

基于 FBG 传感技术的黏性土中静压沉桩阻力测试^{*}

王永洪^{1,2}, 张明义^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 刘俊伟^{1,2}, 苗德滋¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院 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 青岛, 266033)

摘要 为了探索光纤光栅(fiber Bragg grating, 简称 FBG)传感技术在黏性土中静压管桩沉桩阻力测试的适用性, 在均质黏性土中进行了模型管桩静力压入试验。数据测试采用增敏微型光纤光栅应变传感器和双模式光纤光栅土压力传感器, 基于 FBG 传感技术采集应变数据, 分析沉桩过程桩端阻力和桩侧阻力贯入特性。通过改变桩长、桩径及开口和闭口, 对比分析基于 FBG 传感技术的静压管桩的贯入过程差异。研究表明, FBG 传感技术对黏性土中静压沉桩阻力的测试性能优越, 能够准确体现静压管桩的贯入特性, 清晰反映桩端阻力和桩侧阻力随桩径、桩长及开口和闭口的变化过程, 这对静压管桩的模型试验与工程设计具有较大的参考价值。

关键词 光纤光栅传感技术; 黏性土; 模型管桩; 沉桩阻力; 测试分析

中图分类号 TH823; TH473

引言

静压沉桩阻力对于沉桩可能性评价和沉桩深度控制等问题具有重要的工程意义^[1-2]。国内外学者通过室内模型试验、离心机模型试验及现场试验对静压沉桩机理开展了一系列研究。周健等^[3]进行了砂土中静压桩沉桩过程力学特性的模型试验, 通过桩顶荷重传感器及桩身应变片, 测得了桩端阻力和桩侧摩阻力的变化规律。李雨浓等^[4]通过在桩身上布置微型应变片, 在多层软黏土层中埋设土压力盒, 研究了沉桩过程桩端阻力和桩侧摩阻力的变化规律及桩周土体应力分布特征。肖昭然等^[5]通过研制的室内模型装置研究了砂土中静压沉桩机理, 得到了静压沉桩过程围压和摩阻力的联系。曹兆虎等^[6]基于透明土、PIV 及图像测试技术, 进行了桩基贯入全过程研究, 得到了开口和闭口管桩的贯入特性。朱友群等^[7]等利用 FBG-布里渊散射光时域分析技术联合感测动态监测打入过程桩身应变, 分析了桩身裂缝、爆桩等质量病害。Nicola 等^[8]在砂土中进行了开口管桩沉桩离心模型试验, 研究了管桩贯入砂土中的力学性状。Lehane 等^[9-10]分别进行了干砂中开口管桩和固结砂土中闭口钢方桩的离心模型贯

入试验, 研究了干砂中不同桩周土体应力、桩径和壁厚沉桩力学特性, 同时分析了影响固结砂土中桩侧水平有效应力增大的因素。刘清秉等^[11]通过离心模型试验对不同密实度的砂土进行研究, 得到不同颗粒形状对闭口静压桩端阻力的影响。李雨浓等^[12-13]进行了高岭黏土中静压沉桩离心模型试验, 通过模型桩头荷重传感器和桩底端阻力测试元件, 测试了贯入过程中的沉桩阻力和桩端阻力。张明义等^[14]在现场足尺静压桩桩底安装自制传感器、桩顶同步读取压桩力进行试验, 以分离桩侧总摩阻力和桩端阻力。寇海磊等^[15]通过高强预应力混凝土管桩桩身刻槽埋入 FBG 传感器, 分离了沉桩过程的桩端阻力和桩侧摩阻力。胡永强等^[16]对模型桩进行了现场静力压入及载荷试验, 研究了穿过不同土层时桩端阻力和桩侧阻力的变化机理, 得到了利用终压桩侧摩擦情况来判断承载力时效性的结论。可以看出, 多数文献仅针对砂土地基中静压桩连续贯入特性进行研究, 且采用传统的电测类传感器进行测试。静力沉桩是一个稳态贯入过程, 在此过程中桩尖和桩周土体应力状态不断变化。进行模型试验时, 传统的测试传感器会造成较大误差, 使测量值与实际值相差较大, 如何在测试过程中克服土颗粒运动对桩端和桩身产生的扰动至关重要。光纤光栅传

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41502304, 41772318, 51778312); 山东省重点研发计划资助项目(2017GSF20107, 2018GSF117010); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EPP06)

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-05-09

传感器体积小,质量轻,电磁干扰能力强,在一根光纤中可以写入多个光栅^[17-18]。国内关于光纤光栅传感技术已应用在很多工程结构中^[19-21],针对黏性土地基的室内模型试验,在开口模型管桩外管和内管同时安装微型光纤光栅传感器,进行不同桩端形式、不同桩径和不同桩长静压沉桩的测试鲜有报道。

笔者采用增敏微型光纤光栅应变传感器和双模式光纤光栅土压力传感器,自行研制双壁开口模型管桩,并在模型管桩外管和内管同时安装增敏微型光纤光栅应变传感器,成功分离桩内侧摩阻力和桩外侧摩阻力,对桩身顶部和底部应变进行直接测量。双模式光纤光栅土压力传感器安装在桩端,对桩端阻力进行直接测量,对比分析基于两种光纤光栅传感器的桩端连续贯入过程差异。通过对光纤光栅应变和压力数据的采集,分析了不同桩径、不同桩长及开口与闭口的桩端阻力和桩侧阻力特性,研究了黏性土中静压沉桩阻力的变化规律。

1 FBG 传感器原理及沉桩阻力测试理论

1.1 FBG 应变传感器基本原理

笔者选用的测试元件为增敏微型 FBG 应变传感器,由光纤光栅、夹持套管和夹持支座 3 部分组成,传感器工作原理结构图如图 1 所示。设两夹持支座之间的距离为 L ,两端夹持套管内侧之间的距离为 L_f ,夹持支座到夹持套管内侧的距离为 L_s 。传感器实物如图 2 所示。

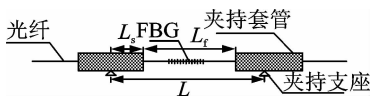


图 1 传感器工作原理结构图

Fig. 1 Working principle structure of sensors

假设光纤和夹持套管内黏结剂不发生变形,两夹持支座之间发生轴向变形 ΔL ,夹持套管的变形为 ΔL_s ,光纤光栅变形为 ΔL_f ,由材料力学基本原理可得

$$\Delta L_s = \frac{P_s L_s}{E_s A_s} \quad (1)$$

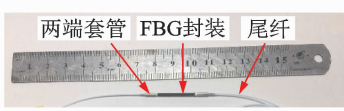


图 2 增敏微型 FBG 应变传感器

Fig. 2 The picture of miniature FBG strain sensors with enhanced sensitivity

$$\Delta L_f = \frac{P_f L_f}{E_f A_f} \quad (2)$$

其中: A_s 为夹持套管的截面积; A_f 为光纤光栅的横截面积; E_s 夹持套管的弹性模量; E_f 为光纤光栅的弹性模量; P 为传感器产生的内力。

由于传感器产生的内力均匀分布,由式(1),(2)可得

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_f} = \frac{\frac{\Delta L_s}{L_s}}{\frac{\Delta L_f}{L_f}} = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (3)$$

将相应的参数 $E_f = 7.2 \times 10^{10}$ Pa, $E_s = 210 \times 10^9$ Pa, $d_f = 0.125$ mm, $d_s = 0.8$ mm 代入式(3)可得

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_f} = 0.0084 \quad (4)$$

由式(4)可知, ΔL_s 可以忽略不计, ΔL 全部由光纤光栅产生。因此传感器应变与光纤光栅应变关系^[15]为

$$\epsilon = \frac{L_f}{L} \epsilon_f \quad (5)$$

令 $K = \frac{L_f}{L}$, 当 $K > 1$ 时,传感器减敏;当 $K < 1$ 时,传感器增敏。由于传感器光纤纤芯的中心波长处于 1 550 nm 波段时, $K_\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 则式(5)可表示为

$$\epsilon = K \epsilon_f = \frac{K \Delta \lambda_{\text{FBG}}}{1.2} \quad (6)$$

1.2 双模式 FBG 土压力传感器基本原理

双模式 FBG 土压力传感器既可以实现温度自补偿,又可以避免测量时受土质和土压力分布不均的影响。双模式 FBG 土压力传感器受到土压力作用后,一次膜片首先产生挠度变化,使得液压油受到挤压,从而引起二次膜片产生挠度变化,最后使光纤光栅发生波长移位,从而可以得到光纤光栅均匀轴向应变,如式(7)所示

$$\epsilon = \frac{\left[\lambda - \lambda_0 - (\lambda_t - \lambda'_t) \frac{1}{a} b \right]}{K} \quad (7)$$

其中: λ 为土压测量光栅测量波长; λ_0 为土压测量光栅初始波长; λ_t 为温度补偿光栅测量波长; λ'_t 为温度补偿光栅初始波长; a 为温度补偿光栅温度灵敏度系数; b 为土压测量光栅温度灵敏度系数; K 为土压测量光栅位移灵敏度系数。

1.3 沉桩阻力测试理论

静压沉桩过程中,桩侧阻力需用柱孔扩张理论

解答;桩端阻力需用桩端球孔扩张理论解答,且桩端用球孔扩张更加贴切^[2]。根据静压沉桩机理,沉桩阻力 R 由桩端阻力 Q_s 和桩侧阻力 F_s 两部分组成,即

$$R = Q_s + F_s \quad (8)$$

2 试验装置

试验对象为开口模型管桩和闭口试验管桩,其中开口模型管桩为双壁,外径为 140 mm,内径为 120 mm。为了达到试验目的,闭口模型管桩根据不同桩径、不同桩长设计了如表 1 所示的模型管桩参数。圆管均选用铝质材料,厚度为 3 mm。试验装置由 8 通道 FS2200RM 光纤光栅解调仪、开口双壁模型管桩 TP₁、闭口模型管桩 TP₂, TP₃ 和 TP₄ 组成。

表 1 模型管桩参数表

Tab. 1 Model pipe pile parameter table

试桩编号	外径/mm	内径/mm	桩长/mm	桩端形式
TP ₁	140	80	1 000	开口
TP ₂	140	—	1 000	闭口
TP ₃	140	—	1 200	闭口
TP ₄	100	—	1 000	闭口

开口双壁模型管桩 TP₁ 的制作:开口模型管桩通过内六角螺栓与管桩桩端相连;因开口桩端处内管与底座之间有微小缝隙,为防止沉桩过程中进入黏土影响测试效果,使用密封胶进行填充密封。开口双壁模型管桩的结构示意图如图 3 所示。光纤光栅应变传感器安装如图 4 所示。试验主要分为以下 3 步:a. 制备土样:试验所用土样取自青岛某住宅工程现场粉质黏土层,根据《土工试验方法标准》^[22] 对土样进行重塑并静置后进行压桩试验; b. 传感器安

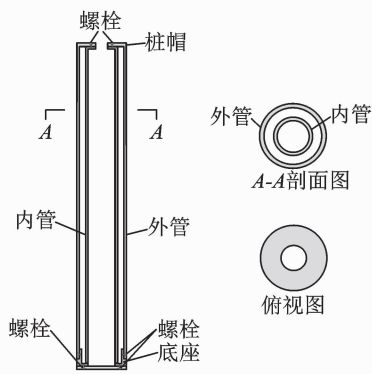


图 3 开口双壁模型管桩结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of open double-wall model pipe pile structure

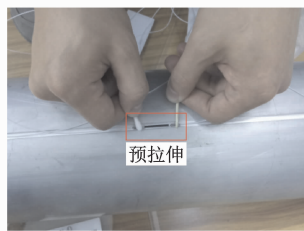


图 4 FBG 应变传感器安装

Fig. 4 Installation of FBG strain sensor

装:传感器安装过程连接光纤光栅解调仪,时时测试每个传感器的波长;c. 静力沉桩:静力沉桩试验装置包括数据采集系统、加载系统和模型箱系统。整个沉桩过程分两次完成,中间一次停顿以增加千斤顶的下落高度,沉桩速度约为 300 mm/min。静力沉桩过程如图 5 所示。



图 5 静力沉桩过程

Fig. 5 Static pile sinking process

3 试验数据分析

为了研究黏性土中静压沉桩阻力受桩径、桩长、开口和闭口的影响,变动其中一项参数,其余参数固定不变,分析沉桩阻力的变化规律。通过增敏微型 FBG 应变传感器和双模式 FBG 土压力传感器应变变化分别得到沉桩过程桩侧阻力和桩端阻力变化。

图 6 为桩径不同时沉桩阻力的变化规律。可以看出,桩端阻力和桩侧阻力随桩径的增大而增加,与桩长相比,桩径对沉桩阻力的影响较大。此外,与桩端阻力相比,桩侧阻力变化较大。

图 7 为桩长不同时沉桩阻力的变化规律。可以看出,桩长对沉桩阻力影响不大,相同桩长范围内桩端阻力和桩侧阻力都相差不大。长桩沉桩深度由 90 cm 增加至 110 cm,桩端阻力由 1.812 kN 增加

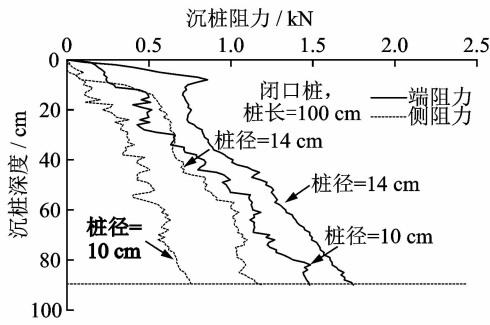


图 6 沉桩阻力随桩径变化规律

Fig. 6 Variation of pile-sinking resistance with various pile diameters

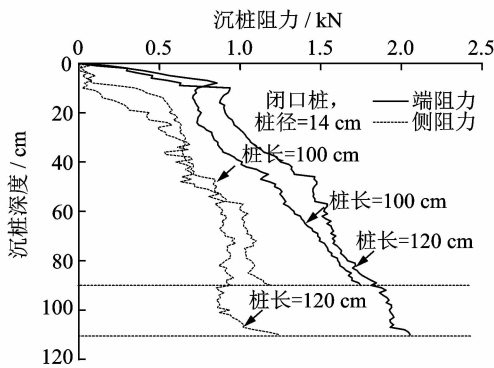


图 7 沉桩阻力随桩长变化规律

Fig. 7 Variation of pile-sinking resistance with various pile length

至 2.054 kN, 桩侧阻力由 0.939 kN 增加至 1.244 kN, 与短桩桩侧阻力 1.191 kN 相近。

图 8 为沉桩阻力与开、闭口的关系。可以看出, 沉桩阻力的大小与开、闭口有关, 闭口桩侧阻力明显大于开口桩侧阻力。

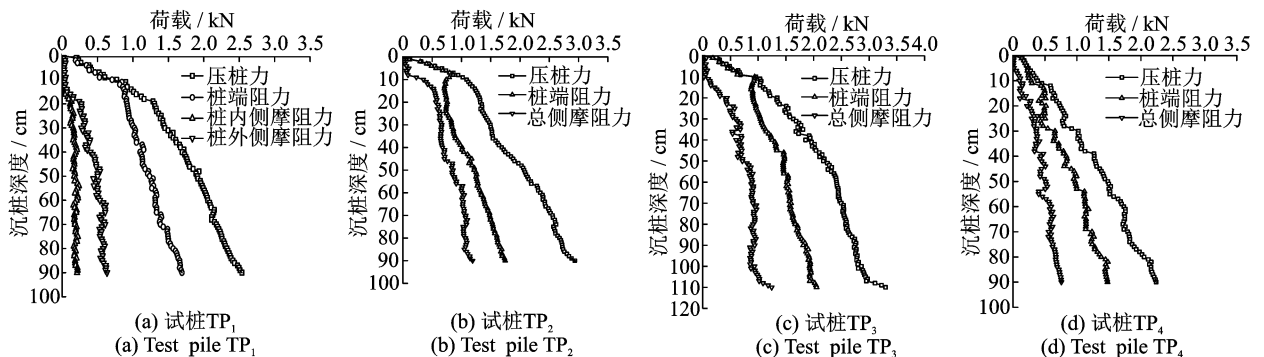


图 9 桩顶施加荷载与桩侧及桩端阻力之间的相互关系图

Fig. 9 The relationship between the applied load of pile top and pile tip resistance and pile shaft resistance

图 9 为桩顶施加荷载与桩侧及桩端阻力之间的相互关系图。可以看出, 试桩 TP₁ 桩内侧摩阻力、

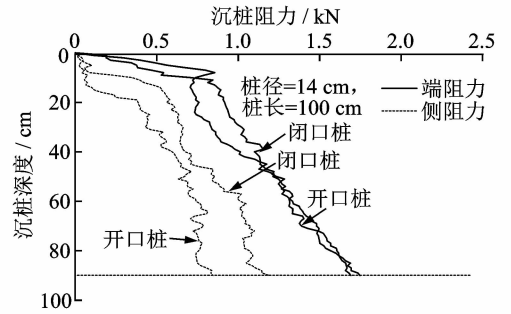


图 8 沉桩阻力受开、闭口影响

Fig. 8 Influence of pile-sinking resistance with open-ended and close-ended pile

桩外侧摩阻力及桩端阻力之和等于桩顶压桩力, 试桩 TP₂, TP₃ 和 TP₄ 总侧摩阻力与桩端阻力之和均等于桩顶压桩力, 说明了测试结果的有效性。

以上分析可以看出, 均质黏性土层静压沉桩阻力主要为桩端阻力, 桩侧摩阻力占比较小, 见表 2。同时, 桩径和开、闭口对均质黏性土层沉桩阻力有较大影响, 但桩长对沉桩阻力影响较小。

表 2 沉桩结束时桩端阻力、桩侧阻力占沉桩阻力的百分比
Tab. 2 Percentage of pile end resistance and pile side resistance at the end of pile sinking

试桩编号	沉桩阻力/kN	桩端阻力/kN	桩端阻力百分比/%	桩侧摩阻力/kN	桩侧摩阻力百分比/%
TP ₁	2.538	1.692	66.7	0.846	33.3
TP ₂	3.298	2.054	62.3	1.244	37.7
TP ₃	2.938	1.747	59.5	1.191	40.5
TP ₄	2.238	1.480	66.2	0.757	33.8

图10为模型桩沉桩阻力与沉桩深度的关系曲线。可以看出,对于桩径和桩长均相等的开口桩 TP_1 和闭口桩 TP_3 ,沉桩阻力在开始阶段上升较快,但是当沉桩深度约20 cm时,此时 TP_1 和 TP_3 沉桩阻力相等,沉桩阻力出现拐点,随后沉桩阻力增加缓慢,当沉桩深度约40 cm时,开口桩 TP_1 沉桩阻力开始小于闭口桩 TP_3 , TP_3 沉桩阻力开始比 TP_1 增加速率快,当贯入量为90 cm时, TP_3 沉桩阻力比 TP_1 增大了15.8%,这与开、闭口桩贯入过程作用机理是吻合的。桩径越大的闭口桩沉桩阻力增加速率越快,对于桩长相等的 TP_3 和 TP_4 ,当贯入量为90 cm时, TP_3 沉桩阻力比 TP_4 增大了31.3%。对于桩径相等的 TP_2 和 TP_3 ,当贯入量为0~90 cm时,两桩沉桩阻力基本相等,当贯入量为110 cm时, TP_2 沉桩阻力比 TP_3 贯入量为90 cm时增大了12.3%。分析采用闭口桩、增大桩径和增大桩长均能增加桩身承载力,增大桩径使桩身承载力增幅最大,闭口桩比开口桩增幅次之,增加桩长的增加幅度最小。

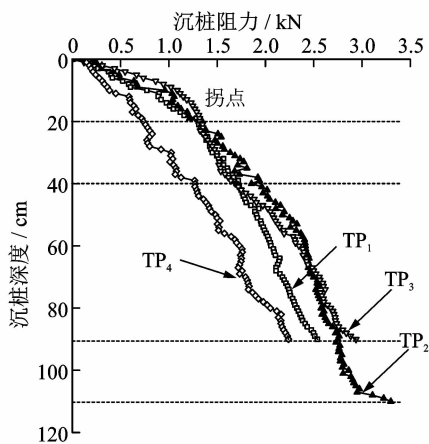


图10 沉桩阻力曲线对比

Fig. 10 Comparison between resistance curves of pile penetration

4 结论

1) FBG传感技术能够很好地满足黏性土中静压管桩沉桩阻力的测试要求,清晰反映出桩端阻力和桩侧阻力在不同桩径、桩长及开口和闭口下的变化规律。

2) 均质黏性土地层静压沉桩阻力主要为桩端阻力,沉桩过程中桩侧阻力较小。桩径和开、闭口对均质黏性土地层沉桩阻力有较大影响,桩长对沉桩阻力影响较小。

3) 采用闭口桩、增大桩径和增大桩长均能增加桩身承载力,增大桩径使桩身承载力增幅最大,闭口

桩比开口桩增幅次之,增加桩长的增加幅度最小。

参 考 文 献

- [1] 杨庆光, 刘杰, 何杰, 等. 楔形与等截面静压沉桩贯入阻力对比研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 32(5): 897-901.
Yang Qingguang, Liu Jie, He Jie, et al. Comparative research on penetration resistance of jacked tapered piles and uniform section piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 32(5): 897-901. (in Chinese)
- [2] 李镜培, 李林, 孙德安, 等. 饱和软土地层静压沉桩阻力理论研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1454-1461.
Li Jingpei, Li Lin, Sun Dean, et al. Theoretical study on sinking resistance of jacked piles in saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1454-1461. (in Chinese)
- [3] 周健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压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.
Zhou Jian, Deng Yibing, Ye Jianzhong, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 501-507. (in Chinese)
- [4] 李雨浓, 李镜培, 赵仲芳, 等. 层状地基静压桩贯入过程机理试验[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40(6): 1409-1414.
Li Yunong, Li Jingpei, Zhao Zhongfang, et al. Model test research on penetration of jacked pile in layered soil[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(6): 1409-1414. (in Chinese)
- [5] 肖昭然, 刘轶. 静力沉桩的室内模型试验装置研发[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1695-1698.
Xiao Zhaoran, Liu Yi. Development of laboratory model test equipments for jacked piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1695-1698. (in Chinese)
- [6] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1564-1568.
Cao Zhaohu, Kong Gangqiang, Liu Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1564-1568. (in Chinese)
- [7] 朱友群, 朱鸿鹤, 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.
Zhu Youqun, Zhu Honghu, Sun Yijie, 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. (in Chinese)
- [8] Nicola A D, Randolph M F. Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3):295-318.
- [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] Lehane B M, White D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(4): 1039-1052.
- [11] 刘清秉, 项伟, Lehane B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 400-410.
Liu Qingbing, Xiang Wei, Lehane B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 400-410. (in Chinese)
- [12] 李雨浓, Lehane B M, 刘清秉. 黏土中静压沉桩离心模型[J]. *工程科学学报*, 2018(3):285-292.
Li Yunong, Lehane B M, Liu Qingbing. Centrifuge modeling of jacked pile in clay[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018(3): 285-292. (in Chinese)
- [13] 李雨浓, Lehane B M. 双层高岭黏土中沉桩特性模型试验[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2018, 48(6): 1778-1784.
Li Yunong, Lehane B M. Lateral stress for model jacked piles in two-layered kaolin clay[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2018, 48(6): 1778-1784. (in Chinese)
- [14] 张明义, 邓安福. 预制桩静力贯入层状地基的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(4): 490-492.
Zhang Mingyi, Deng Anfu. Experimental study on jacked precast piles in layered soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(4): 490-492. (in Chinese)
- [15] 寇海磊, 张明义. 基于桩身应力测试的静压PHC管桩贯入机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(5): 1295-1302.
Kou Hailei, Zhang Mingyi. Static pressure PHC pipe pile penetration mechanism based on pile stress test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(5): 1295-1302. (in Chinese)
- [16] 胡永强, 汤连生, 黎志中. 端承型静压沉桩贯入过程中桩侧阻力变化规律及其时效性试验研究[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2015, 54(1): 130-135.
Hu Yongqiang, Tang Liansheng, Li Zhizhong. Experimental study on variation and time effect of shaft resistance of jacked pile installation[J]. *Journal of Sun Yat-Sen University: Natural Science Edition*, 2015, 54(1): 130-135. (in Chinese)
- [17] 闫光, 辛璟涛, 陈昊, 等. 预紧封装光纤光栅温度传感器传感特性研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(5): 968-971.
Yan Guang, Xin Jingtao, Chen Hao, et al. Sensing properties of fiber grating temperature sensor package preload[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5): 968-971. (in Chinese)
- [18] 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.
Zhang Weihang, Jiang Junfeng, Wang Shuang, et al. Fiber-optic fabry-perot high-pressure sensor for marine applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0206001. (in Chinese)
- [19] 任亮, 夏梦颖, 姜涛, 等. 基于环向应变的燃气管道泄漏监测试验[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 36(5): 820-825.
Ren Liang, Xia Mengying, Jiang Tao, et al. Leakage detection of gas pipeline based on hoop strain monitoring[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 36(5): 820-825. (in Chinese)
- [20] 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, 36(11): 1106001.
Markov Alexey, Guo Yao, Chang Tianying, et al. Application of fiber bragg grating in the measurements of acoustic properties of ice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 36(11): 1106001. (in Chinese)
- [21] 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): 756-762.
Li Peng, Wang Lai, Guo Haiyan, 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): 756-762. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国行业标准编写组. GB/T 50123-1999. 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.



第一作者简介:王永洪,男,1984年11月生,博士、讲师。主要研究方向为地基基础及桩基础工程。曾发表《基于FBG传感技术的砂土中管桩土塞效应测试研究》《《振动、测试与诊断》2019年第39卷第1期》等论文。
E-mail: hong7986@163.com