

文章编号: 1000-7598-(2008)10-2805-06

堆载条件下单桩负摩阻力模型试验研究

杨 庆^{1,2}, 孔纲强², 郑鹏一², 栾茂田^{1,2}

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2.大连理工大学 土木水利学院, 大连 116024)

摘 要: 通过对粉土中混凝土单桩竖向静载荷的模型试验, 分析了在桩周土堆载条件下, 端承桩、摩擦端承桩在桩周土含水率变化时, 桩侧摩阻力、桩端阻力的变化规律及不同土层的沉降、“中性点”位置和下拽力的变化。研究发现, 摩擦端承桩“中性点”位置随桩周土含水率、堆载等级的变化而变化, 在最优含水率附近, 土层的下陷量较大, 致桩体沉降量也大, 故“中性点”的位置会有所上升; 随着桩周土堆载的增大, 桩周土对桩侧的下拽力也增大, 桩体进一步下陷, 使桩土相对位移反而减少, “中性点”有所上升。

关 键 词: 表面堆载; 负摩阻力; 下拽力; 中性点; 单桩; 模型试验

中图分类号: TU 411.93

文献标识码: A

Model test study of negative skin friction for single pile under surface load

YANG Qing^{1,2}, KONG Gang-qiang², ZHENG Peng-yi², LUAN Mao-tian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Through the vertical static load model experiment of concrete single pile in silt, the change rule of the resistance of pile side and pile tip, the subsidence situation of different soil strata, and the changes of “neutral point” position and dragload of end-bearing pile and friction end-bearing pile are analyzed under the variety of the water content change of the soil around the pile. It is found that the “neutral point” position of friction end-bearing pile changes while the variety of water content and load grade of soil around the pile change; “neutral point” position reaches the tiptop near optimum moisture content and becomes higher along with the load increase.

Key words: surface load; negative skin friction; dragload; neutral point; single pile; model test

1 引 言

结构物荷载通过桩基础传递给地基, 竖向荷载由桩底土层抵抗力和桩侧土产生的摩阻力来支承。若桩周有大面积填土或者堆载, 桩周土的沉降可能大于桩体的沉降, 从而产生桩侧负摩阻力^[1], 堆载条件下单桩负摩阻力作用示意图如图 1。桩侧负摩阻力非但不能为承担上部荷载作出贡献, 反而要产生作用于桩侧的下拽力, 造成桩端地基的屈服或破坏、桩身破坏、结构物不均匀沉降等。因此, 桩侧负摩阻力对桩基础的作用是桩基础设计必须考虑的问题之一^[2]。

目前国内外关于桩基负摩阻力的研究主要集中在现场测试、室内模型试验和经验公式的推导 3 个

方面^[3]。近年来, 国内外开展了一系列的模型试验, Sawaguchi et al (1977 年)^[4] 利用模型试验研究了斜桩负摩阻力性状。Shibata, Sekiguchi et al (1977 年, 1982 年)^[5,6] 利用群桩模型试验对竖直桩、斜桩负摩阻力性状进行了研究, 并分析了沥青涂层对减少负摩阻力值的作用。吴一伟 (1995 年)^[7] 利用室内模型试验研究了砂土液化后因固结沉陷引起的桩侧负摩阻力与地面沉陷之间的关系。陆明生 (1997 年)^[8] 通过对单桩负摩阻力的模型试验研究及有限元分析, 在 Kerisel 总应力法基础上提出了估算单桩下拉荷载的经验公式。周国庆 (1999 年)^[9] 利用室内模型试验分析了单桩负摩阻力与饱和中砂融化沉降位移的关系。谢耀峰 (2004 年)^[10] 结合湛江港某码头桩基工程, 对桩的负摩阻力进行了模型试验研究。

收稿日期: 2006-12-13

作者简介: 杨庆, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及工程地质的教学和研究工作。E-mail: qyang@dlut.edu.cn

本文拟通过对粉土中混凝土单桩竖向静载荷的模型试验,分析桩顶荷载、桩周土堆载下桩端阻力及桩周土沉降情况,进而研究桩周土含水率变化时,“中性点”位置及下拽力的变化规律。

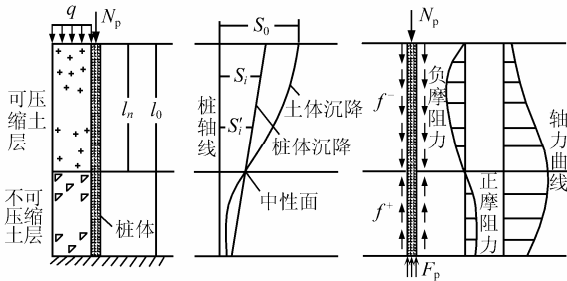


图1 堆载条件下单桩负摩阻力作用特性示意图
Fig.1 Sketch of negative skin friction of single pile under surface load

2 试验准备

2.1 试验装置制作

参考国内外相类似的桩基室内模型试验箱(槽)^[11],本文采用的桩基模型箱内净空尺寸(长×宽×高)为150 cm×70 cm×100 cm。模型箱壁为钢板,可较好地约束侧向变形。模型箱试验装置如图2所示。荷载板采用长×宽×厚为:95 cm×69 cm×20 cm的钢板(中间预留桩孔及沉降标孔)。

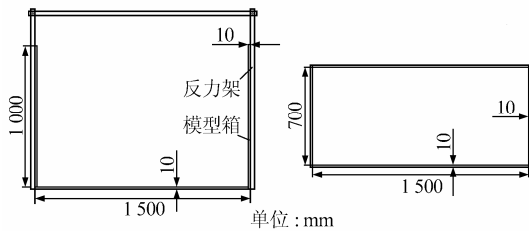


图2 模型箱几何尺寸
Fig.2 Dimensions of model trunk

2.2 试验桩周土选取

试验桩周土的塑限 W_2 为 13.4 %,液限 W_{17} 为 23.74 %;最大干密度 ρ_{dmax} 为 1.91 g/cm³,最优含水率 W 为 13.47 %,具体土性指标见表1。试验时分3层人工填实,并确保各组试验有相近的密实度。

表1 试验土性指标参数
Table 1 Parameters of soils for test

名称	含水率 $W/\%$	土体密度 $\rho/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	压缩系数 α_v/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa
A	7.92	13.3	32.83	31.41	0.19	7.76
B	12.45	13.9	16.13	33.9	0.93	2.13
C	20.20	17.2	10.75	33.25	0.26	6.86

2.3 试验桩模型制作

试验桩采用 C20 素混凝土圆桩,桩径 ϕ 为 15 cm,桩长 L 为 78 cm,桩的静弹性模量 E 为 2.4×10^4 MPa。桩骨料采用粒径在 5~10 mm 之间的碎石。

3 试验内容和方法

3.1 试验设计

为了研究“中性点”及下拽力变化规律,本文共设计了 6 组竖向静载试验。每组试验做两个工况,取平均值。试验装置布置见图 3,试验类型见表 2。将桩体及测量仪器预先埋设在土体中,桩体、土压力盒的埋设高程误差 < 2 %,沉降标的埋设高程误差 < 3 %。采用尺寸为直径 ϕ 等于 12 cm,厚度 d 等于 3 cm 的振弦式土压力盒测定桩端阻力。采用沉降标及大量程百分表测读土层沉降量。采用 20 cm 厚、粒径在 5~10 mm 之间的碎石持力层模拟摩擦端承桩;而桩端直接作用在钢板箱底上模拟端承桩。桩周土为厚度 75 cm 的粉土。利用液压式千斤顶加压,力式传感器系统作为控制加压系统。

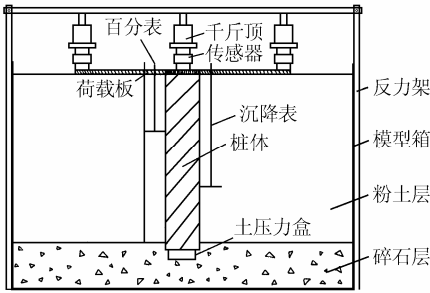


图3 模型装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of test apparatus

表2 试验类型
Table 2 Types of test

桩号	持力层	桩周土性质	桩基类型
P_1	基岩	A	端承桩
P_2	碎石	A	摩擦端承桩
P_3	基岩	B	端承桩
P_4	碎石	B	摩擦端承桩
P_5	基岩	C	端承桩
P_6	碎石	C	摩擦端承桩

3.2 测试内容

- (1) 测试各组试验的荷载与桩顶沉降的 $Q-S$ 曲线;
- (2) 测试各组试验在桩顶加载情况下,桩端阻力变化曲线;在桩周土加载情况下,桩端阻力的增加值。

(3) 测试各组试验在桩顶加载情况下, 土表层的沉降曲线; 在桩周土加载情况下, 土表层、-25 cm 层、-50 cm 层、-75 cm 层土层的沉降曲线。

3.3 测试方法

选用 JGJ94—94 建筑桩基技术规范^[12], 试验采用油压千斤顶反向进行加载, 快速维持荷载法, 考虑相对稳定, 每隔 15 min 加 1 级荷载。并按照《规范》的规定进行。

4 试验结果及分析

4.1 桩顶荷载作用下桩顶沉降、桩端阻力、桩周土表面沉降情况

(1) 桩顶荷载与桩顶沉降的关系曲线分析

预制混凝土桩测得的静弹性模量 E 为 2.4×10^4 MPa, 本试验的桩顶最大加载量为 70 kN, 故桩体基本在弹性状态下工作, 桩体的变形可以忽略不计。利用扣除 P_1 , P_3 , P_5 组测得由于桩端土压力盒、桩底模型箱变形引起的误差沉降可以得到相应的 P_2 , P_4 , P_6 组的荷载与桩顶沉降关系曲线。

由图 4 可以看出, 桩顶荷载与桩顶沉降基本成线性关系。桩顶的沉降量跟桩周土的含水率亦有关系, 在接近最优含水率时沉降量达到最大, 这与桩周土在接近最优含水率时的压缩模量较小有关。

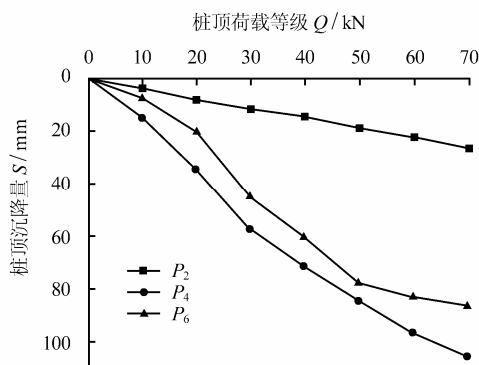


图 4 桩顶荷载与摩擦端承桩桩顶沉降关系曲线

Fig.4 Curves of settlements of pile top versus loads of pile top of friction end-bearing pile

(2) 桩顶荷载与桩端阻力的关系曲线分析

由图 5 可以看出, 在桩顶荷载作用下桩端阻力基本以线性增长。在同一桩周土类型下, 桩端阻力值端承桩比摩擦端承桩稍大一些, 这是因为摩擦端承桩中桩侧正摩阻力发挥作用的原因, 与文献^[13]研究结果一致。同一桩周土类型在同一桩顶荷载下, 桩端阻力跟桩周土含水率有关。在最优含水率时, 桩端阻力最小, 即此时桩侧正摩阻力发挥达到最大。

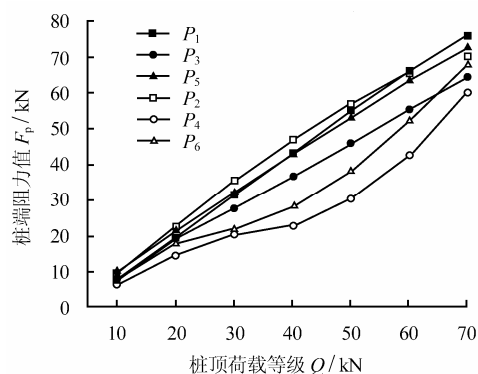


图 5 桩顶荷载与桩端阻力值的关系曲线

Fig.5 Curves of resistances of pile tip versus loads of pile top

(3) 桩顶荷载与桩周土表面沉降的关系曲线分析

由图 6 可以看出, 桩顶荷载引起桩周土表层沉降基本成线性关系, 沉降量的大小跟桩体的沉降量及桩周土的含水率均有关系。摩擦端承桩比端承桩引起的桩周土表层沉降量大, 桩周土含水率在接近最优含水率时, 沉降量最大。

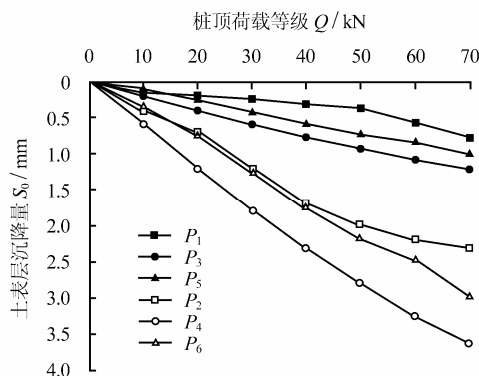


图 6 桩顶荷载与桩周土表面沉降关系曲线

Fig.6 Curves of settlements of surface soil versus loads of pile top

4.2 桩周土堆载下土层沉降、桩端阻力变化情况

(1) 桩周土荷载与土层沉降的关系曲线分析

对于端承桩 -75 cm 层即为土层最底层, 对于摩擦端承桩 -75 cm 层为粉土层与碎石层的分界层, 经沉降标测得该层沉降量很小, 几乎接近于 0。

由图 7、图 8 和图 9 可以看出, 各土层沉降规律基本一致, 沉降量与桩周土的含水率有关, 随着含水率的增大沉降量先增大后减少, 在最优含水率附近达到最大值。这是因为在最优含水率附近, 土体的压缩模量最小。同一含水率状况下, 相同桩周土堆载等级下, 同一土层端承桩桩周土的沉降量比摩擦端承桩的桩周土的沉降量要大。

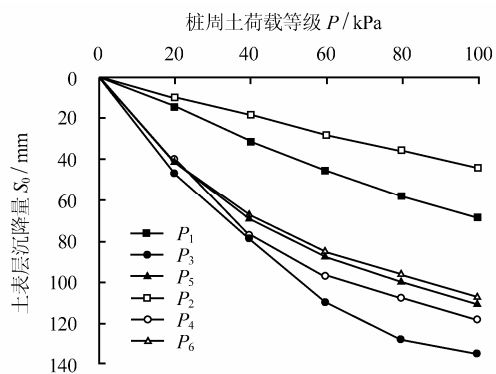


图7 桩周土堆载下土层沉降曲线

Fig.7 Curves of settlements of surface soil under soil surface loads

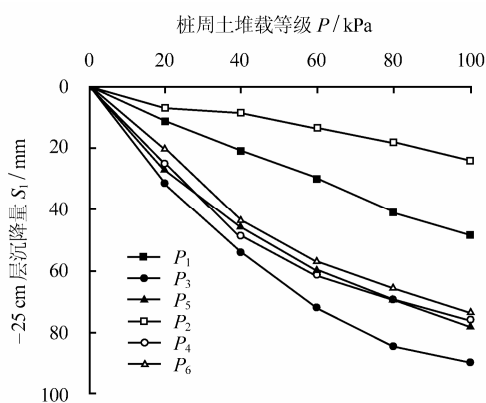


图8 -25 cm 层沉降曲线

Fig.8 Curves of settlements on -25 cm stratum

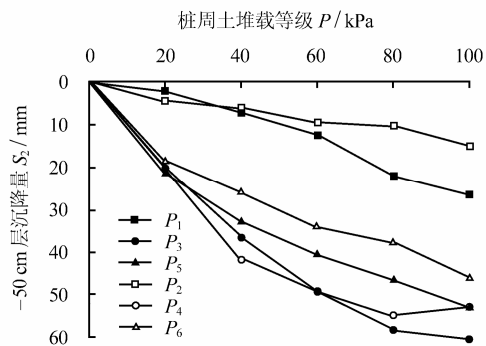


图9 -50 cm 层沉降曲线

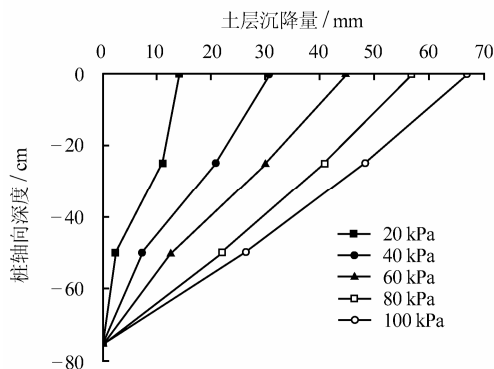
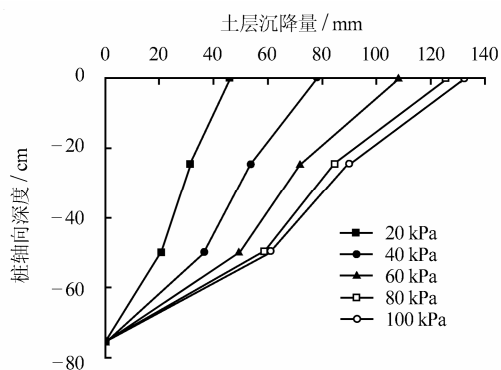
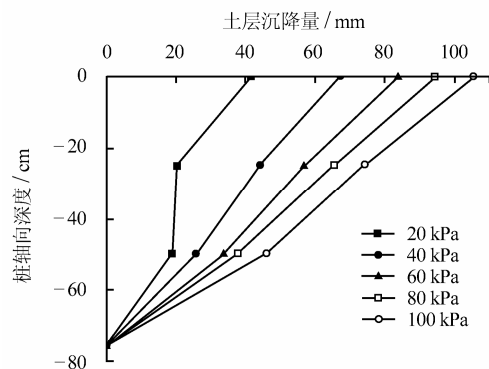
Fig.9 Curves of settlements on -50 cm stratum

(2) 沿桩轴线方向土层在不同桩周土堆载下关系曲线分析

由图 10、图 11 和图 12 可以看出, 各级桩周土堆载作用下, 土层轴向沉降近似线性增长, 不同试验类型下的规律基本一致。这与文献[10]试验所测得的桩周土体沉降沿深度的分布规律一致。

(3) 桩周土堆载下“中性点”位置变化情况

“中性点”为作用于桩身所有向下的力和所有向上的力的平衡点, 也为桩侧摩阻力为 0、桩土相对位移为 0、桩身轴力最大的点^[14]。对于端承桩,

图10 P_1 桩各级堆载下土层轴向沉降图Fig.10 Settlements of soil under soil surface loadings on axial direction of P_1 图11 P_3 桩各级堆载下轴向沉降图Fig.11 Settlements of soil under soil surface loadings on axial direction of P_3 图12 P_6 桩各级堆载下轴向沉降图Fig.12 Settlements of soil under soil surface loadings on axial direction of P_6

桩体全长都承受负摩阻力, 故不存在中性点问题, 这与文献[8, 15]研究结果一致; 对于摩擦端承桩的中性点位置变化, 与桩周土的含水率、桩周土堆载等级等因素有关。

由图 13 可以看出, 对于摩擦端承桩, 不同桩周土在同一堆载等级下, “中性点”位置随桩周土含水率的变化而变化, 在最优含水率附近, 土层的下陷量较大, 引起的桩体沉降量也越大, 从而使中性点

的位置反而有所提高。

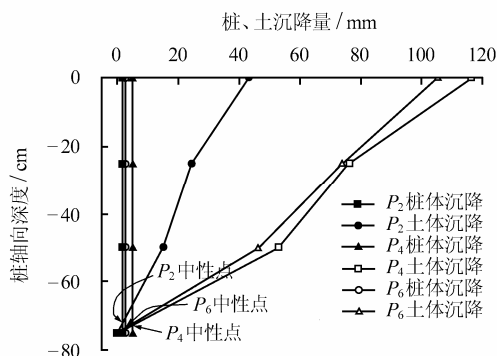


图 13 100 kPa 桩周土堆载下 P_2, P_4, P_6 桩-土沉降曲线
Fig.13 Curves of settlements of P_2, P_4, P_6 versus soil under 100 kPa surface load

由图 14 和表 3 可以看出,同一桩周土在不同堆载等级下,“中性点”位置随着堆载的增大而上升。这是因为随着堆载增大的同时,桩周土对桩侧的下拽力也增大,导致桩体进一步下陷,从而使中性点反而有所上升。

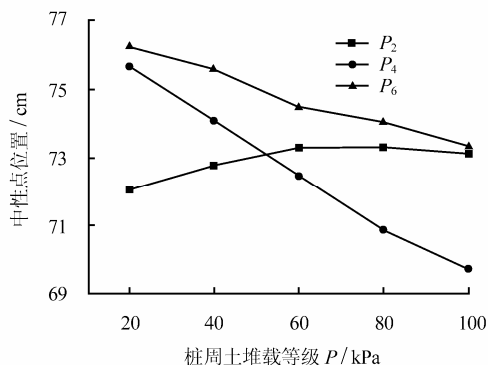


图 14 桩周土堆载下中性点 l_n 变化规律
Fig.14 Rule of neutral point l_n under surface soil loads

表 3 摩擦端承桩中性点位置与堆载等级的关系
Table 3 Relation between neutral point of friction end-bearing pile and load grade

堆载等级 /kPa	P_2 桩		P_4 桩		P_6 桩	
	l_n	l_n / l_0	l_n	l_n / l_0	l_n	l_n / l_0
20	72.06	0.924	75.66	0.970	76.27	0.978
40	72.77	0.933	74.09	0.950	75.61	0.969
60	73.27	0.939	72.44	0.929	74.48	0.955
80	73.29	0.940	70.83	0.908	74.05	0.949
100	73.11	0.937	69.68	0.893	73.32	0.940

另外,由于摩擦端承桩在桩周土堆载情况下,“中性点”位置变化受土层深度等因素影响较大,限于模型试验的尺寸原因,试验所得“中性点”位置较实际工程低。故开展现场试验测定桩侧负摩阻

力分布及确定“中性点”位置,是很有必要的。

(4) 桩周土堆载下桩端阻力变化

由图 15 和表 4 可以看出,桩周土堆载下桩端阻力成线性增长,桩端阻力值随含水率的变化而有所变化,在含水率接近最优含水率的时候,桩周土沉降引起的桩端阻力增加值最大,即桩周土沉降引起的对桩侧的负摩阻力值最大。这与第 4.1 节 (2) 得到的结论是一致的。桩周土引起的对桩侧的下拽力,端承桩比摩擦端承桩要大,这与文献[8, 10]的研究结果一致。

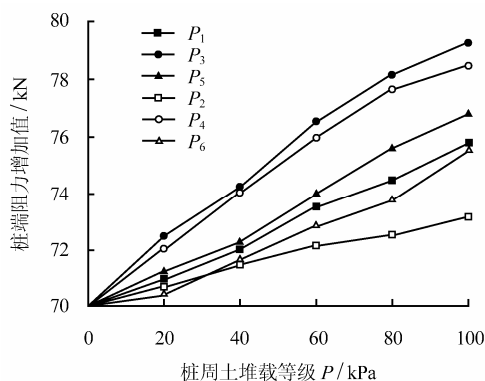


图 15 桩周土堆载下桩端阻力增加值
Fig.15 Values of resistance of pile tip under surface soil loads

表 4 100 kPa 桩周土堆载下桩侧最大下拽力值
Table 4 Maximal values of dragload on pile side under 100 kPa surface soil load

组号	最大下拽力/kN	组号	最大下拽力/kN
P_1	5.77	P_2	3.15
P_3	9.2	P_4	8.43
P_5	6.77	P_6	5.56

5 结 论

综合本文试验分析结果,可以得出如下结论:

(1) 桩周土性质影响着桩侧摩阻力的发挥,桩周土含水率的变化对桩侧正摩阻力有影响,尤其是对摩擦端承桩。桩周土在达到最优含水率的时候,桩顶荷载最易引起土层沉降,而分担上部荷载的桩侧正摩阻力值也最大。

(2) 在相同的桩周土堆载情况下,端承桩与摩擦端承桩相比,端承桩桩周土层的沉降量相对较大,桩周土沉降引起的对桩身的下拽力也较大,即摩擦端承桩在负摩阻力的作用下,桩体有所下降,从而使下拽力较端承桩小。

(3) 对于端承桩,不存在“中性点”,桩体全长都承受负摩阻力;对于摩擦端承桩,“中性点”位置

随桩周土含水率、堆载等级的变化而变化,在最优含水率附近,土层的下陷量较大,致桩体沉降量也大,故“中性点”的位置会有所上升;随着桩周土堆载的增大,桩周土对桩侧的下拽力也增大,桩体进一步下陷,使桩土相对位移反而减少,“中性点”有所上升。

(4) 随着桩周土沉降的增大,桩周土对桩侧的作用力增大,导致桩体的进一步下陷,从而保持桩土相对位移基本一致,即桩侧负摩阻力基本保持不变。因此,研究桩侧负摩阻力时考虑桩土系统共同作用是非常必要的。

参 考 文 献

- [1] 袁灯平, 黄宏伟, 程泽坤. 软土地基桩侧负摩阻力研究进展初探[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 53—60, 84.
YUAN Deng-ping, HUANG Hong-wei, CHENG Ze-kun. Research progress of negative skin friction on piles in soft soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(2): 53—60, 84.
- [2] 黄强. 桩基工程若干热点技术问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [3] 周国林. 单桩负摩阻力传递机理分析[J]. 岩土力学, 1991, 12(3): 35—42.
ZHOU Guo-lin. The analysis on negative friction of piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1991, 12(3): 35—42.
- [4] SAWAGUCHI M, TAKAHASHI K. Model test on negative friction acting on batter piles[C]//Proceedings of 32nd Japan Annual Meeting on Civil Engineering. [s. l.]: [s. n.], 1977: 556—557.
- [5] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, TSUJI I, et al. Model tests on negative friction acting on piles[C]//Proceedings of 22nd Japan Symposium. Hiroshima: Japanese Society for SMFE, 1977: 49—55.
- [6] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative skin friction acting on piles[J]. **Soils Foundations**, 1982, 22 (2): 29—39.
- [7] 吴一伟, 费涵昌, 林侨兴, 等. 砂土液化对桩基的影响[J]. 同济大学学报, 1995, 23(3): 360—364.
WU Yi-wei, FEI Han-chang, LIN Qiao-xing, et al. The effect of pile by sand clay liquefaction[J]. **Journal of Tongji University**, 1995, 23(3): 360—364.
- [8] 陆明生. 桩基表面负摩擦力的试验研究及经验公式[J]. 水运工程, 1997, (5): 54—58.
LU Ming-sheng. Model tests and experience formula for negative skin friction of a single pile[J]. **Port & Waterway Engineering**, 1997, (5): 54—58.
- [9] 周国庆, 杨维好. 中砂融沉位移与单桩负摩阻力关系得试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(6): 535—538.
ZHOU Guo-qing, YANG Wei-hao. Test study on relation between thaw-collapse displacement of medium sand and negative friction of single pile[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1999, 28(6): 535—538.
- [10] 谢耀峰, 王云球. 码头桩基负摩擦力的模型试验研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(12): 29—30, 41.
XIE Yao-feng, WANG Yun-qiu. Model test study on negative skin friction for dock pile[J]. **Building Structures**, 2004, 34(12): 29—30, 41.
- [11] 宰金珉, 将刚, 王旭东, 等. 复合桩基非线性共同作用模型试验设计与研究[C]//第24届全国土工测试学术研讨会论文集. 北京: 黄河水利出版社, 2005: 27—32.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [13] 陈福全, 简洪钰, 许万强, 等. 小截面静压预制桩的现场试验及其应用研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 213—216.
CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu, XU Wan-qiang, et al. An in-situ test and analysis of static pressed precast piles with small section[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 213—216.
- [14] FELLENIUS B H. Basics of Foundation Design (Second edition)[M]. BiTeech Publishers, Richmond, British Columbia, 1999: 164.
- [15] ENDO M, KAWASAKI T, SHIBATA T. Nagative skin friction acting on steel pipe in clay[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico city: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, 1969, (2): 85—92.