

基于 FBG 传感技术的砂土中管桩土塞效应测试^{*}

王永洪^{1,2}, 刘俊伟^{1,2}, 朱娜¹, 赵国晓¹, 王明明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 为了探索光纤光栅传感技术在双壁开口管桩贯入过程中土塞效应的适用性, 采用增敏微型光纤光栅传感器, 在大尺寸模型试验箱中进行了静力压桩下双壁开口模型管桩的土塞效应测试。试验模型管桩高为 1 065 mm, 厚度为 20 mm, 模型材料选用铝管, 管桩贯入到密实状态的砂土中。沿内、外管对称布置 26 个光纤光栅测点, 通过改变桩靴形式, 采集贯入过程土塞高度和应变数据, 分析了不同桩靴形式下管桩的土塞高度、桩内和外侧摩阻力等贯入特性, 研究了静压作用下管桩的土塞效应。结果表明, 光纤光栅适用于双壁开口管桩的土塞效应测试要求, 能准确体现管桩的应变大小及桩内、外侧摩阻力等贯入特性。

关键词 光纤光栅传感器; 砂土; 管桩; 土塞效应; 测试分析

中图分类号 TH823; TU473

引 言

预制管桩已成为我国最主要的桩型之一, 使用范围覆盖了工业民用建筑、港口、铁路以及水利等工程建设各个领域^[1]。预制管桩施工前选择桩型和沉桩设备, 需要准确预估其沉桩阻力, 否则沉桩过程易造成预制管桩桩身被折断、接桩处断裂等现象^[2-3]。工程应用中, 预制管桩端部敞口形式居多, 管桩底部会有土体挤入形成土柱, 称之为“土塞效应”, 此为引起沉桩阻力重要组成部分。国外学者较早地研究了“土塞效应”。文献^[4-5]进行足尺模型试验, 揭示了土塞性状受土体性状影响、土塞侧阻土压力系数和土塞发挥高度的分布规律。Heerema 等^[6]提出土塞模型由弹簧和质点组成, 并将此命名为“桩中桩”, 桩-土之间有复杂的相互作用, 认为沉桩过程分析时应把桩节点与土节点的相互摩擦作用考虑进去。Paikowsky 等^[7]和 Brucy 等^[8]通过试验研究描述土塞形成的全过程: 沉桩初期桩体内土塞高度 L_p 与桩体贯入深度 L 相等, 贯入深度增加土体与开口管桩内壁摩擦增加, 土塞形成速度较桩体贯入速度减小, 土塞生成高度小于桩体贯入深度。Paik 等^[9]将开口管桩沉入不同砂土中, 研究不同土壤条件对开

口管桩荷载传递机理的影响, 测量出开口管桩承载力包含外侧摩阻力、桩端阻力和内侧摩阻力 3 个部分。Lehane 等^[10]和 Paik 等^[11]通过室内模型试验研究了土塞高度和土塞增量填充率随桩体打入深度的变化规律及开口管桩和闭口管桩在沉桩和静载试验过程中土塞的影响。国内学者对此也进行了研究。陆昭球等^[12]通过对大量的钢管桩试验数据采集分析, 土塞高度受表层土体性质的影响, 表层土体越硬, 土塞高度越小。郑俊杰等^[13]利用圆孔扩张理论得到了桩周土体应力场和位移场解析解, 分析了挤土效应和土塞效应。谢永健等^[14]分析了上海地区典型软土地基不同场地 44 根开口管桩土塞测量数据, 初始贯入时不同桩型桩体内土塞高度较为接近, 随着桩体打入深度的增加, 土塞高度增加缓慢。张忠苗等^[15]对不同土层条件下混凝土管桩的土塞效应进行试验研究, 现场试验和室内试验结果显示, 土层越坚硬, 土塞形成高度越大, 上软下硬土层易造成土塞滑动, 上硬下软土层易形成闭塞。刘润等^[16]提出研究大直径钢管桩土塞闭塞效应的拟静力平衡法, 通过室内小比例尺模型试验与实际工程中钢管桩土塞闭塞效应进行对比分析, 验证了静力平衡法对大直径钢管桩土塞效应判断的实用性。

^{*} 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(ZR2016EEP06)

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-05-25

对预制管桩进行土塞效应模型试验,分离其在贯入过程中“土塞阻力”,有助于加深对预制管桩土塞性状的认识。管桩贯入时桩侧及桩底内壁均与土体接触,模型试验尺寸小,土塞阻力小,对传感器的尺寸和灵敏性要求更高,电测类传感器无法满足测试要求,因此管桩模型的土塞效应测试难度很大。光纤光栅作为一种新的研究领域的传感技术,光纤光栅传感器易于光纤熔接,可以多个光栅同时写入,实现分布式传感,且具有体积小、精度高和抗电磁干扰能力强等优点^[17-19]。国内已将光纤光栅传感技术应用于各种实际工程中^[20-23],但在桩基工程特别是管桩的测试方面少有报道。笔者利用大尺度模型试验箱,采用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,简称 FBG)应变传感器,通过改变桩端形式,同时进行管桩开口和闭口对比试验,进行了静压双壁开口管桩的土塞效应测试试验。通过实时采集 FBG 应变传感器数据,分析了不同情况下管桩的土塞高度、桩内侧摩擦阻力和桩外侧单位摩擦阻力等特性,研究了静压双壁开口管桩的土塞效应规律。

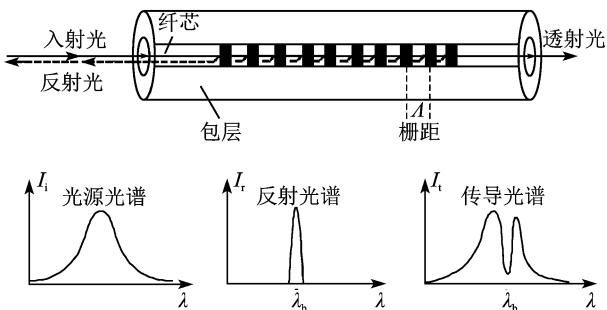
1 FBG 传感器原理及土塞效应测试理论

1.1 FBG 传感器原理

光纤光栅是利用折射率发生周期性变化的光栅,满足波长条件的光被反射回去,其余光穿过光栅,光纤光栅传感器工作原理如图 1 所示。图中纤芯的明暗交替表示折射率的周期性变化,波长反射条件^[24]为

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (1)$$

其中: λ_b 为光纤光栅中心波长; n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; Δ 为光栅周期。



I_s 为光源光谱; I_r 为反射光谱; I_t 为传导光谱;
 λ 为光纤光栅波长(nm); λ_b 为光纤光栅中心波长(nm)

图 1 光纤光栅传感器工作原理图

Fig. 1 The working schematic diagram of FBG sensors

室内试验温度变化不大可以忽略不计,因此不考虑外界温度变化时^[25]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \epsilon \quad (2)$$

其中: $\Delta\lambda$ 为光纤光栅波长变化; p_{11} 与 p_{12} 为光弹效应常数; ν 为泊松比; ϵ 为光纤轴向应变。

$$\text{令 } K_\epsilon = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \lambda, \text{ 可得}$$

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

其中: K_ϵ 为光纤光栅应变灵敏度系数。

本试验选用增敏微型 FBG 应变传感器,其两端带有夹持式支座,可以通过改变夹持支座之间距离 L 及夹持套管之间的光纤光栅距离 L_f ,调节传感器的灵敏度系数。增敏微型 FBG 应变传感器结构示意图如图 2 所示。增敏微型 FBG 应变传感器工作原理如图 3 所示。增敏微型 FBG 传感器技术参数如表 1 所示。

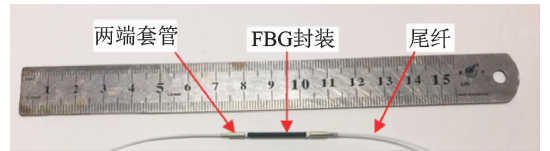


图 2 增敏微型 FBG 应变传感器结构示意图

Fig. 2 The structure schematic diagram of miniature FBG strain sensor with enhanced sensitivity

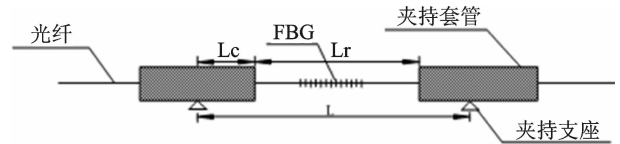


图 3 夹持式传感器工作原理

Fig. 3 Working principle of clamping sensor

表 1 增敏微型 FBG 传感器技术参数

Tab. 1 Technical parameters of miniature FBG sensor with enhanced sensitivity

3dB 带宽/ 典型值/nm	波长间 距/nm	波长范 围/nm	量程/ $\mu\epsilon$	标距/ mm	分辨率/ 分辨率/ $\mu\epsilon$
0.2	± 3	1 510~ 1 590	$\pm 1 500$	23	1

1.2 土塞效应测试理论

静压开口管桩沉桩阻力包括桩外侧摩阻力、桩内侧摩擦阻力和桩端阻力,静压闭口管桩沉桩阻力包括桩外侧摩擦阻力和桩端阻力。沉桩阻力会使管桩发生压缩,致使管桩桩壁产生竖向变形,竖向变形可通过测试得到,试验中采用 FBG 传感器测试沿桩长范

围内轴向应变变化,桩内、外侧摩阻力利用式(4), (5)计算出两截面上的桩身轴力差值,与两截面内桩周面积之比得到。桩身截面轴力^[15]为

$$N_i = E\epsilon_i A \quad (4)$$

其中: N_i 为第 i 截面轴力(kN); E 为桩身弹性模量(kPa); ϵ_i 为第 i 截面实测应变; A 为桩身面积(m^2)。

桩内、外侧摩阻力可根据桩身截面轴力求得

$$F_i = N_i - N_{i+1} \quad (5)$$

各相邻桩身截面的桩内、外侧平均摩阻力为

$$f_i = \frac{F_i}{Ul_i} \quad (6)$$

其中: F_i 为第 i 层桩内、外侧摩阻力(kPa); N_i, N_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 截面轴力(kN); f_i 为第 i 层桩内、外侧平均摩阻力(kPa); U 为桩身截面周长(m); l_i 为第 i 截面与第 $i+1$ 截面之间的距离(m)。

闭口桩端承载力为

$$q_p = \frac{N_n}{A_0} \quad (7)$$

其中: q_p 为桩端承载力(kPa); N_n 为桩端轴向力(kN); A_0 为桩端面积(mm^2)。

2 试验方案

2.1 试验设计

试验在大尺度模型箱中进行,模型箱长为 3km、宽为 3km、高为 2km,模型箱上面为加载系统,可实现前后、左右移动。为实现分离管桩外壁和管桩内壁的摩擦,研究土塞形成规律,试验选用双壁开口模型管桩,总长度为 1065 mm,双壁开口模型管桩由两个同心的内、外薄壁圆管组成,圆管选用铝质材料。试验采用青岛海砂(干砂),模型箱内砂样的相对密实度为 73%,处于密实状态。模型管桩内管、外管参数如表 2 所示。双壁开口模型管桩内、外管如图 4 所示。

表 2 模型管桩内管、外管参数

Tab. 2 Internal and external tube parameters of mode pipe pile

名称	长度/ mm	半径/ mm	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	泊松比
外管	1 000	67	3	72	0.3
内管	1 000	57	3	72	0.3

2.2 应变测试技术

本次试验沿外管和内管长度方向布置传感器,

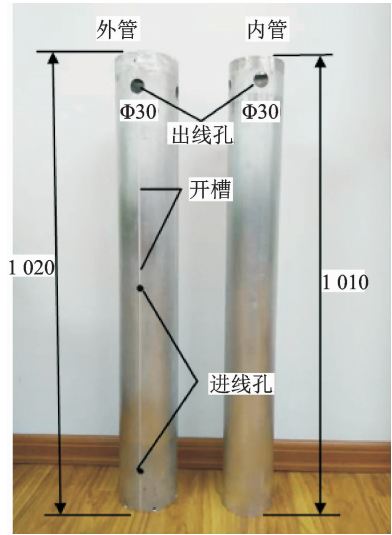


图 4 双壁开口模型管桩内、外管(单位:mm)

Fig. 4 Internal and external tube of double-walled open mode pipe pile(unit: mm)

为防止外管传感器在沉桩过程破坏,在外管表面两侧对称开槽,开槽宽度为 2 mm,深度为 2 mm。先将传感器一端夹持套管粘到槽体底部,另一端向外侧预拉伸 0.2~0.8 nm 后用胶固定,最后用环氧树脂封装。内管传感器对称粘贴到两侧管壁,并用 704 胶覆盖保护传感器。沿外管和内管全长各分别对称布置 12 个和 14 个传感器,外管传感器等间距布置,内管底部传感器间距减小。FBG 应变传感器布置图如图 5 所示。模型管桩传感器安装详图如图 6 所示。模型管桩上部开孔安装滑轮,滑轮上端连接 MPS 拉线位移传感器,用 MPS 拉线位移传感器实时记录桩体沉降和土塞生成高度,

传感器安装过程连接光纤光栅解调仪,实时测试每个传感器的波长,光纤光栅解调仪选用 FS 2200RM-Rack-Mountable Bragg Meter 解调仪,其参数指标如表 3 所示。

表 3 光纤光栅解调仪参数指标

Tab. 3 Parameter index of FBG demodulator

采集频率/ ($t \cdot s^{-1}$)	动态范围/ nm	量程/ nm	精度/ pm	分辨率/ pm
1	±3	1 500~1 600	±2	1

3 试验结果分析

为了研究桩端形式对管桩土塞效应的影响,在其他因素相同时,采用 4 种不同形式桩靴:PO-1 试验桩为内 30 度桩靴、PO-2 试验桩为无桩靴、PO-3 试验桩为外 30 度桩靴、PC 试验桩为闭口平面桩靴。

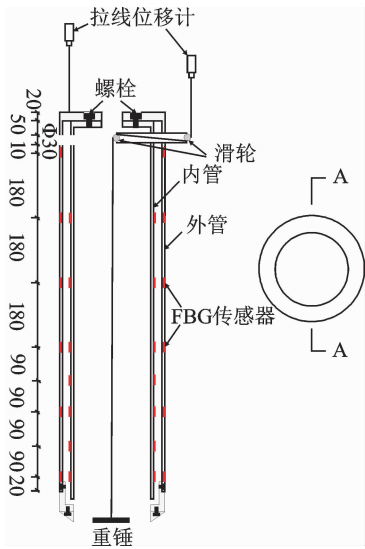


图 5 光纤光栅应变传感器布置图(单位: mm)

Fig. 5 Arrangement of FBG strain sensors (unit: mm)

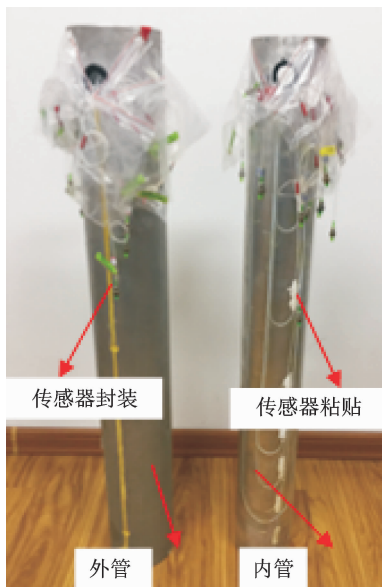


图 6 模型管桩传感器安装详图

Fig. 6 Sensor installation detailing of model pipe pile

3.1 土塞高度变化

土塞高度随贯入深度变化曲线如图 7 所示。其中:PO-1 试验桩土塞高度为 555 mm,PO-2 试验桩相比较 PO-1 试验桩土塞高度减小约 19.9 mm, PO-3 试验桩相比较 PO-2 试验桩土塞高度减小约 20.9 mm,PC 试验桩无土塞高度形成。可见,桩靴形式对管桩土塞高度有显著影响。土塞高度与沉桩深度之比为土塞率,3 种不同桩靴形式土塞率分别为 0.77,0.75,0.72,内 30°桩靴土塞率最大,外 30°桩靴土塞率最小,无桩靴土塞率居中。

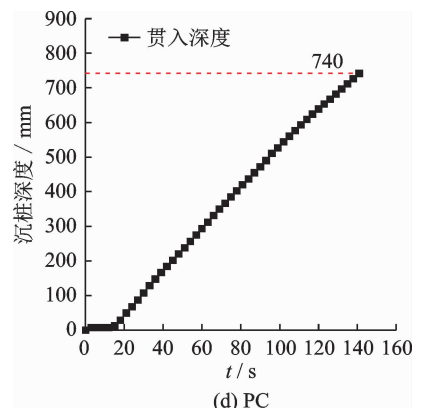
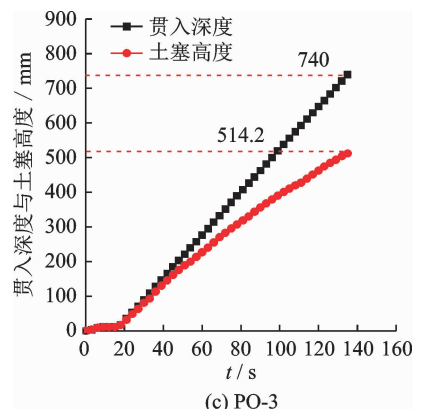
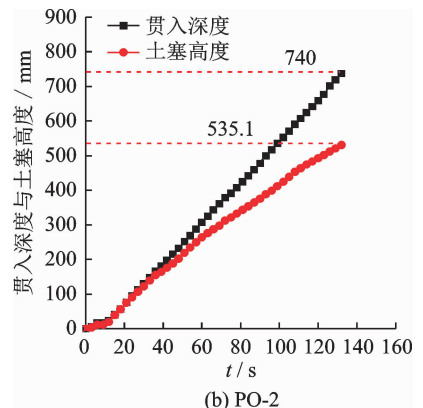
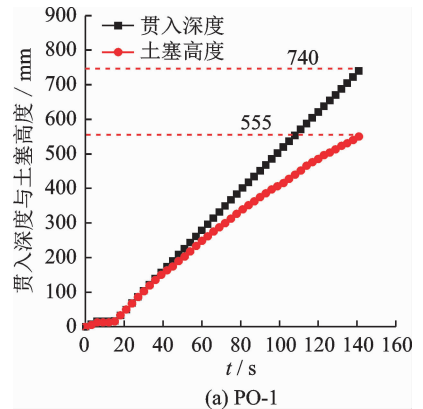


图 7 土塞高度随贯入深度变化曲线

Fig. 7 Curves of plugging height with the sink pile depth

3.2 桩内、外侧摩阻力测试

通过光纤光栅应变变化得到沉桩过程桩外侧摩阻力和桩内侧摩阻力变化。PO-1 试验桩、PO-2 试验桩、PO-3 试验桩内、外侧单位摩阻力沿深度分布曲线如图 8~10 所示。PC 试验桩外侧单位摩阻力

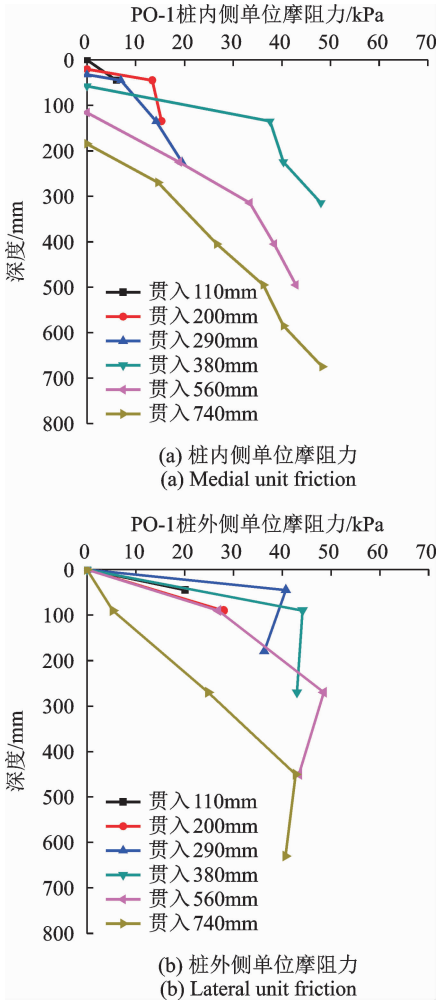


图 8 PO-1 试验桩内、外侧单位摩阻力桩身分布曲线
Fig. 8 Variation of internal and external unit friction of PO-1 test pile with depth

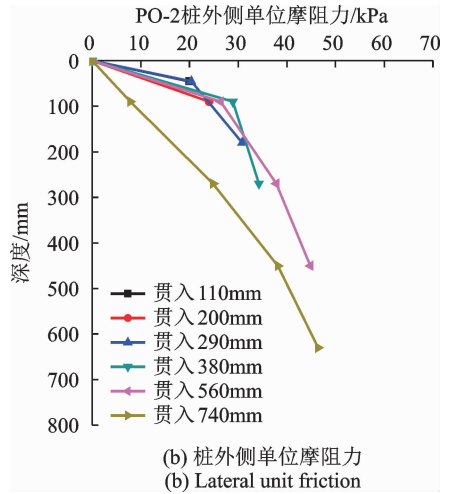
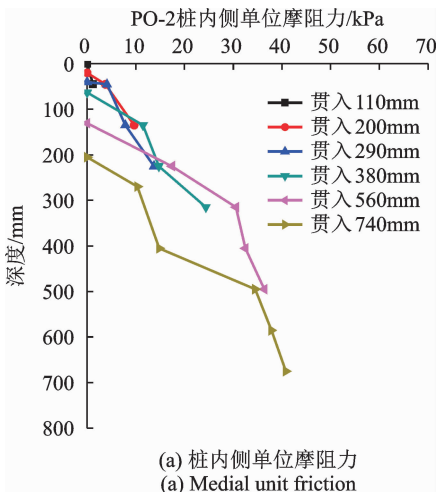


图 9 PO-2 试验桩内、外侧单位摩阻力桩身分布曲线
Fig. 9 Variation of internal and external unit friction of PO-2 test pile with depth

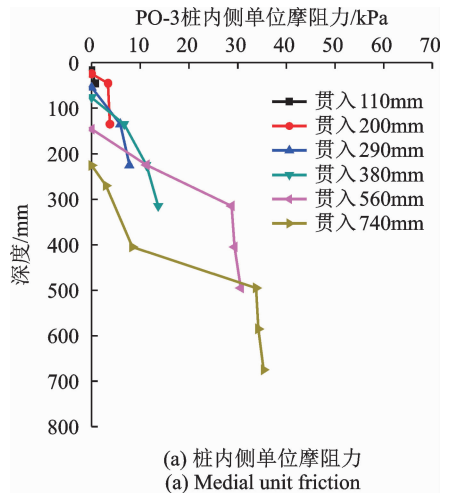


图 10 PO-3 试验桩内、外侧单位摩阻力桩身分布曲线
Fig. 10 Variation of internal and external unit friction of PO-3 test pile with depth

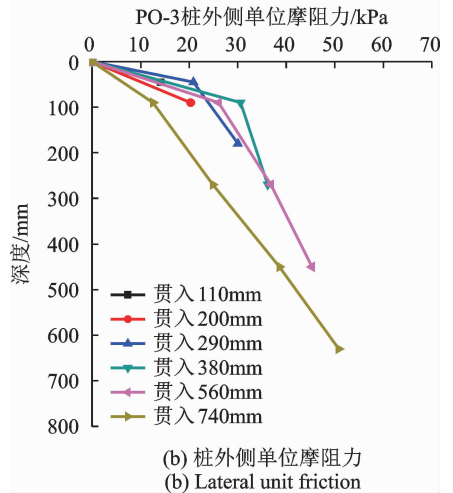


图 10 PO-3 试验桩内、外侧单位摩阻力桩身分布曲线
Fig. 10 Variation of internal and external unit friction of PO-3 test pile with depth

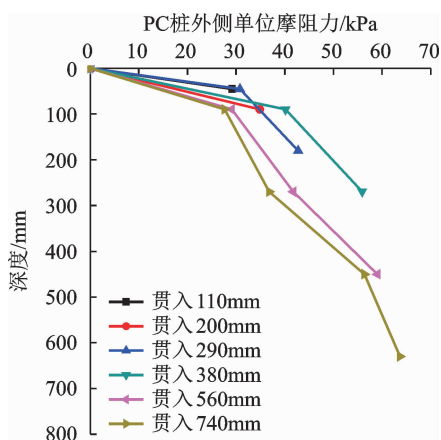


图 11 PC 试验桩桩外侧单位摩阻力沿深度分布曲线

Fig. 11 Variation of external unit friction of PC test pile with depth

沿深度分布曲线如图 11 所示。开口管桩沉桩过程中,一部分土体被管桩挤到周围产生挤土效应,随着桩身下管桩外壁与桩周土体相互剪切,形成剪切力,即桩外侧摩阻力;部分土体进入管内形成土塞,沉桩过程中土塞与桩体相互剪切,产生桩内侧摩阻力。由图 8~10 可知,在相同贯入深度下,试验桩由上至下桩内、外侧单位摩阻力呈增大趋势;贯入深度越大,桩内、外侧单位摩阻力也越大,随着沉桩深度的增加,桩内、外侧摩阻力逐渐发挥。由图 11 可知,因闭口管桩没有“土塞效应”,闭口管桩产生最大桩外侧单位摩阻力为 63.65kPa,显著大于开口管桩外侧单位摩阻力。沉桩深度较大时,随贯入深度的增加,相同土层桩内、外侧单位摩阻力出现弱化现象,可见大直径开口管桩内、外侧摩阻力同样存在“侧阻退化效应”。

4 结论

1) 桩靴影响土塞生成,PO-1,PO-2,PO-3 试验土塞的生成高度分别为 555,535.1 和 514 mm,内 30°桩靴向内部倾斜更易生成高度较大的土塞,外 30°桩靴向外部倾斜所生成的土塞高度最小。土塞高度和土塞增量填充率值随桩体贯入深度的增加而波动较大,但总体呈现降低的趋势,土塞趋于闭塞。

2) 沉桩结束时,桩体 PO-1,PO-2,PO-3 桩内侧摩阻力分别为 48.33,40.84 和 35.36 kPa,桩外侧摩阻力分别为 42.78,46.39 和 50.78 kPa,PC 桩外侧摩阻力为 63.65 kPa,可见桩靴对桩内、外侧摩阻力产生明显影响。

3) 相同贯入深度下,桩内、外侧摩阻力沿深度非均匀分布,深度越大,单位摩阻力越大;沉桩深度

较大时,随着桩体贯入深度的继续增加,相同土层单位侧摩阻力出现弱化现象。可见,大直径开口管桩内、外侧单位摩阻力存在“侧阻退化效应”。

参 考 文 献

- [1] 邢皓枫,赵红葳,叶观宝,等. PHC 管桩工程特性分析[J]. 岩土工程, 2009, 31(1): 36-39.
Xing Haofeng, Zhang Hongwei, Ye Guanbao, et al. Analysis of engineering characteristics of PHC pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 36-39. (in Chinese)
- [2] 张明义,于素健,周益众. 利用标贯击数估算静压桩的沉桩阻力[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 282-285.
Zhang Mingyi, Yu Sujian, Zhou Yizhong. Calculating jacking resistance of jacked pile by using beating counts of standard penetration test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 282-285. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Kishida H. The ultimate bearing capacity of open piles in sand[C]// Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Haifa, Israel: [s. n.], 1967: 25-28.
- [5] Kishida H, Isemoto N. Behaviour of sand plugs in open-end steel pipe piles[C]// Proceedings 9th International Conference Soil Mechanics. Tokyo: [s. n.], 1977: 601-604.
- [6] Heerema E P, Jong D A. An advanced wave equation computer program which simulates dynamic pile plugging through a coupled mass-spring system[M]// Numerical Methods in Offshore Piling. [S. l.]: Thomas Telford Publishing, 1980: 37-42.
- [7] Paikowsky S G, Whitman R V. The effects of plugging on pile performance and design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(4): 429-440.
- [8] Brucy F, Meunier J, Nauroy J F. Behavior of pile plug in sandy soils during and after driving[C]// Offshore Technology Conference. [S. l.]: Offshore Technology Conference, 1991.
- [9] Paik K H, Lee S R. Behavior of soil plugs in open-ended model piles driven into sands[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1993, 11(4): 353-373.
- [10] 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.
- [11] Paik K, Salgado R, Lee J, et al. Behavior of open-and closed-ended piles driven into sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 296-306.

- [12] 陆昭球,高倚山,宋铭栋. 关于开口钢管桩工作性状的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 114-117.
Lu Zhaoqiu, Gao Qishan, Song Mingdong. Some knowledge about working performance open-end steel pipe pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 114-117. (in Chinese)
- [13] 郑俊杰,聂重军,鲁燕儿. 基于土塞效应的柱形孔扩张问题解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 4004-4008.
Zhen Junjie, Nie Chongjun, Lu Yaner. Analytical solutions of cylindrical cavity expansion problems considering plugging effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4004-4008. (in Chinese)
- [14] 谢永健,王怀忠,朱合华. 软黏土中PHC管桩打入过程中土塞效应研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1671-1675.
Xie Yongjian, Wang Huaizhong, Zhu Hehua. Soil plugging effect of PHC pipe pile during driving into soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1671-1675. (in Chinese)
- [15] 张忠苗,刘俊伟,俞峰,等. 静压预应力混凝土管桩土塞效应试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2274-2280.
Zhang Zhongmiao, Liu Junwei, Yu Feng, et al. Research on plugging effect of jacked prestressed concrete pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2274-2280. (in Chinese)
- [16] 刘润,郭绍曾,周龙,等. 大直径钢管桩土塞效应的拟静力判断方法[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 20-27.
Liu Run, Guo Shaozeng, Zhou Long, et al. Quasi-static method to evaluate the soil plug effect on a large-diameter steel pipe pile[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 20-27. (in Chinese)
- [17] 王义平,唐剑,尹国路,等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 809-819.
Wang Yiping, Tang Jian, Yin Guolu, et al. The fabrication method and sensing application of fiber grating[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 809-819. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 孙诗惠,余有龙,李慧,等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505002.
Sun Shihui, Yu Youlong, Li Hui, et al. Detection technique of stress waves based on fiber bragg grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505002. (in Chinese)
- [21] 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, 2016, 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, 2016, 36(5): 820-825. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] 田石柱,张国庆,王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0805005. (in Chinese)
- [25] 朱友群,朱鸿鹄,孙义杰,等. FBG-BOTDA联合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)



第一作者简介:王永洪,男,1984年11月生,讲师、博士。主要研究方向为桩基础工程。曾发表《超孔隙水压力对低塑性黏性土桩-土界面抗剪强度的影响》(《岩土力学》2018年39卷第3期)等论文。

E-mail: hong7986@163.com

通信作者简介:刘俊伟,男,1983年2月生,博士、副教授。主要研究方向为桩基础工程及相关领域。

E-mail: zjuljw@126.com