

DOI: 10.11779/CJGE20221414

# 静钻根植桩竖向承载性能现场试验研究

周佳锦<sup>1,2</sup>, 马俊杰<sup>1,2</sup>, 俞建霖<sup>\*1,2</sup>, 龚晓南<sup>1,2</sup>, 张日红<sup>3</sup>

(1. 浙江大学滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058;  
3. 宁波中淳高科股份有限公司, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 通过一组现场试验对同一场地内静钻根植桩的抗压和抗拔承载性能进行研究, 试桩均加载至极限状态。通过抗压和抗拔静载试验对静钻根植桩的抗压和抗拔承载性能进行对比分析。试验结果表明: 静钻根植桩的抗压承载性能相比传统钻孔灌注桩有显著提高, 本次试验场地各土层中静钻根植桩的桩侧摩阻力是规范建议的钻孔灌注桩极限侧摩阻力的 1.49~3.21 倍; 静钻根植桩抗拔承载性能也明显优于钻孔灌注桩, 抗拔试桩的极限承载力是根据规范计算的钻孔灌注桩极限抗拔承载力的 1.52~1.55 倍; 静钻根植桩抗拔状态下桩侧摩阻力明显小于抗压状态下的桩侧摩擦力, 即静钻根植桩也存在侧阻抗拔系数。

**关键词:** 静钻根植桩; 现场试验; 承载特性; 侧摩阻力; 侧阻抗拔系数

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2024)03-0640-08

**作者简介:** 周佳锦(1989—), 男, 博士, 研究员, 主要从事桩基工程、地基处理及地下空间等方面的研究工作。E-mail: zhoujiajin@zju.edu.cn。

## Field tests on bearing capacity of pre-bored grouted planted piles under compression and tension

ZHOU Jiajin<sup>1,2</sup>, MA Junjie<sup>1,2</sup>, YU Jianlin<sup>1,2</sup>, GONG Xiaonan<sup>1,2</sup>, ZHANG Rihong<sup>3</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Engineering Research Center of Urban Underground Space Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China; 3. ZCONE High-tech Pile Industry Holdings Co., Ltd., Ningbo 315100, China)

**Abstract:** A series of field tests are conducted to study the compressive and uplift bearing capacities of pre-bored grouted planted (PGP) piles in the same test site, and the test piles are all loaded to the ultimate state. The compression and uplift bearing capacities of the PGP piles are also compared based on the field test results. The test results show that the compressive bearing capacity of the PGP piles is significantly improved compared to that of the bored piles, and the ultimate skin friction of the PGP piles in different soil layers in this research is about 1.49~3.21 times the ultimate skin friction of the bored piles recommended by the local specification. The uplift bearing capacity of the PGP piles is also better than that of the bored piles, and the ultimate skin friction of the PGP piles under tension is 1.52~1.55 times that of the bored piles under tension recommended by the local specification. Moreover, the ultimate skin friction of the PGP piles under compression is obviously smaller than that under tension, and the uplift coefficient of skin friction is also needed for the PGP piles.

**Key words:** pre-bored grouted planted pile; field test; bearing capacity; skin friction; uplift coefficient of skin friction

## 0 引言

预应力高强混凝土管桩 (PHC 管桩) 和钻孔灌注桩作为两种最主要的桩基形式广泛应用于工程建设中。然而, 目前 PHC 管桩施工方式主要为锤击或静压法, 施工过程会产生振动和噪音污染, 并会引起挤土效应对周边基础设施造成不利影响; 钻孔灌注桩施工过程需要排放大量泥浆造成泥浆污染, 并且资源消耗量大, 不符合可持续发展的理念<sup>[1]</sup>。静钻根植桩是一种新型绿色组合桩基, 其施工过程如图 1 所示<sup>[2]</sup>: 首

先在设计桩位处进行钻孔, 当钻头达到桩端位置时进行扩底注浆, 随后进行桩周注浆使桩孔中形成搅拌均匀的水泥土, 最后将预制桩植入到桩孔中。因此, 静钻根植桩施工过程无挤土效应, 且通过注浆搅拌将钻孔中的土体资源化利用形成水泥土, 施工过程无泥浆排放。目前, 静钻根植桩在中国东部沿海软土地区使用量已到达 600 多万米, 静钻根植桩施工效率相比同

收稿日期: 2022-11-16

\*通信作者 (E-mail: yujianlin72@126.com)

直径钻孔灌注桩提高3倍以上, 其造价相比相同承载力的钻孔灌注桩减小10%以上。

近年来国内也出现了一些与静钻根植桩类似的组合桩基。任连伟等<sup>[3]</sup>、刘汉龙等<sup>[4]</sup>团队提出的高喷插芯组合桩, 其抗压和抗水平承载特性均明显优于传统钻孔灌注桩。叶观宝等<sup>[5]</sup>、Zhang等<sup>[6]</sup>对刚性和柔性基础下劲芯水泥土桩复合地基的承载和沉降特性进行了研究, 并提出了相应的计算方法。王安辉等<sup>[7]</sup>、Wang等<sup>[8]</sup>对劲性复合桩的水平承载特性进行了研究, 研究结果表明劲性复合桩中的水泥土层可以显著提高桩基抗水平承载性能。

在国外, Kon等<sup>[9-10]</sup>通过预钻孔施工预制桩的现场试验和室内预制桩-水泥土接触面剪切试验对预钻孔施工预制桩的承载特性和预制桩-水泥土接触面摩擦特性进行了研究, 研究结果表明当预制桩周围水泥土强度达到10 MPa以上时, 预制桩-水泥土接触面在加载过程中没有发生破坏, 当采用预制竹节桩代替预制管桩时, 预制桩-水泥土接触面极限侧摩阻力增长显著。Kim等<sup>[11]</sup>对钢管组合桩的承载性能进行了研究, 发现其承载性能相比传统非挤土桩有明显提高。Jamsawang等<sup>[12]</sup>和Voottipruek等<sup>[13]</sup>通过对劲性复合桩水平和竖向承载性能进行研究, 发现劲性复合桩的水平和竖向承载性能都明显优于水泥搅拌桩。

静钻根植桩桩身由预制桩和水泥土组成, 桩顶荷载通过预制桩-水泥土-土体接触面传递到桩周土体中, 当预制桩-水泥土接触面侧摩阻力大于水泥土-土体接触面侧摩阻力时, 桩侧摩阻力由水泥土-土体接触面提供, 当预制桩-水泥土接触面侧摩阻力小于水泥土-土体接触面侧摩阻力时, 桩侧摩阻力由预制桩-水泥土接触面提供。静钻根植桩设计时需要保证预制桩-水泥土接触面侧摩阻力大于水泥土-土体接触面侧摩阻力。周佳锦等<sup>[14]</sup>通过模型试验对静钻根植桩的荷载传递机理进行了研究, 试验结果表明静钻根植桩的侧摩阻力是钻孔灌注桩的1.23~1.46倍, 而水泥土层起荷载传递作用。三维桩土接触面剪切试验显示, 预制

桩-水泥土接触面呈脆性破坏特性, 且预制桩-水泥土接触面极限侧摩阻力随着水泥土强度的增加而几乎线性增大<sup>[15-16]</sup>。此外, 静钻根植桩的现场试验结果表明, 其在软土地基中的抗压和抗拔承载性能均优于传统钻孔灌注桩<sup>[17-18]</sup>。

目前静钻根植桩的现场试验研究还较少, 缺乏同一场地中静钻根植桩抗压和抗拔承载性能对比研究。本文通过两组现场试验分别对深厚软土地基中静钻根植桩的抗压和抗拔承载性能进行研究, 研究成果可以为静钻根植桩的设计和实际工程应用提供理论依据。

## 1 试验场地条件

试验场地地质条件如表1所示, 试验场地中存在12 m厚的淤泥质粉质黏土和淤泥质黏土层, 固结不排水剪切试验测得的黏聚力分别为12, 10 kPa, 内摩擦角分别为17.5°, 11.5°, 工程性质较差; 淤泥质黏土层以下为41 m厚的粉质黏土层和黏质粉土层, 试桩桩端位于粉质黏土层中。表1中给出的 $f_s$ 和 $f_p$ 分别为岩土工程勘察规范(DGJ08—37—2012)<sup>[19]</sup>给出的钻孔灌注桩的极限侧摩阻力标准值和极限端阻力标准值。

为了对试验场地土层性质进行更加深入的测试和研究, 在试验场地内进行6组静力触探试验(CPT试验), 试验结果如图2所示, 图中 $q_c$ 为锥尖阻力。图2(a)为3根抗压试桩附近CPT试验结果, 抗压试桩桩长为55 m, CPT试验深度达到70 m。从图2(a)中可以看到, 当土层深度从7.5 m增加到42 m时, 锥尖阻力从0.46 MPa线性增加到2.13 MPa; 试桩桩端位于粉质黏土层中, 锥尖阻力达到7.04 MPa。图2(b)为3根抗拔试桩附近CPT试验结果, 抗拔试桩桩长为43 m, CPT试验深度为60 m。从图2(b)中可以看到, 抗拔桩周围土体的地质条件与抗压桩周围土体的地质条件相似, 在淤泥质粉质黏土到粉质黏土层范围内, 锥尖阻力随土层深度的增加而线性增大, 抗拔桩端位于黏质粉土层中, 锥尖阻力为4.28 MPa。

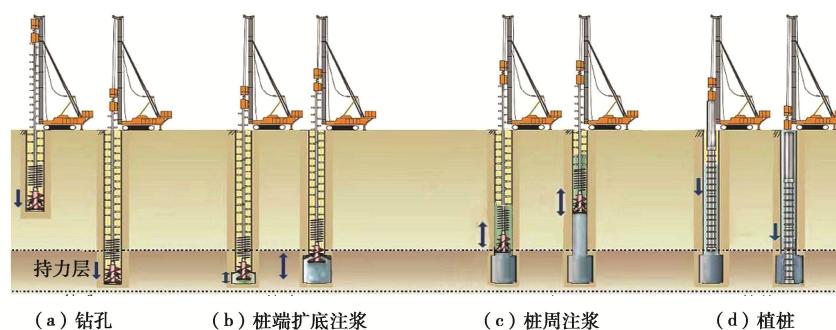


图1 静钻根植桩施工流程

Fig. 1 Installation process of pre-bored grouted planted piles

表 1 试验场地地质条件

Table 1 Geological conditions of test site

土层	土层名称	土层厚度/m	含水率/%	重度/(kN·m <sup>3</sup> )	液限	塑限	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	钻孔灌注桩/kPa		抗拔系数
									$f_s$	$f_p$	
0	杂填土	2.5									
1	粉质黏土 1	1.5	31.0	18.5	0.58	15.6	18	19.5	15		0.75
2	砂质粉土	3.5	27.0	18.9			5	32.0	15		0.65
3	淤泥质粉质黏土	3.5	40.4	17.6	1.30	15.0	12	17.5	15		0.75
4	淤泥质黏土	8.5	50.4	16.7	1.33	19.1	10	11.5	20		0.75
5	粉质黏土 2	9.5	33.1	18.2	0.75	15.3	15	19.5	30		0.75
6	粉质黏土 3	11.5	32.9	18.2	0.79	15.2	16	21.0	45		0.75
7	粉质黏土 4	2.5	23.1	19.7	0.19	14.9	40	20.0	50		0.75
8	黏质粉土	4.5	24.3	19.3			6	31.5	55		0.65
9	粉质黏土 5	5.0	31.0	18.4	0.69	14.9	19	20.5	50		0.75
10	粉质黏土 6	9.0	28.2	18.7	0.62	14.7	12	26.5	65	1500	0.70
11	粉土	10.5	25.9	19.0			3	35	75	2200	

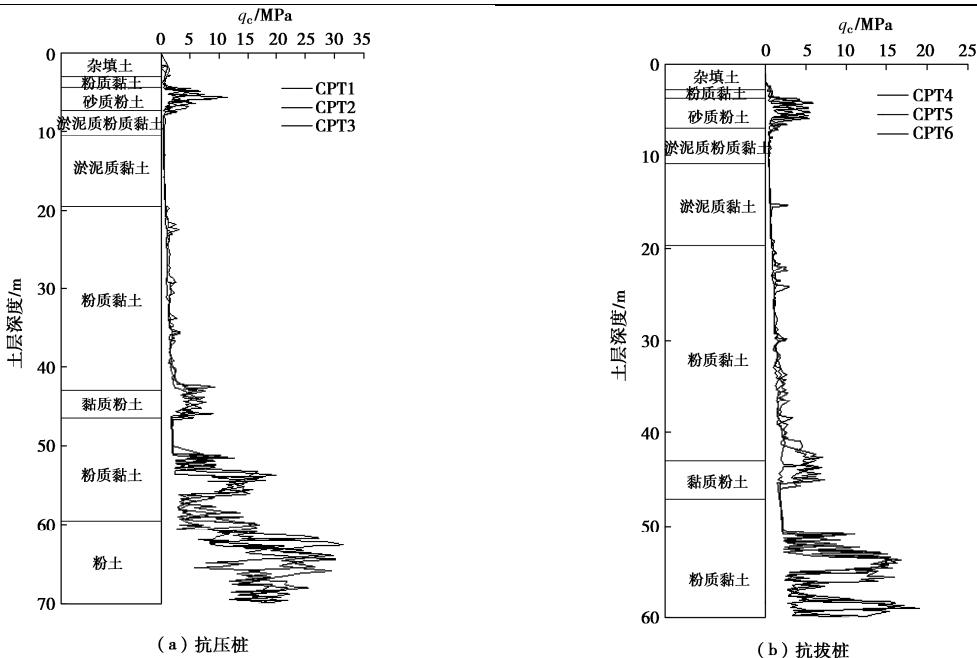


图 2 试验场地静力触探试验结果

Fig. 2 CPT test results of test site

## 2 静钻根植桩试桩介绍

本次试验结合实际工程项目,总共设计 6 根静钻根植桩,其中 3 根为抗压桩,另外 3 根为抗拔桩。抗压桩如图 3 所示,桩长为 55m,钻孔直径为 750 mm,内部为直径 600 mm 的管桩和 500 (650) mm 竹节桩(桩身直径为 500 mm,竹节处直径为 650 mm),桩端位置处存在一个直径为 1200 mm,高度为 2000 mm 的水泥土扩大头。注浆过程中注入桩端水泥浆水灰比为 0.6,桩周水泥浆水灰比 1.0,单桩注浆量为 6.5 m<sup>3</sup>,水泥用量为 3811 kg。

为了研究静钻根植桩在不同土层中的桩侧摩擦性能,在预制桩制作过程中在钢筋笼上埋设振弦式钢筋应力计,如图 4 所示。根据试桩周围的土层分布情况,钢筋应力计分别埋设在地表以下 1.5, 18, 28, 39, 46.5, 53.5 m 处。

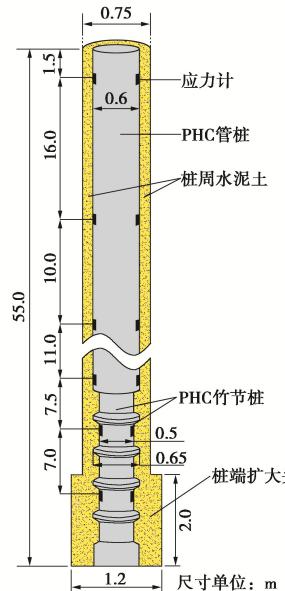


图 3 抗压桩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test pile under compression

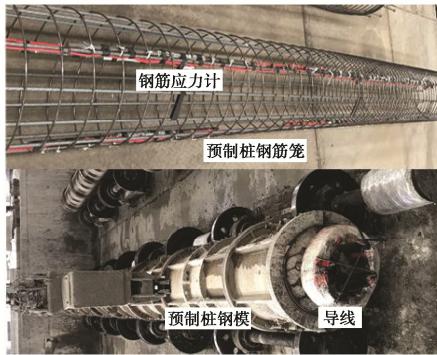


图 4 预制桩制作过程

Fig. 4 Manufacturing process of PHC piles

抗拔试桩如图 5 所示, 试桩桩长为 43 m, 钻孔直径为 650 mm, 内部为直径 500 mm 的管桩和 400(550) mm 竹节桩 (桩身直径为 400 mm, 竹节处直径为 550 mm), 试桩桩端不存在扩大头。

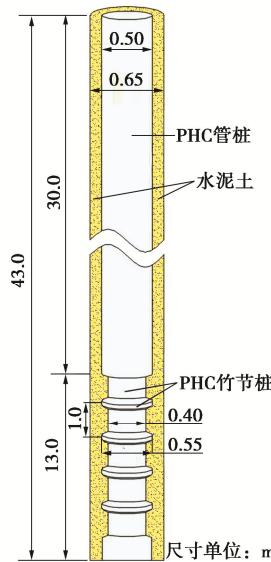


图 5 抗拔桩示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test pile under tension

### 3 静钻根植桩现场试验

#### 3.1 抗压静载试验

静钻根植桩施工完成 28 d 后进行抗压桩的现场静载试验, 试验过程参照建筑基桩检测技术规范<sup>[20]</sup>, 采用慢速维持法进行加载与卸载。3 根试桩荷载位移曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看到, 抗压试桩 1 和试桩 2 均加载至破坏状态, 试桩 3 由于试验过程中加载装置出现问题, 没有加载至破坏状态, 然而试桩 3 在加载至 8000 kN 时的荷载位移曲线与试桩 2 的荷载位移曲线十分接近, 可以认为 3 根试桩的抗压承载特性基本相同。根据建筑基桩检测技术规范, 对于陡降型荷载位移曲线, 取其发生明显陡降的起始点对应的荷载值为单桩竖向抗压极限承载力, 本次试验中抗压试

桩 1 和试桩 2 的抗压极限承载力都为 8800 kN。

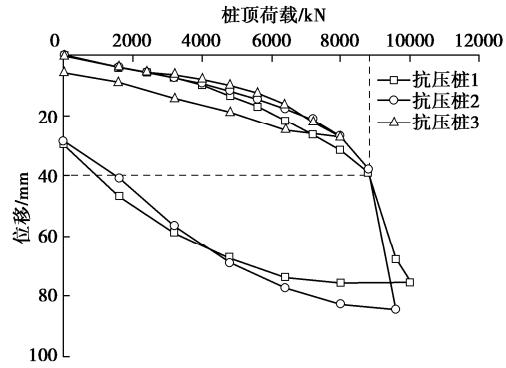
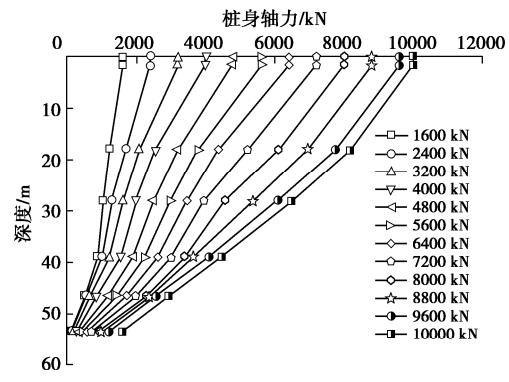


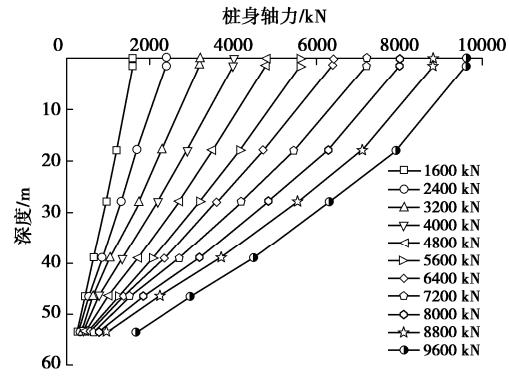
图 6 抗压桩静载试验结果

Fig. 6 Test results of test piles under compression

为了对静载试验中各土层提供的侧摩阻力进行研究, 将预制桩桩身埋设的钢筋应力计数据进行整理得到的试桩 1 和试桩 2 的桩身轴力曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看到, 在各级荷载作用下, 试桩桩身轴力均随着土层深度的增加而减小。从图 7 中还可以看到, 地表以下 1.5 m 处测得的桩身轴力值与所施加的桩顶荷载值基本相同, 根据地勘资料可知试验场地地表 2.5 m 范围内为杂填土, 基本不能提供侧摩阻力; 随着土层深度的增加, 桩身轴力的减小幅度越来越大, 即土层所提供的侧摩阻力随着土层深度的增加而增大。



(a) 抗压桩1



(b) 抗压桩2

图 7 试桩桩身轴力曲线

Fig. 7 Axial forces of test piles under different loads

将静载试验过程中各土层的侧摩阻力与桩土相对

位移数据进行整理得到的侧摩阻力与桩土相对位移数据关系曲线如图 8 所示。根据试验场地土层分布情况, 可以近似划分 1.5~18 m 范围内土层为淤泥质土层, 18~28 m 范围内为粉质黏土层 1, 28~39 m 范围为粉质黏土层 2, 39~46.5 m 为黏质粉土层, 46.5~53.5 m 为粉质黏土层 3。

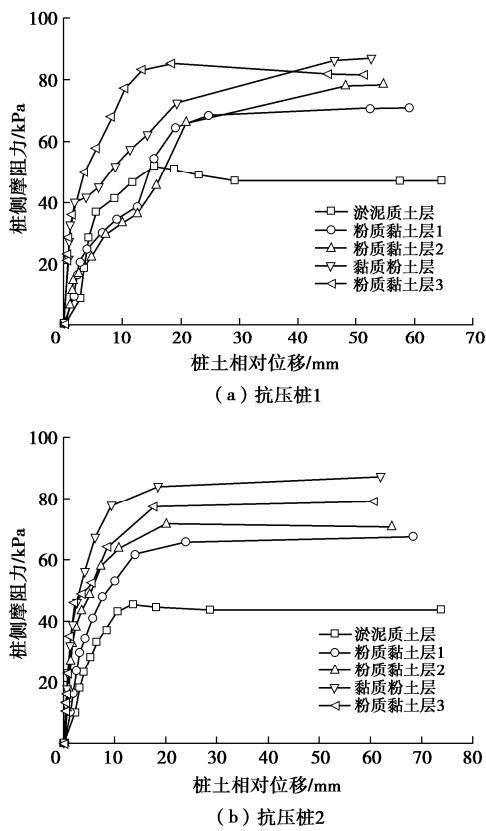


图 8 抗压桩在各土层中侧摩阻力

Fig. 8 Skin frictions in different soil layers for test piles under compression

试桩在各土层中的侧摩阻力可以采用下式进行估算<sup>[21]</sup>:

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

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  $i$  段桩身侧表面积。

桩土相对位移近似采用桩身位移进行计算:

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

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

抗压试桩 1 和试桩 2 实测极限侧摩阻力如表 2 所示。抗压桩 1 在各土层中的极限侧摩阻力分别为 52.0, 70.8, 78.6, 86.8, 85.1 kPa。本次试验中桩周水泥土强度达到 1.5 MPa, 根据预制桩-水泥土接触面剪切试

验结果, 预制桩-水泥土接触面极限侧摩阻力为 160 kPa。由图 3 可知, 抗压桩钻孔直径和管桩直径分别为 750, 600 mm, 钻孔直径和管桩直径比值为 1.25。因此, 当水泥土-土体接触面极限侧摩阻力小于 128 kPa 时, 荷载传递过程中预制桩-水泥土接触面不会发生破坏。根据表 1 中给出的钻孔灌注桩在各土层中的极限侧摩阻力值, 根据土层厚度进行加权平均计算得到的淤泥质土层, 粉质黏土层 1, 粉质黏土层 2, 黏质粉土层, 和粉质黏土层 3 中的极限侧摩阻力分别为 16.2, 28.5, 43.6, 51.3, 52.9 kPa。因此, 抗压桩 1 在各土层中的极限侧摩阻力分别为规范推荐的钻孔灌注桩极限侧摩阻力的 3.21, 2.48, 1.80, 1.69, 1.61 倍。

表 2 各土层极限侧摩阻力

Table 2 Peak skin frictions of soil layers

深度/m	土层名称	极限侧摩阻力/kPa		
		抗压 1	抗压桩 2	钻孔灌注桩 $f_s$
1.5~18	淤泥质土层	52.0	45.2	16.2
18~28	粉质黏土层 1	70.8	67.2	28.5
28~39	粉质黏土层 2	78.6	71.4	43.6
39~46.5	黏质粉土层	86.8	86.6	51.3
46.5~53.5	粉质黏土层 2	85.1	78.6	52.9

静钻根植桩在浅部淤泥质土层中的极限侧摩阻力远高于规范推荐的钻孔灌注桩极限侧摩阻力, 这是由于静钻根植桩施工过程中注浆阶段不仅加固钻孔中的土体, 同时水泥浆也渗透到桩周土体中, 使桩土接触面的摩擦性能得到显著提高。粉质黏土层和黏质粉土层中静钻根植桩极限侧摩阻力也达到了规范推荐的钻孔灌注桩极限侧摩阻力的 1.61~2.48 倍, 说明静钻根植桩在粉质黏土层和黏质粉土层的摩擦性能也明显优于钻孔灌注桩。粉质黏土层和黏质粉土层中的侧阻提高幅度小于淤泥质土层, 这是由于淤泥质土工程性质较差, 静钻根植桩施工过程对淤泥质土层加固程度大于粉质黏土层和黏质粉土层的加固程度。

抗压试桩 2 在各土层中的极限侧摩阻力分别为 45.2, 67.2, 71.4, 86.6, 78.6 kPa, 与试桩 1 在各土层中的极限侧摩阻力值接近。抗压试桩 2 在各土层中的极限侧摩阻力分别为规范推荐的钻孔灌注桩极限侧摩阻力的 2.79, 2.48, 2.36, 1.69, 1.49 倍。

从上述分析可知, 静钻根植桩施工过程中的注浆阶段能够显著提高桩土接触面的摩擦特性, 提高桩基的桩侧承载性能, 本次试验中静钻根植桩在各土层中的极限桩侧摩阻力是规范推荐的钻孔灌注极限桩侧摩阻力的 1.49~3.21 倍。静钻根植桩桩身形式与高喷插芯组合桩、劲性搅拌桩和水泥土复合管桩等组合桩基形式相似。现场和模型试验结果表明: 高喷插芯组合桩与同桩径灌注桩相比承载力高 30%以上<sup>[3]</sup>, 劲性搅拌桩的侧摩阻力为规范给出的钻孔灌注桩的 1.26~

1.47倍<sup>[21]</sup>, 水泥土复合管桩的侧摩阻力约为钻孔灌注桩的1.8倍<sup>[22]</sup>。预制桩(芯桩)周围水泥土层的存在提高了静钻根植桩等组合桩基的桩侧摩阻力, 桩侧摩阻力提高程度受桩周土体性质, 注入水泥浆水灰比, 注浆量等因素影响。

### 3.2 抗拔静载试验

抗拔桩静载试验也在试桩施工完成28 d后进行, 试验过程参照建筑基桩检测技术规范<sup>[20]</sup>, 采用慢速维持法进行分级加载与卸载。静钻根植抗拔试桩荷载位移曲线如图9所示。从图9中可以看到, 试桩桩顶位移均随着桩顶荷载的增加而稳步增大, 且3根试桩的桩顶荷载位移曲线都比较接近, 说明试桩附近土层分布情况以及试桩质量都基本一致。根据基桩检测技术规范, 按钢筋抗拉强度控制, 桩顶上拔荷载达到钢筋强度标准值的90%可停止加载。本次试验中, 当桩顶荷载增加到3000 kN时, 已达到预制桩桩身极限抗拔承载力, 因此抗拔试桩1、试桩2和试桩3分别加载到3060, 3000, 3000 kN后停止加载。抗拔试桩1加载至3060 kN时桩顶位移为88.73 mm, 试桩2和3桩顶荷载增加至3000 kN时, 桩顶位移分别为68.23, 67.27 mm。由图9可知, 3根试桩的桩顶荷载位移曲线均为缓变性, 没有出现明显转折点, 可以取桩顶位移为10%D(D为桩身直径)时的桩顶荷载为极限抗拔承载力<sup>[23]</sup>。由图6可知, 抗拔试桩搅拌直径为650 mm, 当桩顶位移为65 mm时, 3根试桩的极限抗拔承载力分别为2915, 2970, 2980 kN。

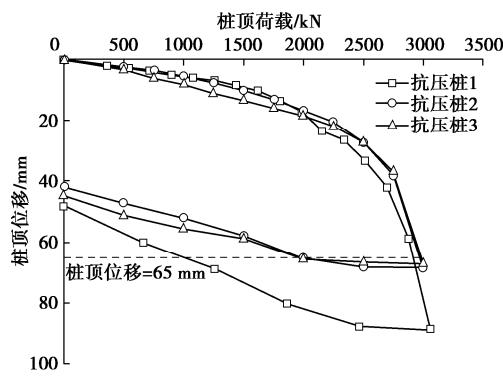


图9 抗拔桩静载试验结果

Fig. 9 Test results of test piles under tension

由于抗拔试桩桩身没有埋设应力或应变传感器, 无法直接测得加载过程中各土层所提供的侧摩阻力, 可以根据理论公式对抗拔桩在各土层中的摩擦特性进行分析和研究。由表1可知试验场地土体基本为黏性土, 可以采用总应力法估算各土层的极限侧摩阻力:

$$\tau_f = \alpha c_u \quad (3)$$

式中:  $\tau_f$  为极限侧摩阻力;  $\alpha$  为黏结系数;  $c_u$  为土层不排水抗剪强度。

根据现场十字板剪切试验和静力触探试验结果测得的抗拔试桩周围各土层的不排水抗剪强度如表3所示, 其中土层1~5的不排水抗剪强度为现场十字板剪切试验测得, 土层6~7的不排水抗剪强度为根据图2(b)给出的静力触探试验结果计算所得。

表3 试桩周围土体不排水抗剪强度

Table 3 Undrained shear strengths of soil around test piles

土层	土层名称	不排水抗剪强度/kPa		
		试桩1	试桩2	试桩3
1	粉质黏土	35.2	35.2	35.2
2	砂质粉土	46.0	46.0	46.0
3	淤泥质粉质黏土	24.6	24.6	24.6
4	淤泥质黏土	28.5	28.5	28.5
5	粉质黏土	37.9	37.9	37.9
6	粉质黏土	51.9	50.3	49.4
7	粉质黏土	57.7	69.7	73.7

各土层的黏结系数 $\alpha$ 值可根据不排水抗剪强度和竖向有效应力进行估算<sup>[24]</sup>:

$$\alpha = 0.5 \cdot (c_u / \sigma'_{v0})^{-0.5} \quad (c_u / \sigma'_{v0} \leq 1.0) \quad (4)$$

$$\alpha = 0.5 \cdot (c_u / \sigma'_{v0})^{-0.25} \quad (c_u / \sigma'_{v0} > 1.0) \quad (5)$$

计算所得 $\alpha$ 值需小于等于1。

根据式(3)~(5)计算所得的各土层极限侧摩阻力如表4所示。从表4中可以看到, 根据总应力法计算所得的各土层的极限侧摩阻力都大于表1中给出的钻孔灌注桩极限侧摩阻力推荐值, 且总应力法计算所得的极限侧摩阻力基本为钻孔灌注桩极限侧摩阻力推荐值的1.1~1.4倍。这是由于API给出的侧摩阻力计算公式主要针对挤土桩, 而挤土桩的桩侧摩阻力一般都大于非挤土桩。

表4 各土层计算极限侧摩阻力

Table 4 Calculated ultimate skin frictions of soil layers

土层	土层名称	极限侧摩阻力/kPa		
		试桩1	试桩2	试桩3
1	粉质黏土	17.4	17.3	17.0
2	砂质粉土	24.0	24.6	23.8
3	淤泥质粉质黏土	21.6	21.8	21.2
4	淤泥质黏土	28.5	28.5	28.5
5	粉质黏土	37.9	37.9	37.9
6	粉质黏土	51.9	50.3	49.4
7	粉质黏土	57.7	69.7	73.7

根据表1中给出的钻孔灌注桩极限侧摩阻力推荐值计算所得的极限承载力为2571 kN。然而, 受桩身泊松效应和桩周土体有效应力变化的影响, 在上拔荷载作用下各土层中桩基侧摩阻力均小于抗压状态下桩基侧摩阻力, 表1中给出了各土层的侧阻抗拔系数推荐值。根据表1中给出的各土层极限侧摩阻力和抗拔系数计算所得的试桩抗拔极限承载力为1918 kN。抗拔试桩实测的极限抗拔承载力分别为2915, 2970, 2980 kN, 实测的静钻根植桩的极限抗拔承载力为计算

钻孔灌注桩极限抗拔承载力 1.52~1.55 倍。

根据表 4 中给出的各土层极限侧摩阻力和表 1 的抗拔系数计算所得试桩 1、试桩 2 和试桩 3 的极限抗拔承载力分别为 2320, 2392, 2442 kN。实测的静钻根植桩极限抗拔承载力分别为计算抗拔承载力的 1.26, 1.24, 1.22 倍, 说明静钻根植桩的极限抗拔承载力高于挤土桩的极限抗拔承载力。

### 3.3 试桩摩擦特性对比分析

现场静载试验结果表明静钻根植桩抗压、抗拔承载性能均明显优于传统钻孔灌注桩。由于静钻根植桩桩身是由高强度预制桩和桩周水泥土形成的组合结构, 其侧阻抗拔系数可能与传统钻孔灌注桩有所不同。由图 3 可知抗拔试桩桩长为 43 m, 试桩桩端位于 7-粉质黏土层 4 中, 将抗压试桩 1.5~39 m 范围内桩侧摩阻力进行整理得到的抗压、抗拔试桩侧摩阻力和桩顶位移对比曲线如图 10 所示。

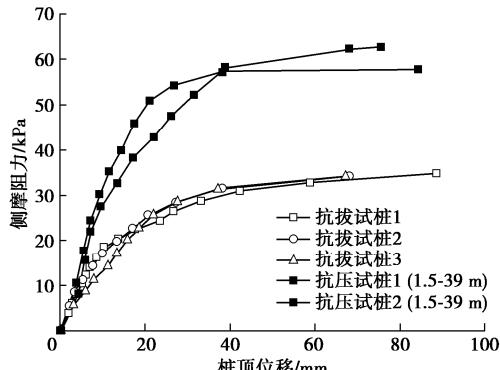


图 10 抗压、抗拔试桩侧摩阻力对比

Fig. 10 Comparison of skin frictions of test piles under compression and tension

从图 10 中可以看到, 3 根抗拔试桩的侧摩阻力明显小于抗压试桩的侧摩阻力。因此, 可以认为静钻根植桩抗拔状态下的极限侧摩阻力也明显小于抗压状态下的极限侧摩阻力, 与传统钻孔灌注桩抗压、抗拔状态下侧阻关系一致。当桩顶位移为 40 mm 时, 抗拔试桩的平均侧摩阻力为 31 kPa, 而抗压试桩在 1.5~39 m 范围内的平均侧摩阻力达到 58 kPa, 本次试验中抗压和抗拔试桩直径均小于 800 mm, 不需要考虑桩径对侧阻的影响, 静钻根植桩抗拔/抗压侧摩阻力比为 0.53。表 1 中给出钻孔灌注桩在粉质黏土和淤泥质黏土中的抗拔系数均为 0.75, 砂质粉土中的抗拔系数为 0.65, 由于砂质粉土层厚度仅为 3.5 m, 可以认为抗拔桩桩长范围内钻孔灌注桩的抗拔系数为 0.75。静钻根植桩桩身结构与钻孔灌注桩不同, 实测的抗拔系数为 0.53, 小于钻孔灌注桩的抗拔系数。

## 4 结 论

本文通过一组现场试验对静钻根植桩的抗压和抗

拔承载性能进行研究, 通过对试验结果的分析和研究, 得到以下 3 点结论。

(1) 静钻根植桩的抗压承载性能明显优于传统钻孔灌注桩, 抗压试桩 1 在本次试验场地的淤泥质土层、粉质黏土层 1、粉质黏土层 2、黏质粉土层和粉质黏土层 3 中的极限侧摩阻力分别为规范推荐的钻孔灌注桩极限侧摩阻力的 3.21, 2.48, 1.80, 1.69, 1.61 倍, 抗压试桩 2 在各土层中的极限侧摩阻力为规范推荐的钻孔灌注桩极限侧摩阻力的 1.49~2.79 倍。

(2) 静钻根植桩的抗拔承载性能优于钻孔灌注桩和挤土桩。实测的静钻根植桩极限抗拔承载力为计算钻孔灌注桩极限抗拔承载力 1.52~1.55 倍, 且为计算挤土桩极限抗拔承载力 1.22~1.26 倍。

(3) 静钻根植桩在抗拔状态下的桩侧摩阻力明显小于抗压状态下的桩侧摩阻力, 即静钻根植桩也存在侧阻抗拔系数。本次试验中静钻根植桩抗拔/抗压极限侧摩阻力比值为 0.53, 小于钻孔灌注桩的侧阻抗拔系数 0.75。

## 参考文献:

- [1] 周佳锦. 静钻根植竹节桩承载及沉降性能试验研究与有限元模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (ZHOU Jiajin. Test and Modeling on Behavior of the Pre-Bored Grouting Planted Nodular Pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [2] 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 Jiajin, WANG Kuihua, GONG Xiaonan, 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))
- [3] 任连伟, 刘汉龙, 雷玉华. 高喷插芯组合桩技术及其应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 518-522. (REN Lianwei, LIU Hanlong, LEI Yuhua. Technology and application of JG soil-cement-pile strengthened pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 518-522. (in Chinese))
- [4] 刘汉龙, 任连伟, 郑 浩, 等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1395-1401. (LIU Hanlong, REN Lianwei, ZHENG Hao, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1395-1401. (in Chinese))
- [5] 叶观宝, 蔡永生, 张 振. 加芯水泥土桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 672-678.

(YE Guanbao, CAI Yongsheng, ZHANG Zhen. Research on calculation of pile-soil stress ratio for composite foundation reinforced by stiffened deep mixed piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(3): 672-678. (in Chinese))

[6] ZHANG Z, YE G B, CAI Y S, et al. Centrifugal and numerical modeling of stiffened deep mixed column-supported embankment with slab over soft clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, **56**(10): 1418-1432.

[7] 王安辉, 章定文, 谢京臣. 软黏土中劲性复合桩水平承载特性  $p$ - $y$  曲线研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(2): 381-389. (WANG Anhui, ZHANG Dingwen, XIE Jingchen.  $P$ - $y$  curves for lateral bearing behavior of strength composite piles in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(2): 381-389. (in Chinese))

[8] WANG A H, ZHANG D W, DENG Y G. Lateral response of single piles in cement-improved soil: numerical and theoretical investigation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, **102**: 164-178.

[9] KON H, YOSHIDA E, KABASAWA K, et al. Investigation of soil cement around nodular piles after pile-toe load test installed by pre-bored piling method[J]. *Japanese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **5**(4): 615-623. (in Japanese)

[10] KON H, YOSHIDA E, KIMURA M. A study on adhesion of nodular pile and soil cement by pre-bored piling method[J]. *Japanese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **7**(1): 361-375. (In Japanese).

[11] KIM D, JEONG S, PARK J. Analysis on shaft resistance of the steel pipe prebored and precast piles based on field load-transfer curves and finite element method[J]. *Soils and Foundations*, 2020, **60**(2): 478-495.

[12] JAMSAWANG P, BERGADO D T, VOOTTIPRUEX P. Field behaviour of stiffened deep cement mixing piles[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2011, **164**(1): 33-49.

[13] VOOTTIPRUEX P, SUKSAWAT T, BERGADO D T, et al. Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, **38**(3): 318-329.

[14] ZHOU J J, GONG X N, ZHANG R H. Model tests to compare the behavior of pre-bored grouted planted piles and wished-in-place concrete pile in dense sand[J]. *Soils and Foundations*, 2019, **59**(1): 84-96.

[15] ZHOU J J, YU J L, GONG X N, et al. The effect of cemented soil strength on the frictional capacity of precast concrete pile-cemented soil interface[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**: 3271-3282.

[16] 俞建霖, 徐嘉诚, 周佳锦, 等. 混凝土芯水泥土复合桩混凝土-水泥土界面摩擦特性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2022, **55**(8): 93-104, 117. (YU Jianlin, XU Jiacheng, ZHOU Jiajin, et al. Experimental study on frictional capacity of concrete-cemented soil interface of concrete-cored cemented soil column[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, **55**(8): 93-104, 117. (in Chinese))

[17] ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Testing and modeling the behavior of pre-bored grouting planted piles under compression and tension[J]. *Acta Geotechnica*, 2017: 1061-1075.

[18] ZHOU J J, YU J L, GONG X N, et al. Field tests on behavior of pre-bored grouted planted pile and bored pile embedded in deep soft clay[J]. *Soils and Foundations*, 2020, **60**(2): 551-561.

[19] 上海市建设和管理委员会. 岩土工程勘察规范: DGJ 08—37—2002[S]. 2002. (Shanghai Municipal Construction and Management Commission. Code for Investigation of Geotechnical Engineering. DGJ 08—37—2002[S]. 2002. (in Chinese))

[20] 建筑桩基检测技术规范: JGJ106—2022[S]. 2022. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ106—2022[S]. 2022. (in Chinese))

[21] 凌光容, 安海玉, 谢岱宗, 等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, **22**(2): 92-96. (LING Guangrong, AN Haiyu, XIE Daizong, et al. Experimental study on concrete core mixing pile[J]. *Journal of Building Structures*, 2001, **22**(2): 92-96. (in Chinese))

[22] 宋义仲, 卜发东, 程海涛, 等. 管桩水泥土复合基桩承载性能试验研究[J]. *工程质量 A 版*, 2012, **30**(5): 12-16. (SONG Yizhong, BU Fadong, CHENG Haitao, et al. Experimental study on bearing properties of tubular cement composite pile[J]. *Construction Quality*, 2012, **30**(5): 12-16. (in Chinese))

[23] FLEMING K, WELTMAN A, RANDOLPH M, et al. *Piling Engineering*[M]. 3rd ed. London: Taylor & Francis, 2009.

[24] API 2014. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design, API RP2A-WSD[S]. 22th Ed. Washington: American Petroleum Institute, 2014.