BOTDA)、基于拉曼背向散射原理的分布式光纤传感技术(如 ROTDR)、基于瑞利散射的分布式光纤传感技术(如 OFDA)以及基于布拉格光纤光栅的准分布式光纤传感技术(如 FBG)等^[4,8]。基于布里渊散射光时域的分布式光纤传感技术(BOTDR)是发展较快、研究较成熟的一项传感技术, 已成功实现在预应力管桩和钻孔灌注桩等桩型中进行桩身轴力、侧摩阻力、桩端阻力、桩身应变等参数测试, 并能准确

基金项目: 国家自然科学基金(41790442); 陕西省科技统筹创新工程计划(2016KTZDSF04-05-01); 陕西省“三秦学者”创新团队支持计划(2013KCT-13)

作者简介: 黄晓维, 男, 1993 年生, 汉族, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事岩土工程测试与监测方向研究。E-mail: huangxw@jk.com.cn

确定桩身破坏位置,分析破坏原因^[9-11]。魏广庆等^[12]基于 BOTDR 传感原理,对预制桩在分布式应变模式下的桩身应变、内力分布测试进行了研究,并结合实例,分析了测试误差的可能来源。朴春德等^[13]成功将分布式光纤传感技术应用于钻孔灌注桩的检测中,并与传统的钢筋计、土压力盒等点式监测结果进行比较,得出 BOTDR 分布式光纤传感技术在测试全桩身轴力、侧摩阻力分布、确定端承力和检验桩身浇注质量等方面效果良好。因此,BOTDR 分布式光纤传感技术作为一种新型检测技术,在桩基测试中取得了良好的效果,面对桩基工程测试的广大市场需求,具有广泛的应用前景和重大的工程意义。

1 BOTDR 技术原理与设备

1.1 原理及特点

BOTDR 的核心技术是检测光纤中的背向布里渊散射信号^[14-15]。应用于桩基测试时,通过向光纤中注入脉冲光,若光纤沿桩身发生轴向应变,则光纤中的背向布里渊散射光的频率将发生漂移^[16-17]。据前人的试验及研究,频率的漂移量与光纤发生的轴向应变呈一定的线性关系,依据测试前标定的光纤线性系数,便可获得光纤的应变变化量,进而推算出桩身内力等其他参数,由于测试和监测的对象是应变,光纤传感测试技术往往需要采取温度补偿措施^[18-19]。

该技术的特点在于能将普通的单模光纤作为传感介质,无需另外特殊加工,无需回路,单端便可完成测试,能实现对大型结构工程(桥梁工程)和线状工程(石油管道、水利工程)的全分布式检测和监测^[6,20]。

1.2 仪器设备

(1) 传感光纤类型

传感光纤可分为无护套和有护套。无护套的传感光纤称为裸纤,尺寸纤细,材质脆性大,极易折断,

仅适合室内试验研究使用。有护套的光纤统称为光缆,为应对桩基工程中复杂、苛刻的施工环境,常在裸纤外封装护套和保护层,以提高光纤的强度和存活率,通常具有多层结构,主要包括纤芯、包层、涂覆层、护套等^[21]。据调研,国内如睿科光电技术有限公司等有生产销售各种类型的分布式光纤传感光缆,搭配分布式布里渊光纤传感解调仪,已成功应用于桥梁等钢结构体、隧道等水泥结构体表面、土木工程结构等应变分布的监测。索文斌等^[22]概括了两类分别适用于预制桩和灌注桩的分布式传感光缆,如图 1 所示,各类参数见表 1。总体来看,在灌注桩使用的光纤直径较粗,弹性模量大,承受拉力荷载值高,而预制桩中埋设的光纤强度参数要比灌注桩中低得多,这也是结合不同桩型及其受力特点,在经济适用的条件下,选择最优的光纤类型(见图 1)。

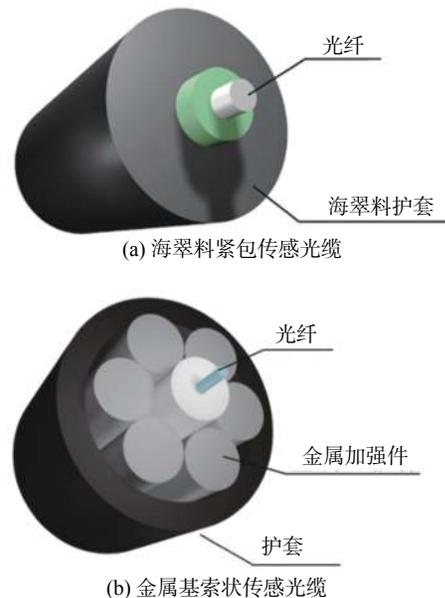


图 1 两类传感光缆示意图^[22]

表 1 传感光缆性能参数^[22]

光纤	直径/mm	弹模/GPa	质量/(kg·km ⁻¹)	抗拉力/N	适用桩型	频移-应变系数/(MHz·μ ϵ ⁻¹)	频移-温度系数/(MHz/°C)
海翠料紧包传感光缆	0.9	2	3.8	25~38	预制桩	0.04958	2.990
金属基索状传感光缆	5	42	38	2350	钻孔灌注桩	0.04900	1.775

(2) 光纤标定

在光纤中发生布里渊散射光的频率会随桩身的变化而发生改变^[23],因此,使用基于 BOTDR 理论的光纤传感技术进行桩基测量时,使用前必须对光纤进行标定,以获得其频移与应变之间的线性关系^[24]。标定工作一般在试验室内进行,常用的方法有等强度梁法、定荷拉伸法、定点拉伸法等^[25-26],其中定点拉伸

法在业内应用最广。标定工作大多基于裸纤进行,相应的技术和配套装置也发展成熟。此外,安鹏举等^[26]对紧包光纤标定进行了试验,并基于定点拉伸法提出了改进的标定方法,较传统方法取得了更好的测试效果。实际工程应用中的光纤往往具有过厚的黏结层(如铠装光纤),会造成光纤初始应变不均,因此在标定过程中受拉时存在应力分布调整。针对这

类光纤的标定,目前在理论研究和试验装置方面仍有大量的工作需要进行。

(3) 测量系统

国外对于光纤传感测量系统研究起步较早、水平较高,如美国、加拿大、瑞士、日本等国家先后在系统的研发和应用方面取得了巨大进步^[5,27]。国内如南京大学施斌团队、哈尔滨工业大学董永康团

队、四川大学刘浩吾等先后研发生产了分布式光纤传感技术系列产品,并在桥梁、隧道工程中付诸实用。为更好地推广光纤传感技术并服务于工程应用,本文进一步调研了国内外生产研发相关仪器的情况,包括仪器名称、型号、测量参数、测量精度等信息参数,并总结了一些代表性的生产销售公司及其部分产品(见表2)。

表2 国内外分布式传感光纤设备情况

国家	仪器名称	型号	测量参数	测量精度	生产销售商
瑞士	Omnisens分布式光纤传感技术	V3、V4、V9系列	应变、温度	应变: 2 $\mu\epsilon$	Omnisens SA
	分布式光纤温度、应变测量系统	VISIONDual	布里渊频移、应变、温度	应变: 2 $\mu\epsilon$ 温度: 0.1 $^{\circ}\text{C}$	
美国	DTSS温度应变监测系统	MTS-8000	应变、温度	应变: 20 $\mu\epsilon$ 温度: 1 $^{\circ}\text{C}$	JDSU公司
日本	AQ8603型BOTDR光纤应变监测系统	AQ8603	应变	应变: 30 ~ 40 $\mu\epsilon$	NTT公司
意大利	OSD-1分布式光纤温度和应变监测系统	OSD-1	布里渊频移、应变、温度	应变: 4 $\mu\epsilon$ 温度: 0.2 $^{\circ}\text{C}$	Optosensing公司
中国	单端/双端分布式光纤应变测量系统	NZS-DSS-AS01/AD01	应变、温度	应变: $\pm 2 \mu\epsilon$	南智传感 睿科光电
	高空间分辨率分布式光纤温度和应变测量系统	RP1000系列	应变、温度	应变: 20 $\mu\epsilon$ 温度: 1 $^{\circ}\text{C}$	

据市场调研,美国生产的分布式光纤传感设备在国内整体价格昂贵,在实际桩基工程应用中难以推广,而瑞士、意大利等国家生产的大多产品既能满足测量精度的需求,价格在国内又可被普遍接受,目前使用较多。随着中国国内市场和技术实力的崛起,未来将会研发出更加低价高效的光纤传感测量系统,以便分布式光纤传感技术在桩基测试中广泛推行与应用。

2 基于 BOTDR 技术的桩基测试

2.1 安装工艺

现有的测试手段是将分布式传感光纤植入到桩基内部去测量,根据已有的工程经验,安装的成功与否直接决定着测试效果。本文整理了已有的光纤成功安装工艺,旨在为光纤在桩基测试中的布设提供参考。根据桩基种类、测试过程以及测试内容的不同,就应用最为广泛的预制桩和钻孔灌注桩进行归纳总结。

(1) 预制桩(PHC管桩)

PHC管桩即预应力高强度混凝土管桩,是采用预应力离心成型工艺制成的一种空心圆筒型混凝土预制构件^[28]。测试时通常沿桩身轴线布置一组或多组两两互成 90° 的传感光纤,对桩身的纵向变形进行测试^[12]。此外,施斌等^[18]指出,在贯入预制桩过程中,桩尖部位最易产生局部破坏,因此在该位置一定

深度内应设置一定间隔的环向应变传感光纤和温度补偿光纤,以监测桩身的环向变形和裂缝情况。实施步骤可概括如下,布设示意如图2。

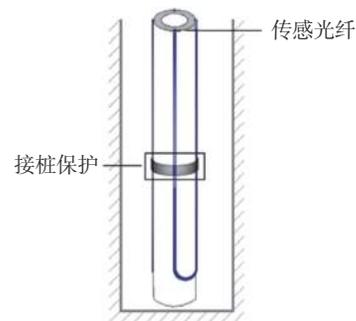


图2 预制桩中传感光纤布设示意图

一是开槽布纤。沿桩身表面预先设计测试路线,后用切割工具沿设计路线进行开槽,其深度和宽度以能放入测试光纤为准,光纤埋入后采取定点固定。

二是涂胶防护。槽内推荐使用高强胶剂进行填充、粘贴和表面保护,桩头处光纤外露部分可加套管保护,再用缓冲材料进行包裹固定。

三是光纤对接。将已埋设好光纤的管桩按先后顺序贯入,在桩接口施工处,先进行桩的焊接,之后将上下桩对应的光纤进行对接并采取保护措施,为保证光纤接口成功,两端保证有富余的光纤长度,确认对接成功后将冗余的光纤盘在桩接头处加特殊保护层,后接着打桩施工。

(2) 钻孔灌注桩

钻孔灌注桩是指通过机械或人力等手段在地基土中形成桩孔, 后在孔中放入钢筋笼, 再灌注混凝土而形成的桩^[28]。因此传感光纤是同钢筋笼一起放入桩孔的, 具体实施方法与步骤概括如下^[13, 29-30], 布设示意如图 3^[22]。

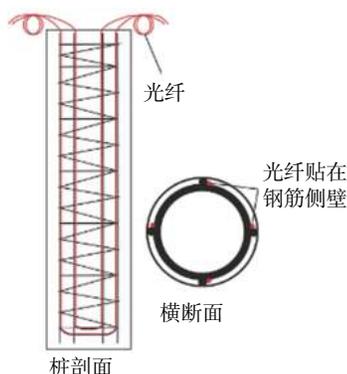


图 3 钻孔灌注桩光纤布设示意图

一是光纤布设。传感光纤垂直布设在钢筋笼对称的二根主筋上, 为保证其成活率, 采用 U 型放线布设, 且布设位置尽量靠近钢筋笼主筋侧面。

二是绑扎固定。该工艺的主要目的是使传感光纤能够铅直埋设于桩内。因此, 绑扎时应对其给予一定的预应力, 可将光纤一端固定, 另一端利用锁线器拉紧, 采用定点固定的方式, 用高压胶带或类似其他胶带进行绑扎, 固定间隔宜为 20 ~ 50 cm。

三是过弯及出口保护。要点是在传感光纤弯折及混凝土外露位置处加松套管进行保护, 防止其折断。其次在浇筑混凝土过程中, 对其进行覆盖保护, 防止机械设备的破坏。传感光纤应在桩头预留一定的长度, 以便后续接入 BOTDR 调解仪进行测试, 同时对预留的光纤进行特殊保护, 防止后期桩头施工和养护对传感光纤产生损坏。

2.2 数据采集与处理

分布式光纤传感技术能采集到整个测试路线上的数据点, 可达成千上万个采样点, 每个采样点包含了布里渊散射光频移、功率谱、损耗及光纤应变等信息, 一次测量的数据量非常庞大。受外界因素的影响, 这些巨大的原始监测数据中常包含着异常数据点、噪声信号等干扰数据, 数据的处理旨在通过一定的处理技术及异常识别模型和方法提取出真实有用的数据, 以便于桩基变形分析^[13, 29, 31]。

朴春德等^[13]提出了对采集数据的两种处理方法, 即去噪和平滑处理。去噪方法采用了小波分析的原理和方法, 即去除噪声信号, 保留真实信号, 改善信号

的信噪比^[32]; 平滑处理则采用了移动平均法, 减弱或消除偶然因素作用, 显示应变曲线的变化趋势。

2.3 测试效果

大量研究结果表明, BOTDR 分布式光纤传感技术在桩基测试中取得了良好效果, 同时, 对可获得的测试参数及结果进行了总结分析^[9, 12, 33]。

(1) 桩基桩体全断面应变分布。

(2) 根据桩身的形状和材料力学参数, 推算出桩身内力、侧摩阻力及桩端阻力。

(3) 查明桩径异常和土层突变位置, 准确识别和判断桩身质量缺陷, 分析施工工艺等因素对桩身承载性能的影响。

(4) 通过多方位布设光纤测桩身应变, 对桩身形态和偏心荷载情况进行判断分析, 更加全面地了解桩基承载特性。

2.4 工程实例

图 4 显示了某工地超高层试桩试验工程中应变和轴力部分测试结果。由测试结果可知, 桩身轴向应变从桩顶到桩底逐渐减小, 在不同荷载级别下呈现较好的一致性规律, 可直观观测到桩身全断面应变变形分布; 随着桩顶施加的分级荷载增大, 桩身轴力逐渐增大, 而随着桩体埋深的增加, 轴力也相继趋于零, 呈现同步变化和一致性规律。

3 结论

随着 BOTDR 分布式光纤传感技术在桩基工程测试中的逐步推广, 理论和实践日益加强, 改变了隐蔽的桩基工程在检测、监测中的现状, 实现了对桩基桩身的全断面监测, 大大提高了监测准确性并切实保障了工程建设安全。本文总结了基于 BOTDR 原理的分布式光纤传感技术在桩基测试方面的基本原理、设备概况、测试流程、数据处理与分析及测试结果与效果评价, 进一步提出该技术今后需深入研究的方向。

(1) 国内目前使用的光纤调解仪大多从国外引进, 价格昂贵, 在实际工程中难以广泛应用。需进一步开展仪器设备方面研究, 研发高精度、低价格的分布式光纤测试系统, 从而实现该技术在桩基测试应用中的全面推广。

(2) 面对复杂的地下施工环境, 传感光纤往往需要较厚的黏结层来进行保护, 严重影响了光纤标定的准确性。需进一步研发更加可靠的光纤标定设备, 制定标定工艺与流程, 解决标定中光纤因保护套导致的初始应变不均等问题。

(3) 数据处理过程中对异常数据点的识别和判断

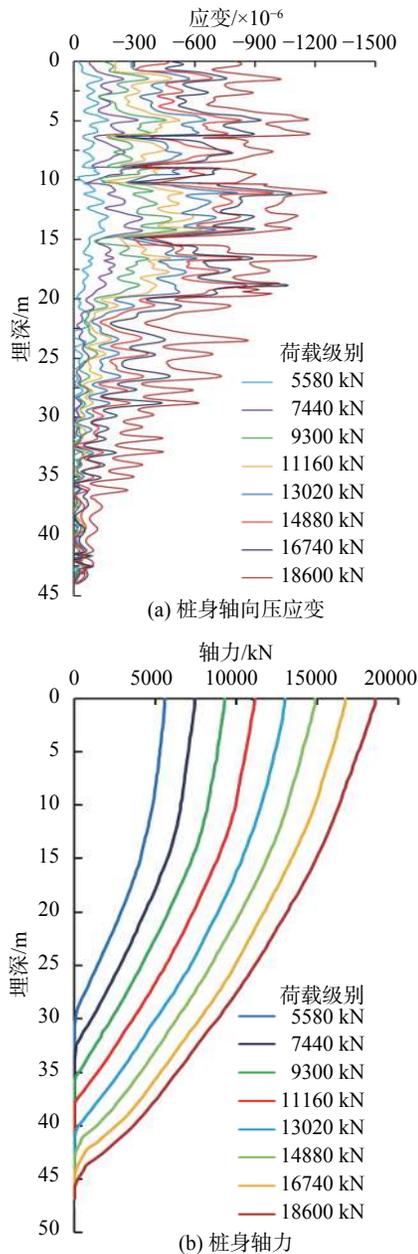


图4 桩基部分参数测试结果示意图

对桩基桩身安全状态的鉴别有着至关重要的作用。面对地下隐蔽工程,该过程往往因个人主观操作而出现偏差。需要进一步完善数据处理方法,开展智能化数据处理研究。

随着 BOTDR 分布式光纤传感技术在桩基测试领域的深入发展,其涵盖的内容和范围愈加广泛,本文仅对其中部分内容做概述性总结和评述,为工程技术人员提供参考。

参 考 文 献

[1] 杨春柳. PHC管桩桩身质量检测中多种方法的综合应

用[J]. *岩土工程技术*, 2019, 163(3): 138-142.

- [2] 高 强, 杨龙才, 王炳龙. 软黏土中钻孔灌注桩承载特性的试验研究[J]. *岩土工程技术*, 2004, (1): 35-39.
- [3] 陈 芳. 桩基测试发展趋势展望[J]. *山西科技*, 2009, (1): 111-112.
- [4] 施 斌, 张 丹, 王宝军. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(S2): 109-116.
- [5] 朱鸿鹄, 施 斌. 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*, 2013, 21(1): 166-169.
- [6] 乔迎欣, 黎剑华, 贺跃光. 光纤监测技术在土木工程中的应用现状及展望[J]. *南昌工程学院学报*, 2007, (1): 13-18.
- [7] 王静瑜. 浅述分布式光纤传感技术在桩基检测中的应用[J]. *江西建材*, 2019, (3): 57-58.
- [8] HARTOG A H. An introduction to distributed optical fibre sensors[M]. CRC Press, 2017.
- [9] 余小奎. 分布式光纤传感技术在桩基测试中的应用[J]. *电力勘测设计*, 2006, (6): 12-16.
- [10] BAO X, DEMERCHANT M, BROWN A, et al. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(11): 1698-1704.
- [11] OHNO H, NARUSE H, KURASHIMA T, et al. Application of Brillouin scattering-based distributed optical fiber strain sensor to actual concrete piles[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, 85(4): 945-951.
- [12] 魏广庆, 施 斌, 贾建勋, 等. 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*, 2009, 31(6): 911-916.
- [13] 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, 30(7): 976-981.
- [14] 陈 磊, 詹跃东, 田庆生. 基于BOTDR分布式传感系统的研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2019, (6): 96-100.
- [15] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [16] 卢 毅, 施 斌, 席 均, 等. 基于BOTDR的地裂缝分布式光纤监测技术研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(1): 8-13.
- [17] WAIT P C, NEWSON T P. Measurement of Brillouin scattering coherence length as a function of pump power to determine Brillouin linewidth[J]. *Optics Communications*, 1995, 117(1-2): 142-146.

(下转第 293 页)