

DOI: 10.11779/CJGE2019S2054

挤密效应对砂土中水平受荷桩承载特性的影响

胡 铠¹, 苏 栋^{*1, 2}, 余中良³, 黄俊杰¹, 庞小朝^{2, 4}

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060;
3. 碧桂园集团惠深区域, 广东 惠州 516347; 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518000)

摘要: 砂土中的挤土桩在实际工程中广泛应用, 部分挤土桩长期遭受风荷载、波浪荷载等水平循环荷载的作用, 而挤土桩对桩周土体的挤密效应会对桩身水平承载力产生较大影响。通过开、闭口桩的室内模型试验, 研究分析了砂土初始相对密度、桩径、长径比等因素对挤土桩单调和循环承载特性的影响。结果表明, 在不同密实度砂土中, 开口桩水平承载力总体上弱于闭口桩。桩径、长径比和土体相对密度都会对开口桩、闭口桩之间承载力的差值造成较大的影响。循环荷载作用下, 松砂中不同桩径和埋深的开口桩、闭口桩的水平承载力都随着加载周期的增加而增大, 而在中密砂中, 随着循环次数的增加, 循环加载后承载力增加的幅度较松砂中的减少, 甚至出现下降。

关键词: 单桩; 水平静力加载; 水平循环加载; 挤密效应

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0213-04

作者简介: 胡 铠(—), 男, 硕士研究生, 主要从事土与结构相互作用、岩土数值计算方法等方面的研究。E-mail: 635473986@qq.com。

Influences of compaction effect on bearing capacity of laterally loaded piles in sand

HU Kai¹, SU Dong^{1, 2}, YU Zhong-liang³, HUANG Jun-jie¹, PANG Xiao-chao^{2, 4}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Country Garden Co., Ltd., Huishen Regional, Huizhou 516347, China; 4. Shenzhen Research and Design Institute of China Academy of Railway Sciences, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Displacement piles are widely adopted in practical engineering. Some of the piles are used to resist the horizontal cyclic loadings induced by wind or wave. Based on the model tests conducted on open-end and closed-end piles, the effects of the initial relative density of sand, pile diameter and length-diameter ratio on the static and cyclic bearing capacities are investigated. The results indicate that the bearing capacity of the open-end piles is generally weaker than that of closed-end piles in both loose and medium-dense sands. Difference in the pile diameter, length-diameter ratio, and relative density of sand will result into significant difference in the bearing capacities of the open-end and closed-end piles. Under cyclic loading, the bearing capacity of the piles in loose sand always increases with the number of loading cycles. In the medium dense sand, the increment in the loading capacity as caused by the cyclic loading is smaller than that in the loose sand, and becomes negative in some cases.

Key words: single pile; horizontal static loading; horizontal cyclic loading; compaction effect

0 引言

预制桩在贯入土体后会引起周围土体变形, 使桩周土体密实, 桩身和桩端周围一定范围内的土体会发生不同程度的扰动和重塑, 进而对桩基承载力产生影响。Vesic^[1]在砂土中进行了压桩试验, 观察到了桩基端部阻力和侧部阻力的变化, 由此得出了桩基临界深度的变化; Lehanel 等^[2]在干砂中对开口管桩的沉桩过程进行了模型试验, 发现可以将管桩中土塞刚度表示为管桩的端阻力和其中土芯填充增量比的函数; Yasufuku

等^[3]在3种不同密实度的砂土中进行了管桩的贯入试验, 并以此得到了土体的压缩指数和桩的沉降比之间的关系。苏栋等^[4-5]通过小比尺模型试验, 分析了循环荷载的位移路径变化对桩基承载力的影响。王小龙等^[6]通过室内模型试验及PIV成像技术, 得出增大桩径在

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878416)

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者(E-mail: sudong@szu.edu.cn)

很大程度上能够提高桩的水平承载力和减小桩端水平位移。然而, 已有关于挤密效应的研究大多集中于对单桩的竖向承载力的影响。在某些实际工程中, 桩基需承受由风荷载、波浪荷载和地震荷载等引起的水平荷载的作用, 因此在设计时需考虑挤密效应对桩基水平承载特性的影响。本文采用室内模型试验, 较系统地研究和分析了砂土初始相对密度、桩径、长径比等因素对挤土桩水平单调和循环承载特性的影响规律。

1 试验条件

1.1 模型箱和加载设备

试验模型箱是直径为 500 mm, 高为 720 mm 的不锈钢圆桶, 加载设备为计算机控制的双轴运动平台, 如图 1 所示。可通过电脑中的编码程序, 可控制运动平台的滑块的运动, 从而实现对桩头的单向或循环加载。加载过程采用桩头位移控制, 速度为 0.1 mm/s。

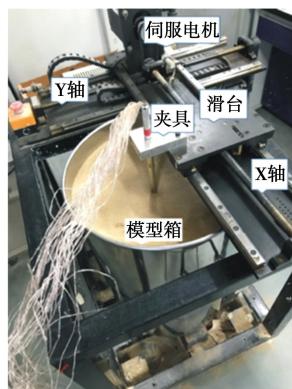


图 1 双轴运动平台及模型箱

Fig. 1 Biaxial motion platform and model box

1.2 土样制备

试验用砂为灌砂法专用砂, 其物理参数为 $D_{50}=0.34 \text{ mm}$, $C_u=1.59$, $e_{\max}=0.855$, $e_{\min}=0.541$ 。为了确保所制土样的均匀性以及制样过程的可重复性, 采用干落法制作土样, 分别制备了相对密度为 10% 的松砂和 55% 的中密砂土样。

1.3 模型桩

模型桩采用外径为 16 mm, 壁厚为 1 mm 以及外径为 30 mm, 壁厚为 2 mm 薄壁铝管制成, 桩身布置共有 18 组应变片 (X 方向 9 组, Y 方向 9 组), 沿桩身同一高度对称位置的两个应变片连成一组半桥线路。通过采用千斤顶静力压入的方法进行压桩。在加载试验前, 将桩头用固定夹具锁定在运动平台滑块上, 使桩头无法自由转动, 加载点距离砂土表面 180 mm。在试验过程中, 作用在桩头加载点的水平荷载通过布置在土层表面处桩身上的应变片所测得的弯矩反算得到。模型桩的具体尺寸及材料参数见表 1。为对比分

析挤密效应的影响, 两种桩径的模型桩都分别进行了开口桩和闭口桩的试验。

表 1 模型桩的基本参数

Table 1 Basic parameters of model pile

参数	铝合金型号	长度/mm	壁厚/mm	外径/mm	泊松比 ν_p	E_p /GPa
16 mm 桩	6061	880	1	16	0.33	72
30 mm 桩	6061	880	2	30	0.33	72

2 松砂中的试验结果及分析

分别在相对密度 $D_r=0.1$ 的松砂中进行了直径 D 为 16, 30 mm 的开口桩和闭口桩的单向水平静力加载和单向水平循环加载试验, 桩的埋深与桩径比 L/D 分别为 10, 15, 20, 加载位移幅值为桩径 D 的 50%。

图 2 为 16 mm 桩在埋深与桩径比 $L/D=10$ 时水平静力加载 (LK1 和 LB1) 及循环加载试验 (LK2 和 LB2) 的结果, 从中可以发现:

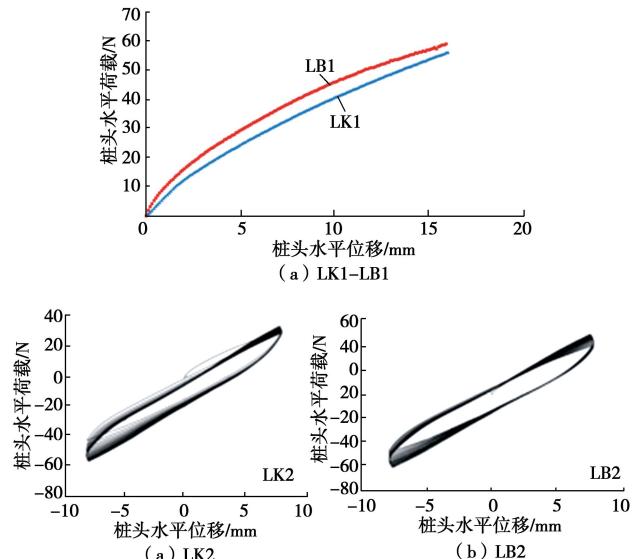


图 2 $L/D=10$ 时的荷载 - 位移关系曲线

Fig. 2 Force-displacement relationship of piles with L/D of 10

(1) 对于试验 LK1、LB1 水平静力加载, 桩头荷载随着位移增大呈非线性增大, 且这种非线性增大呈现一种减弱的趋势。相同位移时, 闭口桩 (LB1) 的受荷高于开口桩 (LK1), 随着桩头位移的不断增大, 闭口桩与开口桩之间的桩头荷载差值呈现先增大后减小的趋势。

(2) 对于松砂中的循环加载 (LK2 和 LB2), 随着加载周期的增大, 桩头水平荷载不断增大, 桩基荷载 - 位移曲线的滞回圈在 20 个周期左右基本稳定下来; 桩头水平承载力较水平静力加载都有所提高, 经过相同加载周期后, 开口桩桩头水平承载力提高比例小于闭口桩桩头荷载提高比例。

图 2 结果表明, 在松砂中相同位移时闭口桩的桩基水平承载力要大于开口桩, 这是由于闭口桩桩端闭合, 在贯入土体的过程中, 桩身周围以及桩端下部的土体受到桩身的挤压作用密实度得到提高。开口桩由于桩端敞开, 在桩体贯入土体的过程中桩端土涌入桩身内部形成土塞, 桩周土体的密实度小于闭口桩。因此在相同位移时, 闭口桩桩周土体可以提供更大的水平阻力。随着桩头位移的不断增大, 桩身对周围土体不断挤压, 使得两种桩型桩周土体相对密度都不断提高, 且随着位移的增大, 两者水平承载力的差值随着加载的进行而不断的缩小, 挤密效应的影响逐渐减小。

表 2 为挤密效应对不同埋深 16 mm 桩在 20 个循环周期时的水平承载力的影响情况。对于松砂中的 16 mm 桩, 在循环荷载作用下, 开口桩、闭口桩承载力都得到了较大提升。在相同位移幅值时, 随着埋深的增大, 当埋深与桩径比 L/D 由 10 增大到 15 时, 开口桩、闭口桩承载力提升比例都得到提高, 继续增大 L/D 至 20 时, 开口桩、闭口桩承载力提升比例较 $L/D=15$ 时略有降低。总体而言, 循环荷载对闭口桩承载力提升的比例略大于开口桩。

表 2 循环加载对 16 mm 桩水平承载力的影响

Table 2 Influences of cyclic loading on horizontal bearing capacity of 16 mm-pile

埋深与桩径比	开口桩/%	闭口桩/%
10	23.1	28.8
15	34.1	35.9
20	22.5	24.1

随着埋深的增大, 土塞对开口桩堵塞效应增加, 实测发现随着埋深的增大, PLR (土塞长度比) 值逐渐减小, 这一变化使得由于桩头形式不同引起的挤密效应差异进一步减小。另一方面, 由于埋深的增大, 桩端土体对桩身的嵌固作用也进一步增强, 因而使得循环加载对 $L/D=20$ 时桩身水平承载力的提升比例较 $L/D=15$ 时略有减小。

在循环荷载作用下, 桩周一定范围内的土体颗粒变密。随着桩基埋深的进一步增大, 在循环荷载作用下, 土体颗粒间的相互挤压范围逐渐向桩底扩大, 此时桩端土体对桩身的嵌固作用也进一步增强, 土体的致密化深度不再增加。在每次循环加载的卸载阶段, 桩身与土体间的空隙由上层塌落土颗粒填充, 桩基卸载残留位移就向加载方向移动一点, 桩-土体系抵抗水平变形的能力增强, 表现为循环荷载作用下桩基水平承载力较静力加载有所提升。

表 3 为不同埋深的 30 mm 直径开口桩、闭口桩水平加载试验桩头荷载变化情况, 可以看出随着桩身入土深度的增大, 循环荷载对 30 mm 直径闭口桩的水平承载力提高比例大于开口桩, 且闭口桩和开口桩之间

的差值大于 16 mm 桩。这是由于桩径越大, 闭口桩对桩周土体的挤密效应越显著。在循环荷载作用下, 随着桩径由 16 mm 增大到 30 mm, 从桩头荷载提升值来看, 桩径的增大对于闭口桩影响程度要大于开口桩, 这也印证了挤密效应对闭口桩的影响程度大于开口桩这一观点。对于两种不同桩径的开口桩和闭口桩, 随着埋深与桩径比进一步增大至 15 时, 循环荷载作用下其桩头承载力提升值也随着增大, 进一步增大至埋深与桩径比 $L/D=20$ 时, 桩头荷载提升值却较 $L/D=15$ 时有所降低。分析上述现象是由于在桩径与埋深比由 $L/D=10$ 增大至 $L/D=15$ 时, 桩基的挤密效应随着埋深的增大而显著增加, 进而使得桩周土体承载力得以提高, 而当埋深与桩径比增大至 $L/D=20$ 后, 由于此时埋深较大, 桩端土体对桩端嵌固作用较强, 使得桩身在循环荷载作用下位移小于埋深较小时, 土体在桩身不断的循环挤压下相对密度提升值小于埋深较小时, 从而导致桩头承载力提升值埋深较小时。

表 3 循环加载对 30 mm 桩水平承载力的影响

Table 3 Influences of cyclic loading on horizontal bearing capacity of 30 mm-pile

埋深与桩径比	开口桩/%	闭口桩/%
10	28.7	36.1
15	35.1	37.9
20	30.1	38.5

3 中密砂中的试验结果及分析

本文在相对密实度 $D_r=0.55$ 的中密砂中开展直径为 16, 30 mm 的单桩水平加载试验, 试验参数与松砂中的相同。

图 3 (a), (b) 分别为 16 mm 开口桩 (MK1)、闭口桩 (MB1) 在 $L/D=10$ 时的试验结果, 从中可以看出:

(1) 对于试验 MK1, 第 2 周期的桩头水平荷载较第 1 个周期略有降低, 随着周期数的增加, 开口桩桩头水平荷载较第 2 周期有所增大, 且趋于稳定后大于第 1 个周期的桩头水平荷载。而对于试验 MB1 (相同埋深下的闭口桩), 经过相同周期后, 桩头水平荷载较第 1 周期有所降低。无论是闭口桩还是开口桩, 其桩头水平荷载变化值都主要集中于前 3 个周期, 随后逐渐达到稳定。

(2) 对于开口桩, 桩头水平承载力提高的原因与开口桩在松砂中的机理类似; 对于相同埋深的闭口桩来说, 桩身贯入土体后, 土体初始相对密度已较之前显著增大, 因而此时随着循环荷载的进行, 桩身对桩周土体的扰动使得土体相对密度较初始相对密度反而有所降低, 进而体现为循环荷载作用下桩基水平承载力随周期数的增加而减少。

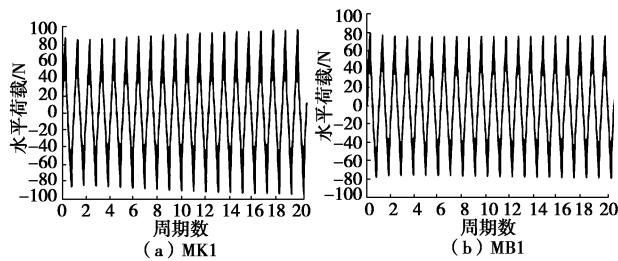
图 3 16 mm 桩 $L/D=10$ 时桩头荷载的变化Fig. 3 Variation of load at head of 16 mm-pile when $L/D=10$

表 4 为循环加载下中密砂中不同埋深与桩径比的 16 mm 桩在第 20 周期时的水平承载力与第 1 周期的增量百分比。除了 $L/D=10$ 的闭口桩外, 其余的桩基经过循环加载后, 承载力都得到了提升, 而且提升的幅度接近。

表 4 中密砂中循环加载对 16 mm 桩水平承载力的影响

Table 4 Influences of cyclic loading on horizontal bearing capacity of 16 mm-pile in medium dense sand

埋深与桩径比	开口桩/%	闭口桩/%
10	7.00	-5.7
15	7.50	7.9
20	7.07	7.2

表 5 为循环加载下中密砂中 30 mm 桩在不同 L/D 值时水平承载力变化情况。可以看出, 对于开口桩、闭口桩, 当 L/D 为 10 和 15 时, 循环加载都导致了承载力的降低, 而闭口桩降低的幅度更大, 这是由于闭桩在压桩过程中由于受挤密效应的影响, 桩周砂土更密实, 因此第一周期的承载力更高, 但循环加载导致桩周土体持续松动, 因而承载力逐步降低。当 L/D 增大至 20 后, 桩基水平承载力却较初始时有所提升, 与 L/D 为 10, 15 时有较大区别, 可能是桩基埋深的进一步增加, 在桩身贯入土体后对土体进一步的挤密使得桩端附近土体对桩端嵌固作用也进一步增强, 从而使得循环荷载作用下桩身对土体的扰动进一步减小, 因而在桩身位移较小的情况下, 桩身对于周围土体的小范围扰动仅局限于土体的弹性变形区, 使得此时桩身对土体的挤压提高了土体的相对密度, 挤密效应对于桩基承载力的影响使得桩基承载力得到了提升。

表 5 中密砂中循环加载对 30 mm 桩水平承载力的影响

Table 5 Influences of cyclic loading on horizontal bearing capacity of 30 mm-pile in medium dense sand

埋深与桩径比	开口桩/%	闭口桩/%
10	-9.3	-15.6
15	-5.3	-7.9
20	2.5	5.2

4 结 论

(1) 在不同密实度砂土中, 埋深且桩头位移幅值相同时, 开口桩的水平承载力总体上弱于闭口桩。

(2) 循环荷载作用下, 不同密实度砂土中, 桩径对桩基水平承载力的影响程度总体上大于埋深的影响程度。

(3) 桩径、长径比和土体相对密度都会对开口桩、闭口桩之间承载力的差值造成较大的影响。循环荷载作用下, 松砂中不同桩径和埋深的开口桩、闭口桩的水平承载力都随着加载周期的增加而增大, 而在中密砂中, 循环加载后闭口桩水平承载力随着循环次数的增加, 增大的幅度较松砂中的减少, 甚至会出现下降的现象。

参 考 文 献:

- [1] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972(3): 203 – 208.
- [2] LEHANEL 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.
- [3] YASUFUKU N. & HYDE A.F.L. Pile end-bearing capacity in crushable sands[J]. Géotechnique 1995, 45(4): 663.
- [4] 苏 栋. 水平(椭)圆形加载路径下的单桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 738 – 745. (SU Dong. Experimental study on a single pile under horizontal elliptical/circular loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 738 – 745. (in Chinese))
- [5] SU D, YAN W M. A multidirectional $p-y$ model for lateral sand–pile interactions[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(2): 199 – 214.
- [6] 王小龙, 刘益平, 龚维明, 等. 砂性土中钢管桩水平承载特性模型试验研究[M]// 第十三届全国桩基工程学术会议. 2017: 178 – 183. (WANG Xiao-long, LIU Yi-ping, GONG Wei-ming, et al. Small-scale model tests of lateral bearing capacity of steel pipe pile in sand[M]// Papers Collection of the Thirteenth National Symposium on pile Foundation Engineering, 2017: 178 – 183. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)