

基于光纤布拉格光栅传感技术的不同桩径静压桩贯入特性研究

马加骁¹, 王永洪^{1,2*}, 张明义^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 刘雪颖¹

¹青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033;

²山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033

摘要 为了探索光纤布拉格光栅(FBG)传感技术在针对不同桩径静压桩贯入特性测试中的适用性,分别采用拉伸试验机、砂标法标定 FBG 应变传感器、FBG 压力传感器,传感器线性度及测试精度较好,并配合不同桩径的模型桩在大尺寸模型箱中进行了室内静压沉桩试验。试验结果表明:FBG 传感技术能够较好地满足不同桩径静压桩贯入特性的测试要求,所用传感器具有较高的线性度、灵敏性,经验证测试数据可靠,传感器安装方法可行;所用传感器能够对模型桩贯入过程中的压桩力、桩端阻力、侧摩阻力、桩身轴力、单位侧摩阻力进行动态、精准的监测,较为直观地反映了不同桩径的模型桩在静压过程中的贯入特性差异及变化规律。

关键词 测量; 光纤布拉格光栅; 传感器; 静压桩; 桩径; 测试分析

中图分类号 TU473

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0504003

Penetration Characteristics of Jacked Piles with Different Pile Diameters Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology

Ma Jiexiao¹, Wang Yonghong^{1,2*}, Zhang Mingyi^{1,2}, Bai Xiaoyu^{1,2}, Liu Xueying¹

¹School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

²Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao, Shandong 266033, China

Abstract To explore the applicability of the fiber Bragg grating (FBG) sensing technology in the penetration characteristics of jacked piles with different pile diameters, FBG strain and pressure sensors were calibrated using a tensile testing machine and sand calibration method, respectively. The linearity and testing accuracy of sensors are found to be good. Further, the jacked pile test of the test model with sensors was conducted in a large model box. Experiment results indicate that the requirement for FBG sensing technology to test the penetration characteristics of jacked piles with different pile diameters can be satisfied. FBG sensors demonstrate high linearity and sensitivity; moreover, the test data are reliable, and the installation method of the sensor is feasible. During the penetration process, FBG sensors can dynamically and accurately monitor the pile driving force, pile end resistance, side friction resistance, pile axial force, and unit side friction. Moreover, they can reflect the differences and change rules of penetration characteristics of the model piles with different pile diameters in the process of isostatic pressing.

Key words measurement; fiber Bragg grating; sensors; jacked pile; pile diameter; test analysis

OCIS codes 120.4640; 060.2280; 060.2300; 060.2370

1 引 言

静压桩是利用静压力将预制桩压入土体中的一种桩基础施工方法,具有无噪声、无振动、施工速度

快、沉桩质量好、综合效益高等诸多优点,在工民建、市政、道桥等工程领域中备受青睐^[1-3]。为进一步提高静压桩的承载能力、优化桩基设计、改进施工工艺,国内外众多学者通过室内外试验采用不同的测试技

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2019-12-17; 录用日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51778312)、山东省重点研发计划(2017GSF20107,2018GSF117008)

* E-mail: hong7986@163.com

术对静压桩的贯入特性进行了积极的研究和探索。

施峰^[4]将装有钢筋计的钢筋笼置于预制桩的桩芯内,对不同桩长的预制桩在静压沉桩过程中的受力状态进行了研究。张忠苗等^[5]同样利用钢筋计对不同桩型预制桩的承载特性进行了研究,测得了方桩和圆桩的端阻、侧阻的变化规律。史永强等^[6]将应变片安装于每节管桩的内壁,对静压过程中预制桩桩身的受力状态进行了监测。刘争宏等^[7-8]分别利用三向位移计和滑动测微计,对静载试验过程中管桩的端阻、侧阻、负摩阻力的变化规律进行了相关研究。虽然现场试验测得的数据较为真实、可靠,能够较好地反映静压沉桩过程中的桩身受力特性,但是现场试验成本较高、耗时较长且传感器安装测试难度较大。所以,众多学者采用室内模型试验,根据具体工况合理选择制作模型桩及试验土体,通过安装的传感器,对所需数据进行监测和采集。Lehane等^[9]通过室内模型试验,研究了不同壁厚对管桩的桩端阻力、侧摩阻力、压桩力的影响。Gavin等^[10]将应变片粘贴于模型桩外壁,对开、闭口管桩在砂土中的贯入特性进行了研究分析。周健等^[11]采用半模桩结合电阻式传感器对静压过程中桩的挤土效应及沉桩阻力进行了研究。Jeong等^[12-13]利用应变片研究了土塞率、土塞增长率的变化规律,及其对贯入特性的影响。李雨浓等^[14]借助鼓轮式离心机对闭口方桩进行了静压试验,通过T-bar试验和静力触探试验对贯入过程中桩身的径向应力及侧摩阻力进行了监测和研究。综上所述,室内静压沉桩试验中多采用传统的电阻式或振弦式传感器,由于室内模型试验中对模型尺寸、受力等物理量进行了缩尺,因此要求传感器具有较高的灵敏度和抗干扰性能以确保测试精度,而应变片等传统传感器无法较好地满足

监测要求。光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新兴的监测技术,具有精度高、体积小易安装、抗干扰能力强等诸多优势,被广泛应用于结构工程^[15-16]、海洋工程^[17]、隧道工程^[18-19]等多种工程领域,但基于光纤光栅传感技术研究桩径对静压桩贯入特性影响的试验报道较少。

本文利用FBG应变传感器、FBG压力传感器和自制的铝质模型桩,将FBG应变传感器通过刻槽法安装于桩身,FBG压力传感器安装于桩顶,通过两种传感器对桩身应变、桩顶压力进行监测;并对桩径分别为140 mm、100 mm的模型桩在静压贯入过程中的桩端阻力、侧摩阻力、单位侧摩阻力及桩身轴力的变化规律进行了研究。

2 基本原理分析

2.1 FBG应变传感器原理

Hill等^[20-21]发现在光纤中掺入锗、锡、硼等杂质,能提高光纤的光敏性,经强紫外光曝光后将入射光相干场图样写入光纤,使此段光纤的折射率沿其长度方向呈周期性变化,称此为光纤光栅。将连续宽谱光从一端注入光纤,经过光栅时FBG相当于一个窄带滤波器,满足Bragg衍射条件的波长将被反射,其余的宽带光继续透射穿过光栅^[22]。FBG的工作原理如图1所示^[23],图中: A 为光谱强度; λ_{Bi} 为FBG反射光的中心波长, $i=1,2,\dots,n$ 。当光纤光栅的受力状态和所处温度改变时,反射光的中心波长将发生变化,通过监测中心波长的漂移量可得到被测物理量的值。Bragg衍射条件为^[24]

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: λ 为光纤光栅反射光的中心波长; n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为光栅栅距。

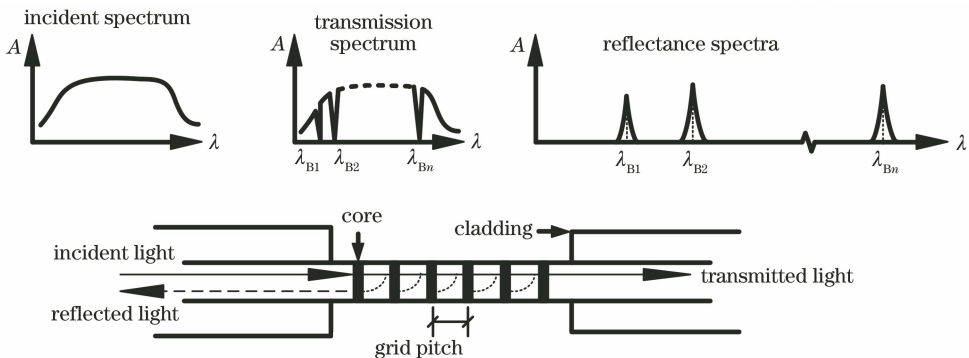


图1 FBG工作原理图

Fig. 1 Working schematic of FBG

FBG 中心波长的漂移受应变与温度的双重影响,假定应变和温度对中心波长的影响相互独立,通过监测中心波长的漂移量 $\Delta\lambda$ 及温度的变化量 ΔT ,即可推算出光纤光栅的轴向应变量 $\Delta\epsilon$ ^[25],三者之间的关系式为

$$\Delta\lambda = [(1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T]\lambda_0, \quad (2)$$

式中: P_e 为光纤有效弹光系数; α 为光纤热膨胀系数; ξ 为折射率温度系数; λ_0 为初始中心波长。

由于室内试验温度变化不大,可不考虑温度变化对中心波长的影响,则(2)式可简化为^[26]

$$\Delta\lambda = K_\epsilon \Delta\epsilon \lambda_0, \quad (3)$$

$$K_\epsilon = 1 - P_e, \quad (4)$$

式中: K_ϵ 为光纤光栅的应变灵敏度系数。

由于裸 FBG 应变传感器在试验过程中易被损坏,常采用封装的方法提高传感器的存活率^[27],本试验所用 FBG 应变传感器采用聚酰胺和纤维复合材料封装,在传感器两端安装不锈钢夹持套管。封装后的 FBG 应变传感器受封装材料及工艺的影响,其应变灵敏度系数与裸 FBG 存在差异,通过拉伸试验机、标定板、光纤光栅解调仪对封装 FBG 应变传感器进行标定试验。拉伸试验机为 CMT5305 系列

微机控制电子万能试验机,其变形测量范围为 0.2%~100% F.S.(full scale),变形测量分辨率为 1/300000 F.S.,变形测量相对误差小于 $\pm 0.5\%$;标定板为尺寸 400 mm×100 mm×5 mm(长×宽×高)的钢板;光纤光栅解调仪为 FS 2200RM 型光纤光栅解调仪。利用环氧树脂将封装 FBG 应变传感器沿标定板长度方向粘贴,再利用拉伸试验机对钢板逐级施加拉应力,使其应变从 0 $\mu\epsilon$ 增至 130 $\mu\epsilon$,再逐级卸载至应变为 0 $\mu\epsilon$,通过光纤光栅解调仪对试验过程中传感器中心波长的变化进行监测,封装 FBG 应变传感器的标定原理如图 2 所示, N 为标定板所受拉力。测得封装 FBG 传感器应变与中心波长的拟合曲线如图 3 所示。封装 FBG 应变传感器拟合曲线与测试数据具有较高的相关性,在封装前后传感器的相关性系数均大于 0.999,应变灵敏度由 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 变为 4.6 pm/ $\mu\epsilon$,测量精度由 1.2%F.S. 变为 0.8%F.S.。这是因为裸光纤光栅安装较为不便,光栅与监测点易出现接触不完全的情况,且安装时裸光栅的直线度较难保证,从而造成误差,影响测量精度,封装后传感器的护套和夹持套管能够改善此问题。

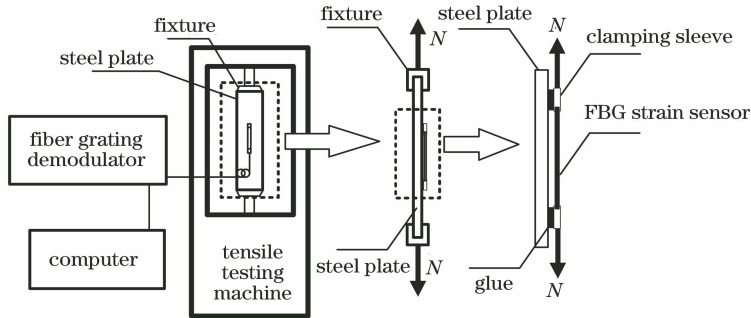


图 2 FBG 应变传感器标定试验原理图

Fig. 2 Calibration schematic of FBG strain sensor

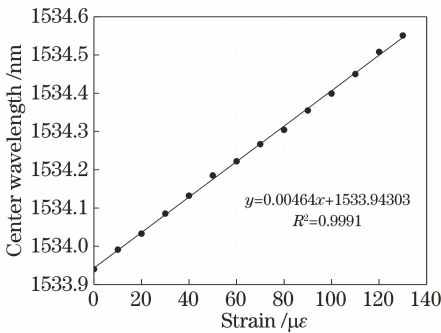


图 3 FBG 应变传感器标定曲线

Fig. 3 Calibration curve of FBG strain sensor

2.2 FBG 压力传感器基本原理

FBG 压力传感器是基于 FBG 传感技术的压力

型传感器,当压荷载作用于 FBG 压力传感器上时,金属膜片首先发生挠曲变形,从而推动连接杆移动,假定连接杆为完全刚性,则悬臂梁受到连接杆传递的集中荷载作用后会产生挠度相同的变形,使悬臂梁 FBG 安装处发生应变,FBG 的中心波长发生漂移^[28]。FBG 压力传感器的结构原理如图 4 所示,图中: l 为悬臂梁固定端到连接点的长度, a 为悬臂梁固定端至 FBG 安装点的长度, F 为刚性连接杆作用于悬臂梁上的集中力, R 为膜片的半径, ω_1 、 ω_2 分别为膜片中心的挠度和悬臂梁自由端的挠度。

根据材料力学和弹性力学的基本原理,可知矩形等截面悬臂梁的惯性矩 I 、圆形膜片的弯曲刚度 D 的表达式分别为^[29-30]

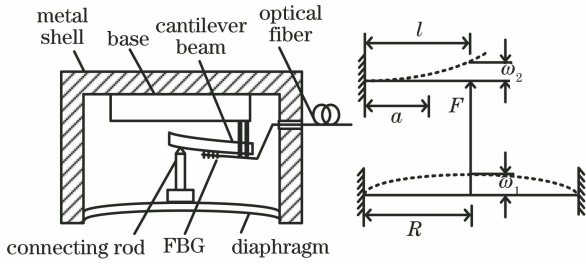


图 4 FBG 压力传感器工作原理图

Fig. 4 Schematic of FBG pressure sensor

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (5)$$

$$D = \frac{E_1 H^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (6)$$

式中: b 为悬臂梁的宽度; h 为悬臂梁的厚度; H 为膜片的厚度; E_1 为膜片的弹性模量; μ 为膜片的泊松比。

由于圆形膜片和悬臂梁之间为刚性连接, 两构件连接处的挠度相等, 根据平面圆形薄板特性^[30] 可得膜片中心的挠度 ω_1 , 根据材料力学原理^[29] 可知悬臂梁自由端的挠度 ω_2 , ω_1 、 ω_2 和 F 的表达式分别为

$$\omega_1 = \frac{qR^4}{64D} - \frac{FR^2}{16\pi D}, \quad (7)$$

$$\omega_2 = \frac{Fl^3}{3E_2 I}, \quad (8)$$

$$F = \frac{qR^4 / (64D)}{R^2 / (16\pi D) + l^3 / (3E_2 I)}, \quad (9)$$

式中: q 为作用于膜片上的压应力; E_2 为悬臂梁的弹性模量。

由材料力学的基本原理^[29] 可得悬臂梁上 FBG 安装点处的应变 $\Delta\varepsilon$, 与(3)式联立可得压力传感器所受压力 q 与中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 之间的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{qK_e R^4 h (l - a) / (64D)}{2E_1 I [R^2 / (16\pi D) + l^3 / (3E_2 I)]} \lambda_0. \quad (10)$$

传感器的膜片和悬臂梁均由 S31603 不锈钢制成, 其弹性模量和泊松比分别为 200 GPa、0.306; 膜片半径 R 为 30 mm, 厚度 H 为 1.3 mm; 悬臂梁宽度 b 为 15 mm, 厚度 h 为 1.3 mm; 悬臂梁固定端到连接点的长度 l 为 25 mm, 悬臂梁固定端到 FBG 安装点的长度 a 为 20 mm; FBG 的应变灵敏度系数 K_e 为 1.2 pm/ $\mu\varepsilon$, 中心波长 λ_0 为 1530.613 nm。将各参数代入(10)式, 可得 FBG 压力传感器灵敏度的理论值为 472.05 nm/MPa。

FBG 压力传感器的标定装置主要由液压千斤顶、量力环、承压板、垫板、标定桶、反力架及标准砂组成。具体参数如下: 承压板为直径 300 mm、厚

20 mm 的圆形钢板, 垫板为直径 100 mm、厚 20 mm 的圆形钢板, 标定桶的直径和高度分别为 310 mm、100 mm, 量力环的率定系数为 87.47 N/0.01 mm, 传感器上覆土层厚度为 30 mm, 传感器的波长变化通过 FS 2200RM 型光纤光栅解调仪采集。FBG 压力传感器的标定装置如图 5 所示。在标定过程中, 为防止超过量程, 先逐级加压 (0.2 MPa 直至 2.0 MPa), 然后逐级卸载 (0.2 MPa 至 0 MPa)。经多次加载卸载后, 得到的 FBG 中心波长与传感器所受压力的拟合结果如图 6 所示。在标定过程中, FBG 压力传感器所受压力与其中心波长的变化量呈现良好的线性关系, 线性相关性达 0.9994, 精度为 0.84% F.S., 灵敏度系数为 415.05 pm/MPa, 与理论计算的灵敏度存在一定的偏差, 这可能是因为刚性连接杆并非完全刚性, 在受压过程中会产生压缩变形, 通过连接杆传递给悬臂梁的挠度存在一定的损耗, 且传感器制作安装工艺也会影响传感器的灵敏度。

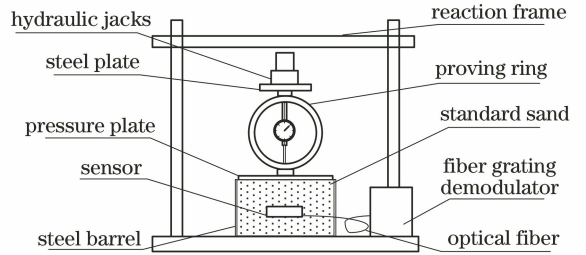


图 5 FBG 压力传感器标定试验装置

Fig. 5 Calibration device of FBG pressure sensor

3 试验方案

3.1 试验装置

为研究不同桩径对静压桩贯入特性的影响, 本试验设计了两直径分别为 140 mm、100 mm 的模型桩 TP1、TP2, 模型桩由双层铝质圆管制成, 通过 6

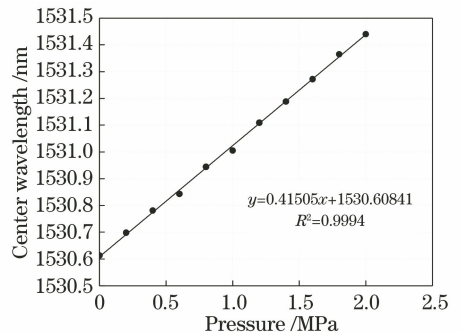


图 6 FBG 压力传感器标定曲线

Fig. 6 Calibration curve of FBG pressure sensor

个六角螺栓将圆形金属底板安装于桩端,使桩端形式为闭口,模型桩参数如表 1 所示。

静压桩贯入试验在长×宽×高为 3 m×3 m×2 m 的大尺寸模型箱中进行,模型箱由钢板焊接而成,模型箱顶部有由横梁、液压千斤顶等构件组成的

加载系统,能够对模型桩施加稳定、连续的静压力,使模型桩静压贯入试验土体中。试验土体为粉质黏土(取自工程现场),根据《土工试验方法标准》^[31]将土体重塑分层填入模型箱中,采用压实机械将土体分层压实、洒水,覆盖薄膜后静置 30 d 再进行试验。

表 1 模型桩参数

Table 1 Model pile parameters

Model pile	Diameter /mm	Length /mm	Thickness /mm	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio	Form of pile end
TP1	140	1000	3	72	0.3	Closed
TP2	100	1000	3	72	0.3	Closed

3.2 传感器安装与监测

采用传统的粘贴法将 FBG 应变传感器安装于桩壁上,在沉桩过程中受侧摩阻力的影响传感器易损坏,为提高 FBG 应变传感器的存活率,本试验采用刻槽法安装。通过开槽机在模型桩桩身两侧对称开槽,浅槽的宽度与深度均为 20 mm,确定传感器的安装位置后,先采用 704 胶将 FBG 应变传感器一侧的不锈钢夹持管粘于浅槽底部,对传感器进行预拉伸处理,

直至其波长增加 2 nm,再将另一侧的不锈钢夹持管也固定粘贴于浅槽底部。用环氧树脂涂覆 FBG 应变传感器并填充浅槽,使环氧树脂与桩身表面相平,安装过程中检测每个 FBG 应变传感器的波长,确保安装过程中传感器的存活率。FBG 压力传感器置于桩顶与液压千斤顶之间,安装位置应位于桩顶中心处,用于监测模型桩贯入过程中压桩力的变化规律。模型桩管桩结构及传感器安装位置如图 7 所示。

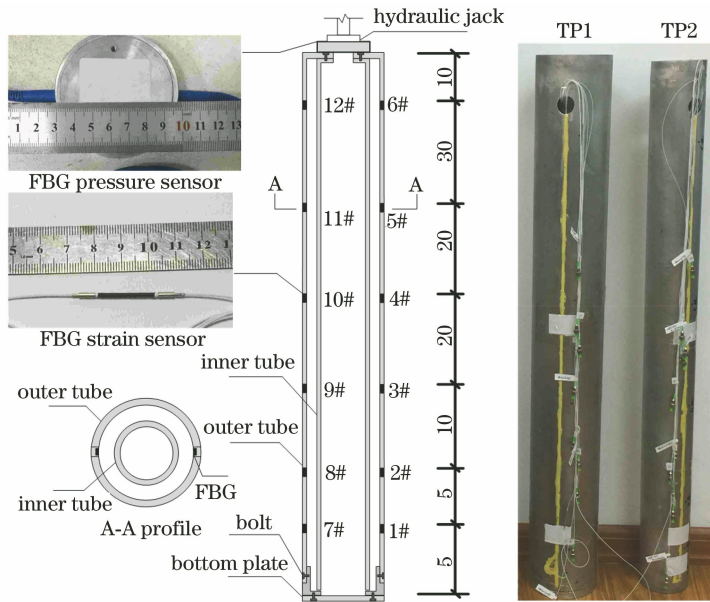


图 7 模型桩结构及传感器的安装位置示意图。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 7 Schematic of model pile structure and installation of sensors. (a) Schematic; (b) physical drawing

传感器安装完成后,将模型桩与土体的贯入点对位,用水平尺检测桩身的垂直度,确保桩身垂直贯入土体中。通过电控系统控制液压千斤顶移动对位、压桩入土,模型桩的贯入速度控制为 300 mm/min。试

验所用 FBG 应变传感器与 FBG 压力传感器均基于光纤光栅传感技术,两种传感器的波长变化均通过 FS 2200RM 型光纤光栅解调仪采集,解调仪的基本参数如表 2 所示。测试系统如图 8 所示。

表 2 光纤光栅解调仪参数

Table 2 Parameters of FBG demodulator

Sampling frequency /Hz	Dynamic range /nm	Range /nm	Accuracy /nm	Resolution /pm
1	±3	1500–1600	±2	1

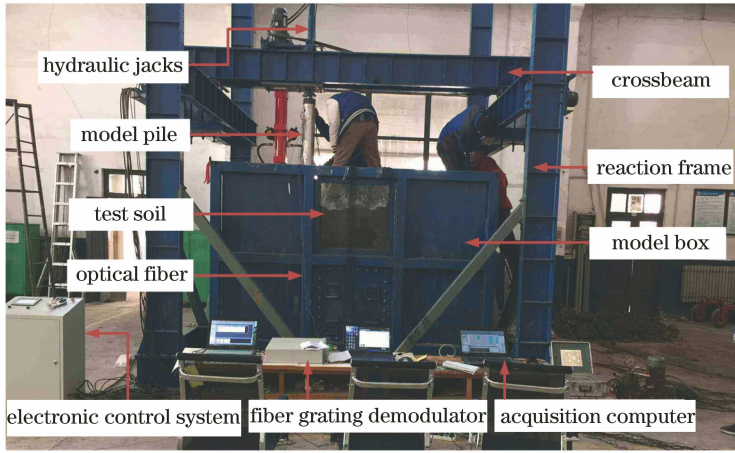


图 8 传感实验测试系统
Fig. 8 Test system of sensor experiment

4 测试结果与分析

4.1 测试数据的验证与分析

由于 FBG 应变传感器 1#、7# 距桩端 5 cm, 在模型桩贯入深度小于 5 cm 时, 传感器 1#、7# 还未进入土体, 此时模型桩所受压桩力与传感器 1#、7# 测得的桩端阻力应相等, 故可通过对比此深度范围内的压桩力与端阻力间的关系, 对数据的可靠性及传感器安装方法的可行性进行验证。如图 9 所示, 虚直线为 5 cm 深度线, 在贯入深度小于 5 cm 时, TP1、TP2 的压桩力与端阻力曲线均具有较好的一致性。为进一步对两种传感器的测试数据进行验证, 取 TP1、TP2 贯入深度为 0~10 cm 时的压桩力和端阻力进行对比, 得到两者的差值随深度的变化规律, 如图 10、图 11 所示。

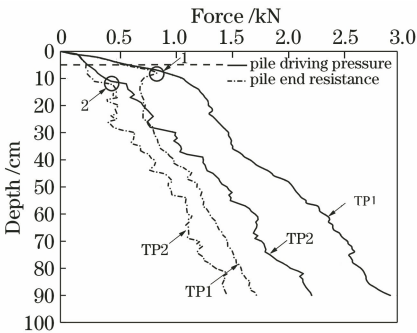


图 9 压桩力和端阻力的变化曲线
Fig. 9 Variation curves of pile driving force and pile end resistance

图 10 中, 虚线为临近桩端的 FBG 应变传感器 1#、7# 贯入土体时的深度线, 在虚线左侧即传感器 1#、7# 未贯入土体。贯入深度在 1~4 cm 时, TP1 的压桩力与端阻力仅分别相差 0.005, 0.008, 0.008,

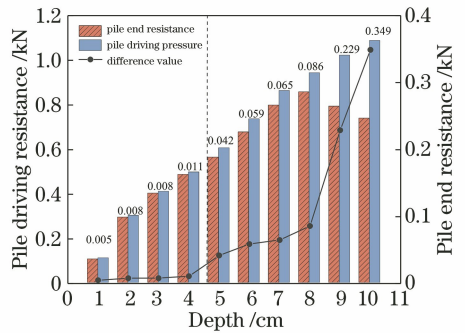


图 10 模型桩 TP1 的压桩力和端阻力对比图
Fig. 10 Driving pressure and end resistance of model pile TP1

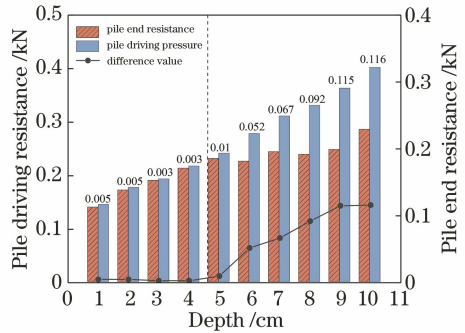


图 11 模型桩 TP2 压桩力和端阻力对比图
Fig. 11 Driving pressure and end resistance of model pile TP2
0.011 kN, 两者差值较小; 贯入至 5 cm 时, 传感器贯入土体, 差值突变为 0.042 kN, 随贯入深度的继续增加, 侧摩阻力逐渐发挥作用, 两者的差值迅速增大。图 11 中, TP2 的变化趋势与 TP1 基本一致, 在贯入深度为 1~4 cm 时, TP2 的压桩力与端阻力的差值仅为 0.005, 0.005, 0.003, 0.003 kN, 贯入至 5 cm 时变为 0.01 kN。结果说明两种传感器测得的数据比较可靠, 所用的传感器安装方法具有可行性。TP1、TP2 对应的最大误差分别为 11 N、5 N, 两者存在差

值可能是因为贯入过程中桩身并非完全垂直于土体,且涂覆环氧树脂对FBG应变传感器的灵敏度存在一定的影响。

4.2 端阻力和侧摩阻力分析

通过桩端的FBG压力传感器与桩身的FBG应变传感器,能够对模型桩贯入过程中的压桩力和沉桩阻力进行监测,进而得到桩端阻力、桩侧摩阻力、端阻比及侧阻比随贯入深度的变化规律,结果如图12和图13所示。

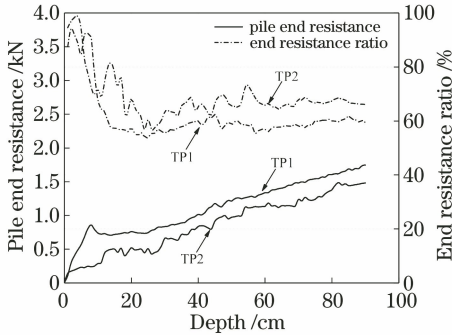


图12 端阻力和端阻比随贯入深度的变化曲线
Fig. 12 Relationship among pile end resistance, end resistance ratio, and penetration depth of pile body

图12为桩端阻力和端阻比随贯入深度的变化规律,可见模型桩TP1、TP2的桩端阻力均随贯入深度的增加而增大,在贯入初期TP1端阻力增长较快,后期两者的增长速率基本保持一致。在相同贯入深度下,桩端阻力随桩径的增加而增大,至沉桩结束时TP1比TP2桩端阻力大18.04%。在沉桩初期,模型桩TP1、TP2端阻比均随贯入深度的增加而快速减小,贯入至40cm后基本保持不变,至沉桩结束时TP1比TP2端阻比大6.67个百分点。说明随桩径的增加,桩端与土体的接触面积增大,所受端阻力及端阻比均有所增加。

图13为桩侧摩阻力和摩阻比随贯入深度的变

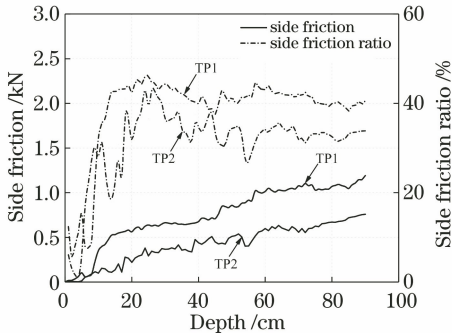


图13 侧摩阻力和侧阻比随贯入深度的变化曲线
Fig. 13 Relationship among side friction, side friction ratio, and penetration depth of pile body

化规律。由图12和图13可见:桩端阻力和桩侧摩阻力的发挥具有异步性,沉桩初期模型桩TP1、TP2的沉桩阻力以桩端阻力为主,侧摩阻力未充分发挥;随贯入深度的增加,TP1的侧摩阻力明显高于TP2的,至沉桩结束时TP1桩侧摩阻力比TP2的大57.33%,说明随着桩径的增加,桩身挤土效应逐渐发挥,桩身与桩周土体的接触面积更大且接触更为紧密,侧摩阻力较大。与桩端阻力相比,桩径的变化对桩侧摩阻力的影响更为显著,模型桩TP1、TP2均呈现摩擦端承桩的承载特性。

4.3 轴力、单位侧摩阻力分析

图14和图15分别为模型桩TP1、TP2贯入过程中桩身轴力随贯入深度的变化曲线。由图14和图15可见,模型桩TP1、TP2的桩径虽然不同,但两桩轴力的分布及变化趋势相似,在同一贯入深度下,桩身轴力随深度的增加而减小,TP1轴力减小现象更为明显。这是因为轴力的减小与桩身侧摩阻力的作用有关,TP1的桩径较大,在贯入过程中所受挤土效应更为显著,使轴力的传递能力较差,减幅明显高于TP2。在同一深度下,桩身轴力随贯入深度的增加而增加,且TP1的增幅明显大于TP2,经分析原因为TP1的桩径较大,贯入过程中所受侧摩阻力较大,导致TP1的轴力大于TP2。

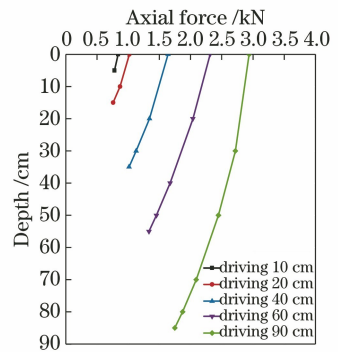


图14 模型桩TP1轴力变化曲线
Fig. 14 Axial force of model pile TP1

图16和图17分别为模型桩TP1、TP2贯入过程中单位侧摩阻力的变化曲线。由图16和图17可见,模型桩TP1、TP2的单位侧摩阻力的变化趋势相似,在同一贯入深度下,单位侧摩阻力随深度的增加而增大,且增大速率逐渐减小,与文献[32]研究结果一致。这是因为随着贯入深度的增加,模型桩与桩周土体接触更为紧密,所受到的单位侧摩阻力较高。在同一深度下,TP1、TP2的单位侧摩阻力均随模型桩贯入深度的增加而减小,单位侧摩阻力出现不同程度的“退化效应”,分析原因为对于同一深度的土

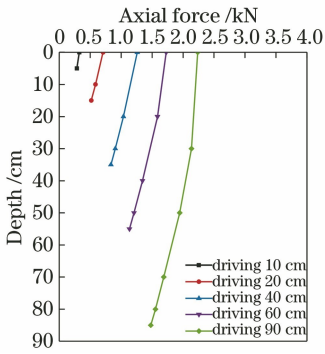


图 15 模型桩 TP2 轴力变化曲线

Fig. 15 Axial force of model pile TP2

层,在模型桩贯入过程中受到连续的剪切及扰动作用,导致水平应力释放与模型桩的单位侧摩阻力出现退化,且桩径越大模型桩对土体的剪切、扰动作用越大,所以 TP1 的退化现象更明显。

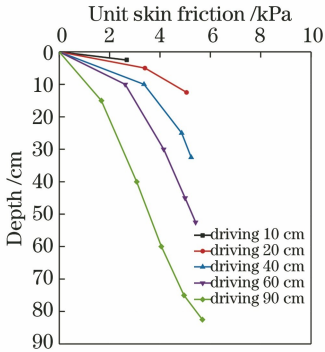


图 16 模型桩 TP1 单位侧摩阻力变化曲线

Fig. 16 Unit skin friction of model pile TP1

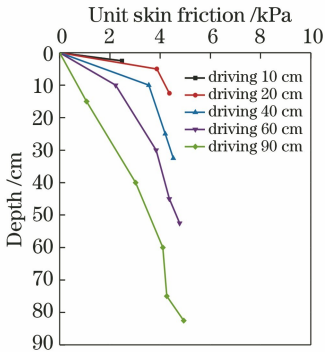


图 17 模型桩 TP2 单位侧摩阻力变化曲线

Fig. 17 Unit skin friction of model pile TP2

5 结 论

基于光纤光栅传感技术的应变传感器和压力传感器具有较高的线性度及灵敏度,能够较好地满足不同桩径模型桩静压贯入特性的测试要求,能够对模型桩贯入特性进行动态且精准的监测,测得了不同桩径模型桩贯入过程中压桩力及桩身受力的变化

规律。经验证:FBG 压力传感器、FBG 应变传感器的监测数据具有较高的可靠性,传感器的安装方法具有可行性,模型桩 TP1、TP2 的最大测试误差仅为 11 N、5 N。在静压贯入过程中,模型桩所受沉桩阻力以桩端阻力为主,桩侧摩阻力与端阻力的发挥具有异步性,模型桩 TP1、TP2 呈现摩擦端承桩的承载特性。桩径的变化对侧摩阻力的影响较大,至沉桩结束时,模型桩 TP1 的侧摩阻力比 TP2 的大 57.33%,而桩端阻力仅大 18.04%,增大桩径能够明显提高桩身的承载能力。随贯入深度的增加,同一深处的桩身轴力呈现增长趋势,单位侧摩阻力出现不同程度的“退化效应”,且随桩径的增加,轴力增长与侧阻退化现象更为明显。

参 考 文 献

- [1] Zhang M Y. Research an application on jacked piles [M]. Beijing: China Building Material Industry Press, 2004.
张明义. 静压压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [2] Murthy D S, Robinson R G, Rajagopal K. Formation of soil plug in open-ended pipe piles in sandy soils[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2018: 1-11.
- [3] Basu P, Prezzi M, Salgado R, et al. Shaft resistance and setup factors for piles jacked in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(3): 04013026.
- [4] Shi F. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 95-99.
施峰. PHC 管桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 95-99.
- [5] Zhang Z M, Yu J, Zhang G X, et al. Contrastive experimental analysis of bearing behaviors of PHC pile and precast square piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3059-3065.
张忠苗, 喻君, 张广兴, 等. PHC 管桩和预制方桩受力性状试验对比分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3059-3065.
- [6] Shi Y Q, Zhao J B, Guo H. Study on internal force test technology of statically pressed pipe pile [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40 (1): 20-22.
史永强, 赵俭斌, 郭卉. 静压管桩内力测试技术研究 [J]. 工程勘察, 2012, 40(1): 20-22.
- [7] Liu Z H, Zheng J G, Yu Y T. Vertical bearing behaviors of PHC piles in collapsible loess [J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 111-114.
刘争宏, 郑建国, 于永堂. 湿陷性黄土场地 PHC 桩竖向承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 111-114.
- [8] Liu F, Zheng J G. Immersion tests on PHC piles in collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 362-366.
刘飞, 郑建国. 湿陷性黄土场地 PHC 桩浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 362-366.
- [9] Lehane B M, Gavin K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(6): 473-480.
- [10] Gavin K G, Lehane B M. The shaft capacity of pipe piles in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 36-45.
- [11] Zhou J, Deng Y B, Ye J Z, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 501-507.
周健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 501-507.
- [12] Ko J, Jeong S. Plugging effect of open-ended piles in sandy soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(5): 535-547.
- [13] Jeong S, Ko J, Won J, et al. Bearing capacity analysis of open-ended piles considering the degree of soil plugging[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 1001-1014.
- [14] Li Y N, Lehane B M, Liu Q B. Centrifuge modeling of jacked pile in clay [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(3): 285-292.
李雨浓, Barry M Lehane, 刘清秉. 黏土中静压沉桩离心模型[J]. 工程科学学报, 2018, 40(3): 285-292.
- [15] Tian S Z, Cao C C, Wang D P. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- [16] Li P, Wang L, Guo H Y, et al. Analysis on process of vortex-induced vibration of risers based on FBG sensing technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 240-248.
李朋, 王来, 郭海燕, 等. 基于 FBG 传感技术的立管涡激振动过程分析[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(2): 240-248.
- [17] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, et al. Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001.
张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206001.
- [18] Wei G Q, Shi B, Hu S, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571-576.
魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG 在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571-576.
- [19] Wang J, Liu B, Sui Q M, et al. Application of a novel fiber-optic grating seepage pressure sensor in tunnel water gushing model [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(10): 1286-1289.
王静, 刘斌, 隋青美, 等. 新型 FBG 渗压传感器在隧道涌水模型中的应用[J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(10): 1286-1289.
- [20] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [21] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- [22] Deng L, Cai C S. Applications of fiber optic sensors in civil engineering [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 25(5): 577-596.
- [23] Zhu Y Q, Zhu H H, Sun Y J, et al. Model experiment study of pipe pile driving into soil using FBG-BOTDA sensing monitoring technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 695-702.
朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. FBG-BOTDA 联合传感测管桩击入土层模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 695-702.
- [24] Cao H J, Si J H, Chen T, et al. Temperature and strain dual-parameter heterogeneous fiber Bragg grating sensor made by femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702009.
曹后俊, 司金海, 陈涛, 等. 飞秒激光制备异质光纤光栅的温度应变双参数传感器[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702009.
- [25] Markov A, Guo Y, Chang T Y, et al. Application of fiber Bragg gratings in the measurements of acoustic properties of ice [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1106001.
马科夫·阿列克谢, 郭耀, 常天英, 等. 光纤布拉格

- 光栅在冰声学性能测量中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1106001.
- [26] Li P, Wang L, Guo H Y, et al. Testing of vortex-induced vibrations of deep-sea risers based on FBG sensing technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4): 756-763, 814.
李朋, 王来, 郭海燕, 等. 基于 FBG 传感技术的深海立管涡激振动测试研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 756-763, 814.
- [27] Sun L, Liang D Z, Li H N. Monitoring of cracks in frame shear wall structure using fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2010, 30(5): 496-499.
孙丽, 梁德志, 李宏男. 用 FBG 传感器监测框架-剪力墙结构裂缝 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 496-499.
- [28] Wang J J, Jiang D S, Liang Y F, et al. A differential optical fiber grating pressure cell and the temperature characteristic [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(4): 389-391.
王俊杰, 姜德生, 梁宇飞, 等. 差动式光纤 Bragg 光栅土压计及其温度特性的研究 [J]. 光电子 • 激光, 2007, 18(4): 389-391.
- [29] Su Y L. Mechanics of materials [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001: 10-325.
苏翼林. 材料力学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2001: 10-325.
- [30] Xu Z L. Theory of elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 199-222.
徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 199-222.
- [31] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [32] Iskander M G, Olson R E. An experimental facility to model the behavior of steel pipe piles in sand [R]. New York: Offshore Technology Research Center, 1995.