

DOI: 10.11779/CJGE201503024

静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究

周佳锦^{1, 2}, 龚晓南^{1, 2}, 王奎华^{1, 2}, 张日红³

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

3. 浙东建材集团, 浙江 宁波 315000)

摘要: 为了研究静钻根植竹节桩的抗拔承载性能, 进行了静钻根植竹节桩抗拔静载试验。通过一组破坏性抗拔试验得到了完整的静钻根植竹节桩抗拔荷载位移曲线, 并采用幂函数、双曲线和指数函数分别对试桩荷载位移曲线进行了拟合; 通过桩身埋有应变计的静钻根植竹节桩的抗拔试验分别对其桩侧摩阻力与桩端阻力进行了研究。试验结果表明: 静钻根植竹节桩抗拔荷载位移曲线比较平缓, 采用指数函数对其进行拟合的效果较好; 静钻根植抗拔桩中水泥土与桩周土接触面摩擦性质比灌注桩中桩土接触面摩擦性质要好, 静钻根植抗拔桩的桩侧摩阻力是钻孔灌注桩的 1.47~2.11 倍; 静钻根植抗拔桩中桩端水泥土扩大头能够提高桩基桩端阻力, 而且能够提高靠近桩端处桩身与土体接触面的摩擦性质。

关键词: 静钻根植工法; 竹节桩; 水泥土; 桩端水泥土扩大头; 抗拔承载力

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)03-0570-07

作者简介: 周佳锦(1989-), 男, 浙江诸暨人, 博士研究生, 主要从事桩基工程, 地基处理及基坑工程等方面的研究工作。E-mail: zjjmuforever@163.com。

Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension

ZHOU Jia-jin^{1, 2}, GONG Xiao-nan^{1, 2}, WANG Kui-hua^{1, 2}, ZHANG Ri-hong³

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. ZDOON Building Materials Group, Ningbo 315000, China)

Abstract: A series of field tests on static drill rooted nodular piles are conducted to investigate their behavior under tension. A group of destructive field tests are conducted to investigate the load-displacement response of the static drill rooted nodular piles under tension. Moreover, the power function, hyperbolic function and exponential function are used to fit the load-displacement curves of the test piles, respectively. Field tests on the static drill rooted nodular piles instrumented with strain gauges are conducted to investigate their skin friction and mobilized tip resistance. The test results show that the load-displacement curves of the static drill rooted nodular piles under tension are relatively flat, and that the exponential function can be used to fit the curves well. The frictional capacity of the static drill rooted nodular piles is better than that of the bored piles, and the skin friction of the static drill rooted nodular piles is about 1.47~2.11 times that of the bored piles. The existence of the enlarged cemented soil base of the static drill rooted piles can improve the capacity of the tip resistance as well as the frictional capacity of the pile-soil interface close to the enlarged base.

Key words: static drill rooted method; nodular pile; cemented soil; enlarged cemented soil base; uplift capacity

0 引言

随着中国城市建设的高速发展, 地下空间的开发和利用成为发展的必然趋势; 在中国东南沿海软土地区, 由于地下水位较高, 大规模地下建筑的出现使得抗拔桩在工程中得到了越来越广泛的应用。国内外学者对抗拔桩的承载特性进行了许多富有成效的研究工作^[1-4], 随着工程经验的积累与理论研究的深入, 出现了扩底抗拔桩和桩侧注浆抗拔桩等一些新的抗拔桩型^[5-10]。文献[8]

中指出, 扩底抗拔桩的极限承载力比等截面桩提高 50%以上, 扩底效果明显; 文献[10]中提出, 相比传统的抗拔桩, 桩侧后注浆抗拔桩的侧摩阻力得到了显著的改善, 桩侧注浆抗拔桩的承载能力相比传统抗拔桩有了较大程度的提高。然而, 文献[8]中也提到了扩底

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378464, 51278450)

收稿日期: 2014-04-17

抗拔桩在扩底成孔过程中面临诸多困难, 孔壁的稳定性不易控制。桩侧注浆抗拔桩在注浆过程中比较难控制注浆质量, 也无法对注浆质量进行实时监测。因此, 扩底抗拔桩和桩侧注浆抗拔桩都可以改善桩基的抗拔性能, 但是对施工技术的要求很高, 限制了其在实际工程中的应用。

静钻根植竹节桩是一种新型的组合桩基: 通过一种特殊的螺旋钻孔注浆形成水泥土, 然后植入预制竹节桩(管桩)形成组合桩基。其具体施工工法如文献[11]中所述。静钻根植竹节桩通过桩周水泥土改善桩土界面的摩擦性质, 通过桩端水泥土扩大头改善了桩端承载性质。笔者对静钻根植竹节桩的抗压承载性进行了研究, 提出了静钻根植竹节桩的抗压承载性能比普通钻孔灌注桩要好^[11-13], 而对其抗拔承载性能还未曾进行研究。而静钻根植竹节桩中由于桩周水泥土及桩端水泥土扩大头的存在, 可以认为其结合了扩底抗拔桩和桩侧注浆抗拔桩的优点。

本文通过静钻根植竹节桩的破坏性抗拔试验及桩身埋有钢筋应力计的静钻根植竹节桩的现场静载试验对其抗拔承载特性进行了研究与分析。

1 静钻根植竹节桩破坏性抗拔试验

1.1 试验概况

为了对静钻根植竹节桩的抗拔承载特性进行研究, 在某管桩公司的试验场地中进行了静钻根植竹节桩的破坏性抗拔静载试验。试验采用了两种不同尺寸的竹节桩: 竹节处直径为 650 mm, 桩身直径为 500 mm

(650 (500) mm 型) 的竹节桩和竹节处直径为 800 mm, 桩身直径为 600 mm (800 (600) mm 型) 的竹节桩。650 (500) mm 型竹节桩中钻孔直径为 700 mm, 桩端扩大头直径为 1000 mm, 高度为 2100 mm; 而 800 (600) mm 型竹节桩中钻孔直径为 850 mm, 桩端扩大头直径为 1250 mm, 高度为 2550 mm。

考虑到桩基受到上部荷载作用时桩身上部所受拉力要大于桩身下部所受拉力, 而且桩身上部土体所能提供的侧摩阻力一般要小于下部土体所提供的侧摩阻力; 而管桩截面积要大于同尺寸的竹节桩截面积, 同时竹节桩与水泥土的黏结效果要好于管桩与水泥土的黏结效果, 所以在实际工程中常采用上部为管桩, 下部为竹节桩的组合形式。本次抗拔试验中 800 (600) mm 竹节桩与直径为 800 mm 管桩组合在一起, 上部为 3 段直径为 800 mm 的管桩, 分别长 4 m, 15 m, 15 m, 共 34 m, 桩身下部为两段 15 m 长的竹节桩, 试桩总长 64 m。650 (500) mm 竹节桩与直径为 600 mm 的管桩进行组合, 上部为 3 段直径为 600 mm 的

管桩, 分别长 12, 12, 10 m, 共 34 m, 下部为两段 15 m 长竹节桩, 试桩总长也为 64 m。直径为 850 mm 的静钻根植竹节桩和直径为 700 mm 的静钻根植竹节桩分别如图 1 (a)、1 (b) 所示。

试验场地工程地质条件如表 1 所示。其中 ρ 为土体重度; I_p 和 I_L 分别为土体的塑性指数和液性指数; c 和 φ 分别为土体黏聚力和内摩擦角, 由固结不排水三轴试验测得; E_s 为土体压缩模量; q_{sa} 和 q_{pa} 分别为桩侧摩阻力特征值和桩端阻力特征值, 由静力触探试验实测数据进行整理后得到。

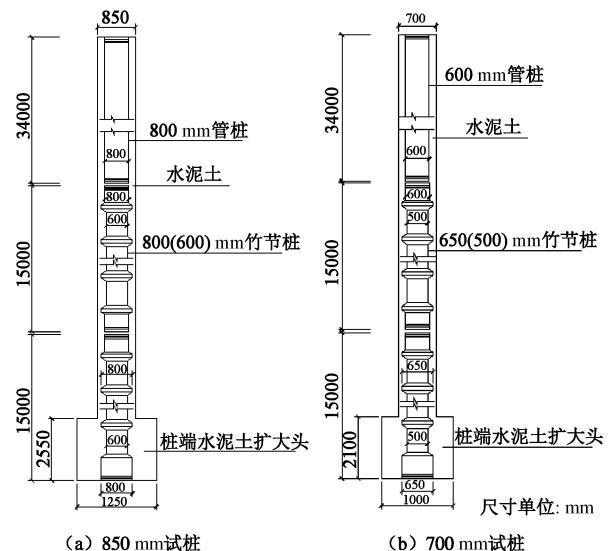


图 1 静钻根植竹节桩示意图

Fig. 1 Sketch of test piles

1.2 试验结果

单桩竖向静荷载试验执行标准为建筑基桩检测技术规范^[14], 两根静钻根植抗拔桩均采用支墩 - 反力架装置, 并用千斤顶反力加载 - 位移传感器测读桩顶上拔量的试验方法。试验采用慢速维持法进行分级加载与卸载。根据抗拔试验所测得的荷载与上拔数据, 经整理后所绘制的试桩荷载位移曲线如图 2 所示。

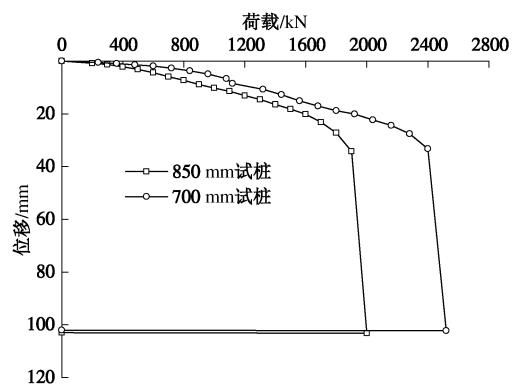


图 2 试桩荷载位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of test piles

表 1 试验场地地质条件

Table 1 Soil profiles and properties of test site

土层	土名	土层厚度 /m	ρ /(kg·m ⁻³)	I_p	I_L	c /kPa	φ (°)	E_s /MPa	管桩		钻孔灌注桩		标贯 击数
									q_{sa} /kPa	q_{pa} /kPa	q_{sa} /kPa	q_{pa} /kPa	
3-1	淤泥质黏土	18.10~18.90	1750	18.5	1.24	12.0	10.2	2.36	11	8	18	15	1
3-2	粉砂	4.10~4.30											9
4	淤泥质黏土	21.80~22.50	1790	17.1	1.27	15.4	11.6	3.17	12	9	12	9	8
5-1	粉质黏土	2.90~3.20	1990	12.9	0.45	44.6	17.1	6.97	35	28	35	28	10
6	粉质黏土	8.50~9.20	1890	14.6	0.97	20.1	13.3	3.88	25	20	25	20	16
7-2	粉砂	3.80~4.70							42	36	42	36	55
7-3	粉质黏土	0.90~1.40	2010	10.5	0.77	26.7	17.1	5.87	25	20	25	20	60
8	粉砂	5.80~5.90							42	2300	36	550	60

从图 2 中可以看出, 两根试桩在所受荷载较小时桩顶位移增加量较小, 当荷载达到极限值时, 桩顶位移急剧增加, 试桩发生破坏。其中 700 mm 静钻根植竹节桩在荷载为 1900 kN 时, 桩顶位移为 34.22 mm; 当荷载达到 2000 kN 时, 桩顶位移增大到 103.15 mm, 试桩发生破坏。850 mm 静钻根植竹节桩在前十九级荷载作用下, 桩顶位移为 33.21 mm; 当荷载达到 2520 kN 时, 桩顶位移增加到 102.17 mm, 试桩发生破坏。700 mm 静钻根植竹节桩和 850 mm 静钻根植竹节桩极限抗拔承载力分别为 1900 kN 和 2400 kN。

1.3 试桩荷载位移曲线拟合

在实际工程中的试桩一般都会作为工程桩使用, 现场静载试验往往无法达到极限破坏状态。因此, 采用适当的曲线函数对本次破坏性抗拔试验中测得的荷载位移曲线进行拟合, 得到的曲线函数对实际工程中静钻根植竹节桩抗拔极限承载力的预测具有一定的参考价值。文献[15]中指出描述桩基荷载位移曲线常用的非线性数学模型有双曲线模型、指数模型和幂函数模型, 而用幂函数模型描述抗拔桩荷载位移曲线适应性更强, 模拟结果比较合理。文献[9]则提出对桩侧注浆抗拔桩, 就极限承载力来说, 实际极限抗拔承载力介于双曲线函数和指数函数拟合结果之间。

本文分别采用双曲线、指数函数和幂函数对本次破坏性抗拔试验中试桩的荷载位移曲线进行拟合。根据文献[15]所述, 描述试桩荷载位移曲线的双曲线函数可以表示为

$$Q = \frac{s}{\frac{1}{K_i} + \frac{s}{Q_m}} , \quad (1)$$

式中, Q 为桩顶上拔荷载, s 为桩顶上拔位移, K_i 为初始抗拔刚度, Q_m 为极限抗拔力。

指数函数可以表示为

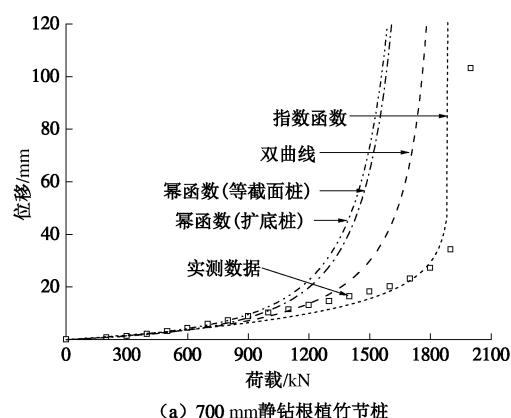
$$Q = Q_m \left[1 - \exp \left(-\frac{K_i}{Q_m} s \right) \right] . \quad (2)$$

幂函数可以表示为

$$Q = Q_m \left\{ 1 - \left[1 + \frac{(n-1)K_i}{Q_m} s \right]^{\frac{1}{1-n}} \right\} . \quad (3)$$

其中对等截面桩 $n=2.122$, 扩底桩 $n=2.902$ 。

试桩初始抗拔刚度 K_i 可以根据图 2 中实测曲线初始阶段数据计算得到, 拟合曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 当桩顶荷载较小时, 3 种函数的拟合曲线与实测值的吻合度都较好; 随着桩顶荷载的增加, 实测曲线相对比较平缓, 而双曲线和幂函数拟合曲线的位移都偏大, 只有指数函数的拟合曲线与实测曲线比较吻合。说明采用指数函数对静钻根植竹节桩的抗拔荷载位移曲线进行拟合的效果较好。



(a) 700 mm 静钻根植竹节桩

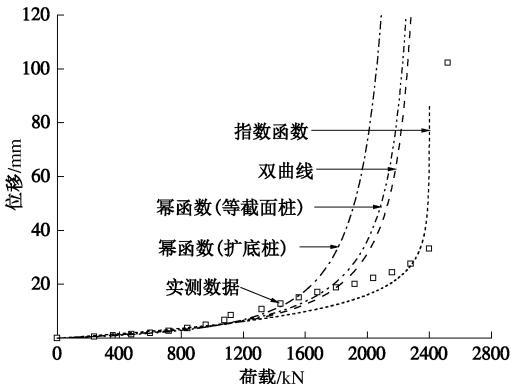


图 3 试桩荷载位移曲线的拟合

Fig. 3 Fitting load-displacement curves of test piles

为 1936 kN, 均达到设计要求。

2 静钻根植竹节桩抗拔承载特性分析

2.1 现场静载试验

为了对静钻根植竹节桩的单桩竖向抗拔极限承载力、桩侧摩阻力和桩端阻力进行研究, 对某实际工程中的 2 根静钻根植竹节桩进行了单桩竖向抗拔静载试验, 试桩桩身均埋设了钢筋应力计。

试桩中预制桩为直径为 600 mm 的管桩和 650 (500) mm 型的竹节桩, 钻孔直径为 750 mm, 桩端扩大头直径为 1200 mm, 高度为 2400 mm。试桩上部为 2 段 600 mm 的管桩, 分别长 10 m 和 15 m, 下部为 1 段长度为 15 m 的 650 (500) mm 型竹节桩, 试桩总长 40 m。试验场地土层分布情况及土体力学指标如表 2 所示, 其中 f_{ak} 为地基土承载力特征值; λ_i 为抗拔系数。

根据场地土层分布情况, 试桩钢筋应力计布置在距离桩顶 1, 14.5, 23.5 和 39 m 桩身截面处, 每个截面布置两个钢筋应力计, 试桩具体尺寸及应力计位置如图 4 所示。试桩设计承载力特征值为 880 kN, 要求最大试验荷载为 1760 kN。

竖向抗拔静载试验采用地基土的反力作为荷载, 用 320 吨千斤顶分级施加至桩顶, 由油压传感器测读桩顶荷载; 上拔量由 4 只对称分布的量程为 50.00 mm 的计位移表测读; 桩顶荷载及上拔量直接通过静力荷载测试仪自动采样、显示和存储, 所用测试设备的精度满足相关规范的要求。加卸载方法按建筑基桩检测技术规范 (JGJ106—2003)^[14] 中慢速维持法执行。

2.2 现场静载试验结果

试桩桩顶荷载位移曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 试桩在加载过程中各级沉降稳定, 无突变, 属于缓变型曲线; 结合建筑基桩检测技术规范, 试桩 1 抗拔极限承载力为 1760 kN, 试桩 2 抗拔极限承载力

表 2 土层分布情况及土体力学指标

Table 2 Soil profiles and properties

土层	土名	土层厚度/m			ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	f_{ak} /kPa	E_s /MPa	管桩		钻孔灌注桩		λ_i
		场地	试桩 1	试桩 2				q_{sa} /kPa	q_{pa} /kPa	q_{sa} /kPa	q_{pa} /kPa	
1-1	杂填土	4.10~0.70	1.1	0.8	1750							
1-2	黏土	1.70~0.30	0.5	1.2	1840	80	4.19	16		14		0.60
2	淤泥质黏土	13.30~10.80	12.6	12.3	1700	60	2.32	9		8		0.55
5-1	黏土	8.50~2.20	2.8	4.1	1870	150	7.27	28	1200	26	450	0.70
5-2	粉质黏土	8.00~1.90	6.3	5.0	1850	130	4.70	22	750	20	320	0.70
6-1	粉质黏土	20.00~12.30	14.6	15.1	1840	110	4.44	20	650	18	280	0.75
6-2	中砂	2.70~0.40	1.5	2.0	1980	200	25.0	35		33		0.60
6-3	黏土	13.00~5.90	9.2	6.0	1810	120	5.38	22	700	20	300	0.75
6-4	粉质黏土	10.30~1.60	4.0	5.1	1890	140	6.74	29	800	27	350	0.75
6-5	砾砂	5.20~0.60	1.4	2.3	1960	350	30.0	45	3000	43	1300	0.60

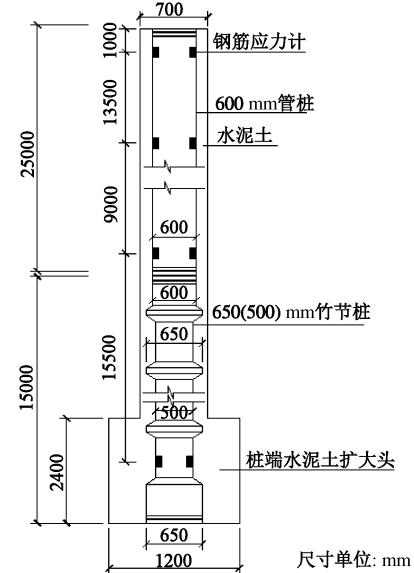


图 4 钢筋应力计位置图

Fig. 4 Cross section of strain gauges

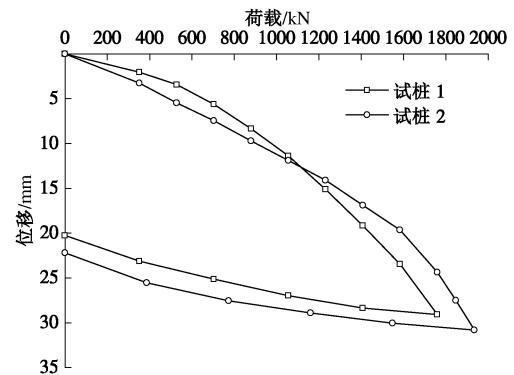


图 5 试桩荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of test piles

由于试桩要作为工程桩使用, 在加载到设计要求极限承载力时即停止加载, 没有加载到破坏状态。为了预测试桩的极限抗拔承载力, 用指数函数对试桩荷载位移曲线进行拟合, 如图 6 所示。从图 6 中可以看

出, 在加载过程中, 试桩 1 的拟合曲线的位移比实测值小, 当荷载接近极限承载力时拟合曲线与实测曲线的位移差逐渐变小, 两条曲线变化趋势也相似, 拟合曲线可以用来预测试桩的极限抗拔承载力; 试桩 2 的拟合曲线与实测曲线基本吻合, 也可以用来预测试桩的极限抗拔承载力。上述分析说明用指数函数模拟静钻根植竹节桩抗拔桩的荷载位移曲线的效果较好, 试桩 1 的抗拔极限承载力为 2000 kN, 试桩 2 的极限抗拔承载力为 2400 kN。

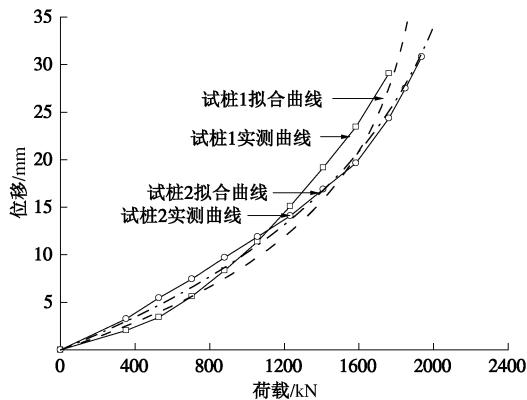


图 6 荷载位移拟合曲线

Fig. 6 Fitting load-displacement curves

2.3 试桩轴力分析

试桩在各级荷载作用下的桩身轴力可以由该桩身截面处的钢筋应力计测得的频率值进行计算。钢筋应力计上的轴力 P_i 及应力 ε_i 分别用以下公式进行计算:

$$P_i = K(F_i^2 - F_0^2) + B \quad , \quad (4)$$

$$\varepsilon_i = \frac{P_i}{E_s A_s} \quad . \quad (5)$$

式中 K 为钢筋应力计的标定时得到的标定系数; F_i 为钢筋应力计在某级加载情况下的震动频率, F_0 为钢筋应力计的初始频率; B 为标定时得到的初始读数; E_s 和 A_s 分别为钢筋应力计的弹性模量和截面积。

由于钢筋应力计焊接在试桩钢筋笼上, 可以认为钢筋应力计应变与该截面处桩身的应变相等, 则 i 截面处桩身轴力 N_i 可以用下式进行计算:

$$N_i = E_p \varepsilon_i A_p \quad , \quad (6)$$

式中, E_p 和 A_p 分别为 i 截面处桩身弹性模量和截面积。

试桩在各级荷载作用下的桩身轴力曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 在各级荷载作用下, 试桩桩身轴力沿着桩身逐渐减小; 而且桩侧摩阻力随着桩顶荷载的增加而逐渐增大。从图 7 中还可以看到, 在桩身 0~1 m 范围内桩身轴力值减小幅度很大, 而根据表 2 中土层分布情况可知 0~1 m 范围内土层为杂填土。对于传统桩基, 该部分杂填土所能提供的侧摩阻力很小, 几乎可以忽略不计; 而实测的 2 根静钻根植

抗拔桩桩侧杂填土提供的侧摩阻力都比较大, 这是因为杂填土渗透性较好, 在桩基施工过程中大量水泥浆渗透到杂填土中, 杂填土中含有大量的碎石, 在水泥浆注入后形成了素混凝土, 土体性质得到了改良。

距离桩端 1 m 处钢筋应力计所测得的桩身轴力值可以近似认为是桩端阻力, 从图 7 中可以看出, 试桩桩端阻力也随着桩顶荷载的增加而增大, 在加载至最大试验荷载时, 试桩 1 和试桩 2 桩端阻力分别为 65 kN 和 87.5 kN。由于试桩没有加载到破坏状态, 无法测出其极限桩端阻力; 然而, 从测得桩端阻力值已经可以看出桩端水泥土扩大头的存在可以改善静钻根植抗拔桩的桩端承载特性。

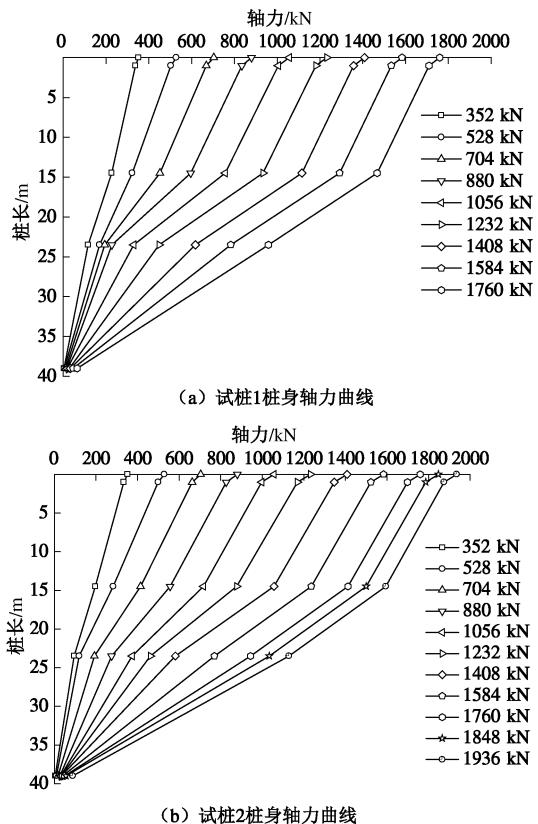


图 7 试桩桩身轴力曲线

Fig. 7 Axial forces of test piles under different loads

2.4 桩侧摩阻力分析

静钻根植竹节桩作为一种组合桩基, 在荷载传递过程中预制桩与桩周水泥土始终是一个整体, 其桩土相对位移为水泥土与桩周土之间的相对位移。试桩桩土相对位移可用下式进行计算:

$$\delta_i = S - \sum_{j=1}^i \frac{L_j}{2} (\varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}) \quad . \quad (7)$$

式中 δ_i 为试桩桩土相对位移; L_j 为第 j 段桩长; S 为桩顶沉降; ε_j , ε_{j+1} 分别为第 j 和 $(j+1)$ 截面处钢筋应力计应变。

试桩桩侧摩阻力由水泥土与桩周土界面提供, 各

土层桩侧平均摩阻力由下式进行计算:

$$f_{si} = \frac{P_i - P_{i+1}}{A_i} \quad (8)$$

式中 f_{si} 为桩侧摩阻力; P_i , P_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 截面处桩身轴力, A_i 为第 i 段试桩水泥土的侧面积。

试桩桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线如图 8 所示。

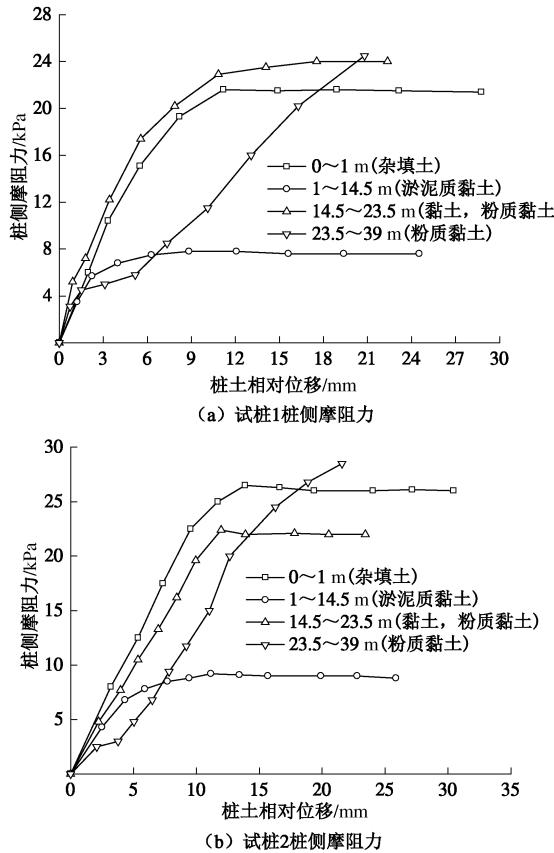


图 8 试桩桩侧摩阻力 - 桩土相对位移曲线

Fig. 8 Relationship between skin friction and pile-soil relative displacement

从图 8 中可以看出, 随着桩土相对位移的增加, 各个土层所提供的侧摩阻力也逐渐增大; 当桩土相对位移到某一值后, 桩侧摩阻力达到极限值, 随着桩土相对位移的增加桩侧摩阻力会有所减小, 并逐渐趋于稳定, 即桩侧土体出现软化现象。2 根试桩在粉质黏土层中的桩土位移超过 20 mm 时侧摩阻力还随着桩土相对位移的增加而增大, 这很可能与桩端水泥土扩大头的存在有关。文中 2.1 部分提到, 试桩桩端水泥土扩大头直径为 1200 mm, 高度为 2400 mm, 因此有 1400 mm 高度的水泥土扩大头在粉质黏土层中, 随着桩土相对位移的增加, 水泥土扩大头对上部土体产生挤压, 以土体压缩的形式限制桩土相对位移, 即扩大头发挥了嵌固作用。因此, 当桩土位移超过 20 mm 时粉质黏土层侧摩阻力还没有达到极限值。

文献[11]中提到, 静钻根植竹节桩抗压桩中水泥

土与桩周土界面的摩擦性质比钻孔灌注桩中桩土界面摩擦性质要好, 桩周土所能提供的极限侧摩阻力比灌注桩要大; 为了研究静钻根植竹节桩抗拔桩侧摩阻力, 将试桩实测桩侧摩阻力值与表 2 中提供的钻孔灌注桩侧摩阻力值进行比较分析。试桩 1 和试桩 2 中杂填土所提供侧摩阻力分别达到了 21.6 kPa 和 26.5 kPa, 文中 2.3 节指出素填土在水泥浆注入后土体性质的到了改良, 使得其所能提供的桩侧摩阻力值较大。试桩 1 和试桩 2 中淤泥质黏土层所提供的极限侧摩阻力分别为 7.8 kPa 和 9.2 kPa, 而表 1 中给出淤泥质黏土层对于灌注桩的极限侧摩阻力为 8 kPa, 抗拔系数为 0.55, 即抗拔灌注桩的极限侧摩阻力为 4.4 kPa; 试桩在淤泥质黏土层的侧摩阻力是灌注桩的 1.77 倍和 2.10 倍。14.5~23.5 m 深处的黏土与粉质黏土层, 实测的试桩 1 和试桩 2 桩侧摩阻力值分别为 22.3 kPa 和 23.4 kPa, 根据表 1 中给出的土层厚度和侧摩阻力值可以计算得到土层对于抗拔灌注桩的极限侧摩阻力分别为 15.2 kPa 和 15.8 kPa, 试桩的侧摩阻力是灌注桩的 1.47 倍和 1.48 倍。在加载至最大试验荷载时, 粉质黏土层所提供的桩侧摩阻力没有达到极限值, 在最大试验荷载作用下, 实测的试桩 1 和试桩 2 桩侧摩阻力值分别为 24.5 kPa 和 28.5 kPa, 而表 1 中给出粉质黏土层对于抗拔灌注桩的极限侧摩阻力为 13.5 kPa, 试桩侧摩阻力分别为灌注桩的 1.81 倍和 2.11 倍, 而且还没有达到极限值。

通过上述分析可知静钻根植抗拔桩的侧摩阻力是钻孔灌注桩的 1.47~2.11 倍, 而且靠近桩端处土层所提供的侧摩阻力值提高程度更大, 这很可能是因为试桩桩端存在一个水泥土扩大头, 在受荷过程中水泥土扩大头对上部土体产生挤压, 改善了土体性质, 并且提高了桩土界面的摩擦性质。

因此, 静钻根植竹节桩抗拔桩在受荷过程中, 桩侧摩阻力从上到下逐渐发挥, 而且由于桩周水泥土的存在其所受侧摩阻力相比灌注桩有所提高; 随着桩土相对位移的增加, 桩端水泥土扩大头开始承受荷载, 而且水泥土扩大头对上部土体产生挤压作用使得靠近桩端处桩身所受侧摩阻力得到进一步的提高。当静钻根植竹节桩抗拔桩所受上拔荷载超过其极限承载力时, 桩顶位移突然增大, 桩基发生破坏。

3 结 论

本文主要通过一组静钻根植竹节桩的破坏性抗拔试验和一组桩身埋有钢筋应力计的静钻根植竹节桩的现场静载试验对静钻根植竹节桩的抗拔承载特性、桩侧摩阻力和桩端阻力进行了研究, 可以得出以下结论:

(1) 静钻根植竹节桩抗拔荷载位移曲线比较平

缓, 反映出其抗拔承载性能较好; 用指数函数对静钻根植抗拔桩的荷载位移曲线进行拟合的效果较好。

(2) 静钻根植抗拔桩中桩周水泥土的存在改善了桩土界面的摩擦性质, 水泥土与桩周土接触面摩擦性质要好于灌注桩中桩土接触面摩擦性质; 静钻根植抗拔桩的桩侧摩阻力是抗拔钻孔灌注桩侧摩阻力的 1.47~2.11 倍。

(3) 静钻根植抗拔桩中桩端水泥土扩大头能够改善桩基的桩端承载性质, 同时能够提高靠近桩端处桩土接触面的侧摩阻力, 对静钻根植抗拔桩的承载性能有着较大影响。

(4) 静钻根植竹节桩是一种新型的组合桩基, 对其进行的研究还比较少, 作为抗拔桩使用时水泥土与桩周土界面和桩端水泥土扩大头与桩侧注浆抗拔桩和扩底抗拔桩有一定的相似之处, 但又不完全相同。随着静钻根植桩的推广与应用, 可以对其抗拔承载特性进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] CHATTOPADHYAY B C, PISE P J. Uplift capacity of piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, **112**(9): 888~904.
- [2] NICOLA A D, RANDOLPH M F. Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, **119**(12): 1952~1973.
- [3] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究[J]. 岩土力学, 2001, **22**(3): 308~310. (HE Si-ming. Study on bearing capacity and failure of uplift pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(3): 308~310. (in Chinese))
- [4] 黄茂松, 郑建俊, 王卫东, 等. 开挖条件抗拔桩的承载力损失比分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1291~1297. (HUANG Mao-song, LI Jian-jun, WANG Wei-dong, et al. Loss ratio of bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1291~1297. (in Chinese))
- [5] DICKIN E A, LEUNG C F. Performance of piles with enlarged bases subject to uplift forces[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(5): 546~556.
- [6] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A. The influence of soil reinforcement on the uplift behavior of belled piles embedded in sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, **19**(1): 1~22.
- [7] FLEMING W G K. The improvement of pile performance by base grouting [J]. Civil Engineering, 1993, **97**(2): 88~93.
- [8] 王卫东, 吴江斌, 许亮, 等. 软土地区扩底抗拔桩承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9): 1418~1422. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, XU Liang, et al. Full-scale field tests on uplift behavior of piles with enlarged base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(9): 1418~1422. (in Chinese))
- [9] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 桩侧注浆抗拔桩的试验研究与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 284~289. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun. Full-scale tests and application of side-grouting uplift piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 284~289. (in Chinese))
- [10] 钱建固, 贾鹏, 程明进, 等. 注浆桩土接触面试验研究及后注浆抗拔桩承载特性数值分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 662~668. (QIAN Jian-gu, JIA Peng, CHENG Ming-jin, et al. Experimental study of grouting pile-soil interface and numerical simulation of bearing behavior of side-grouting uplift pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 662~668. (in Chinese))
- [11] ZHOU Jia-jin, WANG Kui-hua, GONG Xiao-nan, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of a static drill rooted nodular pile in soft soil areas[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), **14**(10): 705~719.
- [12] 周佳锦, 王奎华, 龚晓南, 等. 静钻根植竹节桩承载力及荷载传递机制研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(5): 1367~1376. (ZHOU Jia-jin, WANG Kui-hua, GONG Xiao-nan, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of static drill rooted nodular piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(5): 1367~1376. (in Chinese))
- [13] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗压承载性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, **48**(5): 835~842. (ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Performance of static drill rooted nodular piles under compression[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, **48**(5): 835~842. (in Chinese))
- [14] JGJ106—2003 建筑桩基检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (JGJ106—2003 Building pile testing technology code[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [15] 许宏发, 钱七虎, 金丰年. 描述抗拔桩荷载-位移曲线的幂函数模型[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 622~624. (XU Hong-fa, QIAN Qi-hu, JIN Feng-nian. Power function model to describe load-displacement curve of tension pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 622~624. (in Chinese))