

DOI: 10.11779/CJGE2019S2038

多级扩径桩承载特性模型试验及计算研究

刘干斌¹, 胡光静², 韩仲², 郑言东¹, 郑荣跃¹

(1. 宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 200436)

摘要: 在宁波砂质粉土中开展了等直径桩、扩底桩、扩径桩(多级扩径)抗压静载模型试验, 测试获得了单桩承载力-沉降($Q-s$)曲线、桩侧摩阻力, 对比分析了3种桩的承载特性, 并推导建立了多级扩径桩承载力和沉降计算公式, 结果表明: 多级扩径桩更能充分地发挥扩大头下端土体的承载作用, 具有提高承载力、减小沉降的作用; 受到扩大头的影响, 多级扩径桩中部侧阻无法充分发挥, 但扩径阻力是荷载传递的重要方式; 建立的多级扩径桩的承载力及沉降计算公式较为合理。

关键词: 多级扩径桩; 模型试验; 抗压静载; 承载特性; 设计计算

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0149-04

作者简介: 刘干斌(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事桩基工程方面等方面的教学和科研。E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn。

Model tests on bearing behaviors and calculation of multi-stage expanded piles

LIU Gan-bin¹, HU Guang-jing², HANG Zhong², ZHENG Yan-dong¹, ZHENG Rong-yue¹

(1. Institution of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Shanghai Civil Engineering Co. LTD of CREC, Shanghai 200436, China)

Abstract: The bearing capacity-settlement curve ($Q-S$) of single pile and the side friction resistance of piles are obtained based on the model tests on the compressive static loads on equal-diameter pile, expanded pile and expanded-diameter pile (multi-stage expansion) in the sandy silt of Ningbo, the bearing behavior of three kinds of piles are compared, and the formula for the bearing capacity and settlement of multi-stage expanded piles are deduced for the first time. The results show that expanded-diameter pile can make full use of the bearing capacity of the soil under the expanded head and has the better effect of reducing the settlement and increasing the bearing capacity. The lateral resistance near the middle of the enlarged head cannot be fully exploited because of the expanded head. However, the expansion resistance is an important way of load transfer. The proposed formula for calculating the bearing capacity and settlement of multi-stage expanded piles is reasonable.

Key words: multi-stage expanded pile; model test; static load test; bearing behavior; design calculation

0 引言

扩底桩、扩径桩是一种变截面桩, 其能够充分发挥土层和桩身的承载潜力, 使承载力大幅度提高, 同时减少沉降。近年来, 扩底桩在工程中应用越来越广泛, 国内外学者根据现场试验数据得到了扩底桩受力和变形规律^[1]。扩径桩与挤扩支盘桩的承载特性既有相同之处, 又有不同之处^[2]。对于扩径桩, 一些学者通过数值模拟对扩径桩的承载特性进行了研究, 并与实测数据进行对比分析^[3]。

目前, 多级扩径桩承载性状和沉降计算方面的研究较少, 由于多级扩径桩(扩径、扩底)受荷后扩大头附近的荷载传递机理更为复杂, 考虑到模型试验具有试验条件可控、测量数据较为精确可靠以及可重复多次试验的优点^[4], 本文以宁波市轨道交通1、2号线高架段大直径钻孔灌注桩(桩径0.8~1.2 m, 桩长60~

90 m)为对象, 在砂质粉土中开展等直径桩、扩底桩及扩径(多级)桩模型试验, 研究扩径桩的承载性状和桩身荷载传递规律, 并建立适用于扩径桩单桩受压时的承载力和沉降计算方法, 可以为扩径桩的设计提供理论技术支持。

1 试验方案

1.1 试验系统

试验模型箱长×宽×高为2.0 m×2.0 m×1.35 m, 采用钢梁钢板及螺栓等构件组合焊接而成, 外部和底部采用若干道加劲梁加固。采用桩顶堆载砝码的方式实现分级加载。采用百分表量测竖直对称布置在桩顶处量测桩顶的竖向沉降量, 精度为0.01 mm。

1.2 模型桩及测点布设

模型桩采用空心薄壁铝管，外直径为 80 mm，壁厚 2 mm，桩长 1 m。试验桩型：等直径桩、扩底桩（底部扩大头）和扩径桩（中部、底部扩大头）。扩径比（扩大头直径与等截面直径比值）为 1.5，即扩底处直径为 120 mm，高度为 120 mm（图 1）。沿桩身长度方向对称布置两组应变片，采用环氧树脂胶固定保护。

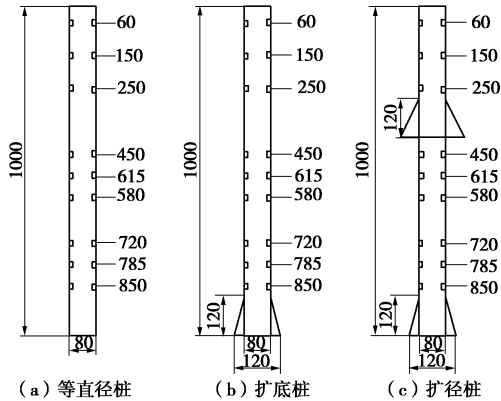


图 1 模型桩及测点布设

Fig. 1 Model piles and layout of measuring points

试验用土采用宁波砂质粉土，其不均匀系数 $C_u=9.43$ ， $C_c=1.88$ ，级配良好；湿重度 18.9 kN/m^3 ，含水率为 17.8%，内摩擦角为 28.1° 。采用分层填筑，每层虚铺 250 mm 厚度，用砧码压实至 150 mm，直到填土总高为 1.3 m。模型桩采用预埋形式，桩身入土 950 mm，预埋时采用重锤悬挂法来控制模型桩的垂直度，保证模型桩的准确竖直定位。

1.3 加载方案

试验前，利用有限单元法对模型试验进行模拟，得到等直径桩和扩底桩达到 40 mm 沉降时的桩顶荷载分别为 360，6000 N。据此试验时，采用慢速维持荷载法^[11]进行分级加载，每级施加计算最大加载量的 1/10~1/15，第一级加载量可取分级荷载的 2 倍。

2 试验结果与分析

2.1 荷载 - 沉降曲线

图 2 为等直径桩、扩底桩和扩径桩桩顶荷载 - 沉降 ($Q-s$) 曲线，可以看出：3 种试验桩的 $Q-s$ 曲线均呈现出缓变特性，未出现明显拐点，扩径桩曲线最为平缓，扩底桩次之，等直径桩较陡。在桩顶荷载为 2600 N 时，等直径桩沉降为 13.77 mm，而扩底桩只有其一半，仅为 6.57 mm，扩径桩则只有 4.37 mm，说明中间扩大头对桩身的减沉作用十分显著。参考文献[5]，取桩顶总沉降量为 15 mm 时的荷载为极限承载力，即等直径桩、扩底桩、扩径桩的极限承载力分别为 2687，3608，4482 N，可见扩底桩较等直径桩提高

1.34 倍，扩径桩较等直径桩提高 1.67 倍，扩径桩较扩底桩提高 1.24 倍，说明扩大头对桩的承载能力有较大的提高作用^[6]。

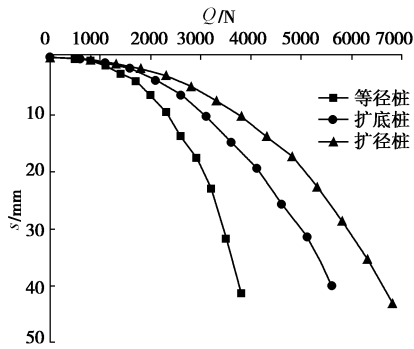


图 2 模型桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 $Q-s$ curves of model piles

2.2 桩侧摩阻力

桩侧摩阻力分布如图 3 所示，扩底桩桩端侧阻较其上部侧阻有减弱的现象，说明扩大头的存在弱化了桩端附近侧阻的发挥，受荷后扩大头的下沉使扩头斜侧面出现一定范围的临空区^[3]。等直径桩桩端处侧摩阻力最大有 11.4 kPa，而扩底桩端处相同位置最大侧摩阻力仅为 6.77 kPa，降低 40.6%。扩径桩（图 3 (c)）

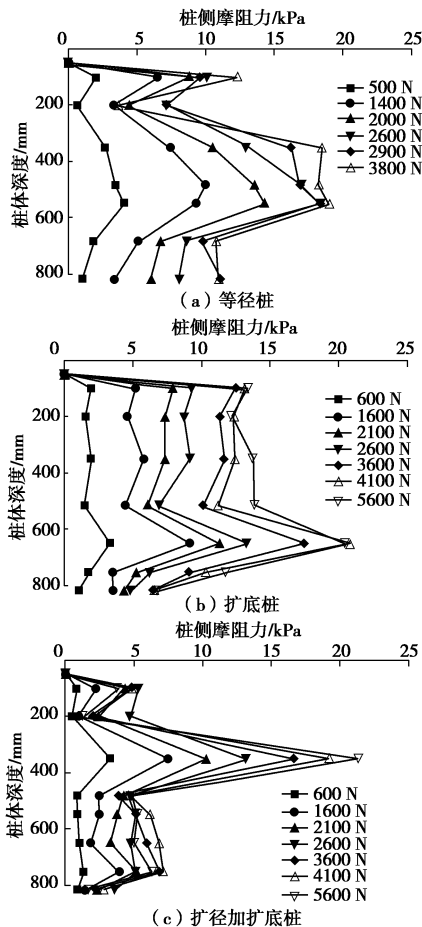


图 3 桩侧摩阻力沿桩身分布曲线

Fig. 3 Frictional resistances along piles

侧阻的大小及增幅有不同表现。扩径处上下附近的侧阻表现较为复杂, 扩径处最大侧阻是等直径桩相同位置的 2.47 倍, 说明扩径处的扩径阻力发挥的作用比桩侧摩阻力大, 扩径对于桩基承载能力的提高效果明显。

3 扩径桩承载力及沉降计算

3.1 扩径桩抗压承载力及沉降计算公式推导

假定: ① 同一层土中桩侧达到极限侧摩阻力后均匀分布且保持不变; ② 达到极限荷载时, 桩端土符合温克尔地基模型; ③ 扩径桩变截面段轴力无衰减, 刚度无穷大, 扩径段侧阻为 0, 计算模型如图 4, 5 所示。

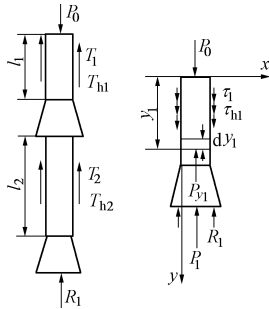


图 4 扩径桩受力分析

Fig. 4 Stress analysis of enlarged-diameter pile

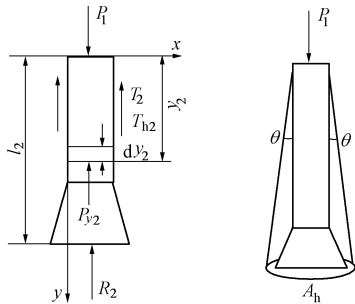


图 5 下段桩身扩径桩受力分析

Fig. 5 Stress analysis of enlarged pile of lower section

第一段桩身任意截面 y 处的轴力计算如下(图 4):

$$P_{y1} = P_0 - u_1 y (\tau_1 + \tau_{h1}) \quad (1)$$

式中 P_{y1} 为第一段等直径段桩身任意截面处的轴力; P_0 为桩顶竖向荷载; l_1 为第一段等直径段桩长度; τ_1 , τ_{h1} 分别为第一段等直径段桩身弹性压缩、桩端沉降引起的桩侧摩阻力, u_1 为桩身周长。

由等直径段桩身弹性压缩和桩端沉降引起的总桩侧摩阻力分别表示为 T_1 和 T_{h1} , $T_1 = u_1 \tau_1 l_1$ 、 $T_{h1} = u_1 \tau_{h1} l_1$, 则第一段等直径段桩身压缩变形量 Δ_1 [7]:

$$\Delta_1 = \int_0^{l_1} \frac{P_{y1}}{EA_1} dy = \frac{l_1}{EA_1} \left(P_0 - \frac{T_1}{2} - \frac{T_{h1}}{2} \right) \quad (2)$$

式中, E 为桩身弹性模量, A_1 为等直径段桩身的横截面积。

第二段桩身任意截面处轴力(图 5):

$$P_{y2} = P_1 - T_1 - T_{h1} - u_2 y (\tau_2 + \tau_{h2}) \quad (3)$$

式中 P_{y2} 为第二段等直径段桩身任意截面处的轴力; P_1 为中部扩径底部变截面处轴力; l_2 为第二段等直径段桩身入土长度; τ_2 , τ_{h2} 分别为桩身弹性压缩、桩端沉降引起的侧摩阻力; u_2 为桩身周长。

第二段等直径桩桩身压缩变形量 Δ_2 :

$$\Delta_2 = \frac{l_2}{EA_1} \left(R_2 + \frac{T_2}{2} + \frac{T_{h2}}{2} \right) \quad (4)$$

式中, T_2 , T_{h2} 分别表示等直径桩桩身压缩和桩端沉降引起的总桩侧摩阻力, $T_2 = u_2 \tau_2 l_2$, $T_{h2} = u_2 \tau_{h2} l_2$ 。

对整个桩体而言, 荷载与抗力平衡, 即

$$P_0 = R_1 + R_2 + T_1 + T_2 + T_{h1} + T_{h2} \quad (5)$$

式中, R_1 , R_2 分别为扩径阻力和桩端阻力。

假设扩径底面以下的桩侧摩阻力以 θ 角扩散至桩底平面处, 在该平面形成一个面积为 A_h 的圆面, 圆面内压应力均布, 则 $A_h = \frac{\pi}{4} (d_1 + 2l \tan \theta)^2$, 其中 d_1 为等直径段桩直径, l 为入土长度。若为短桩, $\theta = \varphi / 4$, φ 为土的内摩擦角; 若为长桩, 可取 $1^\circ \sim 5^\circ$ 。当土层为多层时, 可取桩侧各层土内摩擦角的加权平均值。

桩端沉降 Δ_h 为

$$\Delta_h = \eta \frac{P_1}{C_h A_h k} \quad (6)$$

式中, C_h 为桩端土的竖向地基系数, 与深度成正比, $C_h = Lm_0$, m_0 可查表, η 为大于 1 的增大系数, k 为扩径比, L 为桩入土长度。由温克尔假定可得, $\sigma_{cz} = C_h \Delta_z = Lm_0 \Delta_z$ 。

扩径阻力 R_1 为

$$R_1 = \sigma_1 A_0 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) Lm_0 (\Delta_h + \Delta_2) \quad (7)$$

式中, A_0 为最大扩径段截面与等直径段截面面积之差, d_1 , d_2 分别为等直径段直径和扩径段最大直径。

桩端阻力 R_2 为

$$R_2 = \sigma_2 A_e = \eta \frac{A_e}{A_h} P_1 \quad (8)$$

式中, σ_2 为桩端应力, $\sigma_2 = \eta P_1 / A_h$, A_e 为桩底面积。

由扩径上段桩体静力平衡可得

$$P_1 = P_0 - R_1 - T_1 - T_{h1} \quad (9)$$

联立式 (8), (9), 并利用式 (5) 可得

$$R_2 = a(T_2 + T_{h2}) \quad (10)$$

式中, $a = \eta A_e / (A_2 - \eta A_e)$ 。

桩顶总位移量 s :

$$s = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_h \quad (11)$$

3.2 公式计算值与试验值对比

利用式 (5), (11) 对模型试验桩进行承载力和沉降计算, 其中 η 取 1.1, m 取 6000 kN/m^4 , 总 $\tau_1 = 9 \text{ kPa}$,

$\tau_2=10\text{ kPa}$ ，将计算结果与模型试验结果进行对比如表 1，2 所示，可以看出计算结果与试验结果较为吻合，从而验证了理论公式的合理性。

表 1 承载力实测与计算结果对比

Table 1 Comparison between measured and test bearing capacities

桩型	T_1+T_{h1} /N	T_2+T_{h2} /N	R_2 /N	R_1 /N	P_0 /N	实测荷 载/N	误差 /%
等直 径桩	2148	0	0	552	2701	2600	-3.8
扩底 桩	1877	0	0	1600	3478	3604	3.6
扩径 桩	520	1085	925	1186	3929	4208	8.9

表 2 沉降实测与计算结果对比

Table 2 Comparison between measured and test settlements

桩型	桩身压缩 量/mm	桩端位 移/mm	桩顶位 移/mm	实测位 移/mm	误差 /%
等直径桩	0.028	18.324	18.325	15	18.2
扩底桩	0.044	15.729	15.773	15	4.9
扩径桩	0.115	15.161	15.161	15	1.8

4 结 论

(1) 在相同加载时，扩径桩的极限承载力是等直径桩的 1.67 倍，扩底桩极限承载力是等直径桩的 1.34 倍，扩大头对桩承载能力良好的提高作用。

(2) 扩底桩与等直径桩的桩侧摩阻力在桩身上部和中部发挥情况相近，而在桩端附近(扩大头上端附近)，等直径桩表现出强化趋势，扩底桩则表现出弱化效应，设计时需考虑减小侧阻；中部扩径处桩侧摩阻力受扩径影响无法完全发挥。

(3) 理论计算与模型试验结果较为吻合，两者误差在均在-11%~10%，建立的扩径桩承载力及沉降计算理论较为合理。

参考文献：

[1] 高 盟, 王 滢, 高广运, 等. 一种大直径扩底桩端阻力和侧阻力的确定方法[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 797 - 801. (GAO Meng, WANG Ying, GAO Guang-yun, et al. A method for determining tip and side resistances of large diameter pedestal pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 797 - 801. (in Chinese))

[2] 杨果林, 陈似华, 林宇亮. 大直径扩径桩与等截面桩对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, **6**(2): 34 - 37. (YANG Guo-lin, CHEN Si-hua, LIN Yu-liang. Contrastive experimental study between expanded diameter piles and equal diameter piles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, **6**(2): 34 - 37. (in Chinese))

[3] 张利鹏, 王晓谋. 等直径桩, 扩底桩, 支盘桩承载特性对比[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2016, **36**(5): 37 - 44. (ZHANG Li-peng, WANG Xiao-mou. Comparison on load-bearing characteristics among equal diameter pile, bell pile and branch pile[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science edition), 2016 **36**(5): 37 - 44. (in Chinese))

[4] 曾友金, 章为民, 王年香, 等. 桩基模型试验研究现状[J]. 岩土力学, 2003(增刊 2): 674 - 680. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, et al. Reviews of state-of-art of modeling simulation on pile foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(S2): 674 - 680. (in Chinese))

[5] 肖建华, 刘 淼. 桩基础单桩静载试验及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2015, **34**(5): 606 - 611. (XIAO Jian-hua, LIU Miao. Single pile static load test of pile foundation and the analysis of numerical simulation[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, **34**(5): 606 - 611. (in Chinese))

[6] 蔡江东, 姜振泉. 大直径软岩嵌岩桩端阻发挥性状实测分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, **33**(4): 124 - 128. (CAI Jiang-dong, JIANG Zhen-quan. Experimental analysis of the character of base resistance along large diameter socket pile casted in soft rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, **33**(4): 124 - 128. (in Chinese))

[7] 梁 韵, 任士房, 耿大新, 等. 大直径变截面桩竖向承载力及沉降算法研究[J]. 华东交通大学学报, 2009, **26**(4): 34 - 38. (LIANG Yun, REN Shi-fang, GENG Da-xin, et al. Research on algorithm for the vertical bearing capacity and settlement of the large diameter pile with variable cross-section[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, **26**(4): 34 - 38. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)